

## Etude d'un système de production d'hydrogène par voie solaire Application sur l'électrolyse de la vapeur d'eau à très hautes températures

H. Derbal<sup>1</sup>, R. Miri<sup>1</sup> et A. M'Raoui<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculté de Génie Mécanique et Génie des Procédés, U. S. T. H. B.  
B.P. 32, El-Alia, Bab Ezzouar, Alger

<sup>2</sup> Centre de Développement des Energies Renouvelables,  
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger

**Résumé** – Cette étude porte sur la conception d'une installation de production d'hydrogène par électrolyse de la vapeur d'eau à très hautes températures (700 – 1000 °C) dont les ressources énergétiques sont solaires. L'alimentation en électricité se fait par des cellules photovoltaïques et l'alimentation en vapeur est assurée par une centrale solaire à concentration. La simulation numérique de la production d'hydrogène, pour l'installation proposée, est faite en se basant sur les équations caractéristiques régissant l'électrolyse de l'eau, les panneaux photovoltaïques et la centrale solaire à concentration. Le taux de production d'hydrogène est déterminé pour des valeurs différentes du rayonnement solaire et pour différents sites du pays. Les résultats obtenus par le code de calcul établi et dont le but recherché est la détermination des conditions les plus favorables pour une meilleure production d'hydrogène, sont présentés et discutés.

**Abstract** – This study relates to the design of a hydrogen generating station per electrolysis of the water vapour at very high temperatures (700 – 1000 °C) whose energy resources are solar: The electricity supply is done by photovoltaic cells and the water vapour is ensured by a solar power station concentration. The numerical simulation of the hydrogen production, for the installation proposed, is made while being based on the characteristic equations governing the electrolysis of water, the photovoltaic panels and the concentration solar power station. The hydrogen production rate is given for various values of the solar radiation and several sites of Algeria. The results obtained by the established computer code and of which the required goal is the determination of the most favourable conditions for a better production of hydrogen, are presented and discussed.

**Mots clés:** Energie solaire - production d'hydrogène - Electrolyse de l'eau - Hautes températures - Cellule photovoltaïque - Système de concentration.

### 1. INTRODUCTION

L'approvisionnement énergétique mondial est aujourd'hui essentiellement basé sur l'utilisation des ressources fossiles et nucléaire. A terme, de telles sources d'énergie pourraient causer de sérieux préjudices à notre environnement. Les pollutions atmosphériques et l'effet de serre, mis en cause dans le réchauffement climatique, associés aux retombées radioactives liées au nucléaire sont des conséquences attendues. Ainsi, à la lumière de tous ces éléments, le système d'énergie actuel n'est pas viable sur le moyen et long terme. Le changement climatique est tenu pour l'une des menaces les plus sérieuses pesant sur la durabilité de l'environnement de la planète, sur la santé et le bien-être humain et sur l'économie mondiale. L'épuisement des réserves mondiales de pétrole et de gaz naturel, leurs prix qui augmentent sans cesse et l'insécurité de l'approvisionnement à long terme qui met la situation énergétique mondiale en rupture avec les objectifs du développement durable, provoque une demande grandissante pour de nouvelles sources d'énergie renouvelables et non polluantes.

Un système d'énergie solaire peut être avancé comme solution à la fois renouvelable et non polluante.

Pour envisager la généralisation d'un système d'énergie basé sur le solaire, il faut assurer une distribution de l'énergie à la fois uniforme et régulée. Cela nécessite de développer une technologie de stockage de l'énergie solaire afin de découpler la demande et la production d'énergie et permettre son transport. Celle-ci doit être rentable et de surcroît compatible avec de fortes productions. Pour cela, dans le cadre de notre travail, nous envisageons l'étude de la production de combustibles solaires (carburant synthétiques, i.e. hydrogène solaire). Un combustible peut être transporté par pipelines ou stocké dans des réservoirs, pour être acheminer vers des point de consommation (automobile, industrie, etc.) et restituer sa valeur énergétique. Incidemment, sa production à partir de l'énergie solaire revient à stocker celle-ci sous forme chimique. L'hydrogène, associé à d'autres éléments, abonde dans la nature et sa combustion n'est pas polluante. Il constitue, pour cela, le parfait combustible solaire [1].

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 [1]. L'hydrogène est produit par voie solaire principalement à l'aide de procédés thermochimiques, photo électrochimiques et électrolytiques [2]. Nous optons pour le troisième cas de figure. 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 [3-5]; les électrolyseurs alcalins, à membrane et à très haute température [6-8]. Le système proposé est celui de l'électrolyseur à vapeur d'eau à très haute température où l'électricité est produite par des cellules photovoltaïques et l'alimentation en vapeur d'eau est assurée par une centrale solaire à concentration. Un schéma synoptique du système est donné par la figure 1.

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

- l'électrolyseur à vapeur d'eau à très haute température,
- une batterie de modules photovoltaïques devant alimenter l'électrolyseur en électricité,
- une centrale solaire à concentration devant alimenter l'électrolyseur en vapeur d'eau.

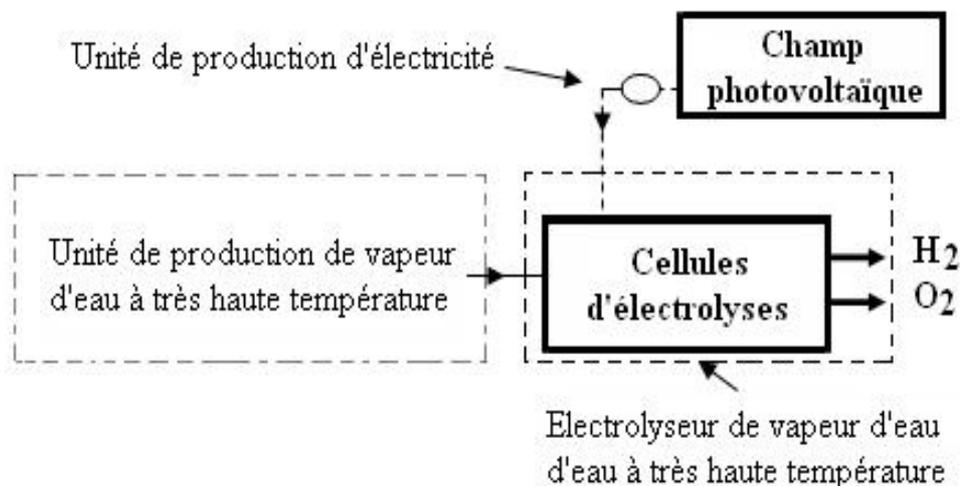


Fig. 1: Schéma de principe de l'installation de production d'hydrogène par voie solaire

## 2. CONCEPTION D'UNE INSTALLATION SOLAIRE DE PRODUCTION D'HYDROGENE PAR ELECTROLYSE DE VAPEUR D'EAU

### 2.1 Simulation de l'unité de production de vapeur d'eau

Le principe de fonctionnement de l'unité de production de vapeur d'eau, représentée sur la figure 2, est le suivant :

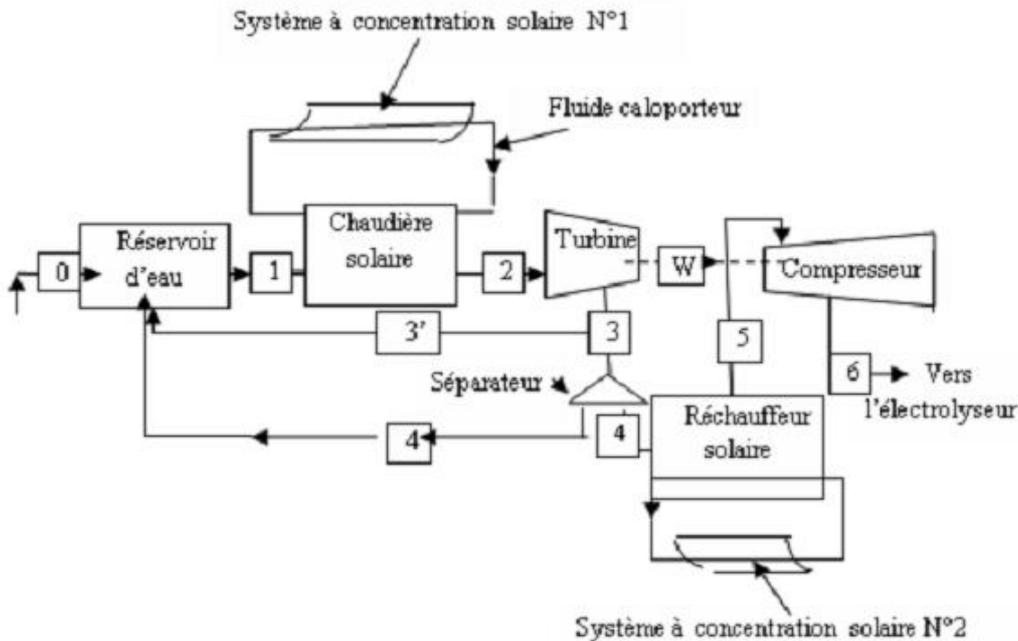


Fig. 2. Schéma de principe de l'installation solaire de production de vapeur d'eau

