

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

8/03

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie mécanique

SUJET :

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

ETUDE D'UNE PRODUCTION D'HYDROGENE UTILISANT UN  
SYSTEME DE PANNEAUX PHOTOVOLTAIQUES  
APPLICATION A L'INDUSTRIE AUTOMOBILE



Proposé et dirigé par :

P<sup>R</sup>.E.Bilgen

M<sup>R</sup>. M.Benbraika

M<sup>R</sup>.S.Larbi

M<sup>R</sup>.S.M'raoui

Etudié par :

M<sup>R</sup>. Bendaoud Larbi Adlane



PROMOTION 2003

## DEDICACES

*Je dédie ce travail à :*

*Mes parents qui m'ont toujours soutenu  
sans limites pour pouvoir poursuivre des études  
sans sentir le moindre manque.*

*Mon frère et sœur à qui je souhaite la plus  
grande réussite intellectuelle.*

*Mes chers amis en particulier Seif, Mehdi,  
Sofiane de champ de manœuvre, Sofiane de  
béjaia, Nabil sniksou, S'haouli, Redouane,  
Adlane, salafi et à tous ceux que je connais.*

*BENDAOU LARBI ADLANE.*

# Remerciements

*Je tiens à remercier toutes les personnes ayant contribué à la réalisation de ce travail.*

*Je remercie tout les enseignants qui ont contribué a ma formation depuis l'école primaire jusqu'à l'obtention de mon diplôme d'ingénieur d'état.*

*Mes grands remerciement, respects, et sincères reconnaissances vont vers mes promoteurs le Professeur E. Bilgen de l'Ecole polytechnique de Montréal et au Dr S. Larbi et Dr M. Benbraika de l'Ecole nationale polytechnique d'Alger ainsi que Dr S.M'raoui du Centre de recherche et développement des énergies renouvelables.*

*Je tiens à remercier monsieur le directeur du C.D.E.R. Mr Belhamel de m'avoir accueilli au sein de son institution et de m'avoir permis d'effectuer mon stage de fin d'études.*

*Je remercie les membres du jury*

*Mr Benkoussas président de jury.*

*Mr Bouhdjar membre de jury.*

*Mr Mahmah invité.*

المهدف من هذه الدراسة هو تحديد أبعاد والمقارنة بين ثلاثة منشآت طاقة ذات لاقات شمسية لتوليد الكهرباء للتزويد الطاقوي لثلاث أنواع من السيارات : الأولى كلها كهربائية ، الثانية بطاريات ذات إحتراق والاخيرة بمحرك ذي إحتراق داخلي .  
الكلمات المفتاحية : لاقات شمسية ، سيارات كهربائية ، بطاريات ذات إحتراق وهيدروجين .

## RESUME :

Dans ce travail nous avons fait un dimensionnement énergétique de trois installations de recharge de trois véhicules différents, le premier tout électrique utilisant des batteries a plomb rechargeable, le deuxième utilisant des piles à combustible et le troisième a moteur à combustion interne à hydrogène.

**Mots clés :** voiture électrique, piles à combustible à hydrogène, panneau solaire

## ABSTRACT :

In the following work ,we have done a an energetic dimensioning for three rechargeable power plants for three different vehicles; the first one is an all electric vehicle using rechargeable plumb batteries, the second is a fuel cell vehicle, and the third is powered by a hydrogen internal combustion engine .

**Keywords :** electric vehicle, hydrogen fuel cell ,solar panels

**PREAMBULE** ..... i

**Chapitre I : INTRODUCTION**

I.1 Les systèmes photovoltaïques..... 2  
 I.1.1 Présentation..... 2  
 I.1.2 Historique..... 2  
 I.1.3 Les photopiles ..... 4  
 I.1.4 Les cellules photovoltaïques ..... 5  
 I.1.5 Appareillage des panneaux solaires ..... 7  
 I.2 La production d'hydrogène..... 8  
 I.2.1 Introduction..... 8  
 I.2.2 L'électrolyse et les électrolyseurs ..... 8

**Chapitre II : LE SOLAIRE**

II.1 Rayonnement solaire ..... 12  
 II.1.1 Coordonnées du soleil..... 12  
 II.1.2 Déclinaison  $\delta$  au jour N ..... 13  
 II.1.3 Angle horaire  $\omega$  ..... 13  
 II.1.4 Temps solaire vrai TSV ..... 13  
 II.1.5 Convention de signe ..... 14  
 II.1.6 Angle d'incidence du rayonnement solaire ..... 14  
     II.1.6.1 Panneaux fixes ..... 14  
     II.1.6.2 Panneaux asservis ..... 14  
 II.1.7 Energie solaire sur les panneaux..... 15  
 II.2 Conversion photovoltaïque..... 15  
 II.2.1 Coefficient de transmission du couvercle..... 17  
 II.2.2 Coefficient d'absorption des cellules..... 17  
 II.2.3 Energie transmise et absorbée ..... 18  
 II.2.4 Rendement des cellules..... 18  
 II.2.5 Bilan thermique ..... 18  
     II.2.5.1 Coefficient de perte..... 18  
 II.2.6 Flux de chaleur perdues ..... 19  
     II.2.6.1 Energie électrique produite ..... 20  
 II.2.7 Rendement mensuel et annuel ..... 20  
 II.3 La voiture électrique..... 20  
 II.3.1 Différents modes de stockage d'énergie dans les voitures électriques et hybrides..... 21  
     II.3.1.1 Pile à combustible ..... 21  
 II.3.2 Système à alimentation pile à combustible ..... 24  
 II.3.3 Les types de montage possibles..... 24  
 II.3.4 L'alimentation en hydrogène..... 25  
     II.3.4.1 Stockage de l'hydrogène a bord ..... 25  
     II.3.4.2 Stockage sous forme cryogénie (liquide)..... 26  
 II.3.5 L'alimentation en oxygène..... 27

### Chapitre III : MODELISATION DE L'ELECTROLYSEUR

III.1 Introduction :	28
III.2 L'électrolyse :	30
III.3 Modélisation de l'électrolyseur :	31

### Chapitre IV : DIMENSIONNEMENTS DES VEHICULES

IV.1 Présentation générale	35
IV.2 Parcours des différents véhicules	40
IV.3 Véhicule électrique à batteries au plomb	41
IV.3.1 Moteur électrique	41
IV.3.2 Accumulateurs	41
IV.3.3 La boîte a vitesse	41
IV.4 Présentation du véhicule électrique à piles à combustibles	43
IV.4.1 Le réservoir d'hydrogène	44
IV.4.2 Le calculateur	44
IV.4.3 Les piles à combustibles	44
IV.4.4 Le moteur	44
IV.4.5 La boîte a vitesse	44
IV.4.6 Le système de transmission	44
IV.5 Présentation du véhicule à combustion interne à hydrogène	45
IV.6 Résultats obtenus	46
IV.6.1 Pile à combustible	47
IV.6.2 Véhicule à combustion interne à hydrogène	47

### Chapitre V : PROCEDURE ET METHODOLOGIES DES CALCULS

V.1 Introduction	48
V.2 Détermination de la charge	49
V.3 Dimensionnement des batteries	49
V.4 Calcul de la superficie des panneaux photovoltaïques nécessaires	51
V.5 Calculs énergétiques	51
V.5.1 Panneaux fixes	53
V.5.2 Panneaux semi-asservis	53
V.5.3 Les panneaux asservis	54
V.5.4 Calcul énergétique, 1 <sup>ère</sup> méthode	54
V.5.5 Calcul énergétique, 2 <sup>ème</sup> méthode	56
V.6 Calcul du débit d'hydrogène produit	63
V.7 Résultats	65

### Chapitre VI : RESULTATS ET DISCUSSIONS

VI.1 Les irradiances	70
VI.2 Méthode thermique	72
VI.2.1 Les rendements horaires	73
VI.2.2 Production électrique	75
VI.2.3 Rendement annuel	77
VI.3 Méthode électrique	79
VI.3.1 Les rendements horaires	79

## NOMENCLATURE

A	: Azimut
$A'$	: Surface de l'électrode .
AC	: Superficie des cellule
$A_P$	: Superficie totale des panneaux
C	: Capacité totale des batteries .
$C_{bat}$	: Capacité d'une batteries .
$C_N$	: Capacité nominale .
$del$	: profondeur de décharge journalière des batteries
$E_i$	: Energie électrique produite par heure.
$E_r$	: Epaisseur de résine.
$FH_{loc}$	: Fuseau horaire local
$\Delta G^\circ$	: Gibbs standard 273.2 kj/mol
$\Delta G$	: Variation de l'énergie de Gibbs
H	: Hauteur du soleil
$h'$	: Nombre d'heure d'ensoleillement par jour .
$h''$	: Nombre d'heure par jour sans soleil.
$H_{b,s}$	: Flux solaire direct sur le panneau
$H_d$	: Irradiations diffuses sur panneaux .
$H_{d,s}$	: Flux solaire diffus sur le panneau
Hre	: Coefficient d'échange par rayonnement vers l'avant
Hri	: Coefficient d'échange par rayonnement vers l'arrière
$H_t$	: Irradiations totale sur panneaux .
Hw	: Coefficient d'échange par convection avec le vent
$H_{t_i}$	: Irradiation totale instantanées sur les panneaux .
$I_D$	: Courant de diode
$I_s$	: Courant de saturation de la diode
$I_{cc}$	: Courant de court circuit .
$I_{mp}$	: Courant de puissance maximale des P.V. .
$I_{ph}$	: Photo courant
I	: Le courant qui traverse une cellule.
$k$	: Constante de Boltzman
$K'$	: Coefficient d'extinction du verre
$K_g$	: Conductivité du verre
$K_r$	: Conductivité de la résine
LambertW(x)	: Fonction W de Lambert
$L_{loc}$	: Longitude .
$L_{st}$	: Longitude standard.
$m$	: Facteur d'idéalité de la diode 1..5
$m_{ref}$	: Module de référence
N	: Jour de l'année
$N_1$	: Nombre de jour total d'utilisation des batteries sans recharge .

$N_2$	: Nombre de jours durant lesquelles les batteries doivent être rechargées après une
$N_C$	: Nombre de cellules dans un électrolyseur .
$N_e$	: Nombre d'électrolyseur en marche .
$N_j$	: Nombre de jours du mois j
$P_{max_i}$	: Puissance maximale instantanée .
$P$	: Pression ambiante.
$P^o$	: Pression de référence 1 bar.
$P_{elec}$	: La puissance de l'électrolyseur.
$P_G$	: La puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques quotidiennement.
$P_L$	: Puissance délivrée par les panneaux .
$P_{max}$	: Puissance produite par les panneaux photovoltaïques .
$Poids_{bat}$	: Poids d'une batteries .
$q$	: Charge d'un électron
$Q_a$	: Flux absorbé par les cellules
$Q_{bl}$	: Flux perdu vers l'arrière
$Q_t$	: Flux transmis
$R$	: Constante des gaz parfait .
$R_g$	: Epaisseur du verre.
$R_{par}$	: Coefficient de réflexion du verre dans la direction parallèle
$R_{per}$	: Coefficient de réflexion du verre dans la direction perpendiculaire
$S$	: Inclinaison des panneaux
$T'$	: Température absolue .
$T$	: Température ambiante.
$T$	: Température de l'électrolyseur.
$T_a$	: Température ambiante
$T_c$	: Température des cellules
$T_{ge}$	: Température extérieure du couvercle avant
$T_{gi}$	: Température extérieure du couvercle arrière
$T_r$	: Température de référence des cellules
$T_{ref}$	: Température de référence
$T_{st}$	: Temps standard ou officiel.
$TSV$	: Temps solaire vrai
$U$	: Différence de potentielle du système.
$U_b$	: Coefficient de perte vers l'arrière
$U_{bat}$	: Tension d'une batteries .
$U_l$	: Coefficient de perte global
$U_t$	: Coefficient de perte vers l'avant
$v$	: Vitesse du vent.
$VT$	: Tension thermodynamique $VT = \frac{kT}{q}$
$V_{mp}$	: Tension de puissance maximale des P.V.
$z$	: Nombre d'électrons transmis par réaction .

**Lettres grecques :**

$\phi$	: Latitude .
$\alpha$	: Coefficient d'absorption
$\alpha_b$	: Coefficient d'absorption du rayonnement direct
$\alpha_d$	: Coefficient d'absorption du rayonnement diffus
$\alpha_g$	: Coefficient d'absorption du rayonnement réfléchi
$\beta_r$	: Rapport de la chute de rendement par augmentation de $T_c$ d'un degré celsius
$\gamma$	: Azimut des panneaux
$\delta$	: Déclinaison du soleil
$\varepsilon_g$	: Emissivité du verre
$\tau$	: Rendement des panneaux
$\tau_a$	: Rendement annuel
$\tau_m$	: Rendement mensuel
$\tau_r$	: Rendement de référence
$\theta$	: Angle d'incidence du rayonnement direct
$\theta_d$	: Angle d'incidence du rayonnement diffus
$\theta_g$	: Angle d'incidence du rayonnement réfléchi
$\theta_r$	: Angle de réfraction
$\theta_z$	: Angle zénithal
$\rho_g$	: Réflectivité du verre
$\omega$	: Angle horaire

## PREAMBULE



Dans le présent travail nous allons dimensionner une installation de production électrique et hydrogène pour ravitailler un véhicule de moyenne puissance pour foyer uni-familiale.

Nous considérerons trois types de véhicules, tout électrique utilisant des batteries à plomb, électrique utilisant des piles à combustible hydrogène - oxygène, à moteur à combustion interne à hydrogène.

Pour le premier type de véhicule les batteries seront rechargées par l'électricité produite par des panneaux photovoltaïques et nous étudierons les trois configurations possibles des panneaux. Panneaux à poursuite totale du soleil, semi asservis et fixes. Nous calculerons leurs rendements horaires, quotidiens, mensuels et annuel ainsi que leur production électrique.

Pour les deux autres véhicules, nous considérerons toujours les trois configurations des panneaux photovoltaïques, nous calculeront aussi leurs rendements horaires, quotidiens, mensuels et annuel ainsi que la production électrique et le débit d'hydrogène.

Le code nous donnera en plus des paramètres cités précédemment les surfaces des panneaux photovoltaïques nécessaire pour chaque installation et ceci pour chaque configuration. Les données expérimentales d'irradiation solaire du site de Bouzereah – Alger entre 1987 et 1991 seront utilisées pour le calcul de dimensionnement, les caractéristiques des panneaux photovoltaïques sont celles des modules déjà installés sur site.

Dans le premier chapitre nous donnerons une introduction sur la conversion de l'énergie solaire où nous traiterons des éléments constituant une installation photovoltaïque, et les moyens de production d'hydrogène en expliquant les différents types d'électrolyseurs et leur fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre nous citerons les différentes équations de calculs des caractéristiques solaires à savoir les coordonnées du soleil, sa déclinaison, le temps solaire vrai, l'angle horaire, l'angle d'incidence de rayonnement. Ces différentes grandeurs sont nécessaires pour le calcul énergétique des panneaux photovoltaïques ainsi que leurs rendements. Nous aborderons aussi les différents types de véhicules électriques considérés, le mode de stockage d'énergie dans chaque type et les différentes technologies disponibles.

Dans le troisième chapitre nous détaillerons le principe de fonctionnement des électrolyseurs ainsi que leurs différentes technologies, nous aborderons aussi les modèles mathématiques les plus récents que nous adapterons pour notre dimensionnement.

Dans le quatrième chapitre nous détaillerons les différents éléments constituant les véhicules traités à savoir un véhicule tout électrique utilisant des batteries à plomb rechargeable, un véhicule utilisant des piles à combustible air-hydrogène, et finalement un véhicule à combustion interne à hydrogène.

Dans le cinquième chapitre nous donnerons la méthodologie à suivre pour dimensionner l'installation, nous commençons par citer les formules de dimensionnement des batteries, de la superficie des panneaux puis nous calculerons les caractéristiques des panneaux à savoir la production électrique horaire, journalière, mensuelle et annuelle, ainsi que leur rendement et la production d'hydrogène et cela pour chaque type de configuration des panneaux et en utilisant deux méthodes l'une basée sur un bilan thermique et l'autre sur un bilan électrique.

Finalement dans le dernier chapitre, nous exposerons les résultats donnés par le code, à savoir la variation des rendements, la variation de la production d'hydrogène et celle de la production électrique pour chaque méthode et installation.

L'énergie a toujours été vitale pour les hommes dont les demandes n'ont jamais cessé de croître avec le temps. Pour palier à ces demandes, des ressources facile d'obtention mais pas toujours commode pour l'environnement ont été adoptés, par exemple le charbon, le pétrole, sans oublier la limitation de ces réserves qui ne sont pas très abondante sur la planète.

L'impact négatif sur l'environnement et les réserves limitées dans le temps de ces sources d'énergies ont amenés les chercheurs a réfléchir à de nouvelles sources qui seraient à la fois plus disponibles et plus propres. Ces nouvelles sources sont constituées principalement du soleil, vent, marées... [16].

Dans notre étude; nous allons nous intéresser à la production d'hydrogène solaire en utilisant des cellules photovoltaïques. Ces deux sources d'énergies (énergie électrique solaire et hydrogène) sont ceux de la future technologie, elles font objet de plusieurs recherches et sont toujours au stade de l'expérimentation et du développement.

Nous nous proposons d'étudier dans ce chapitre un système domestique de production d'énergie électrique solaire par la méthode photovoltaïque afin d'utiliser cette dernière pour la production d'hydrogène à partir de l'eau, qui sera le combustible d'une voiture citadine (voir fig.1) [8]:

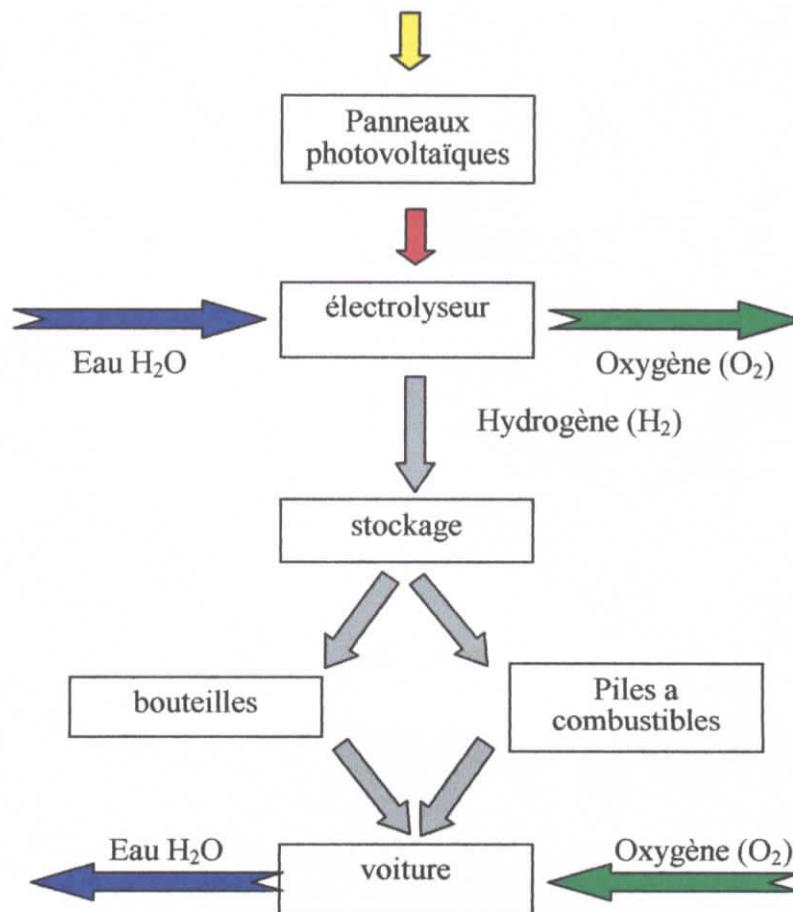


Fig. 1.1 Schématisation du système de production d'hydrogène solaire [16]

## I.1 Les systèmes photovoltaïques

### I.1.1 Présentation

Le mot "photovoltaïque" tient son origine du grec "photo" qui signifie lumière et de "voltaïque" qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta ayant beaucoup contribué à la découverte de l'électricité. Le photovoltaïque est la conversion directe de la lumière solaire en électricité [10]. Les solides éclairés par des radiations lumineuses de fréquence convenable laissent échapper des charges négatives (qui sont en fait des électrons). On donne ainsi le nom d'effet photoélectrique à tous les phénomènes dans lesquels les électrons se déplacent sous l'action de la lumière.

