

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

BIOMETHANATION PAR INJECTION DE DIHYDROGENE
ÉTAT DE L'ART ET POTENTIEL D'EMERGENCE

BIOLOGICAL METHANATION WITH H₂
STATE OF THE ART AND MARKET OPPORTUNITIES

octobre 2020

F. MICHEL – VOLTIGITAL
K. HUBERT – ENERKA
P. PRE – IMT Atlantique



Créée à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD est depuis 1989, le catalyseur d'une coopération entre industriels, institutionnels et chercheurs.

Acteur reconnu de la recherche appliquée dans le domaine des déchets, des sols pollués et de l'utilisation efficace des ressources, RECORD a comme objectif principal le financement et la réalisation d'études et de recherches dans une perspective d'économie circulaire.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et institutionnels) définissent collégialement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Biométhanation par injection de dihydrogène. Etat de l'art et potentiel d'émergence, 2020, 268 p, n°19-0419/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de la transition écologique)
www.ademe.fr

© RECORD, 2020

RESUME

Dans la dernière étape de la digestion anaérobie, des microorganismes (les archées méthanogènes) transforment le dioxyde de carbone (CO₂) et le dihydrogène (H₂) en méthane (CH₄) et en eau : c'est la méthanation biologique.

Par sa complexité, la voie in-situ comporte encore de nombreux verrous technologiques et demeure en retrait. En revanche, en 2020, les procédés biologiques sont techniquement maîtrisés dans des réacteurs dédiés (voie ex-situ) et mis en œuvre selon plusieurs modalités (épuration de biogaz, power-to-gas-, méthanation de syngaz). Si les développements industriels sont encourageants, les modèles économiques demeurent incertains.

Dans la perspective d'étudier les conditions de mises en œuvre et le potentiel d'émergence, en particulier en synergie avec les autres filières gaz renouvelables (biométhane et hydrogène), l'étude présente les grandes tendances de la digestion anaérobie (Partie II.) suivi d'un état de l'art des filières de production, stockage, distribution de dihydrogène (Partie III.).

Le cœur du rapport (Partie IV.) est un état de l'art de la méthanation biologique par injection de H₂, sous l'angle des aspects biologiques, des paramètres opératoires et des types de réacteurs. Les acteurs industriels ainsi que leurs références sont présentés tout comme les principaux auteurs scientifiques. On présente également les principaux concepts de mises en œuvre (en voies in-situ avec un TRL faible 4 – 5 et ex-situ, avec des premières références commerciales), ainsi que les verrous et leviers de développement.

Deux études de faisabilité d'une part sur le couplage méthanisation + méthanation (150 Nm³/h de biométhane) et d'autre part en dans le cadre d'une unité power-to-gas (20MWe) sont réalisées (Partie V.) pour expliciter les aspects techniques et économiques. Cet exercice permet de mettre en évidence les difficultés à équilibrer les modèles économiques.

Enfin une étude du potentiel d'émergence (Partie VI) basée sur l'identification de cas d'usage précis permet de dégager 3 segments prioritaires de développement, des recommandations pour les acteurs de la filière et des pistes de recherche complémentaires.

MOTS CLES

Biométhanation, hydrogène, épuration, biométhane, biogaz, power-to-gas, Gaz Naturel de Synthèse (SNG), usage du CO₂, méthanation de syngaz, réacteur biologique

SUMMARY

In the last step of anaerobic digestion, microorganisms called archeas turn CO₂ and H₂ into CH₄. This biological methanation process is studied in this report both through the technical aspects and in the perspective of go-to-market.

- Part II. is a review of current practices and trends in anaerobic digestion (AD), AD plants being considered as potential CO₂ providers for biological methanation ;
- Part III. refers to a state of the art study of production and storage technologies for H₂ ;
- In Part IV., we focus on the key concepts of biological methanation : biological mechanisms, inhibitions, optimum parameters, reactor development, players, references as well as key barriers and current approaches to tackle these barriers;
- To put this into practice, two practical case studies are introduced in Part V.: first case refers to a dual unit AD + biological methanation for a typical biomethane project in France (150 Nm³/h). Second case is a large scale power-to-gas unit (20MWe).
- Finally the potential market segments for biological methanation and go-to-market opportunities are studied in Part VI,

While ex-situ methanation is almost mature as a technology (3 commercial units and a dozen of ongoing or planned pilot units), it is still difficult to find compelling use cases, as the economics are strongly disadvantaged.

In-situ methanation (TRL 4 – 5) is a complex technology, yet to be developed further.

KEY WORDS

biomethane, hydrogen, biological process, methanation, power-to-gas, synthetic natural gas, Carbon capture use and storage, reactor, syngas methanation, biogas upgrading.

Présentation de l'étude

Inspirée de la méthanisation, la méthanation biologique est une technologie au cœur des enjeux de gaz renouvelable, de la valorisation du CO₂ et de la gestion des réseaux énergétiques du futur.

> Une revue du contexte de la méthanisation permet de replacer les tendances actuelles (croissance forte du biométhane), les enjeux de réduction de coût et les synergies potentielles entre technologies, notamment dans le cadre d'une épuration du biogaz par méthanation biologique.

> Le H₂ étant l'autre ingrédient clé de la méthanation, on passe en revue les enjeux, les technologies de production et de stockage. Près de 25 filières sont passées en revue, mais 3 seulement (électrolyse alcaline, électrolyse PEM et gazéification de biomasse), sont pertinentes pour la méthanation à ce jour. Les filières H₂ issues de CH₄ sont écartées, même celle bas carbone, compte tenu de l'application visée

Au vu des besoins en H₂ (assez conséquents) pour des projets conventionnels, il apparaît plus pertinent de produire localement que de concevoir une approche livraison par un site dédié.

> Les principes biologiques de la méthanation sont rappelés, y compris les nombreuses et complexes interactions dans le cadre de la méthanation in-situ.

La voie ex-situ permet de supprimer les contraintes et de fonctionner au régime le plus adapté (thermophile, pression entre 4 et 12 bar), mais le verrou de la diffusion du H₂ en phase liquide demeure, bien que simplifié.

