

Etudes des procédés de production biologiques de l'hydrogène

Samira Chader^{1*}, Hocine Hacene², Maiouf Belhamel¹ et Spiros N. Agathos³

¹ Division Bio-Energie & Environnement, Centre de Développement des Energies Renouvelables,
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie

² Laboratoire de Microbiologie, Université des Sciences et de la Technologie
Houari Boumediene, B.P. 32, El-Alia, Bab Ezzouar, Alger, Algérie

³ Unité Génie Biologique, Université Catholique de Louvain,
Place Croix du Sud, 2 Bte 19, B 1348 Louvain La Neuve, Belgique

(reçu le 15 Novembre 2007 – accepté le 25 Décembre 2007)

Résumé - En raison de sa haute efficacité de conversion et son recyclage naturellement non polluant, l'hydrogène est aujourd'hui considéré, le carburant du futur. L'étude présentée est une synthèse bibliographique résumant les principaux procédés de production biologique d'hydrogène. Ces derniers s'avèrent moins consommateurs d'énergie et plus favorables à l'environnement par rapport aux processus thermo-chimiques et électrochimiques, puisqu'ils font appel à des organismes photosynthétiques ou fermentatifs n'utilisant que l'énergie lumineuse du soleil. L'article reprend de façon détaillée les micro-organismes et les voies biochimiques impliquées dans le procédé de production qui repose essentiellement sur l'activité des nitrogénase et hydrogénase. Une perspective de production biologique d'hydrogène, par des organismes photosynthétiques isolés du sud algérien est aussi présentée.

Abstract - Because of its high conversion efficiency and recycling naturally non-polluting, hydrogen is now considered the fuel of the future. The study presents is a survey of biological hydrogen processes. They are less energy consuming and more environmentally friendly compared with electrochemical and thermo chemical process, as they rely on photosynthetic organisms or fermentative using only light energy from the sun. The article includes a detailed micro-organisms and the biochemical pathways involved in the production process, which is essentially based on the activity of nitrogenase and hydrogenised. A prospect of biological production of hydrogen by photosynthetic organisms isolated from the south of Algeria is also presented.

Mots clés: Hydrogène – Production – Photosynthèse – Fermentation – Bioréaction hybride.

1. INTRODUCTION

Pas moins de 80 % de la demande énergétique mondiale est assurée par les énergies fossiles. Ces dernières épuisables, sont aussi génératrices de graves problèmes environnementaux liés aux changements climatiques et aux dégagements dans l'atmosphère de polluants organiques et des gaz à effet de serre. L'hydrogène est aujourd'hui proposé comme le vecteur énergétique de demain.

En effet, selon un rapport de l'AIE (Agence Internationale de l'Energie), l'hydrogène est l'une des rares options pour remplacer le pétrole et réduire les émissions du secteur des transports. D'autres rapportent que les applications stationnaires de l'hydrogène auront un meilleur bilan énergétique et environnemental global à travers son utilisation dans les PAC (Pile à Combustible). L'association Fuel Cell Europe a démontré que les PAC alimentées par de l'hydrogène produit à partir du gaz naturel 'quoique n'offrant pas une source d'énergie durable en tant que telle, représentent une voie efficace pour économiser l'apport inévitable d'énergie fossile pendant une transition vers un système énergétique durable'.

L'analyse du cycle de vie de la filière indique que chaque kWh d'électricité produit par la PAC réduira les émissions de CO₂ associées d'au moins 40 % par rapport à la production fossile existante.

* samira.chader@gmail.com

L'hydrogène n'est pas lui-même une source d'énergie primaire, il est plutôt produit à partir d'autres sources. Il est d'autant plus intéressant lorsque sa production est de source énergétique propre et renouvelable. Plusieurs procédés de production sont préconisés, certains maîtrisés, demeurent coûteux et nuisibles, d'autres plus rentables et plus propres mais encore, en cours d'expérimentation.

L'hydrogène est principalement produit à partir d'énergies fossiles, de biomasse ou d'eau. Les méthodes de production à partir des énergies fossiles sont:

- le vaporeformage du gaz naturel;
- le craquage du gaz naturel;
- l'oxydation partielle des hydrocarbures;
- la gazéification du charbon.

