



## LE GAZ VERT DE LA METHANISATION AGRICOLE PEUT-IL ETRE UNE SOLUTION A LA PENURIE DE RESSOURCES ENERGETIQUES

Jean-Pierre JOUANY

Revue Francophone du Développement Durable

2024 - n°23 - Mars

Pages 57 - 74

ISSN 2269-1464

Article disponible en ligne à l'adresse :

---

<https://erasme.uca.fr/version-francaise/publications/revue-francophone-du-developpement-durable>

---

Pour citer cet article

---

Jouany J.P (2024), Le gaz vert de la méthanisation agricole peut-il être une solution à la pénurie de ressources énergétiques, *Revue Francophone du Développement Durable*, n°23, Mars, p. 57 – 74.

# Le « gaz vert » de la méthanisation agricole peut-il être une solution à la pénurie de ressources énergétiques en France ?

Jean-Pierre JOUANY

Directeur de recherche honoraire INRAE

Vice-président de l'association GREFFE\*

Membre du collectif CSNM\*\*

*Résumé* : Le travail que nous présentons a pour objectif de vérifier si l'allégation de « gaz vert » attribuée au biogaz obtenu par méthanisation de substrats agricoles correspond à la réalité. Il s'appuie à la fois sur des publications scientifiques fiables et sur des données issues d'études personnelles. Les résultats obtenus montrent que le bilan énergétique du cycle de vie d'un méthaniseur, estimé par son TRE, est voisin de 1, ce qui signifie qu'il consomme autant d'énergie qu'il en produit. Ils indiquent également que les émissions de GES des méthaniseurs sont 2 à 3 fois plus élevées que celles du gaz naturel, et sont environ 30 fois supérieures à celles établies par QUANTIS et reprises ensuite par l'ADEME et GRDF. La perte importante du C stocké dans les sols, associée à l'augmentation des émissions de GES, montre que la méthanisation a un impact négatif fort sur le climat. Enfin, nous avons établi que la fourniture des substrats agricoles aux méthaniseurs consommera 9 % des terres arables françaises en 2050, ce qui pose la question de la souveraineté alimentaire du pays. L'effet délétère de la méthanisation agricole que nous mettons en évidence, s'oppose frontalement aux assertions de l'ADEME et de GRDF qui ont néanmoins été exploitées jusque-là par les pouvoirs publics pour définir la politique énergétique de la France. Cette situation mérite d'être clarifiée par des études complémentaires qui seraient conduites par la recherche publique, en-dehors de tout conflit d'intérêt, sur l'utilité réelle de la méthanisation agricole dans la production nationale d'énergie.

*Mots-clés* : Méthanisation, Energie, Emission de GES, Déstockage du C des sols, Surface agricole mobilisée

## Introduction

La consommation annuelle d'énergie primaire de la France s'élevait à 2 571 TWh en 2020, alors que sa production nationale n'était que de 1 500 TWh. Le déficit a été comblé jusque-là par l'importation d'énergies fossiles, mais cette situation est désormais extrêmement risquée pour différentes raisons : (i)-Une grande instabilité géopolitique de la plupart des pays producteurs ; (ii)-un épuisement prévisible des réserves fossiles ; (iii)-l'absolue nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) pour protéger le climat de la planète.

Ces contraintes obligent nos gouvernants à rechercher de nouvelles sources d'énergie qui soient durablement disponibles sur le territoire national et présentant le caractère impérieux de ne pas augmenter la concentration atmosphérique des GES. La part des énergies fossiles dans le bouquet énergétique primaire réel de la France étant composé actuellement de 28 % de pétrole, 16 % de gaz naturel et 2 % de charbon (Données et Etudes Statistiques 2021), leur remplacement ne paraît possible que par l'addition de

diverses sources d'énergie renouvelable (ENR) pour palier l'intermittence et le faible rendement de chacune d'elles.

Parmi les sources d'ENR, les bioénergies dont la méthanisation est une composante, sont regardées avec intérêt par les pouvoirs publics puisqu'elles peuvent être produites à partir de biomasse considérée comme inépuisable, qualité qui leur attribue le caractère, vraisemblablement abusif, de « durable ».

Les biotechnologues se sont inspirés du processus naturel d'émission de méthane ( $\text{CH}_4$ ) dans les milieux anaérobies tels que les marais, les rizières, les décharges, les sédiments, le tube digestif de certains animaux et insectes, pour proposer, des dispositifs appelés « méthaniseurs » destinés à produire du biogaz à vocation énergétique à partir de déchets agricoles et de déjections animales (Moletta, 2015).

Les installations de méthanisation se sont fortement développées en Allemagne vers les années 90s où l'on comptait déjà 10 000 unités en 2018, dont 8 500 fonctionnaient à l'aide de produits agricoles. Au total, le biogaz fournissait une puissance énergétique de près de 5 000 MW représentant 5,0 % de la production électrique allemande. A la même date, on dénombrait seulement 500 unités de méthanisation en France assurant 0,5 % de la production électrique nationale<sup>1</sup>. Actuellement, la France produit 7 TWh de biométhane qui représentent 1,5 % de la consommation nationale de gaz.

## Fonctionnement d'une unité de méthanisation

Le digesteur (appelé également méthaniseur) constitue le cœur du système. Il se présente sous forme d'une (ou de multiples) cuve(s) de plusieurs milliers de mètres-cubes de volume, étanches à l'air, qui sont alimentées quotidiennement de plusieurs dizaines de tonnes (t) de matières organiques diverses. Le milieu des digesteurs est maintenu à 39° C (fermentation mésophile) ou à 50° C (fermentation thermophile) et contient un écosystème microbien anaérobie qui dégrade puis fermente les matières organiques pour générer un mélange gazeux appelé « biogaz », ainsi qu'un résidu appelé « digestat ». Le biogaz est composé de 60 % de  $\text{CH}_4$ , 40 % de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), et d'autres gaz présents à de faibles concentrations : de l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), de l'hydrogène sulfuré ( $\text{H}_2\text{S}$ ), de la vapeur d'eau, des siloxanes...).

En amont du digesteur, le dispositif d'introduction des matières organiques broyées comprend une trémie équipée d'une vis sans fin excluant toute introduction d'air. Dans le cas d'une méthanisation agricole, les intrants organiques sont essentiellement d'origine agricole.

A la sortie du digesteur, le biogaz produit est collecté avec des précautions particulières pour éviter les risques d'incendie et d'explosion en raison de sa teneur élevée en méthane ( $\text{CH}_4$ ). Le biogaz peut être utilisé à l'état brut pour actionner un moteur, ou un générateur de vapeur, couplé à un générateur électrique. Ce procédé,

---

<sup>1</sup> <https://energie-fr-de.eu/fr/accueil.html>

appelé « cogénération », produit à la fois de l'électricité et de la chaleur dont le rendement énergétique global dépend étroitement de la technicité appliquée à la récupération des calories. L'autre forme d'utilisation du biogaz consiste à l'épurer pour atteindre une teneur minimale de 97 % de CH<sub>4</sub> répondant à l'appellation de « biométhane », qui sera ensuite injecté dans le réseau national de GRDF ou utilisé comme gaz naturel pour véhicule (GNV). Le dispositif de cogénération a été surtout utilisé jusqu'à ces dernières années. Désormais, la plupart des nouvelles installations sont de type « injection dans le réseau de gaz naturel ».

