



UNIVERSITÉ DANS LA VILLE  
*un souffle de culture*

# La biométhanisation

**André PAUSS**

Professeur des universités

UTC–GPI/TIMR

[andre.pauss@utc.fr](mailto:andre.pauss@utc.fr)

**Xiaojun LIU**

Maître de Conférences

UTC–GPI/TIMR

[xiaojun.liu@utc.fr](mailto:xiaojun.liu@utc.fr)

06 décembre 2023  
Compiègne

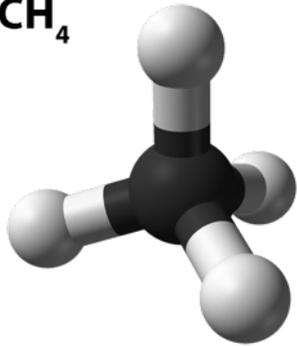
## Définition

La méthanisation (encore appelée « digestion anaérobie ») est la **transformation** de la **matière organique** en un **biogaz** composé principalement de **méthane** et de gaz carbonique **par un consortium microbien fonctionnant en anaérobiose**.

*(Moletta, La méthanisation, 2015)*



# Qu'est-ce que la méthanisation?



## Méthane

Le composé principal du gaz naturel

- Pouvoir calorifique inférieur: 9,94 kWh·Nm<sup>-3</sup>
- Deuxième gaz à effet de serre après CO<sub>2</sub>

Carburant	PCI MJ·kg <sup>-1</sup>
Méthane	50
Essence E10	39,5
Essence	41
Diesel	43
H <sub>2</sub>	120
Charbon	35



## Histoire de la méthanisation

- Les microorganismes méthanogènes sont apparus très tôt dans l'histoire de la terre
- 10e siècle avant J.-C., le biogaz est utilisé pour chauffer l'eau en Assyrie.
- Volta en 1776 a trouvé une relation entre la quantité de matière en décomposition et la quantité de gaz inflammable produite (gaz des marais)



- Lavoisier 1787 dit que le gaz de Volta est "gas hydrogenium carbonatrum", c'est-à-dire composé de carbone et d'hydrogène

## Histoire de la méthanisation

- 1859 : Premier digesteur construit à Bombay dans une colonie de lépreux
- 1895 : L'Angleterre développe une fosse septique pour la ville d'Exeter afin d'utiliser le biogaz pour l'éclairage
- 1907 : Imhoff Allemagne - brevet délivré pour la cuve Imhoff
- 1940 : la digestion du fumier pour produire du méthane se développe en France avec le digesteur Ducellier-Isman et en Allemagne autour de la Seconde Guerre mondiale.



digesteur agricole et cuisinière alimentée en gaz de fumier<sup>17</sup> (1952)

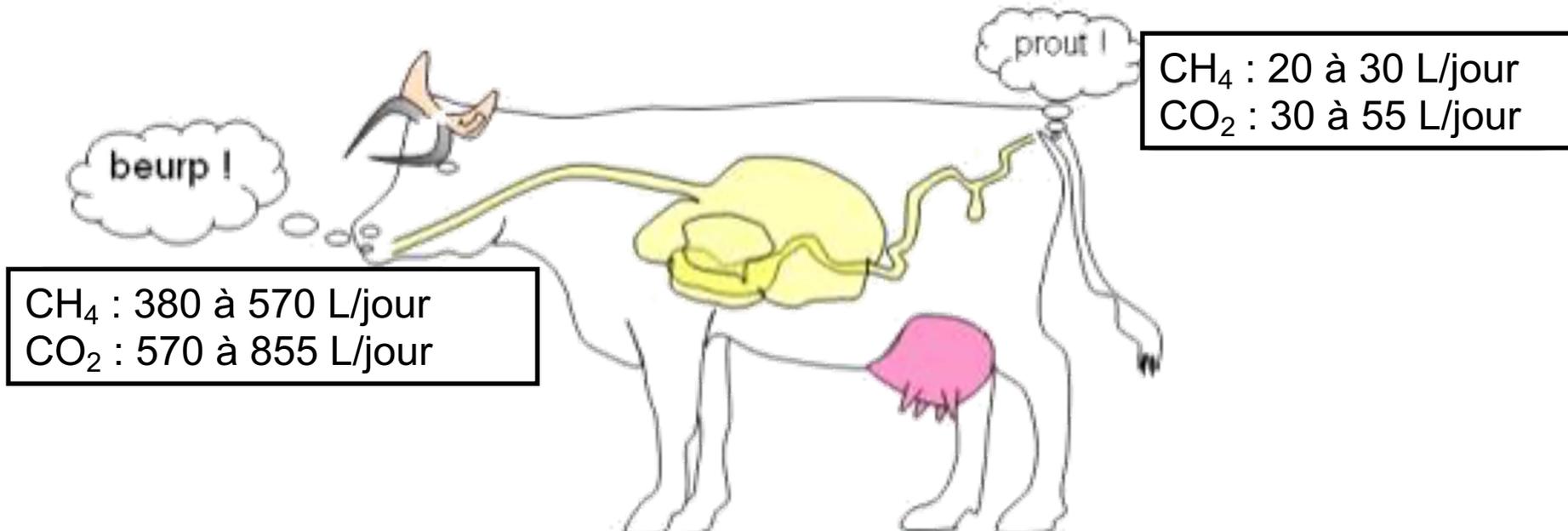
## Histoire de la méthanisation



Source : Wellinger,2010; Johannes,2010



**Phénomène naturel au niveau du tractus intestinal des organismes vivants :  
Humains, ruminants, termites**



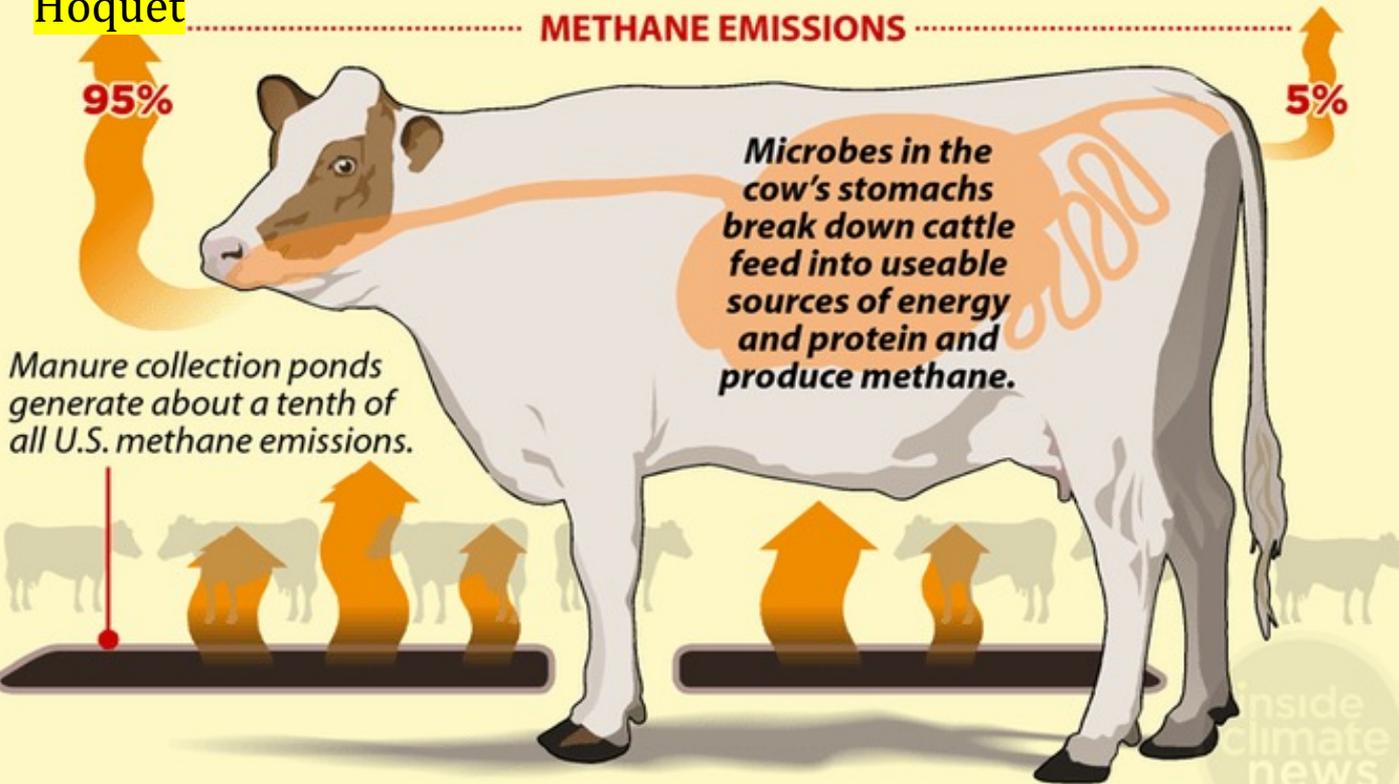
Production mondiale de gaz à effet de serre (GES)  
900 milliards de tonnes/an, soit 18% des émissions

## Livestock-Based Methane Emissions

About a quarter of U.S. methane emissions come straight out of livestock, most of it from belching.

