# La biométhanisation

publié le 23/05/2022

*Descriptif :*

L'énergie est une question cruciale pour notre société. Parmi la diversité des technologies de production d'énergie de demain, la production de biogaz par méthanisation est une solution simple à mettre en œuvre, peu coûteuse financièrement et présentant des perspectives intéressantes. L'écologie est aussi une question importante. L'utilisation du méthane produit par des microorganismes anaérobies à partir de déchets organiques lors de leur dégradation, permet de réduire les gaz à effet de serre.
La biométhanisation, processus biologique de dégradation des matières organiques en méthane en autres, est donc un sujet d'actualité et représente une partie des biotechnologies. De nombreuses expérimentations et études sur ce thème sont réalisées actuellement pour développer cette filière comme par exemple le Test de Potentiel Méthanogène (TPM). Ce test permet l'étude de faisabilité d'un projet de méthanisation et fait intervenir des techniciens formés aux biotechnologies. D'autres études, notamment celles utilisant des technologies de biologie moléculaire comme le séquençage nouvelle génération (NGS) et la métagénomique, permettent à la recherche de progresser sur ce sujet et d'optimiser dans l'avenir la production de biométhane.

*Sommaire :*

- 1. Place de la méthanisation en France
- 2. Approche scientifique de la méthanisation

Le biogaz est reconnu comme une énergie renouvelable au titre de la directive CE (2001/77/CE) depuis septembre 2001.
La biométhanisation consiste en une dégradation biologique contrôlée des déchets dans des réacteurs hors-sol en conditions anaérobies.
La digestion anaérobie consiste en une succession de réactions chimiques au cours desquelles la matière organique contenue dans les déchets est dégradée et on obtient, en fin de traitement, un digestat stabilisé dont la charge polluante a été minimisée, tout en produisant du biogaz. Le digestat, de volume moindre que les déchets de départ, peut alors être enfoui ou encore faire l'objet d'un retour au sol après compostage. Le biogaz, lui, peut être utilisé notamment pour produire de l'électricité à travers un générateur alimenté par ce biogaz. Le biogaz est composé principalement de méthane et de dioxyde de carbone.

Dans cet article, une première partie va être consacrée aux enjeux économiques et sociétaux de la méthanisation ainsi que de la place grandissante en France, pour cette technologie. Dans un second temps, les aspects théoriques et biotechnologiques de la synthèse de biogaz seront développés notamment la biochimie et la microbiologie associées. Il est à noter que les études microbiologiques de ces bioprocédés ne sont pas classiques, et sont maintenant de plus en plus enrichies par des études métagénomiques utilisant des techniques de biologie moléculaire. En effet, le développement de ces dernières a permis d'avancer considérablement dans l'étude des communautés microbiennes complexes présentes dans l'environnement.

## 1. Place de la méthanisation en France

La méthanisation est un secteur de l'activité agro-industrielle dont l'objectif est de valoriser les déchets organiques venant de diverses activités humaines en produisant du biogaz et du digestat.
Le biogaz, composé majoritairement de méthane et de dioxyde de carbone, va être utilisé soit sur son lieu de production afin de produire de la chaleur et de l'électricité pour les systèmes en cogénération, soit, après purification en biométhane, injecté dans le réseau classique de distribution du gaz domestique ou bien utilisé comme biocarburant pour véhicule (BioGNV = BioGaz Naturel pour Véhicule). L'activité est soutenue en France, par des tarifs de rachat pour l'énergie et encadrée par les réglementations ICPE (=Installation Classée pour la Protection de l'Environnement).
Dans un contexte de développement durable, la méthanisation répond à de nombreuses problématiques :

- Dépollution : baisse de la quantité de déchets et réduction des nuisances olfactives,
- Production d'énergie : le méthane engendré servant à la production d'électricité et/ou de chaleur
- Valorisation des résidus de digestion : le digestat (sous-produit de la digestion) stabilisé est utilisé comme amendement en agriculture.

La provenance de ces ressources organiques est multiple. Cela peut être des déchets urbains, des résidus d'activités agricoles ou bien encore des rejets agro-industriels.

### 1.1 Évolution de la production de biogaz

La France était le 6ème producteur de biogaz en Europe en 2019 mais le développement est tel que sa progression devrait la positionner au 4ème rang européen dès 2022. Toutefois, elle se situe encore largement derrière l'Allemagne et le Royaume-Uni, qui produisent plus de trois quarts du biométhane en Europe. En France, la majorité des unités de méthanisation se trouvent dans des fermes agricoles.

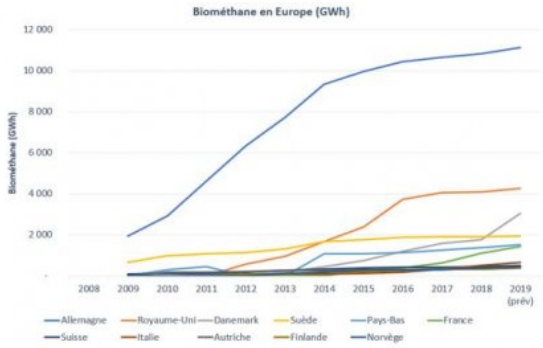



*Figure 1 : Évolution de la production de biométhane en Europe de 2009 à 2019 (Source : GRDF)*

### 1.2 Consommation en gaz en France et conséquences

La France consomme près de 500 térawattheures (TWh) de gaz naturel par an. Les usages principaux sont observés dans le secteur résidentiel pour 30 %, dans le secteur industriel pour 25 %, dans le secteur tertiaire pour 20 % et pour la production d'électricité pour 20 % (Ministère de la Transition Écologique (MTE), Les chiffres clés de l'énergie, édition 2020).
La France produit moins de 1,5 TWh et donc importe la quasi-totalité du gaz dont elle a besoin. Notre dépendance est d'ailleurs, très récemment, mise en avant avec le démarrage du conflit armé entre Russes et Ukrainiens qui génère entre autres, de nombreuses tensions sur l'approvisionnement des ressources énergétiques.
C'est pourquoi la production de Biogaz présente un intérêt tout particulier pour notre souveraineté énergétique.

### 1.3 Bilan en unités de méthanisation

De plus, la production de gaz par biométhanisation de déchets organiques apparait comme une source d'énergie très intéressante pour décarboner et relocaliser notre consommation de gaz.

Au 15 février 2022, on dénombrait en France 1087 unités de méthanisation dont 216 réalisent l'injection de biogaz dans un réseau et 871 en cogénération (chaleur et électricité).
Au 31 décembre 2021, l'injection dans le réseau de gaz naturel correspond à une production de 5 TWh sur un an (2,2 TWh fin 2020 et 1,2 TWh fin 2019). 5 TWh représente l'équivalent de la consommation annuelle de plus de 1 500 000 logements neufs ou plus de 24 000 bus roulant au BioGNV (Gaz Naturel pour Véhicule).
L'impact positif sur l'environnement se traduit par plus de 450 000 tonnes d'émissions de gaz à effet de serre évitées grâce au biométhane injecté dans le réseau.