#### Principe de fonctionnement de l'installation

L'eau entre dans la chaudière solaire à l'état 1 et un débit ( $\dot{m}_1$ ) et elle en sort à haute pression et à haute température (état 2) où elle est reçue et détendue par la turbine qui va produire le travail  $W$  nécessaire au compresseur. A la sortie de la turbine, un mélange liquide-vapeur est récupéré: Le liquide, à l'état 3' et avec un débit ( $\dot{m}_{3'}$ ) est recyclé vers le réservoir d'eau et la vapeur d'eau, à l'état 3, avec un débit ( $\dot{m}_3$ ) est divisée, grâce à un séparateur, en deux quantités :

- la première (état 4) avec un débit ( $\dot{m}_4$ ) sert, une fois traitée (réchauffée et comprimée) aux conditions désirées (état 5), à alimenter les cellules d'électrolyse;
- la seconde (état 4') avec un débit ( $\dot{m}_{4'}$ ) est recyclée vers le réservoir d'eau.

L'installation de production de vapeur d'eau possède deux générateurs de chaleur :

- Le premier alimente la chaudière solaire d'une puissance  $Q_{12}$  ;
- Le second alimente le réchauffeur solaire d'une puissance  $Q_{45}$ .

Chaque générateur de chaleur est alimenté par le fluide caloporteur provenant d'un groupe de concentrateurs solaires. La chaleur cédée par le fluide caloporteur du circuit primaire est absorbée par l'eau. On peut écrire alors :

La chaleur nécessaire  $Q_{12}$ , pour transformer l'eau de l'état 1 à l'état 2, est :

$$Q_{12} = \dot{m}_1 (h_2 - h_1) \quad (\text{kW}) \quad (1)$$

Où :  $h_1$  : Enthalpie spécifique de l'eau à la sortie du réservoir (kJ/kg)  
 $h_2$  : Enthalpie de la vapeur d'eau surchauffée aux condition  $T_2$  et  $P_2$  (kJ/kg)  
 $\dot{m}_1$  : Le débit d'eau à la sortie du réservoir (kg/s).

D'une autre part, la dernière relation s'écrit sous la forme :

$$Q_{12} = \dot{m}_{el} C_{pel} (T_2 - T_1) = \dot{m}_{fcl} C_{fcl} (T_{fcel} - T_{fcs1}) \quad (2)$$

Où respectivement  $\dot{m}_{el}$ ,  $\dot{m}_{fcl}$  sont les débits massiques de vapeur d'eau et du fluide caloporteur (kg/s);  $C_{pel}$  et  $C_{fcl}$  les chaleurs massiques de vapeur d'eau et du fluide caloporteur (kJ/kg°C);  $T_1$  et  $T_2$  les températures à l'entrée et à la sortie de la chaudière (°C);  $T_{fcel}$  et  $T_{fcs1}$  les températures du fluide caloporteur à l'entrée et à la sortie du générateur de vapeur (°C).

Cette chaleur correspond à la puissance utile qui doit être délivrée par la chaudière solaire. Dans notre cas, c'est un ensemble de concentrateurs cylindro-paraboliques. L'expression de cette puissance est donnée par [9, 10] :

$$Q_u = \eta_0 I_b A_c - U_c (T_c - T_a) a \quad (3)$$

Où  $\eta_0$  est le rendement optique de conversion :  $\eta_0 = \alpha_c \cdot \rho_c \cdot \tau_c \cdot \chi_c$ .

Le terme ' $U_c (T_c - T_a) a$ ' représente les pertes thermiques de l'absorbeur par conduction, convection et rayonnement. Dans notre cas, nous prévoyons des concentrateurs cylindro paraboliques qui possèdent des absorbeurs sous vide. L'avantage majeur de ces absorbeurs est leur conductance thermique très faible, ce qui nous permet de négliger les pertes thermiques par conduction et par convection [9]. Dans le cas d'un dimensionnement théorique de notre installation et en prenant en considération l'effet de serre produit par l'enveloppe vitrée de l'absorbeur sous vide, opaque aux rayonnement infrarouges de grandes longueurs d'ondes émis par l'absorbeur, les pertes thermiques par rayonnement peuvent être aussi négligées [10, 11]. Ce qui permet d'écrire la relation (3) sous la forme :

$$Q_{12} = \eta_0 I_b A_{C12} \quad (4)$$

Suivant le même raisonnement, la chaleur nécessaire au réchauffage de l'eau est donnée par la relation suivante :

$$Q_{45} = \dot{m}_4 (h_5 - h_4) = \eta_0 I_b A_{C12} \quad (5)$$

La surface totale des concentrateurs cylindro paraboliques de l'installation est donc :

$$A_C = \frac{Q_{12}}{\eta_0 I_C} + \frac{Q_{45}}{\eta_0 I_C} \quad (6)$$

Selon la surface unitaire  $A_U$  choisie, il est possible de déterminer le nombre de concentrateur approprié (N) :

$$N = A_C / A_U \quad (7)$$

La surface de chaque absorbeur (a) est donnée par la relation [9-11] :

$$a = A_U / C \quad (8)$$

Où  $C$  est la concentration du rayonnement solaire (Fig. 3), choisie en fonction de la température imposée du fluide de travail et du rendement de conversion  $\eta_0$  désiré [11] :

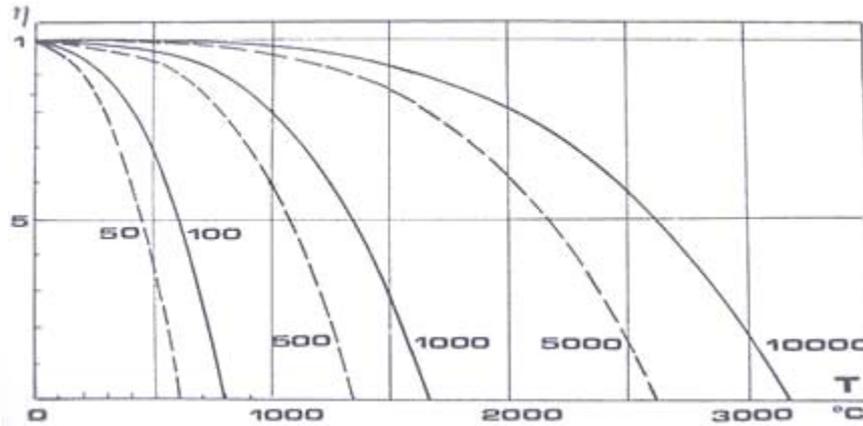


Fig. 3: Variation de  $\eta_0$  en fonction de  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) et  $C$  [11]

Le travail nécessaire pour assurer la compression est donné par la relation suivante :

$$W_{56} = \dot{m}_4 (h_6 - h_5) \quad (9)$$

Où  $h_6$  représente l'enthalpie de la vapeur d'eau surchauffée aux conditions  $T_6$  et  $P_6$  (conditions de fonctionnement de l'électrolyseur) et  $h_5$  représente l'enthalpie de la vapeur d'eau surchauffée. Elle est limitée par le type de l'échangeur solaire utilisé [16].

