Application des Plasmas Non Thermiques dans la production de l'hydrogène

KHODJA Khadidja
Directeur de Recherche
Division Hydrogène Renouvelable - CDER
E-mail : k.khodja@cder.dz

La recherche sur les sources d'énergie alternative efficaces pour remplacer les combustibles fossiles est devenue un domaine majeur pour le développement énergétique durable. Il est évident qu'il y a eu un déclin des réserves de combustibles fossiles comme énergie primaire, ce qui oblige le monde, y compris l'Algérie [1] à se tourner au développement de nouvelles sources d'énergie pour répondre aux exigences à la fois renouvelables et écologiques. Dans ces deux cas, l'hydrogène (H_2) est l'une des sources d'énergie les plus prometteuses. En outre, il peut être utilisé pour produire de la chaleur par combustion grâce à son pouvoir calorifique élevé, il peut également être utilisé pour activer les piles à combustible afin de produire de l'énergie électrique sans émissions de gaz toxiques. Diverses applications de l'hydrogène gazeux ont conduit à la découverte de nouvelles sources et méthodes de production d'hydrogène, notamment à partir des gaz à effet de serre (GES) dont les principaux composants sont le méthane (CH_4) et le dioxyde de carbone (CO_2). Ces méthodes auront l'avantage de réduire les GES en produisant du H_2.

Les GES sont émis dans l'atmosphère par diverses ressources telles que la combustion d'énergies fossiles, les procédés industriels, les élevages agricoles (principale source) et le traitement des déchets, l'utilisation de solvants, la réfrigération et la climatisation. En conséquence, les progrès du réchauffement climatique sont actuellement préoccupants dans le monde.

Traditionnellement, à l'échelle industrielle, l'hydrogène est produit à partir de sources fossiles par vapo-reformage du gaz naturel, c'est à dire principalement du CH_4. Les récentes recherches s'intéressent particulièrement à la manière de trouver un procédé technologique capable de convertir les GES en hydrogène et d'autres gaz synthétiques, susceptibles d'avoir une empreinte carbonique faible ou nulle. Parmi les technologies de traitement qui ont retenu l'attention des chercheurs ces dernières années pour leur efficacité élevée à produire du H_2, citons la conversion au moyen de technologies utilisant les plasmas non thermiques (PNT).

Le terme plasma fait souvent référence au quatrième état de la matière. À mesure que la température augmente, les molécules deviennent plus énergétiques et transforment l'état de la matière dans l'ordre suivant : solide, liquide, gazeux et plasma [2] (voir figure 1).

Un PNT, plasma froid ou plasma hors équilibre est un plasma qui n'est pas en équilibre thermodynamique, car la température des électrons est beaucoup plus élevée que la température des espèces lourdes (ions et neutres). Les températures des électrons varient généralement de 10^4 à 10^5 K (1 à 10 eV) à température ambiante du gaz [3].

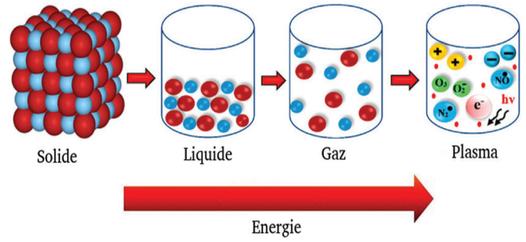

Figure 1 : Les quatre états de la matière

Cette énergie élevée signifie que les électrons produits peuvent dissocier des liaisons moléculaires fortes par collision avec des molécules réactives. Les PNT sont créés en appliquant de l'énergie électrique à un gaz. Il s'agit d'un gaz ionisé, constitué de diverses espèces chimiquement actives (c'est-à-dire divers types de radicaux, d'ions, d'atomes et de molécules excités et d'électrons), en plus des molécules de gaz neutre. Les systèmes utilisés pour la génération des PNT se basent sur la pression et la géométrie des électrodes (voir figure 2).

La décharge luminescente est une décharge à basse pression avec des charges négatives et positives accélérées par des sources AC, DC ou RF respectivement vers la cathode et l'anode, générant de nombreux effets dans le volume et les parois de la décharge, tels que l'ionisation du gaz, la dissociation du gaz, recombinaison de charges, photo-excitation, pulvérisation cathodique, émission d'électrons secondaires, etc (voir figure 2-A).

La décharge couronne illustrée sur la figure 2-B consiste en une décharge non homogène qui peut être initiée à la pression atmosphérique avec une source haute tension et en utilisant des géométries d'électrodes non identiques, telles qu'une plaque plate et une pointe. La courbure de la pointe du fil crée le champ électrique élevé nécessaire pour ioniser les espèces neutres.

La décharge à barrière diélectrique (DBD) représentée sur la figure 2-C est une géométrie à deux électrodes avec des couches diélectriques, telles que des plaques de quartz, insérées dans l'espace de décharge. Dans ce cas, le système est généralement alimenté par une source AC de haute tension. Dans les DBD, le diélectrique recouvre au moins une des électrodes afin de limiter le courant de décharge et d'empêcher la transition de la décharge vers l'arc.

