

# Regards de jeunes chercheurs sur la méthanisation

Centre Technique national du Biogaz et de la Méthanisation  
Mai 2026



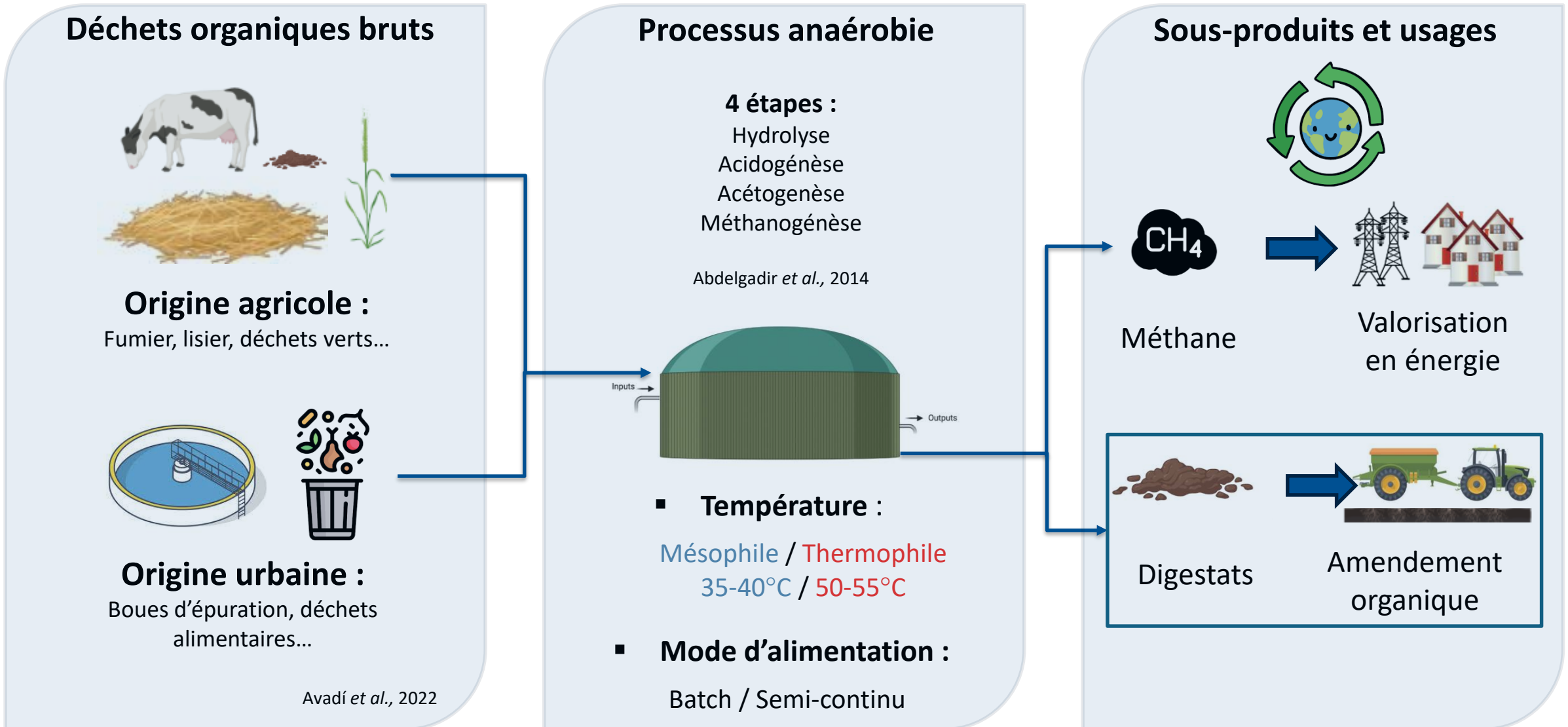
# Occurrence d'indicateurs bactériens du danger sanitaire associés aux pratiques d'épandage de digestats dans les sols agricoles

Caroline Wybraniec, PhD  
Laboratoire d'Écologie Microbienne (Lyon)

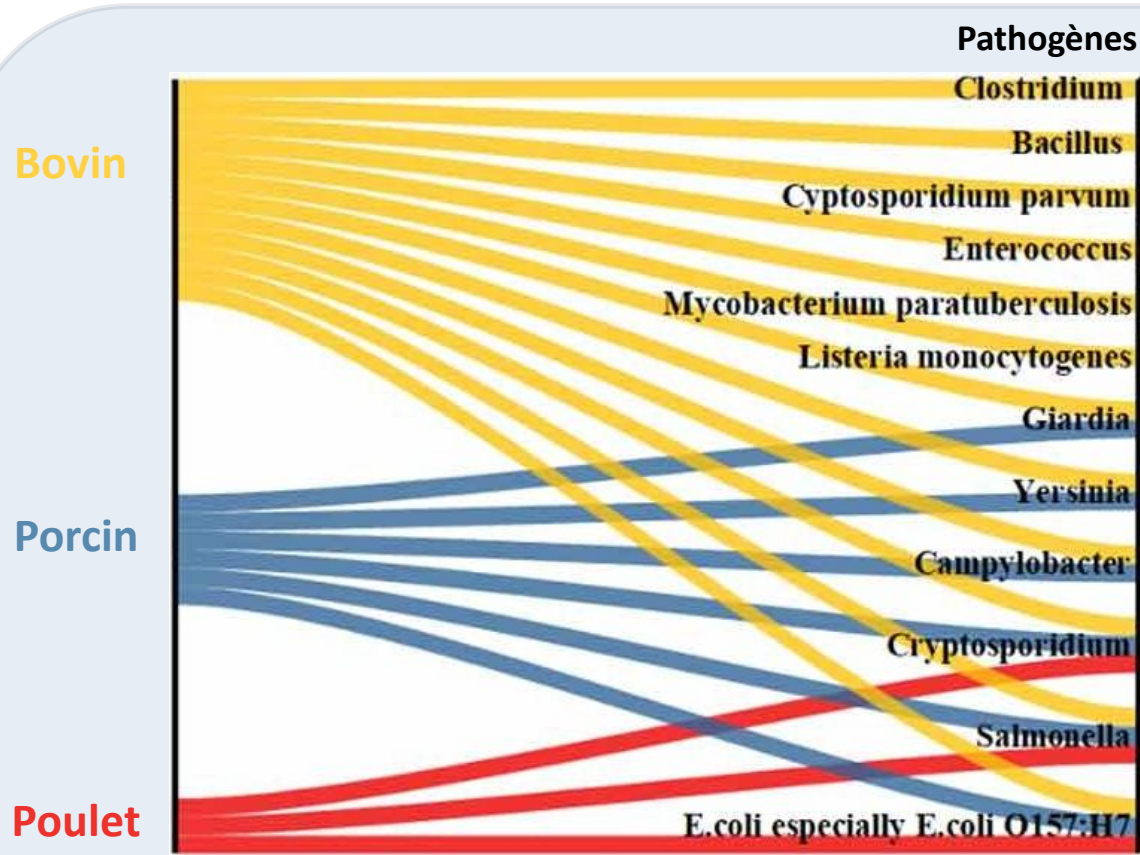
Centre Technique national du Biogaz et de la Méthanisation  
Mai 2026

# La méthanisation

Contexte et enjeux sanitaires



## Déchets agricoles



D'après Lin *et al.* (2022)

## Déchets urbains

### ▪ Boues de station d'épuration (STEP)

Bactéries pathogènes/résistantes aux antibiotiques :  
*Salmonella, Campylobacter jejuni, Campylobacter coli, Listeria monocytogenes*

Sahlström *et al.*, 2004; Hölzel *et al.*, 2010; Avadí *et al.*, 2022

Virus : Polio, Influenza, Adenovirus...

Fijalkowski *et al.*, 2017

### ▪ Déchets alimentaires

*Enterobacteriaceae* (Wu *et al.*, 2018)  
*Pseudomonas, Clostridium, Listeria* mais également  
*Acidovorax sp.* (phytopathogène)

Dharmasena et Jiang, 2018; Sundberg *et al.*, 2011

## Déchets agricoles

### ▪ Fumiers bovins

Produits pharmaceutiques vétérinaires  
(0 et 801  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  de matière sèche)

Hormones  
(0 et 307  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  variations saisonnières)

Métaux lourds  
Fe 7590 > Mn 292 > Zn 170 > Cu 89  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  en moyenne  
*Hill et al., 2021*

### ▪ Fumiers porcins

Métaux lourds  
Zn 110 > Fe 85 > Al 43 > Mn 22 > Cu 12  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  en moyenne

*Antezana et al., 2016*

## Déchets urbains

### ▪ Boues de STEP

Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)  
(67-370  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

*Stevens et al., 2003*

Produits pharmaceutiques (0-429  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

*Fijalkowski et al., 2017*

### ▪ Déchets alimentaires

Métaux lourds ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Pesticides ( $\mu\text{g}$  à  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Polychlorobiphényles ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

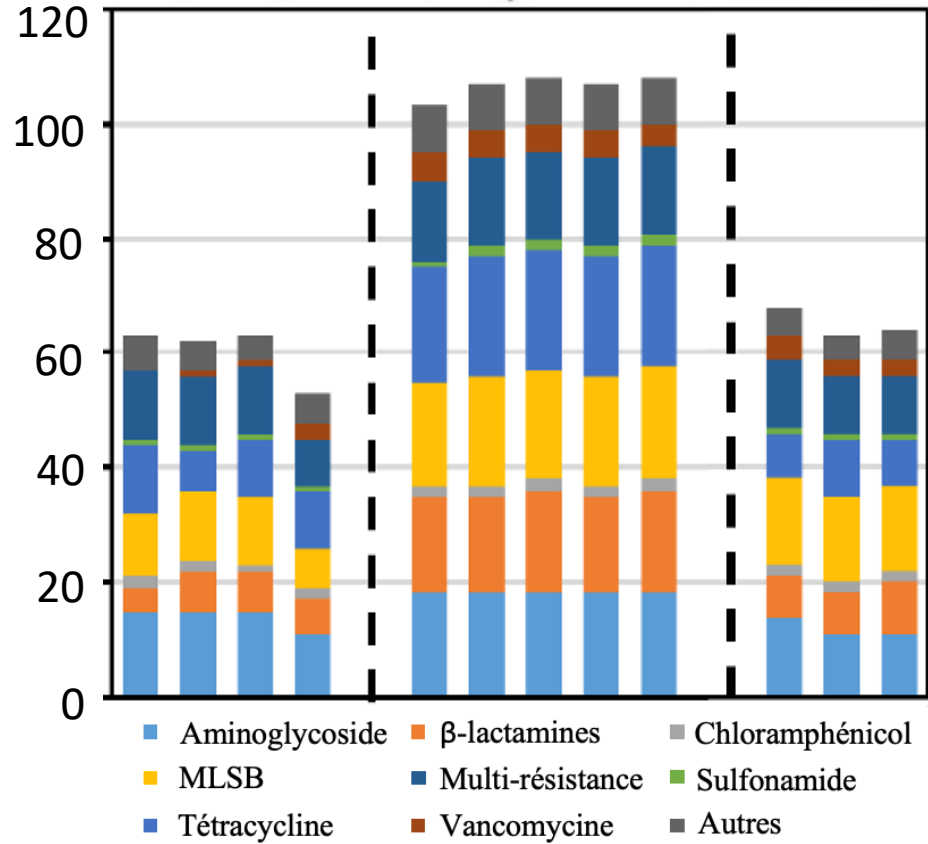
HAP ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

