

M. CH. 02 / 145 / 13



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des sciences et sciences de l'ingénieur
Département de Génie des Procédés

Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat

Spécialité : Génie des Procédés
Option : Génie Chimique

Présenté par :

YOUMBAI Salma
DEHANE Fouzia



Thème

**EFFETS DU SOLUTE ET DE SA CONCENTRATION SUR LA
PRODUCTION D'HYDROGENE PAR UN SYSTEME
PHOTOVOLTAIQUE**

Soutenu publiquement devant le jury :

| | | | | |
|-----|--------------------|----------|-------------------------|------------|
| Dr. | Ladjel Segni | M.C | Université Kasdi Merbah | Président |
| Mr. | Sellami Med Hassen | M..A.C.C | Université Kasdi Merbah | Examineur |
| Mr. | | M.A.C.C | Université Kasdi Merbah | Examineur |
| Dr. | Saouli Salah | M.C | Université Kasdi Merbah | Rapporteur |

Année Universitaire 2006 / 2007

| | |
|---|----|
| IV.3.1. Les variations du voltage aux bornes de la cuve d'électrolyse | 37 |
| IV.3.2. Les variations de l'intensité du courant dans la cuve d'électrolyse | 38 |
| IV.3.3. Les variations du débit d'hydrogène | 40 |
| IV.3.4. L'étude comparative des variations du débit d'hydrogène | 41 |
| CONCLUSION | 45 |
| BIBLIOGRAPHIE | 47 |

NOMENCLATURE

| | | |
|------------|---|---------|
| a | Premier coefficient de trouble du ciel | |
| b | Deuxième coefficient de trouble du ciel | |
| C | Concentration de la solution | % |
| c | Constante de correction | |
| D_{st} | Distance soleil-terre | m |
| H | Rayonnement solaire global | W/m^2 |
| H_{dir} | Rayonnement direct | W/m^2 |
| H_{diff} | Rayonnement diffus | W/m^2 |
| h | Hauteur du soleil | deg |
| I_{cs} | Constante solaire | W/m^2 |
| I_p | Intensité du courant électrique aux bornes du panneau | A |
| m | Masse de la solution | kg |
| n | Nombre du jour de l'année | |
| Q | Débit massique de l'hydrogène produit | g/min |
| R_s | Rayon solaire | m |
| s | Angle d'inclination de la surface inclinée | deg |
| t | Temps | s |
| T | Température surfacique du soleil | °K |
| V_p | Tension aux bornes du panneau | V |

Symboles grecs

| | | |
|----------|---------------------------------|-------------------|
| ρ | Coefficient d'albédo | |
| σ | Constante de Stéphane-Boltzmann | $W/m^2 \cdot K^4$ |

il faut ajouter le numéro à côté de chaque figure

LISTE DES FIGURES

- Figure 1. Les couches de l'atmosphère terrestre.
- Figure 2. Rayonnement solaire à travers l'atmosphère.
- Figure 3. Variations de la conductivité électrique de quelques solutions.
- Figure 4. Variations du rayonnement solaire en fonction du temps.
- Figure 5. Variations de l'intensité et le voltage du panneau photovoltaïque en fonction du temps.
- Figure 6. Le schéma du montage expérimental.
- Figure 7. Le panneau photovoltaïque.
- Figure 8. Le pyranomètre.
- Figure 9. Le générateur de courant continu.
- Figure 10. La balance digitale et la cuve d'électrolyse.
- Figure 11. Le montage expérimental de la production d'hydrogène.
- Figure 12. Variations des voltages aux bornes de la cuve de la solution NaOH en fonction du temps.
- Figure 13. Variations des voltages aux bornes de la cuve de la solution KOH en fonction du temps.
- Figure 14. Variations de l'intensité du courant dans la cuve de la solution de NaOH en fonction du temps.
- Figure 15. Variations de l'intensité du courant dans la cuve de la solution de KOH en fonction du temps.
- Figure 16. Variations des débits d'hydrogène pour une solution de NaOH en fonction du temps.
- Figure 17. Variations des débits d'hydrogène pour une solution de KOH en fonction du temps.

Figure 18. Comparaison entre les débits d'hydrogène dans le cas d'une solution de NaOH et KOH pour une concentration de 0,1 %.

Figure 19. Comparaison entre les débits d'hydrogène dans le cas d'une solution de NaOH et KOH pour une concentration de 0,2 %.

Figure 20. Comparaison entre les débits d'hydrogène dans le cas d'une solution de NaOH et KOH pour une concentration de 0,3 %.

Figure 21. Comparaison entre les débits d'hydrogène dans le cas d'une solution de NaOH et KOH pour une concentration de 0,4 %.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Valeurs des coefficients de trouble du ciel.

Tableau 2. Quelques propriétés chimiques et physiques sur l'hydrogène et quelques comparaisons avec le gaz naturel.

même remplace il faut ajouter
les résumés des pages

INTRODUCTION

Dans le cadre de la promotion des énergies propres et renouvelables, la recherche d'une nouvelle source d'énergie est d'une importance vitale. L'un de ces candidats est l'hydrogène, puisque ce dernier est disponible dans l'univers et sur terre en abondance. Le souci majeur est de trouver les moyens les plus rentables et accessibles pour le produire à bas prix.

Ainsi, l'objectif de notre travail, est une continuation du projet entrepris l'an dernier sur la production d'hydrogène par un système d'électrolyse d'eau utilisant l'électricité produite par des panneaux photovoltaïques.

Dans ce projet, l'effet du soluté et de sa concentration sur la production d'hydrogène par l'électrolyse d'eau au moyen de l'électricité photovoltaïque est considéré.

Pour cela, des expériences ont été conduites sur un système d'électrolyse d'eau en utilisant deux solutions aqueuses, l'une de soude et l'autre de potasse de différentes concentrations. Les résultats ont montré que le débit d'hydrogène produit augmente avec la concentration et est plus important avec la solution de soude qu'avec la solution de potasse.

CHAPITRE I
L'ENERGIE SOLAIRE

Beaucoup de travaux expérimentaux et théoriques traitent de la production de l'hydrogène par l'électrolyse de l'eau en utilisant l'effet photovoltaïque [1, 3]. L'effet de la température de l'électrolyse sur la production de l'hydrogène a été étudié par Kothari et al. [4]. La modélisation mathématique de la performance des systèmes à grandes échelles pour la production d'hydrogène par électrolyse en utilisant des panneaux photovoltaïque avec ou sans le système de pointage a été considéré par Bilgen [5]. L'étude de la sécurité, la performance et l'entretien des installations photovoltaïques produisant de l'hydrogène a été conduite par Lehmen et al. [6]. Récemment, Ahmad et El-Shenawy [7] ont étudié un système photovoltaïque pour la production de l'hydrogène en Egypte avec et sans pointeur.

I.1. L'historique de l'énergie solaire

L'énergie solaire atteignant la terre est la source de la vie et le moteur de toutes les transformations physiques, chimiques et biologiques. Elle est aussi la cause de toutes les autres formes connues d'énergies comme l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique et l'énergie de la biomasse.

L'énergie solaire peut être utilisée efficacement selon plusieurs méthodes. Les applications ayant trait à l'utilisation de l'énergie solaire peuvent être regroupées en trois catégories principales qui sont, le chauffage, le refroidissement et la production d'énergie électrique.

Contrairement à ce que l'on veut nous faire croire, l'énergie solaire n'est pas une énergie nouvelle, elle a longtemps été la seule source d'énergie, grâce à la photosynthèse qui permet la production du bois, la seule énergie nouvelle est l'énergie nucléaire dont l'utilisation ne remonte qu'à une cinquantaine d'années.

Archimède, environ 250 ans avant notre ère, mit au point des miroirs pour concentrer l'énergie solaire et incendier la flotte romaine assiégeant Syracuse.

En 1839, Edmond Becquerel, physicien français qui donna son nom à la mesure de la radioactivité, découvrit l'effet photovoltaïque qui se développera par la suite surtout dans la domaine de l'espace. En 1878, Auguste Mouchot créa une machine à vapeur

fonctionnant grâce à un miroir parabolique qui lui permet d'actionner une presse d'imprimerie.

En 1912, le Nord-Américain Schumann a construit en Egypte, une station de pompage de l'eau et en 1953, un four solaire de 75 kW est installé au Mont-Louis dans les Pyrénées, son successeur, le four d'Odeillo, bâti en 1990, permet d'atteindre des températures de 3000 degrés Celsius.

I.2. Le soleil

I.2.1. La composition du soleil

Le Soleil est une étoile de diamètre 1.4×10^6 kilomètres, de masse 2×10^{30} kilogrammes et de densité moyenne de 1400 kilogrammes par mètre cube. Sa distance à la terre est d'environ 149 millions de kilomètres [1,2]. Il est la principale source d'énergie, de lumière et de chaleur dans le système solaire, cela a permis l'apparition de la vie sur terre. C'est aussi la seule étoile dont il est possible d'observer la composition de près. Le Soleil n'est pas tout à fait sphérique, sa surface effectue une révolution tous les 25.40 jours à l'équateur, il ne lui faut pas moins de 36 jours aux pôles. Cette rotation est responsable de son activité magnétique. En tournant sur lui-même, il crée un champ magnétique 5000 fois plus intense que celui de la terre.

L'énergie solaire se crée profondément dans le noyau du Soleil. Là où la température atteint 15 millions de degrés Celsius pour une pression de 340 milliards d'atmosphères. Ces température et pressions sont si intenses qu'elles provoquent des réactions thermonucléaires. Ces réactions thermonucléaires provoquent la fusion de quatre atomes d'hydrogène pour former un atome d'hélium. La masse du noyau d'hélium formé lors de la fusion est plus petite que la masse des quatre noyaux d'hydrogène. La différence de masse est transformée en énergie et transportée vers la surface du Soleil, par un processus de convection, où elle est libérée sous forme de lumière et de chaleur. L'énergie générée dans le noyau met un million d'années pour atteindre la surface. Chaque seconde, 700 millions de tonnes d'hydrogène sont ainsi converties en hélium.