Les effluents liquides (digestats) sont évacués en continu vers des cuves où ils sont stockés pendant une période minimale de 5 à 6 mois, avant leur épandage en guise d'engrais sur les terres agricoles.

## Caractéristiques de la méthanisation et affichage de ses perspectives

La puissance moyenne des unités de méthanisation, en France, est aujourd'hui d'environ 1 500 W ce qui représente une production d'énergie annuelle de 12 GWh si l'on admet qu'elle fonctionne 340 jours par an. Selon l'ADEME-1, la disponibilité en matières méthanisables en France permettrait à la filière d'assurer une production énergétique de 123 TWh PCS en 2050, ce qui représenterait plus de 40 % de la consommation nationale de gaz prévue à cette date. La « loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte » de 2015, exprimée à travers la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE), fixe l'objectif de porter la production de biométhane à 30 TWh en 2030 et à 100 TWh en 2050, dont 90 % serait d'origine agricole. La méthanation et la pyrogazéification compléteraient la biométhanisation pour atteindre un mix énergétique gazeux 100 % renouvelable en 2050 selon l'ADEME-1.

Ces données montrent qu'il est nécessaire de multiplier par 15 la production actuelle de biométhane pour arriver aux objectifs fixés par l'ADEME-1 d'ici 2050. Cette perspective ambitieuse nécessite soit l'implantation d'une profusion d'unités de capacité moyenne de production de biométhane, ou bien l'installation d'un nombre réduit d'unités de très grande capacité. Il est vraisemblable que la seconde solution l'emportera avec l'arrivée dans la filière de grands groupes énergétiques comme EDF, ENGIE et Total Energies. Ainsi, l'unité de Mourenx (Landes), qui a été inaugurée au début de l'année 2023, préfigure ce modèle en produisant déjà 70 GWh par an et annonçant une production prochaine de 160 GWh utilisant alors 220 000 t de matières organiques par an, soit 640 t par jour !

## Comment se mesure le bilan énergétique des méthaniseurs ?

Selon le principe de conservation de l'énergie énoncé par Max Planck en 1887, l'énergie d'un système non isolé (système qui a des interactions avec son milieu environnant, ce qui est le cas des unités de méthanisation) évolue de « *manière variationnelle*<sup>2</sup> ». Cette loi physique signifie que le bilan énergétique de la méthanisation est égal au cumul des entrées moins le cumul des sorties pendant le délai d'observation. Un bilan énergétique négatif indique que le système consomme davantage d'énergie qu'il en génère, les pertes étant dues aux interactions du système avec son environnement.

La formule-clé utilisée pour évaluer la production nette d'une source énergétique, fossile ou autre, est l'EROI pour « *Energy Return On Investment* » [équivalente à TRE pour « *Taux de Retour Énergétique* » en français] ; elle est égale au rapport entre l'énergie produite et l'énergie dépensée pour la produire. Un système destiné à produire de l'énergie doit donc avoir un TRE > 1. Si ce rapport est inférieur à 1, cela signifie que la quantité d'énergie produite utilisable est inférieure à l'énergie dépensée pour la produire.

Dans le cas de la méthanisation agricole, l'énergie produite est facile à comptabiliser puisqu'elle est égale à 9,960 kWh par Nm<sup>3</sup> de biométhane généré. Pour simplifier nos futurs calculs, nous considérerons que le pouvoir calorifique du biométhane produit est égal à 10 kWh par m<sup>3</sup>. A cette production d'énergie, nous ajouterons l'énergie épargnée par l'utilisation des digestats en remplacement des engrais chimiques, ces derniers consommant beaucoup d'énergie au cours de leur synthèse.

En revanche, la liste des dépenses énergétiques indispensables au fonctionnement d'une unité de méthanisation est plus complexe à établir, ce qui conduit fréquemment à des débats animés entre experts en charge de les dénombrer. Les dépenses énergétiques associées à la production de biogaz doivent inclure l'ensemble des dépenses pour la construction du site, mais aussi celles de son exploitation incluant les dépenses pour son fonctionnement et sa maintenance. La liste suivante des activités comptant dans les dépenses énergétiques, qui n'est vraisemblablement pas exhaustive, peut servir de base au calcul du TRE :

*-Etude du projet et démarches administratives préalables ; -construction du site et des structures annexes (voiries, accès aux fluides, traitement et exploitation des effluents...); -mise en culture et récolte des intrants (CIVE, cultures principales...); -transport et stockage des intrants sur le lieu du site ; -traitement (broyage et homogénéisation) puis introduction des intrants dans les digesteurs ; -fonctionnement des digesteurs (chauffage et agitation du milieu, transfert des liquides par des pompes) ; -collecte et stockage du biogaz ; -épuration du biogaz en biométhane dans le cas d'injection de biométhane dans le réseau gazeux national ; -collecte et enregistrement des données issues des divers capteurs installés sur les dispositifs du site ; -collecte et stockage des digestats sur le site ; -transport des digestats sur leur lieu d'utilisation ;*

---

<sup>2</sup> Pierre Bérest (1997), *Calcul des variations : Application à la mécanique et à la physique*, Ellipses.

*-épandage des digestats sur les terres agricoles ; -arrêts accidentels des digesteurs et leur remise en fonctionnement ; -arrêt définitif de l'installation et démantèlement de l'ensemble du site en fin de vie.*

## Quelle est la valeur du TRE de la méthanisation agricole ?

Une valeur du TRE de la méthanisation agricole égale à 5 – 6, pouvant dans certains cas atteindre la valeur de 10, est proposée par l'ADEME<sup>3</sup>, sans préciser le mode de calcul utilisé. Pour juger du bien-fondé de cette évaluation, il faut préciser que la bibliographie scientifique mondiale ne livre aucune donnée sur ce paramètre, ce qui prouve la complexité du sujet et limite la crédibilité des données présentées par l'ADEME.

Toutefois, pour répondre indirectement à la question posée, on peut envisager d'utiliser les TRE déjà établis pour d'autres sources d'énergie dont la technologie est proche de celle de la méthanisation agricole.

Le tableau 1 publié par l'Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques (OPECST) présente les TRE des principales sources d'énergies renouvelables. Il confirme le fait que le TRE de la méthanisation est actuellement inconnu, mais il propose une valeur assez précise du TRE du bioéthanol (de 0,8 à 1,6) produit à partir de la fermentation anaérobie d'amidon de céréales (maïs, blé). Si le processus de la méthanisation est proche de celui du bioéthanol, il en diffère par un potentiel fermentaire moindre du maïs utilisé sous forme de fourrage incluant les tiges et les feuilles, auquel sont ajoutés d'autres fourrages verts. Ainsi, on peut conclure que le rendement énergétique du biogaz est nettement inférieur à celui du bioéthanol, ce qui nous amène à proposer un TRE de 0,7 à 1,0 pour la méthanisation agricole.

