

ETUDE D'UNE INSTALLATION DE PRODUCTION D'HYDROGENE SOLAIRE PAR L'ELECTROLYSE DE L'EAU

Belkhir NEGROU⁺, Nouredine SETTOU^{*}, Nasreddine CHENNOUF et Boubekeur DOKKAR

Laboratoire de Valorisation et de Promotion des Ressources Sahariennes (VPRS)

Université Kasdi Merbah Ouargla, 30 000 Ouargla, Algérie

⁺ b.negrou@yahoo.fr et ^{*} settou@hotmail.com

RÉSUMÉ : L'hydrogène est considéré comme le porteur potentiel d'énergie du futur. On entend par hydrogène solaire, l'hydrogène produit en utilisant les énergies renouvelables, particulièrement l'énergie solaire. La présente étude concerne une installation assurant la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau dont les ressources énergétiques sont solaires. L'alimentation en électricité se fait par une cheminée solaire de façon très simple, écologique, et bon marché. Nous posons les équations décrivant le comportement énergétique et électrique de l'électrolyse de l'eau et la cheminée solaire. Le taux de production d'hydrogène est déterminé pour des valeurs différentes du rayonnement solaire et pour différents sites du pays.

MOTS-CLÉS : Production d'hydrogène, Energie solaire, cheminée solaire, Electrolyse de l'eau

1. Introduction

L'hydrogène est considéré comme le combustible du futur, sa production est actuellement assurée principalement par reformage du gaz naturel [1]. 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. Certains envisagent aussi sa production grâce à l'électricité nucléaire durant les heures creuses; c'est donc une sorte de stockage de l'énergie. Quant à son usage, il peut être soit comme combustible pour les moteurs thermiques, soit pour produire l'électricité par les piles à combustible [2]. Ces derniers auront un rôle à jouer dans les transports futurs suite à l'épuisement du pétrole. Compte tenu des perspectives prometteuses des piles à combustibles et des moteurs thermiques à hydrogène, un système d'énergie à hydrogène peut alors être proposé comme solution de remplacement ou tout au moins complémentaire, du système d'énergie actuel [3]. Pour rappel, le procédé électrolytique consiste à dissocier l'eau en hydrogène et en oxygène au moyen d'un courant électrique continu traversant un électrolyte disposé entre deux électrodes. Dans le but d'une meilleure production d'hydrogène, trois principaux types d'électrolyseurs font l'objet de nombreuses recherches [4,5]; les électrolyseurs alcalins, à membrane et à très haute température. Le système proposé est celui de l'électrolyseur alcalin où l'électricité est produite par une cheminée solaire. Un schéma synoptique du système est donné par la figure 1.

2. Conception de l'installation de production d'hydrogène

L'installation de production d'hydrogène est composée principalement de trois parties:

- L'électrolyseur de l'eau type alcalin.
- Un système de pompage pour obtenir de l'eau utilisée dans l'électrolyseur (aux conditions de fonctionnement).
- Une cheminée solaire assurant l'alimentation en électricité pour le système de pompage et l'électrolyseur de l'eau.

2. 1. Simulation de la cheminée solaire

La cheminée solaire est constituée de trois composantes principales : la serre chaude (le collecteur solaire), la cheminée qui est une longue structure tubulaire et la turbine éolienne. Ces trois éléments essentiels ont été familiers depuis un temps immémorial, mais la cheminée solaire les combine dans un nouveau système de fonctionnement, le collecteur est ouvert à la périphérie pour

introduire l'air frais qui sera chauffé par les rayons solaires, sous l'effet de serre, où la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur produit un gradient de la masse volumique de l'air interne qui se relève ; une turbine éolienne est mise dans la trajectoire de l'écoulement de l'air pour convertir l'énergie cinétique en énergie mécanique, et le générateur, entraîné par la turbine convertit l'énergie mécanique en énergie électrique (figure 2) [6].

