

Pyrolyse du méthane pour la production de l'hydrogène « turquoise »

Abir AZARA
Maître de recherche B
Division Hydrogène Renouvelable - CDER
a.azara@cderr.dz

Introduction

La transition énergétique, qui consiste à remplacer les énergies fossiles polluantes par des énergies propres et renouvelables, est une mission obligatoire et urgente pour les chercheurs du monde entier afin d'assurer un avenir neutre en carbone qui s'inscrit dans le cadre du développement durable et de la lutte contre le réchauffement climatique.

Actuellement, les procédés d'énergie renouvelable les bien établis et développés sont l'hydroélectricité, le solaire et l'éolien. Cependant, ces technologies présentent certains défis car elles sont intermittentes et dépendent fortement des conditions météorologiques. Outre ces sources d'énergie renouvelables, l'hydrogène se présente comme un vecteur énergétique prometteur. En effet, l'hydrogène peut être utilisé comme matière première chimique dans les usines de production d'ammoniac et d'engrais, comme carburant pour le transport, ainsi que pour la production de chaleur et d'électricité. De plus, si l'hydrogène est produit de manière écologique, il deviendra un élément clé d'un avenir énergétique propre et rentable.

Le reformage du méthane à la vapeur (SMR) est actuellement le principal procédé de production d'hydrogène en raison de sa maturité technologique à l'échelle industrielle. Néanmoins, l'inconvénient majeur du procédé est son empreinte carbone qui correspond à la génération de grandes quantités de gaz à effet de serre. Pour produire de l'hydrogène de manière écologique, l'électrolyse de l'eau en utilisant

l'électricité provenant d'une source d'énergie renouvelable est la technologie la plus répandue actuellement. Cependant, l'implantation de cette technologie à grande échelle sera difficile dans le futur proche à cause de certains défis tels que les coûts d'investissement et d'exploitation élevés et son caractère énergivore qui doivent être surmontés pour assurer sa maturité et rentabilité. Le développement d'autres technologies écologiques pour la production d'hydrogène a fait l'objet d'innombrables études ces dernières années. Parmi ces technologies, la pyrolyse du méthane, principal composant du gaz naturel, apparaît comme un procédé potentiel pour la transition vers une économie de l'hydrogène durable.

Pyrolyse du méthane

Le méthane est une matière première appropriée en termes de disponibilité en raison de l'existence d'énormes réserves de gaz naturel. En 2017, ces réserves mondiales s'élevaient à 6 923 milliards de pieds cubes, ce qui pourraient répondre à la demande mondiale actuelle de gaz pendant environ 52 ans [1]. Étant donné que le SMR entraîne d'importantes émissions de CO₂, la pyrolyse du méthane, qui est sa décomposition thermique ou thermocatalytique en carbone et en hydrogène sans émission de CO₂, se présente comme un procédé alternatif pour la production d'hydrogène, auquel on a attribué la couleur « turquoise ».

Ce procédé nécessite moins d'énergie par rapport à d'autres technologies, son besoin d'apport énergétique est sept fois inférieur à celui de l'électrolyse de l'eau et légèrement inférieur à celui du SMR comme indiqué dans le Tableau 1 [2].

Tableau 1: Chaleur de réaction de différents procédés pour une mole d'hydrogène produit [2].

Méthode	Réaction	ΔH^0_r (kJ. mol ⁻¹)
SMR	$\frac{1}{4}CH_4(g) + \frac{1}{2}H_2O(g) \leftrightarrow \frac{1}{4}CO_2(g) + H_2(g)$	41.3
Electrolyse	$H_2O(g) \leftrightarrow \frac{1}{2}O_2(g) + H_2(g)$	285.8
Pyrolyse	$\frac{1}{2}CH_4(g) \leftrightarrow \frac{1}{2}C(s) + H_2(g)$	37.7

En ce qui concerne l'efficacité énergétique, si l'on ne prend pas en compte la séquestration du CO₂ (CCS), le SMR est significativement plus efficace que la pyrolyse du méthane (75% contre 58%). Cependant, lorsque la mise en oeuvre de systèmes CCS est prise en compte, l'efficacité énergétique nette des deux procédés devient très similaire, 60% pour le SMR et 58% pour la pyrolyse du méthane. D'un point de vue environnemental, l'empreinte CO₂ de la pyrolyse du méthane, qui correspond aux émissions issues de la production de l'électricité nécessaire et à celles générées lors de l'extraction et du transport du gaz naturel, est nettement inférieure à celle du SMR (Figure 1) [3].

