



HAL
open science

Méthanisation : bénéfiques et impacts agronomiques et environnementaux

Florent Levavasseur, Léa Boros, Fabrice Beline, Sophie Carton, Marco Carozzi, Lucie Martin, Philippe Martin, Sabine Houot

► **To cite this version:**

Florent Levavasseur, Léa Boros, Fabrice Beline, Sophie Carton, Marco Carozzi, et al.. Méthanisation : bénéfiques et impacts agronomiques et environnementaux. Les soirées scientifiques de Melle, Feb 2024, Melle, France. hal-04495385

HAL Id: hal-04495385

<https://hal.inrae.fr/hal-04495385>

Submitted on 8 Mar 2024

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

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

Les soirées scientifiques de Melle

Melle, 15 janvier 2024

Méthanisation : bénéfices et impacts agronomiques et environnementaux

Florent Levavasseur¹, Léa Boros¹, Fabrice Béline², Sophie Carton³, Marco Carozzi⁴, Lucie Martin¹, Philippe Martin⁴, Sabine Houot¹

¹ INRAE, AgroParisTech, UMR ECOSYS, Palaiseau, France

² INRAE, Intitut Agro, UMR SAS, Rennes, France

³ AgroParisTech, Ferme de Grignon, Thiverval-Grignon, France

⁴ INRAE, AgroParisTech, UMR SAD-APT, Palaiseau, France

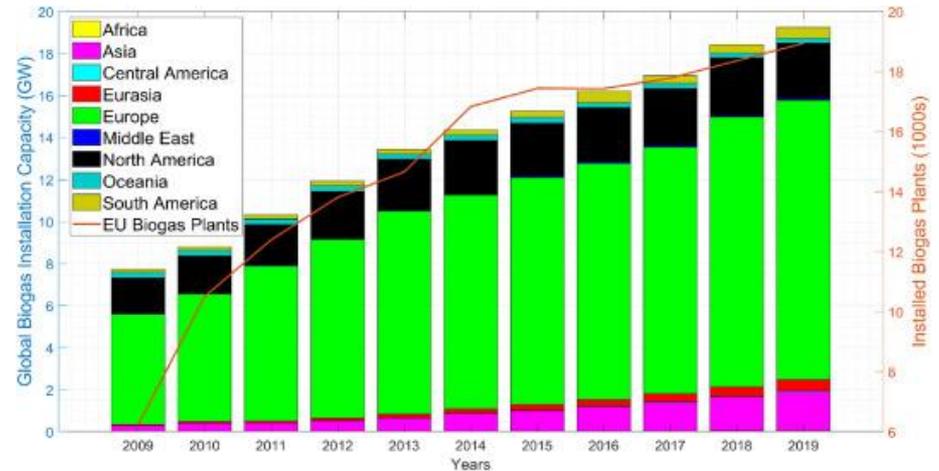
Principe de la méthanisation

- Production de biogaz par fermentation anaérobie (sans oxygène) de résidus organiques
- Utilisation directe possible du biogaz en injection ou BioGNV (véhicule), ou en cogénération (chaleur + électricité)
- Diversité de substrats utilisables : effluents d'élevage, déchets agro-industriels, déchets alimentaires, culture intermédiaire à vocation énergétique (CIVE), culture dédiée...
- Résidus de la méthanisation : le digestat, utilisé en fertilisant / amendement organique



Développement de la méthanisation dans le monde et en Europe

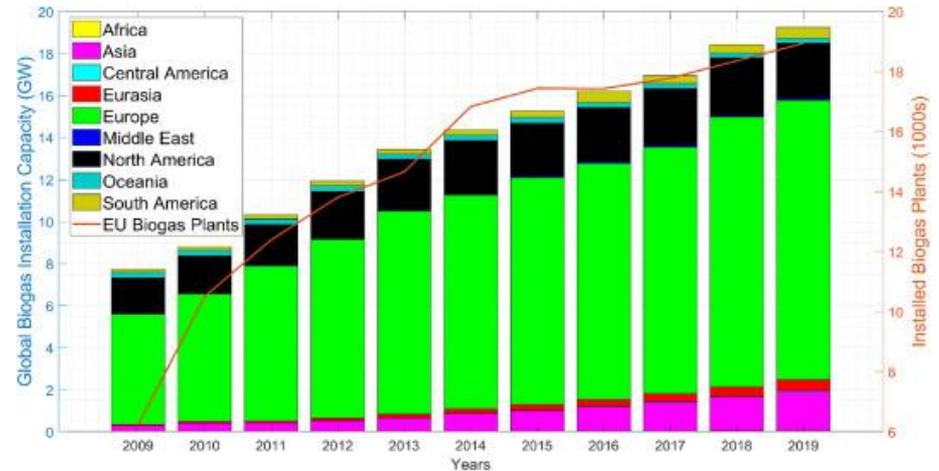
- Méthanisation principalement développée en Europe, récemment



Bumharter et al. (2023)

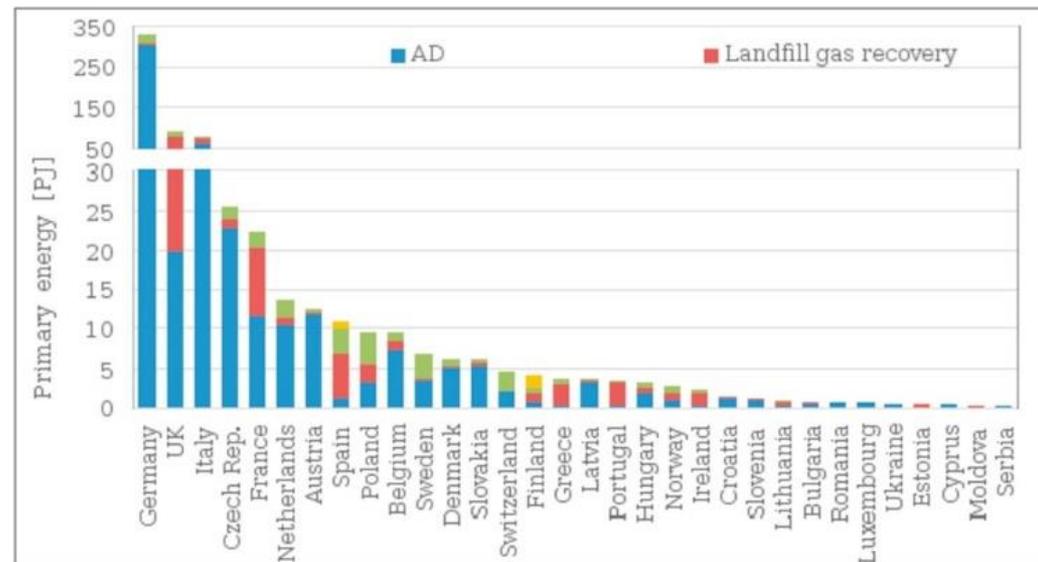
Développement de la méthanisation dans le monde et en Europe

- Méthanisation principalement développée en Europe, récemment



Bumharter et al. (2023)

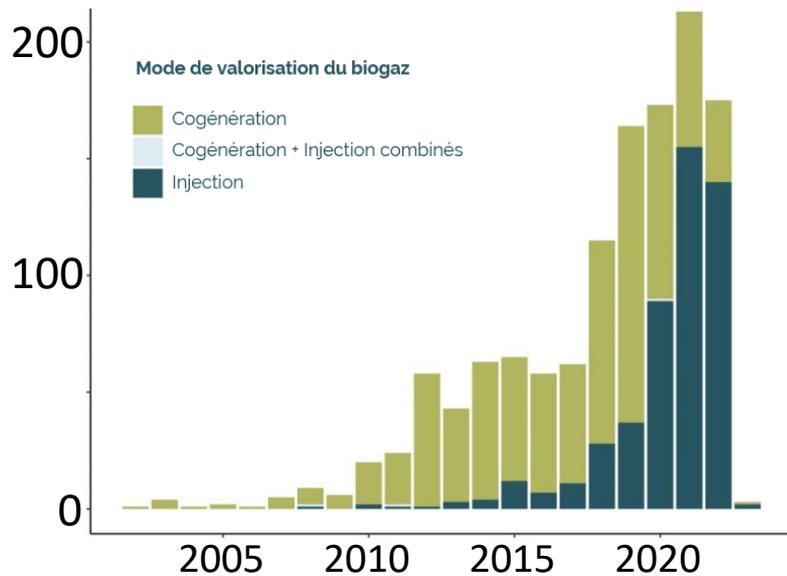
- En Europe, principalement développée en Allemagne, UK et Italie



Scarlat et al. (2018)

Développement de la méthanisation en France

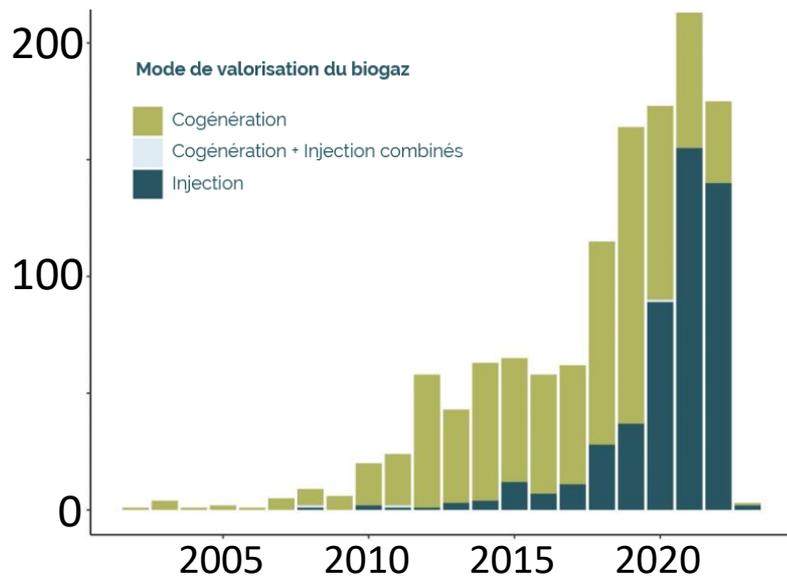
- Développement + récent et soutenu de la méthanisation en France, initialement en cogénération, puis en injection
- Développement soutenu par diverses politiques publiques



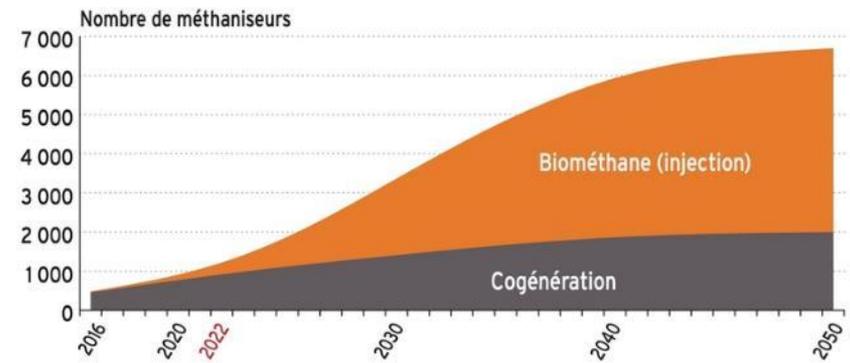
Nombre de nouveaux méthaniseurs par an en France (source des données : SINOE)

Développement de la méthanisation en France

- Développement + récent et soutenu de la méthanisation en France, initialement en cogénération, puis en injection
- Développement soutenu par diverses politiques publiques
- Biogaz en 2050 dans différentes perspectives : 30 à 40% du gaz utilisé, 10 à 15% de l'énergie finale consommée (*Béline et al., 2023*)



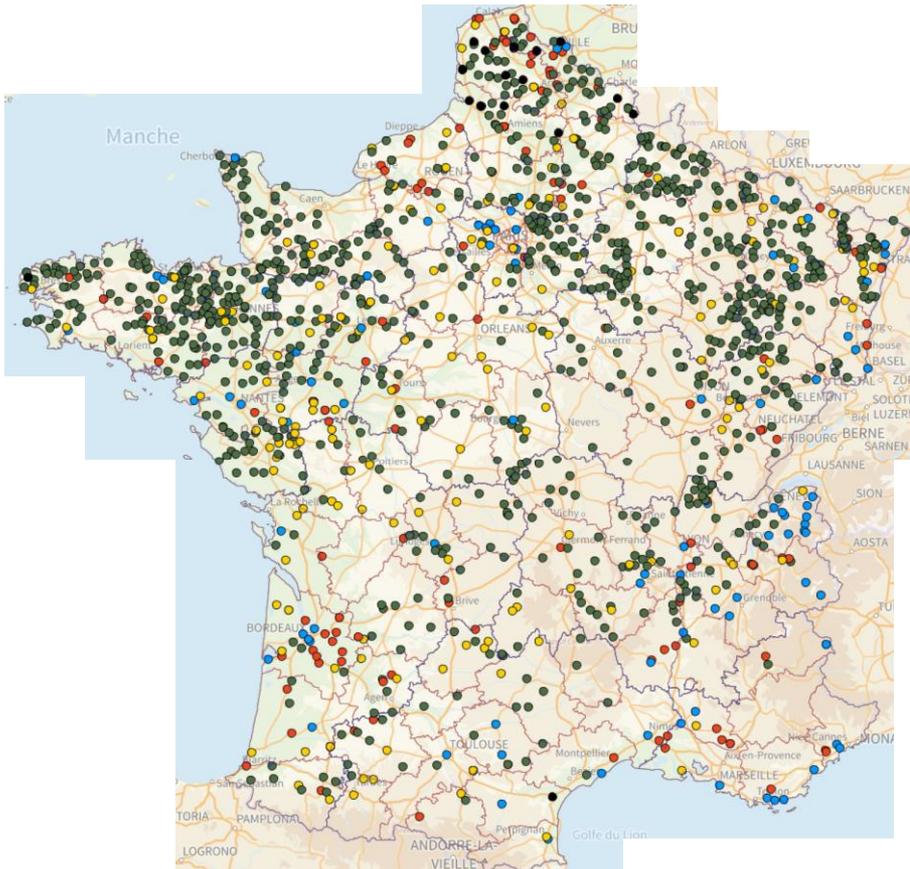
Nombre de nouveaux méthaniseurs par an en France (source des données : SINOE)



