



L'hydrogène en tant que Carburant dans le Secteur du Transport : Cas de l'Algérie

R. Boudries^{#1}

[#]Division Hydrogène Energies Renouvelable

Centre de Développement des Energies Renouvelables

BP 62, Route de l'Observatoire, Bouzareah, 6240 Alger, Algérie

¹r.boudries@cde.dz

Résumé— Les problèmes liés plus particulièrement à l'émission des gaz à effet de serre et à la disponibilité du carburant ont été engendrés par l'expansion du secteur de transport. Strictes réglementations, amélioration des rendements des moteurs et des carburants alternatifs ont été proposés pour faire face à ces problèmes. Toutefois, un carburant n'est approprié que s'il répond aux critères de performance, disponibilité et de coût. De par sa caractère polyvalent et renouvelable, l'hydrogène, en tant que carburant, offre le meilleur potentiel pour faire face aux problèmes soulevés par l'utilisation des carburants conventionnels.

En Algérie, s'il est reconnu que le secteur du transport est un secteur névralgique de l'économie nationale, il n'en demeure pas moins qu'il est, de l'avis de tout un chacun, que c'est un secteur qui consomme plus d'énergie qu'il n'en faut et qui est très polluants. Tenant compte du fait que ce secteur ne fait que se développer et de ce fait les problèmes y afférents ne font qu'empirer, le besoin urgent de s'en occuper s'impose.

L'objectif de ce travail est l'étude de la viabilité économique de l'hydrogène en tant que carburant dans le secteur du transport en Algérie. La technique de production d'hydrogène considérée est celle du PV-électrolyseur. First, tenant compte des données technico-économiques, le coût de production d'hydrogène est déterminé. Tenant compte des avancés technologiques et de la courbe d'apprentissage, l'évolution de ce coût est étudiée. Par la suite, la compétitivité de l'hydrogène avec les carburants conventionnels.

Mot-clés— carburant hydrogène, carburant alternative, carburant conventionnel, système PV-électrolyseur, Algérie, étude économique

I. INTRODUCTION

Le transport a, de tout temps, joué un rôle fondamental dans l'épanouissement des civilisations. Les secteurs économique, social et même militaire ont besoin de moyens de transport performants pour se développer. Poussé par l'exigence de moyens de plus en plus puissants le secteur du transport a subi des mutations à travers les âges. Ces mutations se sont accompagnées de changement dans la nature du carburant requis mais aussi par la génération d'impacts, la plupart du temps négatifs, sur l'environnement.

Le cheval est resté pendant très longtemps le moyen de transport favori. Le carburant requis par ce moyen de transport

est très répandu dans la nature et le problème de pollution ne se posait pas. Avec l'avènement de la machine à vapeur une mutation profonde s'est opérée. Les moyens de transport se sont mécanisés et les besoins énergétiques ont non seulement changé mais augmenté. Un nouveau problème est engendré pour la production et l'utilisation de ce nouveau carburant. La déforestation devenait un problème majeur.

La mise au point du moteur à combustion et la découverte des hydrocarbures ont sauvés les forêts. Le secteur du transport a connu alors une expansion sans précédent. Toutefois non seulement le problème de pollutions 'est aggravé mais la demande énergétique s'est accrue avec de réels risques de pénuries énergétiques.

Pour faire face à ces problèmes, des actions sont entreprises. Ces actions doivent menées non vers des technologies à faible émission de gaz polluants et hauts rendements mais aussi vers le remplacement des carburants conventionnels. A long terme, la solution est dans l'introduction de carburants alternatifs propres. Un intérêt est actuellement porté sur le gaz naturel, le propane, l'éthanol, le méthane et l'hydrogène. De tous ces alternatifs carburants, l'hydrogène offre la perspective de résoudre les problèmes posés sans apparemment y engendrer d'autres.

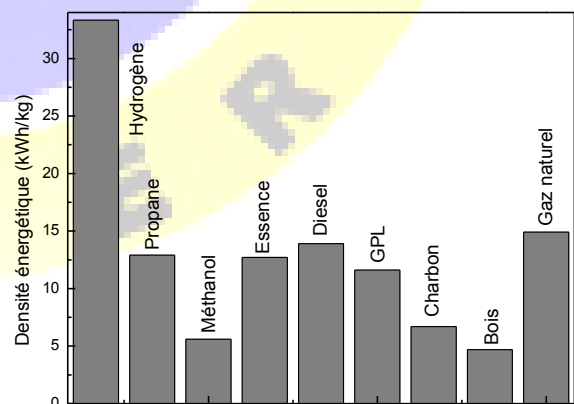


Fig. 1 : Comparaison des densités énergétiques de différents carburants.

L'hydrogène possède des propriétés uniques qui font de lui un excellent alternatif carburant. De la figure 1, on voit qu'il a la plus grande densité énergétique massique. De plus, sa



combustion ne produit aucun produit carbonique que ce soit le monoxyde de carbone ou le dioxyde de carbone. Il peut aussi être produit à partir d'une variété d'énergies primaires. L'hydrogène est versatile dans sa transformation énergétique. Il génère de l'énergie soit sous forme de chaleur par combustion avec l'oxygène, soit sous forme électrique par conversion chimique.

Pour l'Algérie, l'introduction de l'hydrogène dans le secteur du transport ouvre d'indéniables opportunités. D'abord, il permet l'exploitation des énormes ressources particulièrement solaires. Ensuite, il permet au pays de subvenir aux besoins énergétiques qui sont en pleine expansion et de contribuer aux régions isolées du grand sud.

