

Les émissions de méthane le long des chaînes d'approvisionnement en biométhane et biogaz sont sous-estimées

 [cell.com/one-earth/fulltext/S2590-3322\(22\)00267-6](https://cell.com/one-earth/fulltext/S2590-3322(22)00267-6)

Sciences pour la société

Un abandon immédiat du charbon et du pétrole pour l'énergie est nécessaire pour limiter la hausse des températures, mais est difficile en raison des besoins énergétiques, en particulier dans des domaines comme le chauffage et le refroidissement qui nécessitent un approvisionnement énergétique substantiel tout au long de l'année. Le gaz naturel est actuellement utilisé comme combustible de transition. Il offre les mêmes performances que le charbon et le pétrole mais émet moins de CO_2 . Cependant, le gaz naturel libère du méthane (CH_4), qui est un agent de réchauffement plus puissant que le CO_2 . Le biométhane et le biogaz sont apparus comme de solides candidats pour remplacer le gaz et réduire les émissions de CO_2 et de CH_4 . Cependant, ces carburants de remplacement ne sont pas exempts d'émissions de CH_4 . En effet, CH_4 est libéré à divers moments de la production et de la distribution, mais une compréhension approfondie de l'endroit, du moment et de la quantité de CH_4 libéré reste absente. Une synthèse et une analyse des données existantes sur les émissions de CH_4 du biométhane et du biogaz révèlent que les émissions de CH_4 tout au long des chaînes d'approvisionnement ont été sous-estimées. La majorité du CH_4 provient de quelques super-émetteurs seulement et principalement au stade du digestat. Il est urgent d'atténuer le CH_4 tout au long des chaînes d'approvisionnement en biométhane et en biogaz si nous voulons limiter le réchauffement climatique à $1,5^\circ\text{C}$.

Sommaire

Bien que le gaz naturel génère moins d'émissions de CO_2 , l'extraction, le traitement et la distribution du gaz libèrent tous du méthane, qui a un plus grand potentiel de réchauffement climatique que le CO_2 . Le biométhane et le biogaz qui utilisent des déchets organiques comme matière première sont apparus comme des alternatives au gaz naturel, avec des émissions de carbone et de méthane plus faibles. Cependant, la mesure dans laquelle le méthane est encore émis à différentes étapes des chaînes d'approvisionnement en biogaz et en biométhane reste incertaine. Ici, nous adoptons une approche Monte Carlo pour synthétiser systématiquement la distribution des émissions de méthane à chaque étape clé de la chaîne d'approvisionnement en biométhane et biogaz en utilisant les données recueillies dans la littérature existante. Nous montrons que les 5 % d'émetteurs les plus importants sont responsables de 62 % des émissions. Les émissions de méthane pourraient être plus de deux fois supérieures aux estimations précédentes, l'étape de traitement du digestat étant responsable de la majorité du méthane rejeté. Pour assurer les bénéfices climatiques de la production de biométhane et de biogaz,

Résumé graphique



Introduction

À mesure que nous avançons dans le 21^e siècle, les systèmes énergétiques doivent s'éloigner des combustibles fossiles et accroître leur capacité d'énergie renouvelable si l'on veut atteindre les objectifs de température de l'Accord de Paris. Cependant, en raison des défis liés à l'adoption de technologies à faible émission de carbone, certains domaines des systèmes énergétiques mondiaux sont difficiles à décarboner. Il s'agit notamment de l'industrie lourde, des transports et des systèmes de chauffage et de refroidissement, qui représentent ensemble une part importante des émissions de dioxyde de carbone (CO_2).

Le gaz naturel a donc été utilisé comme un carburant alternatif important, qui peut offrir un approvisionnement énergétique à grande échelle, en particulier pour le chauffage domestique et les besoins en eau chaude, la production d'électricité et les applications industrielles, avec des émissions de CO_2 bien inférieures à celles du pétrole et du charbon. Bien que le remplacement du pétrole et du charbon par du gaz naturel réduise les émissions de CO_2 , les émissions fugitives de la chaîne d'approvisionnement du gaz naturel (extraction, traitement et distribution du gaz) peuvent toutes libérer du CH_4 .

Environ 39,6 millions de tonnes de CH_4 ont été émises en 2021, représentant 61 % des émissions de pétrole et de gaz et 30 % des émissions totales de CH_4 du secteur de l'énergie. Étant donné que le CH_4 a un potentiel de réchauffement climatique beaucoup plus élevé que le CO_2 et qu'il est actuellement responsable d'au moins un quart du réchauffement climatique, il y a de fortes demandes pour que l'utilisation du gaz naturel soit réduite d'au moins 35 % d'ici 2050 et de 70 % d'ici 2100. par rapport à 2019 ;

par conséquent, des méthodes alternatives d'énergie propre sont essentielles pour remplacer le gaz naturel afin de limiter le réchauffement climatique à 1,5°C.

Une autre méthode de décarbonation du gaz naturel consiste à le remplacer par du biométhane ou du biogaz, qui est un mélange de gaz (principalement du CH_4 et du CO_2) produit à partir de matériaux biodégradables. La production et l'utilisation de biométhane et de biogaz ont été mises en avant dans le cadre des efforts d'atténuation,

avec jusqu'à 37 exajoules (EJ)/an de gaz issus de la biomasse dans les scénarios du rapport spécial du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat sur le réchauffement climatique de 1,5 °C (GIEC SR1.5C),

qui limite les élévations de température en dessous de 2°C. L'Agence internationale de l'énergie (AIE)

ont rapporté que la production mondiale de biométhane et de biogaz pourrait satisfaire près de 20 % de la demande mondiale de gaz si son potentiel durable était pleinement utilisé.

Parce que le biométhane est similaire au gaz naturel, il peut être facilement stocké et injecté dans l'infrastructure de gaz naturel existante, fournissant potentiellement une énergie fiable et abordable.

Au moment d'écrire ces lignes, l'Europe est le leader mondial de la production de biométhane par valorisation du biogaz, suivie des États-Unis, de la Chine et du Canada.

Selon la World Biogas Association (2019), 700 usines de valorisation du biogaz fonctionnent dans le monde, dont 195 en Allemagne (le plus grand producteur), le biogaz dominant actuellement la production de biométhane. La production de biométhane et de biogaz devrait encore augmenter, la demande devant être multipliée par 9 d'ici 2040 par rapport aux niveaux de 2018,

entraîné par l'augmentation du volume de déchets organiques générés par les sociétés modernes, les changements dans les pratiques de gestion des déchets et l'élimination progressive des combustibles fossiles visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) et à atteindre les objectifs gouvernementaux. Compte tenu de cette multitude d'engagements, d'investissements et de développements, le biométhane et le biogaz pourraient être cruciaux pour aider à établir un système énergétique mondial propre, fiable et abordable.

Cependant, de grandes quantités de CH_4 peuvent encore être émises par les chaînes d'approvisionnement du biométhane et du biogaz, y compris la manutention du digestat, les digesteurs anaérobies, les unités de valorisation, les stockages et le transport des matières premières, et les étapes de stockage et de distribution.

Le CH_4 est un GES à durée de vie relativement courte mais a un potentiel de réchauffement planétaire (PRG) $27,2 \pm 11$ fois plus grand que le CO_2 sur un horizon de 100 ans et $80,8 \pm 25,8$ fois plus grand sur un horizon temporel de 20 ans pour les sources biogènes.

L'importance de réduire les émissions de CH_4 pour respecter l'Accord de Paris cibles a été démontrée par Rogelj et al.,

car il s'agit d'un GES important en termes de dépassement potentiel des objectifs de l'Accord de Paris, où le réchauffement dépasse "bien en dessous de 2°C " puis revient au niveau cible d'ici 2100,

conduisant à des points de basculement potentiels dans les systèmes physiques et socio-économiques. Sixième rapport d'évaluation (AR6) du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) (Groupe de travail III)

a souligné que le CH_4 joue un rôle important pour déterminer si ou quand $1,5^\circ\text{C}$ est atteint, car la réduction des émissions de CH_4 compensera l'augmentation de la température mondiale beaucoup plus rapidement que le CO_2 , en raison de sa durée de vie relativement courte et de sa plus grande puissance de GES. Le rapport AR6 a également noté que les réductions des émissions de CH_4 devront se produire plus rapidement que celles de CO_2 et que la réduction des émissions de CH_4 (et d'autres GES autres que le CO_2) est essentielle pour atténuer le réchauffement.

Alors que les scénarios AR6 prévoient une augmentation de la capacité du biométhane jusqu'à 200 fois entre 2020 et 2050,

comprendre où se produisent les émissions de CH_4 et quelle est la quantité émise est crucial.

Il existe à ce jour des études de mesure des émissions portant sur des installations spécifiques de biométhane,

qui ont mesuré sur site (mesure des émissions à chaque source ponctuelle) et hors site (mesure des émissions basée sur des observations faites hors du site). Celles-ci peuvent également être appelées études ascendantes (sur site) et descendantes (hors site). Ceux-ci ont constaté que les émissions des installations de biométhane peuvent atteindre 97 kg h⁻¹ CH₄.

Cependant, une évaluation complète en caractérisant la distribution des émissions de CH₄ à chaque étape de la chaîne d'approvisionnement en biométhane et biogaz reste floue. Ici, nous rassemblons les données publiées sur les émissions des études de mesure du CH₄ pour évaluer et synthétiser la distribution des émissions de chaque étape de la chaîne d'approvisionnement afin de caractériser le profil d'émissions de la chaîne d'approvisionnement en biométhane et biogaz (voir [les procédures expérimentales](#) et la [figure S1](#) pour l'itinéraire de la chaîne d'approvisionnement sélectionné). Une agrégation de Monte Carlo examine la distribution des émissions de la chaîne d'approvisionnement. Cela permet de caractériser le profil d'émission des filières biométhane et biogaz. Nous constatons que, si la chaîne d'approvisionnement en biométhane et biogaz émet moins de CH₄ que la chaîne d'approvisionnement en pétrole et en gaz naturel, le taux d'émission est plus élevé. En outre, nous constatons que 62 % des émissions cumulées sont rejetées par les 5 % d'émetteurs les plus importants. Nous constatons également que les émissions de méthane pourraient être plus de deux fois supérieures aux estimations précédentes, et que l'étape de traitement du digestat a contribué aux émissions de CH₄ les plus importantes tout au long de la chaîne d'approvisionnement. Nos résultats permettront de mieux comprendre comment améliorer la durabilité de la production de biométhane et de biogaz en fournissant aux exploitants d'usines, aux investisseurs dans la chaîne d'approvisionnement et aux décideurs politiques des informations sur les domaines dans lesquels des améliorations peuvent être apportées aux chaînes d'approvisionnement en biométhane et biogaz pour réduire le CH₄ les émissions, ainsi que si le CH₄ existant ou proposé la réglementation est suffisante ou doit être révisée.

