

## LES GAZ RENOUVELABLES AU CŒUR DE LA TRANSITION ENERGETIQUE

**Coordinateurs :** Elise El Ahmar (CTP), Marco Campestrini (CTP)

**Encadrant industriel :** Frédéric Legrand (ENGIE Lab CRIGEN)

**Centre de recherche concernés :** Centre Thermodynamique des Procédés (CTP) et ENGIE Lab CRIGEN

**Lieux :** CTP, 35 rue Saint Honoré, 77300 Fontainebleau et ENGIE Lab CRIGEN, 4 rue Joséphine Baker, 92 240 Stains

### RESUME :

Le biogaz, mélange composé principalement de méthane ( $\text{CH}_4$ ) et de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), est produit grâce à un processus de dégradation de matières organiques en l'absence d'oxygène. Le biométhane résulte d'un processus d'épuration du biogaz lui permettant d'avoir les mêmes propriétés que le gaz naturel et est garanti d'origine 100 % renouvelable. Le biométhane représente une voie de production d'hydrogène renouvelable ou « vert ».

Les élèves seront amenés à découvrir le biogaz/biométhane et la molécule  $\text{H}_2$  de leurs productions jusqu'à leurs différentes applications ainsi que le captage et la valorisation du  $\text{CO}_2$ .

La consommation de gaz renouvelables permet de mieux valoriser les déchets des territoires et de lutter contre le changement climatique tout en dynamisant l'économie locale et l'activité des agriculteurs locaux.

La molécule  $\text{H}_2$ , quant à elle, constitue une vraie piste d'avenir pour la transition énergétique en permettant le développement des énergies renouvelables décentralisées et l'explosion de solutions de mobilité verte.

### CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE :

Un gaz renouvelable (dit aussi gaz vert) est un gaz utilisable par exemple pour la production d'électricité, de chaleur, ou encore il peut être utilisé comme carburant. Un gaz renouvelable n'est pas extrait ou produit en partant des réserves fossiles, comme le gaz naturel. Le biogaz est aujourd'hui le gaz renouvelable par excellence.



**Un gaz vert est un gaz garanti d'origine renouvelable**

## Biogaz/Biométhane

Le biogaz est un gaz combustible, un mélange en moyenne de méthane (CH<sub>4</sub>) à 65% et de CO<sub>2</sub> à 35%. C'est une ressource d'énergie renouvelable issue de la biomasse. Cependant le nom 'biogaz' regroupe une grande variété de gaz issus de procédés de traitement spécifiques, à partir des déchets organiques divers – industriels, d'origine animale, ménagère etc.

La composition (Tableau 1) et les propriétés du biogaz varient selon les intrants utilisés, les procédés de méthanisation, mais aussi la température, le temps de séjour hydraulique, etc. Les autres composants du biogaz sont le CO<sub>2</sub>, l'eau, l'azote, et des éléments indésirables en faible quantité comme l'H<sub>2</sub>S, les siloxanes, les composés organiques volatiles, les chlorés ou les fluorés.

Selon sa composition, le biogaz présente des caractéristiques qu'il est intéressant de comparer au gaz naturel et au propane. Le biogaz est un gaz sensiblement plus léger que l'air, il produit deux fois moins de calories par combustion à volume égal que le gaz naturel.

| Composants                                       | Ordures ménagères | Boues de STEP1 | Déchets agricoles | Déchets de l'industrie agro-alimentaire |
|--|-------------------|----------------|-------------------|---|
| CH <sub>4</sub> % vol                            | 50-60             | 60-75          | 60-75             | 68                                      |
| CO <sub>2</sub> % vol                            | 38-34             | 33-19          | 33-19             | 26                                      |
| N <sub>2</sub> % vol                             | 5-0               | 1-0            | 1-0               | -                                       |
| O <sub>2</sub> % vol                             | 1-0               | < 0,5          | < 0,5             | -                                       |
| H <sub>2</sub> O % vol                           | 6 (à 40 ° C)      | 6 (à 40 ° C)   | 6 (à 40 ° C)      | 6 (à 40 ° C)                            |
| Total % vol                                      | 100               | 100            | 100               | 100                                     |
| H <sub>2</sub> S mg/m <sup>3</sup>               | 100 – 900         | 1000 - 4000    | 3000 – 10 000     | 400                                     |
| NH <sub>3</sub> mg/m <sup>3</sup>                | -                 | -              | 50 - 100          | -                                       |
| Aromatiques mg/m <sup>3</sup>                    | 0 – 200           | -              | -                 | -                                       |
| Organochlorés ou organofluorés mg/m <sup>3</sup> | 100-800           | -              | -                 | -                                       |

