



Veille technologique sur les filières gaz verts #4

JUILLET 2024



Publication en
collaboration avec



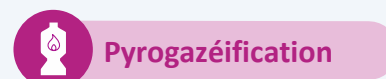
Clés de lecture

Thématiques étudiées

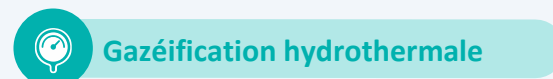
Procédés de production



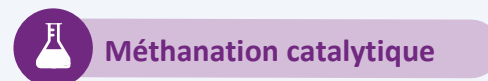
Méthanisation



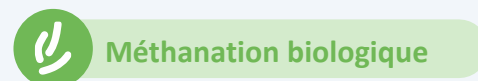
Pyrogazéification



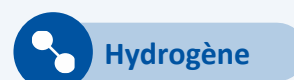
Gazéification hydrothermale



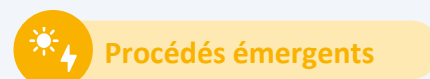
Méthanation catalytique



Méthanation biologique



Hydrogène

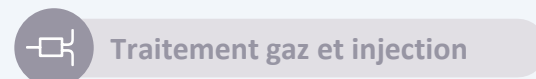


Procédés émergents

Amont & aval



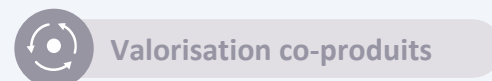
Stockage



Traitement gaz et injection



Valorisation du CO₂



Valorisation co-produits

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 de 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'analyses économiques de technologies et d'analyses 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.



Interview

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

Table des matières



Méthanisation

L'intégration d'une brique d'électrodialyse au cours de la méthanisation

a permis une réduction efficace de l'inhibition par l'ammoniac (production multipliée par 1,4 par rapport au scénario de référence) selon une étude menée par plusieurs universités en Irlande, en Chine et en Espagne.

[> Focus page 5](#)



Valorisation co-produits

Retour au sol du digestat de boues de STEP et perspectives d'amélioration des valeurs fertilisantes associées

Une équipe de chercheurs italiens s'est intéressée à l'amélioration des propriétés fertilisantes des digestats de boues de STEP, en évaluant l'impact de l'application d'un champ magnétique statique de haute intensité sur le digestat.

[> Focus page 7](#)



Gazéification hydrothermale

Effet de la température et des matériaux à base de Ni et Mo sur l'élimination des sulfates en gazéification hydrothermale

Une équipe de chercheurs suisses a cherché à décrypter le phénomène de réduction thermochimique du sulfate (en vue de son élimination) et les paramètres influant sur le procédé. Ils ont montré que la réduction du sulfate est particulièrement favorisée au-delà de 420°C.

[> Focus page 12](#)



Hydrogène

Production de H₂ par gazéification de déchets plastiques avec bouclage chimique

Le reformage par bouclage chimique peut produire un gaz de synthèse d'une pureté équivalente à celle du vaporeformage avec une réduction des émissions de CO₂ de 30% et une augmentation de 5% du rendement en hydrogène le tout sans apport externe de chaleur.

[> Focus page 14](#)




Méthanisation

Utilisation de tamis moléculaires pour la purification directe du biogaz produit par méthanisation

Une équipe de chercheurs italiens a évalué la performance de trois tamis moléculaires pour la purification du biogaz. La purification par tamis moléculaires permettrait d'atteindre des performances épuratoires bien supérieures à 95%, dans des conditions opérationnelles simples.

[> Focus page 16](#)



Méthanation catalytique

Méthanation dans un réacteur à lit fixe avec un flux d'alimentation en biogaz distribué

Une équipe de chercheurs espagnols a comparé les performances de différents modes d'injection de biogaz dans un réacteur de méthanation à lit fixe. Introduire du biogaz avec un flux distribué permet d'accroître les performances et de réduire les points chauds.

[> Focus page 18](#)



Procédés émergents

Revue des différents mécanismes d'absorption extracellulaire d'électrons pour une application à l'électrométhanogénèse

L'université d'Aarhus au Danemark a réalisé une revue des interactions entre les composants biologiques et électrochimiques dans différents modèles d'électrométhanogénèse.

[> Focus page 20](#)



Traitement gaz et injection

Évaluation technico-économique de la réduction des GES par la combustion des offgases d'épuration

Des chercheurs italiens ont étudié la viabilité technico-économique de l'ajout de systèmes de combustion des gaz résiduels post-épuration (RTO) et trouvent un seuil limite de rentabilité à une valeur de 0,3% de méthane perdu lors cette épuration.

[> Focus page 22](#)



Hydrogène

Modèle dynamique d'un système Power-to-gaz : rôle du stockage de l'hydrogène et stratégies de gestion

Des chercheurs issus de plusieurs universités ont publié un article sur la recherche d'optimalité technique d'un système de Power-to-méthane et ont conclu que l'utilisation d'un stockage H₂ de petite taille (1h de remplissage) et d'un méthaniseur dimensionné sur 80% de capacité de l'électrolyseur était optimale.

[> Focus page 24](#)

Autres actualités

Méthanisation

Le projet VALPLAST, financé par l'UE, et qui vise à étudier la co-digestion des bioplastiques avec des boues de station d'épuration, vient d'être lancé par un consortium d'acteurs européens.

Ce projet permettra de développer une méthodologie pour la récupération énergétique des bioplastiques dans les digesteurs de stations d'épuration.

[> Lien vers l'article](#)

Méthanisation

VERTUS Energy vient d'achever une levée fonds de 8,7 M€.

La start-up de biotechnologies propose une solution de contrôle des bactéries pour optimiser les réactions de digestion anaérobie.

[> Lien vers l'article](#)

Politiques de soutien

Plan ambitieux de développement du biogaz présenté au nouveau gouvernement du Royaume-Uni

L'association de méthanisation et des bioressources au royaume uni (Anaerobic Digestion and Bioresources Association ADBA) a présenté son plan ambitieux de développement du biogaz en 10 points au nouveau gouvernement.

[> Lien vers l'article](#)

Projet marquant

Nouvelle version de la carte interactive recensant les installations de biométhane en Europe par l'EBA

Cette nouvelle version est une mise à jour de la base de données de 2022-2023 : il est observé une augmentation de 37% de la capacité de production de biométhane installée en Europe.

[> Lien vers l'article](#)

Projet marquant

ENGIE signe un Biomethane Purchase Agreement de 7 ans en Europe avec l'industriel allemand BASF

Engie signe avec avec l'industriel de la chimie un contrat de Biomethane purchase agreement pour les sites d'Anvers et de Ludwigshafen sur 7ans pour un total de 3 TWh .

[> Lien vers l'article](#)

Pyrogazéification

Cristal Union prend une participation dans l'entreprise GazoTech.

Le spécialiste français de la pyrogazéification de biomasse solide résiduelle, GazoTech, a vu une participation du groupe Cristal Union (figurant parmi les premiers producteurs européens de sucre et d'alcool) à hauteur de 20% de son capital.

[> Lien vers l'article](#)

Méthanisation

Anaero Technology commercialise un méthaniseur pour laboratoire avec des performances très proches des réels

Anaero Technology, ayant conclu que les tests de méthaniseurs à l'échelle du laboratoire n'étaient pas assez proches de la réalité, a décidé de commercialiser un méthaniseur avec un volume du réacteur compris entre 1 et 20 L qui répond à ces critères. Validé par plus de 15 ans de données de méthanisation, il aidera à l'optimisation des process.

[> Lien vers l'article](#)

Méthanisation

Les modalités d'application du dispositif de Certificats de Production de Biogaz, introduit en 2021, ont été précisées par un décret paru le 6 juillet 2024.

Le décret, qui fixe des obligations de restitution de certificats à hauteur de 6,5 TWh en 2028 pour l'ensemble des fournisseurs de gaz naturel, pourrait faciliter le développement et le financement de la méthanisation.

[> Lien vers l'article](#)

Analyse technico-économique

BP publie son rapport *World Energy Outlook 2024* et prévoit une augmentation importante des bioénergies en 2050

Dans son rapport annuel, BP met l'accent sur deux scénarios. Le premier, trajectoire actuelle, prévoit en 2050 une augmentation de deux tiers des bioénergies et le second, scénario net zéro, plus qu'un doublement de celles-ci.

[> Lien vers l'article](#)

Traitement gaz et injection

Detalys bénéficie de 3 millions € de subvention pour quadrupler la production de filtres en matériaux éco-innovants

Lauréat de l'appel à projets France 2030 « Première usine » avec sa production de filtres issus à plus de 90% de sous-produits industriels, Detalys vise des objectifs forts de croissance. Ces filtres permettent de remplacer l'utilisation de charbon actif pour la désulfuration du biogaz.

[> Lien vers l'article](#)

Intégration d'une brique d'électrodialyse dans la méthanisation pour gérer l'inhibition de la production de méthane par l'ammoniac

EN BREF

Une équipe de chercheurs rattachés à des universités irlandaises, chinoises et espagnoles a étudié le potentiel lié à l'intégration d'une technologie **d'électrodialyse dans un réacteur de méthanisation** pour gérer l'inhibition du processus de digestion anaérobie par l'ammoniac. **Efficace pour gérer cette inhibition (augmentation de la production de CH_4 d'un facteur 1,4), l'approche permet également de récupérer l'ammonium in situ.**

OBJET : article publié dans *Bioresource Technology*

DATE : Mai 2024

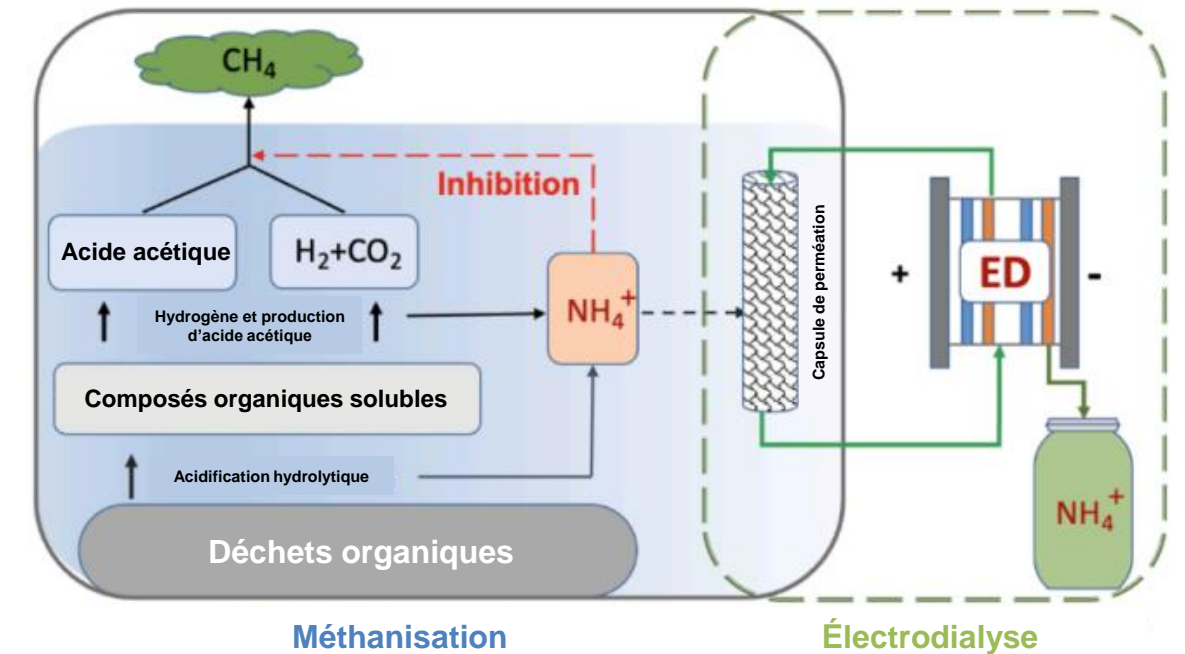
[LIEN VERS L'ARTICLE](#)

OBJECTIF : coupler la digestion anaérobie à une brique d'électrodialyse pour réduire l'inhibition à l'ammoniac, récupérer l'ammonium (NH_4^+) in situ et augmenter l'efficacité de la production

RÉSULTATS : l'intégration de l'électrodialyse dans un digesteur expérimental a permis une réduction efficace de l'inhibition par l'ammoniac (production multipliée par 1.43 par rapport au scénario de référence)

Contexte

Si la méthanisation est un procédé mature, de nombreux projets de recherche visent à améliorer encore les rendements et à traiter un panel de plus en plus large d'intrants. Apporter une réponse à l'inhibition de la digestion anaérobie par l'ammoniac constitue notamment un enjeu important pour permettre la valorisation de substrats riches en azote. Des concentrations en ammoniac (sous forme NH_4^+ ou NH_3) trop importantes peuvent en effet entraîner une diminution de la production de CH_4 voire mener à l'arrêt complet de la réaction. Plusieurs solutions sont à l'étude comme l'adaptation des micro-organismes, la co-digestion, l'absorption chimique ou encore la précipitation, mais aucune ne s'est encore imposée. La présente étude démontre l'intérêt de l'alternative représentée par l'électrodialyse.