Depuis 40 ans, on assiste à un fort développement du concept photovoltaïque mais celui-ci est déjà connu depuis plusieurs siècles. Le principe bien que connu de manière assez précise est régulièrement remis en cause par la découverte de nouveaux matériaux et l'avancement des nouvelles technologies.

Durant des années, de plus en plus d'applications se concrétisent permettent ainsi de toucher aujourd'hui un large secteur d'activités; Ce qui engendre un impact très important de point de vue économique et environnemental.

### I.1.2 Historique

L'énergie solaire est à l'origine de la vie et des cycles biologiques et climatiques. En d'autres termes, elle est à la source des richesses énergétiques fossiles que sont le charbon, le pétrole, le gaz, et les énergies renouvelables comme la biomasse, l'énergie hydraulique et éolienne. Dès l'antiquité, les hommes ont tenté de s'approprier l'énergie solaire à des fins purement matérielles telle que le chauffage. C'est également à cette époque qu'a émergé l'idée d'une conversion de celle-ci en une énergie mécanique de pompage. On retrouve notamment sur ces sujets les travaux d'Euclide, d'Archimède ou encore d'Héron d'Alexandrie. Le développement de ces concepts a été concrétisé au Moyen Age et à la Renaissance avec l'incorporation du verre dans la réalisation de certains bâtiments et l'étude des miroirs ardents ou la construction des pompes solaires par Salomon de Caus.

Néanmoins, des considérations scientifiques ont été abandonnées à partir du 17<sup>e</sup> siècle. Les grands chercheurs ont alors perdu toute crédibilité. Nous pouvons citer Kircher, Tschirnhausen, Mariotte au 17<sup>e</sup> siècle, Desaguliers, Buffon, Nollet et Lavoisier au 18<sup>e</sup> siècle car les effets électriques ne pouvaient s'expliquer par la seule théorie ondulatoire et continue de la lumière. Ainsi, l'émission photoélectrique est quasi instantanée même avec des énergies lumineuses très faibles alors que la théorie ondulatoire voudrait qu'il faille attendre des dizaines de minutes ou des heures pour que l'énergie accumulée dans l'atome soit suffisante pour en chasser un électron. Pour avoir une interprétation cohérente du phénomène, Einstein introduisit la notion de photon en 1905.

Il faudra attendre le 20<sup>ème</sup> siècle pour voir se développer aux Etats-Unis une série de réalisations relatives à l'exploitation de l'énergie solaire. Les années 60 vont voir fleurir de nouvelles expériences qui vont avoir un impact considérable sur le comportement et les

habitudes des êtres humains. Les laboratoires de Bell Téléphone (Etats-Unis) ont mis au point en 1954 la première cellule photoélectrique de rendement (6%) qui atteignit 15 % au début des années 60. Le produit prend alors des formes différentes selon la composition du semi-conducteur de base et la nature de la barrière de potentiel créant et de la force électromotrice.

En 1955, le " US Signal Corps " avait pour mission d'alimenter en électricité les premiers satellites artificiels américains. La solution des photopiles solaires a été alors envisagée sous l'impulsion de W. Cherry.

Après le lancement du premier satellite soviétique en octobre 1957, " Vanguard " a été lancé par les USA en mars 1958, avec 1dm<sup>2</sup> de photopiles produisant moins de 1 watt.

En 1972, la NASA publie un rapport sur les retombées et les évolutions des activités spatiales.

En 1973, avec le choc pétrolier la conversion photovoltaïque a connu un développement déterminé par l'essor des techniques de spatiale liées aux télécommunications.

Ainsi, comme l'avait constaté Becquerel, la transformation de l'énergie rayonnante peut désormais se faire directement. Ce dispositif a pris alors le nom de pile photovoltaïque. Il consiste en un montage métal-électrolyte-métal symétrique, qui ne donne aucun potentiel dans l'obscurité mais qui peut délivrer un courant quand l'une des électrodes est éclairée.

La première utilisation rentable de la photopile terrestre est l'alimentation de systèmes de communication. Elle a entraîné une hausse du taux de croissance moyen de ce marché. Ce dernier a atteint alors 30 % dans les années 80. Cette hausse concerne essentiellement :

- 1- Les réémetteurs de télévision (puissance de 500 à 1000 Wc).
- 2- Les relais hertziens (puissance de 500 à 2000 Wc).
- 3- Les relais de radiotéléphone (puissance de 80 à 250 Wc).

La fiabilité de ces applications dites professionnelles est obtenue au moyen de générateurs photovoltaïques.

Dans la même période, les photopiles ont servi à alimenter des balises, stations de détection des crues et des incendies, chantiers mobiles et autres installations dispersées.

On assiste également, au niveau de l'habitat, au développement commercial de l'alimentation solaire. Celle-ci connaît un grand succès et représente alors 15 % du marché des photopiles aux USA (1992).

Enfin, les années 80-82 ont été témoin de l'apparition d'un nouveau secteur pour le moins original celui des micro-alimentations pour les produits de grande consommation (calculatrices solaires, appareils électroniques grand public...). Ce marché a été créé par l'initiative de firmes japonaises telles que Sanyo, Mitsubishi, Sony... Ce secteur a été alors le seul à être dominé par la filière du silicium amorphe. Cette branche représentait en 1992 douze pour cent des applications du photovoltaïque.

La prise de conscience des limites de l'électrification rurale conventionnelle par extension des réseaux centralisés, a obligé les marchés à s'ouvrir afin d'atteindre les campagnes de façon plus rentable.

Pour l'Europe, on trouve 6 centrales de plus de 300 kWc en fonctionnement. La plus grande de ces centrales se trouvait en Italie, à Delphos avec une puissance de 3 MWc. La notion de " centrale " a été contestée pour l'électricité solaire, qui semble mieux s'accommoder à une certaine dispersion des installations. A la limite, une appropriation individuelle est possible, notamment grâce aux " maisons solaires " connectées au réseau. Sur ce fait, on peut compter sur l'Allemagne avec ses 2 500 toits solaires (1990-92). De son côté, la Suisse expérimente divers types de tuiles ou de façades solaires. Les Pays Bas ont quant à eux projeté pour 2010 d'avoir 0,6 % de leurs maisons équipées de générateurs photovoltaïques.

Aujourd'hui plus de 90 000 familles dans le monde sont électrifiées par le Soleil via des photopiles, sans compter les centaines de millions d'utilisateurs de calculateurs solaires ou les centaines de milliers de villageois qui sont alimentés par des pompes solaires photovoltaïques dans les Pays en Voie de Développement.

### I.1.3 Les photopiles [18]

La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. Dans un isolant électrique, les électrons sont liés aux atomes et ne peuvent se déplacer contrairement aux conducteurs électriques, dont les électrons sont totalement libres de circuler et permettent le passage d'un courant; par contre dans un semi-conducteur, la situation est intermédiaire les électrons de valence ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes (de l'énergie solaire par exemple).

Afin d'améliorer la conduction d'un semi-conducteur, les fabricants injectent dans une plaquette semi-conductrice des matériaux étrangers, ou impuretés de même taille qui possèdent un nombre d'électrons périphériques juste inférieur ou juste supérieur aux quatre électrons du silicium.

Le dopage « n » consiste à ajouter au semi-conducteur des atomes possédant cinq électrons périphériques (phosphore par exemple). Quatre de ces électrons vont participer à la structure et un électron supplémentaire va se retrouver libre et pouvoir se déplacer. Ce sont des porteurs de charges mobiles. Ce dopage se fait sur la face avant exposée à la lumière.

Le dopage « p » consiste à ajouter au silicium des atomes possédant trois électrons de valence (bore par exemple). Ceux-ci participent à la structure, mais un « trou » est créé par chaque atome étranger puisqu'il lui manque un électron périphérique. Ce dopage se fait sur la face arrière du semi-conducteur.

Grâce au traitement par dopage, on obtient une « jonction » possédant un champ électrique interne pour entraîner vers le circuit extérieur les charges électriques libérées sous illumination.

Le dessus et le dessous du semi-conducteur doivent ensuite être couverts de contacts métalliques pour collecter l'électricité générée et le résultat donne ce qu'on appelle une « photopile ». Pour laisser passer la lumière, l'électrode avant est déposée sous forme de grille, l'arrière étant simplement recouvert d'une couche métallique continue.

### I.1.4 Les cellules photovoltaïques

Pour former un modules, on place les photopiles élémentaires entre deux supports (généralement en verre) après les avoir reliées entre elles en série par des fils conducteurs extra-plats ; les deux supports sont assemblés à l'aide d'une résine à base d'éthylvinyle acétate [20].

En général, une seule cellule(une photopile) ne permet pas d'alimenter directement un équipement électrique dont les tensions de fonctionnement sont normalisées (12, 24, 48V). En effet, pour du silicium cristallin par exemple, la tension électrique est voisine de 0,5 V et la puissance d'environ 1W (sous une énergie solaire de 1000 W/m<sup>2</sup>) [5].

Pour atteindre le voltage souhaité, plusieurs cellules doivent être connectées en série. Et pour obtenir la puissance souhaitée, plusieurs de ces séries de cellules peuvent être montées en parallèle. On obtient ainsi un panneau rectangulaire, un « module photovoltaïque » aux voltage et puissance désirés.

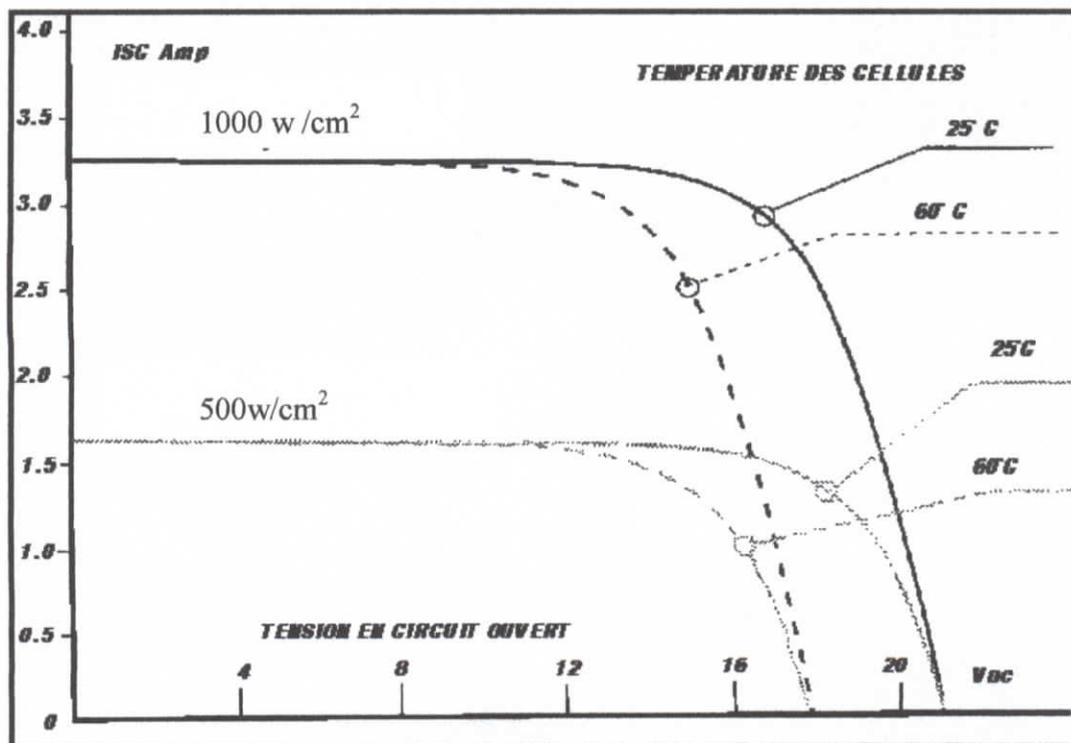


Fig.1.2 Variation du courant des cellules en fonction de la tension à différentes températures et puissances [18].

En effet, pour un éclairement donné, la puissance électrique maximale fournie correspond à un point de fonctionnement situé près du coude de la caractéristique courant - tension d'une photopile et qui définit la charge optimale (voir Fig. 1.2- Fig. 1.3).

Le courant de court-circuit est proportionnel au flux, alors que la tension en circuit ouvert en dépend peu, d'où le montage en parallèle des cellules.

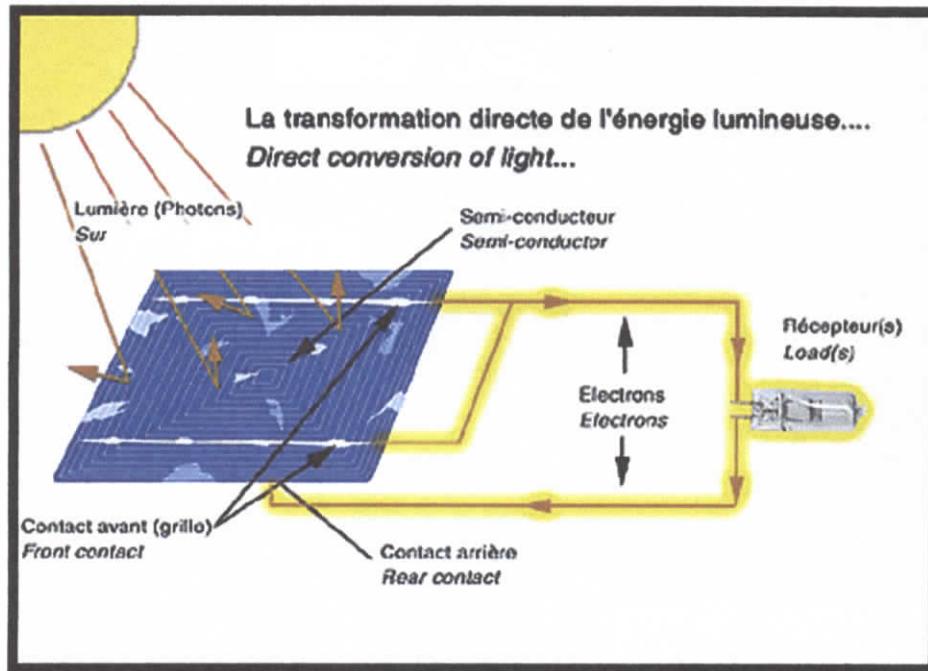


Fig. 1.3 Schéma descriptif d'une photopile [2].

Le soleil réchauffe les modules photovoltaïques, la température de la cellule a une grande influence sur ses performances électriques. Plus la température est froide, plus elle est efficace, chaque degré de réchauffement occasionne une perte de rendement .

En fonction de la puissance désirée, les panneaux eux-mêmes peuvent être assemblés pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle la nuit.

Très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement ou nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On équipe alors le système de batteries, d'accumulateurs permettant de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu. Un "régulateur" est alors indispensable pour protéger la batterie contre les surcharges ou les décharges profondes nocives à sa durée de vie.

Enfin, le générateur photovoltaïque produisant du courant continu (comme des piles), est nécessaire pour un certain nombre d'applications. On convertit ce courant continu en courant alternatif à l'aide d'un onduleur (comparable à celui qui alimente nos téléviseurs, réfrigérateur, etc....)

### I.1.5 Appareillage des panneaux solaires

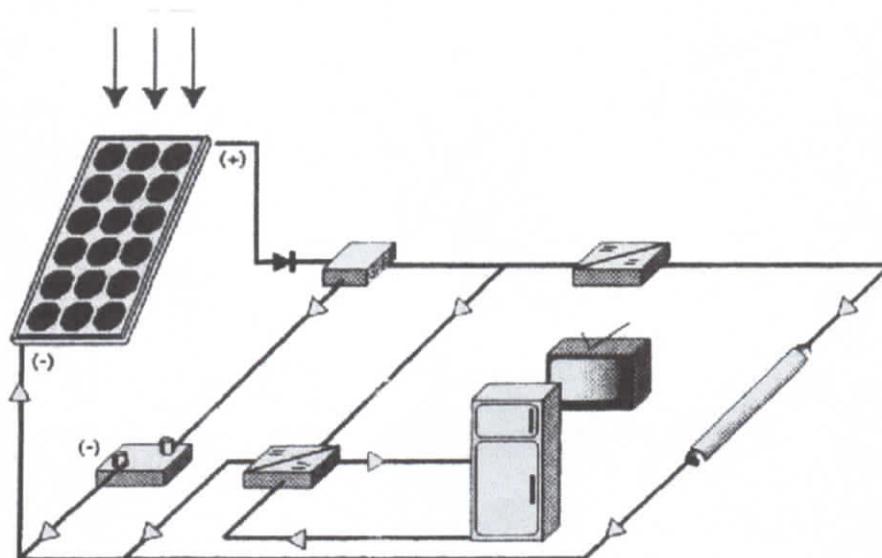
Une installation photovoltaïque comporte (figure 1.4) [25] :

- 1- Des châssis et supports pour l'installation et la fixation des modules sur le site et pour leur orientation optimale vers le soleil.
- 2- Des accessoires de câblage (câbles, protection anti-foudre...).
- 3- Un onduleur permettant de convertir le courant continu issu des modules photovoltaïques en courant alternatif nécessaire à beaucoup d'appareils électriques.

Il faut aussi assurer le couplage entre une production électrique discontinue (qui suit le cycle solaire et les fluctuations de la météo) et les besoins en énergie de l'utilisateur. D'où la nécessité d'interposer un stockage et de le gérer au mieux.

Le stockage repose dans la plupart des cas sur l'emploi de batteries au plomb dérivées des accumulateurs automobiles. En utilisant du plomb doux, l'autodécharge et les contraintes d'entretien de la batterie deviennent marginales. Il n'en reste pas moins que ce type de stockage reste lourd, encombrant et cher. De plus, la durée de vie des batteries ne dépasse guère 5 ans alors que celle des photopiles dépasse 15 ans.

On prévoit une diode anti-retour pour éviter que la batterie ne se décharge pendant la nuit. De même un régulateur de charge évite à la fois les décharges excessives de la batterie et coupe l'énergie en provenance des photopiles quand la batterie est pleine.



**Fig. 1.4. Schéma typique de production domestique d'énergie photoélectrique [18].**

## I.2 La production d'hydrogène

### I.2.1 Introduction

L'hydrogène est un vecteur énergétique comme l'électricité. Contrairement aux sources primaires d'énergie, il doit être fabriqué avant d'être stocké et utilisé. Il est essentiellement obtenu à partir d'hydrocarbures, vaporéformages du gaz naturel ou gazéification (résidus pétroliers, charbon, biomasse) ou encore par électrolyse de l'eau [14].

Ces différents procédés varient en fonction de matière première, de sa complexité, de son rendement, de sa pureté et du coût. Le choix du procédé de préparation de l'hydrogène se fait aussi en fonction des débits souhaités et des disponibilités énergétiques locales. Du fait l'électrolyse représente aujourd'hui moins de 1% de la capacité totale de production de cet hydrogène et n'est utilisée que si l'électricité est bon marché et/ou si une pureté élevée de l'hydrogène produit est requise.

Après l'électrolyse industrielle avec des puissances unitaires pouvant aller jusqu'à plusieurs méga watt d'autres moyens de production d'hydrogène (unités chlore-soude) ou encore pour stocker un excédent d'électricité produit par un barrage isolé, on assiste aujourd'hui à l'essor des électrolyseurs de petite capacité de 1 à 100 Kw fig. 5.

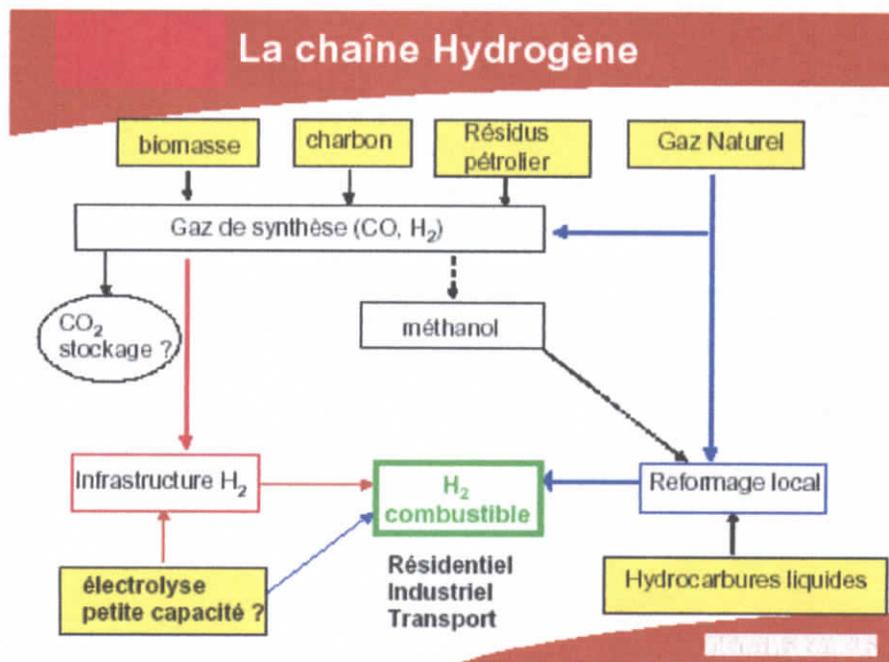


Fig. 1.5 Chaîne de l'hydrogène.

