

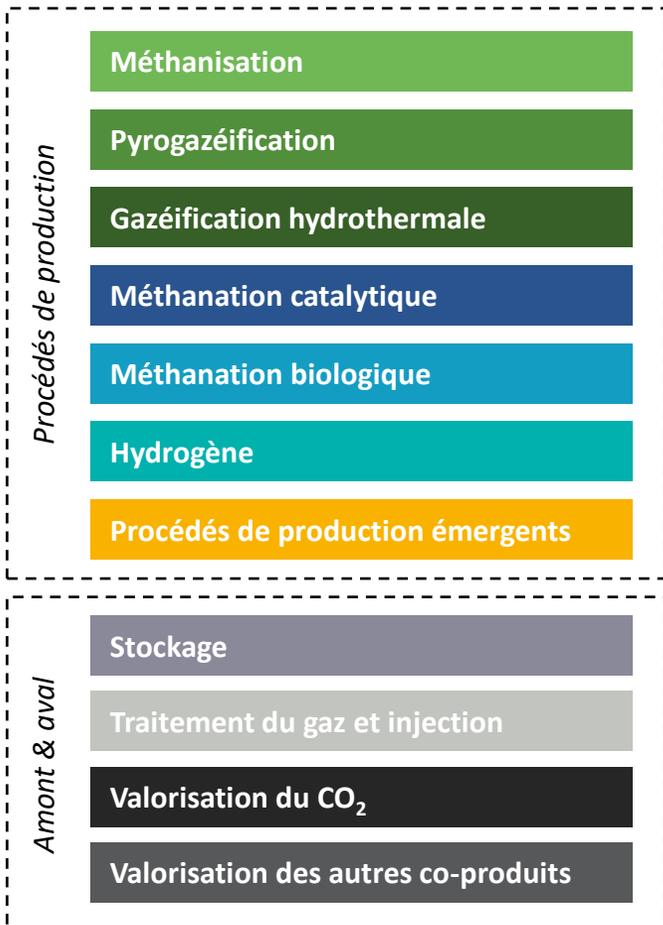
Veille technologique sur les

filières gaz verts - # 3



Clés de lecture

Thématiques étudiées



Typologies des sujets abordés

| | | |
|---|------------------------------------|--|
|  | Recherche | Publications portant sur de 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

Gazéification hydrothermale



Une équipe de chercheurs canadiens a comparé la **performance des catalyseurs pour la production de H₂ par gazéification hydrothermale**. Les catalyseurs hétérogènes à base de **Ni et Ru** ont démontré d'excellents résultats et de **nouveaux catalyseurs à base de carbone actif** sont prometteurs.

[Focus page 5](#)

Méthanation catalytique



Une équipe de chercheurs thaïlandais a fait une analyse comparative (technique, économique et d'impact) de différents modes de fonctionnement d'une technologie **SOEC** (cellules d'électrolyse à oxyde solide) **couplée à une unité de méthanation**. Le mode « **coélectrolyse de l'eau et du CO₂** » pourrait améliorer la performance du système global.

[Focus page 7](#)

Méthanation catalytique



Une équipe de chercheurs égyptiens a étudié **l'effet des supports ZrO₂, Ce-ZrO₂, La-ZrO₂ et CeO₂ sur le processus de méthanation catalytique** utilisant du Ni comme catalyseur. **L'incorporation de 2,5 % en masse de cérium (Ce) ou d'oxyde de lanthane (La₂O₃) au zircon (ZrO₂) permet d'augmenter le taux de conversion de CO₂ en CH₄** après quelques heures de réaction.

[Focus page 9](#)

Méthanation biologique



Des chercheurs allemands ont analysé en détail le fonctionnement des **réacteurs à lit ruisselant** pour la méthanation biologique. Plusieurs **possibilités d'optimisation du processus ont été identifiées**, par exemple sur l'écoulement du liquide et la formation de biofilms. Des études technico-économiques sont encore nécessaires pour arriver à l'industrialisation du procédé.

[Focus page 11](#)

Méthanation biologique



Des chercheurs chinois ont étudié la performance d'une **unité de méthanation biologique in situ sous différents débits et modes d'injection (pulsé ou continu) de CO₂**. Lorsque le CO₂ est injecté de manière pulsée, **les rendements en méthane peuvent être augmentés jusqu'à 27 %** par rapport au témoin.

[Focus page 13](#)

Procédés émergents



Des chercheurs espagnols ont étudié la **performance de l'électro-méthanogenèse pour valoriser le CO₂ issu de HTC** [1]. **Le gaz de HTC a démontré des performances moindres que le CO₂ pur** (diminution de la densité de courant et production de CH₄ et impact inégal sur les communautés microbiennes cathodiques), mais a quand même permis d'obtenir un **biogaz riche en méthane à 70 %**.

[Focus page 15](#)

Hydrogène



L'hydrogène naturel dit « blanc » est une ressource prometteuse du fait de son faible impact carbone, son caractère renouvelable et son coût compétitif supposés. Ce focus **décrypte les enjeux liés à l'hydrogène naturel** suite à la publication d'un article de presse dans Les Échos sur **la découverte d'un gisement potentiel dans le bassin minier lorrain**

[Focus page 17](#)

Valorisation du CO₂



L'entreprise CarbonWorks développe une technologie de photobioréacteur (PBR) innovante qui permettrait d'obtenir un rendement surfacique de production de microalgues beaucoup plus important que les technologies communément utilisées. Ce focus présente cette solution et resitue les principaux enjeux liés aux PBR.

[Focus page 24](#)

Autres actualités

Méthanisation



Goldman Sachs investit dans Synthica Energy, une entreprise de **conception/exploitation d'installations de méthanisation à partir de déchets organiques**. Ce capital permettra à Synthica Energy d'accélérer le déploiement de ses méthaniseurs aux États-Unis : projets en Floride, Illinois, Missouri, New York, Pennsylvanie...

@ [Lien vers l'article](#)

Pyrogazéification



EQTEC annonce le succès de ses essais de gazéification à vapeur d'eau et oxygène, menés dans le cadre du projet Biogaz Gardanne en partenariat avec le LERMAB de l'université de Lorraine. Le succès de ces essais, dont les résultats sont en accord avec les simulations, montre que **la technologie de gazéification vapeur/oxygène pourrait être appliquée à une échelle commerciale** pour des déchets de bois de catégorie B.

@ [Lien vers l'article](#)

Pyrogazéification



Arkema France a déposé un brevet pour un procédé et une technologie de **production de gaz de synthèse enrichi en H₂ par Water Gas Shift catalytique sans ajout de H₂S**, rendant le procédé moins toxique et inflammable. Pour arriver à remplacer le H₂S, Arkema utilise le disulfure de diméthyle ou le diméthylsulfoxyde.

@ [Lien vers l'article](#)

Pyrogazéification



Une équipe de chercheurs chinois a développé un processus de valorisation innovant pour le **traitement des déchets de biomasse**. Le processus a été initialement développé à partir des résultats d'études expérimentales sur la pyrolyse avant d'être amélioré par l'application d'un algorithme d'optimisation. **Trois scénarios différents ont été analysés sur la base de l'indice de durabilité** (prise en compte consommation énergétique, sécurité, coûts).

@ [Lien vers l'article](#)

Pyrogazéification



Le groupe **IDEX a racheté l'unité de pyrogazéification pour cogénération d'EQTEC à Villers-sous-Montrond** dans le département du Doubs (ancien projet Synnov du Groupe Bonnefoy, qui avait échoué, et dont le réacteur de gazéification va être remplacé par la technologie d'EQTEC). L'ambition est d'en faire un projet vitrine en France.

@ [Lien vers l'article](#)

Gazéification hydrothermale



Des chercheurs ont estimé le rendement gaz de synthèse dans le processus de gazéification hydrothermale par l'application de modèles d'intelligence artificielle. Les données utilisées viennent des résultats expérimentaux à l'échelle laboratoire recueillis dans 50 publications scientifiques. Les résultats montrent que **la température du procédé et le temps de séjour** sont les facteurs qui **contribuent le plus aux fractions molaires de l'hydrogène et du méthane**.

@ [Lien vers l'article](#)

Méthanation catalytique



Une équipe de chercheurs belge a étudié **le réglage de la sélectivité de la méthanation du CO₂ par l'intermédiaire de MgO/Ni**. Ici, le Ni/SiO₂ combiné à de l'oxyde de magnésium MgO est comparé au Ni/SiO₂. Les résultats de cette étude **mettent en avant le rôle prometteur de l'interface MgO/Ni pour améliorer la réactivité de la méthanation du CO₂**.

@ [Lien vers l'article](#)

Hydrogène



Une équipe de chercheurs a **dressé un état de l'art de la recherche sur la production d'hydrogène par électrocatalyse**. **La Chine apparaît comme le contributeur le plus prolifique**, avec une croissance constante de la productivité de la recherche au cours de la dernière décennie. Les États-Unis, la Corée du Sud, l'Inde et l'Allemagne figurent parmi les cinq premiers pays en matière de recherche sur l'électrocatalyse.

@ [Lien vers l'article](#)

Hydrogène



Le CEA et Engie, en collaboration avec le CNRS et l'Université Grenoble-Alpes, ont annoncé le 28 juin le lancement de **la chaire industrielle Prosper-H2 dédiée aux carburants solaires**. Les équipes travailleront notamment sur les dispositifs photo-électrochimiques utilisés pour la production d'hydrogène solaire.

@ [Lien vers l'article](#)

Étude de la conception et des performances des catalyseurs pour la gazéification hydrothermale de la biomasse



EN BREF

Objet : article publié dans *Molecules*

Objectif : comparer et informer sur les avancées récentes des différents catalyseurs homogènes, hétérogènes et au charbon actif pour la gazéification hydrothermale ainsi que les obstacles à leur conception.

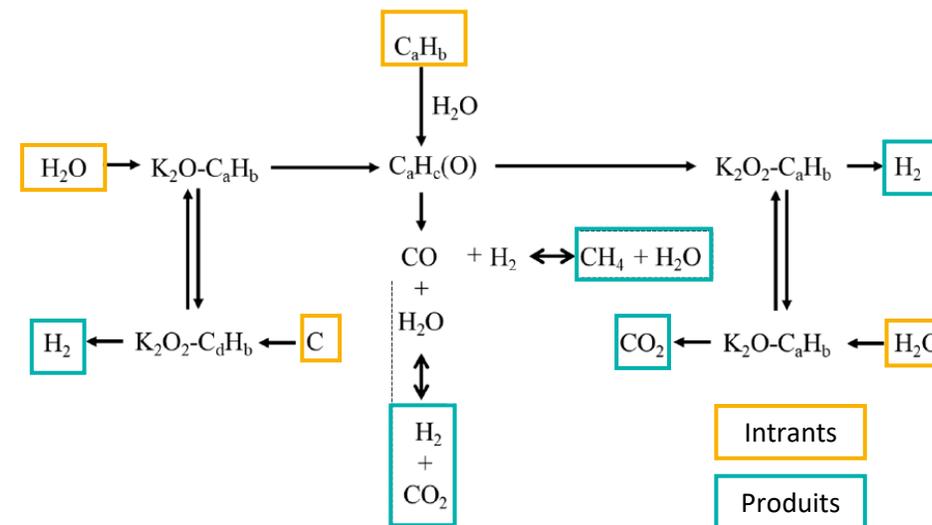
Résultats : les catalyseurs homogènes ont de meilleures performances, mais sont plus difficiles à récupérer. C'est pourquoi les hétérogènes sont plus souvent utilisés et leur performance est en train d'être améliorée.

Date : juin 2023

Une équipe de chercheurs canadiens a comparé la **performance des catalyseurs pour la production de H₂ par gazéification hydrothermale**. Les catalyseurs hétérogènes à base de **Ni** et **Ru** ont démontré d'excellents résultats et de nouveaux catalyseurs à base de carbone actif sont prometteurs.

Contexte

Actuellement, la principale voie de synthèse de l'H₂ est le reformage à la vapeur du méthane (95 % de la production globale), qui est fortement émettrice de CO₂. Pour substituer cette voie, la conversion par gazéification hydrothermale est capable de produire durablement de l'H₂ à partir de sources de biomasse lignocellulosique renouvelables. Ce processus utilise **l'eau dans des conditions subcritiques^[2] ou supercritiques^[3]** comme solvant et milieu de réaction pour désintégrer des substrats organiques complexes en gaz tels que H₂, CH₄, CO et CO₂. La gazéification hydrothermale avec de l'eau subcritique (SCWG) ne nécessite pas non plus de séchage de la biomasse, ce qui rend le processus efficace sur le plan énergétique. **Les catalyseurs jouent un rôle important** dans l'amélioration de l'efficacité du processus de SCWG, en particulier **l'efficacité de la conversion du carbone et la sélectivité des gaz**.