Résultats

Résumé de la méthode

Pour évaluer les émissions globales de la chaîne d'approvisionnement, la chaîne d'approvisionnement en biométhane est divisée en cinq étapes principales : (1) matières premières ; (2) production de biogaz ; (3) la valorisation du biogaz ; (4) transmission, distribution et stockage de gaz ; et (5) le stockage du digestat. Cette étude a été compilée à partir de plusieurs études publiées et des données de mesures sur site (prises à chaque source d'émission individuelle) et hors site (rapportées pour l'ensemble du site). La fonction d'estimation de la densité du noyau (KDE) a été utilisée pour évaluer les caractéristiques de la distribution des données recueillies auprès de sources individuelles

pour chaque étape de la chaîne d'approvisionnement. Ensuite, une simulation de Monte Carlo a été effectuée pour estimer les émissions totales de la chaîne d'approvisionnement, qui ont ensuite été comparées aux émissions hors site rapportées à partir de mesures sur l'ensemble du site dans des études publiées précédemment (voir [leprocédures expérimentales](#) pour plus de détails).

Émissions totales de la chaîne d'approvisionnement

La distribution cumulée des émissions de CH₄ de la chaîne d'approvisionnement est illustrée à la [figure 1 A](#). Les émissions médianes et moyennes sont de 40,0 à 42,3 g d'éq. CO₂ /MJ_{HHV} (41,1–41,3 à l'intervalle de confiance [IC] à 95 %) et 51,4–52,7 g CO₂-eq. /MJ_{HHV} (52,2–52,4 à l'IC à 95 %), respectivement, avec un 5^e centile de 11,0–16,3 g CO₂-eq. /MJ_{HHV} (15,6–15,7 à l'IC à 95 %) et un 95^e centile entre 118,2 et 144,0 g CO₂-eq. /MJ_{HHV} (131–133 à l'IC à 95 %) en utilisant GWP₁₀₀ valeurs. Chaque courbe définit la distribution cumulative pour une seule simulation de Monte Carlo et montre que les émissions totales de la chaîne d'approvisionnement varient de 2,5 à 343 g CO₂-eq. /MJ_{HHV}. La distribution des émissions est fortement asymétrique vers le haut ([Figure 1 A](#)), ce qui indique des sites à fortes émissions disproportionnellement appelés « super-émetteurs » (voir la section sur l' [identification des super-émetteurs](#) pour plus de détails). Nos résultats sont cohérents avec ceux observés pour les chaînes d'approvisionnement en pétrole et en gaz naturel.

En utilisant une production mondiale de biogaz et de biométhane de 35 mégatonnes d'équivalent pétrole (Mtep) ($1,47 \times 10^{12}$ MJ) en 2018, notre estimation basée sur un modèle des émissions de la chaîne d'approvisionnement en biométhane en 2018 peut représenter jusqu'à 18,5 téragrammes (Tg) CH₄ par an (6,4–7,8 Tg CH₄ an⁻¹ au 95^e centile et une moyenne de 2,8–2,9 Tg CH₄ an⁻¹), ce qui est plus de deux fois supérieur à l'estimation de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) des émissions de CH₄ provenant de la bioénergie (9,1 Tg en 2021). Notre estimation des émissions mondiales de biogaz et de biométhane CH₄ est nettement inférieure à celle de la chaîne d'approvisionnement mondiale de pétrole et de gaz naturel (82,5 Tg en 2021) ; en revanche, il est comparable au segment de production de la supply chain américaine du pétrole et du gaz naturel (6,1–7,1 Tg an⁻¹) sur la base des mesures du site.



Figure 1 Répartition cumulée des émissions de CH₄ de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement
[Afficher la légende complète](#)

La distribution cumulative des émissions en pourcentage du total de CH₄ produit est illustrée à la [figure 1 B](#). Le 5^e centile est de 1,7 % à 2,0 % (1,94 % à 2,0 % à l'IC à 95 %) de la production de CH₄, et le 95^{le} centile est de 12,3 % à 13,4 % (12,6 % à 12,8 % à l'IC à

95 %) de la production totale de gaz. Les plages de valeurs minimales, médianes, moyennes et maximales étaient assez cohérentes pour toutes les estimations ([figure 1](#)). Si les estimations basses et médianes sont quasiment identiques, l'écart entre le biométhane et le gaz naturel est très variable dans les estimations les plus hautes. La médiane variait de 5,1 % à 5,3 % (5,1 % à 5,2 % à l'IC à 95 %), avec des taux d'émission moyens de 5,90 % à 6,04 % (5,9 % à 6,0 % à l'IC à 95 %) de CH_4 total par production supérieure à celle du gaz naturel (0,8 % à 2,2 % de la production de CH_4).

[Rutherford et al.](#)

ont constaté que les émissions de CH_4 dans le segment de la production de pétrole et de gaz naturel étaient de 1,3 % (1,2 % à 1,4 % à l'IC à 95 %), ce qui est nettement inférieur à nos conclusions. D'autre part, malgré la baisse de la production de gaz, l'une des émissions de CH_4 les plus élevées signalées provenant de la production de pétrole et de gaz (bassin d'Uinta à partir d'un enregistrement pluriannuel d'observations sur site) révèle un taux d'émission plus élevé que nos résultats (6%- 8%).

Bien que les émissions de la chaîne d'approvisionnement en biométhane soient comparables à la production de pétrole et de gaz naturel en termes de $\text{Tg CH}_4 \text{ an}^{-1}$, le taux d'émission normalisé à la production est considérablement plus élevé. Cela pourrait être dû à divers facteurs, notamment des installations de production mal gérées; un manque d'attention à l'industrie du biométhane entraînant une baisse des investissements pour la modernisation, l'exploitation et la surveillance ; et l'emploi d'opérateurs d'usine hautement qualifiés

par rapport au pétrole et au gaz naturel. En outre, la mauvaise conception et la mauvaise gestion des unités de stockage des matières premières et du digestat ainsi qu'un intérêt limité pour les émissions des infrastructures peuvent entraîner des taux d'émission plus élevés par rapport à la quantité de gaz produite. Étant donné que les chaînes d'approvisionnement en pétrole et en gaz naturel ont été principalement exploitées par de grandes entreprises pendant des décennies, elles ont davantage investi dans la détection et la réparation des fuites.

D'autre part, compte tenu de la croissance de la production de biométhane due aux stratégies nationales de décarbonation, des efforts plus urgents sont également nécessaires pour que la chaîne d'approvisionnement en biométhane traite non seulement les émissions de CH_4 mais aussi la durabilité du biométhane.

Identification des super-émetteurs

Une petite proportion d'installations ou d'équipements avec des taux d'émission disproportionnellement élevés sont étiquetés super-émetteurs,

provoquant la distribution à queue lourde (voir [Figure S4](#)). Un petit nombre de gros émetteurs peut entraîner une sous-estimation ou une surestimation des taux d'émission s'ils ont des schémas d'émissions intermittents, une utilisation insuffisante de l'équipement de traitement ou des stratégies d'exploitation et d'entretien inadéquates. Dans cette étude, les super-émetteurs ont été étudiés à différentes étapes de la chaîne

d'approvisionnement, y compris les systèmes d'alimentation ; stockage de substrats ; bassins de ruissellement; soupapes de surpression sur les digesteurs anaérobies et les gazomètres ; conduits d'échappement et d'aération des unités de valorisation ; la ventilation des unités, telles que les compresseurs ou les réservoirs de digestat fermés ; stockage ouvert du digestat ; et torchage. Dans la distribution à queue lourde ([figures 1A et 1B](#)) et la boîte à moustaches des émissions de chaque étage ([figure 2](#)), le taux d'émission moyen est supérieur à la médiane en raison des super-émetteurs (voir le [tableau S1](#) pour plus de détails). Comme nous manquons d'informations sur le CH₄ sur place₄ sources, nous les identifions comme le top 5 % des émissions les plus élevées sur la base de la fonction de densité cumulée des émissions de CH₄ , parallèlement aux sites de production de gaz naturel.

Les 5 % les plus élevés des émissions totales (199–224,8 g éq. CO₂ /MJ_{PCS}) représentent 62 % (IC : 58 %–66 %) des émissions cumulées, avec un seuil de 211,9 g éq. CO₂ . /MJ_{HHV} . Les caractéristiques des super-émetteurs de la chaîne d'approvisionnement en biométhane sont similaires à celles des super-émetteurs de la chaîne d'approvisionnement en pétrole et en gaz naturel (les 5 % de fuites les plus importantes contribuent à 50 - 60 % des émissions totales).

Étant donné qu'il est peu probable que les super-émetteurs restent constants dans le temps, une surveillance continue sera nécessaire pour détecter les schémas d'émission intermittents ou les fuites imprévisibles de la chaîne d'approvisionnement en biométhane. Des travaux futurs sont nécessaires pour comprendre les caractéristiques des sites de super-émetteurs individuels dans la chaîne d'approvisionnement en biométhane. L'efficacité des efforts d'atténuation pourrait être améliorée en investissant dans la cause sous-jacente des conditions opérationnelles évitables au niveau des composants.



Figure 2 Littérature Émissions de CH₄ à différentes étapes de la chaîne d'approvisionnement en biométhane
[Afficher la légende complète](#)

Contribution de chaque étape de la chaîne d'approvisionnement

La contribution de chaque étape de la filière biométhane est illustrée sur la [Figure 2 A](#) en g CO_{2-eq.} /MJ_{HHV} et en pourcentage de la production totale dans la [figure 2 B](#). Les distributions sont presque identiques. Les émissions proviennent principalement du stockage du digestat, suivi des étapes de production et de valorisation. Des résultats similaires ont été observés par Reinelt et al.,

où les émissions les plus élevées proviennent du stockage ouvert du digestat et des vannes de décompression. De même, Alvarez et al.

ont constaté que les unités de production et de collecte étaient la principale source d'émissions dans la chaîne d'approvisionnement américaine en pétrole et en gaz naturel. Dans l'ensemble, les émissions les plus faibles se produisent au stade de la transmission, du stockage et de la distribution (TSD), similaire à la chaîne d'approvisionnement américaine en pétrole et en gaz naturel.

