

Proposition d'un système de production Industrielle d'hydrogène géothermique dans le sud Algérien

Nasreddine CHENNOUF , Belkhir NEGROU, Khadidja BOUZIANE ,Noureddine SETTOU,
Boubekeur DOKKAR

RÉSUMÉ

L'hydrogène présente certaines caractéristiques physico-chimiques avantageuses d'un point de vue énergétique. C'est un gaz très léger qui possède un pouvoir calorifique très élevé. Il est inodore, incolore, non polluant.

L'hydrogène est le combustible et le porteur d'énergie le plus prometteur et le plus universel, dont l'emploi se généralisera dans l'avenir.

L'existence d'une importante nappe albiennaise, en combinaison avec une insolation très importante fait du sud algérien une place de choix, pour la production d'hydrogène géothermique.

L'objectif du présent travail est de proposer un système d'amélioration de la production de l'hydrogène géothermique dans le sud algérien, à l'étape industrielle, en raison de ses avantages par rapport aux autres combustibles. Nous voulons présenter un prototype de production d'hydrogène géothermique en réalisant les différentes étapes intervenant dans les processus de production. Chaque étape du processus tels que la captation de l'énergie géothermique, la distillation solaire, l'électrolyse, sera réalisée à l'échelle laboratoire et/ou simulée numériquement grâce à des modèles mathématiques élaborés dans des codes informatiques. Ces différentes installations seront étudiées et optimisées pour les conditions régionales de ressources hydriques et climatiques.

Mots clés: Énergie Solaire, Géothermie, Conversion d'énergie, Hydrogène, Distillation Solaire, Électrolyse de l'eau

1. INTRODUCTION

L'hydrogène est actuellement une des matières de base des industries chimiques et pétrochimiques. Plus de la moitié de l'hydrogène produit à dessein est utilisée pour la production d'ammoniac (46%) et de méthanol (8%).

Nasreddine CHENNOUF, Laboratoire de Valorisation et de Promotion des Ressources Sahariennes (VPRS), Université Kasdi Merbah, 30 000 Ouargla, Algérie,
E-mail : Chennouf.nasreddine@gmail.com

Belkhir NEGROU, Laboratoire de Valorisation et de Promotion des Ressources Sahariennes (VPRS), Université Kasdi Merbah, 30 000 Ouargla, Algérie,

Khadidja BOUZIANE, Laboratoire de Valorisation et de Promotion des Ressources Sahariennes (VPRS), Université Kasdi Merbah, 30 000 Ouargla, Algérie,

Noureddine SETTOU, Laboratoire de Valorisation et de Promotion des Ressources Sahariennes (VPRS), Université Kasdi Merbah, 30 000 Ouargla, Algérie,
E-mail : settou@hotmail.com

Boubekeur DOKKAR Belkhir NEGROU, Laboratoire de Valorisation et de Promotion des Ressources Sahariennes (VPRS), Université Kasdi Merbah, 30 000 Ouargla, Algérie,

Le raffinage et la chimie utilisent de larges quantités d'hydrogène dont l'essentiel est disponible sur place en tant que sous-produit de procédés de raffinage (FCC, reformage catalytique) et de fabrications chimiques (production de chlore, d'éthylène, de styrène, ...).

Une petite partie (< 4%) est commercialisée en tant que gaz industriel dans des secteurs comme la soudure, l'industrie du verre, la fabrication de semi-conducteurs, la fabrication d'aliments et le transport spatial. L'évolution prévisible de ces secteurs industriels ne laisse pas prévoir de changement notable dans les volumes de production.

Bien que les technologies de production de l'hydrogène à partir du gaz naturel ou d'autres combustibles fossiles soient aujourd'hui bien établies, le changement d'ordre de grandeur conduira vraisemblablement à des modifications notables. En particulier, du fait de la nécessité de séquestrer le CO₂ le plus économiquement possible, les unités seront de grande taille et proches des sites de production où les conditions de séquestration pourront être les plus favorables.