Mécanisme catalytique du potassium (homogène) dans le SCWG de la biomasse [1]

| Catalyseurs hétérogènes | Catalyseurs homogènes |
|--|--|
| Le catalyseur est dans la même phase que les réactifs et les produits de la réaction catalysée | Le catalyseur et les réactifs sont dans plusieurs phases |
| Ex. hydroxydes et carbonates | Ex. métaux, oxydes ionocovalents, oxydes ioniques |

Définition des catalyseurs hétérogènes et homogènes

[1] Schéma issu de l'article, [2] Eau subcritique : Eau chaude (entre 100 et 350 °C), maintenue à l'état liquide par modification de la pression sans pour autant atteindre l'état supercritique, [3] Etat supercritique : Fluide chauffé au-delà de sa température critique et comprimé au-dessus de sa pression critique sans devenir un gaz (dans le cadre de l'expérience, l'eau est chauffée à 374 °C à une pression de 221 bar);

Étude de la conception et des performances des catalyseurs pour la gazéification hydrothermale de la biomasse



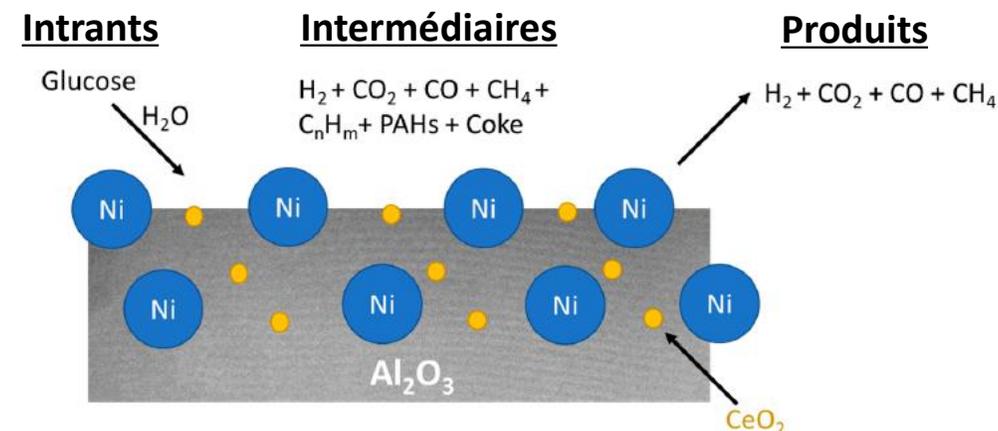
Résultats

Cette étude dresse un état de l'art des performances de différents types de catalyseurs^[2] (homogènes, hétérogènes et des plus récents à base de carbone) pour la gazéification hydrothermale. Les conclusions sont les suivantes :

- Bien que les catalyseurs **homogènes** (par exemple, KOH, K_2CO_3) soient plus performants que les catalyseurs hétérogènes, ils souffrent de **problèmes de corrosion, bouchage, récupération du catalyseur et de recyclage**.
- Les catalyseurs **hétérogènes** sont **relativement plus faciles à récupérer, mais ils peuvent être désactivés** notamment en cas d'encrassement, d'empoisonnement, de frittage et de formation de charbon dans le réacteur. D'autre part, les catalyseurs hétérogènes à base de **métaux de transition** (par exemple, Ni, Cu, Co et Ru) ont démontré **d'excellentes performances. Les catalyseurs à base de Ru et de Ni sont les plus largement utilisés**.
- De nouveaux **catalyseurs tels que le charbon actif, le charbon de bois, les NTC** (Nanotubes de carbone) et la biomasse lignocellulosique imprégnée de nanoparticules catalytiques **sont prometteurs**.

Application et valorisation

L'utilisation de catalyseurs pour la gazéification hydrothermale est prometteuse puisque cela permettra de réduire la température de réaction et donc, d'améliorer l'efficacité énergétique du système. Néanmoins, **certains obstacles empêchent pour le moment la commercialisation** de cette technologie : corrosion du réacteur, bouchage dû à la précipitation de sels minéraux, résistance aux températures et pressions élevées, etc. Des recherches sur ces sujets ainsi que des **analyses technico économiques et environnementales permettraient d'accélérer le passage à l'échelle de cette solution**.



Mécanisme catalytique (hétérogène) de Ni/Ce-Al₂O₃ dans le SCWG du glucose [1]

[1] Schéma issu de l'article ; [2] catalyseur homogène : le catalyseur est dans la même phase que les réactifs et les produits de la réaction catalysée (par ex. : hydroxydes et carbonates), catalyseur hétérogène : le catalyseur et les réactifs sont dans plusieurs phases (par ex. : métaux, oxydes ionocovalents, oxydes ioniques)

Analyses comparatives des systèmes power-to-gas intégrant les SOEC et la méthanation

EN BREF

- Objet :** article publié dans *Thermal Science and Engineering Progress*
- Objectif :** comparer les systèmes intégrés de la méthanation et des SOEC [1] avec deux modes, électrolyse de l'eau et coélectrolyse, pour la production de gaz vert
- Résultats :** le mode coélectrolyse est plus performant, mais reste plus cher en termes de LCOE [2]. L'ajout de CO et de chaleur améliore la performance.
- Date :** mai 2023

Une équipe de chercheurs thaïlandais a fait une analyse comparative de deux systèmes intégrés SOEC [1] pour la production de gaz vert (méthanation). Le mode « coélectrolyse de l'eau et du CO₂ » est le mode le plus performant d'un point de vue énergétique et environnemental.

Contexte

Le processus de méthanation catalytique permet de produire du CH₄ à partir de CO₂ et de H₂. Il peut être couplé avec une technologie SOEC en amont [1] qui peut fonctionner selon deux modes. Dans le mode « électrolyse de l'eau », l'H₂ est tout d'abord obtenu puis il est mélangé avec la source de CO₂ avant d'être injecté dans l'unité de méthanation. Dans le mode « coélectrolyse de la vapeur et du dioxyde de carbone », le système SOEC permet de réaliser l'électrolyse simultanée de l'eau et du CO₂. Un gaz de synthèse contenant du CO₂, CO et du H₂ est alors obtenu. Il peut être directement introduit dans l'unité de méthanation. Ce mode nécessite un apport énergétique plus conséquent pour alimenter l'électrolyseur SOEC, mais améliore les performances de la réaction de méthanation en raison de la présence de CO dans le gaz en entrée.

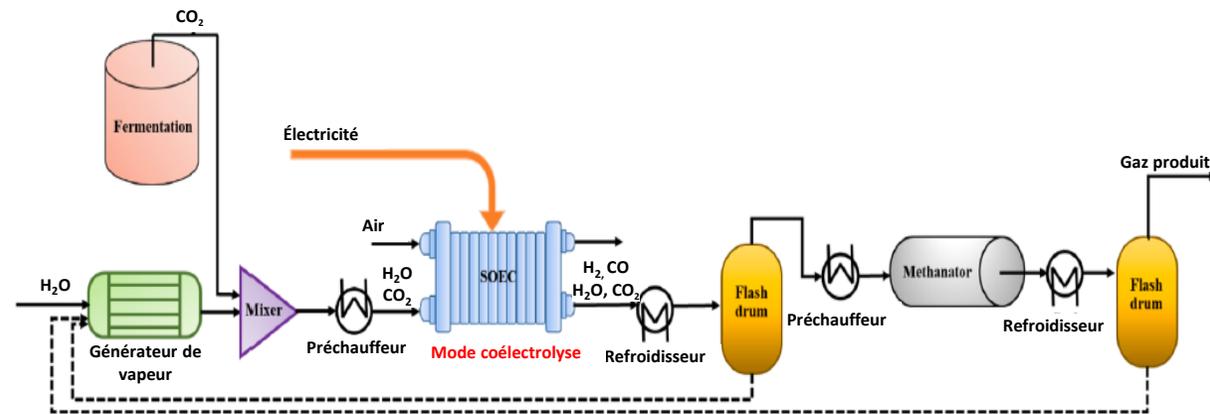
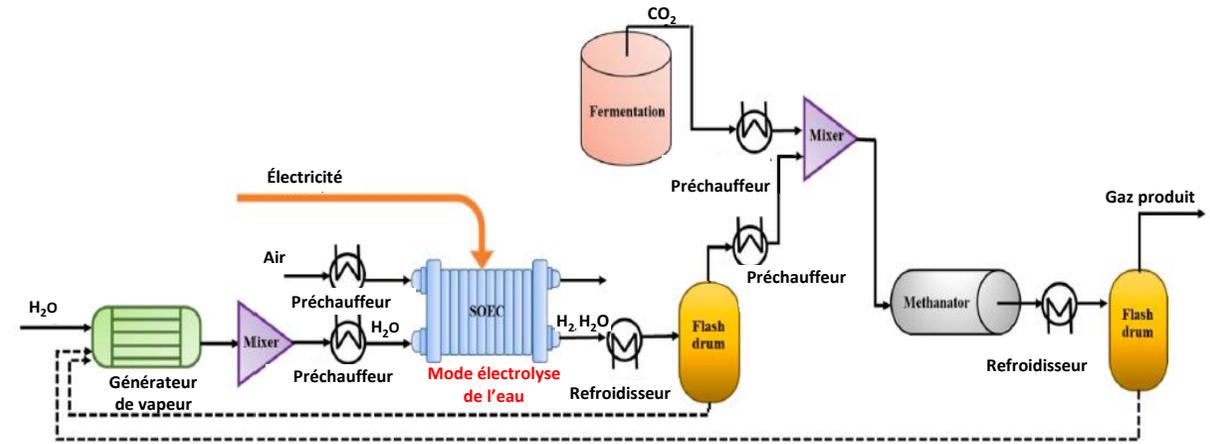


Schéma du processus de méthanation avec des SOECs en mode électrolyse de l'eau (au-dessus) et en mode coélectrolyse (en bas) [3]

[1] cellules d'électrolyse à oxyde solide – fonctionnant à haute température ; [2] Prix complet actualisé de l'énergie ; [3] Schéma issu de l'article

Analyses comparatives des systèmes power-to-gas intégrant les SOEC et la méthanation

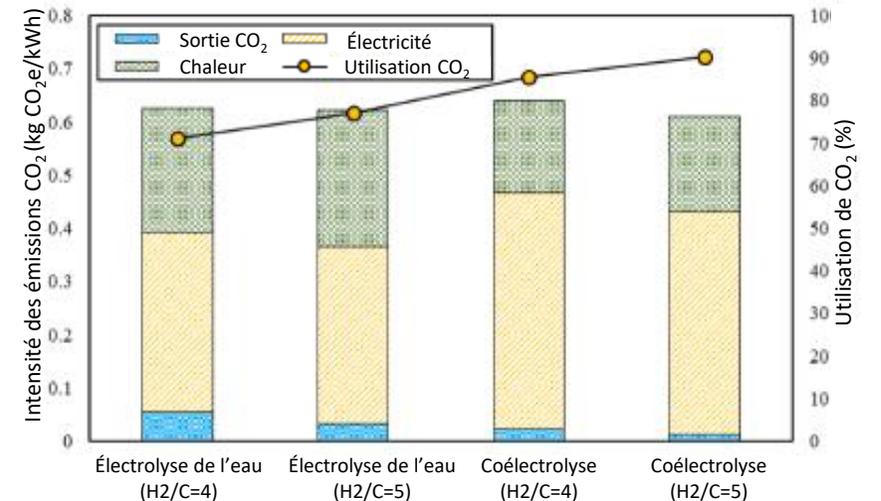
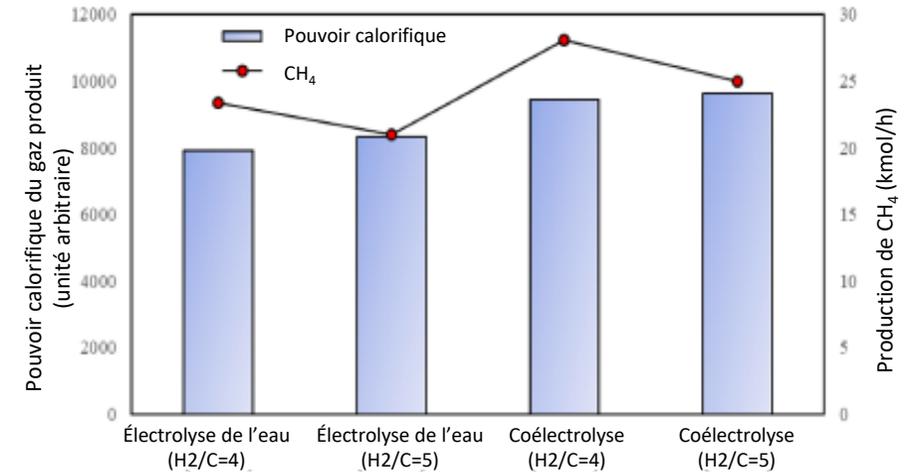
Résultats

Cette étude se concentre sur l'analyse comparative (technique, économique et environnementale) de deux systèmes intégrés de **méthanation avec SOEC** : **(1) en mode électrolyse de l'eau et (2) en mode coélectrolyse eau et CO₂**. Les résultats sont les suivants :

- Le rendement en CH₄ de la **méthanation en mode coélectrolyse eau et CO₂** est **plus élevé** que celui de la méthanation du CO₂ seul (les maximums sont atteints à 400 °C). De plus, **le rendement énergétique du système intégré de méthanation en mode coélectrolyse est supérieur au mode électrolyse de l'eau d'environ 2%**.
- La mise en place d'un **système de récupération de chaleur fatale permettrait d'augmenter jusqu'à 6 %** l'efficacité énergétique de la chaîne technologique (SOEC couplée avec l'unité de méthanation)
- Le **coût actualisé du produit** dans le système utilisant la SOEC avec électrolyse de l'eau est inférieur (201-212 \$/MWh) à celui du mode avec coélectrolyse (236-249 \$/MWh), car pour le deuxième mode les coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance sont plus élevés d'environ 10-13%.
- L'impact principal sur les émissions de CO₂ provient de l'utilisation de l'électricité** ce qui pose la question de l'intensité carbone du réseau qui alimente le système (cf. figure ci-contre). Avec de l'électricité d'origine éolienne, le mode co-électrolyse de l'eau et du CO₂ présente la plus faible empreinte carbone.

Application et valorisation

Cette étude a permis de démontrer que **l'utilisation des SOEC avec le mode coélectrolyse de l'eau et du CO₂** permet d'obtenir les meilleurs résultats en termes de rendement en méthane et d'impact. Cependant, cette **technologie est encore peu mature** (TRL 6-7) et les coûts restent élevés. Par conséquent, des développements sont nécessaires pour sa commercialisation.



Performance de la méthanation pour les deux systèmes intégrés (en haut) et intensité CO₂ des deux systèmes intégrés avec le gaz naturel comme source d'électricité (en bas) [1] ; [2]

[1] Schémas issus de l'article ; [2] Dans le mode co-électrolyse, le rapport H₂/C correspond au ratio entre le nombre de mol de H₂ et le nombre de mol de CO ; dans le mode électrolyse de l'eau, le rapport H₂/C correspond au ratio entre le nombre de mol de H₂ et le nombre de mol de CO₂

Étude du potentiel d'amélioration de la méthanation du CO₂ grâce à l'utilisation de Ni sur différents supports

EN BREF

-  **Objet** : article publié dans *Molecular Catalysis*
-  **Objectif** : étudier l'influence de différents supports (ZrO₂, Ce-ZrO₂, La-ZrO₂ et CeO₂)^[1] pour le Ni utilisé comme catalyseur^[2] sur le processus de méthanation catalytique
-  **Résultats** : alors que le ZrO₂ rend le catalyseur Ni inactif, l'ajout d'oxyde de cérium et de lanthane au ZrO₂ améliore les performances de ce dernier
-  **Date** : 14 juillet 2023

Une équipe de chercheurs égyptiens a étudié l'effet des supports ZrO₂, Ce-ZrO₂, La-ZrO₂ et CeO₂ sur le processus de méthanation catalytique utilisant du Ni comme catalyseur. L'incorporation de 2,5 % en masse de cérium (Ce) ou d'oxyde de lanthane (La₂O₃ noté La) au zircon (ZrO₂) permet d'augmenter le taux de conversion de CO₂ en CH₄ après quelques heures de réaction par rapport à une utilisation seule du ZrO₂.