Les trois régions les plus développées pour cette production sont le Grand Est (20 %), la Bretagne (15%), la Normandie (9,5 %) (chiffres de février 2022)

| Régions | Nombre d'unités de méthanisation | Représentation en % |
|---|---|---|
| Ile-de-France | 33 | 3,0 % |
| Centre-Val de Loire | 39 | 3,6 % |
| Bourgogne-Franche-Comté | 72 | 6,6 % |
| Normandie | 102 | 9,4 % |
| Hauts-de-France | 112 | 10,3 % |
| Grand-Est | 220 | 20,2 % |
| Pays-de-la-Loire | 94 | 8,6 % |
| Bretagne | 167 | 15,4 % |
| Nouvelle-Aquitaine | 89 | 8,2 % |
| Occitanie | 41 | 3,8 % |
| Auvergne-Rhône-Alpes | 94 | 8,6 % |
| PACA | 21 | 1,9 % |
| Guadeloupe | 1 | 0,1 % |
| Martinique | 2 | 0,2 % |
| Total | 1087 | 100,0 % |

*Tableau 1 : Nombre d'unités de méthanisation en France (février 2022) (Source : ATEE)*

Les unités sont majoritairement installées dans des fermes (52 % au total). Pour certaines régions, ce taux peut atteindre plus de 70 % comme dans la région Grand-Est (82 %) et dans la région Bretagne (75 %)

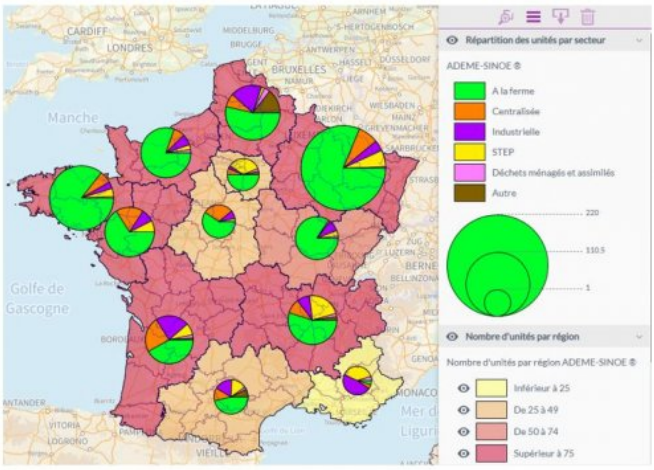



*Figure 2 : Carte des unités de méthanisation et de biogaz et répartition des unités par secteur (Source : ATEE)*

### 1.4 Perspectives de développement

Les perspectives de développement sont nombreuses car des objectifs ambitieux ont été fixés au niveau national et européen en matière, notamment, de réduction des gaz à effet de serre, et de développement de la part des énergies renouvelables.
La ***loi énergie climat*** du 9 novembre 2019 fixe un objectif pour 2028, de 8 % de gaz renouvelables dans les réseaux de gaz.
Le texte sur la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) publié en 2019 propose pour 2028, un objectif de production de biogaz compris entre 24 et 32 TWh.
A l'horizon 2050, le biogaz devrait représenter plus de 100 TWh de la consommation totale de l'énergie, avec près de 60 TWh de biométhane injectés dans le réseau de gaz. La méthanisation représenterait alors à elle seule plus de 17 % du gaz injecté dans le réseau.

### 1.5 Enjeux de la méthanisation

La production de biogaz participe donc à la diversité énergétique de la France. Les enjeux de cette production sont donc à regarder à travers divers axes :

**Les enjeux environnementaux :** La biométhanisation est considérée comme un produit énergétique qui participe à la lutte contre le réchauffement climatique. En effet :

- La méthanisation permet de multiplier par deux la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). Le biogaz peut remplacer des ressources fossiles comme le pétrole, le gaz naturel ou bien encore le charbon afin de chauffer des bâtiments, faire rouler des véhicules et produire de l'électricité. De plus, la méthanisation permet de capter le méthane (CH4) naturellement produit lors de la décomposition de la matière organique. Le méthane est un GES qui, à volume égal, a un pouvoir réchauffant pour la planète, 21 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone (CO2). Enfin, la méthanisation, par son implantation locale, limite la pollution par les véhicules transportant les sources d'énergie comme le pétrole (moins de transport = moins de pollution).
- La méthanisation permet de valoriser une très grande diversité de déchets organiques, comme les huiles alimentaires et les matières grasses ou encore les laitages qui ne peuvent pas être compostés. Sans ce procédé, il faudrait incinérer ou à mettre en décharge ce type de déchets.
- La méthanisation produit aussi du digestat qui peut être utilisé comme fertilisant ou engrais se substituant alors à certains engrais minéraux dont la production est très consommatrice en énergie fossile.

**Les enjeux économiques :** La biométhanisation est un acteur économique important qui permet la création de revenus supplémentaires. Trois raisons envisageables :

- La construction d'une unité de méthanisation se fait avec des coûts modérés. De plus, le prix des terrains en milieu rural où sont construites ces unités sont généralement plus abordables. Pour compléter, il est à noter que, par la suite, les coûts du traitement des déchets par ce procédé de méthanisation est assez bon marché. Il est de l'ordre de cinquante euros la tonne, contre une centaine d'euros pour l'équivalent par incinération ou par stockage.
- La méthanisation permet de produire une énergie locale et renouvelable qui limite les frais de transport pour son utilisation. Elle permet, aussi, de créer une dynamique économique territoriale permettant un développement local. Le système énergétique du biométhane s'organise en boucles courtes et locales, propre à une économie circulaire. La méthanisation est donc source d'activités et d'emplois non délocalisables. Pour la conception et construction, le transport, le fonctionnement et la maintenance des sites, on estime ainsi à 1 emploi direct créé par tranche de 300 kW électrique. (Source : Club Biogaz et AREC Île-de-France, mars 2012).
- Pour les agriculteurs exploitants, cela leur permet, en plus, une diversification de leurs ressources financières en leur apportant des revenus complémentaires réguliers et stables. De plus, l'utilisation du digestat pour l'épandage leur permet de réduire leurs dépenses pour l'achat d'engrais minéraux souvent coûteux. (Source : ADEME France)

**Les enjeux sociaux :** L'impact est ici mitigé entre points positifs et négatifs.

- Il y a des enjeux sociaux positifs notamment car la filière de biométhanisation permet de lutter contre la désertification rurale. De plus et

bien souvent, les sites de méthanisation deviennent des lieux d'échanges, d'informations et de formations, auprès des professionnels, des riverains et du grand public. Enfin, la France propose l'un des marchés européens les plus prometteurs pour l'avenir avec un potentiel encore largement sous-exploité. Depuis que les tarifs de l'électricité produite à partir de biogaz ont été réévalués en 2006 puis en 2011, et que les tarifs des autres sources d'énergie ont augmentées (notamment actuellement début 2022) la filière connaît un dynamisme important soutenu par les pouvoirs publics.

- Parmi les impacts négatifs, on trouve principalement le scepticisme d'une partie de la population. En effet, souvent méconnue ou mal connue du grand public, la méthanisation souffre d'un déficit d'image qui engendre des inquiétudes et des amalgames en tout genre. Certains incidents médiatisés écornent cette filière comme celui survenu en août 2020 dans un site industriel de méthanisation exploité par Engie Bioz à Châteaulin (Finistère) qui avait entraîné une pollution de la rivière qui alimente un tiers des habitants du Finistère en eau potable. 180 000 personnes avaient dû restreindre leur consommation d'eau. La presse a relaté ces faits comme le montre le document ci-dessous. L'ensemble de ces incidents alimentent de nombreuses polémiques, cependant le risque est non négligeable et il doit être pris en compte.

