

Etude technico-économique de la production d'hydrogène par deux applications de l'énergie solaire dans la région de Ouargla

Nasreddine CHENNOUF*, Soumia RAHMOUNI, Belkhir NEGROU, Boubeheur DOKKAR et Nouredine SETTOU

Univ Ouargla, Fac. des Sciences Appliquées, Lab. de Valorisation et de Promotion des Ressources Sahariennes 'VPRS', Ouargla 30 000 (Algérie)

* Email : chennouf.na@univ-ouargla.dz

ملخص: نظرا لتزايد الاهتمامات البيئية خاصة فيما يتعلق بالتحكم في انبعاث الغازات المتسببة في الاحتباس الحراري و لمواجهة نضوب الوقود الاحفوري، يعتبر الهيدروجين الاخضر المصنوع من مصادر الطاقة المتجددة حامل الطاقة للمستقبل. الهدف من هذا العمل هو دراسة جميع العناصر التقنية و الاقتصادية لإنتاج الهيدروجين بكميات كبيرة عن طريق عملية التحليل الكهربائي للماء باستخدام مصادر للطاقة المتجددة. قمنا بتقديم الطريقة المتبعة التي تسمح لنا بنمذجة جميع الأجزاء المكونة للنظام. و قمنا بتقدير كمية إنتاج الهيدروجين وتحديد تكلفة إنتاجه لكل من المنشآت طاقة متجددة/هيدروجين و ذلك من أجل القيام بمقارنة متجانسة. النتائج المتحصل عليها أثبتت أنه من أجل قدرة إنتاجية سنوية صغيرة (50 طن)، تعتبر المنشأة الكهروضوئية هي الأحسن، وأكبر من هذه القدرة تعتبر المدخنة الشمسية/هيدروجين هم الأكثر كفاءة.

الكلمات الدالة: الطاقة المتجددة، التحليل الكهربائي للماء، إنتاج الهيدروجين، دراسة التقنية و الاقتصادية، النمذجة.

RÉSUMÉ : Face aux préoccupations environnementales de plus en plus pressantes, telles que la maîtrise des rejets de gaz à effet de serre, et face à l'épuisement annoncé des réserves d'énergies fossiles, l'hydrogène vert obtenu à partir des énergies renouvelables est perçu comme un vecteur énergétique prometteur. Ce travail de recherche est une étude technique et économique sur la réalisation d'une installation de production massive d'hydrogène en utilisant deux procédés d'énergie électrique renouvelable pour alimenter un électrolyseur industriel de type alcalin. Nous présentons la modélisation énergétique de deux sous systèmes constituant l'installation Energie Renouvelable à production d'hydrogène (EnR/H₂). L'évaluation du potentiel de production d'hydrogène ainsi que l'estimation du coût total d'hydrogène électrolytique produit est menée afin de faire une comparaison unifiée entre les systèmes EnR/H₂. Les résultats obtenus montrent que les deux installations étudiées sont très rentables et présentent un grand potentiel de production d'hydrogène. Les études effectuées montrent que l'intérêt technico-économique de la production d'hydrogène pour les deux technologies proposées dépend des paramètres environnementaux et surtout de la capacité de production choisie pour la conception. L'installation PV/H₂ est la plus intéressante pour une capacité de 50t/an, par contre, l'installation Cheminée/H₂ est pour une capacité supérieure.

MOTS-CLÉS : Energie renouvelable, électrolyse de l'eau, production d'hydrogène, étude technico-économique, modélisation numérique.

ABSTRACT: Facing to the increasingly pressing environmental concerns, such as the control of the emission of gas with greenhouse effect, and facing the exhaustion announced of fossil energies reserves, hydrogen obtained from renewable energies is seen as a promising energy vector. This work focuses on the techno-economic study on the realization of a massive generating station of hydrogen by using two processes of renewable electrical energy to supply an industrial electrolyser of alkaline type. We present the energy modeling of two systems constitute the EnR/H₂ installation. The evaluation of the potential of hydrogen production as well as the estimate of the electrolytic hydrogen total costs product is carried out in order to make a comparison unified between the EnR/H₂ systems. The results obtained show that the two studied installations are very profitable and have a great potential of production of hydrogen. The studies carried out show that the techno-economic interest of the hydrogen production for one of two technologies suggested depends on the environmental parameters and especially on the production capacity chosen for the design (installation PV/H₂ is most interesting for a capacity of 50t/an, on the other hand, the Chimney/H₂ for a higher capacity).

