

Conception et simulation d'un système de production d'hydrogène par électrolyse EHT (application au site d'Adrar)

Djamal DARFILAL, Chakib SELADJI, Youssouf FRAINE

Laboratoire Energétique et Thermique Appliquée ETAP, Université Abou-Bekr BELKAÏD B.P 119, Tlemcen
13000

djamelar89@hotmail.fr, seladji@yahoo.fr, youfraine@hotmail.fr

Résumé : L'hydrogène fait actuellement l'objet d'un intérêt majeur tant sur le plan production que sur le plan stockage. La présente étude, localisée dans une région du sud Algérien(ADRAR) a fait l'objet d'une analyse par le biais du logiciel TRNSYS. Certains composants ont été développés au cours de ce projet à l'aide de TRNSED. Le langage évolué W-Editor a été également exploité pour la programmation de nouveaux éléments. Il eu ressort de notre étude que la technique EHT (électrolyse haute température) est une bonne alternative pour une production en masse de l'hydrogène, utilisant l'énergie solaire, très disponible en Algérie.

Mots clés : électrolyse EHT, solaire, hydrogène, TRNSYS.

1. Introduction

Face à la demande énergétique qui ne cessera de croître dans le futur, l'humanité ne peut agir que par remplacement d'une manière progressive les énergies fossiles et fissiles épuisables et originaire de pollution par les énergies renouvelables, propres et inépuisables. L'hydrogène semble être la source et le vecteur d'énergie idéale [1]. L'hydrogène n'existe pas à l'état naturel, il faut le synthétiser à partir des énergies renouvelables. L'électrolyse EHT (haut température) reste la technique de production la plus souple et surtout lorsque cette dernière est envisagée en aval d'une centrale solaire fournissant la chaleur et l'électricité [2]. L'Algérie, à partir de sites privilégiés comme celui d'Adrar, se présente comme le meilleur candidat pour héberger un projet d'envergure pour la production de l'hydrogène en tenant compte, particulièrement de la disponibilité de l'énergie solaire et de la ressource hydrique.

1.1. Description du site

La région d'Adrar est caractérisé par un fort taux d'ensoleillement, horizontale de 6598.5 Wh/m²/j et de 7003.82 Wh/m²/j sur un plan orienté plein sud et incliné à latitude du lieu à 27.53° pendant une durée d'insolation journalière réelle de 10 h en moyenne. Aussi la région d'ADRAR est couverte par une géante nappe phréatique (nappe albienne), considérée comme la plus grande au monde sa profondeur moyenne est de 1000m, elle est artésienne, caractérisée par un débit spécifique de l'ordre de 250 l/s. Son eau est chaude dépasse les 60°C, salée de l'ordre de 2 à 7g/l. L'alimentation de la nappe est relativement faible, se fait par ruissellement à la périphérie du réservoir. [3,4]

1.2. Description du système

Le champ solaire est la partie réceptrice de l'installation: la radiation solaire y est transformée en énergie thermique. Le fluide (huile synthétique par exemple) qui circule à l'intérieur du tuyau (tube), est chauffé à une température supérieure à 400 °C. Ce fluide est ensuite pompé à travers des échangeurs afin de produire de la vapeur d'eau à 300 °C et 30 bars de pression. La vapeur reçoit une quantité d'énergie Cette vapeur est ensuite intégrée dans un cycle thermodynamique générant un travail W_t au moyen d'une (ou à plusieurs) turbines .A la sortie de la turbine le mélange liquide-vapeur est ensuite séparé, le liquide est recyclé vers le réservoir, et une partie de la vapeur est ensuite réchauffée à 300°C, cette vapeur reçoit une quantité d'énergie , La dernière étape est la compression de la vapeur à $T=900^{\circ}\text{C}$ et $P=30$ bars, W_c est le travail nécessaire pour assurer cette compression. L'eau est pompée d'un puits vers un réservoir avec un débit $\dot{m}=1\text{kg/s}$, le débit sortant du réservoir (à calculer) entre dans la chaudière solaire (point 1) et sort (point 2) à une température $=300^{\circ}\text{C}$ et une pression =