Nombre de méthaniseurs en France jusqu'en 2022 et projections jusqu'en 2050 (Solagro)

Répartition des sites en France par type

- Etat des lieux au 1^{er} janvier 2023 (*Ademe, 2023*)
 - Méthanisation plus développée dans la moitié nord
 - 73% des unités à la ferme
 - Sites en injection sont devenus majoritaires (53%)



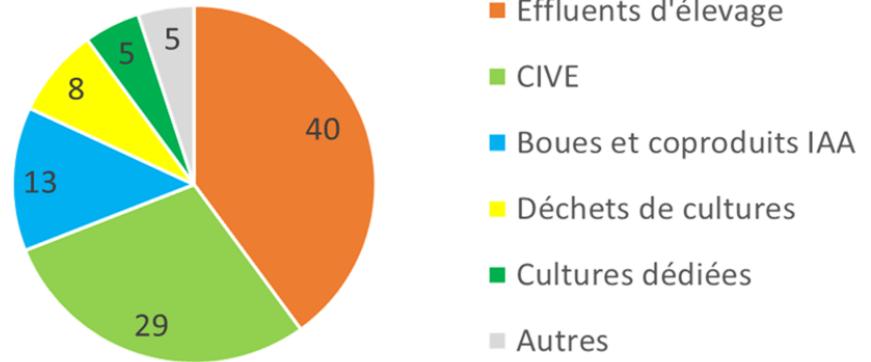
*Unités de méthanisation opérationnelles
(au 05/02/2024) (ADEME-SINOE)*

- A la ferme
- Centralisée / Territoriale
- Industrielle
- STEP
- Déchets ménagers et assimilés
- Autre

Les substrats méthanisés

- Effluents d'élevage et CIVE sont les principaux substrats méthanisés en France (idem dans les perspectives)

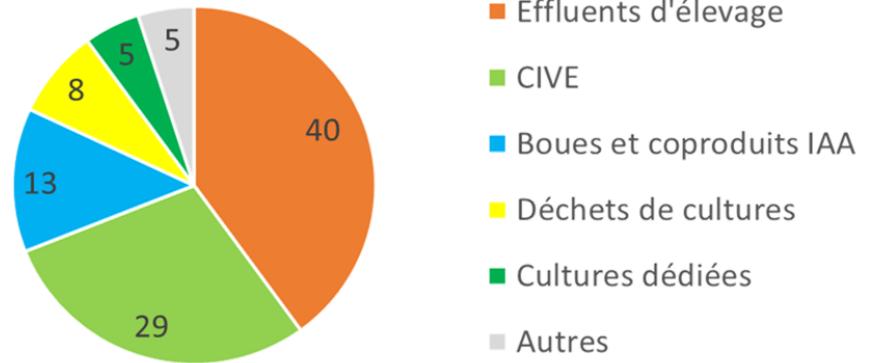
*Répartition massique (%)
du gisement valorisé en
méthanisation agricole
en 2020 (Ademe, cité
dans Salmon, 2021)*



Les substrats méthanisés

- Effluents d'élevage et CIVE sont les principaux substrats méthanisés en France (idem dans les perspectives)

*Répartition massique (%)
du gisement valorisé en
méthanisation agricole
en 2020 (Ademe, cité
dans Salmon, 2021)*

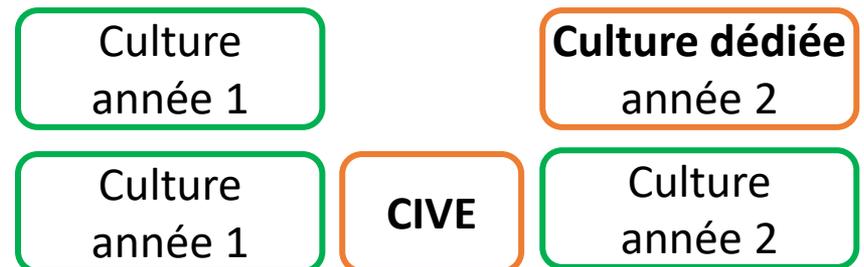


- Différences cultures dédiées et CIVE :
 - Culture dédiée : « remplace » la culture à vocation alimentaire (ou autre) produite normalement sur la parcelle agricole
 - Culture intermédiaire à vocation énergétique (CIVE) : s'insère entre les deux cultures à vocation alimentaire (ou autre)

Avant méthanisation



Après méthanisation



Quels bénéfices et impacts environnementaux ?

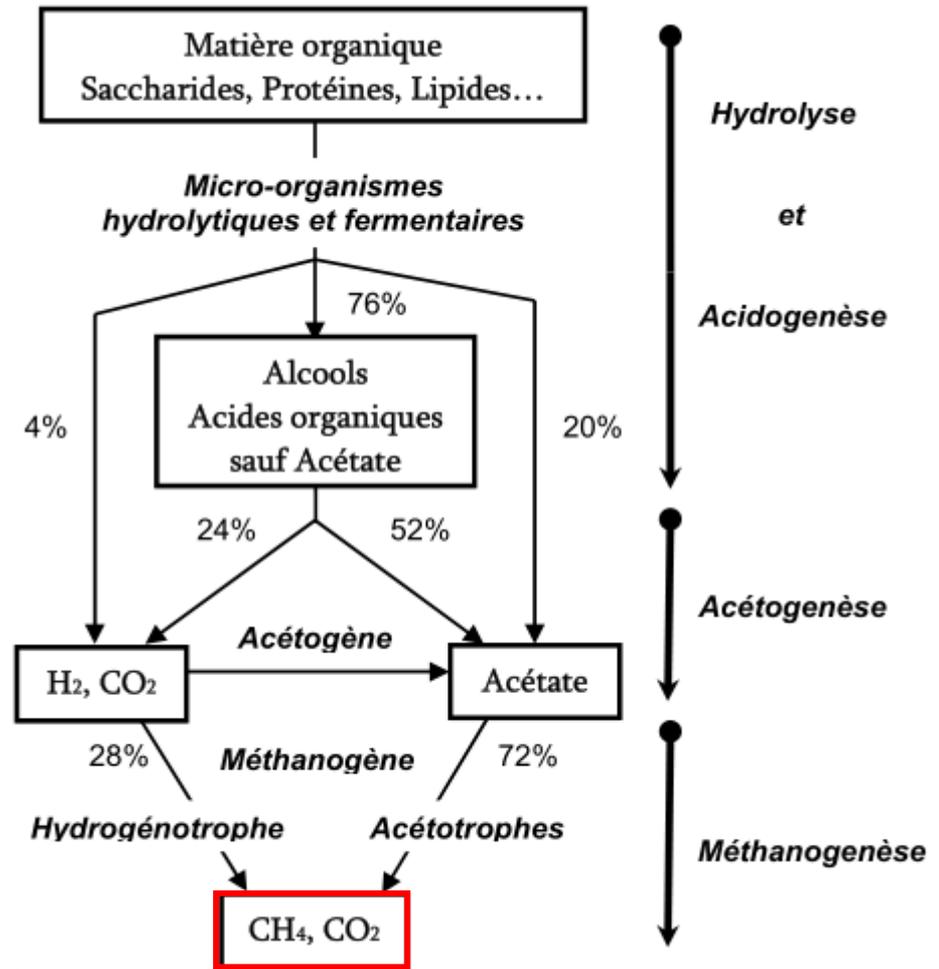
- Production d'énergie renouvelable et substitution d'énergie fossile
- Fuite / émissions au stockage / émissions liées au transport
- Passage (partiel) d'effluents bruts et/ou engrais minéraux à digestat
- Imports de nutriments sur la ferme (économie d'engrais ?), mais possible augmentation des besoins (CIVE)
- Production de CIVE et/ou cultures dédiées : changement de succession, intrants (ferti, phyto, irrigation...), concurrence avec la production alimentaire ?
- Autres changements ?
- En comparaison à d'autres filières de traitement des déchets ou de production d'énergie ?

Plan

- Introduction
- Que se passe-t-il dans un méthaniseur ?
- Quels sont les effets du digestat sur la santé des sols ?
- La méthanisation permet-elle une diversification des systèmes de culture ?
Met-elle en danger le maintien des prairies ?
- La méthanisation permet-elle une augmentation du bouclage des cycles ?
Une réduction de la consommation des engrais ? Des autres intrants ?
- Quelles performances agronomiques et environnementales associées ?
Quel bilan environnemental en comparaison à d'autres filières ?
- Conclusion

La digestion anaérobie de la matière organique

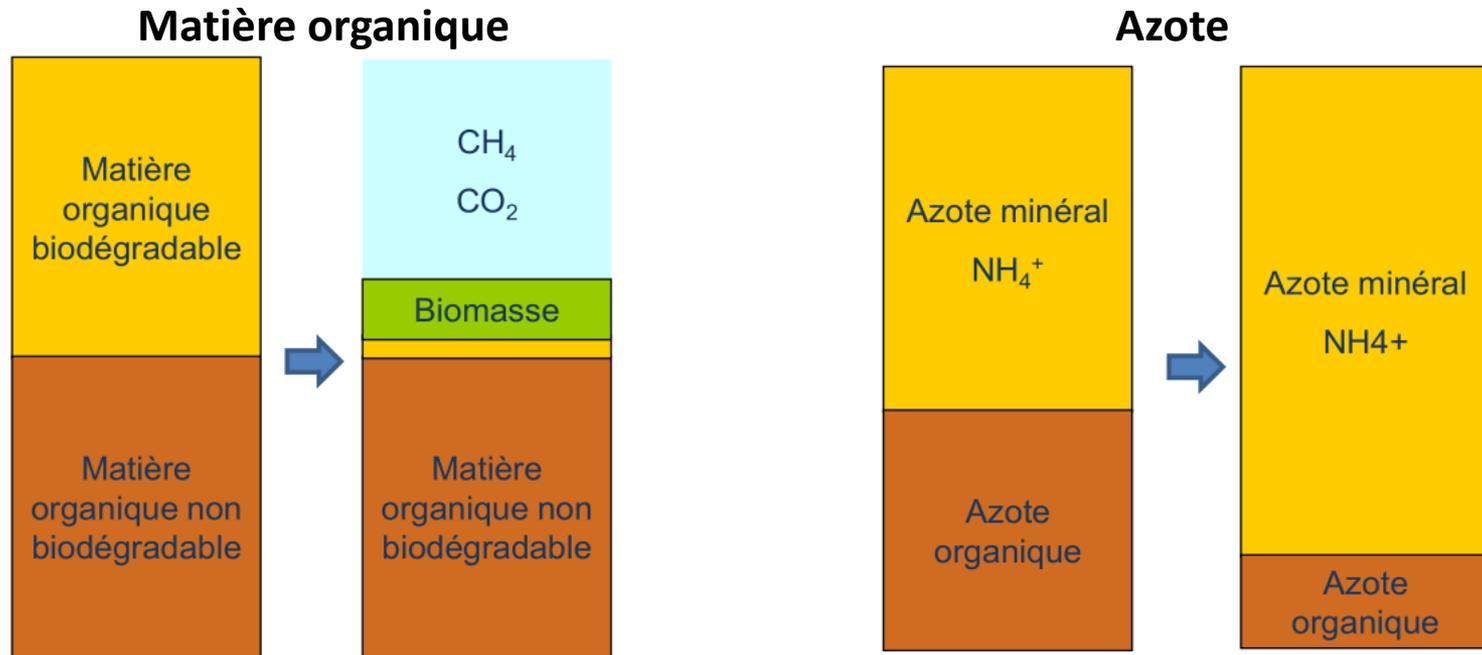
- Conversion de composés organiques complexes en méthane (CH_4) et en dioxyde de carbone (CO_2)
- Action concertée de microorganismes appartenant à une communauté microbienne complexe
- Conditions anaérobies (sans oxygène)
- Différentes conditions de température possibles :
 - Psychrophile : 5-25°C
 - Mésophile : 30-40°C
 - Thermophile : 45-60°C } Nécessité de chauffage



Cresson (2006)