### I.2.2 L'électrolyse et les électrolyseurs

La décomposition de l'eau par électrolyse est régie par l'équation chimique [22]:



avec une enthalpie de dissociation de l'eau :  $\Delta H = 285 \text{ kJ/mole}$

Cette décomposition nécessite un apport d'énergie (électrique pour l'électrolyse) dépendant essentiellement de l'enthalpie et de l'entropie de réaction. Le potentiel théorique de la décomposition est de 1.481 V à 298 K. Les valeurs classiques des potentiels de cellules industrielles sont de l'ordre de 1.7 à 2.1 V, ce qui correspond à des rendements d'électrolyse de 70 à 85 %. La consommation électrique des électrolyseurs industriels (auxiliaires compris) est généralement de 4 à 6 kWh/Nm<sup>3</sup> et il convient d'éliminer en permanence la chaleur dégagée liée aux irréversibilités .

L'alimentation minimale en eau d'un électrolyseur est de 0.8 L/Nm<sup>3</sup> d'hydrogène.

En pratique, la valeur réelle est proche de 1 L/Nm<sup>3</sup>. L'eau introduite doit être la plus pure possible car les impuretés demeurent dans l'équipement et s'accumulent au fil de l'électrolyse, perturbant les réactions électrolytiques par :

- La formation de boues .
- L'action des chlorures sur les électrodes .

Une spécification importante sur l'eau porte sur sa conductivité ionique généralement inférieure à quelques  $\mu\text{s/cm}$ .

Une cellule d'électrolyse est constituée de deux électrodes (anode et cathode, conducteurs électroniques) reliées à un générateur de courant continu, et d'un électrolyte (milieu conducteur ionique).

L'électrolyte est généralement une solution aqueuse acide ou basique, une membrane polymère échangeuse de protons ou une membrane céramique conductrice d'ions O<sup>2-</sup>.

L'électrolyse industrielle est réalisée généralement à partir d'une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium dont la concentration varie en fonction de la température (typiquement de 25% en masse à 80°C jusqu'à 40% à 160°C). La potasse est préférée à la soude, essentiellement pour des raisons de conductivité supérieure à un niveau de température équivalent et de meilleur contrôle des impuretés chlorures et sulfates.

Pour les électrolyseurs de petite capacité, il existe de nombreuses technologies très diversifiées, notamment en terme de nature de l'électrolyte et de technologie associée, allant d'un possible couplage amont avec une alimentation électrique renouvelable (photovoltaïque ou éolien), à la fourniture finale directe d'hydrogène sous pression.

Les premiers appareils d'électrolyse disposaient d'électrodes mono polaires avec chaque anode connectée au pôle positif et chaque cathode au pôle négatif, les cellules d'électrolyse fonctionnaient alors en parallèle. Les systèmes bipolaires développés ensuite, utilisaient des plaques jouant le rôle d'anode d'un côté et de cathode de l'autre, la conduction s'opère à l'intérieur de l'électrode au travers de son épaisseur, permettant ainsi une limitation de la chute ohmique. Les assemblages bipolaires offraient l'avantage d'une densité de courant plus élevée et d'une meilleure compacité. Cette conception introduite cependant une difficulté supplémentaire, l'électrode présente une face en milieu oxydant (anode) et une en milieu réducteur (cathode). Tous les systèmes industriels, ou presque, reposent sur la technologie bipolaire, alors que quelques fournisseurs d'électrolyseurs de petite capacité proposent encore des structures unipolaires.

Dans tous les cas, les recherches sur les matériaux sont fondamentales. Les cellules d'électrolyse doivent être étanches, isolées électriquement et résistantes à la corrosion dans des conditions de température et pression parfois élevées.

L'électrolyse alcaline classique est proposée en modules de capacité ( 200 Nm<sup>3</sup> d'hydrogène) par des constructeurs d'électrolyseurs industriels. Les modules comprennent généralement une alimentation électrique, les cellules d'électrolyse (solution de potasse, assemblage mono ou bipolaire), une unité de purification de l'eau, une unité de déshumidification des gaz, une unité de purification de l'hydrogène, un compresseur et un système de contrôle. Certaines technologies d'électrolyseurs alcalins fonctionnent directement sous pression. Les modules de petite capacité opèrent de 3 à 30 bars.

L'électrolyse à membrane polymère PEM (Proton Exchange Membrane) conductrice de protons fig. 1.6 est la principale alternative à l'électrolyse alcaline. Les avantages de cette technologie sont la compacité, la simplicité du design et du fonctionnement et la limitation des problèmes de corrosion. Néanmoins le coût de la membrane polymère (3-30 mm d'épaisseur, environ 100\$ U.S. / m<sup>2</sup>) et l'utilisation d'électro-catalyseurs à base de métaux nobles peut conduire à des équipements plus onéreux que les électrolyseurs alcalins de même capacité.

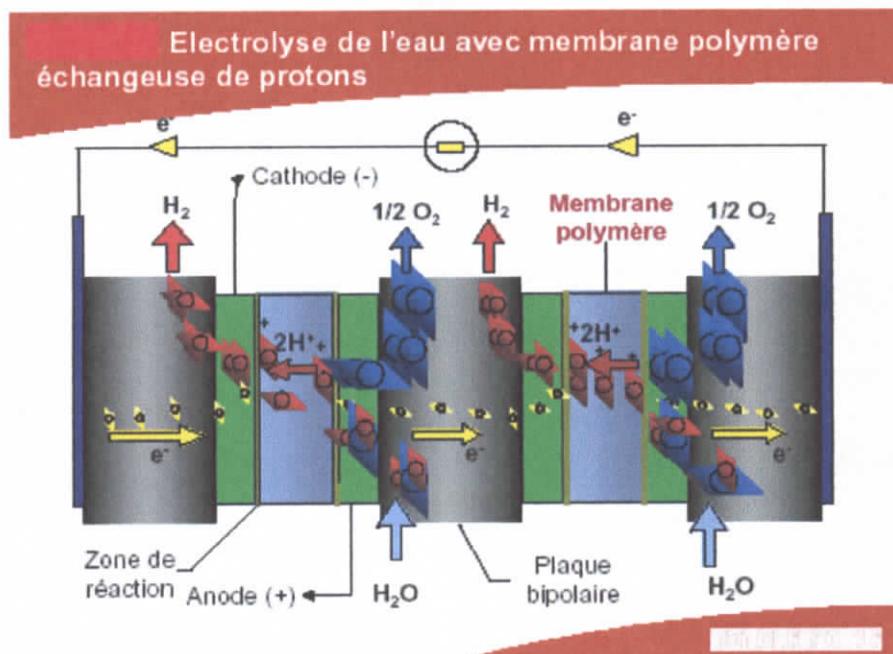
L'électrolyse à membrane polymère est considérée par beaucoup de chercheurs comme une technologie d'avenir, car elle peut bénéficier des nombreux développements sur les piles à combustibles de technologie PEM, et de la réduction des coûts associée. L'électrolyse à membrane polymère de petite capacité est d'ores et déjà une technologie mature, utilisée depuis plusieurs dizaines d'années pour des applications sous-marines et spatiales (génération d'oxygène). Ces unités peuvent opérer de la pression atmosphérique à plusieurs dizaine de bar, voire au-delà de 100 bar.

Il convient enfin de mentionner l'électrolyse sur membrane alcaline, connue sous le nom de IMET (Inorganic Membrane Electrolysis Technology), avec plusieurs dizaines d'unités de petite capacité commercialisées depuis 1989.

Actuellement, il n'existe pas encore de normes ou de codes sur la conception ou l'installation d'électrolyseur de petite capacité, des projets sont cependant en discussion, notamment au sein de l'ISO TC 197, dédié aux technologies de l'hydrogène.

Nous entrons cependant dans la phase essentielle d'apprentissage et d'intégration d'une technologie dans son environnement opérationnel, économique et social. Dans cette phase sensible, il apparaît donc utile d'opérer, autant que possible, dans le «monde réel » afin d'optimiser le retour d'expériences dans toutes ces dimensions.

C'est le choix de SunLine Transit, une compagnie de bus californienne, qui opère depuis Juillet 2000 plusieurs unités de production d'hydrogène, dont deux électrolyseurs de technologies alcalines. L'un des électrolyseurs est couplé à un ensemble photovoltaïque, d'une puissance nominale de 37 kW, ce qui permet une production renouvelable d'hydrogène. Celui-ci alimente une flotte limitée de véhicules à hydrogène, ainsi que deux bus fonctionnant avec de l'Hythane, mélange d'hydrogène (15% en volume) et de gaz naturel. Le bilan thermique portera non seulement sur les performances des électrolyseurs et des auxiliaires, mais également sur la fiabilité dans le temps des équipements, leur opérationabilité, la maintenance requise et la qualité de charge dans des réservoirs sous pression.



**Fig. 1.6 Electrolyse de l'eau avec membrane polymère échangeuse de protons**

# CHAPITRE II

## *ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE*

## II.1 Rayonnement solaire

La conversion du rayonnement solaire en énergie électrique par le moyen de cellules solaires, a pour origine le programme américain au début des années 1960, qui avait besoin d'une source d'énergie électrique pouvant fonctionner de façon fiable pendant longtemps. Le programme avait surtout besoin de cellules pouvant produire le plus grand nombre de wattheure possible par cellule, sans tenir compte de leurs coût. Chose qui a conduit à la fabrication de cellules de rendement théorique de l'ordre de 24%, mais dans la pratique le maximum atteint est de 15%, pour des cellules solaires au silicium mono cristallin.

Le coût élevé de la fabrication de ces cellules, a depuis lors était le principal obstacle à l'expansion de leurs utilisations à grande échelle, malgré que cette technologie est assez développée. Afin de résoudre ce problème les principales recherches actuelles sont dirigées vers la fabrication de cellules moins coûteuses, en silicium amorphe, en cadmium, en sulfate cuivreux, en indium et en oxyde d'étain, mais les rendements enregistrés à présent sont faibles. Il y a aussi des recherches en cours sur des cellules coûteuses en arsenic de gallium, mais qui ont l'avantage de travailler à hautes températures.

Malgré les tentatives de réduire le prix du kWh électrique produit à partir des cellules solaires, jusqu'à présent, elles ne peuvent pas concurrencer l'électricité classique dans les régions dotées d'un réseau électrique. Mais dans les régions éloignées des installations de génération d'électricité elles peuvent concurrencer les autres sources d'énergie. Dans le cadre d'un projet de calcul d'une installation photovoltaïque permettant de répondre aux besoins en énergie d'une maison uni familiale, on se propose dans ce chapitre, d'étudier les panneaux qui auront la fonction de collecter le rayonnement solaire et puis le convertir en énergie électrique [18].

### II.1.1 Coordonnées du soleil [2]

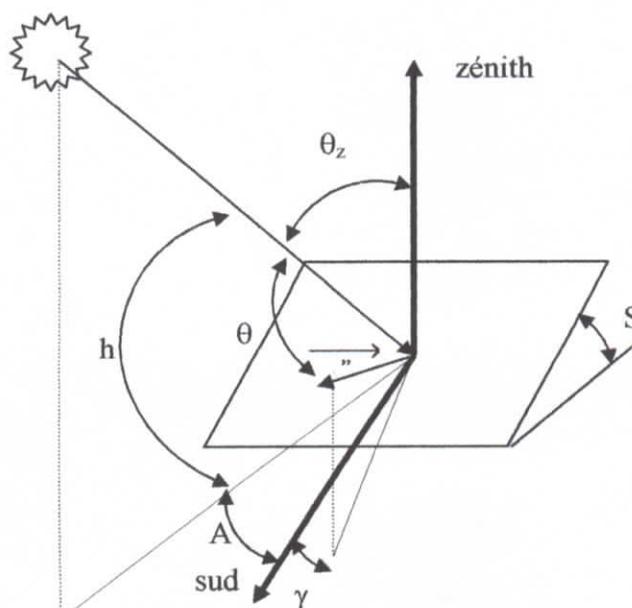


fig. 2.1 Repérage de la position du soleil.

L'azimuth ou l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud, cet angle est mesuré positivement vers l'ouest .

La hauteur ou angle que fait la direction du soleil avec sa projection ,le complément de h ou l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale est appelé angle zénithal ( $\theta_z$ ).

La position du soleil est déterminée par son azimuth A, et sa hauteur h

(fig. 2-1) qui sont données par :

$$\sin(h) = \sin(\phi)\sin(\delta) + \cos(\phi)\cos(\delta)\cos(\omega) \quad (2-1)$$

$$\sin(A) = \frac{\sin(\delta)\sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (2-2)$$

L'angle zénithal du soleil  $\theta_z$  est donné par la relation :

$$\cos(\theta_z) = \sin(h) \quad (2-3)$$

### II.1.2 Déclinaison $\delta$ au jour N

La déclinaison du soleil est exprimée avec précision par l'équation :

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360}{365}(N + 284)\right) \quad (2-4)$$

### II.1.3 Angle horaire $\omega$ [25]

L'angle horaire  $\omega$ , défini comme étant  $15^\circ$  fois le nombre d'heures de différence avec le midi solaire et affecté d'un signe négatif le matin, positif l'après-midi est donné par la relation suivante :

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (2-5)$$

### II.1.4 Temps solaire vrai TSV

Le temps solaire vrai est donné par la relation :

$$TSV = T_{st} + E + \frac{1}{15}(L_{st} - L_{loc}) \quad (2-6)$$

$T_{st}$  est le temps standard ou officiel, duquel on ôte une heure si l'heure avancé d'été (HAE) est en vigueur .

$$L_{st} = 15 FH_{loc} \quad (2-7)$$

Où :

$FH_{loc}$  : Fuseau horaire du lieu considéré, pour Alger il est de +1 ;

$L_{ST}$  : Longitude du lieu, pour Alger elle est de  $3^\circ$  ;

$L_{loc}$  : Latitude du lieu, pour Alger elle est de  $36^\circ 50'$  .

L'équation du temps :

$$E=9.87\sin(2\beta) - 7.53\cos(\beta) - 1.5\sin(\beta) \quad (2-8)$$

Où :

$$\beta = 360 \frac{(N - 81)}{364}$$

### II.1.5 Convention de signe

Les conventions de signes adoptées sont :

- $\omega$ , négatif le matin, positif l'après-midi ;
- $\phi$ , est positif pour l'hémisphère nord ;
- $A$  et  $\gamma$ , sont positifs à l'ouest du sud ;
- $\delta$ , est positif vers le nord ;
- $L_{loc}$ , est négatif à l'est de Greenwich .

### II.1.6 Angle d'incidence du rayonnement solaire

On considère deux cas possibles, à savoir panneaux photovoltaïques fixes, c'est à dire à inclinaison fixe, et avec un système de poursuite totale ou partielle du soleil.

#### II.1.6.1 Panneaux fixes

Dans ce cas l'inclinaison  $S$  est fixe, et l'angle d'incidence  $\theta$  est donné par :

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(\delta)\sin(\phi)\cos(S) - \sin(\delta)\cos(\phi)\sin(S)\cos(\gamma) + \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(S)\cos(\omega) \\ & + \cos(\delta)\sin(\phi)\sin(S)\cos(\gamma)\cos(\omega) + \cos(\delta)\sin(S)\sin(\gamma)\sin(\omega) \quad (2-9) \end{aligned}$$

L'optimum dans ce cas, pour une inclinaison donnée est obtenue pour un azimut des panneaux photovoltaïques nul.

#### II.1.6.2 Panneaux asservis

Dans ce cas le système est asservi de tel sorte à avoir  $\theta$  nul, ce qui donne une inclinaison  $S$  et un azimut du panneau variables :

$$\cos(\theta)=1 \quad (2-10)$$

#### *Calcul de l'inclinaison $\delta$*

L'angle d'incidence  $\theta$  peut s'écrire aussi sous la forme :

$$\cos(\theta)=\sin(S)\cos(\gamma) \quad (2-11)$$

En éliminant  $\gamma$  entre les équations (2-9) et (2-11) on obtient une équation du second degré en  $S$ , qui a une racine double :

$$\cos(S) = \frac{\sin(h)}{2 \cos(\theta)} \quad (2-12)$$

En tenant compte de l'équation (2-10) on a alors :

$$\cos(S) = 0.5 \sin(h) \quad (2-13)$$

*calcul de l'azimut  $\gamma$*

en éliminant l'inclinaison  $S$ , entre les équations (2-13) et (2-11) on a :

$$\cos(\gamma) = 2 \left( \sqrt{4 - \sin(h)^2} \right)^{-1} \quad (2-14)$$

### II.1.7 Energie solaire sur les panneaux

C'est la somme des trois composantes directe, diffuse, et réfléchie. La composante directe est obtenue par :

$$H_{b,s} = (H_t - H_d) \frac{\cos(\theta)}{\sin(h)} \quad (2-15)$$

Avec l'hypothèse d'isotropie du rayonnement diffus et réfléchi on a :

$$H_{d,s} = H_d \frac{1 + \cos(S)}{2} \quad (2-16)$$

$$H_{g,s} = H_t \frac{(1 - \cos(S)) \rho_g}{2} \quad (2-17)$$

Donc, le rayonnement solaire global sur les panneaux est alors :

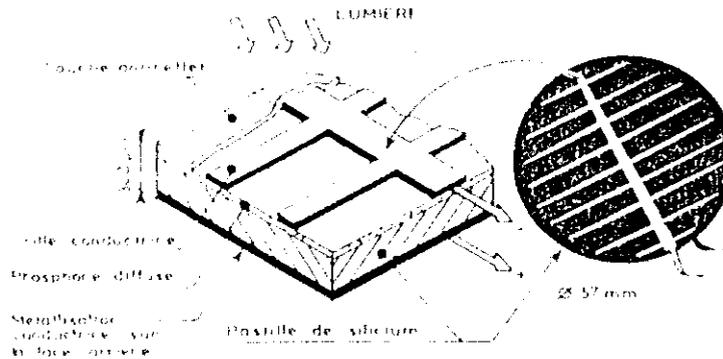
$$H_{t,s} = (H_t - H_d) \frac{\cos(\theta)}{\sin(h)} + H_d \frac{1 + \cos(S)}{2} + H_t \frac{1 - \cos(S)}{2} \rho_g \quad (2-18)$$

## II.2 Conversion photovoltaïque

Un panneau photovoltaïque est très simple à construire une fois les cellules photovoltaïques réalisées. Les seules cellules commercialisées sont faites en silicium mono cristallin dont la fabrication complexe passe par les étapes suivantes:

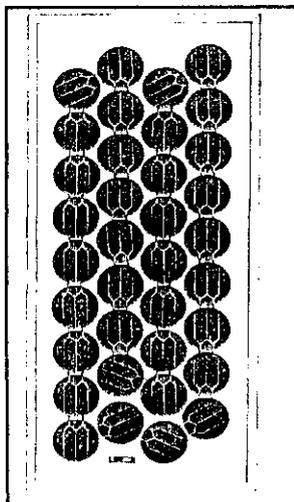
- Fusion du sable au four pour obtenir du silicium poly cristallin de pureté 98% ;
- Transformation en chlérosilane par distillation fractionnée ;
- Tirage d'un lingot mono cristallin de pureté 99.999999%, de diamètre allant de 60 à 200 mm et de longueur 1 m, de masse : 10 kg à 14000 C; la durée est de 10h par unité ;
- Rectification du lingot au diamètre désiré ;
- Découpage à la scie diamantée pour obtenir une plaque à l'épaisseur désirée (généralement 400mm). Le débit de cette opération est de 60 à 100 plaques/heure ;
- Décapage des plaques à l'acide nitrique ;

- Diffusion d'atomes de phosphore à 850°C sur la face avant ;
- Métallisation de la face avant avec une grille qui doit recueillir le courant; et de l'arrière complètement par vaporisation sous vide, d'argent, avec un canon à électrons ;
- Dépôt sur la face avant d'une couche d'oxyde de titane antireflet ;
- A ce stade les cellules photovoltaïques sont réalisées, une cellule photovoltaïque concrétisant ces différentes étapes est présentée sur la figure 2.2

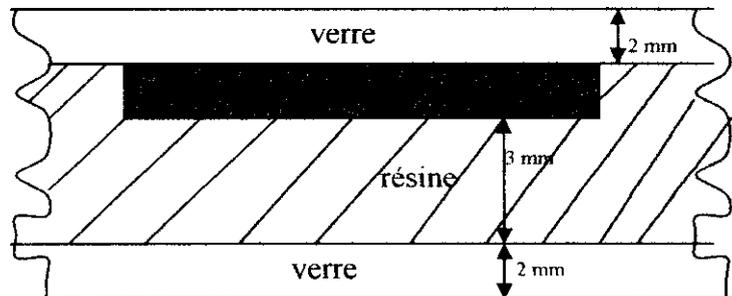


**Fig. 2.2 Schéma d'une cellule photovoltaïque.**

Les cellules photovoltaïques sont ensuite connectées entre eux en série Selon la figure 2.3, pour constituer un panneau photovoltaïque, les cellules connectés sont encapsulées dans une structure bi-verre à l'aide d'une couche de résine de silicone (figure 2.4). Le panneau ainsi fabriqué est appelé module. Le nombre de module à utiliser dépend de la puissance désirée, les modules sont connectés en série, parallèle ou série/parallèle afin de régler la sortie électrique (courant, différence de potentielle) désirée.