## 2.2 Simulation de l'électrolyse de la vapeur d'eau

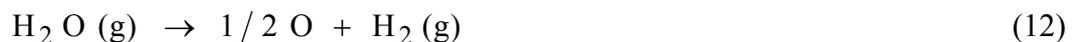
La figure 4 illustre le schéma de principe du processus électrochimique [7] : une paroi étanche d'oxyde électrolyte solide (OES) conducteur par ions  $\text{O}^{2-}$  est recouverte de deux conducteurs électroniques assurant respectivement la fonction d'anode et de cathode. Cette paroi sépare deux atmosphères en circulation contenant un mélange  $\text{H}_2\text{-H}_2\text{O}$  d'une part et de l'oxygène pur d'autre part. Sous la tension appliquée  $U$ , les molécules de vapeur d'eau sont dissociées à la cathode en ions  $\text{O}^{2-}$  et en hydrogène selon la réaction :



Les ions  $\text{O}^{2-}$  migrent au travers de la paroi d'OES. A l'anode se produit l'oxydation des ions  $\text{O}^{2-}$  en oxygène selon la réaction :



La réaction globale de cette décomposition est :



L'énergie globale nécessaire pour effectuer cette réaction est égale à la variation d'enthalpie  $\Delta H$  de cette réaction qui est équivalente à la somme de la variation d'énergie libre  $\Delta G$  et la variation de l'entropie de la réaction  $\Delta S$  :

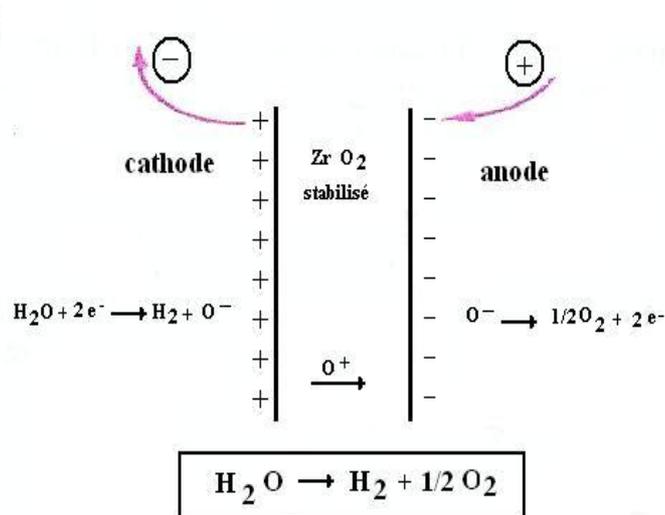


Fig. 4: Principe de fonctionnement d'électrolyse de la vapeur d'eau [7]

$$\Delta H_{\text{TP}} = \Delta G_{\text{TP}} + T \Delta S_{\text{TP}} \quad (13)$$

Les variations d'enthalpie et d'entropie de l'équation (13) sont calculées comme suit :

$$\Delta H_{\text{TP}} = \left( h_{\text{TP}} \right)_{\text{H}_2} + \frac{1}{2} \left( h_{\text{TP}} \right)_{\text{O}_2} - \left( h_{\text{TP}} \right)_{\text{H}_2\text{O}} \quad (14)$$

Avec:

$\Delta H_{\text{TP}}$  : Variation d'enthalpie de la réaction (kJ/ k mole)

$\left( h_{\text{TP}} \right)_x$  : Enthalpie à une température T et une pression P données (kJ/kmole)

$$\left( h_{\text{TP}} \right)_x = \left( h_{f_{\text{Tref}, \text{Pref}}} \right)_x + \left( \Delta h_{\text{Tref}, \text{Pref} \rightarrow \text{TP}} \right)_x \quad (15)$$

x correspondant à  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$  ou  $\text{H}_2\text{O}$ .

$\left( h_{f_{\text{Tref}, \text{Pref}}} \right)_x$  : Enthalpie de formation standard (kJ/kmole)

$\left( \Delta h_{\text{Tref}, \text{Pref} \rightarrow \text{TP}} \right)_x$  : Changement d'enthalpie entre les Conditions standard et l'état

considéré

$T_{\text{ref}} = 298,15 \text{ K}$  ;  $P_{\text{ref}} = 0.1 \text{ MPa}$ ; T, P : Conditions de température et de pression de fonctionnement.

L'enthalpie  $\left( h_{\text{TP}} \right)_x$  peut s'écrire aussi comme suit :

$$\left( h_{\text{TP}} \right)_x = \left( h_{\text{Tref}, \text{Pref}} \right)_x + C_{p_x} (T - T_{\text{ref}}) \quad (16)$$

$C_{p_x}$  : Chaleur massique à pression constante (kJ/kmole K)

De même, la variation totale de l'entropie s'écrit sous la forme :

$$\Delta S_{\text{TP}} = \left( S_{\text{TP}} \right)_{\text{H}_2} + 1/2 \left( S_{\text{TP}} \right)_{\text{O}_2} - \left( S_{\text{TP}} \right)_{\text{H}_2\text{O}} \quad (17)$$

Avec:

$\Delta S_{\text{TP}}$  : Variation de l'entropie de la réaction (kJ/kmole)

$(S_{TP})_x$  : Entropie à une température et une pression P données, (kJ/kmole)  
 $(S_{TP})_x = (S_{Tref, Pref})_x + (\Delta S_{Tref, Pref \rightarrow T, P})_x$  (18)

$(S_{Tref, Pref})_x$  : Entropie aux conditions de référence (kJ/kmole)

$(\Delta S_{Tref, Pref \rightarrow T, P})_x$  : Changement d'entropie entre les conditions standard et l'état considéré.

L'entropie  $(S_{TP})_x$  peut s'écrire aussi comme suit :

$$(S_{TP})_x = C_{p_x} \ln(T / T_{ref}) - R \ln(P / P_{ref}) + (S_{Tref, Pref})_x$$
 (19)

Où R : Constante des gaz parfait (= 8.3144 J/mole K).

Dans les conditions réversibles, il existe une relation d'équivalence entre l'énergie électrique **W** absorbée par la cellule d'électrolyse et la variation d'énergie libre **ΔG**.

L'énergie électrique **W** est liée à la tension minimale réversible d'électrolyse **U<sub>R</sub>** par la relation :

$$W = Z \cdot F \cdot U_R$$
 (20)

Z : nombre d'électrons mis en jeu (= 2)

F : constante de Faraday (= 96487 C/ mole = 26.8 Ah/mole).

L'équivalence avec l'enthalpie libre ΔG permet d'écrire :

$$- \Delta G = Z \cdot F \cdot U_R$$
 (21)

Ce qui donne l'expression de la tension minimale réversible exprimée comme suit :

$$U_R = - \Delta G / Z$$
 (22)

La cinétique d'électrolyse à haute température peut être modélisée par l'emploi de relations empiriques courant tension. Faisant partie d'une nouvelle technologie, la documentation sur la modélisation des électrolyseurs à vapeur à très haute température est difficilement accessible, nous avons cependant trouvé dans la littérature [4, 12, 13] différentes courbes caractéristiques **U = f(I)** en fonction de la température du service, par exemple la courbe présentée ci-dessous est proposée par P. Aujollet [12] :

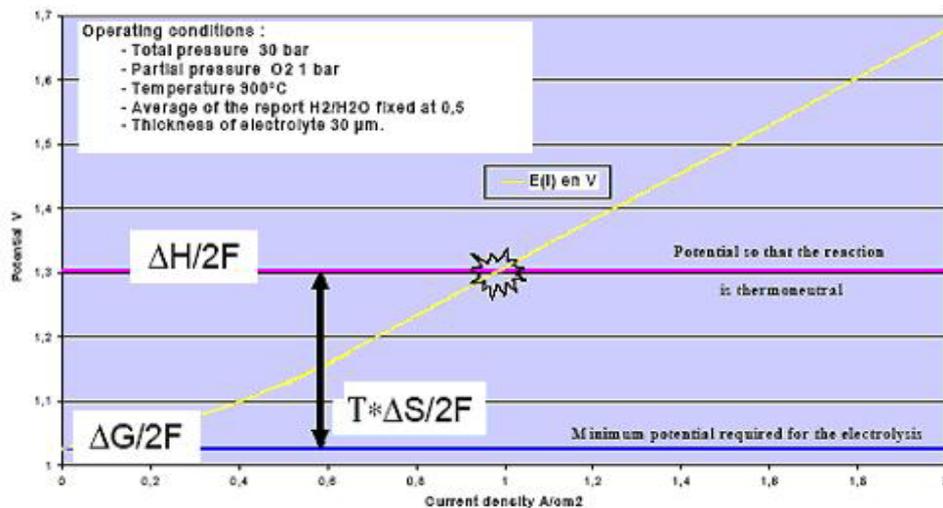


Fig. 5: Variation de la tension en fonction de la densité du courant pour un électrolyseur à vapeur d'eau (900 °C)

D'où nous pouvons tirer l'expression suivante :

$$U_E = f(I) \quad (23)$$

$$U_E = a I / A_E + b \quad (24)$$

A partir du graphe 4, les valeurs des constantes trouvées sont :  $a = 0.32$  et  $b = 1.025$

Ce qui nous permet d'écrire

$$U_E = 0.32 I / A_E + 1.025 \quad (25)$$

Avec :  $U_E$  : Tension appliquée aux bornes des électrodes (V)

$I$  : Intensité du courant traversant les électrodes (A)

$A_E$  : Surface des électrodes ( $\text{cm}^2$ ).