Contexte

La méthanation catalytique est une réaction permettant la formation de CH₄ à partir de H₂, de CO₂ et/ou de CO. Cette réaction est activée grâce à la présence d'un catalyseur qui est généralement dispersé sur un autre matériau appelé support. Le choix du support du catalyseur influe sur son activité^[3], sur sa stabilité et sur sa sélectivité^[4] : le support peut interagir avec certains réactifs, mais aussi conditionner les interactions du catalyseur avec son environnement. Parmi les supports connus, ceux à base de ZrO₂ font l'objet d'une attention toute particulière des chercheurs depuis quelques années.

[Lien vers l'article](#)

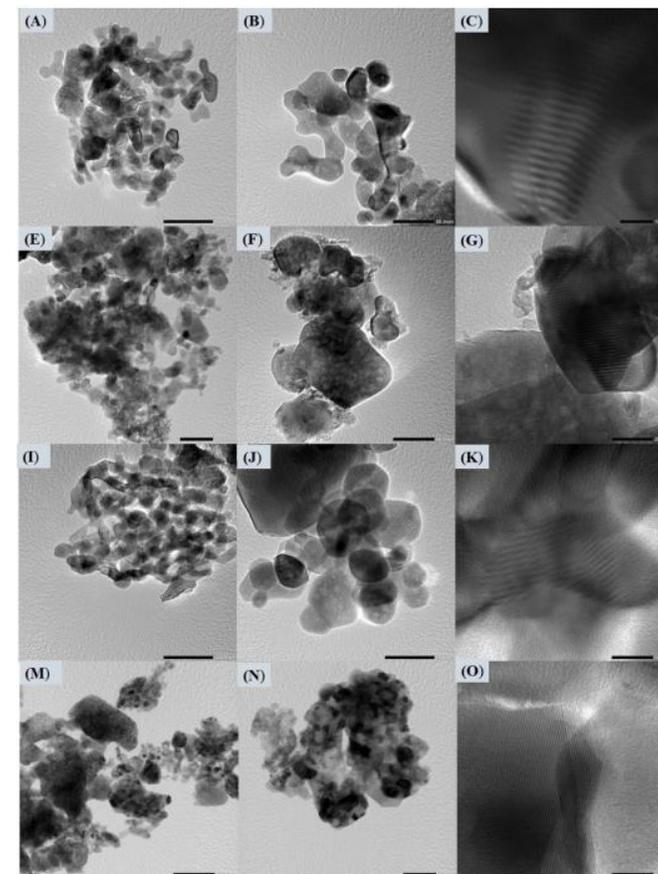


Image des supports étudiés obtenue à l'aide d'une technique de microscopie électronique de transmission^[5]

(A-B-C) Ni/ZrO₂ à l'échelle de 100 nm, 50 nm et 10 nm ; (E-F-G) Ni/CeO₂ à l'échelle de 100 nm, 50 nm et 20 nm ; (I-J-K) Ni/Ce-ZrO₂ à l'échelle de 100 nm, 50 nm et 10 nm ; (M-N-O) Ni/La-ZrO₂ à l'échelle de 100 nm, 50 nm et 10 nm

[1] Matériau possédant une grande surface sur laquelle il est possible de déposer un catalyseur dans le but d'augmenter le plus possible l'aire où ce dernier peut réagir [2] Les catalyseurs sont généralement constitués d'une phase active métallique, siège de la réaction, qui est dispersée sur un support poreux ou non poreux, de nature oxyde comme l'alumine (Al₂O₃), la silice (SiO₂) ou la cérine (CeO₂) ; [3] Capacité d'un catalyseur à augmenter la vitesse de réaction ; [4] Capacité d'un catalyseur à favoriser la production du produit désiré par rapport aux produits secondaires ; [5] Images issues de l'article

Étude du potentiel d'amélioration de la méthanation du CO₂ grâce à l'utilisation de Ni sur différents supports



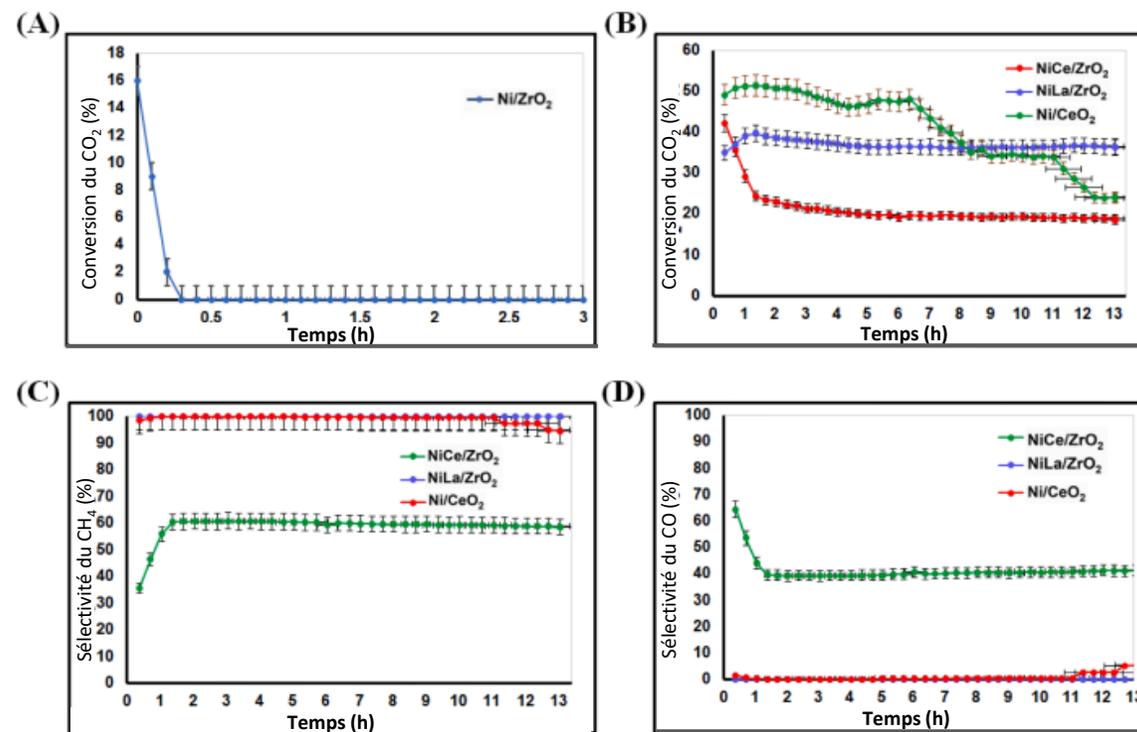
Résultats

Cette étude a permis de tester l'efficacité de différents supports à base de zircon (ZrO₂) sur des catalyseurs à base de Ni. Pour chaque support testé avec le Ni, la réaction de méthanation catalytique est étudiée pendant 13 heures.

- Lorsque le support est composé **exclusivement de zircon**, le **catalyseur (Ni/ZrO₂)** devient **inactif** dans le cas d'une méthanation à 350 °C.
- Après **incorporation de 2,5 % en masse de cérium (Ce)**, le catalyseur (Ni/Ce-ZrO₂) reste actif avec environ **19 % de conversion de CO₂ en CH₄** après 13 heures de fonctionnement.
- Après **incorporation de 2,5 % en masse d'oxyde de lanthane (La₂O₃)**, le catalyseur (Ni/La-ZrO₂) fonctionne en permanence avec **une conversion d'environ 37 % de CO₂ au bout de 13 heures de réaction** et une sélectivité de 100 % pour le CH₄.
- Lorsque le support est exclusivement composé **d'oxyde de cérium (CeO₂)**, les performances du catalyseur (Ni/CeO₂) sont **intéressantes pour des réactions d'une durée inférieure à 7 heures**. Au-delà de cette période, les résultats obtenus sont moins encourageants en raison de la **faible stabilité du support**. Entre la onzième et treizième heure d'expérience, le taux de conversion du CO₂ chute par exemple de 33 % à 24 % et la sélectivité de CH₄ diminue de 99,5 % à 94,7 %.

Application et valorisation

Cette étude constitue **une première étape vers un potentiel développement des supports à base de zircon** pour la méthanation catalytique. Les résultats obtenus montrent que **l'ajout d'espèces telles que Ce ou La₂O₃ à la zircon permet d'améliorer l'efficacité du Ni en tant que catalyseur**. Des recherches complémentaires restent néanmoins nécessaires pour confirmer l'impact positif de ces supports sur le procédé global de méthanation.



Évolution des paramètres caractéristiques de la réaction de méthanation catalytique pour différents supports [1]

[1] Schémas issus de l'article

Méthanation biologique dans les réacteurs à lit ruisselant (TBR) - une revue critique

EN BREF

-  **Objet** : article publié dans *Biosource Technology*
-  **Objectif** : identifier les paramètres déterminants à l'amélioration des performances d'un réacteur à lit ruisselant (TBR) pendant la construction, l'inoculation et le fonctionnement du réacteur.
-  **Résultats** : des stratégies opérationnelles et des besoins de recherche supplémentaires ont été identifiés afin d'améliorer les performances globales du réacteur à lit ruisselant.
-  **Date** : juin 2023

Des chercheurs allemands ont réalisé un état de l'art sur les **réacteurs à lit ruisselant (TBR)** pour la méthanation biologique. **Plusieurs possibilités d'optimisation du processus ont été identifiées**, par exemple sur l'écoulement du liquide et la formation de biofilms.

Contexte

La méthanation biologique utilise des méthanogènes pour synthétiser du CH_4 . Les réacteurs biologiques montrent une grande tolérance aux impuretés, contrairement à la méthanation catalytique. Cependant, **l'une des limites est la cinétique lente des méthanogènes**. Le transfert de masse peut être augmenté en **améliorant l'interface limite de phase** [2] par le design du réacteur. **Une interface limite de phase améliorée a été identifiée dans les réacteurs à lit ruisselant (TBR) qui permettent d'optimiser les échanges de matière**. Cependant, la technologie des TBR est pour le moment principalement mise en œuvre à l'échelle laboratoire. Cette étude recense ainsi les **différents axes de recherche à approfondir pour accélérer son industrialisation**.

[Lien vers l'article](#)

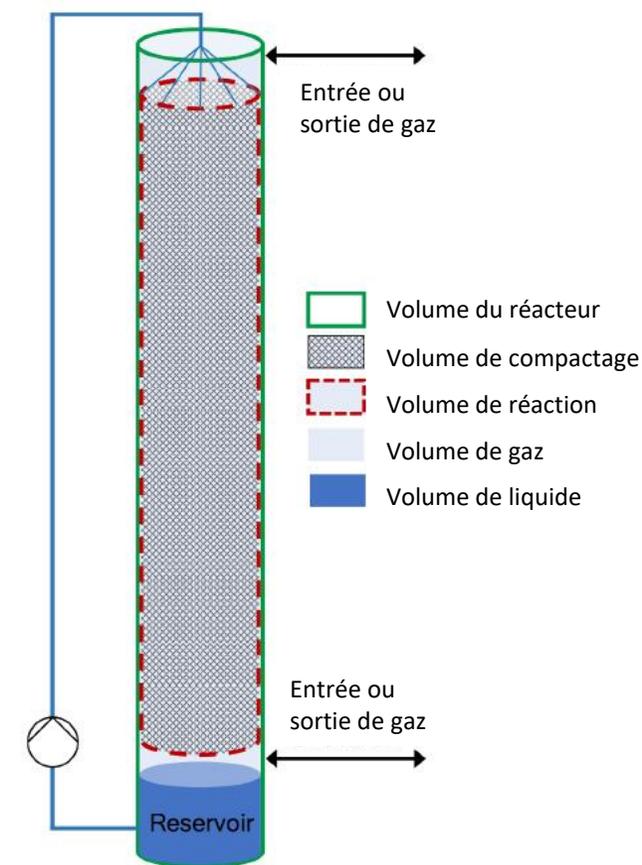


Schéma simplifié d'un réacteur à lit ruisselant [1]

[1] Schéma issu de l'article ; [2] Couche limite par laquelle ont lieu les échanges et les interactions entre deux éléments

Méthanation biologique dans les réacteurs à lit ruisselant (TBR) - une revue critique