Transformation de la matière organique lors de la méthanisation

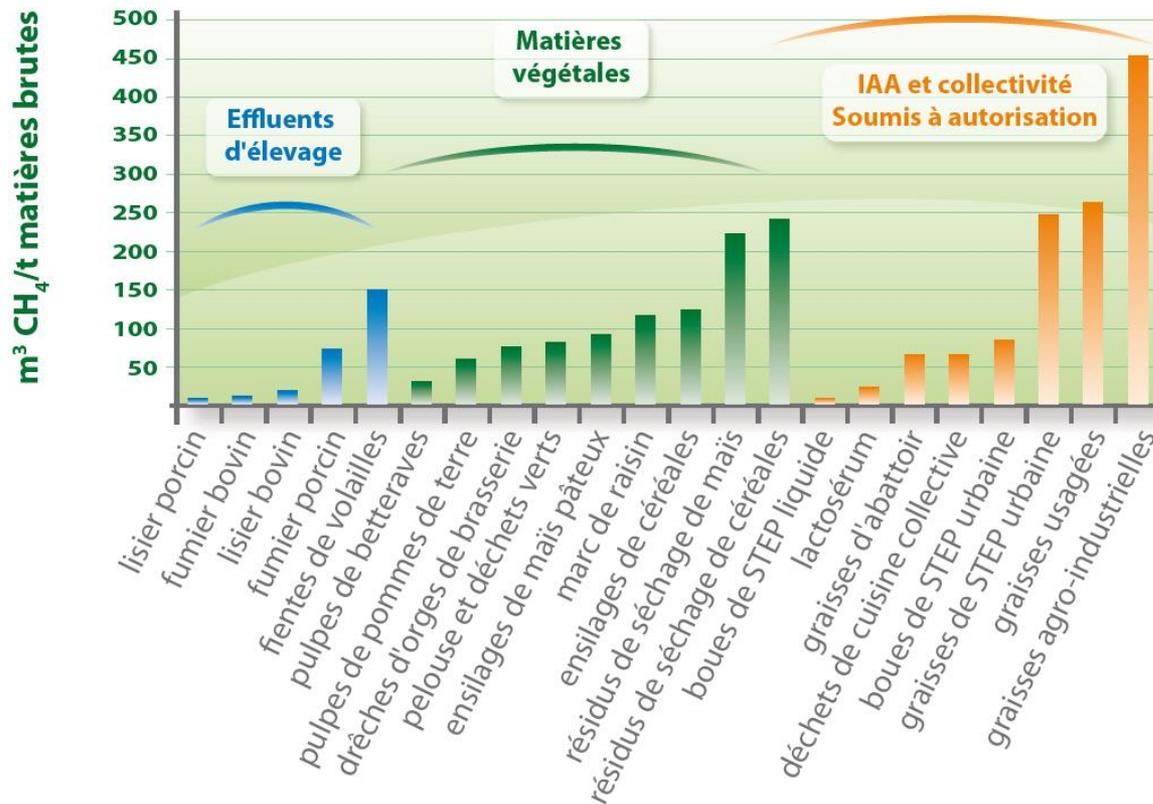
- \searrow matière organique dans le digestat, mais enrichissement relatif en composés + stables (- facilement biodégradable)
- \approx conservation de l'azote dans le digestat, mais \nearrow de la fraction minérale (directement disponible pour les plantes)
- Conservation des autres éléments (P, K...)



Girault (2019)

Différents potentiels méthanogènes

- Potentiel méthanogène = quantité de méthane produit par un substrat organique lors de sa méthanisation
- Très variable selon les substrats considérés
- Potentiel relativement + élevé des (inter)cultures ensilées par rapport aux effluents d'élevage



Le digestat

- Digestat = matière organique résiduelle à l'issue de la méthanisation
- Contient la matière organique non dégradée, la biomasse microbienne, des éléments minéraux
- Digestat brut (souvent liquide), peut subir une séparation de phase :
 - Digestat liquide : contient l'essentiel des éléments solubles (N minéral...)
 - Digestat solide : contient l'essentiel de la matière organique résiduelle et du phosphore
- Stockage en cuve ou lagune (brut, liquide) ou fumière (solide) avant d'être épandu au champ



Lagune de stockage de digestat liquide



Stockage de digestat solide

Plan

- Introduction
- Que se passe-t-il dans un méthaniseur ?
- Quels sont les effets du digestat sur la santé des sols ?
- La méthanisation permet-elle une diversification des systèmes de culture ?
Met-elle en danger le maintien des prairies ?
- La méthanisation permet-elle une augmentation du bouclage des cycles ?
Une réduction de la consommation des engrais ? Des autres intrants ?
- Quelles performances agronomiques et environnementales associées ?
Quel bilan environnemental en comparaison à d'autres filières ?
- Conclusion

Santé des sols

- Capacité du sol à assurer une productivité de biomasse végétale compatible avec le maintien à long terme des fonctionnalités écologiques de l'écosystème
- Pas de consensus sur la façon de l'évaluer, en absolu ou relativement à un usage
- Trois grandes catégories d'indicateur : chimie, physique et biologie du sol
- Matière organique des sols influence de nombreux indicateurs



Méthanisation et matière organique des sols

Cas de la méthanisation des effluents d'élevage

⊖ « Perte » de carbone labile dans le méthaniseur ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$) → moins de matière organique retournée au sol

⊕ Augmentation de la stabilité de la matière organique retournée au sol

Méthanisation et matière organique des sols

Cas de la méthanisation des effluents d'élevage

⊖ « Perte » de carbone labile dans le méthaniseur ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$) → moins de matière organique retournée au sol

⊕ Augmentation de la stabilité de la matière organique retournée au sol

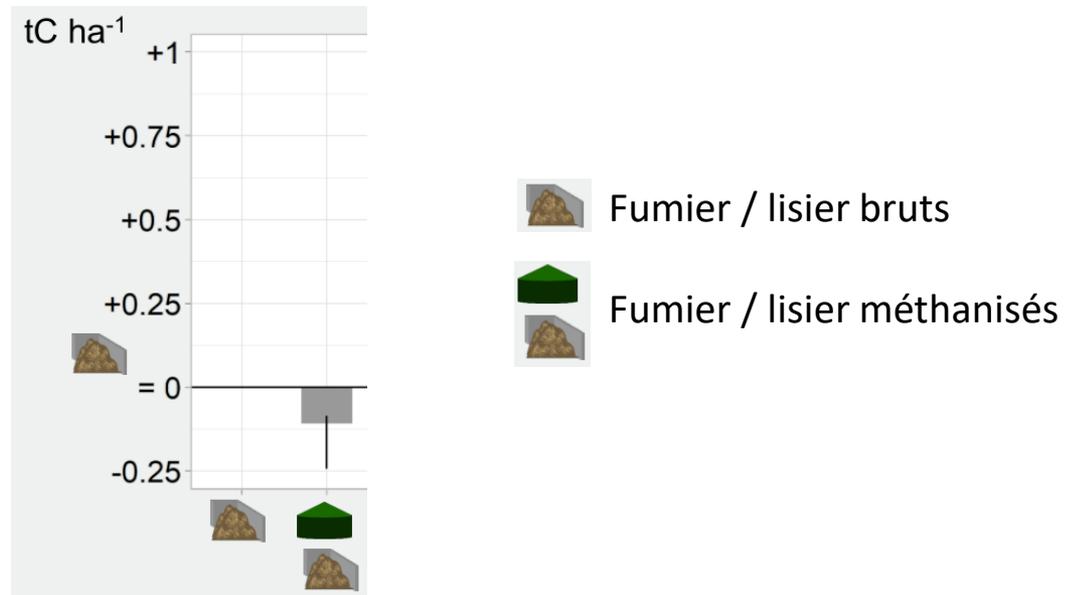
Sans introduction de biomasse
additionnelle dans le méthaniseur :

**Stabilité à légère ↘ de la matière
organique du sol**

(Moinard, 2021, Thomsen et al., 2013, Wentzel et al., 2015)

*Evolution du
stockage de C dans
le sol après 20 ans*

(Moinard, 2021)



Méthanisation et matière organique des sols

Cas de la méthanisation des effluents d'élevage

- « Perte » de carbone labile dans le méthaniseur ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$) → moins de matière organique retournée au sol

+ Augmentation de la stabilité de la matière organique retournée au sol

Sans introduction de biomasse
additionnelle dans le méthaniseur :
**Stabilité à légère ↘ de la matière
organique du sol**

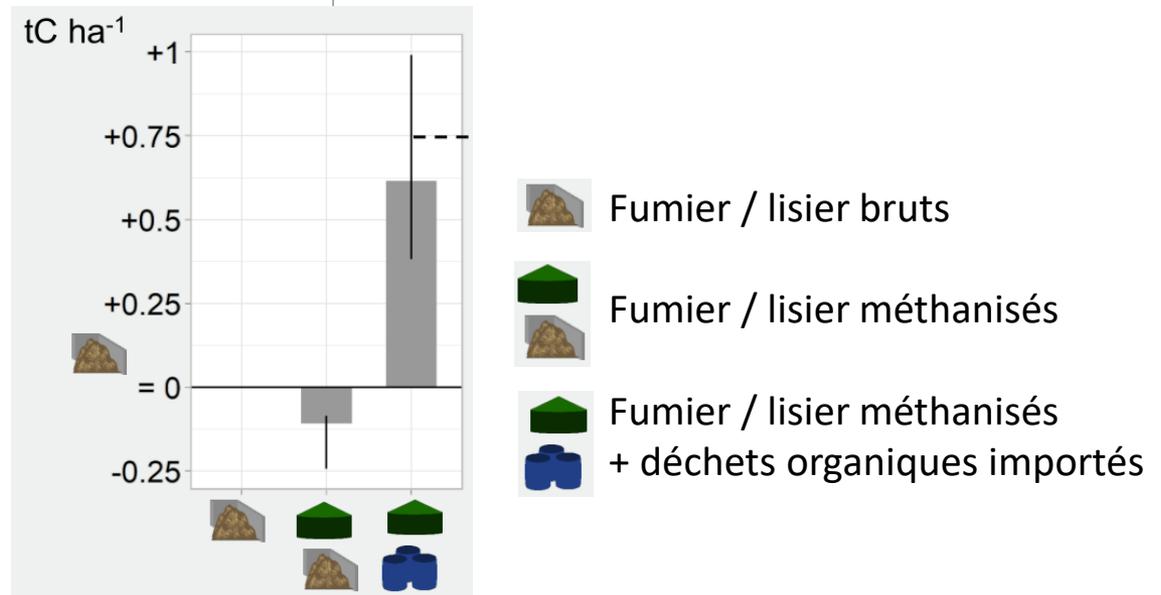
(Moinard, 2021, Thomsen et al., 2013, Wentzel et al., 2015)

Introduction de + biomasse dans le
méthaniseur (déchets alimentaires...)
pour la méthanisation :
Légère ↗ de la MO du sol

(Moinard, 2021)

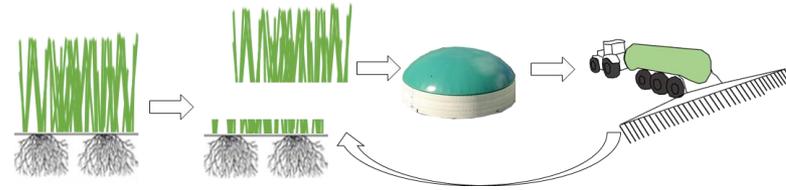
*Evolution du
stockage de C dans
le sol après 20 ans*

(Moinard, 2021)



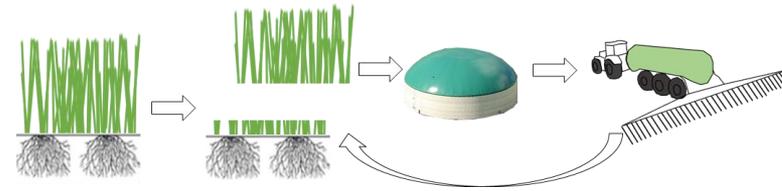
Méthanisation et matière organique des sols

**Cas de la méthanisation
des CIVE**



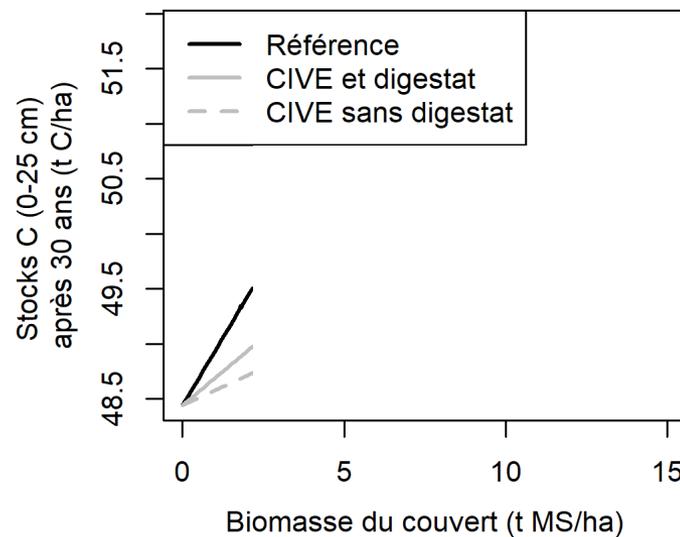
Méthanisation et matière organique des sols

Cas de la méthanisation des CIVE



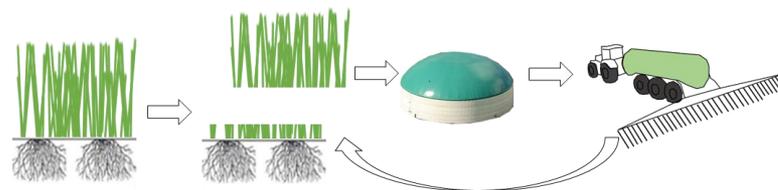
A production identique de biomasse du couvert : **légère \searrow de la matière organique du sol**

(Levavasseur et al. 2023a)



Méthanisation et matière organique des sols

Cas de la méthanisation des CIVE



A production identique de biomasse du couvert : **légère \searrow de la matière organique du sol**

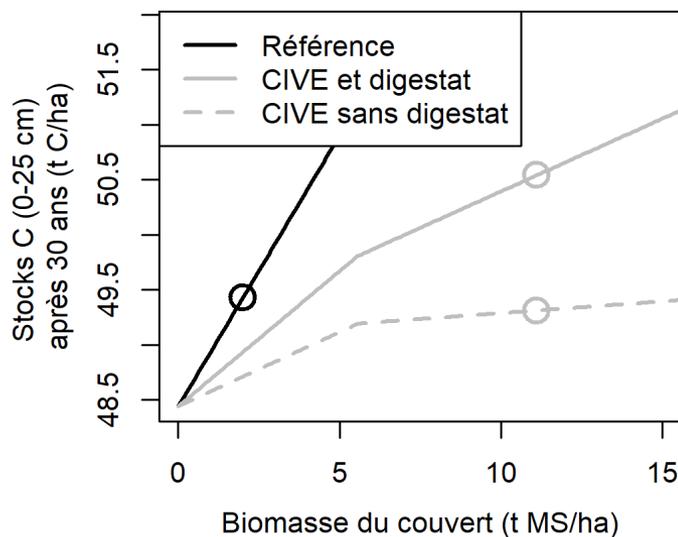
(Levavasseur et al. 2023a)