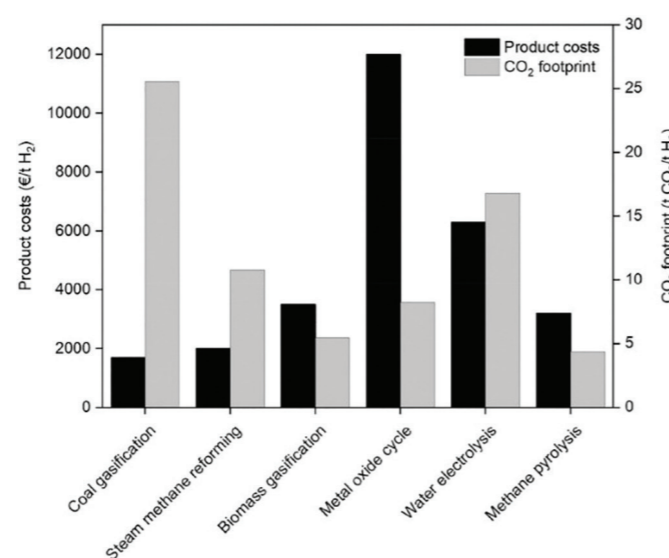


Figure 1. Coûts du produit et empreinte CO₂ des différentes technologies de production d'hydrogène selon les données reportées dans la réf. [3]. Remarque : L'empreinte CO₂ de l'électrolyse de l'eau correspond à l'utilisation de l'électricité à partir du réseau.

Malgré les avantages de la pyrolyse du méthane, elle n'est pas encore compétitive économiquement par rapport à la technologie mature du SMR. Les coûts estimés du produit issu de la pyrolyse du méthane varient de 2.6-3.2 € par kg d'hydrogène. En revanche, un kg d'hydrogène produit par SMR coûte 2 € [3]. Cette valeur pourrait toutefois augmenter à l'avenir si des pénalités plus élevées pour les émissions de CO₂ sont imposées. Un autre aspect qui peut également améliorer l'efficacité économique de la pyrolyse du méthane est la vente du coproduit de la réaction qui se présente sous forme de nanotubes et des nanofils de carbone, des produits de grande valeur ajoutée.

Apport énergétique

Le méthane est l'hydrocarbure saturé le plus stable en raison de sa symétrie structurale et de l'énergie élevée de ses liaisons C-H. Sa décomposition thermique complète nécessite des températures aux alentours de 1200 °C. L'utilisation d'un catalyseur peut baisser les températures de réaction (en de sous de 750 °C). Pour fournir cette énergie, un four électrique est souvent utilisé comme source de chauffage pour le réacteur. Cependant, cette méthode est coûteuse pour les réacteurs industriels, par conséquent, d'autres sources de chauffage alternatives ont été utilisées comme l'énergie solaire concentrée et le plasma.

Le rayonnement solaire concentré peut être utilisé pour chauffer les parois du réacteur qui chauffent ensuite le gaz par convection gaz-solide (chauffage indirect), ou il peut être transmis à travers une fenêtre transparente qui permet le chauffage direct du gaz généralement mélangé avec un composant qui absorbe davantage le rayonnement, comme les particules de carbone [4]. Actuellement, quatre technologies principales de concentration solaire sont appliquées à l'échelle pilote et commerciale, notamment les capteurs paraboliques, les systèmes de réflecteurs linéaires de Fresnel, les systèmes à parabole et les systèmes de récepteur central (Figure 2) [5].

Outre l'énergie solaire, le plasma peut également être utilisé comme source de chauffage écologique. Le plasma thermique est une source de chaleur flexible et réglable et les taux d'ionisation sont suffisamment élevés pour induire un échauffement par effet Joule contrairement au plasma non-thermique [6]. Il existe aussi le plasma généré par micro-ondes.