*O'Connor et al., 2022*

# La méthanisation

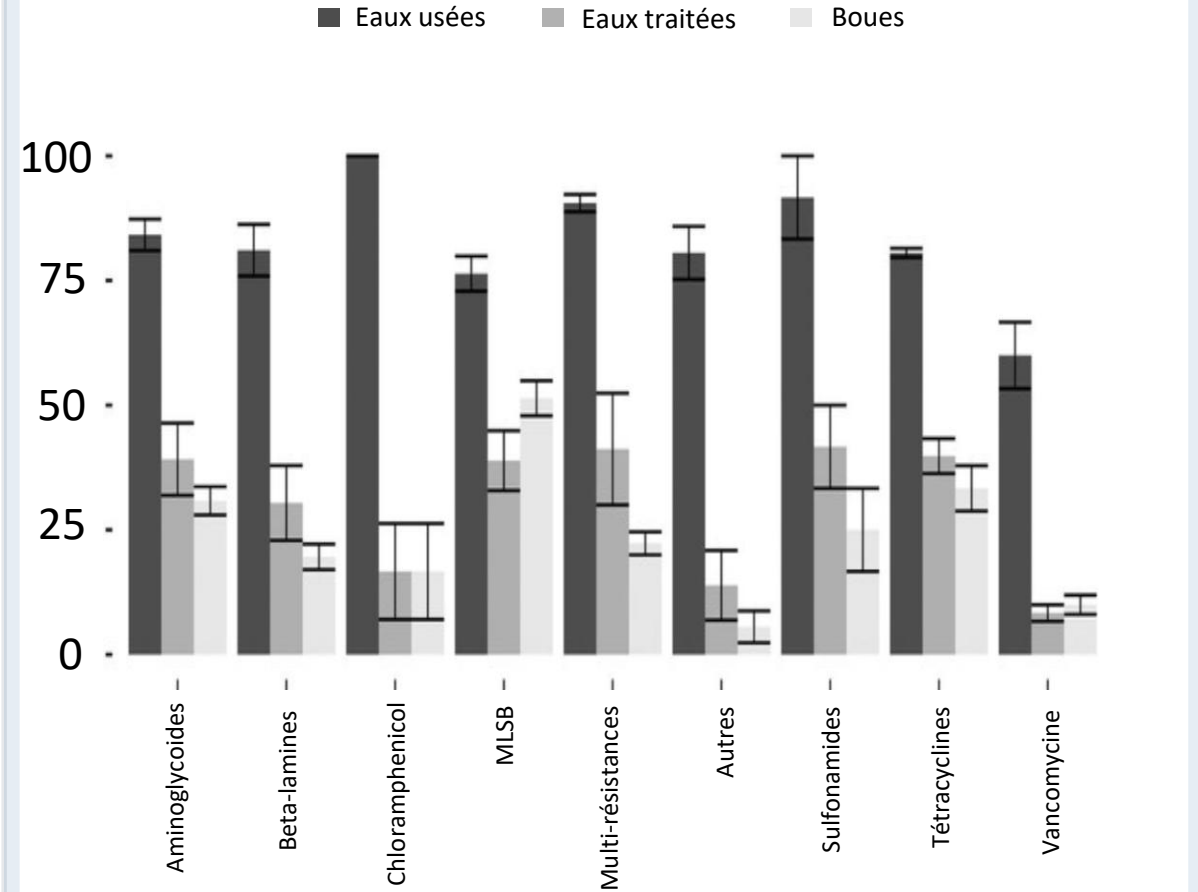
Dangers associés à l'origine des digestats : Gènes de résistance aux antibiotiques (GRA)

## Déchets agricoles



D'après Qian *et al.* (2018)

## Déchets urbains



## Richesse moyenne des GRA/ADNr 16S

D'après Karkman *et al.* (2016)

# La méthanisation

Dangers associés à l'origine des digestats : Éléments génétiques mobiles (EGM)

## Déchets agricoles et urbains

Contiennent des **EGM** : Plasmides, intégrons ou séquences d'insertion (IS)

*Guo et al., 2017; Wolters et al., 2016*

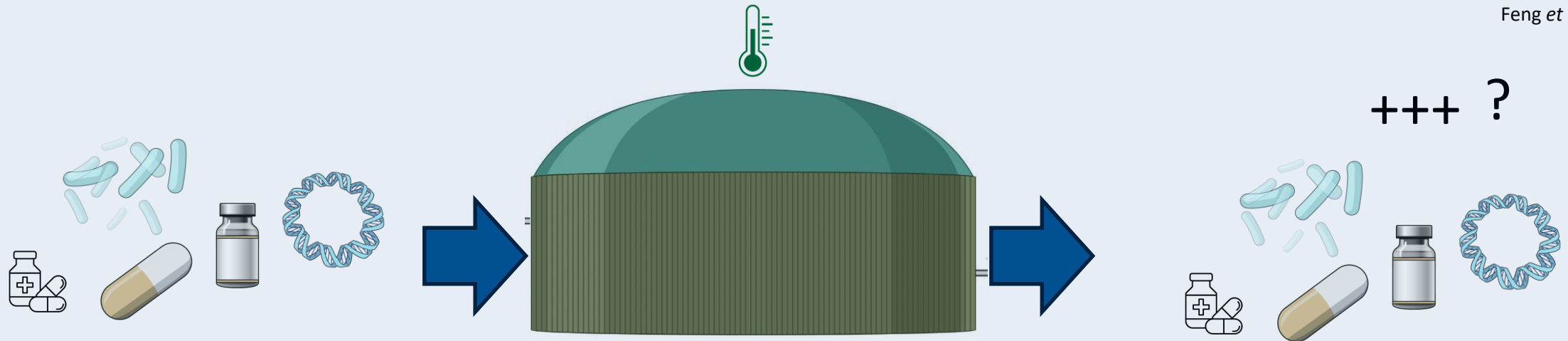
Contaminants chimiques +++

↗ Mécanismes de co-sélection de résistance

*Huo et al., 2024*

↗ Enrichissement et dissémination des GRA

*Feng et al., 2021*



Arrêté du 13 juin 2017 : Limites de contamination pour la commercialisation des digestats en tant que matières fertilisantes

## Critères microbiologiques

- ***Escherichia coli* ou *Enterococcaceae***  
≤ 10<sup>3</sup> UFC/g
- ***Salmonella***  
Absence dans 25 g

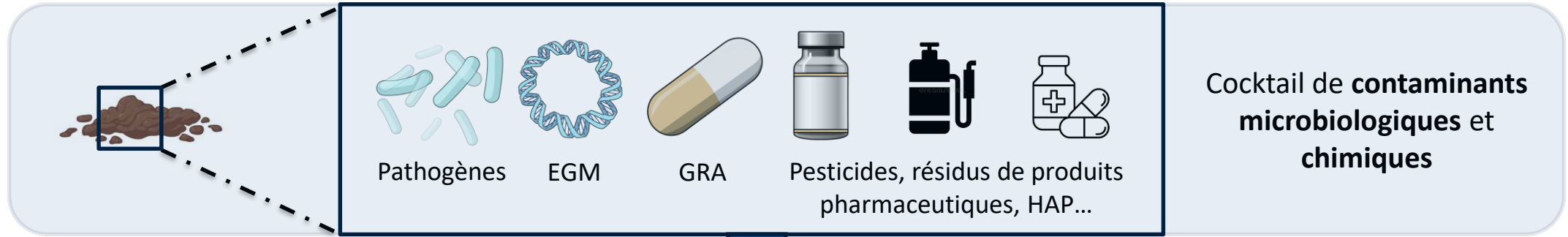
## Critères chimiques

- **Métaux lourds**  
Zn 1500 > Cu 600 > Pb 180 > Cr 120 > Ni 60 >  
As 18 > Se 12 > Cd 3 > Hg 2 mg/kg de MS
- **HAP**  
Somme de 16 HAP < 6 mg·kg<sup>-1</sup>

- ✓ Critères uniquement requis pour **commercialiser** les digestats !
- ✓ **Période de 21 jours** requise entre :  
Épandage et mise en pâturage des animaux ou récolte des fourrages (article 11 du règlement (CE) n°1069/2009)

# Question scientifique

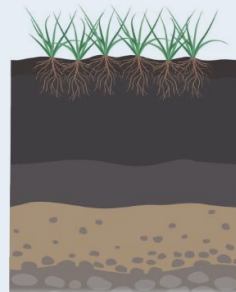
Risques associés à l'épandage des digestats



Après épandage, les digestats entrent en contact avec tout l'écosystème agricole



Animaux de rente



Sol agricole



Phyllosphère

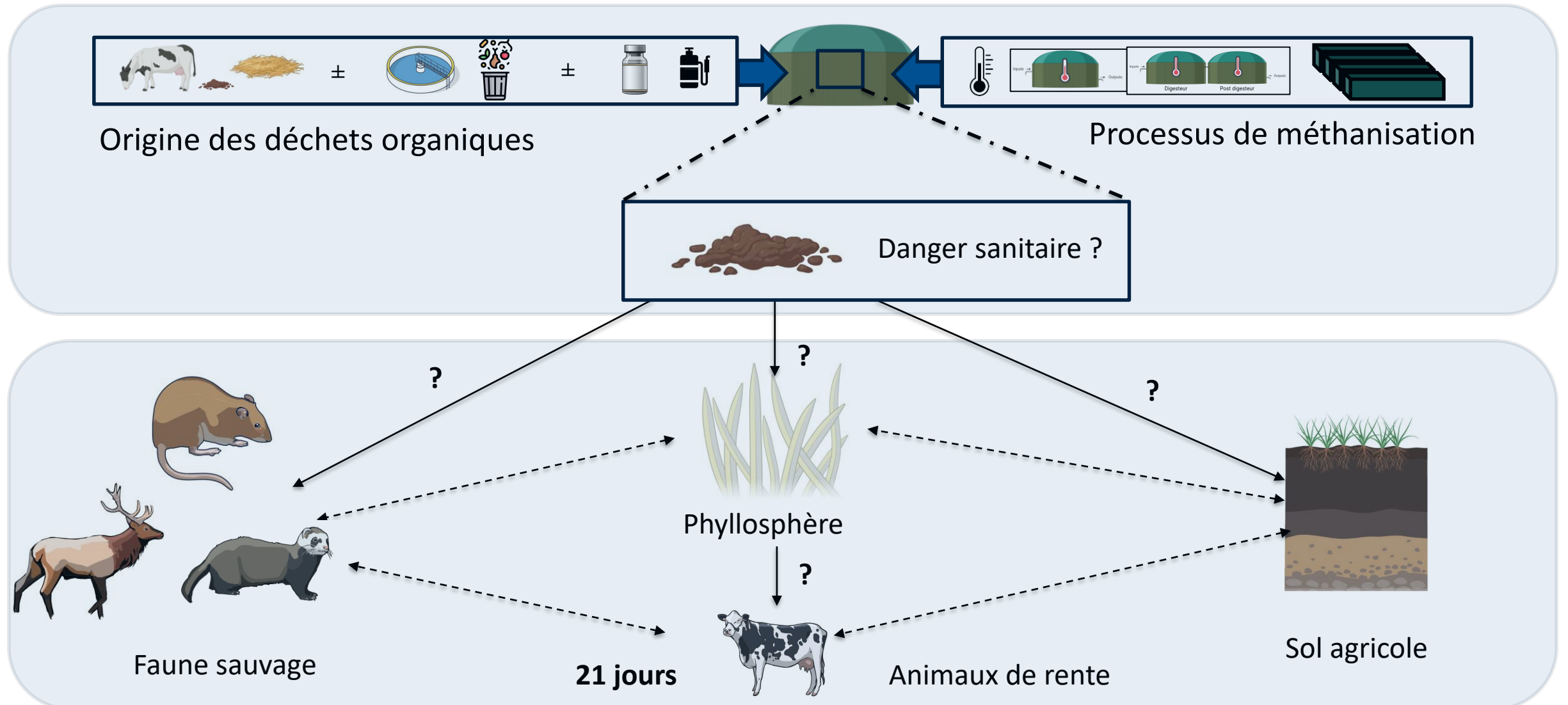


Faune sauvage

Les risques associés doivent donc être abordés dans un cadre de **santé globale**

