

Etude d'un Système de Production d'Hydrogène Solaire en Algérie

R. Boudries-Khellaf

CDER, B.P.62, Route de l'Observatoire 16340 Bouzareah Alger.

R_zaka@yahoo.fr

Résumé – *L'hydrogène est considéré comme le porteur potentiel d'énergie du futur. On entend par hydrogène solaire, l'hydrogène produit en utilisant les énergies renouvelables, particulièrement l'énergie solaire.*

L'existence d'une importante nappe phréatique, en combinaison avec une insolation très importante font de l'Algérie une place de choix pour la production d'hydrogène solaire. Cette production offrira non seulement à l'Algérie une énergie propre mais aussi et surtout permettra d'augmenter et de diversifier ses ressources énergétiques.

Dans le présent travail, est considérée la production de l'hydrogène solaire par électrolyse de l'eau. L'apport énergétique pour la dissociation de l'eau est fournie par un système photovoltaïque. La production moyenne par mètre carré de panneau photovoltaïque et par jour est évaluée. Les variations saisonnières et géographiques ont été étudiées. Le potentiel de production s'avère très important particulièrement au sud.

Abstract – *Hydrogen is considered as the potential energy vector of the future. By Solar hydrogen, it is meant that hydrogen is produced using renewable energies particularly solar energy.*

The existence of an important underground water in combination with the highest insolation in the world make Algeria a place of choice for the production of solar hydrogen. This production will offer Algeria not only a clean energy but also will permit to increase and to diversify its energy resources.

In the present work, is considered the solar hydrogen production by water electrolysis with the water dissociation energy furnished by a PV system. The mean production per square meter of PV panel and by day is estimated. The seasonal and geographical variations are studied.

The production potential comes out to be very important particularly in the South.

Mots clés: Energie solaire - Hydrogène production - Electrolyse - PV

1. INTRODUCTION

De l'avis de beaucoup d'experts, l'hydrogène est l'une des sources d'énergie les plus importantes du futur [1]. L'hydrogène représente la forme énergétique la moins nocive pour l'environnement. Muni d'un cycle énergétique fermé, il rentre dans divers applications, tels que la production d'électricité, le chauffage des habitats et la fourniture de carburant pour le transport.

Les réserves d'énergies fossiles étant très limitées, l'hydrogène se présente comme un excellent alternatif dans un premier temps et un substitut par la suite. Il peut jouer un rôle même plus important que les énergies conventionnelles. En effet, il présente l'avantage d'être non polluant et il peut utiliser les mêmes moyens de transport que les énergies conventionnelles. Non seulement il peut subvenir aux besoins énergétiques locaux mais il peut aussi être une importante commodité d'exportation.

Pour l'Algérie, il s'avère d'une importance capitale. Il permet non seulement d'augmenter et de diversifier ses réserves et ses exportations énergétiques mais aussi de subvenir à ses besoins énergétiques qui deviennent de plus en plus importants.

Plusieurs techniques existent pour la production de l'hydrogène. Certaines de ces techniques sont arrivées à maturité de production commerciale, d'autres sont encore à l'échelle expérimentale. La décomposition catalytique du gaz naturel, l'oxydation partielle des huiles lourdes, la gazéification du charbon et l'électrolyse de l'eau sont parmi les procédés de production d'hydrogène qui sont industrialisés ou en phase d'industrialisation. Les cycles thermo-chimiques purs et hybrides par exemple sont à l'échelle de Recherche et Développement, tandis que les procédés photo-chimiques et photo-biologiques sont encore au premier stade de la recherche.

L'électrolyse de l'eau pour la production de l'hydrogène est le procédé le plus répandu et le plus prisé. L'utilisation de l'énergie solaire dans les procédés d'électrolyse s'avère la méthode la plus rentable et la plus protectrice de l'environnement.

Figure 1 montre le schéma synoptique d'un procédé de production d'hydrogène par électrolyse. On voit, de cette figure, que l'on peut diviser le système en trois parties :

- ◆ Le système d'appoint énergétique pour la décomposition de l'eau. Ce système peut être un champ de panneaux photovoltaïques ou un système hybride. L'utilisation de stations géothermiques a aussi été prise en considération [2].

- ◆ Le système de l'électrolyse de l'eau. Les techniques les plus importantes couramment utilisées pour la production de l'hydrogène sont les électrolytes alcalines, les membranes polymères et les oxydes de céramiques.

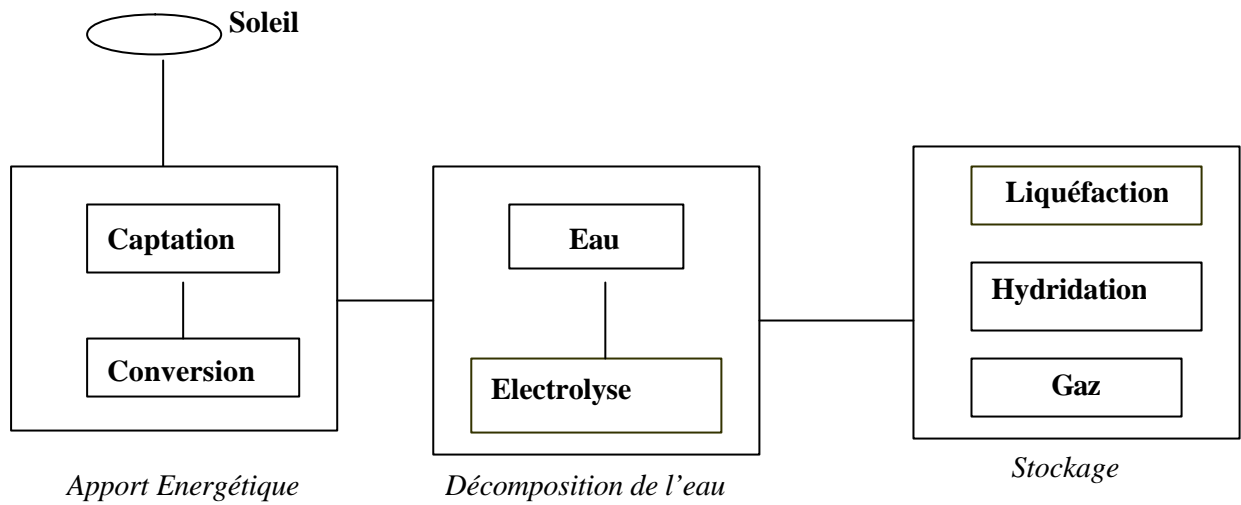


Fig. 1: Système synoptique de production de l'hydrogène solaire

- ◆ Le systèmes de stockage. Les techniques les plus utilisées sont la liquéfaction de l'hydrogène ou son hydridation. Le choix des hydrides est très important. L'émergence des quasicristaux et les nanotubes [3] comme potentiels métaux de stockage d'hydrogène a relevé de leur importance. Le système de stockage est parfois remplacé par un système de distribution soit pour utilisation sur site pour la production d'énergie par exemple ou pour une évacuation vers un autre lieu par moyen de transport ou par pipeline.