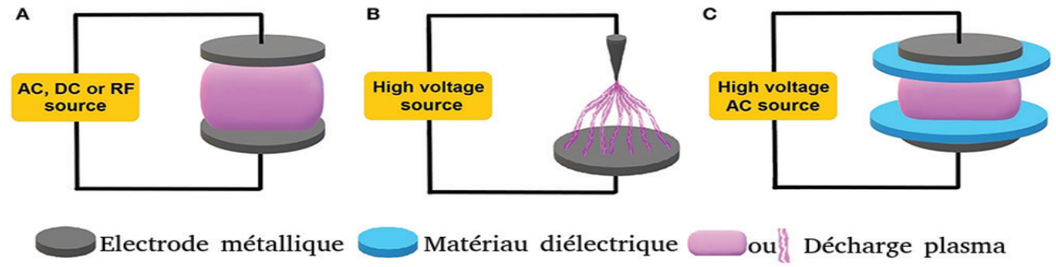

Figure 2 : Différents types de géométrie de décharges utilisées pour la réduction des GES [4]

Décomposition par plasma du dioxyde de carbone:

Le CO_2 contribue largement au réchauffement climatique. Divers processus visant à réduire les concentrations de CO_2 restent un sujet brûlant dans la communauté des chercheurs, et une option qui a retenu l'attention consiste à appliquer la technologie du plasma non thermique comme solution. Les émissions mondiales de CO_2 sont d'environ 30 milliards de tonnes par an. La molécule de CO_2 est stable et fortement liée, la décomposition est donc de nature hautement endothermique. La décomposition de la molécule de CO_2 est présentée par l'équation (1) :

$CO_2 \rightarrow CO + 1/2\ O_2 = 280$ kJ/mol (2.9 eV/mol)

Les calculs thermodynamiques prédisent que les températures requises pour rompre la liaison chimique et compléter la décomposition en carbone (C) et en oxygène (O) sont respectivement d'environ 1500 °C et 5000 °C. La conversion et l'efficacité énergétique sont les principaux paramètres utilisés pour estimer l'efficacité de l'utilisation du CO_2. L'efficacité de conversion mesure l'efficacité avec laquelle un processus peut convertir le CO_2 fourni [5].

Conversion du méthane :

Le CH_4 est le deuxième gaz à effet de serre responsable du réchauffement climatique. Le gaz naturel ou CH_4 est l'une des sources d'énergie les moins chères et les plus abondantes et constitue la principale source d'électricité au monde. La conversion du CH_4 et du CO_2 peut produire des produits chimiques et des combustibles liquides précieux, tels que l'hydrogène gazeux, le gaz de synthèse, le méthanol, les hydrocarbures supérieurs, le formaldéhyde, etc. Sous cet angle, le CH_4 est une matière première importante pour la production d'électricité. Le CH_4 peut être directement utilisé pour la production d'électricité ou pour la production de gaz de synthèse et c'est un composé très stable.

Diverses méthodes sont utilisées pour la transformation du CH_4 en gaz de synthèse, notamment le reformage à la vapeur du méthane (VRM), l'oxydation partielle du méthane (OPM) et le reformage à sec du méthane (RSM) (voir tableau 1).

Tableau 1 : Méthodes de décompositions, leurs réactions et enthalpie correspondantes

Méthode	Réaction	Enthalpie (kJ/mol)
VRM	$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H$	206
OPM	$CH_4 + 1/2\ O_2 \rightarrow CO + 2H_2$	-36
RSM	$CH_4 + CO_2 \rightarrow 2CO + 2H_2$	247

Il existe deux sujets qui suscitent de plus en plus d'intérêt aujourd'hui et qui attirent l'attention du monde entier : la sécurité énergétique mondiale et les problèmes environnementaux. Le monde ne peut plus compter sur l'énergie provenant de combustibles fossiles, qui sont une source non renouvelable et dont il a été prouvé qu'ils provoquent un grave réchauffement climatique en raison de leurs émissions dans l'atmosphère sous forme de gaz à effet de serre. La production d'hydrogène est l'une des sources de carburant alternatives du futur, car elle présente les caractéristiques d'être renouvelable et respectueuse de l'environnement, elle est donc considérée comme capable de répondre aux deux problèmes ci-dessus.

En outre, la décomposition par plasma du CO_2 , du CH_4 et du mélange (GES), est considérée comme une technologie de conversion prometteuse pour produire de l'hydrogène et d'autres carburants chimiques. L'utilisation des PNT présente de multiples avantages en termes de fonctionnement à basse température, améliore la sélectivité et l'efficacité énergétique du produit. Un défi majeur qui reste encore à relever est la poursuite des études visant à développer les processus de reformage à sec par PNT de l'échelle du laboratoire vers une échelle industrielle plus stable et plus efficace afin de garantir la disponibilité énergétique à l'avenir.

Références

1. Sahnoune F., Belhamel M., Zelmat M., (2016), Algerian energy policy and potential to reducing greenhouse gas emissions, Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy, 11, 12, 1118-1127.

2. Fridman, A., & Kennedy, L.A. (2021). Plasma Physics and Engineering (3rd ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781315120812

3. G. Petitpas, J.D. Rollier, A. Darmon, J. Gonzalez-Aguilar, R. Metkemeijer, L. Fulcheri, A comparative study of non-thermal plasma assisted reforming technologies, Int. J. Hydrogen Energy 32 (2007) 2848–2867.

4. A. M. D. Santos, R. C. Catapan, D. A. Duarte, The Potential of Non-thermal Plasmas in the Preparation of Supported Metal Catalysts for Fuel Conversion in Automotive Systems: A Literature Overview, Front. Mech. Eng., 06 (2020) 1-12.

5. Y. Vadikkeettil, Y. Subramaniam, R. Murugan, P.V. Ananthapadmanabhan, J. Mostaghimi, L. Pershin, C. Batiot-Dupeyrat, Y. Kobayashi, Plasma assisted decomposition and reforming of greenhouse gases: A review of current status and emerging trends, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 161 (2022) 112343.