KEYWORDS: Renewable energy, water electrolysis, hydrogen production, techno-economic study, numerical modeling.

1. Introduction

A l’heure actuelle, la production d’hydrogène se fait presque exclusivement à partir de combustible fossile [1]. Dans la perspective d’un développement durable avec réduction des émissions de gaz à effet de serre, la production massive de l’hydrogène via l’électrolyse de l’eau semble, la solution idéale, lorsque celle-ci est effectuée à l’aide d’une source d’énergie renouvelable. L’électrolyse alcaline est le procédé le plus mature, employé en industrie [2], offrant l’avantage de la simplicité. Les défis pour l’usage de l’électrolyse sont de réduire la consommation, le coût et la maintenance et d’augmenter la fiabilité, la durabilité et la sûreté [3]. Plusieurs références expérimentales et théoriques étudiées pour la production d’hydrogène par électrolyse de l’eau utilisent le système photovoltaïque comme une source d’énergie électrique [4, 5, 6]. Une installation de production massive de l’hydrogène par l’utilisation d’un électrolyseur alcalin alimenté par une cheminée solaire a été discutée [7]. Ce travail de recherche est une étude technique et économique sur la réalisation d’une installation de production massive d’hydrogène en utilisant trois procédés d’énergie électrique renouvelable pour alimenter un électrolyseur industriel de type alcalin dans la région de Ouargla (Algérie).

2. Conception de l’installation de production d’hydrogène EnR/H₂

Le système que nous avons étudié est une installation de production massive de l’hydrogène. Elle est composée principalement de deux sous systèmes ; un premier pour la production d’énergie électrique renouvelable et un deuxième pour l’électrolyse (le stockage d’hydrogène n’est pas considéré). Le principe de fonctionnement de l’installation est présenté sur la figure (1).

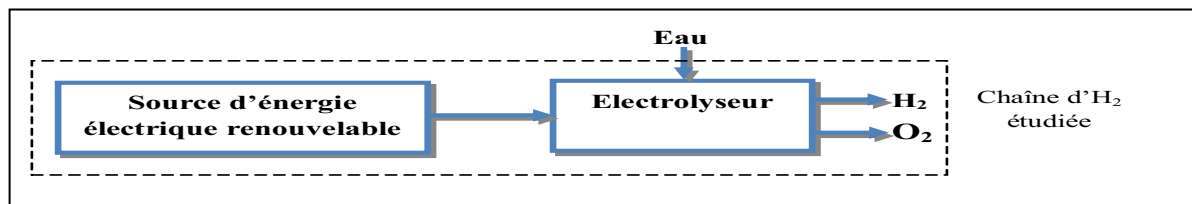


Figure 1 : Schéma de principe de fonctionnement de l’installation de production de l’hydrogène (EnR/H₂).

Le système de production d’hydrogène proposé est constitué d’un électrolyseur alimenté par trois sources différentes d’énergie électrique. Deux configurations sont présentées, la première configuration est représenté par un système photovoltaïque couplé à un électrolyseur (PV/H₂), la deuxième configuration est celle qui utilise une cheminée solaire pour produire de l’électricité qui est envoyée par la suite pour alimenter un électrolyseur (Cheminée/H₂).

3. Modélisation des sources de production d’énergie électrique

Afin de déterminer les différents flux d’énergie au sein d’un système de production électrique, chaque entité de celui-ci doit être modélisée.

3.1. Modélisation de la production photovoltaïque

La production d’énergie dans un système photovoltaïque est principalement assurée par le générateur photovoltaïque (figure 2). Désormais, uniquement à l’aide des données climatiques du site (ensoleillement et température ambiante) et des données du constructeur du module, nous pouvons connaître l’énergie disponible en sortie du module photovoltaïque. L’énergie électrique produite par un générateur photovoltaïque est donnée par la relation (1) [8] :

$$E_{PV} = \eta_{PV} A_{PV} G_i \tag{1}$$

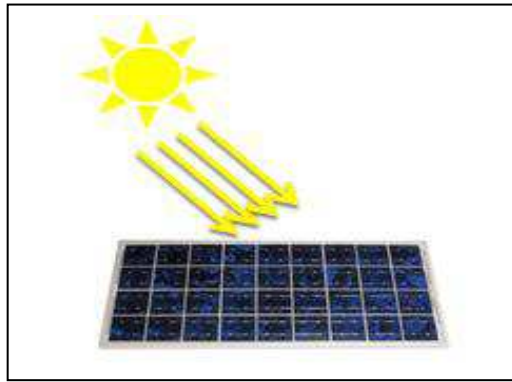


Figure 2 : Principe de fonctionnement de générateur PV.