***Extrait du journal, Le télégramme : Publié le 19 août 2020 à 21h41 et modifié le 20 août 2020 à 11h57***

*« À la suite d'une pollution de l'Aulne à l'ammoniaque, la préfecture recommande de ne pas utiliser l'eau du robinet comme boisson ou pour laver ses fruits et ses légumes. 50 communes, dont Châteaulin et Quimper, sont concernées.*

*Photographie 1 : Pollution de l'Aulne : Manifestants contre le méthaniseur de Châteaulin, le Télégramme photographie publié le 22 août 2020 à 17h46*

*Un déversement accidentel de matières provenant de l'usine de méthanisation de Châteaulin, survenu lundi, est à l'origine de la pollution de l'Aulne, indique, ce jeudi, la préfecture du Finistère. Elle se répand en amont de la prise d'eau de Coatigrac'h, propriété du syndicat mixte de l'Aulne (SMA). Les concentrations en ammoniaque ont conduit l'exploitant à mettre à l'arrêt l'usine dans la nuit de mardi à mercredi. « Une adaptation de la filière de traitement a été testée par l'exploitant mais n'a pas permis de rétablir pour l'instant une conformité de l'eau produite », note la préfecture. L'usine avait été inaugurée en 2018, en présence du secrétaire d'État à la Transition écologique et solidaire, Sébastien Lecornu. »*

Toujours dans les points négatifs, il est aussi à noter que les coûts de construction restent entre 1,6 à 2,3 fois plus élevés en France qu'en Allemagne (Source : Xerfi 2012) et freinent donc le développement des unités de méthanisation. Les démarches administratives, aussi, sont longues et complexes et augmentent le temps et les coûts de développement des projets.

## 2. Approche scientifique de la méthanisation

### 2.1 Présentation d'une unité de méthanisation

La méthanisation est un procédé complexe de transformation basée sur la dégradation de la matière organique par des microorganismes, en conditions contrôlées et en l'absence d'oxygène de la matière organique en énergie (biogaz) et en fertilisant (digestat). Le principe général est schématisé ci-dessous.

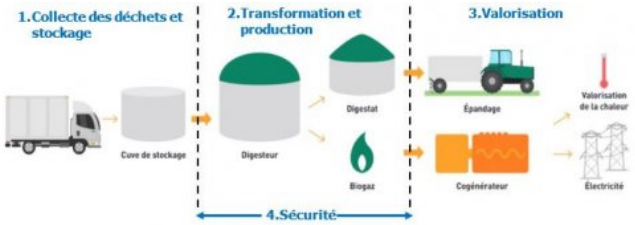



*Figure 3 : Principe général d'une unité de méthanisation, de la collecte à la valorisation des produits (Infographie d'origine Aunis Atlantique))*

1. Collecte des déchets et stockage
Les déchets organiques, appelés intrants, issus de diverses sources, comme les déchets ménagers, les déchets agricoles ou encore les déchets industriels (IAA, STEP, ISDND), sont réceptionnés et pesés à l'entrée du site de méthanisation. Selon leur nature et leur consistance, les matières organiques peuvent être prétraitées avant d'être envoyées vers les digesteurs. Dans ce cas-là, elles sont broyées et stérilisées par passage à la chaleur sous pression. Pour éviter les éventuelles émissions odorantes à l'extérieur du site, ces opérations se font à l'intérieur d'un hall de réception équipé d'unités de désodorisation (source Gicon-engineering).

2. Transformation et production
Les matières organiques sont ensuite introduites dans des cuves cylindriques et hermétiques, le digesteur et le post-digesteur, dans lesquels, elles sont soumises à l'action de microorganismes et ceci en l'absence d'oxygène (fermentation anaérobie). Un

mélangeur/malaxeur permet l'introduction homogène de cette matière organique dans le digesteur. Le temps de séjour est d'environ 50 jours[1] à une à une température comprise entre 38°C et 40°C (fermentation mésophile). Le post-digesteur est surmonté d'un dôme à double membrane qui stocke le biogaz formé.
Le procédé de méthanisation est contrôlé par un système d'acquisition et de contrôle des données. Un grand nombre de paramètres, comme les débits, les pressions, les températures, les pH ou les caractéristiques du biogaz, sont surveillées en permanence et les valeurs sont enregistrées. Ces valeurs sont utilisées pour réguler les différentes unités du site de méthanisation (alimentation, agitation, épuration, injection...).

3. Valorisation
Deux produits vont être valorisés, le biogaz et le digestat.
Avant la valorisation, le biogaz peut être prétraité pour éliminer certains composés indésirables qui n'ont aucune valeur énergétique comme, par exemple, le sulfure d'hydrogène ($H_2S$) ou l'eau ($H_2O$). Pour éliminer le $H_2S$, des sels de fer sont ajoutés dans les fosses de réception, et une injection contrôlée d'air est faite dans le dôme du post-digesteur. Pour éliminer l'eau ($H_2O$) obtenue de la condensation, le biogaz est refroidi par un ventilateur. Le biogaz, une fois traité est comparable au gaz naturel (principalement du méthane).
Ce biométhane est récupéré pour être, soit stocké, soit consommé surplace par un groupe électrogène (cogénération). La combustion du méthane par le générateur produit de l'électricité et de la chaleur. L'électricité produite par un système de turbine/alternateur est envoyée dans le réseau de distribution d'électricité Enedis pour être consommé. La chaleur récupérée est transformée en eau chaude (85°C-90°C), par un échangeur de chaleur, et stockée dans un ballon, avant distribution aux consommateurs potentiels tels que des entreprises, des particuliers, ou bien des bâtiments publics situés à une distance raisonnable de la centrale. Le digesteur lui-même, ainsi que l'ensemble des installations de l'unité de méthanisation le nécessitant, sont auto-alimentés par cette source de chaleur.
Le digestat est évacué du digesteur pour être stocké dans une fosse pendant au moins 6 mois. Il peut être séparé en deux phases avec une presse à vis, pour donner un digestat liquide épandable sur les terres agricoles et un digestat solide épandable ou compostable. Le digestat a un bon pouvoir fertilisant, meilleur que le lisier simple par exemple. Suite à la séparation solide/liquide, le digestat liquide est considéré comme un engrais organique azoté. Il contient la majorité de l'azote initial sous forme minérale (ammonium $NH_4^+$). Le digestat solide est riche, notamment en phosphore sous forme de pentoxyde de phosphore ($P_2O_5$) et en potassium. Il est à noter que le taux de germes pathogènes de ce digestat est réduit.

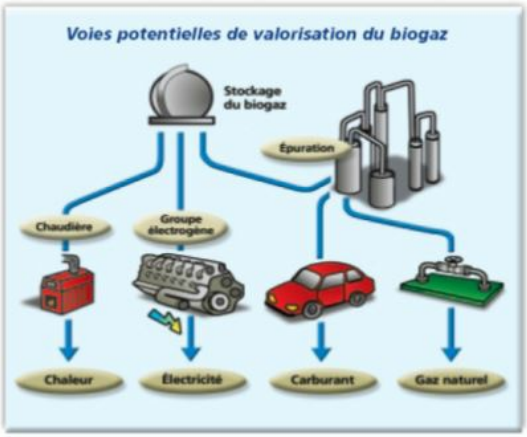



*Figure 4 : Valorisation énergétique du biogaz (Source : GDF)*

4. Sécurité
Les réglementations (sanitaire, environnementale) prévoient notamment des dispositions pour maitriser la sécurité des biens et des personnes. Les exploitants, avec le concours des concepteurs et des constructeurs, doivent identifier les risques à chaque étape de la conception à l'exploitation de l'unité de méthanisation. Ils doivent, notamment, s'assurer de la qualité de cette construction selon des normes, de la bonne pratique de l'exploitation selon des cahiers des charges et de réalisation d'un suivi et d'une maintenance rigoureuse des installations.
Ils doivent déterminer les mesures de prévention adaptées à ces risques et prévoir les procédures en cas d'incidents.
Les installations de méthanisation sont confrontées à des risques d'incendie, d'explosion, d'anoxie, d'intoxication chimique ou biologique et de pollution.

