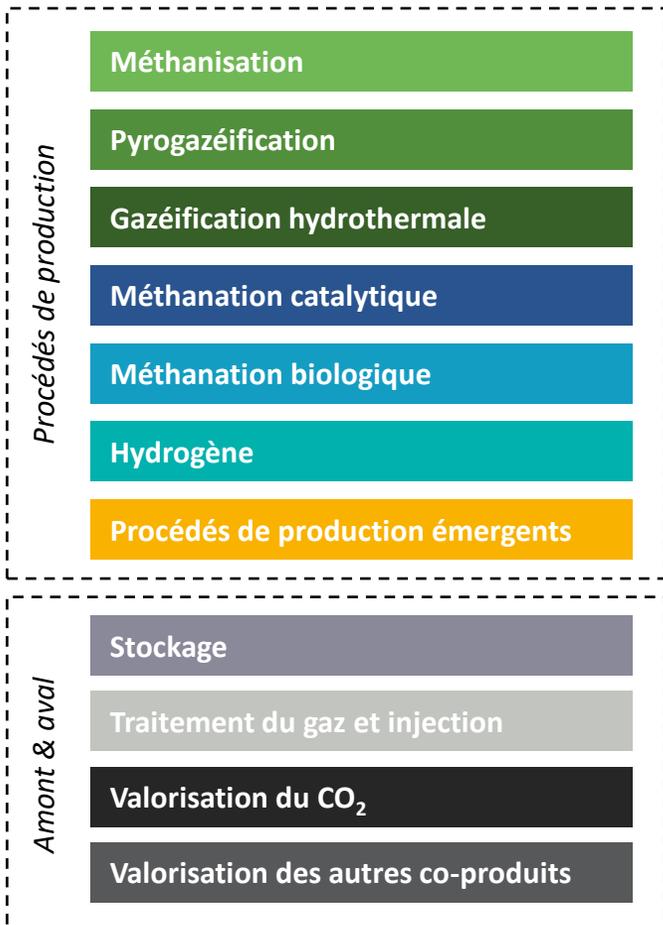


# Veille technologique sur les filières gaz verts - #1



# Clés de lecture

## Thématiques étudiées



## Typologies des sujets abordés



Recherche

Publications portant sur des **nouvelles observations scientifiques** susceptibles d'aboutir au développement d'innovations technologiques sur la production de gaz verts.



Innovation

Publications scientifiques / brevets portant sur le **développement des nouvelles technologies**



Projet marquant

Focus sur des **projets susceptibles de marquer une étape clef** dans le développement des filières gaz verts.



Analyse technico-économique

Publications d'**analyse économique de technologies** et d'**analyse de développement de marché d'une filière gaz verts**.



Politiques de soutien

Décryptage de **mesures politiques susceptibles de lever des obstacles** pour le développement de certaines technologies.



Entretien

**Entretiens avec des acteurs majeurs de l'innovation** sur les filières gaz verts.

# Table des matières

## Pyrogazéification

 BIOS Bioenergiesysteme GmbH a déposé un **brevet** sur un procédé de **production d'un gaz à faible teneur en goudron et en poussières, à partir de biomasse solide**, de résidus biogènes et/ou de fractions de déchets organiques.

 [Focus page 5](#)

## Méthanation catalytique

 Une équipe de chercheurs de l'**Empa** (en Suisse) développe un **nouveau réacteur optimisé de méthanation** qui doit permettre de **limiter la présence de H<sub>2</sub>O parmi les produits** et faciliter l'injection du CH<sub>4</sub> en **limitant les étapes d'épuration** nécessaires. La technologie s'appuie sur un procédé de sorption.

 [Focus page 7](#)

## Méthanation biologique

  
 Une équipe de chercheurs danois et brésilien a mené une étude sur **l'impact des métaux** (Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Se, Mo...) **sur le processus de méthanation biologique** et la **production de CH<sub>4</sub> en sortie**. En particulier, un modèle mathématique a permis de simuler l'effet du Fer sur le processus.

 [Focus page 9](#)

## Hydrogène

 Le HZB Institute for Solar Fuels a démontré que **la co-production de composés chimiques** (p. ex. du MSA) **et de H<sub>2</sub>** permettait de **réduire considérablement l'empreinte énergétique** de la production de H<sub>2</sub> vert par électrolyse PEC.

 [Focus page 11](#)

## Hydrogène

 Fairbrics a déposé un brevet sur une **cellule d'électrolyse sans membrane** pour la production de H<sub>2</sub> ayant un **fonctionnement facile à mettre en œuvre et ne nécessitant pas un entretien contraignant**.

 [Focus page 13](#)

## Hydrogène

 Une équipe de chercheurs de la Technische Universität de Berlin a proposé un **modèle** (et un **logiciel open source**) pour étudier la **viabilité des modèles commerciaux de couplage Power-to-Gas**. Appliqué au cas de la production de H<sub>2</sub> vert en Allemagne, ils en déduisent les leviers disponibles pour accroître sa compétitivité.

 [Focus page 15](#)

## Stockage

 Des chercheurs brésiliens de **l'IPEN** de São Paulo ont développé une méthode, basée sur un réacteur électrochimique, permettant de **stocker de manière efficace l'hydrogène (H<sub>2</sub>) dans l'ammoniac (NH<sub>3</sub>) à température ambiante**, via un procédé dissipant **moins d'énergie**, et ne nécessitant **pas de purification**.

 [Focus page 17](#)

## Traitement du gaz et injection

 Air Liquide a déposé un brevet pour un procédé et un dispositif de **perméation membranaire** permettant de **contrôler et limiter la perte de méthane** lors de l'épuration du biogaz.

 [Focus page 19](#)

# Autres actualités

## Méthanisation



L'**Ukraine** a inauguré sa **première usine de production de biométhane** qui va desservir 1 500 consommateurs via le réseau de distribution de gaz du pays.

@ [Lien vers l'article](#)

## Méthanisation



Des chercheurs de l'université d'État de Campinas et de l'université fédérale de l'ABC (UFABC) dans l'État de São Paulo (Brésil) ont réussi à **produire du biogaz à partir de marc de pomme**, le résidu pulpeux qui reste après que le fruit a été écrasé pour en extraire le jus.

@ [Lien vers l'article](#)

## Pyrogazéification



La société EQTEC, spécialisée dans les technologies de pyrogazéification, va mener **une étude de faisabilité** (pour une valeur d'**un million d'euros**) sur la **transformation de déchets en gaz renouvelable** sur le site d'une usine de charbon désaffectée à Aix-en-Provence, en France.

@ [Lien vers l'article](#)

## Hydrogène



Des chercheurs de l'IMT Mines Albi ont effectué **un état de l'art complet des techniques de contrôle, analyse et quantification de l'hydrogène** produit à partir de biomasse, en particulier dans les mélanges gazeux. Des paramètres comme la précision de mesure des méthodes, leur temps de réponse, leur stabilité, etc. y sont par exemple examinés.

@ [Lien vers l'article](#)

## Hydrogène



La Chine **multiplie les unités de production de H<sub>2</sub> vert** de grande taille. Actuellement, la plus grande unité du pays est Ordos, **un système de 390 MW** construit par Sinopec, géant public chinois du raffinage du pétrole, **qui produira environ 30 000 tonnes de H<sub>2</sub> vert par an**.

@ [Lien vers l'article](#)

## Hydrogène



BP s'apprête à lancer un **cluster d'hydrogène bas-carbone**, nommé HyVal, dans la région de Valence en Espagne. Cette collaboration privé-public devrait aboutir en 2030 à l'installation **d'une unité d'électrolyse de 2GW**.

@ [Lien vers l'article](#)

## Hydrogène



L'Université d'Aston, située à Birmingham, a reçu une **subvention de £300,000** de la part de la Fondation Wolfson pour l'aider à développer le **premier laboratoire de recherche mondial spécifiquement dédié à la production d'hydrogène bas carbone à partir de biomasse**.

@ [Lien vers l'article](#)

## Stockage



Air Liquide ouvre la voie à la conversion d'ammoniac en H<sub>2</sub> avec une **nouvelle technologie de craquage**. L'entreprise a annoncé la construction d'une **unité pilote** de craquage d'ammoniac de taille industrielle dans le port d'Anvers. Celle-ci devrait être opérationnelle en 2024.

@ [Lien vers l'article](#)

## Photocatalyse



Des chercheurs du Tata Institute of Fundamental Research de Mumbai ont réussi à **catalyser l'hydrogénation du CO<sub>2</sub>** (avec une bonne réactivité et une bonne sélectivité), **à de basses températures** (84 à 223 °C) **sans apport de chaleur externe** par **une excitation plasmonique à l'or-noir chargé de Nickel**.

@ [Lien vers l'article](#)

# Procédé de production d'un gaz à faible teneur en goudron et en poussières, à partir de biomasse solide

## EN BREF

**Objet :** brevet pour un procédé (et un dispositif) de pyrogazéification à partir de biomasse solide, de résidus biogènes et/ou de fractions de déchets organiques

**Objectif :** développer un procédé permettant la production d'un gaz à faible teneur en goudron et en poussières

**Dépositaire :** BIOS Bioenergiesysteme GmbH

**Date :** mars 2023

BIOS Bioenergiesysteme GmbH a déposé un brevet pour un procédé de production d'un gaz à faible teneur en goudron et en poussières à partir de biomasse solide, résidus biogènes ou de fractions de déchets organiques. Le dispositif comprend un réacteur de gazéification à courant ascendant ou un réacteur de pyrolyse, combiné à un réacteur de traitement de gaz.

## Contexte

La pyrogazéification permet de traiter des intrants variés par **transformation thermochimique à haute température en l'absence de CO<sub>2</sub>** pour produire du syngaz valorisable en méthane de synthèse.