Le présent travail traite de la viabilité économique de l'hydrogène en tant que carburant du secteur de transport. La technique de production d'hydrogène considérée est celle du PV-électrolyseur. First, tenant compte des données technico-économiques, le coût de production d'hydrogène est déterminé. Les effets des avancés technologiques et de la courbe d'apprentissage sur le coût de production sont étudiées. Par la suite, la compétitivité de l'hydrogène avec les carburants conventionnels.

II. EVALUATION DU POTENTIEL DE 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 capter l'énergie solaire et les cellules électrolytiques pour décomposer l'eau est de loin le système le plus attrayant et le plus simple. L'électrolyse de l'eau pour la production d'hydrogène est une technique largement répandue qui a atteint la phase industrielle.

L'utilisation de l'énergie solaire dans les procédés d'électrolyse s'avère être la plus viable et la plus protectrice de l'environnement. Comme l'électricité à courant continu générée par le panneau photovoltaïque convient parfaitement aux systèmes d'électrolyse, la majorité des systèmes produisant de l'énergie à partir du soleil utilise des systèmes photovoltaïques pour la génération d'électricité pour l'électrolyse de l'eau [3]. Le système de PV-électrolyseur est particulièrement intéressant car il offre flexibilité et modularité et il est technologiquement mûr [4]. Comme reporté en Figure 2, l'unité PV – électrolyseur couramment utilisés incluent:

1. Des panneaux photovoltaïques pour capter et convertir l'énergie solaire en énergie électrique requise par l'électrolyseur pour la décomposition de l'eau. Plusieurs modèles [5], aussi bien théoriques que semi empiriques, existent pour la détermination de l'énergie électrique générée. Dans le présent

travail, les relations semi-empiriques, avec les données météorologiques et radiométriques et les caractéristiques des modules photovoltaïques, ont été utilisées pour l'estimation de l'énergie produite par le module photovoltaïque [6].

2. Le système de mise en forme et de conditionnement du signal issu du module photovoltaïque. Des études sur ces systèmes [7] ont montré que leur rendement ne dépasse pas les 97 %. Une valeur très conservatrice de ce rendement serait de l'ordre de 85 %.

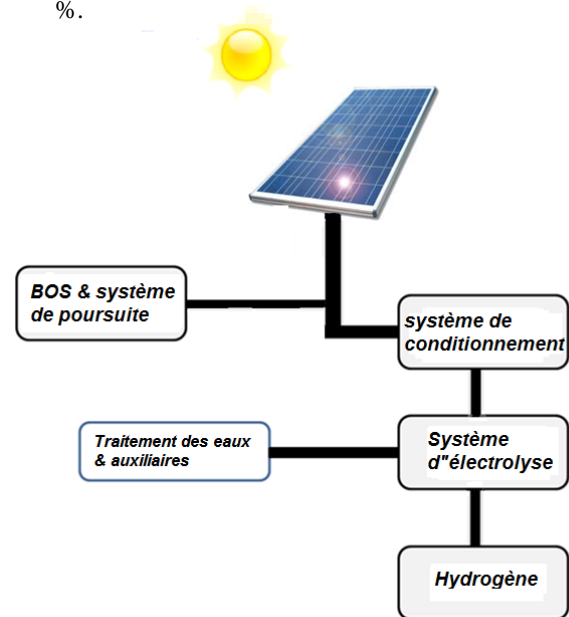


Fig.2 : unité de production d'hydrogène

Le système d'électrolyse qui comprend l'ensemble des cellules d'électrolyse pour la dissociation de la molécule d'eau en hydrogène et en oxygène. Dans le présent travail, on s'est placé dans le cas d'un électrolyseur alcalin avec une solution aqueuse à 30 % en masse d'hydroxyde de potassium (KOH) comme électrolyte. L'énergie de dissociation de l'eau est théoriquement déterminée à partir de l'enthalpie de dissociation de l'eau [8]. Toutefois, suite aux différentes pertes dans l'électrolyseur, elle est nettement plus grande. Différentes méthodes [9] ont été utilisées pour déterminer la valeur de cette énergie qui dépend aussi bien de la nature des électrodes et de l'électrolyte que de sa température et de la pression d'écoulement des différents fluides. Dans l'état actuel de la technologie, elle varie entre 3.5 kWh/m³ à 5 kWh/m³ pour des pressions allant jusqu'à 30 bars et des températures jusqu'à 120 °C.

En plus de ces systèmes, on doit prendre en compte les systèmes auxiliaires tels que les systèmes de contrôle et de séparation des gaz produits et le système d'alimentation et de



traitement de l'eau. L'eau utilisée dans l'électrolyse peut provenir de différentes sources. Au nord, l'eau de mer constitue une source inépuisable d'eau. Au sud, elle peut être prise de l'importante nappe phréatique qui, dans certains cas comme celui de la région d'Adrar, n'est qu'à quelques mètres de la surface.

En plus des caractéristiques de performance des composants du système PV-électrolyseur, les capacités de production d'hydrogène de ce système sont également fonction d'une part de l'intensité et de la distribution du rayonnement solaire, et d'autre part de la taille, de la position et de l'orientation des panneaux PV. L'énergie solaire a été déterminée à partir des données météorologiques [10] et des mesures de rayonnement [11]. L'énergie solaire reçue par mètre carré de panneau photovoltaïque a été estimée pour les panneaux fixes, pour le système de poursuite Nord/Sud (N/S).