Dans la pratique, forte \nearrow de la production de biomasse du couvert \rightarrow plus de racines, plus de chaumes, plus de digestat \rightarrow **légère \nearrow de la MO du sol**

(Levavasseur et al., 2023a)



Couvert non méthanisé à « faible » biomasse
(www.lafranceagricole.fr)



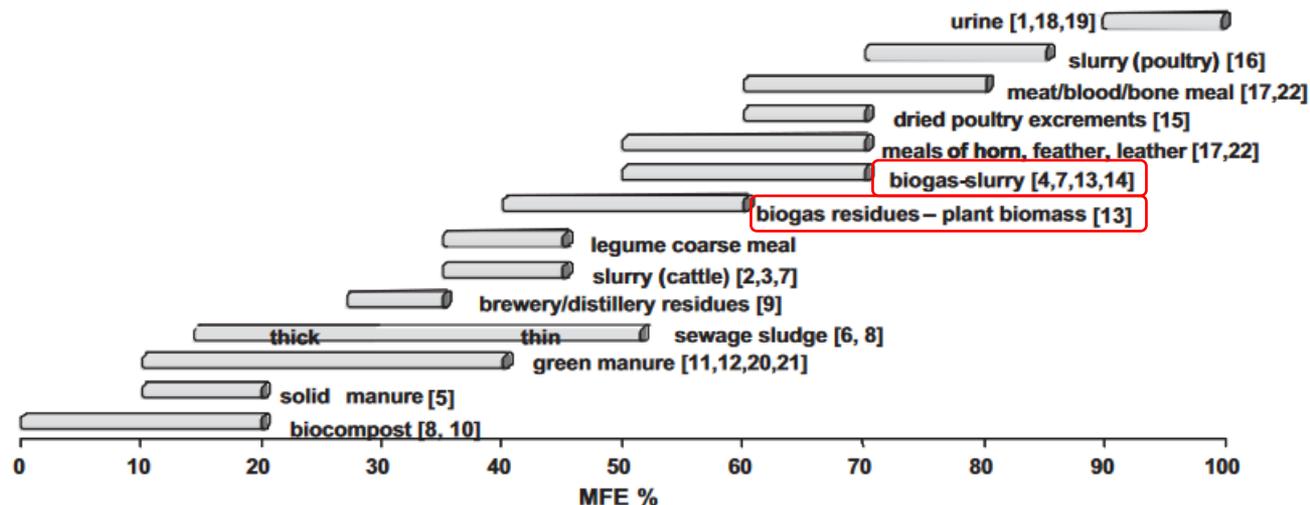
Orge CIVE à forte biomasse
(www.syngenta.fr)

Digestats et fourniture de nutriments

- Valeur fertilisante N des digestats (Möller & Müller, 2012) :
 - souvent + élevée / biomasse non digérée et engrais organiques classiques (lisier, fumier, couverts végétaux...)
 - souvent + faible / engrais minéraux

→ Bon potentiel de substitution des engrais N, sous conditions de limiter les pertes vers l'environnement (volatilisation...)

- Potentiel ↗ à long terme suite à des apports répétés et ↗ MO du sol
- Aussi bonne efficacité en termes de fertilisation P (Jordan-Meille et al., 2017)



Coefficient d'équivalence engrais azoté de divers produits organiques (adapté de Gutser et al., 2005)

Digestats et pertes de N par volatilisation

- Une partie de l'azote des engrais est volatile
- Volatilisation ammoniacale :
 - Perte potentiellement importante de N pour l'agriculture (\searrow rendement et/ou \nearrow engrais minéraux)
 - Fort impact sur la qualité de l'air et la santé, NH_3 = précurseur de particules fines
 - Acidification des sols, eutrophisation des eaux et émission indirecte de N_2O (GES) après redéposition
- Agriculture = 94% des émissions de NH_3 , dont la majeure partie en lien avec la gestion des effluents d'élevage (Citepa, 2020)



Pic de pollution atmosphérique

ADEME

Digestats et pertes de N par volatilisation

- Une partie de l'azote des engrais est volatile
- Volatilisation ammoniacale :
 - Perte potentiellement importante de N pour l'agriculture (\searrow rendement et/ou \nearrow engrais minéraux)
 - Fort impact sur la qualité de l'air et la santé, NH_3 = précurseur de particules fines
 - Acidification des sols, eutrophisation des eaux et émission indirecte de N_2O (GES) après redéposition
- Agriculture = 94% des émissions de NH_3 , dont la majeure partie en lien avec la gestion des effluents d'élevage (Citepa, 2020)
- Volatilisation NH_3 du digestat par rapport aux engrais minéraux / organiques usuels :
 - résultats contrastés selon la matière sèche, le pH, la minéralisation du N (Pedersen & Hafner, 2023)
 - souvent un problème important à limiter : bonnes conditions météo, matériel adapté...



ADEME

Pic de pollution atmosphérique



Epandage au pendillard



www.web-agri.fr

Injection

Digestats et lixiviation de nitrates

- Origine principalement agricole de la pollution des eaux par les nitrates (PRO et engrais)
- Problématiques associées : eutrophisation (N+P)
 - marée verte, eau non potable ($>50 \text{ mg/L NO}_3^-$)
 - fermeture de captages...
- Pollution généralisée en zones de grandes cultures et d'élevage intensif → réglementations zones vulnérables aux nitrates



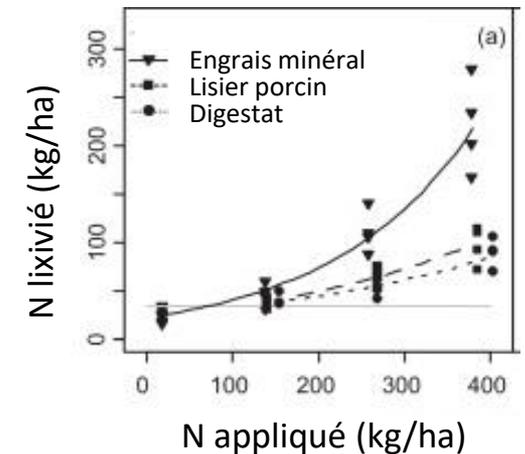
Marée verte (Ménèsquen, 2003)

Digestats et lixiviation de nitrates

- Origine principalement agricole de la pollution des eaux par les nitrates (PRO et engrais)
- Problématiques associées : eutrophisation (N+P)
→ marée verte, eau non potable ($>50 \text{ mg/L NO}_3^-$)
→ fermeture de captages...
- Pollution généralisée en zones de grandes cultures et d'élevage intensif → réglementations zones vulnérables aux nitrates
- Effet du digestat sur la lixiviation de nitrates :
 - effet similaire à d'autres fertilisants (Launay et al., 2022)
 - à utiliser à la bonne période (hors drainage, quand la culture absorbe beaucoup N) et à la bonne dose : dans ce cas, pas \nearrow par rapport aux engrais minéraux / organiques usuels
→ Importance de capacités de stockage suffisantes



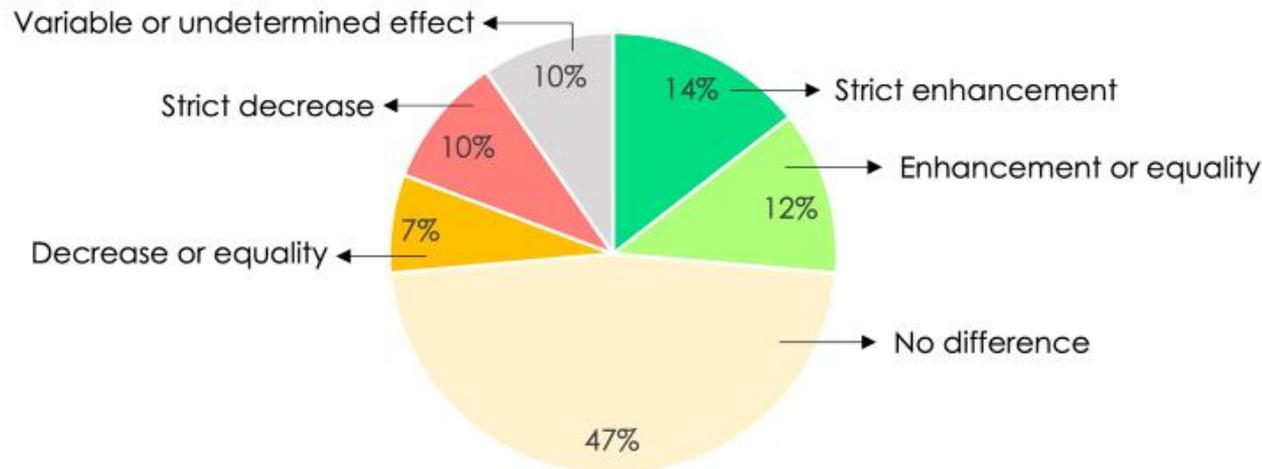
Marée verte (Mènesguen, 2003)



Relation quantité N perdue / appliquée (adapté de Svoboda et al., 2013)

Digestat et fertilité biologique des sols

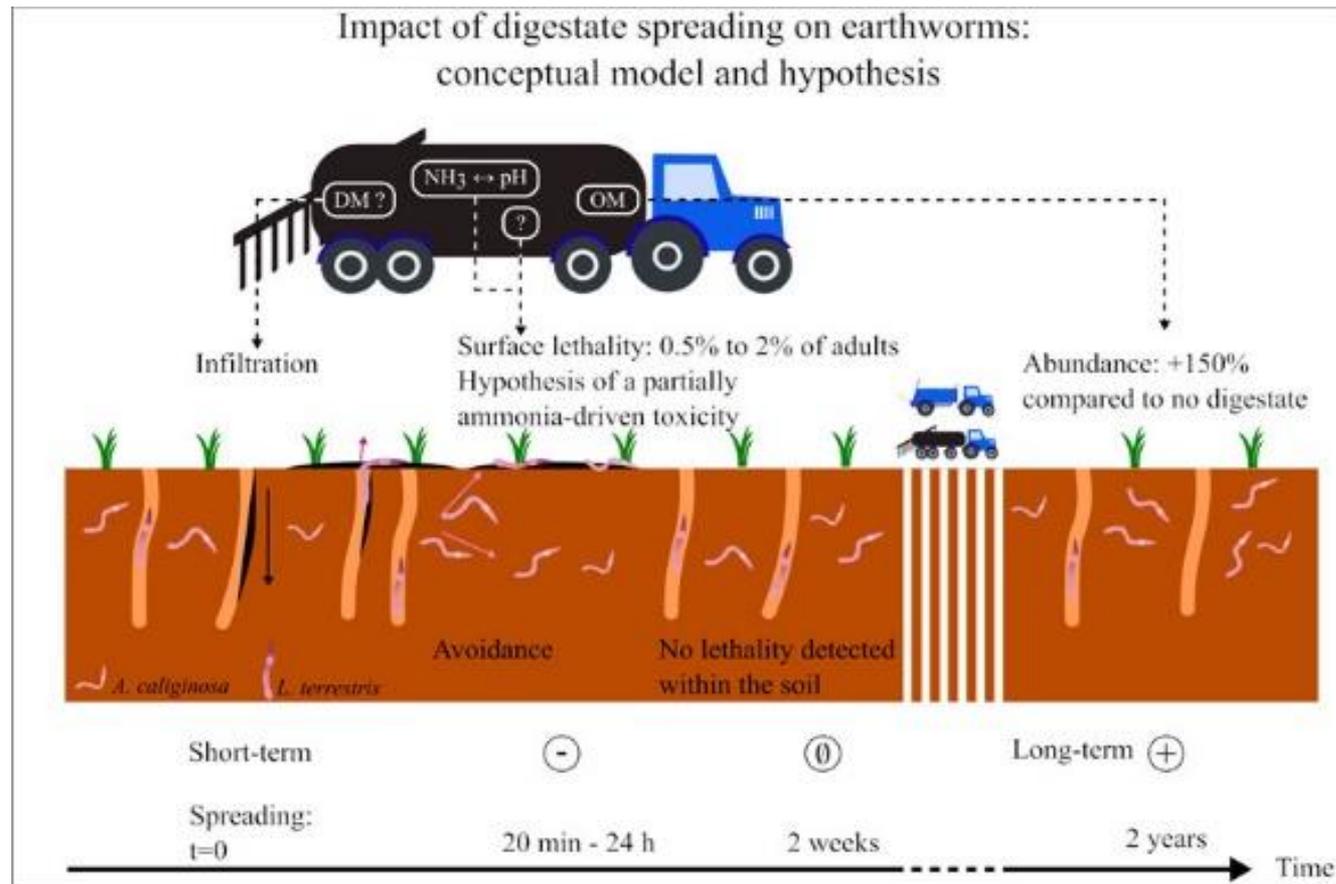
- Deux revues de littératures récentes sur la biologie des sols (*Karimi et al., 2022, van Midden et al., 2023*)
 - Effets contrastés selon le type de digestat, la référence (ferti minérale / biomasse non digérée) et selon les espèces considérées...
 - Moins de stimulation qu'avec de la biomasse non digérée ?
- Ni alarme, ni fort intérêt, mais sujet à creuser



Synthèse des effets d'un apport de digestat sur la qualité microbiologique du sol en comparaison à d'autres fertilisants organiques (Karimi et al., 2022)

Digestat et fertilité biologique des sols

- Exemple des vers de terre
 - Des effets toxiques temporaires observés à court terme (lié au NH_3 ?)
 - Un effet positif sur l'abondance des vers à long terme par rapport à une situation sans apport organique



(Moinard et al., 2021)

Digestat et fertilité physique des sols

- Résultats limités et contrastés sur la structure du sol (*Cooke, 2023*)
- ↗ risque de tassement en comparaison à une fertilisation minérale (*Lantz and Börjesson, 2014*) → utilisation de matériel adapté recommandé, comme pour d'autres fertilisants organiques (lisier...)