I.2.2. Le rayonnement solaire et l'atmosphère

L'énergie solaire émise par le soleil arrivant sur la surface extérieure de l'atmosphère terrestre est dite rayonnement extraterrestre. Il s'agit du rayonnement instantané reçu à un instant donné au dessus de l'atmosphère terrestre en incidence normale, c'est à dire sur un plan perpendiculaire à la direction du soleil. On appelle cette valeur constante solaire, sa valeur est évaluée avec précision par la N.A.S.A à 1367 W/m^2 . Seulement, cette valeur n'est pas tout à fait constante à cause des légères variations de la distance terre-soleil.

La constante solaire est calculée en considérant le soleil comme étant un corps noir à la température de 5760 °K , en tenant compte de la distance soleil-terre, cette constante solaire est [8] :

$$I_{cs} = \sigma T^4 \left(\frac{D_s}{D_{st}} \right) \quad (1)$$

Cependant, cette valeur est affectée par les fluctuations causées par le mouvement de la terre autour du soleil, de ce fait, elle est corrigée par la formule suivante [8] :

$$I_{cs} = c(n) \sigma T^4 \left(\frac{D_s}{D_{st}} \right) \quad (2)$$

où $c(n)$ est une constante de correction donnée par la formule suivante [8] :

$$c(n) = 1 + 0.034 \cos \left[(n - 2) \left(\frac{360}{365} \right) \right] \quad (3)$$

Cette énergie solaire qui tombe en ligne droite sur la terre ne parvient pas en intégralité car elle va subir des altérations en traversant l'atmosphère. Ces altérations sont dues aux phénomènes d'absorption et de diffusion.

En effet, l'atmosphère est constituée en majorité d'azote et d'oxygène (78 % d'azote et 21 % d'oxygène), mais aussi de l'argon, du dioxyde de carbone, de la vapeur d'eau et d'ozone dont le rôle est le filtrage des ultraviolets.

I.2.2.1. La formation, la structure et la composition de l'atmosphère

L'atmosphère est la couche d'air qui entoure le globe terrestre. Du point de vue de la physique, l'atmosphère obéit aux mêmes lois que celles des gaz parfaits.

L'atmosphère est constituée de quatre couches qui sont :

a) La troposphère

C'est la couche atmosphérique la plus proche du sol, son épaisseur est variable de selon le lieu, elle est de 7 kilomètres au-dessus des pôles, de 18 kilomètres au-dessus de l'équateur et d'environ 13 kilomètre, selon les saison, dans les zones tempérées.

C'est dans cette couche qu'on trouve la plus grande partie des phénomènes météorologiques. Au fur et à mesure qu'on s'élève dans cette couche, la température décroît de façon régulière d'environ 6 degrés Celsius chaque kilomètre pour atteindre - 56 degrés Celsius à sa limite supérieure.

b) la stratosphère

Cette couche est juste au-dessus de la troposphère. C'est dans la stratosphère qu'on trouve la couche d'ozone. Cette dernière est essentielle à la vie sur terre, car elle absorbe la majorité des rayons ultraviolets qui sont extrêmement nocifs pour tout être vivant. Cette absorption provoque un dégagement d'énergie sous forme de chaleur. C'est pourquoi la température augmente lorsqu'on s'élève dans cette couche.

c) La mésosphère

C'est la troisième couche de l'atmosphère. Dans cette couche, la température commence à décroître avec l'altitude pour atteindre - 80 degrés Celsius à une altitude d'environ 80 kilomètres.

Les poussières et les particules qui proviennent de l'espace (les météores) s'enflamment en entrant dans cette couche à cause du frottement avec ses gaz. Ce phénomène nous apparaît sous la forme «d'étoiles filantes».

d) La thermosphère

C'est la couche la plus haute, sa température augmente avec l'altitude et peut atteindre environ 100 degrés Celsius. L'épaisseur de la thermosphère atteint des milliers de kilomètres et disparaît graduellement dans l'espace.

La thermosphère est la région où, près des pôles, se forment les aurores boréales et australes. La pression y devient presque nulle et les molécules d'air sont très rares.

La partie inférieure de la thermosphère est appelée l'ionosphère. L'ionosphère réfléchit les ondes courtes (ondes radio). Ces ondes, émises par un émetteur, rebondissent sur l'ionosphère et sont renvoyées vers la terre. Si elles sont retournées avec un certain angle, elles peuvent faire presque le tour du globe. L'ionosphère permet donc de communiquer avec des régions très éloignées. La séparation entre la mésosphère et la thermosphère s'appelle la mésopause. La séparation entre la troposphère et la stratosphère porte le nom de tropopause.

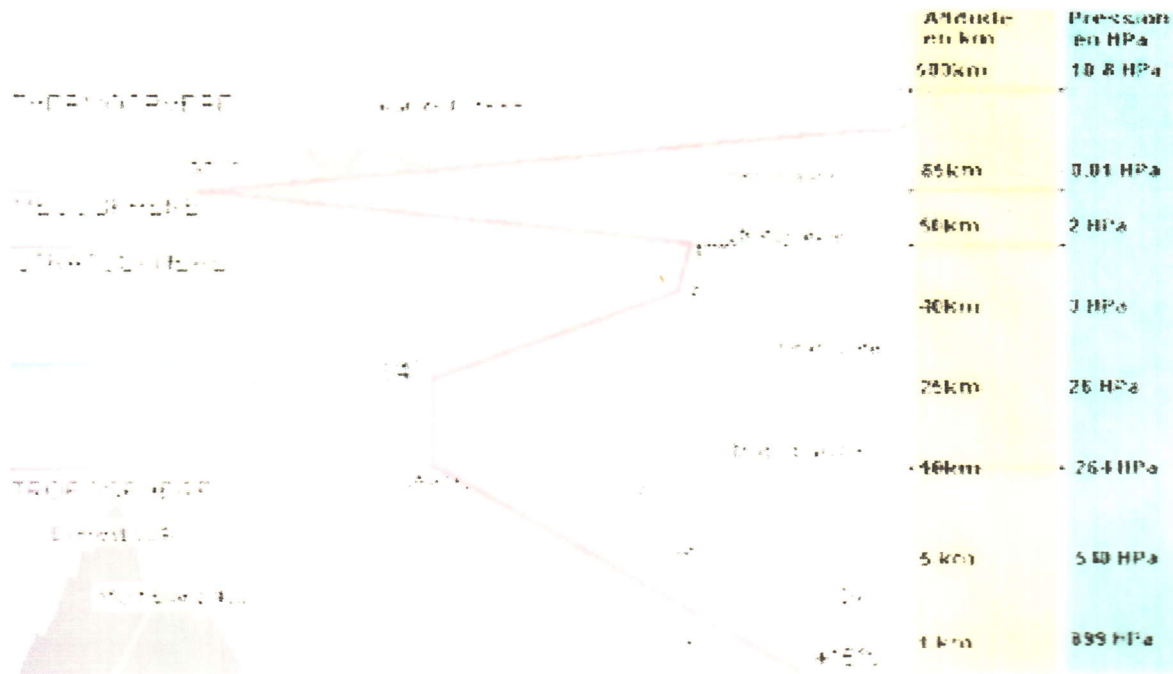


Figure 1. Les couches de l'atmosphère terrestre.

I.2.3. Le rayonnement direct et diffus

I.2.3.1. Le rayonnement direct

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue deux composantes qui sont :

Le rayonnement direct est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, ils forment donc des ombres et peuvent être concentrés par des miroirs. Il est donné par la formule suivante [8] :

$$H_{dir} = ac(n)I_{cs} \exp\left(-\frac{b}{\sin(h)}\right) \quad (4)$$

I_{cs} est la constante solaire et qui vaut 1360 W/m^2 , C est le coefficient de correction de la distance terre- soleil, a et b sont des coefficients de trouble de ciel dont les valeurs sont données dans le tableau suivant :

Tableau 1. Valeurs des coefficients de trouble du ciel.

| Coefficients | Condition normale | Ciel très pur | Zone industrielle |
|--------------|-------------------|---------------|-------------------|
| <i>a</i> | 0.88 | 0.87 | 0.91 |
| <i>b</i> | 0.26 | 0.17 | 0.43 |

I.2.3.2. Le rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère. La diffusion de la lumière est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux dans toutes les directions.

Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet éclatement des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet que le rayonnement diffus est isotrope, c'est à dire que l'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste. Par temps clair ou voilé, outre le ciel bleu relativement isotrope (diffusion par l'air). On a une couronne plus brillante autour du soleil.

Le rayonnement diffus sur une surface horizontal est donné par la formule [8]:

$$H_{diff} = c(n)I_{cs} \sin(h) \left[0.271 - 0.2939a \exp\left(-\frac{b}{\sin(h)}\right) \right] \quad (5)$$

Le rayonnement diffus reçu par une surface inclinée est [8]:

$$H_{diii} = H_{diff} \frac{(1 + \cos(s))}{2} + \rho(I_{cs} \sin(h) + H_{diff}) \frac{(1 - \cos(s))}{2} \quad (6)$$

ρ est un coefficient appelé albédo, il représente la propriété réfléchissante du sol.