Graphique issu de l'étude décrivant le montage expérimental constitué du digesteur anaérobie (à gauche) et du système d'électrodialyse (à droite)

Résultats

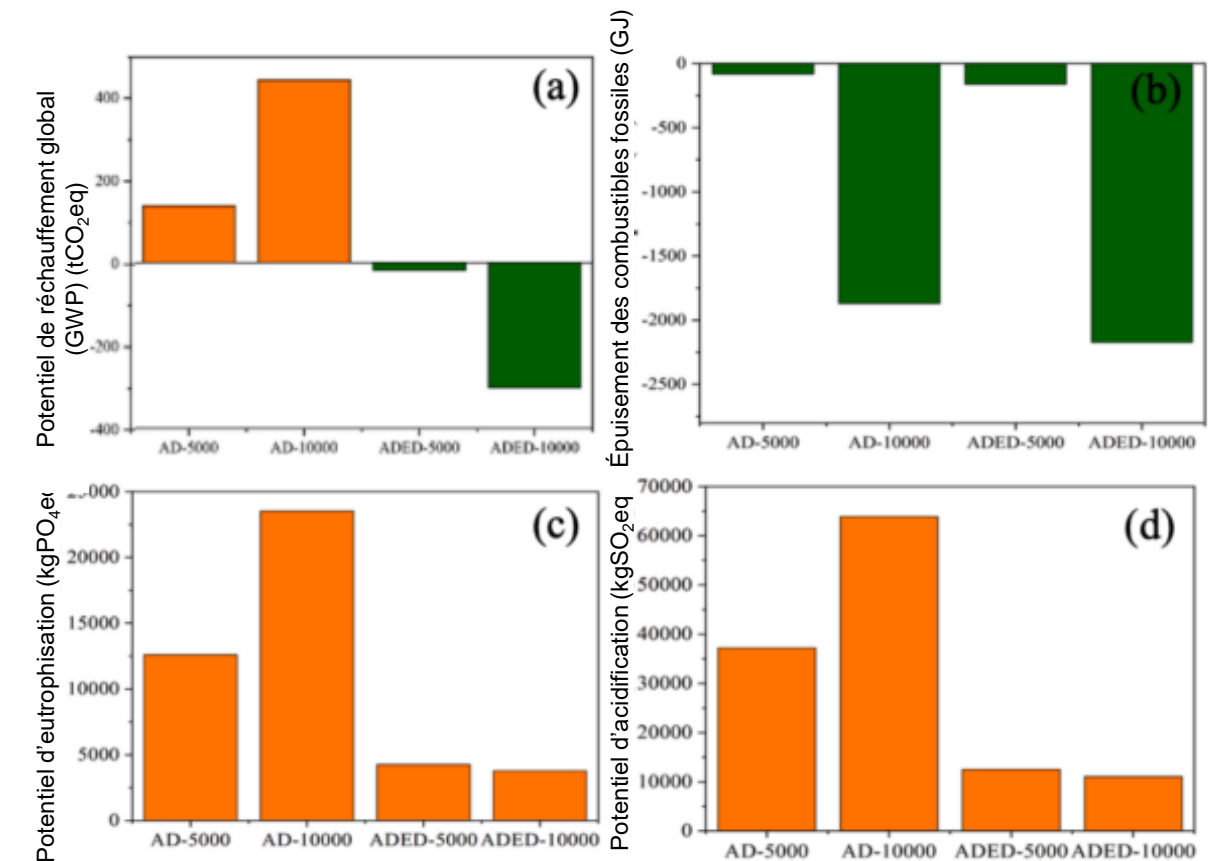
L'équipe de recherche a mis en place un montage expérimental couplant un digesteur d'une capacité de 2L avec un système d'électrodialyse. Celui-ci force la migration des ions NH_4^+ présents dans la solution par application d'un champ électrique et les isole du mélange via un empilement de membranes échangeuses de cations et d'anions. Deux configurations avec respectivement une forte (5 000 mg/L) et très forte (10 000 mg/L) concentration en $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ont été testées avec et sans système d'électrodialyse. Dans chaque cas de figure, les chercheurs ont évalué le rendement de la production de méthane ainsi que la performance environnementale (via une approche d'analyse de cycle de vie).

- Dans le cas d'une concentration de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ de 5 000 mg/L, la production de méthane a été 1,4 fois supérieure dans le cadre du système avec électrodialyse.
- Dans le cas d'une concentration de $\text{NH}_4^+\text{-N}$ de 10 000 mg/L, la production de méthane a été maintenue à un bon niveau grâce à l'électrodialyse, alors qu'elle est stoppée sans.
- L'énergie électrique consommée pour la récupération de NH_4^+ est comprise entre 7,8 et 13 kWh/kg_N^[1], ce qui selon les auteurs est comparable aux niveaux constatés pour la synthèse industrielle d'ammoniac qui se situe en moyenne à 9,1 kWh/kg_N.
- Sur les quatre composantes d'impact testées (émissions CO₂ équivalentes, baisse de consommation de combustibles fossiles, potentiel d'eutrophisation et potentiel d'acidification), les cas de figure avec électrodialyse présentent des résultats équivalents ou supérieurs au scénario de référence.

Application et valorisation

En permettant d'apporter une réponse à l'inhibition par l'ammoniac, l'électrodialyse permet d'envisager un meilleur traitement d'intrants riches en azote ainsi qu'une récupération et une valorisation de l'ammonium comme fertilisant. Si ce procédé est déjà utilisé dans d'autres secteurs (p. ex. traitement des eaux usées), son applicabilité à la méthanisation à grande échelle et sa viabilité économique pour cette filière restent à démontrer afin de confirmer le potentiel technique important démontré dans l'étude.

[LIEN VERS L'ARTICLE](#)



Résultats de l'analyse de cycle de vie et d'impact du couple électrodialyse + digesteur anaérobie (ADED) comparé à un digesteur seul (AD)

[1] kg_N : kg d'azote consommés



Valorisation co-produits



Recherche

Retour au sol du digestat de boues de STEP et perspectives d'amélioration des valeurs fertilisantes associées

EN BREF

En lien avec la parution d'un article évaluant l'impact de **l'application d'un champ magnétique sur les propriétés fertilisantes** des boues de STEP, le focus suivant présente les enjeux liés à la valorisation des boues de stations d'épuration (STEP) et à l'amélioration de leurs propriétés agronomiques.

OBJET : article publié dans *Chemical Engineering Research and Design*

DATE : Avril 2024

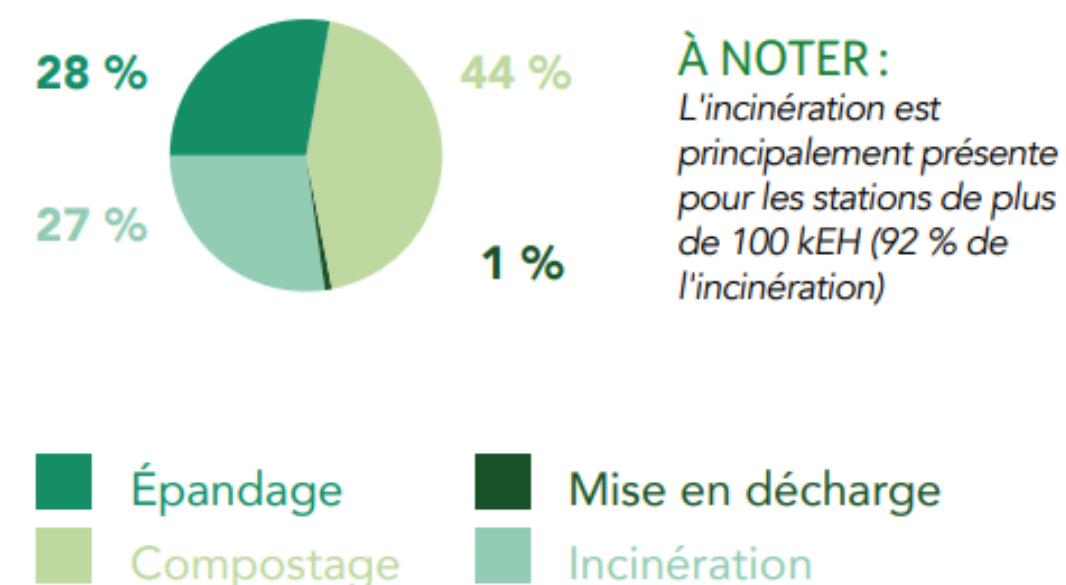
[LIEN VERS L'ARTICLE](#)

Synthèse : le retour au sol des boues de STEP constitue un enjeu important d'économie circulaire, permettant notamment un apport majeur de phosphore, ressource limitée. Des perspectives intéressantes de récupération de matières fertilisantes phosphatées ont été identifiées

Contexte

En France, on recense environ 22 000 stations d'épuration^[1] dont une majorité sont de petite capacité (inférieure à 30 000 équivalent-habitants [EH]). Environ 80% des boues de STEP font l'objet d'un retour au sol, soit par épandage direct ou après compostage. Lorsque la composition des boues ne respecte pas les seuils réglementaires, ces dernières sont incinérées. Cette voie concerne principalement les grandes STEP (> 100 000 EH) adossées à des métropoles. Toutefois, cette approche représente un coût significatif (environ ~140€/tMB contre ~30€/tMB pour l'épandage) et empêche de tirer parti de la valeur agronomique de ces boues. La digestion anaérobie des boues de STEP présente de nombreux avantages au-delà de la seule production de gaz, dont la réduction du volume total de boues à gérer, une diminution de leur odeur et l'amélioration de l'efficacité azotée^[2]. Ce focus vise à analyser le cadre réglementaire, les enjeux et perspectives du retour au sol du digestat de boues de STEP.

Devenir des boues dans les stations de plus de 30 kEH



Graphique représentant la part du devenir des boues de STEP pour les stations de plus de 30 000 équivalent-habitants (EH).

Source : [Méthanisation des boues de stations d'épuration : Externalités et retour au sol](#) (GRDF)

[1] Source : Bilan 2022 du [portail sur l'assainissement collectif](#) ;

[2] Disponibilité de l'azote pour les plantes, traduisant leur capacité à mobiliser l'azote plus ou moins facilement pour assurer leurs besoins.

Intérêt des boues pour le retour au sol

À l'instar des produits résiduels organiques en général, les boues de STEP (digérées ou non) présentent deux valeurs agronomiques principales:

- **Une valeur fertilisante**, favorisant la croissance des plantes par apport d'éléments nutritifs tels que le phosphore (P), l'azote (N) et le potassium (K)
- **Une valeur amendante**, permettant d'améliorer les caractéristiques physico-chimiques des sols (stabilité de la structure, porosité, rétention d'eau...)

La diversité des intrants et l'impact du processus de digestion anaérobie sur ceux-ci donnent toutefois lieu à des valeurs fertilisantes et amendant pouvant varier très largement. Si cette variabilité s'applique également aux digestats de boues de STEP, ces derniers se distinguent généralement par une **bonne teneur en azote et surtout une forte concentration en phosphore**. Garantir et optimiser le retour au sol de cette ressource constitue un enjeu majeur, étant donné son caractère non renouvelable^[1] et son importance dans nos systèmes agricoles. La valorisation des boues de STEP pourrait couvrir 20% des besoins en phosphore. En parallèle, la valorisation de l'azote constitue également un enjeu important, la majorité des engrais azotés étant aujourd'hui synthétisés à partir de ressources fossiles.

Paramètres à surveiller

L'épandage de digestat nécessite de respecter un certain nombre de seuils réglementaires et de pratiques pour tirer le meilleur parti des propriétés agronomiques et éviter de potentiels impacts négatifs. En agriculture, l'apport de nutriments doit toujours se faire de manière précise, en fonction de la saison, de la météo et des besoins des cultures afin d'éviter les phénomènes de lixiviation (lessivage) des nitrates, d'eutrophisation des eaux et de volatilisation de l'ammoniac (voir schéma ci-contre). Dans le cas spécifique des boues de station d'épuration, les études disponibles attestent d'une bonne qualité. Une attention particulière doit être portée à la présence de certains polluants potentiels (éléments traces métalliques [ETM], pathogènes, hormones et composés pharmaceutiques, microplastiques) dont les concentrations varient selon le tissu industriel et urbain couvert par chaque STEP et peuvent conditionner la capacité à épandre.

[LIEN VERS L'ARTICLE](#)

Paramètres discriminants	Voie Humide			
	Digestat lisiers bovins	Digestat STEP/biodéchets/IAA	Digestat territoriale (mélange intrants)	Digestat lisiers porcins
MO (% MS)	+++	-	++	+
NH ₄ ⁺ /TN	0	++	++	+++
P (g/kg MS)	0	+++	+	++
K (g/kg MS)	+++	-	++	+

Schéma: représentation simplifiée des différences relatives de composition du digestat selon l'origine des matières méthanisées

Source: [GERES - Valorisation agricole des digestats : quels impacts sur les cultures, le sol et l'environnement ?](#)

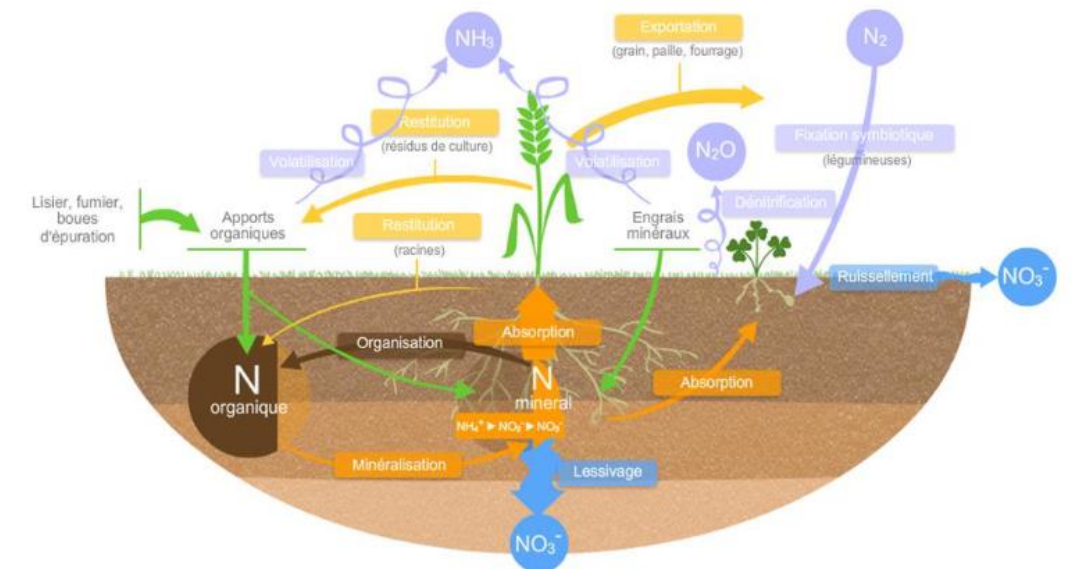


Schéma: cycle de l'azote au sein d'une parcelle agricole.

Source: programme-nitrate.gouv.fr

[1] Le phosphore est recensé comme l'une de 20 matières premières critiques par l'ONU et la seule qui concerne directement l'alimentation. Il est majoritairement extrait de mines dédiées.