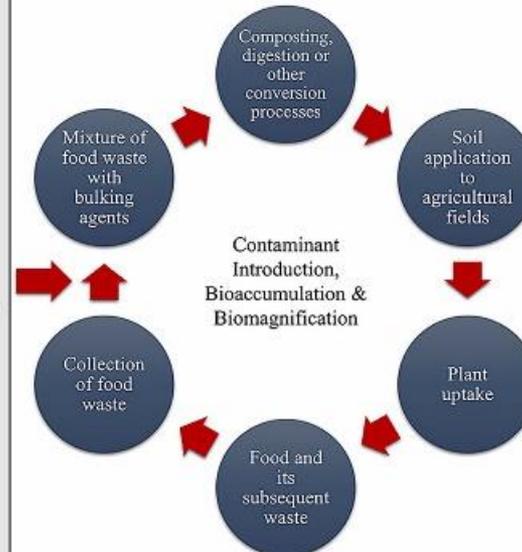
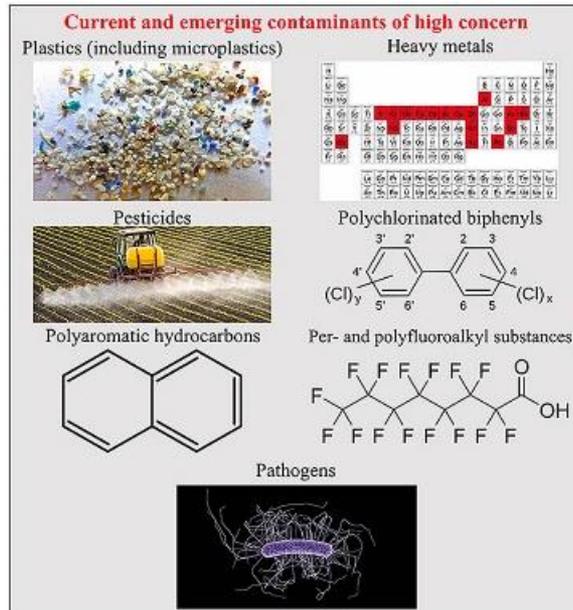


Epandage sans tonne

www.bioenergie-promotion.fr

Digestat et contamination des sols

- Divers contaminants retrouvés dans les digestats : métaux, HAP, PCB, perfluorés, résidus médicamenteux, pathogènes, microplastiques... (ex : *Bunemann et al., 2024*)
- Variabilité des teneurs en contaminants selon le type de déchets méthanisés
- Digestats non issus d'un tri sélectif à la source + contaminés (boue urbaine...)
- Persistance, mobilité et toxicité très variable entre contaminants
- Peu de transfert observé vers la plante après épandage à l'heure actuelle
- Evaluation écotoxicologique difficile
- Problèmes ≈ similaires qu'avec des biomasses non digérées



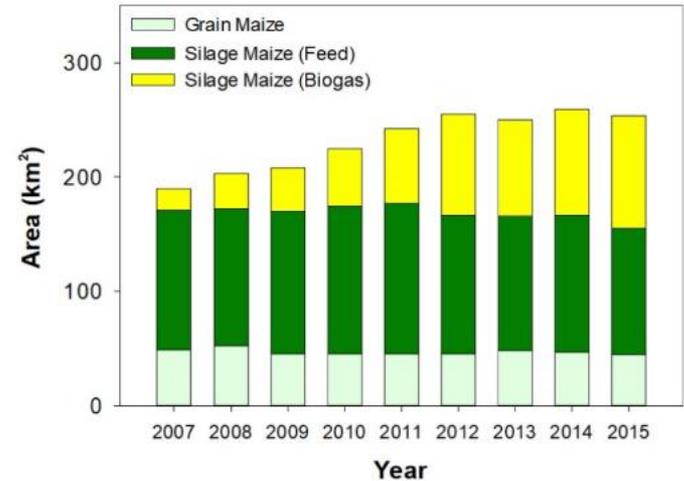
(*O'Connor et al., 2022*)

Plan

- Introduction
- Que se passe-t-il dans un méthaniseur ?
- Quels sont les effets du digestat sur la santé des sols ?
- La méthanisation permet-elle une diversification des systèmes de culture ?
Met-elle en danger le maintien des prairies ?
- La méthanisation permet-elle une augmentation du bouclage des cycles ?
Une réduction de la consommation des engrais ? Des autres intrants ?
- Quelles performances agronomiques et environnementales associées ?
Quel bilan environnemental en comparaison à d'autres filières ?
- Conclusion

Effets observés à l'étranger suite au développement de la méthanisation

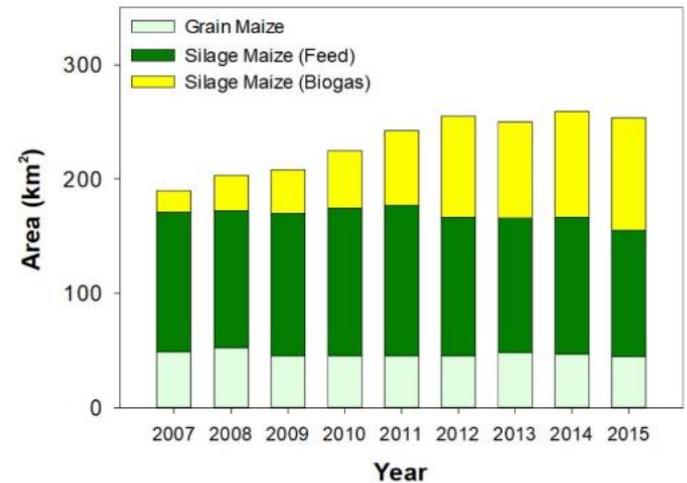
- Allemagne : développement des surfaces en maïs et retournement de prairies (*Lüker-Jans et al., 2017; Vergara & Lakes, 2019; Yang et al., 2021*)
- Italie : 3% de la SAU dédiée aux cultures énergétiques (*Bozzetto et al., 2017*)



Situation en Allemagne (Yang et al., 2021)

Effets observés à l'étranger suite au développement de la méthanisation

- Allemagne : développement des surfaces en maïs et retournement de prairies (*Lüker-Jans et al., 2017; Vergara & Lakes, 2019; Yang et al., 2021*)
- Italie : 3% de la SAU dédiée aux cultures énergétiques (*Bozzetto et al., 2017*)

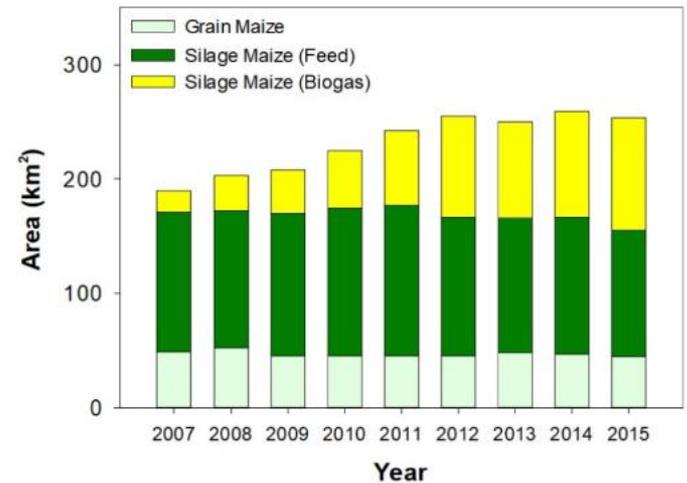


Situation en Allemagne (Yang et al., 2021)

- Peu en phase avec l'agroécologie et compétition avec l'alimentation :
 - impacts sur les volumes et les prix (*Britz & Delzeit, 2013*)
 - limite voire annule l'intérêt de la méthanisation d'un point de vue bilan GES en considérant le report de production (*Britz & Delzeit, 2013, Styles et al., 2015*)

Effets observés à l'étranger suite au développement de la méthanisation

- Allemagne : développement des surfaces en maïs et retournement de prairies (*Lüker-Jans et al., 2017; Vergara & Lakes, 2019; Yang et al., 2021*)
- Italie : 3% de la SAU dédiée aux cultures énergétiques (*Bozzetto et al., 2017*)

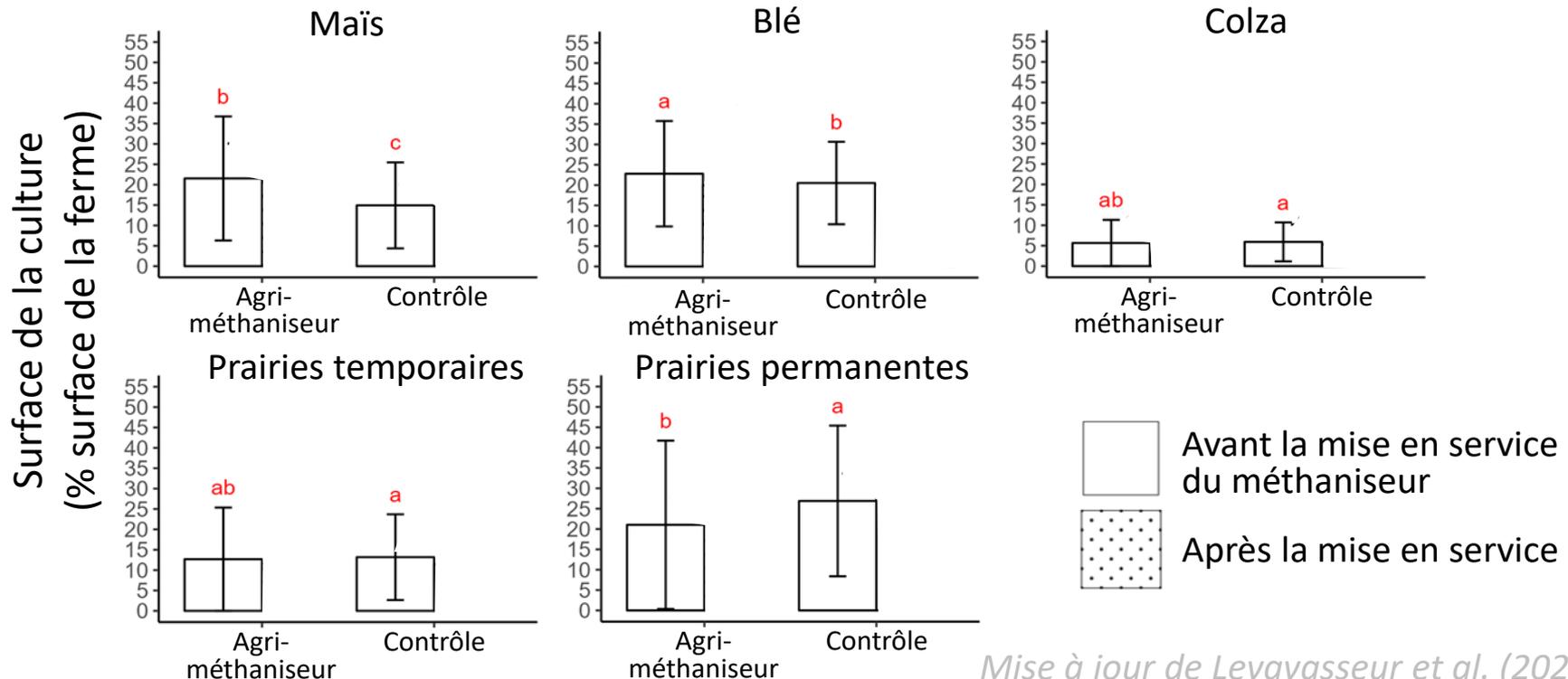


Situation en Allemagne (Yang et al., 2021)

- Peu en phase avec l'agroécologie et compétition avec l'alimentation :
 - impacts sur les volumes et les prix (*Britz & Delzeit, 2013*)
 - limite voire annule l'intérêt de la méthanisation d'un point de vue bilan GES en considérant le report de production (*Britz & Delzeit, 2013, Styles et al., 2015*)
 - Modèles de méthanisation différents en France :
 - Limitation des cultures dédiées à 15% des intrants depuis 2016
 - Prime de rachat du biogaz favorisant les effluents d'élevage (et les CIVE jusqu'en 2020)
- Quels changements induits ?