Tableau 1 : Composition du biogaz selon des sources différentes de production (biogaz énergie renouvelable, Naskeo environnement, 2008)

La valorisation énergétique des biogaz permet d'exploiter le potentiel énergétique de la matière organique contenue dans les déchets, tout en assurant, par la méthanisation, un traitement et le retour au sol de cette même matière organique. Le biogaz participe aux engagements de la France pour la production d'énergie renouvelable sous la forme d'électricité, de chaleur et de carburant. Sa valorisation permet de diminuer les émissions de gaz à effet de serre, méthane et oxydes d'azotes notamment. L'énergie contenue dans un Nm<sup>3</sup> de biogaz contenant 60 % de méthane sera de 21,6 MJ ou 6 kWh, équivalant à environ 0,7 l d'essence ou 0,6 l de fuel.

Après épuration, le biogaz atteint le même niveau de qualité que le gaz naturel et peut donc être injecté dans les réseaux de distribution et de transport : on l'appelle alors biométhane. Au 30 septembre 2019, 105 sites injectent de biométhane en France. Environ 80% des producteurs de biométhane sont agriculteurs. La France pourrait produire 100 % de gaz renouvelable en 2050, selon une étude publiée par l'Ademe. Ce gaz participe à l'économie locale et favorise le développement d'une agriculture durable et pérenne économiquement :

- Il transforme les déchets et effluents agricoles en énergie renouvelable
- Il est injecté localement dans le réseau et alimente les riverains
- Il représente un complément de revenus pour les agriculteurs

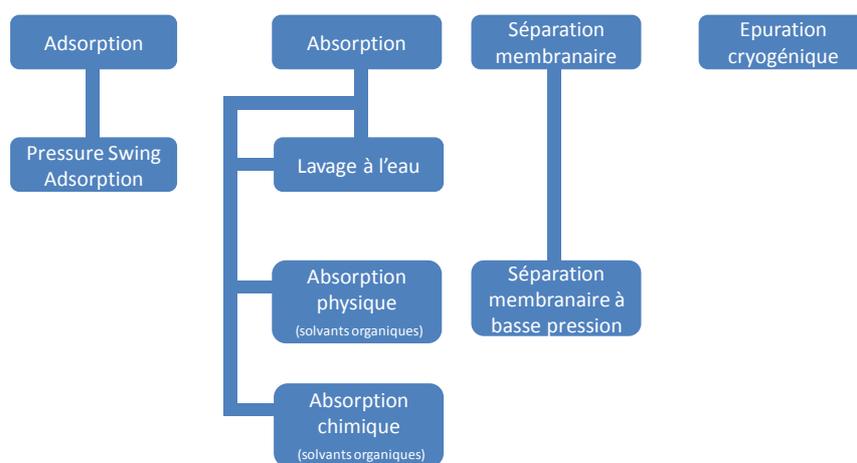
---

1 Boues de STEP : boues résiduaires issues de stations d'épuration traitant des eaux usées domestiques ou urbaines.

-Il génère un coproduit appelé digestat, engrais organique naturel qui se substitue aux engrais chimiques.

### Les procédés de purification du biogaz et de production de biométhane

Au méthane et au CO<sub>2</sub> que contient le gaz à la sortie du méthaniseur, s'ajoutent des traces (Tableau 1) de H<sub>2</sub>S, d'eau, d'azote, d'oxygène et des Composés Organiques Volatiles (COV), ce qui exige un prétraitement sur charbon actif (réputé pour sa porosité particulière) afin de retirer les COV et l'oxygène, conformément aux procédés d'adsorption bien connus. En fonction de l'utilisation du biogaz, il peut être nécessaire de le purifier et de séparer les différents gaz. Pour séparer le méthane des autres composants, il existe ensuite plusieurs procédés d'épuration possibles du biogaz (Figure 1) : l'adsorption, l'absorption physique ou chimique, la séparation membranaire ou la cryogénie. Tous se déroulent en trois étapes afin d'éliminer successivement le CO<sub>2</sub> (décarbonation), H<sub>2</sub>S (désulfuration), et l'eau (déshydratation).



Différents procédés d'épuration du biogaz (source Biogasmax, 2010).