Le rayonnement global est tout simplement la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus,

$$H = H_{dir} + H_{diff} \quad (7)$$

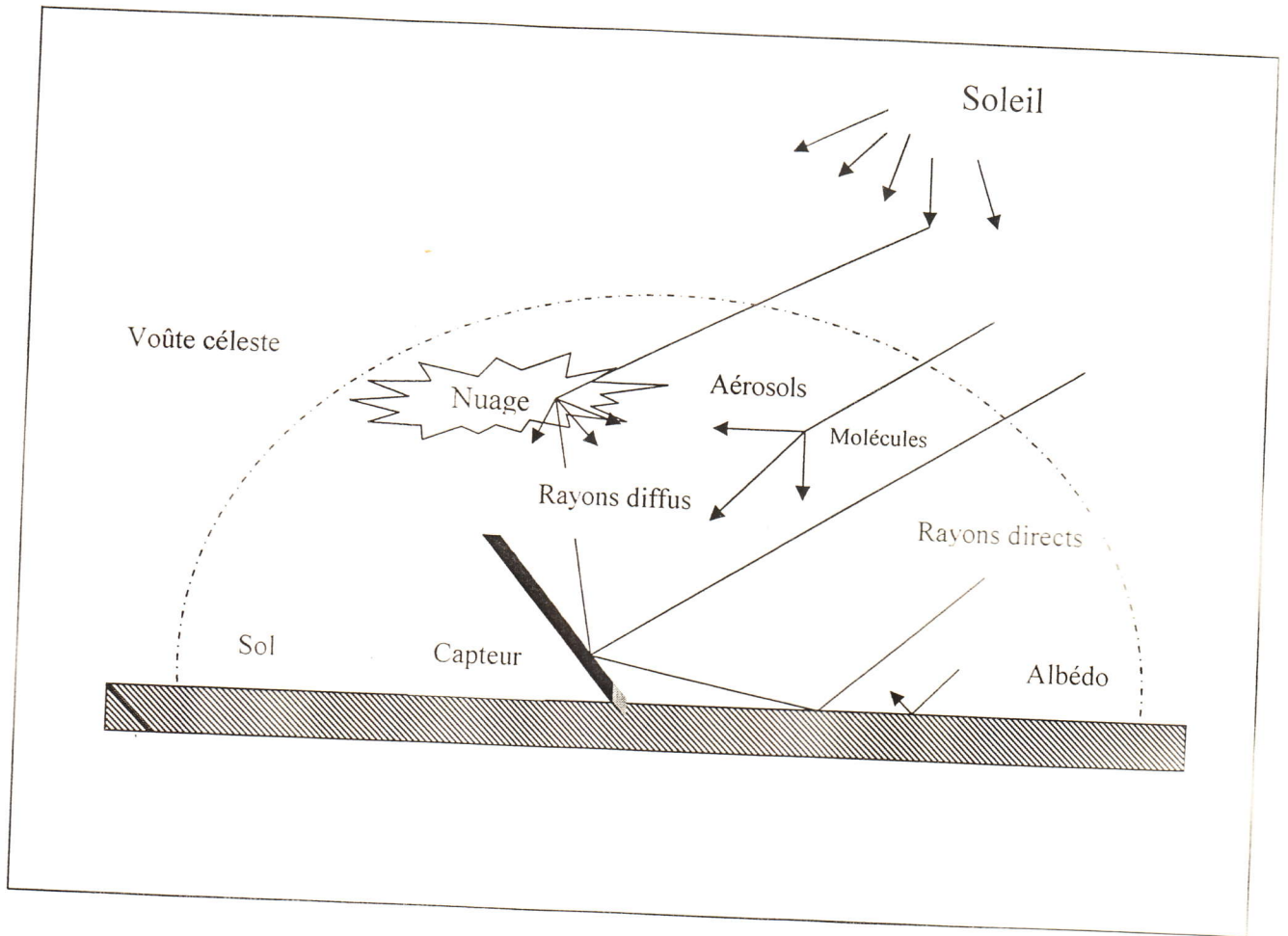


Figure 2. Rayonnement solaire à travers l'atmosphère.

CHAPITRE II
LA CONVERSION
PHOTOVOLTAIQUE DE
L'ENERGIE SOLAIRE

II.1. La conversion d'énergie solaire

L'exploitation de l'énergie solaire au moyen de capteurs relève de deux technologies bien distinctes, l'une produit des calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre produit de l'électricité, c'est l'énergie solaire photovoltaïque.

II.1.1. L'énergie solaire thermique

La conversion solaire thermique permet de récupérer la chaleur du rayonnement solaire au sein d'un fluide, parfois de l'air, le plus souvent de l'eau, par la mise en œuvre de capteurs solaire. Ces techniques peuvent assurer la production d'eau chaude sanitaire, d'eau distillée, le chauffage des piscines et des habitations ainsi que le séchage de céréales.

II.1.2. L'énergie photovoltaïque

Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement le rayonnement solaire en électricité.

II.1.2.1. L'historique

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par Antoine Becquerel en 1839, mais il a fallu attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène.

L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante dans le domaine spatial. Les recherches d'après guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille mais il faudra attendre la crise énergétique des années soixante dix pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres.

II.1.2.2. Le principe de fonctionnement

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et celles du semi-conducteur.

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charge libre est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à un atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimale pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est l'énergie de la bande interdite, cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1,0 à 1,8 électronvolts. Pour les applications photovoltaïques, elle vaut 1,1 électronvolt pour le silicium cristallin (c-Si) et 1,7 électronvolt pour le silicium amorphe (a-Si).

Ce semi-conducteur qui compose ces cellules comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit d'électrons. Le premier sera dit dopé négativement ou du type n, et le deuxième est dit dopé positivement ou de type p. Lorsque le matériau du type p est mis en contact avec le matériau du type n, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p devient chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p, ainsi une jonction p-n est créée. En ajoutant des contacts métalliques sur les deux matériaux on réalise une diode.

Dans les cellules solaires, le semi-conducteur utilisé est le silicium dont les atomes possèdent quatre électrons de valence sur la couche périphérique (colonne IV du tableau de Mendeleïev). Dans le silicium solide, chaque atome est lié à quatre atomes voisins. Si on introduit des atomes (phosphore par exemple) ayant cinq électrons sur la couche périphérique au cristal de silicium, un de ces cinq électrons de valence ne participe pas aux liaisons et peut facilement passer dans la bande de conduction et ainsi devenir libre de se déplacer dans le cristal. Il y a conduction par un électron, et le semi-conducteur est dit du type

n. Si au contraire un atome de valence trois est introduit dans le cristal de silicium (bore par exemple), il en manque un électron pour réaliser toutes les liaisons. Il en résulte un trou dans la bande de valence, qui va contribuer à la conduction, et le semi-conducteur est dit du type p. Les atomes tels que le bore ou le phosphore sont donc des dopants du silicium. Les cellules ainsi obtenues sont assemblées pour former des modules.

II.1.3. Les systèmes photovoltaïques

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de un à trois watts avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La plupart des modules commercialisés sont composés de trente six cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications en douze volts. Le courant de sortie, et donc la puissance, sera proportionnelle à la surface du module.

L'interconnexion des modules entre eux en série ou en parallèle pour obtenir une puissance encore plus grande définit la notion de champs photovoltaïques. Cette composition des modules adapte l'électricité produite aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble, appelé aussi "balance of system" ou BOS, comprend tous les équipements entre le champ photovoltaïque et la charge finale, à savoir la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser les modules, le câblage, la batterie en cas de stockage, le régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif.

II.1.4. Les avantages et les inconvénients des systèmes photovoltaïques

Comme toute technologie, les systèmes photovoltaïques présentent des avantages et des inconvénients. Ces avantages sont :

- a) Ces systèmes sont d'une haute fiabilité, ils ne comportent pas de pièces mobiles, ce qui les rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de leurs utilisations sur les engins spatiaux.

b) Les systèmes photovoltaïques sont faciles à monter car ils sont constitués de panneaux individuels. Ce caractère modulaire permet un montage adaptable à des besoins énergétiques divers.

c) Leur coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils nécessitent ni combustible, ni transport et ni personnel hautement spécialisé.

d) Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

Cependant, les systèmes photovoltaïques ne présentent pas seulement des avantages, ils ont aussi leurs inconvénients, et qui sont :

a) La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

b) Le rendement réel de la conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28 %).

c) Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie dans les régions isolées.

d) Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est élevé. La fiabilité et les performances des systèmes photovoltaïques restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composantes de régulation associées soient judicieusement choisies.

CHAPITRE III
L'HYDROGENE ET SES
PROPRIETES

III.1. L'hydrogène

L'hydrogène qui peut être produit par l'électrolyse de l'eau peut jouer un rôle important comme une alternative aux combustibles conventionnels. Il est considéré comme un porteur potentiel d'énergie. La production de l'hydrogène est obtenue directement en connectant des panneaux photovoltaïques à une cuve d'électrolyse.

III.1.1. Définition

L'hydrogène a été découvert en 1776 par Cavendish et il doit son nom à Lavoisier. On connaît trois isotopes de l'hydrogène, l'hydrogène léger (98,98 % de l'hydrogène naturel), l'hydrogène lourd (ou deutérium) et le tritium. Le noyau de l'atome d'hydrogène léger est formé uniquement d'un proton. L'hydrogène est de loin l'élément le plus abondant dans l'Univers. Il entre dans de nombreuses combinaisons, comme l'eau et la matière organique notamment, et représente la quasi-totalité de la matière interstellaire.

