

Etude, dimensionnement et simulation par TRNSYS d'un système de production massive d'hydrogène par voie solaire au site d'Adrar

D. Darfilal ^{*}, Y. Fraine et C. Seladji

Faculté de Technologie, Département de Génie Mécanique
Université Abou Bakr Belkaïd, B.P. 119, Tlemcen, Algeria

(reçu le 30 Décembre 2012 – accepté le 26 Décembre 2013)

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 (Electrolyse Haute Température) est une bonne alternative pour une production en masse de l'hydrogène, utilisant l'énergie solaire, très disponible en Algérie.*

Abstract - *Hydrogen is currently the subject of major interest both in terms of production and storage. This study, located in a region of southern Algeria (Adrar) was analyzed through the software TRNSYS. Some components have been developed during this project using TRNSED. Language evolved W-Editor has also been used for programming new features. It was clear from our study that the technique EHT (high temperature electrolysis) is a good alternative for mass production of hydrogen using solar energy, very available in Algeria.*

Mots clés: Electrolyse EHT - Energie solaire – Hydrogène - TRNSYS.

1. INTRODUCTION

Face à la demande énergétique qui ne cessera de croître dans le futur et face à l'appropriation inconsidérée des ressources fossiles qui a mis des dizaines de millions d'années pour s'accumuler dans les couches géologiques, 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.

Il peut apporter une réponse efficace aux enjeux climatiques. 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 non polluante surtout lorsque cette dernière est envisagée en aval d'une centrale solaire fournissant la chaleur et l'électricité.

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.

* djameldar89@hotmail.fr

1.1 Description du site

Adrar, chef-lieu de wilaya, se trouve à 1500 km d'Alger et 800 km de Tlemcen, à l'extrême sud du pays. La région est promue wilaya en 1974 à la faveur d'un nouveau découpage administratif. Elle est limitée au Nord par la wilaya d'El Bayadh, au Nord-Ouest par Béchar, à l'Ouest par la wilaya de Tindouf, au Sud par le Mali et au Sud-Ouest par la Mauritanie. Elle a également des frontières par le Sud-Est avec la wilaya de Tamanrasset et Ghardaïa par le Nord-Est. La wilaya d'Adrar s'étend sur une superficie considérable de 427 968 km² pour une population de 389 898 habitants.

La région est caractérisée 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 importante nappe phréatique (nappe albienne), considérée comme la plus grande au monde. Sa profondeur moyenne est de 1000 m, 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 7 g/l.

Cette nappe constitue un des plus grands réservoirs aquifères au monde et un des trois réservoirs sur lesquels le monde arabe compte tirer ses ressources hydriques dans l'avenir. L'alimentation de la nappe est relativement faible, se fait par ruissellement à la périphérie du réservoir. [1, 2]

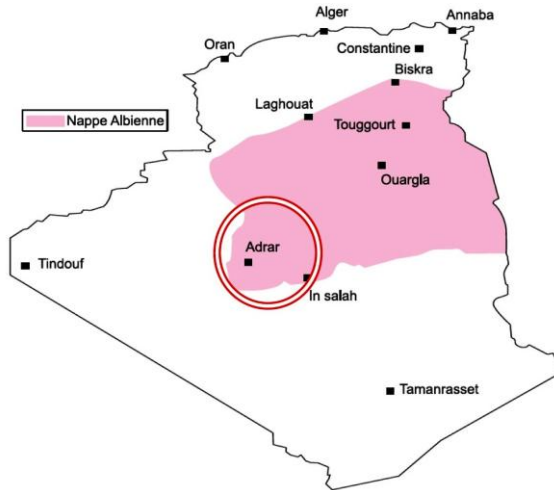


Fig. 1: Nappe albienne

1.2 Description du système

Le champ solaire (composé de deux parties) 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 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 à 30 bars[†] de pression.

[†] Selon le centre aéronautique et spatial Allemand (DLR), à la sortie des concentrateurs, la pression est portée à 30 bars et la vapeur d'eau produite atteint une température de 330 °C.

La vapeur reçoit une quantité d'énergie Q_{1-2} . Cette vapeur est ensuite intégrée dans un cycle thermodynamique générant un travail W_t au moyen d'une (ou plusieurs) turbines (Fig. 2). 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 Q_{4-5} .