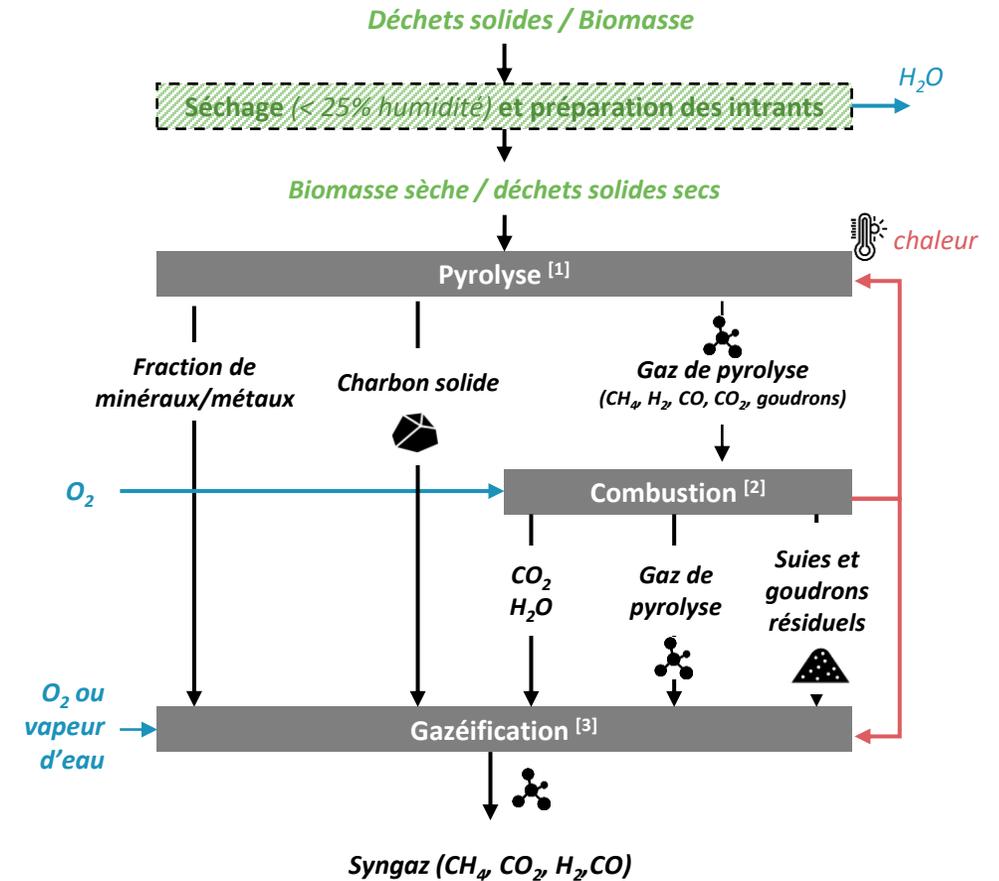
Plusieurs types de méthodes et technologies de pyrogazéification ont été mises au point pour convertir la biomasse sèche en gaz propres. Néanmoins, **la destruction/conversion efficace des bio-huiles et des goudrons** formés au cours de l'étape de pyrolyse et présents dans le gaz en sortie demeure un sujet de recherche important, mais relativement peu traité.

[Lien vers le brevet](#)

5

Pyrogazéification

Innovation



**Chaîne de conversion simplifiée de la pyrogazéification**

[1] production de matières volatiles et de charbon solide par dégradation de la biomasse sous l'effet de la chaleur et en l'absence de O<sub>2</sub> ; [2] oxydation partielle des matières volatiles : craquage des goudrons et production de chaleur ; [3] réduction du charbon en syngaz

# Procédé de production d'un gaz à faible teneur en goudron et en poussières, à partir de biomasse solide



En effet, ces goudrons **corrosifs** (de même que les particules solides fines et les métaux alcalins) empêchent l'utilisation des gaz dans des turbines qu'ils risquent d'endommager.

## Résultats

Ce brevet décrit un dispositif de production de gaz à faible teneur en goudron et en poussières. Cette invention permet de réduire la teneur en goudrons du gaz **de plus de 95%** (jusqu'à 99%) c'est-à-dire **moins de 1 g de goudron par Nm<sup>3</sup> de gaz produit**. Par comparaison, les réacteurs les plus couramment utilisés pour la pyrogazéification conduisent à des teneurs en goudrons de **quelques g par Nm<sup>3</sup> voire quelques dizaines de g par Nm<sup>3</sup>**.

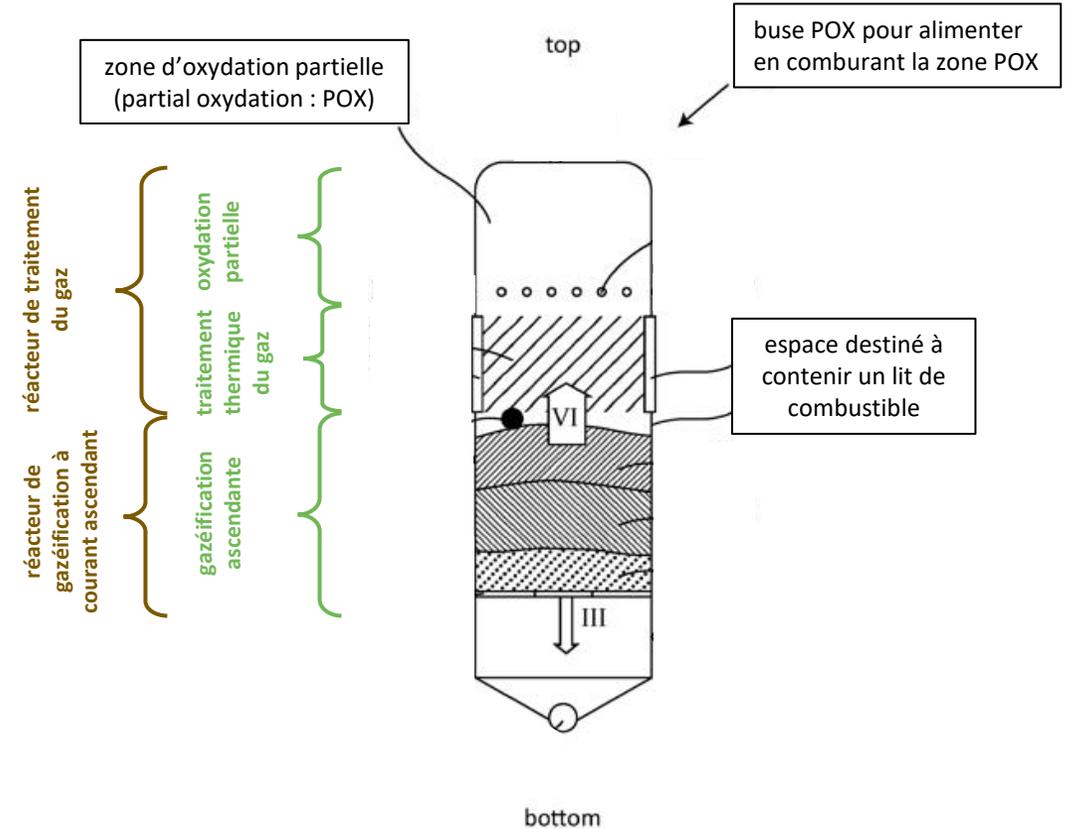
Le dispositif de production de gaz comprend :

- Un réacteur de gazéification à « lit fixe ascendant » (lit fixe à contre-courant) ou réacteur de pyrolyse, conduisant à la libération de gaz contenant en sortie une **faible concentration en particules mais une quantité considérable de goudrons** (50 à 2000 g/Nm<sup>3</sup>).
- Un réacteur de traitement des gaz qui comporte une partie de traitement thermique des gaz et une zone permettant leur oxydation partielle. Dans ce réacteur, les goudrons sont partiellement brûlés.

Le gaz produit possède une **teneur en poussières et en goudron considérablement réduite**.

## Application et valorisation

Ce brevet témoigne des **progrès constants réalisés dans la gestion des goudrons** de pyrolyse au sein des réacteurs de pyrogazéification. Quoique sa structure reste globalement similaire à celle des réacteurs à contre-courant classiques, le réacteur ici breveté permet, par oxydation des gaz de pyrolyse à une température > 1000 °C, la production **d'un gaz à plus faible teneur en goudron et en poussières** : jusqu'à **moins d'un gramme par Nm<sup>3</sup> contre quelques dizaines de grammes pour les réacteurs à contre-courant usuels**.



**Schéma du dispositif breveté par Bios Bioenergiesysteme GmbH**

# Nouveau réacteur de méthanation par sorption pour limiter les étapes de purification du méthane

## EN BREF

-  **Objet :** article publié sur le site de l'Empa (Suisse)
-  **Objectif :** développement d'un nouveau réacteur de méthanation qui limite la co-production d'eau pour éviter les étapes de purification
-  **TRL estimé :** 4-5
-  **Date :** janvier 2023

4 chercheurs de l'Empa (Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche, en Suisse) développent un **nouveau concept de réacteur de méthanation** qui pourrait à terme permettre de **limiter les étapes de purification du méthane**, usuellement nécessaires avant son injection dans le réseau.

## Contexte

La méthanation catalytique est une réaction de formation de **CH<sub>4</sub>** synthétique à partir de **H<sub>2</sub>**, de **CO<sub>2</sub>** et/ou **CO** grâce à la présence d'un **catalyseur** physico-chimique, le plus souvent constitué de nickel.