Au travers d'une étude bibliographique extensive, la comparaison des réacteurs met en évidence le positionnement du réacteur continu mélangé ainsi que ces faiblesses (consommation, fort volume de liquide), les alternatives (filtres percolateurs, colonne à bulle, membrane) et les performances constatées dans l'état de l'art (productivité en vol/vol/jour et teneur en CH₄).

L'étude présente également les acteurs, leurs références et les concepts de mise en œuvre.

> 2 cas d'études sont étudiés pour les aspects technologiques et économiques :

Epuration de biogaz par méthanation biologique (150 Nm³/h de biométhane entrée)
Power to gas 20MWe

> Au-delà des conditions économiques (plutôt défavorable) de la méthanation, on étudie les avantages clés et différenciant de la méthanation et les segments de marché sur lesquels on peut espérer voir un développement. Des recommandations sont également formulées.

Principaux résultats obtenus

La réduction par voie biologique de CO₂ en CH₄ par ajout de H₂ est thermodynamiquement favorable et est possible grâce aux rôles joués par des microorganismes méthanogènes de type Archées, strictement anaérobie

La méthanation biologique est une technologie émergente qui a prouvé sur des unités en laboratoire et pour certaines configurations sur des sites industriels, la possibilité d'atteindre des taux de méthane compatibles avec une injection sur les réseaux de gaz. Deux grandes approches coexistent :

Introduction

Derived from Anaerobic digestion, Biological methanation is a technology at the junction between renewable gases, Carbon capture and use as well as operation of smart electrical grids.

This study first reviews the anaerobic digestion landscape, current trends and cost reduction challenges, before targeting potential synergies between anaerobic digestion and biological methanation.

H₂ being the second key input, this study reviews more than 25 pathways to produce H₂, as well as distribution and storage options. Only 3 (alkaline electrolysis, PEM electrolysis, biomass gasification) are selected as relevant for biological methanation as of today. Considering the size of typical methanation plants, it is more appropriate to consider a local production.

Then, the core part of this studies focuses on the biological methanation technology, with first the biological principles, including numerous and complex interactions that occur in IN-Situ

Through an extensive review of bibliography, the comparison of reactors technology shows:

- *the preferred operating parameters ;*
- *the advantages of the Continuous Stirred Tank Reactor, as well as its main drawbacks (parasitic electrical load, high volume of liquid) ;*
- *the alternative solution (trickle bed reactor, bubble columns, membrane);*
- *the performances (productivity in vol/vol/jour, and %CH₄ content) that are accessible in the state of the art.*

The study also introduces the players, their references and the implementation concept for biological methanation.

Two case studies are proposed:

- *biogas upgrading through biological methanation (150 Nm³/h biomethane plant)*
- *20MWe Power to gas greenfield unit*

Beyond economical aspects (rather not in favor of methanation), we propose an analysis to spot the key differentiator of this technology with several benefits, and some segment where go-to-market may happened.

The study also provides recommendations to players and stake holders.

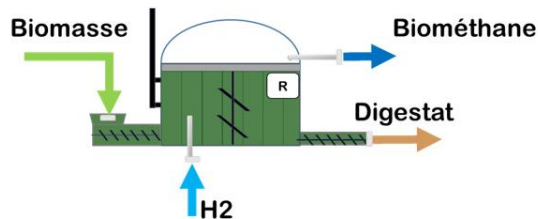
Main Results

Biological conversion of CO₂ into CH₄ with injection of H₂ is thermodynamically possible and realized by microorganisms (Archaeas), strictly operating in anaerobic conditions.

Biological methanation is an emerging technology that has been demonstrated in laboratory and in real industrial environment. It is technically possible to reach CH₄ content level allowing injection on gas grids. Two main approaches can be considered:

Méthanation biologique (voie IN-SITU): de nombreux verrous techniques

En méthanation biologique **IN-SITU** par ajout de H₂, le substrat fournit matière carbonée et microorganismes. On cherche à modifier les mécanismes de la digestion anaérobie pour favoriser la production d'un gaz très riche en CH₄, et idéalement pauvre en H₂ et épuré en CO₂



Points clés

- Faible diffusion H₂g->L
- Importance du diffuseur
- %CH₄ faible (et H₂ non converti)
- Robustesse / Contrôle du procédé
- Gestion du H₂ dans de grands réacteurs
 - Accepter un gaz avec 20% de H₂ en injection?

Extraits : technologies de méthanation IN-SITU (RECORD 2020, LUTRA/Univ. Southampton 2019)

Cette approche demeure à ce jour cantonnée au laboratoire et à quelques expérimentations de démonstration, car de nombreux verrous scientifiques identifiés freinent son développement. Ces principaux verrous sont :

- **Le faible taux de transfert du H₂** de la phase gazeuse à la phase liquide où se trouvent les microorganismes. De fait, il est difficile dans un réacteur existant (de méthanisation), non optimisé d'obtenir un gaz où le H₂ et le CO₂ ont été transformé en CH₄.
- **Les interactions biologiques** : d'une part H₂ est un inhibiteur de certaines étapes de la méthanisation, d'autres part, l'injection de H₂ mal contrôlée pouvant mener en théorie à un arrêt de la digestion notamment par perte de contrôle du pH ou de la quantité d'acides gras volatils (AGV). On notera que le faible taux de transfert du H₂ contribue à amplifier ce problème biologique.

De par sa complexité, beaucoup d'acteurs (y compris scientifique) ont choisi de ne pas / ne plus travailler sur cette voie **IN-SITU**, au profit de la voie **EX-SITU**.

Elle demeure une voie de recherche intéressante car :

- A long terme, elle permet des perspectives de coût faible pour le biométhane ;
- Elle est une piste intéressante vers d'autres recherches (électrolyse in-situ, électro-méthanogénèse) contribuant à un biométhane compétitif.

Voie EX-SITU : de la maturité technique vers la recherche d'un marché

En méthanation biologique **EX-SITU**, on réalise la transformation de matière organique gazeuse (CO₂ pur, biogaz, syngaz) dans un réacteur dédié ce qui permet de s'affranchir des principales contraintes de la voie *in-situ*.