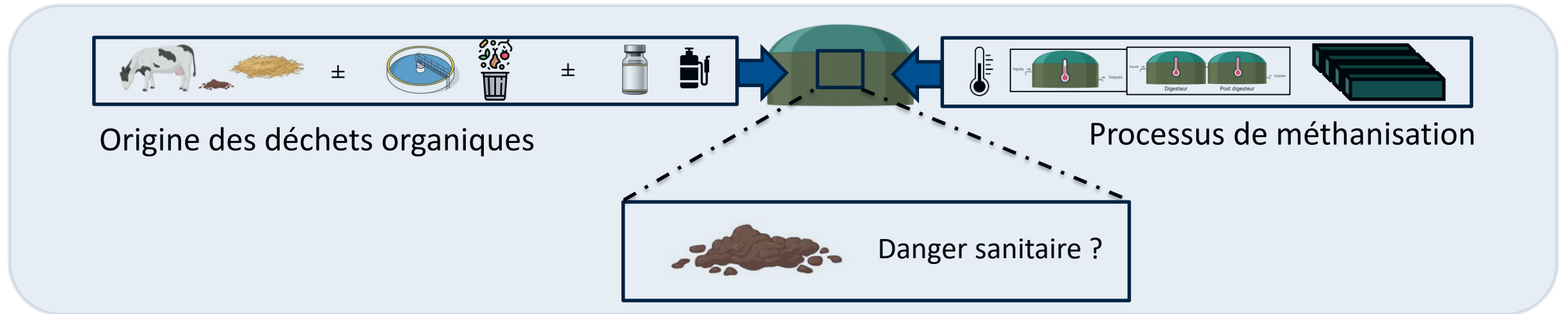
# Question scientifique

Risques associés à l'épandage des digestats



# Question scientifique

Risques associés à l'épandage des digestats



Quel est l'impact de l'origine des déchets organiques et du processus de méthanisation sur la qualité sanitaire des digestats ?

## Avec quels indicateurs mesurer la qualité sanitaire des digestats ?

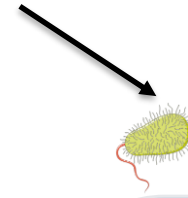
77 indicateurs sélectionnés : Présence dans les déchets d'origine agricole/urbaine dans la littérature

Méthode de détection et quantification validée pour 40 marqueurs moléculaires

12/28 Genres ou espèces pathogènes



23/36 GRA et EGM



4/13 Gènes de virulence

### Gram+/-, aérobies/anaérobies...

e.g. Groupe *Bacillus cereus* (huit espèces)

*Bacteroides* (sous-groupe humain)

*Coxiella burnetii*, *Streptococcus agalactiae*,

*Yersinia enterocolitica*...

Bactéries totales (ADNr 16S)

### Différentes familles d'antibiotiques :

*acrA*, *acrB*, *tolC*, *qacH/E*, *oqxA*, *bla<sub>CTX-M</sub>*, *bla<sub>TEM</sub>*,  
*bla<sub>SHV</sub>*, *ermB*, *tetA*, *tetO*, *tetC*, *sul1*, *sul2*, *vanA*

### Divers EGM :

*IncN*, *IncP*, *IncQ*, *IncF*, *ISEcp1*, *IS26*, *intl1*, *intl2*

### Toxines :

*cpe* : Entérotoxine de *C. perfringens*

*ces* : Toxine émétique de *Bacillus cereus*

### Sidérophores :

*ybtA*, *irp2* : Sidérophore yersiniabactine  
(partagé entre plusieurs Entérobactéries  
comme *E. coli*, *Klebsiella*, *Yersinia*)



### Polluants pharmaceutiques

- ✓ **6 antibiotiques**
  - Quinolones : Norfloxacin
  - Fluoroquinolones : Ofloxacin, ciprofloxacine
  - Tétracyclines : Doxycycline, tétracycline, anhydrotétracycline
- ✓ **1 anti-infectieux (bactériostatique)**
  - Triméthoprime
- ✓ **1 antidépresseur**
  - Fluoxétine
- ✓ **1 antiépileptique**
  - Carbamazépine
- ✓ **2 anti-inflammatoires**
  - Diclofénac, ibuprofène
- ✓ **2 antibactériens**
  - Triclosan, triclocarban



### HAP

- ✓ **13 molécules**

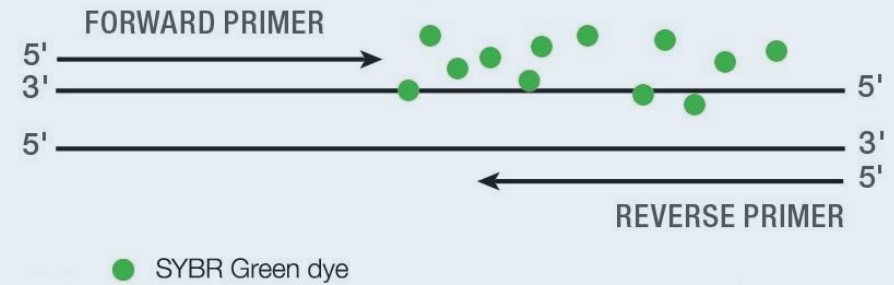


Sertillanges *et al.*, 2020  
Projet ANR Digestate

## Détection (prévalence) par PCR en temps réel (RT-PCR) des marqueurs moléculaires

Chaque séquence d'ADN cible est amplifiée et détectée grâce à un fluorophore (le SYBR Green)

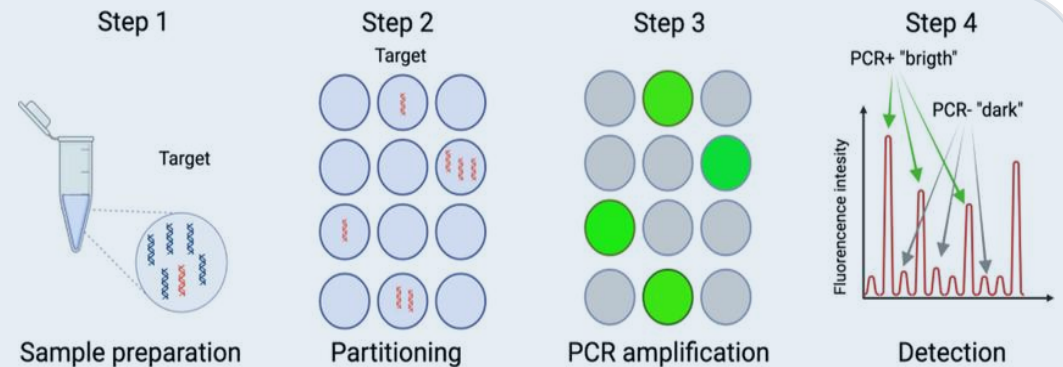
- ✓ Méthode usuellement appliquée



Deepak et al., 2007

## Quantification (concentration) par PCR digitale (ddPCR) des marqueurs moléculaires

- ✓ Méthode moins sensible aux inhibiteurs
- ✓ Ne nécessite pas de courbe d'étalonnage



Baltrušis et Höglund, 2023

## Quel est l'impact...

de **l'origine des déchets organiques**

du **processus de méthanisation**

### sur la qualité sanitaire des digestats ?

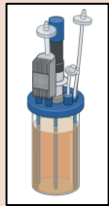
Déchets majoritairement urbains

Déchets agricoles

Réacteurs de laboratoire (6 L, 37°C)

Réacteurs de terrain (Région AURA)

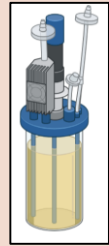
Lab1



**100% Matières fécales**

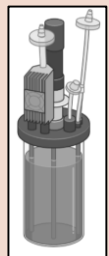
Boue d'épuration (97%) et (3%) fumier bovin

Lab2



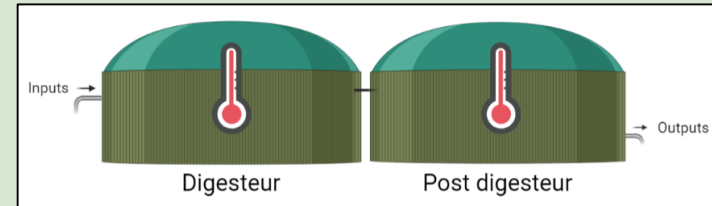
**85% Matières fécales +  
15% Pailles de blé**

Lab3



**81% Matières fécales +  
15% Pailles de blé +  
4% Poudre de zéolite**

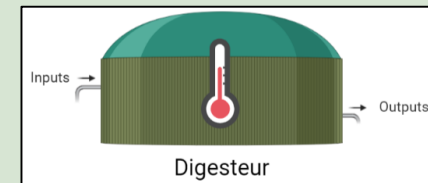
Ter1



**Semi-continu  
bi-étapes**

pH 7.3  
44-45°C

Ter2



**Semi-continu mono-étape**

pH 8.3  
39°C

Ter3



**Batch**

pH 9  
42-47°C

# Résultats

Corrélation entre l'origine des déchets organiques bruts et les polluants chimiques