Réglementation et évolution

Afin de contrôler l'impact du retour au sol des boues de stations d'épuration et des digestats de méthanisation, une réglementation stricte a été adoptée en France et en Europe. Dans le cas de base, les boues (digérées ou non) sont considérées comme des déchets et leurs producteurs sont de facto responsables de leur gestion. Ces boues bénéficiant également du statut de matières fertilisantes, leur retour au sol est possible dès lors qu'elles respectent les prescriptions des régimes auxquelles elles sont soumises :

- Les STEP qui **méthanisent uniquement les boues produites sur site ou leurs propres déchets d'assainissement sont soumises à la réglementation « eau »** (régime IOTA^[1]) pour l'épandage des boues et du digestat de boues. L'épandage est conditionné à une autorisation préfectorale ou une déclaration en application de la réglementation "eau" : réalisation d'une analyse des boues et des sols en complément d'un plan d'épandage.
- Les STEP qui **méthanisent des déchets et boues extérieures à leur propre système d'assainissement relèvent du régime ICPE^[2]**. L'épandage est possible s'il présente un intérêt agronomique et sous réserve des prescriptions sur l'innocuité des boues, sur la transparence et sur la traçabilité de la filière.

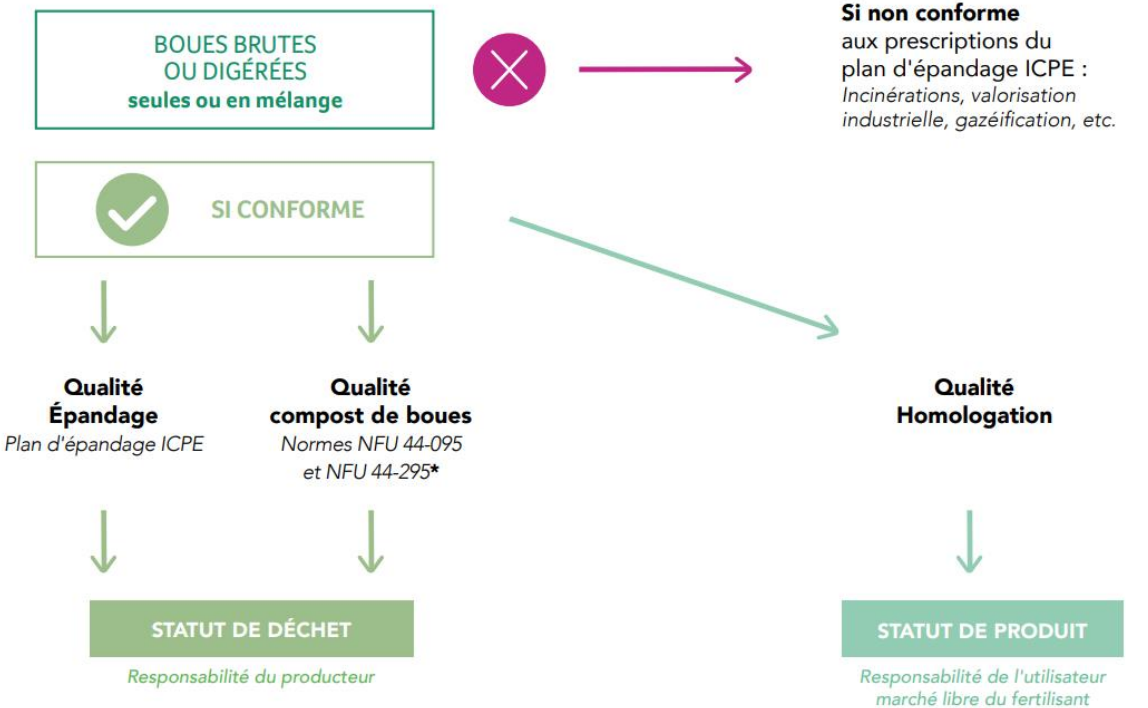
D'autres voies de retour au sol sans plan d'épandage sont possibles :

- Si les boues sont conformes à la norme NFU 44-095 elles peuvent être compostées
- Par une démarche **d'homologation**, les digestats peuvent sortir du statut de déchet, **obtenir le statut de produit et être commercialisés**.

Si les boues ne respectent pas les prescriptions des régimes pertinents, elles doivent être éliminées, généralement par incinération.

La réglementation française est en cours d'évolution et un futur décret sur le « socle commun des matières fertilisantes » est attendu. Ce dernier, mis en consultation en 2023, a vocation à améliorer et homogénéiser la qualité des produits résiduaux organiques épandus en fixant notamment des prescriptions spécifiques. Ce décret impactera nécessairement les digestats de méthanisation et de STEP, qui devront satisfaire les conditions fixées pour être épandues.

[LIEN VERS L'ARTICLE](#)



*44095 : Amendements organiques - Composts contenant des matières d'intérêt agronomique, issues du traitement des eaux (teneur en P2O5 < 3%)

*44295 : Matière fertilisante ayant des caractéristiques mixtes - Amendement organique - Engrais - Composts contenant des matières d'intérêt agronomique, issues du traitement des eaux ayant une teneur en P2O5 supérieure ou égale à 3%

Schéma représentant les différentes possibilités de valorisation des boues de STEP et de digestat selon la réglementation en vigueur

Source : [Méthanisation des boues de stations d'épuration : Externalités et retour au sol](#) (GRDF)

[1] Nomenclature IOTA : Installations, Ouvrages, Travaux et Activités ayant une incidence sur l'eau et les milieux aquatiques ; [2] Nomenclature ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement

Solutions

L'épandage de digestat présente à la fois un enjeu de maîtrise des apports en nutriments pour éviter les risques de pollution, et un enjeu de valorisation optimale de leurs propriétés fertilisantes et amendantes. La présence au sein d'une boue ou d'un digestat brut de nombreux nutriments et matières en concentrations variées complexifie le pilotage agronomique du retour au sol.

En méthanisation, de nombreuses solutions visant à mieux valoriser les matières présentes dans le digestat existent. La séparation du digestat brut en deux phases, liquide et solide, permet de concentrer l'azote dans la phase liquide et la matière organique (propriété amendante) dans la phase solide. La phase liquide peut être épandue ou faire l'objet d'autres traitements visant notamment à concentrer, transformer ou encore éliminer l'azote.

Les principales technologies de traitement de la phase liquide utilisées aujourd'hui sont présentées dans le tableau ci-contre.

Dans une station d'épuration couplée à un digesteur, le digestat de boues est généralement déshydraté avant d'être épandu ou composté. Cela a notamment pour mérite de réduire les volumes à manipuler. La phase liquide obtenue lors de la déshydratation, chargée en azote, est renvoyée en tête de procédé au niveau des bassins biologiques.

Le retour d'un effluent très chargé en nutriments en tête de station peut donner lieu à des enjeux techniques au niveau des installations. Par ailleurs, ce bouclage ne permet pas de tirer le meilleur parti de l'azote récupéré dans le procédé. Pour ces raisons, des technologies de stripping de l'azote peuvent être envisagées pour récupérer ce nutriment et éviter sa précipitation dans les canalisations, qui peut conduire à un entartrage accéléré des systèmes.

D'autres technologies, moins matures, sont explorées pour permettre une séparation efficace des matières fertilisantes, ou le renforcement des propriétés fertilisantes et amendantes des digestats.

[LIEN VERS L'ARTICLE](#)

Technologie	Type de technologie	Objectif	Avantages	Inconvénients
Filtration membranaire	Séparation	• Produire un concentré liquide contenant la majorité de l'azote et du potassium	• Filtrats utilisables comme eau utilitaire ou en irrigation • Forte concentration des fertilisants	• CAPEX et OPEX élevés • Prétraitement nécessaire
Le stripping d'ammoniac	Séparation / transformation	• Volatiliser l'azote ammoniacal pour le concentrer ou le brûler	• Produit un fertilisant solide • Séparation efficace de l'azote ammoniacal (>90%)	• CAPEX élevé et OPEX élevés • Utilisation de produits chimiques
Evaporation / Condensation	Séparation	• Déshydrater la fraction liquide	• Concentration forte de l'ammonium (>90%) • Technologie standardisée et maîtrisée	• Forte consommation de chaleur
Précipitation de struvites	Transformation	Précipiter chimiquement l'ammonium et le phosphate pour former de la struvite	• Produit un fertilisant contenant du phosphate	• Consommation de produits chimiques • Marché peu mature pour le produit final

Tableau de comparaison des différentes technologies de traitement de la phase liquide du digestat

Source: [GERES - Valorisation agricole des digestats : quels impacts sur les cultures, le sol et l'environnement ?](#)

[1] Nomenclature IOTA : Installations, Ouvrages, Travaux et Activités ayant une incidence sur l'eau et les milieux aquatiques ; [2] Nomenclature ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement

Focus sur l'article

Une équipe de chercheurs italiens s'est intéressée à l'amélioration des propriétés fertilisantes des digestats de boues de STEP, en évaluant l'impact de l'application d'un champ magnétique statique de haute intensité sur le digestat. Cette technique est en effet déjà utilisée pour réduire la dureté de l'eau, par précipitation d'espèces ioniques, et a été envisagée comme solution de pré-traitement des boues d'épuration pour faciliter la précipitation de matières fertilisantes (et notamment de struvites). La **struvite** est le fruit de la coprécipitation de l'ammonium et du phosphate (voir équation ci-contre) et est considérée comme un produit fertilisant intéressant. Son caractère solide et ses caractéristiques en font un engrais (contenant de l'azote, du magnésium et surtout du phosphate) à assimilation lente, permettant une utilisation dans la durée par les plantes et une réduction du risque de lessivage des nutriments.

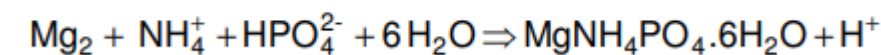
Des travaux ayant mis en évidence qu'une magnétisation des boues en amont de la digestion peut réduire la production de méthane, les chercheurs ont testé l'impact du procédé directement sur deux digestats, issus ici d'unités de traitement d'eaux usées italiennes. Les chercheurs ont appliqué un champ magnétique de 1.5 à 2 Tesla aux échantillons et testé l'influence de plusieurs paramètres dont le nombre de cycles de magnétisation, l'ajout de magnésium exogène à la réaction et l'oxygénation du digestat.

Les expériences ont mis en évidence une réduction de la concentration (par précipitation) des ions NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} et Mg^{2+} pouvant aller jusqu'à respectivement **28%, 38%, 34%, 39% et 31%** en phase liquide dans des conditions optimales^[1]. Parallèlement une analyse de la phase solide a montré une augmentation de composés azotés et phosphorés, dont la struvite.

Conclusions et ouvertures

Le procédé mis en évidence par les chercheurs, dont la performance économique reste à évaluer, permet d'envisager une meilleure valorisation des importantes quantités de phosphore contenues dans les boues de STEP. Elles permettent également d'éviter la recirculation de phases liquides fortes en nutriments et pouvant donner lieu à des enjeux techniques importants dans les stations d'épuration (p. ex. entartrage des canalisations).

[LIEN VERS L'ARTICLE](#)



Équation de précipitation de la struvite



Illustration de struvites, Source : AGCanada

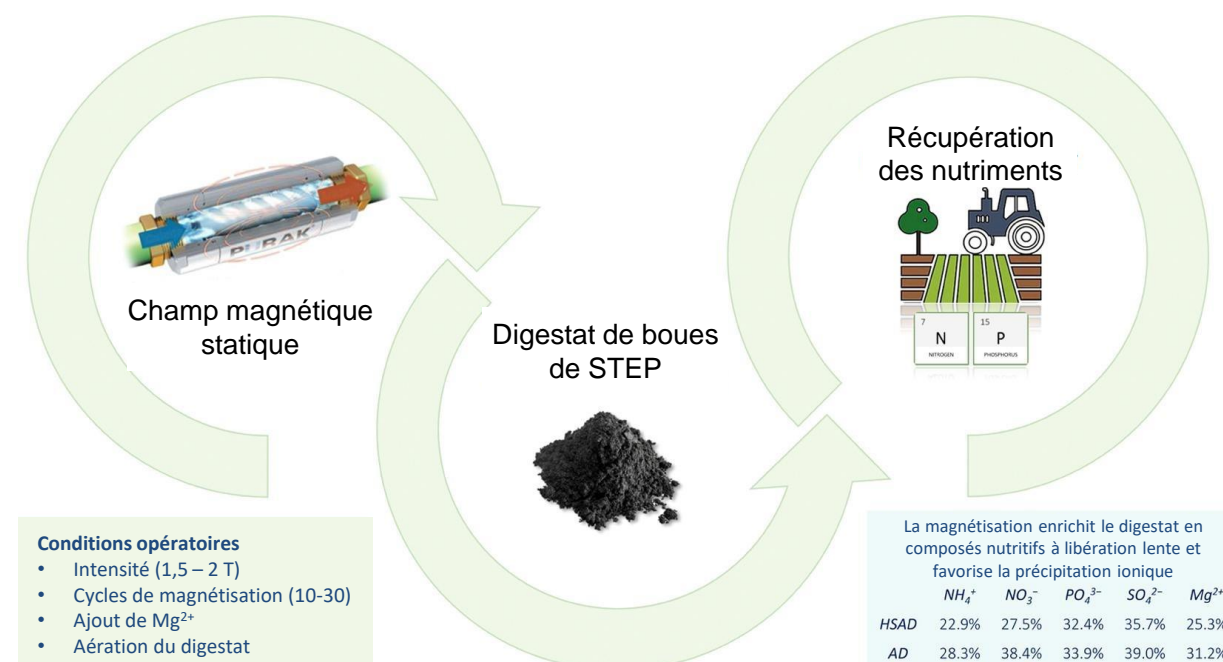


Schéma synthétique de l'expérience réalisée dans l'étude

[1] 30 cycles de magnétisation à 2T, ajout de magnésium à un ratio de $\text{Mg}_2^+ : \text{NH}_4^+ : \text{PO}_4^{3-} = 2:1:1$ et l'ajout d'oxygène pendant l'application du champ magnétique

Effet de la température et des matériaux à base de Ni et Mo sur l'élimination des sulfates en gazéification hydrothermale

EN BREF

Une équipe de chercheurs suisses de l'Institut Paul Scherrer, l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne et de l'Université de Sciences Appliquées du Nord-Ouest de la Suisse a cherché à décrypter le phénomène de réduction thermochimique du sulfate (en vue de son élimination) et les paramètres influant le procédé.