La tension réversible (minimale) à appliquer aux bornes des électrodes est égale à 1.025 V. Cette valeur peut être vérifiée en utilisant l'équation (20).

Comme le montre la figure 4, une tension de valeur plus importante doit être appliquée pour pouvoir générer l'hydrogène. Aussi, la tension d'une valeur de  $U = 1.3$  V correspond à la tension thermo neutre qui est équivalente à  $\Delta H / Z \cdot F$ .

Cette tension est appliquée dans le but de réaliser un procédé d'électrolyse dans des conditions adiabatiques sans changement de température de l'électrolyte,  $U_{\text{thermoneutre}}$  étant la tension imposée à la cellule [14].

La masse  $m$  (kg) du gaz d'hydrogène produit à la cathode (dans le cas idéal) est, quant à lui, proportionnelle à la quantité de courant ayant traversé la cellule, à la masse atomique  $M$  de l'hydrogène et inversement proportionnelle à la valence  $n$  de celui-ci [8] :

$$m_{\text{H}_2} = 1 / F \cdot M / n \cdot I \cdot t \quad (26)$$

Où  $t$  est le temps en (s). La production réelle étant inférieure, le rapport entre la production réelle et idéale est appelé rendement de courant ou rendement faradique  $\eta_f$ , qui dépend exclusivement de l'importance des réactions secondaires ou parasites et non des surtensions. L'expression de la masse d'hydrogène produite  $m$  devient alors :

$$\dot{m}_{\text{H}_2} = 1 / F \cdot M / n \cdot I \cdot t \cdot \eta_f \quad (27)$$

En terme de débit, cette dernière expression s'écrit :

$$\dot{m}_{\text{H}_2} = 1 / F \cdot M / n \cdot I \cdot \eta_f \quad (28)$$

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

$$I = 96487000 \cdot \dot{m}_{\text{H}_2} / \eta_f \quad (29)$$

A partir de l'abaque des caractéristiques de l'électrolyseur [12], nous pouvons déterminer la valeur de la densité de courant  $J$  ( $\text{A}/\text{cm}^2$ ) correspondant à la tension thermo neutre.

Ainsi, la surface des électrodes  $A_E$  sera calculée comme suit :

$$A_E = I / J \quad (30)$$

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

$$W = U \cdot I \quad (31)$$

La puissance nécessaire pour l'électrolyse de l'eau est donnée par la relation [8] :

$$W = U_{\text{thermodynamique}} \cdot I \quad (32)$$

En remplaçant la valeur de  $I$  issue de la relation (29) dans l'équation précédente, l'expression de la puissance  $W$  devient alors :

$$W = 96487000 \cdot U_{\text{thermoneutre}} \cdot \dot{m}_{\text{H}_2} / \eta_f \quad (33)$$

Si les cellules d'électrolyses sont alimentées par un débit de vapeur  $\dot{m}_e$  en (kg/h), la quantité d'hydrogène produite conformément à l'équation 12, est donnée par la relation suivante :

$$\dot{m}_{\text{H}_2} = \dot{m}_e / 9 \quad (34)$$

La puissance nécessaire (W) pour l'électrolyse d'un débit de vapeur d'eau  $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$  est donc :

$$W = 10720778 \cdot U_{\text{thermoneutre}} \cdot \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} / \eta_f \quad (35)$$

### 2.3 Simulation de la production d'électricité par les cellules photovoltaïques [9]

Le schéma électrique équivalent à une cellule photovoltaïque est représenté par la figure 5. Ce circuit est constitué d'une source de courant et d'une diode montée en parallèle. La source de courant délivre un courant  $I_{ph}$ , directement proportionnel à l'intensité de la lumière. La diode représente la jonction P-N de la cellule solaire.

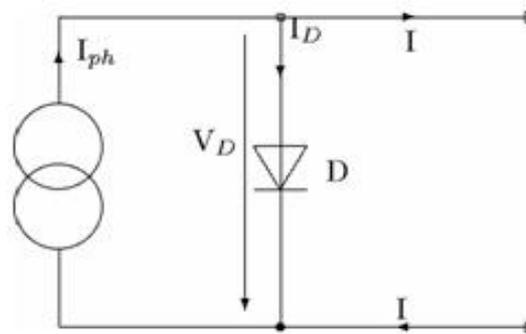


Fig. 6: Schéma électrique équivalent d'un panneau photovoltaïque

Le courant  $I$ , délivré par la cellule photovoltaïque s'écrit comme suit :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{eV/mkT} - 1 \right) \quad (36)$$

La puissance étant le produit de la tension par le courant, son expression dans le cas de notre système est donc :

$$P = V \cdot \left[ I_{ph} - I_0 \left( e^{V/V_t} - 1 \right) \right] \quad (37)$$

Où  $V_t = kT/e$  est appelée tension thermodynamique.

Pour trouver la tension optimale, qui donne la puissance maximale, il faut résoudre l'équation suivante :

$$\frac{\partial P}{\partial V} = 0 \quad (38)$$

Après développement mathématique, la puissance maximale délivrée par une cellule P.V., soumise à une température ambiante  $T_a$  et à une irradiation  $I_c$ , s'écrit comme suit :

$$P_{\max} = \left\{ I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V_m}{V_{tm}}} - 1 \right) \right\} \cdot \left\{ V_t \cdot m \cdot \left( \text{LambertW} \left( \frac{(I_{ph} + I_0)e}{I_0} \right) - 1 \right) \right\} \quad (39)$$

Tel que : Lambert  $W(x)$  est la fonction  $W$  de Lambert, définie par :  $W(x) \cdot e^{W(x)} = x$ .

Le rendement instantané des panneaux photovoltaïques est déterminé par la relation :

$$\eta_i = \frac{P_{\max}}{I_c} \quad (40)$$

Où :  $P_{\max}$  : La puissance maximale instantanée.

$I_c$  : Irradiation totale instantanée sur les panneaux.

Le dimensionnement de l'unité de production d'électricité réside en la détermination du nombre des cellules photovoltaïques, ainsi que leurs connexions. Il dépend des caractéristiques de l'appareil consommateur d'électricité qui est dans notre cas l'électrolyseur de la vapeur d'eau à très haute température.

Les caractéristiques de l'électrolyseur sont données principalement par ce qui suit :

- La puissance nécessaire pour l'électrolyse de l'eau  $W$ , en watt ;
- La tension à appliquer aux bornes de la cellule  $U_{\text{thermoneutre}}$ , en volt ;
- Le courant délivré  $I$ , en ampère.

Le nombre des cellules photovoltaïques nécessaire  $N_{\text{cellules}}$  est donné par la relation suivante [9] :

$$N_{\text{cellules}} = \frac{W}{P_{\max} \cdot 0.96} \quad (41)$$

Pour rappel, est appelée une guirlande, un groupe des cellules montées en série et leur nombre dans une guirlande  $N_{\text{cellules}} / \text{série}$  est donné par la relation suivante

$$N_{\text{cellules}/\text{série}} = \frac{U_{\text{Thermoneutre}}}{V_m} \quad (42)$$

$V_m$  : La tension à puissance maximale.

Le nombre des guirlandes montées en parallèle est, quant à lui, donné par la relation suivante :

$$N_{\text{guirlandes} / \text{parallèle}} = \frac{N_{\text{cellules}}}{N_{\text{cellules} / \text{série}}} \quad (43)$$

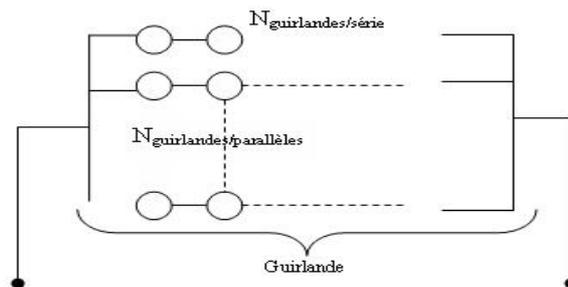


Fig. 7: Connexion des cellules PV en série et en parallèle

### 3. METHODOLOGIE DE RESOLUTION

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 :  $T_6 = 900 \text{ °C}$  ;  $P_6 = 30 \text{ bar}$  ;  $m_6 = 1 \text{ kg/s}$
- L'eau d'alimentation du réservoir est à :  $T_0 = 30 \text{ °C}$  ;  $P_0 = 1 \text{ atm}$  ;  $m_0 = 1 \text{ kg/s}$  (liquide)
- La vapeur à la sortie de la chaudière est à :  $T_2 = 300 \text{ °C}$  ;  $P_2 = 30 \text{ bar}$  ;  $m_2 =$  à déterminer (vapeur surchauffée).