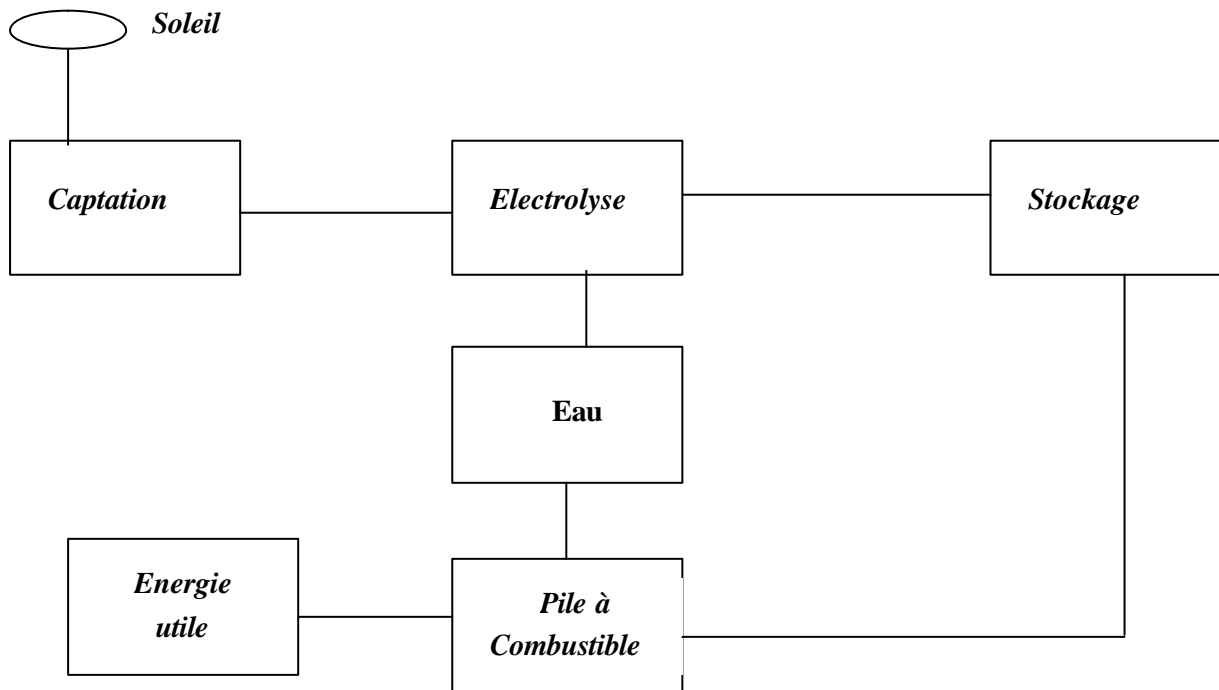


Fig. 2: Cycle de production d'hydrogène solaire par électrolyse

L'Algérie présente d'énormes potentialités aussi bien en énergie solaire qu'en énergie géothermique qu'en énergie éolienne [4]. L'insolation, à travers l'ensemble du pays est l'une des plus élevées du monde aussi bien en puissance qu'en nombre de jour. Cette situation fait de l'Algérie une excellente place pour la production de l'hydrogène utilisant l'énergie solaire.

Du fait que la production de l'hydrogène est cyclique, comme le montre la figure 2, on peut obtenir de l'eau par transformation énergétique de l'hydrogène. Les retombés sur le développement régional et national, sur l'amélioration de la qualité de la vie et la réduction de la pollution sont alors indéniables.

Dans la présente communication, nous proposons d'abord une étude comparative de l'hydrogène en tant que porteur d'énergie avec les énergies conventionnelles. On montrera que l'hydrogène possède des qualités indéniablement supérieures.

Ensuite nous étudierons le rendement énergétique d'un système de production par électrolyse de l'eau utilisant un système photovoltaïque pour le captage de l'énergie solaire. L'étude portera sur la performance de ce système dans différents sites du pays, aussi bien au Tell qu'au Sahara en passant par le Hauts Plateaux. L'accent sera mis surtout sur le potentiel et les variations saisonnières. Finalement les résultats seront présentés et discutés.

2. PROPRIETES PHYSIQUES ET ENERGETIQUES DE L'HYDROGENE

D'un point de vue énergétique, l'hydrogène présente plusieurs avantages [5]:

- Il présente une très grande densité massique d'énergie. Comme le montre le tableau 1, l'énergie fournie par unité de masse d'hydrogène est au moins deux celle fournie par les énergies conventionnelles. Elle est presque trois fois celle de l'essence
- L'hydrogène est le vecteur énergétique le plus versatile. En effet les énergies conventionnelles ne peuvent être converties sous forme d'énergies utiles (énergie mécanique, thermique ou électrique) que suivant un seul processus : celui de la combustion. Par contre l'hydrogène peut être converti en énergie utile suivant cinq différents procédés. En plus de la combustion, l'hydrogène peut être directement converti en vapeur, converti en chaleur par combustion catalytique, converti directement en électricité par des procédés électrochimiques et il peut aussi agir comme source et/ou puits de chaleur par réaction chimique.

Tableau 1 : Comparaison des densités énergétiques *

Vecteur énergétique	Densité massique énergétique (kWh/Kg)
Hydrogène (gaz)	33.3
Hydrogène liquide	33.3
Gaz Naturel	13.9
Propane	12.9
Méthanol	5.6
Essence	12.7
Diesel	11.6

*source I.A.H.E.

- Tenant compte des impacts environnementaux, l'hydrogène solaire est un carburant propre. Dans le tableau 2, on a reporté les polluants produits par différents carburants [5]. Il est à noter que NO_x n'est produit que par la flamme de combustion d'hydrogène. Toute autre forme d'utilisation d'hydrogène (hydridation, vapeur génération, combustion catalytique, etc.) n'en produit pas. On voit que l'utilisation d'hydrogène ne produit ou produit très, très peu d'éléments nocifs à l'environnement.

Tableau 2 : Polluants émis par différents carburants*

Polluant	Hydrocarbure (Kg/GJ)	Charbon (Kg/GJ)	Hydrogène (Kg/GJ)
CO ₂	72.40	100.00	0.
CO	0.80	0.65	0.
SO ₂	0.38	0.50	0.
NO _x	0.34	0.32	0.10

* Source I.A.H.E.

3. TECHNIQUES DE PRODUCTION DE L'HYDROGENE

Dans toute production d'hydrogène, trois aspects doivent être pris en considération, à savoir :

- la matière première : l'extraction de l'hydrogène se fait, en général, à partir de l'eau, des hydrocarbures (tel que le méthane, le méthanol, etc.) ou les deux à la fois;
- l'énergie nécessaire pour la production : cette énergie peut aussi bien être conventionnelle, nucléaire ou renouvelable (solaire, éolienne, géothermale, etc.);
- le procédé de production : plusieurs procédés existent faisant appel à l'énergie quantique telle que la photolyse, à l'énergie électrique telle que l'électrolyse ou à l'énergie thermique tel le procédé thermochimique. Pour la plupart des procédés, il existe plusieurs types et le nombre est relativement important [6].

En Figure 3, les méthodes les plus répandues dans la production d'hydrogène, utilisant les énergies renouvelables, sont schématiquement résumées.

Il est important de noter que le vent aussi bien que les stations thermales peuvent jouer un double rôle. Le vent peut être utilisé aussi bien comme vecteur énergétique pour l'alimentation électrique de l'électrolyseur que pour le pompage de l'eau alimentant l'électrolyseur. De même, les stations thermales peuvent aussi bien générer l'électricité qu'être une source d'eau chaude pour l'électrolyseur. Il a été montré que plus l'eau est chaude plus le rendement de l'électrolyseur est grand [7].