OBJET : article publié dans *Chemical Engineering Research and Design*

DATE : Avril 2024

[LIEN VERS L'ARTICLE](#)

OBJECTIF : étudier l'impact de différents catalyseurs et de la température sur la réduction du sulfate par le glycérol, et contribuer aux travaux sur la désactivation des catalyseurs par le sulfure en gazéification hydrothermale.

RÉSULTATS : La réduction du sulfate (facilitant son élimination) démarre à des températures de 420° - 440°C. L'utilisation de matériaux à base de Ni et Mo n'a en revanche pas d'impact significatif cette la réaction.

Contexte

Voie thermochimique permettant la valorisation de matières organiques humides, la gazéification hydrothermale (GHT) comprend deux grands types de technologies : la GHT catalytique et la GHT à haute température. Dans le cas de la GHT catalytique, plusieurs phénomènes peuvent désactiver les catalyseurs, parmi lesquels la précipitation des sels minéraux contenus dans les intrants ou la contamination au sulfure. Pour y remédier, les sels sont séparés en amont de la gazéification lors d'une étape spécifique s'appuyant sur la faible solubilité des sels dans l'eau à l'état supercritique. La présence d'une concentration résiduelle^[1] de sulfate contribue toutefois à affecter la durée de vie des catalyseurs à terme. L'étude analyse le phénomène de réduction thermochimique du sulfate comme possible solution, et l'impact de divers paramètres dans les conditions d'opération spécifiques à la GHT^[2].

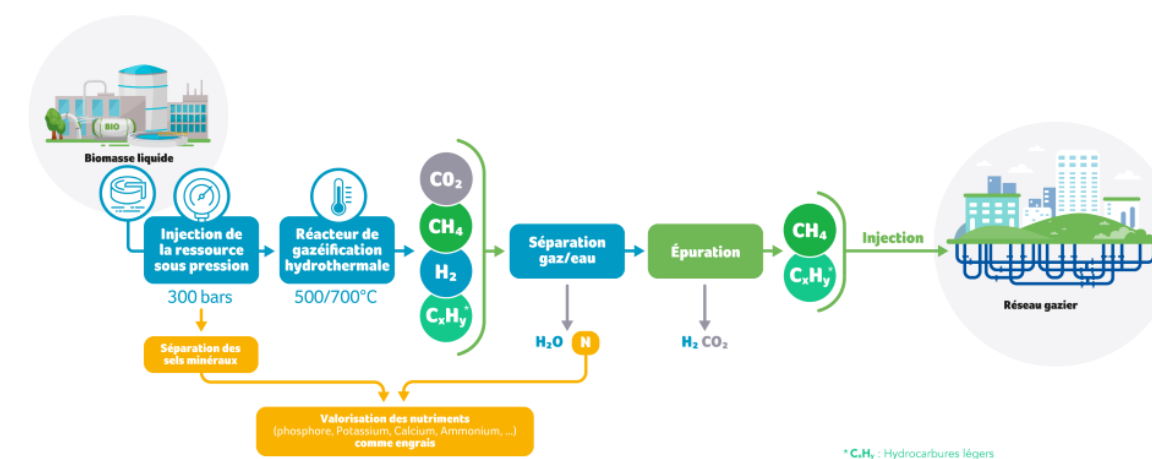


Schéma simplifié du procédé de gazéification hydrothermale
Source : GRDF

[1] Concentrations entre 1-10 mg/L ;

[2] Le procédé de gazéification hydrothermale est opéré dans des conditions de hautes températures (400 – 700 °C) et de haute pression (250 – 300 bars). Dans ces conditions supercritiques, l'eau se comporte comme un fluide avec des propriétés hybrides entre un gaz et un liquide.

Résultats

La biomasse humide contient généralement du soufre, sous forme de sulfides (sulfure inorganique, composés organosulfurés) ou de sulfates. Ces produits soufrés ont un impact négatif sur l'action des catalyseurs de GHT. Si les sulfides peuvent être éliminés efficacement en amont de la gazéification à l'aide de différents matériaux, les sulfates ne sont retirés que partiellement lors de l'étape de séparation des sels minéraux. Une solution consiste donc à réduire les sulfates résiduels en sulfides et les capturer au sein du séparateur de sels, en amont du réacteur de GHT.

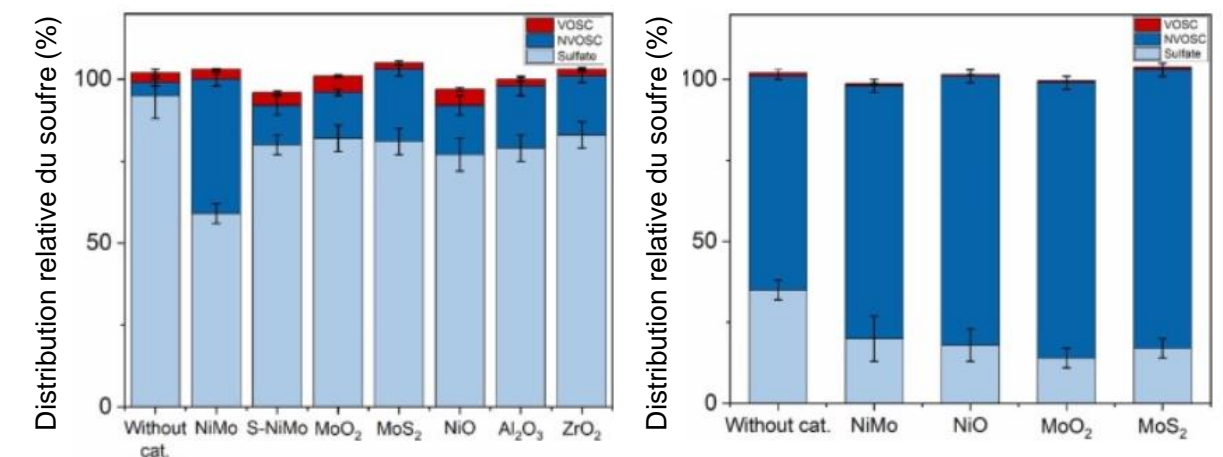
Les chercheurs ont mis en place un protocole de test en laboratoire reproduisant les conditions de fonctionnement de la GHT et simulant plusieurs concentrations de sulfate. Sur cette base, l'équipe a cherché à caractériser l'impact de la température sur la réduction du sulfate par du glycérol et de l'acétone, ainsi que l'impact des matériaux à base de Ni et Mo servant de catalyseurs pour la réduction du sulfate. Ces matières sont en effet reconnues pour leur efficacité éprouvée dans les procédés d'hydrodésulfuration du pétrole mais n'ont jamais été appliquées à la GHT. Les chercheurs ont obtenu les résultats suivants :

- Les sulfates, principaux responsables de la désactivation des catalyseurs, peuvent être réduits en divers produits organosulfurés dont la proportion obtenue varie selon les cas et dont l'impact sur les catalyseurs est moindre.
- **La réduction des sulfates** en composés organosulfurés volatils (principalement des thiophènes) **démarre à partir de 420-440°C** et seulement en présence de glycérol.
- La réduction des sulfates atteint des rendements plus importants (65-85% contre 20-40%) dans le cas de faibles concentrations en sulfates qu'à des niveaux élevés
- **Aucun effet catalytique significatif, concernant la réduction du sulfate, n'a été mis en évidence par l'utilisation de Ni et Mo.**

Application et valorisation

L'étude contribue à alimenter les réflexions sur la préservation de la durée de vie des catalyseurs, enjeu important de la GHT. La thermoréduction des sulfates constitue une piste intéressante pouvant être adaptée aux conditions opératoires spécifiques de cette filière. De futurs travaux pourront s'appuyer sur les résultats pour optimiser les taux de conversion.

[LIEN VERS L'ARTICLE](#)



Concentrations de soufre obtenues après réduction du sulfate par du glycérol (20% de la masse d'intrants) à une pression de 25 MPa et une température de 440°C au bout de 60 min, en présence de divers matériaux.

À gauche, la concentration de sulfate présente en entrée est élevée (10 mM K₂SO₄), à droite elle est faible (575 µm de K₂SO₄)

Production d'hydrogène par gazéification de déchets plastiques avec bouclage chimique

EN BREF

Une équipe de chercheurs américains de l'université de l'État de l'Ohio a mené une analyse des performances de la gazéification de déchets plastiques par bouclage chimique.

OBJET : article publié dans *Applications in Energy and Combustion Science*

DATE : Mai 2024

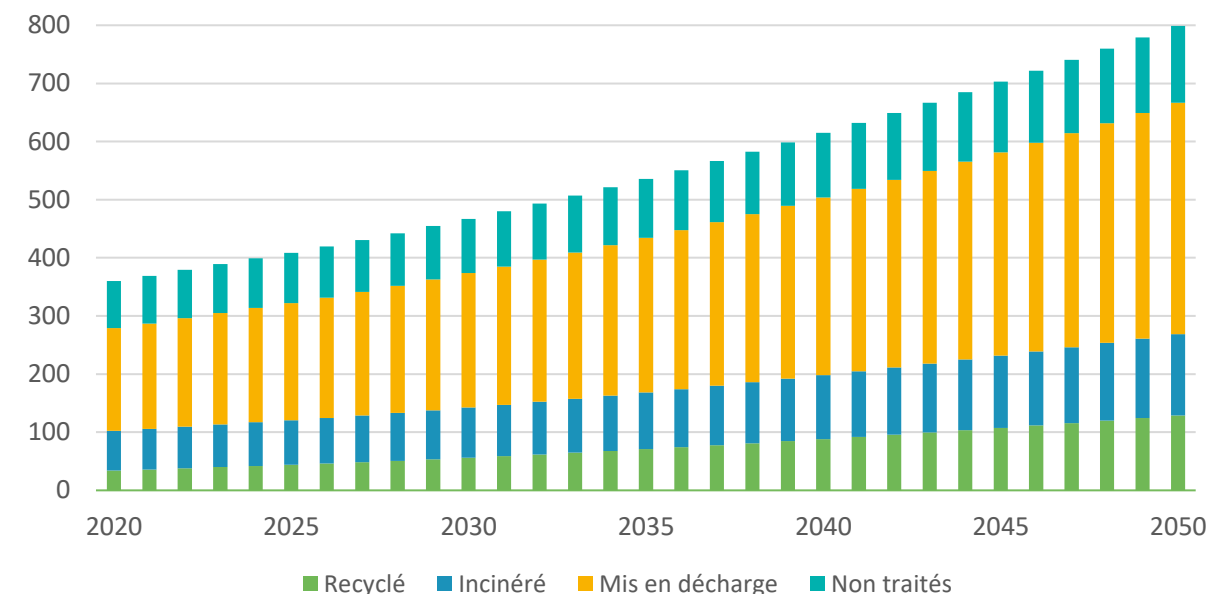
[LIEN VERS L'ARTICLE](#)

OBJECTIF : comparer les procédés de pyrolyse de déchets plastiques par bouclage chimique et par vaporeformage pour la production d'hydrogène

RÉSULTATS : le reformage par bouclage chimique produit un gaz de synthèse d'une pureté équivalente à celle du vaporeformage avec une réduction des émissions de CO₂ de 30% et une augmentation de 5% du rendement en hydrogène^[1] le tout sans apport externe de chaleur

Contexte

La production croissante de déchets plastiques et leur mobilisation progressive liée notamment aux obligations de tri (pour les professionnels depuis 2016 en France) interroge sur le meilleur moyen de les valoriser. Alors qu'ils ne sont pour la plupart pas valorisés (non traités ou mis en décharge, cf. graphique), et qu'une petite partie est encore souvent incinérée (cf. graphique), le développement de la pyrogazéification permet de les convertir en gaz de synthèse. La gazéification à la vapeur est un procédé de formation de gaz de synthèse qui permet la production d'un gaz riche en hydrogène. Ce procédé, surtout utilisé à partir de biomasse, présente comme défi technique majeur l'optimisation des consommations énergétiques, et notamment l'intégration thermique pour l'apport de chaleur. Par ailleurs, la gazéification de déchets plastiques, moins mature que la gazéification de biomasse, génère encore une grande quantité des résidus carbonés (comme les goudrons). Dans ce contexte, des procédés alternatifs sont à l'étude et la gazéification par bouclage chimique autothermique^[2] en fait partie.



Prévisions de la production mondiale de déchets plastiques et de leur valorisation (Source : OCDE)

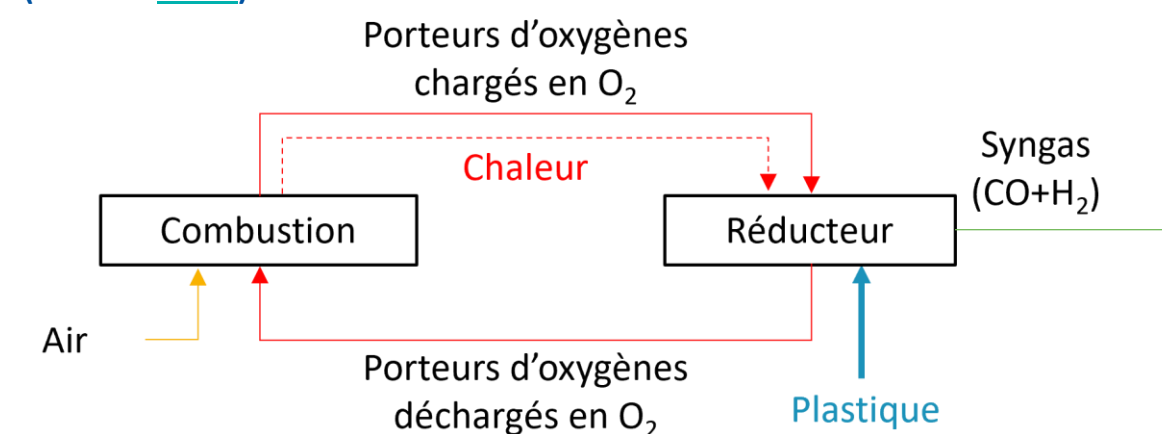


Schéma de fonctionnement simplifié de la pyrogazéification par bouclage chimique

[1] Rendement en H₂ défini comme étant la masse de H₂ en sortie divisée par la masse de plastique en entrée ;
 [2] La pureté du gaz de synthèse est calculée avec le taux de H₂ et de CO présents dans le gaz à la sortie du procédé ;

Résultats

Cette étude compare la production d'hydrogène par gazéification à la vapeur et par bouclage chimique, **en partie grâce à des simulations numériques** : seule la gazéification par bouclage chimique isotherme fait l'objet d'une expérience de laboratoire, le reste (bouclage autothermique, WGS, séparation) étant simulé numériquement à partir des résultats de l'expérience.