- La vapeur à la sortie de la turbine, quant à elle, a les caractéristiques suivantes :

$$T_3 = 100 \text{ °C} ; P_3 = 1 \text{ atm} ; m_3 = 2 \text{ kg/s (vapeur saturée)}$$

- La vapeur à la sortie du séparateur (entrée réchauffeur) a les caractéristiques suivantes :

$$T_4 = 100 \text{ °C} ; P_4 = 1 \text{ atm} ; m_4 = 1 \text{ kg/s (vapeur saturée)}$$

- Propriétés de la vapeur à la sortie du réchauffeur (entrée compresseur) :

$$T_5 = 300 \text{ °C} ; P_5 = 1 \text{ atm} ; m_5 = 1 \text{ kg/s (vapeur surchauffée)}$$

Les caractéristiques de la vapeur d'eau, à la sortie du compresseur et à l'entrée des cellules d'électrolyses, sont données ci-dessus (conditions de fonctionnement de l'électrolyseur).

Les résultats des calculs permettant de déterminer les caractéristiques des fluides, aux différents points du système, sont résumés dans le tableau 1 présenté ci-dessous :

Etat	Phase	T (°C)	P (bar)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg°C)	ṁ (kg/s)
0	Liquide	30	1.013250	125.4	-	1
1	Liquide	-	-	1210.61	-	2.166
2	Vapeur surchauffée	300	30	2993.5	6.5390	2.166
2'	Liquide+Vapeur	100	1.013250	2388.18	6.5390	2.166
3	Vapeur saturée	100	1.013250	2676.1	7.2958	1.8896
3'	Liquide Saturé	100	1.013250	419.04	1.3630	0.276
4	Vapeur saturée	100	1.013250	2676.1	7.2958	1
4'	Vapeur saturée	100	1.013250	2676.1	7.2958	1
5	Vapeur surchauffée	300	1.013250	3074.3	-	1
6	Vapeur surchauffée	900	30	4385.9	-	1

Les valeurs, obtenues par calcul, des puissances de la chaudière solaire  $Q_{12}$ , du réchauffeur solaire  $Q_{45}$  et celle nécessaire à la compression  $W_{56}$  sont :

$$Q_{12} = 3.8617 \text{ MW} \quad Q_{45} = 0.3982 \text{ MW} \quad W_{56} = 1.3116 \text{ MW}$$

### ▪ **Pour la chaudière**

La valeur de la température de la vapeur d'eau est de l'ordre de 300 °C. La température du fluide caloporteur doit avoir une valeur supérieure à dernière. Elle est limitée par le type du concentrateur solaire d'une part et de la nature du fluide caloporteur de l'autre part. Les concentrateurs cylindro paraboliques peuvent fonctionner jusqu'à une température de 450 °C en utilisant l'huile thermique comme fluide caloporteur [16]. Nous fixons une valeur de température de 400 °C.

En se referant à la figure 3, nous pouvons constater que, pour une concentration de 50, l'installation travaille avec un rendement de 60 %. Aussi, une concentration de 100 donne un rendement de 85 % et, avec une concentration de 300, le rendement atteint 90 %. Un compromis réside entre le rendement (qui a un lien direct avec la production donc du taux d'exploitation de l'installation) et la concentration (qui dépend directement du taux d'investissement, i.e. coût de l'installation): Dans notre étude, nous choisissons une concentration de 100 avec un rendement de 85 %, ce qui nous semble être satisfaisant.

La surface totale des concentrateurs  $A_{C12}$ , nécessaire pour produire une puissance de  $Q_{12}$  est égale à  $A_{C12} = Q_{12} / \eta_0 I_c$

En se basant sur l'équation ci-dessus, en optant pour  $\eta_0 = 85\%$  et pour une valeur de rayonnement solaire **direct** par ciel clair de **500 W/m<sup>2</sup>** (valeur moyenne enregistrée, valable pour plusieurs sites sur le territoire national [17]), nous obtenons :

$$A_{C12} = 9086.35 \text{ m}^2$$

- Pour les concentrateurs ayant une surface unitaire  $A_U = 50 \text{ m}^2$  (surface adoptée par plusieurs références [16, 18]), leur nombre approprié (N), devant alimenter la chaudière, est de  $N = 182$ .

- La surface (a) de chaque absorbeur est égale :  $a = 0.5 \text{ m}^2$ .

### ▪ **Pour le réchauffeur**

La température de la vapeur d'eau produite est de l'ordre de 300 °C. La valeur de la température du fluide caloporteur (l'huile thermique) est égale à 400 °C.

En effectuant les mêmes calculs que pour la chaudière, nous obtenons les résultats suivants:

- La surface totale des concentrateurs nécessaire pour produire une puissance de  $Q_{45} = 0.43854168 \text{ MW}$  est :  $A_{C45} = 1031.86 \text{ m}^2$ .

- Pour une surface unitaire  $A_U$  de  $50 \text{ m}^2$ , le nombre de concentrateur approprié (N) est égal à  $N = 21$ .

- La surface de chaque absorbeur (a) est :  $a = 0.5 \text{ m}^2$ .

## 3.2 Détermination de la centrale solaire de production d'électricité

Sa détermination consiste au dimensionnement du circuit des cellules photovoltaïques qui dépend essentiellement des caractéristiques des cellules d'électrolyse (courant, tension).

### ▪ **Détermination des caractéristiques des cellules 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 de vapeur d'eau d'alimentation produit par la centrale solaire et a pour expression :

$$I = 10720778 \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} / \eta_f$$

Pour un débit d'eau de 1 kg/s et un rendement faradique de 0.93, l'intensité du courant qui doit traverser les cellules d'électrolyses pour produire 1/9 kg d'hydrogène est égale à :

$$I = 11.52 \text{ MA}$$

La tension à appliquer aux bornes des cellules d'électrolyses est :  $U = 1.3 \text{ V}$ .

La puissance nécessaire à l'électrolyse de la vapeur d'eau a pour valeur :  $W = 14.98 \text{ MW}$ .

A partir des valeurs de  $I$  et  $U$  et en utilisant l'abaque de l'électrolyse, la surface des électrodes doit être logiquement égale à :  $A_E = 11.52 \cdot 10^6 \text{ cm}^2$ .

#### ▪ **Dimensionnement des cellules photovoltaïques**

Le nombre des cellules photovoltaïques nécessaires (en se référant aux données du modèle disponible en CDER) est égale à:  $N_{\text{cellules}} = 7.33 \cdot 10^6$  cellules.

Le nombre des cellules dans une guirlande (en série) est:  $N_{\text{cellule/série}} = 3$ .

Le nombre de guirlandes montées en parallèle est :  $N_{\text{guirlandes/parallèle}} = 2.54 \cdot 10^6$ .

La surface nécessaire des panneaux photovoltaïques est approximativement de  $126.239 \text{ m}^2$ .

## 4. RESULTATS ET INTERPRETATION

Le programme informatique que nous avons mis au point a permis d'optimiser la production de l'hydrogène par voie solaire pour différents sites en Algérie et étudier l'effet de certains paramètres physiques, météorologiques et géographiques sur les productions énergétiques (thermique et électrique) de l'installation. Une simulation numérique est établie pour, d'une part, la centrale solaire de production de vapeur d'eau alimentée par les concentrateurs cylindro paraboliques et, d'autre part, la centrale solaire de production d'électricité fournie par les panneaux photovoltaïques.

Les tableaux 2 à 6 présentent la variation des paramètres essentiels de l'installation en fonction du mois pour différents sites en Algérie. Le tableau 7 donne les valeurs annuelles de ces paramètres dont le taux d'hydrogène produit pour les différents sites choisis.

### 4.1 Irradiance solaire mensuelle sur plan horizontal

Les valeurs présentées par le tableau 2 nous donne une idée sur le gisement solaire mensuel dans quelques sites principaux en Algérie (est, ouest, nord et sud). Les valeurs maximales du rayonnement solaire sont observées pendant les mois Juin, Juillet et Août pour tous les sites. Les valeurs moyenne d'irradiance les plus importantes sont constatées au sud algérien, dans les wilaya de Tamanrasset et Illizi.