**Fig. 2.3 Vue de face d'un module photovoltaïque.**



**Fig. 2.4 Coupe d'un panneau PV au niveau d'une cellule**

### II.2.1 Coefficient de transmission du couvercle

La figure 2.4, montre les cellules protégées par une couche de verre, dont le coefficient de transmission dépend de l'angle d'incidence du rayonnement solaire. Si l'angle d'incidence du rayonnement direct est calculable, ceux du diffus et du réfléchi sont évalués par des angles d'incidences effectifs:

$$\theta_d = 59.68 - 0.1388 S + 0.001497 S^2 \quad (2-19)$$

$$\theta_g = 90 - 0.5788 S + 0.00269 S^2 \quad (2-20)$$

Notons,  $\beta$  l'angle d'incidence pour lequel la transmission est à calculer en suivant la procédure suivante :

L'angle de réfraction est donné par la loi de SNELL :

$$\theta_r(\beta) = \arcsin(\sin(\beta)/n) \quad (2-21)$$

Le coefficient de réflexion dans les deux directions de polarisation est donné par les expressions de Fresnel:

$$R_{\text{perpendiculaire}} = r_{\text{per}}(\beta) = \frac{\sin^2(\theta_r(\beta) - \beta)}{\sin^2(\theta_r(\beta) + \beta)} \quad (2-22)$$

$$R_{\text{parallele}} = r_{\text{par}}(\beta) = \frac{\tan^2(\theta_r(\beta) - \beta)}{\tan^2(\theta_r(\beta) + \beta)} \quad (2-23)$$

La transmission due uniquement à la réflexion du couvercle :

$$\tau_r(\beta) = \frac{1}{2} \left( \frac{1 - r_{\text{per}}(\beta)}{1 + r_{\text{per}}(\beta)} + \frac{1 - r_{\text{par}}(\beta)}{1 + r_{\text{par}}(\beta)} \right) \quad (2-24)$$

La transmission due à l'absorption du couvercle est donnée par la loi de BOUGER:

$$\tau_a(\beta) = \exp\left(\frac{-k_{eg}}{\cos(\theta_r(\beta))}\right) \quad (2-25)$$

Le coefficient de transmission global est approximé par :

$$\tau(\beta) = \tau_r(\beta) \tau_a(\beta) \quad (2-26)$$

### II.2.2 Coefficient d'absorption des cellules

En prenant des cellules noires, leur coefficient d'absorption dépend de l'angle d'incidence du rayonnement incident, La corrélation le donne en fonction de l'angle d'incidence.

$$\alpha(\beta) = 1 - \exp(-0.0255 - 6.683 \cos(\beta) + 5.947 \cos^2(\beta) - 2.48 \cos^3(\beta)) \quad (2-27)$$

Pour la commodité des formules, on notera par la suite :

$$\beta = \theta \quad , \quad \tau(\theta) = \tau_b \quad ; \quad \alpha(\theta) = \alpha_b$$

$$\beta = \theta_d \quad , \quad \tau(\theta_d) = \tau_d \quad ; \quad \alpha(\theta_d) = \alpha_d$$

$$\beta = \theta_g \quad , \quad \tau(\theta_g) = \tau_g \quad ; \quad \alpha(\theta_g) = \alpha_g$$

### II.2.3 Energie transmise et absorbée

Si la surface totale des cellules est  $A$ , d'après ce qui précède l'énergie transmise et arrivant sur les cellules est :

$$q_t = A(\tau_b H_{b,s} + \tau_d H_{d,s} + \tau_g H_{g,s}) \quad (2-28)$$

L'énergie absorbée par les cellules :

$$q_a = A(\alpha_b \tau_b H_{b,s} + \alpha_d \tau_d H_{d,s} + \alpha_g \tau_g H_{g,s}) \quad (2-29)$$

L'aire sur les panneaux utile pour la transformation en énergie électrique est réduite à la fraction qui arrive sur les cellules, alors que le reste est en partie absorbée par la structure transparente se trouvant entre les cellules et en partie transmis vers le sol.

En général la surface des panneaux  $A_p$ , telle que :

$$A \approx 0.6.A_p \quad (2-30)$$

### II.2.4 Rendement des cellules

Le rendement des cellules photovoltaïques au silicium est donné par :

$$\tau = \tau_r (1 - \beta_r (T_C - T_r)) \quad (2-31)$$

Pour des cellules au silicium on a :

$$0.08 < \tau_r < 0.18 \quad (2-31-a)$$

$$0.0025.C-1 \leq \beta_r \leq 0.004.C-1 \quad (2-31-b)$$

Avec pour :

$$T_r = 0^\circ\text{C} ; \tau_r = 0.12 ; \beta_r = 0.004.C^{-1}$$

Le rendement peut être exprimé, aussi par :

$$\tau = E/q_t \quad (2-32)$$

### II.2.5 Bilan thermique

#### II.2.5.1 Coefficient de perte

En se basant sur la figure (2-5) et (2-6) les coefficients de perte vers l'avant et l'arrière des panneaux sont donnés par :

$$U_t = \left( \frac{e_g}{k_g} + \frac{1}{h_w + h_{re}} \right)^{-1} \quad (2-33)$$

$$U_b = \left( \frac{e_r}{k_r} + \frac{e_g}{k_g} + \frac{1}{h_w + h_{ri}} \right)^{-1} \quad (2-34)$$

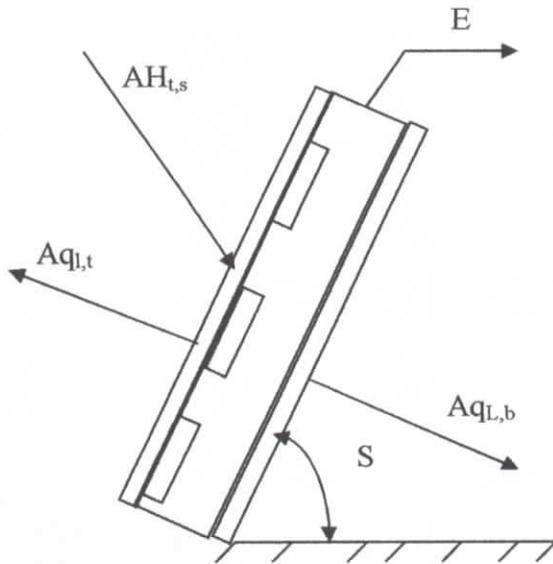


Fig. 2.5 Bilan thermique du panneau.

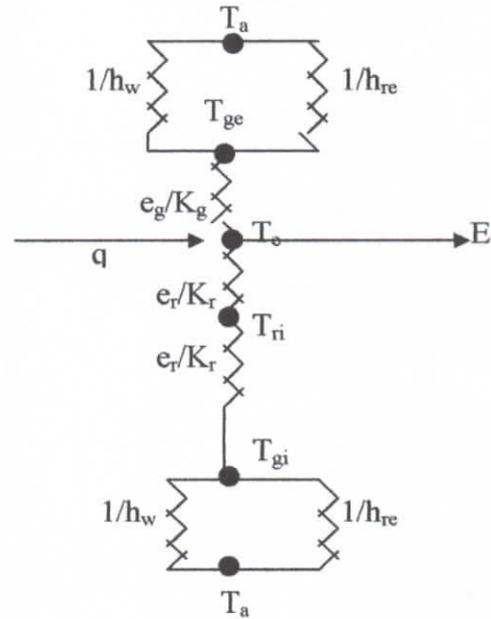


Fig. 2.6 Bilan thermique en terme de conduction, convection et rayonnement.

Où :

$$h_{re} = \epsilon \sigma \gamma (T_{ge}^2 + T_a^2) (T_{ge} + T_a) \quad (2-35a)$$

$$h_{ri} = \epsilon \sigma \gamma (T_{gi}^2 + T_a^2) (T_{gi} + T_a) \quad (2-35b)$$

Le coefficient d'échange par convection est donné par :

$$h_w = 5.7 + 3.8v \quad (2-36)$$

Le coefficient de perte global est alors :

$$U_L = U_t + U_b \quad (2-37)$$

### II.2.6 Flux de chaleur perdues

Le flux de chaleur perdu vers l'avant peut être exprimé par les relations :

$$q_{t,l} = U_t (T_c - T_a) \quad (2-38)$$

$$q_{t,l} = (K_g / \epsilon_g) (T_c - T_{ge}) \quad (2-39)$$

En éliminant  $q_{t,l}$  entre ces deux équations on obtient :

$$T_{ge} = T_c - (e_g / K_g) (T_c - T_{ge}) U_t \quad (2-40)$$

De la même façon le flux perdu vers l'arrière est donné par les relations :

$$Q_{b,l} = U_b (T_c - T_a) \quad (2-41)$$

$$Q_{b,l} = (T_c - T_{gi}) [(e_g / K_g) + (e_r / K_r)]^{-1} \quad (2-42)$$

D'où :

$$T_{gi} = T_c - U_b (T_c - T_a) ((e_g / k_g) + (e_r / k_r)) \quad (2-43)$$

### II.2.6.1 Energie électrique produite

Connaissant le flux absorbé par les cellules et le flux perdu vers le milieu extérieur on peut calculer l'énergie électrique:

$$E = q_a - (q_{t,l} + q_{b,l}) = q_a - U_1 (T_C - T_a) \quad (2-44)$$

En éliminant E et t entre les équations (2-31), (2-31b) et (2-44) on obtient la température des cellules données par:

$$T_C = (q_a + U_L T_a - \tau_r q_t (1 + \beta_V T_r)) (U_L - \beta_r \tau_r q_t)^{-1} \quad (2-45)$$

**N.B.** Pour la commodité des calculs, l'algorithme a été développé en terme de flux. Pour avoir l'énergie transmise, perdue, absorbée ou électrique produite, il suffit de multiplier par la surface totale des cellules.

### II.2.7 Rendement mensuel et annuel

Le rendement mensuel moyen peut être pris comme le rapport de la somme des énergies électriques horaires pendant la journée typique du mois considéré et la somme des énergies transmises correspondant :

$$\tau_m = \frac{\sum_{i=1}^{24} E_i}{\sum_{i=1}^{24} q_{ti}} \quad (2-46)$$

De la même façon le rendement annuel est donné par :

$$\tau_a = \frac{\sum_{j=1}^{12} (N_j \sum_{i=1}^{24} E_i)}{\sum_{j=1}^{12} (N_j \sum_{i=1}^{24} q_{ti})} \quad (2-47)$$

## II.3 La voiture électrique [3]

Depuis l'invention des premiers véhicules automobiles, plusieurs moyens de propulsion se sont trouvés en compétition. Parmi lesquelles il y avait la machine à vapeur, le moteur thermique et électrique. En 1847, Moser FARMERF Armer a fait rouler un véhicule électrique sur une route transportant deux personnes à bord. En 1881 la première automobile électrique circula; c'est un dénommé J.Raffard qui l'avait mise au point. Cette voiture électrique fut rendue possible grâce à la commercialisation de l'accumulateur au plomb. C'était le point de départ de plusieurs inventions de ce type, comme l'Omnibus à traction électrique de Walter C. BERSEY en 1888, le Remorqueur DE DION BOUTON; le véhicule expérimental de Thomas EDISON Qui servait de test pour ses batterie nickel/fer.

Au début du XX<sup>ème</sup> siècle il y avait commercialisation non seulement de voitures électriques mais aussi de machines pour les recharger pourtant l'insuffisance des centrales pour permettre la recharge de plusieurs automobiles ainsi que le poids trop grand des

accumulateurs devaient mener à l'abandon du moteur électrique. Le développement du démarreur automatique pour remplacer la "crank" du moteur à gaz à aussi contribué à la disparition de l'intérêt pour les moteurs électriques.

D'ailleurs il y a eu stagnation des progrès en ce qui concerne le moteur électrique et ce n'est qu'aux environ des années 1960 qu'il regain de l'intérêt et cela à cause de plusieurs circonstances comme par exemple celle de la pression des groupes environnementalistes ainsi que la conscientisation du déclin progressif des réserves de pétrole.

Entre 1959-1960, les états unis se sont mit à la recherche de générateurs pour leur programme spatial. La pile à combustible hydrogène/oxygène apparaissait comme un générateur privilégié, bien que ce procédé soit connu depuis 1839 ce n'est qu'en 1953 que des réussites se firent en l'adoptant plusieurs grandes compagnies se mettent donc à travailler sur la pile à combustible. Cette vague de recherche continua jusqu'en 1968 et permit de nombreux progrès dans le domaine des générateurs électriques, malheureusement ces études ont confirmé que la pile à combustible nécessiterait des recherches beaucoup trop longues et onéreuses pour permettre de fabriquer des moteurs électriques appliqués à l'automobile avec celle-ci par contre il y avait eu sensibilisation des fabricants d'automobiles et ils avaient déjà commencés à amorcer des projets de recherche et de développement en ce qui concerne le moteur électrique. En 1971 La compagnie GULF GENERAL ELECTRIC débouchait avec un prototype de véhicule électrique; au début 1974 la voiture Enfield 8000 était produite en Grèce ce qui constituait un autre véhicule électrique.

En 1974 la crise pétrolière a influencé avantageusement sur le progrès de la voiture électrique. Cette crise se rétablit au début des années 80 il y a désintéressement de la voiture électrique Jusqu'au moment où l'état de la Californie proclame des lois et des projets en sa faveur en 2000.

### II.3.1 Différents modes de stockage d'énergie dans les voitures électriques et hybrides

Dans les voitures électriques, deux grandes catégories de stockage d'énergie sont utilisés [2]:

- 1- Piles à combustible, hydrogène/oxygène;
- 2- Hydrogène liquéfié;
- 3- Batteries au plomb rechargeable.

Dans ce qui suit, nous présenterons le système d'alimentation à piles à combustible, sans détailler celui des batteries au plomb. Du moment où c'est pratiquement la même configuration à part la source d'alimentation (pile à combustible - batteries au plomb)

#### II.3.1.1 Pile à combustible

Entre les années 1950-1965, des dizaines de laboratoires et d'industriels se lancèrent dans les piles à combustible. Les premières applications ont concerné les domaines spatiaux et océanographiques, Il y eut notamment l'essai d'une pile de 20kW par l'U.S. NAVY capable

de fonctionner à une profondeur de 6 000 m. et d'une pile à combustible adoptée par la N.A.S.A. pour les engins spatiaux dans les années soixante. Les premières applications spectaculaires ont été effectuées sur les véhicules spatiaux habités Gemini en 1963 et Apollo en 1968 ce type de pile est d'ailleurs encore employé par les navettes américaines. Dans le domaine spatial, la pile à hydrogène - air a fait la preuve de son efficacité en minimisant grâce à son haut rendement le poids des réactifs transportés. Pour ces applications le prix est secondaire car le but recherché est de disposer de sources électriques fiables et performantes.

Aux Etats-Unis, Allis-Chalmers Manufacturing Company fabriqua une pile alcaline de 15 kW pour un tracteur électrique. Karl Kordesch, chez Union Carbide, réalisa une pile alcaline de 6 kW qui associée à des batteries plomb/acide, alimenta une Austin A40 à propulsion électrique. Cette voiture, d'une autonomie de 300 km pour 2 kg d'hydrogène embarqué dans des bouteilles sous pression, a fonctionné pendant 3 ans en effectuant plus de 16 000 km.

La réussite technologique de ces programmes encouragea un grand nombre de recherches, principalement aux Etats-Unis, mais aussi en Europe, sur des piles utilisant aussi bien l'hydrogène que d'autres combustibles.

Entre 1960-1975, plusieurs firmes industrielles internationales ont mené des recherches fondamentales et technologiques, aboutissant à la réalisation de prototypes de piles à hydrogène/air. Les travaux portèrent sur le concept même de la pile, sur les membranes, sur l'amélioration du rendement, et le développement des auxiliaires indispensables comme les pompes et les vannes. Les systèmes obtenus donnèrent toute satisfaction pour leurs applications, mais on utilisait comme seul carburant et comburant de l'hydrogène et de l'oxygène, tous deux très purs.

Une enquête des autorités fédérales américaines sur les conséquences de la forte croissance de la pollution automobile incite tous les laboratoires et les industriels américains, mais aussi européens et japonais à se lancer dans de nombreux travaux sur l'amélioration des véhicules (développement des véhicules hybrides et électriques...). En même temps, des travaux sur l'utilisation de l'hydrogène dans les moteurs thermiques, son stockage embarqué se développent. En 1972, plus de 30 projets de recherche sont menés aux Etats-Unis sur le stockage et fabrication embarqué, l'objectif initial n'était pas les piles à combustible, mais l'emploi de l'hydrogène dans les moteurs thermiques pour réduire la pollution. Des projets de réalisations de puissantes centrales électriques de 1 à 500 MW utilisant des piles à combustible étaient élaborés (Alstom, Exxon), mais ne se réalisèrent pas car à l'époque des problèmes d'industrialisation, de fourniture et de stockage de carburant ainsi que le prix de revient à l'usage ne sont pas encore satisfaisants.

Une pile à combustible permet de convertir directement de l'énergie chimique en énergie électrique. A la différence des moyens traditionnels de production d'énergie, son rendement ne dépend pas du cycle de Carnot. Par ailleurs, le combustible est fourni en continu à la différence des piles traditionnelles (pile au Zinc) on peut ainsi obtenir du courant de façon continue. L'un des intérêts de la pile à combustible est que les températures de

fonctionnement sont de plus faible niveau que dans les turbines ou les moteurs à combustion ceci permet entre autres d'éviter la formation de  $\text{NO}_x$ . Cependant à ce niveau de température la plupart des carburants carbonés traditionnels sont trop peu réactifs et seul l'hydrogène convient. Le méthanol peut aussi être utilisé dans les piles directes à méthanol, mais leurs performances restent pour le moment inférieures à celles des piles à hydrogène car pour utiliser des combustibles type méthane ou autres alcools, il faut des températures de fonctionnement soient entre 800 à 1000°C.

La réalisation de piles fonctionnant à de telles températures est problématique, on préfère donc utiliser de l'hydrogène. Une cellule élémentaire est constituée de deux électrodes et un électrolyte.

Les deux électrodes sont séparées par l'électrolyte. A l'anode, on amène le combustible (dans notre cas de l'hydrogène) à la cathode est alimentée en oxygène (ou plus simplement en air) [11].

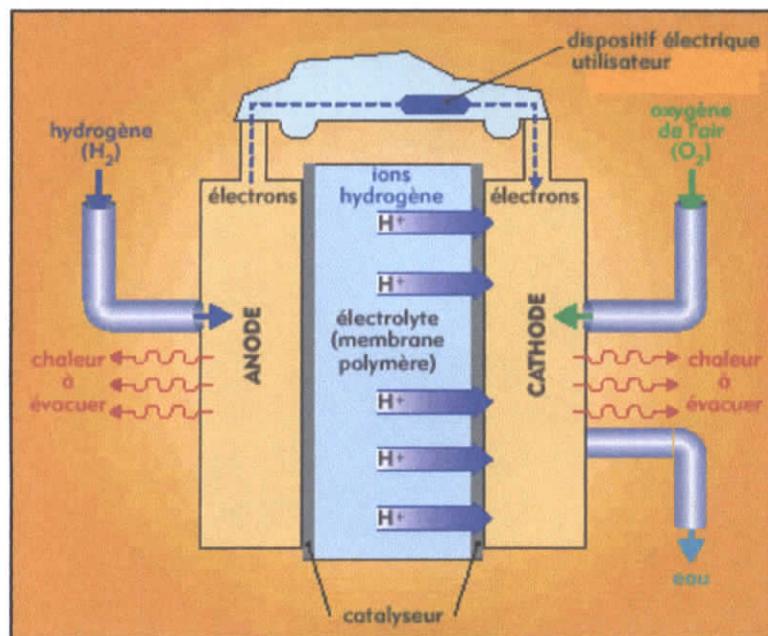


Fig. 2.7 Schématisation d'une pile à combustible.