La dernière étape est la compression de la vapeur à $T = 900^{\circ}\text{C}$ et à $P = 30\text{bars}$. W_c est le travail nécessaire pour assurer cette compression. L'eau est pompée d'un puits vers un réservoir avec un débit $\dot{m}_1 = 1\text{ kg/s}$, le débit \dot{m}_2 sortant du réservoir (à calculer) entre dans la chaudière solaire (point 1) et sort (point 2) à une température $T_2 = 300^{\circ}\text{C}$ et une pression $P_2 = 30\text{bars}$. 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 \dot{m}_2 (point 3) est ensuite divisé en trois, la fraction liquide va être recyclée vers le réservoir. Par contre, la vapeur va être divisée en deux, un débit \dot{m}_{VS} recyclé et un débit unitaire \dot{m}_4 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 inférieure 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 (Fig. 3).

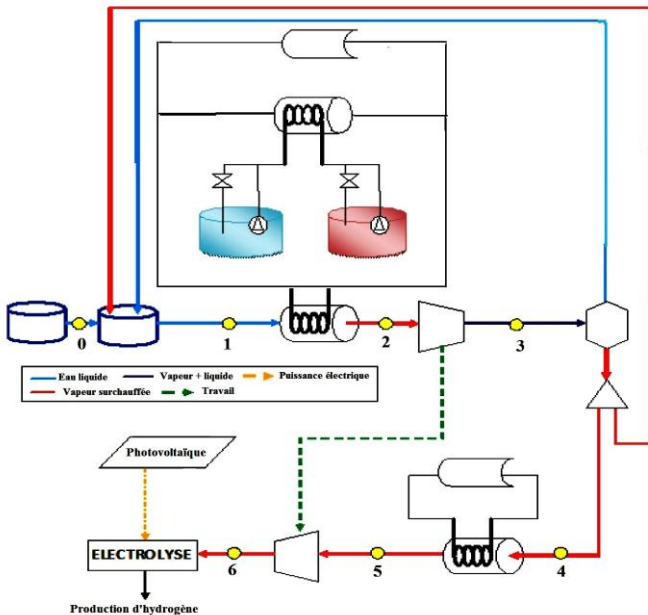


Fig. 2: Schéma descriptif du système

2. DIMENSIONNEMENT ET SIMULATION DU SYSTEME

2.1 Dimensionnement de la chaudière

Les concentrateurs cylindro-paraboliques fonctionnent jusqu'à une température de 400 °C (la température de l'huile) et 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:

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

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

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

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

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

Nous avons aussi la puissance utile délivrée par la chaudière Q_U

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

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

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

Alors à partir des deux équations (7) et (13), on peut tirer la surface S :

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

I_d , représente l'irradiation directe moyenne du site d'Adrar, qui est de l'ordre de $I_d = 562.2 \text{ W/m}^2$, (donnée climatique du logiciel Meteonorm -1981_1990-). Et η_0 , représente le rendement optique des capteurs cylindro-paraboliques.

On peut constater que le rendement augmente lors de l'augmentation du facteur de concentration C et il peut atteindre 90 % pour une concentration $C = 300$. Pour un meilleur rapport production/coût, nous choisissons une concentration $C = 100$ avec un rendement de 85 %.

Pour une surface unitaire S_U de 50 m², 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:

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

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).

A l'anode-



A la cathode-



La réaction globale-



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

$$\Delta H_r \rightarrow \Delta G_r + T \times \Delta S_r \quad (13)$$

avec, ΔH , la variation d'enthalpie de la réaction et ΔG , l'enthalpie de Gibbs.

Lorsque nous avons choisi de travailler dans le mode auto thermique[‡] (étant donné que les sources d'énergie retenue dans notre travail fournissent de la chaleur à des températures inférieures à celle de l'électrolyse). $T \Delta S$, 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. 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 des équations suivantes: [3]

$$\Delta H_r^0 = \Delta H_{f-H_2}^0 + 1/2 \Delta H_{f-O_2}^0 - \Delta H_{f-H_2O}^0 \quad (14)$$

$$\Delta G_r^0 = \Delta G_{f-H_2}^0 + 1/2 \Delta G_{f-O_2}^0 - \Delta G_{f-H_2O}^0 \quad (15)$$

$$\Delta S_r^0 = (\Delta H_r^0 - \Delta G_r^0) / T \quad (16)$$

Ensuite, en faisant appel aux coefficients des chaleurs spécifiques des gaz qui réagissent dans la cellule, exprimés par les équations (17) – (18), à partir des données du tableau des valeurs des enthalpies, enthalpies libres de Gibbs standard et coefficients de chaleur spécifique des gaz qui réagissent dans une cellule d'électrolyse [4], nous pouvons déterminer l'enthalpie et l'entropie de réaction (21) - (22) aux conditions opératoires fixées de la cellule.

