

Valorisation des eaux usées par procédés électrolytiques : Production d'hydrogène

LASSOUANE Fatiha, Maître de recherche A
Division hydrogène renouvelable - CDER
E-mail : f.lassouane@cder.dz

Le monde est entré dans une nouvelle ère où le développement durable est le principal facteur pour relever les défis de l'épuisement de nos réserves et des bouleversements environnementaux. En effet, le développement des énergies renouvelables et le traitement des pollutions environnementales sont deux problèmes majeurs auxquels est confrontée l'humanité ces dernières années. L'étude des sources d'énergie alternatives, durables et économiquement viable devient de plus en plus importante. Dans ce contexte, la récupération des ressources utiles telles que l'hydrogène (H_2) à partir des eaux usées a attiré de plus en plus l'attention des scientifiques ces dernières années. En effet, l'intégration du traitement des eaux usées et de la production d'hydrogène alimentée par les systèmes des énergies renouvelables (SER) peut être un moyen d'améliorer l'économie de l'hydrogène vert [1]. Cette approche est illustrée dans la figure 1. En exemple, le projet « Greenlysis » en Espagne visait à démontrer le potentiel de production d'hydrogène par électrolyse des eaux usées, alimentée par de l'électricité renouvelable. Dans cette approche, l'électrolyseur et les unités de traitement d'une station d'épuration sont alimentés par des panneaux photovoltaïques et des éoliennes.

L'hydrogène a été considéré comme une énergie alternative propre pour le développement durable en raison de ses caractéristiques, de son énergie massique élevée (122 kJ g^{-1}), de sa faible empreinte carbone et de sa durabilité. Compte tenu de l'abondance de la molécule d'hydrogène présente dans les composés organiques, il est considéré comme un élément prometteur et stimulant pour la production simultanée de

H_2 et le traitement des eaux usées organiques [2]. Pour cette raison, l'application de systèmes capables de produire de l'hydrogène tout en traitant les eaux usées est intéressante, à la fois pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre et pour la récupération de l'énergie dépensée pour le traitement. Les eaux usées proviennent principalement de sources domestiques et industrielles.

Dans des études récentes, les chercheurs ont découvert des techniques électrochimiques fiables qui produisent simultanément de l'hydrogène à partir des eaux usées en éliminant les contaminants organiques récalcitrants. En outre, les eaux usées sont considérées comme matière première ou substrat disponible et non coûteux. Parmi ces procédés, l'électro-oxydation, l'électrocoagulation ou procédé électrolytique utilisant les microorganismes, à savoir l'électrolyse microbienne (figure 2).

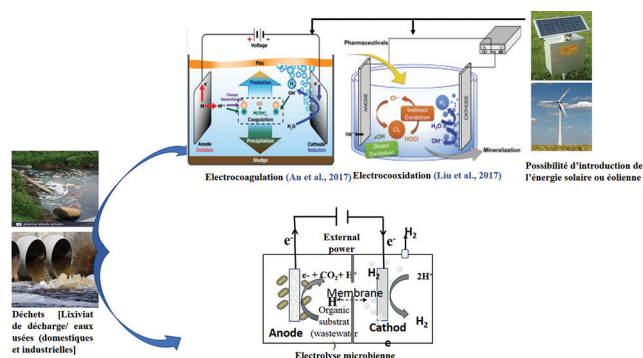


Figure 2. Procédés électrolytiques pour la production d'hydrogène par les eaux usées