Cette évaluation montre que, dans la plupart des cas, la méthanisation agricole dépense plus d'énergie qu'elle n'en produit, ce qui bannit, à priori, la possibilité de lui attribuer l'appellation de « source énergétique ». A la suite de cette estimation, on peut s'étonner de la position de la Directive européenne RED II déclarant que « *les installations de méthanisation qui produisent plus de 19,5 GWh PCS par an ne sont pas tenues de préciser leur efficacité énergétique*<sup>4</sup> ». En tant que scientifique et conscient de l'approximation de notre évaluation du TRE de la méthanisation agricole, il paraît indispensable de solliciter les institutions scientifiques n'ayant aucun conflit d'intérêt avec la filière de méthanisation pour conduire des travaux sur le bilan énergétique réel de la méthanisation.

---

<sup>3</sup> ADEME (octobre 2023). AVIS D'EXPERTS. La Méthanisation. Filière majeure de production de gaz renouvelable et local, au service d'une agriculture plus durable et résiliente. Ce qu'il faut retenir (voir le § 5.3, page 10).

<sup>4</sup>[https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/RED\\_Bioenergies\\_panorama\\_installations\\_concernes.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/RED_Bioenergies_panorama_installations_concernes.pdf)

Tableau 1 : Evaluation du TRE des énergies renouvelables (source OPECST<sup>5</sup>)

<u>Energie</u>	<u>TRE</u>
Eolien terrestre	18
Photovoltaïque	de 4 à 10
Bioéthanol (canne à sucre)	de 0,8 à 10
Bioéthanol (maïs)	de 0,8 à 1,6
Biodiésel	1,3
Biomasse chaleur	?
Solaire thermique	?
<b><u>Méthanisation</u></b>	<b><u>?</u></b>
Géothermie	de 2 à 13
Hydroélectricité	de 11 à 267

## Les déchets agricoles sont-ils une bonne source de matières organiques pour produire du biométhane ?

Il est fréquemment indiqué dans les brochures publicitaires que la méthanisation permet de valoriser les déchets agricoles en énergie. Cette assertion mérite d'être validée par l'examen de leur potentiel méthanogène (PM) qui caractérise le volume (exprimé en m<sup>3</sup>) de CH<sub>4</sub> produit à partir d'1 t de matière brute (MB). La mesure du PM est réalisée en laboratoire, à l'aide d'une méthode de fermentation *in vitro* (Galvan-Arzola *et al*, 2021) ou par spectroscopie dans le proche infra-rouge (Lu *et al* 2023), ou encore à l'aide d'un bioréacteur pilote<sup>6</sup>.

Le tableau 2 montre que les déjections bovines ont des PMs faibles. Ce phénomène s'explique par le fait que les substances potentiellement méthanisables ont été préalablement digérées dans le tube digestif des bovins, incluant le compartiment « rumen » au sein duquel la digestion est comparable à celle des méthaniseurs. Les chevaux qui ne possèdent pas de rumen, excrètent des crottins qui sont riches en matières méthanisables.

La plupart des cultures fourragères récoltées jeunes ont des PMs élevés (> 100), proches de celui du crottin de cheval, ce qui confirme le rôle concurrentiel des fermentations ruminales sur le PM des excréments de bovins. Dans ce tableau 2, on peut s'étonner de la valeur élevée du PM de la paille qui est constituée majoritairement de lignocellulose réputée peu digestible !

Les graines des céréales et des menues-pailles ont des PM plus forts que ceux des cultures fourragères, en raison de leur richesse en grains contenant de l'amidon qui est très fermentescible.

<sup>5</sup> <https://www.senat.fr/rap/r19-646/r19-64613.html>

<sup>6</sup> <https://metys-inrae-transfert.fr/produits/essai-de-methanisation-etude-en-bioreacteur-pilote-de-laboratoire/>

Enfin, l'exceptionnel PM des huiles s'explique par la teneur importante en carbone et en hydrogène des acides gras qui les composent, ces 2 éléments constituant la charpente moléculaire du (CH<sub>4</sub>). A titre d'illustration, la formule brute des acides gras saturés s'écrit CH<sub>3</sub>-[CH<sub>2</sub>]<sub>n</sub>-COOH, où n est un nombre entier et généralement supérieur à 10. Toutefois, il est nécessaire de préciser que l'apport d'huile dans un méthaniseur dont le contenu est riche en eau (teneur en eau ~ 80 à 90 %), doit être limité à un maximum de 5 % des intrants à cause de la formation d'émulsions dans le milieu fermentaire et de leur action délétère sur les bactéries qui fermentent.

Tableau 2 : Potentiel méthanogène de différents substrats utilisés en méthanisation agricole

MB)	Substrats	PM (Nm <sup>3</sup> /t
	Déjections animales	
	Lisier de bovins	14,7*
	Fumier mou de bovins (MS = 18%)	33,3*
	Fumier compact de bovins (18% < MS > 25%)	41,6*
	Fumier très compact de bovins (MS > 25%)	47,7*
	Crottin de chevaux	150-200**
	Cultures	
	CIVE	130***
	Ensilage de maïs	184***
	Ensilage d'herbe	122***
	Grains de céréales	590***
	Menue paille	300***
	Paille de blé	157***
	Huile	874***

\*D'après Sciences Eaux & Territoires (2016).

\*\*D'après Wallrich A. (2022). Potentiel méthanogène du fumier équin ; synthèse bibliographique du programme EQUIFUMIER.

\*\*\*D'après La Méthanisation Agricole. Agricultures & Territoires. Chambre d'Agriculture Lorraine<sup>7</sup>

A partir de ces remarques, on peut conclure que le choix des intrants sera imposé par l'objectif de la méthanisation. Si celui-ci cible la production d'énergie, seules les cultures énergétiques, les cultures intermédiaires et les céréales seront efficaces. Il faut noter que l'usage des cultures principales est réglementairement limité à 15 % des intrants totaux, alors que l'apport des cultures intermédiaires est libre.

A l'inverse, l'usage de déchets seuls ne permet pas d'atteindre cet objectif. La méthanisation peut toutefois être utile pour éliminer des déchets organiques inutiles ou polluants, le peu de CH<sub>4</sub> produit fournissant l'énergie nécessaire au fonctionnement de l'installation. La nature des déchets peut nécessiter l'ajout d'une

<sup>7</sup> [https://meuse.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user\\_upload/Grand-Est/037\\_Inst-Meuse/Energie/Plaquette\\_methanisation\\_agricole\\_2013.pdf](https://meuse.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Grand-Est/037_Inst-Meuse/Energie/Plaquette_methanisation_agricole_2013.pdf)

étape préalable d'hygiénisation à 70° C pour éliminer les agents pathogènes présents. Celles-ci impactera fortement les émissions de GES du méthaniseur en question.

L'assertion souvent avancée, de valoriser des déchets agricoles pour produire de l'énergie sous forme de biométhane, n'est donc pas réaliste.

## Les émissions de gaz à effet de serre (GES) du cycle de vie des méthaniseurs agricoles sont-elles inférieures à celles du gaz fossile ?