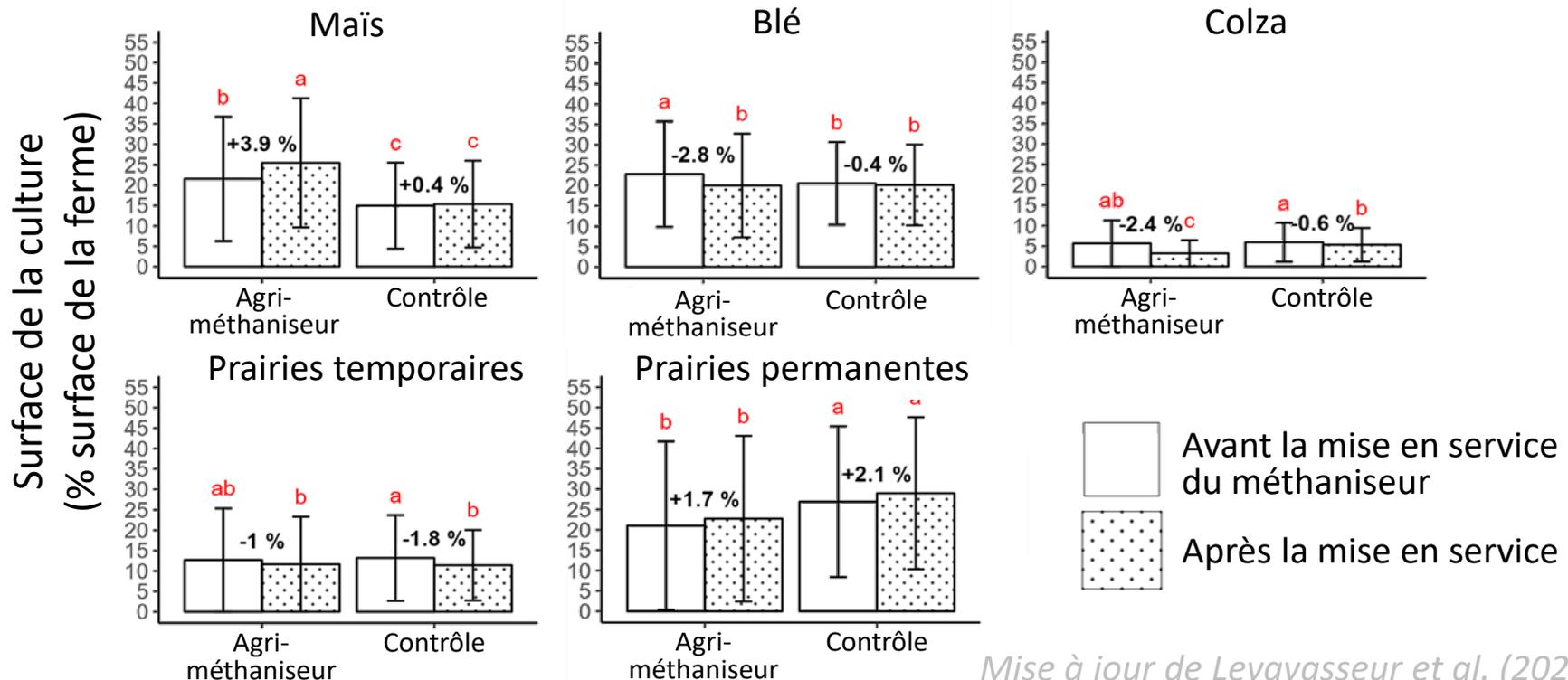
Changements d'assolement à l'échelle France

- Analyse des assolements des agriculteurs méthaniseurs (647 exploitations) en comparaison à une zone de contrôle environnante :
 - Assolement avant méthanisation différent de la zone de contrôle (+ maïs...)



Changements d'assolement à l'échelle France

- Analyse des assolements des agriculteurs méthaniseurs (647 exploitations) en comparaison à une zone de contrôle environnante :
 - Assolement avant méthanisation différent de la zone de contrôle (+ maïs...)
 - Principal changement après méthanisation : augmentation de la sole en maïs au détriment du colza et du blé
 - ≈ stabilité des surfaces en prairies (permanentes + temporaires)
- des changements significatifs mais qui restent mesurés

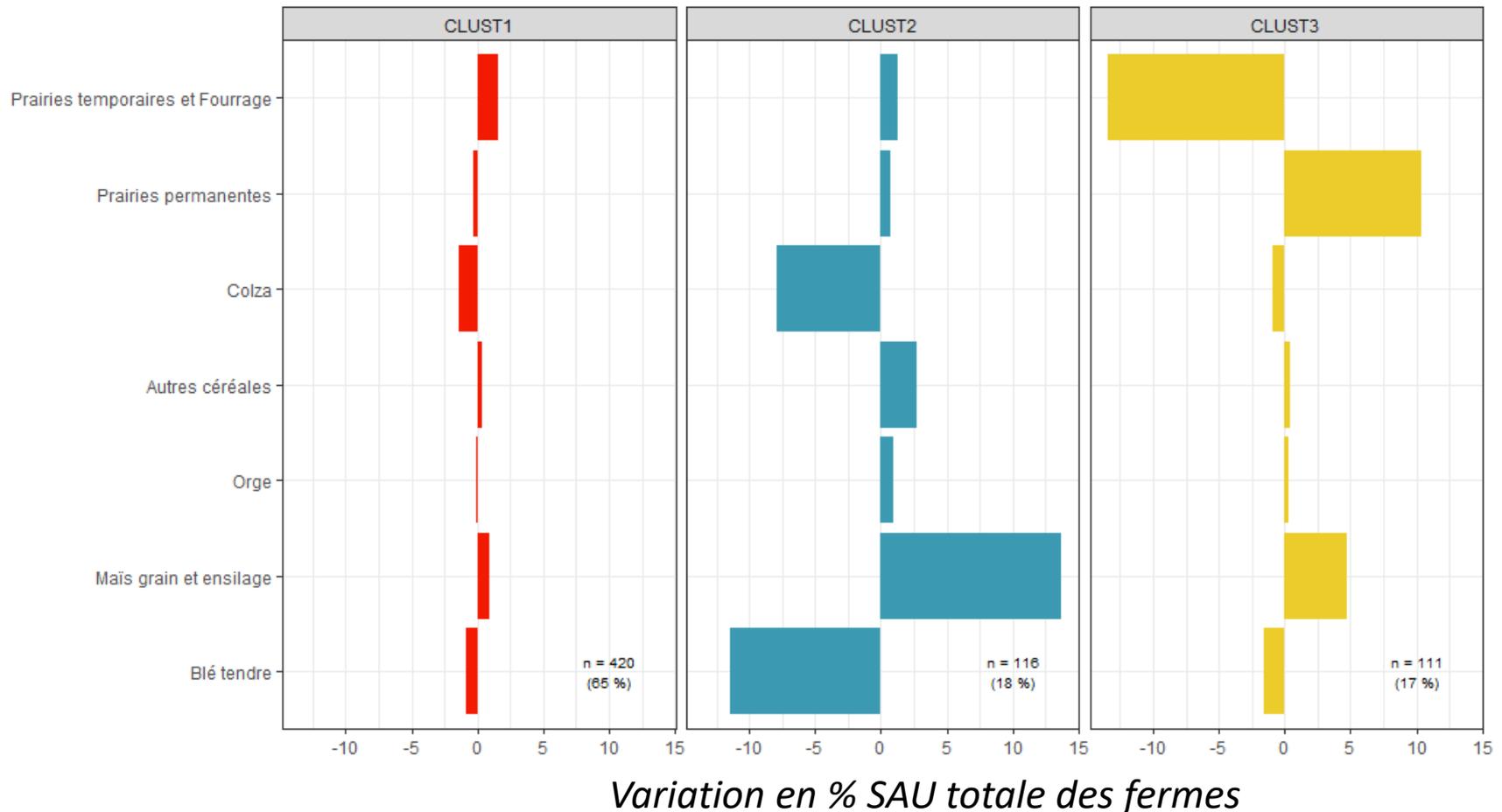


Typologie de changements – échelle France

Mise à jour de
Levavasseur et
al. (2023b)

- Pas de changements sur 65% des fermes (cluster 1)
- Beaucoup + de maïs, - blé et de colza sur 18% des fermes (cluster 2)
- Un peu + de maïs sur 17% des fermes (cluster 3)

→ Quels déterminants de ces changements ?



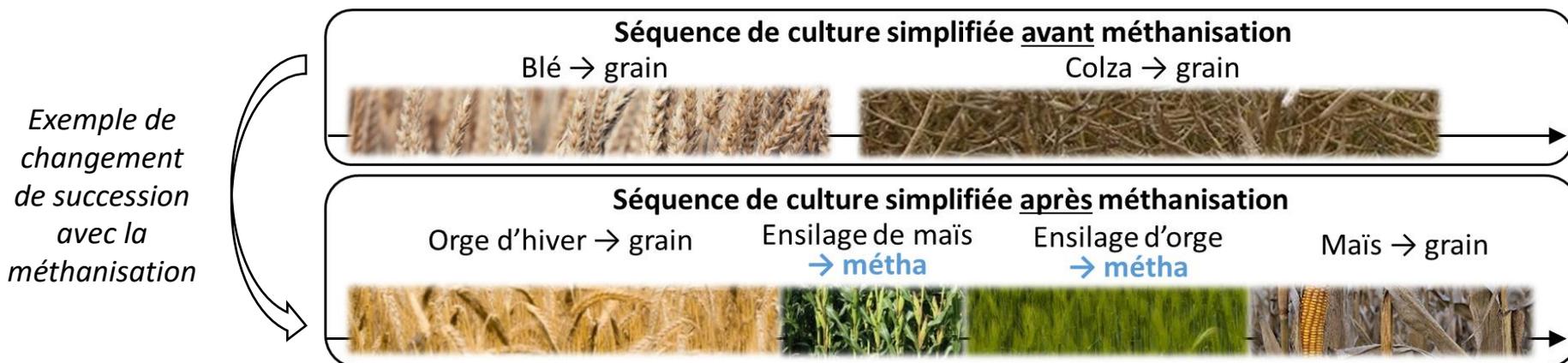
Cas particulier de la méthanisation sans élevage du bassin parisien

- Enquêtes de 35 fermes associées à 24 méthaniseurs (*Boros et al., 2024*)
- Insertion des CIVE dans les successions favorise la couverture des sols en interculture : moyenne de 30% de la surface des fermes en CIVE (été et hiver) → potentiels effets bénéfiques : ↘ érosion et lixiviation des nitrates...
- Principales CIVE : orge, seigle ou triticales en hiver, maïs ou sorgho en été

Cas particulier de la méthanisation sans élevage du bassin parisien

- Enquêtes de 35 fermes associées à 24 méthaniseurs (*Boros et al., 2024*)
- Insertion des CIVE dans les successions favorise la couverture des sols en interculture : moyenne de 30% de la surface des fermes en CIVE (été et hiver) → potentiels effets bénéfiques : √ érosion et lixiviation des nitrates...
- Principales CIVE : orge, seigle ou triticale en hiver, maïs ou sorgho en été
- Modifications des successions pour intercaler plus de CIVE
 - Substitution du blé (parfois totale) par des céréales d'hiver plus précoces (suivi de CIVE d'été)
 - ↗ maïs et un peu tournesol (précédé de CIVE d'hiver) et √ colza

→ Peu d'évolution de la biodiversité cultivée



Plan

- Introduction
- Que se passe-t-il dans un méthaniseur ?
- Quels sont les effets du digestat sur la santé des sols ?
- La méthanisation permet-elle une diversification des systèmes de culture ?
Met-elle en danger le maintien des prairies ?
- La méthanisation permet-elle une augmentation du bouclage des cycles ?
Une réduction de la consommation des engrais ? Des autres intrants ?
- Quelles performances agronomiques et environnementales associées ?
Quel bilan environnemental en comparaison à d'autres filières ?
- Conclusion

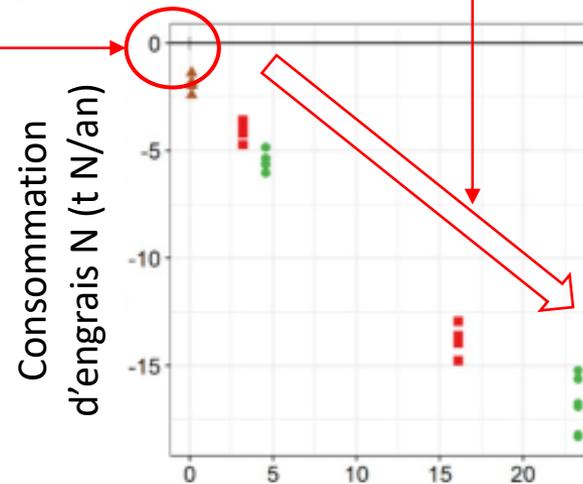
Méthanisation et économies d'engrais, sans CIVE

- Azote du digestat souvent + efficace pour la nutrition des plantes que l'azote des déchets méthanisés
 - Import d'azote via des déchets extérieurs à la ferme
- possibilité de substitution d'engrais de synthèse (dont la production émet des gaz à effet de serre)

Méthanisation et économies d'engrais, sans CIVE

- Azote du digestat souvent + efficace pour la nutrition des plantes que l'azote des déchets méthanisés
 - Import d'azote via des déchets extérieurs à la ferme
- possibilité de substitution d'engrais de synthèse (dont la production émet des gaz à effet de serre)
- Exemple sur une ferme en polyculture-élevage :
 - peu d'économies d'engrais sans apport de déchets extérieurs dans le méthaniseur (i.e., autres qu'effluents de la ferme)
 - ↗ des économies d'engrais avec ↗ imports de déchets

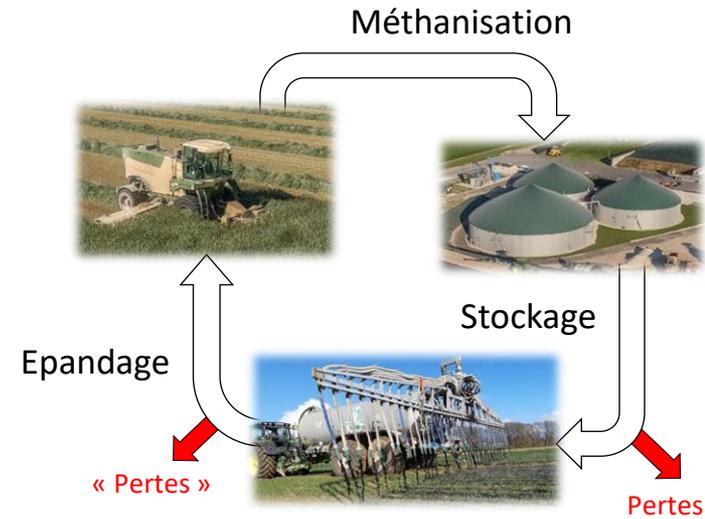
Usage d'engrais N simulé dans une ferme de polyculture-élevage selon la quantité de déchets importés (Moinard, 2021)