### Production de l'hydrogène à partir de biométhane

Le biométhane ainsi obtenu peut-être utilisé pour la production de bio-hydrogène. Ce procédé contient normalement les opérations suivantes :

-Reformage du méthane à la vapeur d'eau (Steam Methane Reforming) : conversion de CH<sub>4</sub> et H<sub>2</sub>O en CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>

-Epuration pour l'élimination du CH<sub>4</sub> résiduel, et pour le captage de CO, CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O pour atteindre une certaine pureté de l'hydrogène (par exemple, une pureté de 99,99% est nécessaire aux piles à combustible).

### Le marché de l'hydrogène

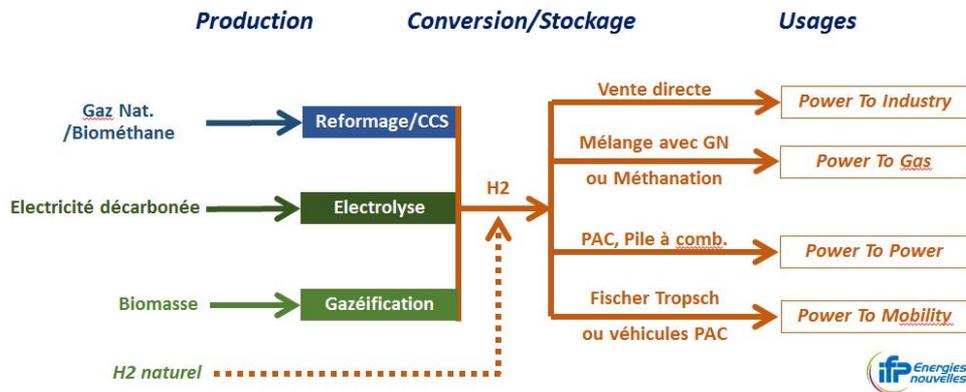
Aujourd'hui, les trois marchés les plus importants de l'hydrogène sont la désulfuration de carburants pétroliers (60%), la synthèse de l'ammoniac, principalement pour les engrais (25%), et la chimie (dont la production de méthanol) (10%). L'hydrogène peut également être utilisé, toutefois, pour produire de l'énergie thermique ou de l'électricité (à l'aide d'une pile à combustible), ou il peut être mélangé à une infrastructure de gaz naturel existante. Hydrogène peut en outre être couplé avec des piles à combustible pour générer de l'électricité. Une application émergente pour l'hydrogène et les piles à combustible aujourd'hui est dans les transports.

Le marché mondial de l'hydrogène industriel est estimé aujourd'hui à 60 Mt et le marché français est lui estimé à près de 1 Mt. L'hydrogène est produit à **94%** à partir d'**énergies fossiles** en France (gaz, charbon, hydrocarbures) et sa production industriel représente plus de 900 kt par an<sup>2</sup>.

2 Plan Hulot pour le déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique (2018).

## La chaîne hydrogène simplifiée

Une fois produit, cet hydrogène peut être stocké physiquement en attendant son utilisation sous forme de gaz ou de liquide. L'hydrogène peut être stocké à la surface des solides (par adsorption) ou dans les solides (par absorption).



### La chaîne hydrogène simplifiée : de la production aux usages.

#### OBJECTIFS, TRAVAIL ET ORGANISATION :

Le MIG sera piloté conjointement par le Centre Thermodynamique des Procédés de Mines Paris Tech et ENGIE (l'un des premiers producteurs d'énergies renouvelables en France). Le tableau ci-après présente le programme provisoire des trois semaines bloquées. Les élèves sont encouragés à poser leurs questions aux conférenciers, qui pourront les aider à acquérir les bases scientifiques, techniques, économiques, etc. Lors des synthèses de fin de semaine, chaque groupe devra présenter aux autres groupes l'avancée de ses travaux. 4 à 5 transparents seront demandés.

#### MINI-PROJETS

Les élèves devront se répartir en 3 groupes afin de travailler sur différents aspects concernant le biogaz et l'hydrogène en répondant à différentes questions.

Groupe 1 : Le marché du biogaz/bio-hydrogène : aspects économiques et environnementaux (Quelles ressources pour la production de biogaz ? Comment choisir le lieu d'implantation ? Acceptabilité et aspects territoriaux concernant l'usage de l'hydrogène dans la ville/sur le territoire, etc....).

Groupe 2 : Méthodes de production de l'hydrogène : Comment l'hydrogène est-il produit et quels sont ses effets sur le climat ? Comment produire un hydrogène compétitif, tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre ? L'hydrogène renouvelable est-il compétitif sur le plan des coûts ?