En dehors de la réformation des gaz, l'électrolyse de l'eau est le procédé le plus développé et le plus utilisé dans l'industrie de production d'hydrogène. L'hydrogène est généré par la dissociation de la molécule d'eau au moyen d'un courant électrique y circulant à travers deux électrodes. Dans le cas de l'hydrogène solaire ce courant est généré par les cellules photovoltaïques. Les plus importantes technologies dans le procédé d'électrolyse de l'eau sont les électrolytes alcalines, les membranes de polymère et les électrolytes d'oxydes de céramique [8, 9]. Les rendements couramment obtenus par le procédé électrolytique sont de l'ordre de 65 %. Toutefois des rendements jusqu'à 85 % sont possible. Les travaux actuels ciblent l'amélioration du rendement électrocatalytique des électrodes, la résistance à la corrosion des matériaux et l'optimisation des conditions du processus.

Contrairement à l'électrolyse qui doit passer par l'étape de génération de courant électrique (dans notre cas les cellules photovoltaïques), la production d'hydrogène par photolyse ou photoconversion utilise directement la lumière solaire pour produire l'hydrogène. Ce procédé fait toutefois appel à un sensibilisateur pour absorber la lumière et stimuler la réaction photochimique et d'un catalyseur pour accélérer la réaction. De ce fait on peut diviser cette technique en deux procédés :

- Le procédé photobiologique où la chlorophylle contenue dans les microorganismes est l'élément absorbant de la lumière et les enzymes les catalyseurs.
- Le procédé photoélectrochimique où un matériaux est l'absorbant de la lumière et un métal est le catalyseur. Suivant la nature du sensibilisateur, on a deux classes de procédés photoélectrochimiques:
- Il y a le procédé utilisant des molécules (complexes métalliques) en solution comme absorbant de lumière. Ce type est souvent connu sous le nom de procédé photochimique.

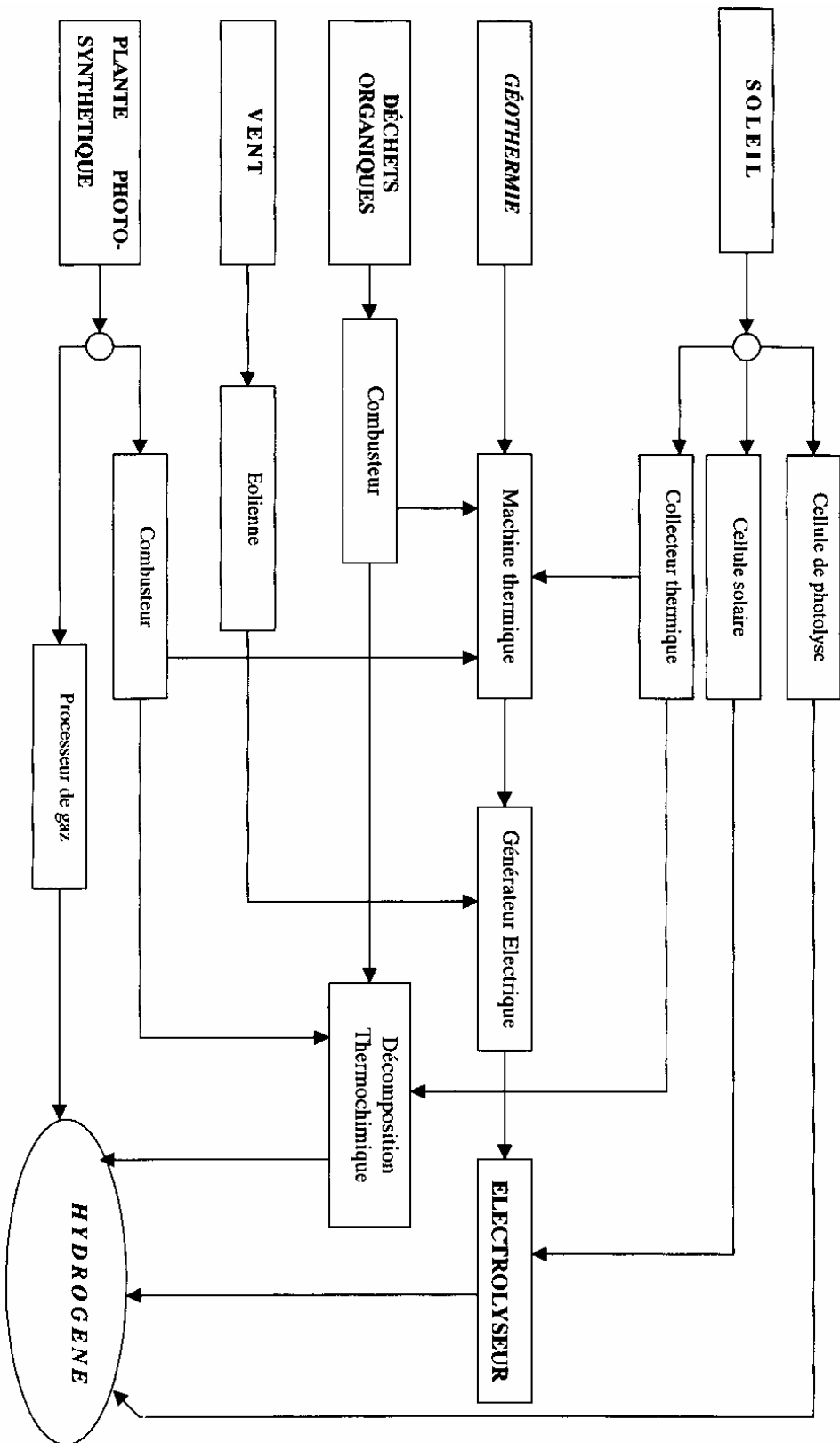


Fig. 3: Principale techniques de production de l'hydrogène utilisant les énergies renouvelables

- L'autre type de procédé utilise comme absorbant de lumière un semi-conducteur soit en suspension dans la solution soit comme unité.

Les procédés photobiologiques utilisent la lumière solaire pour générer de l'hydrogène à partir de certaines algues et bactéries [10]. Les pigments des algues absorbent la lumière tandis que les enzymes des cellules agissent comme catalyseur. Il est aussi possible de produire de l'hydrogène à partir de l'eau avec la cyanobactérie comme catalyseur [11]. Les rendements sont de l'ordre de 5 %; 10 % au meilleur des cas. En plus de ce faible rendement le procédé souffre du double problème d'inhibition en présence d'oxygène et de saturation.

Dans les procédés électrochimiques à semi-conducteur, des cellules photoélectrochimiques sont utilisées comme absorbant de lumière [12, 13]. Le rendement de ces cellules ne dépassent pas les 10 % pour les cellules de type CdS ou SrTiO₃ et les 13 % pour p-InP. Ces cellules font aussi face de problème de corrosion qui limite énormément leur durée de vie.

Le deuxième type de procédé photoélectrochimique, i.e. le procédé photochimique, est encore moins avancé que le premier. Dans ce cas là, un complexe métallique en dissolution absorbe la lumière et génère une séparation de charge qui enclenche la réaction de dissociation de la molécule d'eau.