Plusieurs techniques existent pour la production de l'hydrogène. Certaines de ces techniques sont arrivées à maturité de production commerciale, d'autres sont encore à l'échelle expérimentale. La décomposition catalytique du gaz naturel, l'oxydation partielle des huiles lourdes, la gazéification du charbon et l'électrolyse de l'eau est parmi les procédés de production d'hydrogène qui est industrialisés ou en phase d'industrialisation.

Les cycles thermochimiques purs et hybrides par exemple sont à l'échelle de Recherche et Développement, tandis que les procédés photochimiques et photo biologiques sont encore au premier stade de la recherche.

L'électrolyse de l'eau pour la production de l'hydrogène est le procédé le plus répandu et le plus prisé.

L'utilisation de l'énergie solaire dans les procédés d'électrolyse s'avère la méthode la plus rentable et la plus protectrice de l'environnement [1]

Dans le présent travail, nous proposons d'abord une étude comparative de l'hydrogène en tant que porteur d'énergie avec les énergies

conventionnelles. On montrera que l'hydrogène possède des qualités indéniablement supérieures. Ensuite nous proposons un prototype de production d'hydrogène géothermique par électrolyse de l'eau en réalisant les différentes étapes intervenant dans les processus de production. Chaque étape du processus.

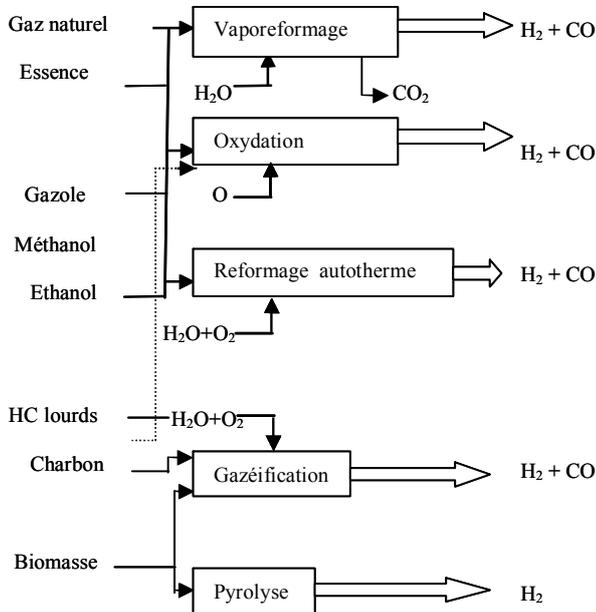


Figure 1: Production thermique d'hydrogène [2]

2. PROPRIETES PHYSIQUES ET ENERGETIQUES DE L'HYDROGENE

L'hydrogène, gaz inodore et incolore, est doté d'excellentes propriétés physicochimiques lui conférant la qualité de combustible universel. Une propriété de première importance est le pouvoir calorifique massique très élevé de l'hydrogène (142 MJ/kg), il est trois fois supérieur à celui de l'essence.

L'hydrogène réagit avec l'oxygène, formant de l'eau et libérant une grande quantité de chaleur (282 kJ/mole H₂). La température de la flamme dans une combustion avec l'oxygène de l'air dépasse 2000°C, ainsi cette flamme est à peine visible à l'oeil nu. Malgré que l'hydrogène a un large domaine d'inflammabilité dans l'air, les dangers d'une auto inflammation ou d'une explosion restent très limités. Ceci résulte des faits qu'il a un très grand coefficient de diffusion dans l'air et que sa densité est la plus faible dans la nature. En effet, l'hydrogène s'échappe vers le haut et sa concentration diminue très rapidement en cas de fuite. En plus, la taille de sa molécule, qui est la plus petite, lui facilite aussi la diffusion à travers les parois métalliques et à travers les substances poreuses, ce qui présente certaines difficultés dans le choix des matériaux pour son stockage et son transport.