L'hydrogène se combine avec presque tous les éléments, en donnant des hydrures; c'est un excellent réducteur. Il permet la synthèse de l'ammoniac et du chlorure d'hydrogène. Les carburants synthétiques sont obtenus par hydrogénation. L'hydrogène est utilisé dans les chalumeaux oxyhydriques et à hydrogène atomique. L'hydrogène liquide sert de carburant dans les moteurs de fusées. La fusion de noyaux d'hydrogène (donc de protons) libère une énergie considérable, la maîtrise de cette fusion permettrait de disposer d'une source d'énergie pratiquement inépuisable. Par ailleurs, la production d'hydrogène par la décomposition de l'eau pourrait fournir un combustible de choix, susceptible d'être utilisé pour la fabrication directe d'électricité avec des piles à combustible.

C'est une source d'énergie propre. Lorsque l'hydrogène est utilisé dans une pile à combustible pour produire de l'électricité, la technologie mise à l'œuvre est absolument non polluante. Le seul sous produit est de l'eau. L'électrolyse produit de l'hydrogène à partir de l'eau et, dans une pile à combustible, l'hydrogène se combine de nouveau à l'oxygène pour créer de l'eau et de l'électricité.

L'hydrogène est aussi sécuritaire que tout autre source d'énergie. Sa production, son stockage et son utilisation sont tout aussi sécuritaires que ceux de l'essence, du diesel ou du gaz naturel, c'est donc une source fiable d'énergie, il est possible d'en produire partout où il y a de l'électricité et de l'eau.

Tableau 2. Quelques propriétés chimiques et physiques sur l'hydrogène et quelques comparaisons avec le gaz naturel.

| Propriété | Valeur numérique |
|---|--|
| PCI (Pouvoir calorifique inférieur) | 10 800 kJ/Nm ³ 119 930 kJ/kg (gaz naturel 50 020 kJ/kg) 3.00 kWh/Nm ³ 33.33 kWh/kg |
| PCS (Pouvoir calorifique supérieur : inclut l'énergie de la vapeur d'eau) | 12 770 kJ/Nm ³ 141 860 kJ/kg 3.55 kWh/Nm ³ 39.41 kWh/kg |
| Densité gazeuse à 20,3 K | 1.34 kg/m ³ |
| Densité gazeuse à 273 K | 0.08988 kg/Nm ³ (gaz naturel 0.6512 kg/Nm ³) |
| Densité liquide à 20.3 K | 70.79 kg/m ³ |
| Chaleur spécifique (Cp) | 14 266 J/kg K (293 K) |
| Chaleur spécifique (Cv) | 10 300 J/kg K |
| Conductivité thermique du gaz | 0.1897 W/(mK) |
| Chaleur d'évaporation | 445.4 kJ/kg |
| Energie théorique de liquéfaction | 14 112 J/g (3.92kWh/kg) |
| Electronégativité | 2.1 |
| Masse atomique | 1.0079 |
| Constante du gaz | 4 124.5 J/kg K |
| Température de solidification | 14.01 K |
| Température d'ébullition (à 1013 mbar abs.) | 20.268 K |
| Température critique | 33.30 K |
| Température d'auto inflammation dans l'air | 858 K (gaz naturel 813 K) |
| Température de flamme dans l'air à 300 K | 2 318 K (gaz naturel 2 148 K) |
| Limites d'inflammabilité dans l'air (vol %) | 4-75 (gaz naturel 5.3-15) |
| Limites de détonation dans l'air (vol %) | 13-65 (gaz naturel 6.3-13.5) |
| Energie minimale d'inflammation (J) | 20 (gaz naturel 290) |
| Energie explosive théorique(kg de TNT/m ³) | 2.02 (gaz naturel 7.03) |
| Suppression de détonation (mélange stœchiométrie) | 14.7 bar (gaz naturel 16.8 bar) |
| Coefficient de diffusion dans l'air | 0.61 cm/s (gaz naturel 0.16) |
| Vitesse de flamme dans l'air | 260 cm/s (7 fois le gaz naturel) |
| Vitesse de détonation dans l'air | 2.0 km/s (gaz naturel 1.8 km/s) |
| Mélange stœchiométrique dans l'air (vol) | 29.53% (gaz naturel 9.48%) |

III.1.2. La production d'hydrogène

Le choix de la méthode de production de l'hydrogène dépend de la disponibilité de la matière première ou de la ressource, de la quantité d'hydrogène exigée et la pureté souhaitée. Les chercheurs et les industriels développent un éventail de processus pour produire l'hydrogène d'une manière économiquement et écologiquement satisfaisante.

Ces processus peuvent être séparés en quatre groupes de technologie :

- a) Les technologies thermochimiques.
- b) La technologie nucléaire.
- c) Les technologies électrolytiques.
- d) Les technologies photolytiques.

Toutes les ressources d'énergies renouvelables et non renouvelables sont envisagées pour permettre la production d'hydrogène qui doit à terme permettre la satisfaction de la demande en énergie sans peser sur le futur environnemental de notre planète.

III.2. La production d'hydrogène par électrolyse

Jusqu'aux années cinquante, l'électrolyse de l'eau était utilisée pour la production d'hydrogène et d'oxygène. Aujourd'hui, l'électrolyse fournit seulement un petit pourcentage de l'hydrogène du monde, lequel est fourni aux applications qui exigent de petits volumes d'hydrogène de grande pureté.

Désormais, l'électrolyse est associée à une future utilisation des énergies renouvelables. Cela pourrait être intéressant au vu de la non simultanée de la production par ces procédés avec les besoins des industriels et des individus. Une autre possibilité réside dans l'utilisation de l'électricité produite par des centrales nucléaires, et plus particulièrement lors des heures creuses. L'hydrogène permettrait ainsi le stockage de l'électricité sous forme chimique, et une réutilisation ultérieure lorsque les besoins se font sentir. En outre, le rendement de l'électrolyse est en pratique de l'ordre de 65 %, bien que, théoriquement, il soit possible d'atteindre 80 ou 85 %. Enfin, étant donné le prix élevé de l'électricité, le coût de l'électrolyse est bien supérieur à celui du reformage. Ainsi, afin d'augmenter la rentabilité du processus, il faudrait une électricité à plus faible coût.

III.2.1. L'électrolyse de l'eau

La cuve d'électrolyse est un appareil électrique désigné souvent sous le nom impropre de voltamètre. C'est une cuve généralement en verre ou en plastique dans laquelle deux électrodes sont fixées pour permettre au courant électrique de circuler dans l'électrolyte. Sous l'effet du passage du courant électrique, des réactions chimiques (réactions d'oxydo-réduction) se déroulent au niveau des électrodes et permettent la transformation l'énergie électrique en énergie chimique.

A l'anode on a une réaction d'oxydation des ions hydroxydes selon le processus suivant :



A la cathode, une réaction de réduction des ions hydronium selon le processus suivant :



Le bilan de ces réactions d'oxydo-réduction est l'électrolyse de l'eau,



La figure 3 représente la variation de la conductivité en fonction de la concentration pour quelques électrolytes.

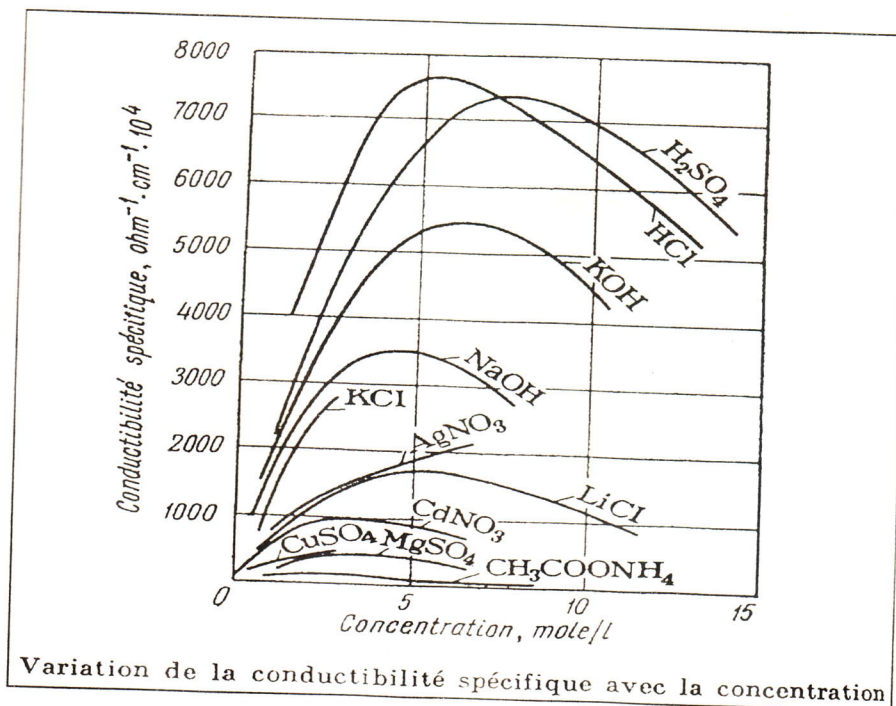


Figure 3. Variations de la conductivité électrique de quelques solutions [9].

CHAPITRE IV
RESULTATS ET
INTERPRETATION

IV.1. Le dispositif expérimental

Le but de ce travail expérimental est l'étude des effets du soluté et de sa concentration sur la production de l'hydrogène par l'électrolyse de l'eau en utilisant l'électricité générée par un système photovoltaïque. Les électrolytes utilisés sont des solutions aqueuses de soude et de potasse ayant différentes concentrations.

Seulement, comme l'électricité générée par un système photovoltaïque dépend directement du rayonnement solaire, il est impossible d'avoir un rayonnement solaire identique chaque jour où se déroule l'expérience à cause des modifications météorologiques. Pour que l'effet du soluté et de sa concentration sur la production d'hydrogène soit étudié correctement, il faut que le courant utilisé à cet effet soit constant.