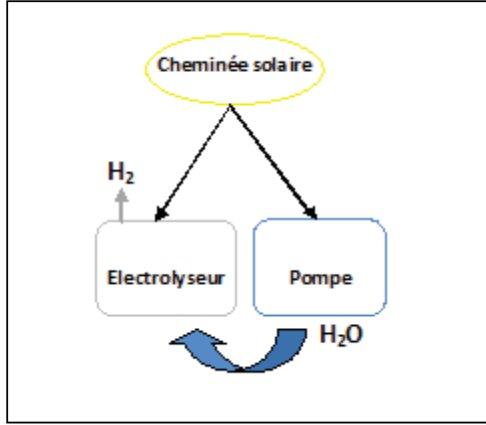


Figure 1 : Schéma de principe de l'installation de production d'hydrogène

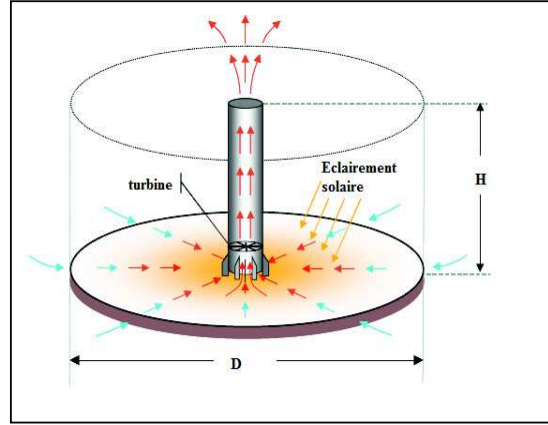


Figure 2: Principe de fonctionnement de la cheminée solaire

Généralement la puissance produite par une cheminée solaire peut être calculée comme l'énergie solaire rapportée au système multiplié par le rendement du collecteur, la cheminée et la turbine(s) respectivement :

$$P = \dot{Q}_{solaire} \cdot \eta_{coll} \cdot \eta_{chem} \cdot \eta_{turb} \quad (W) \quad (1)$$

L'énergie solaire rapportée au système est écrite en fonction de l'éclairement solaire globale sur un plan horizontale (E_h) et la surface du collecteur (A_{coll}).

$$\dot{Q}_{solaire} = E_h \cdot A_{coll} \quad (W) \quad (2)$$

La cheminée convertit le flux de la chaleur produite par le collecteur en énergie cinétique (flux convectif) et en énergie potentielle (abaissement de pression dans la turbine). Ainsi, que la différence de densité de l'air causée par l'élévation de la température donne une force de poussée (poussée d'Archimède). La différence de pression totale Δp_{tot} est produite entre la base de la cheminée et l'air ambiant :

$$\Delta p_{tot} = g \cdot \int_0^{H_{chem}} (\rho_a - \rho_{chem}) dH \quad (Nm^{-2}) \quad (3)$$

En négligeant les pertes par frottement, la différence de pression totale Δp_{tot} peut être divisée en deux composantes: statique et dynamique :

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_s + \Delta p_d \quad (4)$$

La différence de pression statique est négligée lorsqu'il y a un abaissement de pression dans la turbine, la composante dynamique décrit l'énergie cinétique de l'écoulement de l'air. Avec la différence de pression totale et le débit volumique de l'air ($\Delta p_s = 0$), la puissance totale contenue dans la cheminée est maintenant :

$$P_{tot} = \Delta p_{tot} \cdot v_{chem,max} \cdot A_{coll} \quad (W) \quad (5)$$

À partir de laquelle l'efficacité de la cheminée peut être établie :

$$\eta_{chem} = \frac{P_{tot}}{\dot{Q}} \quad (6)$$

Sans turbine, un débit maximal de l'air est reliée avec une vitesse de sortie maximale ($v_{chem,max}$), et la différence de pression est utilisée pour accélérer l'air (converti en énergie cinétique) :

$$P_{tot} = \frac{1}{2} \dot{m} v_{chem,max}^2 \quad (W) \quad (7)$$

En utilisant l'approximation de Boussinesq, la vitesse atteinte par la convection naturelle peut être exprimée par l'expression :

$$v_{chem,max} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{chem} \cdot \frac{\Delta T}{T_0}} \quad (ms^{-1}) \quad (8)$$