Résultats

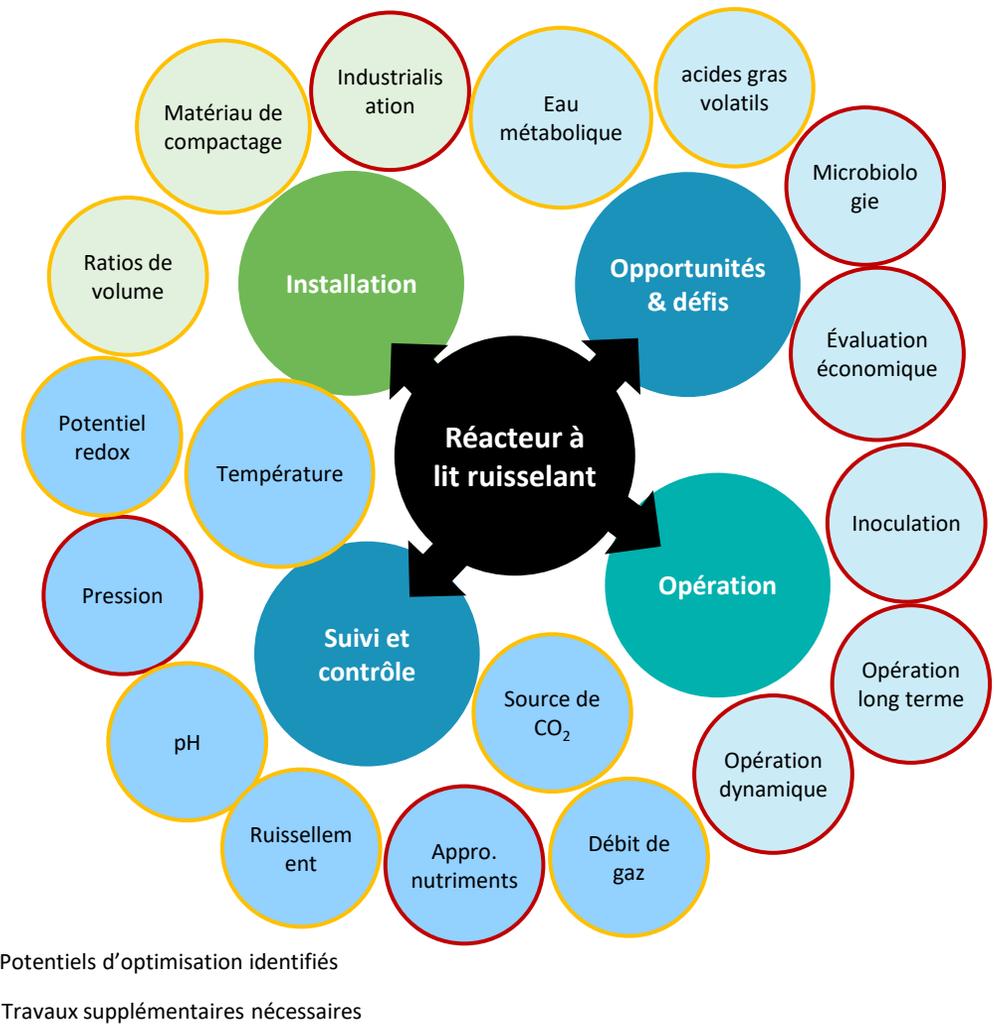
Cette étude a permis d'identifier plusieurs axes d'optimisation susceptibles d'améliorer les performances du réacteur (TBR) :

- Application d'un **matériau porteur de biofilms** au lit de compactage ayant une surface spécifique élevée de plus de $300 \text{ m}^2/\text{m}^3$ et des valeurs de transfert de masse élevées, par exemple des matériaux à base d'argile.
- Formation d'un **biofilm homogène** sur l'ensemble du lit de compactage, dominé par des méthanogènes hydrogénotrophes.
- **Mise en place de solutions de ruissellement** appropriées avec par exemple une charge hydraulique continue inférieure à $10 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$ ou des charges plus élevées, mais intermittentes.
- **Gestion ciblée des nutriments** et possibilité d'utiliser des sous-produits de la digestion anaérobie, par exemple l'eau de rejet provenant de la déshydratation du digestat.
- **Stabilisation du niveau de pH** par le maintien d'une concentration de NH_4^+ d'environ 400-800 mg/l.
- **Réduction de l'effet de dilution** avec l'eau métabolique, par exemple en intégrant un système de membrane pour l'élimination de l'eau formée par réaction de méthanation.
- Intégration d'un **système de surveillance** du potentiel redox et d'autres paramètres

Application et valorisation

La technologie TBR pour la méthanation biologique est encore peu mature et des recherches plus approfondies sont encore nécessaires, par exemple sur la gestion en temps réel de l'approvisionnement en nutriments du réacteur. Afin de prouver la viabilité industrielle de la technologie, **des volumes supérieurs à 1 m^3 doivent être testés**. D'autre part, une évaluation économique serait nécessaire pour déterminer l'intérêt de cette technologie, par rapport aux alternatives.

[Lien vers l'article](#)



○ Potentiels d'optimisation identifiés

○ Travaux supplémentaires nécessaires

Vue d'ensemble des paramètres du réacteur à lit ruisselant analysés [1]

[1] Schéma issu de l'article et complété

Augmentation de la production de méthane par alimentation en CO₂ pulsé



EN BREF

- Objet** : article publié dans *Chemical Engineering Journal*
- Objectif** : optimiser le mode d'injection du CO₂ dans un réacteur de digestion anaérobie et déterminer l'effet du CO₂ exogène sur les voies métaboliques et la distribution de la communauté microbienne.
- Résultats** : le mode CO₂ pulsé avec un débit de 0.66 L/L/j^[2] permet d'augmenter le taux de méthane de 27.1 % et de consommer jusqu'à 59 % du CO₂.
- Date** : juillet 2023

Des chercheurs chinois ont étudié la performance d'un digesteur anaérobie sous **différents débits et modes d'injection de CO₂**. Lorsque le CO₂ est injecté **de manière pulsée**, les **rendements en méthane peuvent être augmentés** jusqu'à de 27,1 % par rapport au témoin.

Contexte

L'**injection de CO₂ in situ dans les systèmes de digestion anaérobie** favorise une réaction de méthanation et permet ainsi de maximiser la concentration de CH₄ en sortie du digesteur. L'augmentation de la production de CH₄ après enrichissement en CO₂ peut en effet varier entre **13 % et 138 %** selon les quelques études conduites sur le sujet. Ces variations s'expliquent notamment par les différentes méthodes d'injection utilisées pour introduire le CO₂ dans les réacteurs de digestion anaérobie.

Cette récente publication s'emploie à mieux comprendre l'impact de l'injection du **CO₂ exogène pour la méthanation biologique** et propose plusieurs pistes d'optimisation.

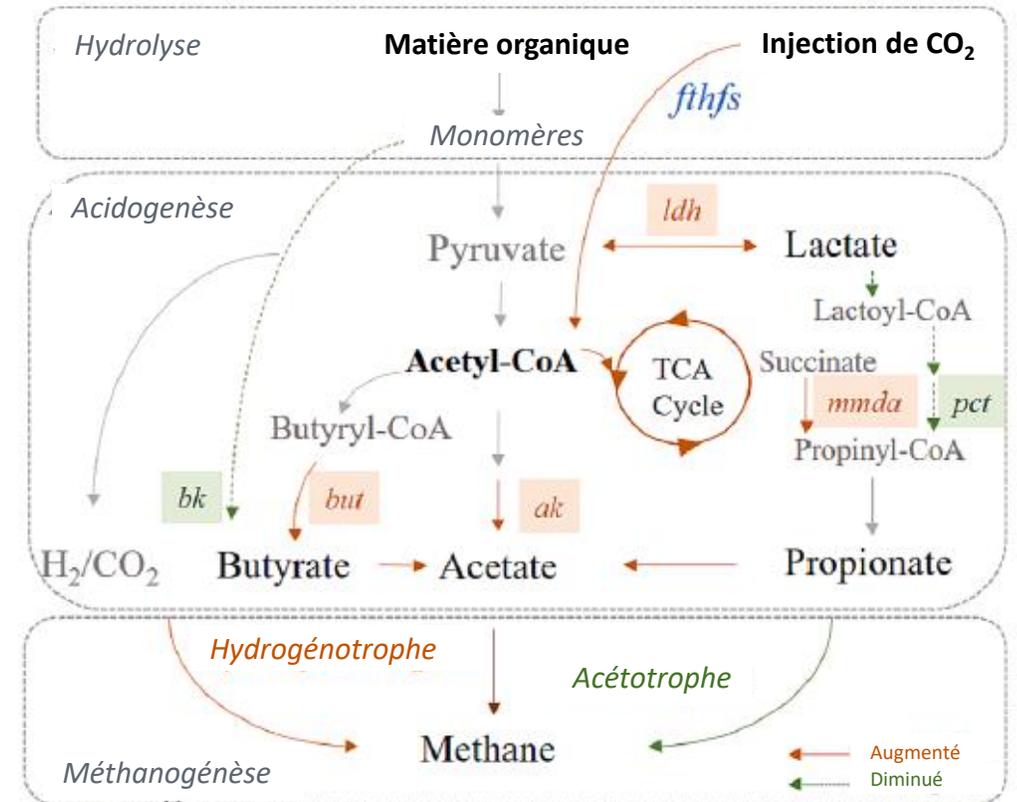


Schéma du processus de méthanation biologique avec injection de CO₂ [1]

[1] Schéma issu de l'article ; [2] volume de CO₂ injecté par volume du réacteur par jour ; [3] digestion anaérobie

Augmentation de la production de méthane par alimentation en CO₂ pulsé



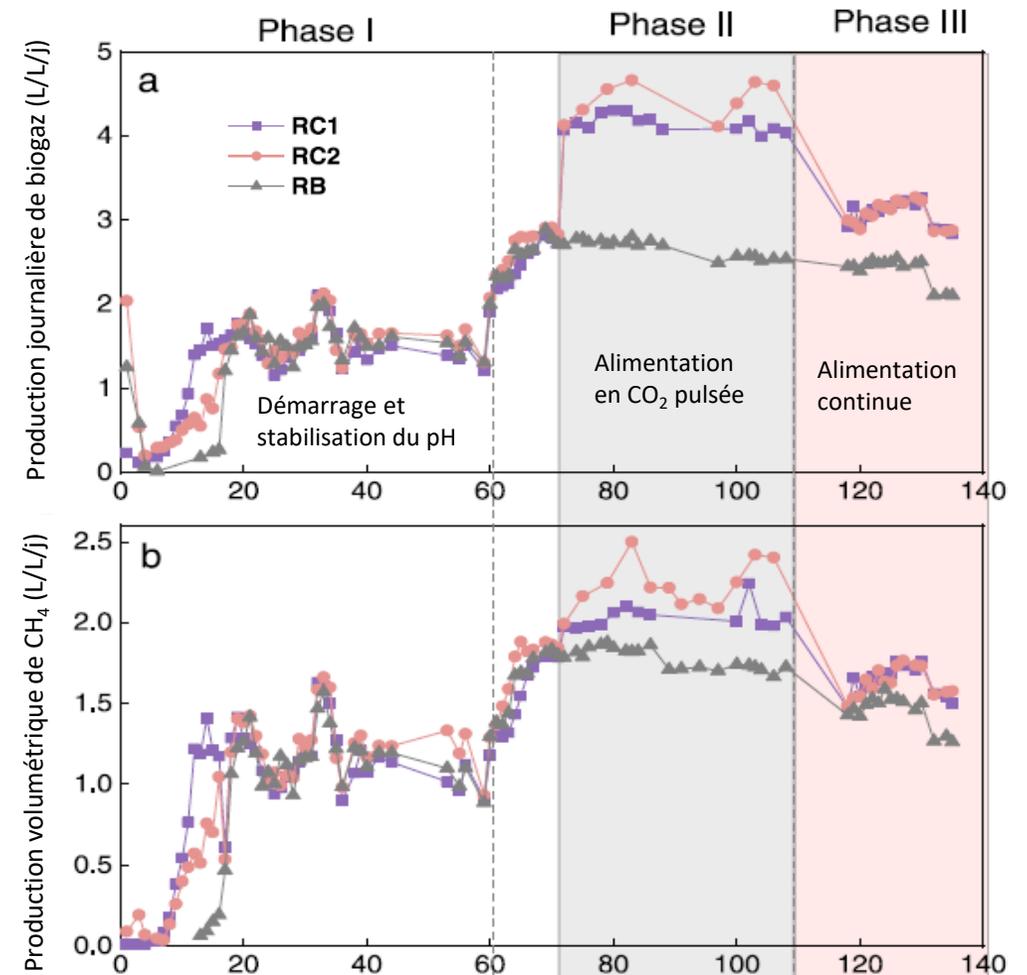
Résultats

Dans cette étude, les performances d'un digesteur agité en continu traitant des déchets alimentaires ont été évaluées sous **différents taux d'injection** (RC1-1.32 L/L/j, RC2-0.66 L/L/j [2] et RB sans injection de CO₂) et **différents modes** (alimentation pulsée et alimentation continue). L'objectif est de trouver la meilleure configuration pour une production maximale de CH₄ tout en garantissant la stabilité du procédé. Les résultats sont les suivants :

- **Le taux d'injection optimal de CO₂ correspond au cas RC2.** Il pourrait être encore augmenté avec une meilleure compréhension des communautés microbiennes.
- **L'injection intermittente du CO₂ a favorisé l'hydrolyse**
- **L'alimentation pulsée en CO₂ est plus performante que le mode d'alimentation continue** : avec une cinétique de bioconversion plus élevée, ainsi qu'un meilleur rendement en méthane (12.4 % en continu vs 19,3% pulsé). De plus, elle peut offrir une plus grande tolérance à la surcharge organique et aux substances toxiques, permettant un temps de dégradation suffisant pour les substances inhibitrices.
- Entre **35 à 59 % du CO₂ injecté supplémentaire peut être valorisé** dans les digesteurs avec une alimentation pulsée en CO₂. **Le rendement en méthane a ainsi été augmenté d'entre 19,3 % et 27,1 %** par rapport au réacteur de contrôle (RB). Il reste à identifier plus précisément les voies de production de CH₄ qui sont prédominantes.

Application et valorisation

Les résultats de cette étude sont très encourageants. L'utilisation du **CO₂ pulsé est peu coûteuse et permet d'augmenter significativement la production de méthane**. Néanmoins, ce procédé est encore peu étudié avec des résultats variés et une **recherche approfondie et robuste** permettrait son développement. De même, une **compréhension plus approfondie sur les cultures microbiennes et sous-produits** pourrait permettre d'accélérer le développement de la technologie davantage.



Production de biogaz et biométhane avec les différents débits et modes d'injection de CO₂ [1]

[1] Schéma issu de l'article ; [2] L/L/jour = Litre de CO₂ injecté par volume de réacteur (en litre) par jour ;

Électrométhanogénèse pour la conversion en CH₄ des gaz résiduels de la carbonisation hydrothermale



EN BREF



Objet : article publié dans *Renewable Energy*



Objectif : étudier la faisabilité technique d'utiliser des gaz résiduels de HTC^[2] comme matière première pour l'électrométhanogénèse.



Résultats : l'EM^[3] de HTC permet d'obtenir un biogaz avec une teneur en CH₄ de 70 %. Mais le procédé reste globalement moins performant qu'avec une alimentation en CO₂ pur.



Date : juillet 2023

Des chercheurs espagnols ont étudié la **performance de l'électrométhanogénèse pour valoriser le CO₂ issu de carbonisation hydrothermale (HTC)**. Le gaz de HTC a démontré des **performances moindres que le CO₂ pur**, mais a quand même permis d'obtenir un biogaz riche en méthane à 70 %.