Pour cela, les caractéristiques utilisées, sont celles d'un panneau photovoltaïque composé de deux modules ayant une surface totale de 1,6 mètres carrés fixé sur un cadre en acier et incliné de 30 degrés avec l'horizontale et orienté vers le sud. Ces caractéristiques sont le courant électrique et la différence de potentiel. Leurs variations durant la journée sont illustrées sur la figure 5.

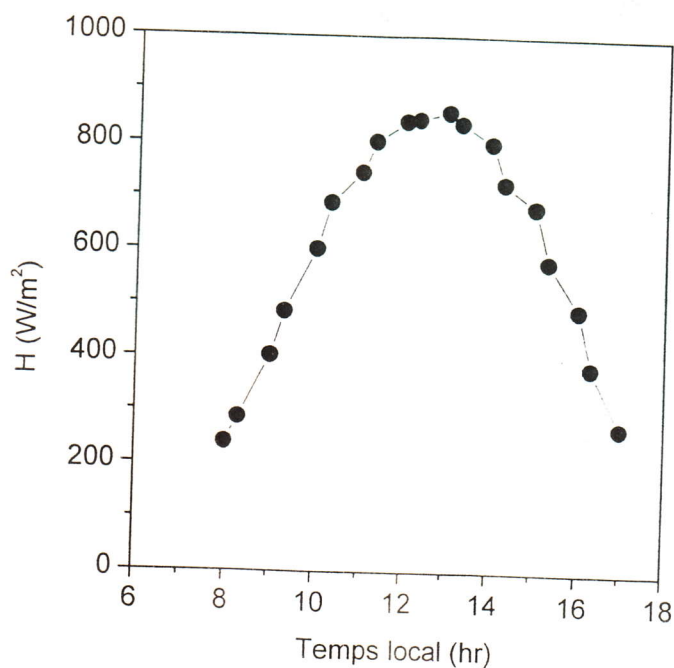


Figure 4. Variations du rayonnement solaire en fonction du temps.

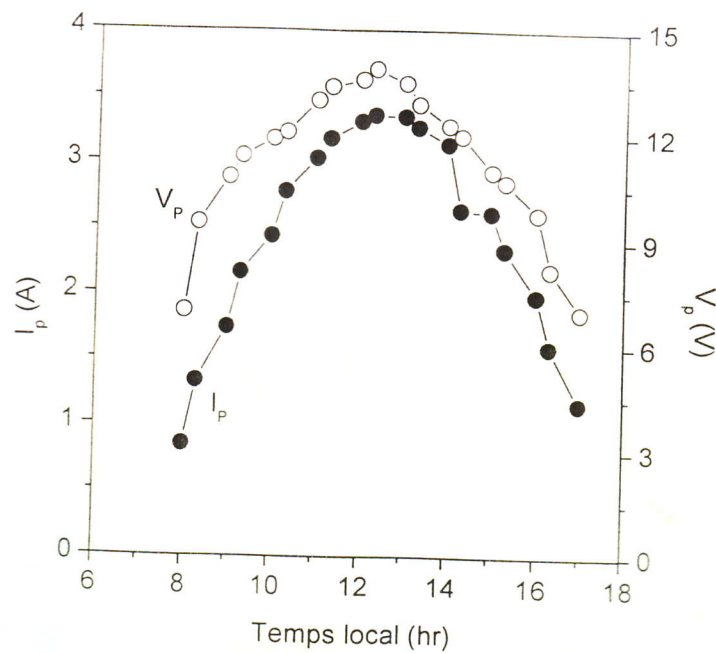


Figure 5. Variations de l'intensité et le voltage du panneau photovoltaïque en fonction du temps.

Le figure 4 montre que le rayonnement solaire augmente durant la matinée pour atteindre un maximum au alentour de treize heures puis il diminue graduellement au coucher du soleil.

Les variations du voltage et de l'intensité délivrées par le panneau photovoltaïque en fonction du temps sont représentées sur la figure 5, il est claire quelles suivent les variations du rayonnement solaire. Elles présentent des maximums au alentour de treize heures et diminuent en fin de la journée.

Le montage expérimental comprend un générateur électrique à courant continu qui simule le panneau photovoltaïque, une cuve d'électrolyse, un voltmètre, un ampèremètre et une balance digitale.

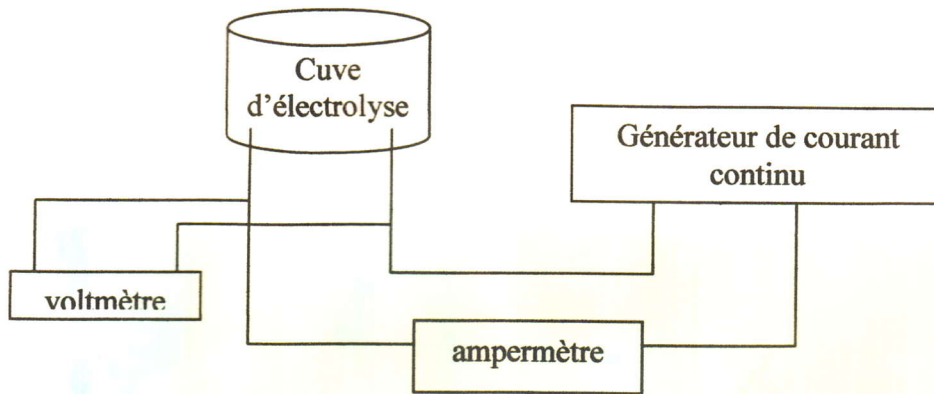


Figure 6. Le schéma du montage expérimental.

La cuve d'électrolyse, désigné souvent sous le nom de voltamètre, est un récipient cylindrique en plastique de dix centimètres de diamètre et huit centimètres de hauteur, dans laquelle sont fixés deux électrodes en fer et peuvent être reliées aux deux bornes du générateur.



Figure 7. Le panneau photovoltaïque.

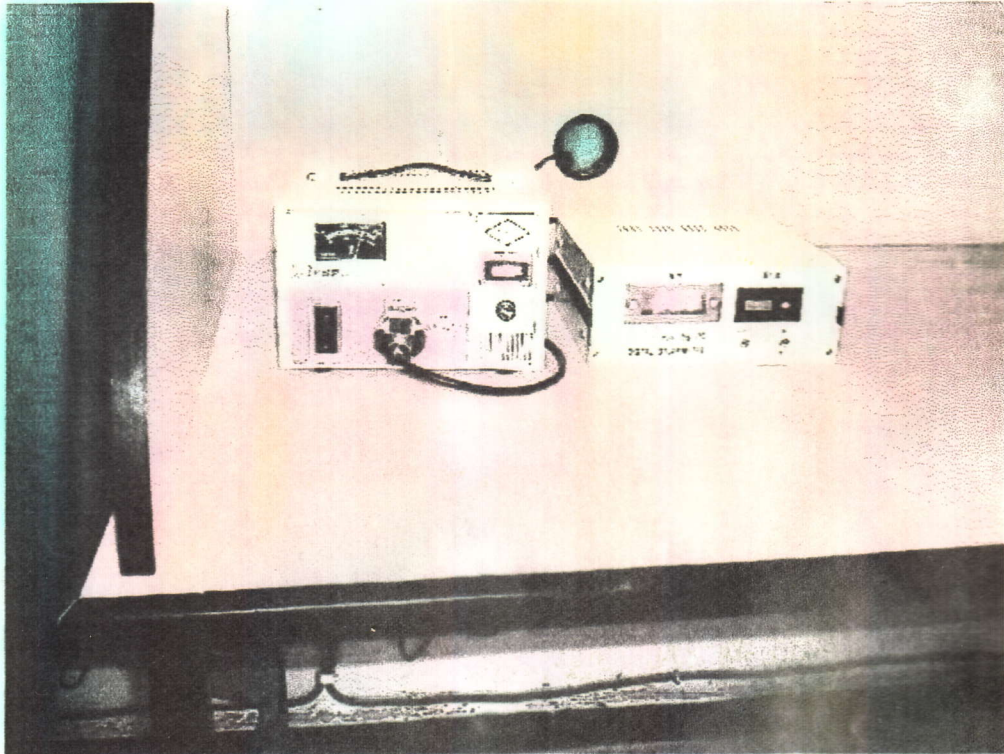
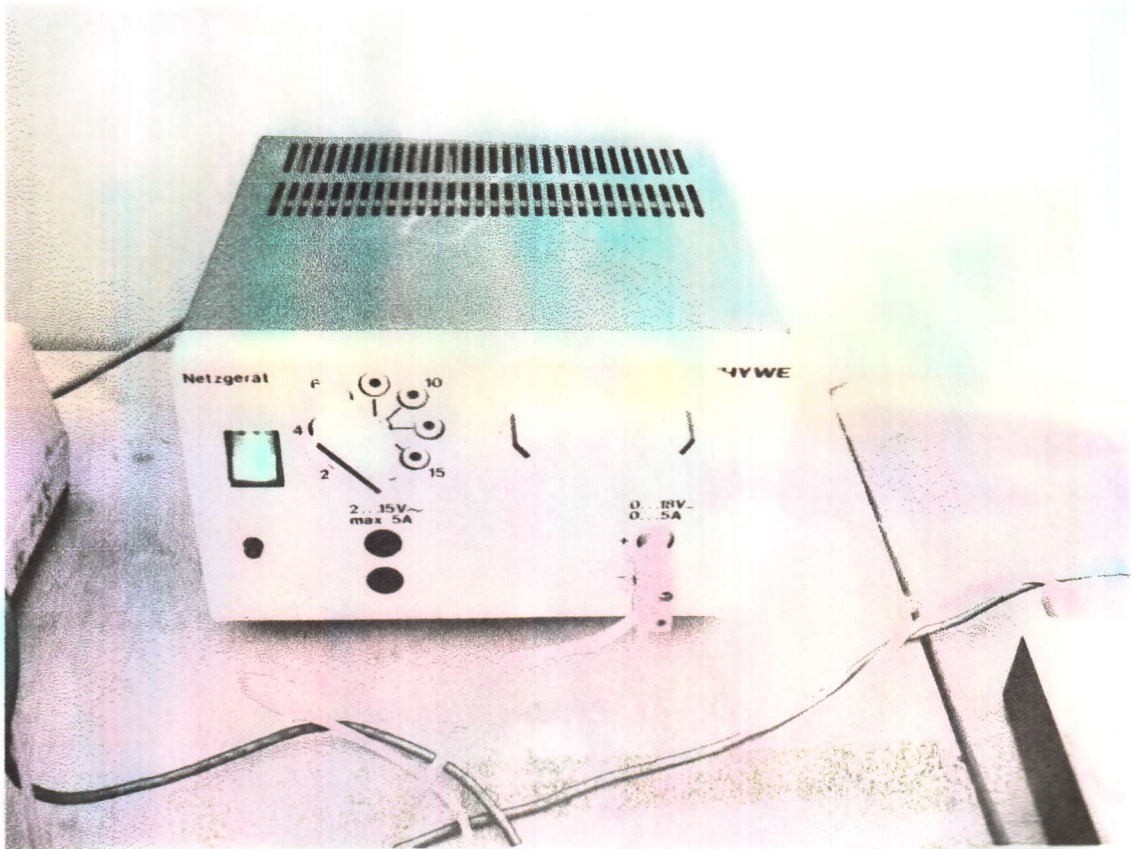