3.2. Modélisation de la production d'une cheminée solaire

Pour des données de la cheminée solaire géométriques (hauteur, diamètre de la cheminée et diamètre du collecteur), et pour des conditions thermiques spécifiques (telles que la température de l'air ambiant, rayonnement solaire) nous pouvons déduire facilement l'évolution de l'énergie électrique générée par la cheminée solaire durant toute l'année, en utilisant la relation (2) [9] :

$$E_{Chemin} = G_h A_{coll} \frac{2}{3} \frac{gH_C}{C_{p,air} T_G} \eta_{PV} A_{coll} \eta_{turb} \quad (2)$$

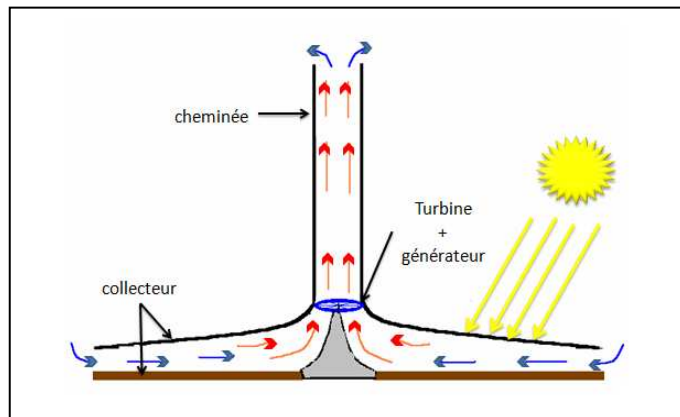


Figure 3 : Principe de fonctionnement de la cheminée solaire.

4. Modélisation énergétique de l'électrolyseur

L'énergie générée par la source renouvelable sera envoyée à l'électrolyseur pour conduire le procédé d'électrolyse de l'eau afin de produire l'hydrogène. Dans cette étude, un électrolyseur de type alcalin a été utilisé. Il bénéficie d'un rendement élevé et un cycle de vie important [10, 11]. Par conséquence, l'énergie transférée à l'électrolyseur est définie comme suit :

$$E_{el} = \eta_{elec} \eta_P E_{source} \quad (4)$$

5. Dimensionnement de l'installation (EnR/H₂)

Nous disposons maintenant d'une démarche permettant de réaliser le dimensionnement de chaque source d'énergie électrique, couplé à un électrolyseur. Le dimensionnement est effectué, en utilisant plusieurs capacités de production annuelle d'hydrogène choisies à partir des données techniques des électrolyseurs industriels de technologie alcaline [11, 12].

5.1. Dimensionnement de l'électrolyseur

Une fois connue la capacité de production annuelle d'hydrogène désirée, nous pouvons déduire les besoins d'énergie électrique nécessaire de l'électrolyseur (la consommation d'eau est proportionnelle à la production d'hydrogène et donc à la puissance absorbé par l'électrolyseur). Pour connaître l'énergie maximale que l'électrolyseur est susceptible d'absorber au cours de l'année, on utilise l'équation [11, 12] :

$$E_{el,an} = \frac{K_{el,th} m_{H_2}}{\eta_{elec}} \tag{5}$$

Le tableau (1) représente les différentes capacités retenues, l'énergie électrique absorbée par l'électrolyseur et le nombre d'électrolyseur (stacks) en série. Nous choisissons l'électrolyseur alcalin dont la consommation électrique est égale à 108 kW, (les caractéristiques techniques sont fournies par la société H₂ Logic) [13].

Ce choix d'électrolyseur est justifié par le bon rendement qu'il présente ainsi que la possibilité d'association pour venir aux besoins de grandes capacités de production.