## Qualité chimique :

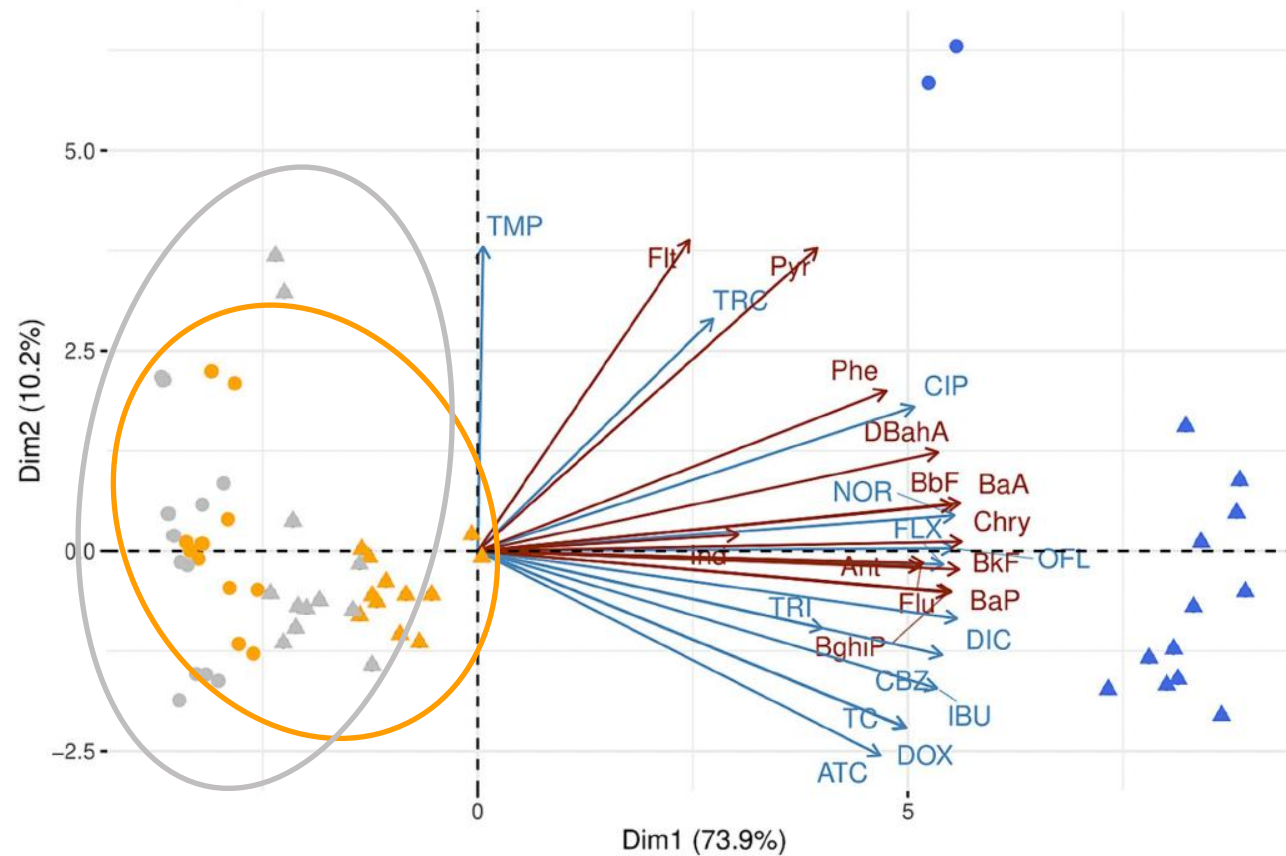
Lab1 > Lab2/Lab3

### Antibiotiques

Doxycycline ( $p < 0.05$ )  
Tétracycline ( $p < 0.05$ )  
Ciproflaxine ( $p < 0.05$ )

### Antibactérien

Triclosan ( $p < 0.01$ )



## Légende

- Lab1
- Lab2
- Lab3
- Déchets bruts
- Digestats
- HAP
- Polluants pharmaceutiques

## Polluants quantifiés :

13 produits pharmaceutiques  
13 HAP

ACP des polluants chimiques en fonction de la nature des déchets organiques utilisés

Wybraniec et al. 2024

### Lab1

100% matières fécales  
(97% boues de STEP)

*int11*, *ISEcp1*,

*oqxA*, *sul1*, *sul2*, *qacH/E*, *ermB*

> 8 log copies/gMS

↗ *int12* (+ 1 log)

↘ *bla<sub>CTX-M</sub>* (-4 log)

### Lab2/Lab3

Matières fécales + Pailles de blé ± Poudre de zéolite

↘ *E. faecalis/faecium* (-1 log),

complexe *M. tuberculosis* (-0,5 log),

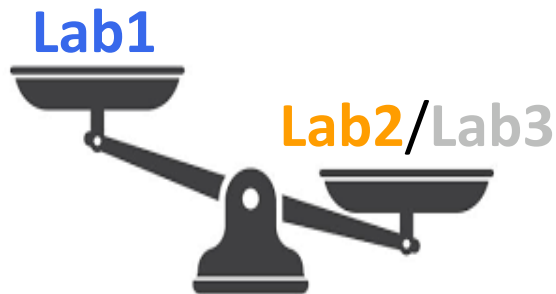
*S. agalactiae* (-4 log)

↘ *int11* (-0,5 log), *int12* (-1 log), *IS26* (-1 log),

*bla<sub>TEM</sub>* (-0,5 log), *bla<sub>CTX-M</sub>* (-4 log)

↘ *irp2* (-4 log)

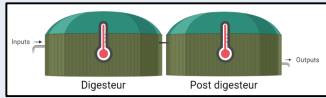
Wybraniec et al., 2024



**Efficacité hygiénisante**

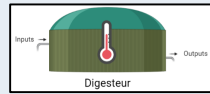
### Semi-continus

Ter1



Bi-étapes

Ter2



Mono-étape

Prévalence et concentration des indicateurs sanitaires :

✗ effet hygiénisation significatif

### Batch

Ter3



↗ groupe *B. cereus* (+2,5 log copies/gMS)

↘ *int12* (-1 log), *tetA* (-1 log)

↘ *ybtA* (-4 log)

Ter1/Ter2



Efficacité hygiénisante

Wybraniec *et al.*, 2024

- ✓ Présence de certains indicateurs est directement liée à l'origine des déchets :

### Déchets agricoles



*C. perfringens* +++

Groupe *B. cereus* +++

*cpe* ---

*ces* ---

### Déchets majoritairement urbains



*C. perfringens* +++

Groupe *B. cereus* +++

*cpe* +++

*ces* +++

Souligne l'importance de l'association :

**Indicateurs utilisés**



**Origine des déchets organiques**

# Impacts & perspectives pour la filière

Quels sont les indicateurs adaptés pour évaluer la qualité sanitaire des digestats ?

## Indicateurs actuels



✓ Peu adaptés :

Tous les *E. coli* ne sont pas pathogènes

✓ Absence de mesure des contaminants

pharmaceutiques (antibiotiques, antimicrobiens...)



Toutefois, il n'existe pas d'indicateur universel...

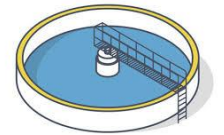
## Indicateurs mis en place

✓ Adaptés selon l'origine des déchets :

Déchets urbains : Gènes de virulence *cpe* et *ces*



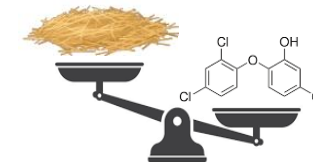
VS



Déchets agricoles riches en paille :

- Contaminants chimiques

Effet hygiénisant sur les EGM et GRA



# Références

Caroline Wybraniec, Benoit Cournoyer, Cécile Moussard, Marion Beaupère, Léa Lusurier, Françoise Leriche, Karine Fayolle, Nicolas Sertillanges, Claire-Sophie Haudin, Sabine Houot, Dominique Patureau, Geneviève Gagne, Wessam Galia

**Occurrence of 40 sanitary indicators in French digestates derived from different anaerobic digestion processes and raw organic wastes from agricultural and urban origin**

DOI: 10.3389/fmicb.2024.1346715

Caroline Wybraniec, Benoit Cournoyer, Joanna Barbe, Ylana Mourier, Laetitia Canonier, Stéphanie Chaverot, Mehdi Hamel, Cécile Moussard, Françoise Leriche, Geneviève Gagne, Wessam Galia

**Valoriser les digestats en Auvergne-Rhône-Alpes : Dynamiques microbiennes et risques sanitaires en grandes cultures et prairies**

DOI: 10.13140/RG.2.2.19867.12327

# Occurrence d'indicateurs bactériens du danger sanitaire associés aux pratiques d'épandage de digestats dans les sols agricoles



 [caroline.wybraniec@univ-tours.fr](mailto:caroline.wybraniec@univ-tours.fr)



ATEE • Tour Eve - 1 place du Sud  
CS20067 - 92800 PUTEAUX  
Tél. : 01 46 56 91 43 • [www.atee.fr](http://www.atee.fr)



Retrouvez les infos scientifiques  
sur [InfoMetha.org](http://InfoMetha.org)



# Épuration du biogaz et procédés membranaires

Margarita KUZNETSOVA, Dr.  
Université de Lorraine, CNRS, Laboratoire Réactions et Génie des Procédés (LRGP)

Centre Technique national du Biogaz et de la Méthanisation  
Mai 2026

# Laboratoire Réactions et Génie des Procédés

Unité de recherche



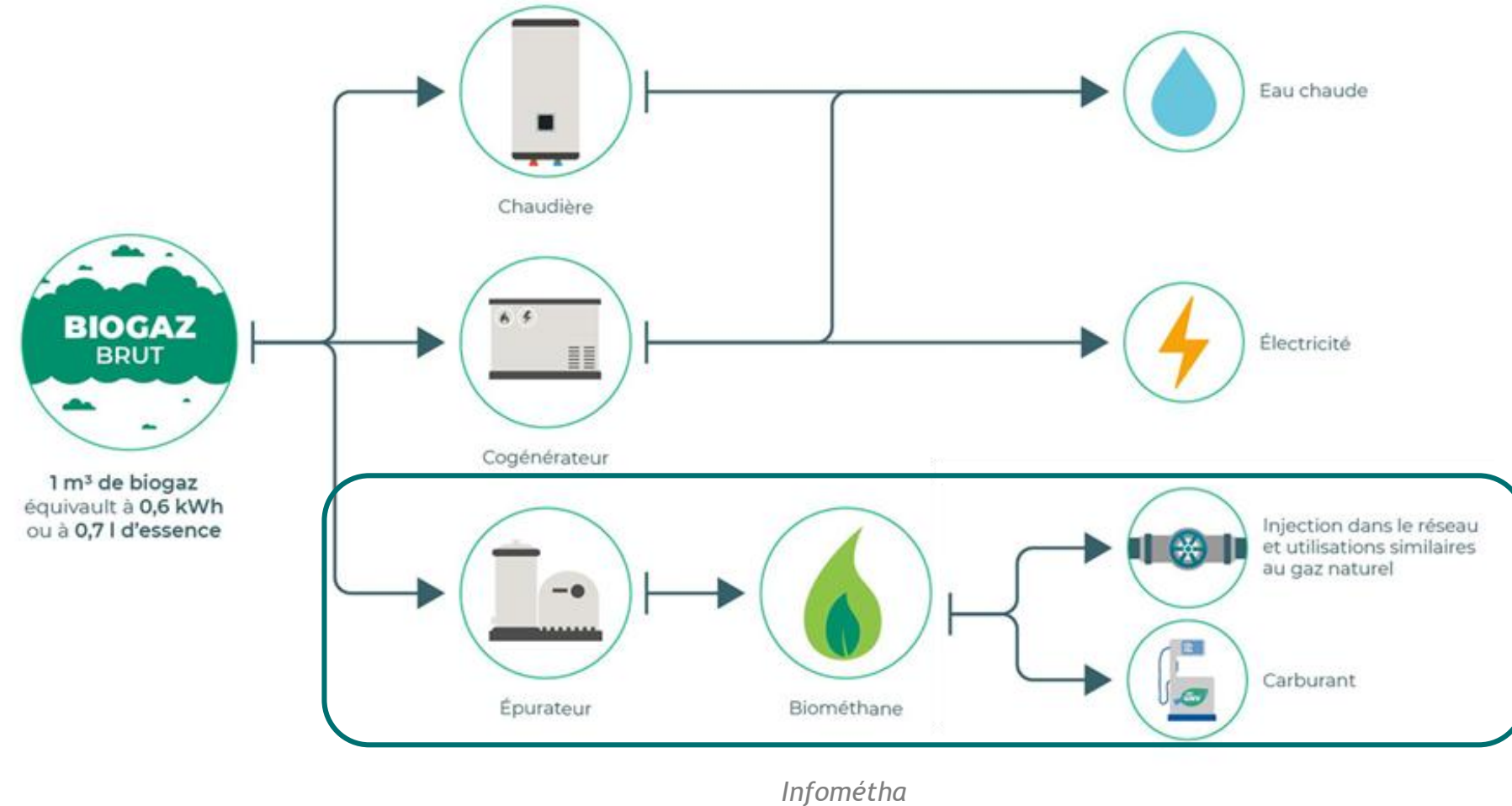
Plus de 300 personnes, dont 12 chercheurs, 78 enseignants-chercheurs, une trentaine de personnels techniques et administratifs, une centaine de doctorants, environ 20 post-docs et ATERs