In-Situ biological methanation : still numerous technological problems to be solved

Within the **IN-SITU** path, both the carbon and the microorganisms' ecosystem is provided by the substrate. In order to produce a biogas with a high CH₄ content (and ideally without H₂ nor CO₂), the mechanism of anaerobic digestion are modified.



IB Catalyst H₂AD (UK, 2019)

Pilote LUTRA/ Univ Southampton
1500 L, Substrats = Foodwaste
Diffuseur =bulleur
Fonctionnement ok, mais %CH₄ faible (70-80%)
Agitation trop forte = impact négatif

While very interesting on a scientific level, this approach is however currently limited to a few research groups, despite being the main focus of biological méthanation in the 2010s. There are still numerous technical limitations that have not been solved, which are mainly:

- **Low H₂ transfer rate** from gas to liquid (the microorganisms are in the liquid phase). Therefore it is difficult in an existing reactor (designed for anaerobic digestion) to get a gas where the H₂ and the CO₂ have been fully converted into CH₄.
- **Biological interactions**: in anaerobic digestion, even if in low concentration H₂ has an inhibition effect on previous steps of the digestion (particularly on the transformation of volatile fatty acid). Therefore uncontrolled injection of H₂ may lead to a failure of the digester, due to pH modification of peak of Volatile Fatty Acid. The low H₂ diffusion rate increases this problem.

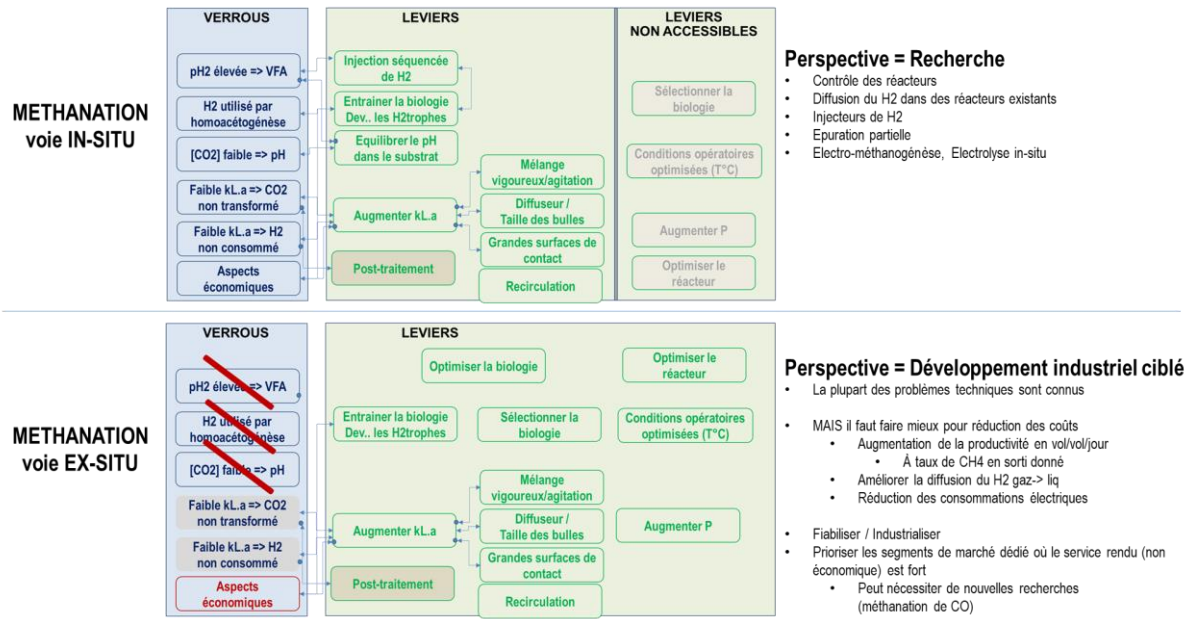
As of 2020, most industrials and academics have stopped developments in the In-SITU fields to focus on EX-SITU.

IN-SITU Methanation remains an interesting path of research as:

- On the long term, it may offer interesting perspective to reduce the cost of renewable natural gas (RNG).
- it is interesting path forward to others research areas (such as in-situ electrolysis, electro-methanogenesis), that would lead to a competitive renewable natural gas.

EX-SITU methanation : Technology sounds good but still looking for a compelling business case

In EX-SITU biological methanation, the gaseous organic compounds (pure CO₂, biogas, syngas) are converted in a dedicated reactor. This allows to lift most constraints that were encountered in IN-SITU methanation.



Leviers et verrous de la méthanation biologique voie in-situ et ex-situ (RECORD 2020)

En 2020, le verrou principal est d'ordre réglementaire et technico-économique :

- D'une part, le gaz de synthèse ne dispose pas (encore) en 2020 d'un statut particulier.
- D'autre part, il est très difficile d'envisager un modèle économique rentable dans le cas général

L'enjeu pour la filière est désormais de trouver son marché et de continuer à se développer pour améliorer sa compétitivité et réduire ses coûts (notamment par effet d'échelle).

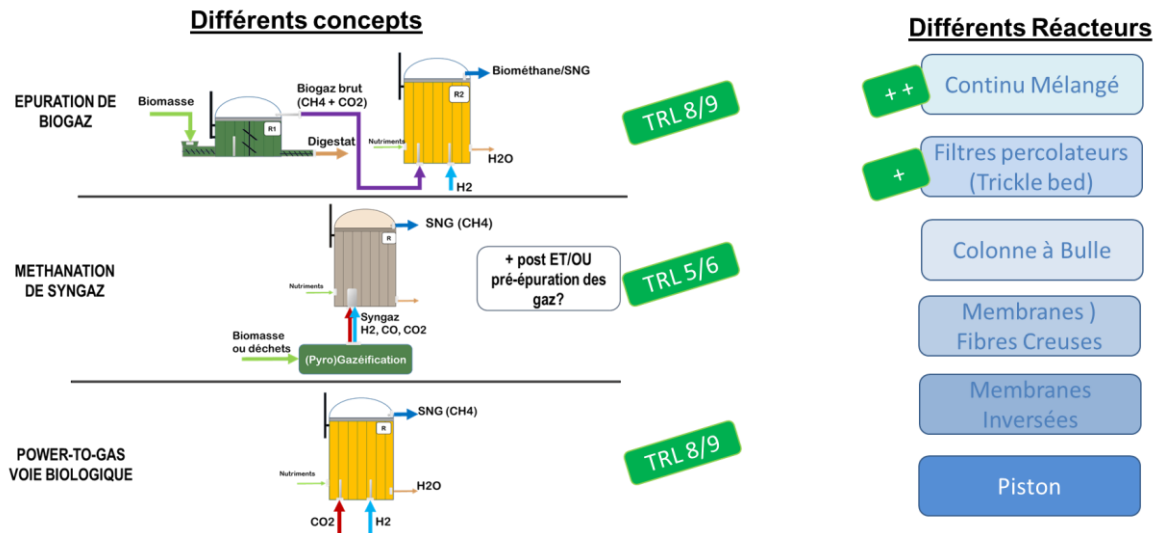
Plusieurs concepts ont été développés :