Le bouclage chimique^[1] se base sur l'utilisation **d'oxydes métalliques solides servant de matériaux transporteurs d'oxygène^[2] et de chaleur**, sous la forme de fines particules pour faciliter leur circulation. Ces particules entrent dans un premier réacteur dans lequel elles sont oxydées au contact de l'air (elles récupèrent de l'O₂ et de l'énergie thermique). Elles circulent ensuite dans le réacteur de gazéification où elles oxydent les déchets plastiques broyés (elles cèdent leur O₂ ainsi que leur chaleur) pour produire du gaz de synthèse riche en H₂ (voir schéma page précédente).

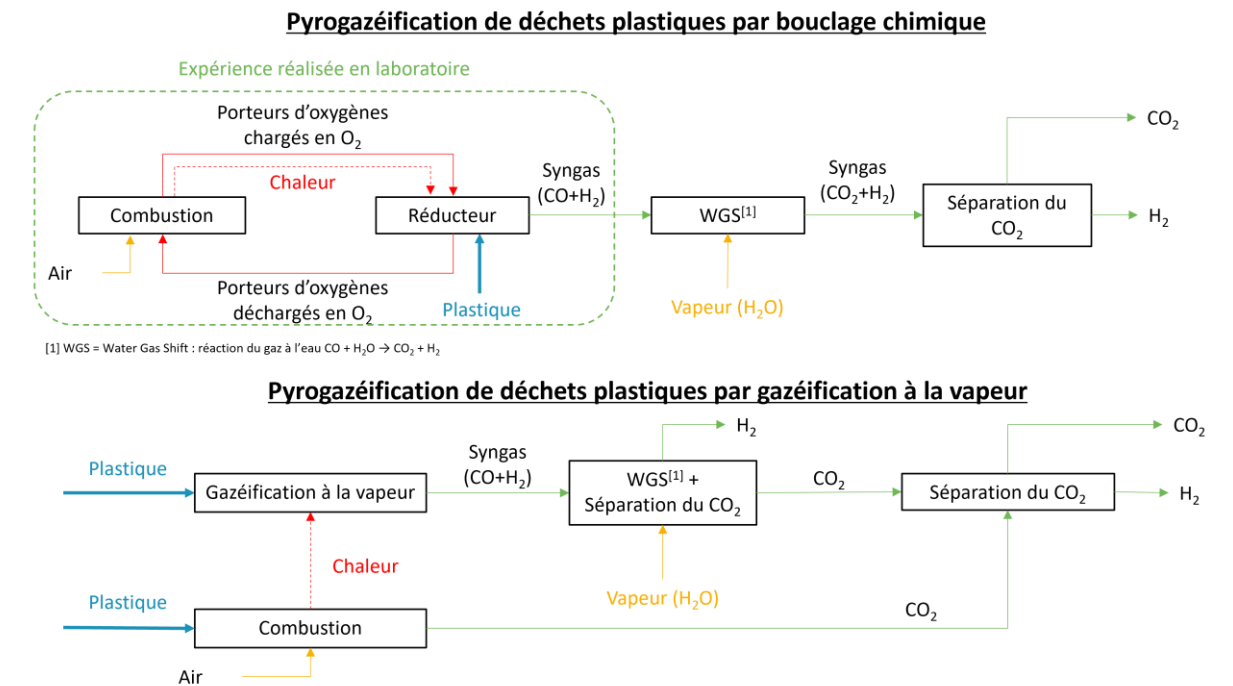
Les performances du bouclage chimique autothermique, comparées à la gazéification à la vapeur, sont les suivantes :

- **Pureté du gaz de synthèse supérieure à 90% (contre 98% pour la gazéification à la vapeur)**
- **Meilleure efficacité thermochimique^[3] avec des indicateurs CGE et ETE meilleurs de 6,3% et 4,5% respectivement**
- **Réduction de la production de CO₂ (44% contre 64% pour la gazéification à la vapeur)**
- Pas de besoin en apport net de chaleur
- **Hausse du rendement en H₂ de 5%**
- Résidus carbonés négligeables sur les porteurs d'oxygène

Application et valorisation

Ce procédé est prometteur pour le développement de la gazéification des déchets plastiques et présente a priori l'avantage **d'accepter une importante variété de déchets plastiques** sans nécessiter de sources de chaleur externes. D'autres études seront nécessaires pour optimiser le temps de séjour des solides et minimiser les coûts du réacteur. Tester la chaîne complète du procédé reste encore un point majeur pour juger de sa viabilité et de son potentiel développement dans le futur.

[LIEN VERS L'ARTICLE](#)



En haut : Schéma de fonctionnement simplifié du procédé par bouclage chimique de pyrogazéification.
En bas : Schéma de fonctionnement simplifié de la pyrogazéification par la voie de la gazéification à la vapeur.
Les deux procédés ont été simulés numériquement, seule la partie encadrée en vert a fait l'objet d'une expérience en laboratoire

[1] Autothermal chemical looping gasification of plastics (CLGP) ;

[2] OC : Oxygen Carriers ;

[3] Cold Gas Efficiency (CGE) : rapport du pouvoir calorifique supérieur du produit sur celui de l'intrant et Effective Thermal Efficiency (ETE) : rapport du pouvoir calorifique supérieur et l'énergie en sortie sur celui de l'intrant et de l'énergie en entrée



Méthanisation



Recherche

Analyse de différentes configurations de tamis moléculaires pour la purification directe du biogaz produit par méthanisation

EN BREF

Une équipe de chercheurs des Universités italiennes de Calabre et de Catane a évalué en laboratoire la performance de trois différents tamis moléculaires pour la purification de biogaz en biométhane.

OBJET : article publié dans *Fuel*

DATE : Février 2024

[LIEN VERS L'ARTICLE](#)

OBJECTIF : comparer la performance d'épuration sans traitement et recirculation de plusieurs modèles de tamis moléculaires

RÉSULTATS : la purification par tamis moléculaires permet d'atteindre des performances épuratoires supérieures à 95%, dans des conditions opérationnelles simples

Contexte

Plusieurs technologies permettent l'épuration du biogaz (composé à environ 60% de méthane, 35% de CO₂ et de gaz résiduels^[1]). Les principales technologies utilisées sont notamment le lavage à l'eau, la séparation membranaire ou l'adsorption (PSA, VPSA, TSA). La plupart de ces technologies nécessitent un prétraitement ou un post-traitement du gaz (p. ex. désulfuration) et/ou une recirculation en plusieurs étapes. Bien qu'elles présentent des structures de coût (CAPEX, OPEX) différentes, ces technologies ont pour point commun de constituer un poste de dépense important des unités de production de biométhane, et ce d'autant plus pour les unités de petite taille. Dans l'objectif d'identifier des perspectives d'amélioration de la compétitivité de la production de biométhane à petite échelle, les chercheurs ont évalué l'intérêt d'utiliser des modèles de tamis moléculaires déjà utilisés pour d'autres applications et disponibles dans le commerce.

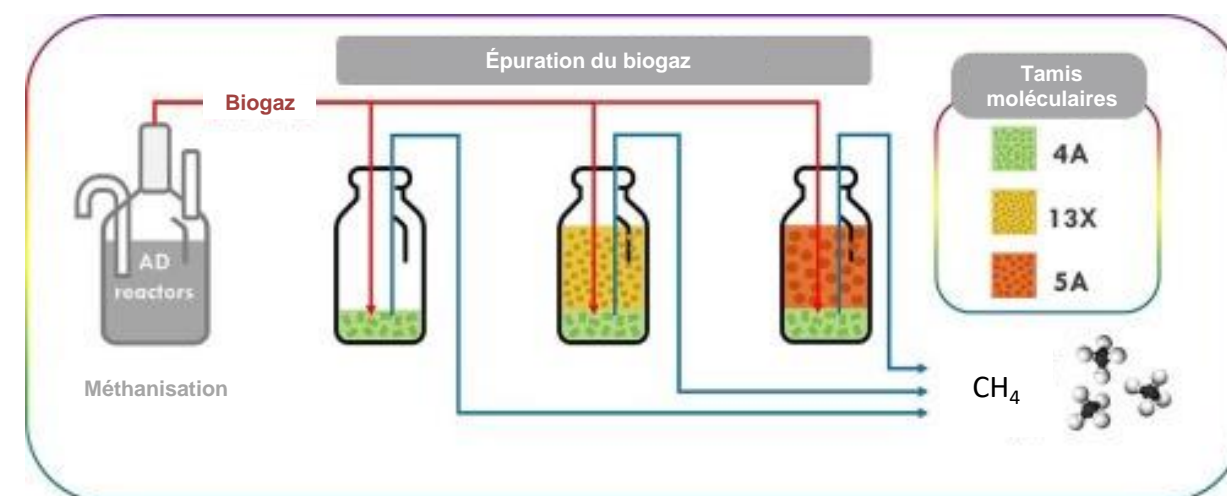


Schéma représentant les trois configurations de tamis moléculaires testées par l'équipe de recherche (utilisation de tamis seuls ou en série)

[1] Gaz résiduels : H₂S, NH₃, N₂, H₂, H₂O, d'après le rapport : [État des lieux des technologies de gaz verts](#);

Résultats

L'étude a consisté en l'épuration d'un biogaz réellement issu de méthanisation (et non d'un mélange de gaz purs, communément utilisés lors d'expériences en laboratoire) par différents systèmes de tamis moléculaires, et ce sans pré- ou post-traitement, ni recirculation. Trois modèles de tamis (4A, 5A, 13X) largement utilisés dans l'industrie et disponible à prix compétitif ont été acquis auprès du constructeur spécialisé Honeywell. Ces composés aluminosilicatés inorganiques généralement utilisés comme adsorbants solides dans les applications industrielles sont commercialisés en différentes tailles sous forme de billes (13X et 5A) et de pastilles (4A). Les tamis nécessitent d'être régénérés pour pouvoir maintenir leur efficacité dans le temps. Trois configurations de digesteurs semi-continus expérimentaux (2L) associés à des modules d'épuration par tamis moléculaire ont été testées :

- A. Purification par tamis 4A
- B. Purification en série par tamis 4A (25% du volume) puis 13X (75%)
- C. Purification en série par tamis 4A (25% du volume) puis 5A (75%)

Pour chaque système, l'efficacité de l'épuration (proportion de CH₄ dans le gaz obtenu) a été suivie sur 30 jours. Dans le cas de l'utilisation du filtre seul (4A), l'efficacité de l'épuration s'est avérée très élevée mais a décliné largement à partir du 18^{ème} jour. L'utilisation de différents tamis en série a permis d'obtenir des rendements épuratoires de l'ordre de 95% sur l'ensemble de la durée du test. Ces valeurs sont à comparer aux valeurs supérieures à 98% pouvant être obtenues par les systèmes d'épuration actuellement utilisés dans l'industrie.

Application et valorisation

Permettant d'obtenir des rendements intéressants (pureté supérieure à 97%) l'usage de tamis a pour avantage de s'appuyer sur des produits disponibles et économiques, à basse pression et sans pré-traitement. De futurs travaux devront toutefois permettre d'évaluer la capacité à améliorer encore ce rendement épuratoire. En effet, les performances actuellement constatées ne permettent pas de respecter les exigences de la réglementation nationale (ICPE) et européenne (RED). En France, la réglementation ICPE¹ impose aux unités de plus de 50 Nm³/h de respecter un taux de méthane résiduel dans les gaz d'effluents inférieur à 1% (puis 0,5% à partir de 2025), et aux unités dotées d'une capacité de production inférieure à 50 Nm³/h un taux de 2% (puis 1% à partir de 2025). Dans cette logique, la performance technico-économique d'un système combinant épuration par tamis avec des dispositifs de combustion des gaz résiduels (cf. article de cette veille sur les RTO) pourra également être évaluée et comparée aux systèmes d'épuration disponibles sur le marché.

Enfin, l'identification des meilleures modalités de régénération des tamis et l'évaluation de l'impact de plusieurs cycles de régénération sur l'efficacité sont nécessaires pour assurer le maintien de la performance dans la durée.