1. Procédés pour l'Environnement, la Sécurité et la VALorisation des ressources (PErSeVAL)
2. **Procédés, Réacteurs, Intensification, Membranes, Optimisation (PRIMO)**
3. BioProcédés - BioMolécules (BioProMo)
4. CInétique - THERmodynamique - Énergie (CITHERE)
5. Génie des Procédés pour les Produits et les Matériaux (Génie des Produits)



# Valorisation du biogaz

Du gaz brut au biométhane



**Biogaz brut** : un gaz renouvelable produit à partir de déchets organiques de diverse origine

**Biométhane** : un biogaz épuré avec les mêmes caractéristiques que le gaz naturel

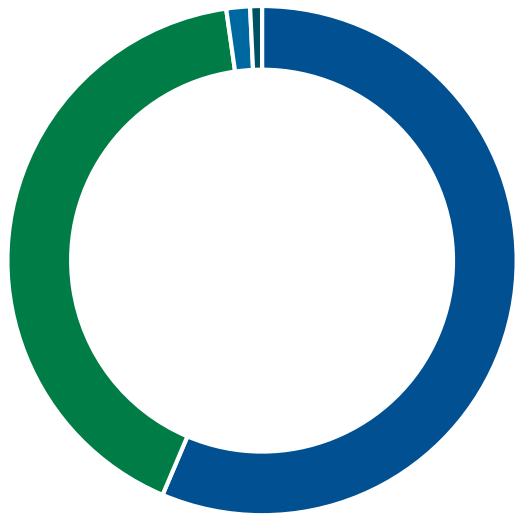


Comment transformer le biogaz brut en un gaz équivalent au gaz naturel ?

# Composition du biogaz

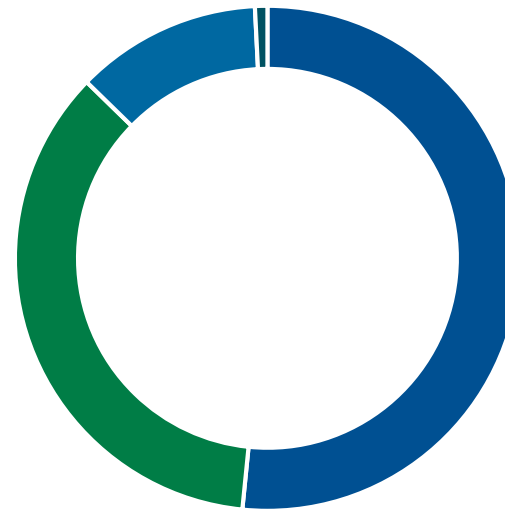
Une composition variable selon l'origine du biogaz

Méthanisation



- CH<sub>4</sub> ~ 50-80%
- CO<sub>2</sub> ~ 30-50%
- O<sub>2</sub> et N<sub>2</sub> ~ 0-3%
- Traces (H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>S, ...)

Gaz de décharge



- CH<sub>4</sub> ~ 35-65%
- CO<sub>2</sub> ~ 30-45%
- N<sub>2</sub> ~ 5-35%
- Traces (H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>S, ...)

- **Méthane (CH<sub>4</sub>)** Un gaz combustible, un composé d'intérêt principal
- **Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)** Une impureté majeure réduisant fortement le pouvoir calorifique

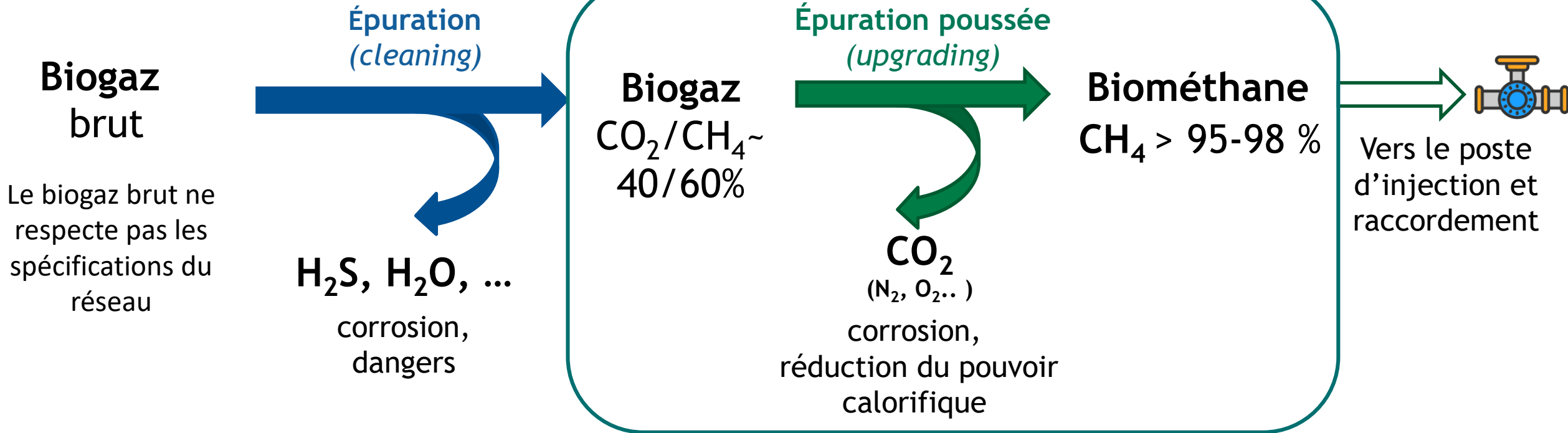


## À retenir

Le biogaz brut peut contenir jusqu'à 50 % de CO<sub>2</sub> → non utilisable directement

# Pourquoi purifier le biogaz

Enjeux énergétiques, réglementaires et opérationnels

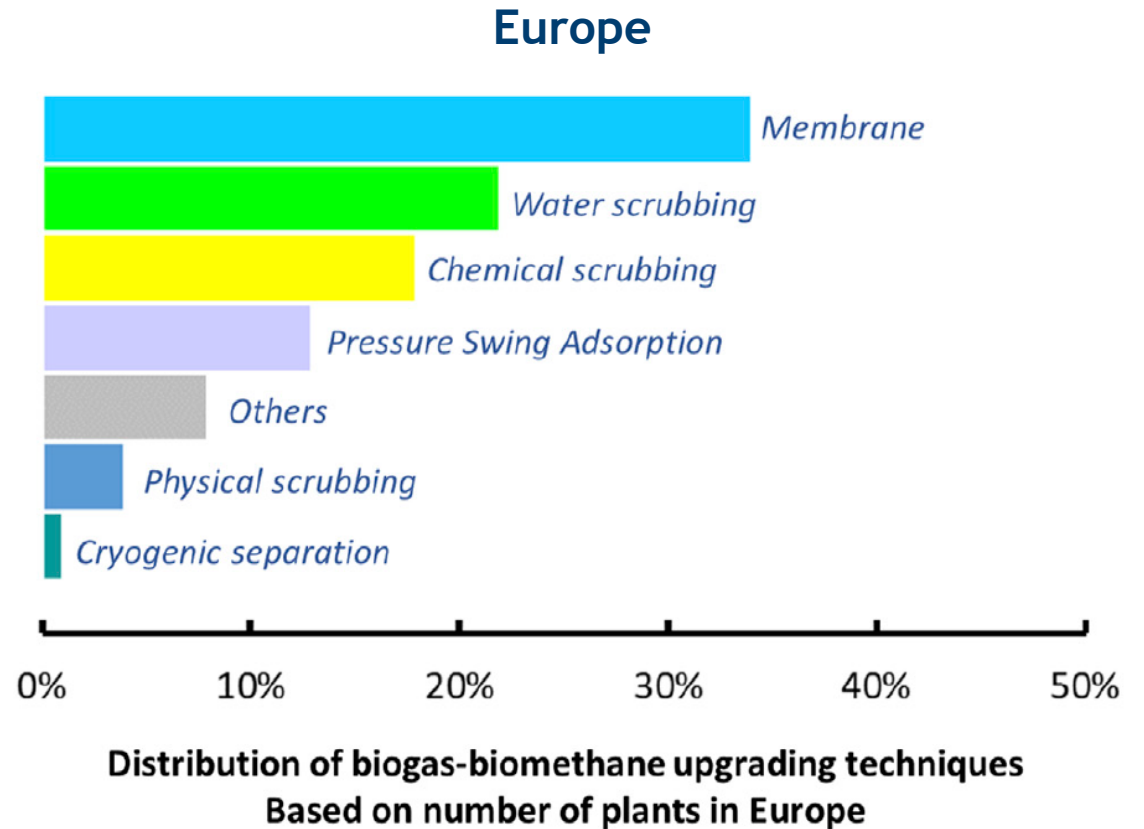
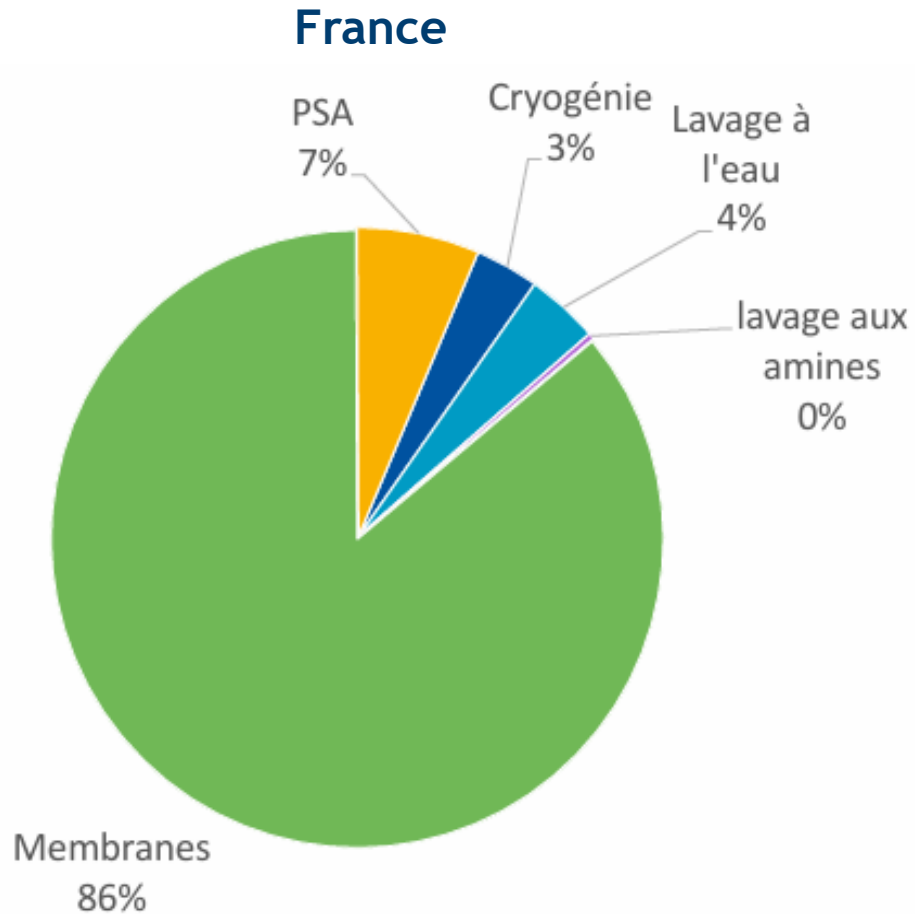