- Un incendie ou une explosion peuvent se produire lorsque sont réunis, en concentration suffisante, un combustible (le méthane) et un comburant (l'oxygène de l'air). La présence d'une source d'inflammation est aussi requise.
  Le méthane et le dioxyde de carbone présentent des risques d'asphyxie pour les opérateurs car ces gaz peuvent provoquer une anoxie.
- La présence de sulfure d'hydrogène ou de dioxyde de carbone en trop grande concentration peut représenter des risques chimiques d'intoxication accrue.
- La présence de microorganismes peut engendrer des infections plus ou moins graves comme, des allergies, ou encore des intoxications. Ce sont les matières organiques introduites dans le méthaniseur et le digestat obtenu qui exposent les opérateurs à ce risque.
- Les fuites et les déversements accidentels de matières organiques ou de digestat peuvent, aussi, provoquer une pollution chimique ou biologique. Les nappes phréatiques sont particulièrement sujettes à ce type de pollution pouvant engendrer des effets néfastes sur le

réseau de distribution d'eau potable. Le sol lui-même, peut aussi subir des dégradations durables aux conséquences écologiques importantes.

Des mesures de sécurité sont donc indispensables à l'installation et à l'exploitation des méthaniseurs.
Pour rassembler non exhaustivement ces risques, le tableau 2 met en parallèle les risques potentiels, les conditions pouvant amener à ce risque, les causes et mesures de sécurité possibles.

| Les risques potentiels | Conditions du risque | Quelques causes possibles | Mesures de sécurité indispensables |
|---|---|---|---|
| Incendie /explosion | Présence de méthane (combustible)<br>Présence d'oxygène (comburant)<br>Présence d'une source d'inflammation<br>Concentration du gaz combustible | -Fuites de gaz<br>-Formation de zones explosives<br>-Travaux de soudure<br>-Canalisations bloquées<br>-Confinement<br>-Défaut d'agitation<br>-Fuites (bris de tuyaux ou de cuves)<br>-Projections et aérosols contenant des microorganismes.<br>-Création d'arcs électriques<br>-Défaut d'installation<br>-Défaut de maintenance<br>-Fissures<br>-Problèmes d'étanchéité | -Utiliser des matériaux qui ne sont pas susceptibles de subir une corrosion (canalisations)<br>-Utilisation de matériaux étanches<br>-Installations aux normes (électriques et autres)<br>-Stockage à l'extérieur<br>-Installer un dispositif de protection contre les effets d'une explosion<br>-Soupape de sécurité<br>-Redondance des vannes<br>-Présence d'une torchère<br>-Mettre en place des détecteurs<br>-Locaux ventilés<br>-Suivre les normes |
| Anoxie | Accumulation de biogaz =baisse taux $O_2$<br>Présence de $CH_4$ et de $CO_2$ | | |
| Risques chimiques et intoxications | Présence possible de $NH_3$, d'$H_2S$ ou de $CO_2$ | | |
| Risques biologiques | Présence de microorganismes éventuellement pathogènes (intrants et digestat) | | |
| Pollution | Stockage d'intrants et de digestat | | |

*Tableau 2 : Risques potentiels d'une unité de méthanisation et mesures possibles.*

Plusieurs dispositifs sont disponibles pour aider les exploitants à maitriser les risques comme :

- Des guides sur les règles de sécurité des installations de méthanisation agricole (pdf de 3,5 Mo) édité par INERIS.
- Des labels attestant de bonnes pratiques comme ceux de Qualimétha et AMO
- L'organisation de formations de futurs exploitants notamment le Certificat de spécialisation de responsable d'unité de méthanisation agricole.

## 2.2 Biochimie et microbiologie de la méthanisation

**a. Composition du biogaz**
Le biogaz est produit par la fermentation de matières organiques animales ou végétales et ceci en anaérobiose. Sa composition varie en fonction de la nature des substrats introduits (les intrants) et des conditions opératoires. Le tableau qui suit donne un exemple de la composition indicative d'un biogaz de type agricole.

| Produits | Formules chimiques | Teneurs moyennes dans un biogaz |
|---|---|---|
| **Méthane** | $CH_4$ | 50 à 75 % |
| **Dioxyde de carbone** | $CO_2$ | 25 à 45 % |
| **Sulfure d'hydrogène** | $H_2S$ | 0 à 2 % |
| **Ammoniac** | $NH_3$ | <0,1 % |
| **Azote** | $N_2$ | 0 à 2 % |
| **Hydrogène** | $H_2$ | 0,1 à 1 % |
| **Monoxyde de carbone** | CO | <0,1 % |
| **Oxygène** | $O_2$ | 0 à 2 % |
| **Composés organiques volatils** | COV | <1 % |
| **Eau** | $H_2O$ | 2 à 7 % |

*Tableau 3 : Teneurs des principaux composants du biogaz agricole (ministère de l'agriculture)*

Remarque 1 : Le méthane ($CH_4$) est un gaz à effet de serre (GES) dont le potentiel de réchauffement global (PRG) sur un siècle est 21 fois plus important que celui du dioxyde de carbone ($CO_2$). Il est donc particulièrement important de limiter au maximum son dégagement dans l'atmosphère.
Remarque 2 : Le biogaz a une composition proche de celle du gaz naturel (figure 5)

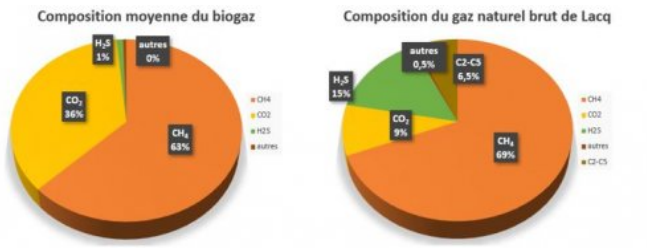



*Figure 5 : Comparaison entre la composition moyenne du biogaz et la composition du gaz naturel brut extrait de Lacq (Département des Pyrénées Atlantique 64)*

**b. Réactions biochimiques**
Lors des différentes réactions de méthanisation, le méthane et le dioxyde de carbone sont produits par une suite de plusieurs réactions biochimiques et ceci à partir de matières organiques. Ces réactions métaboliques sont exécutées pratiquement toutes en anaérobiose par des microorganismes vivants qui possèdent les enzymes nécessaires. Ces réactions, sûrement déjà présentes sur Terre avant même la vie aérobie, ont été, et sont toujours, fondamentales pour les cycles biogéochimiques (carbone, soufre et azote notamment).
Ces microorganismes méthanogènes que l'on retrouve naturellement dans certains écosystèmes naturels comme les marais, les lacs, les rizières, ou encore le sol ou même dans les microbiotes intestinaux de certains animaux, travaillent ensemble pour générer ce biogaz à partir de substrats organiques (glucides, lipides, protéines et acides nucléiques).