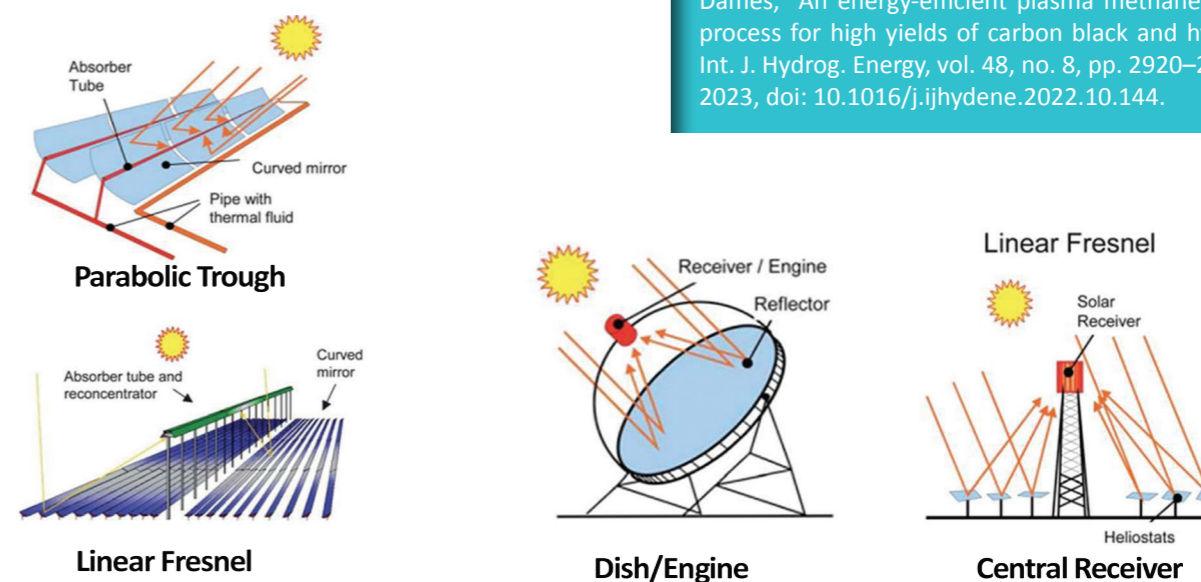


Figure 2. Schéma des quatre technologies de concentration solaire : capteurs paraboliques (PT), systèmes réflecteurs Fresnel linéaires (LF), systèmes à moteur parabolique (DE) et récepteurs centraux (CR) [5].

Conclusion

Face aux défis environnementaux pressants et aux impératifs de réduction des émissions de CO₂, l'hydrogène « turquoise » apparaît comme une alternative prometteuse. La pyrolyse du méthane est une technologie temporaire appropriée pour la production d'hydrogène sans CO₂ qui peut servir de passerelle entre les modes de production traditionnels émetteurs de CO₂ comme le SMR et les solutions émergentes comme l'électrolyse de l'eau, très énergivore. Pour rendre cette technologie totalement durable, l'apport énergétique devrait être écologique. Pour cela, l'énergie solaire ou le plasma sont utilisés pour combler les besoins énergétiques du procédé. Bien que la pyrolyse du méthane pour produire de l'hydrogène n'ait pas encore été mise en oeuvre dans le monde, des efforts sont fournis par la communauté scientifique ainsi que par les gouvernements afin d'encourager le déploiement de cette technologie dans le futur proche.

Références

1. "World Natural Gas Statistics - Worldometer." Accessed: Aug. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.worldometers.info/gas/>
2. F. Angikath et al., "Technoeconomic assessment of hydrogen production from natural gas pyrolysis in molten bubble column reactors," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 49, pp. 246–262, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.07.308.
3. A. Abánades, C. Rubbia, and D. Salmieri, "Thermal cracking of methane into Hydrogen for a CO₂-free utilization of natural gas," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 38, no. 20, pp. 8491–8496, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.08.138.
4. M. Msheik, S. Rodat, and S. Abanades, "Methane Cracking for Hydrogen Production: A Review of Catalytic and Molten Media Pyrolysis," *Energies*, vol. 14, no. 11, Art. no. 11, Jan. 2021, doi: 10.3390/en14113107.
5. M. Romero and A. Steinfeld, "Concentrating solar thermal power and thermochemical fuels," *Energy Environ. Sci.*, vol. 5, no. 11, pp. 9234–9245, Oct. 2012, doi: 10.1039/C2EE21275G.
6. L. Fulcheri, V.-J. Rohani, E. Wyse, N. Hardman, and E. Dames, "An energy-efficient plasma methane pyrolysis process for high yields of carbon black and hydrogen," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 48, no. 8, pp. 2920–2928, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.10.144.