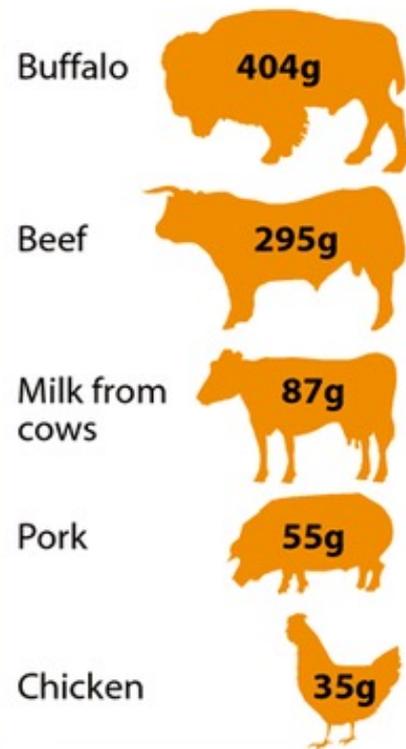
**Hoquet**

**Flatulence**



### METHANE EMISSIONS PER GRAM OF PROTEIN

Global estimates in grams, CO<sub>2</sub>-equivalent



SOURCES: EPA; FAO

PAUL HORN / InsideClimate News

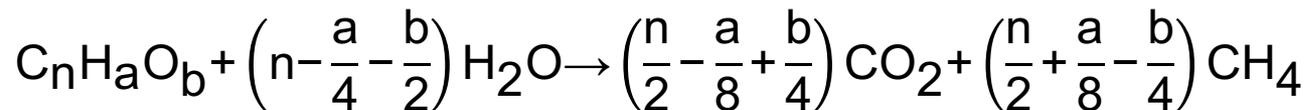
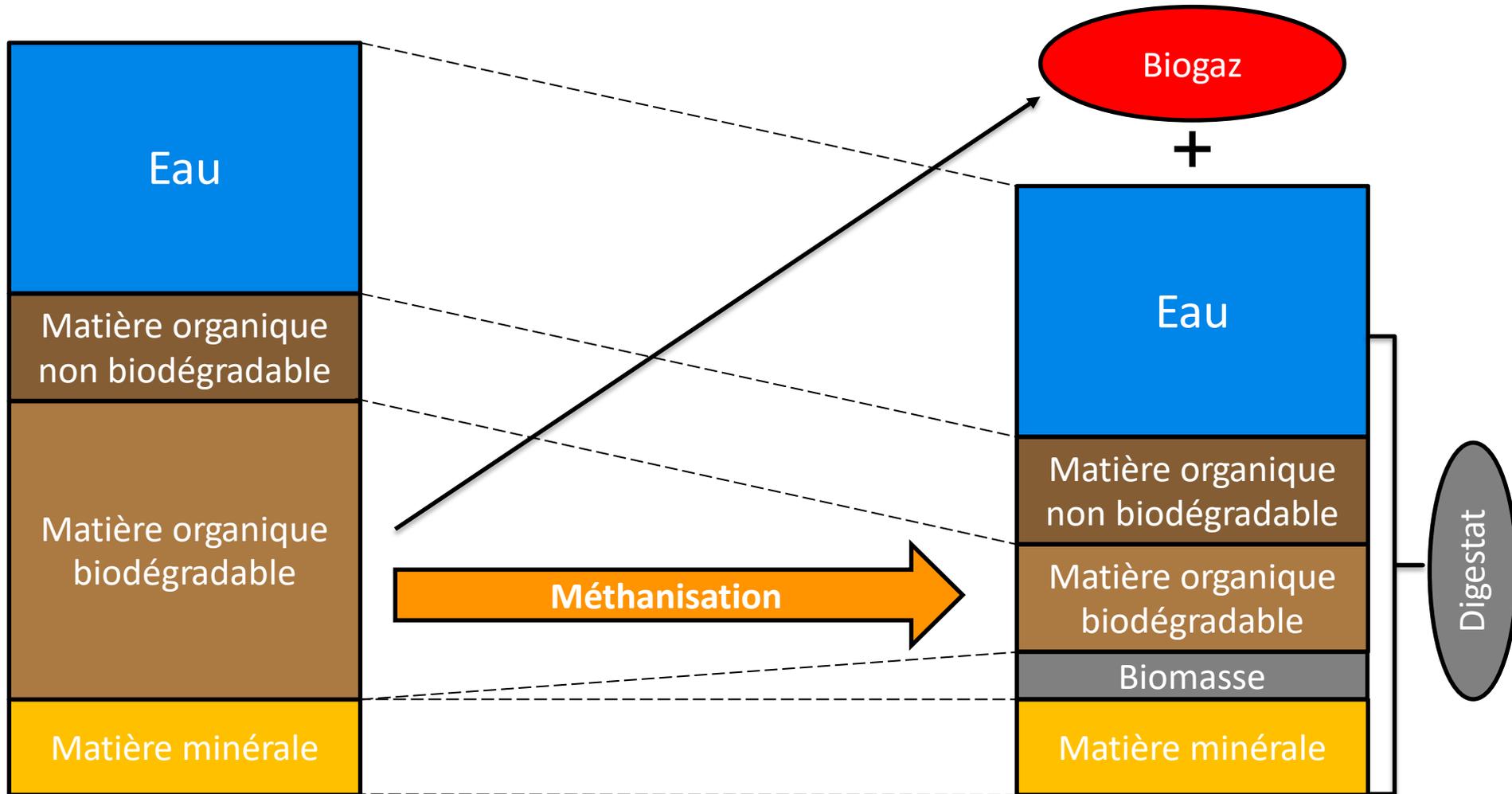
**Potentiel de réchauffement global (PRG) à 100 ans**

(US EPA & FAO)

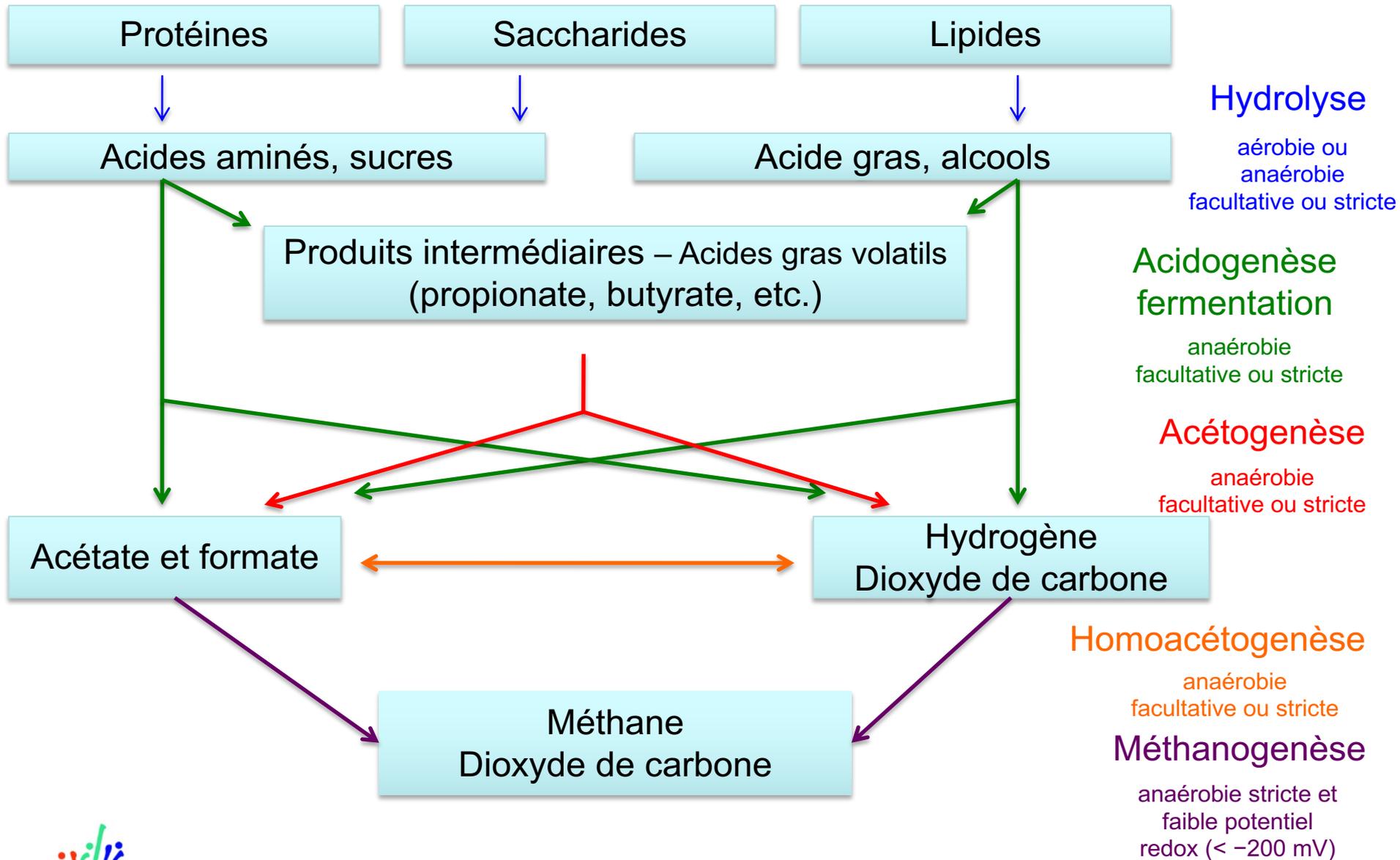
1 kg CH<sub>4</sub> a un impact sur l'effet de serre équivalent à 25 kg CO<sub>2</sub>



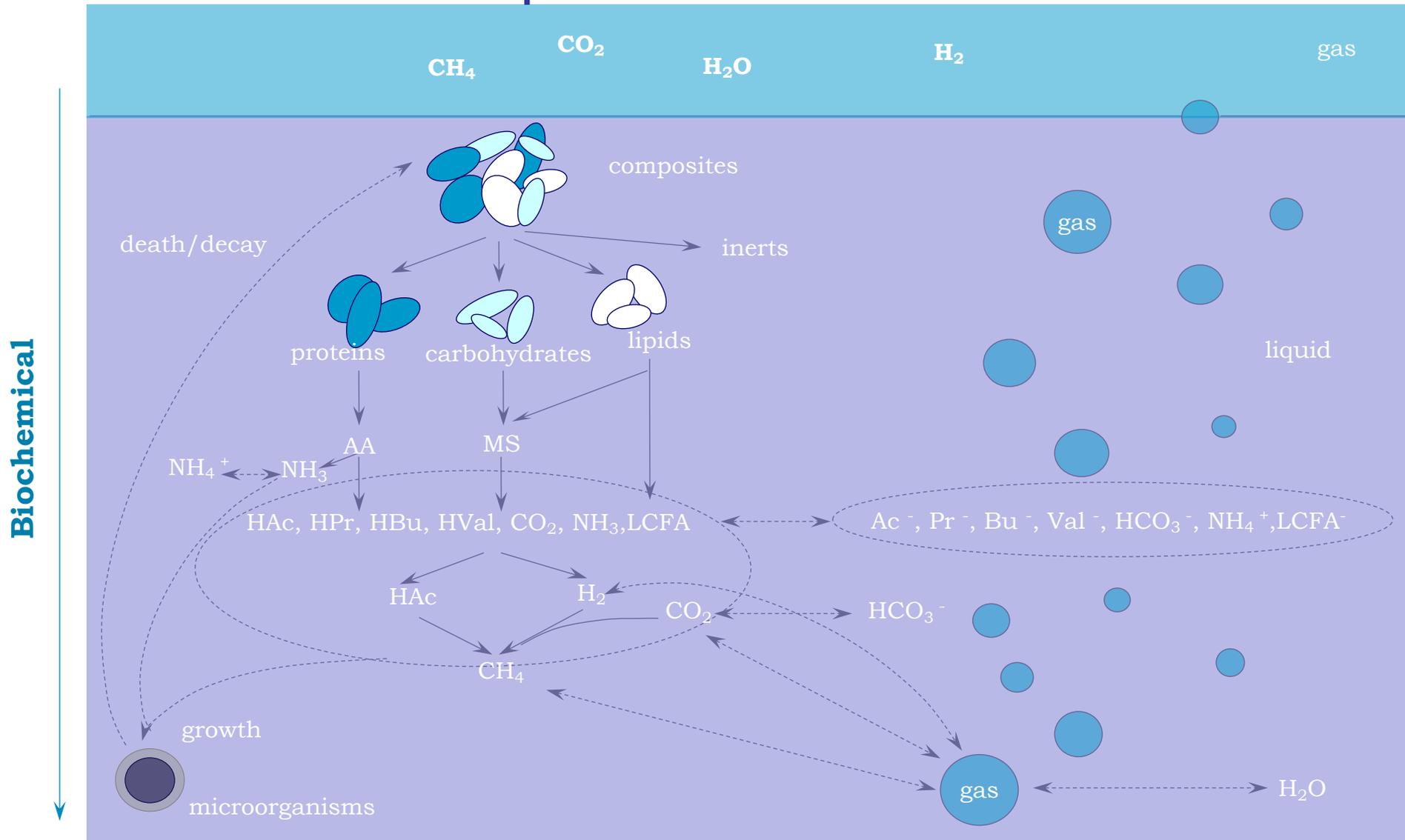
## Représentations schématiques de la méthanisation