[‡] L'énergie $T \Delta S$ est fournie sous forme électrique. Ainsi, pour ce mode, l'énergie nécessaire pour la réaction d'électrolyse de l'eau ($\Delta H_r = \Delta G + T \Delta S$) est entièrement fournie par l'énergie électrique, dégradée pour partie par effet Joule.

$$\Delta A_{CP} = A_{CPH_2} + 1/2 A_{CPO_2} - A_{CPH_2O} \quad (17)$$

$$\Delta B_{CP} = B_{CPH_2} + 1/2 B_{CPO_2} - B_{CPH_2O} \quad (18)$$

$$\Delta C_{CP} = C_{CPH_2} + 1/2 C_{CPO_2} - C_{CPH_2O} \quad (19)$$

$$\Delta D_{CP} = D_{CPH_2} + 1/2 D_{CPO_2} - D_{CPH_2O} \quad (20)$$

$$\Delta H_r = \Delta H_r^0 + R \left(\frac{\Delta A_{CP} (T - T^0) + \frac{\Delta B_{CP}}{2} (T^2 - T^{02})}{+ \frac{\Delta C_{CP}}{3} (T^3 - T^{03}) - \frac{\Delta D_{CP}}{(T - T^0)}} \right) \quad (21)$$

$$\Delta S_r = \Delta S_r^0 + R \left(\frac{\Delta A_{CP} \log(T/T^0) + \Delta B_{CP} (T - T^0)}{+ \frac{\Delta C_{CP}}{2} (T^2 - T^{02}) - \frac{\Delta D_{CP}}{(T^2 - T^{02})}} \right) \quad (22)$$

Les formules (21) et (22) nous permettent de calculer la valeur de ΔG_r nécessaire pour la réaction. Aussi la cinétique d'EHT peut être modélisée par l'emploi d'une relation empirique courant - tension [essai thermique]. Les résultats de cet essai thermique sont apparents dans la courbe (la tension en fonction de l'intensité) suivante:

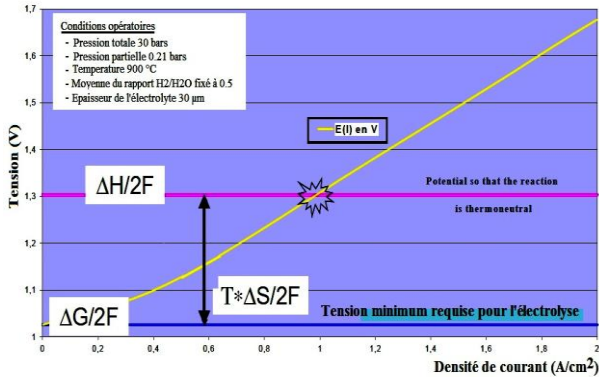


Fig. 3: Variation de la tension en fonction de la densité du courant pour un électrolyseur EHT [5]

La tension thermo neutre correspond au fonctionnement isotherme de l'électrolyseur. Elle est donnée par la formule suivante: [6]

$$U_{\text{thermo-neutre}} = \Delta H / nF \quad (23)$$

Sur la figure 4, nous constatons que la tension thermo-neutre correspond à une valeur de $U_{\text{thermo-neutre}} = 1.3 \text{ V}$. Cette tension est appliquée dans le but de réaliser un procédé d'électrolyse dans des conditions adiabatiques sans changement de température de l'électrolyte.