On notera en particulier ici que l'étape de stockage du digestat est une source importante de CH_4 , comprise entre 0,05 et 242,1 g $\text{CO}_{2\text{-eq.}}/\text{MJ}_{\text{PCS}}$ ([Figure 2 A](#)) soit 0,005 % et 14,8 % du biométhane total produit ([Figure 2 B](#)). Les sources d'émissions sont les réservoirs de stockage de digestat (liquide et solide) ouverts ou couverts et les lagunes. Les émissions provenant de la manipulation du digestat, telles que les processus de post-compostage, l'application du digestat, l'épaississement des gaz d'échappement, les unités de déshydratation et les fuites des centrifugeuses, ont été exclues de la chaîne d'approvisionnement en biométhane dans cette étude. Notre analyse a révélé que les émissions de CH_4 de cette étape sont 23% plus élevées que celles rapportées précédemment,

alors qu'ils forment encore une partie substantielle des études précédentes.

L'étape de production de biogaz est la deuxième plus grande source d'émission, allant de 0,002 à 106,5 g $\text{CO}_{2\text{-eq.}}/\text{MJ}_{\text{HHV}}$ ([Figure 2 A](#)) soit 0,001 % à 9,9 % de la production de CH_4 ([Figure 2 B](#)). Les émissions liées à la production de biogaz proviennent principalement du digesteur anaérobie et du réservoir d'hygiénisation. Les réservoirs d'hygiénisation représentent une fraction relativement faible des émissions de cette étape. Les émissions du digesteur anaérobie sont très variables, en fonction des émissions fugitives des différents types de couverture et du contrôle de la ventilation des soupapes de surpression. De plus, Zeng et al.

ont constaté que la température de fermentation et la qualité du matériau d'alimentation ont un effet sur les émissions de CH_4 des digesteurs anaérobies. Suite à la production de biogaz, les estimations des émissions provenant de la valorisation du biogaz sont de 0,002 à 72,4 g $\text{CO}_{2\text{-eq.}}/\text{MJ}_{\text{HHV}}$ ([Figure 2 A](#)) ou 0,001 % à 5,5 % de la production de CH_4 ([Figure 2 B](#)), qui sont légèrement supérieurs à ce qui a été rapporté par Dumont et al.

Les émissions de l'étape de production de biométhane proviennent de l'échappement ou de l'aération des unités, des gaines de ventilation, des pompes de surpression, des vannes de sécurité des installations de valorisation, des laveurs à eau ou chimiques, des membranes.

De plus, les émissions des matières premières, résultant des fuitifs et des événements du stockage du substrat, sont le quatrième contributeur le plus important à la chaîne d'approvisionnement, représentant 0,0003 à 28,8 g $\text{CO}_{2\text{-eq.}}/\text{MJ}_{\text{HHV}}$ ([Figure 2 A](#)) ou 0,0003 % à 3,1 % de la production totale de CH_4 ([Figure 2 B](#)), et représentent la plus petite proportion des émissions totales de la chaîne d'approvisionnement. Des émissions plus élevées sont associées au stockage du substrat. Dumont et al.

ont signalé une plus grande plage d'émissions de CH_4 (0,2 % à 0,5 % de la production de CH_4) pour le stockage des matières premières.

Cependant, leurs résultats étaient basés sur un ensemble de données plus petit que le nôtre, et les émissions peuvent avoir diminué grâce aux améliorations technologiques depuis la publication de leur étude.

Approches de traitement du digestat

Comme indiqué ci-dessus, le stockage du digestat est la plus grande source d'émissions dans la chaîne d'approvisionnement en biométhane. Cela est dû à l'accumulation de

matière organique, qui conduit à la production de CH_4 à partir de la fermentation. Selon Dohler et al.,

le stockage du digestat pourrait représenter près de 27 % du $\text{CO}_{2\text{eq}}$ mondial. Émissions des processus de digestion anaérobie. La façon dont le digestat est manipulé a un impact majeur sur les émissions, les réservoirs de stockage de digestat ouverts et les lagunes émettant plus que les réservoirs fermés similaires aux résultats de Paolini et al.

(Figure 3). Le potentiel de gaz résiduel, la température du digestat, la quantité de substrat, le niveau de remplissage et les conditions météorologiques ont tous une influence significative sur le taux d'émission des réservoirs de stockage de digestat à ciel ouvert et des lagunes.

La figure 3 montre clairement que les réservoirs fermés peuvent encore émettre du CH_4 , bien que les émissions des réservoirs fermés puissent être évitées grâce à des matériaux de revêtement améliorés, une conception efficace et un entretien régulier. Les installations doivent envisager de devenir accréditées selon les normes de la spécification publiquement disponible (PAS) 110,

qui recommandent une couverture du digestat pour diminuer les émissions. Par conséquent, nous recommandons d'utiliser un stockage fermé du digestat avec des systèmes de récupération de vapeur dirigés vers l'unité de valorisation lorsque cela est économiquement viable pour traiter les émissions de cette étape. Cibler les réductions des émissions liées à la manipulation du digestat fournit les plus grandes améliorations environnementales, bien qu'il soit noté que les stratégies de détection et d'atténuation nécessiteraient des dépenses et une réglementation supplémentaires.



Figure 3 Littérature Émissions de CH_4 du stockage ouvert et fermé du digestat
[Afficher la légende complète](#)

Impact des technologies de valorisation du biogaz

La valorisation du biogaz en biométhane peut entraîner des émissions importantes. La littérature fournit peu de données sur les technologies de valorisation spécifiques, bien que les preuves disponibles montrent que les filtres à membrane et l'absorption chimique entraînent des émissions plus faibles que l'adsorption modulée en pression (PSA) et les épurateurs à eau et chimiques (voir les figures 4 A et 4B). Par conséquent, les indications initiales indiquent que la technologie d'absorption chimique est la meilleure technologie disponible pour la mise à niveau afin de réduire les émissions de CH_4 , ce qui correspond aux valeurs rapportées précédemment.

L'utilisation de PSA et d'épurateur d'eau doit être évitée, bien que davantage de mesures doivent être effectuées.



Figure 4 Littérature Émissions de CH_4 provenant de différentes technologies de valorisation du biogaz
[Afficher la légende complète](#)

Estimations des émissions totales de la chaîne d'approvisionnement par rapport aux mesures mobiles sur l'ensemble du site

Parallèlement à l'approche Monte Carlo sur site (agrégation des émissions basées sur les composants) décrite ci-dessus, les mesures sur l'ensemble du site (hors site) constituent une référence utile. Dans la littérature, les émissions de CH_4 provenant de 792 mesures sur l'ensemble du site variaient entre 0,1 et 483 g $\text{CO}_{2\text{-eq.}}/\text{MJ}_{\text{HHV}}$, avec une moyenne de 51,7 et une médiane de 24,6 g $\text{CO}_{2\text{-eq.}}/\text{MJ}_{\text{HHV}}$ (voir [Figure 5 A](#)). Il s'agit d'une plage plus large avec une médiane inférieure et une estimation supérieure de la limite supérieure que notre simulation de Monte Carlo des mesures sur site. Alors que la moyenne des séries de Monte Carlo (51,4–52,7 g $\text{CO}_{2\text{-eq.}}/\text{MJ}_{\text{HHV}}$) et des mesures sur l'ensemble du site (51,7 g $\text{CO}_{2\text{-eq.}}/\text{MJ}_{\text{HHV}}$) sont comparables, la médiane des essais de Monte Carlo (40,0–42,3 g $\text{CO}_{2\text{-eq.}}/\text{MJ}_{\text{HHV}}$) est supérieure aux mesures de l'ensemble du site (24,6 g $\text{CO}_{2\text{-eq.}}/\text{MJ}_{\text{HHV}}$) en raison de la forte distribution queue des pistes de Monte Carlo. Avant d'exécuter la simulation de Monte Carlo, la fonction de densité de probabilité d'émissions de chaque étape est identifiée pour établir un bon ajustement. La distribution à queue lourde est due à la présence de super-émetteurs à chaque étape de la chaîne d'approvisionnement dans les exécutions de Monte Carlo, alors que les données sur les émissions de l'ensemble du site ne présentaient pas cette queue lourde.

Cependant, des super-émetteurs sont certainement observés dans les mesures sur l'ensemble du site et l'émission maximale est supérieure à celle des simulations de Monte Carlo, mais celles-ci sont insuffisantes en quantité et en amplitude pour élever la médiane au-dessus de la moyenne. Cet écart entre la distribution des mesures sur l'ensemble du site et celle observée dans l'approche de Monte Carlo (c'est-à-dire à partir de l'agrégation des mesures de chaque étape) mérite d'être approfondi dans le futur. Un certain nombre de facteurs sont connus pour affecter les mesures, y compris les conditions météorologiques pendant l'enquête, la durée des mesures, les incertitudes dans les modèles de calcul des taux d'émissions, la présence de super-émetteurs et les conditions de traitement des installations.

Il est également susceptible d'être influencé par diverses sources (voir [Figure 5 B](#)), tels que les biofiltres utilisés pour la réduction des odeurs, les solides stockés provoquant la fermentation, les émissions provenant de l'ouverture de service, ou des fuites situées au-dessus des unités, qui ne sont pas quantifiées par les études de mesures sur site. Nous avons combiné les diverses sources rapportées dans quelques études

et estimé leurs impacts sur les émissions totales à l'aide d'une simulation de Monte Carlo (voir [Figure S2](#)) après avoir identifié le KDE associé (voir les [procédures expérimentales](#)), ce qui impacte la distribution des données. [Figure 5B](#) a démontré que diverses sources pouvaient augmenter les émissions totales de la chaîne d'approvisionnement de 22 %.

Cependant, il est à noter que, comme seules quatre études ont fait état d'émissions provenant de biofiltres et de séparateurs solides, des enquêtes de surveillance plus détaillées sont nécessaires pour mieux comprendre l'impact des diverses sources d'émission sur les émissions de la chaîne d'approvisionnement. Le taux de fuite élevé

signalé dans les mesures hors site pourrait également être dû à des perturbations de processus ou à une ventilation et un torchage importants causés par une infrastructure insuffisante, ce qui entraîne un schéma d'émissions intermittent et hautement imprévisible qui peut surestimer ou sous-estimer des sources importantes de CH₄.

La divergence entre les mesures sur site et hors site est très probablement due à des conditions de fonctionnement anormales entraînant des émissions élevées de CH₄ provenant principalement du segment de production,

qui est cohérent avec celui des chaînes d'approvisionnement en pétrole et en gaz naturel.

Nous sommes d'accord avec Zavala-Araiza et al.

et Rutherford et al.

que l'augmentation des données sur les émissions au niveau des composants grâce à une surveillance continue des émissions et à une caractérisation efficace des sources d'émissions peut réduire l'incertitude et la divergence entre les mesures sur site et hors site.