30 bar. Ce débit est détendu dans la turbine qui va nous produire le travail nécessaire pour entrainer le compresseur. Le débit sortant du mélange liquide-vapeur (point 3) est ensuite divisé en trois, la fraction liquide va être recyclée vers le réservoir. la vapeur va être divisée en deux, un débit recyclé et un débit unitaire qui va être traité dans les étapes suivantes du processus (réchauffé et comprimé). Concernant le système de stockage, il fonctionne lorsqu'on a une production excédentaire de chaleur ou lorsque Q_{1-2} est inférieur à la valeur nécessaire, cette partie va être stockée dans des réservoirs de sel fondu. La vapeur à la sortie du compresseur va être reçue par un électrolyseur EHT qui est alimenté par une source d'énergie solaire produisant de l'électricité. Nous allons utiliser pour cela une centrale solaire photovoltaïque.

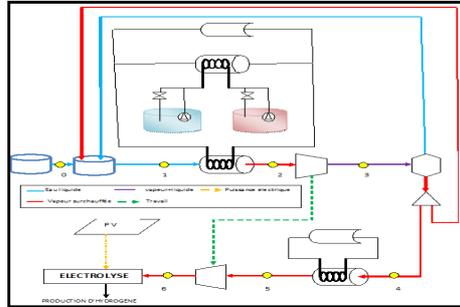


Figure 1 : Schéma descriptif du système

2. Dimensionnement et simulation du système

2.1. Dimensionnement de la chaudière

La vapeur d'eau atteint une température de l'ordre de 300°C, la puissance nécessaire pour le bon fonctionnement de l'unité Q_{1-2} est :

$$Q_{1-2} = \dot{m}_1 (h_2 - h_1) \quad (1)$$

Le bilan énergétique du réservoir nous permet de calculer la valeur de h_1

$$\dot{m}_0 h_0 + \dot{m}_{LS} h_3' + \dot{m}_{VS} h_3'' = \dot{m}_1 h_1 \quad (2)$$

$$\dot{m}_{LS} = \dot{m}_1 (1 - x) \quad (3)$$

$$\dot{m}_{LS} = (\dot{m}_1 x) - 1 \quad (4)$$

Nous avons aussi la puissance utile délivrée par la chaudière Q_U

$$Q_U = \eta_0 I_d S - U_C (T_C - T_a) a \quad (5)$$

Pour notre cas nous allons négliger le terme $U_C (T_C - T_a) a$, qui représente les pertes thermiques. Donc Q_U devient :

$$Q_U = \eta_0 I_d S \quad (6)$$

Alors à partir des deux équations (1) et (6) on peut tirer la surface S :

$$S = \dot{m}_1 (h_2 - h_1) / \eta_0 I_d \quad (7)$$

On peut calculer le nombre de concentrateurs N .

$$N = S/S_U \quad (8)$$

Nous allons refaire de nouveau les mêmes procédures pour le deuxième réchauffeur :

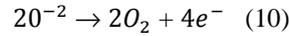
$$Q_{4-5} = \dot{m}_4 (h_5 - h_4) \quad (9)$$

La sortie de la chaudière est représentée par le point 5. La température $T_5=300^\circ\text{C}$ et $P_5=1\text{bar}$ et la sortie du séparateur (point 4) $T_4=100^\circ\text{C}$ et $P_4=1\text{bar}$.

2.2 Dimensionnement de l'électrolyseur

Nous avons choisi de travailler avec un électrolyseur EHT car il permet de travailler à forte densité de courant, d'où une forte capacité de production dans un volume réduit (la moitié). [5]

À l'anode :



À la cathode :



L'énergie nécessaire pour la réaction correspond à la variation de l'enthalpie de la réaction.

$$\Delta H \rightarrow \Delta G + T \Delta S \quad (12)$$

Lorsque nous avons choisi de travailler dans le mode auto thermique TΔS est fourni sous forme électrique dégradé par l'effet de joule, on va supposer que cette dégradation soit suffisante pour maintenir la température constante entre l'entrée et la sortie donc une réaction thermo neutre [6] . Dans un premier temps, l'enthalpie de réaction, l'enthalpie libre de Gibbs et l'entropie de réaction dans les conditions standards sont estimées à l'aide de la courbe suivante