C'est l'argument de GRDF selon lequel « le contenu en carbone du biométhane ou du biogaz est environ 10 fois inférieur à celui du gaz naturel fossile, et est comparable aux énergies renouvelables électriques et thermique »<sup>8</sup>, qui a conduit à attribuer l'appellation de « gaz vert » au biométhane. Or, la molécule de méthane s'écrit CH<sub>4</sub> aussi bien pour le biométhane que pour le gaz naturel. Le contenu de carbone des 2 sources de méthane est donc parfaitement identique et le biométhane est incontestablement une source d'énergie carbonée (voir la vidéo de V. Masson Delmotte<sup>9</sup> co-présidente du groupe I du GIEC sur ce sujet). La rhétorique erronée s'appuie sur le calcul des GES émis au cours du fonctionnement des méthaniseurs (QUANTIS 2020), en le comparant à celui du gaz naturel. Selon cette étude, le biométhane n'émettrait que 23,4 kg CO<sub>2</sub> eq/MWh, soit 10 fois moins que le gaz fossile (241 kg CO<sub>2</sub> eq/MWh ; source ADEME-Base Carbone 2014) pour produire la même quantité d'énergie.

Ce résultat semble à priori surprenant si l'on tient compte du nombre important d'activités énergivores qui interviennent dans le process de méthanisation, depuis la culture des intrants jusqu'à l'injection de biométhane pur dans le réseau de gaz national. En réponse à cette demande de données nouvelles sur le bilan des émissions de GES, nous avons entrepris un travail sur l'analyse du cycle de vie d'une unité de méthanisation produisant annuellement 4,1 GWh d'énergie correspondant à une production annuelle de 410 000 m<sup>3</sup> de méthane injecté. Nous avons choisi ce modèle de méthaniseur issu de la publication de Meyer-Aurich *et al* (2012) car beaucoup de données utiles à notre étude en ont été extraites. L'unité est alimentée chaque jour par 50 t de matières brutes contenant 70 % de lisier de bovin, 15 % de CIVE et 15 % d'ensilage de maïs. Les cultures de maïs et de CIVE, ainsi que les lieux d'épandage des digestats, sont distants de 5 km du site de méthanisation. Le lisier de bovin est situé à proximité de l'unité et son introduction dans les digesteurs est faite à l'aide d'un système de pompage depuis la fosse de stockage. Les matières végétales solides (ensilage de maïs et de CIVE) sont introduites au moyen d'une trémie munie d'une vis sans fin.

---

<sup>8</sup> <https://www.grdf.fr/gaz-vert/energie-transition-ecologique/reduction-gaz-effet-serre>

<sup>9</sup> Vidéo V. Masson-Delmotte <https://twitter.com/YannWeb/status/1486651487736549378>

Nous avons identifié 10 étapes essentielles au fonctionnement de l'installation et calculé les émissions de GES de chacune d'elles (Tableau 3). Le détail des calculs est précisé dans la publication de Jouany (2023).

Tableau 3 : Bilan récapitulatif des émissions de GES du méthaniseur-type étudié

Etape 1. Conception, construction, installation et entretien du site	5 kg CO <sub>2</sub> eq/MWh
Etape 2. Culture, récolte du maïs + CIVE et préparation des ensilages	78 kg CO <sub>2</sub> eq/MWh
Etape 3. Collecte, transport et introduction de lisier dans le digesteur	0 kg CO <sub>2</sub> eq/MWh
Etape 4. Fonctionnement du digesteur (chauffage, agitation, pompes)	20 kg CO <sub>2</sub> eq/MWh
Etape 5. Fuites de biogaz et de biométhane	111-242 kg CO <sub>2</sub> eq/MWh
Etape 6. Purification du biogaz en biométhane injecté	20 kg CO <sub>2</sub> eq/MWh
Etape 7. Collecte et stockage des données, contrôle des produits, torchère	3 kg CO <sub>2</sub> eq/MWh
Etape 8. Arrêt accidentel des digesteurs et remise en route	3 kg CO <sub>2</sub> eq/MWh
Etape 9. Arrêt définitif en fin de vie de l'installation	5 kg CO <sub>2</sub> eq/MWh
Etape 10. Combustion finale du biométhane injecté + « offgas » du biogaz	327 kg CO <sub>2</sub> eq/MWh
<b>Total des émissions de GES :</b>	<b>572-703 kg CO<sub>2</sub> eq/MWh</b>

Notre étude montre que le bilan de CO<sub>2</sub> eq du biométhane est 2 à 3 fois plus important que celui du gaz naturel, ce dernier étant égal à 241 kg CO<sub>2</sub> eq/MWh (ADEME-Base Carbone 2014 ; voir à la page 45). Des études récentes réalisées aux USA confirment nos résultats ; ils indiquent que les biocarburants issus de produits agricoles, dont le biométhane agricole est une composante, ont des bilans d'émission de GES supérieurs à ceux des énergies fossiles (voir Futura 2023 qui présente les résultats des scientifiques des universités de Purdue et de Princeton), et que l'essentiel de cette différence est dû au déstockage du carbone terrestre lors du retournement des prairies ou de la déforestation pour cultiver le maïs destiné à la production des biocarburants ou du biométhane. Selon O'Hare *et al* (2009), l'écart en faveur des carburants fossiles est particulièrement net au cours des 15 premières années après la mise en œuvre de la production des biocarburants et s'estompe ensuite. La durée de vie des méthaniseurs étant de l'ordre de 20 ans, on peut considérer que l'écart des émissions de GES en défaveur du biométhane est permanent.

Les émissions de GES que nous avons calculées (Tableau 3) sont environ 30 fois supérieures à celles établies par QUANTIS (2020) et reprises ensuite par GRDF et par l'ADEME. L'écart est dû au fait que ces institutions ont utilisé le modèle DIGES <sup>210</sup> (Boiteau et Dabert, 2009) qui ignore les émissions des étapes 1, 2, 6, 7, 8, 9, 10 du tableau 3, et sous-estime fortement l'étape 5 dans le calcul du bilan des émissions de GES. Face aux critiques adressées à ce modèle, et pour répondre aux exigences de la directive européenne RED II n°2018/2001, Solagro et INRAE-transfert (2022) ont proposé de

<sup>10</sup> <https://hal.inrae.fr/hal-02593780>

nouvelles équations mais celles-ci ne répondent pas totalement aux suivis complets des étapes du cycle de vie des méthaniseurs (oubli des émissions dues au changement d'usage des sols, de l'étape d'épuration du biogaz et du rejet des « offgas », enfin de la combustion du biométhane).

Nous considérons que l'argument selon lequel l'implantation d'un méthaniseur sur une exploitation agricole n'aurait pas d'impact sur ses cultures ni sur les émissions de GES qui y sont associées (étape 2) n'est pas valable. En effet, le méthaniseur consomme annuellement 5 100 t de maïs et de CIVE sous forme d'ensilage qu'il faut donc semer, cultiver, traiter et récolter au moyen de machines consommant de l'énergie et émettant des GES.