[LIEN VERS L'ARTICLE](#)

Configurations	Durée d'utilisation des tamis en jours			
	8	18	28	30
A	100%	98%	91%	87%
B	98%	99%	95%	95%
C	98%	98%	100%	97%

Tableau présentant la performance d'épuration selon les différentes configurations testées et au fil de la durée du test

[1] Arrêté du 10/11/09 fixant les règles techniques auxquelles doivent satisfaire les installations de méthanisation soumises à autorisation en application du titre Ier du livre V du code de l'environnement

Méthanation dans un réacteur à lit fixe avec un flux d'alimentation en biogaz distribué

EN BREF

Une équipe de chercheurs espagnols de l'université de Zaragoza a comparé les performances de différents modes d'injection de biogaz dans un réacteur de méthanation à lit fixe et montré qu'**introduire du biogaz avec un flux distribué permet d'accroître les performances de la réaction et de réduire les points chauds.**

OBJET : article publié dans *Catalysis Today*

DATE : mai 2024

[LIEN VERS L'ARTICLE](#)

OBJECTIF : comparer les performances (sélectivité et taux de conversion) des réacteurs de méthanation catalytique à lit fixe selon la configuration d'injection du biogaz

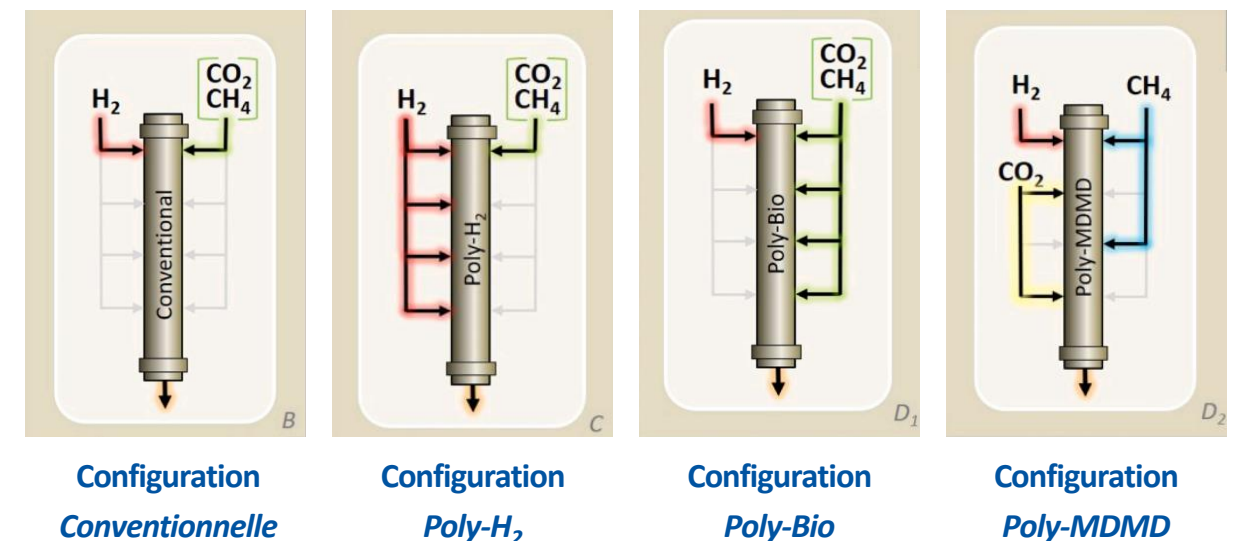
RÉSULTATS : l'alimentation en flux distribué offre de meilleures performances de conversion du CO₂, de sélectivité du CH₄ ainsi qu'une réduction des points chauds dans le réacteur

Contexte

Avec le développement des énergies renouvelables intermittentes, la filière *Power-to-gas*^[1] s'affirme comme une solution prometteuse pour le stockage d'énergie et la flexibilité du réseau électrique. Elle permet en effet d'utiliser le surplus d'électricité pour produire de l'hydrogène (par électrolyse) qui peut être soit utilisé directement soit recombinaé avec du CO₂ (issu du biogaz ou de CCUS^[2]) pour produire du méthane injectable dans le réseau de gaz (étape de méthanation). Cette étude s'intéresse à l'optimisation de la configuration des réacteurs de méthanation à lit fixe (technologie actuellement la plus mature et la plus simple) en proposant et comparant plusieurs modes d'injection de biogaz. Les chercheurs souhaitent en particulier analyser l'influence de la configuration du réacteur sur : la sélectivité vis-à-vis du CH₄, le taux de conversion du CO₂ et le contrôle de la température (voir tableau à droite).

Performance évaluée par les chercheurs	Explication
Sélectivité du CH ₄	Favoriser la méthanation directe* du CO ₂ en CH ₄ plutôt que sa méthanation indirecte** en CO (et en co-produits indésirables comme les dépôts carbonés). *Directe : $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$ **Indirecte : $CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$ puis $CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$
Conversion du CO ₂	Accroître le taux de conversion du CO ₂ en CH ₄ pour augmenter la quantité de gaz injectable et limiter les étapes de purification.
Contrôle de la température	Limiter l'apparition des points chauds qui conduisent notamment à la formation de résidus carbonés.

Schéma des différentes configurations testées lors de cette expérience [3]



[1] Pour en savoir plus sur la filière Power-to-gas : [ATEE](#) ou [État des lieux des technologies de gaz verts](#) ;
[2] CCUS : Carbon Capture Usage and Storage ;
[3] Une autre configuration a été testée, elle est similaire à la D2 (nommée D3) et inverse la place du CH₄ et du CO₂

Résultats

Les expériences ont été réalisées dans un réacteur à lit fixe utilisant un catalyseur à base de Ni-Mn. Plusieurs températures (entre 250°C et 400°C) et vitesses d'injection (WHSV^[1] entre 6,6 et 47,7 g_{CO2} g_{cat}⁻¹ h⁻¹) ont été appliquées et les conclusions restent les mêmes quant aux différents modes d'injection du biogaz. L'alimentation « Poly-Bio » (voir schéma précédent) présente les meilleurs résultats des configurations testées, les voici :

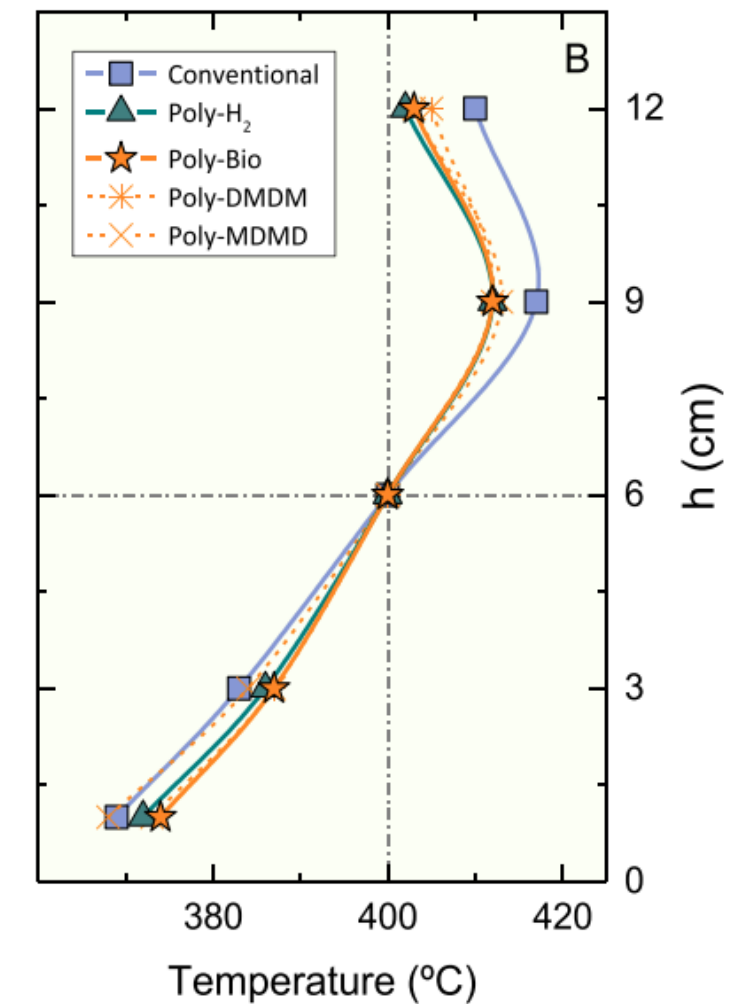
- **Débit de production de méthane 2,4 fois plus important** comparé à un réacteur dans une configuration conventionnelle avec les mêmes conditions d'opération (Température, Pression, WHSV, rapport H₂:CO_{2-in} et CH₄:CO_{2-in})
- Meilleure activité de la réaction avec un **taux de conversion de 15,3% du CO₂ contre 12,5% en alimentation conventionnelle**
- **Sélectivité plus haute du CH₄** dans la configuration « Poly-Bio » que dans la configuration conventionnelle
- **Réduction du phénomène de points chauds** grâce à une meilleure distribution de température le long du réacteur

Il est intéressant de noter qu'à l'inverse de l'alimentation « Poly-bio », l'alimentation en « Poly-H2 » (une alimentation où le flux d'H₂ est distribué et celui du biogaz est en un seul point), **les résultats se dégradent, et ce sur tous les critères précédents** (sélectivité du CH₄ et celle du CO ainsi que l'apparition de points chauds).

Application et valorisation

L'utilisation d'un flux de biogaz distribué le long du réacteur de méthanation est prometteuse car elle améliore les performances du système (meilleure sélectivité du méthane et production accrue, homogénéisation de la température dans le réacteur et diminution des points chauds qui entraînent la formation de résidus carbonés), elle simplifie le contrôle en température et pourrait aider à l'accélération du déploiement de la filière.

[LIEN VERS L'ARTICLE](#)



Graphique représentant la température d'équilibre le long du réacteur, montrant ainsi l'effet de réduction des points chauds (à 9 cm surtout) avec un flux de biogaz distribué. En effet à 9cm et 12cm une réduction de la température est observée grâce aux alimentations distribuées ce qui limite le maximum de température dans le réacteur et donc le phénomène de points chauds.

[1] Weight hourly space velocity : vitesse d'injection de gaz, ici le CO₂, calculée en gCO₂ g_{cat}⁻¹ h⁻¹

Revue de différents mécanismes d'absorption extracellulaire d'électrons pour une application à l'électrométhanogénèse

EN BREF

Une équipe de chercheurs du département de génie chimique et biologique de l'université d'Aarhus (Danemark) a réalisé une revue scientifique des interactions entre les composants biologiques et électrochimiques dans différents modèles d'électrométhanogénèse.

OBJET : article publié dans *Biotechnology Advances*

DATE : Mai 2024

[LIEN VERS L'ARTICLE](#)

OBJECTIF : comparer la performance de différents mécanismes d'absorption d'électrons par les micro-organismes utilisés en électrométhanogénèse

RÉSULTATS : les mécanismes reposant sur une absorption indirecte des électrons (via du dihydrogène) donnent lieu à de meilleurs résultats de production de CH₄

Contexte

L'électrométhanogénèse s'inscrit dans la famille des procédés de *Power-to-méthane*, visant la production de méthane à partir d'électricité, d'eau, et d'une source de CO₂ à convertir. Les projets industriels de *Power-to-méthane* associent généralement une unité d'électrolyse pour la production d'H₂ et une unité de méthanation^[1] (biologique ou catalytique). Procédé plus émergent, l'électrométhanogénèse se différencie par sa capacité à synthétiser du méthane sans apport externe d'hydrogène, en couplant au sein d'une même brique l'action d'électrodes et de micro-organismes méthanogènes. L'intérêt scientifique récent se justifie par les perspectives de gains de coûts liés à la compacité, par rapport à la méthanation biologique seule, et à l'absence de catalyseur métallique, par rapport à la méthanation catalytique. Adoptant une approche multidisciplinaire à la croisée de l'ingénierie, la microbiologie et l'électrochimie, les chercheurs ont réalisé une revue de différents mécanismes d'absorption d'électrons mis en œuvre par les corps méthanogènes en interaction avec la cathode.

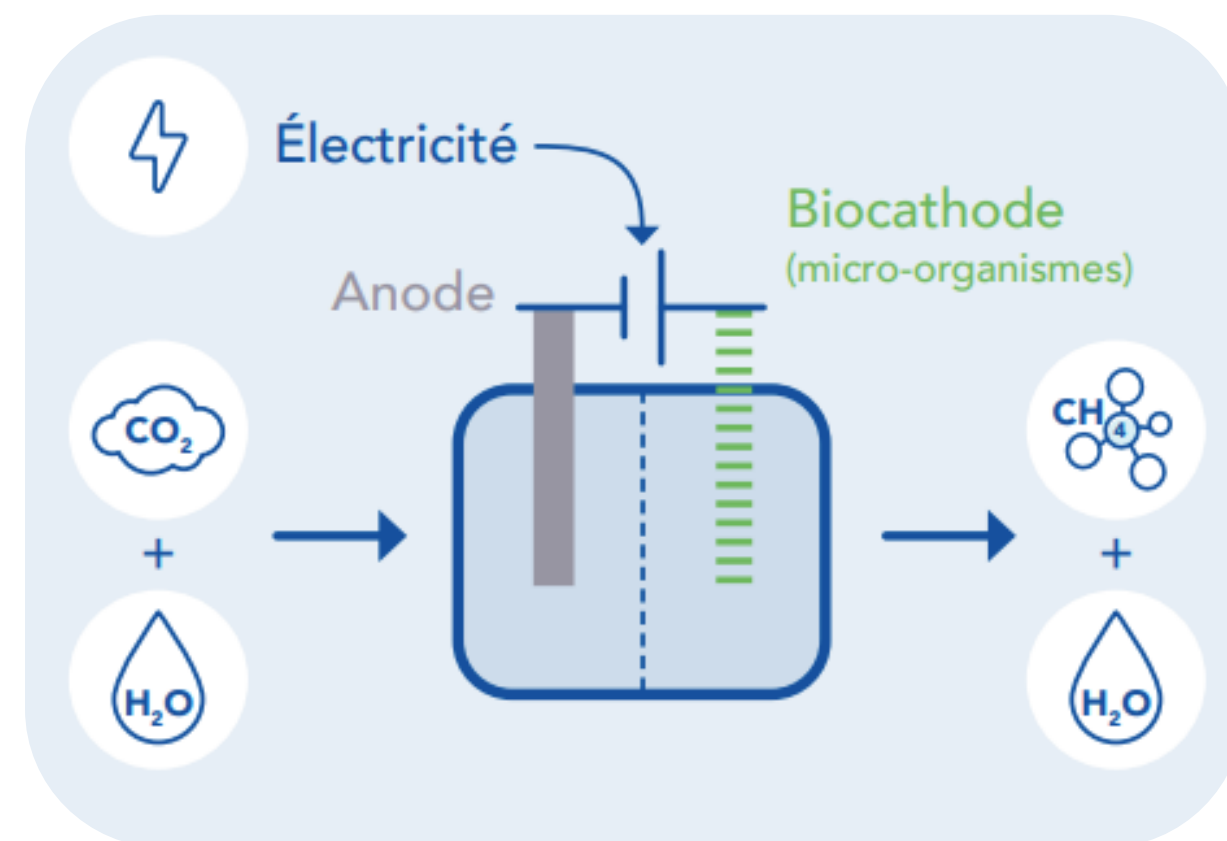


Schéma simplifié du procédé d'électrométhanogénèse

Source : [État des lieux des technologies de gaz verts](#)

[1] Méthanation : procédé consistant à faire réagir du CO₂ et de l'H₂ (grâce à des micro-organismes pour la méthanation biologique et grâce à des catalyseurs pour la méthanation catalytique) afin de produire du méthane : pour en savoir plus : [États des lieux des technologies de gaz verts](#)

Résultats

Les systèmes d'électrométhanogénèse se composent généralement de deux chambres séparées par une membrane, contenant respectivement une anode et une cathode, alimentées par une source externe d'électricité. La tension négative à la cathode permet aux micro-organismes méthanogènes présents (en monoculture ou en culture mixte avec plusieurs espèces méthanogènes) **d'utiliser les électrons disponibles pour convertir le CO₂ en méthane**. L'étude compare différents mécanismes permettant l'extraction d'électrons par des organismes méthanogènes et distingue notamment :

- **Les mécanismes directs** où les électrons sont directement captés depuis la cathode et utilisés par les micro-organismes pour produire du CH₄
- **Les mécanismes indirects** où les électrons sont captés pour former des composés intermédiaires (comme de l'H₂ ou des ions formiates^[1]) réutilisés pour synthétiser du CH₄

Pour cette revue, les chercheurs ont comparé les résultats d'études portant sur l'électrométhanogénèse mais également sur la biocorrosion, procédé proche utilisant du fer comme source d'électrons. En effet, l'analyse du phénomène de corrosion de fer zérovalent (Fe⁰) par des espèces méthanogènes apporte un éclairage complémentaire sur les mécanismes d'extraction d'électrons. Les 5 principaux mécanismes étudiés sont présentés sur le schéma ci-contre. Malgré la complexité liée à la comparaison de résultats obtenus dans des conditions opératoires différentes (tension, type de réacteur, matière constitutive de la cathode, etc.), **la revue conclut à une performance en matière de production de méthane supérieure pour les phénomènes indirects mobilisant de l'hydrogène ou des ions formiates comme intermédiaire** (en rouge sur le schéma). Cette **meilleure performance** est justifiée par **l'écart de production de méthane 5 fois plus faible** lorsque la même **population de micro-organismes est privée des enzymes** permettant la formation de composés intermédiaires (Étude de [Rowe et al., 2019](#)).