III. ETUDE ECONOMIQUE DE LA PRODUCTION D'HYDROGENE

Dans le cas actuel, le coût de production d'hydrogène peut être divisé en trois parties:

- Le coût de l'électricité requis par l'électrolyseur pour la production de l'hydrogène. Le système de production de l'électricité, dans le cas actuel, inclut les modules photovoltaïques et tous leurs accessoires.
- Le coût de l'électrolyse de l'eau pour la production de l'hydrogène. Dans le cas actuel, le système d'électrolyse inclut l'électrolyseur et tous ses accessoires.
- Le coût du fonctionnement et de l'entretien (O&M) et les coûts y afférents.

A. Coût du système PV

Dans le système actuel, l'électricité requise par l'électrolyseur pour la production de l'hydrogène est produite in situ en utilisant un système PV-solaire. Il a été montré [12] que le coût d'un tel système pourrait être divisé en:

- le coût capital des modules photovoltaïques,
- le coût du BOS qui inclut toutes les parties du système de photovoltaïque excepté le module photovoltaïque lui-même.

Pour les modules photovoltaïques, les cellules photovoltaïques sont considérées du type de cristaux de silicium. Le rendement des panneaux photovoltaïques et de celui du BOS du module photovoltaïques sont prises égales à 12 % et 89 % respectivement [13]. Le coût des modules PV, sous la poussée de l'innovation technologique, a rapidement baissé depuis le commencement de leur commercialisation. Dans le cas actuel, le coût capital des modules photovoltaïques est pris variant de la valeur actuelle à la valeur prévue idéalement par les courbes d'apprentissage.

Le coût capital est pris variant entre 2,5 \$/Wp et 0,2\$/Wp. Dans le travail actuel, le coût additionnel du système de

poursuite est pris égal à 10 % du coût du BOS du système photovoltaïque.

Afin de déterminer l'effet de la technologie sur le coût de production d'hydrogène, la variation de ce coût de production est étudiée en fonction du rendement du module photovoltaïque.

B. Coût du système d'électrolyse

Différents modèles ont été proposés pour estimer le coût du système d'électrolyse [14]. Certains modèles [15] supposent que le coût est fonction de la taille du système et de la densité du courant nominal de l'électrolyseur jusqu'à 15 kA/m². D'autres [14] ont supposé que les coûts liés au système de l'électrolyseur peuvent être divisés en deux parties.

La première partie est le coût des équipements (l'électrolyseur et ses auxiliaires). La deuxième partie est le coût afférent, i.e., le coût de l'installation, de la mise en marche, etc.

Dans la présente étude, ce dernier modèle a été adopté. Dans ce cas, les coûts du système d'électrolyseur peuvent être exprimés par la relation suivante [16]:

$$C_{elsc} = \frac{K_{el}}{31,536 \eta_r CF} C_{em} \left[f_1 + (1 - f_1) \frac{i_r}{i} + \frac{f_2}{2} \left(1 + \frac{i_r}{i} \right) \right]$$

La technologie de l'électrolyseur considérée est celle du type unipolaire. Ses caractéristiques peuvent être trouvées dans la littérature. Les valeurs de f_1 et de f_2 sont prises comme étant égales à 0,90 et 0,45 respectivement [17]. Les valeurs du courant nominal et du courant de fonctionnement sont prises égales à 134 mA/cm² et 268 mA/cm² respectivement. L'efficacité à la tension de fonctionnement est prise égale à 0,84 et le coût capital de l'unité de système d'électrolyse est 170 \$/kW.

IV. COMPARAISON DE L'HYDROGENE AVEC D'AUTRES CARBURANTS

A. Equivalent essence de l'hydrogène

La présente étude est limitée au cas de la comparaison avec les carburants conventionnels du secteur du transport. En effet pour déterminer la compétitivité économique de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique, une comparaison de l'hydrogène en tant que carburant a été menée avec les carburants conventionnels les plus courants, à savoir l'essence, le diesel et le GPL. Les propriétés de ces carburants sont reportées au Tableau I. Les coûts de ces carburants sont ceux affichés par les stations Naftal d'Alger.

Il est à noter que la comparaison de l'hydrogène aux carburants conventionnels se fait au niveau du contenu énergétique. De ce fait, on fait appel alors à la notion de l'équivalent essence de l'hydrogène [18]. Le coût équivalent essence d'hydrogène est pris comme étant égal au coût



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014



d'hydrogène par unité de volume équivalent essence de l'hydrogène. Le coût relatif, rapport du coût équivalent essence d'hydrogène au coût de l'essence permet de déterminer la viabilité économique de l'hydrogène en tant que carburant. Un coût relatif inférieur à un est une indication de la bonne compétitivité de l'hydrogène en tant que carburant.

TABLEAU I
Propriétés et coûts des carburants conventionnels

	Densité énergétique (kJ/l)	coût (DA/l)*	Emission CO ₂ (kg/l)
Essence	32920	23	2,3
Diesel	38472	13,9	2,6
GPL	35078	9	1,7

On a considéré deux cas :

- Dans le premier cas, le coût de l'essence est pris comme étant égal au prix affiché au niveau des stations Naftal.
- Dans le deuxième cas, le coût de l'essence est pris comme la somme du prix affiché par les stations Naftal et le coût de l'émissions du CO₂ par l'essence lors de son utilisation. Le coût actuel de l'émission du CO₂ varie entre \$ 20 et \$ 100. Un prix conservateur de \$ 30 a été considéré dans cette étude.

La comparaison a été menée pour les trois carburants. Les coûts de l'hydrogène sont ceux déterminés pour le système PV-électrolyseur étudié dans ce travail. L'étude est menée pour différents coûts unitaires du module photovoltaïque et différentes valeurs du rendement du module photovoltaïque.