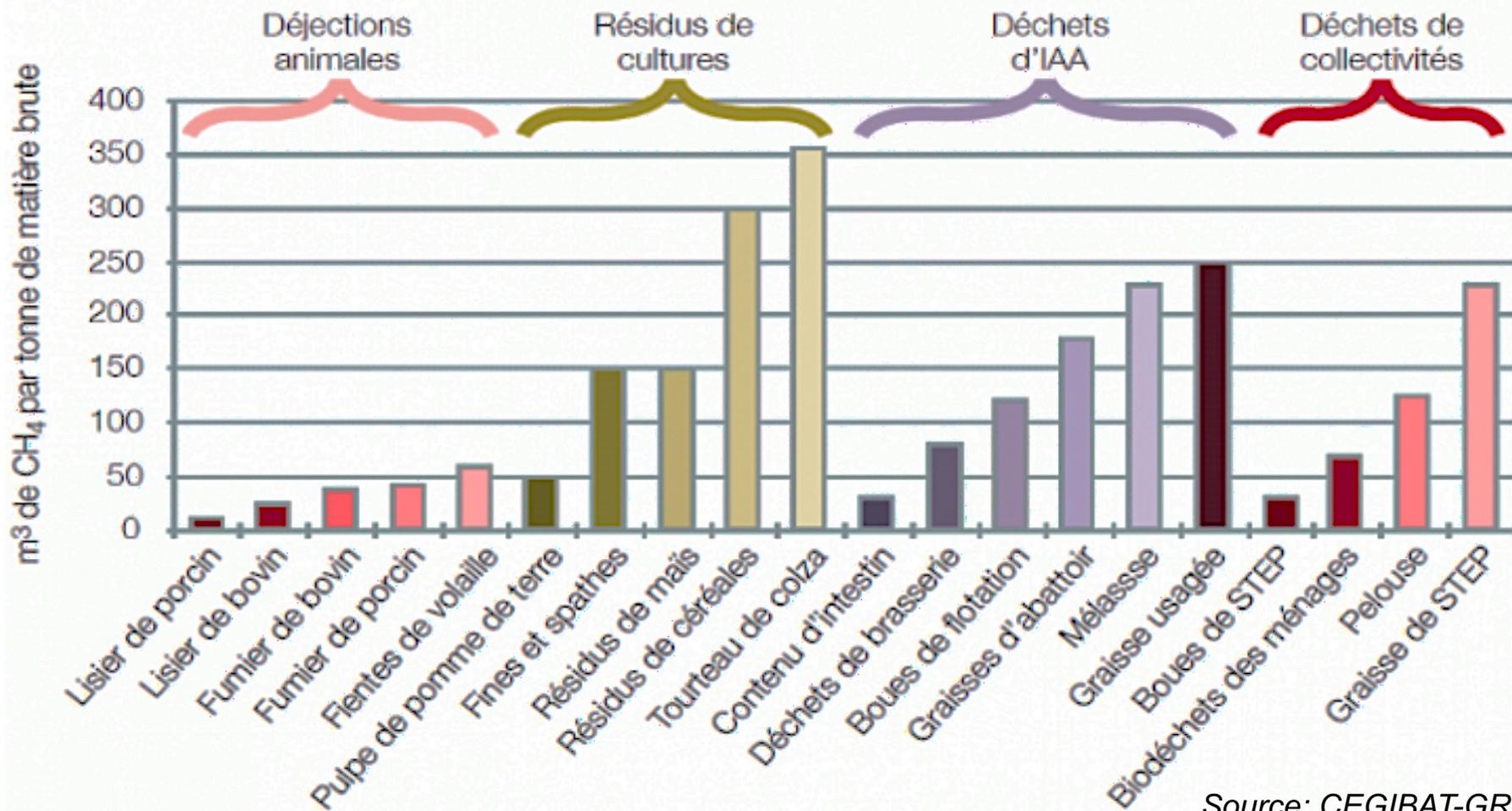
## MATIÈRE ORGANIQUE PRÉTRAITÉE



## Complexité de la méthanisation



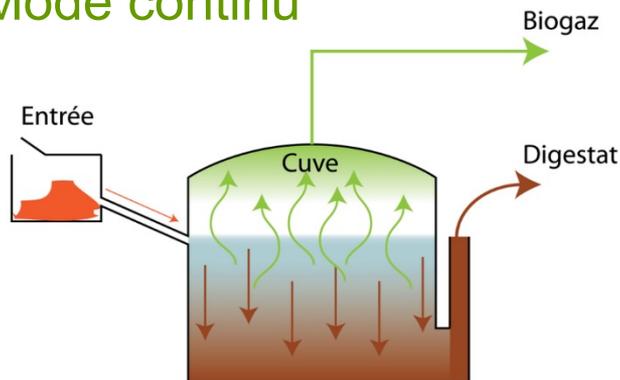
## Potentiel méthanogène de différents substrats agricoles et alimentaires



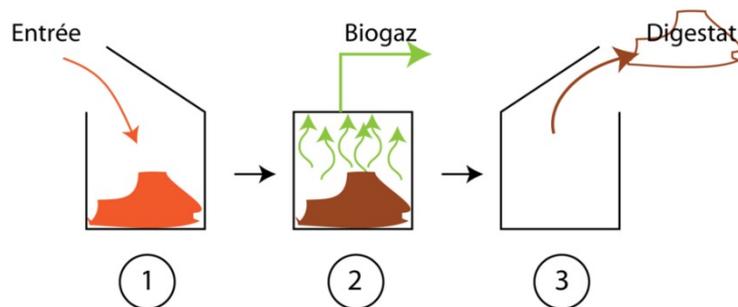
Source: CEGIBAT-GRDF

## 2 modes : continu ou discontinu

### Mode continu



### Mode discontinu



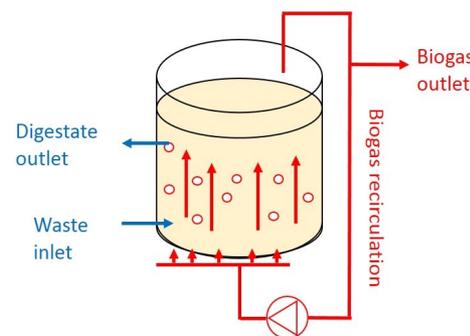
## 2 typologies : voie liquide ou voie solide

### • Méthanisation dite « voie humide »

- 8 à 15% MS **89% du parc**
- Milieu liquide, mélangé

### • Méthanisation dite « voie solide »

- 15 à 50% MS **11% du parc**
- Milieu solide, « mélange » réalisé par le gaz et le liquide



57 unités  
45 discontinues  
12 continues  
(source : Solagro)