Figure 8. Le pyranomètre



enlevé

Figure 9. Le générateur de courant continu.



~~expliquer moi le montage~~

Figure 10. La balance digitale et la cuve d'électrolyse.

~~expliqué~~

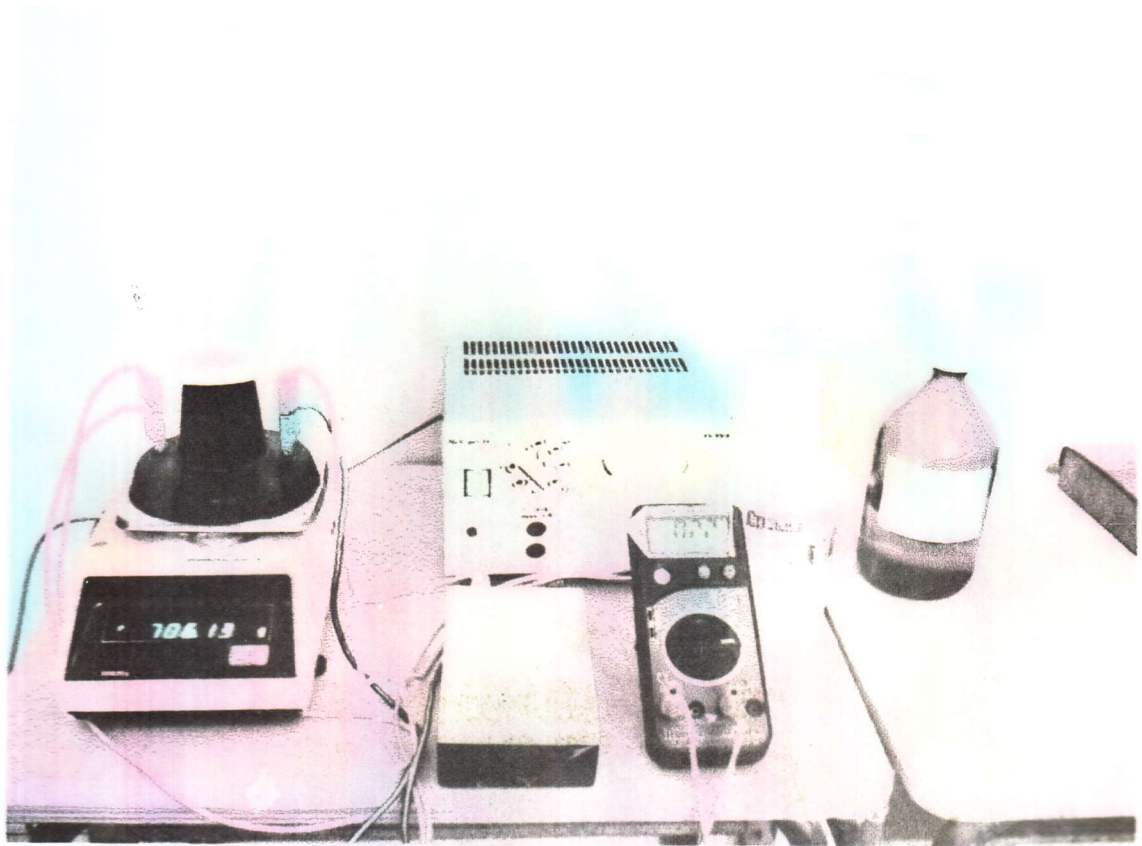


Figure 11. Le montage expérimental de la production d'hydrogène.

expliquer moi le montage et
son travail

Le voltmètre permet de mesurer la différence de potentiel aux bornes de la cuve d'électrolyse. L'ampèremètre sert à mesurer l'intensité du courant électrique circulant à travers la cuve d'électrolyse.

La masse de l'hydrogène produit est déterminée avec la balance digitale, en mesurant les masses de la solution chaque trente minute. Ainsi, la masse d'hydrogène produit, pendant cet intervalle de temps, n'est rien d'autre que la différence entre ces deux masses.

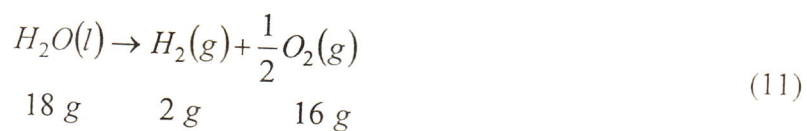
Le générateur électrique, utilisé pour simuler le panneau photovoltaïque, délivre une tension et une intensité de courant variables. Les variations de la tension et du courant électrique en fonction du temps représentées sur la figure 5 sont ajustées grâce aux boutons de tension et du courant du générateur.

Les électrolytes utilisés sont deux solutions aqueuses d'hydroxyde de sodium et d'hydroxyde de potassium ayant des concentrations massiques allant de 0,1 % à 0,4 %.

Au début de chaque expérience, la cuve d'électrolyse est placée sur la balance digitale qui doit être tarée. La solution de concentration donnée est versée dans la cuve d'électrolyse et le générateur est allumé. Après chaque trente minute, la masse restante de la solution, la différence de potentiel et le courant électrique sont mesurés. Ensuite, les valeurs de la tension et du courant électrique sont ajustés de nouveau et l'expérience continue ainsi toute la journée.

IV.2. Le calcul du débit de l'hydrogène

Pour déterminer le débit massique de l'hydrogène produit pendant chaque trente minute, l'équation (10) est utilisée. Chaque mole d'eau produit une mole d'hydrogène selon l'équation suivante :



Le débit d'hydrogène produit est :

$$Q = \frac{m(t) - m(t+30)}{270} \quad (12)$$

IV.3. L'interprétation des résultats

IV.3.1. Les variations du voltage aux bornes de la cuve d'électrolyse

Les variations du voltage au niveau des bornes de la cuve d'électrolyse en fonction du temps pour les différentes concentrations des solutions de soude et de potasse sont représentées respectivement sur les figures 12 et 13.

Il est à noter que les concentrations n'ont aucune influence sur le voltage aux bornes de la cuve d'électrolyse. Dans les deux cas, les voltages présentent un maximum au alentour de treize heures.

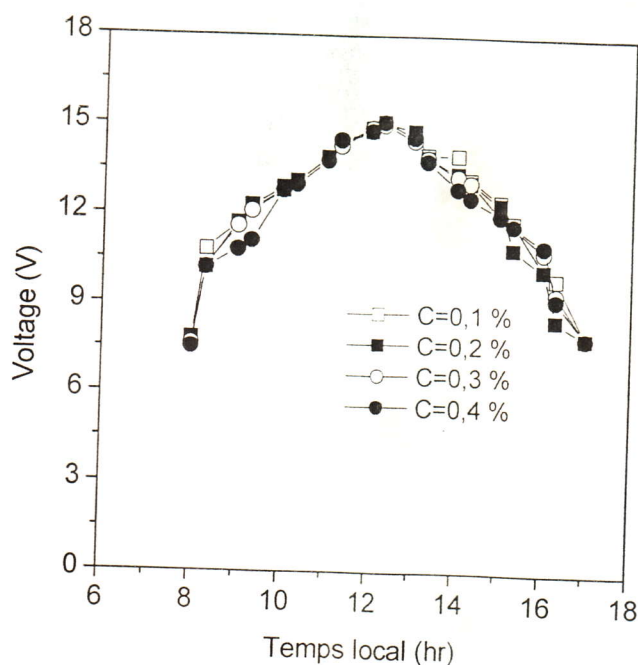


Figure 12. Variations des voltages aux bornes de la cuve de la solution NaOH en fonction du temps.