Dans le cas particulier d'une pile hydrogène-oxygène, on a oxydation de l'hydrogène à l'anode selon l'équation chimique [26]:

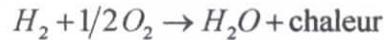


Il s'agit d'une réaction catalysée, l'atome d'hydrogène réagit en libérant deux électrons, qui circulent dans le circuit électrique qui relie l'anode à la cathode.

A la cathode, on assiste à la réduction cathodique (également catalysée) de l'oxygène selon:



Le bilan donne donc:



Cette réaction est exothermique, à 25°C l'enthalpie libre de la réaction est de -237 ou -229 kJ/mol selon que l'eau formée est liquide ou gazeuse.

Ceci correspond à des tensions théoriques de 1,23 et 1,18 V.

### II.3.2 Système à alimentation pile à combustible

De la même façon qu'un moteur thermique doit être couplé à de nombreux périphériques, le module pile à combustible doit être lui aussi, couplé à plusieurs périphériques tels qu'il apparaît sur la figure 4 et qui doivent être intégrés au véhicule.

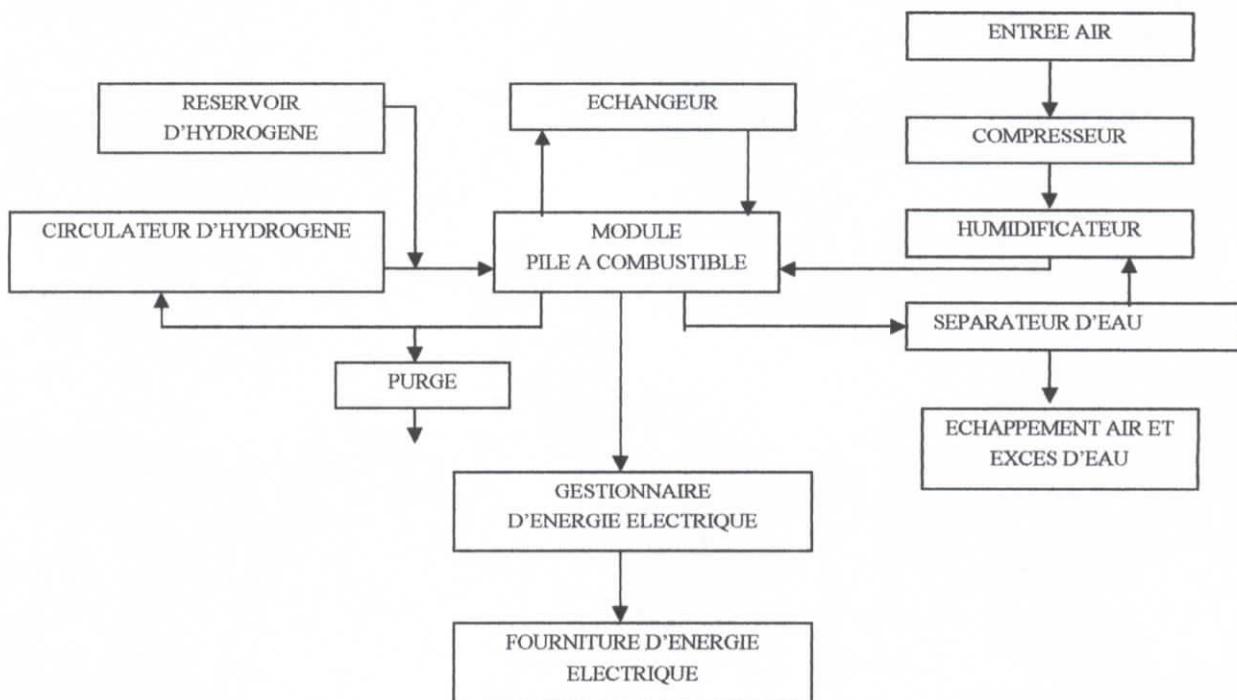


Fig. 2.8 Schéma synoptique d'une pile à combustible.

### II.3.3 Les types de montage possibles

La pile à combustible peut :

- Soit être utilisée seule sur le véhicule (exemple :Necar de DaimlerChrysler)
- Soit être couplée à une batterie (NiMH ou Li-ion). Dans ce cas deux architectures sont possibles :

- \* Soit il s'agit d'une batterie alimentant le moteur électrique, et la pile à combustible (de petite puissance) charge la batterie quand c'est nécessaire.
- \* Soit la batterie est montée en parallèle avec la pile à combustible et a alors deux rôles complémentaires, donner un appoint de puissance et récupérer une partie de l'énergie de freinage. A noter que, dans une variante la batterie peut être remplacée par une super-capacité (exemple dans les voitures Honda et Volkswagen).

Le constructeur fait le choix du type de montage en fonction de plusieurs paramètres dont:

- 1- La fonction du véhicule (urbain ou routier),
- 2- Le coût :il peut être plus économique d'installer une pile à combustible de plus petite taille quitte à y ajouter une batterie et sa gestion électrochimique.
- 3- Les qualités énergétiques qu'il souhaite offrir à son client: il est clair que la dernière solution est la plus efficace sur les plans énergétique et environnemental dans la mesure où pour certains types d'utilisation urbain et périurbain, l'énergie de freinage récupérée peut atteindre 30% de l'énergie totale consommée.

### II.3.4 L'alimentation en hydrogène

Deux familles de solutions sont possibles et actuellement testées [9] :

- Soit l'hydrogène est stocké à bord sous forme liquide ou gazeuse (sous pression ou absorbé dans un hydrure)
- Soit l'hydrogène est fabriqué à bord au fur et à mesure du besoin.

#### II.3.4.1 Stockage de l'hydrogène à bord

##### *Stockage gazeux sous pression*

Le stockage de gaz sous pression constitue un système extrêmement simple, il n'utilise pas d'auxiliaire coûteux en énergie et il est capable de délivrer la quasi totalité d'hydrogène stocké avec une dynamique et une cinétique bien supérieures au besoin.

Les matériaux composites actuels utilisés pour la réalisation des réservoirs permettent d'obtenir des performances massiques intéressantes de l'ordre de 5 à 6%.

Les meilleures performances que le C.E.A. (Centre des Energies Atomiques) a obtenues en 1994 dans le cas d'un réservoir de ce type sous 700 bars avec un coefficient de sécurité de 2,5 (qui équipe le prototype Hydrogène ) sont :

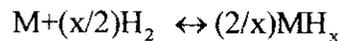
$$25 \text{ g H}_2 \text{ /litre de réservoir} - 65\text{g H}_2 \text{ /kg de réservoir}$$

Les réservoirs sont constitués d'une vessie servant de barrière à l'hydrogène (généralement en alliage d'aluminium) renforcée par de la fibre de carbone imprégnée de résine.

La plupart des prototypes fonctionnent actuellement sous 250 à 350 bars. Les réservoirs de forme cylindrique sont généralement intégrés dans le châssis du véhicule.

### *Stockage dans les hydrures*

Une hydrure est un composé solide formé par action directe (théoriquement réversible) de l'hydrogène gazeux sur un métal ou un composé métallique M suivant la réaction :



Les principaux objectifs fixés pour l'application automobile sont :

- 1- Capacité massique d'absorption: 5 % .
- 2- Température de désorption: < 150°C
- 3- Cyclabilité : de l'ordre de 5000 cycles

Les principaux composés métalliques actuellement proposés pour les prototypes automobiles sont :

- 1- Alliages Fe-Ti : malgré une capacité massique relativement faible (1%), ils sont fréquemment utilisés en raison du faible coût des matériaux de base et d'une faible enthalpie de formation (< 8kcal/mol)
- 2- Alliages LaNi5 (capacité massique de 2 à 3%)
- 3- Les alliages de magnésium: l'hydrure de magnésium présente un coût faible et une capacité massique élevée (jusqu'à 7,6% en poids). Il est malheureusement très instable (température de désorption de l'ordre de 280°C à 1 bar relatif) et très sensible aux impuretés.

A ce jour, les alliages proposés ne satisfont donc pas les objectifs, soit ils présentent généralement des capacités massiques de stockage trop faibles et auxquelles il faut encore ajouter le poids de la technologie de mise en œuvre (réservoir basse pression, chauffage.....), soit la température de désorption est trop élevée. A titre d'exemple, Toyota, dans le cadre de son programme FCEV, et plus précisément dans le cadre de son premier prototype RAV-4L de véhicule à pile à combustible a réalisé les performances suivantes avec un alliage original Ti-béta :

37 g H<sub>2</sub> /litre de réservoir - 20 g H<sub>2</sub> /kg de réservoir

il faut cependant noter l'excellent comportement de ce type de stockage, du point de vue sûreté, qui explique l'intérêt manifesté par certains constructeurs (Toyota, Mazda, Honda, General Motors).

#### II.3.4.2 Stockage sous forme cryogénie (liquide)

Du fait de sa faible densité (70,8 kg/m<sup>3</sup> à 20,3 K), le volume correspondant à 5kg d'hydrogène est de l'ordre de 70 litres.

D'un point de vue pratique, ce mode de stockage peut donc paraître séduisant d'autant plus que l'hydrogène liquide est aisément disponible dans les pays industrialisés.

Néanmoins, il est pénalisé par plusieurs inconvénients:

- La nécessité de maintenir l'hydrogène à de très basse température ce qui exige une isolation thermique soignée, donc encombrante, qui n'empêche pas une évaporation parasite mais permet un contrôle à un niveau admissible de l'ordre de 3% par jour. Cette évaporation peut toutefois ne pas être permanente en réalisant une enceinte pressurisée dotée d'une vanne de décharge .
- L'énergie nécessaire à la liquéfaction de l'hydrogène représente environ 40% de l'énergie contenue dans le gaz.
- La manipulation de l'hydrogène liquide exige une station de remplissage automatique complexe et onéreuse .

Les performances d'un réservoir d'hydrogène liquide, pressurisé à une dizaine de bars pour tenir quelques jours sans fuite, sont voisines de :

30 g H<sub>2</sub> /litre de réservoir - 70 g H<sub>2</sub> /kg de réservoir

Les prototypes équipés de ce type de réservoir sont : HydroGen1 de General Motors, Necar 4A de DaimlerChrysler, Bora HyMotion de Volkswagen, Fever de Renault.

### II.3.5 L'alimentation en oxygène

L'oxygène nécessaire à la réaction électrochimique est prélevé directement à partir de l'air ambiant, comme dans le cas des moteurs thermiques.

# CHAPITRE III

## *MODELISATION DE L'ELECTROLYSEUR*

Dans ce qui suit, nous présenterons la modélisation mathématique d'un électrolyseur alcalin utilisé dans l'installation de production d'hydrogène solaire.

La modélisation mathématique de l'électrolyseur utilisée est inspirée de l'article[21], nous exposerons les démarches suivies.

Le modèle est basé sur une combinaison d'études thermodynamiques et de données empiriques de l'électrolyseur.

Le modèle élaboré nous donnera les caractéristiques suivantes :

- Tension aux bornes d'une cellule de l'électrolyseur.
- Débit d'hydrogène produit.
- Le rendement de l'électrolyseur.

L'installation utilisée est une station individuelle de production d'hydrogène solaire par la méthode des cellules photovoltaïques installée à Zurich.

### III.1 INTRODUCTION :

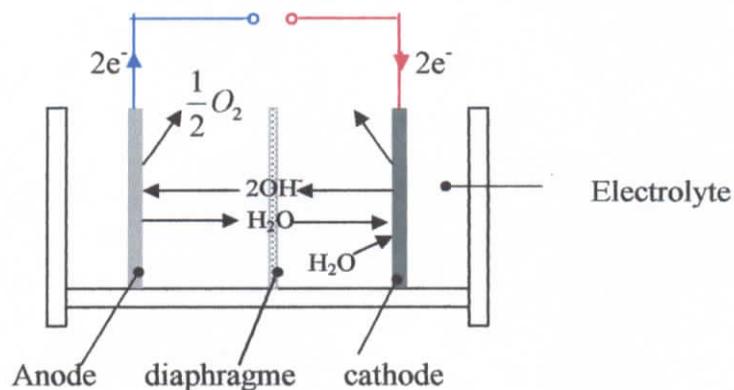
Un électrolyseur est un dispositif de décomposition chimique de l'eau par courant électrique.

Il est composé principalement de :

- 1- Bac de stockage;
- 2- Electrolyte;
- 3- Electrodes;
- 4- Membrane de séparation.

L'électrolyte utilisé conventionnellement dans les électrolyseurs alcalins à eau utilisent une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium KOH .

Pour une optimisation de conductivité électrique et une augmentation de résistance à la corrosion des matériaux on utilise l'électrolyte avec des concentrations variant entre 20-30 wt% .



**Fig. 3.1 Schématisation d'une cellule d'électrolyseur et de son principe de fonctionnement [1].**

On appelle cellule, toute paire d'anode et électrode séparés par une membrane Fig.3-1.

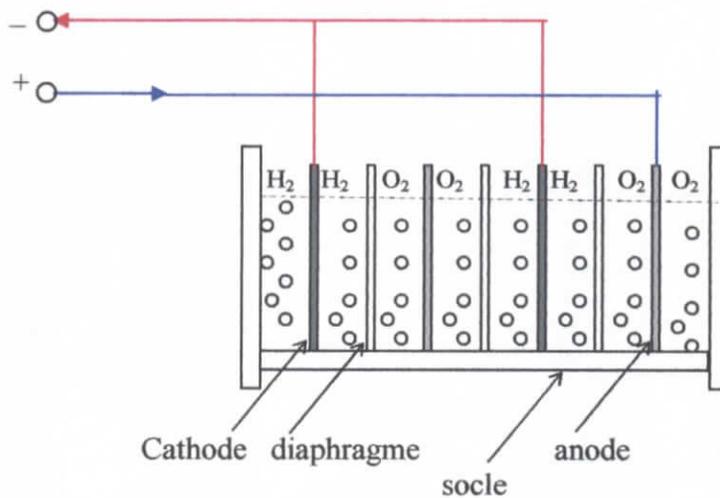
Les conditions de température et de pression de l'électrolyseur étudié sont :

- Température comprise entre 70-100°C.
- Pression comprise entre 1-30 bar.

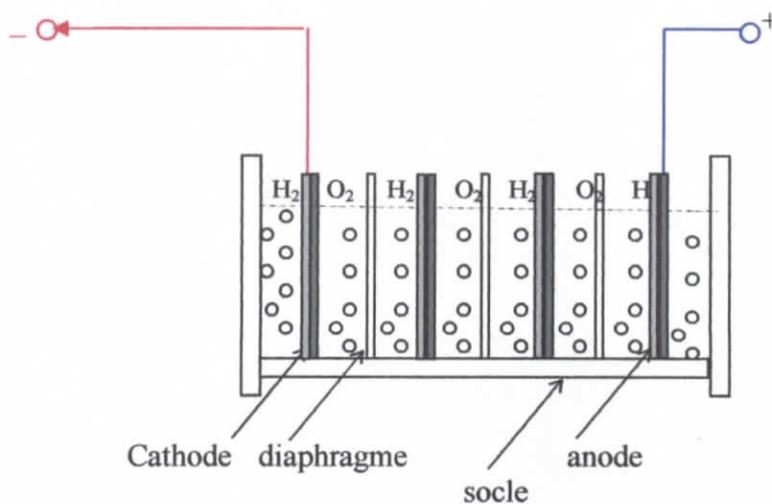
Un électrolyseur se compose en plusieurs cellules branchées en série.

On trouve deux grandes configurations des cellules dans un électrolyseur :

- Cellules mono polaires (Fig3-2).
- Cellules bipolaires (Fig3-3).



**Fig. 3.2 Principe de fonctionnement d'un électrolyseur mono polaire [1].**



**Fig. 3.3 Principe de fonctionnement d'un électrolyseur bipolaire [1].**

Dans la configuration mono polaire, chaque cellule a les deux électrodes branchées individuellement au réseau d'alimentation électrique de l'installation, par contre dans la configuration bipolaire, chacune des cellules est reliée géométriquement et électriquement en série.

Le principal avantage des électrolyseurs bipolaires, est qu'ils sont très compact par rapport aux électrolyseurs mono polaires, et cette compacité fait qu'ils ne demandent pas de grandes intensités électrique pour un fonctionnement normal, et cela est due à la faible résistance ohmique de l'électrolyte ce qui induit à l'augmentation de leur rendement.

Néanmoins, on trouve quelques désavantages avec les cellules bipolaires, par exemple l'apparence de région de corrosion due au courant parasite, ce qui crée des problèmes de dysfonctionnement.

La compacité et la haute pression de fonctionnement des électrolyseurs bipolaires, demandent une panoplie de matériels sophistiqués ce qui affecte directement le prix de revient de l'installation.

Par contre les électrolyseurs mono polaires demandent un moindre investissement pour la maintenance que les électrolyseurs bipolaires.

La plupart des électrolyseurs du marché actuel sont de type bipolaire.

Dans les nouveaux types des électrolyseurs alcalins la tension de fonctionnement des cellules est réduite et l'intensité de courant augmenté par rapport aux autres types d'électrolyseurs.

Néanmoins l'augmentation de la densité de courant augmente la surtension dans l'anode et la cathode et augmente aussi la résistance ohmique de l'électrolyseur à cause des gaz échappés.

Trois modifications techniques peuvent être adoptées pour un meilleur rendement des électrolyseurs :

- 1- Une nouvelle configuration des cellules pour réduire leurs surfaces spécifiques en dépit de la diminution de la densité de courant.
- 2- Adopter de hautes températures de fonctionnement pour réduire la résistance interne des cellules pour augmenter la conductivité électrique de l'électrolyte.
- 3- Adopter un électrocatalyseur pour réduire la surtension a l'anode et la cathode.

### III.2 L'électrolyse :

L'électrolyse est la décomposition de l'eau en hydrogène ( $H_2$ ) et oxygène( $O_2$ ), elle est produite par le passage d'un courant électrique a travers deux électrodes séparées par un électrolyte de bonne conductivité ionique.

La réaction chimique de l'électrolyse de l'eau est :

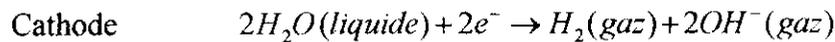
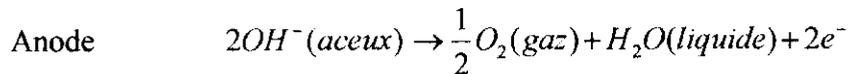


Pour réaliser cette réaction il faut garantir un potentiel seuil entre les deux électrodes.

Le voltage minimal ou voltage réversible est calculé en utilisant l'énergie de Gibbs pour la décomposition de l'eau.

Dans les électrolyseurs, l'électrolyte est souvent de l'hydroxyde de potassium aqueux, tel que les ions de potassium  $K^+$  et les anions de l'hydroxyde  $OH^-$  sont considérés comme des transporteurs ioniques.

Les réactions à la cathode et à l'anode sont :



Avec des solutions alcalines les électrodes doivent avoir une très bonne résistance à la corrosion et une très bonne conductivité électrique et propriétés catalytiques, pour cela on utilise des anodes à base de nickel, cobalt et de fer et des cathodes à base de nickel, platine et de carbone catalytique (ni, c-pt).

De l'oxyde de nickel (NiO) est utilisé comme diaphragmes.

### III.3 Modélisation de l'électrolyseur :

Dans cette étude, nous nous limitons dans le dimensionnement à la méthode thermodynamique.

L'étude thermodynamique nous fournit une description des réactions chimiques et thermochimiques du système étudié.

Dans ce qui suit nous donnons une description thermodynamique d'un électrolyseur à une basse température de réaction électrochimique de l'hydrogène -oxygène.

Les hypothèses suivantes sont adoptées dans les calculs thermodynamiques :

- L'hydrogène ( $H_2$ ) et l'oxygène ( $O_2$ ) sont des gaz parfaits.
- L'eau est un fluide incompressible.
- Les états gazeux et liquides sont séparés.

En se basant sur les hypothèses citées, la variation de l'enthalpie  $\Delta H$ , entropie  $\Delta S$ , et de l'énergie de Gibbs  $\Delta G$  de la réaction de décomposition de l'eau sont calculés dans l'état de référence de l'hydrogène pure ( $H_2$ ), oxygène pure et de l'eau dans des conditions standard de pression et de température (25°C et 1bar).

La variation de l'enthalpie de réaction de l'électrolyse de l'eau est la différence entre l'enthalpie des produits ( $H_2, O_2$ ) et celle des réactants ( $H_2O$ ).