## Méthanisation : Comment choisir ?

Source: APESA

Caractéristique  
substrat

Substrat pompable



Pompable

Substrat solide



Pelletable

Matière  
organique

Soluble

Matières en  
suspension

Mise en  
solution

Procédés à  
envisager

Voie « liquide » < 3%

Voie « semi  
liquide » 3% - 12%

Voie « solide » 20 -  
40%

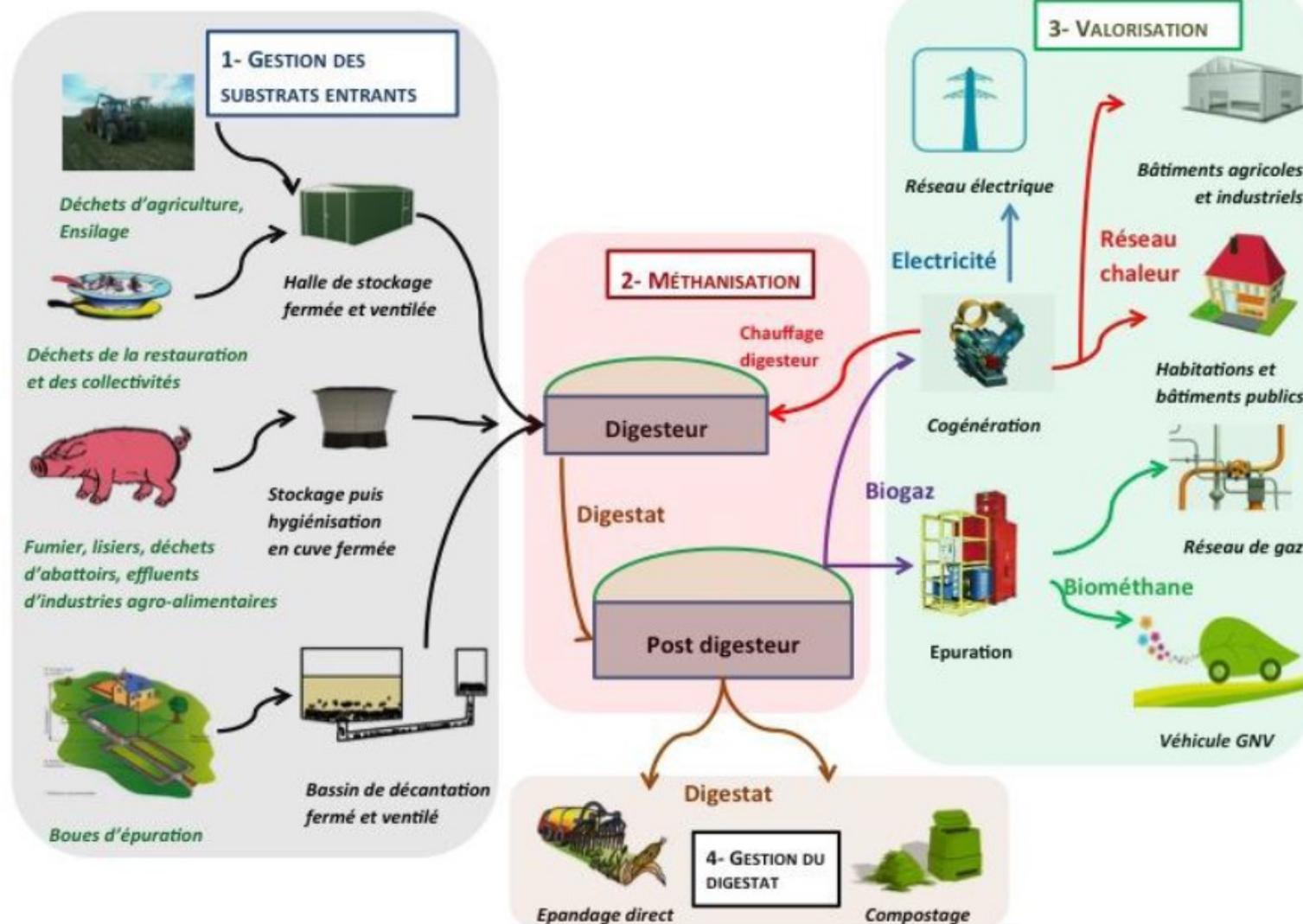
IAA  
Industries

STEP  
IAA  
**Agricole**

Déchets  
ménagers  
**Agricole**

## Enjeux environnementaux

## Enjeux énergétiques



## Enjeux agronomiques

Source : Club Biogaz, 2011

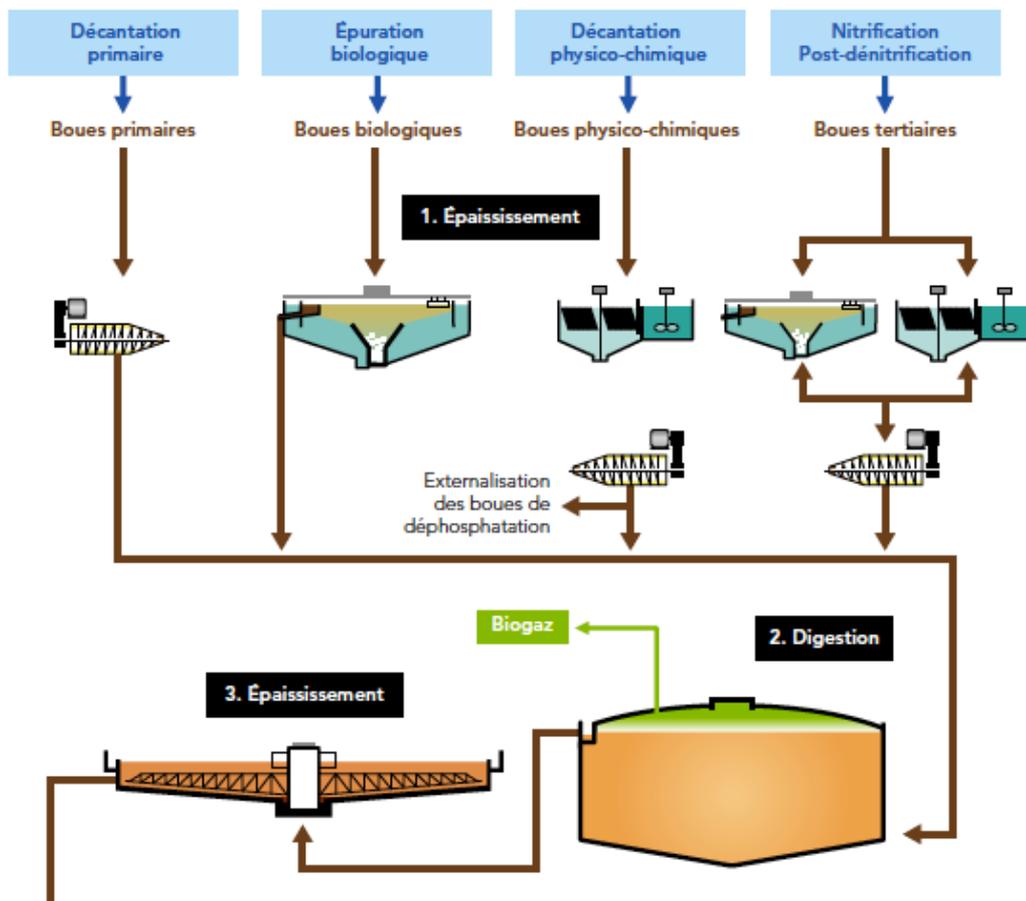
## Stabilisation, réduction du volume des boues de station d'épuration, production d'énergie

Exemple Seine-Aval (Achères)

1,5 millions de m<sup>3</sup> d'eaux usées par jour, 5 millions d'habitants concernés



## Stabilisation, réduction du volume des boues de station d'épuration, production d'énergie



- 135 000 tonnes de boues transformées en biogaz
- 260 000 m<sup>3</sup> de digesteur
- 65 millions de m<sup>3</sup> de biogaz/an
- Couverture de 60 % des besoins énergétiques du site
- Division par deux de la teneur en matière sèches des boues



Moules de bouchot



Moules sous-taille



Moules cassées

Nettoyage et tri des moules génèrent 10 à 30 % de moules non-commercialisables,  
En France : 5 000 à 15 000 tonnes /an

Brevet FR2100142 , 2021

## Enjeux énergétique – transition environnementale



LA FRANCE INDÉPENDANTE EN GAZ EN 2050

# Un mix de gaz 100 % renouvelable en 2050 ?

SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE

**ADEME**  
Agence de l'Environnement  
et de la Maîtrise de l'Énergie

**GRDF**  
GAS RESEAU  
DISTRIBUTION FRANCE

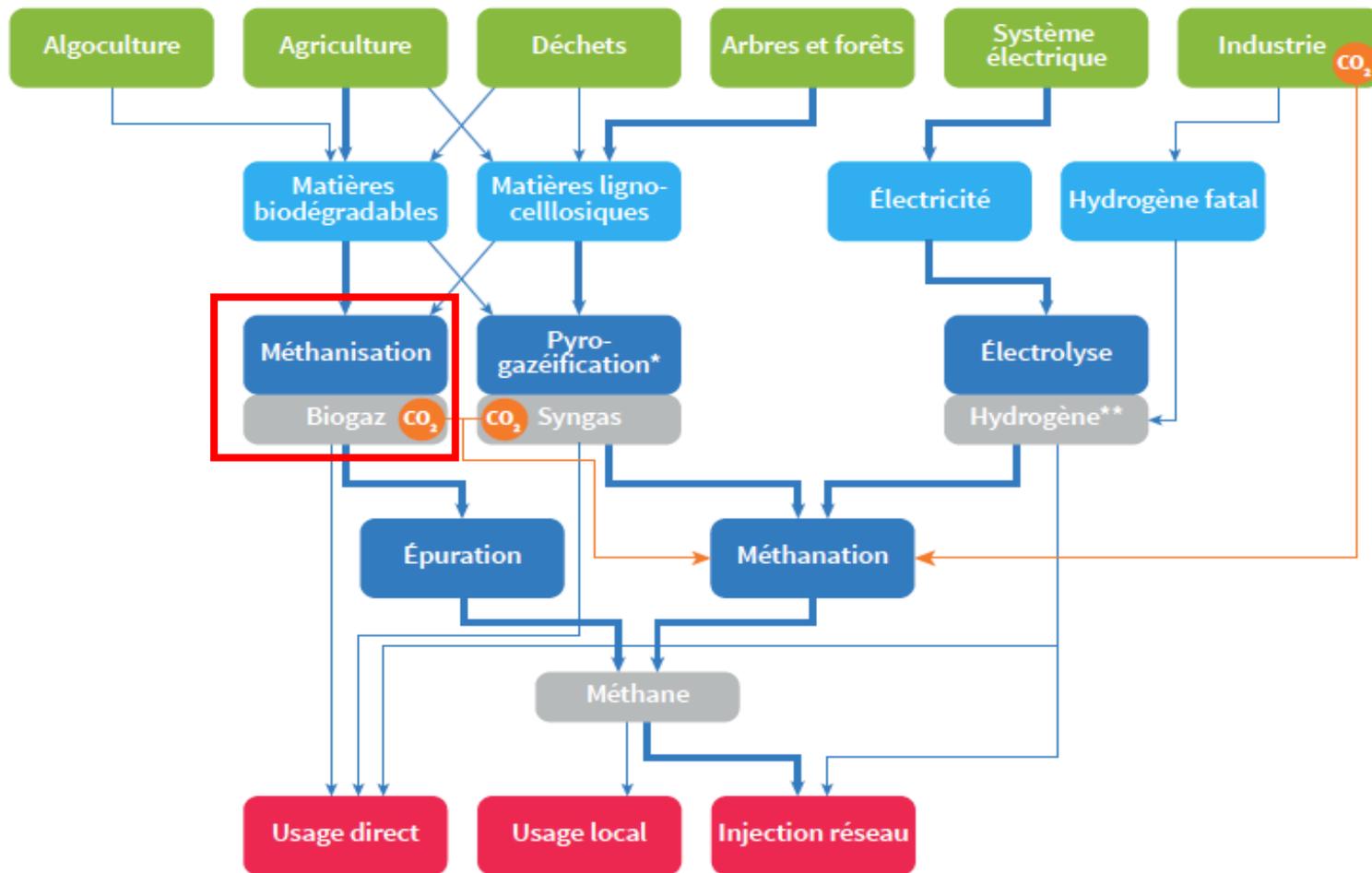
**GRTgaz**

**HORIZONS**

2018



# Ampleur du secteur de la méthanisation



\* La « pyrogazéification » inclut la pyrogazéification hydrothermale des algues.