### 4.2 Puissance électrique mensuelle fournie par les cellules photovoltaïques

Le tableau 3 présente les valeurs de la puissance maximale mensuelle donnée par les cellules photovoltaïques et cela pour différents sites. Il est possible de remarquer que cette puissance est proportionnelle au rayonnement solaire et ce, conformément à l'équation (39) qui exprime la puissance maximale en fonction de la valeur du photo courant qui est proportionnel, quant à lui, au rayonnement solaire. Les valeurs maximales sont obtenues pendant le mois de Juin (les plus importantes sont données par les panneaux photovoltaïques installés à Tamanrasset).

**Tableau 2:** Irradiance solaire mensuelle sur l'horizontal (kWh/m<sup>2</sup>/mois)

<b>Q<sub>s</sub>/mois</b>	<b>Annaba</b>	<b>Biskra</b>	<b>Alger</b>	<b>Djelfa</b>	<b>Oran</b>	<b>Illizi</b>	<b>Taman.</b>	<b>Djanet</b>
Latitude	36.833	34.8	36.717	34.683	35.633	26.5	22.783	24.55
Longitude	7.817	5.733	3.25	3.25	0.66*	8.417	5.517	9.467
Altitude	3.0	86	25	1144	90*	558	1377	1054
1	85,96	64,05	41,88	85,28	93,00	152,43	164,21	165,01
2	108,84	119,92	58,02	92,88	109,17	168,36	182,62	180,52
3	104,90	131,47	141,92	73,53	127,19	218,24	235,35	225,25
4	141,21	180,60	116,46	226,77	158,61	222,45	236,64	239,82
5	151,62	113,12	232,28	113,15	116,75	199,89	236,56	258,94
6	239,91	240,99	237,90	140,55	248,19	262,44	254,43	212,37
7	225,21	245,40	236,28	237,68	244,87	265,82	212,16	240,09
8	215,88	210,64	174,99	133,67	185,60	234,76	221,77	210,95
9	161,25	153,00	173,31	121,89	183,72	199,32	195,00	216,09
10	139,25	73,62	89,50	128,09	75,02	192,17	190,71	191,92
11	92,70	101,10	76,74	72,39	106,80	155,34	139,05	151,11
12	71,80	81,19	80,91	38,28	28,95	136,83	142,72	124,74

**Tableau 3:** Puissance électrique mensuelle fournie par les cellules P.V. (kW/mois)

<b>Mois</b>	<b>Annaba</b>	<b>Biskra</b>	<b>Alger</b>	<b>Djanet</b>	<b>Djelfa</b>	<b>Illizi</b>	<b>Oran</b>	<b>Taman.</b>
1	310.78	209.10	117.06	670.74	329.84	631.25	337.72	658.08
2	442.14	478.90	180.15	752.34	340.02	708.22	411.78	757.78
3	347.06	477.36	564.08	986.97	245.15	967.65	443.70	1043.13
4	594.81	791.70	460.22	1206.95	1254.22	1088.89	653.67	1205.35
5	605.63	357.01	1360.40	1448.11	410.95	896.34	461.26	1309.06
6	1567.63	1464.37	1518.47	1091.97	506.98	1614.66	1680.01	1681.17
7	1306.00	1349.84	1326.87	1341.62	1310.17	1552.59	1470.78	1038.46
8	1057.66	935.22	681.82	926.13	434.90	1075.80	807.19	1030.80
9	665.11	530.83	716.51	891.71	413.99	777.86	777.87	783.22
10	513.57	183.84	252.23	717.64	445.80	709.17	203.24	720.70
11	337.94	361.50	242.55	544.91	239.08	567.01	377.03	476.38
12	246.49	275.38	66.38	430.73	110.22	525.29	77.93	533.94

### 4.3 Rendement mensuel des panneaux photovoltaïques

Le tableau 4 donne les valeurs du rendement mensuel des panneaux photovoltaïques. Les valeurs minimales sont détectées pendant la saison estivale. Les propriétés électriques des semi conducteurs sont très sensibles à la température et l'augmentation de cette dernière influe considérablement sur la performance du panneau photovoltaïque.

**Tableau 4:** Rendement mensuel des panneaux photovoltaïques (%)

Mois	Annaba	Biskra	Alger	Djanet	Djelfa	Illizi	Oran	Taman.
1	10.67	10.80	10.35	11.16	10.67	10.22	10.79	11.12
2	11	10.93	10.45	10.87	11.40	10.86	10.88	10.91
3	10.66	10.44	10.92	10.46	10.99	10.49	10.71	10.58
4	10.88	10.54	10.87	10.11	11.27	10.12	10.91	10.31
5	10.53	9.49	10.80	9.31	10.50	9.38	10.54	9.91
6	10.53	9.59	10.50	9.31	10.00	9.05	10.48	9.57
7	10.23	9.18	10.12	9.38	9.91	9.08	10.15	9.67
8	10.05	9.11	9.83	9.36	9.45	9.14	9.90	9.65
9	10.15	9.38	10.05	9.43	9.99	9.36	10.17	9.97
10	9.95	8.95	9.49	9.33	10.32	9.52	9.48	9.86
11	10.50	10.30	10.30	10.16	10.97	10.14	10.45	10.34
12	10.61	10.63	10.75	10.54	10.87	10.78	10.19	10.76

#### 4.4 Puissance thermique mensuelle produite par les concentrateurs cylindro paraboliques

Le tableau ci-dessous donne les puissances thermiques fournies par les concentrateurs cylindro paraboliques pour la production de la vapeur d'eau au niveau de la chaudière et du réchauffeur solaire. Cette puissance est directement proportionnelle au rayonnement solaire. Les valeurs maximales sont enregistrées pendant le mois de Juin. De ce point de vue, Les sites les plus intéressants pour l'installation des centrales solaires à concentrateurs cylindro paraboliques doivent être implantés au sud algérien, à l'exemple de la wilaya de Tamanrasset.

**Tableau 5:** Puissance thermique mensuelle produite par les concentrateurs cylindro paraboliques (kW/mois)

Mois	Annaba	Biskra	Alger	Djanet	Djelfa	Illizi	Oran	Taman.
1	70.66	33.96	11.98	168.67	64.50	161.51	74.83	163.75
2	105.06	114.51	26.85	195.41	58.15	187.19	89.66	193.51
3	49.78	95.10	118.06	271.40	34.56	268.29	79.02	283.96
4	112.01	178.88	78.48	357.04	331.01	309.37	123.91	347.08
5	99.03	58.70	353.96	475.62	47.67	228.39	70.51	383.99
6	432.39	448.85	418.26	310.48	71.03	554.01	482.45	543.49
7	348.95	276.18	368.01	412.65	371.16	527.53	422.63	272.20
8	290.21	276.18	144.40	258.54	69.19	333.54	191.84	289.43
9	166.09	125.87	189.96	274.34	75.69	224.75	211.91	203.85
10	136.71	25.27	41.52	214.00	96.53	212.10	28.40	204.20
11	83.00	90.27	45.51	146.51	39.59	156.37	89.99	110.16
12	52.44	57.32	66.38	97.06	11.12	135.78	7.63	132.56

#### 4.5 Débit mensuel d'hydrogène produit

Les productions mensuelles d'hydrogène pour différents sites d'Algérie sont données par le tableau 6. Leurs valeurs sont proportionnelles l'intensité du rayonnement solaire et elles sont pratiquement toutes maximales pendant le mois de Juin. Les quantités les plus importantes sont produites à Tamanrasset et à Illizi.

**Tableau 6:** Débit mensuel d'hydrogène produit (kg/mois)

Mois	Annaba	Biskra	Alger	Djanet	Djelfa	Illizi	Oran	Taman.
1	8295.11	5581.28	3124.58	17903.02	8803.82	16849.08	9014.18	17565.16
2	11801.37	12782.70	4808.40	20081.06	9075.64	18903.38	10990.97	20226.33
3	9263.63	12741.56	15056.28	26343.65	6543.36	25827.96	11842.98	27842.63
4	15876.49	21131.62	12284.06	32215.32	33477.16	29064.25	17447.56	32172.67
5	16165.16	9529.16	36311.05	33652.28	10968.99	23924.77	12311.68	34940.70
6	41842.49	39086.29	40530.30	29146.23	13532.15	43097.72	44841.95	44872.94
7	34859.25	36029.26	35416.23	35809.99	34970.42	41440.97	39257.30	27718.03
8	28230.46	24962.47	18198.94	24719.89	11608.18	28714.86	21545.10	27513.62
9	17752.83	14168.67	19124.66	23801.02	11050.01	20762.31	20762.57	20905.23
10	13708.06	4906.94	6732.45	19154.77	11899.13	18928.70	5424.74	19236.61
11	9020.08	9648.92	6473.98	14544.54	6381.50	15134.48	10063.63	12715.21
12	6579.10	7350.20	7762.76	11496.93	2941.90	14020.81	2080.17	14251.68

#### 4.6 Résultats comparatifs des paramètres annuels pour différents sites

Les variations annuelles des paramètres cités ci-dessus, pour les différents sites d'Algérie, sont présentées dans les figures 8 à 12.