A partir de la biomasse sous toutes ses formes (résidus forestiers, agroalimentaires ou déchets organiques,...), la production d'hydrogène se fait par pyrolyse ou gazéification en donnant un mélange gazeux (H_2 , CH_4 , CO_2 , CO et N_2).

Les méthodes de production de l'hydrogène à partir de l'eau se font par:

- électrolyse;
- photolyse;
- procédé thermochimique;
- thermolyse (décomposition thermique directe);
- production biologique.

Excepté la production biologique, les procédés cités ci-dessus sont consommatrices d'une grande quantité d'énergies fossiles, électrique ou thermique en plus d'être très nocifs à l'environnement [1, 2]. En effet, la production biologique s'opère dans les conditions ambiantes de température et de pression et ne nécessite aucun apport énergétique, de plus elle est sans danger à l'environnement, tout au contraire elle permet la mise en valeur de certaines ressources naturelles trop souvent négligées.

Dans ce qui suit, une revue bibliographique des principaux travaux effectués cette dernière décennie est présentée. Il sera aussi question de détailler le mécanisme réactionnel de la production biologique de l'hydrogène.

2. PROCÉDES DE LA PRODUCTION BIOLOGIQUE DE L'HYDROGENE

La production biologique de l'hydrogène est définie comme le résultat du métabolisme d'un organisme vivant qui libère, dans des conditions données, de l'hydrogène gazeux comme métabolite secondaire. Le **tableau 1** donne les principales espèces ayant été déterminées comme étant des souches productrices d'hydrogène.

Les procédés biologiques de production de l'hydrogène sont classés en 4 catégories, à savoir:

1. la bio photolyse de l'eau par les algues et les cyanobactéries;
2. la photo décomposition des composés organiques par les bactéries photosynthétiques;
3. la fermentation des composés organiques par les bactéries;
4. le système hybride utilisant des bactéries photosynthétiques et des bactéries anaérobiques.

Tableau 1: Microorganismes utilisés pour la production de l'hydrogène

Taxons	Nom de l'organisme	Références
Microalgues Vertes (Chlorophyceae)	<i>Scenedesmus obliquus</i>	[3]
	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	[4]
	<i>Chlamydomonas moewusii</i>	[4]

Cyanobactérie Avec hétérocyste	<i>Anabaena azollae</i>	[5, 6]
	<i>Anabaena CA</i>	[7]
	<i>Anabaena variabilis</i>	[8, 9]
	<i>Anabaena cylindrica</i>	[10, 11]
	<i>Nostoc muscorum</i>	[12]
	<i>N. spongiaeforme</i>	[9]
	<i>Westiellopsis prolifica</i>	[9]
Cyanobactérie Sans hétérocyste	<i>Plectonema boryanum</i>	[13]
	<i>Oscillatoria Miami BG7</i>	[14]
	<i>Synechococcus sp.</i>	[15]
	<i>Aphanothece halophytico</i>	[16]
	<i>Mastidocladus laminosus</i>	[17]
	<i>Phormidium valderianum</i>	[18]
Bactéries Photosynthétiques	<i>Rhodobater sphaeroides</i>	[19, 20]
	<i>Rhodospseudomonas sphaeroides</i>	[21]
	<i>Rhodospirillum rubrum</i>	[22]
	<i>Chromatium sp. Miami PSB 1071</i>	[23]
	<i>Halobacterium halobium</i>	[24]
Bactéries Fermentatives	<i>Enterobacter aerogenes</i>	[25]
	<i>Clostridium butyricum</i>	[26]
	<i>Desulfovibrio vulgaris</i>	[17]
	<i>Magashaera elsdenii</i>	[17]
	<i>Citrobacter intermedius</i>	[27]
	<i>Escherichia coli</i>	[26]

Il est aussi important de signaler que chaque espèce présente des spécificités, quant aux conditions de culture et de production (composition du milieu, temps de dédoublement,...). Ainsi les taux de production et la nature des métabolites seront différents à l'intérieur d'un même genre et d'une espèce à une autre (**Tableau 2**).