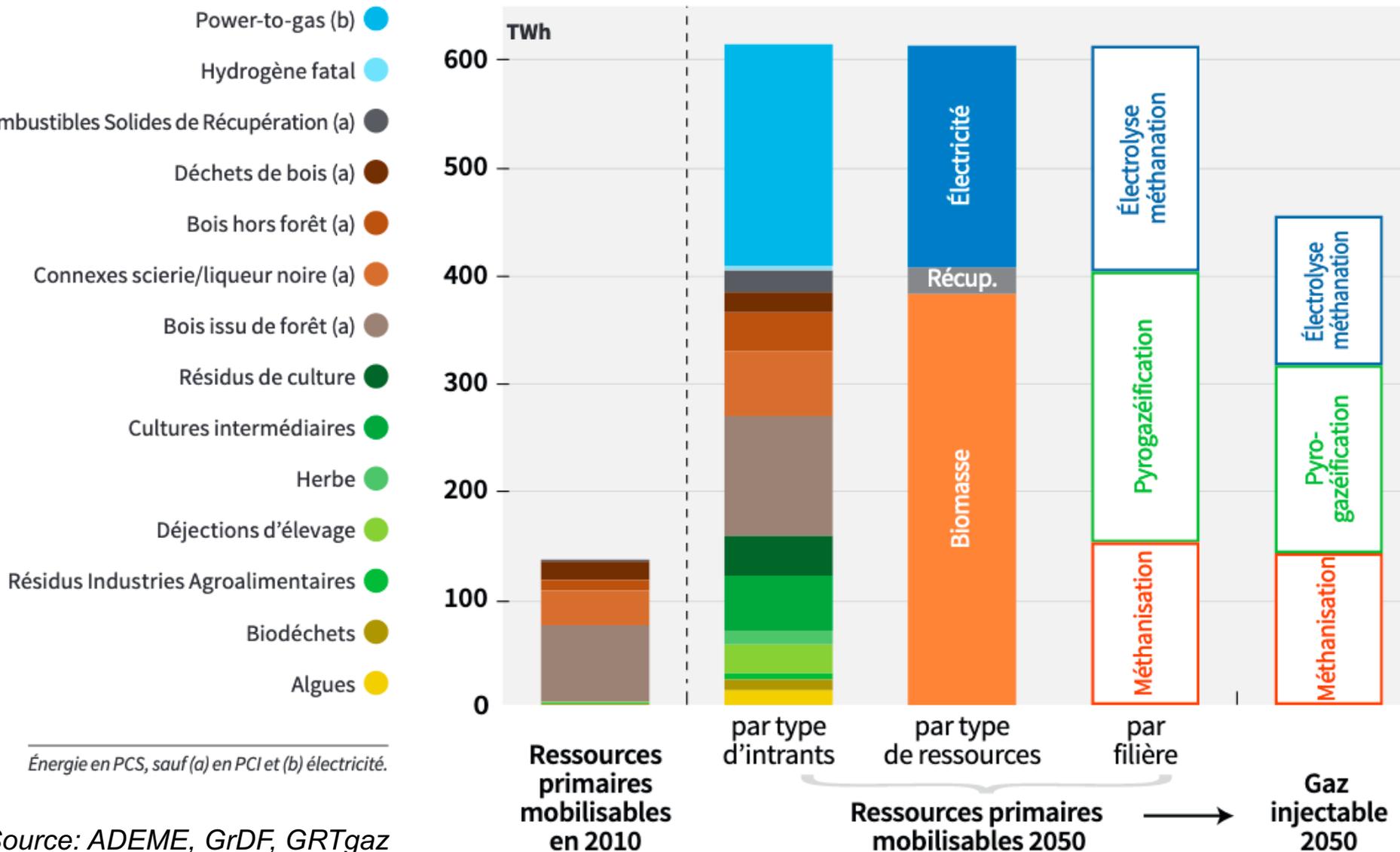
\*\* L'hydrogène peut aussi être utilisé directement pour divers usages, ce qui n'est pas pris en compte dans cette étude.

## Coût par filière

- Méthanisation ≤ 80€/MWh
- Pyrogazéification entre 80 et 120 €/MWh (sauf CSR à 40 €/MWh)
- Power-to-gas entre 65 à 185 /MWh
  - 65-125 €/MWh PtH2
  - 105-185 €/MWh PtCH4

Source: ADEME, GrDF, GRTgaz

## Un potentiel théorique de 460 TWh de gaz renouvelable



# Ampleur du secteur de la méthanisation

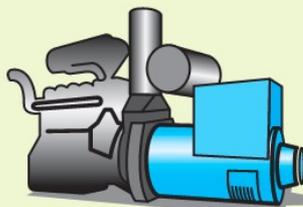
Soit pour alimenter un moteur de cogénération, et produire ainsi de l'électricité et de la chaleur.

biogaz



réseau électrique

électricité



cogénération

réseau de chaleur



bâtiments agricoles et industriels



habitations et bâtiments publics

Soit en chaudière pour alimenter un réseau de chaleur.

Soit le biogaz est épuré pour avoir la même qualité que le gaz naturel : on parle alors de biométhane. Ce biométhane peut être injecté dans le réseau de gaz naturel ou utilisé comme biométhane carburant dans les véhicules qui roulent au Gaz Naturel Véhicule (GNV).

biogaz



épuration

biométhane

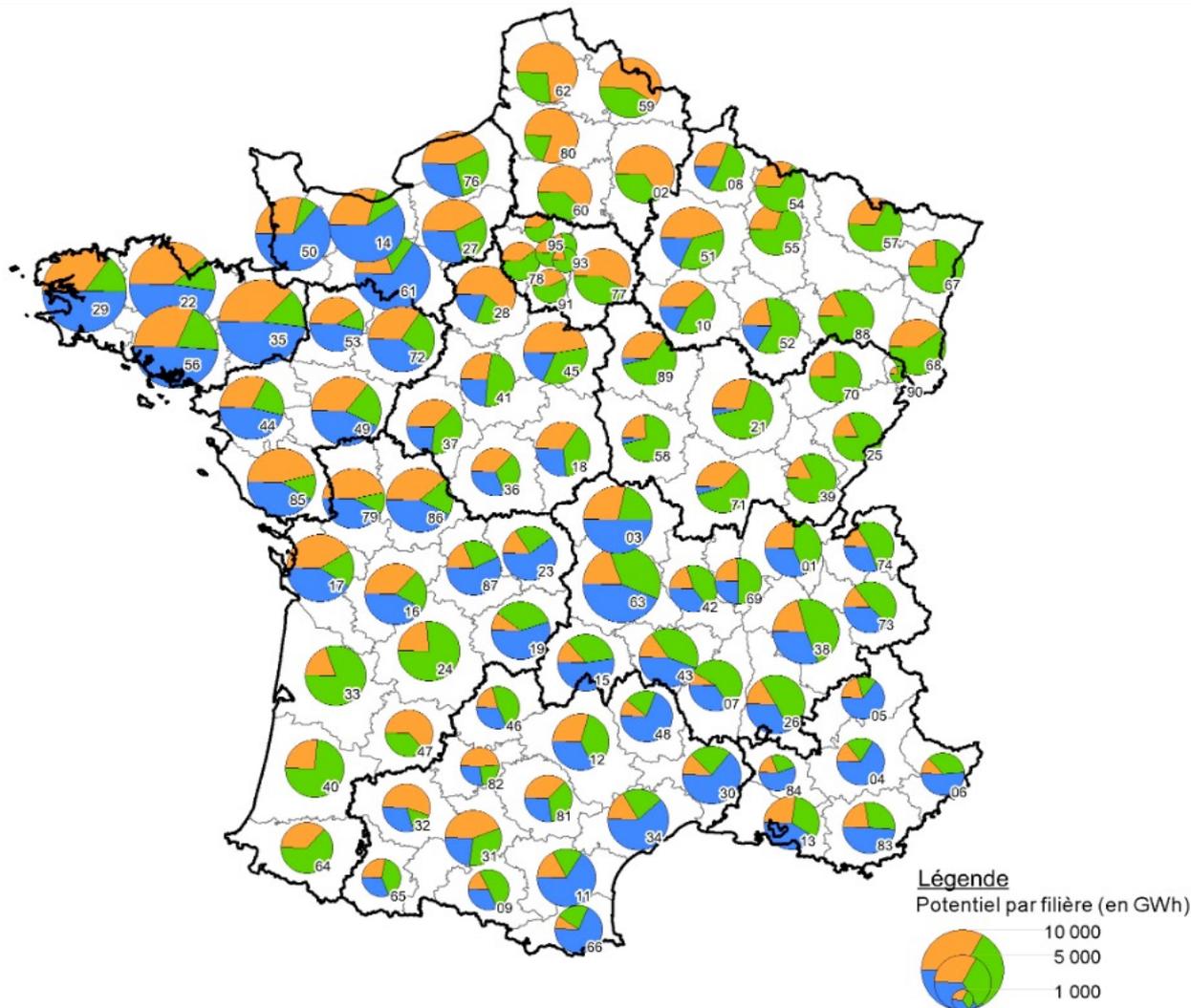


réseau de gaz



Source: Club Biogaz

## Répartition du potentiel de gaz injectable en 2050



Source: ADEME, GrDF, GRTgaz

## Projection en 2030

La loi de transition énergétique fixe l'objectif que 10% du gaz soit d'origine renouvelable en 2030 ce qui représentera 12 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an évitées (3% de nos émissions).