Import d'azote avec les déchets extérieurs (t N/an)

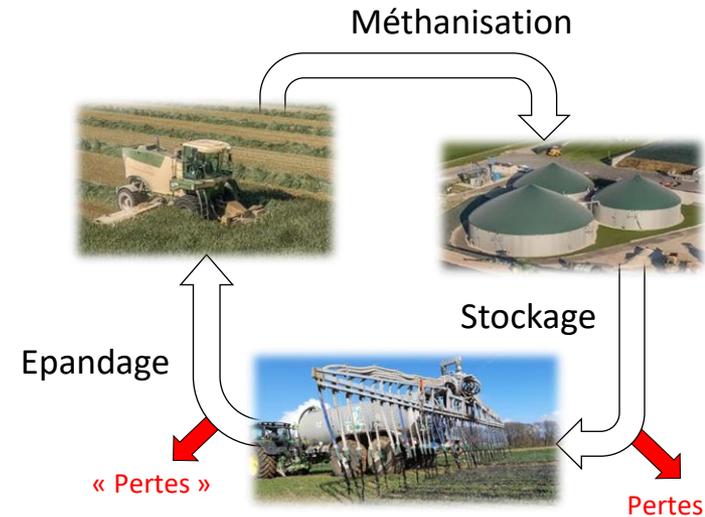
Méthanisation et économies d'engrais, avec CIVE

- En théorie, bouclage possible des nutriments avec la méthanisation des CIVE, mais pertes au champ et au stockage



Méthanisation et économies d'engrais, avec CIVE

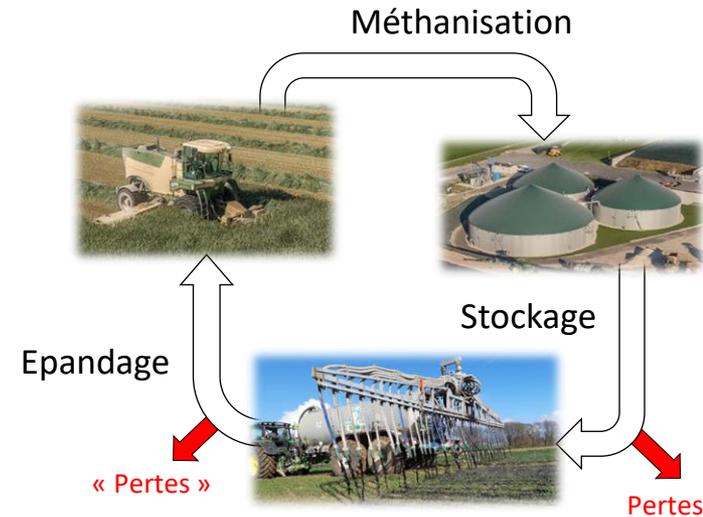
- En théorie, bouclage possible des nutriments avec la méthanisation des CIVE, mais pertes au champ et au stockage
- En pratique, dans le bassin parisien (enquêtes) *(Boros et al., 2024)* :
 - CIVE : 100 à 140 kg N_{efficace} / ha (organique et/ou minéral) pour maximiser la biomasse
 - Economies d'engrais N avec le digestat sur $\approx 1/2$ ferme malgré la fertilisation des CIVEs, grâce aux imports de déchets



*Essai fertilisation de CIVE
(chambres-agriculture)*

Méthanisation et économies d'engrais, avec CIVE

- En théorie, bouclage possible des nutriments avec la méthanisation des CIVE, mais pertes au champ et au stockage
- En pratique, dans le bassin parisien (enquêtes) *(Boros et al., 2024)* :
 - CIVE : 100 à 140 kg N_{efficace} / ha (organique et/ou minéral) pour maximiser la biomasse
 - Economies d'engrais N avec le digestat sur $\approx 1/2$ ferme malgré la fertilisation des CIVEs, grâce aux imports de déchets
- Potentiel théorique de mobiliser les légumineuses en CIVE pour assurer des économies d'engrais via la fixation symbiotique d'azote, mais peu mises en œuvre en pratique (moindre potentiel de biomasse)



*Essai fertilisation de CIVE
(chambres-agriculture)*

Méthanisation et usage des phytosanitaires

- CIVE conduites de façon assez intensive dans le bassin parisien (*Boros et al., 2024*)
 - Protection phyto chez la plupart des enquêtés : surtout herbicide, mais pas que, à des doses moindres que pour la culture principale correspondante
 - Des compensations possibles dues au changement de cultures principales : maïs moins traité que le colza...
 - Interrogations sur les effets à long terme (salissement de la parcelle...)



*Désherbage d'automne
de blé (non CIVE)
(©NCornec/Arvalis)*

Méthanisation et usage de l'eau

- Deux cultures / an → réserve en eau du sol davantage sollicitée, recharge des nappes potentiellement limitée (*Carton et al., 2022*)
- Enquête dans le bassin parisien : (*Boros et al., 2024*)
 - Irrigation des CIVE d'été dans ≈ 50% des cas
 - Possible ↗ de l'irrigation de la culture principale après CIVE d'hiver
- Disponibilité de l'eau : facteur limitant de la production des CIVE d'été et/ou des cultures principales suivant les CIVE d'hiver : (*Boros et al., 2024*)
 - Rendement des CIVE d'été : de 0 à 12 t MS/ha
 - 20% de pertes de rendement sur le maïs grain suivant la CIVE d'hiver souvent évoqué (effet du stress hydrique et du semis retardé)



Irrigation de CIVE d'été

<http://adenca.over-blog.com>

Plan

- Introduction
- Que se passe-t-il dans un méthaniseur ?
- Quels sont les effets du digestat sur la santé des sols ?
- La méthanisation permet-elle une diversification des systèmes de culture ?
Met-elle en danger le maintien des prairies ?
- La méthanisation permet-elle une augmentation du bouclage des cycles ?
Une réduction de la consommation des engrais ? Des autres intrants ?
- Quelles performances agronomiques et environnementales associées ?
Quel bilan environnemental en comparaison à d'autres filières ?
- Conclusion

Performances agro-environnementales des fermes

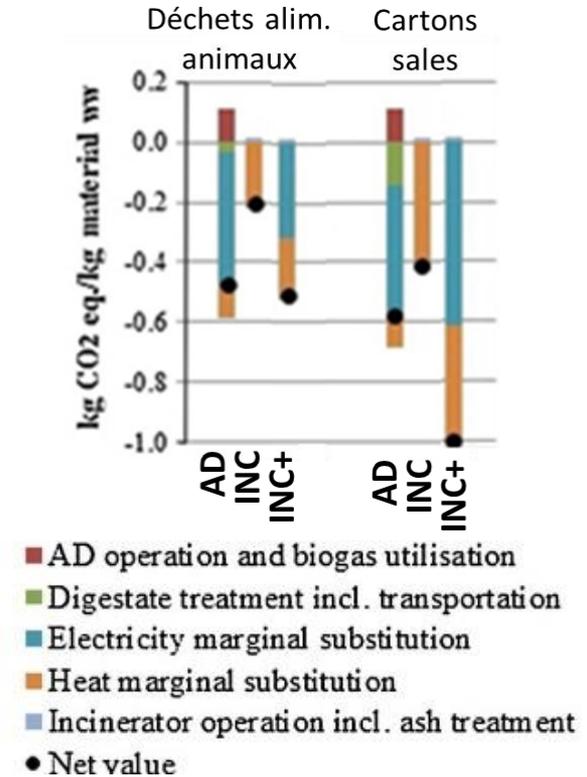
- Tentative de synthèse des performances agro-environnementales (travaux diapos précédentes...) :
 - Majorité des effets au champ positifs à neutres et production de biogaz
 - Une bonne partie des effets positifs liée aux co-substrats méthanisés (import C, N...)
 - Des points de vigilance (eau, phyto, NH_3 , concurrence alimentation)
- Principalement des fermes conventionnelles « assez intensives » → compatibilité avec des systèmes + agroécologiques (AB...) ?

Critère		Evolution
Production d'énergie		↗
Diversité des rotations		≈ à légère ↘ avec CIVE
Production de biomasse	Totale	↗
	Hors métha	≈ à ↘ avec CIVE / dédiées
Stockage de C dans le sol à 30 ans		≈ à ↗ (avec CIVE et/ou déchets extérieurs)
Fertilité des sols		≈ à légère ↗ (avec déchets extérieurs et/ou CIVE)
Besoin engrais N min		↘ (avec déchets extérieurs)
Besoin engrais PK		↘ (avec déchets extérieurs)
Lixiviation NO_3^-		↘ à ≈ (si ferti ajustée)
Volat NH_3		↗
Emissions de N_2O		≈
Bilan GES		↘ (avec injection biogaz)
Ressource en eau		↘ drainage (- 20 mm/an) et ↗ irrigation avec CIVE
Pression phyto		≈ à ↗ avec CIVE (possibles compensations)
Résultats socio-éco		?

Performances environnementales du traitement des déchets

- Méthanisation des déchets urbains (AD)
+ favorable du point de vue changement climatique que l'incinération (INC), sauf avec des incinérateurs + efficaces (INC+) (récupération d'énergie dans incinérateur)

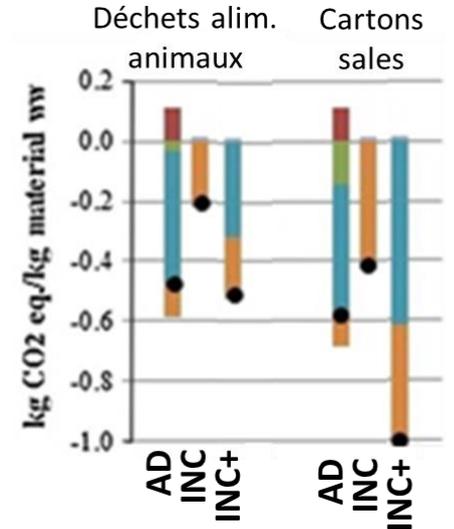
Bilan GES du traitement des déchets (Naroznova et al., 2016)



Performances environnementales du traitement des déchets

- Méthanisation des déchets urbains (AD) + favorable du point de vue changement climatique que l'incinération (INC), sauf avec des incinérateurs + efficaces (INC+) (récupération d'énergie dans incinérateur)

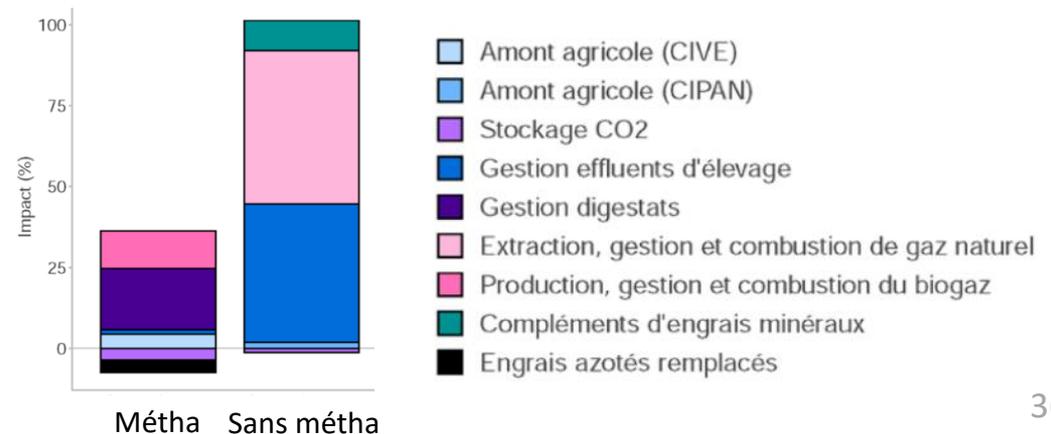
Bilan GES du traitement des déchets (Naroznova et al., 2016)



- AD operation and biogas utilisation
- Digestate treatment incl. transportation
- Electricity marginal substitution
- Heat marginal substitution
- Incinerator operation incl. ash treatment
- Net value