Il est toutefois possible d'utiliser un procédé faisant appel à la combinaison de deux ou de tous les procédés déjà décrits pour produire de l'hydrogène. Ce procédé hybride s'avère parfois plus puissant. Il est par exemple possible d'élargir la gamme de longueurs d'onde de lumière absorbée, et par là augmenter le rendement, en adsorbant des molécules sur des surfaces de semi-conducteur [14].

Une autre option pour la production d'hydrogène est le procédé thermochimique. Dans ce procédé, c'est l'énergie thermique qui est utilisée pour la dissociation de la molécule d'eau. Ce procédé comprend plusieurs réactions couplés ou cycles [15]. Une multitude de ces cycles sont reportés, mais la plupart d'entre eux reste à l'état d'expérimentation et d'essai. Le cycle KIER-3 utilisant l'oxyde de cuivre et le sulfate de cuivre, le cycle UT-3 avec les céramiques ZrO₃-Y₂O₃, ZrSiO₃ + ZrO₂, et les systèmes redox sont les procédés thermochimiques les plus en vue [16, 17, 18]. La pyrolyse de l'acide sulfurique représente aussi un moyen intéressant de dissocier la molécule d'eau.

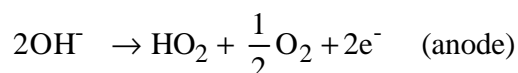
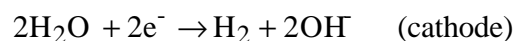
Le procédé thermochimique peut aussi être utilisé pour la gazéification et la pyrolyse de la biomasse et des déchets solides pour la production de l'hydrogène [19].

4. ESTIMATION DE LA PRODUCTION D'HYDROGENE

De tous les systèmes de production d'hydrogène par décomposition de l'eau en utilisant les énergies renouvelables, la combinaison du module photovoltaïque pour le captage de l'énergie solaire et les cellules électrolytiques pour la décomposition de l'eau est de loin le système le plus attrayant et le plus simple.

Comme le montre la figure 4, un tel système comprend :

- Le module photovoltaïque** : Il est constitué de panneaux de matériaux photovoltaïques pour la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. En général, ces matériaux sont des semi-conducteurs ou des composites de semi-conducteurs sous forme amorphe, monocristalline ou polycristalline. Dernièrement d'autres matériaux sont apparus [3]. Le rendement η_p de ce module est fonction de la nature du matériau et des conditions météorologiques. Ce rendement varie entre 10 % et 12 %.
- Le système d'adaptation** : On entend par là le système de mise en forme et de conditionnement du signal issu du module photovoltaïque. Des études sur ces systèmes [20] ont montré que leur rendement ne dépasse pas les 97 %. Pour notre estimation, on a utilisé le rendement le plus conservatif possible, c'est à dire un rendement de 85 %.
- Le système électrolytique** : En général, c'est l'ensemble de cellules consistant chacune de deux électrodes immergées dans une solution électrolytique et connectées à une alimentation DC. La solution électrolytique consiste en de l'eau auquel un produit chimique conducteur est ajouté. La réaction de décomposition de l'eau est :



Comme l'énergie exigée par cette réaction est 58 Kcal/mole [21], le voltage minimale applicable entre les électrodes est alors 1,24 V. En pratique, il est beaucoup plus important.

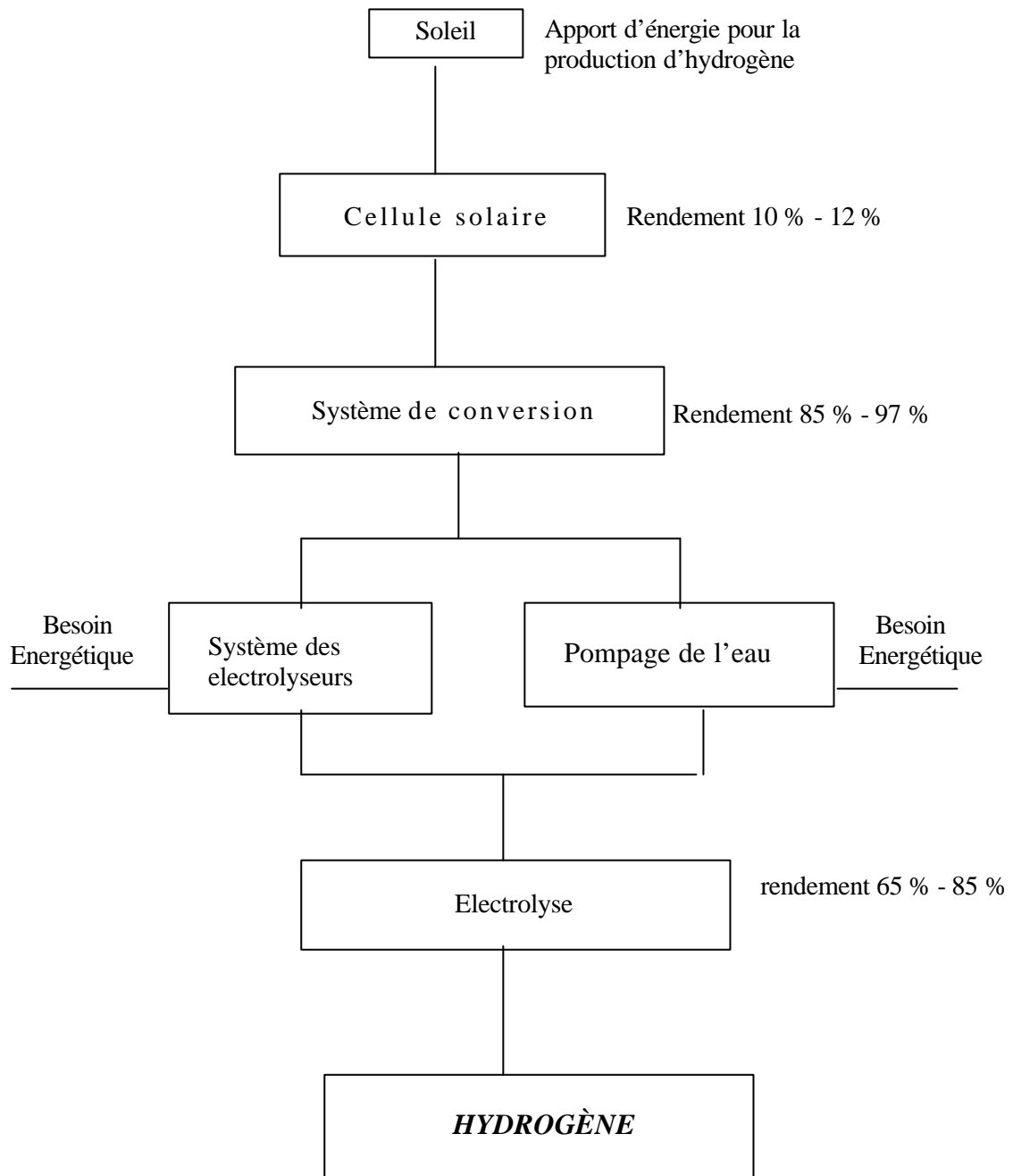


Fig. 4: Représentation schématique d'un système de production d'hydrogène

Le point d'opération optimale est défini comme étant le point d'intersection de la courbe I-V du module photovoltaïque et de la courbe I-V de la cellule électrolytique.