Tableau 1 : Dimensionnement de l'électrolyseur industriel de technologie alcaline choisie.

| | | | | |
|---|-----|------|------|-----|
| <i>m_{H₂}</i> (t/an) | 50 | 150 | 250 | 500 |
| <i>E_{el,an}</i> (GWh/an) | 3.5 | 10.5 | 17.5 | 35 |
| Nombre de stacks (électrolyseur) | 8 | 24 | 40 | 80 |

5.2. Dimensionnement du système photovoltaïque

Le dimensionnement d'une installation photovoltaïque revient à déterminer la surface nécessaire du générateur photovoltaïque pour adopter un système photovoltaïque suffisant pour couvrir les besoins de l'électrolyseur utilisé à tout instant.

Les étapes de dimensionnement de l'installation sont les suivantes :

- Tout d'abord, nous estimons l'irradiation solaire mensuelle incidente sur une surface inclinée à latitude de la ville de Ouargla (31°) durant toute l'année ;
- Pour chaque capacité de production d'hydrogène, nous cherchons à connaître l'énergie maximale que l'électrolyseur est susceptible d'absorbée au cours de l'année (équation 5), puis pour chaque mois. Pour ceci, nous multiplions l'énergie annuelle par un pourcentage représentant le rapport entre l'irradiation mensuelle et l'irradiation annuelle ;
- Connaissant l'énergie mensuelle consommée par l'électrolyseur et l'irradiation solaire mensuelle, nous déduisons la surface de générateur photovoltaïque convenable, qui représente la plus grande surface obtenue.

Tableau 2 : Dimensionnement de générateur photovoltaïque.

| | | | | |
|---|------|------|------|-------|
| <i>m_{H₂}</i> (t/an) | 50 | 150 | 250 | 500 |
| <i>A_{PV}</i> (m ²) | 1657 | 4971 | 8286 | 16572 |

La surface de générateur photovoltaïque s'accroît en augmentant la capacité de production d'hydrogène. Une corrélation linéaire est obtenue entre les capacités choisies et les surfaces de captation.

5.3. Dimensionnement de la cheminée solaire

Le dimensionnement d'une cheminée solaire consiste à déterminer le volume d'un cylindre d'hauteur égale à la hauteur de la cheminée et une surface de base égale à celle du collecteur. En tenant compte des rendements de la turbine et de collecteur qui sont respectivement 0.8 et 0.7 [9], le volume de la cheminée solaire peut être calculé à partir de l'équation (2).

La démarche adaptée pour dimensionner cette installation est la suivante :

- Détermination de l'énergie solaire disponible sur le collecteur (en kWh/m²) ;
- Pour chaque capacité de production d'hydrogène, nous cherchons à connaître l'énergie maximale que l'électrolyseur est susceptible d'absorber au cours de l'année (équation 5) ;
- Connaissant l'énergie annuelle consommée par l'électrolyseur et l'irradiation solaire annuelle incidente sur une surface horizontale, le volume correspondant à cette consommation électrique peut être calculé.

Le tableau suivant illustre la variation du volume moteur en fonction de différentes capacités de production d'hydrogène retenues.

Tableau 3 : Dimensionnement de la cheminée solaire.

| m_{H_2} (t/an) | 50 | 150 | 250 | 500 |
|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $H_c \times A_{coll}$ (m ³) | 1.38 10 ⁸ | 4.15 10 ⁸ | 6.91 10 ⁸ | 1.38 10 ⁹ |
| H_c (m) | 270 | 350 | 390 | 440 |
| D_{coll} (m) | 808 | 1229 | 1503 | 2001 |

6. Evaluation du potentiel de production d'hydrogène

L'évaluation du potentiel est basée sur l'utilisation de l'énergie électrique produite par une source renouvelable qui entraîne le fonctionnement d'un électrolyseur. Dans cette analyse, une capacité de puissance de 52.5 kWh/kg pour l'électrolyseur a été considérée (ce qui correspond à environ 75% de rendement) [14]. Le rendement supplémentaire qui est inclus pour tenir compte des pertes d'énergie dans l'électrolyseur est égal à 90% [10, 11]. Le calcul de la masse d'hydrogène produite à partir de chaque source renouvelable est décrit comme suit :

$$m_{H_2} = \frac{E_{el}}{PCI_{H_2}} = \frac{\eta_{el}\eta_P E_{source}}{PCI_{H_2}} \quad (6)$$

Les deux installations étudiées sont conçues afin de produire annuellement une même quantité d'hydrogène de 500 tonnes.