Produit à partir d'hydrogène (bas-carbone) et de CO<sub>2</sub> atmosphérique, le méthane synthétique est une source d'énergie **transportable et stockable** à long-terme, et permet d'envisager un système gazier décarboné. Le procédé de méthanation catalytique peut cependant encore être optimisé, et parce que de l'eau est co-produite avec le méthane, il doit être suivi d'une étape de purification pour injection à un haut degré de pureté<sup>[1]</sup> dans le réseau.

[Lien vers l'article](#)

7

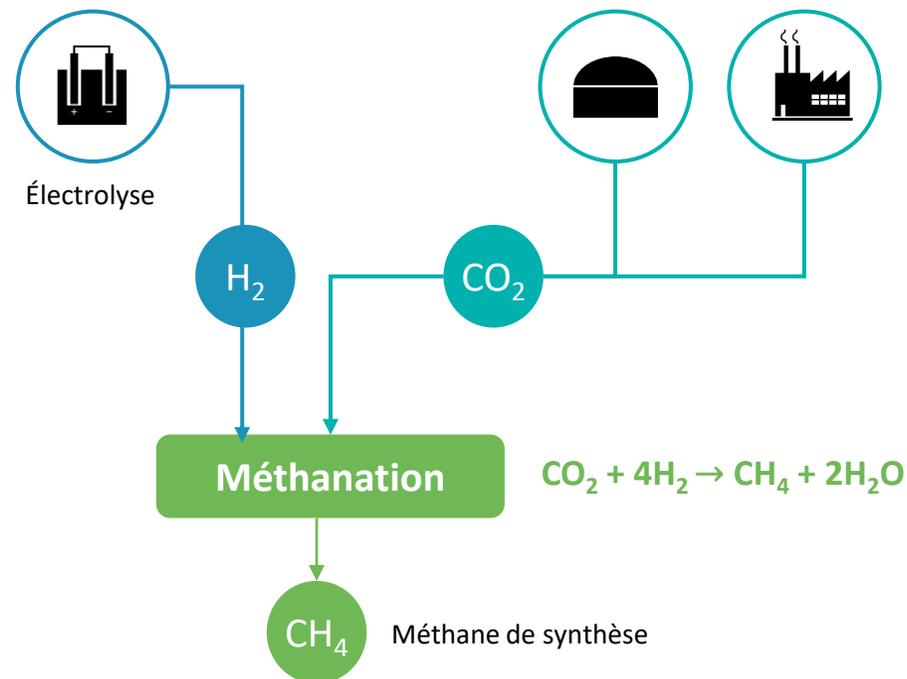


Schéma du procédé de méthanation

[1] Pour l'injection dans le réseau, la teneur en eau doit être inférieure à 53 mg/(n)m<sup>3</sup>. Les techniques de purification incluent la cryogénie, l'absorption sur glycols ou encore, les tamis moléculaires.

# Nouveau réacteur de méthanation par sorption pour limiter les étapes de purification du méthane



## Résultats

Les chercheurs de l'Empa développent depuis plus de 3 ans un **nouveau concept de réacteur** de méthanation qui **empêche la présence d'eau dans le gaz produit par sorption** et limite ainsi les étapes de purification du méthane produit [1].

Ce réacteur à **lit fixe** fonctionne avec un **support catalytique poreux de pellets de zéolithe** qui adsorbe l'eau produite pendant la réaction de méthanation. Cette élimination continue permet d'obtenir du **CH<sub>4</sub> pur** pour produit.

En fin de réaction, **le support doit être séché pour être réutilisé au cours d'un nouveau cycle**. Pour cela, **le réacteur est rincé au H<sub>2</sub> en l'absence de CO<sub>2</sub>** et à **basse pression**, permettant une évacuation de l'eau.

Pour garantir une production continue de méthane, deux réacteurs fonctionnant en alternance sont donc nécessaires.

## Application et valorisation

Les recherches de l'équipe de Florian Kiefer s'inscrivent dans le cadre plus large du **projet de démonstrateur de mobilité** « move », lancé en 2015, qui entend notamment produire du CH<sub>4</sub> à partir de CO<sub>2</sub> et d'eau (électrolyseur de 180 kW) tous deux **extraits de l'atmosphère**. Le projet est soutenu entre autres par le canton de Zurich, Avenegy Suisse, Migros, Swisspower, le conseil des ETH, etc.

La répliquabilité de ce procédé sur des installations à grande échelle doit désormais être évaluée.

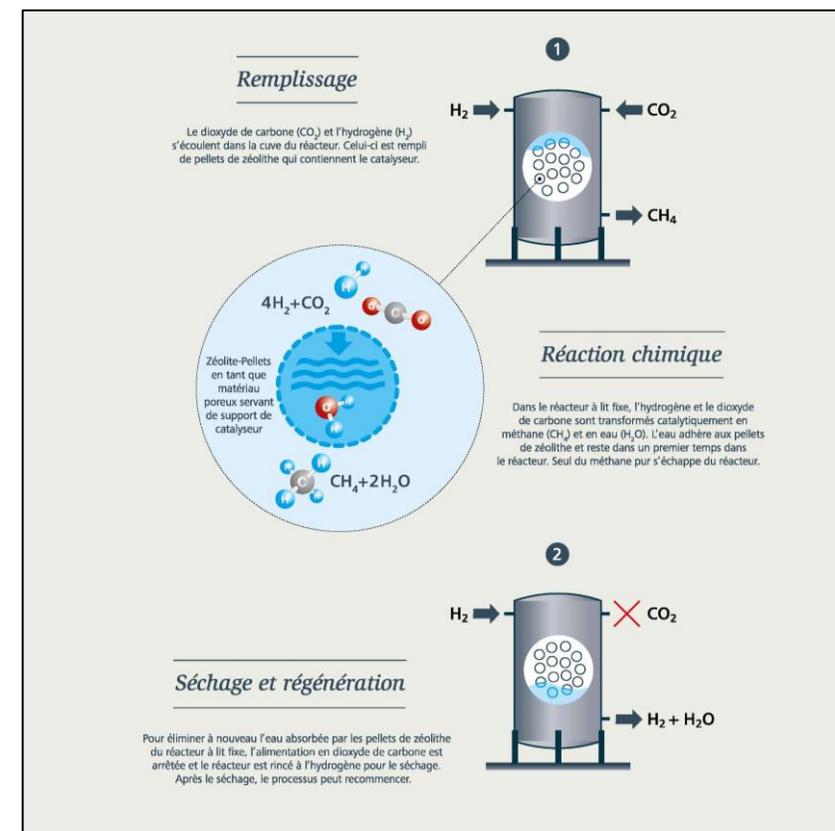


Schéma du procédé et du réacteur de méthanation renforcée par sorption [2]

# Étude de l'impact de la limitation du fer sur la méthanation biologique



## EN BREF

**Objet :** article publié dans *Journal of Environmental Chemical Engineering*

**Objectif :** étudier l'impact des métaux traces, comme le fer, sur le processus de méthanation biologique

**Résultats :** un manque de fer nuit au développement des microorganismes hydrogénotrophes responsables de la formation de CH<sub>4</sub> et diminue l'efficacité du procédé

**Date :** février 2023

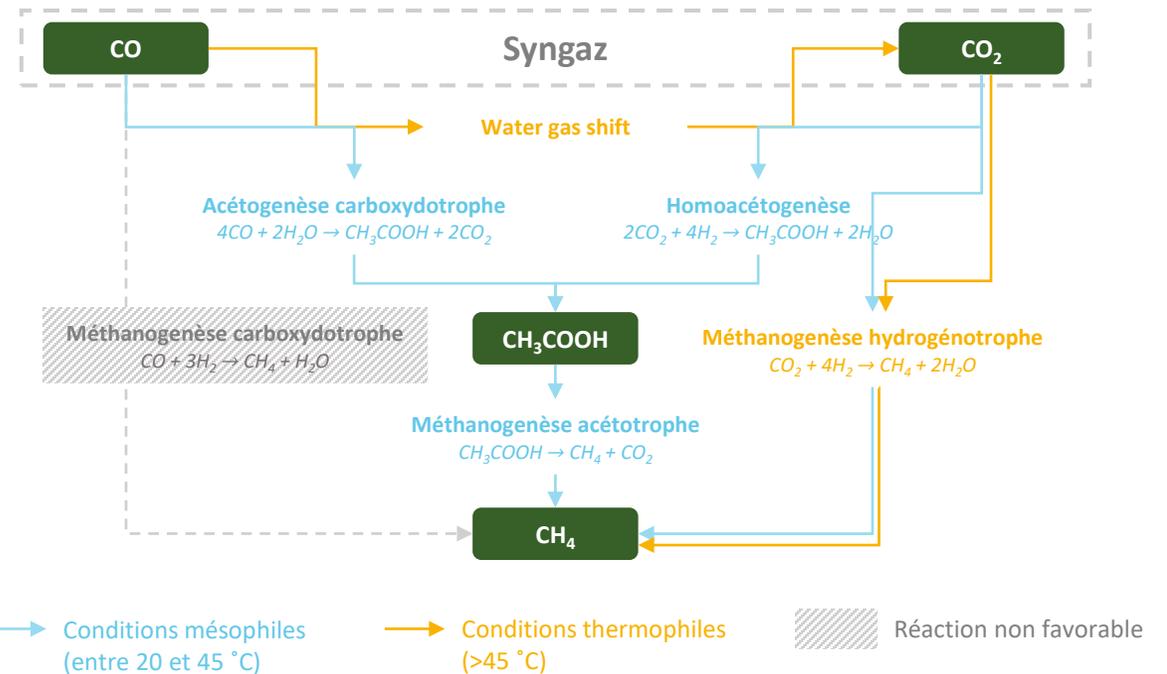
Des chercheurs danois et brésiliens ont **étudié l'impact des métaux traces** (Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Se, Mo, W) **sur le processus de méthanation biologique** et la **production de CH<sub>4</sub> en sortie**.