La tension minimale dite réversible qui correspond au rapport $\Delta G_r / n \times F$ a une valeur: $U_{\text{réversible}} = 1.025 \text{ V}$. 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 [7]:

$$\dot{m}_{\text{H}_2} = \frac{1}{F} \times \frac{M}{n} \times I \times t \quad (24)$$

Mais la production réelle dépend d'un coefficient appelé rendement faradique η_f qui varie très fortement en fonction de la température. A la température de $900 \text{ }^\circ\text{C}$, le rendement faradique $\eta_f = 0.94$, $M = 1 \text{ g/mole}$, $n = 1$ et $F = 96487000$. Donc pour un débit d'hydrogène donné, l'intensité du courant nécessaire est :

$$I = 964870000 \times \dot{m}_{\text{H}_2} / \eta_f \quad (25)$$

Ou bien lorsque $\dot{m}_{\text{H}_2} = 1/9 \times \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$

$$I = 10720778 \times \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} / \eta_f \quad (26)$$

Nous allons prendre une valeur unitaire du débit $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = 1 \text{ kg/s}$. Toujours à l'aide de la figure 4, la valeur de la densité du courant qui correspond à la valeur thermo neutre de la tension est: $J = 1 \text{ A/m}^2$. Aussi nous savons que la puissance nécessaire pour l'électrolyse:

$$P = U_{\text{thermo neutre}} \times I \quad (27)$$

2.3 Dimensionnement de l'unité de production d'électricité

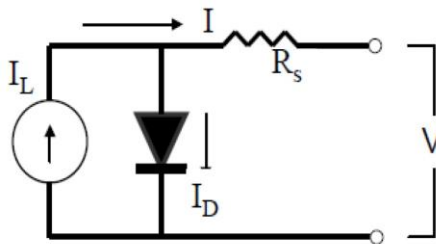


Fig. 4: Circuit électrique équivalent dans un modèle de 4 paramètres [9]

Dans ce projet, nous avons travaillé avec des cellules de silicium monocristallin qui représente la première génération des générateurs photovoltaïques. Ce genre de cellules a les caractéristiques électriques suivantes (pour une cellule monocristalline de $10 \times 10 \text{ cm}$, avec un rayonnement $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$).

- Le point de fonctionnement à vide U_V pour $I = 0 \text{ A}$, $U_V = 0.57 \text{ V}$.
- Le point de fonctionnement en court-circuit I_{cc} pour $U = 0 \text{ V}$, $I_{cc} = 3 \text{ A}$.

La puissance produite par une cellule a comme expression $P = U \times I$, donc nous pouvons tracer la courbe (Fig. 5). Cette dernière a un maximum de puissance P_M correspond à une tension U_{pm} , $P_M = 1.24 \text{ W}$, $U_{pm} = 0.45 \text{ V}$ et $I_{pm} = 2.75 \text{ A}$.

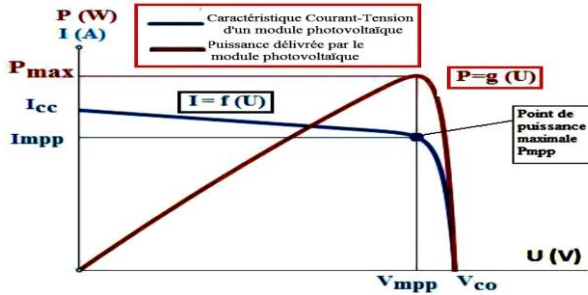


Fig. 5: Caractéristique courant-tension et puissance produite d'un module photovoltaïque [10]

Aussi le type choisi a une valeur de $\text{NOCT}^{\S} = 43 \text{ }^{\circ}\text{C}$ et $\mu_{p\text{max}} = -0.43\% / ^{\circ}\text{C}$. Le groupement des cellules en série permet d'augmenter la tension de sortie et le groupement en parallèle permet d'augmenter le courant. Par exemple, pour un groupement monté en série composé de N cellules donne une tension à la sortie.

$$U_S = N \times U_c \quad (28)$$

Où, U_c est la tension fournie par une cellule. De la même manière, le courant de sortie I_s pour un groupement de n cellules donne:

$$I_S = N \times I_c \quad (29)$$

Selon la référence [8], le nombre de cellules nécessaires est:

$$N_{\text{cellules}} = p / 0.96 \times p_M \quad (30)$$

Aussi la tension nécessaire $U_{\text{thermo-neutre}} = 1.3 \text{ V}$, donc le nombre de cellules en série est:

$$N_{\text{cellules/série}} = U_{\text{thermo-neutre}} / U_{pm} \quad (31)$$

Alors le nombre de cellules en parallèle est:

$$N_{\text{cellules/parallèle}} = N_{\text{cellules}} / N_{\text{cellules/série}} \quad (32)$$