B. Cas de véhicule léger à moteur à combustion interne

L'étude menée ci-dessus n'est que pour comparer les coûts des différents carburants en se basant uniquement sur le contenu énergétique de chacun d'eux. Toutefois une évaluation plus précise serait de tenir compte des efficacités des systèmes. A cette fin, le cas d'un véhicule à moteur à combustion interne est pris comme exemple et est étudié. Suivant la nature du carburant, trois types de moteurs sont considérés [19]:

- Le premier est un moteur à essence. Sa consommation est de l'ordre de 8 l au 100 km.
- Le deuxième est un moteur à hydrogène. Il a été montré qu'un moteur à hydrogène consomme moins d'énergie qu'un moteur à essence. Le moteur à hydrogène représente une efficacité 15 % supérieur à celle d'un moteur à essence à combustion interne.

- Le troisième type est celui d'un moteur à carburant mixte. On considère le cas d'un carburant mixte à 45 % hydrogène et 55 % essence. Des études menées sur ce type de moteur ont montrés qu'il y a une réduction de consommation énergétique de l'ordre de 30 % par rapport à un moteur à essence.

Pour déterminer la compétitivité des trois types de moteurs, on a étudié le coût du carburant au 100 km pour chaque type de moteur. A cette fin on a considéré quatre cas de figures :

- Dans le premier cas, on considère le coût de l'hydrogène à la production et on ne tient pas compte du coût de l'émission du CO₂.
- Dans le deuxième cas, on considère le coût de l'hydrogène à la production mais on tient compte du coût de l'émission du CO₂.
- Dans le troisième cas, on considère le coût de l'hydrogène à la distribution et on ne tient pas compte du coût de l'émission du CO₂.
- Dans le quatrième cas, on considère le coût de l'hydrogène à la distribution mais on tient compte du coût de l'émission du CO₂.

V. RESULTATS ET DISCUSSIONS

A. Coût de production de l'hydrogène

Le coût de production de l'hydrogène est la somme des deux coûts précédemment rapportés, c'est-à-dire., le coût de système PV et le coût de système d'électrolyse. Les coûts de production de l'hydrogène sont étudiés aussi bien pour différents coût and différentes efficacité du module PV que pour différentes technologies des électrolyseurs.

De la figure 3 on voit que le coût relatif de l'électricité représente jusqu'à 90 % du coût total de production de l'hydrogène.

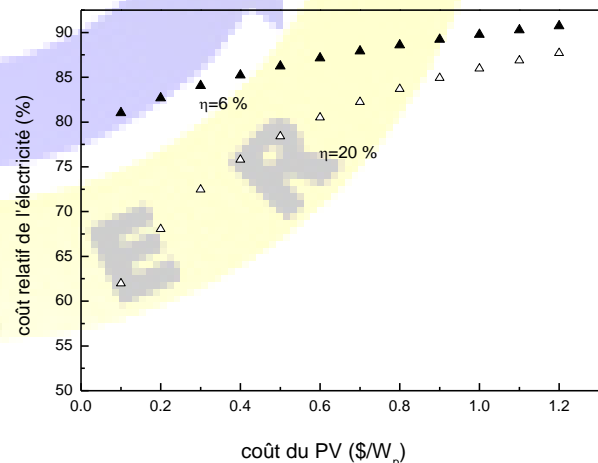


Fig. 3 Coût relatif de production de l'électricité

Ces résultats sont pour le site de Sétif. Similaires résultats sont trouvés pour les autres sites. Ce coût relatif diminue avec



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 13 et 14 Octobre 2014



l'amélioration du rendement des panneaux photovoltaïques et surtout de leur coût. Pour un coût de PV de 0,1 \$/W_p et un rendement de 20 %, le coût de l'électricité représente à peu près 62 % du coût total de production d'hydrogène.

Pour déterminer l'effet de la technologie d'électrolyse, on a déterminé le coût de production d'hydrogène dans différents types d'électrolyseurs. Figure 4 montre clairement que le coût de l'électrolyse de l'eau reste le plus élevé, à peu près 23 % plus élevé que dans le cas de l'électrolyseur unipolaire, en utilisant les électrolyseurs de type SPE. Le coût est le plus bas avec les électrolyseurs bipolaires, à peu près 10 % moins cher que dans le cas de l'électrolyseur unipolaire

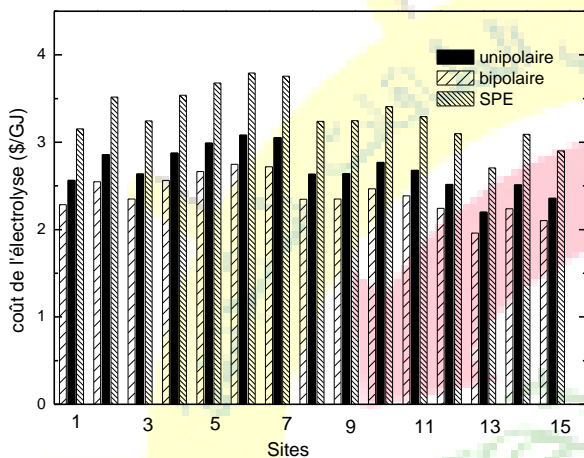


Fig.4 Coût d'électrolyse de l'eau pour différents technologies (1 Oran, 2 Médéa, 3 Alger, 4 Blida, 5 Bejaia, 6 Annaba, 7 Sétif, 8 Saïda, 9 Béchar, 10 Ghardaïa, 11 Ouargla, 12 Adrar, 13 Tamanrasset, 14 In Salah, 15 In Guezzem)

Pour déterminer l'évolution du coût de production de l'hydrogène tenant compte de l'évolution du coût capital du module photovoltaïque, le coût de production d'hydrogène a été étudié.