Figure 5 Chaque étape des émissions avec les mesures sur l'ensemble du site et les exécutions de MC

[Afficher la légende complète](#)

Discussion

Dans l'ensemble, cette étude a montré que les grandes caractéristiques de la chaîne d'approvisionnement en biométhane conduisaient à des profils d'émission similaires à ceux du pétrole et du gaz naturel, bien que la gestion du digestat, la production de biogaz et la valorisation soient des différenciateurs clés. La synthèse des données disponibles ici a montré que cela conduit à des émissions directes de CH₄ inférieures à celles de la chaîne d'approvisionnement en pétrole et en gaz naturel, mais à des taux de perte de CH₄ beaucoup plus élevés que la chaîne d'approvisionnement en pétrole et en gaz naturel. Cette conclusion est pertinente dans le contexte des efforts mondiaux pour atténuer les émissions de CH₄, qui à ce jour se concentrent en grande partie sur les chaînes d'approvisionnement en gaz naturel. Il est également pertinent d'élargir les efforts pour atténuer le changement climatique, où le CH₄ les émissions sont de plus en plus reconnues comme un facteur clé de forçage climatique. Compte tenu du rôle potentiel important du biométhane dans un avenir énergétique conforme à l'Accord de Paris, la meilleure technologie disponible doit être appliquée pour détecter et réduire les émissions, les politiques et la réglementation de la chaîne d'approvisionnement

doivent considérer ces émissions de manière plus systématique, et une meilleure compréhension des émissions contrefactuelles du cycle de vie des déchets et des sous-produits des matières premières du biométhane doit être développée. Il est à noter que même si les matières premières ne sont pas utilisées pour générer du biométhane, elles peuvent quand même émettre du CH₄; en fait, certaines études ont suggéré que le traitement du fumier pour la production de biométhane pourrait être une stratégie d'atténuation.

Nous pensons que cette grande quantité d'émissions de CH_4 provenant de la chaîne d'approvisionnement en biométhane, d'autre part, peut être évitée en prenant des mesures appropriées d'identification, de détection, de mesure et de quantification des émissions. Il est essentiel de souligner que, si le biométhane est largement utilisé à l'avenir pour atteindre les objectifs de décarbonation, les émissions de la chaîne d'approvisionnement en biométhane doivent être évitées afin d'atteindre les objectifs de zéro net.

Réfléchissant à ces résultats par rapport à la directive européenne sur les énergies renouvelables (RED) 2009/28/CE,

il est clair que la réduction des émissions provenant du traitement du digestat et des moteurs à gaz pourrait soutenir une production de biométhane plus durable. Selon un rapport de l'UE

sur la durabilité de la biomasse solide et gazeuse utilisée pour l'électricité, le chauffage et le refroidissement, le seuil de GES pour la production de biométhane est de $34,8 \text{ g CO}_{2\text{-eq.}} / \text{MJ}_{\text{HHV}}$,

hors émissions de digestat. En revanche, les émissions de CH_4 de la chaîne d'approvisionnement en biométhane sont estimées dans cette étude entre 2,5 et $343 \text{ g CO}_{2\text{-eq.}} / \text{MJ}_{\text{HHV}}$ et 0,8 à $182 \text{ g CO}_{2\text{-eq.}} / \text{MJ}_{\text{HHV}}$ ($18,3\text{--}19,5 \text{ g CO}_{2\text{-eq.}} / \text{MJ}_{\text{HHV}}$ pour la médiane et $64\text{--}74 \text{ g CO}_{2\text{-eq.}} / \text{MJ}_{\text{PCS}}$ pour le 95^e centile) lorsque les émissions de digestat sont exclues (voir Figure S3). Compte tenu du CO_2 et du N_2O ($\text{GWP}_{100} = 273 \pm 130$)

émises par la production de biométhane, les émissions totales de GES de la chaîne d'approvisionnement en biométhane sont susceptibles de dépasser ce seuil à moins que des mesures urgentes ne soient prises. Compte tenu des durées de vie et des GWP différents du CO_2 , du CH_4 et du N_2O , les recherches futures peuvent se concentrer sur l'intégration des émissions à différentes échelles de temps afin d'étendre davantage l'impact des chaînes d'approvisionnement en biométhane sur le réchauffement climatique et le changement climatique. Il est clair que dans ces conditions d'exploitation et compte tenu de la grande diversité des voies de production de biogaz, la production de biométhane peut perdre ses avantages en tant que technologie d'énergie propre et peut compromettre les objectifs de l'Accord de Paris si elle est utilisée de manière intensive. Cette étude servirait de ligne directrice pour les plages d'émissions associées à chaque étape tout en recommandant des mesures appropriées pour chaque étape afin de réduire les émissions et de progresser vers les objectifs de l'Accord de Paris. Par conséquent, des technologies et des techniques de réduction des émissions et des réglementations plus spécifiques sur les émissions et la détection et la réparation des fuites sont essentielles pour réduire considérablement les émissions de la chaîne d'approvisionnement. 4 émissions se produiraient si la matière première n'avait pas été convertie en biométhane. Les études futures devraient se concentrer sur des analyses contrefactuelles pour évaluer les crédits de GES selon divers scénarios contrefactuels.

Notre modèle d'émissions de la chaîne d'approvisionnement en biométhane présenté dans cette étude représente les technologies les plus couramment utilisées dans l'industrie, mais il présente certaines limites en ce qui concerne la disponibilité et la résolution des données. Premièrement, les données d'entrée proviennent uniquement

d'enquêtes de mesure et la taille de l'échantillon n'est pas assez grande pour déterminer un modèle de distribution de probabilité pour chaque chaîne d'approvisionnement. En tant que telle, la fonction KDE a été utilisée plutôt que la qualité de l'ajustement puisque les données ne pouvaient pas être ajustées à certaines fonctions de distribution, en raison du manque de données et de la distribution à queue lourde. De plus, une grande partie des données de la littérature ont été exclues, en raison de l'utilisation de facteurs d'émission par défaut, en particulier dans les études de modélisation. Deuxièmement, certaines études n'ont pas pu être incluses parce qu'elles n'ont pas rapporté les taux de production de biogaz ou de biométhane malgré la déclaration de CH₄ émissions.

Les enquêtes de mesure les plus détaillées ont été menées dans diverses régions d'Europe et principalement dans des usines agricoles, de sorte que cette étude reflète en grande partie l'agriculture européenne. D'autres directions de recherche possibles associées à ce travail comprennent l'adaptation des profils d'émissions des itinéraires théoriques de la chaîne d'approvisionnement, par exemple, à l'aide d'outils d'évaluation du cycle de vie. Les recherches futures devraient cibler la collecte de données à partir de diverses voies de la chaîne d'approvisionnement en biométhane dans d'autres pays afin de réduire l'incertitude des données et d'améliorer la taille et la représentativité des échantillons, ce qui peut aider à identifier les voies de production de biométhane les plus durables. Cette base de données accumulée peut être utilisée pour améliorer l'équipement, la conception des processus et les opérations qui atténueraient les émissions de CH₄.

Procédures expérimentales

La disponibilité des ressources

Contact principal

De plus amples informations et demandes de ressources doivent être adressées à et seront traitées par le contact principal, Semra Bakkaloglu (s.bakkaloglu@imperial.ac.uk).

Disponibilité des matériaux

Cette étude n'a pas généré de nouveaux matériaux uniques.

Approche méthodologique

Cette étude vise à estimer les émissions de CH₄ de la chaîne d'approvisionnement en biométhane et à caractériser les sources d'émissions aux différentes étapes de la chaîne d'approvisionnement (décrites dans la [Figure S1](#)). Les critères de sélection pour les mesures d'émissions de CH₄ mobiles nécessitaient que des mesures directes sur site ou hors site soient rapportées par les auteurs de l'étude, plutôt que de s'appuyer sur des études expérimentales, à l'échelle du laboratoire et théoriques.

La littérature existante rapporte des taux d'émission dans différentes unités, et certaines études fournissent des informations insuffisantes pour permettre la conversion d'unités. Dans cette étude, les estimations des émissions de CH₄ ont été converties en pourcentage

de la production totale (volume de CH₄ émis/volume de gaz produit) et en grammes d'équivalent CO₂ par mégajoule d'énergie en fonction du pouvoir calorifique supérieur (PCS). Ceux-ci ont été choisis pour permettre des comparaisons avec la chaîne d'approvisionnement en pétrole et en gaz naturel sans déduire les services en aval. Les émissions de la source ont été divisées par le volume total attendu de biométhane qui serait généré pour l'utilisation de l'énergie.

Des hypothèses ont été appliquées pour convertir les taux d'émission publiés en unités métriques. On a supposé que le GWP₁₀₀ du CH₄ est de 27,2, avec un PCS de 38,1 MJ/m³ ou 55,5 MJ/kg. Les pourcentages volumiques moyens de CH₄ dans le biogaz et le biométhane ont été respectivement de 65 % et 95 %, sauf indication contraire dans une étude. Nous avons supposé que la teneur en CH₄ est de 55 % dans le biogaz pour la matière première du fumier. Nous négligeons l'incertitude des mesures et le GWP₁₀₀ (±11), bien qu'une incertitude de mesure existe chaque fois qu'un taux d'émission est quantifié. Semblable à Brandt et al., nous évaluons toutes les émissions à leurs niveaux déclarés et étudions l'impact de la répartition des émissions. Les émissions de GES autres que le CH₄, comme le CO₂, le N₂O et le NH₃, n'ont pas été incluses parce qu'elles sortent du cadre de cette étude. De plus, les émissions de CH₄ basées sur le GWP₂₀ (80,8) ont été fournies dans la [Figure S4](#). Les trois étapes de cette étude sont :

- 1
Construire l'inventaire des émissions
- 2
Évaluation du modèle d'émissions de la chaîne d'approvisionnement
- 3
Application de simulations de Monte Carlo pour produire des plages d'émissions totales.

Inventaire des émissions

À la suite d'examen systématiques de la base de données existante, 51 articles rapportant des mesures d'émissions de CH₄ mobiles ont été examinés, y compris des articles universitaires ainsi que des rapports gouvernementaux et industriels (voir les [procédures expérimentales supplémentaires](#)). Nous avons utilisé les données des mesures mobiles de CH₄ à l'aide de méthodes de détection de fuites sur site et de télédétection au sol (hors site). Les émissions de CH₄ provenant des sites d'enfouissement ont été exclues en raison du manque de données sur la quantité de biogaz et de biométhane générée par le système de collecte des gaz d'enfouissement, qui est principalement calculée à l'aide d'outils de modélisation des sites d'enfouissement, et les émissions de CH₄ dépendent du CH₄ le taux d'oxydation ainsi que le matériau de couverture du sol plutôt que les émissions des infrastructures.