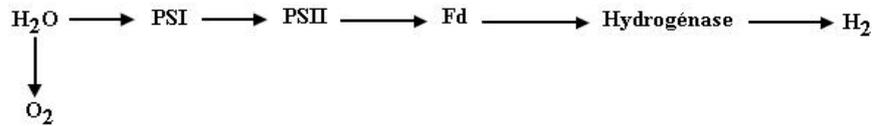
Tableau 2: Comparaison des différents procédés de production biologique de l'hydrogène

Organisme utilisé	Matière première utilisée	Temps de dédoublement (h)	Taux maximum d'H ₂ produit (mmolH ₂ /g.MS.h)	Métabolites majeurs produits	Réf
Bactéries Photosynthétiques			7 - 25		
<u>Photosystèmes Double</u> (PSI et PSII)					
<i>Oscillatoria sp. Miami BG7</i>	Milieu A sans NH ₄ Cl	25	0.3	H ₂ /CO ₂ /O ₂ = 6:3:1, biomasse	[14, 28]
<i>Anabaena cylindrical</i>	Milieu avec azotes	2.2 - 9	1.3	H ₂ , O ₂ , biomasse	[29]
<u>Un seul photosystème</u>					
<i>Rhodospseudomonas capsulata</i>	Lactate avec autre source d'azote		5.3	H ₂ , CO ₂ , O ₂ . une quantité de lipide biomasse	[30, 31]

<i>Rhodopseudomonas Capsulate</i>	Bouses de vaches		0.3	H ₂ , CO ₂ , O ₂ . une quantité de lipide Biomasse	[32]
<i>Rhodopseudomonas sp.</i>	Amidon		1.3	H ₂ , CO ₂ , O ₂ . une quantité de lipide Biomasse	[33]
<i>Rhodobacter sphaeroides</i>	Acide lactique Déchets		5.9	H ₂ , CO ₂ , O ₂ . une quantité de lipide Biomasse	[34]
<i>Rhodobacter sphaeroide</i>	Eaux usées		0.46	H ₂ , CO ₂ , O ₂ . une quantité de lipide Biomasse	[35]
Mélange de microorganismes contenant:					
<i>Phormidium valderianum</i> , <i>Halobacterium halobium</i> , <i>Escherichia coli</i> 1:1:1	ASNIII combiné avec TES et azote		19	H ₂ , CO ₂ , O ₂ . une quantité de lipide, Biomasse	[36]
Bactéries Fermentatives					
<u>Anaérobie Stricte</u> <i>Clostridium butyricum</i>	Milieu contenant du glucose	0.16 - 2	7.3	H ₂ , CO ₂ , Une importante quantité de lipide, Biomasse	[37]
<u>Anaérobie Facultative</u> <i>Citrobacter intermedius</i>	Cellulose, Amidon, Glucose		9.5	H ₂ , CO ₂ , Une importante quantité de lipide, Biomasse	[27]
<i>Enterobacter cloacae</i> IIT	Saccharose		29.63	H ₂ , CO ₂ , Une importante quantité de lipide, Biomasse H ₂ / CO ₂ = 9	[38]

2.1 Bio photolyse de l'eau par les algues et les cyanobactéries

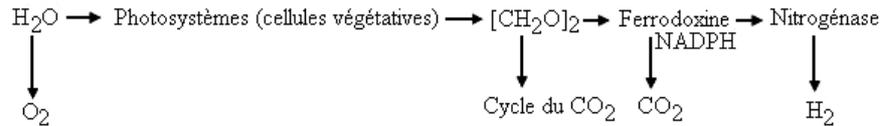
La production de l'hydrogène par bio photolyse repose sur le principe de la photosynthèse connue chez toutes les plantes. Le métabolisme des organismes utilisés est réorienté vers la production d'hydrogène au lieu de la synthèse des hydrates de carbone et la formation de la biomasse. La photosynthèse implique l'absorption de la lumière par deux photosystèmes (Photosystème I: PSI et Photosystème II: PSII) distincts opérant en série pour la dissociation de deux molécules d'eau et libérant de l'oxygène. Ainsi des électrons sont libérés et seront utilisés soit pour réduire le CO₂ (Cycle de Calvin) soit sont eux mêmes réduits en hydrogène gazeux par une enzyme appelée hydrogénase. Cette dernière absente chez les plantes supérieures et spécifiques aux microalgues, quelques macroalgues vertes et les cyanobactéries, peut réduire les protons en hydrogène gazeux sous certaines conditions. Ce phénomène a été rapporté pour la première fois par Gaffron et Rubin [39], puis repris par plusieurs chercheurs [40, 41]. Ces derniers expliquent que la bio décomposition directe de la molécule d'eau par l'énergie des PSI et PSII libèrent des électrons qui sont transportés via des porteurs (Ferredoxine: Fd) jusqu'à une hydrogénase qui va les réduire en gaz selon la réaction simplifiée suivante:



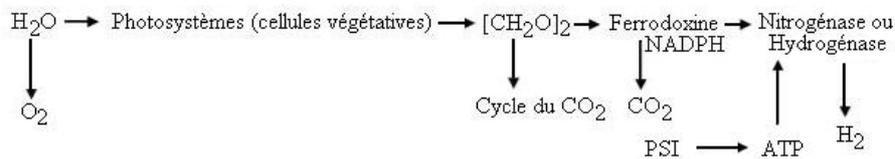
Cependant, le rendement de cette production est tributaire du taux d'oxygène dans le milieu. Des niveaux d'oxygène $\geq 2\%$ inhibe l'activité de l'hydrogénase, ce qui diminue la production de l'hydrogène [42]. Des conditions d'anaérobiose suivies d'une période d'éclairage suffisant, sont déterminantes pour une production soutenue.

Les cyanobactéries appelées aussi bactéries fixatrices d'azote, sont capables de produire de l'hydrogène via la photosynthèse en impliquant un complexe enzymatique faisant intervenir en plus de l'hydrogénase, une nitrogénase en fonction du type de cyanobactérie (avec ou sans hétérocyste) [43].

Bactéries fixatrices d'azote avec hétérocyste

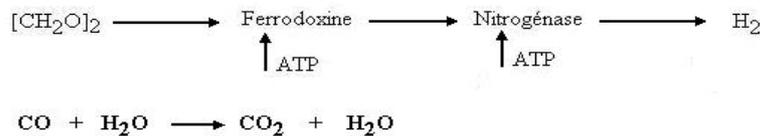


Bactéries fixatrices d'azote sans hétérocyste



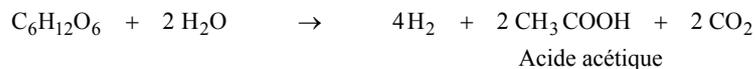
2.2 Photo décomposition des composés organiques par les bactéries photosynthétiques

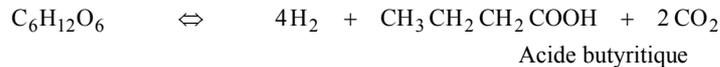
Les bactéries photo trophiques peuvent dégrader les composés organiques issus de nombreux substrats dérivés de déchets, en utilisant un large spectre visible en garantissant un haut rendement de production de l'hydrogène [44, 45]. Cette méthode de production est intéressante, puisque l'oxygène n'est pas un facteur limitant. Le monoxyde de carbone est aussi utilisé comme substrat pour produire de l'hydrogène.



2.3 Fermentation des composés organiques par les bactéries

Cette méthode de production d'hydrogène se fait par des bactéries fermentatives qui dégradent à l'obscurité, les composés organiques issus de l'hydrolyse des déchets de la biomasse riche en glucose. Les principales réactions sont les suivantes.





2.4 Système hybride utilisant des bactéries photosynthétiques et des bactéries anaérobies

Dans les systèmes hybrides, les deux types de microorganismes (photosynthétiques et non photosynthétiques) sont impliqués dans le processus de production de l'hydrogène [46].

En effet, certaines bactéries, telle que *Clostridium* peuvent digérer à l'obscurité et en anaérobiose, les carbohydrates produits par des microalgues (en présence de lumière) en acides organiques (Fig. 1)