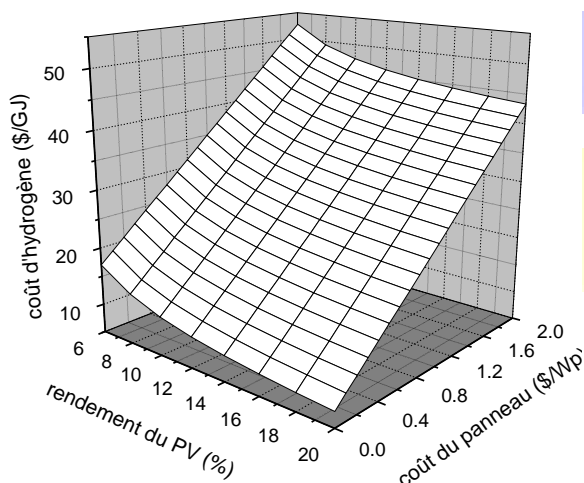


Fig. 5 Evolution du coût de production d'hydrogène avec

le rendement et le coût capital du PV

En Figure 5, on reporte la variation du coût de production de l'hydrogène en fonction du rendement des panneaux photovoltaïques et de leur coût. Cette courbe montre que ce coût diminue avec une réduction du coût des panneaux photovoltaïques et une amélioration de leur rendement.

Les résultats actuels montrent une réduction de plus de 62 % du coût de génération d'électricité par photovoltaïque solaire pendant que le prix du PV chute de 2,5 \$/W_p à 0,5 \$/W_p. Cette réduction est le résultat des avancés technologiques et de l'amélioration dans la fabrication.

B. Coût équivalent de l'hydrogène

En Figure 6, on a étudié l'évolution du coût relatif de l'équivalent essence de l'hydrogène en fonction du rendement et du coût du module photovoltaïque.

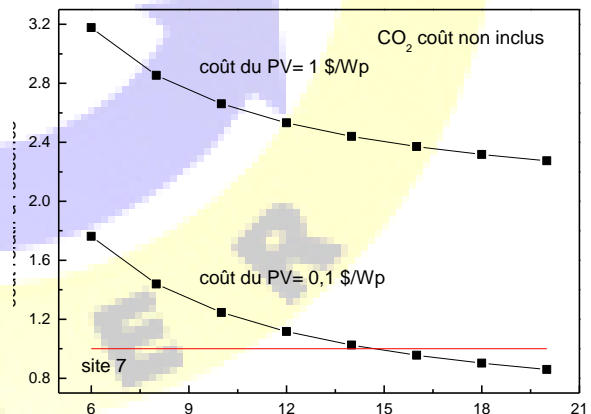
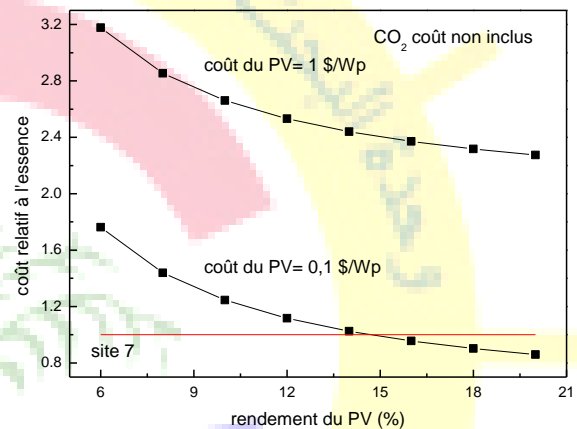


Fig. 6 Evolution du coût relatif de l'équivalent essence de l'hydrogène.

On voit de cette figure que, dans le cas où le coût du CO₂ n'est pas pris en compte, l'hydrogène est plus compétitif que l'essence pour un coût du module photovoltaïque de 0,1 \$/W_p et pour des rendements à partir 14 %.

Toutefois, si on inclut le coût du CO₂, l'hydrogène devient plus compétitif que l'essence pour un coût du module



photovoltaïque supérieur à 0,1 \$/Wp et pour des rendements à partir de 11 %.

En Figure 7, on a étudié l'évolution du coût relatif de l'équivalent diesel de l'hydrogène en fonction du rendement du module photovoltaïque et de son coût unitaire.