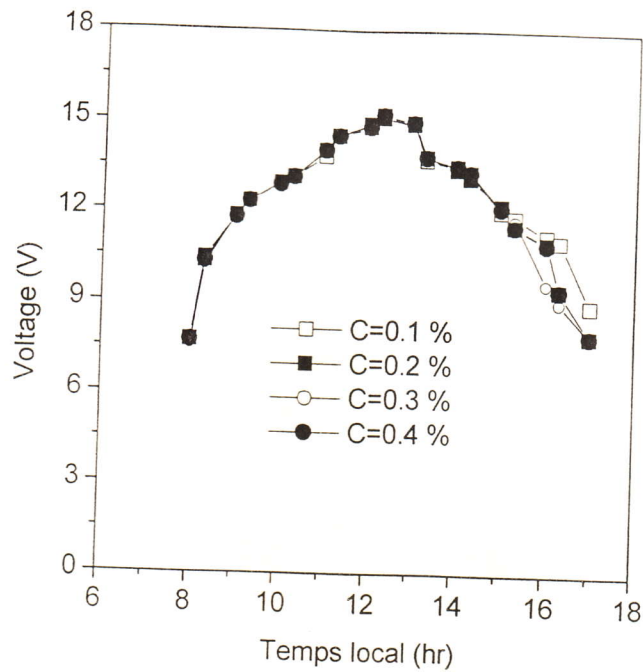


Figure 13. Variations des voltages aux bornes de la cuve de la solution KOH en fonction du temps.

IV.3.2. Les variations de l'intensité du courant dans la cuve d'électrolyse

Les figures 14 et 15 illustrent les variations de l'intensité du courant électrique, qui traverse la cuve d'électrolyse, en fonction du temps pour les différentes concentrations des deux électrolytes.

Dans les deux cas, l'intensité du courant électrique augmente avec la concentration. Ainsi, chaque augmentation de la concentration est accompagnée par une augmentation des valeurs du courant électrique, ceci est dû à l'influence de la concentration sur la conductivité de l'électrolyte [9]. La conductivité d'une solution de soude ou de potasse augmente avec la concentration, ceci entraîne une diminution de la résistance de la solution. La conductivité d'une solution de potasse est supérieure à celle d'une solution de soude, ceci explique le fait que les intensités du courant électrique dans le cas d'une solution de potasse sont supérieures à celles mesurées dans le cas d'une solution de soude.

expliquer mieux

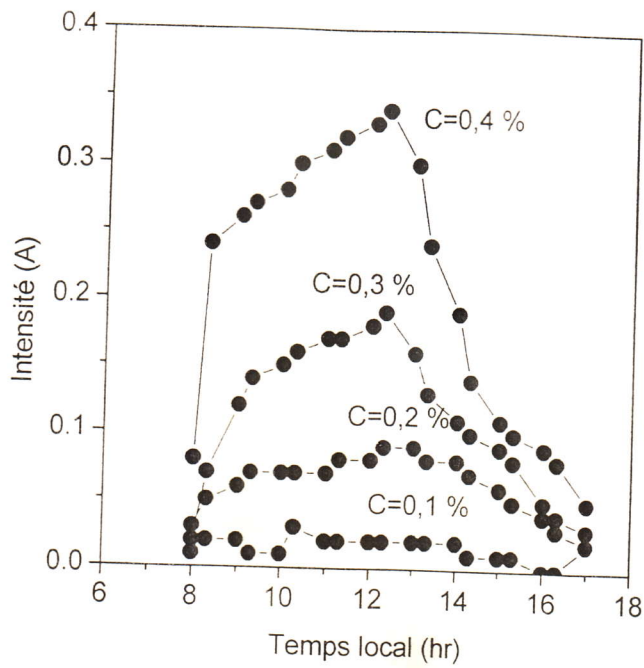


Figure 14. Variations de l'intensité du courant dans la cuve de la solution de NaOH en fonction du temps.

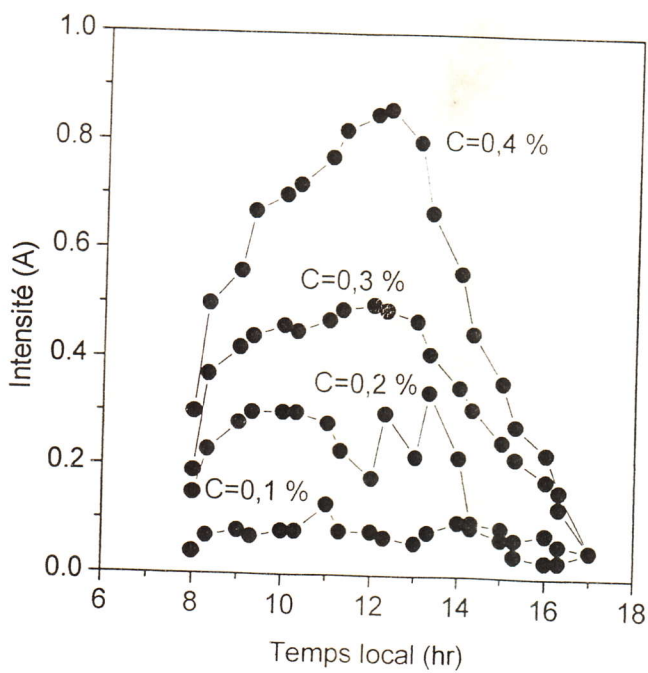


Figure 15. Variations de l'intensité du courant dans la cuve de la solution de KOH en fonction du temps.

IV.3.3. Les variations du débit d'hydrogène

Les effets de la concentration des solutions de soude et de potasse sur le débit d'hydrogène produit par électrolyse sont représentés sur les figures 16 et 17.

Les débits d'hydrogène produit augmentent avec l'augmentation de la concentration que ce soit pour la solution de soude ou la solution de potasse. Ceci est dû au fait que la masse produite de l'hydrogène pendant un intervalle de temps donné est proportionnelle à l'intensité du courant électrique qui traverse la cuve.

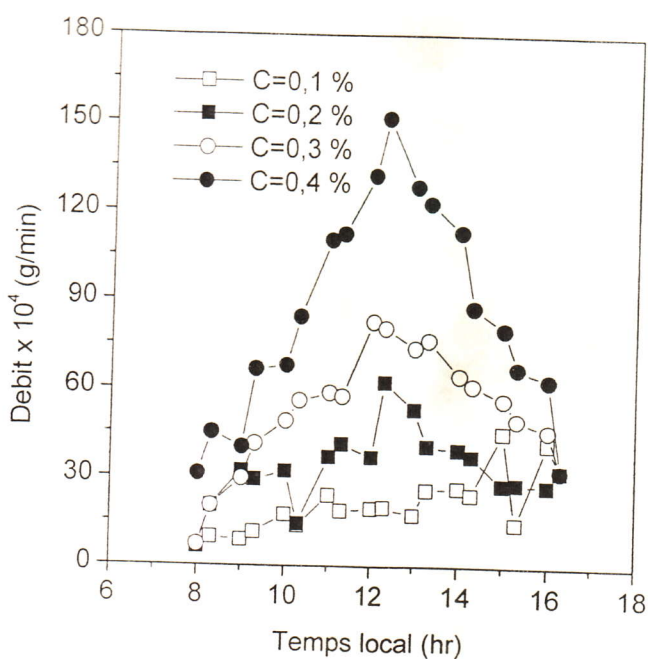


Figure 16. Variations des débits d'hydrogène pour une solution de NaOH en fonction du temps.

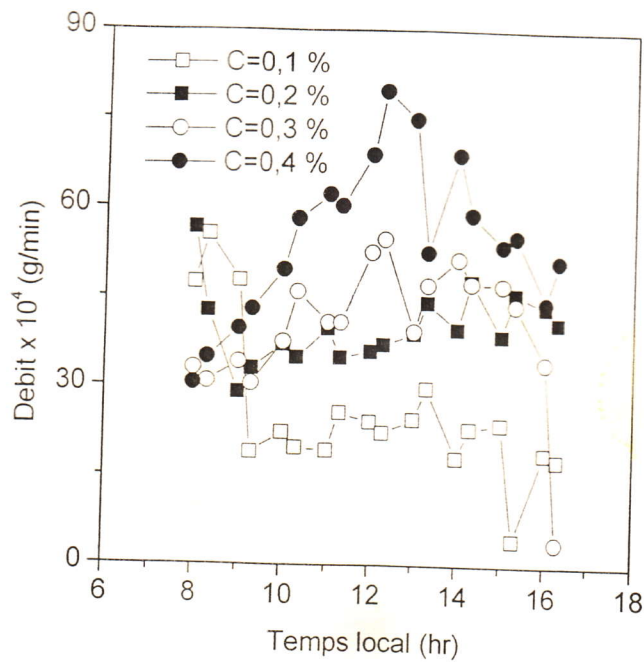


Figure 17. Variations des débits d'hydrogène pour une solution de KOH en fonction du temps.

IV.3.4. L'étude comparative des variations du débit d'hydrogène

Les figures 18, 19, 20 et 21 représentent une comparaison entre les variations des débits d'hydrogène produit lors de l'électrolyse des solutions de soude et de potasse à concentration égale.

Pour les concentrations de 0,1 % et 0,2 %, les deux solutions de soude et de potasse produisent plus au moins la même quantité d'hydrogène. Cependant, ils existent des différences au début des expériences.

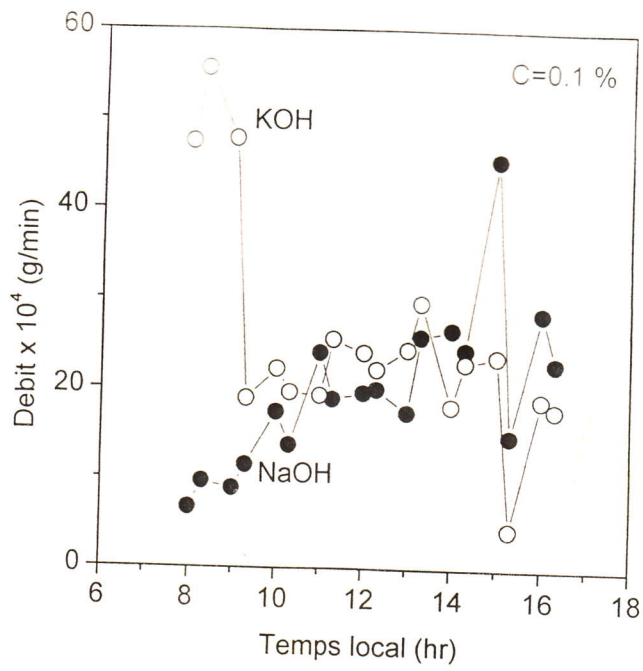


Figure 18. Comparaison entre les débits d'hydrogène dans le cas d'une solution de NaOH et KOH pour une concentration de 0,1 %.