6.1. Evaluation de production de l'hydrogène de l'installation PV/H₂

Pour déterminer le potentiel de la production d'hydrogène solaire photovoltaïque, nous avons utilisé les équations reportées ci-dessus, un programme de calcul écrit en langage Matlab a été mis au point.

Le tableau 4 récapitule les quantités d'hydrogène produites pour chaque mois de l'année par une installation de type PV/H₂.

Tableau 4 : Récapitulation de l'hydrogène produit par l'installation PV/H₂.

| | Jan. | Fév. | Mar. | Avr. | Mai | Jun. | Juil. | Aou. | Sep. | Oct. | Nov. | Déc. |
|---------------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| m_{H_2} (t) | 6.41 | 6.20 | 6.46 | 6.62 | 6.65 | 6.27 | 6.76 | 6.82 | 6.08 | 6.32 | 6.19 | 5.45 |

La figure (6) représente la production mensuelle de l'hydrogène photovoltaïque, avec les données météorologiques du site choisi, en utilisant le modèle mathématique déjà présenté.

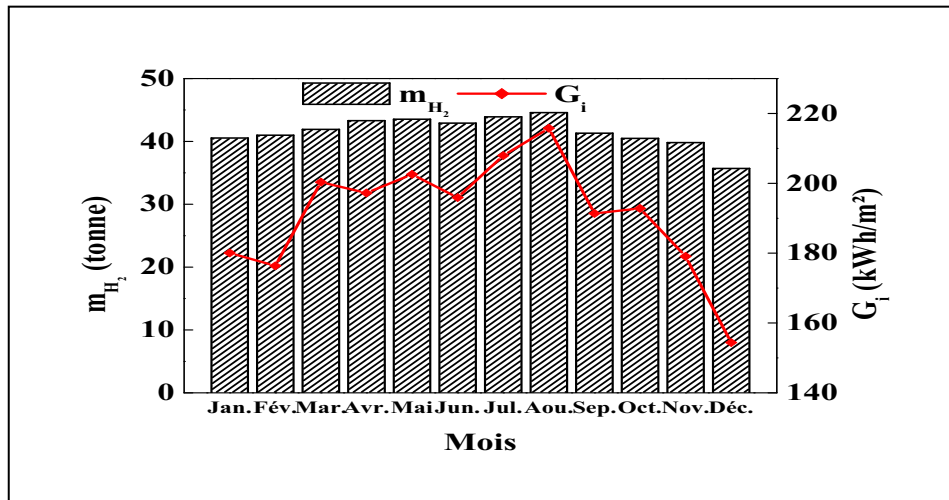


Figure 6: Evaluation de la production mensuelle de l'hydrogène par l'installation PV/H₂.

En analysant cette figure, on peut conclure que pour une surface de générateur photovoltaïque égal à 108134 m² (équivalent à une production d'hydrogène de 500t/an), la production d'hydrogène n'est pas uniforme pour toute l'année, elle est maximale au mois d'Aout, et elle est moins importante pour les autres mois de l'année.

6.2. Evaluation de production de l'hydrogène de l'installation Cheminée/H₂

Pour déterminer le potentiel de la production d'hydrogène pour l'installation Cheminée/H₂, nous avons utilisé les équations reportées ci-dessus. Le diagramme d'évaluation du potentiel de production d'hydrogène est illustré en figure (7).