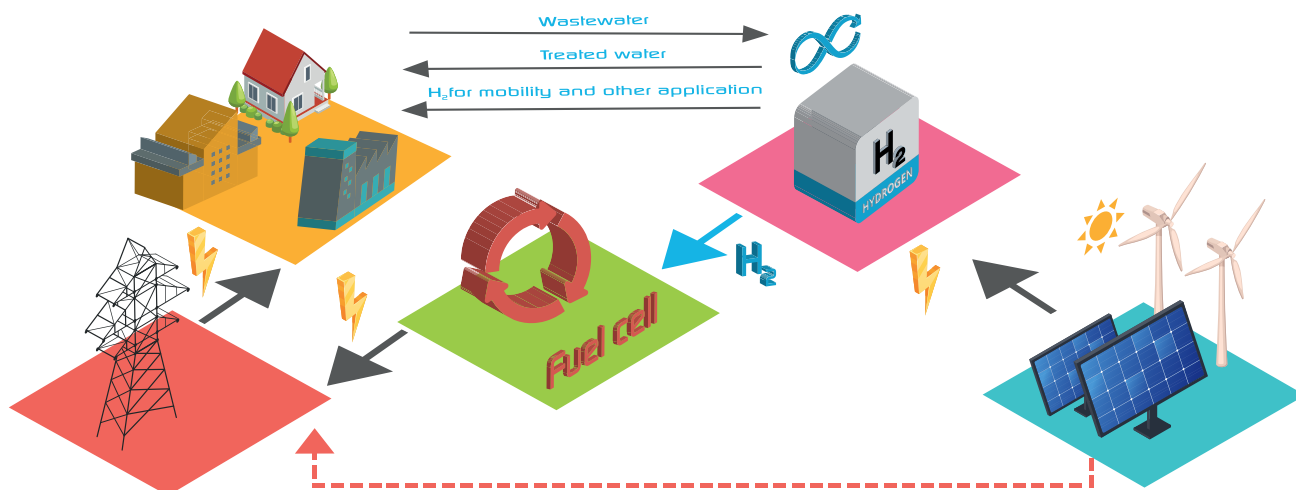


Figure 1. Intégration de la production d'hydrogène avec le traitement des eaux usées, les énergies renouvelables et le réseau électrique [1].

Ces technologies sont de nouvelles approches pour la production d'hydrogène qui ont suscité beaucoup d'intérêt dû aux avantages attrayants qu'elles renferment (figure 3). De même, l'énergie solaire et l'énergie éolienne peuvent être utilisées comme sources d'énergie. Des panneaux solaires peuvent être utilisés pour activer les électrodes à l'intérieur des cellules électrolytiques.

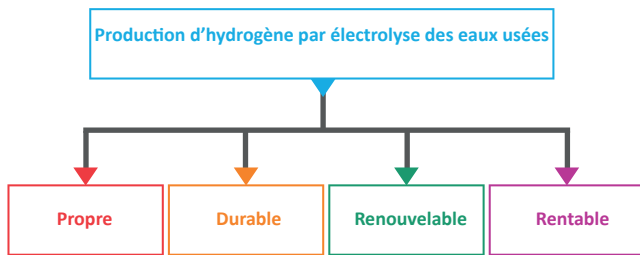


Figure 3. Les avantages de la production d'hydrogène par électrolyse des eaux usées

Electro-oxydation (EO)

L'électro-oxydation est une technologie puissante pour décomposer et minéraliser les composés organiques résistants. Le procédé d'électrolyse a un coût variable en fonction de la consommation d'énergie par kilogramme d'hydrogène produit. Il est donc essentiel de réduire la quantité d'énergie utilisée pour être compétitif avec les procédés industriels classiques de production d'hydrogène. La présence de matière organique à faible potentiel d'oxydation implique une diminution du coût de la production d'hydrogène [3].

Dans le procédé d'électro-oxydation, des oxydants sont produits lors du traitement in situ, soit directement à la surface des électrodes, soit indirectement à partir de composés chimiques présents dans l'eau traitée. Ce procédé a pour objectif soit l'oxydation totale (ou minéralisation) soit l'oxydation partielle (conversion de la matière organique en composés plus simples, facilement dégradables et moins polluants) de la matière organique.

Electrocoagulation (EC)

Le processus d'électrocoagulation génère des coagulants par un processus in situ lorsque le courant électrique passe à travers une anode en aluminium ou en fer qui libère des ions métalliques dans une solution. Les ions métalliques synthétisés réagissent en outre pour produire des hydroxydes, des polyhydroxydes et des composés polyhydroxy-métalliques qui ont une forte affinité envers les ions chargés de manière opposée présents en solution pour stimuler le processus de coagulation. L'hydrogène est généré à la cathode et peut être récupéré pour être utilisé comme source d'énergie ou comme réactif pour d'autres applications industrielles. Les floccs formés ont une grande surface qui est capable d'adsorber les composés organiques solubles et de piéger les particules colloïdales présentes dans la solution. Les floccs accumulés sont éliminés par sédimentation ou flottation [4].