Selon Bakkaloglu *et al* (2022), les émissions de GES dues aux fuites de biogaz et de biométhane (étape 5) représentent, en moyenne, 5,6 % des gaz produits, les 95<sup>ème</sup> percentiles des émissions étant de 12,2 %. Les auteurs indiquent que ces émissions sont fortement sous-estimées dans la plupart des études qui ont été conduites au cours des 20 dernières années. Ainsi, Esnouf *et al* (2021) ont fixé un taux d'émissions fugitives à 0,5 % de la production de biogaz lors de l'analyse du cycle de vie des méthaniseurs réalisé par l'INRAE et GRDF. En accord avec les résultats de Bakkaloglu *et al* (2022), nous proposons 2 évaluations pour cette étape, 111 et 242 kg CO<sub>2</sub> eq/MWh. La première correspond à un niveau de fuites de 5,6 % (moyenne des méthaniseurs selon Bakkaloglu *et al*, 2022), et la deuxième à un niveau de 12,2 % qui s'applique aux installations les moins soignées.

*Remarque.* Le calcul du CO<sub>2</sub> eq de cette étape a été fait en attribuant la valeur de 28 au PRG<sup>11</sup> du méthane sur un temps de 100 ans. Si le calcul est effectué avec un PRG du méthane égal à 84 sur un temps de 20 ans, ce temps correspondant à la durée d'exploitation des méthaniseurs, les émissions de GES de l'étape 5 seraient alors à **333** et **726 kg CO<sub>2</sub> eq/MWh** respectivement pour les niveaux de fuites de 5,6 % et 12,2 %. Le bilan total des émissions des méthaniseurs serait alors de **794** et **1 187 kg CO<sub>2</sub> eq/MWh**, ce qui condamnerait définitivement l'avenir de la filière. En raison de l'impact du PRG du méthane sur le bilan des émissions de GES des méthaniseurs, il est urgent de préciser la valeur qui doit lui être attribuée.

Selon DIGEST 2, les étapes 6, 7 et 8, n'émettent pas de gaz à effet de serre, ce qui contredit de nombreuses études comme celle d'Atelge *et al* (2021) qui concerne la seule étape de purification du biogaz en biométhane. De même, les étapes 1 et 9 sont ignorées dans le bilan des émissions de DIGEST 2 alors que l'élaboration du projet puis la construction du site et des annexes, sont émettrices de GES.

Enfin, l'étape 10 relative au CO<sub>2</sub> issu de la combustion du biométhane, appelé « CO<sub>2</sub> biogénique » par l'ADEME, est ignorée par le modèle DIGES 2 au prétexte que la même quantité de CO<sub>2</sub> est captée par la photosynthèse des végétaux introduits dans les

---

<sup>11</sup> PRG : Le Potentiel de Réchauffement Global est le pouvoir réchauffant d'un gaz, rapporté au pouvoir réchauffant de la même masse de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) pendant un temps défini.

méthaniseurs. Or, la communauté scientifique considère que tout CO<sub>2</sub> émis dans l'atmosphère, quelle que soit son origine, est séquestré dans l'atmosphère pendant une durée qui varie de 100 à 1 000 ans avant d'être totalement éliminé (Jancovici 2007 ; Friedlingstein *et al*, 2020). Il agit donc pendant tout ce temps sur l'effet de serre global et participe au dérèglement climatique. Bien que l'ADEME ne tienne pas compte de ce facteur, son rapport publié en février 2022 indique (paragraphe 3.2, page 7) « *Le carbone émis est libéré instantanément et va rester des siècles dans l'atmosphère et contribuer durant tout ce temps au réchauffement* » ce qui valide notre position et va à l'encontre des calculs faits par l'ADEME !

*Remarque.* L'ADEME a publié un second rapport en juillet 2022 intitulé *Méthode pour la réalisation des bilans d'émissions de GES*, indiquant au paragraphe 5.5.2 de la page 45, « *lorsqu'elles sont associées à une variation durable du stock terrestre de matière organique, ces émissions de CO<sub>2</sub> biogénique doivent être évaluées conjointement avec les émissions de CO<sub>2</sub> non biogénique et entrent dans le calcul des émissions en CO<sub>2</sub> eq* ». Or, l'utilisation des CIVE dont la partie aérienne est récoltée au lieu d'être enfouies dans les sols, ainsi que le changement d'usage des terres agricoles (retournement des prairies par exemple), conduisent inévitablement à des pertes du carbone des sols lorsqu'un méthaniseur agricole est implanté sur une exploitation (voir le paragraphe VIII du présent document). Il est donc justifié d'intégrer le CO<sub>2</sub> biogénique dans le calcul des émissions totales de GES des méthaniseurs, ce que l'ADEME ne fait pas !

## La méthanisation agricole mobilise des surfaces arables qui ne seront plus disponibles pour nourrir les humains et les animaux

Les quantités annuelles d'intrants retenues pour assurer la production de 100 TWh en 2050 sont les suivantes : 25,4 x 10<sup>6</sup> t d'ensilage de maïs représentant 15 % de la MB totale des ingrédients et produisant 25,4 TWh de biométhane ; 67,7 x 10<sup>6</sup> t de CIVE représentant 40 % de la MB totale des ingrédients et produisant 67,7 TWh de biométhane ; 76,2 x 10<sup>6</sup> t de lisier de bovins représentant 45 % de la MB totale des ingrédients et produisant 7,6 TWh de biométhane. Nous avons utilisé un potentiel de méthanisation de 100 m<sup>3</sup> par t de MB à la fois pour l'ensilage de maïs et pour les CIVE, et celui de 10 m<sup>3</sup> par t de lisier de bovins.

Nous avons évalué qu'une surface cultivée de 0,76 x 10<sup>6</sup> ha est nécessaire pour produire 25,4 x 10<sup>6</sup> t d'ensilage de maïs et une surface de 1,13 x 10<sup>6</sup> ha pour produire les CIVE dont la moitié ne mobilise aucune surface si on admet qu'elle utilise les mêmes terres que les cultures principales. L'autre moitié sera cultivée sur des surfaces à créer. Au total, il est nécessaire d'exploiter 1,32 x 10<sup>6</sup> ha pour la seule alimentation des méthaniseurs destinés à produire 100 TWh si, par ailleurs, on admet que le cheptel fournissant les lisiers et les surfaces de pâturage restent constants sur l'exploitation. L'ajout de la surface occupée par les infrastructures (site de méthanisation, réseau routier et réseau de fluides...) que nous avons estimée à 2 % des surfaces cultivées,

conduit à une surface agricole totale de  $1,36 \times 10^6$  ha pour produire 100 TWh par méthanisation. Cette surface consommera 9 % des terres arables françaises en 2050 et sera équivalente à la surface totale de 3 départements. En accord avec nos données, Searchinger *et al* (2022) indiquent que le plan européen « Fit-for-55 » qui vise à réduire de 55 % les émissions de gaz à effet de serre émis par les pays de l'Union Européenne d'ici 2030, « obligera l'UE à détourner 20 % de ses terres cultivées vers des cultures destinées à l'énergie ». Le chiffre de 20 % concerne l'ensemble des bioénergies produites à partir de substrats agricoles, tandis que celui de 9 % que nous proposons s'applique à la seule méthanisation.

Cette étude montre, que si les objectifs fixés à la méthanisation sont atteints en 2050, celle-ci amputera d'une partie non négligeable les terres agricoles destinées à produire les aliments pour nourrir les humains et les animaux. Il s'agit là d'une question de société qui devrait être débattue au niveau des citoyens : « L'agriculture a-t-elle la mission de nourrir la population ou de produire de l'énergie ? ». A ce propos, on peut citer la réaction de la région Normandie qui vient de supprimer toutes ses aides financières aux méthaniseurs qui mobilisent des surfaces agricoles<sup>12</sup>.