In 2020, main barriers to market are regulation and business cases:

- Synthetic Natural Gas statute may not have a clear legal status (and associated benefits and support schemes) ;
- There is no profitable business case as of today. Finding an economic-sounded case in a near future is also difficult.

Main topic for the industry is to find its market segments and to keep on developing the technical know-how in order to improve its costs (possibly by industrialization and scale effect) and its competitiveness

Several concepts have been developed, mostly methanation of biogas, pure CO2 and Syngas.



Concepts et applications de la méthanation ex-situ (RECORD 2020)

Technologies et paramètres opératoires (voie EX-SITU)

La méthanation biologique se déroule préférentiellement en régime thermophile (autour de 65°C), à une pression entre 4 et 12 bars.

Du point de vue biologique, on notera l'opposition entre les cultures uniques sélectionnées (réputées plus performantes mais plus sensibles) et les cultures élevées mélangées (réputées plus robustes),

L'agitation joue un rôle important pour favoriser la diffusion de H₂ en phase liquide, mais avoir un effet négatif sur la biomasse et sur le bilan énergétique complet. Pour un réacteur donné, le coefficient kL.a est une valeur de la diffusion du H₂

La productivité en méthanation de gaz en CO₂ pur est supérieure que pour des applications sur biogaz. Les valeurs de productivité les plus élevées sont reportées pour des configurations de réacteurs mélangés (ex-situ et méthanation de CO₂ pur). Elles tendent à diminuer avec la richesse en méthane, atteignant néanmoins jusqu'à 140 L/L/j pour une pureté de 85% (Seifert et al. (2014)). A ce niveau de pureté, les filtres percolateurs semblent aujourd'hui démontrer des performances moindres.

Technology and operating conditions (EX-SITU)

Biological methanation occurs preferably in thermophile conditions (around 65°C), at a pressure between 4 and 12 bars.

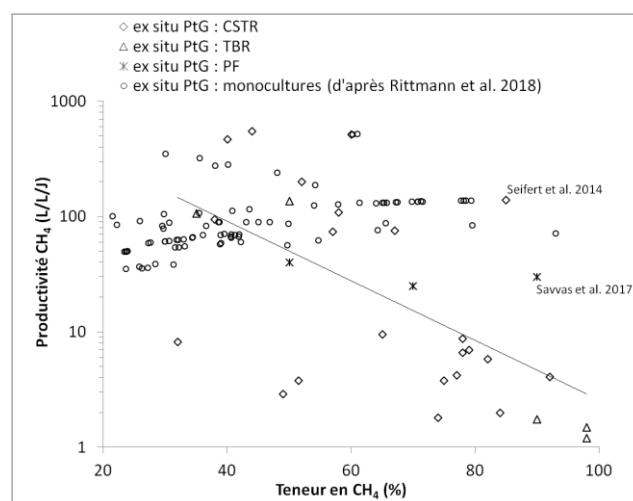
From a biological perspective, two philosophies can be found:

- some players would emphasize selected cultures (considered as most productive, but possibly less resilient to pollutant and new operating conditions) ;
- Others would consider mixed culture, trained from an existing inoculum, as a more accessible biological catalysis.

For a given reactor, among the most important operating parameters, the kl.a factor gives measures of diffusion of H₂ into liquid phase.

In methanation reactors (and particularly CSTR type), mixing plays a key role in improving H₂ diffusion into the liquid phase and therefore the productivity. However beyond a certain level, mixing has a negative impact on the biomass formed and on the overall energy balance.

According to our review of the literature, productivity in (volume/volume reactor/time) is higher for pure CO₂ methanation, rather than on biogas. High values were reported for CSTR units (ex-situ and pure CO₂ methanation). They tend to decrease with the %CH₄, reaching up to 140 L/L/day for a 85% purity (Seifert et al, 2014). At this level, trickle bed reactor shows lower performances today.



Productivity as a factor of CH₄ content in public scientific literature (RECORD 2020)

Des valeurs de productivité nettement supérieures (800 vol/vol/jour) sont mentionnées par des acteurs industriels mais il n'existe pas de données publiques disponibles pour analyser ces revendications.

Les projets en phase commerciale visent une pureté en CH₄, compatible avec les spécifications des réseaux de gaz, le cas échéant avec une étape de post-épuración.

Pour pouvoir être comparée, une valeur de productivité doit toujours être mentionnée pour une teneur en CH₄, une pression de fonctionnement et une consommation électrique pour l'agitation.

Industrial players have mentioned much higher productivity values (up to 800 vol/vol/day), but there is no available public evidence to assess this claim.

As for %CH₄ content, post-upgrading might be necessary to reach a full compliance to gas grid specification, all time. Industrial players claim it is possible to reach >96% CH₄ values for injection.

In order to be compared, a productivity value should be always given for a %of CH₄, an operating pressure and a parasitic electrical consumption (for mixing).

Acteurs et références

La méthanation biologique ex-situ a donné des développements industriels pertinents, de plusieurs acteurs.



Players and references

Ex-situ Biological methanation has led to interesting references, from several players.