Lors de la méthanisation, les réactions biochimiques observées transforment des molécules organiques complexes en molécules minérales plus simples, il s'agit donc de façon générale, d'une minéralisation.
Les différentes réactions impliquées se déroulent en 4 étapes que sont l'hydrolyse, l'acidogenèse, l'acétogenèse et la méthanogenèse.

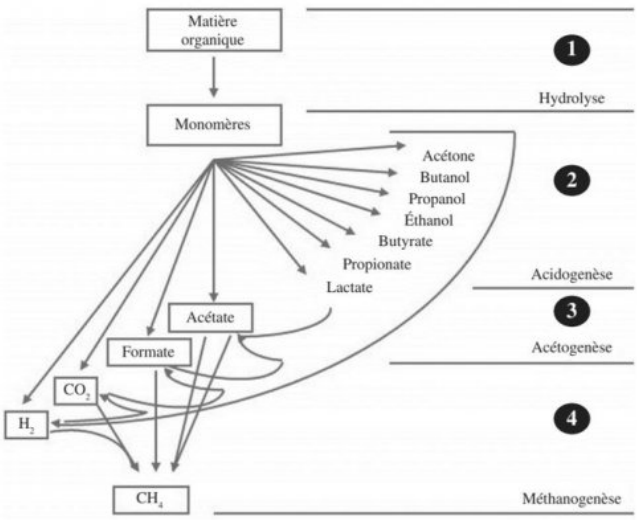



*Figure 6 : Les 4 étapes de la digestion anaérobie (Garcia 1990)*

- Hydrolyse
  Au cours de cette étape, les macromolécules organiques tels que les glucides, les lipides, les protéines et les acides nucléiques, sont hydrolysées en monomères hydrosolubles tels que des oses, des acides gras, des acides aminés et des nucléotides. Cette réaction d'hydrolyse est catalysée par des enzymes produites par des microorganismes. Cette étape d'hydrolyse est généralement la moins rapide des 4 types de réactions et donc, c'est l'étape limitante pour l'ensemble du processus de méthanisation.

- Acidogenèse
  Au cours de l'étape d'acidogenèse, les monomères obtenus lors de la réaction précédente, sont transformés principalement en acides volatils (tels que l'acide acétique, l'acide propionique, l'acide butyrique, l'acide valérique, etc.) mais aussi en alcools et en d'autres acides organiques (comme l'acide lactique ou succinique). Il apparait, dans cette série de réactions, de l'hydrogène et du dioxyde de carbone.

| Réactions biochimiques observées durant acidogenèse | $\Delta G^{o\prime}$ (kJ/réaction) |
|---|---|
| Glucose + 2 $H_2O$ → 2 éthanol + 2 $HCO_3^-$ + 2 $H^+$ | -225,4 |
| Glucose → 2 lactate + 2$H^+$ | -198,1 |
| Glucose + 2$H_2O$ → butyrate + 2 $HCO_3^-$ + 3 $H^+$ + 2 $H_2$ | -254,4 |
| Glucose → 3 acétate + 3 $H_2$ | -310,6 |
| Glucose + $HCO_3$ → butyrate + acétate + formiate + 3 $H^+$ + 2$H_2O$ | -144,0 |
| 3 Lactate → 2 propionate + acétate + $HCO_3^-$ + $H^+$ | -164,8 |

*Tableau 4 : Exemples de réactions biochimiques lors de l'acidogenèse (Godon 2008)*

- Acétogenèse
  Pendant les réactions de l'acétogenèse, les intermédiaires métaboliques de la phase précédente sont transformés en acide acétique, en dihydrogène et en dioxyde de carbone. Ces molécules sont indispensables à ce moment-là car ce sont les précurseurs de la formation du méthane.
  Pour cette synthèse d'acide acétique, deux voies sont décrites :
  - La voie homoacétogène qui conduit à la production d'acide acétique à partir de molécules organiques principalement.
  - La voie hétéroacétogène qui aboutit à la production d'acide acétique ainsi que de dihydrogène et de dioxyde de carbone mais aussi à d'autres acides volatils tels que l'acide propionique, l'acide pyruvique ou encore l'acide butyrique.

Thermodynamiquement, ces réactions sont endergoniques ($\Delta G_0' > 0$) dans les conditions standards (concentration des réactifs = 1 mol/L ; pression des gaz = 1 atm). Cependant, si la pression partielle de dihydrogène diminue (en deçà de $10^{-4}$ à $10^{-6}$ atm), la production d'acétate redevient possible mais ensuite, l'accumulation de dihydrogène conduit à l'arrêt de l'acétogenèse.
L'acétogenèse est une des étapes clés de la digestion anaérobie. En effet, tout dysfonctionnement à ce niveau risque de se traduire par une accumulation de dihydrogène et d'acides volatils entraînant une baisse importante du pH, pouvant inhiber les enzymes de l'étape de méthanogenèse suivante.

| Réactions biochimiques observées durant acétogenèse | $\Delta G^{o\prime}$ (kJ/réaction) |
|---|---|
| Éthanol + 2 $H_2O$ → acétate + $H^+$ + 2 $H_2$ | -3,9 |
| Butyrate + 2 $H_2O$ → 2 acétate + 2 $H_2$ - $H^+$ | +7,0 |
| Lactate + 2 $H_2O$ → acétate + 2 $H_2$ + 3 $HCO_3^-$ + $H^+$ | +9,6 |
| Éthanol → acétate + 2 formiate + $H^+$ + $H_2O$ | +48,1 |
| Propionate + 3 $H_2O$ → 2 acétate + 3 $H_2$ + $HCO_3^-$ + $H^+$ | +76,1 |

*Tableau 5 : Exemples de réactions biochimiques lors de l'acétogenèse (Godon 2008)*

- Méthanogenèse
  Dans cette dernière étape, les produits précédents de l'acétogenèse (acétate, formiate, dioxyde de carbone et dihydrogène) sont utilisés pour produire du méthane. Trois types de réactions peuvent être distingués :
  - La méthanogenèse hydrogénotrophe qui consiste à une réduction du dioxyde de carbone en présence de dihydrogène. L'acide formique peut aussi être utilisé comme source d'électrons pour ce type de réactions.

| Réactions biochimiques observées durant la méthanogenèse hydrogénotrophe |
|---|
| $CO_2$ + 4 $H_2$ → $CH_4$ + 2 $H_2O$ |
| 4 HCOOH → $CH_4$ + 3 $CO_2$ + 2 $H_2O$ |
| 4 CO + 2$H_2O$ → $CH_4$ + 3 $CO_2$ |

*Tableau 6 : Exemples de réactions biochimiques lors de la méthanogenèse hydrogénotrophe (Yuchen Liu et William B. Whiteman 2008)*

  - La méthanogenèse acétotrophe qui, à partir de l'acide acétique, produit du méthane et du dioxyde de carbone.

| Réactions biochimiques observées durant la méthanogenèse acétotrophe |
|---|
| $CH_3COOH$ → $CH_4$ + $CO_2$ |

*Tableau 7 : Exemples de réactions biochimiques lors de la méthanogenèse acétotrophe (Yuchen Liu et William B. Whiteman 2008)*

  - La méthanogenèse méthylotrophe qui utilise le méthanol ou la méthylamine ou bien encore, ses dérivées comme source de carbone pour la synthèse du méthane.