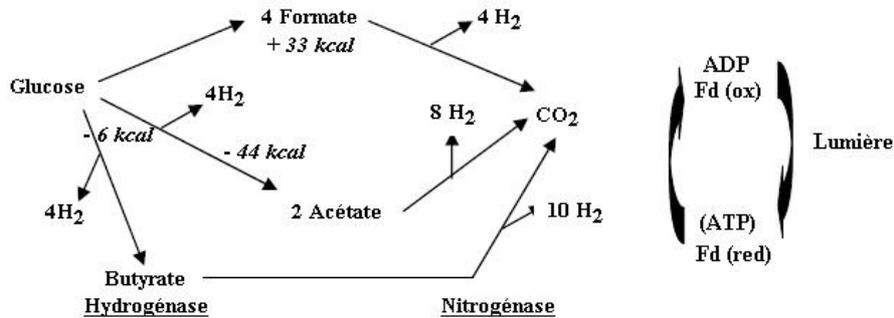


Fig. 1: Mécanisme biochimique de la décomposition du glucose par des microorganismes photosynthétiques et des bactéries anaérobies pour la production hybride de l'hydrogène

3. PRODUCTION BIOLOGIQUE DE L'HYDROGENE EN ALGERIE

La production biologique de l'hydrogène a débuté il y a quatre ans au Centre de Développement des Energies Renouvelables. Elle préconise la biophotolyse directe de l'eau, utilisant des microalgues photosynthétiques locales, isolées notamment des eaux continentales du sud algérien. Les travaux ont tout d'abord porté sur l'isolement et l'identification des espèces. Des essais de réalisation de photobioréacteurs adaptés à la fois à la croissance et la production ont été tentés [47, 48].

Une expérience en cours de réalisation a permis à partir d'une culture de 500 ml de *Chlorella sp.* isolée de la région de Timilaine de produire jusqu'à 210 ml de gaz constitué à 55 % d'hydrogène pour un taux correspondant à 88 mM H₂ par heure et par litre de milieu (Fig. 2). Des essais de production à partir d'une collection de souche sont amorcés, ainsi que des cultures hybrides sont entamées, permettant de comparer les rendements de production des différents procédés en prenant en compte les paramètres physicochimiques intervenants (pH, intensité lumineuse, composition du milieu,...).

4. CONCLUSION

De ce qui précède, on peut conclure que l'hydrogène biologique est une voie prometteuse, elle peut avoir plusieurs origines adaptée à des espèces particulières.

En effet, il est important de réaliser une étude en amont pour sélectionner et étudier les exigences de chaque espèce. Ce qu'il faut retenir en particulier, c'est le fait que les procédés énumérés s'opèrent tous à des températures ambiantes et pressions normales.

Aussi on note que la vitesse de la production fermentative d'hydrogène est toujours plus rapide que celle de la production photosynthétique. De plus, une quantité de sous produits est

obtenue, tels que les acides gras (acide lactique, acide acétique, acide butyrique, etc.) qui peuvent à leur tour être valorisés.

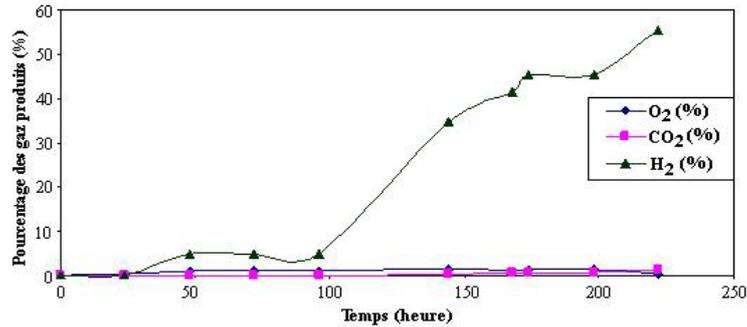


Fig. 2: Cinétique de production des gaz dans une culture de *Chlorella sp.* isolée de la région de Timilaine (Adrar)