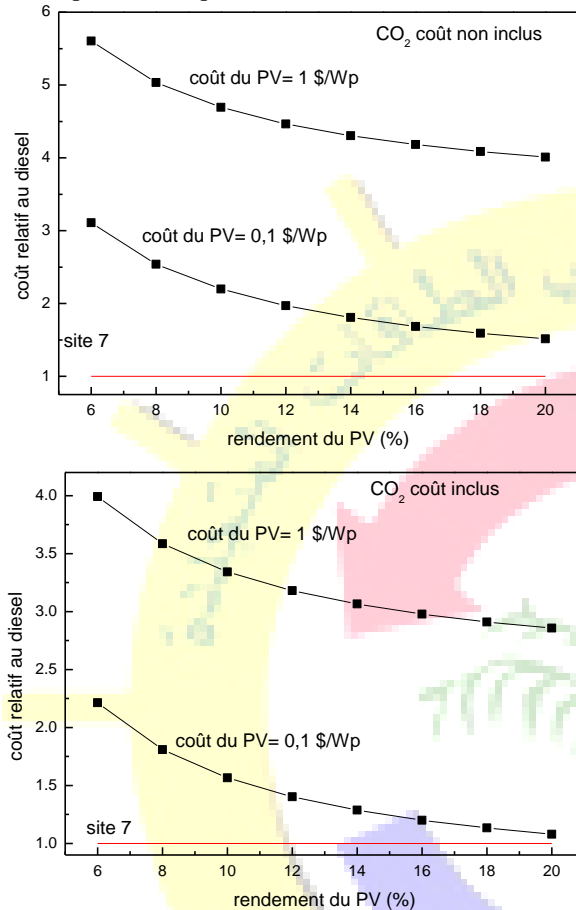


Figure 7 : Evolution du coût relatif de l'équivalent diesel de l'hydrogène

On voit de cette figure que, dans le cas où le coût du CO₂ n'est pas pris en compte, l'hydrogène n'est compétitif avec le diesel que pour des coûts unitaires du module photovoltaïque nettement inférieurs à 0,1 \$/Wp, des coûts difficiles à atteindre dans le futur proche.

Toutefois, si on inclut le coût du CO₂, l'hydrogène devient plus compétitif que l'essence pour un coût unitaire du module photovoltaïque proche de 0,1 \$/Wp mais pour des rendements supérieur à 20 %.

Il est important de noter que cette étude ne tient compte que du contenu énergétique. Toutefois, les résultats différeront si on tient compte des efficacités des systèmes.

Une étude similaire a été menée pour le GPL. L'étude montre que, d'un point de vue du contenu énergétique, le GPL est de loin le plus compétitif.

C. Cas du véhicule à moteur à combustion interne

En Figure 8, on montre l'évolution du coût à la production du carburant au 100 km dans le cas où le coût du CO₂ émis par la combustion du carburant n'est pas inclus.

Dans chaque cas, la ligne horizontale indique le coût du carburant pour le moteur à essence.

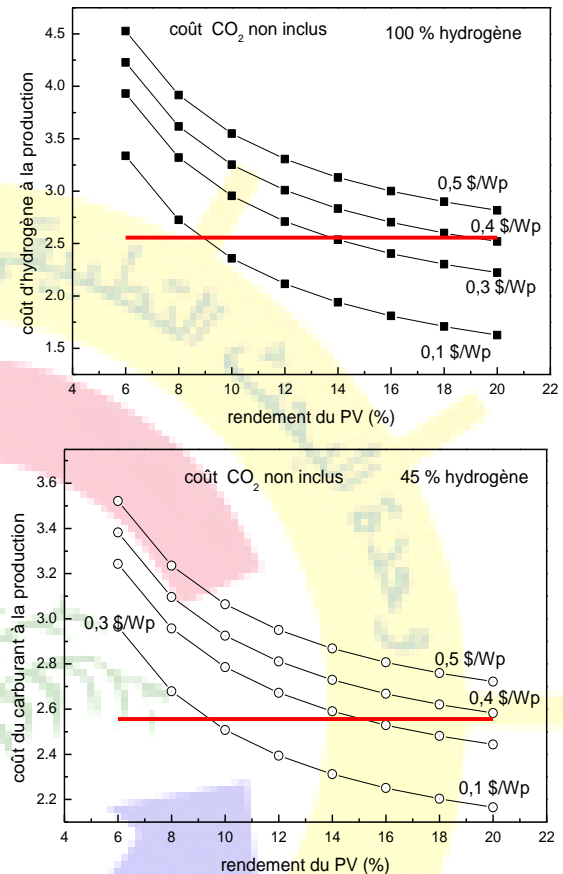


Fig. 8 Evolution du coût à la production du carburant pour différents moteurs. Cas où le coût du CO₂ émis n'est pas inclus.

Dans le cas où le coût du CO₂ émis par le véhicule durant la combustion du carburant n'est pas pris en compte, cette figure montre que l'hydrogène et le carburant mixte ne deviennent compétitif avec l'essence que pour des coûts du module photovoltaïque en dessous de 0,4 \$/Wp.

De cette figure, on peut aussi en déduire qu'à coût unitaire du module photovoltaïque égal, l'hydrogène devient plus compétitif que le carburant mixte pour des rendements plus faible du module photovoltaïque.

En Figure 9, on montre l'évolution du coût à la production du carburant au 100 km dans le cas où le coût du CO₂ émis par la combustion du carburant est inclus. La ligne horizontale indique toujours le coût du carburant pour le moteur à essence.

Dans le cas où le coût du CO₂ émis par le véhicule durant la combustion du carburant est pris en compte, la Figure montre que l'hydrogène et le carburant mixte ne deviennent



compétitif avec l'essence que pour des coûts du module photovoltaïque en dessous de 0,6 \$/Wp.

CO₂ émis par la combustion du carburant est inclus. La ligne horizontale indique le coût du carburant pour le moteur à essence