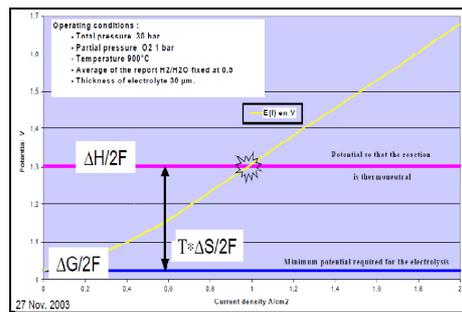


Figure 2 : la tension en fonction de la densité du courant pour EHT [7]

La tension thermo neutre correspond au fonctionnement isotherme de l'électrolyseur. Elle est donnée par la formule suivant : [8]

$$U_{\text{thermo-neutre}} = \frac{\Delta H}{nF} \quad (13)$$

La tension à appliquer aux bornes des électrodes correspond à la tension thermo-neutre qui est la somme de la tension réversible et les irréversibilités. Dans le cas parfait la masse d'hydrogène produite dépend essentiellement de l'intensité du courant électrique, alors :

$$m_{\text{H}_2} = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n} \cdot I \cdot t \quad (14)$$

Mais la production réelle dépend d'un coefficient appelé rendement faradique η_f

$$I = 96487000 \cdot m_{\text{H}_2} / \eta_f \quad (15)$$

Ou bien lorsque : $m_{\text{H}_2} = 1/9 m_{\text{H}_2\text{O}}$

$$I = 10720778 \cdot m_{\text{H}_2\text{O}} / \eta_f \quad (16)$$

Nous allons prendre une valeur unitaire du débit $m_{\text{H}_2\text{O}} = 1\text{kg/s}$ Toujours à l'aide de la figure 2, la valeur de la densité du courant qui correspond à la valeur thermo neutre de la tension : $J=1\text{A/m}^2$. Aussi nous savons que la puissance nécessaire pour l'électrolyse :

$$P = U_{\text{thermo-neutre}} \cdot I \quad (17)$$

2.3 Dimensionnement de l'unité de production d'électricité

La puissance produit par une cellule de silicium monocristallin a comme expression $P = U \cdot I$ [9] donc on peut tracer la courbe $U(I)$ qui a un maximum de puissance P_M correspond à une tension U_{pm} , $P_M = 1,24W$, $U_{pm} = 0,45 V$ et $I_{pm} = 2,75 A$.

Selon la référence [10] le nombre de cellule nécessaire :

$$N_{Cel} = \frac{p}{0,96 \cdot p_M} \quad (18)$$

Aussi la tension nécessaire $U_{\text{thermo-neutre}} = 1,3 V$, donc le nombre de cellule en série est :

$$N_{Cel/serie} = \frac{U_{\text{thermo neutre}}}{U_{pm}} \quad (19)$$

Alors le nombre en parallèle est :

$$N_{Cel/parallele} = \frac{N_{cel}}{N_{cellules/série}} \quad (20)$$

3. Résultats et discussions:

A l'aide du logiciel WASP, les caractéristiques de l'eau parcourant notre installation est résumé dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Les caractéristiques de l'eau pour chaque point

P	T (°C)	P (Bar)	H (kJ/kg)		S (KJ/°C)	
0	60	1	251,06		0.831	
1	-	-	1218,29		-	
2	300	30	2992,8		6.533	
3	100	1	$h'_3 = 418,8$	$h''_3 = 2674,9$	$S'_3 = 1,3$	$S''_3 = 7,3$
4	100	1	2674,9		7,353	
5	300	1	3073,9		8,220	
6	900	30	4387,4		8.201	

D'après les résultats obtenu nous pouvons constater que le rendement de l'installation thermique est plus important que le rendement de la centrale photovoltaïque ce qui implique que la production de l'hydrogène dépend essentiellement de la production d'électricité.