| Réactions biochimiques observées durant la méthanogenèse méthylotrophe |
|---|
| $CH_3OH$ + $H_2$ → $CH_4$ + $H_2O$ |
| 4 $CH_3NH_2$ + 2 $H_2O$ → 3 $CH_4$ + 4 $NH_3$ + $CO_2$ |
| 2 $(CH_3)_2NH$ + 2 $H_2O$ → 3 $CH_4$ + $CO_2$ + 2 $NH_3$ |
| 4 $(CH_3)_3N$ + 6 $H_2O$ → 9 $CH_4$ + 3 $CO_2$ + 4 $NH_3$ |
| $CH_3NH_2$ + $H_2$ → $CH_4$ + $NH_3$ |
| 2 $(CH_3)_2S$ + 2 $H_2O$ → 3 $CH_4$ + $CO_2$ + 2 $H_2S$ |
| $(CH_3)_2S$ + 2 $H_2$ → 2 $CH_4$ + $H_2S$ |

*Tableau 8 : Exemples de réactions biochimiques lors de la méthanogenèse méthylotrophe (Yuchen Liu et William B. Whiteman 2008)*

- Autres réactions observées.
  Par ailleurs, parallèlement à la méthanogenèse, des réactions de sulfato-réduction peuvent se produire sous l'action de bactéries sulfato-réductrices en présence de sulfate et dans un milieu réducteur. Ces réactions permettent la transformation d'alcools ou d'acides gras en $H_2S$ et $CO_2$ en utilisant le sulfate comme source d'énergie. En particulier, les bactéries sulfato-réductrices ont la capacité d'utiliser l'hydrogène et l'acide acétique, entrant ainsi en concurrence avec les réactions de méthanogenèse.

| Réactions de sulfato-réduction |
|---|
| Oxydation de l'acétate |
| $CH_3COO^-$ + $SO_4^{2-}$ → 2 $HCO_3^-$ + $HS^-$ |
| Oxydation de l'éthanol |
| $CH_3CH_2OH$ + ½ $SO_4^{2-}$ → $CH_3COO^-$ + ½ $HS^-$ + ½ $H^+$ + $H_2O$ |
| Oxydation du propionate |
| $CH_3CH_2COOH$ + ¾ $SO_4^{2-}$ →$CH_3COO^-$ + ¾ $HS^-$ + ¼ $H^+$ |
| Oxydation du butyrate |
| $CH_3CH_2CH_2COOH$ + ½ $SO_4^{2-}$ →2 $CH_3COOH$ + ½ $HS^-$ + ½ $H^+$ |
| Oxydation de l'hydrogène |
| 4 $H_2$ + $SO_4^{2-}$ + $H^+$ → $HS^-$ + 4 $H_2O$ |
| Oxydation du thiosulfate |
| $S_2O_3^{2-}$+ $H_2O$ → $SO_4^{2-}$+ $HS^-$ + $H^+$ |
| 4 $SO_3^{2-}$+ $H^+$ → 3 $SO_4^{2-}$+ HS |

*Tableau 9 : Exemples de réactions de sulfato-réduction (Stams et al., 2005)*

Ces réactions métaboliques aboutissent à la production :

- du digestat qui est un produit humide riche en matière organique. Parmi ces molécules non dégradées, on trouve de la lignine par exemple.
- du biogaz qui est un mélange gazeux saturé en eau, composé d'environ 50 % à 70 % de méthane ($CH_4$), de 20 % à 50 % de gaz

carbonique ($CO_2$) et de quelques traces d'autres produits comme de l'ammoniac ($NH_3$), de l'azote ($N_2$) ou encore du sulfate d'hydrogène ($H_2S$) (Voir tableau 3).

### 2.3 Écosystème microbien du digestat

Le digestat présent dans le méthaniseur est un écosystème complexe très hétérogène par sa composition, et qui rassemble un grand nombre de microorganismes variés.
Les nombreux microorganismes impliqués dans cette digestion anaérobie, sont en relation étroite entre eux car les réactions des uns fournissent les substrats des autres.
La composition de la population microbienne présente dans les méthaniseurs n'est généralement pas entièrement identifiée et elle varie d'un digestat à l'autre. Cependant les microorganismes présents sont des microorganismes, en principe, thermophiles ou mésophiles et ils appartiennent aux domaines que sont les ***Bacteria*** et les ***Archaea*** .
Les microorganismes issus de ces deux domaines impliqués dans la méthanisation, peuvent être classés en fonction des étapes dans lesquelles ils interviennent généralement.
On va décrire ainsi 3 groupes :

- Les microorganismes hydrolytiques et fermentatifs qui réalisent les étapes d'hydrolyse et d'acidogénèse
- Les microorganismes acétogènes impliqués dans l'acétogenèse.
- Les microorganismes méthanogènes sont ceux qui interviennent dans la dernière phase du processus aboutissant à la synthèse de méthane. Il est à signaler que ces méthanogènes sont tous des ***Archaea*** . Une cinquantaine d'espèces de ces méthanogènes ont déjà été décrites. Elles sont toutes anaérobies. Cependant elles appartiennent à des groupes phylogéniques pouvant être différents (différents clades).

| Étapes/groupes de microorganismes | | Exemples de genres ou espèces ou groupes phylogénétiques impliqués | |
|---|---|---|---|
| **Hydrolyse et acidogenèse** | | *Clostridium, Bacillus, Ruminococcus, Enterobacteroïdes, Propionibacterium et Butivibrio* | |
| **Acétogenèse** | Homoacétogènes | *Clostridium, Acetobacterium, Sporomusa, Acetogenium, Acetoanaerobicum, Pelobacter Butyribacterium, Eubacterium* | |
| | Syntrophes | *Syntrophobacter, Syntrophomonas, Syntrophus* | |
| | Sulfato-réductrices | *Desulfovibrio, Desulfobacter, Desulfotomaculum, Desulfomonas* | |
| **Méthanogenèse** | Voie hydrogénotrophe | *Archaea* | *Methanothermobacter thermoautotrophicus Methanosarcina barkeri* |
| | Voie acétotrophe | *Archaea* | *Methanosarcina Methanosaeta* |
| | Voie méthylotrophe | *Archaea* | *Methanosarcinales* (Ordre) |

*Tableau 10 : Exemples de genres ou espèces ou groupes phylogénétiques impliqués dans les différentes étapes de la méthanisation (https://www.méthanisation.info)*

Ces trois communautés doivent constituer un écosystème symbiotique. Un équilibre doit être trouvé pour que chaque microorganisme puisse se développer et synthétiser ces produits. De plus, les produits des uns ne doivent pas inhiber le développement des autres.
Les conditions optimales de croissance des bactéries hydrolytiques et acidogènes sont relativement les mêmes avec une gamme de pH commune aux alentours de 4,5 à 6,5. Alors que les 2 autres étapes nécessitent des conditions optimales avec un pH plus élevé (6,8 à 7,5).
L'ensemble de ces microorganismes évoluant dans le même écosystème, les conditions ne sont a priori jamais optimales pour l'ensemble des familles. Le pH se situe naturellement autour de 7-7,5 et sauf cas particulier, aucune régulation de pH n'est à effectuer, excepté en cas de réelle acidose (la chute du pH est due à une accumulation d'acides provoquant une interruption de la production de biogaz).
La liste exacte des différentes espèces de microorganismes opérant dans chacune de ces étapes est, pour la plupart des cas, mal définie car leur culture est difficile par des techniques classiques de laboratoire, notamment par le fait que ces souches soient anaérobies (certaines bactéries de l'étape d'hydrolyse peuvent tolérer la présence d'oxygène) et que leur nombre et leurs variétés soient importants. De plus, les interactions entre les espèces peuvent aussi en modifier leurs propriétés ce qui pourrait mal orienter l'identification par comparaison avec une souche pure.
Il est à noter que les microorganismes présents dans les digesteurs dépendent du type de substrat présent dans le digesteur. L'alimentation par du lisier conduit à un haut taux d'ammoniac et d'acides gras volatils faisant apparaitre de façon majoritaire des Methanosarcina, alors qu'une alimentation par des boues, baisse les taux d'ammoniac et d'acides gras volatils et favorise la présence de Methanosaeta (Karakashev et al. 2005).
La connaissance des différentes espèces est donc un travail très complexe du fait du nombre d'espèces présentes. Des travaux de métagénomique et métabolomique, de plus en plus nombreux, ont pour objectif de les identifier et de comprendre leur rôle. En effet, la connaissance des espèces permettrait une compréhension des mécanismes impliqués et ainsi un meilleur contrôle du processus dans sa globalité (St-Pierre and Wright, 2014 ; Lu et al., 2013 Schluter et al., 2008)