Contexte

La carbonisation hydrothermale (HTC) est une technologie thermochimique pour la gestion des déchets. **Elle produit une phase gazeuse composée principalement de CO₂**, pouvant être valorisée. Il s'agit d'une matière première idéale pour la production de méthane par électrométhanogénèse (EM). **L'EM est un processus biologique qui convertit du CO₂ en méthane du côté de la cathode d'un système bioélectrochimique (BES)**. Son opération se fait à des températures et des pressions ambiantes et fait intervenir des bactéries comme catalyseurs. Jusqu'à ce jour, il a été démontré que le CO₂ pur et celui présent dans le biogaz en sortie de méthaniseur constituent des substrats appropriés pour l'EM. Toutefois, **l'utilisation d'effluents gazeux de la HTC comme matière première n'a pas encore été étudiée.**

[Lien vers l'article](#)

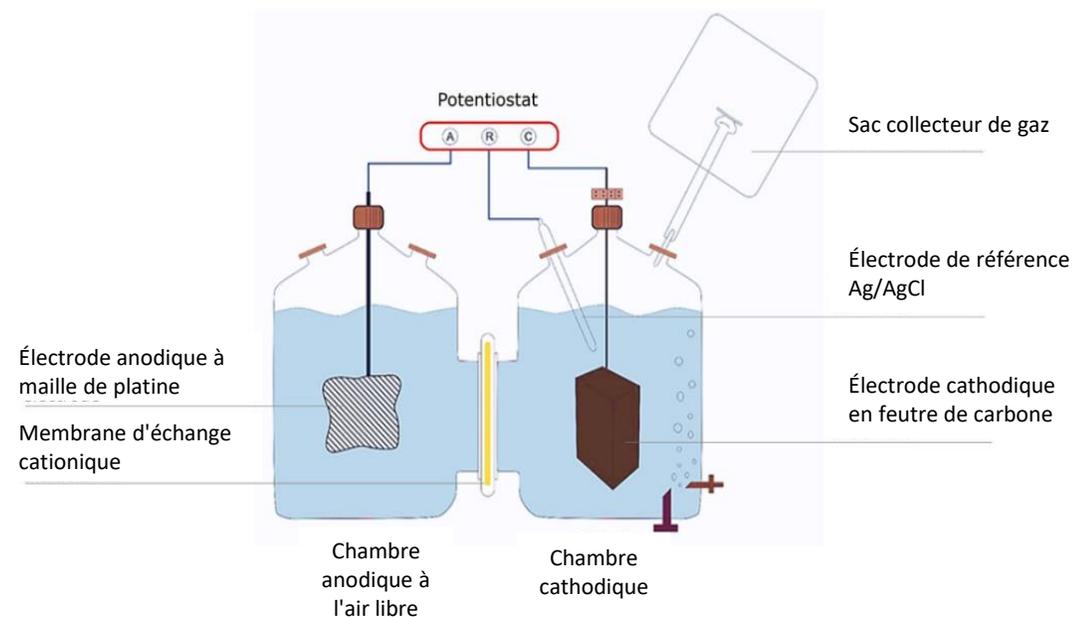


Schéma du réacteur [1]

[1] Schéma issu de l'article; [2] HTC : carbonisation hydrothermale; [3] EM : électrométhanogénèse

Électrométhanogénèse pour la conversion en CH₄ des gaz résiduels de la carbonisation hydrothermale



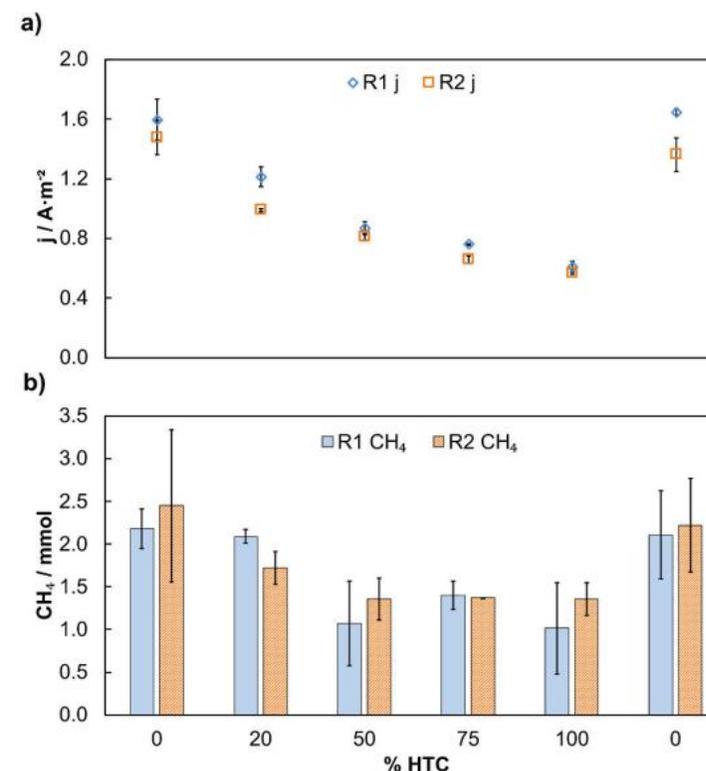
Résultats

Cette étude se concentre sur la **faisabilité technique d'utiliser des gaz résiduels de HTC** comme matière première pour l'électrométhanogénèse, avec une attention particulière sur la **performance et l'impact sur les communautés microbiennes cathodophiles**. En absence du gaz résiduel de HTC, le process est alimenté par du CO₂ pur pour comparaison. Deux réacteurs identiques sont étudiés.

- **La production de méthane diminue**, passant d'environ 2,3 mmol par cycle [2] (0 % HTC) à 1,2 mmol par cycle (100 % HTC), mais **en définitive l'EM avec HTC a permis d'obtenir un biogaz avec 70 % de CH₄**.
- **Le courant diminue** de 1,5 Am⁻² en l'absence de HTC à 0,6 Am⁻² lorsque seul le HTC alimente les réacteurs, ce qui révèle un impact négatif sur les micro-organismes. Cette baisse de la densité de courant et de la production de méthane **pourrait être liée à la présence de monoxyde de carbone (CO) dans le HTC**, car le CO peut inhiber l'activité.
- **Les changements provoqués par l'utilisation de HTC sont réversibles** puisqu'à la fin de l'expérimentation avec 0 % de HTC, on retrouve les valeurs initiales.
- **L'alimentation en HTC a également eu un impact négatif sur les communautés microbiennes cathodiques**, en particulier sur la famille d'archées Methanomicrobiaceae, et a provoqué une diminution du nombre total de copies de gènes des bactéries.

Application et valorisation

L'utilisation de l'EM comme procédé pour valoriser du CO₂ résiduel est faisable pour produire du CH₄. Toutefois, **cette étude a démontré des écarts de performance quand le gaz de HTC est utilisé comparé à du CO₂ pur**. Des études plus approfondies ou à grande échelle seraient nécessaires pour **valider l'intérêt de l'EM pour les gaz résiduels de HTC**.



Densité du courant (a) et production de méthane (b) en fonction de la quantité de HTC pour les deux réacteurs identiques (R1, R2) [1]

[1] Schémas issus de l'article ; [2] cycles de 7 jours en mode batch

Découverte d'un gisement d'hydrogène blanc dans le bassin minier lorrain : promesses et limites

EN BREF

Objet : décryptage des enjeux liés à l'hydrogène naturel dit « blanc », suite à la publication d'un article de presse dans *Les Échos* sur la découverte d'un gisement potentiel dans le bassin minier lorrain

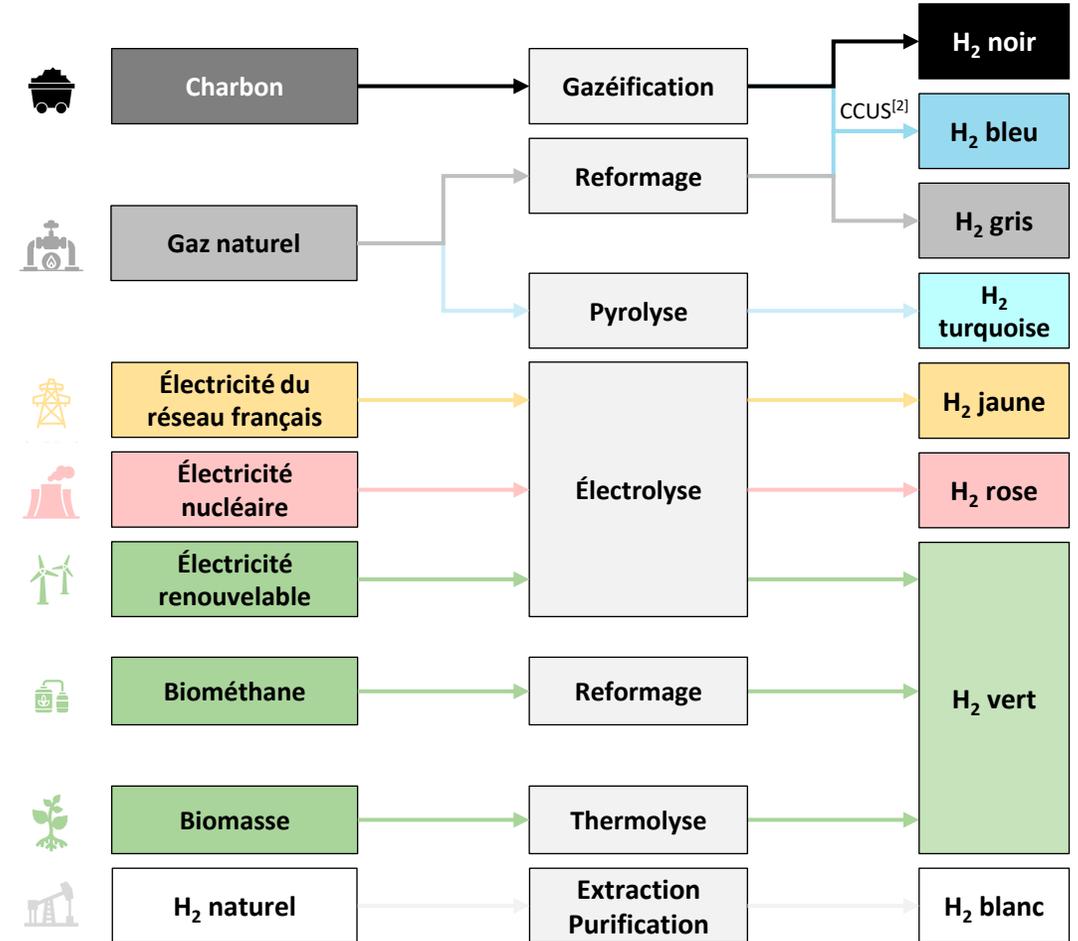
Synthèse : l'hydrogène naturel est une ressource prometteuse du fait de son faible impact carbone, son caractère renouvelable et son coût compétitif supposés. Néanmoins, de nombreuses inconnues demeurent : dix à quinze années seront nécessaires avant de la voir, peut-être, jouer un rôle dans la transition énergétique.

L'annonce de la FDE^[1] en mai dernier a fait grand bruit : une équipe de chercheurs du CNRS et de l'université de Lorraine aurait découvert un **important gisement d'hydrogène blanc** dans le **bassin houiller lorrain**. Si de nouvelles mesures confirmaient ces premiers résultats, il s'agirait du plus gros réservoir mondial d'hydrogène blanc jamais découvert.

Contexte

L'hydrogène H₂ est sans doute amené à jouer un rôle majeur dans le futur système énergétique mondial parce qu'il offre une **solution de décarbonation** de nombreux usages, et constitue un levier d'**intégration des énergies renouvelables** dans le mix énergétique. Pour différencier H₂ selon ses modes de production, **plus ou moins décarbonés**, on lui attribue généralement une couleur : gris, bleu, jaune, vert, etc. Selon cette terminologie, **on appelle « hydrogène blanc », l'hydrogène qui se forme naturellement dans le sous-sol terrestre.**

Sondant initialement les profondeurs du bassin minier lorrain à la recherche de méthane, c'est ce H₂ blanc dont les chercheurs ont détecté la présence, à des **concentrations volumiques qui dépassent 15% à 1100 mètres de profondeur.**



Couleurs et voies de production d'hydrogène

Chaque méthode de production d'hydrogène est associée à une couleur selon la source et la technologie de production associés, traduisant intuitivement leur impact environnemental. A ne pas confondre avec les définitions officielles de l'hydrogène renouvelable / bas carbone / carboné, en cours d'élaboration dans les textes européens.

[1] La Française De l'Énergie est un producteur de gaz, électricité verte et chaleur ;

[2] Carbon Capture Utilization & Storage

Découverte d'un gisement d'hydrogène blanc dans le bassin minier lorrain : promesses et limites



Selon les géologues, cet hydrogène « naturel » serait en réalité produit à des profondeurs plus importantes : les premières simulations laissent penser que **la concentration pourrait dépasser 90% à 3 000 mètres de profondeur**. Dans ce cas, le gisement lorrain pourrait contenir jusqu'à **46 millions de tonnes d'H₂**, près de la moitié de la demande mondiale annuelle d'hydrogène^[1].