Electrolyse microbienne

D'autres applications utilisent des cellules électrochimiques microbiennes (CEM) pour produire de l'hydrogène renouvelable et, simultanément, le traitement des eaux usées. Une cellule microbienne a le potentiel de convertir les eaux usées organiques en hydrogène et en produits chimiques à valeur ajoutée telles que le méthane, l'éthanol et le peroxyde d'hydrogène. Par rapport à d'autres méthodes conventionnelles,

les CEM offrent un rendement élevé en H₂ avec un faible apport d'énergie de 0,4 à 0,5 V. Les principaux composants d'une CEM sont similaires à ceux du processus d'électrolyse, c'est-à-dire les électrodes d'anode et de cathode, membrane semi-perméable, les microbes électrochimiquement actifs et le bloc d'alimentation. Plusieurs types d'eaux usées, telles que les eaux usées agricoles, domestiques et industrielles, ont été testés.

Ce procédé utilise des micro-organismes exo-électrogènes, transféreurs d'électrons extracellulaires, capables de donner ou d'absorber des électrons. Dans une cellule d'électrolyse les bactéries actives oxydent la matière organique et produisent des électrons, des protons et du dioxyde de carbone [5]. Toutefois, les eaux usées sont un mélange complexe de divers types de polluants et leur composition dépend fortement de la source de la génération et les micro-organismes utilisés dépendent fortement du substrat présent dans les eaux usées. La plupart des électrogènes isolés utilisés dans les CEM tels que *Shewanella oneidensis* MR-1, *Geobacter sulfurreducens*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Sphingomonas xenophaga*, *Rhodospirillum rubrum*, etc. appartiennent au groupe de *Proteobacteria* [6].

La production d'hydrogène par bio-électrolyse a été réalisée avec succès à l'échelle pilote en utilisant une eau usée urbaine. La production d'hydrogène a atteint des valeurs supérieures à 4 L j⁻¹ avec une pureté du gaz de 95 %, une récupération de gaz cathodique de 82 % et une récupération d'énergie de 121% par rapport à l'apport électrique [7].

En conclusion, la gestion des eaux usées pour la récupération d'énergie tel que l'hydrogène s'est avérée être une stratégie pratique et économiquement viable pour promouvoir une économie circulaire et réduire les risques environnementaux graves associés au rejet d'eaux usées dans les systèmes aquatiques. Les techniques électrolytiques utilisant les eaux usées se révèlent prometteuses pour la production d'hydrogène, ce qui pourrait constituer une solution efficace pour l'Algérie, qui fait face à un stress hydrique important. Toutefois, ces procédés sont encore à un stade de développement et nécessitent la poursuite de nombreux efforts de recherche pour être pleinement opérationnels.

Référence

1. M. Cartaxo, J. Fernandes, M. Gomes, H. Pinho, V. Nunes, et P. Coelho, « Hydrogen Production via Wastewater Electrolysis—An Integrated Approach Review », in The Proceedings of the International Conference on Smart City Applications, Springer, 2021, p. 671-680.
2. Y. Liu, Y.-Y. Deng, Q. Zhang, et H. Liu, « Overview of recent developments of resource recovery from wastewater via electrochemistry-based technologies », *Sci. Total Environ.*, vol. 757, p. 143901, 2021.
3. L. Pérez Orosa, E. Chinarro, D. Guinea, et M. C. García-Alegre, « Hydrogen Production by Wastewater Alkaline Electro-Oxidation », *Energies*, vol. 15, no 16, p. 5888, 2022.
4. V. Devda et al., « Recovery of resources from industrial wastewater employing electrochemical technologies: status, advancements and perspectives », *Bioengineered*, vol. 12, no 1, p. 4697-4718, 2021.
5. A. M. Elgarayh et al., « Hydrogen production from wastewater, storage, economy, governance and applications: a review », *Environ. Chem. Lett.*, p. 1-52, 2022.
6. J. L. Varanasi, R. Veerubhotla, S. Pandit, et D. Das, « Biohydrogen production using microbial electrolysis cell: recent advances and future prospects », *Microb. Electrochem. Technol.*, p. 843-869, 2019.
7. J. A. Baeza, À. Martínez-Miró, J. Guerrero, Y. Ruiz, et A. Guisasaola, « Bioelectrochemical hydrogen production from urban wastewater on a pilot scale », *J. Power Sources*, vol. 356, p. 500-509, 2017.