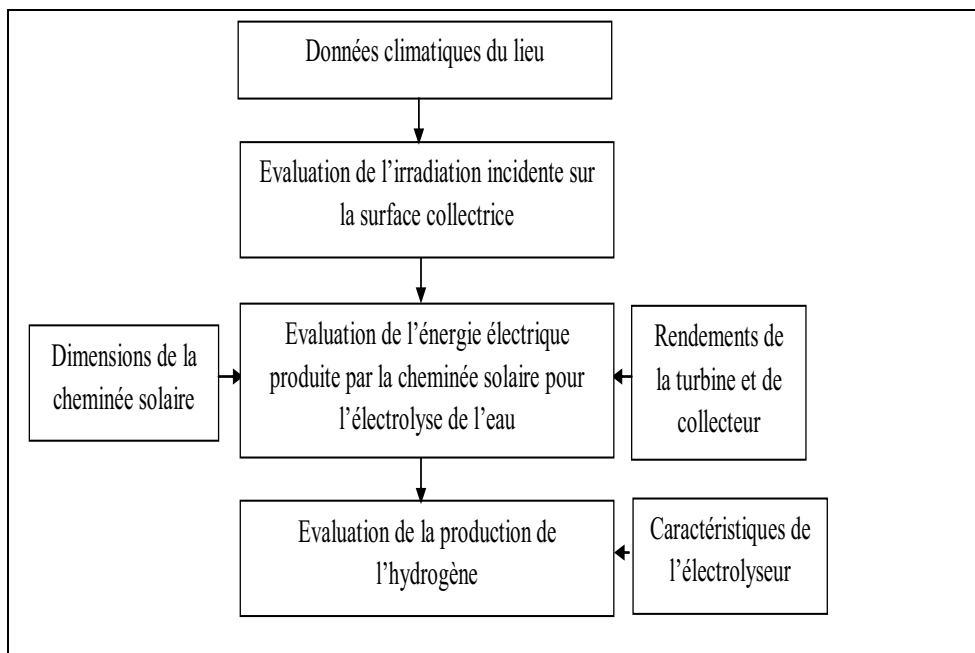


Figure 7 : Diagramme pour l'évaluation de la production de l'hydrogène de l'installation Cheminée/H₂.

Le tableau 5 récapitule les quantités d'hydrogène produites par la cheminée solaire pour chaque mois de l'année.

Tableau 5 : Récapitulation de l'hydrogène produit par l'installation Cheminée /H₂.

| | Jan. | Fév. | Mar. | Avr. | Mai | Jun. | Juil. | Aou. | Sep. | Oct. | Nov. | Déc. |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| m_{H_2} (t) | 42.16 | 46.57 | 60.38 | 67.22 | 75.04 | 74.7 | 77.16 | 73.71 | 58.37 | 51.35 | 42.44 | 35.81 |

La figure (8) représente la production mensuelle de l'hydrogène, avec les données météorologiques de la région de Ouargla, et pour des dimensions de la cheminée conçue (une hauteur égale à 410 m et un diamètre du collecteur de 1746 m), en utilisant le modèle mathématique déjà présenté.

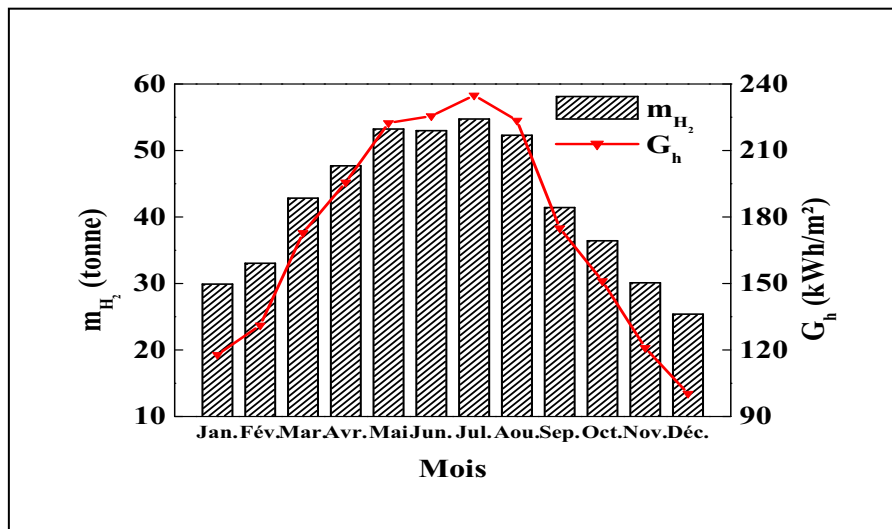


Figure 8 : Evaluation de la production mensuelle de l'hydrogène par l'installation Cheminée/H₂.