3. RESULTATS ET DISCUSIONS

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

[§] La température de fonctionnement des cellules photovoltaïques dans les conditions suivantes: un ensoleillement de 800 W/m^2 et une température de $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$. [8]

Tableau 1: Caractéristiques de l'eau pour chaque point

Point	Température (°C)	Pression (bar)	Entalpie (kJ/kg)	Entropie (kJ/°C)
0	$T_0 = 60$	$P_0 = 1$	$h_0 = 251.06$	$s_0 = 0.831$
1	-	-	$h_1 = 251.06$	-
2	$T_2 = 300$	$P_2 = 30$	$h_2 = 2992.8$	$s_2 = 6.533$
3	$T_3 = 100$	$P_3 = 1$	$h_3' = 418.8$ $h_3'' = 2674.9$	$s_3' = 1.3$ $s_3'' = 7.3$
4	$T_4 = 100$	$P_4 = 1$	$h_4 = 2674.9$	$s_4 = 7.353$
5	$T_5 = 300$	$P_5 = 1$	$h_5 = 3073.9$	$s_5 = 8.220$
6	$T_6 = 900$	$P_6 = 30$	$h_6 = 4387.4$	$s_6 = 8.201$

A l'aide de l'interface graphique de TRNSYS, nous avons mis au point le schéma de l'installation désirée. Cette dernière nous a permis d'estimer la production massive de l'hydrogène pour le site d'Adrar. Il nous a permis également d'étudier l'influence de certains paramètres sur la production d'hydrogène. La simulation est divisée en deux parties: la centrale solaire de production d'électricité et la centrale solaire de production de vapeur.

La figure 6 illustre une partie du schéma de la simulation réalisé pour la production d'électricité:

FM ADRAR: Fichier Meteonorm type TMY2;
W-interpreter: Espace de programmation;
Daily integration: Intégrateur;
TYPE25c: Imprimante;
TYPE47a: Batterie de stockage;
TYPE57: Tableau de conversion;
TYPE65: Objet pour l'affichage graphique;
TYPE94a: Capteur photovoltaïque.

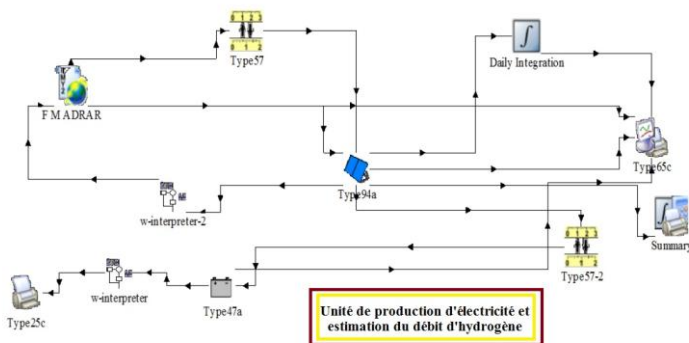


Fig. 6: Schéma de l'installation de production d'électricité

Le schéma précédent de TRNSYS nous a permis de simuler la température ambiante et le rayonnement solaire sur le site d'Adrar:

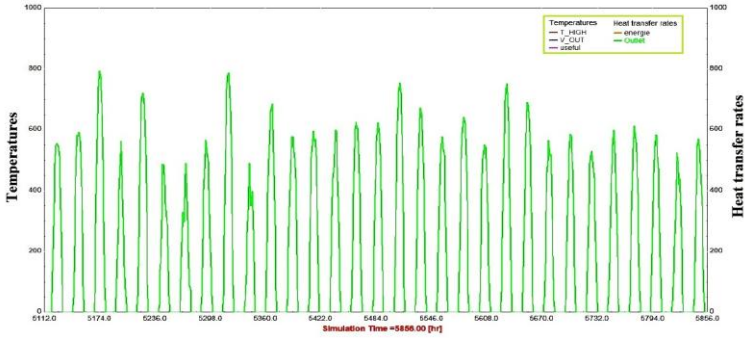


Fig. 7: Rayonnement solaire direct sur le site d’Adrar (mois d’Août)

Comme conclusion, les paramètres annuels de cette première installation sont les suivants:

Tableau 2: Paramètres annuels de la première installation

Puissance du rayonnement solaire totale (W/m²)	1.975.210
Puissance photovoltaïque (MWh)	10.927.072.758
Puissance thermique de la centrale de production de vapeur (MWh)	5.025.682.679
Puissance thermique du réchauffeur (MWh)	539.597.778
Production d’hydrogène (kg)	291.660

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.