où ΔT est la différence de température entre l'air ambiant et la sortie du collecteur. Le rendement de la cheminée est donné par l'équation 9 [7] :

$$\eta_{chem} = \frac{g \cdot H}{c_p \cdot T_0} \quad (9)$$

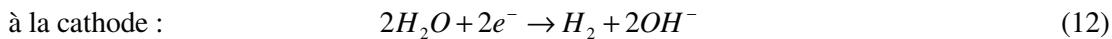
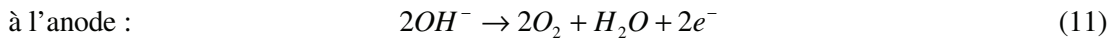
En utilisant les équations (1), (2) et (9), nous constatons que la puissance produite par une cheminée solaire est proportionnelle à la surface du collecteur et la hauteur de la cheminée (l'équation 10) :

$$P = \frac{2}{3} \frac{\eta_{coll} \cdot \eta_{tur} \cdot A_{coll} \cdot g \cdot E \cdot H}{c_p \cdot T_0} \quad (W) \quad (10)$$

Comme la production électrique de la cheminée solaire est proportionnelle au volume inclus dans la hauteur de la cheminée et la surface du collecteur, une même puissance électrique peut être produite par une grande cheminée avec une petite surface du collecteur, et vice versa. Dès que des pertes par frottement dans le collecteur sont incluses dans une simulation détaillée, la corrélation linéaire entre la puissance produite et la surface du collecteur ainsi que la hauteur de cheminée n'est pas strictement la plus valable. Néanmoins, elle est une bonne règle de base tant que le diamètre du collecteur n'est pas trop large.

2. 2. Simulation de l'électrolyseur de l'eau

L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique de décomposition de l'eau en hydrogène et en oxygène. Elle est rendue possible par le passage d'un courant continu à travers deux électrodes immergées dans un électrolyte liquide ou solide. L'électrolyse alcaline est la technologie la plus répandue pour la production d'hydrogène électrolytique mais également pour la production de nombreux composés chimiques dont le chlore. Elle bénéficie ainsi d'une très grande maturité industrielle. Dans un électrolyseur à technologie alcaline, l'électrolyte est une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH). La conduction ionique est alors assurée par les ions hydroxyde (OH⁻) et potassium (K⁺). Les réactions anodiques et cathodiques sont décrites ci-dessous:



La figure ci-après illustre de manière schématique l'électrolyse alcaline.

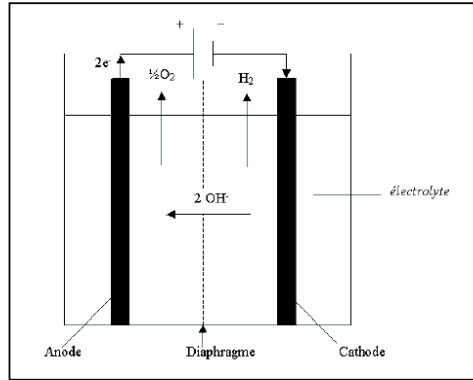


Figure 3: Principe de l'électrolyse alcaline

Actuellement, les électrolyseurs à technologie alcaline commercialement disponibles ont des températures de fonctionnement comprises entre 80 et 90 °C et leurs pressions de fonctionnement s'échelonne de 1 jusqu'à environ 30 bar (absolus). Ils présentent une gamme de puissance allant du kW au MW, les rendements énergétiques de tels électrolyseurs sont de l'ordre de 75 à 90 %, pour une durée de vie supérieure à 80 000 heures de fonctionnement, pouvant même aller jusqu'à 160 000 heures (soit environ 18 ans).