## Contexte

La méthanation biologique est une réaction de **formation de CH<sub>4</sub> en milieu anaérobie** à partir de **H<sub>2</sub>**, de **CO<sub>2</sub>** et / ou de **CO** dissous en phase aqueuse, et de **microorganismes**.

Les éléments traces métalliques (ETM comme le fer, le cuivre, le zinc, etc.) sont indispensables aux **enzymes** impliquées dans les réactions de méthanation biologique. En voie directe (i.e. par méthanogenèse hydrogénotrophe) comme en voie indirecte (via la formation d'acétate), ils y jouent le rôle de **cofacteurs**<sup>[1]</sup> ou **centres catalytiques**<sup>[2]</sup>. En particulier, il a été démontré que le fer (Fe) est très important pour une **méthanation biologique stable** car il est nécessaire au **fonctionnement d'une majorité d'enzymes** impliquées dans le processus. Pour autant, une **compréhension plus fine des besoins en métaux traces** est encore nécessaire pour optimiser le procédé.

[Lien vers l'article](#)



**Ensemble des réactions pouvant être réalisées par les micro-organismes lors de la méthanation biologique selon les conditions opératoires**

[1] composé chimique non protéique mais qui est nécessaire à l'activité biologique d'une protéine, le plus souvent une enzyme ; [2] région d'une enzyme à laquelle les molécules du substrat peuvent se lier et où une réaction chimique a lieu

# Étude de l'impact de la limitation du fer sur la méthanation biologique



## Résultats

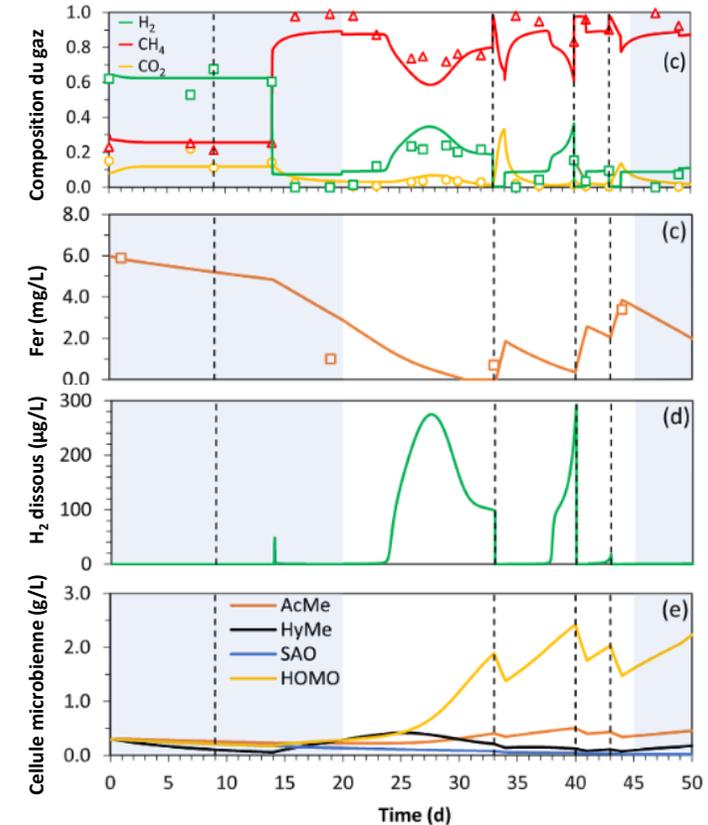
Cette étude met en lumière l'influence de la quantité de métaux (notamment quantité de fer) sur la méthanation biologique (ici, méthanogenèse hydrogénotrophe utilisant du fumier digéré comme source de nutriments).

- Dans un premier temps, la réaction est menée en milieu réactionnel privé de nutriments. La **diminution de la quantité de fer** entraîne une **baisse significative de la teneur en CH<sub>4</sub> dans le gaz de sortie** et une augmentation de la concentration d'acide acétique.
- Après l'apport de nutriments, l'**augmentation des concentrations de Co, Ni et Fe** est un facteur essentiel pour l'**amélioration de l'activité méthanogène**, conduisant à une **teneur en CH<sub>4</sub> de plus de 98 %** dans le biogaz de sortie et à une forte baisse de la concentration d'acide acétique.
- Pour confirmer les résultats expérimentaux, un **modèle mathématique** a été utilisé pour **simuler l'influence de l'élément le plus important, Fe**, sur le processus de méthanation biologique. Le *BioModel* utilisé a démontré que la limitation du Fe **supprime les archées hydrogénotrophes**<sup>[1]</sup>, conduisant à l'**accumulation de H<sub>2</sub>**.

## Application et valorisation

Cette étude permet de démontrer qu'une **faible quantité de fer nuit au développement des microorganismes hydrogénotrophes responsable de la formation de CH<sub>4</sub>**. Elle ouvre la voie à une réflexion sur l'**optimisation du procédé de méthanation biologique**, via la concentration de métaux traces.

Par ailleurs, le modèle mathématique (publié par les auteurs<sup>[2]</sup>) pourrait aussi être utilisé pour modéliser l'activation des groupes microbiens en fonction de la présence / limitation d'autres métaux traces.



### Évolution des paramètres lors de la réaction de méthanogenèse en fonction du temps

Après l'ajout de nutriments aux jours 33, 40 et 43, les concentrations de Co et de Ni ont respectivement triplé et doublé, la concentration de Fe a été multipliée par 5, ce qui a permis d'accroître l'activité méthanogène, conduisant à un gaz de sortie ayant une teneur en CH<sub>4</sub> de plus de 98 % avec un débit de 0,52 L<sub>CH<sub>4</sub></sub>/jour.

[1] micro-organismes produisant du méthane comme sous-produit métabolique ;  
[2] modèle initial publié dans [Angelidaki et al. \(2000\)](#). Plusieurs améliorations (qui sont exposées dans l'[article principal](#)) ont été apportées à ce modèle depuis sa première publication.

# Coproduire des composés chimiques pour améliorer la rentabilité de la production de H<sub>2</sub> renouvelable par photoélectrochimie



## EN BREF



**Objet :** article publié dans *Nature Communications*



**Objectif :** étudier l'impact de la co-production de composés chimiques sur l'Analyse de Cycle de Vie énergétique de la production d'H<sub>2</sub> vert par PEC



**Résultats :** co-produire des composés chimiques à haute valeur énergétique peut améliorer sensiblement la rentabilité énergétique du processus de production d'H<sub>2</sub> par PEC



**Date :** février 2023

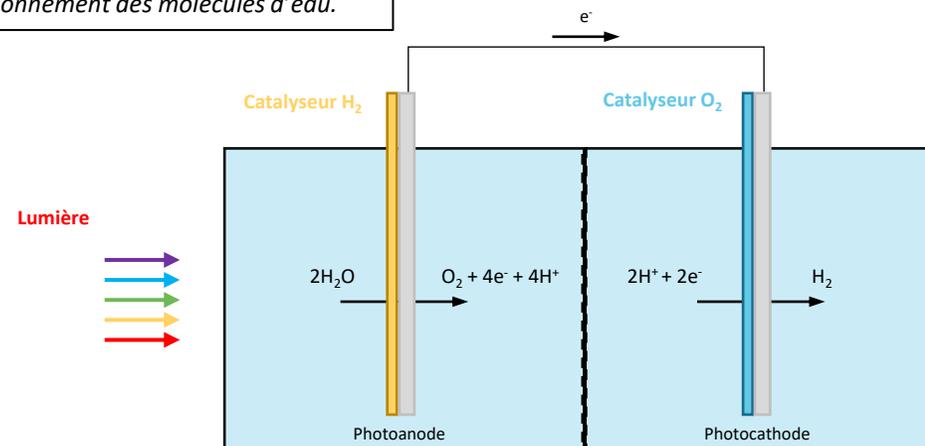
Des chercheurs du [HZB Institute for Solar Fuels](#) et du [Département de Chimie de la Technische Universität](#) de Berlin ont démontré que la co-production de H<sub>2</sub> vert<sup>[1]</sup> et de produits chimiques permettait d'accroître la compétitivité des cellules photoélectrochimiques.

## Contexte

La production d'hydrogène vert à partir d'énergie solaire s'effectue le plus souvent au sein d'électrolyseurs reliés à des systèmes photovoltaïques externes et qui permettent d'atteindre des rendements STH (Solar-To-Hydrogen) montant jusqu'à 30%<sup>[2,3]</sup>.

Un autre type de technologies d'électrolyse se développe également rapidement : **les cellules PEC (i.e., photoélectrochimiques)**, qui **couplent au sein d'une même unité la conversion de l'énergie solaire et l'électrolyse de l'eau**. Quoique moins mature, cette technologie permet d'envisager, à terme, une production de H<sub>2</sub> **plus compétitive grâce à un meilleur rendement et à des matériaux moins chers**.

L'anode est irradiée par de la lumière solaire. L'excitation des électrons dans le semi-conducteur permet la production d'un courant électrique et le fractionnement des molécules d'eau.



À la cathode, les électrons et les protons combinent pour former du H<sub>2</sub>.

## Fonctionnement d'une cellule électrochimique

[1] Hydrogène produit par électrolyse à partir d'électricité renouvelable ; [2] rendement STH = efficacité de la conversion de l'énergie solaire en énergie hydrogène ; [3] Source : [Australian National University](#)

# Coproduire des composés chimiques pour améliorer la rentabilité de la production de H<sub>2</sub> renouvelable par photoélectrochimie



Pour le moment, la PEC est encore loin d'être compétitive à grande échelle : un rendement STH généralement inférieur à 10%, un LCOE<sup>[1]</sup> bien plus haut que pour la production d'hydrogène par reformage de méthane, une durée de vie limitée, des besoins énergétiques élevés, etc.