De plus, nous n'avons considéré que les émissions des stations d'épuration avec digesteurs anaérobies. Les détails de l'itinéraire choisi pour la chaîne

d'approvisionnement en biométhane utilisé dans cette étude sont décrits en détail dans la [figure S1](#).

La disponibilité des données d'inventaire des émissions est très variable, en raison des variations dans les méthodologies appliquées, de la conception et de l'exploitation différentes des usines et de l'insuffisance des données pour chaque chaîne d'approvisionnement. La plupart des données sur les émissions concernaient l'Europe. Les ensembles de données pour chaque source d'émissions ont été divisés en sous-catégories, où il y avait une variation perceptible entre les matières premières (voir le [tableau S1](#)). Les étapes de la chaîne d'approvisionnement en biométhane sont (1) la collecte et le stockage des matières organiques (matières premières) ; (2) les convertir en biogaz dans des conditions anaérobies (AD) ; (3) valorisation du biogaz en biométhane (valorisation) ; (4) transport, stockage de gaz et distribution de gaz généré (TSD); et (5) le stockage du digestat.

Stockage des matières premières

Toute matière biodégradable, telle que les résidus agricoles, le maïs, les cultures, les boues d'épuration ou les déchets alimentaires et de boissons, utilisée dans la digestion anaérobie est appelée matière première. Le rendement en biogaz d'une matière première spécifique peut varier en fonction de la teneur en matière sèche, du temps de séjour dans le digesteur et de la pureté de la matière première.

La matière première transportée d'un tiers vers l'installation de production est stockée dans l'installation et prétraitée avant d'être envoyée à l'étape de production de biogaz. Cette étape couvre quatre composants principaux : les bassins de ruissellement, le convoyeur à vis, le réservoir de mélange (réservoir d'homogénéisation) et le stockage du substrat. Les réservoirs de stockage de substrat et les unités de réception de la biomasse, tels que les tas de matières premières, les bassins de ruissellement, les convoyeurs à vis et les réservoirs de mélange (homogénéisation), sont les principales sources d'émissions, bien que peu d'études aient étudié les émissions à ce stade.

Les émissions du système d'alimentation sont incluses dans les émissions de stockage du substrat (voir [tableau S1](#)). Ces émissions sont principalement fugitives, provenant principalement des réservoirs de stockage ouverts et des unités d'alimentation.

Production de biogaz

Le matériau physiquement traité est pasteurisé et livré à un digesteur anaérobie pour générer du biogaz. La concentration de CH₄ dans le biogaz dépend du type de matière première du digestat, du type de digesteur anaérobie et des conditions dans le digesteur, telles que mésophile et thermophile. L'étape de production de biogaz est constituée d'une cuve tampon (hygiénisation) et d'un réacteur (digesteur anaérobie). Les émissions de CH₄ précédemment signalées provenant des réservoirs d'hygiénisation, des digesteurs anaérobies et des post-digesteurs sont incluses dans cette étape (voir le [tableau S1](#)).

Ces émissions sont fugitives et d'évacuation.

Production de biométhane : procédé de valorisation du biogaz

Le biogaz peut être valorisé en biométhane en éliminant les impuretés. Selon la qualité du biogaz et l'utilisation finale, différentes technologies de valorisation peuvent être utilisées. Actuellement, l'épuration à l'eau est la technologie commerciale la plus courante, suivie des épurateurs chimiques, de la membrane, du PSA, de l'épurateur physique organique et de la séparation cryogénique.

Les émissions de CH₄ provenant de divers processus de valorisation, tels que les filtres à charbon, les épurateurs chimiques et à eau et les technologies membranaires, ont été signalées dans des études antérieures.

et ont été inclus dans l'étape des processus de mise à niveau (voir [tableau S1](#)). Ce sont des fuitifs et des événements des échappements PSA et des conduits d'aération et de ventilation.

Transport, stockage et distribution

Le biogaz peut être utilisé pour produire de la chaleur, de l'électricité ou les deux. Le biométhane peut être injecté dans un réseau de gaz ou utilisé comme carburant de transport renouvelable dans les véhicules. Des études antérieures ont fait état d'échappements de CH₄ provenant de la cogénération, de la production d'électricité, de l'utilisation de la chaleur, des unités de production combinée de chaleur et d'électricité, du glissement des moteurs à gaz, de la torche et du gazomètre.

Les émissions provenant des pipelines, des torchères, des compresseurs et des soupapes de surpression (PRV) sont prises en compte dans les étapes de transport, de stockage et de distribution (voir [tableau S1](#)) afin de les comparer à la chaîne d'approvisionnement en gaz naturel. Les émissions d'utilisation finale provenant principalement de la combustion incomplète de la production combinée de chaleur et d'électricité (CHP), ainsi que les fuites fugitives et les événements des unités de production d'énergie, n'ont pas été incluses dans les émissions de cette étape.

Stockage du digestat

Le digestat peut être utilisé tel quel ou peut être transformé par différentes méthodes pour être utilisé comme engrais. La spécification PAS 110 pour la qualité du digestat est conçue pour garantir que le digestat n'est plus classé comme déchet et qu'il est sûr et fiable à utiliser comme engrais, amendement du sol ou conditionneur, et il recommande que tous les types de digestat soient couverts.

Bien que certaines installations suivent le schéma PAS 110, aucun des articles publiés ne précise si le digestat est conforme à la norme. Les séparateurs solides-liquides, tels que les séparateurs à centrifugeuse et à vis, les filtres à membrane, les biofiltres, le traitement aérobique et le compostage, sont largement utilisés pour traiter le digestat.

Le traitement et le stockage du digestat liquide et solide peuvent également entraîner des émissions, en fonction de la température, du vent, de la pression atmosphérique, des paramètres de traitement de l'usine et du niveau de remplissage des réservoirs de stockage.

Les données sur les émissions par type de digestat (par exemple, solide ou liquide) et les propriétés de stockage (réservoirs fermés ou ouverts) ont été recueillies à partir d'études antérieures (voir [tableau S1](#)).

Les émissions sont principalement fugitives et s'échappent des PRV ouverts. Les émissions associées à l'utilisation du digestat, telles que l'application d'engrais et le post-compostage, ont été exclues de la chaîne d'approvisionnement car le digestat n'est pas toujours utilisé dans la zone d'exploitation et leurs émissions ne sont rapportées que dans quelques études.

Émissions diverses

Une étape d'émission supplémentaire a été ajoutée pour tenir compte d'une variété de sources qui ne sont pas nécessairement présentes dans chaque chaîne d'approvisionnement en biométhane. Les émissions de CH₄ provenant des biofiltres pour la réduction des odeurs, des filtres à compost et des séparateurs ont été rapportées dans quelques études

et sont inclus dans les émissions diverses.

Mesures mobiles sur tout le site

Des mesures mobiles sur l'ensemble du site ont été incluses à des fins de comparaison avec le modèle des émissions totales de chaque chaîne d'approvisionnement.

Diverses techniques de mesure des émissions ont été utilisées pour quantifier les émissions et leurs sources dans l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement, ce qui a entraîné une grande variation des émissions.

Modèles d'émissions de la chaîne d'approvisionnement

Il est important de déterminer la fonction de densité de probabilité (PDF) des émissions à chaque étape avant d'exécuter la simulation de Monte Carlo.

Le PDF établit un bon ajustement des émissions pour chaque étape, y compris une évaluation de l'incertitude. Étant donné que les émissions à chaque étape présentent des caractéristiques uniques, en particulier en ce qui concerne divers super-émetteurs, leurs données et leurs distributions de probabilité diffèrent (voir le [tableau S2](#) pour les caractéristiques des PDF). En raison de la distribution à queue lourde ([Figure S3](#)) et du manque de taille de l'échantillon, le PDF non paramétrique, qui est le KDE, a été généré pour étudier les PDF des émissions de chaque étape à l'aide de Python. KDE fournit généralement des estimations plus précises des distributions de données que les approches paramétriques.

La bande passante de KDE pour chaque étape a été déterminée automatiquement dans la bibliothèque SciPy de Python à l'aide de la règle de Scott, qui dépend du nombre de points de données.

La taille totale de l'échantillon est de 347 et 399 pour $g\text{ CO}_{2\text{-eq.}}/\text{MJ}_{\text{HHV}}$ et données normalisées de production, respectivement.

Simulation de Monte-Carlo

Les émissions totales de la chaîne d'approvisionnement ont été estimées à l'aide de simulations de Monte Carlo,

qui a été largement appliqué pour estimer les émissions de CH_4

avec évaluation des incertitudes. Le PDF de chaque chaîne d'approvisionnement, obtenu à partir du KDE, a été défini dans la simulation pour échantillonner à chaque étape, suivi d'un résumé de chaque étape. Plutôt que de séparer les données par type de matière première, nous les avons divisées par étape de la chaîne d'approvisionnement, comme le montre la [figure S1](#) . Les émissions totales de CH_4 ont été évaluées 10 000 fois avec des tirages aléatoires des distributions pour chaque étape. Les 10 000 estimations ont ensuite été utilisées pour évaluer la distribution cumulative du CH_4 dans les modèles de chaîne d'approvisionnement par le code Python.

Disponibilité des données et des codes

Tous les ensembles de données originaux utilisés dans ce travail ont été mis à disposition dans le cadre des publications référencées et décrites dans le texte. Le code Python utilisé pour la fonction d'estimation de la densité du noyau (KDE) et la simulation de Monte Carlo avec les données ont été déposés chez Zenodo Data :

<https://doi.org/10.5281/zenodo.6550794> .

Remerciements

Les auteurs tiennent à souligner le financement du Sustainable Gas Institute , fondé par l' Imperial College de Londres . Nous remercions Thomas Flesch et Anders Michael Fredenslund pour leur coopération. Le résumé graphique est créé avec [BioRender.com](https://www.biorender.com) .

Les contributions de l'auteur

Conceptualisation, SB et AH ; méthodologie, SB, JC et AH ; logiciel, SB ; validation, SB et JC ; analyse formelle, SB et JC ; enquête, SB, JC et AH ; rédaction – brouillon original, SB ; rédaction – révision et édition, JC et AH ; acquisition de financement, AH ; ressources, SB et AH ; surveillance, AH

Déclaration d'intérêts

Les auteurs ne déclarent aucun intérêt concurrent.