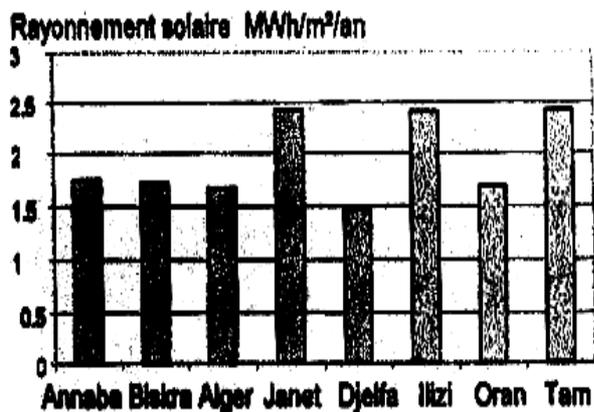


Fig. 8: Rayonnement solaire annuel incident

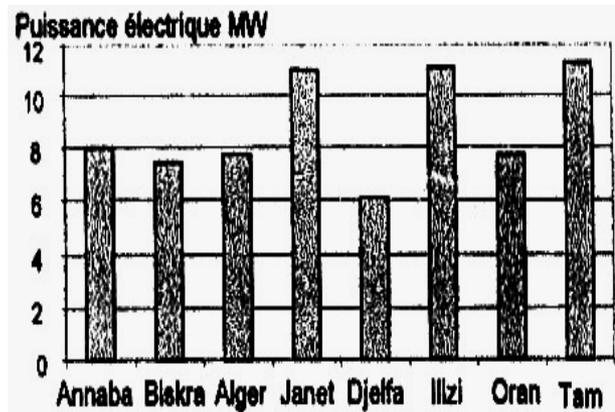


Fig. 9: Puissance électrique annuelle délivrée par les panneaux photovoltaïques

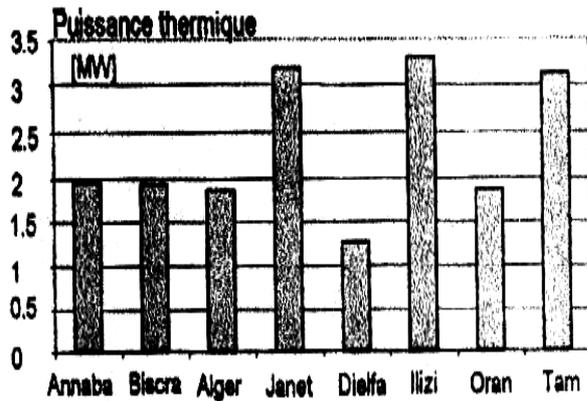


Fig. 10: Puissance annuelle délivrée par les concentrateurs cylindro-paraboliques

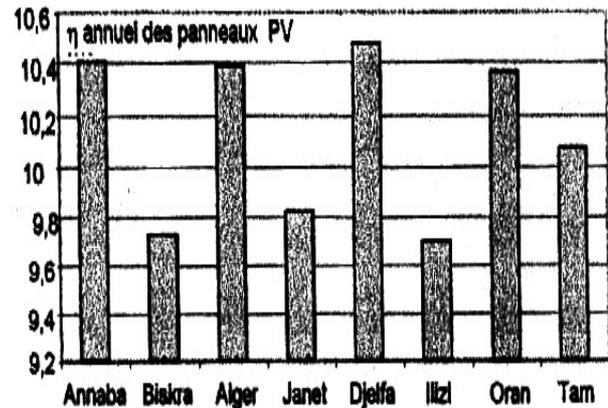


Fig. 11: Rendement annuel des panneaux photovoltaïques pour différents sites

### Estimation des taux annuels de production d'hydrogène solaire par électrolyse

Dans le tableau 7 et la figure 12 présentés ci dessous, sont regroupées les taux de production annuels de l'hydrogène solaire obtenus par voie électrolytique  $\dot{m}_{H_2}$  (kg/an) pour différents sites d'Algérie et déterminés en fonction des valeurs annuelles de l'énergie solaire reçue sur le plan horizontal  $Q_s$  (kWh/m<sup>2</sup>/an), de la puissance électrique produite par les cellules photovoltaïques  $Q_{pv}$  (kW/an), du rendement annuelle des panneaux photovoltaïques  $\eta_{PV,a}$  (%) et de la puissance thermique délivrée par les concentrateurs cylindro parabolique  $Q_{cpc}$  (kW/an).

Les puissances électrique et thermique générées par notre installation sont directement proportionnelles au rayonnement solaire dont l'intensité est maximal au sud algérien. Leurs valeurs les plus importantes sont évidemment détectées à Tamanrasset, Djanet et Illizi. 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 (de 25 à 45 %) comparées à celles produite 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 200 000 kg. A propos du rendement des panneaux photovoltaïques, les valeurs les plus faibles sont celles des panneaux installés au sud et cela à cause de l'effet négatif des températures élevées détectés au sud sur l'efficacité des semi conducteurs, composant principal des cellules solaires.

**Tableau 7:** Paramètres annuels pour différents sites d'Algérie

	<b>Annaba</b>	<b>Biskra</b>	<b>Alger</b>	<b>Djelfa</b>
$Q_s$	1738,54	1715,10	1660,19	1464,16
$Q_{PV}$	7994,82	7415,05	7711,20	6041,33
$Q_{CPC}$	1946,34	1935,15	1863,38	1270,21
$\eta_{PV,a}$	10,41	9,73	10,39	10,48
$\dot{m}_{H_2}$	213394,03	197919,08	205823,69	161252,25
	<b>Oran</b>	<b>Illizi</b>	<b>Tamanrasset</b>	<b>Djanet</b>
$Q_s$	1677,24	2408,06	2411,23	2416,82
$Q_{PV}$	7702,18	1111,74	11238,06	11009,81
$Q_{CPC}$	1872,79	3298,83	3128,18	3181,72
$\eta_{PV,a}$	10,37	9,70	10,08	9,82
$\dot{m}_{H_2}$	205582,83	296669,28	299960,84	293868,72

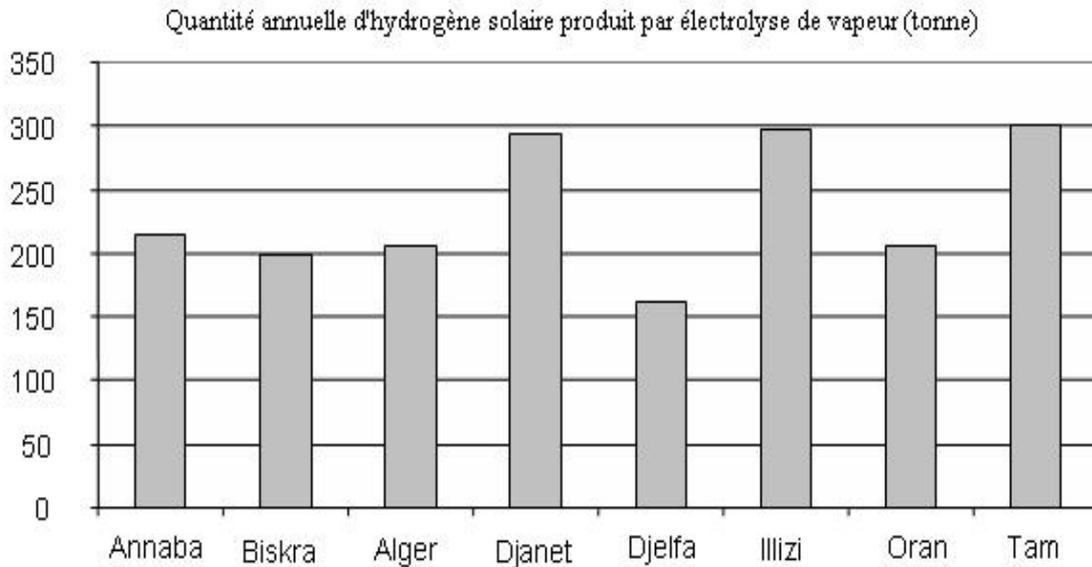


Fig. 12: Estimation de la production annuelle d'hydrogène solaire par électrolyse de vapeur d'eau pour différents sites d'Algérie

## 5. CONCLUSION

L'installation présentée et décrite ci-dessus assure, d'après les prédictions de notre simulation numérique, une production massive d'hydrogène gazeux (au maximum 400 kg/h) par électrolyse de l'eau à très haute température (900 °C, 30 bars). L'alimentation énergétique des cellules d'électrolyses est assurée par conversion de l'énergie solaire hybride : thermique et photovoltaïque.