## Upgrading ...

- Valorisation énergétique
- Contraintes d'injection dans le réseau
- Impact des impuretés

# Panorama des technologies d'upgrading

Différentes solutions pour séparer CH<sub>4</sub> du CO<sub>2</sub>



Retour d'expérience interopérateurs sur l'injection de biométhane - année 2024

Sec. Front. Chem. Eng., 26 October 2021 Separation Processes  
Volume 3 - 2021

## Distillation cryogénique

Séparation par liquéfaction à basse température



## Absorption gaz-liquide (eau, amines)

Dissolution sélective du CO<sub>2</sub> dans un liquide



## Adsorption gaz-solide (PSA)

Rétention sélective du CO<sub>2</sub> sur un solide



## Séparation membranaire

Utilisation d'un matériau perméselectif



## AVANTAGES DE LA PERMÉATION GAZEUSE



### Continuité

Sans étape de régénération



### Respectueux de l'environnement



### Efficacité énergétique

Faible OPEX



### Modularité

Conception compacte

Facilité de mise à l'échelle







### Low footprint

Procédé intensifié

# Perméation gazeuse

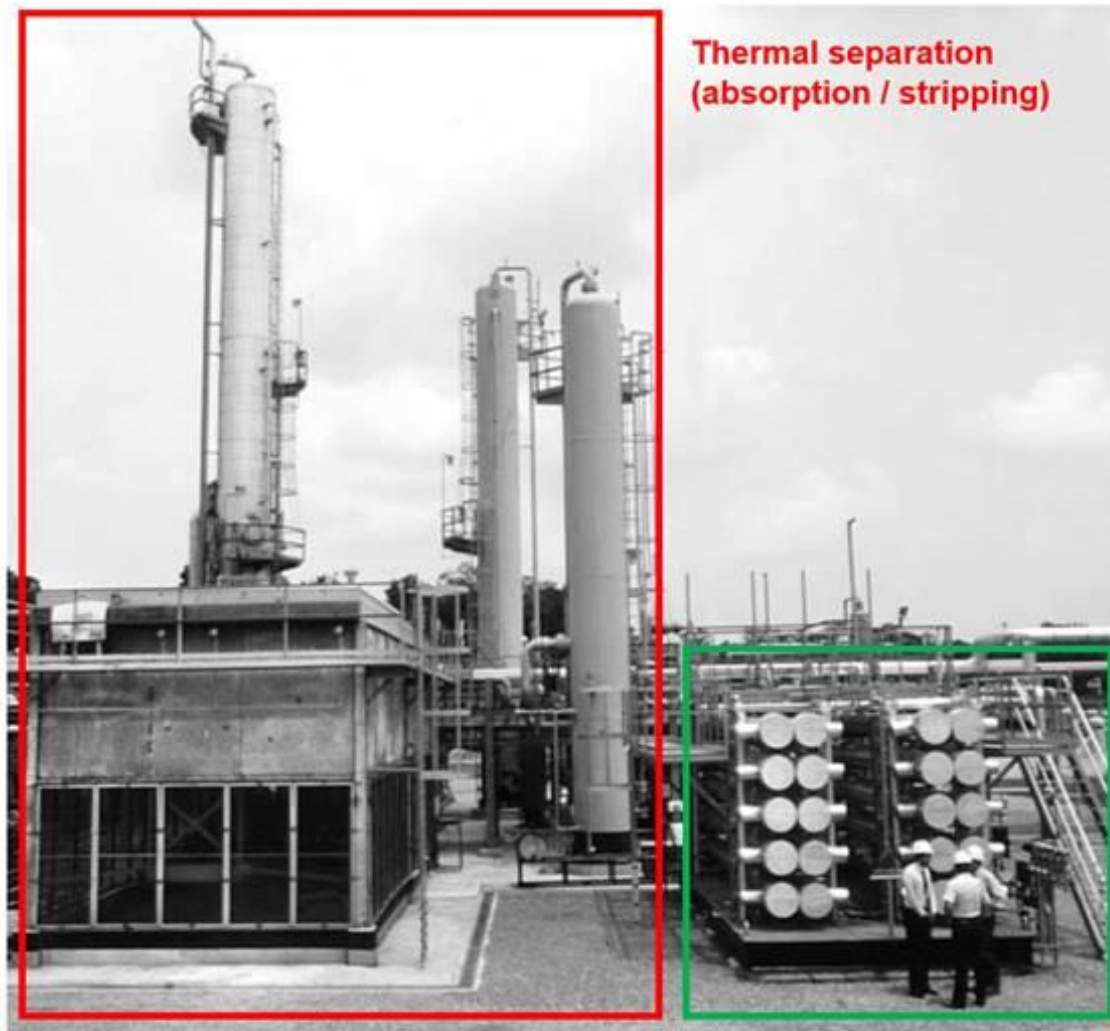
Comparaison des technologies d'upgrading

	Water scrubber	Chemical absorption	PSA	Air Liquide Membrane
CH <sub>4</sub> content (%)	>98%	>98%	97%	>98%
CH <sub>4</sub> recovery rate (%)	98%	98 to 99%	92% to	98% to 99.5%**
Removed elements	CO <sub>2</sub> , COV	CO <sub>2</sub> , COV	CO <sub>2</sub> , COV, O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> *	CO <sub>2</sub> , COV, H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub>
Energy consumption (kWh/Nm <sup>3</sup> raw biogas)	0,24 – 0,4	0,56 – 0,7	0,23 – 0,4	0,2 – 0,3
Off-gases treatment (thermal oxidation)	-	Not required	-	+
CAPEX - OPEX				

(\*): needs a dedicated adsorbent

(\*\*): in development

## CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> separation



Thermal separation  
(absorption / stripping)

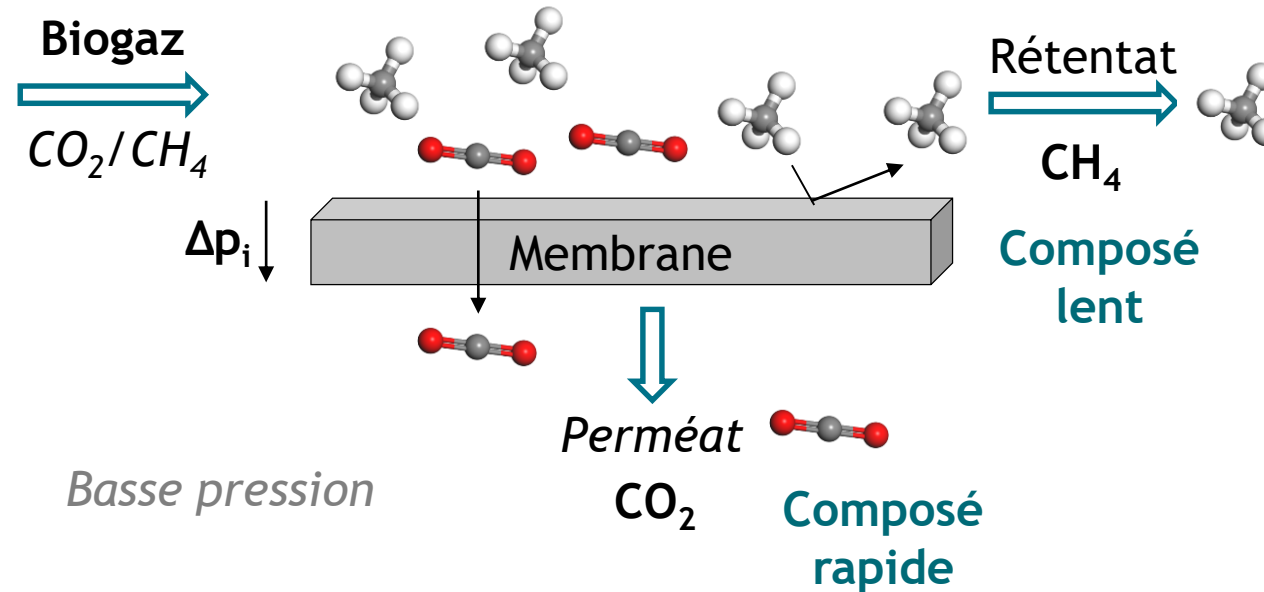
20 polymeric modules  
(same separation task)

Adapted from Dortmund and Doshi (2003) "CO<sub>2</sub> removal membrane technology: recent developments", *Chemical engineering world*, vol. 58, pp. 55-66

# Principe des membranes

Schéma simplifié de séparation  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$

*Haute pression*



*Basse pression*

Séparation cinétique

Force motrice :  $\Delta p$  (différence de pression partielle)



**À retenir**

$\text{CO}_2 \rightarrow$  gaz rapide

$\text{CH}_4 \rightarrow$  gaz lent

# Principe des membranes

## Paramètres caractéristiques

$P_i$  **PERMÉABILITÉ** [Barrer]

Propriété intrinsèque du matériau

$\mathbb{P}_i$  **PERMÉANCE** [GPU - Gas Permeation Unit]

Vitesse de passage des composés à travers un matériau membranaire donné

$\alpha_{i/j}^*$  **SÉLECTIVITÉ**

Rapport des perméances des composés, le plus souvent mesuré en gaz pur

Plus un gaz passe rapidement à travers la membrane, plus sa perméance est élevée

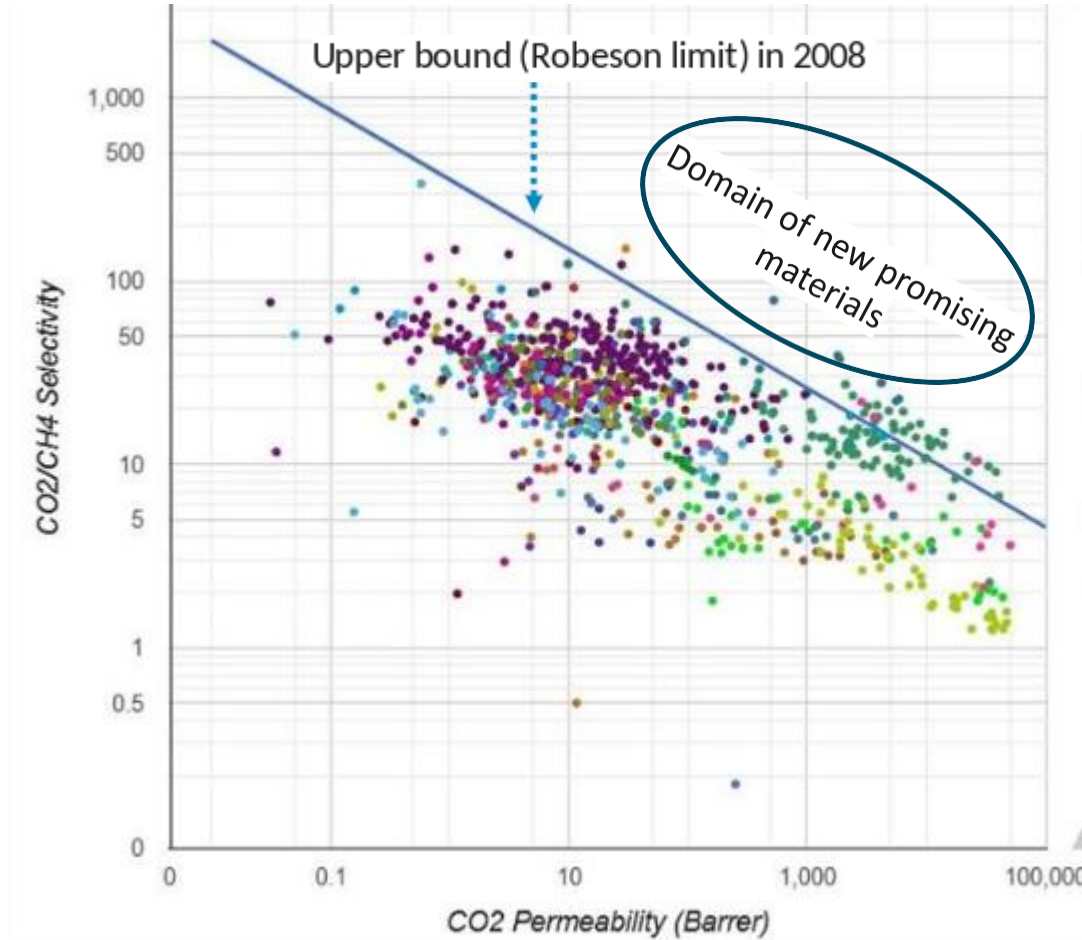
$$J_i = P_i \times A_m \times (p_{i,up} - p_{i,down})$$