Information supplémentaire

Références

1.

La Société royale

Chauffage et refroidissement à faible émission de carbone : surmonter l'un des défis nets zéro les plus importants au monde.

<https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/climate-change-science-solutions/climate-science-solutions-heating-cooling.pdf>

Date : 2021

[Voir dans l'article](#)

[Google Scholar](#)

2.

- Speirs J.
- Dubey L.
- Balcombe PS
- Taric N.
- Brandon N.
- Hawkes A.

Les meilleurs usages du gaz naturel dans le cadre des objectifs climatiques de Paris.

Institut du gaz durable, Imperial College London , 2021

Voir dans l'article

Google Scholar

3.

- Nisbet EG
- Fisher RE
- Lowry D.
- France J.L.
- Allen G.
- Bakkaloglu S.
- Broderick TJ
- Caïn M.
- Colman M.
- Fernandez J.
- et al.

Atténuation du méthane : méthodes pour réduire les émissions, en route vers l'Accord de Paris.

Rév. Geophys. 2020 ; 58 (e2019RG000675

)<https://doi.org/10.1029/2019rg000675>

Voir dans l'article

- Référence croisée
- Google Scholar

4.

Huppmann D.

Explorateur de scénarios IAMC 1,5 ° C et données hébergées par IIASA.

Consortium de modélisation d'évaluation intégrée et Institut international d'analyse des systèmes appliqués , 2018<https://doi.org/10.22022/SR15/08-2018.15429>.

Voir dans l'article

- Référence croisée
- Google Scholar

5.

AIE

Perspectives pour le biogaz et le biométhane : perspectives de croissance organique.

AIE , Paris 2020

Voir dans l'article

Google Scholar

6.

◦ Marc-Antoine E.M.

◦ Mathieu C.

Biogaz et biométhane en Europe : leçons du Danemark, de l'Allemagne et de l'Italie.

Études de l'Ifri, 2019

<https://www.ifri.org/en/publications/etudes-de-lifri/biogas-and-biomethane-europe-lessons-denmark-germany-and-italy>

Voir dans l'article

Google Scholar

7.

ADBA

Rapport sur la politique de digestion anaérobie.

Association Méthanisation & Bioressources , 2019

Voir dans l'article

Google Scholar

8.

GIEC

AR6 Changement climatique 2021 : La base des sciences physiques.

Cambridge University Press , 2021

Voir dans l'article

Google Scholar

9.

Paris Agreement

Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques.

Paris Agreement, 2015

Voir dans l'article

Google Scholar

10.

- Rogelj J.
- Meinshausen M.
- Schaeffer M.
- Knutti R.
- Riahi K.

Impact de l'atténuation de courte durée sans CO₂ sur les budgets carbone pour stabiliser le réchauffement climatique.

Environ. Res. Lett. 2015; 10: 075001 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/7/075001>

Voir dans l'article

- Scopus (52)
- Référence croisée
- Google Scholar

11.

GIEC

Changement climatique 2022 : Atténuation du changement climatique.
Contribution du Groupe de travail III au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

Cambridge University Press , 2022

https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC_AR6_WGIII_FinalDraft_FullReport.pdf

Voir dans l'article

Google Scholar

12.

- Edouard B.
- Volker K.
- Elmar K.
- Keywan R.
- Robert S.
- Jarmo K.
- Robin L.
- Zébedée N.
- Marit S.
- Chris S
- et al.

Base de données des scénarios AR6 hébergée par l'IIASA.

Institut international d'analyse des systèmes appliqués , 2022

Voir dans l'article

Google Scholar

13.

- Reinelt T.
- McCabe BK
- Colline A.
- Harris P.
- Baillie C.
- Liebetrau J.

Mesures sur le terrain des émissions fugitives de méthane de trois installations australiennes de gestion des déchets et de biogaz.

Gestion des déchets 2022 ; 137 : 294-

303<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.012>

Voir dans l'article

- Scopus (0)
- PubMed
- Référence croisée
- Google Scholar

14.

- Reinelt T.
- Liebetrau J.

Surveillance et atténuation des émissions de méthane des soupapes de surpression d'une usine de biogaz.

Chim. Ing. Technol. 2020 ; 43 : 7-18<https://doi.org/10.1002/ceat.201900180>

Voir dans l'article

- Scopus (6)
- Référence croisée
- Google Scholar

15.

- Reinelt T.
- Delré A.
- Westerkamp T.
- Holmgren MA
- Liebetrau J.
- Scheutz C.

Utilisation comparative de différentes approches de mesure des émissions pour déterminer les émissions de méthane d'une usine de biogaz.

La gestion des déchets. 2017 ; 68 : 173-

185<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.053>

Voir dans l'article

- Scopus (24)
- PubMed
- Référence croisée
- Google Scholar

16.

- Liebetrau J.
- Reinelt T.
- Agostini A.
- Linke B.

Émissions de méthane des usines de biogaz.

AIE bioénergie , 2017

Voir dans l'article

Google Scholar

17.

- Liebetrau J.
- Reinelt T.
- Clemens J.
- Hafermann C.
- Friehe J.
- Weiland P.

Analyse des émissions de gaz à effet de serre de 10 usines de biogaz du secteur agricole.

Sci de l'eau. Technol. 2013 ; 67 : 1370-1379<https://doi.org/10.2166/wst.2013.005>

Voir dans l'article

- Scopus (67)
- PubMed
- Référence croisée
- Google Scholar

18.

- Bakkaloglu S.
- Lowry D.
- Fisher RE
- France J.L.
- Brunner D.
- Chen H.
- Nisbet EG

Quantification des émissions de méthane des usines de biogaz au Royaume-Uni.

Gestion des déchets 2021 ; 124 : 82-

93<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.01.011>

Voir dans l'article

- Scopus (17)
- PubMed
- Référence croisée
- Google Scholar

19.

- Scheutz C.
- Fredenslund AM

Taux d'émissions et pertes totales de méthane de 23 usines de biogaz.

Gestion des déchets 2019 ; 97 : 38-

46<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.029>.

Voir dans l'article

- Scopus (29).
- PubMed
- Référence croisée
- Google Scholar

20.

- savoirs traditionnels de chair
- Desjardins R.L.
- Worth D.

Émissions fugitives de méthane d'un biodigester agricole.

Biomasse Bioénergie. 2011 ; 35 : 3927-

3935<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.009>.

Voir dans l'article

- Scopus (95).
- Référence croisée
- Google Scholar

21.

- Daniel-Gromke J.
- Liebetrau J.
- Denisenko V.
- WS K.
- JH.

Le dispositif d'hémiarthroplastie humerale pour la prise en charge primaire et en échec des fractures proximales de l'humérus : une série de cas.

Ouvrez Orthop. J. 2015 ; 9 : 1-6<https://doi.org/10.2174/1874325001509010001>

Voir dans l'article

- PubMed
- Référence croisée
- Google Scholar

22.

- Godet en H
- VanderZaag AC
- Burt SD
- Wagner-Riddle C.
- Crella A.
- Desjardins R.L.
- MacDonald D.J.

Émissions de méthane provenant du digestat d'une usine de biogaz agricole.

Bioressource. Technol. 2016 ; 216 : 914-922
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.031>

Voir dans l'article

- Scopus (43).
- PubMed
- Référence croisée
- Google Scholar

23.

- Balcombe PS
- Brandon N.
- Hawkes A.

Caractérisation de la distribution des émissions de méthane et de dioxyde de carbone de la chaîne d'approvisionnement en gaz naturel.

J. Propre. Prod. 2018 ; 172 : 2019-2032
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.223>

Voir dans l'article

- Scopus (44).
- Référence croisée
- Google Scholar

24.

- Balcombe PS
- Anderson K.
- Speirs J.
- Brandon N.
- Hawkes A.

La chaîne d'approvisionnement en gaz naturel : l'importance des émissions de méthane et de dioxyde de carbone.

Maintien ACS. Chim. Ing. 2017 ; 5 : 3-20
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b00144>

Voir dans l'article

- Scopus (57).
- Référence croisée
- Google Scholar

25.

- Balcombe PS
- Anderson K.
- Speirs J.
- Brandon N.
- Hawkes A.

Émissions de méthane et de CO₂ de la chaîne d'approvisionnement en gaz naturel.

Institut du gaz durable , 2015

Voir dans l'article

Google Scholar

26.

- Brandt AR
- Heath GA
- Cooley D.

Les fuites de méthane des systèmes de gaz naturel suivent des distributions extrêmes.

Sciences et technologies de l'environnement. 2016 ; 50 : 12512-12520 <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04303>

Voir dans l'article

- Scopus (113)
- PubMed
- Référence croisée
- Google Scholar

27.

- Omara M.
- Zimmermann N.
- Sullivan M.
- Li X.
- Ellis A.
- Cesa R.
- Subramanien R.
- Bientôt AA
- Robinson A.L.

Émissions de méthane des sites de production de gaz naturel aux États-Unis : synthèse des données et estimation nationale.

Sciences et technologies de l'environnement. 2018 ; 52 : 12915-12925 <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03535>

Voir dans l'article

- Scopus (43)
- PubMed
- Référence croisée
- Google Scholar

28.

- Zavala-Araiza D.
- Álvarez RA
- Lyon D.R.
- Allen DT
- Marchese A.J.
- Zimmerle D.J.
- Hambourg SP

Les super-émetteurs dans les infrastructures de gaz naturel sont causés par des conditions de procédé anormales.

Nat. Commun. 2017; 8: 14012<https://doi.org/10.1038/ncomms14012>

Voir dans l'article

- Scopus (77)
- PubMed
- Référence croisée
- Google Scholar

29.

- Rutherford JS
- Sherwin ED
- Ravikumar AP
- Heath GA
- Englander J.
- Cooly D.
- Lyon D.
- Omara M.
- Langfitt Q.
- Brandt AR

Comblent l'écart de méthane dans les inventaires d'émissions de production de pétrole et de gaz naturel aux États-Unis.

Nat. Commun. 2021; 12: 4715<https://doi.org/10.1038/s41467-021-25017-4>

Voir dans l'article

- Scopus (8)
- PubMed
- Référence croisée
- Google Scholar

30.

- Lin J.C.
- Barès R.
- Haricot B
- García M.
- Croman E.
- Lyman S.

Diminution des émissions de méthane et taux de fuite élevés et constants observés sur plusieurs années dans un bassin de production de pétrole/gaz de l'ouest des États-Unis.

Sci. Rép. 2021 ; 11 : 22291<https://doi.org/10.1038/s41598-021-01721-5>

Voir dans l'article

- Scopus (2)
- PubMed
- Référence croisée
- Google Scholar

31.