## Résultats

Les chercheurs du HZB Institute for Solar Fuels et de la TU de Berlin ont démontré, **à partir de simulations**, que la formation de co-produits chimiques (p. ex. de l'acide méthylsulfonique ou MSA en anglais) peut permettre d'**améliorer la compétitivité** (estimée par un **temps de retour énergétique**<sup>[2]</sup>) de la production de H<sub>2</sub> au sein de cellules photoélectrochimiques.

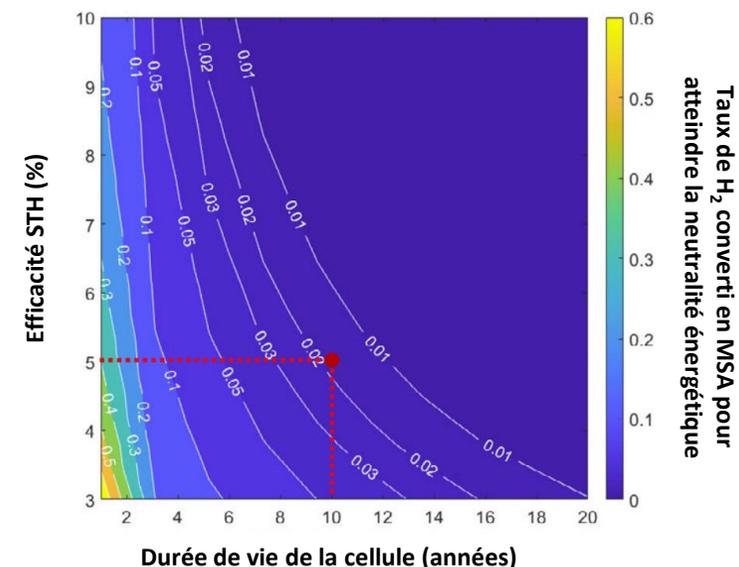
Ainsi, pour une PEC avec un rendement STH moyen de 5%, ils estiment que le temps de retour énergétique, quand le seul produit formé est H<sub>2</sub>, est de **17 ans**. Autrement dit, 17 années sont nécessaires pour que l'énergie générée sous forme de H<sub>2</sub> compense l'énergie utilisée lors de la fabrication et l'utilisation de la cellule.

En revanche, il suffit qu'une fraction minimale de 2% du H<sub>2</sub> produit soit immédiatement utilisée pour synthétiser de l'acide méthylsulfonique à partir d'acide itaconique **pour que le temps de retour énergétique soit divisé par 2**. Quand 30% du H<sub>2</sub> est réutilisé de cette manière, seules 2 années sont nécessaires pour rentabiliser l'énergie utilisée en entrée.

## Application et valorisation

Cet article montre qu'une balance énergétique compétitive peut être atteinte facilement pour la production d'hydrogène vert au sein de PEC, quand celle-ci est couplée à la production d'un produit chimique comme l'acide méthylsulfonique.

Ce résultat peut être étendu à n'importe quel produit chimique dont la valeur énergétique est plus haute que celle du H<sub>2</sub>. Le couplage représente une opportunité majeure à court et moyen termes parce que **la durée de vie d'une PEC n'est pour le moment que de quelques années**.



### Taux de conversion de H<sub>2</sub> en MSA nécessaire pour atteindre la balance énergétique pour différents rendements STH et différentes durées de vie de la PEC [3]

Pour une cellule photoélectrochimique ayant une durée de vie de 10 ans et un rendement STH moyen de 5%, convertir 2% de H<sub>2</sub> en MSA permet d'atteindre un équilibre énergétique, i.e. de produire autant d'énergie que celle nécessaire à la fabrication et au fonctionnement de la cellule, au cours de sa durée de vie.

[1] LCOE : Levelized Cost of Energy ou Coût actualisé de l'énergie ; [2] durée nécessaire pour que l'énergie produite équilibre l'énergie nécessaire à la fabrication et au fonctionnement de la PEC ; [3] carte de couleur reproduite directement depuis l'article.

# Cellule d'électrolyse sans membrane facilitant la purification des produits



## EN BREF

- Objet** : brevet pour une cellule d'électrolyse sans membrane
- Objectif** : développer une cellule d'électrolyse, au fonctionnement facile, sans entretien contraignant, et permettant une purification aisée des produits
- Dépositaire** : Fairbrics
- Date** : mars 2023

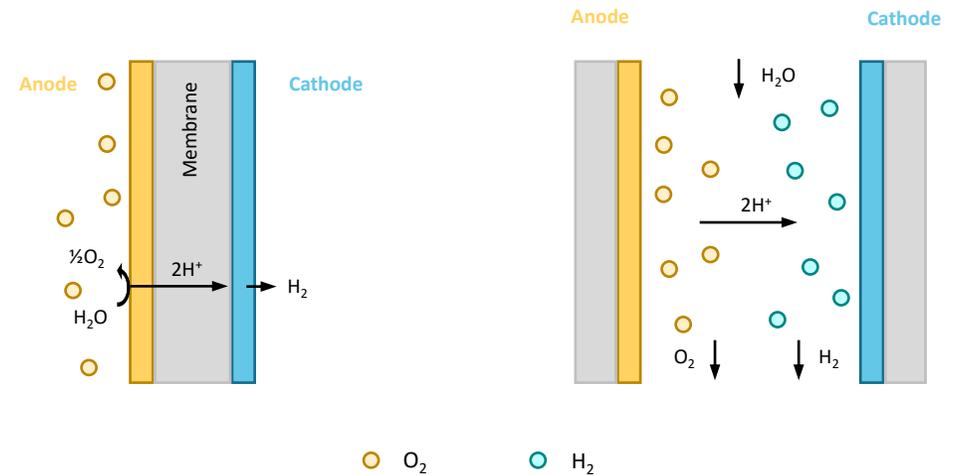
Fairbrics a déposé un brevet portant sur une **cellule d'électrolyse sans membrane** en flux ayant un **fonctionnement facile à mettre en œuvre** sans nécessité d'un entretien contraignant.

## Contexte

La plupart des électrolyseurs qui comprennent une membrane sont **onéreux** et nécessitent un **entretien important**, dû au **vieillissement de la membrane**. Pour pallier cette contrainte, des cellules sans membrane ont été développées ces dernières années. Elles nécessitent la mise en œuvre d'un **flux laminaire**<sup>[1]</sup> pour **éviter que les produits formés respectivement à la cathode et à l'anode ne se mélangent**, ce qui compliquerait la purification du produit à synthétiser.

Néanmoins, ces cellules sans membranes ne sont pas aisées à mettre en œuvre

- La mise en place d'un flux laminaire requiert des **conditions opératoires et un design de cellule complexes**
- L'absence de membrane requiert la **solubilisation des réactifs dans l'électrolyte**



### Schéma illustratif d'un électrolyseur à membrane (ici une PEM, à gauche) et d'un électrolyseur sans membrane (à droite)

Ces deux schémas représentent les électrolyseurs avec et sans membrane les plus classiques. D'autres typologies d'électrolyseurs peuvent cependant exister.

[1] un écoulement est dit laminaire si sa direction et sa vitesse changent peu.

# Cellule d'électrolyse sans membrane facilitant la purification des produits



## Résultats

Ce brevet porte sur le développement d'une cellule d'électrolyse sans membrane conçue pour permettre un **fonctionnement et une purification des produits plus aisés**, sans nécessité d'un entretien contraignant.

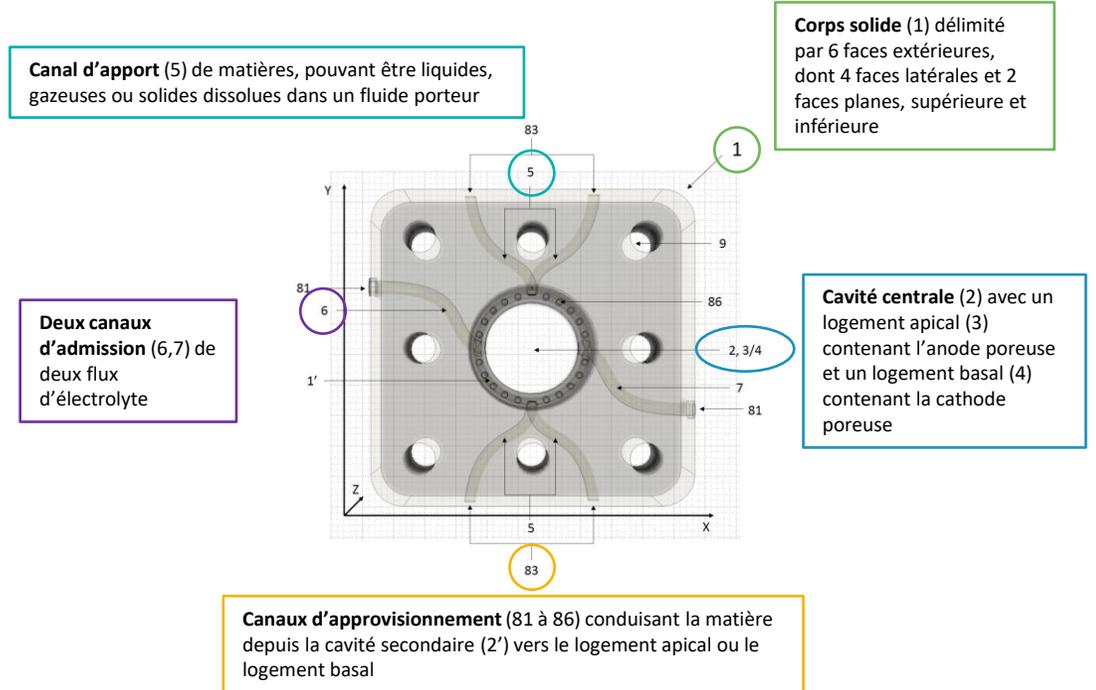
Cette cellule d'électrolyse est capable :

- de **fonctionner en l'absence de flux laminaire**, rendant ainsi les conditions opératoires moins strictes
- **d'apporter les réactifs destinés à la cathode et ceux destinés à l'anode de façon sélective grâce aux différents canaux d'approvisionnements**, permettant ainsi d'éviter que des réactions parasites aient lieu (cf. représentation ci-contre)
- d'apporter des matières liquides et des matières gazeuses, notamment des réactifs gazeux, ainsi que des matières solides dissolues dans un fluide porteur grâce au canal d'apport (cf. représentation ci-contre)
- d'utiliser des matières liquides ou gazeuses qui ne sont pas des réactifs mais qui permettent de **modifier la température ou le pH**, ou de placer les électrodes **sous atmosphère inerte**, et ce de façon sélective, à l'une des électrodes, permettant ainsi un contrôle plus aisé des paramètres de la réaction

## Application et valorisation

Ce brevet porte sur le développement d'une **cellule d'électrolyse sans membrane** permettant **d'apporter des réactifs** (ou autres matières) **sélectivement à l'anode à la cathode** grâce à des canaux d'approvisionnements spécifiques et de fonctionner sans flux laminaire.