On prend la même considération pour calculer la variation d'entropie dans la réaction chimique.

La variation de l'énergie de Gibbs est donnée par :

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (3-1)$$

Dans les conditions standards (1bar, 25°C ) la décomposition de l'eau n'est pas instantanée, ce qui induit que l'énergie de Gibbs est positive.

L'énergie de Gibbs standard pour la décomposition de l'eau est  $\Delta G^\circ = 237 \text{ kJ/mol}$ .

Dans un processus électrochimique dans des conditions standard de pression et de température, le travail maximal tiré est égal à la variation de l'énergie de Gibbs.

La loi de Faraday donne l'énergie électrique requise pour l'électrolyse de l'eau .

L'énergie électrique pour une réaction chimique réversible ou pour une tension réversible est donnée par :

$$U_{rev} = \frac{\Delta G}{z.F} \quad (3-2)$$

Tel que :

$\Delta G$  : Variation de l'énergie de Gibbs.

F : 96485C/mol Constante de Faraday.

z : 2, Nombre d'électrons transférés par réaction chimique.

L'énergie totale dont on a besoin pour l'électrolyse de l'eau, est égale à la variation des enthalpies entre l'état final et initial.

L'enthalpie standard de l'eau est  $\Delta H^\circ = 286 \text{ kJ/mol}$ .

La cinétique de l'électrode de l'électrolyseur peut être modélisée en utilisant des résultats empiriques de courant-tension (U-I), la relation suivante est donnée par l'auteur :

$$U = U_{rev} + \frac{r}{A} I + s \cdot \log\left(\frac{t}{A} I + 1\right) \quad (3-3)$$

Tel que :

r : Paramètre de résistance ohmique de l'électrolyte.

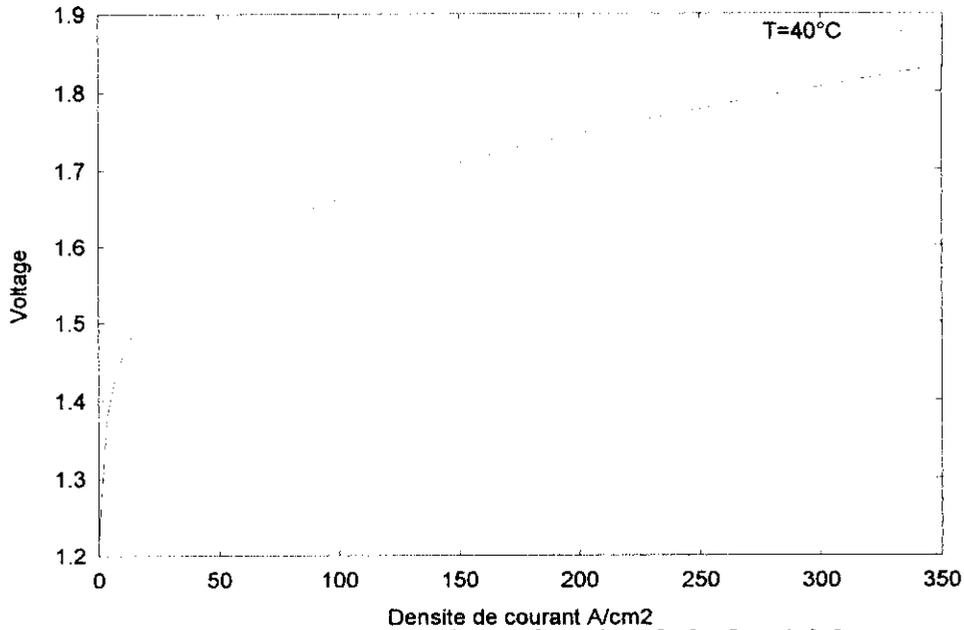
A : 0.25 m<sup>2</sup> Surface de l'électrode .

I : Intensité du courant traversant une cellule.

s : Coefficient de surtension aux électrodes V.

t : Coefficient de surtension aux électrodes A<sup>-1</sup> m<sup>2</sup>.

La fig. 3.4 nous illustre la variation de la tension en fonction de la densité de courant dans une cellule d'électrolyseur alcalin pour une température de fonctionnement. de 40 °C.



**Fig. 3.4 Variation du potentiel en fonction de la densité de courant.**

Pour une correcte illustration de la dépendance de la surtension à la température, on peut modifier et faire apparaître la dépendance de la résistance ohmique et des coefficients de la surtension « s » et « t » à la température.

La relation expérimentale est donnée par :

$$U = U_{rev} + \frac{r_1 + r_2 T}{A} I + s \cdot \log\left(\frac{t_1 + t_2/T + t_3/T^2}{A} I + 1\right) \quad (3-4)$$

Nous considérons que la puissance produite par les panneaux photovoltaïques est transmise à 93% aux électrolyseurs, ce qui nous permet d'estimer leur puissance.

Pour trouver le courant aux bornes de l'électrolyseur nous procédons comme suit :

1- Nous multiplions l'équation (3-4) par la tension I ce qui nous donne l'expression de la puissance :

$$U * I = \left\{ U_{rev} + \frac{r_1 + r_2 T}{A} I + s \cdot \log\left(\frac{t_1 + t_2/T + t_3/T^2}{A} I + 1\right) \right\} * I \quad (3-5)$$

$$P = I U_{rev} + \frac{r_1 + r_2 T}{A} I^2 + I \cdot s \cdot \log\left(\frac{t_1 + t_2/T + t_3/T^2}{A} I + 1\right) \quad (3-6)$$

2- Nous tirons de l'équation (3-6) l'expression du courant I :

$$I = \frac{P}{U_{rev}} - \frac{r_1 + r_2 T}{A U_{rev}} I^2 - \frac{I \cdot s}{U_{rev}} \cdot \log\left(\frac{t_1 + t_2/T + t_3/T^2}{A} I + 1\right) \quad (3-7)$$

En utilisant une méthode numérique de résolution d'équations non linéaires telle que la méthode du point fixe, on calcule l'intensité du courant qui traverse l'électrolyseur.

Sachant la puissance de l'électrolyseur (93% de la puissance transmise par les panneaux photovoltaïques) on peut calculer la tension d'un électrolyseur par :

$$U = \frac{P}{I} \quad (3-8)$$

L'efficacité de faraday est définie comme étant le rapport entre la production maximale d'hydrogène actuelle et théorique dans un électrolyseur.

L'efficacité de faraday est donnée par :

$$\eta_F = \frac{\left\{ \frac{I}{A} \right\}^2}{f_1 + \left\{ \frac{I}{A} \right\}^2} f_2 \quad (3-9)$$

A partir de la loi de Faraday, le taux de production d'hydrogène dans une cellule de l'électrolyseur est directement proportionnel au taux de transfert d'électrons dans les électrodes.

Le débit d'hydrogène produit par l'électrolyseur est donné par :

$$\eta_{H_2}^0 = \eta_F \frac{n_c I}{z.F} \quad (3-10)$$

Les débits d'oxygène et la consommation de l'eau de l'électrolyseur sont déduits directement à partir de la réaction stœchiométrique de l'électrolyse de l'eau :

$$\eta_{H_2O}^0 = \eta_{H_2}^0 = \eta_{O_2}^0 \quad (3-11)$$

Ainsi, nous trouverons les caractéristiques de l'électrolyseur utilisé dans l'installation sachant :

- 1- Le débit d'hydrogène produit ;
- 2- Le rendement de l'électrolyseur ;
- 3- L'intensité de l'électrolyseur ;
- 4- Le courant qui traverse l'électrolyseur.

# CHAPITRE IV

## ***DIMENSIONNEMENT DES VEHICULES***

## IV.1 Présentation générale

Dans le présent chapitre, nous allons procéder à la recherche des consommations en carburant des différents véhicules traités dans notre projet, à savoir :

- 1- Un véhicule électrique utilisant des batteries au plomb ;
- 2- Un véhicule électrique utilisant des piles à combustible ;
- 3- Un véhicule à combustion interne à hydrogène.

Pour atteindre notre objectif, et pouvoir déceler les consommations en carburant des différents véhicules étudiés, nous utiliserons un code de calcul sous MATLAB 6.5 dénommé ADVISOR développé par NREL " National Renewable Energy Laboratory " avec l'aide de plusieurs firmes internationales de l'automobile.

ADVISOR, ADvanced Vehicle SimulatOR, est un simulink de MATLAB; Il est conçu pour une analyse rapide et efficace des performances et comportements énergétiques des véhicules conventionnels et électriques ainsi que des véhicules hybrides .

ADVISOR donne aussi des simulations et analyses détaillées du comportement des différents composants du véhicule à étudier sur la base des contraintes environnementales de fonctionnement choisies par l'utilisateur.

Après exécution d'ADVISOR on peut bénéficier des résultats suivants :

- Estimation, et prévision de l'économie de carburant du véhicule ;
- Estimer l'utilisation de la réserve de carburant des véhicules conventionnels, hybrides et électriques a travers leurs parcours ;
- Comparer les différentes émissions de gaz des différents types de véhicules ;
- Connaître la consommation énergétique des véhicules.

Nous nous intéressons à la consommation du véhicule après cent kilomètres de parcours.

La première version d'ADVISOR a vu le jour en novembre 1994 pour aider à l'étude du propulseur du véhicule hybride de US DOE compagnie, puis plusieurs versions ont vu le jour et sont utilisés par Daimler Chrysler, Ford Motor Company, General Motors Corp, Delphi Automotive Systems, Visteon.

ADVISOR a été utilisé par TOYOTA et HONDA pour l'étude de leurs véhicules hybrides, et après comparaison avec des résultats expérimentaux, on a constaté un rapprochement remarquable entre les deux données, ce qui a donné encore plus de force au code de calcul pour ce qui concerne la fiabilité et l'excellente précision d'analyse du comportement de ce genre de voiture.

Ce qui nous manquait dans ce code de simulation, était le traitement des voitures à combustion interne à hydrogène, ADVISOR n'a pas dans sa base de données leurs caractéristiques, ce qui nous a poussé à utiliser une littérature très récente dans le domaine pour tirer les informations dont on avait besoin.

Les démarches d'utilisation d'ADVISOR sont les suivantes :



**Fig. 4.1** Page d'accueil d'ADVISOR.

En premier lieu ADVISOR présente les différents organismes qui ont collaborés à son développement, il propose aussi le choix du système d'unité avec lequel il va opérer, à savoir :

- 1- Système métrique.
- 2- Système américain.

Après détermination du système d'unités, on passe à la page suivante :

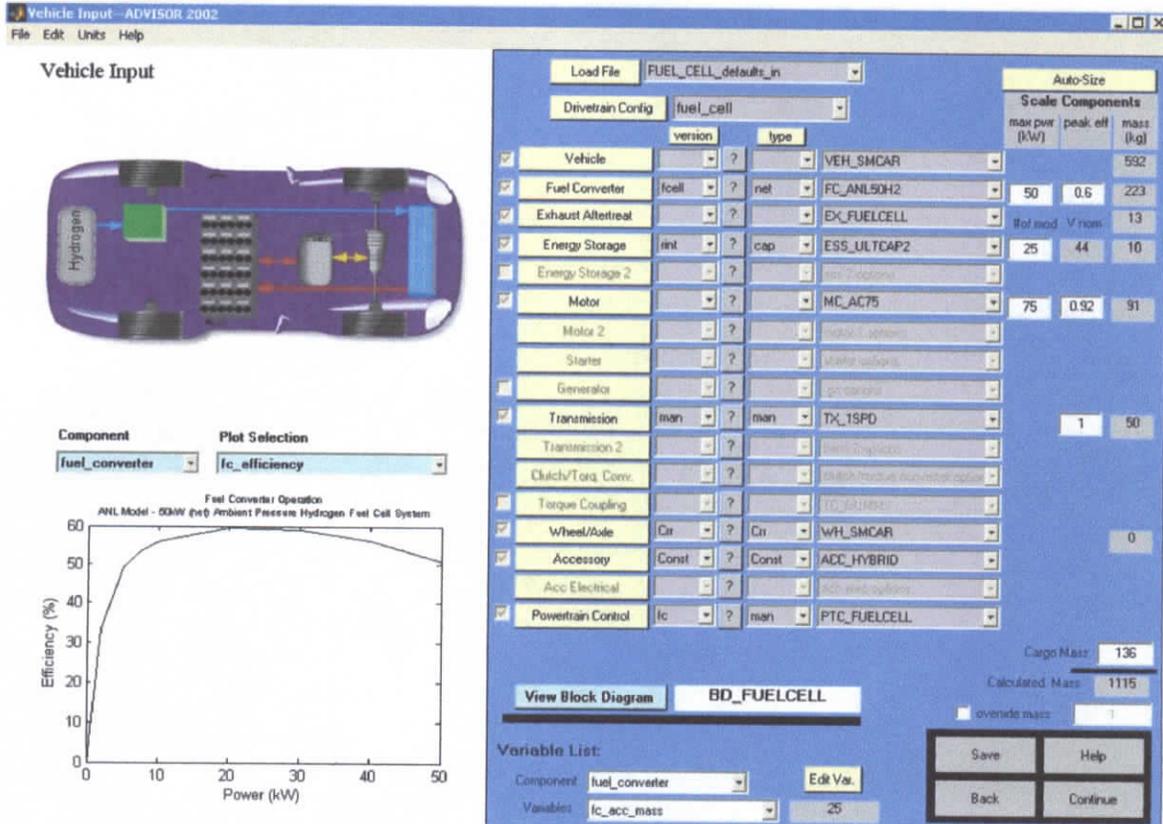


Fig. 4.2 Choix du type et des caractéristiques du véhicule à étudier.

A cette étape, l'opérateur a choix entre les différentes configurations de véhicules qu'ADVISOR propose :

- 1- Véhicule ordinaire.
- 2- Véhicule hybride parallèle.
- 3- Véhicule hybride série.
- 4- Véhicule tout électrique à batteries au plomb.
- 5- Véhicule auto-constitué (configuration personnalisée).

Après avoir choisi le type du véhicule à étudier, ADVISOR nous donne les différents paramètres :

- Poids du moteur.
- Poids total des différents organes de transmission.
- Poids total des batteries.
- Poids de la carcasse du véhicule.
- Nombre total des batteries utilisées.

- Types des batteries utilisées.
- Type des pneumatiques utilisés.
- Surface frontale du véhicule.
- Hauteur du centre de gravité de la voiture.
- Entre axes.
- Coefficient aérodynamique du véhicule.
- Chargement que peut supporter la voiture.
- Diamètre des roues.

Si on a une utilisation particulière, c'est à dire si on veut que le véhicule subit des tests particuliers on change les paramètres qui sont pris habituellement par défaut, à savoir :

- Durée du test.
- La pente maximale du parcours.
- La motorisation de la voiture.
- Les tests d'accélération.
- Les tests de pollution (qui n'est pas notre cas).
- Vitesse maximale autorisée.

The screenshot shows the 'Autosize Configuration Window' with the following sections:

- Autosize Method Selection:**
  - Autosize using Matlab
  - Autosize using VisualDOC
- Constraints:**
  - Grade (Grade Options button)
  - Acceleration (Accel Options button)
- Design Variables:**

Variable Name	Initial Value	Lower Bound	Upper Bound
<input checked="" type="checkbox"/> Fuel Converter (kW)	50	38	75
<input checked="" type="checkbox"/> ESS (# modules)	25	19	38
<input checked="" type="checkbox"/> Motor Size (kW)	75	56	112
<input type="checkbox"/> Low SOC [-]			
<input type="checkbox"/> High SOC [-]			
<input checked="" type="checkbox"/> Final Drive Ratio	=> min. top speed		144.8
- Objectives:**
  - Component Sizes (Minimize)
  - Vehicle Mass (Minimize)
  - City/Highway Combined Fuel Economy (Maximize)
- VisualDOC Optimization Parameters:**
  - Design Cycles: Min  Max
  - Optimization Method:  Feasible Directions  SLP  SQP
  - \*\* Response surface approximations method will be used.

Buttons at the bottom: RUN, DEFAULTS, CANCEL, HELP

**Fig. 4.3 Choix de la puissance de motorisation du véhicule.**

Test Conditions		
Basic Parameters		
	Units	Value
<input checked="" type="checkbox"/> Grade	%	6
<input checked="" type="checkbox"/> Speed	mph	55
<input checked="" type="checkbox"/> Duration	s	10
<input type="checkbox"/> Gear Number	-	1
Enable/Disable Systems		
<input type="radio"/> All Systems Enabled		
<input checked="" type="radio"/> Energy Storage Disabled		
<input type="radio"/> Fuel Converter Disabled		
<input type="checkbox"/> Inertia SFC	-	0.6
<input type="checkbox"/> Minimum SBC	-	0.4
Mass Parameters		
<input checked="" type="radio"/> Use Current Mass	kg	1115
<input type="radio"/> Override Vehicle Mass	kg	1115
<input type="radio"/> Add to Current Mass	kg	0
Solution Conditions		
<input type="checkbox"/> Grade Lower Bound	%	0
<input type="checkbox"/> Grade Upper Bound	%	10
<input type="checkbox"/> Grade Initial Step Size	%	1
<input type="checkbox"/> Speed Tolerance	mph	0.01
<input type="checkbox"/> Grade Tolerance	%	0.05
<input type="checkbox"/> Maximum Iterations	-	25
<input type="checkbox"/> Display Status	-	0

Buttons: OK, Cancel, Help, Defaults, Load PNGV

**Fig. 4.4 Détermination des conditions de calcul.**

Après détermination des paramètres, on obtient un premier résultat :

- 1- Durée du test.
- 2- Distance parcourue.
- 3- Vitesse moyenne.
- 4- Vitesse maximale
- 5- Accélération moyenne.
- 6- Décélération moyenne.
- 7- Accélération maximale.
- 8- Décélération maximale.

il nous donne aussi la possibilité de modifier quelques autres paramètres tels que :

- Tolérance des calculs
- Nombre d'itération maximum
- Pente de la route initiale.

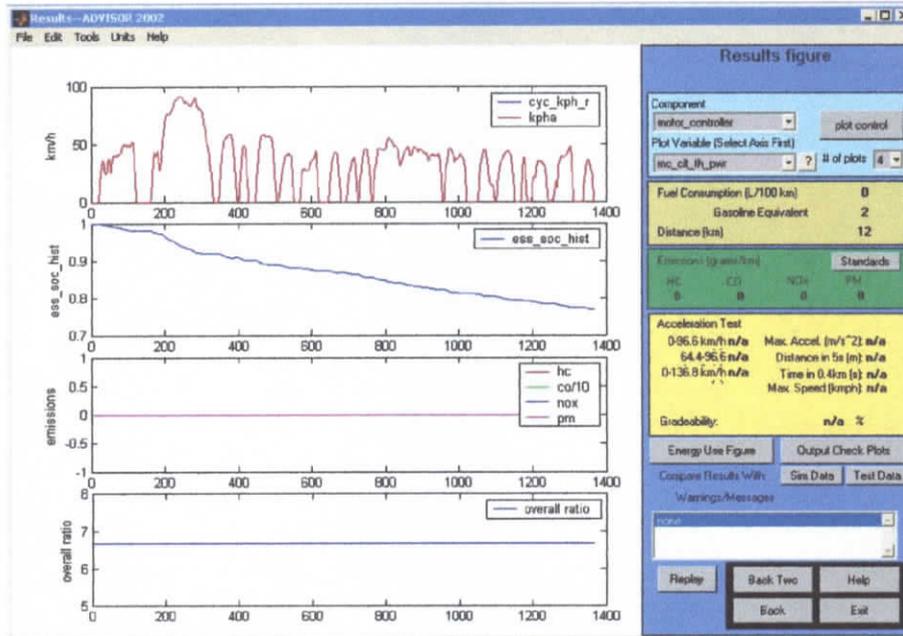


Fig. 4.5 Résultats des calculs.