REFERENCES

- [1] M.A. Rosen and D.S. Scott, 'Comparative Efficiency Assessments for a Range of Hydrogen Production Processes', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 23, N° 8, pp. 653 - 659, 1998.
- [2] M.S. Casper, 'Hydrogen Manufacture by Electrolysis, Thermal Decomposition and Unusual Techniques', Park Ridge, NJ: Naves Data Corp, 1978.
- [3] J. Schnackenberg, R. Schulz and H. Senger, 'Characterization and Purification of a Hydrogenase from Eukaryotic Green Alga *Scenedesmus Obliquus*', FEBS Letters, Vol. 327, N°1, pp. 21 - 24, 1993.
- [4] E. Greenbaum, 'Hydrogen Production by Photosynthetic Water Splitting', In: T.N. Veziroglu and P.K. Takashashi, Editors. Hydrogen Energy Progress VIII, Proceedings of the 8th WHEC, Hawaii, N-Y, Pergamon Press, pp. 743 - 754, 1990.
- [5] M. Banerjee, A. Kumar, H.D. Kumar, 'Factors Regulating Nitrogenase Activity and Hydrogen Evolution in *Azolla-anabaena Symbiosis*', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 14, N°12, pp. 871 - 879, 1989.
- [6] D.J. Shi, M. Brouers, D.O. Hall and R.J. Rubin, 'The Effects of Immobilization on the Biochemical, Physiological and Morphological Features of *Anabaena Azollae*', Planta, Vol. 172, N°3, pp. 298 - 308, 1987.
- [7] D. Kumar and H.D. Kumar, 'Effect of Monochromatic Lights on Nitrogen Fixation and Hydrogen Evolution in the Isolated Heterocysts of *Anabaena sp. Strain CA*', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 16, N°6, pp. 397 - 401, 1991.
- [8] A.S. Tsygankov, L.T. Serebryakova, D.A. Sveshnikov, K.K. Rao, I.N. Gogotov and D.O. Hall, 'Hydrogen Photoproduction by Three Different Nitrogenases in Whole Cells of *Anabaena Variabilis* and Dependence on pH', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 22, N°9, pp. 859 - 867, 1997.
- [9] D. Vyas and H.D. Kumar, 'Nitrogen Fixation and Hydrogen Uptake in Four Cyanobacteria', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 22, N°2, pp. 163 - 168, 1995.
- [10] G.D. Smith, G.D. Ewart and W. Tucker, 'Hydrogen Production by Cyanobacteria', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 17, N°9, pp. 695 - 698, 1992.
- [11] W.D.P. Stewart and P.E. Rowell, 'Ects of *L*-methionine *D,L*-sulfoximine on the Newly Fixed NH₃, Acetylene Reduction and Heterocyst Production in *Anabaena Cylindrica*', Biochem. Biophy. Res. Commun, Vol. 65, pp. 846 - 856, 1975.
- [12] H. Spiller, E. Ernst, W. Kerkin and P. Boyer, 'Increase and Stabilization of Photoproduction of Hhydrogen in *Nostoc Micorum* by Photosynthetic Electron Transport Inhibitors Z', Naturforsch, Vol. 33, pp. 541 - 547, 1978.