Les pouvoirs calorifiques volumiques de l'hydrogène liquide et gazeux sont faibles par rapport à ceux du gaz naturel et de l'essence ou du diesel. A quantités égales d'énergie, il faut prévoir un réservoir pour l'hydrogène avec un volume beaucoup plus grand, ce qui présente un certain nombre de problèmes de stockage et de transport surtout dans les voitures.

Sous conditions adéquates, la réaction de l'hydrogène avec l'oxygène peut être réalisée pour donner de la chaleur de bas niveau (combustion catalytique) ou donner essentiellement de l'électricité (les piles à combustible).[3]

PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	119930 kJ/kg ;
PCS (Pouvoir calorifique supérieur)	141860 kJ/kg ;
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	10800 kJ/Nm ³
PCS (Pouvoir calorifique supérieur)	12770 kJ/Nm ³
Densité gazeuse à 20,3 K	1,34 kg/m ³
Densité gazeuse à 273 K	0,08988 kg/Nm ³ (gaz naturel 0.6512 kg/Nm ³)
Densité liquide à 20,3 K	70,79 kg/m ³
Chaleur spécifique (Cp)	14 266 J/kg K (293 K)
Chaleur spécifique (Cv)	10 300 J/kg K
Chaleur d'évaporation	445,4 kJ/kg
Energie théorique de liquéfaction	14 112 J/g (3.92kWh/kg)
Masse atomique	1,0079
Température de solidification	14,01 K
Température d'ébullition (à 1013 mbar abs.)	20,268 K
Température d'auto inflammation dans l'air	858 K (gaz naturel 813 K)
Température de flamme dans l'air à 300 K	2 318 K (gaz naturel 2 148 K)
Limites d'inflammabilité dans l'air (vol %)	4-75 (gaz naturel 5,3-15)
Limites de détonation dans l'air (vol %)	13-65 (gaz naturel 6,3-13,5)
Energie minimale d'inflammation (J)	20 (gaz naturel 290)
Energie explosive théorique (kg de TNT/m ³)	2,02 (gaz naturel 7,03)
Surpression de détonation (mélange stoechiométrique)	14,7 bar (gaz naturel 16,8 bar)
Coefficient de diffusion dans l'air	0,61 cm/s (gaz naturel 0,16)
Vitesse de la flamme dans l'air	260 cm/s (gaz naturel 37 cm/s)
Vitesse de détonation dans l'air	2,0 km/s (gaz naturel 1,8 km/s)
Mélange stoechiométrique dans l'air (vol)	29,53% (gaz naturel 9,48%)

Tableau 1 : Caractéristiques physicochimiques de l'hydrogène naturel [4]

3. TECHNIQUES DE PRODUCTION DE L'HYDROGENE

Dans toute production d'hydrogène, trois aspects doivent être pris en considération, à savoir :

la matière première: l'extraction de l'hydrogène se fait, en général, à partir de l'eau, des

hydrocarbures (tel que le méthane, le méthanol, etc.) ou les deux à la fois;

l'énergie nécessaire pour la production: cette énergie peut aussi bien être conventionnelle, nucléaire ou renouvelable (solaire, éolienne, géothermale, etc.);

le procédé de production: plusieurs procédés existent faisant appel à l'énergie quantique telle que la photolyse, à l'énergie électrique telle que l'électrolyse ou à l'énergie thermique tel le procédé thermochimique. Pour la plupart des procédés, il existe plusieurs types et le nombre est relativement important [5].

En (Figure 2), on représente le prototype de production d'hydrogène géothermique qui sera réalisée à l'échelle laboratoire et/ou simulée numériquement grâce à des modèles mathématiques élaborés dans des codes informatiques. Ces différentes installations seront étudiées et optimisées pour les conditions régionales de ressources hydriques et climatiques.

Il est important de noter que, les stations thermales peuvent aussi bien générer l'électricité qu'être une source d'eau chaude pour l'électrolyseur. Il a été montré que plus l'eau est chaude plus le rendement de l'électrolyseur est grand [6].

En dehors de la réformation des gaz, l'électrolyse de l'eau est le procédé le plus développé et le plus utilisé.