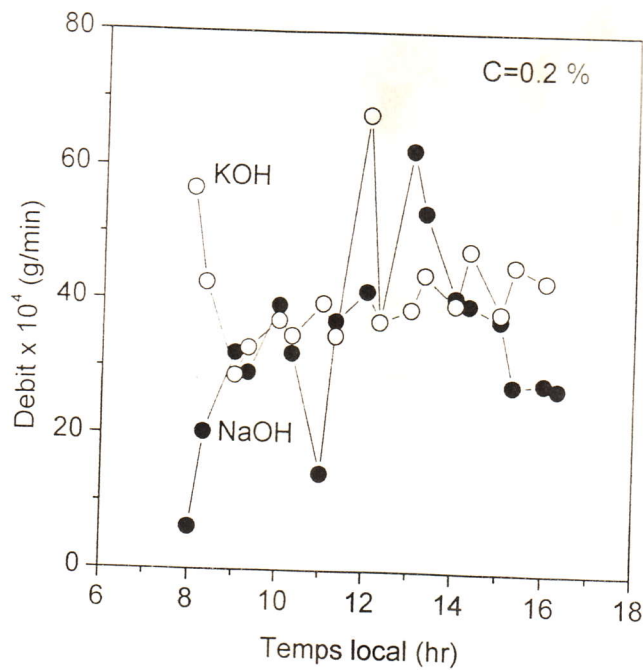


Figure 19. Comparaison entre les débits d'hydrogène dans le cas d'une solution de NaOH et KOH pour une concentration de 0,2 %.

Pour les concentrations de 0,3 % et 0,4 %, les différences entre les deux solutions de soude et de potasse sont plus importantes. Dans le cas de l'électrolyse de la solution de soude, la quantité d'hydrogène produite est pratiquement le double de celle produite en utilisant la solution de potasse.

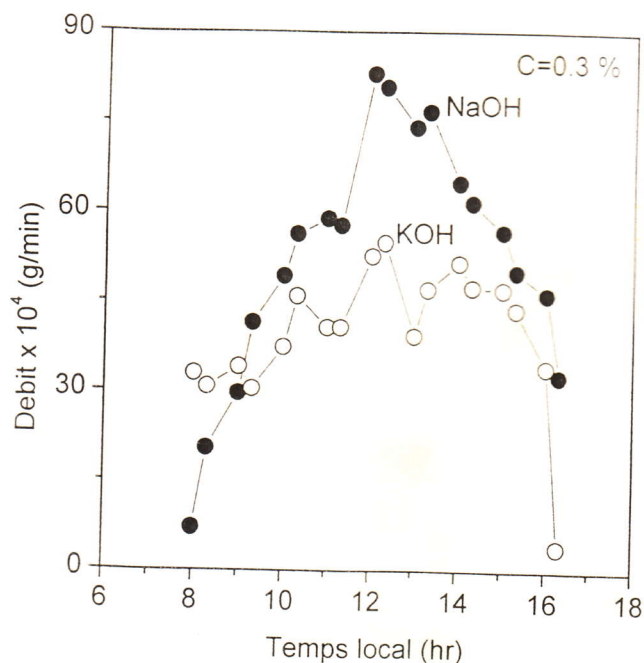


Figure 20. Comparaison entre les débits d'hydrogène dans le cas d'une solution de NaOH et KOH pour une concentration de 0,3 %.

Cette forte génération d'hydrogène dans le cas de la solution de soude peut être expliquée par le fait que la dimension et la masse de l'ion Na^+ sont inférieures à celles de l'ion K^+ . Ces propriétés déterminent la mobilité des ions dans la solution et cela peut être la cause de la forte génération d'hydrogène dans le cas de la solution de soude. Une autre raison est que dans le cas d'une solution de soude, le nombre d'ions en solution est supérieur à celui d'une solution de potasse pour la même concentration.

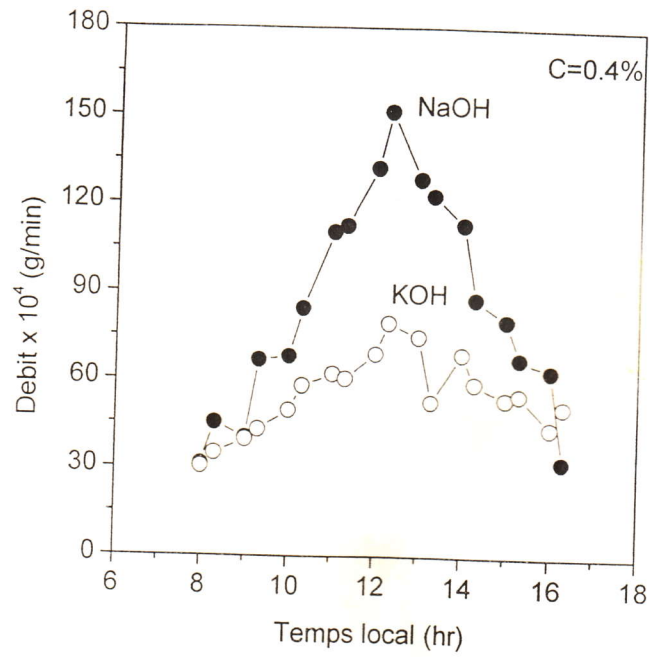


Figure 21. Comparaison entre les débits d'hydrogène dans le cas d'une solution de NaOH et KOH pour une concentration de 0,4 %.

CONCLUSION

Dans ce travail, les effets de la solution et de sa concentration sur la production d'hydrogène par l'électrolyse de l'eau en utilisant l'électricité générée par un système photovoltaïque sont étudiés expérimentalement.

Le dispositif expérimental comprend un générateur de courant continu, qui simule le panneau photovoltaïque, une cuve d'électrolyse et des instruments de mesure, tel que, le voltmètre, l'ampermètre et la balance.

Les solutions utilisées sont de la soude et de la potasse avec quatre concentrations différentes.

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que :

- a) Le débit d'hydrogène produit augmente avec la concentration.
- b) Pour les faibles concentrations, le débit d'hydrogène produit est presque le même que ce soit pour la solution de soude ou la solution de potasse.
- c) Cependant, pour les fortes concentrations, le débit d'hydrogène est plus important dans le cas de la solution de la soude que dans celui de la potasse.

Ce travail peut être réétudié avec d'autres solutés et d'autres concentrations.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Duffie J.A., Beckman W. A., Solar energy thermal processes, Wiley, New York, 1974.
- [2] Kreith F., Kreider J., Principals of solar engineering, Hemisphere, Washington, 1978.
- [3] Labouret A., Viloz M., Energie solaire photovoltaïque, Dunod, Paris, 2003.
- [4] Kothari R., Buddhi D., Sawhney R. L., Studies of the effect temperature of the electrolytes on the rate of production of hydrogen, International Journal of Hydrogen Energy, 30, 251-263, 2005.
- [5] Bilgen E., Solar hydrogen from photovoltaic electrolyzer system, Energy Conversion Management, 42, 1047-1057, 2001.
- [6] Lehman P. A., Chamberlin C. E., Pauletto G., Rochelau M. A., Operating experience with a photovoltaic hydrogen energy system, International Journal of Hydrogen Energy, 24, 505-517, 1990.
- [7] Ahmad G. E., El-Shanaway E. T., Optimized photovoltaic system for hydrogen production, Renewable Energy, 31, 1043-1054, 2006.
- [8] Chouard P., Michel H., Simon M. F., Bilan thermique d'une maison solaire, collection de la direction des études et recherches d'électricité de France, Eyrolles, Paris, 1977.
- [9] Kiréev V., Cours de chimie physique, Edition Mir, Moscou, 1975.

RESUME

Dans le cadre de la promotion des énergies propres et renouvelables, la recherche d'une nouvelle source d'énergie est capitale. L'un de ces candidats est l'hydrogène, puisque ce dernier est disponible en abondance sous forme d'eau. Le souci majeur est de trouver les moyens les plus rentables et accessibles pour le produire à bas prix.

Dans ce projet, l'effet du soluté et de sa concentration sur la production d'hydrogène par l'électrolyse d'eau au moyen de l'électricité photovoltaïque est considéré.

Les solutions étudiées sont celles de la soude et de la potasse. Les résultats ont montrés que la production d'hydrogène est plus importante avec une solution de soude.

ملخص

في إطار ترقية الطاقات النظيفة والمتجددة، فإن البحث على مصدر جديد للطاقة مهم جدا. حيث يعتبر الهيدروجين من بين المرشحين لهذه الترقية كونه من العناصر المكونة للماء.

إن الاهتمام الأساسي هو إيجاد الطرق بتكلفة منخفضة. في هذا المشروع تمت دراسة تأثير المحلول وتركيزه على إنتاج الهيدروجين وهذا باستعمال طريقة التحليل الكهربائي للماء بواسطة تيار كهروضوئي. المحلولين المستعملين في هذه الدراسة هما: محلول الصودا ومحلول البوتاس، وتبين من النتائج أن كمية الهيدروجين المنتجة تكون أكبر في حالة محلول الصودا هذا بالمقارنة بالكمية المنتجة باستعمال محلول البوتاس.