- [13] Sukla Sarker, K.D. Pandey and A.K. Kashyap, 'Hydrogen Photoproduction by Filamentous non-Heterocystous Cyanobacterium *Plectonema Boryana* and Simultaneous Release of Ammonia', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 17, N°9, pp. 689 - 694, 1992.
- [14] S. Kumazawa and A. Mitsui, 'Characterization and optimization of hydrogen photoproduction by a saltwater blue-green alga, *Oscillatoria sp. Miami BG7*. I. Enhancement through limiting the supply of nitrogen nutrients', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 6, N°4, pp. 339 - 348, 1981.
- [15] K.J. Reddy and A. Mitsui, 'Simultaneous Production of Hydrogen and Oxygen as Affected by Light Intensity in Unicellular Aerobic Nitrogen Fixing Blue-Green Alga *Synchococcus sp. Miami BG 043511*', In: C. Sybesma, Editors, Advances in Photosynthetic Research, Vol. II, Hague, Martinus Nijho-Junk, pp. 785 - 788, 1984.
- [16] S. Belkin and E. Padan, 'Hydrogen Metabolism in the Facultative Anoxygenic Cyanobacteria (*Blue-Green Algae*) *Oscillatoria Limnetica* and *Aphanothece Halophytica*', Archives of Microbiology, Vol. 116, N°1, pp. 109 - 111, 1978.
- [17] H. Bothe and T. Kentemij, 'Potentialities of H₂-Production by Cyanobacteria for Solar Energy Conversion Program', In: T.N. Veziroglu and P.K. Takashashi, Editors, Hydrogen Energy Progress VIII, Proceedings of the 8th WHEC, Hawaii, N-Y, Pergamon Press, pp. 729 - 734, 1990.
- [18] R. Bagai and D. Madamwar, 'Prolonged Evolution of Photohydrogen by Intermittent Supply of Nitrogen Using a Combined System of *Phormidium Valderianum*, *Halobacterium Halobium* and *Escherichia Coli*', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 23, N°7, pp. 545 - 550, 1998.
- [19] E. Fascetti, E. D'Addario, O. Todini and A. Robertiello, 'Photosynthetic Hydrogen Evolution with Volatile Organic Acids Derived from the Fermentation of Source Selected Municipal Solid Wastes', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 23, N°9, pp. 753 - 760, 1998.
- [20] C.H. Sasikala, C.V. Ramana and P.R. Rao, 'Regulation of Simultaneous Hydrogen Photoproduction during Growth by Ph and Glutamate in *Rhodobacter Sphaeroides O.U.001*', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 20, N°2, pp. 123 - 126, 1995.
- [21] S.P. Singh and S.C. Srivastava, 'Isolation of Non-Sulfur Photosynthetic Bacteria Strains Efficient in Hydrogen Production at Elevated Temperatures', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 16, N°6, pp. 403 - 405, 1991.
- [22] H. Zürrer and R. Bachofen, 'Aspects of Growth and Hydrogen Production of the Photosynthetic Bacterium *Rhodospirillum Rubrum* in Continuous Cultures', Biomass, Vol. 2, N°3, pp. 165 - 174, 1982.
- [23] Y. Ohta, J. Frank and A. Mitsui, 'Hydrogen Production by Marine Photosynthetic Bacteria: Effect of Environmental Factors and Substrate Specificity of the Growth of Hydrogen-Producing Marine Photosynthetic Bacterium *Sp. Miami Pbs 1071*', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 16, N°5, pp. 451 - 460, 1981.
- [24] M.M. Taqui Khan and J.P. Bhatt, 'Polyethylene Glycol Mediated Fusion of *Halobacterium Halobium* MMT22 and *Escherichia Coli* for Enhancement of Hydrogen Production', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 16, N°10, pp. 683 - 685, 1991.
- [25] S. Tanisho, N. Wakao and Y. Kokako, 'Biological Hydrogen Production by *Enterobacter Aerogenes*', Journal of Chemistry and Engineering, Japon, Vol. 16, pp. 529 - 530, 1983.
- [26] S. Tanisho, Y. Suzuki and N. Wakao, 'Fermentative Hydrogen Evolution by *Enterobacter Aerogenes* Strain E.82005', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 12, N°9, pp. 623 - 627, 1987.
- [27] J.D. Brosseau and J.E. Zajic, 'Continuous Microbial Production of Hydrogen Gas', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 7, N°8, pp. 623 - 688, 1982.
- [28] E.J. Philips and A. Mitsui, 'Role of Light Intensity and Temperature in the Regulation of Hydrogen Photoproduction by the Marine Cyanobacterium *Oscillatoria Sp. Miami BG7*', Applied and Environmental Microbiology, Vol. 45, pp. 1212 - 1220, 1983.
- [29] J.C. Weissmen and J.R. Bonemann, 'Hydrogen Production by Nitrogen Starved Culture of *Anabaena Cylindrica*', Applied and Environmental Microbiology, Vol. 33, pp. 123 - 129, 1977.
- [30] P. Hillmer and H. Gest, 'H₂ Metabolism in the photosynthetic bacterium *Rhodopseudomonas Capsulata*: H₂ Production by Growing Culture', Journal of Bacteriology, Vol. 129, N°2, pp. 724 - 731, 1977.
- [31] S. Tanisho, 'Feasibility Study of Biological Hydrogen Production from Sugar Cane by Fermentation', In: T.N. Veziroglu, C.J. Winter, J.P. Basselt and G. Kreysa, Editors, Hydrogen Energy Progress XI, Proceedings of the 11th WHEC, Stuttgart, Vol. 3, pp. 2601 - 2606, 1996.