### 2.4 Différentes pistes d'optimisation

**a. Études méta-omiques**
Pour améliorer et optimiser la production et les process de méthanisation, il est probablement intéressant de connaitre la composition exacte en microorganismes responsables des diverses réactions biochimiques mais aussi de connaître les interactions entre les espèces et la fonction de chacune dans cette communauté. De nouvelles approches de biologie moléculaire appuyées par la bioinformatique permettent d'améliorer nos connaissances sur ces populations et leurs fonctions au sein de ces écosystèmes. La métagénomique, la métatranscriptomique, la métaprotéomique ou encore la métabolomique permettent, ainsi, de révéler la microbiologie de ces systèmes

complexes en lien avec leurs potentialités fonctionnelles.
Du séquençage haut-débit (NGS pour Next-Generation Sequencing) et de la qPCR sur ces populations et leurs milieux permettent, maintenant, d'accéder finement aux capacités fonctionnelles des écosystèmes de méthanisation.

A propos des études métagénomiques, deux stratégies sont possibles :

- Le séquençage global qui consiste à séquencer et analyser l'ensemble des séquences présentes dans l'échantillon de digestat.
- Le séquençage ciblé 16S qui est un séquençage ciblé du gène codant l'ARNr 16S mettant en évidence la représentation et l'abondance des différentes espèces de Bacteria ou Archaea d'un digestat donné.

Cette deuxième technique est la plus utilisée car moins coûteuse, elle est souvent suffisante pour identifier les microorganismes présents. Cette technique comprend différentes étapes (figure 7) comme l'extraction de l'ensemble des ADN génomiques présents dans l'échantillon, la détection et l'analyse des gènes codant l'ARN ribosomique 16S, présent chez ces Procaryotes. L'étude des variations génétiques sur ce gène permettent une analyse phylogénétique. Dans la pratique, on n'analyse pas la totalité de la séquence 16S (1500 pb) mais qu'une partie, en général la région V3-V4. Cette région est souvent suffisante pour identifier le microorganisme jusqu'au genre.

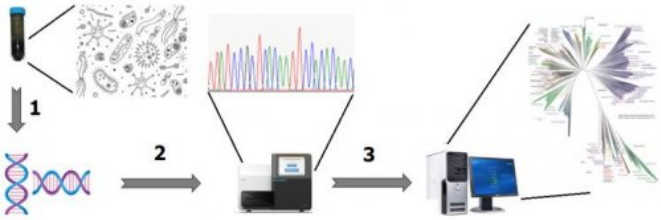



*Figure 7 : Schéma simplifié de la démarche analytique d'une étude métagénomique d'un digestat*
- 1 : Étape d'extraction des ADN
- 2 : Séquençage des ADN 16S
- 3 : Analyses bio-informatiques

**b. Pré-traitements**
Bien souvent, les biodégradations par les différents microorganismes présents dans les digesteurs ne sont pas totales. Par exemple, la partie lignocellulosique des déchets organiques végétaux est difficilement biodégradable. La lignine est une molécule organique extrêmement résistante à la dégradation biologique mais certains champignons sont capables de la dégrader principalement par des réactions d'oxydation. Au-delà des méthodes classiques de broyage, des traitements thermochimiques qui permettent de rendre plus rapidement les substrats (la cellulose) accessibles, se développent de nouveaux pré-traitements qui permettent d'optimiser ces productions. On peut évoquer, notamment, la réalisation de traitements enzymatiques (à partir de ligninases extraites des champignons) qui permettent de pré-dégrader la lignine en la décrochant de la cellulose. On peut citer la Lignine peroxydase (LiP) ou bien la Manganèse peroxydase (MnP) extraite d'un champignon (*Phanerochaete chrysosporium*).

**c. Étude du virome**
Parmi les voies d'amélioration possibles, l'étude de virus des microorganismes méthanogènes semblent être une voie prometteuse et particulièrement celle des virus des archées méthanogènes. En effet, ces derniers sont mal connus et mal définis encore aujourd'hui et leur utilisation éventuelle comme vecteurs de transduction pourrait permettre l'optimisation du rendement de la production du biogaz ou bien la réalisation de biocontrôles à des fins de bonne conduite du process, comme c'est déjà le cas dans d'autres domaines (médical, agro-alimentaire, épuration des eaux usées). Les virus de bactéries et d'archées pourraient être utilisés pour favoriser les voies de fermentation les plus optimales et établir des populations plus standardisées et efficientes. Ces virus pourraient donc servir d'outils ciblant spécifiquement certains groupes fonctionnels microbiens.
De plus, la connaissance de ces virus pourrait aider à les neutraliser en cas d'effets parasitaires négatifs sur les microorganismes d'intérêts présents dans les digestats.

Le projet VIRAME proposé par l'université Paris Saclay, a pour objectif de caractériser, in situ, le contenu génomique de virus d'archées méthanogènes dans les bioprocédés anaérobies de valorisation des déchets organiques. Ce projet souhaite établir le lien entre un virus et son hôte au sein d'écosystèmes complexes comme les digestats. Différentes techniques de biologie moléculaire (méta-omiques, isotopie, en particulier « Stable isotope probing » SIP) et des analyses *in silico* classiques (génomique comparative) et spécifiques (analyse de CRISPR spacers, de provirus, composition en k-mers), ont pour objectif de définir les liens entre les voies de méthanogenèse réalisées par les archées et la présence des virus infectant ces archées.

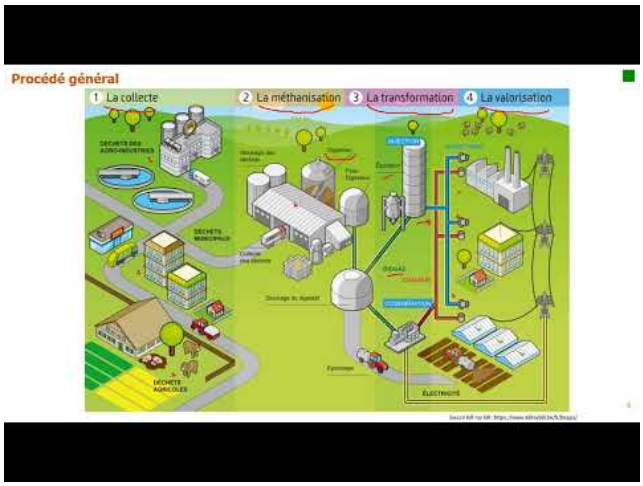
**En conclusion**
La biométhanisation n'est pas un sujet nouveau mais il reste d'actualité tant le développement du nombre d'unités de production progresse sur notre territoire et que nos besoins énergétiques, eux, ne faiblissent pas. De plus, nous devons, par nos actions, faire d'immenses efforts pour maintenir notre planète viable.