Le rendement du système électrolytique dépend aussi bien de la nature de la cellule et de sa température que des conditions météorologiques et des caractéristiques du module photovoltaïque. Ce rendement est en général compris entre 65 % et 85 % [22]

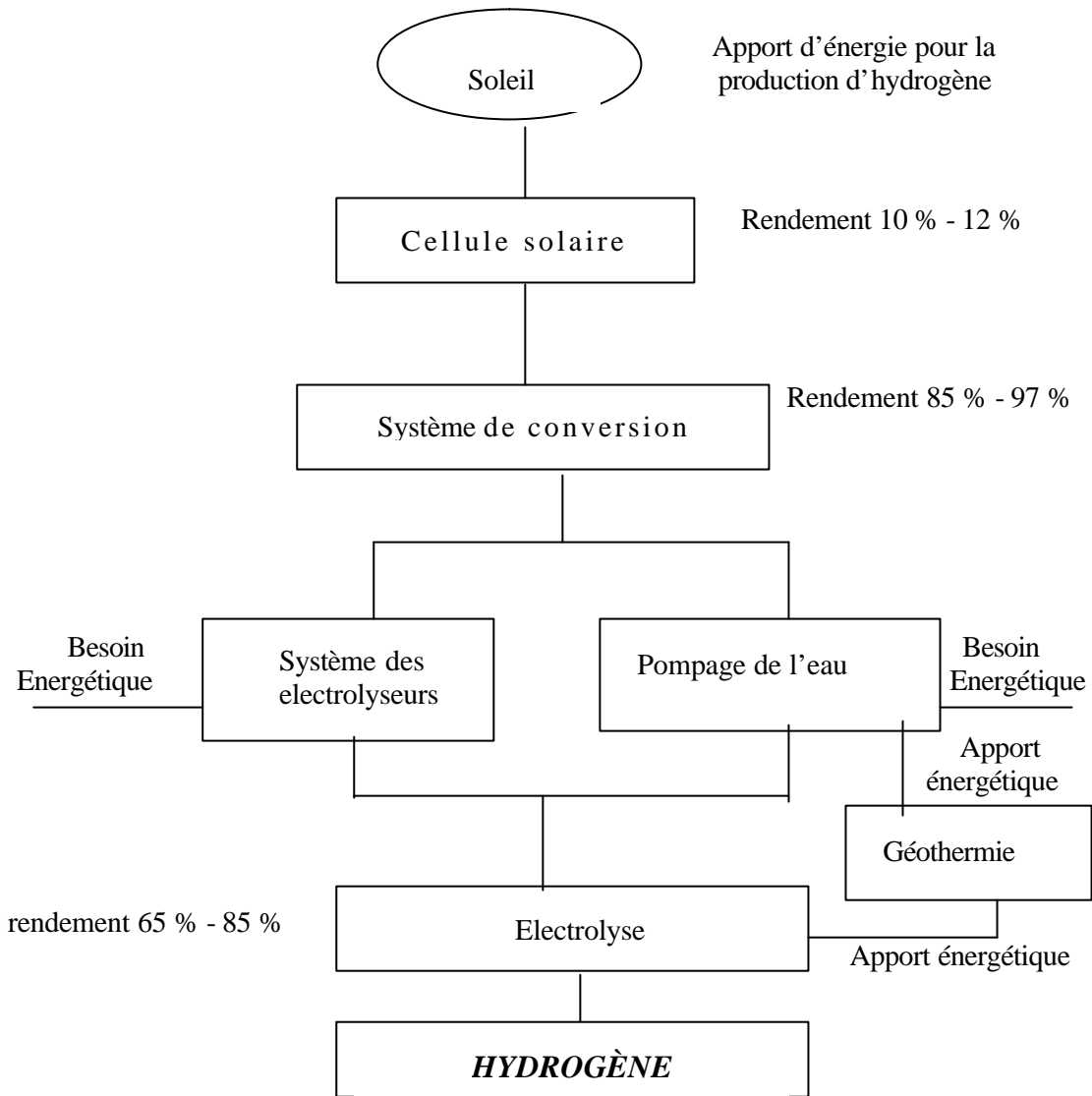


Fig. 5: Représentation schématique d'un système de production d'hydrogène dans le cas de l'existence et de l'utilisation d'une source thermique

- ♦ **Le système des électrolyseurs et le pompage de l'eau :** Ce système comprend aussi bien les systèmes auxiliaires tels que les systèmes de contrôle et de purification des gaz produits que le système de pompage et de traitement de l'eau. L'eau utilisée dans l'électrolyse peut provenir de différentes sources. Elle peut être prise de la mer dans le cas des sites côtiers que des nappes phréatiques particulièrement pour le grand sud. L'utilisation des eaux thermales peut s'avérer un choix judicieux. En effet, cette eau chaude, étant en plus une source d'énergie, ne fera qu'augmenter le rendement de production d'hydrogène du système. Comme le montre la figure 5, elle joue un double rôle : celui de matière première et celui d'agent énergétique. L'énergie nécessaire pour le pompage de l'eau dépend de sa source. La puissance pour un débit q d'une nappe se trouvant à une profondeur h est donnée par :

$$P = \rho g h q$$

où ρ est la densité de l'eau et g la constante de gravité ($9,8 \text{ m/s}^2$)

L'énergie pour le fonctionnement de ces systèmes peut être fournie soit par le module photovoltaïque soit par une énergie d'appoint. Cette énergie d'appoint peut être conventionnelle. Mais beaucoup plus importante, elle peut être une énergie éolienne ou géothermique [23, 24].

Dans le présent cas de l'évaluation de la production d'hydrogène du présent système, une estimation du rendement de ces systèmes a été effectuée en utilisant l'équation ci-dessus et en prenant le cas le plus défavorable et en estimant son effet sur le rendement du système électrolytique.

L'estimation de la production d'hydrogène a été obtenue en utilisant les rendements des différents composants du système d'électrolyse et les moyennes annuelles ou les moyennes mensuelles de l'irradiation globale journalière pour les années 1992- 1996.

5. RESULTATS

Au Tableau 3, nous avons reporté l'estimation du taux de production en se basant sur le rendement des différents systèmes et sur les moyennes annuelles de l'irradiation globale journalière. Les années prises en considérations s'étalent de 1992 à 1996. C'est une production par jour et par mètre carré de panneau photovoltaïque. Ces résultats montrent que le taux de production est très important à travers le territoire national, mais plus particulièrement le sud.