**1 450**

Installations mises en fonctionnement depuis 15 ans

**2,5 TWh**

production électrique annuelle

**9,0 TWh**

de capacité annuelle de biométhane injecté

**23 – 44 g CO<sub>2</sub> eq/kWh**

soit 5 à 10 fois moins émetteur que le gaz naturel

**1,9 TWh**

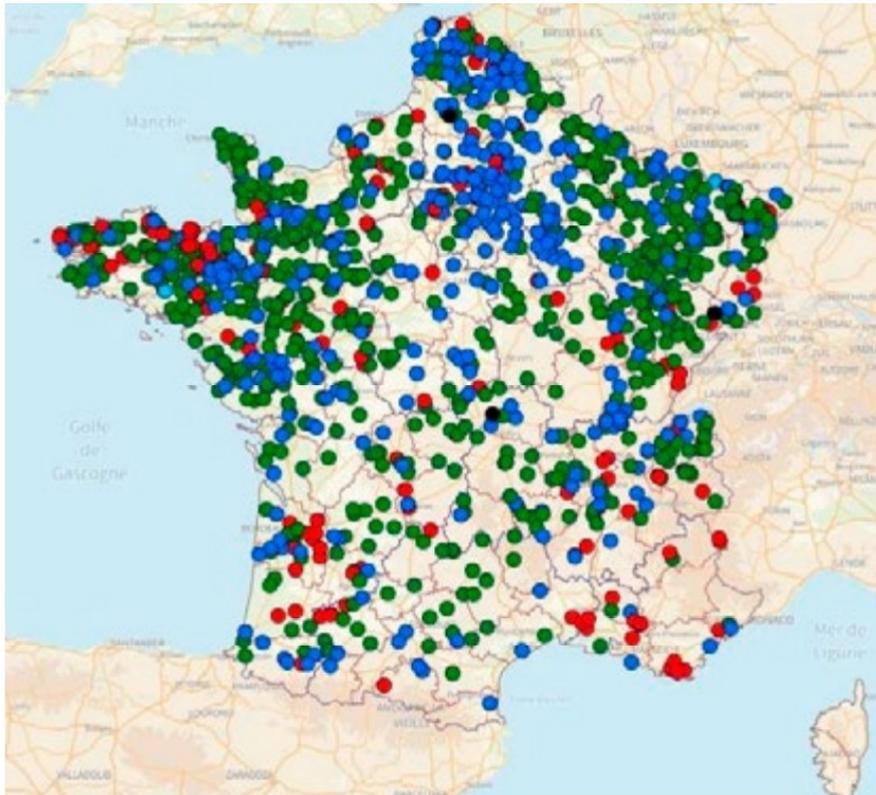
production de chaleur annuelle

**4 420 ETP**

18000 – 53000 ETP (équivalent temps plein) en 2030

# Ampleur du secteur de la méthanisation

Parc français des centres de méthanisation au 1<sup>er</sup> janvier 2022



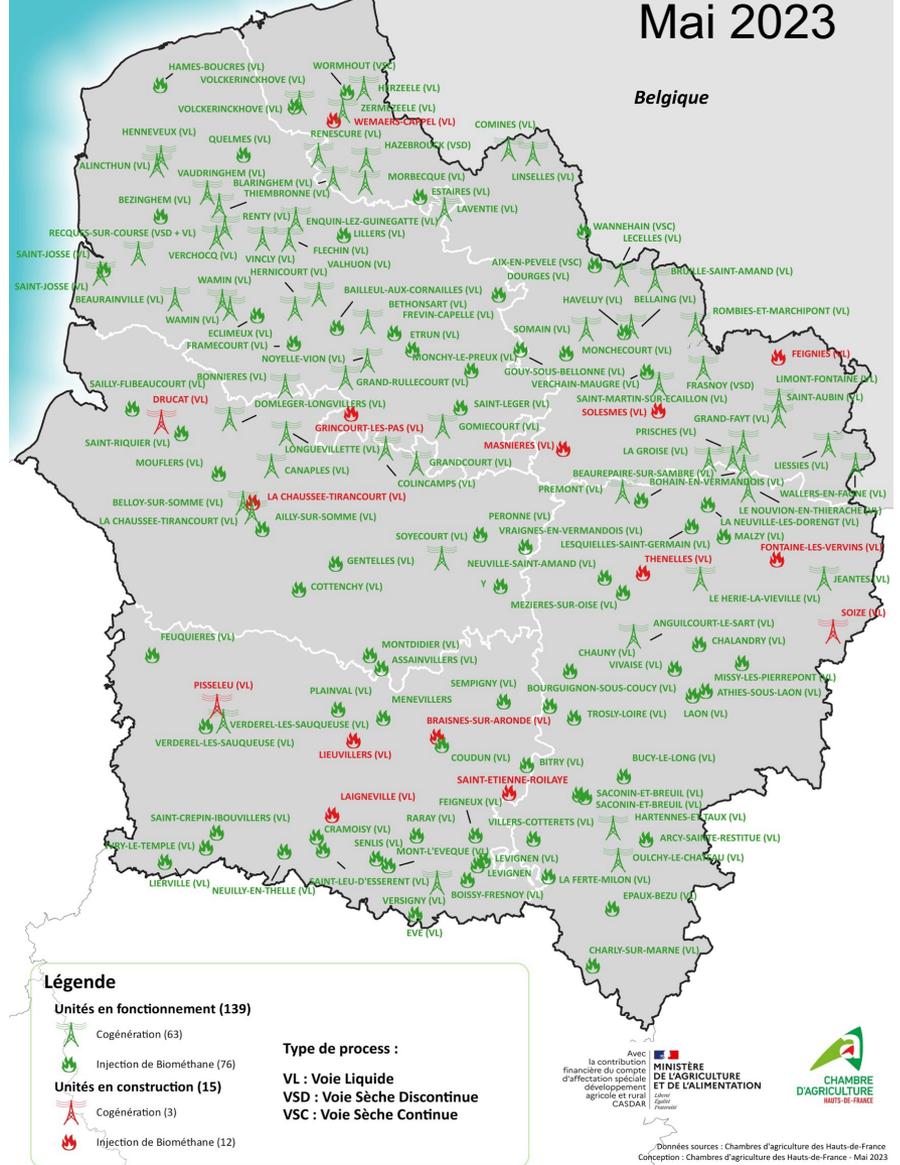
- Chaudière
- Cogénération
- Injection
- Cogénération + injection
- Carburant
- Non précisé

Source : ADEME, SINOE

Source : ADEME, Déchets Chiffres-clés - Edition 2023  
Chambre d'agriculture HdF mai 2023



## Les unités de méthanisation agricoles dans les Hauts-de-France



## Panorama des unités de méthanisation agricoles en région Hauts-de-France (au 31 mai 2023)

- **Nombre d'unités<sup>(1)</sup> en fonctionnement : 139**
  - > Process : **133** en « voie liquide infiniment mélangé »
    - 6** en « voie sèche » : *discontinue* (3) & *continue* (3)
  - > Valorisation du biogaz : **64** en cogénération (*dont 29 en micro-méthanisation*)
    - 75** en injection biométhane
  - > Production d'énergies renouvelables :
    - Electricité : ~ **17,2 MW<sub>élec</sub>** installés, soit la conso élec ~ **24 400** logements<sup>(2)</sup>
    - Biométhane : ~ **15 150 Nm<sup>3</sup>/h** injectés, soit la conso gaz ~ **115 300** logements<sup>(2)</sup>
- **Nombre d'unités<sup>(1)</sup> en construction : 15**
  - > Process : **15** en « voie liquide infiniment mélangé »
  - > Valorisation du biogaz : **3** en cogénération
    - 12** en injection biométhane



(1) Source : Chambres d'Agriculture HdF  
(2) ratios ADEME HdF



Arnauld ETIENNE (CA NPdC) - Référent Régional Méthanisation Hauts-de-France

1

Source : Chambre Agriculture Hauts-de-France

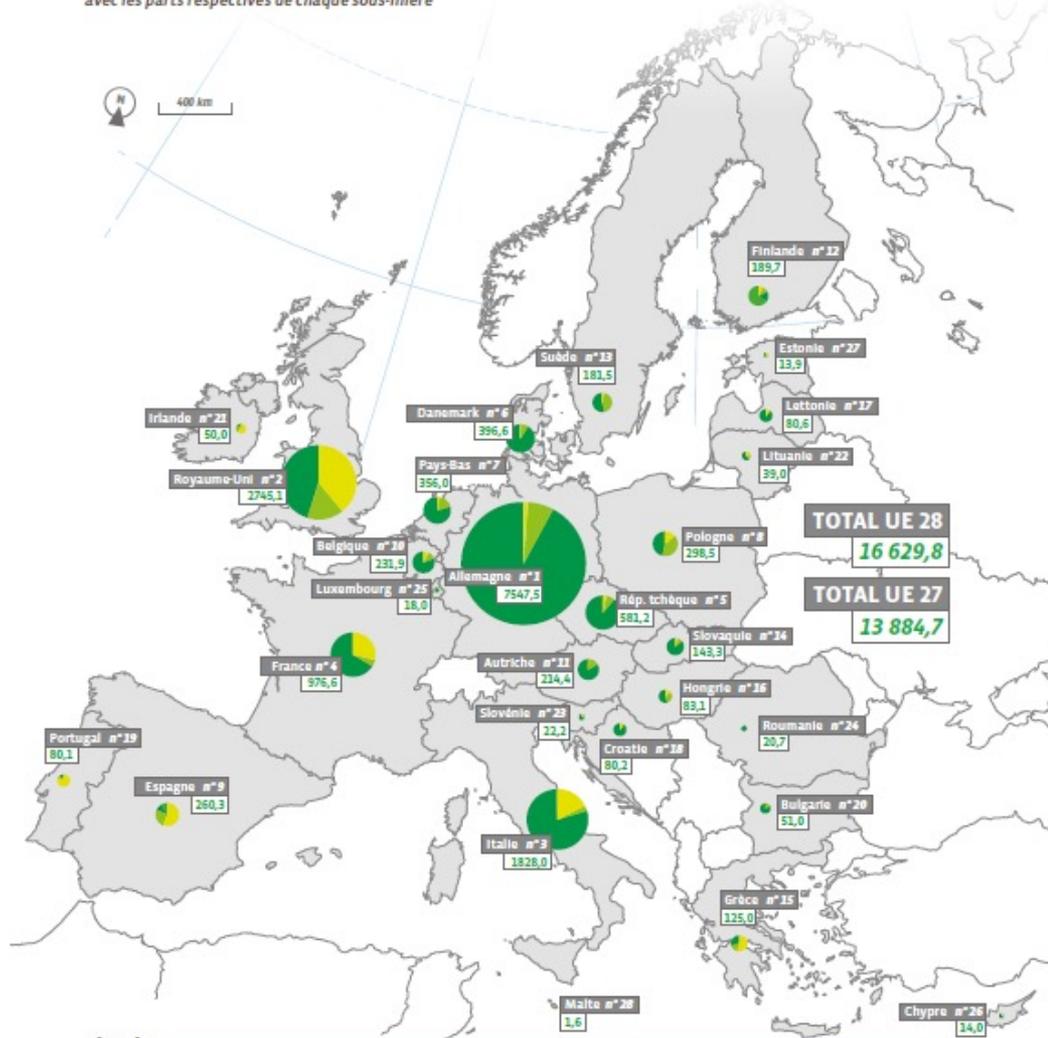
## Bus au BioGNV de l'Agglomération de Compiègne

Depuis janvier 2023, remplacement progressif par bus (Bio)GNV



# Ampleur du secteur de la méthanisation

Production d'énergie primaire de biogaz dans les pays de l'Union européenne à la fin 2019\* (en ktep)  
avec les parts respectives de chaque sous-filière



**Légende**

7547,5 Les chiffres en vert indiquent la production biogaz totale en ktep.