La loi économique de l'offre et de la demande s'applique désormais à cette concurrence puisque les exploitants de méthaniseurs proposent des prix d'achat aux substrats agricoles deux fois supérieurs au prix du marché agricole (Cadiou, 2023). Une telle tendance qui met en danger la production alimentaire doit être dénoncée !

## La méthanisation diminue la quantité de carbone (C) stockée dans les sols

Le remplacement des cultures intermédiaires CIPANs en CIVEs a un impact significatif sur le bilan carboné net de l'exploitation puisque les CIVEs sont fauchées pour alimenter les méthaniseurs alors que les CIPANs sont enfouies dans le sol où elles contribuent au stockage de quantités importantes de C. Cette modification de l'utilisation finale des cultures intermédiaires aboutit à un transfert du C des sols vers l'atmosphère, ce qui va à l'opposé de « l'initiative 4 pour 1000<sup>13</sup> » lancée par la France lors de la COP 21, en 2015, pour limiter l'élévation de température de la planète en-deçà de 2° C. Si l'on considère que le C de la partie aérienne des CIVEs représente, en moyenne, 15 % de leur matière brute<sup>14</sup>, et que 25 % du C qui entre dans les méthaniseurs est transformé en biogaz, on peut alors chiffrer à  $2,5 \times 10^6$  t la quantité de C qui sera émise annuellement dans l'atmosphère au lieu d'être stockée dans les sols

<sup>12</sup> <https://www.environnement-magazine.fr/energie/article/2023/11/22/146757/methanisation-normandie-suspend-ses-aides-suite-des-derives>

<sup>13</sup> Initiative 4 p 1000 : la communauté scientifique lance l'appel de Sète. <https://www.ird.fr/initiative-4-pour-1000-la-communaute-scientifique-lance-lappel-de-sete>

<sup>14</sup> Tang Z. *et al* (2018). Patterns of plant carbon, nitrogen and phosphorus concentration in relation to productivity in China's terrestrial ecosystems. PANS, 115(16), 4033-4038. <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1700295114>

lorsque la production de biométhane atteindra 100 TWh en 2050. On considère, par ailleurs, que 75 % du C des CIVE revient au sol via les digestats.

L'autre source importante de perte de C concerne le changement d'usage des sols (ChUS) qui consiste essentiellement à retourner des surfaces de prairies naturelles pour cultiver une partie du maïs nécessaire à l'alimentation des méthaniseurs. Si nous estimons que le ChUS correspond à une surface d'environ 30 ha pour couvrir les besoins d'un méthaniseur produisant 10 GWh de biométhane (moyenne en France actuellement), celui-ci sera de  $3,1 \times 10^5$  ha pour une production de biométhane de 100 TWh. Selon l'INRAE<sup>15</sup>, les 30 premiers centimètres du sol des prairies naturelles stockent 84,6 t C/ha tandis que le sol des cultures de maïs ne stocke que 51,6 t C/ha. Le changement d'affectation des terres se traduit donc par une perte de C stocké de 33 t C/ha/an, ce qui représente un déficit annuel de  $10,2 \times 10^6$  t de C des sols pour une production de 100 TWh.

Au total, le remplacement des CIPAN par des CIVE, ainsi que le changement d'usage des sols, diminueront de  $12,7 \times 10^6$  t la quantité de C stockée annuellement dans les sols, lorsque la méthanisation produira 100 TWh d'énergie par an en 2050.

Des alertes sur ces pertes importantes du puits de C que sont les sols, dues principalement au ChUS, et leurs conséquences sur le climat et la biodiversité, sont lancées dans la revue NATURE par les scientifiques qui mettent en cause la Commission européenne de vouloir promouvoir les bioénergies incluant le biométhane (Searchinger *et al*, 2022). Par ailleurs, une synthèse réalisée par FranceAgriMer (2022) dénonce le risque d'une carence de biomasse agricole disponible au-delà des 5 prochaines années, ce qui conduit les auteurs à suggérer « *qu'un arbitrage national sur l'usage de la biomasse fermentescible pourra devenir nécessaire pour fixer les objectifs de production de biométhane par la méthanisation, en fonction des limites du sol et des ressources hydriques, des capacités logistiques, des besoins protéiques des cheptels, de la dynamique de développement des produits biosourcés, et d'autres paramètres économiques et sociétaux. D'un point de vue purement massique, ce travail montre qu'une entrée en concurrence avec les besoins de l'élevage est à prévoir sur la biomasse d'origine résiduaire* ». Il s'agit là d'une question majeure qui déterminera l'avenir de la filière maïs qui ne semble pas préoccuper les responsables des perspectives énergétiques de notre pays.

*Remarque* : Cette perte durable du stock de C terrestre, démontrée ici, implique que le CO<sub>2</sub> biogénique issu de la combustion du biométhane soit comptabilisé dans le bilan des émissions du méthaniseur (voir la remarque à la fin du chapitre VI).

---

<sup>15</sup> INRAE (2019). Quel au regard de l'objectif 4 p 1000 et à quel coût ? Ce document est accessible via <https://www.territoires-climat.ademe.fr/actualite/etude-de-linra-stocker-du-carbone-dans-les-sols-francais-quel-potentiel-au-regard-de-lobjectif-4-pour-1000-et-a-quel-cout>

## L'épandage des digestats enrichit-il la qualité et la fertilité des sols ?

Les matières résiduelles (digestats) qui sont récoltés en sortie des digesteurs, ont une teneur en matière sèche (MS) faible, de l'ordre de 7 %, ce qui permet de les épandre en l'état sur les terres agricoles. Ils peuvent subir un traitement de phase qui permet d'obtenir un digestat très liquide ayant une teneur en MS de 5 %, et un digestat solide pouvant atteindre jusqu'à 25 % de MS. Il est possible également de sécher les digestats pour obtenir une MS de 75 % qui permet de les conserver plus aisément<sup>16</sup>.

Les caractéristiques chimiques des digestats sont différentes de celles des matières agricoles dont ils sont issus, ce qui a des conséquences sur leur comportement à l'égard des sols et de leur biosphère, ainsi que de l'environnement : (i)-une faible teneur en MS ; (ii)-un pH alcalin (pH ~ 8) ; (iii)-un rapport carbone/azote (C/N) faible ; (iv)-une part importante d'azote minéralisé sous forme d'ammonium  $\text{NH}_4^+$  (et surtout d'ammoniac gazeux  $\text{NH}_3$  à cause du pH alcalin) ; (v)-des pertes gazeuses élevées sous forme de  $\text{CH}_4$  et d'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) au cours du stockage des digestats pendant 5 à 6 mois avant leur épandage, d'où la nécessité de couvrir les cuves.