L'expression du débit d'hydrogène produit est donnée par la relation [8] :

$$m_{H_2} = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n} \cdot I \cdot \eta_f \quad (\text{kgs}^{-1}) \quad (13)$$

En posant : $K = F \cdot n / M = 96487000$, pour un débit d'hydrogène donné, l'intensité du courant nécessaire à sa production devient :

$$I = 96487000 \cdot m_{H_2} / \eta_f \quad (\text{A}) \quad (14)$$

L'énergie globale d'électrolyse W s'exprime en fonction de la tension réelle U (en V) et de l'intensité I (en A) par l'expression suivante :

$$W = U \cdot I \quad (\text{W}) \quad (15)$$

Avec $U = U_{th} / \eta_{el}$, la puissance nécessaire pour l'électrolyse est donnée par la relation [9] :

$$W = U_{th} / \eta_{el} \cdot I \quad (16)$$

En remplaçant la valeur de I issue de la relation (14) dans l'équation précédente, l'expression de la puissance W devient alors :

$$W = 96487000 \cdot U_{th} \cdot m_{H_2} / (\eta_{th} \cdot \eta_f) \quad (17)$$

Si les cellules d'électrolyses sont alimentées par un débit d'eau m_{H_2O} , la quantité d'hydrogène produite conformément à l'équation 12, est donnée par la relation suivante :

$$m_{H_2} = m_{H_2O} / 18 \quad (18)$$

La puissance nécessaire (W) pour l'électrolyse d'un débit d'eau est donc :

$$W = 5360389 \cdot U_{th} \cdot m_{H_2O} / (\eta_{th} \cdot \eta_f) \quad (19)$$

2. 3. Le système de pompage de l'eau

Ce système comprend aussi bien les systèmes auxiliaires tels que le système de pompage et de traitement de l'eau. L'eau utilisée dans l'électrolyse peut provenir de différentes sources. Elle peut être prise de la mer dans le cas des sites côtiers ou des nappes phréatiques particulièrement pour le grand sud. L'utilisation des eaux thermales peut s'avérer un choix judicieux. En effet, cette

eau chaude, étant en plus une source d'énergie, ne fera qu'augmenter le rendement de production d'hydrogène du système.

L'énergie nécessaire pour le pompage de l'eau dépend de sa source. La puissance pour un débit q d'une nappe se trouvant à une profondeur h est donnée par :

$$P_{pompe} = \rho \cdot g \cdot h \cdot q \quad (W) \quad (20)$$

L'énergie nécessaire pour le fonctionnement de ce système de pompage est fournie par l'énergie électrique produite par la cheminée solaire.

3. Méthodologie de résolution

La première étape est consacrée au dimensionnement de l'installation de production d'hydrogène par voie solaire. La seconde étape consiste à estimer et comparer les quantités d'hydrogène produites par cette installation, en plusieurs sites d'Algérie, afin de déterminer les conditions les plus favorables pour sa production optimale.

3.1 Dimensionnement de l'installation de production d'hydrogène

Les conditions de fonctionnement prises, aux différents points de l'installation, sont :

- L'électrolyseur travaille à : $T = 90 \text{ }^\circ\text{C}$; $P = 10\text{bar}$; $\dot{m}_{H_2O} = 5\text{kg/s}$
- L'air ambiant à l'entrée de la cheminée solaire à : $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; $P_0 = 1\text{atm}$
- L'eau pompée à : $h = 2000\text{m}$; $q = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

Les valeurs, obtenues par calcul sont:

- L'énergie nécessaire pour le système de pompage de l'eau: $P_{pompe} = 98.1 \text{ kW}$
- Détermination des caractéristiques d'électrolyse :

L'intensité du courant qui traverse les cellules d'électrolyse dépend uniquement du débit d'hydrogène à produire. Ce dernier dépend directement du débit d'eau d'alimentation produit par le système de pompage (l'équation 14), pour un débit d'eau de 1 kg/s , un rendement faradique de 0.99 et un rendement énergétique de 0.9 , l'intensité du courant qui doit traverser les cellules d'électrolyse pour produire $1/18 \text{ kg}$ d'hydrogène est égale à : $I = 5.41 \text{ MA}$.

La tension thermoneutre à appliquer aux bornes des cellules d'électrolyse est : $U_{th} = 1.48 \text{ V}$.

La puissance nécessaire à l'électrolyse de l'eau a pour valeur : $W = 8.9\text{MW}$.