- Gaz de décharge
- Gaz de digestion des boues
- "Autres biogaz" provenant de la fermentation anaérobie
- Biogaz provenant de procédés thermiques

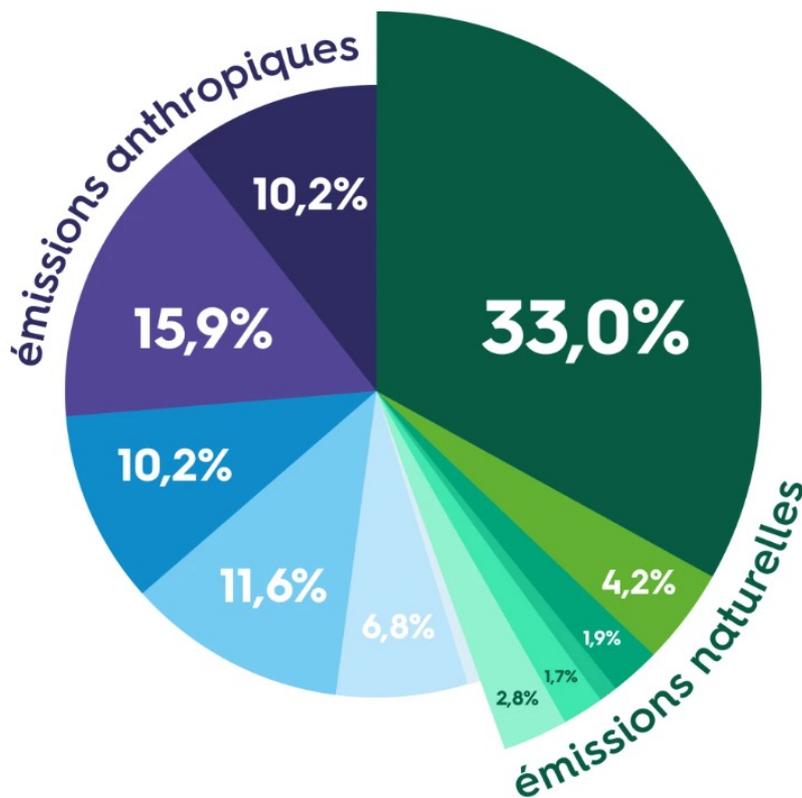
\*Estimations. Note : lorsque l'information n'était pas encore disponible, la répartition entre les différents types de biogaz a été estimée par Eurobserv'ER pour l'année 2019 en fonction de celle de l'année 2018. Source : Eurobserv'ER 2020

Source : Eurobserv'ER  
Biogaz Barometer, 2020

- Spécificité de la méthanisation en France
  - Ressources agricoles principalement
  - Modèle de « codigestion » : effluents agricoles et biodéchets du territoire
  - Problématique des gisements pailleux
  - Réglementations environnementale et sanitaire
- Objectif de 1.500 méthaniseurs en 2023
- Objectif de 15.000 emplois d'ici 2030
- Essentiellement des unités de méthanisation agricoles et des coproduits agricoles (~80% à horizon 2050)
  - Lisiers et fumiers, paille
  - Culture intermédiaire à vocation énergétique (CIVE)

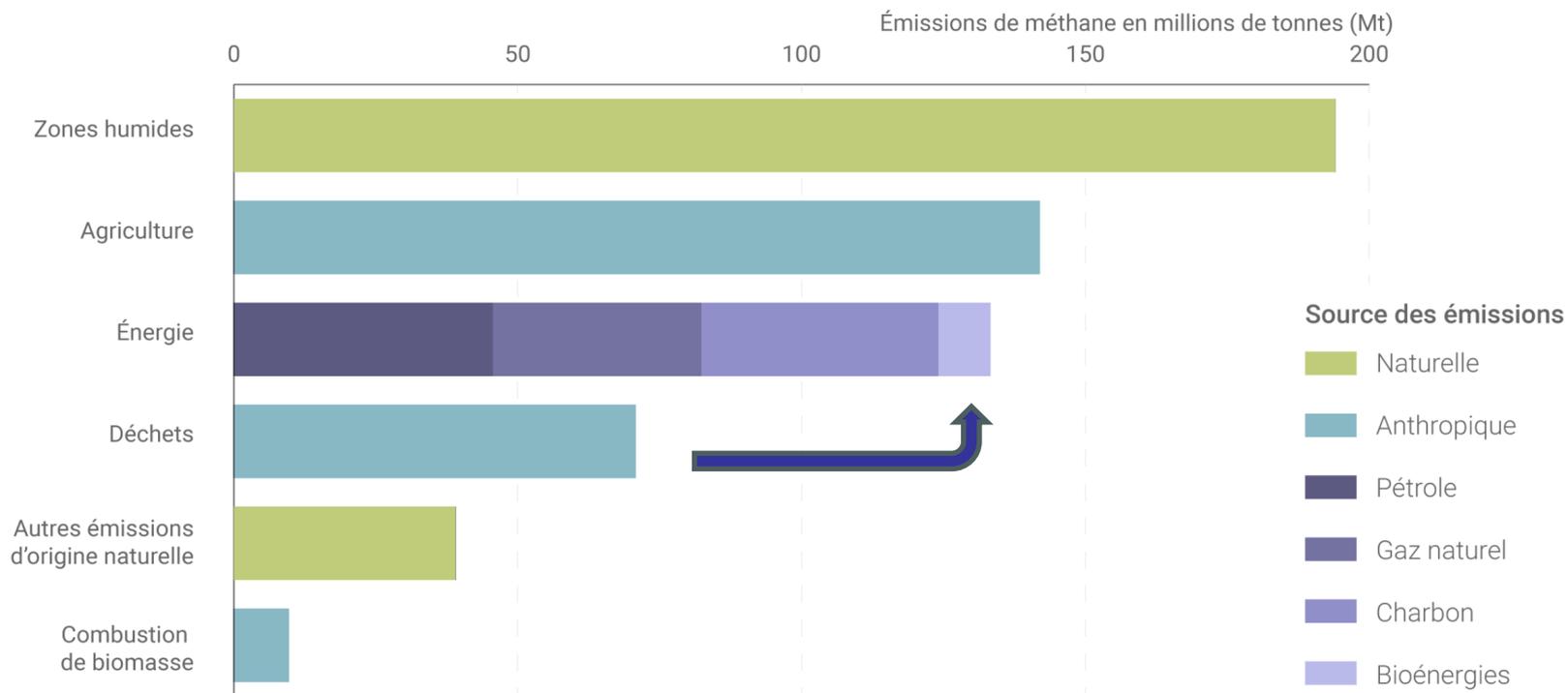
# Emission de méthane dans le monde

(GIEC, source figure: terega.fr)



## Emissions de méthane dans le monde

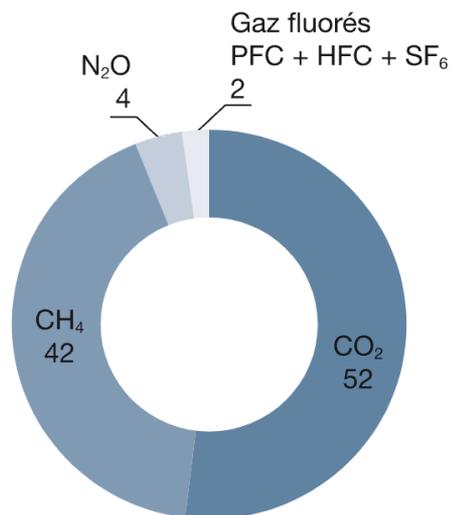
### Méthane Source des émissions dans le monde en 2022



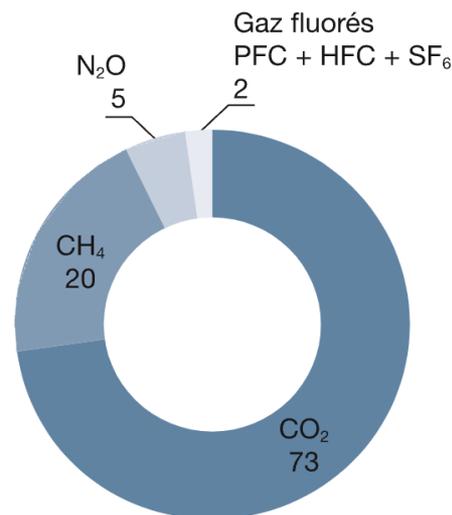
Connaissance des Énergies | Source : Global Methane, Tracker 2023, AIE, février 2023.

## Sources et puits de méthane dans le monde (GIEC)

Selon le potentiel de réchauffement global à 20 ans



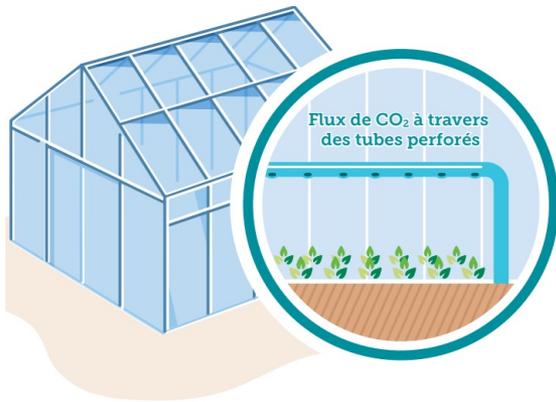
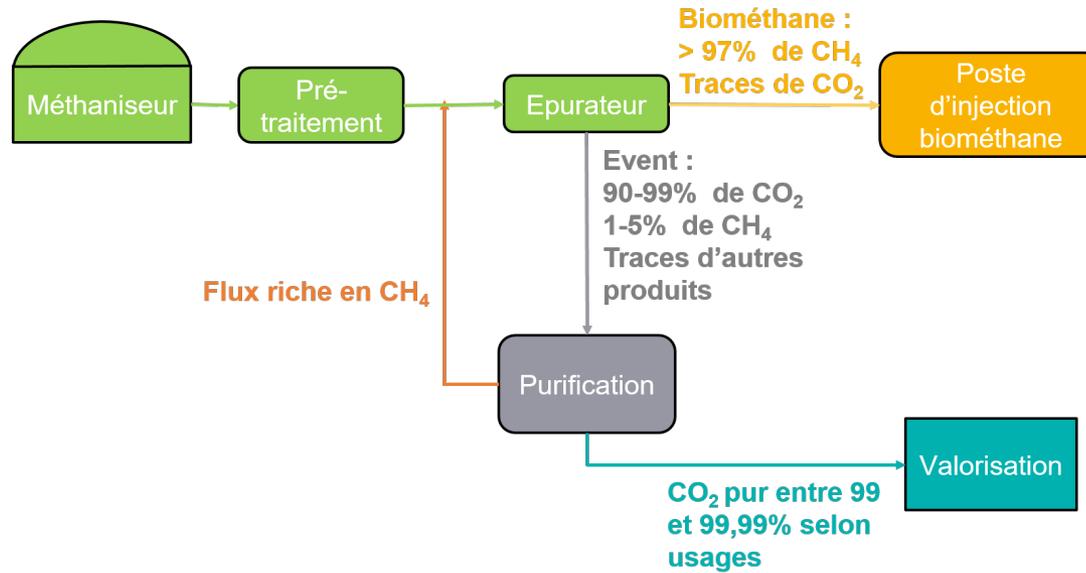
Selon le potentiel de réchauffement global à 100 ans