Une partie importante du C des intrants est transformée en biogaz dans les digesteurs alors que la totalité de l'N est conservée, ce qui explique la baisse du rapport C/N des digestats. La perte de ce carbone, dit « labile », qui constitue la principale source d'énergie des microorganismes du sol, va diminuer leur développement ainsi que leur activité biologique, ce qui aura un impact négatif à la fois sur la structure des sols et sur la production agricole à moyen terme (Aurousseau *et al*, 2021). Comme indiqué précédemment pour l'azote, la totalité des minéraux P, K, ainsi que les oligoéléments des intrants, sont conservés dans les digestats. La majorité de l'azote organique des substrats (protéines et urée) est minéralisée dans les digesteurs en  $\text{NH}_4^+$  et en  $\text{NH}_3$  volatil qui, ensemble, peuvent atteindre 65 % de l'azote total des digestats. Or, contrairement à ce qui est fréquemment allégué, l'azote ammoniacal est moins bien assimilé par les végétaux que les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) dont la teneur est plus faible dans les digestats. Ces singularités nécessitent que des précautions soient prises au moment de l'épandage des digestats pour respecter les réglementations en vigueur et éviter des dommages à l'environnement (voir « *L'utilisation des digestats en agriculture – Les bonnes pratiques à mettre en œuvre* »<sup>17</sup>). Un plan d'épandage doit être défini dans le dossier IPCE, au sein duquel sont précisés les parcelles concernées et le matériel utilisé. Les périodes d'épandage doivent respecter les conditions climatiques usuelles. En réalité, peu de contrôles sont effectués par les services agréés et, la plupart du temps, ils portent sur de simples déclarations des gestionnaires des sites de méthanisation (Cadiou, 2023).

<sup>16</sup> [https://aile.asso.fr/wp-content/uploads/2020/03/VF-Valdipro\\_Fiche-produit\\_Digestat-sec.pdf](https://aile.asso.fr/wp-content/uploads/2020/03/VF-Valdipro_Fiche-produit_Digestat-sec.pdf)

<sup>17</sup> <https://methasynergie.fr/wp-content/uploads/2021/06/0621.guide-epandage-digestats-methanisation.pdf>

L'accumulation d'azote minéralisé dans les sols a plusieurs effets négatifs sur l'environnement : (i)-elle entraîne un appauvrissement de la biodiversité microbienne impliquée dans la symbiose au niveau racinaire (la rhizosphère), ainsi qu'une perte de la microfaune des sols (Fonty, 2021 ; Fonty, 2022 ; van Midden *et al*, 2023) ; (ii)-elle est à l'origine d'un transfert significatif d'azote soluble vers les eaux profondes, surtout dans les sols karstiques<sup>18</sup>, ce qui augmentera leur concentration en nitrates ; (iii)-elle entraîne une perte importante d'azote sous forme de NH<sub>3</sub> par volatilisation ; les gaz NH<sub>3</sub> et H<sub>2</sub>S provoquent des nuisances odorantes et des risques respiratoires à l'égard des habitants situés près des lieux d'épandage.

L'agriculture BIO qui interdit l'emploi des engrais chimiques, autorise les digestats de méthanisation s'ils répondent aux exigences réglementaires liées à l'usage des fertilisants et des amendements décrits dans le document ATEE-Club Biogaz (2021). Ce débouché peut devenir un moyen de valoriser les digestats à la condition d'exercer des contrôles sérieux et répétés sur leur innocuité à l'égard des sols et des produits alimentaires BIO.

## Discussion et conclusion

La méthanisation tend à attirer les agriculteurs par son image de technologie innovante qui fournit une forme d'énergie dite « verte » via laquelle ils espèrent obtenir des revenus financiers substantiels ainsi qu'une reconnaissance de la part de la société. L'impression qui tend à dominer est toute autre. En effet, de nombreuses associations de riverains contre l'implantation des méthaniseurs naissent spontanément dès qu'un projet est lancé. Des études scientifiques issues d'universités prestigieuses et publiées dans des revues renommées comme *Nature*, remettent en question la plupart des allégations positives avancées jusque-là. Elles alertent sur les risques majeurs que font courir la méthanisation à l'environnement, à l'agriculture, aux agriculteurs et aux citoyens, en orientant préférentiellement la production agricole vers les bioénergies au détriment de l'alimentation humaine et animale. Cette concurrence quasi-immorale, ainsi que les effets délétères sur les sols cultivés et la biosphère qu'ils abritent, doivent être pris en considération par nos dirigeants (Fonty, 2022). Le slogan « *produire de l'énergie plutôt que nourrir* » pourrait en effet caractériser le choix des décideurs qui ambitionnent de promouvoir la méthanisation agricole.

Compte tenu des objectifs fixés par les pouvoirs publics de multiplier par 5 et par 15 la production actuelle de biométhane en 2030 et 2050, respectivement, il semble urgent de mobiliser la recherche publique pour mener des études objectives sur l'intérêt réel de la méthanisation agricole dans le mix énergétique national. Ces études devront prendre en compte les écarts importants qui existent entre les chiffrages de notre étude

---

<sup>18</sup> [https://actu.fr/societe/coup-dur-pour-la-methanisation-dans-le-lot-une-demande-nationale-d-arret-des-epandages\\_58285585.html](https://actu.fr/societe/coup-dur-pour-la-methanisation-dans-le-lot-une-demande-nationale-d-arret-des-epandages_58285585.html)

et ceux d'autres scientifiques d'une part, et les données de l'ADEME d'autre part. L'ensemble des décisions qui ont été prises jusque-là s'appuient sur les seuls calculs de l'ADEME que nous contestons.

La méthanisation non agricole peut toutefois avoir un intérêt lorsqu'elle utilise de vrais déchets qui n'ont plus d'utilité ou qui polluent l'environnement, à la condition que les substances chimiques à risque ou les agents pathogènes présents dans les intrants ne se retrouvent pas dans les effluents liquides ou gazeux. Les critères d'efficacité énergétique, de coût financier ou d'émissions de GES sont alors secondaires si l'objectif est d'éliminer des matières organiques inutiles, voire nuisantes. On peut également admettre l'implantation des méthaniseurs dits « à la ferme » qui sont alimentés par des substrats autochtones dont le peu d'énergie produite est utilisée sur place. Les réserves émises dans la présente étude concernent essentiellement les sites de méthanisation agricole de grande taille, destinés à alimenter les réseaux énergétiques nationaux.

*Remarque.* L'ensemble des résultats et des commentaires présentés dans ce document s'appliquent à tous les biocarburants produits par fermentation anaérobie de produits agricoles.

## Références bibliographiques

ADEME (2012). Mix de gaz 100 % renouvelable en 2050 ? Etude de faisabilité technico-économique. Rapport de l'étude. <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/1548-mix-de-gaz-100-renouvelable-en-2050--9791029710476.html>

ADEME-BASE CARBONE (2014). *Documentation des facteurs d'émissions de la Base Carbone*. 280 pages.