Examples of industrial demo-plants

left: *Electrochaea, Store&Go, 2019* ; right: *MicrobEnergy(Viessmann), 2015*

En 2020, 10 acteurs industriels ont été recensés et plus de 30 projets passés, en cours ou planifiés, à des stades de maturité technologiques divers.

In 2020, 10 industrial companies have been identified, with more than 30 projects done, ongoing or planned. The Technology Readiness Level ranges from >3 to 8/9.

Trois projets commerciaux ont été identifiés, dont le projet de Viessmann pour LIMECO (Suisse) à Dietikon, prévue pour mise en service en 2020 [méthanation de biogaz de station de traitement d'eau (30%CO₂) avec 2.5MWe d'électrolyse pour 2.5MW d'injection de gaz d'injection de CH₄]

3 commercial projects have been identified, including a 2.5MW HHV (injection capacity) / 2.5MWe electrolysis unit, built by Viessmann for LIMECO in Dietikon (Switzerland), with a start-up planned in 2020. The application is Methanation of a biogas coming from a Waste Water Treatment plant.

NOM	TYPE	Pays	Année	IL&STU ?		Type de Réacteur	T°C	Pression (bar)	Clients	Epurator de biogaz	Méthanation de syngaz	Power-to-gas
				Mono-cultures sélectionnées	Cultures mixtes							
				CHOIX DE CONCEPTION				MARCHES				
INRAE	Académique	FR										
TBI	Académique	FR										
Aarhus	Académique	DK				CSTR						
DTU	Académique	DK				CSTR,percolateur						
Southampton	Académique	UK				CSTR						
Southwales	Académique	UK				CSTR, piston						
Arkolia Energies	Industriel	FR	2018			CSTR		8..12bar				
Electrochaea	Industriel	DE	2006			CSTR+contact/percol	63°C	8..10bar	NREL			
Enosis	Industriel	FR	2014				thermophile	>4 bar				
GICON	Industriel	DE										
Krajete	Industriel	AUT	2010			CSTR	thermophile	15 bar				
MicrobEnergy	Industriel	DE	2011			CSTR	55..70°C	5..10bar	LIMECO			
Micropyros	Industriel	DE	2012			Colonne à bulle	60..65°C	4..8 bar				
PFI-Germany	Industriel	DE	2012			Percolateur						
Terrawatt	Industriel	FR	2014			Percolateur						
TMA Process	Industriel	FR	2019			Percolateur						

Cartographie des acteurs industriels et académiques en méthanation biologique (RECORD 2020)

Hydrogène et applications pour la méthanation

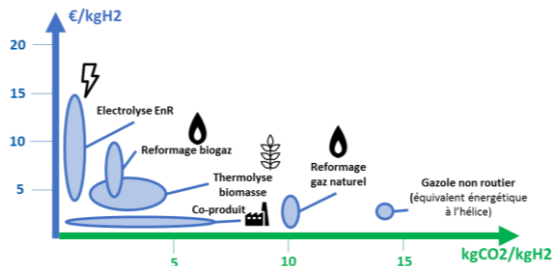
La transition en cours vise à passer d'un hydrogène massif centralisé carboné (50Mt/an dans le monde) à un hydrogène massif et/ou local, multi-filière et décarboné, tout en augmentant les quantités et les usages (x10 d'ici 2050) et en réduisant les coûts (au niveau des utilisateurs, incluant donc production et livraison).

Hydrogen and relevant production pathways for methanation

There is an ongoing transition from a centralized hydrogen from fossil fuels (50 MT/year globally) to a local then massive, low carbon H₂ energetic system, using a technology mix for production. This transition is also considering a large increase in quantity and use-cases (x10 until 2050), and a large reduction of costs (from users point of view, including production and delivery).

Un coût de 2 à 5€/kgH₂ sur site constitue une première base de prix pour des projets 'compétitifs' en 2020, l'effet d'échelle, la localisation et le contenu carbone pouvant fortement impacter ce paramètre.

Parmi plus de 25 modalités de production de H₂, seulement 3 nous apparaissent pertinentes pour la méthanation : Electrolyse PEM et Alcaline et Gazéification de biomasse, les filières associées au CH₄ (H₂ bleu par SMR, fermentation sombre) ayant été exclues du comparatif.



Les filières H₂ et leur potentiel pour la méthanation (Enerka 2020, RECORD 2020)

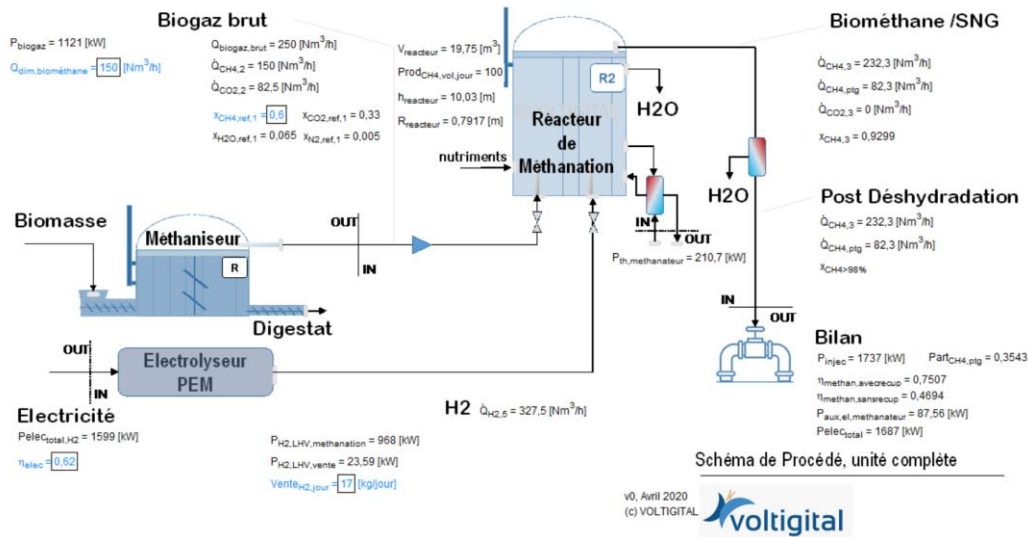
	Filières	Maturité Techno	Marché	Prix du mt. actuel	Potential de croissance	Compétitivité prix (à terme)	Compétitivité CO ₂
1 - Pertinentes	Electrolyse Alcaline Electrolyse PEM Pyrogaéification	High	High	High	High	High	High
2 - Pertinentes hors méthanation	Fermentation sombre SMR Décomposition de méthane (mar de carbone)	High	High	High	High	High	High
3 - Pertinente, mais potentiel limité	Coproduction industrielle	High	High	High	High	High	High
4 - Pas une solution d'avenir	Gazéification du charbon	High	High	High	High	High	High
5 - Game changer ?	Photolyse de l'eau H ₂ naturel	High	High	High	High	High	High
6 - Potentiel lointain, à valider	Electrolyse base Zn Electrolyse SOE Electrolyse AEM Electrolyse microbienne Thermolyse Reformage de bioéthanol Reformage du biogaz Cracking paréol (PCO) Décomposition du méthanol	High	High	High	High	High	High
7 - Maturité faible	Séparation thermochimique de l'eau Combustion in-situ Photodécomposition Électrolyse de l'eau Supercondensation	High	High	High	High	High	High