- La conversion thermique est utilisée pour alimenter les cellules d'électrolyses par un débit de 1 kg/s de vapeur d'eau à très hautes températures et pression. Pour cela, une centrale thermique est conçue par des concentrateurs solaires cylindro-paraboliques pour produire la vapeur d'eau à 1 bar et à 300 °C (température maximale atteinte par ce type de convertisseurs). Cette vapeur d'eau est ensuite comprimée grâce à un compresseur pour atteindre les conditions désirées (900 °C, 30 bars). La puissance nécessaire pour la compression, qui est égale à 1.31 MW est fournie par un alternateur entraîné par une turbine alimentée par la vapeur d'eau provenant des concentrateurs solaires. La puissance que délivre cette centrale solaire thermique, est de l'ordre de 5 MW. Les concentrateurs cylindro paraboliques nécessaires sont au nombre de 203 concentrateurs et ils occupent approximativement une superficie de 1,011 hectares.

- La conversion photovoltaïque est utilisée pour alimenter les cellules d'électrolyses par la puissance électrique nécessaire qui est de l'ordre de 15 MW grâce à une centrale électrique à base de convertisseurs solaires photovoltaïques. Le champ des cellules solaires nécessite une superficie égale à 12,62 hectares.

Grâce à un code de calcul établi, une simulation numérique est faite pour optimiser les productions énergétiques (thermique et photovoltaïque) ainsi que la production d'hydrogène. La simulation a été simultanément appliquée à notre installation en des endroits où les ressources solaires sont variables (Annaba, Biskra, Alger, Janet, Djelfa, Illizi, Oran et Tamanrasset). Les valeurs maximales de production annuelle d'hydrogène ont été détectées au sud Algérien (299960,84 kg à Tamanrasset, à titre d'exemple). Les quantités annuelles

d'hydrogène produites dans les wilayas du nord, de l'est et de l'ouest ont des valeurs qui se rapprochent sensiblement.

Il est évident que le fonctionnement optimal de notre installation est étroitement lié aux conditions climatiques. L'installation doit être placée dans une localité à forte insolation de sorte à extraire le maximum de puissance, tout en tenant compte que l'augmentation de la température ambiante diminue le rendement de la centrale solaire électrique constituée par des panneaux photovoltaïques qui sont sensibles aux températures élevées.

### NOMENCLATURE

A	Surface, m <sup>2</sup>	T	Température absolue, K
C	Concentration géométrique	U	Tension, V
C <sub>P,x</sub>	Chaleur massique, kJ/kg°C	U <sub>c</sub>	Conductance thermique, W/m <sup>2</sup> °C
E	Charge d'un électron, C	U <sub>R</sub>	Tension minimum réversible d'électrolyse, V
F	Constante de Faraday, C/mole	V	Tension délivrée des cellules PV, V
ΔG	Variation d'énergie libre, kJ	V <sub>m</sub>	Tension maximale, V
h	Enthalpie de la réaction, kJ/kmole	V <sub>t</sub>	Tension thermodynamique, V
h <sub>x</sub>	Enthalpie d'une substance x, kJ/kg	W	Energie globale d'électrolyse, W
I	Intensité du courant électrique, A	W <sub>56</sub>	Travail de compression, W
I <sub>b</sub>	Irr. rayonnement direct, W/m <sup>2</sup>	x	Titre, %
I <sub>c</sub>	Irr. rayonnement global, W/m <sup>2</sup>	Z	Nombre d'électrons mis en jeu
I <sub>0</sub>	Intensité du courant d'obscurité, A		<b>Symboles grecs</b>
I <sub>ph</sub>	Photo courant, A	α <sub>c</sub>	Facteur d'absorption _ absorbeur
J	Densité de courant, A/m <sup>2</sup>	η <sub>0</sub>	Rendement optique du capteur %
K	Constante de Boltzmann, J/K	η <sub>i</sub>	Rendement instantané des cellules PV, %
M	Facteur d'idéalité de la diode	η <sub>f</sub>	Rendement faradique, %
N <sub>cel</sub>	Nombre des cellules PV	ρ <sub>c</sub>	Réfectivité du capteur
P	Puissance délivrée par la cellule W	τ <sub>c</sub>	Facteur de transmission
P <sub>i</sub>	Pression de la substance, état i, Pa	χ <sub>c</sub>	Fraction de l'aire réfléchissante inutilisable
Q <sub>u</sub>	Energie utile d'un convertisseur, W		<b>Indices</b>
Q <sub>12</sub>	Puissance de la chaudière sol., W	a	Ambiant
Q <sub>45</sub>	Puissance du réchauffeur sol., W	c	Captage
R	Constante des G.P., kJ/kmole.K	E	Electrode
S	Entropie, kJ/°C	o	Obscurité
t	Temps, s	ph	Photo courant

### REFERENCES

- [1] F. Barber and T.N. Veziroglu, 'Environmental Benefits of the Solar Hydrogen Energy System', Clean Energy, Research Institute University of Miami, Coral Gables, FL 33124, USA.
- [2] T.N. Veziroglu and S. Karac, 'Solar Production of Hydrogen', Solar Energy Engineering, Edited by A.A.M. Sayigh, Academic press, pp. 388, 1985.
- [3] T. Tani, N. Sekiguchi, M. Sakkai and D. Ohta, 'Optimisation of Solar Hydrogen Systems Based on Hydrogen Production Cost', Solar Energy, Vol. 68, N°2, pp. 143 – 149, 2000.

- [4] G. Glatzmaier, D. Blake and S. Showalter, ‘*Assessment of Methods for Hydrogen Production Using Concentrated Solar Energy*’, National Renewable Energy Laboratory (NREL), January 1998.
- [5] T.N. Veziroglu, J. Padin and A. Shahin, ‘*Hydrogen Solar High-Temperature Hydrogen Production System*’, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 25, pp. 295 - 317, 2000.
- [6] G. Lefebvre et C. Raimbault, ‘*Hydrogène*’, Techniques de l’Ingénieur, Vol. J6, N°J6367, 12-1998.
- [7] E. Schouler, E. Fernandez et H. Bernard, ‘*Electrolyseur de la Vapeur d’Eau à Haute Température, Principe et Etat de Développement*’, Revue Générale de l’Electricité, N°3, Mars 1982.
- [8] A. Damien, ‘*Hydrogène par Electrolyse de l’Eau*’, Techniques de l’Ingénieur, Vol. J6, N°6366, 12-1992.
- [9] D. Yogi Goswami, F. Kreith and J.F. Kreider, ‘*Principles of Solar Engineering*’, Edition 2<sup>nd</sup>: Taylor & Francis, 1985.
- [10] J. Desautel, ‘*Les Capteurs Héliothermiques*’, Ed. Edisud & Pyc-Editions, 1979.
- [11] P. Gallet, F. Papini et G. Péri, ‘*Physique des Convertisseurs Héliothermiques*’, Ed. Edisud, 1980.
- [12] P. Aujollet, ‘*Couplage d’un Réacteur Nucléaire avec un Electrolyseur à Vapeur à Très Haute Température*’, DER/SERI, Nov. 2003.
- [13] Ai-Quoc pham, ‘*High Efficiency Steam Electrolyser*’, Lawrence Livermore National Laboratory, 2003.
- [14] H. Wendt and G. Kreysa, ‘*Génie Electrochimique, Principes et Propriétés*’, Editions Dunod, 2001.
- [15] F. Ayati, ‘*Technologie de Production d’Hydrogène Appliqué à la Pile à Combustible*’, Mémoire de Magistère, Chimie industrielle, USTHB, 2004.
- [16] AFEDES, Association Française pour l’Etude et le Développement des Applications de l’Energie Solaire, ‘*Méthodes de Concentration de l’Energie Solaire*’, Les Editions Européennes ‘Thermique et Industrie’, Cahier N°3, 1985.
- [17] M. Capderou, ‘*Atlas Solaire de l’Algérie*’, Tome 2, Aspect Energétique, Office des Publications Universitaires, Juin 1985.
- [18] M. Audibert, ‘*La Centrale Solaire Expérimentale*’, ‘THEK2’ de Production de Chaleur Industrielle, 11<sup>ème</sup> Séminaire sur l’Energie Solaire, Centre International de Physique Théorique, Trieste, Septembre 1980.