ADEME (2022). Utilisation de l'argument de « neutralité carbone » dans les communications. *Les recommandations de l'ADEME*, février, 17 pages. <https://librairie.ademe.fr/developpement-durable/5335-utilisation-de-largument-de-neutralite-carbone-dans-les-communications.html>

ADEME (2022). Méthode pour la réalisation des bilans d'émissions de gaz à effet de serre conformément à l'article L. 229-25 du code de l'environnement. Juillet, 111 pages. <https://www.driat.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/ressources-surles-bilans-des-emissions-de-gaz-a-a12621.html>

ATEE - CLUB BIOGAZ (2019). Épandage des digestats en agriculture biologique, 5 p. [https://atee.fr/system/files/2019-12/2019%2003\\_biogaz\\_veille\\_fiche\\_epandage\\_digestats\\_agri\\_bio.pdf](https://atee.fr/system/files/2019-12/2019%2003_biogaz_veille_fiche_epandage_digestats_agri_bio.pdf)

ATELGE M.R., SENOL H., DJAAFRI M., HANSU T.A., KRISA D., ATABANI A., ESKICIOGLU C., MURATCOBANO H., UNALAN S., KALLOUM S., AZBAR N., KIVRAK H.D. (2021). A critical overview of the state-of-the-art methods for biogas purification and utilization processes. *Sustainability*, 13, 11515, 1 - 39. <https://doi.org/10.3390/su132011515>

- AUROSSEAU P., JOUANY J-P, FONTY G., CHATEIGNER D. (2023). Les scientifiques réagissent quant à l'impact de la méthanisation sur le sol. Les conséquences des digestats standards sur le carbone des sols. Tribune dans *WebAgri*. <https://www.web-agri.fr/tribunes/article/204104/les-scientifiques-reagissent-quant-a-l-impact-de-la-methanisation-sur-le-sol>
- BAKKALOGLU S., COOPER J., HAWKES A. (2022), Methane emissions along biomethane and biogas supply chains are underestimated. *One Earth* 5, 724 - 736.
- BASE CARBONE-ADEME (2014). <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/base-carbone-complete-de-lademe-en-francais-v17-0/>
- BIOTEAU T., DABERT P. (2009). Application pour le calcul du bilan des émissions de gaz à effet de serre des installations de digestion anaérobie, version 2.0. Guide méthodologique. [Rapport Technique] Irstea. 57 pages. Hal-02593780
- CADIOU J. (2023). *Le déploiement de la politique de méthanisation agricole en France : implications pour la transition agroécologique*. Thèse Sociologie. Université Paris-Saclay, 322 pages. NNT : 2023UP- ASB029. tel-04190138
- DONNEES ET ETUDES STATISTIQUES (2021). Comment se compose le mix énergétique de la France ? <https://www.notre-environnement.gouv.fr/actualites/breves/article/comment-se-compose-le-mix-energetique-primaire-de-la-france>
- ESNOUF A., BROCKMANN D., CRESSON R. (2021). *Analyse du cycle de vie du biométhane issu de ressources agricoles*. Rapport ACV, INRAE-Transfert, 170 pages.
- FRANCE-AGRIMER (2022). Ressources en biomasse et méthanisation agricole : quelles disponibilités pour quels besoins ? Analyse de données théoriques de l'ONRB.
- FONTY G. (2021). La méthanisation en milieu agricole vue par un écologue microbien ; un non-sens écologique, éthique et civilisationnel. *Nature & Progrès*, 132, 14 - 16. ISSN 2269-1464
- FONTY G. (2022). La méthanisation agricole : attention danger pour notre souveraineté. *Revue Francophone du Développement Durable*, 20, 1 - 14.
- FRIEDLINGSTEIN P. & al. (2020). Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data*, 12, 3269 - 3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-202>.
- FUTURA (2023). Le biocarburant tiré du maïs conduirait à plus de gaz à effet de serre. <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/developpement-durable-biocarburant-tire-mais-conduirait-plus-gaz-effet-serre-23006/>
- GALVAN-ARZOLA U., MORENO-MEDINA C. U., LUCHO-CHIGO R., RODRIGUEZ-ROSALES M.D.J., VALENCIA-VAZQUEZ R. (2021). Biochemical methane potential of residual biomass for energy generation. *Environmental Technology*, 42, 8, 1165 - 1178. doi: 10.1080/09593330.2019.1660412.
- JANCOVICI J.M. (2007). Quels sont les gaz à effet de serre ? GES et cycle de carbone. <https://jancovici.com/changement-climatique/gaz-a-effet-de-serre-et-cycle-du-carbone/quels-sont-les-gaz-a-effet-de-serre-quels-sont-leurs-contribution-a-leffet-de-serre/>
- JOUANY J-P. (2023). Analyse des émissions de gaz à effet de serre au cours du cycle de vie d'un méthaniseur agricole. *Revue Francophone du Développement Durable*, 21,

1 - 11. <https://erasme.uca.fr/version-francaise/publications/revue-francophone-du-developpement-durable>

LU D., YAN W., LE C., LOW S.L., TAO G., ZHOU Y. (2023). Near-infrared reflectance spectroscopy for rapid prediction of biochemical methane potential of wastewater wasted sludge. *Science of The Total Environment*, 912, p. 169640. doi : 10.1016/j.scitotenv.2023.169640

MAYNAUD G., PATUREAU D., DRUILHE C., ZIEBAL C., JIMENEZ J., TORRIJOS M., POURCHER A.-M., WÉRY N. (2017). Caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques de digestats bruts et post-traités destinés à l'épandage agricole. *Techniques Sciences Méthodes*, 5, 33 - 50.

MOLETTA R. (2015). *La méthanisation* (3<sup>ème</sup> édition). Tec & Doc - Lavoisier. ISBN13 978-2-7430

O'HARE M., PLEVIN R.J., MARTIN J.L., JONES A.D., KENDALL A., HOPSON E. (2009). Proper accounting for time increases crop-based biofuels' greenhouse gas deficit versus petroleum. *Environmental Research Letters*, 4, 1 - 7. doi:10.1088/1748-9326/4/2/024001

QUANTIS (2020). *Evaluation des impacts GES de la production et l'injection du biométhane dans le réseau de gaz naturel – Rapport synthétique*. 18 pages. [https://www.bioenergie-promotion.fr/wp-content/uploads/2020/04/evaluation-des-impacts-ges-biomethane-\\_synthese-quantis\\_2017.pdf](https://www.bioenergie-promotion.fr/wp-content/uploads/2020/04/evaluation-des-impacts-ges-biomethane-_synthese-quantis_2017.pdf)

SCIENCES EAUX & TERRITOIRES (2016). *Fumiers de bovins, une ressource à fort potentiel pour la filière de méthanisation en France*, hors-série n° 24. N°ISSN : 2109-3016.

SEARCHINGER T.D., JAMES O., DUMAS P., KASTNER T., WIRSENIUS S. (2022). EU climate plan boosts bioenergy but sacrifices carbon storage and biodiversity. *Nature*, 612, 27 - 30.

SOLAGRO, INRAE-TRANSFERT (2022). *Outil de calcul des émissions de GES de la production d'énergie par méthanisation suivant les règles de calcul prévues par la directive RED II – rapport méthodologique Version 2*. 52 pages.

VAN MIDDEN C., HARRIS J., SHAW L., SIZMUR T., PAWLETT M. (2023). The impact of anaerobic digestate on soil life : a review. *Applied Soil Ecology*, 191, 1 - 12. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105066>

WALLRICH A. (2022). Potentiel méthanogène du fumier équin ; synthèse bibliographique du programme EQUIFUMIER. 8 pages.