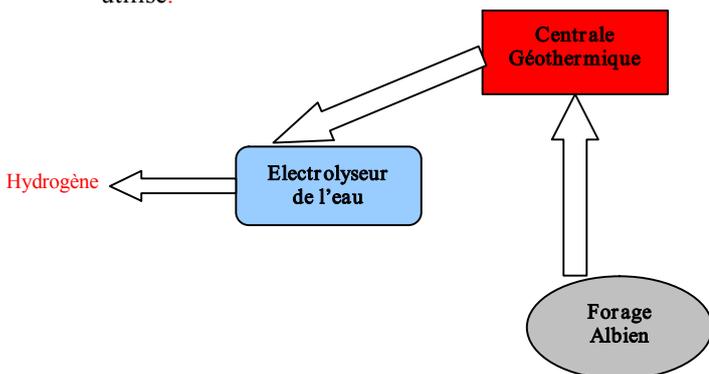


Figure 2 : Prototype de production d'hydrogène géothermique

3-1. CENTRALE GÉOTHERMIQUE A CYCLE BINAIRE

Les ressources géothermiques en Algérie sont de basse enthalpie (température ≤ 100 °C). Elles sont destinées aux utilisations directes comme pour le chauffage de serre et le chauffage urbain. L'énergie géothermique pourrait aussi être utilisée dans la production d'électricité par cycle binaire un bon exemple est donné par la Roumanie.

En effet un groupe de chercheurs à l'université d'Oradea en Roumanie a développé des recherches dans le but de l'exploitation des ressources géo-

thermiques de basse enthalpie pour la production d'électricité.

Etant donné que la température du fluide géothermique est de moins que 100°C (212°F) seulement un cycle binaire pourrait être considéré pour la production d'électricité (selon Maghiar T). La centrale géothermique à cycle binaire transforme l'énergie thermique du fluide géothermique en énergie mécanique, puis grâce à un générateur en énergie électrique. Le schéma de l'installation est montré en (Figure 3).

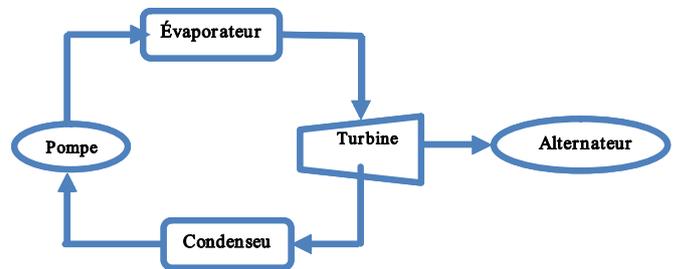


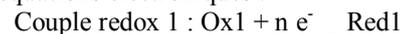
Figure3 : Principe de fonctionnement d'un cycle binaire

Le fluide géothermique chaud passe à travers un coté d'un échangeur de chaleur pour chauffer une pipe. Habituellement le fluide de fonctionnement est un hydrocarbure, tel que l'iso pentane ou réfrigérant tel que R12, pour des raisons environnementales, le fluide de fonctionnement approprié est le dioxyde de carbone CO₂ (aucun danger d'explosion, ininflammable, non toxique). Le fluide de fonctionnement est vaporisé au contact de la chaleur d'origine géothermique, ensuite il est passé à travers une turbine pour générer de l'électricité.

3-3. L'ÉLECTROLYSEUR DE L'EAU

Une réaction d'électrolyse permet la conversion d'énergie électrique en énergie chimique, en utilisant les électrons fournis par un générateur de courant continu. Lors d'une électrolyse, on impose un transfert d'électrons par l'intermédiaire d'un circuit électrique entre le réducteur d'un couple redox et l'oxydant d'un autre couple.

Demi-équations électroniques :



Équation-bilan d'une réaction d'oxydoréduction:
 $\text{Ox1} + \text{Red2} \rightarrow \text{Ox2} + \text{Red1}$

Lors de l'électrolyse, ce transfert n'a pas lieu spontanément.