Groupe 3 : Captage, purification et valorisation du CO<sub>2</sub> : Quelles sont les verrous technico-économiques des techniques de captage ? Quelles pourraient être les nouvelles applications afin d'augmenter la part de CO<sub>2</sub> actuellement valorisé comme matière première

**NB :** Un 4<sup>ème</sup> mini-projet (pour tous les élèves) sera proposé au cas où les visites ne pourront pas avoir lieu dû à la covid-19. Il s'agit de la simulation numérique d'une cuve de stockage d'hydrogène liquide (évaluer la variation de la température à travers les parois de la cuve, optimiser le taux d'évaporation de l'hydrogène liquide, ainsi que la variation de la hauteur de l'hydrogène liquide).

#### LES VISITES

- Visite des installations d'essais du centre de recherche, (ENGIE Lab CRIGEN, Stains).
- Visite de Cryopur (Epuración cryogénique du biogaz ; Massy).
- Visite centrale biométhane (ENGIE Lyon) (à confirmer).

**PROGRAMME PREVISIONNEL**

| Jours           | Semaine 1 (du 16/11 au 20/11)  | Semaine 2 (du 23/11 au 27/11)   | Semaine 3 (du 30/11 au 04/12)   |
|-----------------|--|---|---|
| <b>Lundi</b>    | 9h30-17h30 / Mines Paris<br>M : Présentation du projet et Conférence introduction d'ENGIE<br>AM : Place des <b>gaz verts</b> dans la transition énergétique, enjeux et usages des gaz verts (F. Legrand) | 9h30-17h00 / Mines Paris (F. Legrand)<br>-Déroulement d'un programme de recherche : du brevet à la mise en place de la technologie dans un projet industriel<br>-Déroulement d'un projet industriel : du devis au démarrage de l'installation | 9h30-17h00 / Lyon<br>Visite centrale biométhane (à confirmer)   |
| <b>Mardi</b>    | 09h00-17h00 / CTP<br>M : <b>Recherche de documentaire</b><br>AM : Présentation et discussion autour du <b>développement durable</b> (C. Descamps-Large)  | 9h30-17h00 / Mines Paris<br><b>Captage et valorisation du CO<sub>2</sub></b> (F. Legrand)<br>Enjeux du captage et applications<br>Méthodologie et technologies de captages du CO <sub>2</sub><br>Les voies de valorisation du CO <sub>2</sub> | 9h00-18h00 / CTP<br>M : Visite du CTP<br>AM : Travail de groupe   |
| <b>Mercredi</b> | 9h30-17h00 / Mines Paris<br><b>Biogaz</b> (F. Legrand)<br>Production industrielle, purification et traitement de biogaz<br>Marché actuel<br>Projection du marché et des usages                           | 9h00-17h00<br>M : Travail de groupe (Mines Paris)<br>AM : Visite des installations d'essais du centre de recherche (ENGIE)  | 9h00-18h00 / CTP<br>Travail de groupe   |
| <b>Jeudi</b>    | 9h30-17h00 / Mines Paris<br><b>Hydrogène</b> (F. Legrand)<br>Modes de production,<br>Marché actuel<br>Projection du marché et des usages   | 9h00-17h00<br>M : Travail de groupe (Mines Paris)<br>AM : Visite Cryopur et présentation de la technologie (Massy)  | 9h00-18h00 / CTP<br>Travail de groupe   |
| <b>Vendredi</b> | 9h00-17h00 / CTP<br>M : <b>Généralités sur l'hydrogène</b> (E. El Ahmar)<br><b>Généralités sur le biogaz</b> (M. Campestrini)<br>AM : Bilan 1 <sup>ère</sup> semaine                                     | 9h00-17h00 / Mines Paris<br>M : Travail de groupe<br>AM : Bilan 2 <sup>ème</sup> semaine  | 9h00-15h00 / Mines Paris<br>M : Présentation des résultats<br>AM : Présentation des résultats / Mines Paris |

## DETAILS PRATIQUES POUR LES ELEVES / CONTACT(S)

Dr. Elise El Ahmar

Centre Thermodynamique des Procédés - CTP – Mines ParisTech

e-mail : [elise.el\\_ahmar@mines-paristech.fr](mailto:elise.el_ahmar@mines-paristech.fr)

Portable : + 33 6 88 08 58 81

Dr. Marco Campestrini

Centre Thermodynamique des Procédés - CTP – Mines ParisTech

e-mail : [marco.campestrini@mines-paristech.fr](mailto:marco.campestrini@mines-paristech.fr)

Portable : + 33 7 87 18 91 90

Mr. Frédéric Legrand

ENGIE Lab CRIGEN

e-mail : [frederic.legrand@engie.com](mailto:frederic.legrand@engie.com)

Portable : + 33 6 73 57 31 31