- [32] E. Fascetti, E. D'Addario, O. Todini and A. Robertiello, 'Photosynthetic Hydrogen Evolution with Volatile Organic Acids Derived from the Fermentation of Source Selected Municipal Solid Wastes', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 23, N°9, pp. 753 - 760, 1998.
- [33] S. Vrati and J. Verma, 'Production of Molecular Hydrogen and Single Cell Protein by *Pseudomonas Capsulata* from Cow Dung', Journal of Fermentation Technology, Vol. 61, N°2, pp. 157 - 162, 1983.
- [34] K. Sasikala, C.V. Ramana and M. Subrahmanyam, 'Photoproduction of Hydrogen from Waste Water of a Lactic Acid Fermentation Plant by a Purple Non-Sulfur Photosynthetic Bacterium *Rhodobacter Sphaeroides* O.U. 001', Indian Journal of Experimental Biology, Vol. 29, N°1, pp. 74 - 75, 1991.
- [35] K. Sasikala, C.V. Ramana and P. Raghuvveer Rao, 'Photoproduction of Hydrogen from the Wastewater of a Distillery by *Rhodobacter Sphaeroides* O.U.001', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 17, N°1, pp. 23 - 27, 1992.
- [36] R. Bagai and D. Madamwar, 'Long-Term Photo-Evolution of Hydrogen in a Packed Bed Reactor Containing a Combination of *Phormidium Valderianum*, *Halobacterium Halobium*, and *Escherichia Coli* Immobilized in Polyvinyl Alcohol', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 24, N°4, pp. 311 - 317, 1999.
- [37] I. Karube, S. Matsunaga, S. Tsuni and S. Suzuki, 'Continuous Hydrogen Production by Immobilized Whole Cell of *Clostridium Butyricum*', Biochem. Biophys. Acta, Vol. 44, pp. 338 - 345, 1976.
- [38] N. Kumar and D. Das, 'Enhancement of Hydrogen Production by *Enterobacter Cloacae* IIT-BT 08', Process Biochemistry, Vol. 35, N°6, pp. 589 - 593, 2000.
- [39] H. Gaffron and J. Rubin, 'Fermentative and Photochemical Production of Hydrogen in Algae', Journal of General Physiology, Vol. 26, pp. 219 - 240, 1942.
- [40] J.R. Benemann, K. Miyamoto and P.C. Hallenbeck, 'Bioengineering Aspects of Biophotolysis', Enzyme Microbiological Technology, Vol. 2, pp. 103 - 111, 1980.
- [41] F.P. Healey, 'Hydrogen Evolution by Several Algae', Planta, Vol. 91, p. 220, 1970.
- [42] J.R. Benemann, J.A. Berenson, N.O. Kaplan and M.D. Kauren, 'Hydrogen Evolution by a Chloroplast-Ferredoxin-Hydrogenase System', Proc. Nat. Acad. Sci., USA, Vol. 70, pp. 2317 - 2320, 1973.
- [43] G.D. Smith, G.D. Ewart and W. Tucker, 'Hydrogen Production by Cyanobacteria', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 17, N°9, pp. 695 - 698, 1992.
- [44] J.S. Kim, K. Ito and H. Takahashi, 'Production of Molecular Hydrogen by *Rhodospseudomonas* sp.', Journal of Fermentation Technologie, Vol. 59, N°3, pp. 185 - 190, 1981.
- [45] M. Vincenzini, R. Materassi, M.R. Tredici and G. Florenzano, 'Hydrogen Production by Immobilized Cell-I. Light Dependent Dissimilation of Organic Substances by *Rhodospseudomonas Palustris*', International Journal Hydrogen Energy, Vol. 7, N°3, pp. 231 - 236, 1982.
- [46] J. Miyake, 'Application of Photosynthetic Systems for Energy Conversion', In: T.N. Veziroglu and P.K. Takashashi, Editors. Hydrogen Energy Progress VIII, Proceedings of the 8th WHEC, Hawaii, N-Y, Pergamon Press, pp. 755 - 764, 1990.
- [47] S. Chader, M. Belhamel, H. Hacene, R. Rihani and F. Kaïdi, 'Hydrogen Gas Production by Microalgae Strains Locally Isolated', 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Rome, Italia, May 10 - 14, 2004.
- [48] S. Chader, M. Belhamel, H. Hacene, R. Rihani et F. Kaïdi, 'Caractérisation Physiologique et Biochimique d'une Souche de *Chlamydomonas* Sp. Productrice d'Hydrogène', 1^{er} Workshop International sur l'Hydrogène, Vecteur énergétique d'origine renouvelable, Alger, Algérie, 21 - 23 Juin 2005.