Un intérêt récent

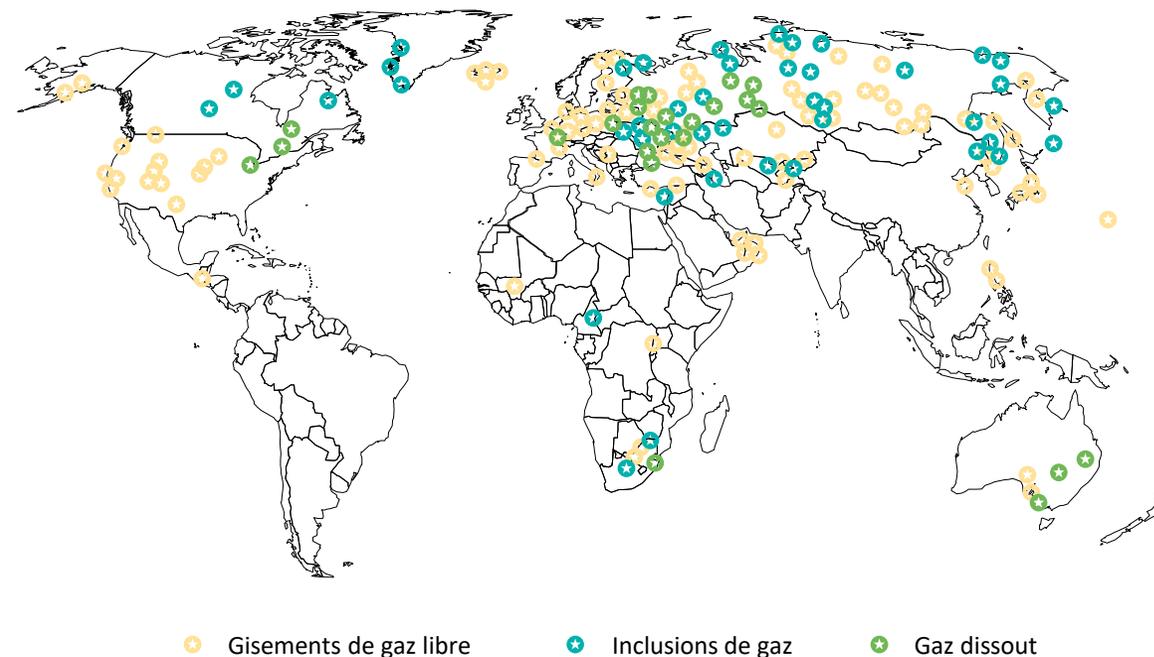
La découverte de la présence d'hydrogène dans le sous-sol terrestre ne date pas de mai 2023 : il y a plusieurs décennies déjà que l'existence d'hydrogène naturel a pu être observée, sous la forme majoritaire de **fuites au niveau des dorsales océaniques, des ophiolites^[2] ou même de la couche continentale**. La cartographie progressive de ces sources tout au long des dernières décennies (cf. carte) a permis de montrer que **l'hydrogène naturel est (presque) partout** pour peu qu'on se donne la peine de le chercher !

Pendant longtemps cependant, ces gisements ont fait l'objet de recherches limitées :

- H₂ n'avait pas été identifié comme une ressource clé pour une transition énergétique qui n'était encore qu'une lointaine réalité,
- Surtout observé sous forme de fuites, l'hydrogène blanc semblait peu exploitable,
- On croyait alors que l'hydrogène naturel serait trop dilué (concentration de quelques pourcents dans le sous-sol terrestre) pour présenter un intérêt économique.

Le **gain d'intérêt récent** pour cette ressource tient non seulement de la prise de conscience des enjeux de la transition énergétique et du rôle potentiel joué par H₂ dans celle-ci, mais aussi de la découverte de gisements avec une forte concentration en hydrogène (e.g., H₂ pur à 98% sur le site de Bourakébougou, à 60 kilomètres de Bamako, au Mali).

Plusieurs acteurs de la recherche se sont depuis positionnés sur le sujet (notamment aux États-Unis, en France, ou au Brésil) et ont fait progresser notre connaissance de cette ressource : en France, l'[Institut Français du Pétrole](#) et le [pôle AVENIA](#) (Pau) font à ce titre figure de référence.



Cartographie des gisements d'hydrogène naturel (concentration > 10%) détectés à date^[3,4]

Plusieurs centaines de réservoirs d'hydrogène blanc ont été observés au cours des dernières décennies, répartis tout autour du globe. Ces gisements sont présents sous trois formes principales : (1) sous forme de **gaz libre**, (2) sous forme d'**inclusions**, i.e., de gaz piégé dans des minéraux, ou (3) sous forme **dissoute**, au sein d'**aquifères** ou de réservoirs d'eau de champs d'hydrocarbures. Le gisement découvert dans le bassin minier lorrain correspond quant à lui de l'hydrogène dissout dans un aquifère.

[1] > 94 Mth₂ en 2021 selon le [Global Hydrogen Review 2022](#) publié par l'IEA ; [2] roches océaniques charriées dans des montagnes lors de collisions de plaques ; [3] non-exhaustif ; [4] [Sciencedirect - The occurrence and geoscience of natural hydrogen](#)

Découverte d'un gisement d'hydrogène blanc dans le bassin minier lorrain : promesses et limites

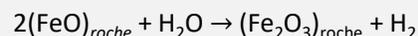


Pour autant, à ce jour, **un unique gisement est exploité commercialement** au niveau mondial : il s'agit du gisement malien de Bourakébougou qui depuis plus de dix ans permet à l'entreprise canadienne Hydroma d'alimenter un village de 4 000 habitants en électricité.

Mécanismes de formation de l'hydrogène blanc

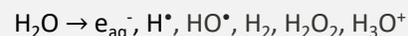
H₂ se forme naturellement en profondeur selon plusieurs processus^[1] dont les principaux sont :

- par **serpentinisation des roches** : on appelle « serpentinisation » un ensemble de réactions d'**altération des péridotites^[2] du manteau supérieur terrestre** (notamment l'olivine et les pyroxènes) **par hydratation**, qui conduisent à la formation de serpentine Mg₃Si₂O₅(OH)₄. Lors de cette hydratation, le fer ferreux Fe(II) contenu dans certains minéraux d'olivine et de pyroxènes peut **s'oxyder en présence d'eau**, produisant H₂ selon l'équation :

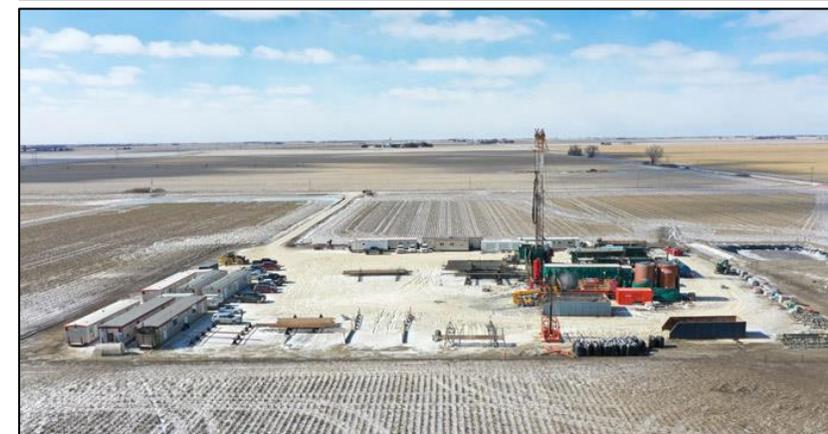
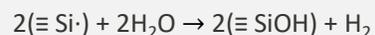


Ce mécanisme est probablement à l'origine des réserves observées dans le bassin lorrain.

- par **radiolyse** : les radiations α , β et γ , émises par désintégration des éléments radioactifs présents dans les **roches de la croûte terrestre** (²³⁸U et ²³⁵U, ²³²Th, etc.) **peuvent exciter, ioniser et dissocier les molécules d'eau**, produisant des radicaux menant en partie à H₂ :



- par **fracturation des roches** : la fracturation naturelle des roches dans les **zones de failles tectoniques** rompt les liaisons chimiques Si-O des minéraux silicates produisant ainsi des **radicaux libres** ($\equiv \text{Si}^\cdot$, $\equiv \text{SiO}^\cdot$, $\equiv \text{Si}^+$, etc.) qui peuvent ensuite **se recombinaison ou réagir avec l'eau**, formant H₂ en co-produit :



Photographies des sites de forage d'hydrogène naturel de Bourakébougou au Mali par Hydroma^[3] (haut) et dans le Kansas par Natural Hydrogen Energy^[4,5] (bas)

[1] MDPI - [The Origin and Occurrence of Natural Hydrogen](#) ; [2] roche magmatique présente dans le manteau supérieur ; [3] [Image issue d'un article du journal L'Intelligent](#) ; [4] [Image issue d'un article du journal Connaissances des énergies](#) ; [5] le site du Kansas n'est pas exploité commercialement, mais à des fins de R&D, par Natural Hydrogen Energy LLC

Découverte d'un gisement d'hydrogène blanc dans le bassin minier lorrain : promesses et limites



Pourquoi l'hydrogène blanc suscite-t-il autant d'intérêt ?

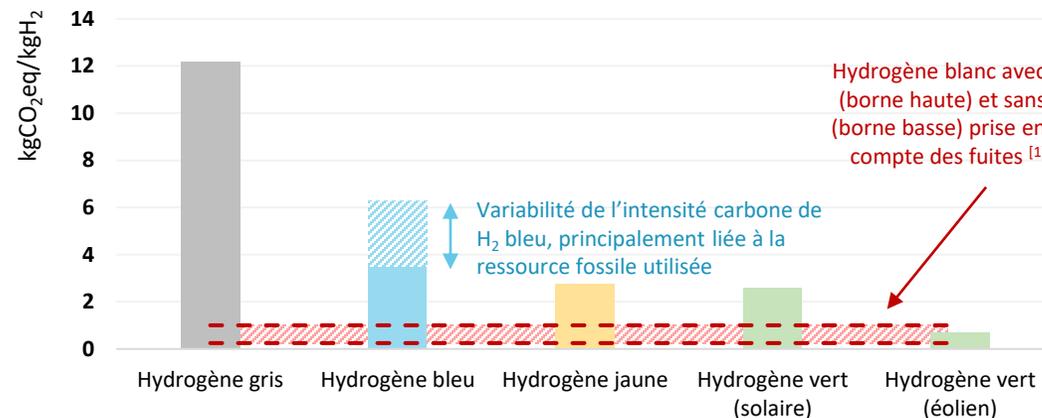
Si la potentielle découverte d'un large gisement d'hydrogène blanc suscite autant d'intérêt, et de réactions, c'est en raison de ses propriétés intéressantes, notamment par comparaison avec les autres modes de production de H₂.

L'hydrogène blanc aurait une très faible empreinte carbone

L'hydrogène (quelle que soit sa couleur) n'émet **pas de CO₂ lors de sa combustion** ce qui en fait un vecteur énergétique particulièrement attractif, par exemple pour produire de la chaleur et de l'électricité ou pour décarboner le transport. Cependant, le mode de production de H₂ peut lui-même être plus ou moins carboné. Ainsi, l'hydrogène gris, produit à partir de gaz naturel, a une empreinte carbone jusqu'à dix fois supérieure à celle de l'hydrogène vert produit quant à lui par électrolyse à partir d'électricité renouvelable. L'hydrogène naturel, extrait directement depuis le sous-sol terrestre **pourrait (selon des premières et très rares estimations) avoir une empreinte carbone encore largement inférieure à celle de l'hydrogène vert**, aux alentours de 0,3 kgCO₂eq/kgH₂^[1].

Si l'empreinte carbone de l'hydrogène naturel n'est pas nulle, c'est essentiellement du fait de la consommation d'**énergie nécessaire à son extraction, et surtout à sa purification**. L'intérêt environnemental de l'hydrogène blanc est donc fortement dépendant des émissions générées par l'énergie employée localement.

Par ailleurs, l'impact environnemental des **fuites liées à l'extraction et au transport** de H₂ reste un angle mort des estimations actuelles. Par comparaison, les fuites de méthane (de 2 à 3% au moment de l'extraction de gaz naturel) font, depuis plusieurs années, l'objet d'une attention croissante de la part des autorités et des chaînes de production. Or, H₂ est une molécule plus petite que CH₄ et d'autant plus susceptible de fuites. Parce que **le potentiel de réchauffement global de l'hydrogène est environ 12 fois supérieur à celui du CO₂**, des fuites (réalistes à ce jour) de 5 ou 10% représenteraient des émissions supplémentaires de 0,5 à 1 kgCO₂eq/kgH₂^[5]. De nombreux défis techniques restent donc à relever du point de vue de l'extraction.



Empreinte carbone des différentes couleurs de l'hydrogène ^[2]

Les premières estimations de l'empreinte carbone de l'hydrogène blanc (périmètre production/extraction) montrent que son empreinte pourrait être plus faible que celle de l'hydrogène vert produit à partir de PV.

| Gaz | Formule | Potentiel de réchauffement global (à horizon 100 ans) |
|--------------------|------------------|---|
| Dioxyde de carbone | CO ₂ | 1 (référence) |
| Méthane | CH ₄ | 28 |
| Protoxyde d'azote | N ₂ O | 265 |
| Hydrogène | H ₂ | 11,6 ± 2,8 |

Comparaison du potentiellement de réchauffement global de H₂ et de GES importants^[3,4]

On appelle potentiellement de réchauffement global (PRG ou GWP pour Global Warming Potential en anglais) le facteur de conversion utilisé pour comparer les impacts relatifs de différents gaz à effet de serre sur le changement climatique par rapport au CO₂, gaz de référence.

[1] MJ Hudson, 2022 ; [2] Base carbone Ademe ; [3] GHG protocol, 2023 ; [4] Nature Journal, 2023 ; [5] rapides calculs d'ordres de grandeur par Blunomy

Découverte d'un gisement d'hydrogène blanc dans le bassin minier lorrain : promesses et limites

L'hydrogène blanc pourrait être renouvelable

Plusieurs expériences de laboratoires ont montré que quelques jours suffisent pour former H₂ par oxydoréduction en présence d'eau. Dans le sous-sol terrestre, à des conditions de pression et température beaucoup plus favorables, on peut raisonnablement envisager que cette même réaction soit **presque immédiate**, et donc que l'hydrogène naturel formé par serpentinisation soit une ressource renouvelable. Le cas du gisement malien semble d'ailleurs pour le moment confirmer cette intuition : en dix ans d'exploitation, la pression de gaz n'y a semble-t-il toujours pas diminué.

Néanmoins, les mécanismes de formation de H₂ blanc en conditions réelles et en particulier les délais associés restent encore peu connus : la capacité de ces gisements à se reconstituer à des échelles de temps humaines doit encore être étudiée.