Etude de cas – Epuration biologique

Un méthaniseur « moyen » de 150Nm³/h biométhane et 80 Nm³/h de CO₂, consommerait 700 kg/jour pour réaliser une épuration par méthanation biologique, soit un électrolyseur d'environ 1.6MWe sur site et une production locale.

Case Study – upgrading through biological methanation

To implement a méthanation reactor, an AD unit producing 150 Nm³/h of biomethane and 80 Nm³/h of CO₂ would need require 700 kg/day of H₂ that would be best suited with a local production. This means an electrolyzer of approx. 1.6MWe



Synoptique Etude de cas épuration de biogaz par voie méthanation biologique (RECORD 2020)

Dans des conditions économiques dites actuelles (CAPEX 4M€, électricité à 55€/MWh, valorisation du à CO₂ 45€/t et tarif biométhane à 114 €/MWh P_{CI}), il n'existe pas de rentabilité à ce type de projet. Un tarif à 138€/MWh serait nécessaire et semble peu probable.

In current economic conditions (CAPEX 4M€, electricity at 55€/MWh, CO₂ value at 45€/tCO₂, biomethane at 114€/MWh LHV), there is no profitability to such projects. Tariff would need to be increase to ~138€/MWh, which seems unlikely as a long term hypothesis.

Une analyse de plusieurs hypothèses économiques (prix CO₂, CAPEX, prix électricité) montre que cette technologie ex-situ en

An analysis of several scenarios (for CO₂, CAPEX, electricity values) shows that such technology (biological méthanation ex-situ) competing with generic upgrading solutions would be

compétition avec les épurateurs classiques pourra difficilement concourir à la baisse du biométhane, même industrialisée.

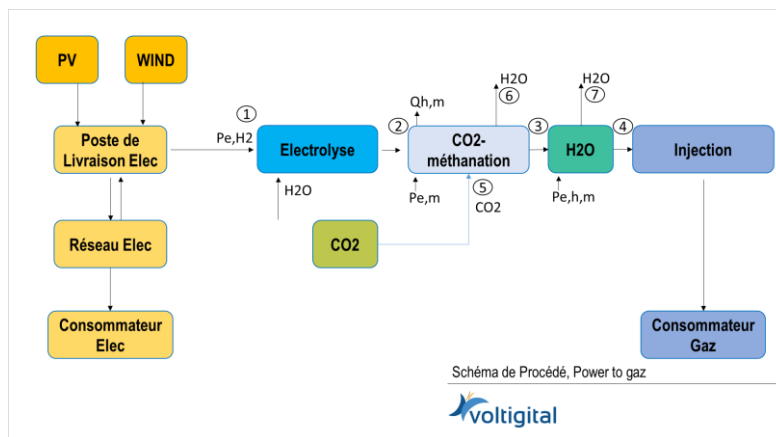
unlikely to reduce the cost of biomethane, even after industrialization.

Etude de cas – Power to gas

Case Study – Power to gas

Une unité de 20MWe neuve autonome est étudiée avec un CAPEX de 2000 €/kW (valeurs 2020, filière émergente) à 1043€/kWe (futur, hypothèse filière mature, dont 350 €/kWe pour les électrolyseurs alcalins).

A 20MW electricity / 11.6MW HHV Greenfield unit is studied with a CAPEX ranging from 2000 €/kWe (emerging technology, 2020 values) to 1040€/kWe (mature technology and markets, assuming 350€/kWe for electrolysis)



**Synoptique projet power-to-gas par voie biologique (RECORD 2020)
20MWe power to gas unit project principles**

Avec un rendement d'électrolyse de 77%_{PCS}, la puissance disponible pour l'injection est de l'ordre de 8,5MW_{PCS} à 70bar (pour environ 1100 Nm³/h de SNG et une consommation de 2 tCO₂/h).

With an electrical efficiency of 77%_{on HHV}, 1100 Nm³/h of SNG could be produced at 70 bar, for a consumption of CO₂ of approx. 2tCO₂/h.

The analysis of several hypothesis for OPEX and CAPEX shows that profitability is difficult to reach with current (and possibly future) values.

L'analyse de différentes hypothèses économiques montrent que la pertinence économique seule est difficilement atteinte aux conditions CO₂, prix électricité, CAPEX actuels voire futur. L'intégration thermique (6MWth basse température disponible) permet d'améliorer légèrement la viabilité économique des projets.

A better valorization of the thermal waste heat (6 MW th, low temperature) allows for a slight improvement on the profitability.