Application et valorisation

Dressant un état de l'art précis des résultats disponibles dans la littérature, la revue permet d'aiguiller les travaux nécessaires pour tendre vers un passage à l'échelle de cette filière. En particulier, le choix des modes d'extraction d'électrons les plus efficaces et l'optimisation des conditions opératoires devront permettre d'augmenter les rendements de conversion du CO₂ en CH₄, qui constitue l'un des principaux enjeux actuels de l'électrométhanogénèse.

[LIEN VERS L'ARTICLE](#)

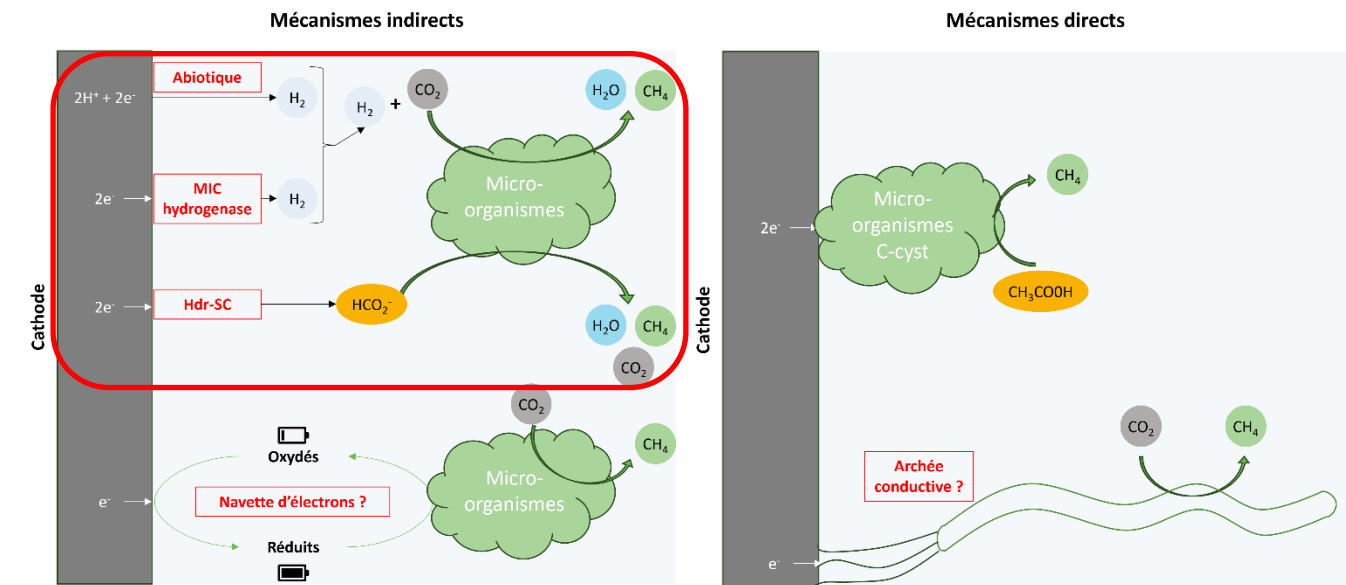


Schéma descriptif des procédés d'extraction d'électrons comparés, distinguant les mécanismes indirects (à gauche) et directs (à droite).

Les cinq procédés d'absorption des électrons détaillés dans l'étude et le schéma sont les suivants :

- Abiotique : production de H₂ par la cathode causant sa corrosion,
- MIC et Hdr-SC sont des types d'enzymes produisant des composés intermédiaires pour l'électrométhanogénèse de certains micro-organismes,
- Navette d'électrons : phénomène encore peu connu de transfert d'électrons par des réactions d'oxydoréduction de composés intermédiaires (ex : Fe³⁺, U⁶⁺),
- Micro-organismes C-cyst : captation directe des électrons du métal par les micro-organismes pour transformer de l'acétate en méthane,
- Archée conductive : procédé encore peu connu de captage des électrons par de longs filaments pour transformer du CO₂ en CH₄.

L'usage de points d'interrogation met en évidence les systèmes n'étant pas encore complètement élucidés et nécessitant des travaux complémentaires.

[1] Ions formiates : HCO₂⁻

Évaluation technico-économique de la réduction des émissions de gaz à effet de serre par la combustion des *offgas* d'épuration

EN BREF

Une équipe de chercheurs d'instituts publics italiens : ENEA^[1] et JRC^[2] et l'entreprise Airprotech (fournissant des équipements de post combustion de gaz) ont publié une étude technico-économique sur la viabilité de la postcombustion des gaz résiduels après l'épuration du biogaz et trouvent **un seuil limite de rentabilité à une valeur de 0,3% de méthane perdu lors cette épuration.**

OBJET : article publié dans *Journal of Environmental Management*

DATE : Juin 2024

[LIEN VERS L'ARTICLE](#)

OBJECTIF : fournir le coût d'évitement d'une tonne de CO₂ par l'installation d'une technologie de combustion RTO^[3] des gaz épurés dit « *offgas* » (ou gaz pauvres) pour aider les décideurs politiques, économiques et scientifiques

RÉSULTATS : il peut être considéré qu'à 0,3% de perte de méthane à l'épuration, il est rentable économiquement au vu du prix du CO₂ sur le marché ETS (50 – 100 €/CO₂eq) d'installer un système RTO

Contexte

Le biométhane injecté dans les réseaux est pour le moment essentiellement issu du biogaz épuré produit par méthanisation. L'épuration (« *upgrading* » en anglais) est la séparation du biométhane des autres gaz, dits « *offgas* », (dont le CO₂ fait partie), ces derniers étant le plus souvent relâchés dans l'atmosphère. Les technologies d'épuration courantes (p. ex. membranes, absorption, PSA) sont souvent efficaces à plus de 99% et permettent de respecter la réglementation française et européenne. Cependant, le CH₄ ayant un potentiel de réchauffement global (PRG) près de 30 fois plus important que le CO₂ sur 100 ans, il est important de continuer à réduire l'impact environnemental du biogaz en diminuant au maximum les (déjà faibles) émissions de méthane comprises dans les *offgas*. L'article étudié s'intéresse ainsi à la possibilité d'oxyder (c.-à-d., de brûler) ce méthane résiduel par une technologie de RTO^[3] (utilisée dans des secteurs émetteurs de COV^[4] : raffineries, usage de peintures et de solvants) pour en limiter l'impact environnemental. L'étude fournit une estimation du coût d'abattement des émissions CO₂eq qui en résulte.

In situ	Absorption	Adsorption		Séparation	
	Physique (p. ex. lavage à l'eau ou biolavage)	Chimique	Pressure-Swing-Adsorption (PSA)	Temperature-Swing-Adsorption (TSA)	Membrane Cryogénie

Principales technologies d'épuration du biogaz

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] ENEA : Agence nationale italienne des nouvelles technologies, de l'énergie et du développement durable ;
 [2] JRC : Joint Research Center, troisième plus gros centre commun de recherche européen ;
 [3] RTO : Regenerative Thermal Oxidizer : système consistant à brûler les éléments résiduels dans les gaz d'échappement (méthane, composés organiques volatils) pour réduire la pollution et n'émettre que du CO₂ et de l'H₂O dans l'atmosphère
 [4] COV : Composés Organiques Volatils

Résultats

De nombreuses technologies d'épuration du biogaz existent : l'absorption à l'eau, l'absorption aux amines, l'adsorption par inversion de pression (*Pressure-Swing Adsorption*), la filtration membranaire, la cryogénie ou encore l'extraction par solvants organiques. Néanmoins, le coût d'abattement d'une tonne de CO₂eq d'une unité RTO est indépendant de la technologie d'épuration utilisée et peut donc être étudié simplement à partir du coût des unités RTO (CAPEX et OPEX) en fonction de la taille de l'unité de production et du pourcentage de méthane présent dans les *offgas*.

L'installation d'unités RTO est donc analysée sur plusieurs configurations d'unités de méthanisation, avec des volumes d'*offgas* de 500 ou 1700 m³/h et des CAPEX variables. Par ailleurs, le coût d'abattement de la tCO₂eq est comparé avec son prix sur le marché ETS même si la production de biométhane n'est pas soumise au mécanisme : cette comparaison de rentabilité est donc ici informative.

Pour la réalisation de l'étude, il est considéré que **l'unité de RTO peut s'autoalimenter en carburant à partir de 0,5% de méthane contenu dans les *offgas*** (soit un « *methane slip* » de 0,33%^[1] de la production totale de biométhane). Avec cette hypothèse, les calculs technico-économiques mènent aux conclusions suivantes :

- Avec **0,3% du méthane total non capturé compris dans les *offgas*** (soit un taux de 0,5% de méthane dans le *offgas*), **il est théoriquement rentable d'installer une unité de RTO** car le coût est compris entre 50 et 100 €/tCO₂eq soit autour du prix actuel de la tonne de carbone (~80€ pour 2023)
- Le point critique est de 0,2% de biométhane non capturé, affichant des prix entre 50 et 150 €/tCO₂eq soit dans l'ordre de grandeur des prix du marché du carbone.

Application et valorisation

Ces calculs technico-économiques apportent un éclairage sur le coût d'abattement potentiel d'une tonne de CO₂eq via un système de combustion des *offgas*. Avec un coût d'abattement estimé entre 50 et 100 €/tCO₂eq, l'installation d'unités de RTO pourrait être économiquement viable avec un prix du carbone comparable à celui de l'EU-ETS.

Pour autant, **la priorité pour la filière reste de maximiser le volume de biométhane injecté et de limiter à moins de 0,5% la part de méthane compris dans les *offgas***, conformément à la réglementation française^[2]. De plus, bien que le RTO soit en théorie énergétiquement partiellement alimenté par une partie du CH₄ présent dans les *offgas*, l'ajout de cette technologie pose tout de même la question de l'efficacité énergétique globale des unités de méthanisation, la réglementation limitant à 15% l'apport d'énergie nécessaire pour la production d'une unité de biométhane. De nouvelles comparaisons des RTO avec d'autres technologies de traitement des *offgas* (par exemple, la liquéfaction qui permet la valorisation du bioCO₂ liquéfié et la récupération du CH₄ au lieu de sa combustion) seraient pertinentes. Ces résultats mériteraient aussi d'être reproduits sur des unités de plus petite taille pour vérifier la viabilité des CAPEX.

[LIEN VERS L'ARTICLE](#)

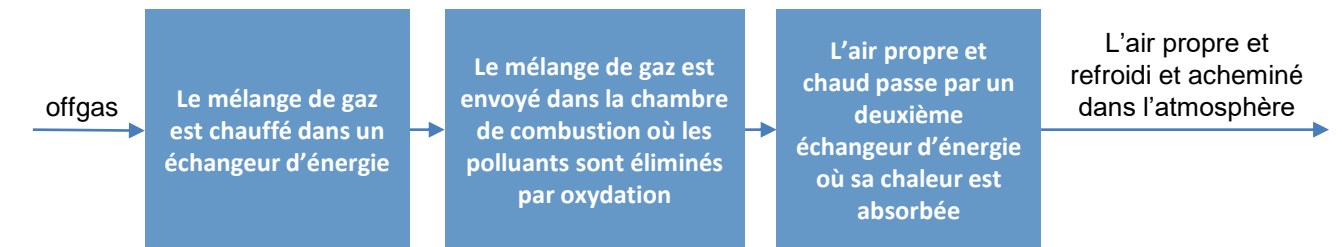
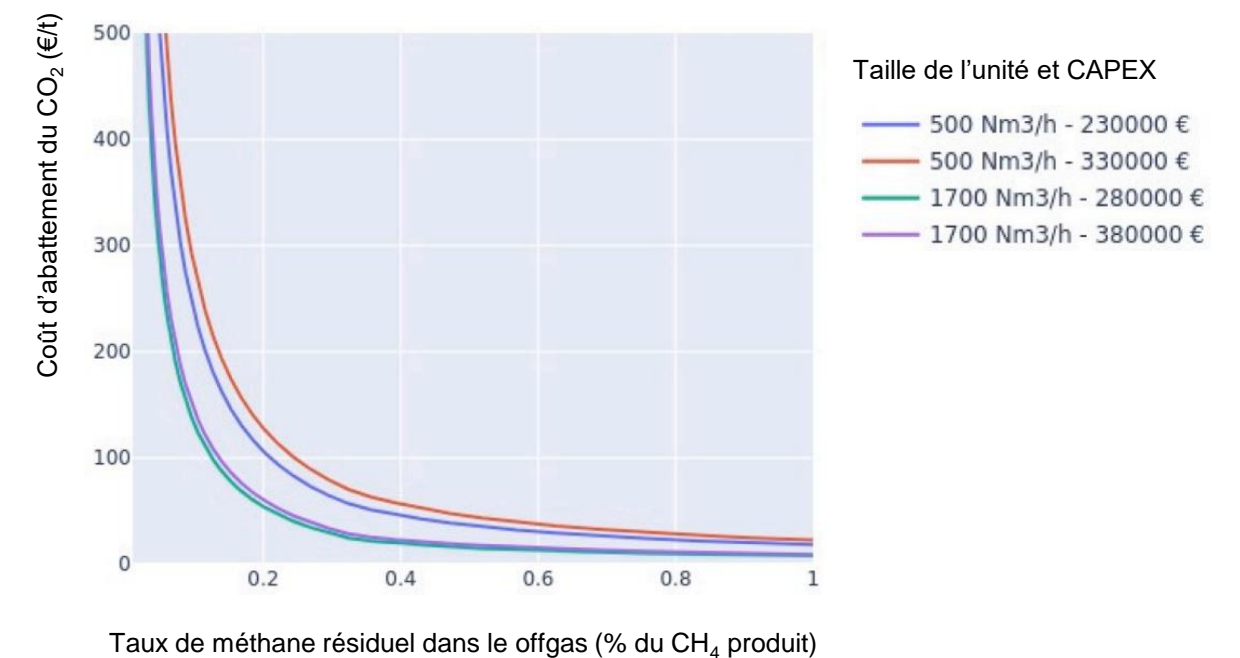