La recherche est très active dans ce domaine pour optimiser, toujours un peu plus, les différents process et techniques pour produire cette énergie. Les microorganismes utilisés font aussi l'objet d'intenses études pour, non seulement saisir la composition de ces populations, mais aussi pour en sélectionner les meilleures souches.

Le développement de la biométhanisation en France et en Europe a donc, des enjeux sociaux et économiques importants. Il permet la production de ressources non négligeables d'énergie et assure des activités supplémentaires pour les territoires ruraux en particulier. Des enjeux politiques et géopolitiques, avec notamment le récent conflit qui a démarré en Ukraine, rajoute de l'intérêt à cette technologie.

La biométhanisation reste aussi un thème de choix pour nos sections de biotechnologies (STL notamment) car il est à la croisée de nombreuses disciplines de notre filière.

- La microbiologie, bien sûr, avec l'étude des nombreux microorganismes intervenants, l'influence de facteurs extérieurs sur leur croissance, les technologies de culture et de contrôle.
- La biochimie avec la maitrise des réactions, des enzymes et des tests comme celui du test du potentiel méthanogène.
- La biologie moléculaire qui améliore nos connaissances sur ce sujet notamment avec des études métagénomiques des populations microbiennes présentes.
  Ce thème permet aussi d'agréger d'autres disciplines de la filière comme l'EMC ou la STBI et des disciplines plus générales comme la physique ou le français.
  De plus, la contextualisation associée à l'expérimentation, qui est une force de nos sections, permet, à nos élèves et à nos étudiants de s'ancrer davantage dans le concret et leur permet aussi de développer leurs compétences techniques et réflexives.




**La biométhanisation** (Video Youtube)

Jules GUITTARD
Lycée VALIN
La Rochelle

**Sitographie**

Les éco-délégués. (2021). éduscol | Ministère de l'Éducation nationale, de la Jeunesse et des Sports - Direction générale de l'enseignement scolaire. Consulté le 9 février 2021, à l'adresse https://eduscol.education.fr/1121/les-eco-delegues

GRDF. G (2020, 17 janvier). Le biométhane en Europe : tour d'horizon du développement. Grdf.fr https://projet-methanisation.grdf.fr

Ministère de la Transition écologique et solidaire, M. (s. d.). (2020. 22 février) Biogaz. https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/biogaz

ATEE. A (2021, 31 Janvier) : Carte des unités de méthanisation en France. Atee.fr. https://atee.fr/energies-renouvelables/club-biogaz/carte-des-unites-de-methanisation-en-france

ADEME. (2022). Actualisation du scénario énergie-climat ADEME 2035–2050. La librairie ADEME. https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/1740-actualisation-du-scenario-energie-climat-ademe-2035-2050-9791029709869.html

Béatrice Sédillot, B. S. (2020, mai). Tableau de bord : biométhane injecté dans les réseaux de gaz - Premier trimestre 2020. Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement et les transports. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/tableau-de-bord-biomethane-injecte-dans-les-reseaux-de-gaz-premier-trimestre-2020

Biogaz Vallée. (2022). Contexte et enjeux | Biogaz Vallée ®. Biogaz Vallée Le cluster de la méthanisation en France. Consulté le 14 février 2022, à l'adresse http://www.biogazvallee.eu/biogaz-valleer/contexte-et-enjeux/

Le Télégramme. (2020, 20 août). Une usine de méthanisation à l'origine de la pollution de l'eau dans le Finistère [Vidéo]. Le Télégramme. https://www.letelegramme.fr/bretagne/pollution-le-prefet-du-finistere-recommande-de-ne-plus-boire-l-eau-du-robinet-dans-50-communes-19-08-2020-12600833.php

GRDF. (2022). Projet-Méthanisation. Consulté le 14 février 2022, à l'adresse https://projet-methanisation.grdf.fr/la-methanisation/la-dynamique-du-marche

ATEE. (2022). Carte des unités de méthanisation en France. https://atee.fr/energies-renouvelables/club-biogaz/carte-des-unites-de-methanisation-en-france

IRSTEA. (2013). La filière de la Méthanisation [Illustration]. https://www.la-viande.fr/. https://www.la-viande.fr/sites/default/files/images/06-09-filiere-methanisation-h.jpg

Carbone, I. C. (2015, 5 février). Les digesteurs à biogaz [Info Compensation Carbone]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=e3D9uotfVdE&feature=youtu.be

Scribbr. (2020, 2 septembre). Générateur gratuit de sources au format APA. https://www.scribbr.fr/generateur-apa/

Programmations pluriannuelles de l'énergie (PPE). (2021, 11 octobre). Ministère de la Transition écologique. https://www.ecologie.gouv.fr/programmations-pluriannuelles-lenergie-ppe# :%7E:text=Le%2028%20octobre%202016%2C%20le,%2D2018%20et%202019%2D2023.

ENGIE. (2022). La composition du gaz naturel en France. Gaz tarifs réglementés. Consulté le 16 février 2022, à l'adresse https://gaz-tarif-

reglemente.fr/gaz/comprendre-gaz-naturel/types-gaz/gaz-naturel/composition-gaz-naturel.html# :%7E:text=Le%20principal%20constituant%20des%20gisements,%C3%A9l%C3%A9ments%20sous%20forme%20de%20traces.

Véolia. (2014, 5 novembre). Cas d'application de l'outil Métatranscriptomique pour l'optimisation des procédés industriels de méthanisation. Métagénomique. https://docplayer.fr/112777708-Cas-d-application-de-l-outil-metatranscriptomique-pour-l-optimisation-des-procedes-industriels-de-methanisation.html

France Biométhane. (2021, 19 janvier). France Biométhane | Promouvoir et démocratiser le biométhane. https://france-biomethane.fr/

Biogas World. (2020, 15 août). Risques et mesures de sécurité liés aux installations de méthanisation. BiogasWorld. https://www.biogasworld.com/fr/news/risques-lies-aux-installations-de-methanisation-et-mesures-de-securite-indispensable/

Wikipedia contributors. (2021, 15 novembre). Biotechnologie. Wikipedia. https://fr.wikipedia.org/wiki/Biotechnologie

Programmes et ressources en série STL. (Mise à jour 2022, février). éduscol | Ministère de l'Éducation nationale, de la Jeunesse et des Sports - Direction générale de l'enseignement scolaire. Consulté le 13 mars 2022, à l'adresse https://eduscol.education.fr/1652/programmes-et-ressources-en-serie-stl

Daniel SALMON, D. S. (2021, 29 septembre). Méthanisations : au-delà des controverses, quelles perspectives ? - Sénat. Sénat.fr. https://www.senat.fr/notice-rapport/2020/r20-872-notice.html.

(1) Ce temps de séjour est variable, il dépend de la taille du digesteur et le débit d'alimentation

Académie de Poitiers

Avertissement : ce document est la reprise au format pdf d'un article proposé sur l'espace pédagogique de l'académie de Poitiers.

Il ne peut en aucun cas être proposé au téléchargement ou à la consultation depuis un autre site.