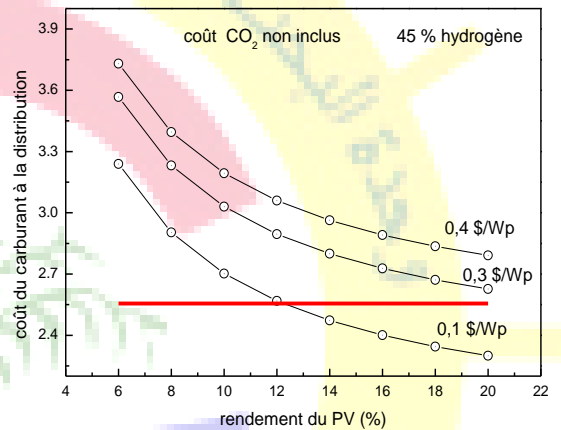
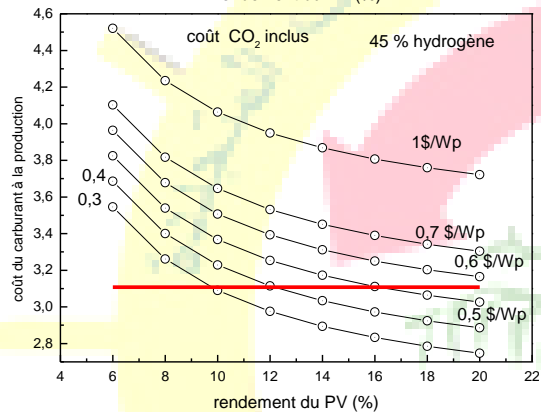
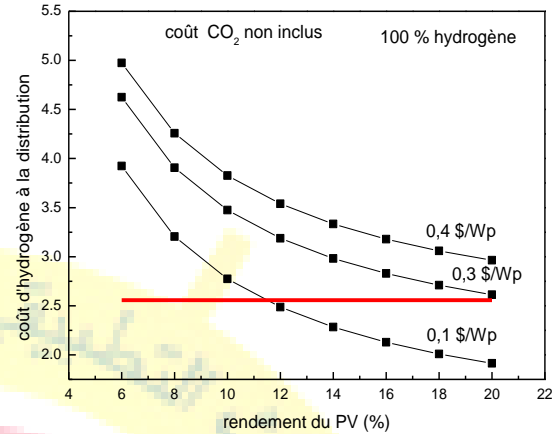
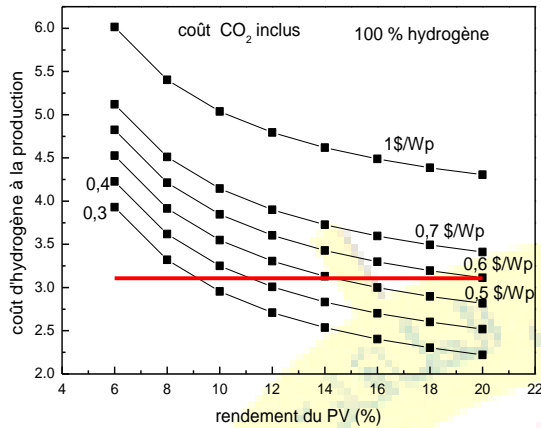


Fig. 9 Evolution du coût à la production du carburant pour différents moteurs. Cas où le coût du CO₂ émis est inclus

Fig. 10 Evolution du coût à la distribution du carburant pour différents moteurs. Cas où le coût du CO₂ émis n'est pas inclus.

Là aussi, la figure indique qu'à coût unitaire du module photovoltaïque égal, l'hydrogène devient plus compétitif que le carburant mixte pour des rendements plus faible du module photovoltaïque.

En Figure 10, on a reporté l'évolution du coût à la distribution du carburant au 100 km dans le cas où le coût du CO₂ émis par la combustion du carburant n'est pas inclus.

La ligne horizontale indique le coût du carburant pour le moteur à essence.

Dans le cas où le coût du CO₂ émis par le véhicule durant la combustion du carburant n'est pas pris en compte, la Figure montre que l'hydrogène et le carburant mixte ne deviennent compétitif avec l'essence que pour des coûts du module photovoltaïque en dessous de 0,3 \$/Wp.

Là, la figure montre qu'à coût unitaire du module photovoltaïque égal, le carburant hydrogène est aussi compétitif que le carburant mixte pour des rendements presque égaux du module photovoltaïque.

En Figure 11, on a reporté l'évolution du coût à la distribution du carburant au 100 km dans le cas où le coût du

Dans le cas où le coût du CO₂ émis par le véhicule durant la combustion du carburant est pris en compte, la Figure montre que l'hydrogène et le carburant mixte ne deviennent compétitif avec l'essence que pour des coûts du module photovoltaïque en dessous de 0,4 \$/Wp.

Là aussi, la figure montre qu'à coût unitaire du module photovoltaïque égal, le carburant hydrogène est aussi compétitif que le carburant mixte pour des rendements presque égaux du module photovoltaïque.

VI. CONCLUSION

Les sources de carburants ont subi des mutations à travers les âges. La situation actuelle va mener inéluctablement vers un changement de cette source. A partir des données socio-économiques, il a été montré que l'économie d'hydrogène ouvre des opportunités certaines pour l'Algérie.

Pour un développement durable, et pour respecter les engagements envers le protocole de Kyoto, la production d'hydrogène à partir des énergies renouvelables est le meilleur



choix. Ceci permet aussi à l'Algérie de valoriser ses immenses ressources en énergie renouvelable. Le potentiel de production de l'hydrogène, utilisant un système photovoltaïque pour le captage de l'énergie solaire et un système d'électrolyse pour la génération d'hydrogène, a été évalué. Les résultats montrent que la production est importante.