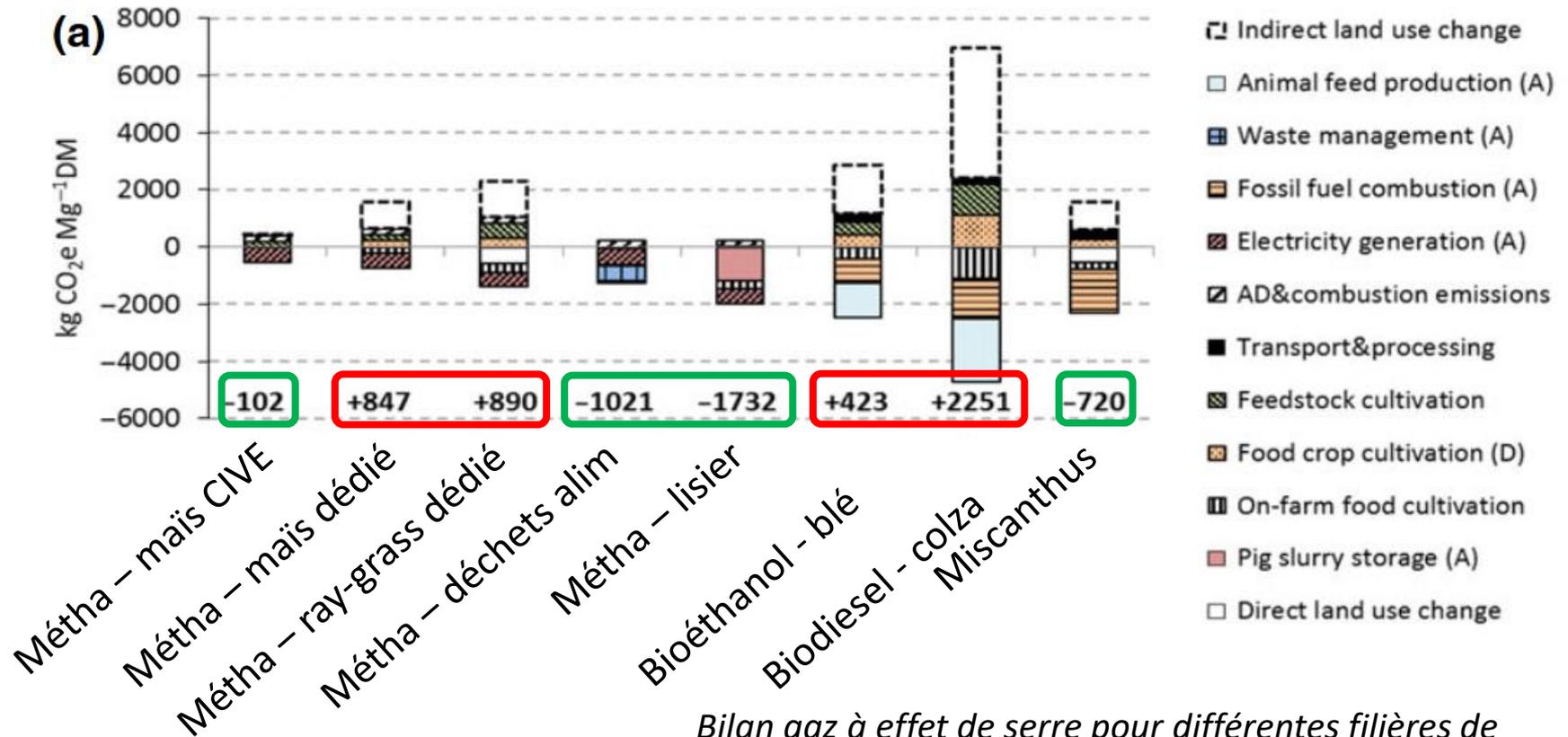
- Méthanisation des effluents d'élevage + favorable que leur épandage direct du point de vue changement climatique, des augmentations sur d'autres impacts possibles

Bilan GES de la gestion des effluents d'élevage (Esnouf et al., 2021)



Performances environnementales de la production d'énergie

- Méthanisation a un bilan favorable par rapport à l'utilisation d'énergies fossiles (bilan GES < 0), sauf avec des cultures dédiées
- Meilleur bilan GES que les autres filières bioénergie
- Des augmentations d'autres impacts avec métha, notamment liés au changement indirect d'usage des sols



Bilan gaz à effet de serre pour différentes filières de production de bioénergie (Styles et al., 2015)

Plan

- Introduction
- Que se passe-t-il dans un méthaniseur ?
- Quels sont les effets du digestat sur la santé des sols ?
- La méthanisation permet-elle une diversification des systèmes de culture ?
Met-elle en danger le maintien des prairies ?
- La méthanisation permet-elle une augmentation du bouclage des cycles ?
Une réduction de la consommation des engrais ? Des autres intrants ?
- Quelles performances agronomiques et environnementales associées ?
Quel bilan environnemental en comparaison à d'autres filières ?
- Conclusion

Conclusion

- Pas d'alerte environnementale majeure liée à la méthanisation
- Une amélioration du bilan environnemental par rapport aux filières alternatives dans de nombreux cas (hormis avec cultures dédiées)
- Des points d'attention (intensification de la production de CIVE, bon usage du digestat...) & des besoins de données complémentaires

- Méthanisation = avant tout une production d'énergie
- Synergie possible entre méthanisation et transition agroécologique reste à approfondir (recherche, politique publique...)
- Quid du changement climatique sur la durabilité du système?

Merci pour votre attention



Bibliographie

- Ademe, 2023. Chiffres clés du parc d'unités de méthanisation en France au 1er janvier 2023.
- Arvalis, 2024. Comment ça marche ? La méthanisation, une source d'énergie et de fertilisant. <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/la-methanisation-une-source-denergie-et-de-fertilisant>
- Béline, F., Couvert, A., Quelen, F. de, Girault, R., Houot, S., Jeuffroy, M.-H., Jimenez, J., Marechal, C. L., Lendormi, T., Menasseri-Aubry, S., & Steyer, J.-P. (2023). La méthanisation agricole en France: Contribution à la transition agroécologique ou opportunité énergétique ? France.
- Boros, L., Levavasseur, F., Carozzi, M., Carton, S., Martin, P., Houot, S., 2024. Caractérisation des changements de systèmes de culture associés à la méthanisation agricole sans élevage. JRI Biogaz Méthanisation, 26-28 mars 2024, Pau.
- Bozzetto, S., Curlisi, C., Fabbri, C., Pezzaglia, M., Rossi, L., & Sibilla, F. (2017). The development of biomethane: A sustainable choice for the economy and the environment. Notes for the elaboration of a road map for the development of biogas done right and biogas refinery technologies in Italy. https://www.consorziobiogas.it/wp-content/uploads/2017/05/Potenzialit%C3%A0_biometano_Italia_FINALE-ENG.pdf
- Bumharter, C., Bolonio, D., Amez, I., García Martínez, M. J., & Ortega, M. F. (2023). New opportunities for the European Biogas industry : A review on current installation development, production potentials and yield improvements for manure and agricultural waste mixtures. Journal of Cleaner Production, 135867. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135867>
- Bünemann, E. K., Reimer, M., Smolders, E., Smith, S. R., Bigalke, M., Palmqvist, A., Brandt, K. K., Möller, K., Harder, R., Hermann, L., Speiser, B., Oudshoorn, F., Løes, A. K., & Magid, J. (2023). Do contaminants compromise the use of recycled nutrients in organic agriculture? A review and synthesis of current knowledge on contaminant concentrations, fate in the environment and risk assessment. Science of The Total Environment, 168901. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168901>
- Britz, W., & Delzeit, R. (2013). The impact of German biogas production on European and global agricultural markets, land use and the environment. Energy Policy, 62, 1268–1275. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.123>
- Cadiou, J. (2023). Le déploiement de la politique de méthanisation agricole en France: Implications pour la transition agroécologique [These de doctorat, université Paris-Saclay]. <https://www.theses.fr/2023UPASB029>
- Carton, S., Levavasseur, F., & Hugonnet, M. (2022). Performances agronomiques et environnementales de la méthanisation agricole sans élevage—Analyse n° 177. Analyse du Centre d'études et de prospective, 177, Article 177.
- Cooke, J. (2023). Study and prediction of the impact of anaerobic digestion process parameters on the composition of digestates, and their effect on the structural stability of soils. L'Institut Agro Rennes Angers.
- Cresson, R. (2006). Etude du démarrage de procédés intensifs de méthanisation : Impact des conditions hydrodynamiques et de la stratégie de montée en charge sur la formation et l'activité du biofilm [PhD Thesis]. <http://www.theses.fr/2006MON20213>
- Esnouf, A., Brockmann, D., & Cresson, R. (2021). Analyse du cycle de vie du biométhane issu de ressources agricoles—Rapport d'ACV. (p. 168). INRAE Transfert.
- Girault, 2019. Déterminants de l'évolution des matières organiques en lien avec les procédés de transformation – Volet Méthanisation. Ecole chercheur SYSTMO, 20 novembre 2019, Rennes.
- Gutser, R., Ebertseder, Th., Weber, A., Schraml, M., & Schmidhalter, U. (2005). Short-term and residual availability of nitrogen after long-term application of organic fertilizers on arable land. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 168(4), 439–446. <https://doi.org/10.1002/jpln.200520510>
- Jordan-Meille, L., Morel, C., Salducci, X., & Michaud, J. (2017, November 8). Valeur agronomique (C, N, P) de digestats de méthanisation d'origine agricole et agro-alimentaire de Dordogne. 13èmes Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse Comifer Gemas., Nantes.
- Karimi, B., Sadet-Bourgeteau, S., Cannavacciuolo, M., Chauvin, C., Flamin, C., Haumont, A., Jean-Baptiste, V., Reibel, A., Vrignaud, G., & Ranjard, L. (2022). Impact of biogas digestates on soil microbiota in agriculture: A review. Environmental Chemistry Letters. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01451-8>
- Lantz, M., & Börjesson, P. (2014). Greenhouse gas and energyassessment of the biogas from co-digestion injected into the natural gas grid: A Swedish case-study including effects on soil properties. Renewable Energy, 71, 387–395. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.048>
- Launay, C. (2023). Insertion de cultures intermédiaires énergétiques dans les systèmes de cultures en France: Évaluation multi-échelles du potentiel de production et des impacts eau–azote–carbone [Phdthesis, Université Paris-Saclay]. <https://pastel.hal.science/tel-04207003>
- Launay, C., Houot, S., Frédéric, S., Girault, R., Levavasseur, F., Marsac, S., & Constantin, J. (2022). Incorporating energy cover crops for biogas production into agricultural systems: Benefits and environmental impacts. A review. Agronomy for Sustainable Development, 42(4), 57. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00790-8>

Bibliographie

- Levavasseur, F., Kouakou, P. K., Constantin, J., Cresson, R., Ferchaud, F., Girault, R., Jean-Baptiste, V., Lagrange, H., Marsac, S., Pellerin, S., & Houot, S. (2023). Energy cover crops for biogas production increase soil organic carbon stocks: A modeling approach. *GCB Bioenergy*, 15(2), 224–238. <https://doi.org/10.1111/gcbb.13018>
- Levavasseur, F., Martin, L., Boros, L., Cadiou, J., Carozzi, M., Martin, P., & Houot, S. (2023). Land cover changes with the development of anaerobic digestion for biogas production in France. *GCB Bioenergy*, 15(5), 630–641. <https://doi.org/10.1111/gcbb.13042>
- Lüker-Jans, N., Simmering, D., & Otte, A. (2017). Impact of biogas plants on regional dynamics of permanent grassland and maize area—The example of Hesse, Germany (2005–2010). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 241, 24–38. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.023>
- Moinard, V. (2021). Conséquences de l'introduction de la méthanisation dans une exploitation de polyculture-élevage sur les cycles du carbone et de l'azote. Combinaison de l'expérimentation et de la modélisation à l'échelle de la ferme [Phdthesis, Université Paris-Saclay]. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-03485490>
- Moinard, V., Redondi, C., Etiévant, V., Savoie, A., Duchene, D., Pelosi, C., Houot, S., & Capowiez, Y. (2021). Short- and long-term impacts of anaerobic digestate spreading on earthworms in cropped soils. *Applied Soil Ecology*, 168, 104149. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104149>
- Möller, K., & Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth : A review. *Engineering in Life Sciences*, 12(3), Article 3. <https://doi.org/10.1002/elsc.201100085>
- Naroznova, I., Møller, J., & Scheutz, C. (2016). Global warming potential of material fractions occurring in source-separated organic household waste treated by anaerobic digestion or incineration under different framework conditions. *Waste Management*, 58, 397-407. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.020>
- O'Connor, J., Mickan, B. S., Siddique, K. H. M., Rinklebe, J., Kirkham, M. B., & Bolan, N. S. (2022). Physical, chemical, and microbial contaminants in food waste management for soil application : A review. *Environmental Pollution*, 300, 118860. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118860>
- Pedersen, J., & Hafner, S. D. (2023). Ammonia emissions after field application of anaerobically digested animal slurry: Literature review and perspectives. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 357, 108697. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108697>
- Salmon, D. (2021). Rapport d'information fait au nom de la mission d'information sur « la méthanisation dans le mix énergétique: Enjeux et impacts ». Sénat.
- Scarlat, N., Dallemand, J.-F., & Fahl, F. (2018). Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*, 129, 457–472. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006>
- Styles, D., Gibbons, J., Williams, A. P., Dauber, J., Stichnothe, H., Urban, B., Chadwick, D. R., & Jones, D. L. (2015). Consequential life cycle assessment of biogas, biofuel and biomass energy options within an arable crop rotation. *GCB Bioenergy*, 7(6), 1305–1320. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12246>
- Svoboda, N., Taube, F., Wienforth, B., Kluß, C., Kage, H., & Herrmann, A. (2013). Nitrogen leaching losses after biogas residue application to maize. *Soil and Tillage Research*, 130, 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.02.006>
- Thomsen, I. K., Olesen, J. E., Møller, H. B., Sørensen, P., & Christensen, B. T. (2013). Carbon dynamics and retention in soil after anaerobic digestion of dairy cattle feed and faeces. *Soil Biology and Biochemistry*, 58, 82–87. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.006>
- van 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, 105066. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105066>
- Vergara, F., & Lakes, T. (2019). Maizification of the Landscape for Biogas Production? [workingPaper]. Humboldt-Universität zu Berlin. <https://doi.org/10.18452/20977>
- Wentzel, S., Schmidt, R., Piepho, H.-P., Semmler-Busch, U., & Joergensen, R. G. (2015). Response of soil fertility indices to long-term application of biogas and raw slurry under organic farming. *Applied Soil Ecology*, 96, 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.06.015>
- Yang, X., Liu, Y., Wang, M., Bezama, A., & Thrän, D. (2021). Identifying the Necessities of Regional-Based Analysis to Study Germany's Biogas Production Development under Energy Transition. *Land*, 10(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/land10020135>