Tableau 3: Estimation du taux probable de production d'hydrogène

Site	Insolation KWh/m ²	Production H ₂ (l/m ² /j)	Site	Insolation KWh/m ²	Production H ₂ (l/m ² /j)
1 Beni- Saf	4,85	96,77	28 Constantine	4,41	87,99
2 Oran	4,59	91,52	29 Batna	4,55	90,71
3 Arzew	4,38	87,25	30 Souk Ahras	4,38	87,35
4 Mostaganem	4,55	90,75	31 Tébessa	4,78	95,35
5 Maghnia	4,91	97,96	32 Saida	4,92	98,02
6 Tlemcen	4,88	97,28	33 El Kheiter	5,02	100,03
7 Mascara	4,53	90,36	34 El Bayadh	5,00	99,74
8 S.B. Abbès	4,92	98,05	35 Mecheria	4,99	99,39
9 Chlef	4,58	91,23	36 Ain Sefra	5,32	106,12
10 Ténès	4,43	88,28	37 Naâma	5,04	100,49
11 Miliana	4,49	89,44	38 Béchar	5,57	111,08
12 Média	4,41	87,98	39 Biskra	5,08	101,21
13 Alger	4,40	87,76	40 Chardaia	5,47	109,14
14 Tizi-Ouzou	4,37	87,19	41 Thouggourt	5,23	104,20
15 Bouira	4,49	89,60	42 El oued	5,17	102,97
16 Béjaia	4,30	85,79	43 Ouargla	5,39	107,39
17 Jijel	4,34	86,55	44 El Goléa	5,71	113,89
18 Skikda	4,33	86,35	45 TSmSmoun	5,79	115,4
19 Annaba	4,36	87,00	46 Béni Abbès	5,79	115,51
20 Guelma	4,36	86,96	47 Adrar	5,93	118,14
21 Tiaret	4,82	96,00	48 In Salah	5,97	118,96
22 Djelfa	4,89	97,50	49 In Amenas	5,91	117,78
23 K.Chellala	4,89	97,48	50 Djanet	6,28	125,10
24 M'sila	4,66	92,88	51 Tamenrasset	6,15	122,53
25 Boussaâda	4,84	96,53	52 Assekrem	6,22	123,95
26 B.B.Arreridj	4,54	90,52	53 B.B.Mokhtar	6,13	122,17
27 Sétif	4,52	90,18	54 In Guezzem	6,22	123,98

Afin de déterminer les effets saisonniers et les effets régionaux, on a comparé le taux de production aussi bien mensuel que saisonnier de douze sites répartis à travers le territoire national. Les résultats ont été obtenus dans ce cas là, en prenant les moyennes mensuelles de l'irradiation globale journalière.

En figure 6, nous avons reporté la variation du taux de production en fonction du mois. On voit que pour les sites côtiers (Alger par exemple), la production n'est pas uniforme pour toute l'année : la production de Juillet est deux fois plus importante que celle de décembre ou de janvier. Cependant en se déplaçant du nord vers le sud, cet écart à tendance à diminuer.

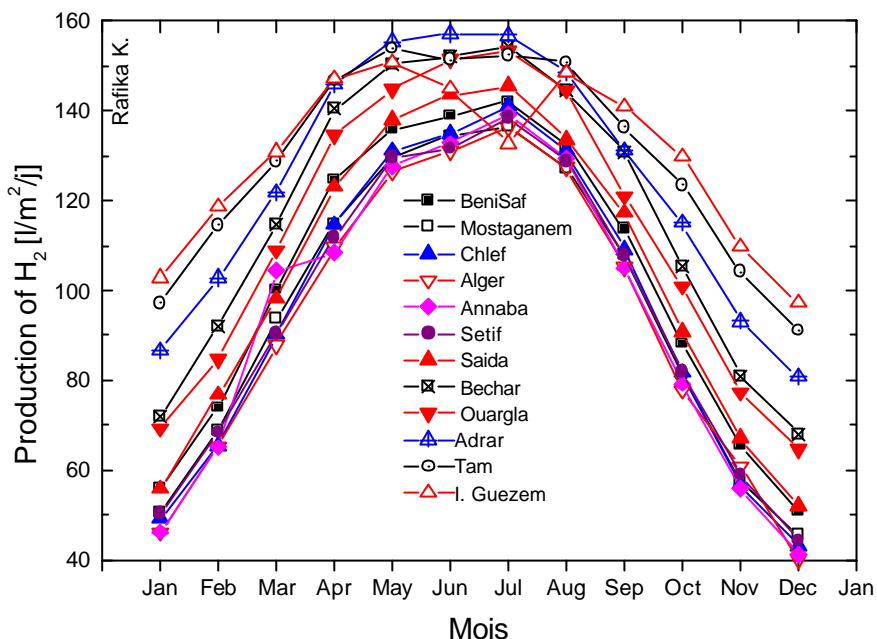


Fig. 6: Variation du taux de production d'hydrogène durant l'année Pour différents sites

Afin de mieux comparer les productions entre les différents sites, on a présenté en figure 7, la production mensuelle pour les différents sites. On voit que si la production est pratiquement la même pour le mois de juillet pour l'ensemble des sites considérés à travers le territoire national, ceci n'est pas le cas pour les autres mois où elle est nettement supérieure au sud qu'au nord : elle est de 50 % plus importante au sud pour les mois de mars et d'octobre, et au moins deux fois plus importante pour le mois de janvier.

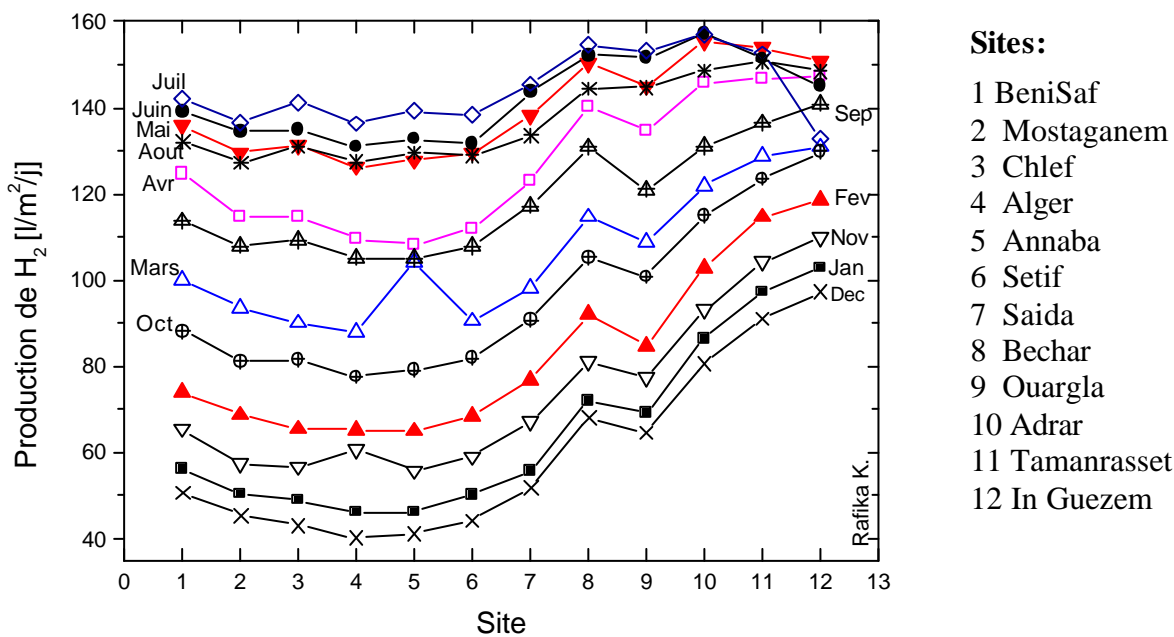


Fig. 7: Variation du taux de production d'hydrogène avec la région pour différents mois de l'année

Finalement on a comparé les productions saisonnières. Figure 8 montre la production saisonnière pour chaque site. On voit l'écart entre les productions des différentes saisons.