- Paolini V.
- Petracchini F.
- M secrète
- Tomassetti L.
- Eh bien N
- Cecinato A.

Impact environnemental du biogaz : bref état des lieux des connaissances actuelles.

J. Environ. Sci. Santé A Tox Hazard Subst. Environ. Ing. 2018 ; 53 : 899-906<https://doi.org/10.1080/10934529.2018.1459076>

Voir dans l'article

- Scopus (145)
- PubMed
- Référence croisée
- Google Scholar

32.

EDF

Atténuation du méthane dans l'industrie pétrolière et gazière.

<https://business.edf.org/insights/methane-mitigation-in-the-oil-gas-industry/>

Date : 2019

Voir dans l'article

Google Scholar

33.

AIE

Réduire les fuites de méthane de l'industrie pétrolière et gazière.

AIE , Paris 2021

Voir dans l'article

Google Scholar

34.

- Zavala-Araiza D.
- Lyon D.
- Álvarez RA
- Palacios c.
- Harriss R.
- Lan X.
- Talbot R.
- Hambourg SP

Vers une définition fonctionnelle des super-émetteurs de méthane : application aux sites de production de gaz naturel.

Environ. Sci. Technol. 2015; 49: 8167-8174<https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00133>

Voir dans l'article

35.

- Brandt AR
- Heath GA
- Court EA
- O'Sullivan F.
- Pétron G.
- Jordanie SM
- Tans P.
- Wilcox J.
- Gopstein AM
- Arent D.
- et al.

Fuites de méthane des systèmes de gaz naturel nord-américains.

La science. 2014 ; 343 : 733-735<https://doi.org/10.1126/science.1247045>

Voir dans l'article

36.

- Dernier RM
- Thorpe AK
- Foster KT
- Rafique T.
- Hopkins FM
- Yadav V.
- Bue B.D.
- Thompson D.R.
- Conley S.
- Colombi N.K.
- et al.

Les super-émetteurs de méthane de Californie.

La nature. 2019 ; 575 : 180-184 <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1720-3>

Voir dans l'article

37.

- Álvarez RA
- Zavala-Araiza D.
- Lyon D.R.
- Allen DT
- Barkley ZR
- Brandt AR
- Davis K.J.
- Herndon SC
- Jacob D.J.
- Karion A.
- et al.

Évaluation des émissions de méthane de la chaîne d'approvisionnement pétrolière et gazière aux États-Unis.

La science. 2018 ; 361 : 186-188 <https://doi.org/10.1126/science.aar7204>

Voir dans l'article

38.

- Mathieu Dumont N.
- Luning L.
- Yildiz I.
- Koup K.

Émissions de méthane dans la production de biogaz.

dans : Le manuel du biogaz. Elsevier , 2013: 248-

266 <https://doi.org/10.1533/9780857097415.2.248>

39.

- Zeng J.
- Xu R.
- Soleil R
- Niu L.
- Liu Y.
- Zhou Y.
- Zeng W.
- Yue Z.

Évaluation du flux d'émission de méthane d'un écosystème typique de fermentation de biogaz en Chine.

J. Propre. Prod. 2020 ; 257 : 120441<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120441>

40.

- Doehler H.
- Niebaum A.
- Roth U.
- Amon T.
- Balsari P.
- Friedl G.

Émissions de gaz à effet de serre et coûts d'atténuation dans deux usines de biogaz européennes.

Entretiens d'experts de Gülzow , 2009

41.

- Bijoux F
- Dinuccio E.
- Balsari P.

Potentiel de biogaz résiduel des réservoirs de stockage du digestat non séparé et de la fraction liquide digérée.

Bioressource. Technol. 2011 ; 102 : 10248-10251<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.08.076>

42.

- Vergote T.L.
- Bodé S.
- Le Dobbelaere AE
- Buysse J.
- Merers E.
- Volcke EI

Suivi des émissions de méthane et de protoxyde d'azote du stockage du digestat suite à la mono-digestion du fumier.

Biosyst. Ing. 2020 ; 196 : 159-171<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.05.011>

43.

ENVELOPPER

PAS 110:2014. Spécification pour le digestat entier, la liqueur séparée et les fibres séparées dérivées de la digestion anaérobie de matériaux biodégradables séparés à la source.

Le BSI , 2014

https://wrap.org.uk/sites/default/files/2021-03/PAS110_2014.pdf

44.

Ricardo Énergie et Environnement

Méthodologie d'évaluation des fuites de méthane des usines de DA. Partie I : Rapport sur la catégorisation proposée des installations de DA et revue de la littérature sur les technologies de surveillance du méthane.

Ricardo Énergie et Environnement , 2017

https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/786756/Methodology_to_Assess_Methane_Leakage_from_AD_Plants_final_report_part1.pdf

45.

- Paolini V.
- Torre M.
- Jacobini W.
- Pasteurs M.
- M secrète
- Tomassetti L.
- Carnevale M.
- Gallucci F.
- Petracchini F.
- Guerrier E.

Séparation CO₂/CH₄ par absorption de carbonate de potassium à chaud pour la valorisation du biogaz.

Int. J. Greenh. Gas Control. 2019; 83: 186-

194<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.02.011>

46.

- Mc Murray A.
- Pearson T.
- Casarim F.

Conseils sur l'application de l'approche de Monte Carlo aux analyses d'incertitude dans la foresterie et la comptabilité des gaz à effet de serre.

Winrock International , 2017

47.

- Fredenslund AM
- Hinge J.
- Holmgren MA
- Rasmussen SG
- Scheutz C.

Mesures par télédétection sur site et au sol des émissions de méthane de quatre usines de biogaz : une étude comparative.

Bioresource. Technol. 2018 ; 270 : 88-

95<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.080>

48.

- Holmgren MA
- Hansen MN
- Reinelt T.
- Westerkamp T.
- Jorgensen L.
- Scheutz C.
- Delré A.

Mesures des émissions de méthane provenant de la production de biogaz – Collecte de données et comparaison des méthodes de mesure : rapport Energiforsk 2015 : 158.

Energiforsk AB , 2015

49.

- Jensen MB
- Moller J.
- Modèle J
- Scheutz C.

Quantification des émissions de gaz à effet de serre d'une installation de traitement biologique des déchets.

Gestion des déchets 2017 ; 67 : 375-

384<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.033>

50.

- Zavala-Araiza D.
- Lyon D.R.
- Álvarez RA
- Davis K.J.
- Harriss R.
- Herndon SC
- Karion A.
- Court EA
- Agneau BK
- Lan X.
- et al.

Réconcilier les estimations divergentes des émissions de méthane du pétrole et du gaz.

Proc. Natl. Acad. Sci. États-Unis d'Amérique 2015 ; 112 : 15597-15602 <https://doi.org/10.1073/pnas.1522126112>

51.

Commission européenne
Stratégie de l'UE pour réduire les émissions de méthane.

Commission européenne , 2020

52.

- Kupper T
- Hani C
- Neftel A.
- Kincaid C.
- Bühler M
- Amon B.
- Vander Zaag A.

Émissions d'ammoniac et de gaz à effet de serre liées au stockage du lisier - Bilan.

Agric. Écosystème. Environ. 2020 ; 300 : 106963 <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106963>

53.

Union européenne
Directive 2009/28/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009 concernant la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables et modifiant puis abrogeant les directives 2001/77/CE et 2003/30/CE.

Journal officiel de l'Union européenne , 2009

54.

Commission européenne
SWD(2014) 259 Final, État des lieux sur la durabilité de la biomasse solide et gazeuse utilisée pour l'électricité, le chauffage et le refroidissement dans l'UE.

Commission européenne , 2014

55.

- Bakkaloglu S.
- Lowry D.
- Fisher RE
- France J.L.
- Nisbet EG

Caractérisation isotopique du carbone et oxydation des émissions de méthane des décharges britanniques par des mesures atmosphériques.

Gestion des déchets 2021 ; 132 : 162-

175 <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.07.012>

56.

Bioénergie I.
Le manuel du biogaz.

Woodhead Publishing Limited , Royaume-Uni 2013

57.

- Liebetrau J.
- Clemens J.
- Cuhls C.
- Hafermann C.
- Friehe J.
- Weiland P.
- Daniel-Gromke J.

Émissions de méthane des installations de production de biogaz dans le secteur agricole.

10. Bibliothèque en ligne Wiley , 2010: 595-

599 <https://doi.org/10.1002/elsc.201000070>

58.

- Château M
- Piringer M.
- Camarade L.
- Poinçon Baumann K.
- Huber-Humer M.

Récupération des émissions multisources dans une usine de biogaz basée sur des calculs de dispersion inverse - un exemple concret.

Environ. Monit. Assess. 2014; 186: 6251-6262 <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3852-0>

59.

- Château M
- Vesenmaier A.
- Flandre C.
- Piringier M.
- Stenzel S
- Huber-Humer M.

Comparaison des modèles de transport lagrangien avant et arrière pour déterminer les émissions de méthane des installations de digestion anaérobie.

Atmos. Environ. X. 2021; 12: 100131<https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2021.100131>

60.

- Daelman MR
- van Voorthuizen EM
- van Dongen UG
- Volcke EI
- van Loosdrecht MC

Émission de méthane lors du traitement des eaux usées municipales.

Eau Rés. 2012 ; 46 : 3657-3670<https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.04.024>

61.

- Delré A.
- Modèle J
- Scheutz C.

Quantification des émissions de gaz à effet de serre des stations d'épuration, par une méthode de dispersion de gaz traceur.

Sci. Total Environ. 2017; 605-606: 258-268<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.177>

62.

- Delré A.
- Modèle J
- Scheutz C.

Quantification des émissions fugitives de méthane de l'usine de biogaz de Linköping (SE).

Université technique du Danemark, DTU Environnement , 2014: 15

63.

- Groth A.
- Maurer C.
- Reiser M.
- Kranert M.

Détermination des taux d'émission de méthane sur une installation de biogaz à l'aide de données de spectrométrie d'absorption laser.

Bioressource. Technol. 2015 ; 178 : 359-361 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.112>

64.

- Harper LA
- savoirs traditionnels de chair
- Tisserand KH
- Wilson J.D.

L'effet de la production de biocarburants sur les émissions de méthane et d'ammoniac des élevages porcins.

J. Environ. Qual. 2010; 39: 1984-1992 <https://doi.org/10.2134/jeq2010.0172>

65.

Jonerholm LH, K.

Sweco Environment AB Pertes de méthane dans le système de biogaz.

Bus Baltique Biogaz , 2012

<https://docplayer.net/29996723-Methane-losses-in-the-biogas-system.html>

66.