Cette cellule est ainsi plus facile mettre en œuvre que la plupart des cellules d'électrolyse avec membrane et les cellules d'électrolyse sans membrane classiques.



### Représentation 3D de la cellule électrolytique sans membrane

L'anode et la cathode étant physiquement séparées (respectivement logées dans un logement apical et dans un logement basal), les produits H<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> formés, dans le cas de l'électrolyse de l'eau, ne sont pas en contact évitant ainsi tout risque de réactions parasites qui pourraient être dangereuses et mener à de potentielles explosions.

# Analyse économique des modèles commerciaux de l'hydrogène vert



## EN BREF

- Objet** : article publié dans *International Journal of Hydrogen Energy*
- Objectif** : étudier les modèles commerciaux du couplage Power-to-Gas (via le cas d'étude du Power-to-Hydrogen en Allemagne)
- Résultats** : l'outil d'analyse open source développé permet de conclure que les modèles commerciaux Power-to-Hydrogen ne sont pas viables dans les conditions de marché actuelles en Allemagne même si des leviers existent
- Date** : décembre 2022

Quatre chercheurs du [Département de gestion de l'énergie et des ressources de la TU](#) de Berlin proposent un **modèle pour étudier la viabilité des modèles commerciaux de production de H<sub>2</sub> vert**. L'application du modèle au marché allemand leur permet de conclure à quelles conditions la production de H<sub>2</sub> vert, qui n'y est pas compétitive, pourrait le devenir.

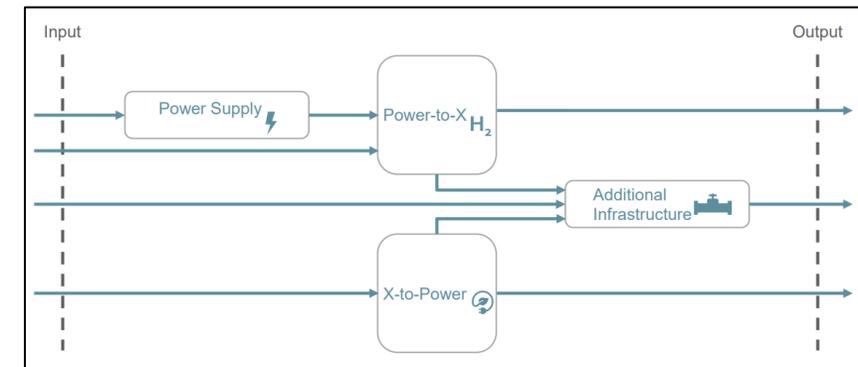
## Contexte

L'hydrogène vert jouera sans doute un rôle majeur dans le futur système énergétique mondial parce qu'il offre une solution de décarbonation de plusieurs usages, et **augmente la flexibilité du système énergétique** par le couplage de la production électrique avec les systèmes gaziers via le Power-to-X. Quoique plusieurs procédés Power-to-X atteignent des stades de maturité technologique industrielle, **leur viabilité économique n'est pas encore démontrée**. Ainsi, la production d'hydrogène vert en particulier reste à ce jour peu compétitive.

## Explications sur l'outil d'analyse utilisé

L'outil **open source** développé par les chercheurs de la TU de Berlin, intitulé OBMETSC, fournit une **plateforme** générique pour **l'évaluation de nombreux modèles d'entreprise** de couplage sectoriel. Il permet à l'utilisateur de remplir **ses propres cas d'utilisation** avec **ses propres hypothèses** via une **interface HTML** et d'évaluer leur succès économique. Une **base de données** est également fournie qui permet d'accéder à des informations sur les **technologies existantes et conditions du marché**. Les modèles calculent une **valeur actuelle nette** pour les modèles commerciaux choisis (Power-to-X ou X-to-Power).

[LIEN VERS L'OUTIL OPEN SOURCE](#)



## Structure des modules présents dans l'outil

L'outil est structuré en quatre briques : alimentation électrique, Power-to-X, X-to-Power et autres infrastructures. Chacune de ces briques est composée de sous-modules qui calculent les données sorties en fonction des paramètres et hypothèses en entrée, et qui sont connectées aux autres modules.

# Analyse économique des modèles commerciaux de l'hydrogène vert



## Résultats

L'étude menée par les chercheurs de la TU de Berlin a un double objectif :

- (1) analyser les **modèles commerciaux de Power-to-H<sub>2</sub>** en identifiant les **facteurs techniques, économiques et réglementaires qui ont une influence majeure sur leur viabilité**,
- (2) produire un **outil open source de modélisation des modèles commerciaux du Power-to-Gas** pour faciliter des démarches d'analyse comparative.

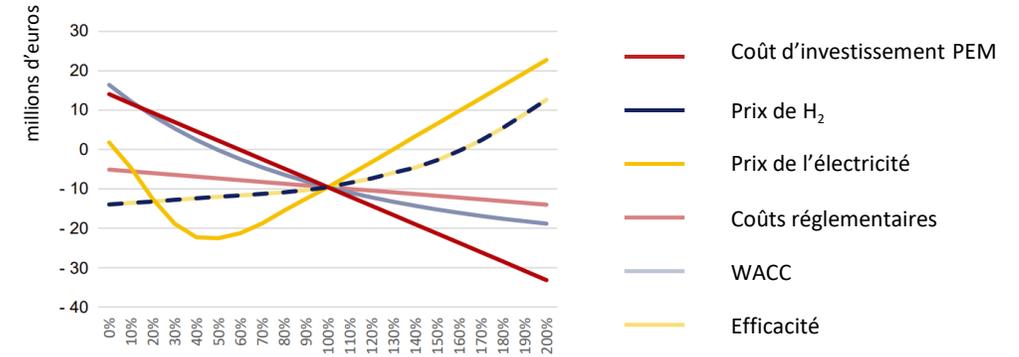
Les chercheurs montrent que les deux modèles commerciaux de production de H<sub>2</sub> vert étudiés (production à partir d'électricité issue d'une installation **solaire photovoltaïque, avec ou sans infrastructure de transport**) ne sont pas économiquement viables dans les conditions actuelles du marché allemand.

Ce résultat s'explique à la fois par le **coût trop élevé des cellules d'électrolyse PEM**<sup>[1]</sup>, par des **WACC**<sup>[2]</sup> **trop élevés** et par le **prix de vente trop faible de l'hydrogène vert**. Pour atteindre une **viabilité économique**, une **réduction d'au moins 40% du coût des PEM** ou une **baisse d'au moins 50% des WACC** seraient nécessaires. En revanche, une **baisse des coûts réglementaires aurait un impact positif assez faible**.

Au contraire, le modèle commercial X-to-Power modélisé, consistant en la vente de chaleur et d'électricité produites par des turbines à hydrogène, est démontré **viable dans les conditions de marché actuelles**, bien que très sensible à plusieurs paramètres : coût des turbines, prix de l'hydrogène, prix de l'électricité...

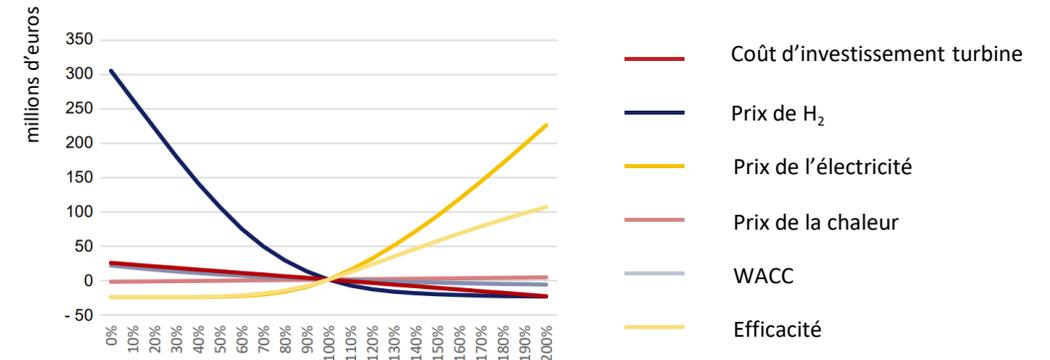
## Application et valorisation

Cet article permet de comprendre quels sont les **principaux leviers** pour accroître la viabilité des modèles commerciaux de production de H<sub>2</sub> vert. L'outil **open source** (en langage Python) peut être utilisé pour **analyser d'autres contextes techno-économiques ou géographiques de couplage Power-to-Gas**.