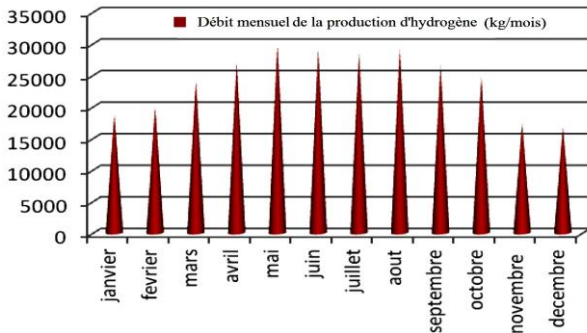


Fig. 8: Production mensuelle de l’hydrogène

4. CONCLUSION

En cette période de crise où les préoccupations environnementales prennent un intervalle considérable, et les ressources fossiles tendent à être insuffisantes, l’hydrogène est présenté comme la technologie apportant la solution la plus adéquate. Il peut rendre le vaste gisement solaire et éolien en Algérie beaucoup plus accessible. L’abondance de la matière première pour la production, la propreté et le recyclage

naturel sont les propriétés qui feront que l'hydrogène sera amené à jouer un rôle de premier rang dans le futur.

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.

Enfin, dans la perspective économique, il est nécessaire d'accompagner cette étude technique par une évaluation économique, ce qui donnera au travail une importance cruciale au moment où le pays envisage différents alternatives pour la diversification des ressources énergétiques. D'autres aspects liés à l'optimisation du système sont recommandés à l'occasion de futures études

REFERENCES

- [1] S. Bennaceur, B. Draoui et L. Bennamoun, '*Etude Expérimentale d'un Chauffe eau Solaire au Sud-Ouest Algérien d'Adrar*', Séminaire International sur le Génie Climatique et l'Energétique, SIGCLE'2010, Constantine, Algérie, 6-7 Décembre 2010. www.umc.edu.dz
- [2] S. El Abass, '*Système d'Irrigation dans les Oasis de Mauritanie: Problèmes de Pompage et Tentatives de Réalimentation des Nappes Phréatiques*', Journées Internationales sur l'Agriculture et la Gastronomie des Oasis, Elche, 14 au 15 Octobre 2009.
- [3] R. Rivera-Tinoco, '*Etude Technico-Economique de la Production d'Hydrogène à partir de l'Electrolyse Haute Température pour Différentes Sources d'Energie Thermique*', Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Mars 2009.
- [4] P. Aujollet, '*Couplage d'un Réacteur Nucléaire avec un Electrolyseur à Vapeur à très Haute Température*', DER/SERI, Novembre 2003.
- [5] A. Damien, '*Hydrogène par Electrolyse de l'Eau*', Techniques de l'Ingénieur: Vol. J6, N° J6366 (12/1992).
- [6] J. Labbé, '*L'Hydrogène Electrolytique comme Moyen de Stockage d'Electricité pour Système Photovoltaïque Isolé*', Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, Septembre 2006.
- [7] Scientific Report, '*Help du logiciel TRNSYS 16*', Vol. 5, Mathematical Reference, 2004 by the Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin- Madison, <http://sel.me.wisc.edu/trnsv>
- [8] S. Busquet, '*Etude d'un Système Autonome de Production d'Energie Couplant un Champ Photovoltaïque, un Electrolyseur et une Pile à Combustible: Réalisation d'un Banc d'Essai et Modalisation*', Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines Paris, 2003.
- [9] <http://www.photovoltaique.guidenr.fr/coursphotovoltaique-> 2011
- [10] H. Derbal, R. Miri et A. M'Raoui, '*Etude, Conception et Simulation Numérique d'un Système de Production d'Hydrogène Solaire par Electrolyse de la Vapeur d'Eau à Haute Température*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 8, pp. 137 – 156, 2005.