- Paredes M.
- Guereca LP
- Molina L.
- Noyola A.

Émissions de méthane des digesteurs anaérobies de boues au Mexique : détermination sur site par rapport à la méthode de niveau 1 du GIEC.

Sci. Total Environ. 2019; 656: 468-474 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.373>

67.

- Noyola A.
- Paredes M.
- Guereca L.
- Molina L.
- Zavala M.

Facteurs de correction du méthane pour estimer les émissions des installations de traitement aérobie des eaux usées sur la base de données de terrain au Mexique et d'une revue de la littérature.

Sci. Total Environ. 2018; 639: 84-91 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.111>

68.

- Reinelt T.
- Liebetrau J.
- Nelles M.

Analyse des émissions de méthane opérationnelles des soupapes de surpression des stockages de biogaz des usines de biogaz.

Bioressource. Technol. 2016 ; 217 : 257-264 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.073>

69.

Ricardo Énergie et Environnement

Méthodologie d'évaluation des fuites de méthane des usines de DA Partie : 2
Méthodologie de surveillance.

Ricardo Énergie et Environnement , 2017

https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/786757/Methodology_to_Assess_Methane_Leakage_from_AD_Plants_final_report_part2.pdf

70.

- Saxo M.
- Schik M.
- Bolli S.
- Soltermann-Post A.
- Van Caenegem L.

Pertes de méthane des usines de biogaz agricoles.

Office fédéral de l'énergie OFEN , Berne 2013

71.

- Samuelsson J.
- Delré A.
- Tulin S.
- Hadi S.
- Offerle B.
- Scheutz C.

Technologies optiques appliquées parallèlement aux approches sur site et à distance pour la quantification des émissions de gaz climatiques dans une usine de traitement des eaux usées.

Eau Rés. 2018 ; 131 : 299-309 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.018>

72.

- Tauber J.
- Parravicini V.
- Svardal K.
- Krampe J.

Quantification des émissions de méthane des digesteurs anaérobies.

Sci de l'eau. Technol. 2019 ; 80 : 1654-1661<https://doi.org/10.2166/wst.2019.415>

73.

- Yoshida H.
- Modèle J
- Scheutz C.

Mesure intégrée à l'usine des émissions de gaz à effet de serre d'une station d'épuration municipale.

Eau Rés. 2014 ; 61 : 108-118<https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.05.014>

74.

- Dhingra R.
- Urgences Christensen
- Liu Y.
- Zhong B.
- Wu C.-F.
- Yost MG
- Remais J.V.

Réductions des émissions de gaz à effet de serre des digesteurs anaérobies domestiques liées à un assainissement durable dans les zones rurales de la Chine.

Sciences et technologies de l'environnement. 2011 ; 45 : 2345-2352<https://doi.org/10.1021/es103142y>

75.

- Angélidaki I.
- Boé K.
- Ellegard L.

Effet des conditions de fonctionnement et de la configuration du réacteur sur l'efficacité des usines de biogaz à grande échelle.

Sci de l'eau. Technol. 2005 ; 52 : 189-194<https://doi.org/10.2166/wst.2005.0516>

76.

- Wolf D.
- Scherello A.

Mesure des émissions de méthane à l'usine de biogaz d'Einbeck à l'aide de CHARM® (Methane Emission Measurement at Biogas Plant Einbeck using CHARM®).

Gwf GasErdgas, Deutscher Industrieverlag GmbH , 2013: 1-7

77.

- Kvist T.
- Aryal N.

Perte de méthane des usines de valorisation du biogaz exploitées commercialement.

Gestion des déchets 2019 ; 87 : 295-

300<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.023>

78.

- Westerkamp T.
- Reinelt T.
- Liebetrau J.

Mesures scientifiques des émissions de méthane avec des méthodes à distance et sur site en comparaison.

Présentation au 2ème atelier IBBA à Kiel, Allemagne , 2014

79.

- Holmgren MA
- Hellstrom H.
- Peterson A.
- Blom A.

L'accord volontaire suédois pour le contrôle des émissions de méthane des usines de biogaz.

Institut de recherche technique SP de Suède , 2012

80.

- Ashmann V.
- Kissel R.
- Gronauer A.

Émissions de gaz d'échappement et performances des centrales de production combinée de chaleur et d'électricité au biogaz.

Recherche en génie agricole. 2006 ; 12 : 46-52

81.

- le noir M.
- Van Dyke G.
- Klimstra J.

Émissions de méthane des moteurs à gaz alimentant des installations de production combinée de chaleur et d'électricité.

J. Integr. Environ. Sci. 2012; 9: 113-

125<https://doi.org/10.1080/1943815x.2012.691885>

82.

- Woess-Gallasch S.
- Oiseau N.
- En ligne Enzinger P. (1999).
- Jungmeier G.
- Padinger R.
- Pena N.
- et al.

Avantages des gaz à effet de serre d'une usine de biogaz en Autriche.

Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH. Ressources—Institut de l'eau, de l'énergie et de la durabilité , 2011

83.

- Woess-Gallasch S.
- En ligne Enzinger P. (1999).
- Jungmeier G.
- Padinger R.

Émissions de gaz à effet de serre des usines de biogaz.

Graz , 2007

84.

- Al Seadi T.
- Drosch B.
- Fuchs W.
- Rutz D.
- Janssen R.

Qualité et utilisation du digestat de biogaz.

dans : Le manuel du biogaz. Elsevier , 2013: 267-301 <https://doi.org/10.1533/9780857097415.2.267>

85.

- Czubaszek R.
- Wysocka-Czubaszek A.

Émissions de dioxyde de carbone et de méthane provenant de champs fertilisés avec du digestat d'une usine de biogaz agricole.

Int. Agrophys. 2018 ; 32 : 29-37 <https://doi.org/10.1515/intag-2016-0087>

86.

- Château M
- Piringer M.
- Huber-Humer M.

Détermination des émissions de méthane des installations de biogaz – Aspects opérationnels et météorologiques.

Bioressource. Technol. 2015 ; 191 : 234-243 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.016>

87.

- Jensen MB
- Moller J.
- Scheutz C.

Évaluation d'une installation combinée de digestion anaérobie sèche et de traitement post-compostage de déchets ménagers organiques triés à la source, à l'aide d'une analyse des flux de matières et de substances et d'un inventaire du cycle de vie.

Gestion des déchets 2017 ; 66 : 23-

35<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.029>.

88.

- Maldaner L.
- Wagner-Riddle C.
- VanderZaag AC
- Gordon R.
- Duke C.

Émissions de méthane provenant du stockage du digestat dans une installation de biogaz de fumier laitier.

Agric. Pour. Météorol. 2018 ; 258 : 96-

107<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.184>.

89.

- Osita K.
- Okumura T.
- Takaoka M.
- Fujimori T.
- Appels L.
- Dewil R.

Émissions de méthane et de protoxyde d'azote suite à la digestion anaérobie des boues dans les stations d'épuration japonaises.

Bioressource. Technol. 2014 ; 171 : 175-

181<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.08.081>

90.

- Awiszus S.
- Meissner K.
- Reyer S.
- Müller J.

Émissions d'ammoniac et de méthane lors du séchage du digestat de biogaz déshydraté dans un séchoir à convoyeur à deux bandes.

Bioressource. Technol. 2018 ; 247 : 419-

425<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.099>.

91.

- Bühler M
- Hani C
- Ammann C.
- Bronnimann S.
- Kupper T

Utilisation de la méthode de dispersion inverse pour déterminer les émissions de méthane des usines de biogaz et des usines de traitement des eaux usées avec des configurations de sources complexes.

Atmos. Environ. 2022; 13: 100161<https://doi.org/10.1016/j.aecoa.2022.100161>

92.

- Senga Kiessé T.
- MS Corson
- Eugène M.

Le potentiel de l'estimation de la densité du noyau pour modéliser les relations entre les caractéristiques des exploitations laitières.

Agric. Syst. 2022 ; 199 : 103406<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103406>

93.

- Čížek P.
- Sadikoglu S.

Régression non paramétrique robuste : une revue.

Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Statistique 2020 ; 12 :
e1492<https://doi.org/10.1002/wics.1492>

94.

- Selingerova I.
- Katina S.
- Horova I.

Comparaison des modèles de régression de survie paramétriques et semi-paramétriques avec l'estimation par noyau.

J. Stat. Calcul. Simulé. 2021 ; 91 : 2717-
2739<https://doi.org/10.1080/00949655.2021.1906875>

95.

Scott DW

Estimation de la densité multivariée : théorie, pratique et visualisation.

John Wiley et fils , 2015<https://doi.org/10.1002/9781118575574>

96.

- Rubinstein RY
- Kroese DP

Simulation et méthode de Monte Carlo.

John Wiley et fils , 2011

Informations sur l'article

Historique des publications

Publié: 17 juin 2022

Accepté : 23 mai 2022

Reçu sous forme révisée : 17 avril 2022

Reçu : 7 février 2022

Identification

DOI : <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.05.012>

droits d'auteur

© 2022 Le(s) Auteur(s). Edité par Elsevier Inc.

Licence utilisateur

[Attribution Creative Commons \(CC BY 4.0\)](#) |

[Comment réutiliser](#)  Icône d'informations

ScienceDirect

[Accéder à cet article sur ScienceDirect](#)

Les figures

- Résumé graphique 
- Figure 1 Répartition cumulée des émissions de CH₄ de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement 
- Figure 2 Littérature Émissions de CH₄ à différentes étapes de la chaîne d'approvisionnement en biométhane 
- Figure 3 Littérature Émissions de CH₄ du stockage ouvert et fermé du digestat 
- Figure 4 Littérature Émissions de CH₄ provenant de différentes technologies de valorisation du biogaz 
- Figure 5 Chaque étape des émissions avec les mesures sur l'ensemble du site et les exécutions de MC 

Articles Liés

- Principaux fournisseurs à l'origine des émissions atmosphériques de mercure via les chaînes d'approvisionnement mondiales

Qi et al.

Une Terre 25 octobre 2019

- En bref
- Texte intégral
- PDF

Archives ouvertes

- Contrôles des plantes vasculaires sur les émissions de méthane provenant des zones humides de formation de tourbe du nord

Joabsson et al.

Tendances en écologie et évolution 01 octobre 1999

- En bref
- Texte intégral
- PDF

- Contribution du biofilm périphytique des sols de paddy à la fixation du dioxyde de carbone et aux émissions de méthane

Wang et al.

L'Innovation 26 novembre 2021

- En bref
- Texte intégral
- PDF

Libre accès