### Analyse de sensibilité du modèle Power-to-Hydrogen (avec infrastructures de transport de H<sub>2</sub>)

Le modèle Power-to-X n'est pas viable dans les conditions actuelles du marché mais peut le devenir en cas de baisse du coût des cellules d'électrolyse ou de hausse du prix de vente de H<sub>2</sub>. La hausse de rentabilité du modèle induite par une hausse des prix de l'électricité doit être analysée avec précaution : parce qu'elle accroît le coût de production de H<sub>2</sub> et les bénéfices d'une vente directe de l'électricité, une telle hausse est doublement défavorable à la production de H<sub>2</sub>.



### Analyse de sensibilité du modèle Hydrogen-to-Power de cogénération

Le modèle Hydrogen-to-Power est légèrement viable économiquement mais la valeur actuelle nette est rapidement dégradée pour toute baisse du coût de l'électricité ou pour toute augmentation du coût des turbines et des prix de H<sub>2</sub>.

[1] Les cellules Proton Exchange Membrane, dont le coût varie généralement de 1000€ à 1600€/kW [IEA] ; [2] WACC = Weighted Average Capital Cost, coût moyen du capital pour un projet.

# Méthode optimisée de production d'ammoniac pour le stockage d'hydrogène



## EN BREF

**Objet** : article publié dans *Electrochemistry Communications*

**Objectif** : optimiser la production d'ammoniac pour stocker du H<sub>2</sub>, par le développement de réacteurs électrochimiques limitant les dissipations thermiques

**Résultat** : la réaction permet de stocker efficacement H<sub>2</sub> sous forme de NH<sub>3</sub> pur, avec un rendement très élevé, et une faible dissipation d'énergie

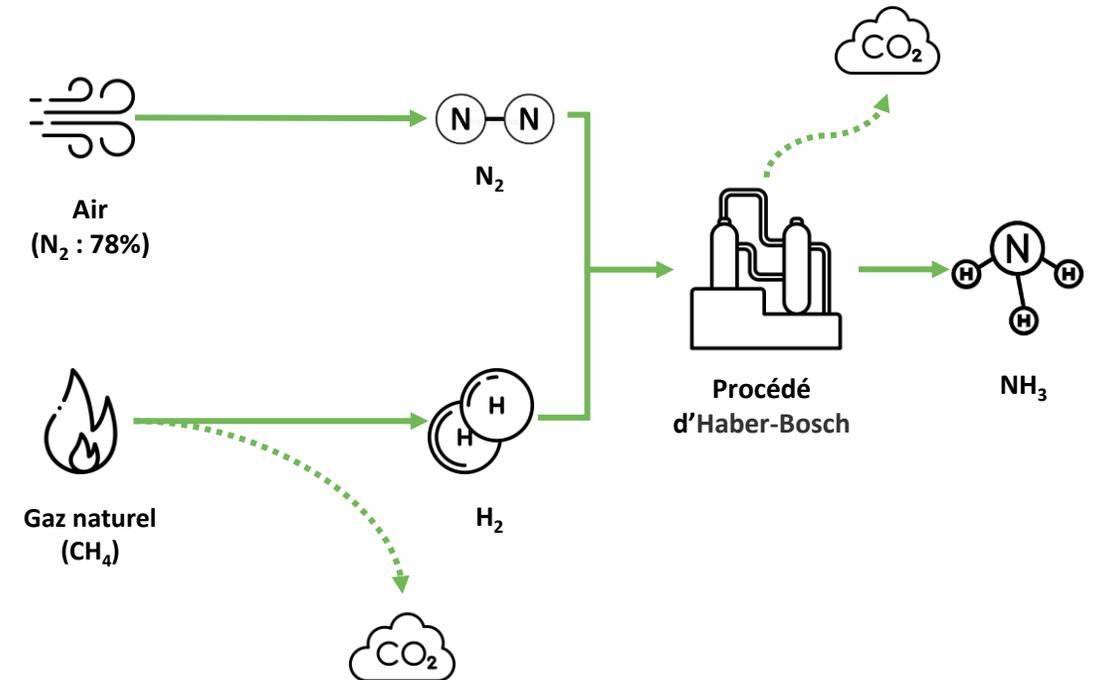
**Date** : mars 2023

Des chercheurs brésiliens de l'[IPEN](#) de São Paulo ont développé une méthode, basée sur un réacteur électrochimique, permettant de **stocker de manière efficace de l'hydrogène H<sub>2</sub>** sous forme d'**ammoniac (NH<sub>3</sub>) à température ambiante**, via un procédé dissipant **moins d'énergie** que le procédé usuel d'Haber-Bosch, et ne nécessitant **pas de purification**.

## Contexte

L'ammoniac (NH<sub>3</sub>), qui est la molécule la plus synthétisée au monde, fait actuellement l'objet de nombreuses recherches. Parce qu'elle peut être utilisée comme **moyen de stockage de H<sub>2</sub>**, elle devrait voir son utilisation croître fortement dans les prochaines années.

Dans ce contexte, plusieurs chercheurs se sont récemment intéressés à la **production de NH<sub>3</sub> à partir de H<sub>2</sub>** par réduction d'azote via des piles à combustible et sous **conditions ambiantes**. Cependant, ces procédés électrochimiques conventionnels utilisent des électrolytes liquides, qui **contaminent l'ammoniac** et imposent une étape de purification supplémentaire. D'autre part, le procédé d'Haber-Bosch, le plus mature, dissipe **une quantité importante d'énergie**<sup>[1]</sup>.



### Schéma de conversion de l'hydrogène en ammoniac à partir du procédé d'Haber-Bosch

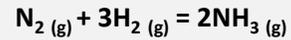
Le procédé d'Haber-Bosch est actuellement la principale méthode industrielle de transformation de H<sub>2</sub> en NH<sub>3</sub> à partir d'azote, mais il dissipe beaucoup d'énergie en raison des hautes pressions et températures du procédé. À lui seul, ce procédé représente près de 1% de la consommation énergétique mondiale. Les chercheurs de l'IPEN se sont donné pour objectif de mettre au point un procédé de conversion plus performant énergétiquement.

[1] le rendement du procédé d'Haber-Bosch a un rendement d'environ 20%  
[\[Mediachimie\]](#)

# Méthode optimisée de production d'ammoniac pour le stockage d'hydrogène

## Résultats

Cette étude présente les résultats expérimentaux d'une **méthode de stockage de l'hydrogène sous forme de NH<sub>3</sub> en conditions de température et de pression ambiantes** dans un réacteur à piles à combustible à membrane échangeuse de protons qui utilise un **catalyseur Cu/C**.



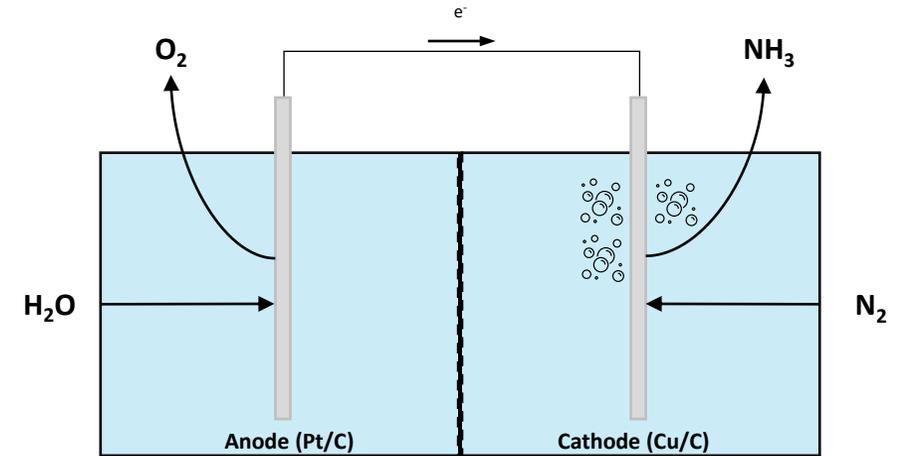
Dans ces conditions la réaction de réduction de l'azote a produit un **rendement en NH<sub>3</sub>** et un **rendement de Faraday** (= rapport entre la quantité de gaz produite et la quantité de gaz théoriquement produite lors d'une électrolyse) **très élevés**. Les valeurs les plus élevées du rendement en NH<sub>3</sub> (38,4 µg.h<sup>-1</sup>.cm<sup>-2</sup>) et du rendement de Faraday (42,57 %) ont été observées à 0V. Ces résultats **sont comparables à ceux obtenus dans les meilleurs réacteurs** et attestent ainsi de l'efficacité du procédé.

Cette méthode de production d'ammoniac présente par ailleurs plusieurs avantages :

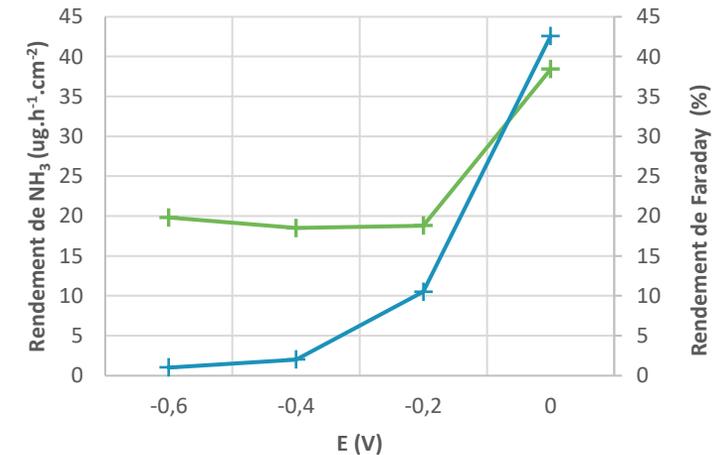
- **Faible dissipation énergétique** du procédé permettant un **stockage de l'hydrogène plus efficace**
- **Fonctionnement en continu** du réacteur
- **Pureté totale de l'ammoniac obtenu** ce qui n'avait pas été obtenu jusqu'ici dans les précédentes études

## Application et valorisation

Ces résultats s'inscrivent dans la continuité des recherches déjà menées sur la production de NH<sub>3</sub> par voie électrochimique qui pourraient **accélérer le développement de l'hydrogène en facilitant son stockage**.