■ CO<sub>2</sub> : dioxyde de carbone   ■ CH<sub>4</sub> : méthane   ■ N<sub>2</sub>O : protoxyde d'azote  
 ■ Gaz fluorés (HFC : hydrofluorocarbures ; PFC : perfluorocarbures ; SF<sub>6</sub> : hexafluorure de soufre)

Source : Giec, 3<sup>e</sup> groupe de travail, 2014

Figure extraite de [statistiques.developpement-durable.gouv.fr](http://statistiques.developpement-durable.gouv.fr)



en agriculture



en industrie

Power to gas (méthanation)  
 $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$

en énergie



# ENERGY CROPS ?



=> Une culture intermédiaire à vocation énergétique (CIVE)

- est une culture implantée et récoltée **entre deux cultures principales dans une rotation culturale** (plusieurs avantages agricoles)
- est récoltée pour être utilisée **en tant qu'intrant dans une unité de méthanisation agricole**
- **n'est pas en concurrence** avec la production alimentaire (CIVE d'hiver)
  - Surface agricole utile mobilisée pour des CIVE :  
< 1% en région HdF, et < 8% au niveau national

Plusieurs types de CIVE existent: vesce, avoine, phacélie, pois fourrager, seigle, trèfle, moutarde...



Vesce



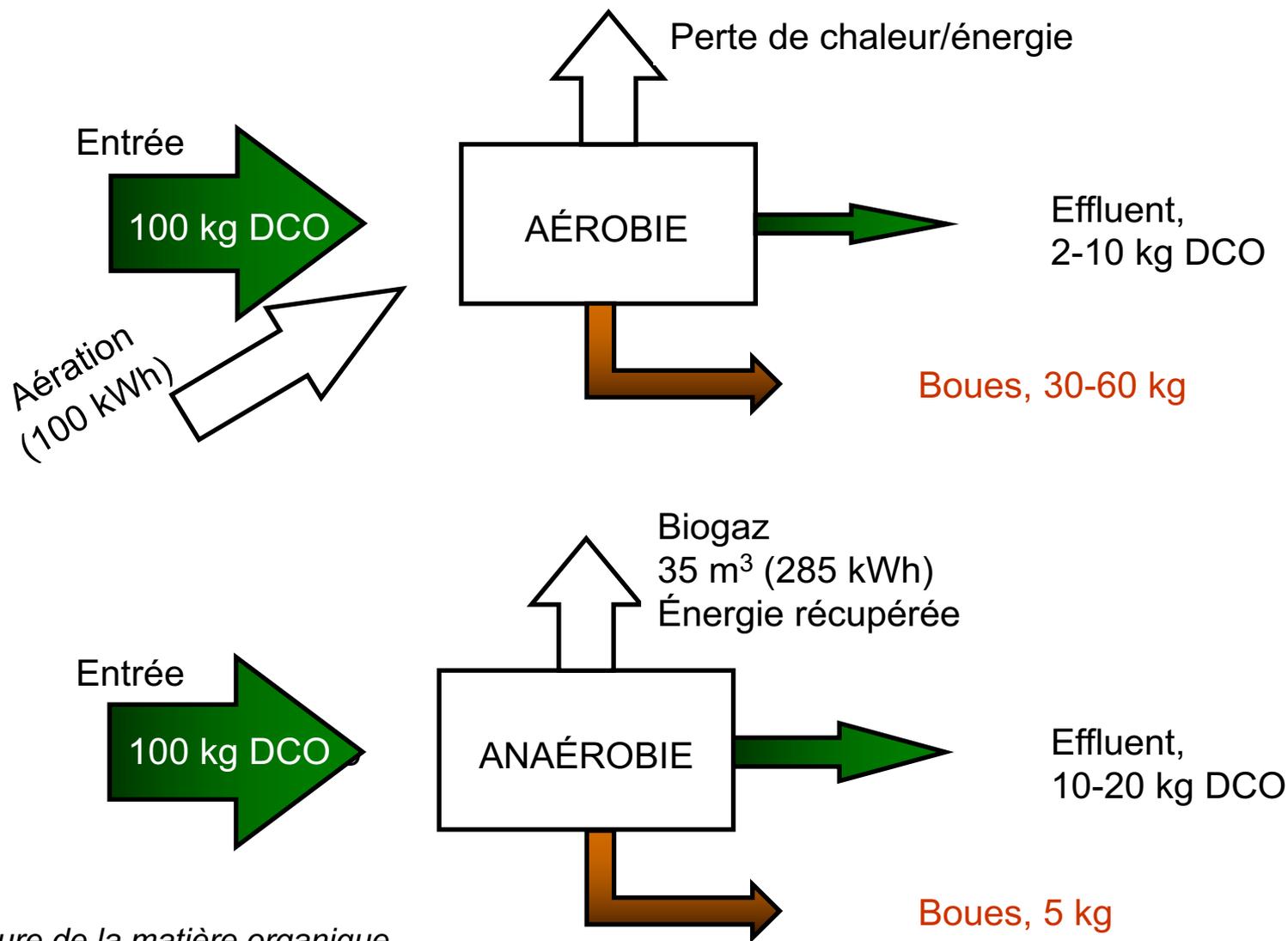
Phacélie



Seigle

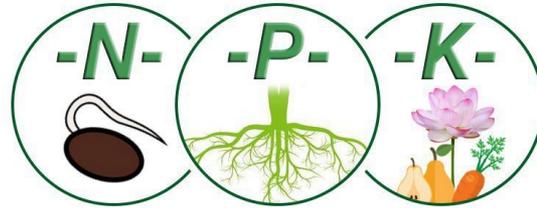


Trèfle



DCO = mesure de la matière organique



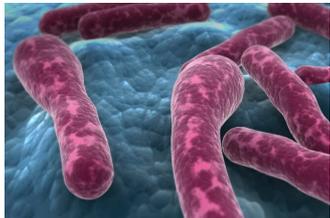
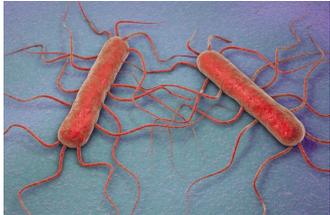


Récupération des nutriments



Impuretés

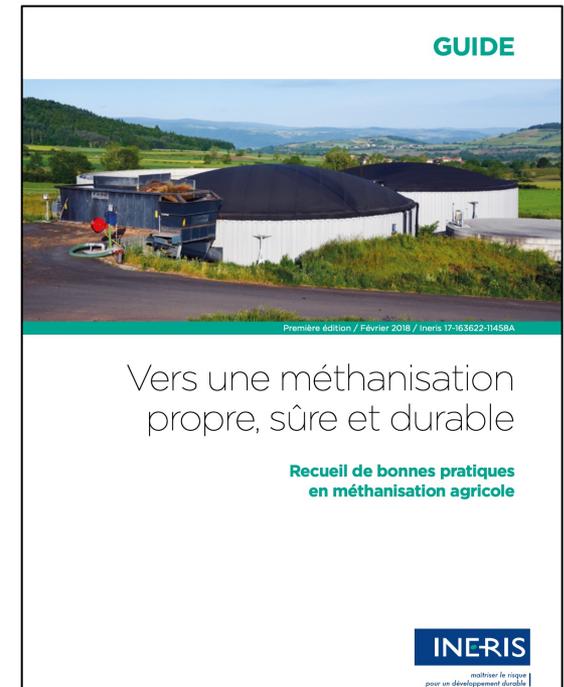
Et carbone



Qualité sanitaire

## Acceptation sociétale

- Effet NIMBY
- Accidents
- Odeurs
- Fuites du biogaz
- Transports (bruits, poussières...)
- Epandage du digestat



Club biogaz – CTBM *Centre technique national du biogaz et de la méthanisation*

<https://atee.fr/energies-renouvelables/club-biogaz/ctbm>

MéthaFrance – *Portail national de la méthanisation*

<https://www.methafrance.fr/>

InfoMetha

<https://www.infometha.org/>

ADEME – *Agence de la transition écologique*

<https://www.ademe.fr/>

SINOE® – *Système d'information et d'observation de l'environnement (ADEME)*

<https://www.sinoe.org/>

European biogas association

<https://www.europeanbiogas.eu/>

INERIS – *Institut national de l'environnement industriel et des risques*

<https://www.ineris.fr/fr>

AAMF – *Association des Agriculteurs Méthaniseurs de France*

<https://aamf.fr/>

Observatoire de la filière Biométhane

<https://odre.opendatasoft.com/pages/observatoire-biomethane-V2/implantation-des-sites#implantation-des-sites>

## La réglementation

LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte

LOI du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets

## Acteurs académiques



Une initiative du Club Biogaz de l'ATEE



et de ses partenaires :





**UNIVERSITÉ DANS LA VILLE**  
*un souffle de culture*

*Merci à Thierry Ribeiro,  
UniLaSalle, pour sa  
relecture attentive*

# La biométhanisation

**André PAUSS**

Professeur des universités

UTC–GPI/TIMR

[andre.pauss@utc.fr](mailto:andre.pauss@utc.fr)

**Xiaojun LIU**

Maître de Conférences

UTC–GPI/TIMR

[xiaojun.liu@utc.fr](mailto:xiaojun.liu@utc.fr)

06 décembre 2023  
Compiègne