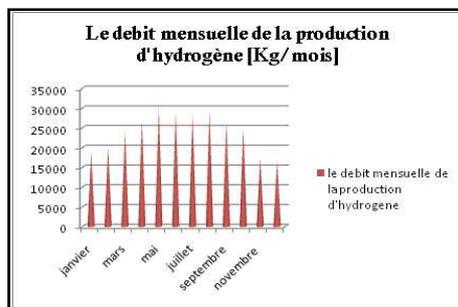


Figure 8 : la production mensuelle de l'hydrogène

Conclusion

L'Electrolyse de la vapeur d'eau à Haute Température (EHT) semble encourageant pour une production massive d'hydrogène plus respectueuse de l'environnement. Jusqu'à aujourd'hui, les études réalisées ont concerné principalement la faisabilité du procédé couplé à des sources d'énergie thermique à Haute Température

(Réacteurs nucléaires à Hélium). Nous avons dans cette étude remplacé ces ressources thermiques fossiles et fissiles par des centrales solaires thermiques. La simulation de la production est très encourageante.

Nomenclature

Symbole	Tc	Température moyenne du fluide dans le récepteur, K
Ac	Ta	La température ambiante, K
Cp	U	Tension, V
Cv	U _c	Conductance globale des pertes thermiques au niveau de l'absorbeur, $W/m^2 \cdot ^\circ C$
C	U _{pm}	Tension à la puissance maximale, V
F	W _c	Travail du compresseur, W
ΔG	W _t	Travail de la turbine, W
ΔH	a	Surface de l'absorbeur, m^2
I	hi	Enthalpie spécifique de la substance a l'état i, Kj/kg
Ic	h'	Enthalpie du liquide saturé, Kj/kg
I _d	h''	Enthalpie du liquide saturé, $Kj/^\circ C$
I _{pm}	m _i	Débit massique de la substance a l'état i, kg/s
J	m _{LS}	Débit massique du liquide saturé, kg/s
N	m _{vs}	Débit massique de la vapeur saturée, kg/s
N cel	t	Temps, S
P		
P _i		
P _M		
Q		
Q _U		
S _i		
S'		
S''		
S _U		
S		
T		

		Symboles grecs
	x	Fraction liquide vapeur
	η _f	Rendement faradique, %
	η _o	Rendement optique de la conversion, %
		Exposant, Indices
	i	substance a l'état i

Références

- [1] F. Auprêtre, L'hydrogène comme vecteur énergétique, compagnie européenne des technologies de l'hydrogène, PPT, <http://ipnweb.in2p3.fr/~ed421/ED421/hydrogene.pdf>
- [2] S. Laveissiere, Les technologies de l'hydrogène au CEA, Dossier de presse, mai 2012
- [3] S. Bennaceur, Etude expérimentale d'une chauffe eau. Solaire au sud ouest Algérien. (Adrar), thèse, 2010.
- [4] S. EL Abass, système d'irrigation dans les oasis de Mauritanie : problèmes de pompage Tentatives de réalimentation des nappes phréatiques, Journées internationales sur l'Agriculture et la gastronomie des Oasis, 14 au 15 octobre 2009.
- [5] S. Guillou, Etude du comportement d'un alliage chromino comme matériau d'interconnecteur pour l'Electrolyse à Haute Température, thèse, décembre 2011
- [6] R. Rivera-Tinoco, Etude Technico-économique de la production d'hydrogène a partir de l'électrolyse haute température pour différentes sources d'énergie thermique, Thèse ,30 Mars 2009.
- [7] P. Aujollet, Couplage d'un réacteur nucléaire avec un électrolyseur à vapeur à très haute température, DER/SERI. Novembre 2003.
- [8] A. Damien, Hydrogène par électrolyse de l'eau, Techniques de l'ingénieur, Vol. J6, N° J 6366 ,12/1992.
- [9] J. Labbé, L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour système photovoltaïque isole, Thèse doctorat, 21 décembre 2006.
- [10] H.Derbal, R.Miri et A.Mraoui, Etude conception et simulation numérique d'un système de production d'hydrogène solaire par électrolyse de la vapeur d'eau à haute température, Revue des Energie Renouvelable ,Volume 8 , pages 137–156 , 2005.