			1	2	3	4	5	6
CAPEX		k€	32 000	32 000	35 500	32 000	20 856	20 856
REVENUS								
SNG	Tarif	€/MWh	25	100	100	60	60	65
Chaleur	Tarif	€/MWh	0	0	40	0	0	0
CO2	Tarif	€/tCO2	100	100	100	450	350	0
COUITS								
Electricité	Tarif	€/MWh	40	20	20	40	40	25
O&M %CAPEX			4%	2%	2%	2%	3%	5%
Payback		ans	-7,49	7,09	6,42	7,17	7,48	-33,18
REVENUS - COUITS	valeur	k€	-4270,6	4516,4	5530,4	4460,4	2790	-628,6

tableau version 0-2

		1	2	3	4	5	6	7	8
CAPEX	k€	41 492	32 000	32 000	32 000	35 500	32 000	20 856	20 856
REVENUS									
SNG	€/MWh	25	122	80	60	60	60	65	46
Chaleur	€/MWh	0	0	0	0	40	0	0	0
CO2	€/tCO2	50	50	250	50	250	250	250	0
COUTS									
Electricité	€/MWh	40	40	40	5	40	40	40	0
O&M %CAPEX		3%	4%	4%	4%	4%	4%	6%	6%
Payback	ans	-9,18	7,05	8,08	7,36	10,58	15,31	8,16	6,94
REVENUS - COUTS	k€	-4519,8	4540	3958	4349,2	3354,8	2090	2557	3006,4

tableau

Scenario review for 20MW power to gas unit (RECORD 2020)

En scénario 5, un CAPEX amélioré de ~21M€, un tarif de soutien du SNG à 60€/MWh PCS et un prix d'électricité de 40 €/MWh rend le projet possible si un soutien à la valorisation du CO₂ (350€/tCO₂) est perçu.

L'amélioration des rendements des électrolyseurs est un point important à suivre dans le futur (avec les électrolyseurs SOEC notamment).

Potentiel d'émergence

Services rendus et Filières concurrentes

Usage de CO₂, production de gaz renouvelable, gestion de l'électricité intermittente... si elle est difficilement rentable dans des projets de production de SNG autonomes, la méthanation biologique peut rendre de nombreux services pertinents. Elle souffre toutefois d'avoir de nombreuses voies concurrentes.

A market development is possible within some economic conditions, such as in Case 7, considering:

- a reduced CAPEX of ~21M€ (considering further cost reduction, scale effects, industrialization, technical improvement)
- a feed-in tariff for the SNG at 60€/MWh HHV
- a 40 €/MWh electricity cost (average 8000h/year)
- a support for the value of CO₂ of 350€/tCO₂

Improvement in electrolyzer efficiency is a key point to be followed in the future, possibly with the up-rising of SOEC electrolyzers.

Potential for market development

Value proposition and competitors

From several perspectives such Carbon Capture Use & Storage, Renewable Gas production, electrical grid flexibility..., biological methanation brings an overall good service in many fields, but has competitors in most market segments.

	Gaz naturel	Injection de Biométhane	Injection de hydrogène	Méthanation catalytique	Méthanation	Monoxyde de carbone	Electrification	Stockage d'électricité	Réseaux électriques	Epuration de gaz
Valoriser du CO ₂ excédentaire					①					
Epurer un flux de gaz en CO ₂										②
Intégrer des ENR aux réseaux (vue producteur)			③						④	
Mieux acheminer l'énergie renouvelable (vue réseau)			⑤						④	
Valoriser de l'élec. Intermittente (vue réseau)								⑥		
Epurer un flux en H ₂										
Décarboner les usages des réseaux de gaz (vue réseau)		⑧	⑦							
Produire du CH ₄ à bas contenu CO ₂ (vue utilisateur)										

⑨

Matrice Usage – technos et compétitions (RECORD 2020)

Segments d'application, potentiel et enjeux

Market segments, potential and challenges

Une segmentation des usages de la méthanation biologique conduit à lister 6 cas d'applications, classés par potentiel et enjeux ('challenge') associés :

A segmentation of possible use cases for biological methanation leads to 6 applications, sorted by potential and related challenges.

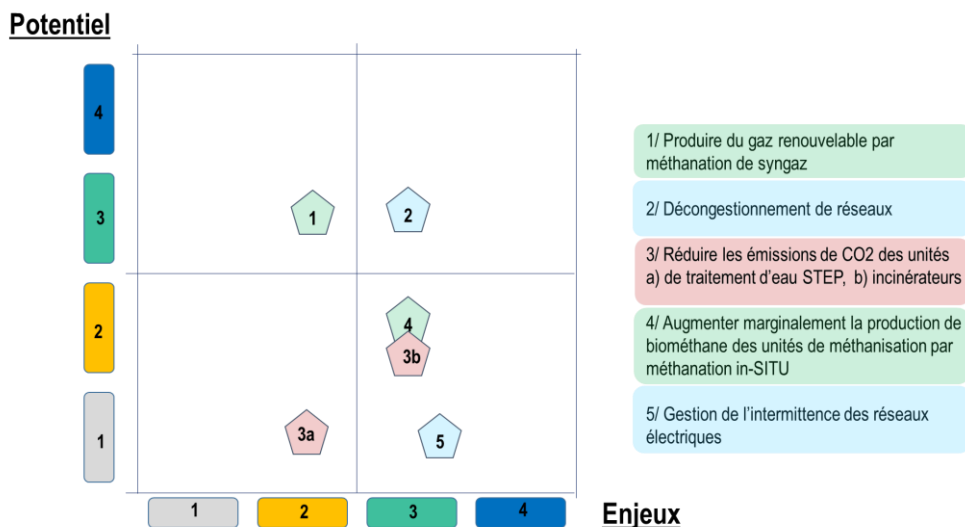


Diagramme Potentiel – Enjeux pour les segments de marchés de la méthanation par voie biologique (RECORD 2020)

> Au premier plan, la méthanation de syngaz paraît un segment d'application très pertinent, pour lequel le différentiel de coût et de qualité défavorable entre hydrogène/méthane n'est pas un problème. Potentiel de 40 à 120 TWh/an en France (étude ADEME gaz renouvelable 2050).

> Syngas methanation appears a relevant market segment, for which the H2 to CH4 price difference is not an issue. Potential is estimated from 40 to 120 TWh/year in France (étude ADEME gaz renouvelable 2050).