L'électrolyseur est constitué de deux électrodes conductrices de courant (cathode et anode) et d'un compartiment (séparé en deux ou non) contenant un électrolyte.

L'électrolyte contient l'oxydant et le réducteur (pas de réaction spontanée entre les deux espèces). L'hydrogène peut être produit par l'électrolyse de l'eau qui joue le rôle de l'oxydant et du réducteur :

A l'anode (lieu de l'oxydation) :
 $2 \text{H}_2\text{O} (\text{l}) \longrightarrow \text{O}_2 (\text{g}) + 4 \text{H}^+ (\text{aq}) + 4 \text{e}^-$
 A la cathode (lieu de la réduction) :
 $2 \text{H}_2\text{O} (\text{l}) + 2 \text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2 (\text{g}) + 2\text{OH}^-(\text{aq})$
 Equation - bilan de l'électrolyse de l'eau :
 $2 \text{H}_2\text{O} (\text{l}) \longrightarrow \text{O}_2 (\text{g}) + 2 \text{H}_2 (\text{g})$
 L'eau est donc décomposée en dioxygène et en dihydrogène.

Il existe trois types de procédés d'électrolyse de l'eau :

L'électrolyse de l'eau en milieu basique (électrolyse conventionnelle de l'eau en milieu alcalin), avec en général un séparateur poreux entre le compartiment cathodique et le compartiment

Références

[1] R. Boudries-Khellaf; Etude d'un Système de Production d'Hydrogène Solaire en Algérie; Rev. Energ. Ren. : Zones Arides (2002) 17-29
 [2] M. Boudellal; La pile à combustible ; DUNOD Paris 2007
 [3]R. Benchrifa, D. Zejli et A. Bennouna ; Hydrogène solaire : Vecteur d'énergie de l'avenir ; L'ESPACE MAROCAINE, Magazine Scientifique pour une Nouvelle Dynamique, n°5, pp 42 – 45 1992.
 [4]R. Benchrifa, D. Zejli et A. Bennouna. K. Zazi ; L'hydrogène combustible du futur;
 [5] R. Momirlan et T. Veziroglu;Recent directions of world hydrogen production; Ren. Sust. Energy Rev. 3 (1999) 219
 [6] J. Paladin, T. N. Veziroglu et A. Shahin; Hybrid Solar High-Temperature Hydrogen Production System; Int. J. Hydrogen Energy 25 (2000) 295.

type	T	P	η	avancement technologique	avantages	inconvénients	applications
alcalin	70-80°C	Patm	60 à 90%	La plus utilisée	Efficacité à grande échelle de production		Usine de taille moyenne
	90-100°C	P>Patm					
PEM	100°C			utilisée	Compacité, simplicité de fonctionnement résistance des matériaux à la corrosion	Cout élevé	Sous-marines et spatiales, production d'O ₂
Vapeur d'eau haute température	850-1000°C			recherche			

Tableau 2 : Différents types de procédés d'électrolyse de l'eau

anodique pour éviter le mélange de l'hydrogène et de l'oxygène :

On utilise comme électrolyte de la potasse (hydroxyde de potassium KOH) en solution à 30% où K⁺ et OH⁻ sont des ions transporteurs de courant. La température normale du procédé est de 70-80°C à pression normale et de 90- 100°C sous pression. Ce procédé est utilisé principalement dans les usines de taille moyenne (0.5-5MW) pour des raisons de prix.

On peut résumer les autres types de procédés d'électrolyse de l'eau dans le tableau suivant :

4. CONCLUSION:

Le présent travail porte sur l'évaluation du fonctionnement d'un système constituant la chaîne de production d'hydrogène (captation géothermique, distillateur solaire, électrolyseur de l'eau), et par la suite d'étudier l'optimisation du système de la production d'hydrogène afin de rendre ce dernier compétitif sur le plan économique.

Une étude économique sera réalisée pour évaluer le coût de la production d'hydrogène et le comparer à d'autres méthodes de production d'énergie électrique (combustibles classiques).