Une membrane plus sélective permet d'obtenir un gaz plus pur

$$\alpha_{i/j}^* = \frac{P_i}{P_j}$$

# Trade-off

Perméabilité vs Sélectivité



*Courbe de trade-off pour différents matériaux polymériques*

# Membranes

Types de matériau

- Membranes polymériques (denses), matériaux vitreux
- Matériaux classiques commerciaux

Membrane material	$P_{CO_2}$ (GPU)	$P_{CH_4}$ (GPU)	Cost (EUR/m <sup>2</sup> )	References	Comments
Cellulose Acetate (CA)	60	3	50	[12]	First commercialised membrane material for CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> separation
Polyimide (PI)	60	1	50	[12]	Second generation polymeric membrane material (improved selectivity, close to trade-off limit)
Zeolite	3500	22	2000	[17]	High performance inorganic membrane material (breakthrough permeance and selectivity)

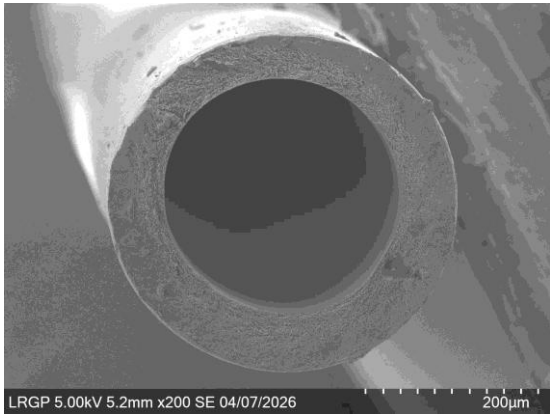
- Membranes inorganiques (poreuses)
- Nouveaux matériaux prometteurs (Chabazite, DDR)
- Non disponibles commercialement à grande échelle

# Modules membranaires

Exemples de fibres creuses polymériques



*Modules industriels*



*Structure des fibres creuses*

*Images MEB (Microscopie électronique à balayage)*



*Assemblage de fibres (module)  
Coupe transversale de la membrane*



**À retenir**

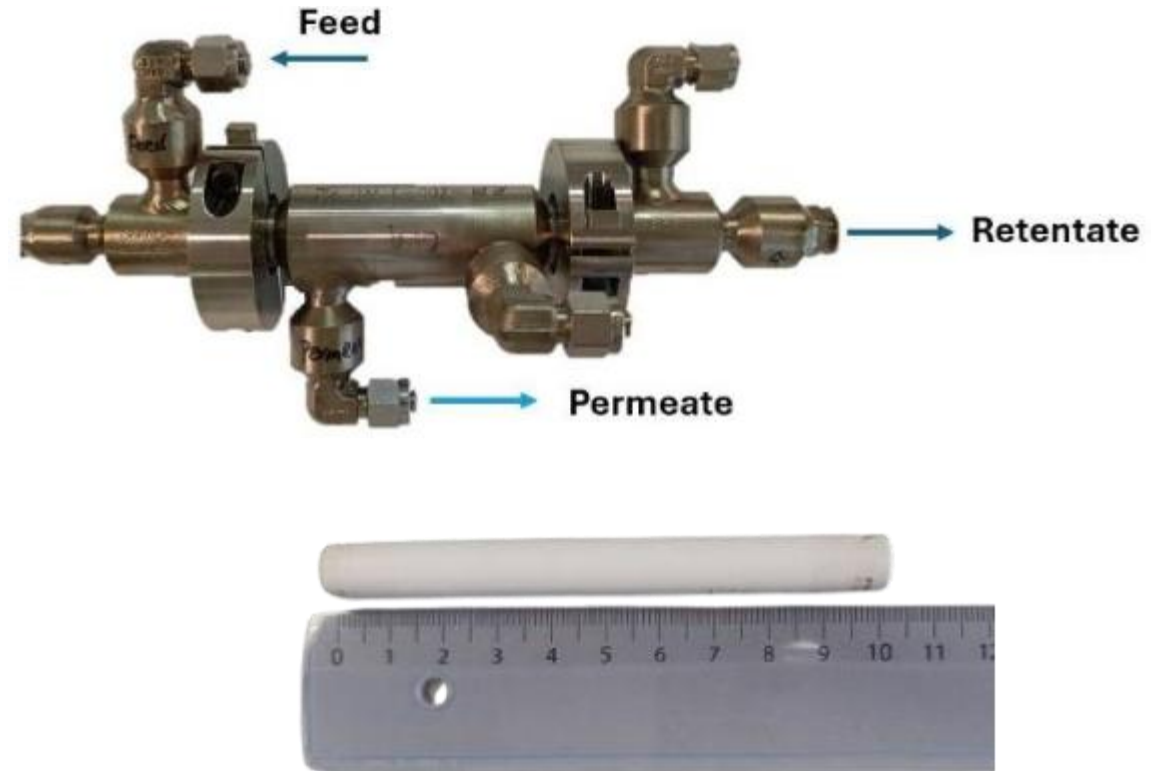
La surface membranaire est très importante

# Méthodologie

Mesures expérimentales : comparaison membranes polymériques et zéolithes



*Module membranaire commercial en polyimide*



*Module membranaire en zéolithe de type Si-CHA*

# Méthodologie

Mesures expérimentales



- **Objectif :**  
Déterminer les paramètres caractéristiques des membranes sur gaz purs (perméance, sélectivité)
- **Gaz étudiés :**  
Biogaz modèle  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  (gaz purs issus du réseau ou de bouteilles)
- **Conditions opératoires:**  
Température: 25 °C, Pression variable, Concentration ...
- **Autres possibilités:**
  - Mélanges binaires  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$
  - Mélanges ternaires  $\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{N}_2$
- **Perspectives expérimentales :**  
Tests possibles en conditions réelles (biogaz brut)



*Banc expérimental de perméation*

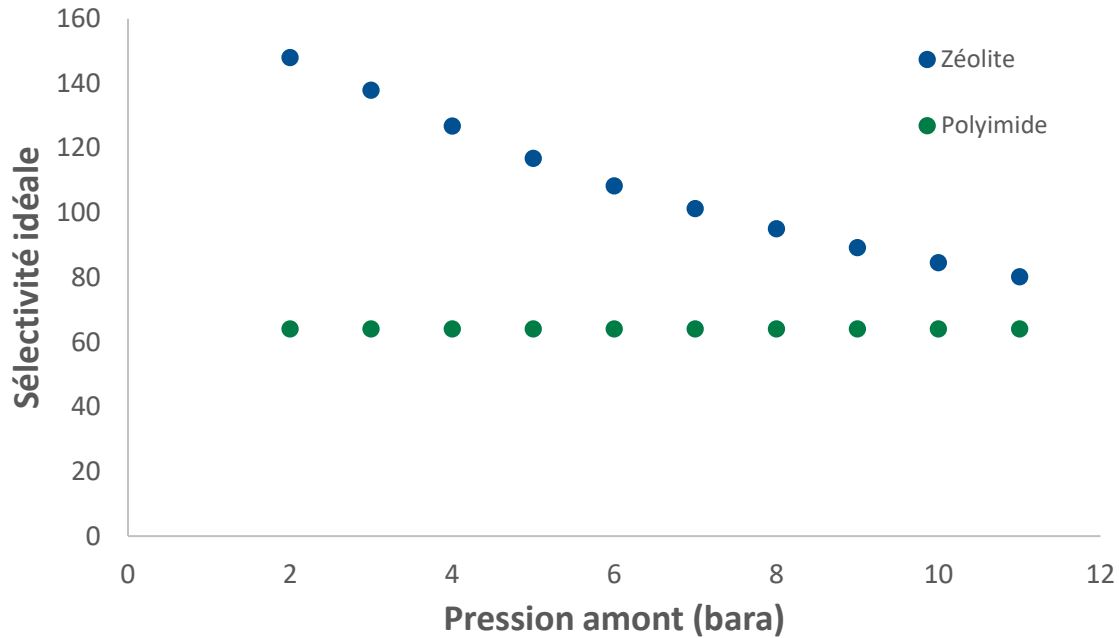
Des vitesses de passage différentes  
des gaz conduisent à leur  
séparation

# Résultats clés

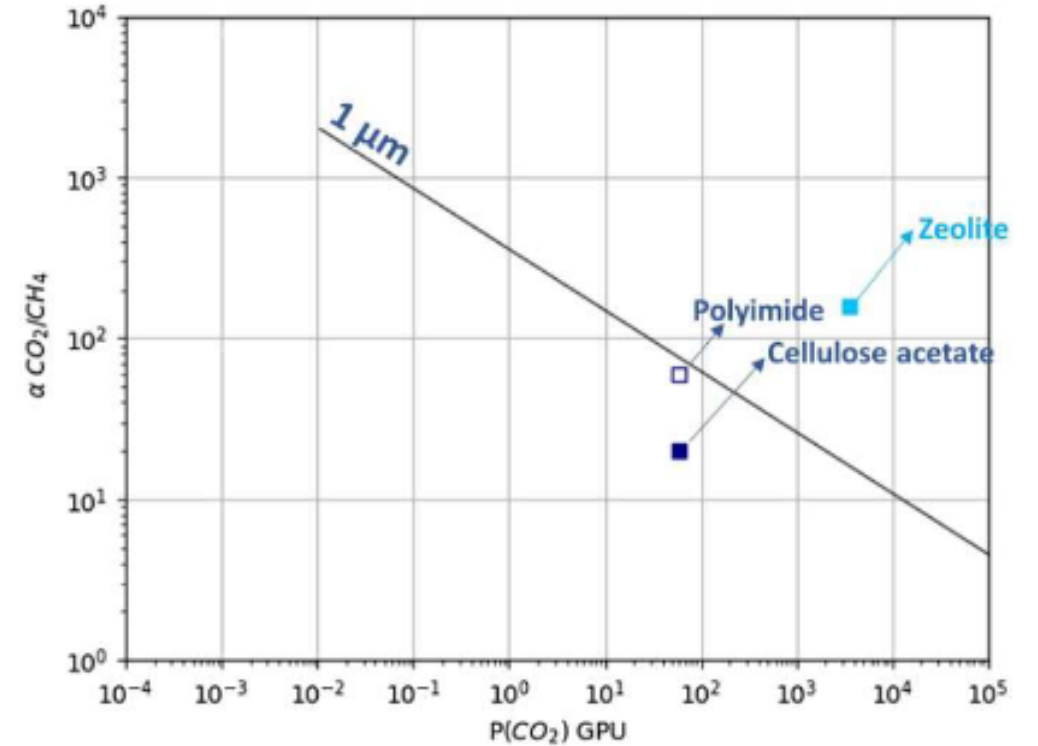
Mesures expérimentales : gaz purs



Variation de la sélectivité  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  mesurée expérimentalement à 25 °C



1. La sélectivité est constante (polymères)
2. La sélectivité diminue avec la pression (zéolithes)



Les membranes inorganiques permettent de dépasser les limites des polymères

# Synthèse des procédés



Potentiel des outils numériques ...