Schéma simplifié du fonctionnement d'un *Regenerative Thermal Oxidizer*



Graphique (issu de l'étude) représentant le coût d'abattement d'une tonne de CO₂eq par l'ajout d'une unité RTO en fonction du taux de méthane non capturé (*methane slip*) et des différentes hypothèses de coûts et de débit des installations

[1] 40% du gaz produit est du *offgas* donc 0,5% de méthane dans 40% donne 0,2% du total du biogaz soit 0,2%/60% = 0,33% du biométhane total donc le *methane slip* est de 0,33%
 [2] Réglementation ICPE 2781 : imposant une valeur limite de méthane contenu dans les gaz épurés de 1% et 0,5% en 2025 pour les sites respectivement de moins de 50Nm³/h et de plus de 50Nm³/h. Actuellement, ces limites sont respectivement de 2% et 1%

Optimisation du dimensionnement technique d'un système *Power-to-gas* par modélisation mathématique

EN BREF

Une équipe de chercheurs des universités de l'ETH Zürich en Suisse, de l'université de Pise en Italie et de l'institut IMDEA Energy en Espagne ont publié un article sur la recherche d'optimalité technique d'un système de *Power-to-méthane*. Ces derniers ont analysé par modélisation mathématique la performance d'un système de *Power-to-méthane* selon plusieurs indicateurs techniques prédéfinis pour proposer une architecture la plus performante possible.

OBJET : article publié dans *Renewable Energy*

DATE : Juin 2024

[LIEN VERS L'ARTICLE](#)

OBJECTIF : identifier le dimensionnement optimal des principaux composants d'un système de *power-to-methane* alimenté par électricité éolienne et associé à un stockage tampon d'hydrogène

RÉSULTATS : dans le cas étudié, l'utilisation d'un stockage de petit volume d'hydrogène couplé à une unité de méthanation dimensionnée à hauteur de 80% de la capacité d'électrolyse installée offre les meilleurs résultats

Contexte

Parmi l'ensemble des systèmes permettant d'offrir une solution à l'intégration d'énergie électrique intermittente, les systèmes de *Power-to-méthane* sont considérés comme des briques essentielles en raison du caractère stockable du gaz produit et la possibilité de valoriser les infrastructures gazières existantes^[1]. Le principe du *Power-to-méthane* est présenté sur le schéma ci-contre. L'association directe de sources d'électricité renouvelable intermittente à des électrolyseurs et une unité de méthanation, sans apport d'électricité par le réseau électrique, présente toutefois des enjeux techniques importants. La variabilité de l'approvisionnement tend à diminuer les facteurs de charge (et donc à augmenter les coûts de production moyens) et à entraîner des cycles d'arrêt/redémarrage fréquents (contribuant à une dégradation accélérée des composants). Plusieurs solutions existent, parmi lesquelles un surdimensionnement de l'approvisionnement électrique ou l'utilisation d'unités d'électrolyse en parallèle, mais toutes posent la question de l'optimum entre performance et coûts. Les auteurs se sont penchés sur l'analyse détaillée d'une approche spécifique, visant à introduire un stockage tampon d'hydrogène en aval de l'électrolyseur et en amont de l'unité de méthanation.

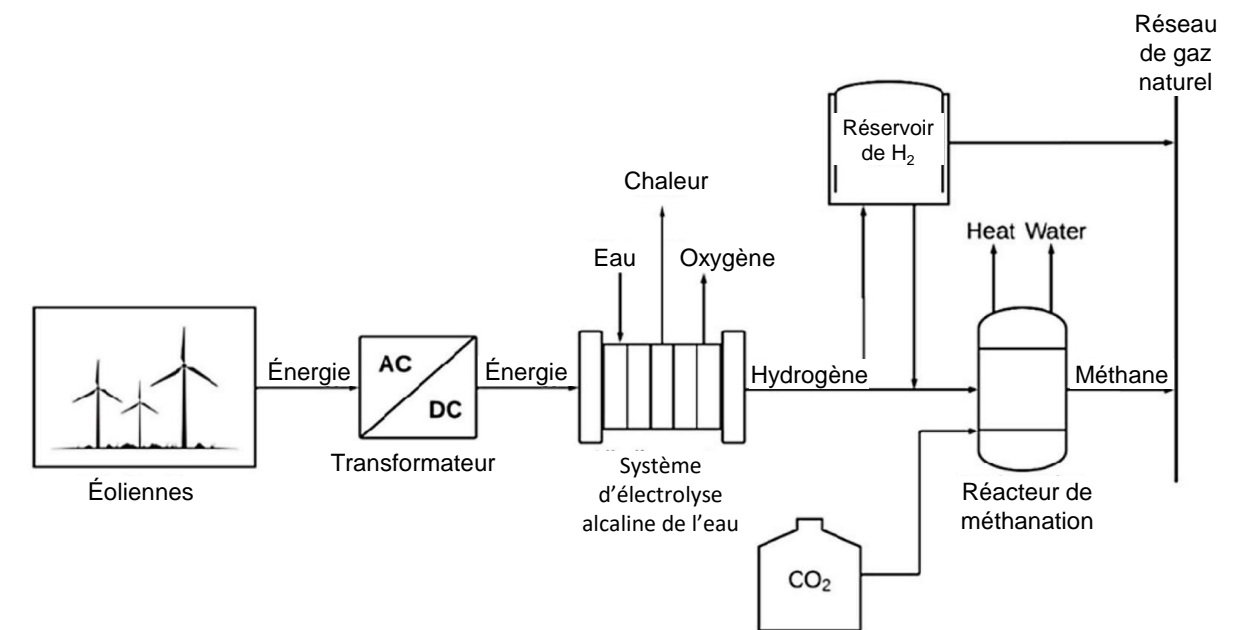


Schéma issu de l'étude et représentant l'installation de *Power-to-Méthane* modélisée

[1] Voir la revue de littérature menée par les auteurs dont : A.B. Gallo, J.R. Simões-Moreira, H.K.M. Costa, M.M. Santos, E. Moutinho dos Santos, Energy storage in the energy transition context: a technology review, Renew. Sustain. Energy Rev. 65 (2016)

Résultats

L'étude se focalise sur la simulation technique d'un système de *Power-to-méthane*. Elle propose une modélisation poussée d'une unité comprenant 12 MW d'éoliennes (8x1.5 MW), un système d'électrolyseurs alcalins de 12 MW (4x3 MW) lié à un stockage d'hydrogène tampon et une unité de méthanation. Les profils de production d'électricité éolienne sont issus du National Renewable Energy Laboratory (NREL – Colorado) moyennés sur un pas de temps de 5 minutes et représentatifs d'une zone venteuse. Sur cette base et considérant la source d'électricité comme une donnée d'entrée figée, les auteurs ont mené des analyses de sensibilité sur les deux briques techniques pouvant faire l'objet d'une optimisation : la capacité du stockage d'hydrogène et la capacité de l'unité de méthanation. La performance de chaque configuration a été évaluée à l'aune de 6 indicateurs de performance technique au niveau annuel : le taux d'utilisation et la charge moyenne de l'unité de méthanation, la production de méthane, le nombre d'arrêts du système, le surplus d'hydrogène produit et le nombre de cycles de charge/décharge du stockage d'hydrogène. En attribuant une importance égale à l'ensemble des indicateurs, les auteurs obtiennent les résultats suivants:

- Le dimensionnement optimal du système est obtenu avec une unité de méthanation de capacité égale à 80% de la capacité nominale des électrolyseurs, associé à un réservoir d'hydrogène de taille minimale (1h)
- Dans cette disposition, le système donne lieu à un surplus d'hydrogène de 2,4% et un facteur d'utilisation de l'unité de méthanation de 40%
- Redémarrer l'unité de méthanation qu'une fois qu'elle atteint le minimum de 50% de sa puissance nominale au lieu de la redémarrer à n'importe quelle puissance permet de diviser par 20^[1] le nombre d'arrêts annuels

Application et valorisation

Conçue en s'appuyant sur une large revue de littérature, l'étude permet de mettre en évidence l'importance d'une articulation optimale des briques constitutives d'unités *Power-to-méthane* et avance des conclusions importantes pour l'amélioration continue de tels systèmes. Si l'étude modélise de manière très fine la performance technique, elle n'intègre pas la dimension économique qui pourrait impacter largement les conclusions de l'étude. Par ailleurs, aucune discrimination n'a été introduite entre les différents indicateurs techniques et un travail plus fin, idéalement en contact avec des acteurs de la filière *Power-to-méthane*, pourra permettre d'identifier ceux à prioriser.

Par ailleurs, les auteurs soulignent la très forte influence du contexte (caractéristiques de la source d'électricité connectée ou non au réseau, possibilité de valoriser le surplus d'hydrogène localement, etc.) dans le dimensionnement de telles unités. Les conclusions ne sauraient donc s'appliquer uniformément à l'ensemble des unités et invitent à déployer une approche au cas par cas.

[LIEN VERS L'ARTICLE](#)

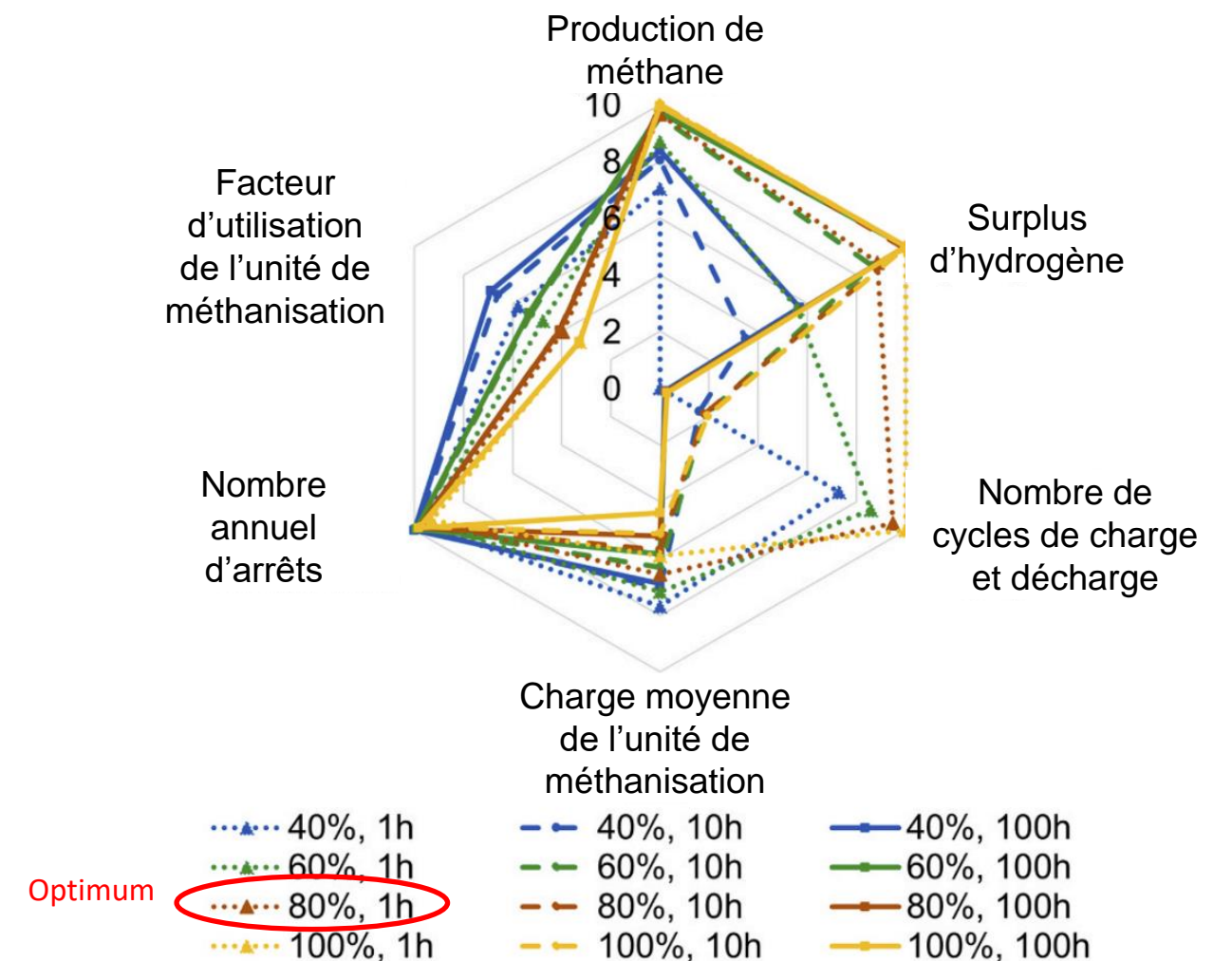


Illustration de l'analyse de sensibilité du système *Power-to-méthane*

- Les pourcentages affichés correspondent au dimensionnement de l'unité de méthanation par rapport aux électrolyseurs
- Les heures correspondent au volume de stockage d'hydrogène (exprimé en durée nécessaire à leur remplissage à production nominale)

[1] : 301 arrêts au lieu de 5950 soit 19,8 fois moins

Pour rester informé

S'ABONNER À LA VEILLE

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@theblunomy.com