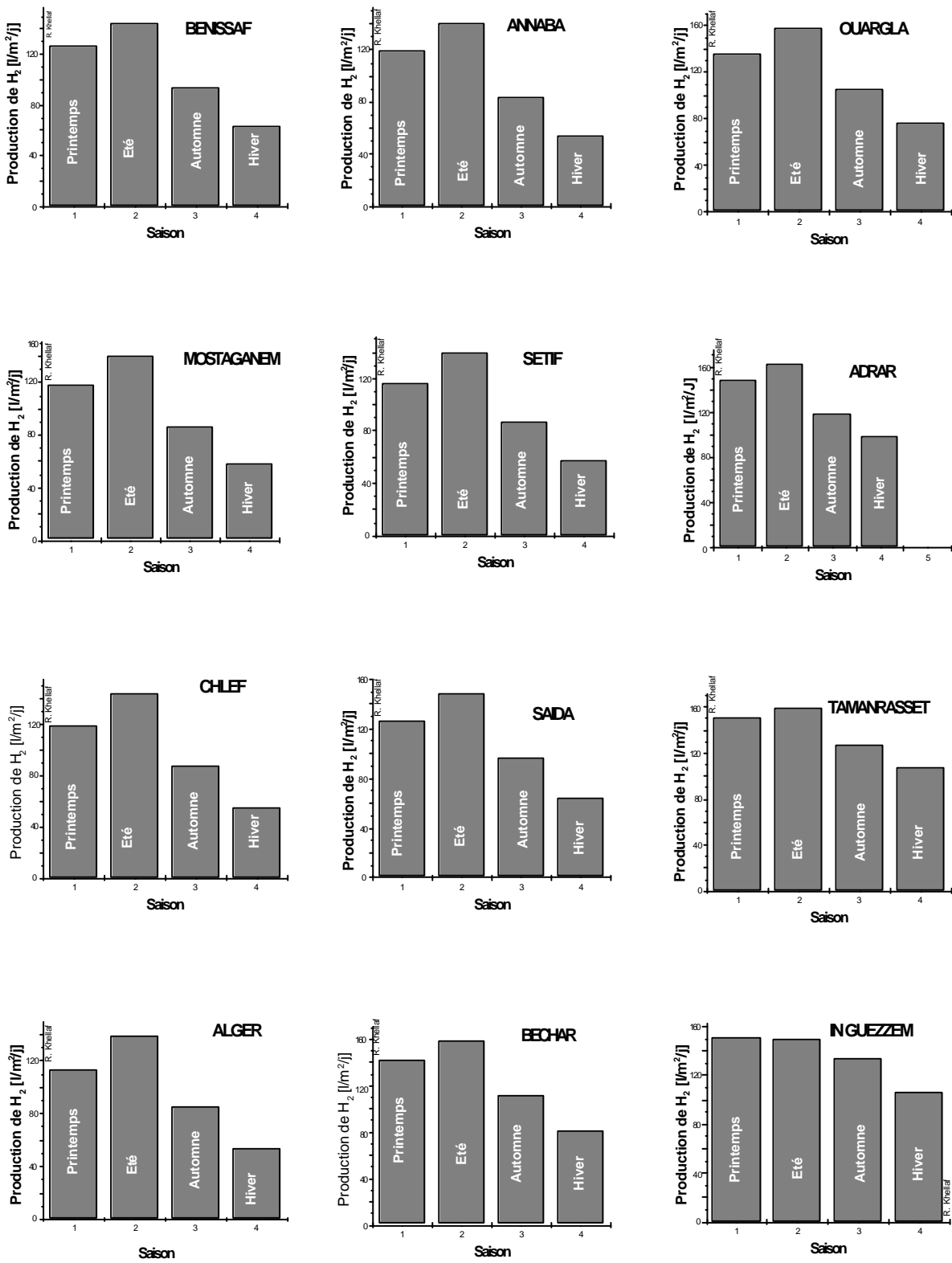


Fig. 8: Variation du taux de production de l'hydrogène avec les saisons Pour différents sites

Cet écart est particulièrement important pour le Nord. Pour Alger, par exemple, la production d'hiver représente seulement 61 % de celle de l'automne, 44 % de celle du printemps et 38 % de celle de l'été. Cependant, cet écart est nettement plus faible pour les régions du Sud. Pour Adrar, la production d'hiver présente 83 % de celle de l'automne, 67 % de celle du printemps et 61% de celle de l'été. Pour Tamanrasset, ces valeurs sont respectivement 84 %, 71 % et 67 %.

En figure 9, la production de l'ensemble des sites pour chaque saison est présentée.

On voit qu'en hiver, il y a un écart important entre les productions des différents sites. Pendant cette saison, par comparaison à la production d'Alger, celle de Tamanrasset et d'In Guezem est deux fois plus importante, celle de Bechar 53 % plus importante et celle d'Ouargla 45 % plus importante.

Toutefois cet écart est moins important pour les autres saisons, particulièrement en été. Pour l'automne, par comparaison avec la production d'Alger, celle de Tamanrasset est 56 % plus importante, celle d'In Guezem 49 % plus importante, celle de Bechar 30 % plus importante et celle d'Ouargla 23 % plus importante.

Pour le printemps ces valeurs sont respectivement 33%, 33 %, 25 % et 20 %. En été, ces valeurs se réduisent respectivement à 15 %, 8 %, 14 % et 15 %.

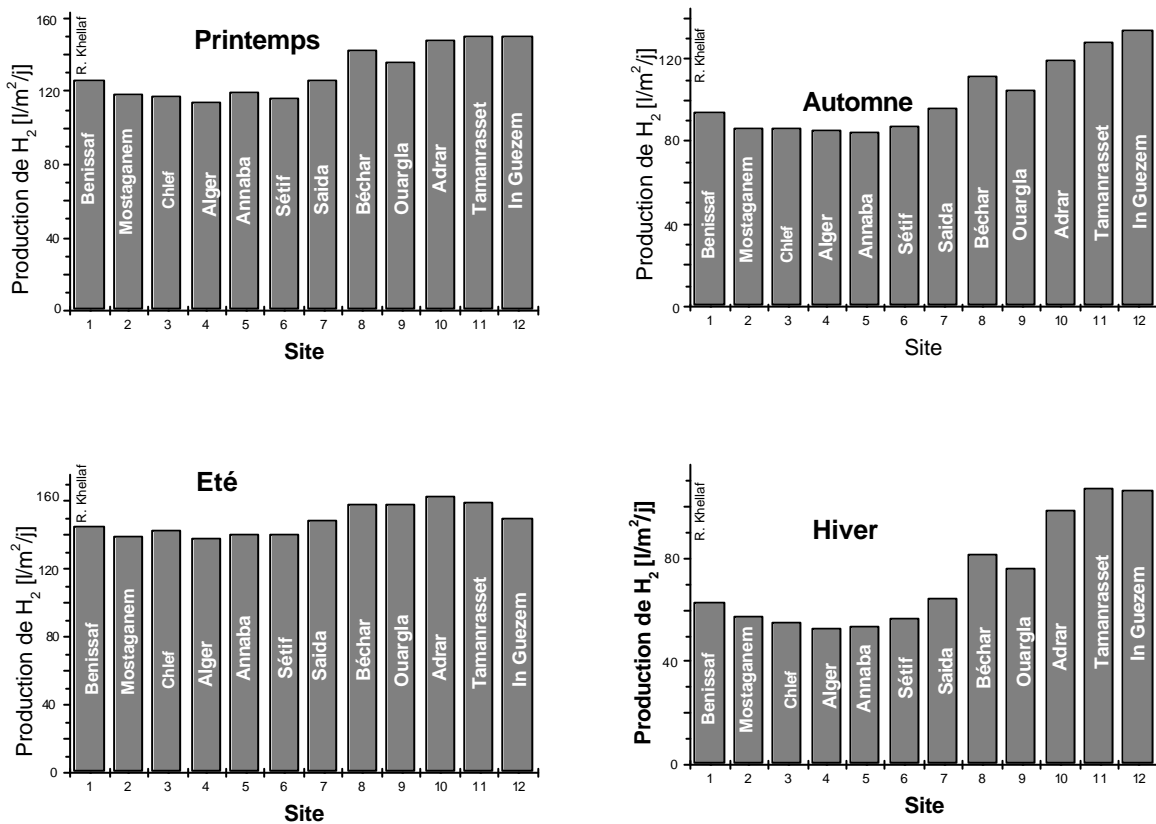


Fig. 9: Variation du taux de production d'hydrogène avec la région pour différentes saisons de l'année