## Optimization framework:

Variable membrane surface area for each stage  
 Variable pressure ratio for each stage including vacuum operation  
 Upstream pressure between 1 to 100 bar, uniform variable  
 Downstream pressure between 0.2 to 1 bar, independent variable

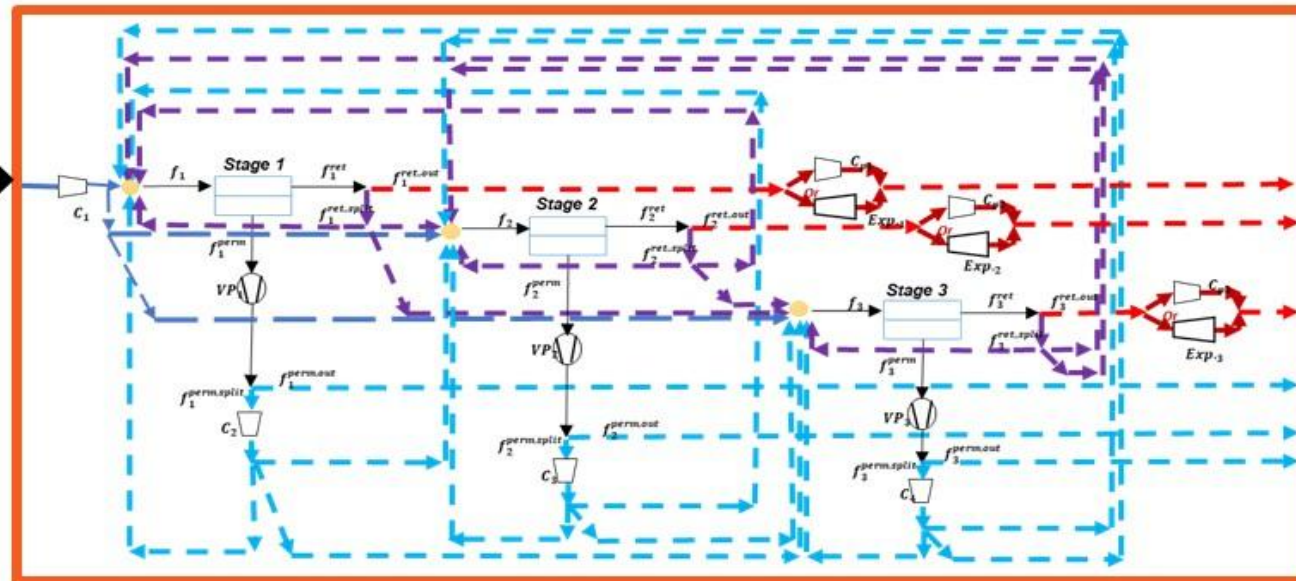
## Process synthesis possibilities:

1. Pre-selected polymer (CA and PI) or inorganic (zeolite) membrane
2. Outlet pressure (biomethane) 5, 10 or 15 bar
3. Feed compressor and/or outlet expander

## Exhaustive combinatorial connectivity including:

1. Variable split stream ratio for all permeate and retentate streams
2. Recycling loops (including self recycling loops)

**Feed mixture**  
**Biogas**  
 60% CH<sub>4</sub> 40% CO<sub>2</sub>  
 Q = 1000 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>  
 P = 1 Bar  
 T = 298 K



**Biomethane (Retentate)**  
 Purity ≥ 98% CH<sub>4</sub>  
 Maximal CH<sub>4</sub> recovery

Permeate

Membrane biogas upgrading process (1 to 3 stages)

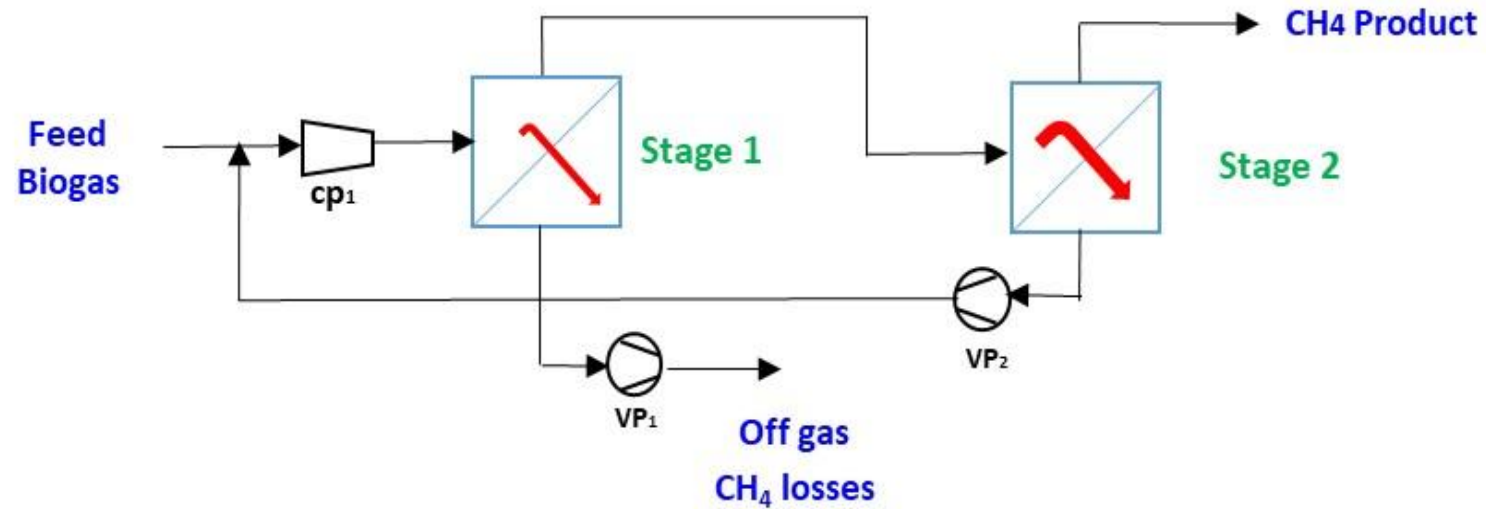
+ Analyse technico-économique

# Résultats clés

Architectures



Upgrading du biogaz : conception optimale de procédé pour une haute sélectivité



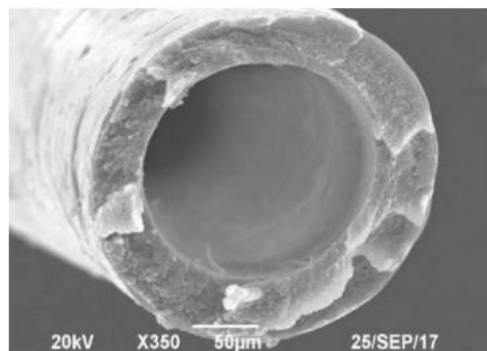


## Our expertise

A multi-scale expertise: membrane material, membrane modules and complete membrane processes.

Our goal is to predict the performance (purity, productivity) and evaluate the relative benefits (OPEX, CAPEX) of a membrane separation process compared to other alternatives, based on various operational parameters (pressure, surface area, temperature, type of membrane material, etc.).

We use innovative membranes and advanced techniques to optimize separation processes.



# Conclusion

## Messages clés

- **Le biogaz nécessite une purification**

Le CO<sub>2</sub> et les impuretés limitent son utilisation directe

- **Les membranes constituent une solution clé**

procédé continu, modulaire et énergétiquement efficace, adapté aux applications décentralisées

- **Limite des membranes polymériques :**

Compromis entre perméance et sélectivité des matériaux polymériques; matériaux commerciaux conventionnels à sélectivité CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> modérée ( $\alpha \sim 64$ ).

- **Potentiel des membranes inorganiques:**

Performances supérieures (sélectivité CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> > 100) mais défis d'industrialisation et de coût

- **Vers des procédés optimisés**

Apport des simulations pour concevoir des architectures performantes

# Impacts et perspectives pour la filière

Apports des membranes et défis à venir



## Industriels:

- Développement de modules
  - Optimisation des procédés
  - Amélioration de la compétitivité économique
  - Flexibilité et déploiement
- 
- Composés mineurs  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$  - conception de procédés spécifiques
  - Développement de procédés hybrides
  - Transfert de technologie



## Académiques:

- Développement de matériaux
- Modélisation et compréhension des mécanismes
- Effets de la polarisation de concentration, ...

# Pour aller plus loin

## Articles scientifiques :

**Bozorg, M. *et al.*** Optimal process design of biogas upgrading membrane systems: Polymeric vs high performance inorganic membrane materials. *Chem. Eng. Sci.* **225**, 115769 (2020)

**Abdul Majid *et al.*** Impact of Concentration Polarization Phenomena on Gas Separation Processes with High-Performance Zeolite Membranes: Experiments vs. Simulations. *Membranes* **14**, 41 (2024)

**Kuznetsova, M. *et al.*** From Molecular Simulations to Experimental Validation of Gas Permeance in Zeolite Membranes. *J. Phys. Chem. C* (2025)

Merci !

Christophe Castel, Eric Favre, Roda Bounaceur, Abdul Majid Omar, Hervé Simonaire, Emilien Girot, Bernardetta Addis, Veronica Piccialli

# Épuration du biogaz et procédés membranaires



Margarita KUZNETSOVA, Dr.  
Chercheuse post-doctorale  
Laboratoire Réactions et Génie des Procédés (LRGP)



margarita.kuznetsova@univ-lorraine.fr



ATEE - Tour Eve - 1 place du Sud

CS20067 - 92800 PUTEAUX

Tél. : 01 46 56 91 43 - [www.atee.fr](http://www.atee.fr)



Retrouvez les infos scientifiques  
sur [InfoMéthA.org](http://InfoMéthA.org)



# Calendrier des Webinaires Janvier – Juin 2026

- **29 mai de 9h30 à 10h30** : Quelles externalités de la méthanisation ? Focus sur les gaz à effets de serre.  
par Hugo Kech, (Analyste Biogaz, AILE)
- **15 juin de 14h à 15h**: Methabiom : Evaluation des systèmes pour la méthanisation agricole en intégrant les spécificités territoriales et les indicateurs environnementaux.  
par Hélène PREUDHOMME (Agrotransfert) et Romain GLOAGUEN (Unilasalle)
- **25 juin de 9h30 à 10h30** : Méthascale : Changement d'échelle de la méthanisation : étude comparative du réacteur de laboratoire à l'unité industrielle.  
par Christine Peyrelasse (APESA) - Audrey Battimelli (Inrae) , Florian Monlau (Totalenergies), Grégory Vericel (Arvalis)