**Fonctionnement d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons appliquée au stockage de H<sub>2</sub> sous forme de NH<sub>3</sub> (catalyseur Cu/C)**



**Rendement en NH<sub>3</sub> et rendement de Faraday en fonction de la tension**

# Procédé d'épuration du biogaz permettant des pertes de méthane et de CO<sub>2</sub> limitées



## EN BREF

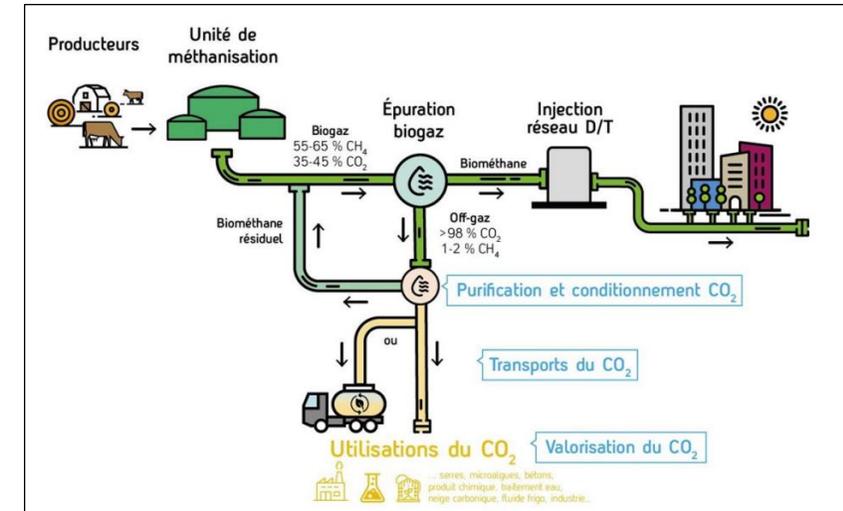
- Objet** : brevet pour un procédé et un dispositif d'épuration de gaz composés entre autres de méthane et de CO<sub>2</sub>
- Objectif** : développer un procédé d'épuration permettant la production d'un flux de biométhane à concentration constante sans perte de méthane
- Dépositaire** : Air Liquide
- Date** : mars 2023

Air Liquide a déposé un brevet pour un procédé (et l'installation correspondante) de traitement d'un gaz contenant **au moins du méthane et du CO<sub>2</sub>** permettant d'obtenir du biométhane avec des **pertes de méthane limitées**.

## Contexte

Le biogaz produit par méthanisation peut être valorisé à proximité du site de production pour fournir de la chaleur, de l'électricité, ou les deux, mais il **peut aussi être injecté dans le réseau sous forme de biométhane**. Pour cela, il doit être d'abord purifié pour obtenir un biométhane conforme aux spécifications du réseau.

L'épuration du biogaz est généralement composée de plusieurs étapes : séchage ; compression, élimination du sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S), des composés organiques volatils, des siloxanes, de l'ammoniac ; chauffage ou refroidissement du biogaz ; séparation du CO<sub>2</sub> et du biométhane... Pour cette dernière étape, plusieurs technologies sont disponibles. Parmi elles, **la technologie membranaire est particulièrement performante si la teneur en CO<sub>2</sub> est élevée**.



**Schéma des flux de l'épuration du biogaz et de la purification du CO<sub>2</sub> [1]**

Paramètre	Composition standard du biogaz	Critère standard pour injection de biométhane
CH <sub>4</sub>	[55%-65%]	> 90%
CO <sub>2</sub>	[35%-45%]	< 3,5% (GRDF)
N <sub>2</sub>	[0-1%]	
O <sub>2</sub>	[0-0,5%]	< 100 ppmv
NH <sub>3</sub>	[0-100 mg/Nm <sup>3</sup> ]	< 3 mg/m <sup>3</sup>
H <sub>2</sub> S	[50-4000ppmv]	< 5mgS/m <sup>3</sup>

**Comparaison entre la composition standard du biogaz et les spécifications pour injection de biométhane dans le réseau français [1,2]**

[1] Comité Stratégique de Filière Nouveaux systèmes énergétiques ; [2] GRDF

# Procédé d'épuration du biogaz permettant des pertes de méthane et de CO<sub>2</sub> limitées



## Résultats

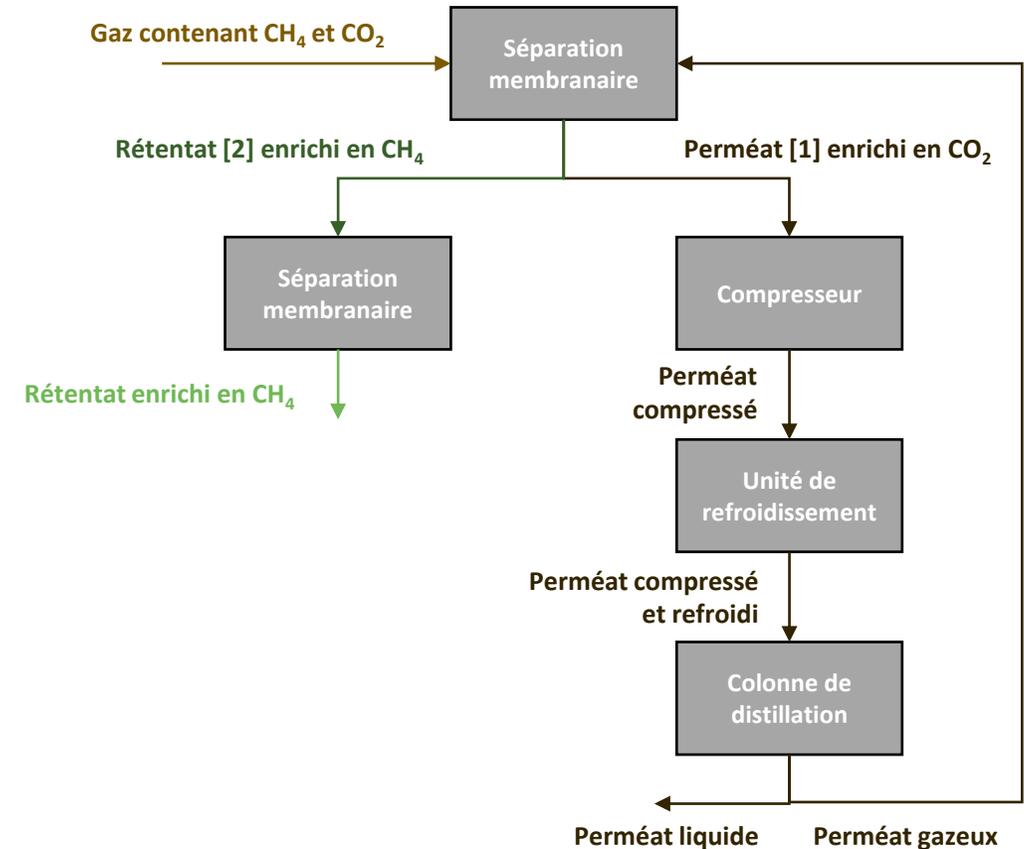
Les procédés membranaires doivent permettre la production d'un gaz de qualité requise, pour un faible coût et en minimisant les pertes de méthane. Le brevet déposé par Air Liquide décrit un procédé et une installation permettant la **séparation du CH<sub>4</sub> et du CO<sub>2</sub>** d'un gaz entrant et l'**obtention d'un flux de biométhane à concentration constante sans perte de méthane**.

L'installation imaginée, quand elle est appliquée à un flux gazeux de méthane et de dioxyde de carbone, comprend :

- (1) une première unité de séparation membranaire produisant un perméat<sup>[1]</sup> enrichi en CO<sub>2</sub> et un rétentat<sup>[2]</sup> enrichi en méthane,
- (2) une seconde unité de séparation produit un rétentat à nouveau enrichi en méthane et un perméat enrichi en CO<sub>2</sub> à partir du premier rétentat,
- (3) un compresseur pour comprimer le premier perméat de CO<sub>2</sub> entre 17 et 25 bar,
- (4) un moyen de refroidissement du perméat ainsi comprimé à une température de -40 °C,
- (5) une colonne de distillation séparant le perméat refroidi en un flux gazeux et un flux liquide,
- (6) un moyen pour recycler le flux gazeux à l'entrée de la première unité de séparation. Un tel procédé permet le recyclage de la totalité du CH<sub>4</sub> contenu dans le flux gazeux,

## Application et valorisation

Ce procédé permet l'obtention d'un flux de biométhane à concentration constante sans perte de méthane et ouvre donc la voie à des unités de traitement du biogaz plus efficaces et moins polluantes.



**Schéma du procédé breveté par Air Liquide**

[1] Perméat = flux ayant traversé la membrane du processus de séparation ; [2] Rétentat = flux n'ayant pas traversé la membrane

Pour vous abonner à la veille, cliquez [ici](#)



*Vous pouvez également contribuer à cette veille en nous faisant des suggestions d'actualités à intégrer dans nos publications bimestrielles en envoyant un mail à :*

[veille.gazvertsgrdf@enea-consulting.com](mailto:veille.gazvertsgrdf@enea-consulting.com)