> Le power to gas pour incorporer de l'énergie renouvelable et acheminer celle-ci correspond à un autre segment pertinent, mais avec des critères assez restrictifs : [pas d'usage de l'électricité en local actuel ou futur] + [tirer de nouvelle ligne électrique est quasi-impossible] + [taux d'incorporation max. de H2 dans le réseau gazier atteint, sans toutefois permettre un réseau H2 dédié]. Ce scénario est potentiellement très présent en Allemagne (Nord/Sud) ou au Danemark et dans toutes les zones où il existe aujourd'hui des abattements ('curtailment'). Ce marché est soumis à des enjeux complexes mais potentiellement significatif en volume à long terme.

> In the perspective to reach targets for carbon intensity reduction, Power to gas is an interesting option as a way to bring large quantity of renewable energy to consuming centers. But criteria are quite restrictive: [no local use of electricity current or future] + [new electrical grid improvements are not feasible] + [H2 max level are reached, without in the same time allowing a dedicated H2 network]. While there are many exclusion criteria, this scenario may be encountered in some areas where curtailments are experienced. These areas may include Germany North/South or Denmark net renewable energy exporter. This market segment is very complex with high challenges, but potentially significant in terms of volume in the long term. Biological methanation could play a role here as well.

> Certains secteurs, notamment publics tels que les incinérateurs et les unités de traitements d'eau usées, pourraient être intéressés par des solutions de valorisation de CO2 fatal, dans une démarche de traitement de déchet. La méthanation biologique apporte une réponse fonctionnelle à ce problème.

> Some customers that are not in competitive position, such as public companies operating waste to energy plants or waste water treatment plant maybe interested to promote methanation as a way to treat CO2, and therefore reaching carbon neutrality well before 2050. Biological methanation can provide an answer to this problem.

> Enfin, la méthanation IN-SITU, si elle était développée du point de vue industriel, pourrait permettre d'augmenter marginalement (fourchette type 5 à 15%) la production de biométhane des méthaniseurs existants (une étape d'épuration resterait nécessaire) sans utilisation de ressource supplémentaire. Des développements scientifiques sont encore nécessaires dans cette voie.

> Finally, IN-SITU methanation, if it were developed enough on an industrial scale could allow to enhance slightly (possibly 5 to 15%) the output of AD plant in biomethane, without additional substrate. A biogas-upgrading step would be still necessary and the gas output could be a mix of CH4 and H2. There is a potential to lower the cost of biomethane in the long term. Additional research programs are necessary in this area.

> La gestion de l'intermittence des réseaux par la méthanation nous paraît à ce stade un secteur d'application trop lointain (beaucoup d'autres outils existent à disposition des opérateurs de réseaux électriques).

Recommandations

Pour les porteurs de projets et innovateurs

- Anticiper que l'émergence du marché puisse être longue et évaluer les potentielles retombées de leurs travaux dans des domaines connexes (hors méthanation biologique) ;
- Bien étudier les segments de marché dans lesquelles ils souhaitent se développer ;
- Arriver rapidement à une solution fonctionnelle, résolvant un besoin particulier d'un utilisateur mieux que les autres.

Pour les scientifiques

- Maintenir des travaux de recherche sur la diffusion dans la phase liquide de l'hydrogène;
- Poursuivre les travaux en méthanation IN-SITU :
 - en se focalisant sur les dispositifs d'incorporation du H2 (diffuseur) et l'atteinte d'une solution économiquement pertinente ;
 - dans le cadre de projet d'épuration partielle (CO2 et H2 résiduel dans le réacteur) ;
 - éventuellement dans un cadre scientifique plus large (électrolyse In-situ, électro-méthanogénèse) ;
- Poursuivre les travaux de méthanation de syngaz (à fort taux de CO).

Autres recommandations

Pouvoirs publics :

- Donner de la visibilité long-terme dans les filières (statut réglementaire du SNG, soutien aux projets revalorisant du CO2) ;
- Ne pas susciter des filières qui ne pourront pas être accompagnées suffisamment par la suite : concentrer les soutiens et être exigeant sur les applications attendues ;
- Analyser où se situent les retombées de ces applications (hors méthanation de syngaz, essentiellement à l'export (Allemagne)).

Industriels :

- Prévoir de faire évoluer ses procédés émetteurs de CO2 ou d'avoir un jour à revaloriser le CO2 (avec un coût de traitement associé). La méthanation biologique peut être une solution simple à mettre en œuvre dans ce cas.

Gestionnaires de réseaux :

- Faciliter l'échange d'informations entre gestionnaires de réseaux électriques, gaziers et entre porteurs de projets permettra de faire apparaître les besoins non satisfaits en matière de décongestionnement et les opportunités de projets.

Recommendations

Towards start-up and entrepreneurs

- *Take into account that the go-to-market may be long and assess the potential low-hanging fruits from their work / developments in side markets (out of biological methanation);*
- *Carefully select the markets where to work;*
- *Quickly propose a simple but functional solution, resolving well and better than others alternatives a dedicated problem of a User.*

Towards researcher

Pursue work in the field of H2 diffusion from gaseous to liquid phase;

- *Further develop the area of IN-SITU methanation:*
 - *by focusing on the H2 injector, in order to reach a solution relevant in terms of cost and performances;*
 - *In the framework of a partial biogas upgrading process (CO2 and H2 still in the reactor, but with a lower %);*
 - *possibly, within a wider research program, that could also study new field of development such as In-Situ electrolysis and/or electro-methanogenesis;*
- *Develop the studies on syngas methanation (with high CO content).*

Other recommendations

Administration / Public sector:

- *Should provide a long term visibility to this industry (legal status of SNG, support to projects valorizing the CO2);*
- *Should not create hope in pathways that will not be supported (not enough) afterwards: it would be better to focus on the support and be critical of the proposed use-cases;*
- *May consider the side-benefits of the technology and propose financial schemes so that a retribution is given for these benefits;*
- *Study in details where the benefits will be reaped: it is possible that out of syngas methanation, the benefits will occur in countries with better market conditions, such as Germany.*

Pas "Industry"

Grid operators (gas/ electricity):

- *Give more access to information between gas / electricity grid operators and industrial players in order to identify the area where curtailment will occur and therefore, the best opportunities for methanation to solve these curtailment issues.*