L'hydrogène blanc n'est pas une solution miracle

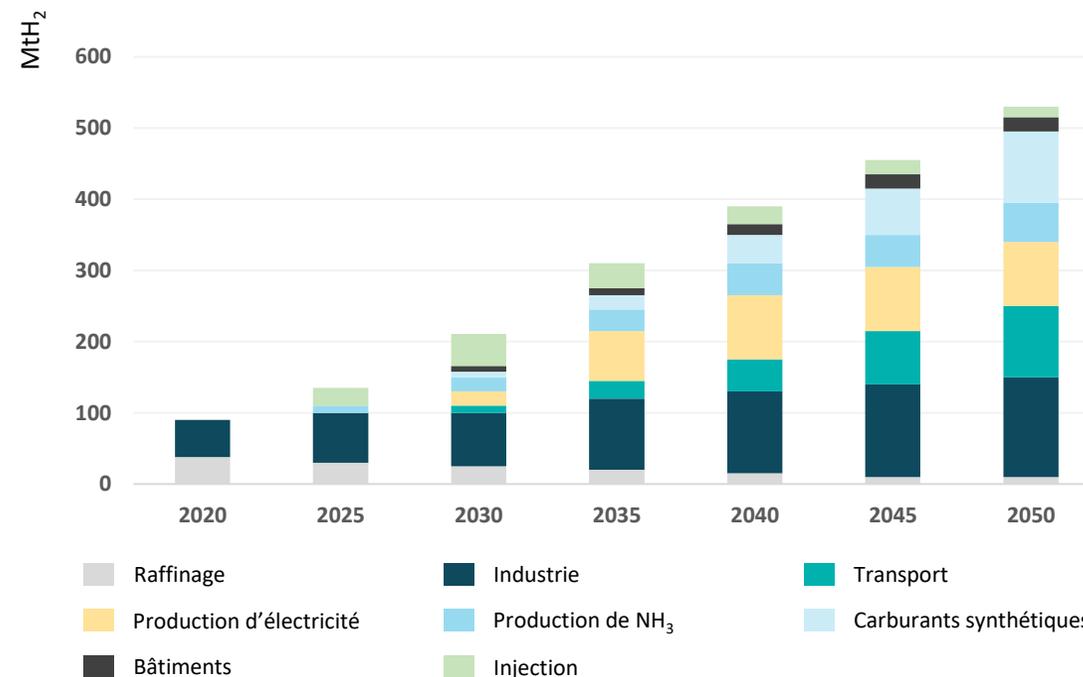
En dépit des propriétés prometteuses de l'hydrogène blanc, **nombre de questions demeurent en suspens** qui devraient inciter à la prudence quant au potentiel que cette ressource pourrait jouer pour la transition des systèmes énergétiques.

Tout d'abord, l'hydrogène naturel est-il exploitable ? Le potentiel d'exploitation des gisements de H₂ blanc dépendra surtout des **quantités accumulées**, de la **puissance des flux produits**, et du **milieu géologique** environnant. Beaucoup d'inconnues technico-économiques demeurent à ce stade.

Les quantités exploitables restent encore inconnues

Tout d'abord, **estimer les réserves mondiales d'hydrogène naturel reste complexe**. Quelques inclusions d'hydrogène ont ainsi été découvertes au cours des dernières années (e.g., au Mali, aux États-Unis, en Russie et plus récemment, en France et en Espagne^[1]) mais **ces inclusions ne sont pas toutes exploitables** :

- Les volumes d'hydrogène estimés dans les inclusions déjà découvertes sont limités : les



Évolution attendue de la demande mondiale en hydrogène d'ici 2050 [2]

La demande mondiale en H₂ a fortement crû au cours des dernières années pour atteindre environ 90 MtH₂ en 2020. D'ici 2050, cette croissance devrait se poursuivre selon l'IEA: plus de 200 Mt en 2030, près de 400 Mt en 2040 et environ 530 Mt. Cet hydrogène devrait principalement être utilisé pour l'industrie, le transport et la production de carburants synthétiques.

[1] Annonce par l'entreprise Helios Aragon, 2023 ; [2] selon le [Global Hydrogen Review 2022](#) publié par l'IEA

Découverte d'un gisement d'hydrogène blanc dans le bassin minier lorrain : promesses et limites



réserves totales connues à ce jour représentent une petite partie de la demande attendue en 2050 qui devrait dépasser 500 MtH₂^[2]. À terme, les quantités disponibles pourraient être très supérieures à la demande mais leur extraction devrait rester techniquement difficile. Ainsi, dans le cas du bassin lorrain, la prudence est de mise quant aux volumes annoncés (c. 45 MtH₂) qui sont pour le moment issus de modélisations et qui **doivent encore être vérifiés par des forages en profondeur**.

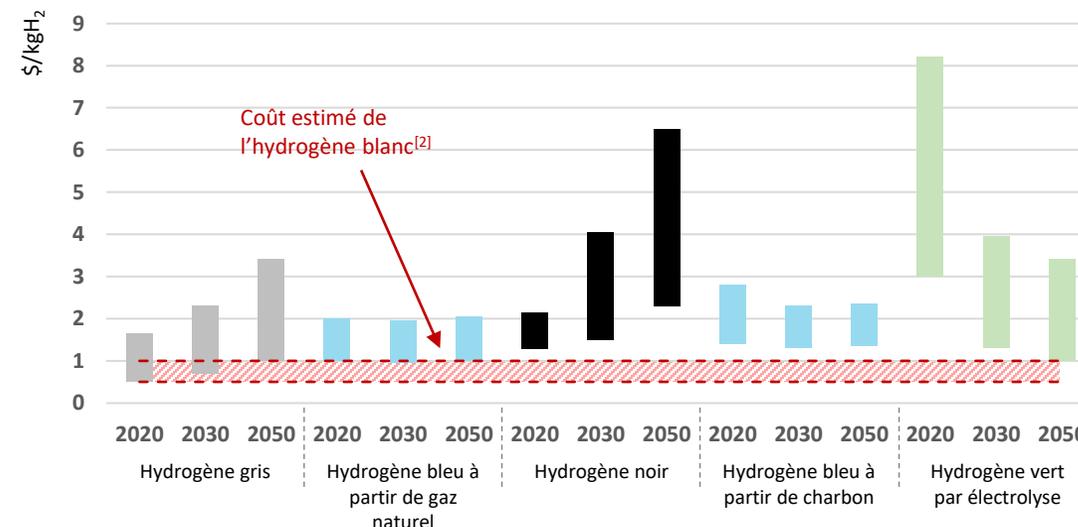
- Bien souvent, H₂ y est présent à des concentrations trop faibles pour qu'une extraction y soit pertinente.

L'extraction d'hydrogène blanc se heurte donc à une **double contrainte technique** : à de faibles profondeurs, H₂ semble plus facilement extractible mais est généralement présent à de faibles concentrations et doit donc être **purifié pour être exploité** ; à des profondeurs importantes, H₂ semble pouvoir être présent à un haut niveau de pureté mais est **difficilement accessible**.

La viabilité économique de l'extraction et du transport reste à prouver

Au-delà de la question des quantités disponibles, **la viabilité économique de l'exploitation de ces gisements d'hydrogène naturel dépendra de la capacité à extraire, purifier, stocker et transporter cette ressource à un coût compétitif**. Les premières estimations évoquent ainsi un coût de production compris entre 0,5 et 1\$ par kgH₂^[1] mais elles reposent pour le moment sur peu d'éléments tangibles et doivent être considérées avec prudence. Par comparaison, le coût de production de l'hydrogène vert par électrolyse est attendu entre 1 et 4\$/kgH₂ en 2030^[2] par l'IEA et à une valeur cible de 4,5€/kgH₂ selon France Hydrogène^[3].

Néanmoins, le coût de production n'est pas le seul paramètre à prendre en compte. En réalité, le **coût de transport de l'hydrogène** extrait pourrait aussi être déterminant. En effet, H₂ est un gaz difficile et cher à transporter qui le plus souvent n'est pas acheminé **au-delà de 100 ou 200 km** du lieu de production. Ainsi, la présence de points de consommation (e.g., ville / industrie) à proximité des sites d'extraction sera sans doute un facteur favorable à leur exploitation. Cela devrait être le cas du bassin lorrain où des clusters industriels sont prévus et de futurs réseaux sont en développement.



Évolution du coût de production d'hydrogène d'ici 2050^[2]

Le coût de production de H₂ fluctue largement selon la voie de production choisie. Produire H₂ par électrolyse à partir d'électricité renouvelable reste plus coûteux que produire H₂ à partir de ressources fossiles. D'ici 2050, ce rapport pourrait s'inverser du fait de la baisse des coûts des EnR et des technologies d'électrolyse, et du prix croissant du carbone. Les premières estimations donnent un coût de production de H₂ blanc compris entre 0,5 et 1 \$/kgH₂.

[1] discussions lors de la conférence H-NAT retranscrite par [Geoscientist](#) ; [2] selon le [Global Hydrogen Review 2022](#) publié par l'IEA ; [3] [France Hydrogène](#), 2022

Découverte d'un gisement d'hydrogène blanc dans le bassin minier lorrain : promesses et limites

Dans le cas contraire, le coût de transport pourrait devenir supérieur au coût de production, limitant alors le potentiel avantage économique de l'hydrogène blanc par rapport à une production par électrolyse.

La présence de potentiels co-produits de ces gisements comme l'Hélium (une ressource rare et dont le prix devrait augmenter) pourrait améliorer la viabilité économique de leur exploitation mais reste à ce stade encore une hypothèse. L'entreprise [45-8](#) prévoit ainsi une installation de production sur le site de Fonts-Bouillants dans la Nièvre, dont l'objectif premier sera d'exploiter l'Hélium du sous-sol mais qui pourra dans un second temps capter cet H₂ naturel.

Quoi qu'il en soit, plusieurs années de **recherches** et de **développements techniques** sont donc nécessaires avant de pouvoir, un jour peut-être, extraire la valeur économique de l'hydrogène naturel. Son rôle à court comme à moyen-terme pour la transition énergétique reste donc une question pleinement ouverte.



Photobioréacteur innovant pour une capture de CO₂ et une culture d'algues à grande échelle



EN BREF

- Objet** : entretien avec l'entreprise française CarbonWorks
- Objectif** : développement d'un nouveau photobioréacteur qui permettrait d'envisager la capture de CO₂ à grande échelle
- Résultats** : le réacteur développé permettrait d'obtenir une productivité de biomasse 50 à 100 fois supérieure aux technologies usuelles par l'ajout de sources lumineuses internes et une configuration géométrique innovante.
- TRL estimé** : 5-6

L'entreprise **CarbonWorks** développe une technologie de photobioréacteur (PBR) innovante qui permettrait d'obtenir un **rendement surfacique de production de microalgues beaucoup plus important** que les technologies communément utilisées.

Contexte

La culture d'algues suscite beaucoup d'espoir pour la capture du CO₂ dont elles sont fortement consommatrices : alimentées par le CO₂ que rejettent les industries, les algues le décomposent par **photosynthèse, en oxygène** (relâché dans l'atmosphère) **et en carbone** (qu'elles assimilent pour leur croissance).

Ces réactions sont optimisées dans des **photobioréacteurs**^[1], i.e. des **systèmes, le plus souvent fermés**, au sein desquels les microalgues sont cultivées dans de l'eau douce ou de l'eau salée, en présence de lumière, naturelle ou artificielle. Néanmoins, les technologies actuelles de PBR sont très consommatrices d'espace et/ou très énergivores^[2] et **ne permettent pas d'envisager la production de grands volumes d'algues ni la séquestration d'importants volumes de CO₂**.

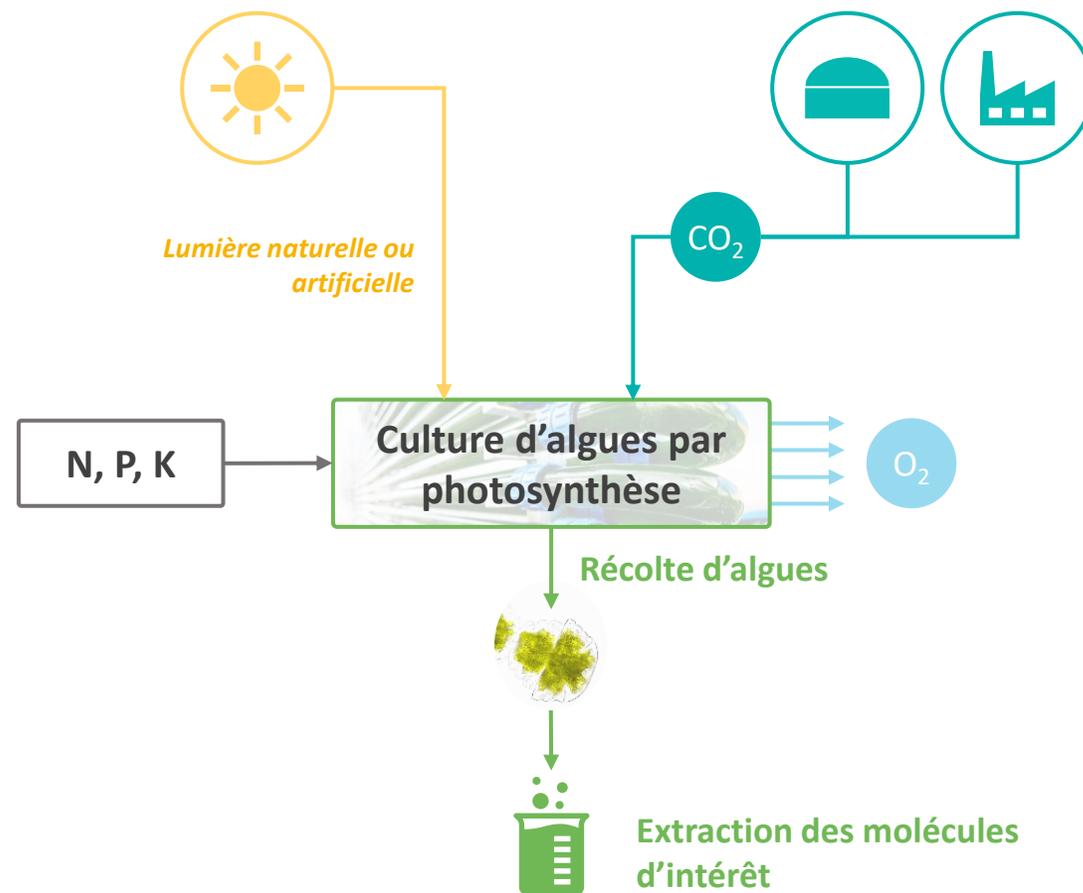


Schéma générique du procédé de photobioréaction

Photobioréacteur innovant pour une capture de CO₂ et une culture d'algues à grande échelle



Principales technologies de culture de microalgues

Une grande variété de systèmes technologiques peut être utilisée pour la culture d'algues, dont les caractéristiques et les performances répondent à des cas d'usages différents.