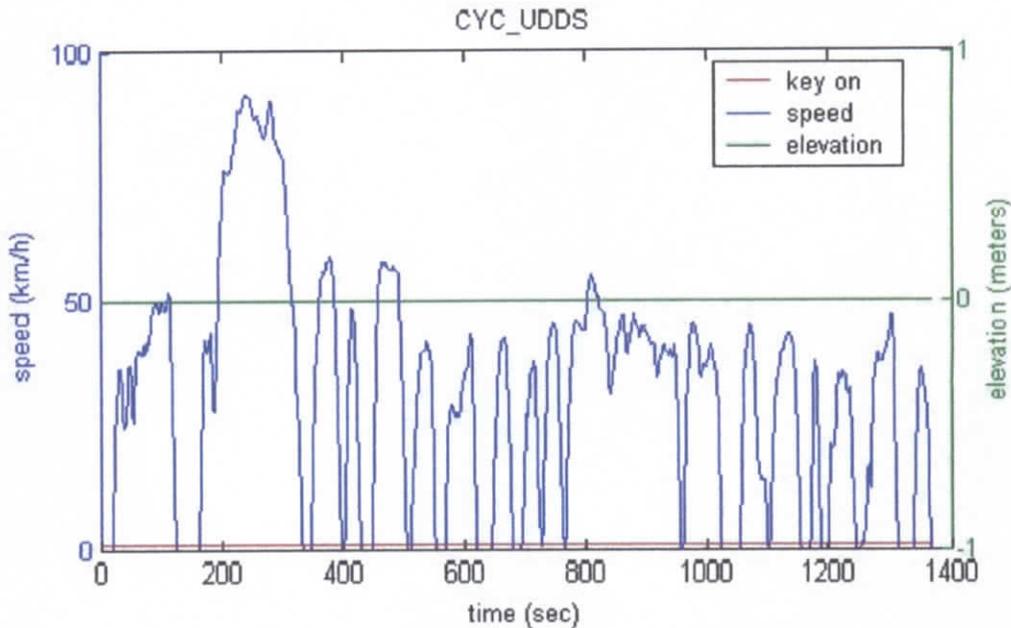
Puis finalement on obtient :

- 1- Comportement du véhicule durant la période du test.
- 2- Variation de la pente du parcours.
- 3- Consommation du véhicule en équivalent essence et au cent km.
- 4- Résultats des différents tests d'accélération.
- 5- Les émissions des différents gaz.

Ainsi, et après être passé par les étapes décrites précédemment, on aura toutes les caractéristiques du véhicule étudié.

## IV.2 Parcours des différents véhicules

Pour déterminer la consommation des véhicules électriques utilisant des batteries au plomb, et de ceux utilisant des piles à combustible, ADVISOR donne leur comportement dans une agglomération dans un intervalle de temps égale à 1600s. Pour faire une étude sur cent kilomètre, nous supposons que ce comportement se répète cycliquement jusqu'à atteindre une distance totale égale à celle fixée pour l'étude (fig.4.6).



**Fig.4.6** Graphe représentant le comportement du véhicule sur une période de 1400S.

### IV.3 Véhicule électrique à batteries au plomb

Le véhicule utilisé est caractérisé par un moteur électrique de 41Kw de puissance comme propulseur et des batteries au plomb fonctionnant à 1.2 V chacune comme source d'énergie électrique, et par une boîte à vitesse et un système d'engrenages pour la transmission de puissance.

#### IV.3.1 Moteur électrique

Le moteur est un modèle à courant continu sans balais et à aimant permanent, spécialement choisi pour son rendement élevé. La force du moteur est transmise à l'arbre moteur via le démultiplicateur final et le différentiel. Le moteur électrique est monté au-dessus de l'essieu avant, tandis que les accumulateurs sont montés sur l'essieu arrière pour assurer une distribution des masses équilibrée.

#### IV.3.2 Accumulateurs

Vingt-quatre accumulateurs au plomb sans entretien, régulés par valve. Ces accumulateurs se distinguent par l'aptitude au recyclage élevée de leurs composants : près de 98 % des matériaux utilisés pour leur construction sont recyclables.

#### IV.3.3 La boîte à vitesse

La boîte à vitesse est composée d'un seul rapport de transmission ce qui rend le véhicule démuné de pédale d'embrayage à l'intérieur de l'habitacle par conséquent une conduite plus simple et plus agréable.

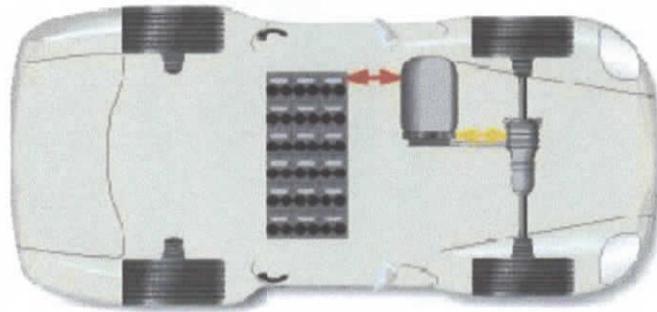


Fig. 4.7 Schématisation du véhicule électrique à batteries au

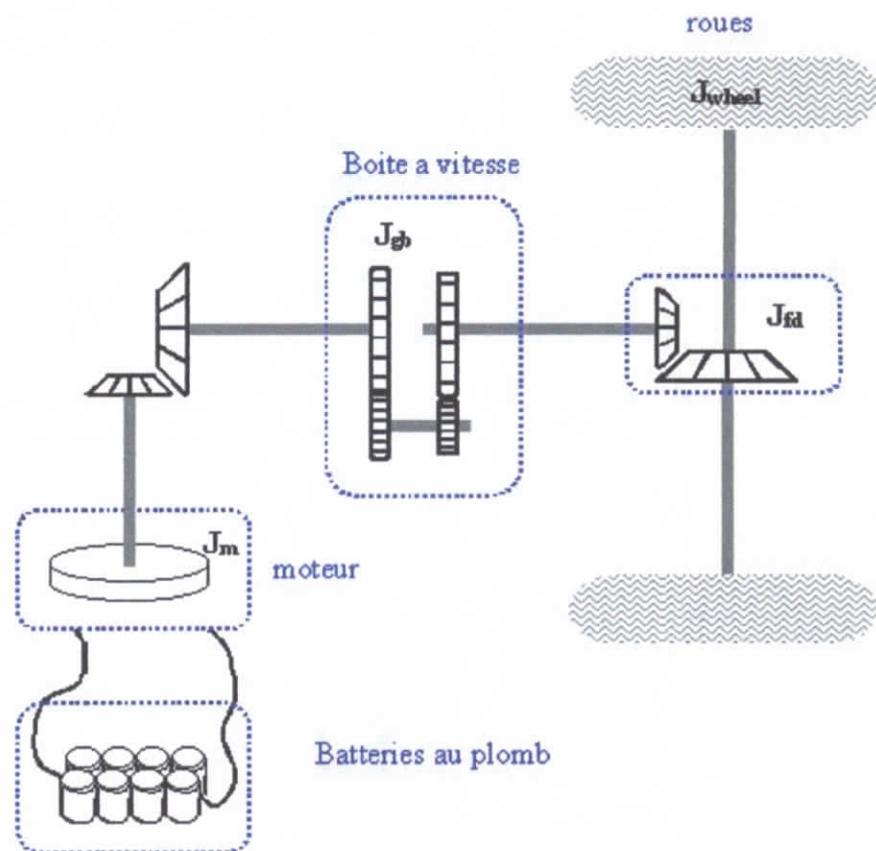


Fig. 4.8 Configuration du véhicule électrique utilisé.

Tableau 4.1: Caractéristiques du véhicule électrique à batteries aux plomb.

<i>Puissance du moteur</i>	75 Kw
Vitesse maximale du véhicule	110 Km / h
Poids total des différents organes de la transmission	50 kg
Poids de la carrosse du véhicule	592 Kg
Poids des piles	275 kg
Poids du moteur	91kg
Surface frontale du véhicule	2 m <sup>2</sup>
Hauteur du centre de gravité du véhicule par rapport au sol	0.5 m
Entre- axe du véhicule	2.6 m
Différence de potentielle de fonctionnement du moteur	0.92 V
Voltage nominal	308 V
Nombre de modules	25
Coefficient aérodynamique du véhicule	0.335
Chargement que peu supporter le véhicule	136 kg
Diamètre des roues	0.9 m

On fera une étude du véhicule sur une route horizontale ,puis sur une pente et enfin dans une ville référence (Alger), cette étude se fera en premier lieu sans charge puis en second lieu avec une charge portée équivalent a 136 Kg .

#### IV.4 Présentation du véhicule électrique à piles à combustibles

La configuration et composants du véhicule utilisant des piles a combustible sont les mêmes que ceux du véhicule électrique roulant avec des batteries au plomb, la seule différence réside au niveau de l'alimentation.

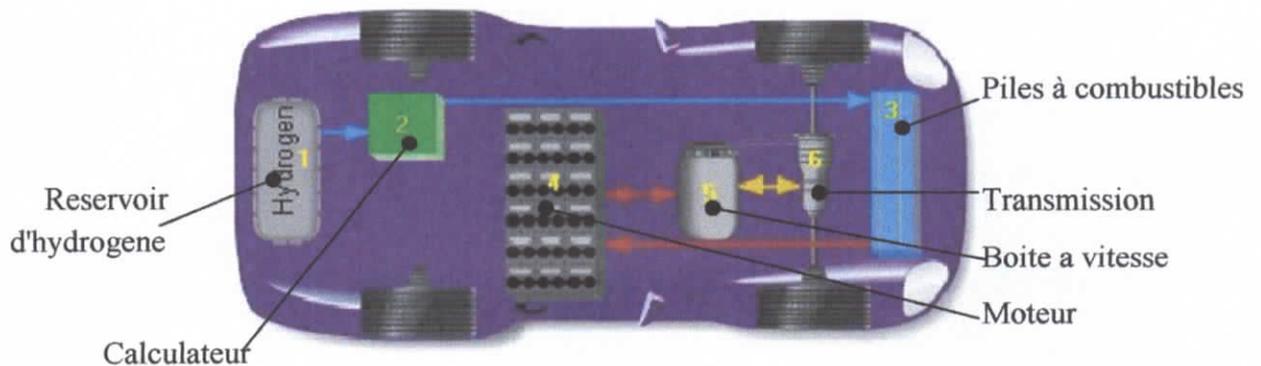


Fig. 4.9 Schématisation du véhicule à piles à combustible.

#### IV.4.1 Le réservoir d'hydrogène

C'est un réservoir d'hydrogène liquide, il a une capacité totale de 1kg de H<sub>2</sub> .

#### IV.4.2 Le calculateur

C'est un élément électronique qui gère l'utilisation du carburant en fonction de la demande d'énergie afin d'optimiser la puissance et gaz à effet de serre .

#### IV.4.3 Les piles à combustible

C'est le mode de conversion d'énergie pour le véhicule, le mode de fonctionnement est défini dans le chapitre précédent .

#### IV.4.4 Le moteur

c'est un moteur électrique du même type et caractéristiques que celui du véhicule électrique .

#### IV.4.5 La boîte à vitesse

c'est une boîte à vitesse du même type et caractéristiques que celle du véhicule électrique

#### IV.4.6 Le système de transmission

c'est un système de transmission du même type et caractéristiques que celui du véhicule électrique .

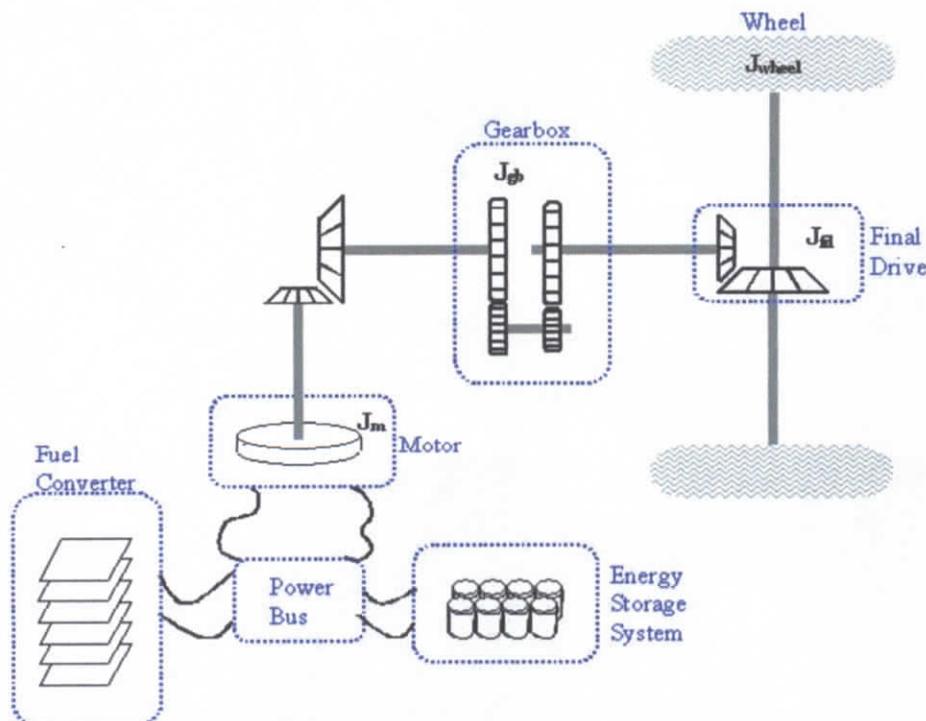


Fig. 4.10 Configuration du véhicule utilisant des piles à combustible.

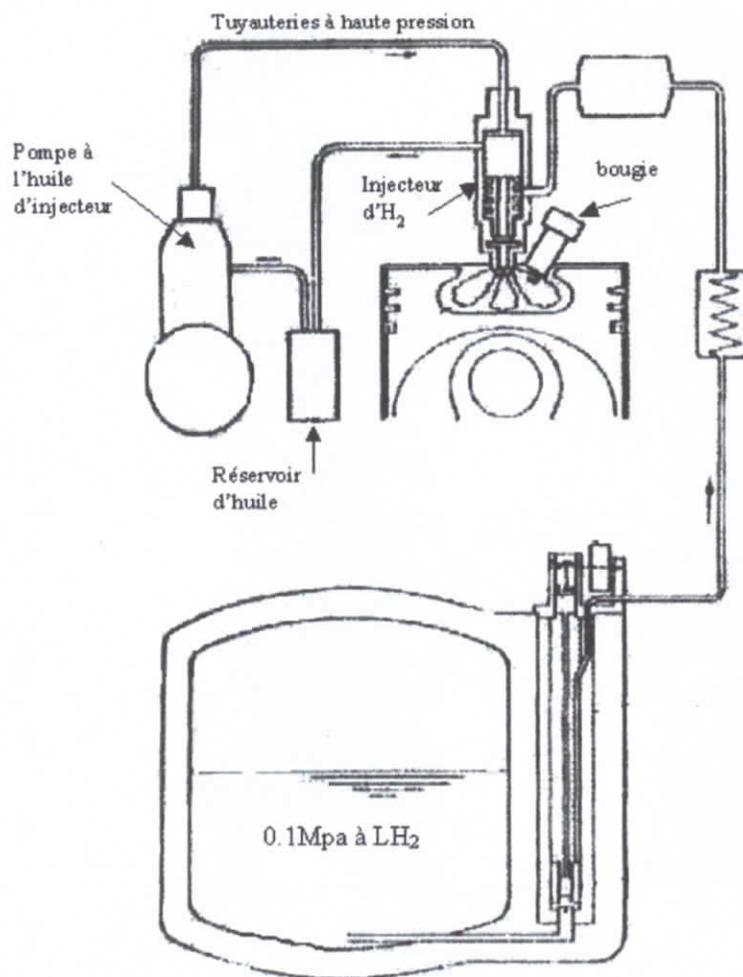
Tableau 4.2 : Les caractéristiques du véhicule à piles à combustible.

Puissance du moteur	75 Kw
Vitesse maximale du véhicule	110 Km / h
Poids total des différents organes de la transmission	50 kg
Poids de la carcasse du véhicule	592 Kg
Poids des piles	275 kg
Poids du moteur	75kg
Surface frontale du véhicule	2 m <sup>2</sup>
Hauteur du centre de gravité du véhicule par rapport au sol	0.5 m
Entre- axe du véhicule	2.6 m
Différence de potentielle de fonctionnement du moteur	0.92 V
Puissance maximale des piles	50kw
Rendement des pile	60%
Poids total des piles	91 kg
Voltage nominal	308 V
Nombre de batteries	25
Coefficient aérodynamique du véhicule	0.335
Chargement que peu supporter le véhicule	136 kg
Diamètre des roues	0.9 m

## IV.5 Présentation du véhicule a combustion interne à hydrogène

Ce type de véhicule a exactement le même principe de fonctionnement que les véhicules à combustion interne a quatre temps traditionnel mais avec des éléments de technologie de pointe et cela a cause du type de carburant utilisé et de ces caractéristiques chimiques très délicates a manipulé .

Le circuit général de la voiture est donné par le schéma suivant [25] :



**Fig. 4.11** Processus d'alimentation d'un M.C.I. à hydrogène.

L'hydrogène liquide est stocké dans un réservoir à pression atmosphérique et à basse pression, et à l'aide de pompe, il est dirigé vers l'injecteur qui le pulvérise en très fines gouttelettes dans la chambre à combustion. L'injecteur est actionné par un système hydraulique, utilisant de l'huile sous pression.

**N.B.** Les calculs sont considérés dans une densité de l'air équivalente à 1,2 kg/m<sup>3</sup>.

## IV.6 Résultats obtenus

Les consommations en équivalent essence super sur 100 km parcourus pour un véhicule utilisant des batteries au plomb selon les cas sont :

- Véhicule sans charge et sur horizontale : 1,7 litre
- Véhicule avec charge et sur horizontale : 2,0 litre
- Véhicule sans charge et sur pente de 10% : 1,9 litre

- Véhicule avec charge et sur pente de 10% : 2.2 litre

nous avons les caractéristiques suivantes de l'essence super :

- 1- La densité :  $\rho = 750 \text{ Kg} / \text{m}^3$  .
- 2- Le pouvoir calorifique inférieur : PCI = 44922 Kj / kg .
- 3- Le pouvoir calorifique supérieur : PCS = 48436 Kj / kg .

On peut calculer la quantité d'énergie E que dégage un litre d'essence super :

$$E = v * \rho * PCI$$

Avec : V = volume d'essence utilisé .

ce qui vaut en masse de batteries :

$$M = \frac{E}{e_{bat}} * m_{bat}$$

- e<sub>bat</sub> : Energie d'une batterie .
- m<sub>bat</sub> : Masse d'une batterie (5kg) .

Ce qui donne pour cent kilomètre parcourus :

Tableau 4.3 Résultats.

Volume d'essence super (l)	Nombre total de batteries	Poids total des batteries (kg)
1.7	23	115
2.0	27	135
1.9	26	130
2.2	29	145

### IV.6.1 Pile à combustible

Nous avons obtenu les besoins énergétiques du véhicule au 100 km était de 0.312 kg d'hydrogène.

Nous utiliserons des piles type PEMFC car elles sont caractérisées par un bon rendement à faible température.

Nous avons les caractéristiques suivantes :

- 0.07 Kg H<sub>2</sub> / Kg de métal
- 9.933 kj / kg
- 14.33 kj / l

### IV.6.2 Véhicule à combustion interne à hydrogène

Selon l'ouvrage utilisé [25] la consommation en carburant d'un véhicule à combustion interne à hydrogène est de l'ordre de 1Kg H<sub>2</sub>/100Km, et utilise une réserve embarquée de 2 à 3Kg.

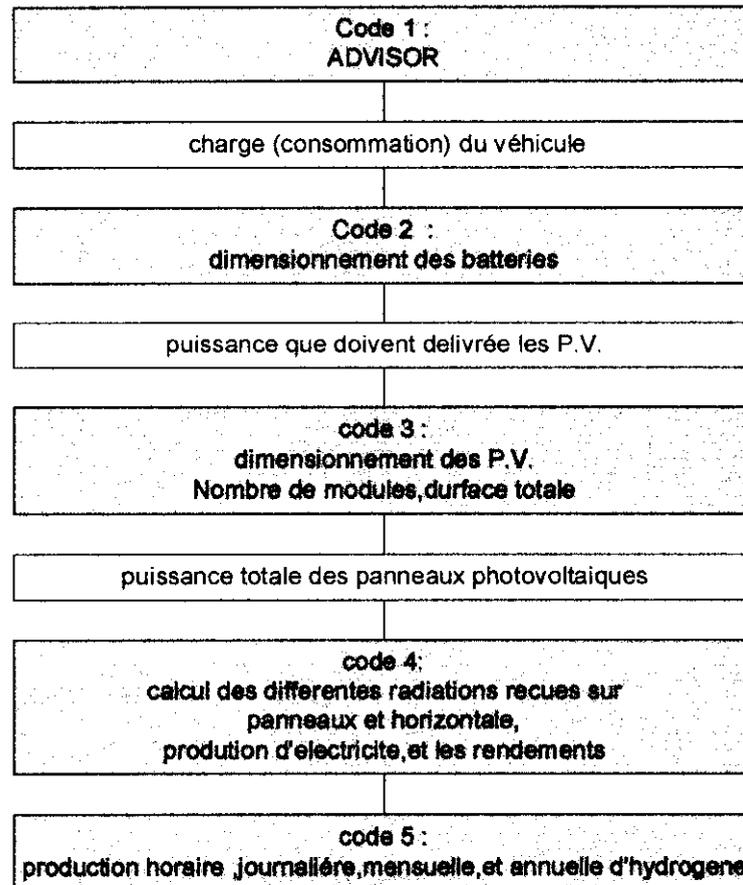
# CHAPITRE V

## *PROCEDURE ET METHODOLOGIE DE CALCULS*

## V.1 Introduction

Dans le présent chapitre, nous donnons les différentes démarches à suivre afin de mener à bien le dimensionnement du système de production d'hydrogène par électrolyse utilisant de l'électricité fournie par des cellules photovoltaïques.