Le maximum de production est atteint au mois de Juillet. Pour cette installation une très forte variation de la production mensuelle d'hydrogène, elle passe du simple au double (plus de 25t, pour la période de Janvier à Avril et de Septembre à Décembre, à plus de 50t pour la période estivale).

7. Estimation du coût de production d'hydrogène

La détermination du coût de production est réalisée à partir des coûts d'investissement du procédé, des coûts opératoires des équipements et de la production actualisée d'hydrogène. Par la suite, nous retiendrons l'équation (7) pour déterminer le coût optimisé de l'hydrogène produit [15]. Cette équation regroupe tous les termes de coût d'investissement et de fonctionnement pour chaque unité de production d'hydrogène. Dans cette étude, seulement le coût de production est traité ; d'autres coûts tels que les coûts de stockage et les coûts de distribution ne sont pas considérés.

$$CTA_{H_2} = \frac{\sum_{n=1}^N [(C_{source} + C_{elc})(1+r)^{-n}]}{\sum_{n=1}^N [H_n(1+r)^{-n}]} \quad (7)$$

Un comparatif du coût de kilogramme d'hydrogène produit de différentes sources d'électricité renouvelable a été présenté, pour une même durée de vie de 30 ans pour les deux installations, un taux d'actualisation de 6% et une durée de vie d'électrolyseur de 7ans. Le tableau (6) reporte tous les résultats de comparaison.

Tableau 6 : Contribution des différents coûts de l'installation PV/H₂ et Cheminée/H₂ dans le coût total d'investissement et le coût d'hydrogène produit.

| | m_{H_2} (t/an) | 50 | 150 | 250 | 500 |
|------------------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Panneau photovoltaïque | CTA_{H_2} (\$/kg H ₂) | 17.103 | 16.217 | 14.611 | 11.598 |
| | P_{H_2} (\$/kg H ₂) | 20.598 | 18.675 | 16.752 | 11.944 |
| Cheminée solaire | CTA_{H_2} (\$/kg H ₂) | 17.319 | 13.063 | 11.704 | 10.181 |
| | P_{H_2} (\$/kg H ₂) | 20.157 | 14.624 | 13.026 | 11.241 |

Pour une capacité de production d'hydrogène de 50 t/an, le coût d'hydrogène produit pour chacune des installations étudiées est du même ordre (17 c\$/kg d'H₂), le minimum coût est ce de l'installation PV/H₂. Pour des capacités de production d'hydrogène supérieure à 50t/an, le coût d'hydrogène produit par l'installation Cheminée/H₂ représente le moins cher.

8. Conclusion

nous avons présenté des modèles énergétiques des composants de différents systèmes utilisées pour converser du potentiel primaire énergétique des sources d'énergie renouvelables en électricité. Le point commun entre les deux procédés est l'utilisation d'un électrolyseur de technologie alcaline pour transformer l'énergie électrique de la source renouvelable en production massive d'hydrogène. Nous avons présenté un comparatif du coût de kilogramme d'hydrogène produit de différentes sources d'électricité renouvelable, les résultats montrent que pour une capacité de production de 50t/an le coût d'hydrogène de l'installation PV/H₂, est le moins cher (17c\$/kg d'H₂), au delà de cette capacité le coût d'hydrogène produit par la cheminée devient plus intéressant.

Nomenclature

| | | |
|----------------|---|--------------------|
| E_{PV} | Energie électrique photovoltaïque | kWh |
| η_{PV} | Rendement de générateur photovoltaïque | % |
| A_{PV} | Surface totale de générateur photovoltaïque | m ² |
| G_i | Irradiation solaire globale sur un plan incliné (inclinaison égale à 31°) | kWh/m ² |
| $E_{Cheminée}$ | Energie électrique produite par la cheminée solaire | kWh |
| G_h | Irradiation solaire globale sur un plan horizontal | kWh/m ² |
| A_{coll} | Surface totale du collecteur | m ² |
| H_c | Hauteur de la cheminée | m |
| C_p | Capacité thermique | J/kg K |
| g | Force de pesanteur | Kg/m ² |
| T_a | Température ambiante | °C |
| η_{coll} | Rendement du collecteur | % |
| η_{turb} | Rendement de la turbine | % |