Les cultures à l'échelle du laboratoire sont réalisées dans des **photobioréacteurs fermés**, basés sur des systèmes de **lumière artificielle**, et pour lesquels un contrôle précis des paramètres de réaction est nécessaire (intensité lumineuse, pH, température, concentration de nutriments, agitation...). Ces PBR peuvent avoir des configurations géométriques variées : PBR tubulaires (les plus fréquents), cylindriques, à panneaux plats, à colonne de levage, sous sac plastique... Ces PBR fermés ont une **empreinte foncière généralement moindre** ainsi qu'une **productivité améliorée** du fait de l'apport ciblé de lumière artificielle mais ont de ce fait une **consommation énergétique et des coûts plus élevés**.

Ces technologies n'étant **pas encore pleinement matures**, pour des productions industrielles, les microalgues sont généralement cultivées dans des fermes, qui prennent la forme de **bassins ouverts** (« open raceway ponds » ou ORP), grandes lagunes, etc.

Le choix d'une technologie de PBR doit être fait en fonction de l'**usage** (énergie, alimentaire, cosmétique), de la **zone géographique** (ensoleillement, coûts), et des **ressources disponibles** (surface, électricité). Le tableau ci-contre résume et compare les caractéristiques de quelques-uns des systèmes les plus utilisés actuellement.

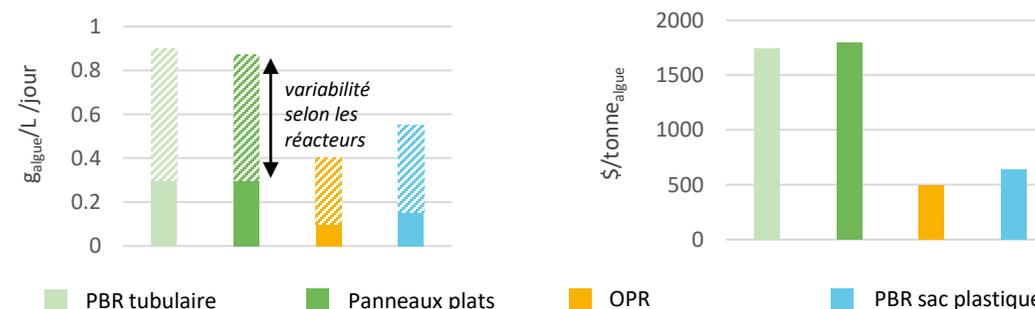
La productivité des PBR fermés doit encore être améliorée

Du fait de leur emprise foncière moindre et de leur meilleure productivité, les PBR fermés ont fait l'objet de nombreux travaux de R&D au cours de la dernière décennie, avec pour objectif premier d'**augmenter encore leur productivité et minimiser leur consommation énergétique**. De nombreux défis technologiques restent en effet à résoudre avant de pouvoir les déployer à une échelle industrielle : optimiser la provision de CO₂, de lumière et de nutriments, contrôler les conditions de culture, minimiser le risque de contamination des cultures, réduire encore l'empreinte foncière et réduire les coûts de production CAPEX et OPEX.



| | Avantages | Inconvénients |
|--|---|---|
| PBR tubulaire (fermés) | <ul style="list-style-type: none"> • Simplicité à implémenter • Grande surface d'éclairage et productivité élevée | <ul style="list-style-type: none"> • Empreinte foncière assez élevée • Forts gradients de pH, CO₂ et O₂ • CAPEX et OPEX élevés • Consommation énergétique |
| PBR à panneaux plats (fermés) | <ul style="list-style-type: none"> • Grande surface d'éclairage et productivité élevée • Maintenance aisée • Contrôle aisé de la température | <ul style="list-style-type: none"> • CAPEX et OPEX élevés • Complexité de mise à l'échelle • Consommation énergétique |
| PBR sous sac plastique (fermés) | <ul style="list-style-type: none"> • CAPEX et OPEX faibles • Empreinte foncière limitée | <ul style="list-style-type: none"> • Fragilité, courte durée de vie • Homogénéité faible • Apport de lumière inhomogène • Consommation énergétique |
| Raceway (OPR) | <ul style="list-style-type: none"> • Maintenance aisée • Faible consommation d'énergie • CAPEX et OPEX faibles | <ul style="list-style-type: none"> • Empreinte foncière très élevée • Productivité faible • Homogénéité faible • Risque de contamination |

Avantages et inconvénients des principaux types de PBR



Productivité volumétrique des principaux types de PBR^[1,2]

Coût de production de microalgues des principaux types de PBR^[3]

[1] "Comparison of commonly used technologies for the cultivation of algae", Schott, 2016 ; [2] grammes d'algues produites par unité de volume (en L) du réacteur ; [3] NREL, 2019

Photobioréacteur innovant pour une capture de CO₂ et une culture d'algues à grande échelle



Parmi ces enjeux, optimiser les apports de lumière et de CO₂ pour faciliter leur captage par les microalgues est un enjeu critique qui reçoit une attention particulière :

- L'intensité lumineuse doit d'abord être ajustée au plus proche des besoins en lumière des algues :

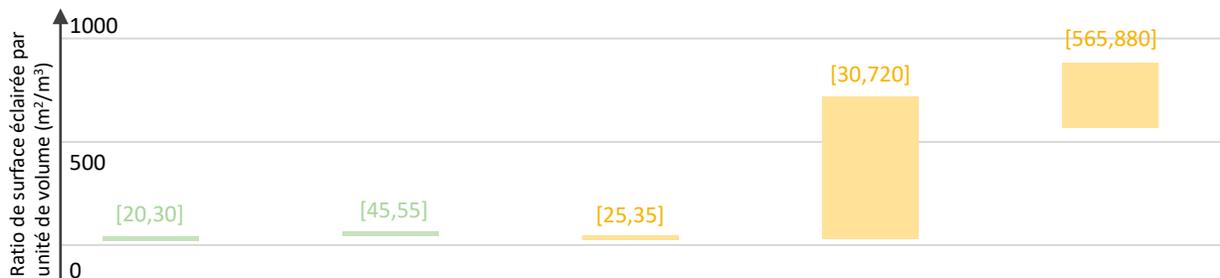
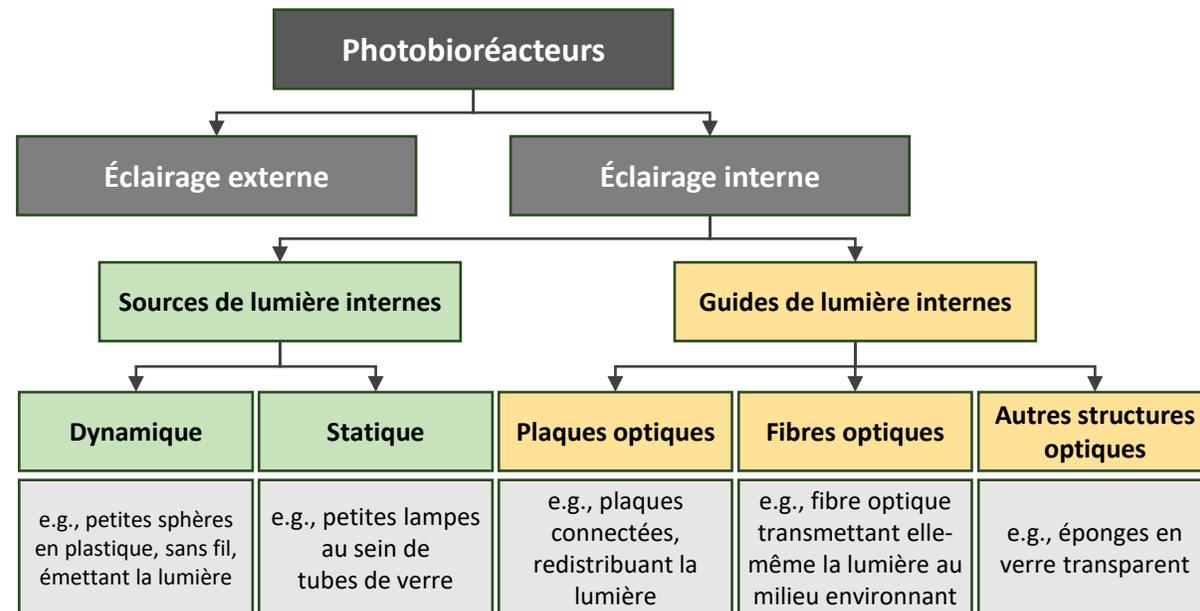
D'une part, une trop grande intensité lumineuse risque d'inhiber la croissance des couches de microalgues externes du réacteur. D'autre part, si l'intensité lumineuse est trop faible, les couches de microalgues les plus internes reçoivent trop peu de lumière du fait de phénomènes d'auto-ombrage^[1], ce qui réduit la productivité volumique. Ce sont donc autant l'**optimisation de l'intensité de la lumière** que sa **distribution homogène au sein du réacteur qui sont importantes**.

Diverses réponses technologiques ont été apportées à cette problématique au cours des dernières années (irradiation orientée, éclairage interne par utilisation de fibres optiques, plaques de redistribution de lumière ou tout simplement par agitation). Elles ont permis d'augmenter la productivité, mais au prix de **coûts élevés** et d'une **complexité qui limite les possibilités de mise à l'échelle**.

L'idée de **placer la source de lumière à l'intérieur du réacteur** est quoi qu'il en soit de plus en plus exploitée, l'enjeu étant alors de **maximiser sa captation** par les microalgues : les pertes de lumière peuvent encore atteindre plus de 50% même avec les fibres optiques.

- De même, l'**optimisation de l'alimentation des cultures en CO₂ est clé**. Maximiser le transfert du CO₂ vers les cellules en environnement aqueux n'est pas une tâche triviale et fait l'objet de recherches poussées (e.g., injection à la demande grâce au suivi du pH cible, résistance des souches au CO₂ industriel, etc.).

C'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux de R&D menés par [CarbonWorks](#), une jeune entreprise française qui a pour objectif de développer une technologie fermée de production de microalgues par captation de CO₂ dans des proportions industrielles.



Classification des PBR à éclairage interne (haut) et ratio de surface éclairée (bas) ^[2,3]

Plusieurs designs de PBR fermés ont été développés pour améliorer l'apport de lumière aux microalgues, en particulier des PBR avec des solutions d'éclairage interne. Le ratio de surface éclairée (c'est-à-dire la surface du PBR effectivement éclairée par le système d'éclairage interne par unité de volume de PBR) fluctue largement en fonction des solutions.

[1] "self-shading", les couches externes de microalgues absorbent une grande partie de la lumière et réduisent la lumière disponible pour les couches internes du réacteur ; [2] [Engineering in Life Sciences](#) ; [3] [Biotechnology Journal](#)



Photobioréacteur innovant pour une capture de CO₂ et une culture d'algues à grande échelle

La technologie CarbonWorks

L'amélioration sensible des rendements au cours des dernières années reste insuffisante pour envisager un usage industriel des algues. Pour la massification de la production, CarbonWorks fait donc aujourd'hui le pari d'un **nouveau type de photobioréacteur** utilisable directement au pied des émetteurs de CO₂ (usines, unités de méthanisation, etc.).

La technologie de CarbonWorks, **en phase de démonstration**, se base sur **l'immersion d'un dispositif lumineux au sein du réacteur constitué de tours verticales opaques**, de façon à **faciliter la rencontre entre les photons, le dioxyde de carbone et les algues**, pour maximiser la production de biomasse tout en minimisant la consommation énergétique et l'emprise au sol.

Avec cette technologie de rupture, l'entreprise espère atteindre un **rendement de production de biomasse de 5 000 tonnes par hectare par an**, correspondant à une **consommation de CO₂ de 10 000 tCO₂/ha/an**. Par comparaison, un photobioréacteur tubulaire fonctionnant avec de la lumière naturelle permettrait la production de seulement 50 à 100 tonnes de biomasse par hectare par an (consommation de 100 à 200 tCO₂/ha/an).

Par ailleurs, grâce à la **flexibilité** de sa technologie, CarbonWorks espère pouvoir domestiquer rapidement plusieurs dizaines de souches de microalgues (contre une dizaine aujourd'hui) en puisant dans une diversité d'espèces estimée à plusieurs centaines de milliers de microalgues. De quoi **adapter le choix de la souche** au gaz entrant et au produit d'intérêt visé.

Application et valorisation

Cette technologie pourrait permettre la culture de volumes d'algues suffisamment importants pour la **production industrielle de biostimulants, de nourriture animale, de nutraceutiques...**

CarbonWorks devra pour cela réussir une **montée en échelle** : conception d'un démonstrateur de 20 m³ (contre 1 m³ actuellement) avec une technologie évolutive prévue pour 2024/2025. Des informations supplémentaires seront attendues dans les mois prochains afin de confirmer l'atteinte des rendements espérés et la viabilité économique de cette technologie.

[Vidéo de présentation de CarbonWorks](#)

Microalgues

Principaux usages des microalgues

Cosmétiques

Chimie verte / bioplastique

Agriculture (biocontrôle & biostimulants)

Pharmaceutique (Nutraceutiques)

Agriculture (nourriture animale)

Alimentation humaine

Energie (e.g., biocarburants et biogaz)

cf. légende

Liste non-exhaustive d'usages à partir de la culture de microalgues

Les PBR fermés permettent la culture de microalgues pour production de molécules à **haute valeur ajoutée** et en **quantité limitée** : ils sont **peu propices pour un usage énergétique des microalgues à court terme**. Pour autant, une production en raceway pourrait permettre d'atteindre jusqu'à 18TWh_{PCI}/an de biogaz et 23TWh_{PCI} de biodiesel en 2050^[2]. CarbonWorks prévoit à ce stade une culture de microalgues principalement orientée vers la production de biostimulants, de produits pharmaceutiques ou de nourriture animale.

| | Production de biomasse (tonnes/ha/an) | Consommation de CO ₂ (tonnes/ha/an) |
|--|---------------------------------------|--|
| OPR – Raceway | 10-30 | 20-60 |
| Panneaux plats | 36-66 | 72-132 |
| Photobioréacteur tubulaire | 50-100 | 100-200 |
| Technologie CarbonWorks (théorique) | 5 000 | 10 000 |

Comparaison des rendements surfaciques de différents types de photobioréacteurs [1]

[1] "Comparison of commonly used technologies for the cultivation of algae", Schott, 2016 ;

[2] ADEME/ENEA/INRIA, [Gisement potentiel de ressources algales](#), 2018

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