- Dimensionnement de l'unité de production de l'électricité (la cheminée solaire):

La puissance nécessaire pour le système de pompage de l'eau et l'électrolyseur est :

$$P_{totale} = 9 \text{ MW}.$$

En tenant compte des rendements de la turbine et du collecteur qui sont respectivement : 0.8 et 0.5 [6] et une valeur de rayonnement solaire par ciel clair de 500W/m^2 (valeur moyenne enregistrée, valable pour plusieurs sites sur le territoire national [10]), nous obtenons :

$H_{chem} \cdot A_{coll} = 2060711\text{m}^3$; c'est-à-dire pour une cheminée qui a une hauteur de 70m , le diamètre du collecteur devient 194m .

3.2 Estimations de la production d'hydrogène

Dans le tableau 1 présenté ci-après, sont regroupées nos estimations sur les taux de production annuels de l'hydrogène solaire pouvant être obtenus par voie électrolytique m_{H_2} (kg/an) pour différents sites d'Algérie et déterminés en fonction des valeurs annuelles de l'énergie solaire reçue sur le plan horizontal E_h (kWh/m²/an) [11] et de la puissance électrique produite par la cheminée solaire P (kW/an). Les puissances électrique et thermique générées par notre installation sont directement proportionnelles au rayonnement solaire dont l'intensité est maximale au sud algérien. Leurs valeurs les plus importantes sont évidemment détectées à Tamanrasset et Ouargla. Dans les autres sites les valeurs sont presque les mêmes. Quant à la production d'hydrogène solaire, les quantités produites au sud sont plus importantes comparées à celles produites au centre, à l'est et à l'ouest où les valeurs se rapprochent beaucoup. La production d'hydrogène moyenne annuelle au sud est de l'ordre de $3 \cdot 10^6 \text{ kg}$.

Tableau 1: Les paramètres annuels pour différents sites d'Algérie

Paramètres	E_h (kWh/m ² /an)	P (kW/an)	m_{H_2} (kg/an)
Annaba	1738.54	94298.42	2.51 10 ⁶
Ouargla	2113.25	114622.70	3.06 10 ⁶
Alger	1660.19	90048.71	2.40 10 ⁶
Tamanrasset	2411.23	130785.14	3.50 10 ⁶
Oran	1677.24	90973.50	2.42 10 ⁶
Djelfa	1464.16	79416.05	2.12 10 ⁶

3.3 Estimations économique

Le tableau 2 présente une comparaison économique du coût de production de l'hydrogène (€/kg_{H2}) par l'électrolyse alcaline en Algérie. En utilisant l'électricité produite par la cheminée solaire et une autre fois par une source conventionnelle, les estimations économiques sont déterminées sur la base d'une loi d'échelle déduite des données de la France, l'Islande, la Norvège et les Etats-Unis [12].

Tableau 2: Comparaison du coût de production d'hydrogène par l'électrolyse alcaline en Algérie

Capacité de production (kg/an)	10 ⁶	2.10 ⁶	4. 10 ⁶	8. 10 ⁶
Source conventionnelle	3.41	3.35	3.31	3.28
Cheminée solaire	11.45	7.54	4.75	3.25

Nous remarquons que pour une capacité de production d'hydrogène faible, le coût de production par une cheminée solaire est plus cher (presque le triple). Par contre pour une grande capacité de production le coût devient moins cher, il atteint une valeur de 3.25 €/kg_{H2} pour une capacité de 8.10⁶kg/an (bénéfique que l'électricité conventionnelle). D'après la référence [6], le coût de l'électricité devient moins cher pour une cheminée solaire à grande capacité.