6. CONCLUSION

Le taux de production de l'hydrogène utilisant un système photovoltaïque de captage de l'énergie solaire a été évalué. Cette estimation est basée sur le cas le plus défavorable. On a donc une estimation du minimum théorique que l'on peut obtenir. Toutefois les résultats montrent que la production d'hydrogène est importante. Les résultats ne sont néanmoins que des estimations du potentiel de production d'hydrogène. Ce potentiel est énorme. Il doit servir de guide dans le choix du site et le design de l'unité de production.

Le but de cette phase de l'étude est de faire ressortir les bénéfices de l'exploitation de l'hydrogène solaire. L'énergie solaire, étant une énergie diffuse, l'hydrogène solaire représente la méthode donnant le meilleur

rendement et le porteur d'énergie présentant les meilleures qualités. On a aussi utilisé des données moyennes pour mettre en évidence avec précision les variations saisonnières. Le travail est en cours avec d'autres données et une estimation plus rigoureuse.

Toutefois, le taux de production et le rendement doivent être définis par des mesures sur terrains.

L'utilisation de l'énergie éolienne soit comme énergie d'appoint soit pour le pompage de l'eau augmentera la production d'au moins 30 %.

Ces résultats montrent clairement que le potentiel de production d'hydrogène dans les régions du sud est très importante. Les immenses terres. L'utilisation des terres arides et improductives permet un développement local avec création d'emploi et d'infrastructure.

REFERENCES

- [1] C. Devillers, K. Pehr, J. S. Duffield, D. Weinmann, H. Vandenborre, A. Gonzales, R. Wurster, M. Kester, F. Heurtaux et P. Ekdunge, "European Integrated Hydrogen Project", 12th World Hydrogen Energy Conference, Buenos Aires, Argentina, 1998.
- [2] B. Arnason et T. I. Sigfúson, "Iceland_ A future Hydrogen Economy", Int. J. Hydrogen Energy 25 (2 000) 389.
- [3] Gibbons P. C. et K. F. Kelton "Toward Industrial Applications", dans Physical Properties of quasicrystals, ed. Z. M. Stadnik, springer Verlag Frankfurt, (1999)
- [4] L. Hamane et A. Khellaf, "Wind Energy Resource in Algeria", Proceedings of the World Energy Congress VI, 1-7 juillet 2000 (United Kingdom)
- [5] T. N. Veziroglu, "Hydrogen Energy System: a Permanent Solution to Global Problems", I.A.H.E. 1999.
- [6] R. Momirlan et T. Veziroglu, "Recent directions of world hydrogen production", Ren. Sust. Energy Rev. 3 (1999) 219
- [7] J. Paladin, T. N. Veziroglu et A. Shahin, "Hybrid Solar High-Temperature Hydrogen Production System", Int. J. Hydrogen Energy 25 (2000) 295.
- [8] W. Pyle, J. Healy et R. Cortez, "Solar Hydrogen Production by Electrolysis", Home Power 39 (1994) 32.
- [9] J. Divisek, B. Steffen et H. Schmitz, "Theoretical Analysis and Evaluation of the Operation Data of a Bipolar Water Electrolyser", Int. J. Hydrogen Energy 19 (1994) 579.
- [10] J. Miyake, T. Wakayama, J. Schnackenberg, T. Arai et Y. Asada, "Simulation of the Daily Sunlight Illumination Pattern for Bacterial Photo-Hydrogen Production", J. Biosc. Bioeng. 88: (1999) 659
- [11] D. O. Hall S. A. Markov, Y. Watanabe et K. K. Rao, "The Potential Applications of Cyanobacterial Photosynthesis for Clean Technologies", Photosynthesis Research 46: (1995) 159
- [12] G. B. Saupe, T. E. Mallouk, W. Kim et R. H. Scmehl, "Visible Light Photolysis of Hydrogen Iodide using Sensitized Layered Metal Oxide Semiconductors : The Role of Surface Chemical Modification in Controlling back Electron Transfer Reactions", J. Phys. Chem. B101 (1997) 2508.
- [13] K. E. Karakitsou et X. E. Verykios, "Effects of Altrivalent Cation Doping of TiO₂ on its Performance as a Photocatalyst for Water Cleavage", J Phys Chem 97: (1993) 1184
- [14] J. R. Bolton, "Solar Photoconduction of Hydrogen : A Review", Solar Energy 57 (1996)37.
- [15] M. A. Pena, J. P. Gomez et J. L. G. Fiero, "New Catalytic Routes for Syngas and Hydrogen Production", Applied Catalysis A : General 144(1996)7.
- [16] M. Sakurai, E. Bilgen, A. Tsutsumi et K. Yoshida, "Solar UT-3 Thermochemical Cycle for Hydrogen Production", Solar Energy 57 (1996)51.
- [17] H. Ohya, H. Nakajima, N. Togami, M. Aihara et Y. Negishi, "Separation of Hydrogen from Thermochemical Processes using Zirconia Silica Composite Membrane", J Membrane Sci 97(1994)91
- [18] M. Lundberg, "Model-Calculations on some Feasible 2-Step Water Splitting Processes", Int. J Hydrogen Energ 18: (1993) 369
- [19] R. Holzinger, C. Warneke, A. Hansel, A. Jordan, W. Lindinger, D. H. Scharffe, G. Schade et P. Grutzen, "Biomass Burning as a Source of Formaldehyde, Acetaldehyde, Methanol, Acetone, Acetonitrile and Hydrogen Cyanide, Geophysical", Res. Lett : 26(1999)1161.
- [20] J. H. R. Enslin et D. B. Snyman, "Combined Low cost, High Efficiency Inverter, Peak Tracker and Regulator for PV Applications", IEEE Trans. Power Electron6, 2(1991)73-82.
- [21] Y. C. Huang, H. Goto, A. Sato, T. Hayashi et H. Uchida, "Solar Energy Storage by Metal Hydride", Z. Phys. Chem. Neue Folge 164 (1989) 1391.
- [22] W. Zittel et R. Wurster, "Hydrogen in the Energy Sector", Ludwig-Bölkow Systemtechnik GmbH (1996)
- [23] R. G. Crocket, M. Newborough, D. J. Highgate et S. D. Probert, "electrolyser-based electricity management", Appl. Energy 51 (1995) 249.
- [24] V. K. Jonsson, R. Gunnarson, B. Arnason et Th. I. Sigfúson, "The Feasibility of Using Geothermal Energy in Hydrogen Production", Geothermics 211 (1993) 673.