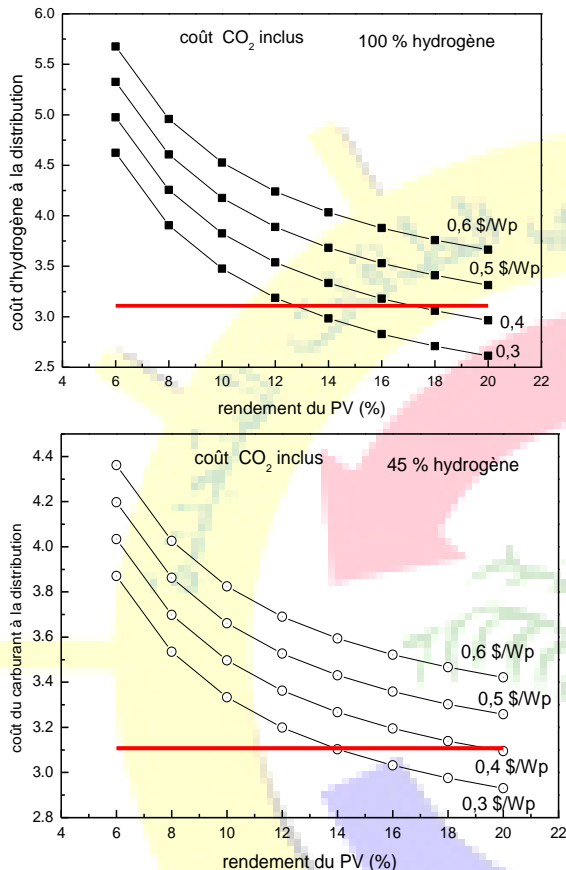


Fig. 11 Evolution du coût à la distribution du carburant pour différents moteurs. Cas où le coût du CO₂ émis est inclus.

Le coût du système de production d'électricité par PV représente 80 % du coût total de production d'hydrogène. Toutefois, après analyse des courbes d'apprentissage et tenant compte des évolutions des prix de panneaux photovoltaïques, ces coûts vont baisser d'une façon spectaculaire permettant une meilleure compétitivité de la production de l'hydrogène par voie PV/électrolyse.

Une analyse de la compétitivité de l'hydrogène avec les carburants conventionnels ont montrés 'il est difficile de se prononcer avec certitude sur la viabilité de l'hydrogène que l'hydrogène en tant que carburant dans le secteur du transport. Toutefois sous le double effet de la courbe d'apprentissage et de l'amélioration de la technologie, les résultats indiquent avec bonne confiance que l'hydrogène sera compétitif avec les carburants conventionnels.

REFERENCES

- [1] R. Boudries, "Hydrogen and gasoline fuelled Internal Combustion engine vehicles in Algeria: Comparative economic competitiveness study", '8th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems' SDEWES 22 au 27 Septembre 2013 à Dubrovnik, Croatia
- [2] R. Boudries, R. Dizene, A. Khellaf et M. Belhamel, Hydrogen as an energy carrier, In: Clean Energy: Resources, Production and Developments, Editor: Aiden M. Harris, Nova Science Publishers, Inc., (2010) p.147-184.
- [3] E. Bilgen "Solar hydrogen from photovoltaic - electrolyse system" Energy conversion and management 42 (2001)1047-1057
- [4] B.S. Richards, G.J. Conibeer, "A comparison of hydrogen storage technologies for solar-powered stand-alone power supplies: A photovoltaic system sizing approach", International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007) 2712 – 2718.
- [5] A. Goetzberger et V. U. Hoffmann, Photovoltaic solar energy generation, Springer Verlag, 2005, Berlin (Allemagne).
- [6] R. Boudries and R. Dizéne, Analysis of solar hydrogen production potential in Algeria: case of an electrolyser-PV tracking system, communication presented at The Energy and Materials Research Conference (EMR2012), 20-22 June 2012, Torremolinos, Spain.
- [7] ETSU Report number ETSU/FCR/005, "Solid polymer fuel cell systems applications study to identify and prioritise", R&D issues, Issue (1993) ETSU/DTI. U.K...
- [8] 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.
- [9] E. Bilgen, Domestic hydrogen production using renewable energy, Solar Energy 77(2004)47-55.
- [10] Office National de la Météo (ONM), Algeria <http://www.meteo.dz/>.
- [11] A. Mefti, M.Y Bouroubi. and A Adane, Generation of hourly solar radiation for inclined surfaces using monthly mean sunshine duration in Algeria, Energy Conversion and Management, vol.44 (19) 2003, 3125-3141
- [12] L. Schrattholtzer, Experience Curves of Photovoltaic Technology, Interim Report IR-00-014, International Institute for Applied Analysis, Laxenburg, Austria. (2000).
- [13] J. M. Ogden and R. H. Williams, Electrolytic hydrogen from thin-film solar cells, International Journal of Hydrogen Energy 15(1990)155-169
- [14] R. Boudries, R. Dizene, Technico-economic analysis of renewable hydrogen production in Algeria" communication presented at the 10th International Conference on Sustainable Energy Technologies. 4 - 7 September 2011, Kumburgaz, İstanbul, Türkiye.
- [15] Tsutomu Oi and Koichi Wada, Feasibility study on hydrogen refuelling infrastructure for fuel cell vehicles using off-peak power in Japan, International Journal of Hydrogen Energy 29(2004)347-354.
- [16] E. Bilgen, Domestic hydrogen production using renewable energy, Solar Energy 77(2004)47-55.



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 13 et 14 Octobre 2014



- [17] R. K. Leroy and A. K. Stuart, Unipolar water electrolysis: a competitive technology, Proceedings 2nd WHEC, Zuroch, Switzerland, p359-375.
- [18] J.O. M. Bockris, J.C. Wass, About the real economics of massive hydrogen production, in Hydrogen Energy

- VII, T.N. Veziroglu, K.H. Protsenko, ed, Pergamon Press(1988)101-151
- [19] A.N. Podgorny, A.I. Mishenko, U.V. Solovey, Technico-economic storage in an automobile, International Journal of Hydrogen Energy 9(1984)773.781