4. Conclusion

L'installation présentée et décrite ci-dessus assure la production massive d'hydrogène gazeux par électrolyse de l'eau. L'alimentation énergétique des cellules d'électrolyse est assurée par une cheminée solaire qui convertit l'énergie solaire thermique en énergie cinétique puis en puissance électrique. Cette dernière est nécessaire pour alimenter le système de pompage qu'est utilisé pour alimenter les cellules d'électrolyse par un débit de 5kg/s de l'eau, et une puissance totale de 9 MW. Le taux de production de l'hydrogène a été évalué, cette estimation est basée sur le cas le plus défavorable. On a donc une estimation du minimum théorique que l'on peut obtenir. La simulation a été simultanément appliquée à notre installation en des endroits où les ressources solaires sont variables (Annaba, Ouargla, Alger, Tamanrasset, Oran, Djelfa). Les valeurs maximales de production annuelle d'hydrogène ont été détectées au sud Algérien (Tamanrasset et Ouargla), Les quantités annuelles d'hydrogène produites dans les autres wilayas ont des valeurs qui se rapprochent sensiblement. Toutefois les résultats montrent que la production d'hydrogène est importante. L'utilisation de l'électricité produite par une cheminée solaire à grande puissance dans la production de l'hydrogène est moins coûteuse que l'électricité conventionnelle. Les résultats ne sont néanmoins que des estimations du potentiel de production d'hydrogène qu'est énorme. Le but de cette phase de l'étude est de faire ressortir les bénéfices de l'exploitation de l'hydrogène solaire. Le travail est en cours avec d'autres données et une estimation plus précise.

Nomenclature

- A Surface [m²]
- D Diamètre [m]
- E Eclairage solaire global [W.m⁻²]
- F Constante de Faraday [C/mole]
- H Hauteur [m]

I	Intensité du courant électrique [A]
M	Masse atomique [g/mole]
P	Puissance [W]
Q	Flux thermique [W]
T	Température [K]
U	Tension réelle [V]
U	Tension thermoneutre [V]
W	Energie globale d'électrolyse [W]
C_p	Chaleur massique [$Jkg^{-1}K^{-1}$]
g	Accélération terrestre, 9.81 [$m.s^{-2}$]
\dot{m}	Débit massique [$kg.s^{-1}$]
p	pression [$N.m^{-2}$]
v	vitesse [$m.s^{-1}$]
ρ	Densité [$kg.m^{-3}$]
η_f	Rendement faradique
η_{el}	Rendement énergétique

Références

- [1] W. Hartumut et K. Gerhard ; *Génie électrochimie - Principe et procédure*, Dunod 1999.
- [2] Revue Clefs, CEA France N°44
- [3] F. Barber et T.N. Veziroglu ; *Environmental Benefits of the Solar Hydrogen Energy System, Clean Energy*, Research Institute, University of Miami, FL 33124, USA.
- [4] T. Tani, N. Sekiguchi, M. Sakkai et D. Ohta ; *Optimization of Solar Hydrogen Systems Based on Hydrogen Production Cost*, Solar Energy, Vol. 68, N°2, pp. 143 – 149, 2000.
- [5] T.N. Veziroglu, J. Padin et A. Shahin ; *Hydrogen Solar High-Temperature Hydrogen Production System*, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 25, pp. 295, 2000.
- [6] Schlaich Bergermann und Partner ; *The Solar Chimney*. Structural Consulting Engineers 2005.
- [7] J. Schlaich. ; *The solar Chimney: Electricity from the sun*. In: Maurer C, editor. Germany: Geislingen, 1995.
- [8] A. Damien ; *Hydrogène par électrolyse de l'eau*, Techniques de l'ingénieur Vol. J6, N° J 6366, 12-1992.
- [9] Ulleberg O ; *Modelling of advanced alkaline electrolyzers : a system simulation approach*, International Journal of Hydrogen, vol. 28, pp. 21-33, 2003.
- [10] M. Capderou, *Atlas Solaire de l'Algérie*, Tome 2, Aspect Energétique, Office des Publications Universitaires, Juin 1985.
- [11] H. Derbal, R. Miri et A. M'Raoui ; *Etude d'un système de production d'hydrogène par voie solaire Application sur l'électrolyse de la vapeur d'eau à très hautes températures*, Rev. Energ. Ren, Vol. 8, pp. 137 – 156, 2005.
- [12] Services for Professionals in Solar Energy and Radiation, <http://www.soda-is.com>, (site consulté en Janvier 2009).