| | | |
|---------------|---|-------------------|
| E_{el} | Energie absorbée par l'électrolyseur | kWh |
| η_{elec} | Rendement d'électrolyseur | % |
| η_p | Rendement supplémentaire inclus pour tenir compte les pertes d'énergie dans l'électrolyseur | % |
| E_{source} | Energie électrique délivrée par la source renouvelable | kWh |
| $K_{el,th}$ | Consommation électrique théorique d'électrolyseur | kWh/kg |
| m_{H_2} | Production annuelle d'hydrogène | kg/an |
| PCI_{H_2} | Pouvoir calorifique inférieur d'hydrogène | kWh/kg |
| N | Durée de vie de l'installation | ans |
| C_{source} | Coût d'investissement total de système de production d'électricité | \$ |
| C_{elec} | Coût d'investissement total d'électrolyseur | \$ |
| r | Taux d'actualisation | % |
| CTA_{H_2} | Coût total actualisé d'hydrogène | \$/kg d' H_2 |

Références bibliographiques

- [1] AFNOR. Production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles. Mémento de l'hydrogène, fiche 3.1.1, 15p, Juin 2009.
- [2] AFNOR. Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau. Mémento de l'hydrogène, fiche 3.2.1, 12p, Mai 2011.
- [3] Zeng K., Zhang D.; Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications, Progress Energy and Combustion Science, Vol. **36**, pp.307-326, 2010.
- [4] Djafour A., Matoug M., Bouras H., Bouchekima B., Aida M.S. et Azoui B.; Photovoltaic-assisted alkaline water electrolysis: Basic principesales, Int. Journal of Hydrogene Energy, Vol. **36**, pp.4117-4124, 2011.
- [5] Khazen S., Ghitoubi S., Saouli S. et Setto N.; Experiments with photovoltaic system for hydrogen production, Annales de la Faculté des Sciences et Science de l'Ingénieur, Vol. **1**, pp.12-16, 2009.
- [6] Duric A. and Firak M.; Hydrogen production using alkaline electrolyzer and photovoltaic (PV) module, Int. Journal of hydrogen production, Vol. **36**, pp.7799-7806, 2011.
- [7] Negrou B., Setto N., Chennouf N. et dokkar B.; Etude d'une installation de production d'hydrogène solaire par l'électrolyse de l'eau, Annales de la Faculté des Sciences et Science de l'Ingénieur, Vol. **1**, pp. 43-49, 2009.
- [8] Belhadj M., Benouz T., Cheknane A. et Bekkouche S.M.A.; Estimation de la puissance maximale produite par un générateur photovoltaïque, Revue des Energies Renouvelables, Vol. **13**, pp. 257-264, 2010.
- [9] Negrou B., Setto N., Chennouf N. and Dokkar B.; Valuation and development of the solar hydrogen production. Int. Journal of Hydrogen Energy, Vol.**36**, pp. 4110-4116, 2011.
- [10] Dagdougui H.; Système d'aide à la décision pour la durabilité des systèmes

énergétiques renouvelables et des infrastructures d'hydrogène : modélisation, contrôle et analyse des risques, Thèse de Doctorat : Science et génie des activités à risques, Ecole Nationale Supérieure de Mines de Paris, 257p, 2011.

- [11] NREL; Current (2009) state of the art hydrogen production cost estimate using water electrolysis; Independent Review; Published for the U.S. Department of Energy Hydrogen Program; Colorado, 51p, September 2009.
- [12] Chennouf N., Negrou B., Dokkar B. et Settou N.; Valuation and estimation of geothermal electricity production using carbon dioxide as working fluid in the south of Algeria, Terragreen 13 International Conference, Beirut-Lebanon, February 15-17, 2013.
- [13] H₂ Logic-Hydrogen Fuel Cell Motive Power Solutions [en ligne]. (2003,2013) Disponible sur : < <http://www.h2logic.com/com> > (Consulté le 04/02/2013).
- [14] AFNOR; Etude technico-économique prospective sur le coût de l'hydrogène. Mémento de l'hydrogène, fiche 10, 11p, Avril 2006.
- [15] Mansilla C., Dautremont S., Shoai Tehrani B., Cotin G., Avril S. et Burkhalter E.; Reducing the hydrogen production cost by operating alkaline electrolysis as a discontinues process in the French market context; Int. Journal of Hydrogen Energy, Vol. **36**, pp.6407-6413, 2011.