L'organigramme suivant illustre les principales démarches :



**Fig. 5.1 Organigramme de dimensionnement de l'installation photovoltaïque.**

Nous commençons par calculer les demandes énergétiques d'un véhicule électrique en utilisant ADVISOR qui servira dans le dimensionnement de la capacité des batteries de stockage source d'énergie électrique du véhicule ainsi que dans les calculs du nombre de modules et la surface totale des panneaux photovoltaïques nécessaires pour assurer la recharge de l'énergie utile des batteries. Finalement, nous calculerons les grandeurs suivantes :

- La quantité de rayonnement reçue par jour, mois, année.
- La quantité d'énergie électrique produite par heure, jour, mois.

- Les rendements horaire, journalier, mensuel, annuel.

## V.2 Détermination de la charge

Pour dimensionner le système, nous commençons par déterminer la consommation totale journalière  $P_L$  en énergie d'un véhicule pour des besoins uni familiale, en utilisant ADVISOR qui nous donnera les différentes consommations d'énergie pour chaque types de véhicule utilisé.

## V.3 Dimensionnement des batteries

L'énergie requise par la voiture électrique, est une énergie utile, qui doit être stockée dans des batteries pour une utilisation ultérieure après recharge, dont leurs dimensionnement est le suivant [7]:

On commence par déterminer la capacité totale des batteries :

$$C = \frac{N_1 24 P_L}{U} \text{ [Ah]} \quad (5-1)$$

Avec :

$C$  : La capacité totale des batteries .

$N_1$  : Nombre de jour total d'utilisation des batteries sans recharge .

$P_L$  : Puissance délivrée par les panneaux .

$U$  : Différence de potentielle du système.

Puis, pour des raisons dues aux caractéristiques intrinsèques déjà vus des batteries; on calcule la capacité nominale :

$$C_N = \frac{C}{0.8} \quad (5-2)$$

$C_N$  : Capacité nominale .

0.8 : La capacité des batteries représente 80% de la capacité nominale .

Ensuite, on calcule la profondeur de décharge journalière des batteries :

$$del = \frac{80 * h^r}{N_1 * 24} \quad (5-3)$$

Avec :

$h''$  : Nombre d'heure par jour sans soleil.

La puissance générée par les panneaux photovoltaïques utilisés est donnée par :

$$P_G = P_L * \frac{N_1 * 24}{h'} \left\{ \frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \right\} \quad (5-4)$$

On peut également écrire la relation précédente sous la forme :

$$P_G * h' = P_L * 24 + \frac{U * C}{N_2} \quad (5-5)$$

Avec :

$P_G$  : La puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques quotidiennement.

$h'$  : Nombre d'heure d'ensoleillement par jour .

$N_2$  : Nombre de jours durant lesquelles les batteries doivent être rechargées après une décharge totale.

Tel que :

$$h' + h'' = 24 \quad (5-6)$$

Il faut respecter dans le dimensionnement une condition dite la condition de charge totale journalière des batteries, elle doit satisfaire la condition suivante :

$$\frac{24}{h'} \leq \frac{P_G}{P_L} \quad (5-7)$$

On calcule la puissance de charge en prenant le maximum entre les deux valeurs calculées :

$$P_G = \max \left\{ P_G = \frac{24 * P_L}{h'}, P_G = \frac{1}{h'} \left[ P_L * 24 + \frac{U * C}{N_2} \right] \right\} \quad (5-8)$$

Ainsi on aura calculé la capacité totale des batteries, sachant que les caractéristiques unitaires d'une batterie sont :

$C_{bat}$  : 35 Ah, capacité d'une batteries .

$U_{bat}$  = 12V, tension d'une batteries .

$Poids_{bat}$  = 5 kg, poids d'une batteries .

Pour déterminer le nombre de batteries utilisées ainsi que leurs poids total, on divise la puissance totale  $P_L$  sur la puissance d'une batterie qui nous donnera le nombre total des unités utilisées, puis on le multiplie par le poids d'une batterie pour avoir la masse totale de la réserve.

$$N_{batt} = \frac{P_L}{C_{bat} \cdot U_{bat}} \quad (5-9)$$

$$M_{batt} = N_{batt} \cdot 5 \quad (5-10)$$

## V.4 Calcul de la superficie des panneaux PV nécessaires

En utilisant les résultats des calculs précédents, on calcule la puissance requise par les panneaux photovoltaïques pour délivrer l'énergie nécessaire pour le bon fonctionnement de l'installation selon la démarche suivante [19]:

$$x_1 = \frac{\text{l'énergie journalière que doivent délivrer les panneaux}}{\text{irradiation sur les panneaux par jour et unité de surface}} \quad (5-11)$$

On surdimensionne de 20%, soit on multiplie ce résultat par un coefficient de sécurité  $cc=1.2$

$$x_2 = x_1 \cdot cc \quad (5-12)$$

Puis on divise par la puissance délivrée par un panneau et par jour :

$$N = \frac{x_2}{\text{la puissance d'un panneaux (75w dans notre cas)}} \quad (5-13)$$

75 : c'est la puissance d'un panneau photovoltaïque du model utilisé, disponible au C.D.E.R.

Ce qui donne finalement le nombre de panneaux nécessaire pour notre installation et cela en arrondissant à l'entier supérieur.

On calcule ensuite la surface totales des modules en multipliant le nombre de module par la surface unitaire :

$$S = N \cdot 0.62 \quad (5-14)$$

0.62 m<sup>2</sup> : Surface unitaire d'un panneau photovoltaïque.

## V.5 Calculs énergétiques

On calcule les flux d'ensoleillement ainsi que les caractéristiques des panneaux photovoltaïques utilisés pour déterminer [25]:

- L'énergie solaire mensuelle que reçoivent les panneaux.
- L'énergie solaire mensuelle sur une surface horizontale.
- L'énergie solaire annuelle transmise.

- L'énergie perdue mensuellement.
- L'énergie électrique produite par jour.
- L'énergie électrique mensuelle produite.
- Les rendements mensuels des panneaux.
- Le rendement annuel des panneaux.

Les calculs se déroulent comme suit :

En utilisant les équations citées ci dessus, nous allons réaliser un programme informatique qui va calculer les performances d'une cellule photovoltaïque pour un lieu donné, connaissant :

- $\phi$  : La latitude .
- $L_{loc}$  : La longitude .
- AC : la superficie des cellule (déterminée précédemment )
- $H_t$  : irradiations totale sur panneaux .
- $H_d$  : irradiations diffuses sur panneaux .

En premier lieu on commence par calculer l'équation du temps qui est donnée par :

$$E = 9.87 \sin(2\beta) - 7.53 \cos(\beta) - 1.5 \sin(\beta) \quad (5-15)$$

Avec :

$$\beta = \frac{360(N - 81)}{364} \quad (5-16)$$

Puis, on calcule le temps solaire vrai à partir de la formule :

$$TSV = T_{st} + E + \frac{1}{15}(L_{st} - L_{loc}) \quad (5-17)$$

Avec :

- $T_{st}$  : Temps standard ou officiel.
- $L_{st}$  : Longitude standard.
- $L_{loc}$  : Latitude du lieu.

Ce qui nous permet de calculer l'angle horaire correspondant à partir de l'équation :

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (5-18)$$

et la déclinaison à partir de l'équation :

$$\delta = 23.45 \sin\left[\frac{360}{365}(N + 284)\right] \quad (5-19)$$

On en déduit alors la hauteur solaire à partir de l'équation :

$$\sin(h) = \sin(\Phi) \cdot \sin(\delta) + \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \quad (5-20)$$

Chose qui va nous permettre de calculer l'angle d'incidence dans chacun des cas qui vont suivre.

### V.5.1 Panneaux fixes

Si les panneaux photovoltaïques sont fixes ( $S = \text{Cst}$ ), on calcule l'inclinaison optimale [11]:

La latitude du site	Inclinaison
0 - 15°	15°
15 - 25°	Même angle que la latitude
25 - 30	Ajouter 5° a la latitude
30 - 35°	Ajouter 10° a la latitude
35 - 40°	Ajouter 15° a la latitude
+ 40°	Ajouter 20° a la latitude

Puis l'azimut solaire avec :

$$A = a \sin\left\{\frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(h)}\right\} \quad (5-21)$$

Puis l'angle d'incidence :

$$\theta = a \cos[\cos(h) * \cos(A - \gamma) * \sin(s) + \sin(h) \cos(s)] \quad (5-22)$$

### V.5.2 Panneaux semi-asservis

Dans le cas de panneaux semi-asservis ou panneaux maison, on a un asservissement limité, c'est à dire que les panneaux ne changent de position qu'en augmentant ou diminuant l'angle d'inclinaison « S », et en gardant leurs azimut nul  $\gamma=0$ , l'angle d'incidence est donné par :

$$\theta = \text{arc cos}[\cos(h) * \cos(A) * \sin(s) + \sin(h) \cos(s)] \quad (5-23)$$

### V.5.3 Panneaux asservis

Dans le cas de panneaux photovoltaïques asservis on a une inclinaison optimale afin de capter un maximum de rayonnement et cela en maintenant l'angle d'incidence toujours nul, c'est à dire  $\theta = 0^\circ$ , ce qui donne pour le calcul de l'inclinaison :

$$S = \frac{\pi}{2} - h \quad (5-24)$$

Et l'azimuth des panneaux est donné par [5] :

$$\gamma = \arctg\left(\frac{\sin(\delta') \sin(\omega)}{\sin(\delta') \cos(\Phi') + \sin(\delta') \sin(\Phi') \cos(\omega)}\right) \quad (5-25)$$

avec :

$$\delta' = \frac{\pi}{2} - \delta$$

$$\Phi' = \frac{\pi}{2} - \phi$$

Finalement on calculera l'énergie solaire par unité de surface reçue par les panneaux pour les trois cas à partir de l'équation :

$$H_{t,s} = (H_t - H_d) \frac{\cos(\Theta)}{\sin(h)} + H_d \frac{1 + \cos(s)}{2} + H_t \frac{1 - \cos(s)}{2} \rho_g \quad (5-26)$$

Pour le calcul énergétique on utilise deux méthodes :

### V.5.4 Calcul énergétique, 1<sup>ère</sup> Méthode

On commence en premier lieu par calculer la transmission du rayonnement direct, diffus et réfléchi, en utilisant les angles d'incidences effectifs calculés par [11]:

$$\theta_d = 59.68 - 0.1388 * S + 0.001497 * S^2 \quad (5-27)$$

$$\theta_g = 90 - 0.5788 * S + 0.00269 * S^2 \quad (5-28)$$

avec :

S : L'inclinaison des panneaux photovoltaïques.

Puis le coefficient d'absorption pour les trois composantes à partir de l'équation :

$$\alpha(\beta) = 1 - \exp[-0.0255 - 6.683 \cos(\beta) + 5.947 \cos^2(\beta) - 2.48 \cos^3(\beta)] \quad (5-29)$$

Par la suite, on calcule l'énergie solaire transmise et arrivant sur les cellules:

$$q_t = A^*(\tau_b H_{b,s} + \tau_d H_{d,s} + \tau_g H_{g,s}) \quad (5-30)$$

et l'énergie absorbée par les cellules absorbée :

$$q_a = A^*(\alpha_b \tau_b H_{b,s} + \alpha_d \tau_d H_{d,s} + \alpha_g \tau_g H_{g,s}) \quad (5-31)$$

A ce stade il faut utiliser une double itération, en effet on se donne un  $T_c$  un  $T_{ge}$  et un  $T_{gi}$ , on calcule  $U_t$  et  $U_b$  de :

$$U_t = \left[ \frac{e_g}{k_g} + \frac{1}{h_w + h_{re}} \right]^{-1} \quad (5-32)$$

$$U_b = \left[ \frac{e_r}{k_r} + \frac{e_g}{k_g} + \frac{1}{h_w + h_{ri}} \right]^{-1} \quad (5-33)$$

après avoir calculé  $h_{re}$ ,  $h_{ri}$  et  $h_w$  de

$$h_{re} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot g \cdot (T_{ge}^2 + T_a^2)(T_{ge} + T_a) \quad (5-34)$$

$$h_{ri} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot g \cdot (T_{gi}^2 + T_a^2)(T_{gi} + T_a) \quad (5-35)$$

$$h_w = 5.7 + 3.8v \quad (5-36)$$

On recalcule  $T_{ge}$  et  $T_{gi}$  des équations pour le  $T_c$  initial par :

$$T_{ge} = T_c - \left( \frac{e_g}{k_g} \right) (T_c - T_{ge}) U_t \quad (5-37)$$

$$T_{gi} = T_c - U_b \cdot (T_c - T_a) \left( \left( \frac{e_g}{k_g} \right) + \left( \frac{e_r}{k_r} \right) \right) \quad (5-38)$$

qui comparés à ceux donnés, on arrête si l'écart est très faible sinon on adopte les nouvelles valeurs calculées, et on recommence en suivant la même procédure.

Une fois il y a convergence sur le calcul de  $T_{ge}$  et  $T_{gi}$  on calcule  $T_c$  :

$$T_c = (q_a + U_t \cdot T_a - \tau_r \cdot q_t \cdot (1 + \beta_v T_r)) (U_L + \beta_r \tau_r \cdot q_t)^{-1} \quad (5-39)$$

Comparé à la précédente valeur, on arrête si la différence est faible sinon on recommence les calculs.

La double itération étant terminée on calcule alors le coefficient de perte global de l'équation :

$$U_L = U_t + U_b \tag{5-40}$$

Le rendement :

$$\eta = \tau_r (1 - \beta_r (T_c - T_r)) \tag{5-41}$$

et l'énergie électrique produite :

$$E = q_a - (q_{t,l} + q_{b,l}) = q_a - U_l (T_c + T_a) \tag{5-42}$$

### V.5.5 Calcul énergétique, 2<sup>ème</sup> Méthode

En omettant les détails sur les explications du phénomène physique intervenant dans la conversion de la lumière en électricité, le schéma électrique équivalent à une cellule photovoltaïque est représenté par la figure 1. Ce circuit est constitué d'une source de courant et d'une diode montées en parallèles.

La source de courant délivre un courant  $I_{ph}$ , directement proportionnel à l'intensité de la lumière, la diode représente la jonction p-n de la cellule solaire.

L'équation (5-43) de la figure 5.1 est déduite directement à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{qV}{mkT}} - 1 \right) \tag{5-43}$$

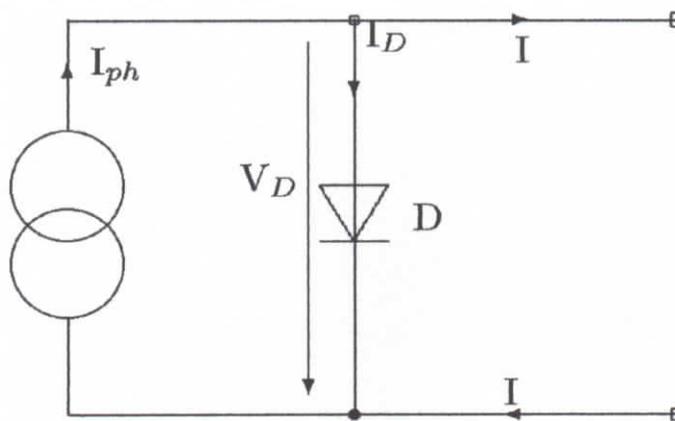


Fig. 5.2 Schéma électrique équivalent d'un panneau.

$I_{ph}$  : Photo courant

$I_D$  : Courant de diode

$I_s$  : Courant de saturation de la diode

$m$  : Facteur d'idéalité de la diode 1..5

$VT$  : Tension thermodynamique  $VT = \frac{kT}{q}$

$k$  : Constante de Boltzman =  $1.380658e-23$  JK<sup>-1</sup>

$q$  : Charge d'un électron =  $1.60217733e-19$  As

$T$  : Température absolue .

Pour trouver les caractéristiques de référence des panneaux photovoltaïques  $I_{ph}$ ,  $I_s$ ,  $m$ , nous devons trouver trois équations pour obtenir un système qui en le résolvant nous déterminons la valeur des inconnues recherchées.

La première équation est déduite en écrivant l'équation caractéristique du circuit électrique des panneaux photovoltaïques pour un état de court-circuit, c'est à dire la différence de potentielle nulle, ce qui donne :

$$I_{CC} - I(V = 0) = 0 \quad (5-44)$$

avec :

$I_{CC}$  : courant de court circuit .

ce qui donne la première équation :

$$I_{CC} - I_{phr} = 0 \quad (5-45)$$

La deuxième équation est déduite en écrivant l'équation caractéristique du circuit électrique des panneaux photovoltaïques pour un état de circuit ouvert, c'est à dire le courant est nulle, ce qui donne :

$$V_{oc} - V(I = 0) = 0 \quad (5-46)$$

avec :

$V_{oc}$  : tension de circuit ouvert.

Ce qui nous donne a partir de l'équation (5-43) l'expression de la tension en circuit ouvert :

$$V_{oc} = \ln \left\{ \frac{I_{phr} + I_{Sr}}{I_{Sr}} \right\} VT_r . m_r \quad (5-47)$$

de là on obtient la deuxième équation de notre système :

$$V_{oc} - \ln \left\{ \frac{I_{phr} + I_{Sr}}{I_{Sr}} \right\} VT_r m_r = 0 \quad (5-48)$$

Finalemment, la troisième équation est écrite pour un état de puissance maximale du système ce qui nous donne à partir de l'équation caractéristique du circuit électrique des panneaux photovoltaïques :

$$I_{mp} - I(V_{mp}) = 0 \quad (5-49)$$

Avec :

$I_{mp}$  : courant de puissance maximale .

$V_{mp}$  : tension de puissance maximale .

On sait que la puissance est le produit de la tension par le courant :

$$P = U \cdot I \quad (5-50)$$

Donc, pour trouver l'expression de la puissance de notre système, multiplions l'équation donnant l'expression du courant du circuit électrique caractérisant les panneaux photovoltaïques par la tension du circuit, ce qui donne :

$$P = V \cdot \left[ I_{phr} - I_{Sr} \left( e^{\frac{qV}{m_r k T_r}} - 1 \right) \right] \quad (5-51)$$

Pour trouver la tension optimale, qui donne la puissance maximale, résolvons l'équation suivante :

$$\frac{\partial P}{\partial V} = 0 \quad (5-52)$$

Ce qui nous permet d'écrire après développement mathématiques l'expression de la tension à puissance maximale :

$$V_{mp} = VT_r m_r \cdot \left\{ \text{lambertW} \left( \frac{(I_{phr} + I_{Sr}) \cdot e}{I_{Sr}} \right) - 1 \right\} \quad (5-53)$$

tel que :

LambertW(x) est la fonction W de Lambert, définie par :  $W(x) * e^{W(x)} = x$

Si on injecte la valeur de la tension de puissance maximale dans l'expression régissant le circuit électrique des panneaux photovoltaïques, nous obtiendrons l'expression du courant à puissance maximale :

$$I_{mp} = I_{phr} - I_{Sr} \cdot \left\{ e^{\left[ \frac{V_{mp}}{VT_r \cdot m_r} \right]} - 1 \right\} \quad (5-54)$$

Ce qui nous donne la troisième et dernière équation de notre système algébrique :

$$I_{mp} - I_{phr} + I_{Sr} \cdot \left\{ e^{\left[ \frac{V_{mp}}{VT_r \cdot m_r} \right]} - 1 \right\} = 0 \quad (5-55)$$

Pour la puissance maximale il suffit de faire le produit du courant et de la tension maximums

$$P_{\max} = \left\{ I_{phr} - I_{Sr} \cdot \left[ e^{\left( \left\{ \text{lambertW} \left( \frac{(I_{phr} + I_{Sr}) \cdot e}{I_{Sr}} \right) - 1 \right\} \right)} - 1 \right] \right\} \cdot m_r \cdot VT_r \cdot \left\{ \text{lambertW} \left( \frac{(I_{phr} + I_{Sr}) \cdot e}{I_{Sr}} \right) - 1 \right\} \quad (5-56)$$

Ainsi nous avons notre système d'équations, qui s'écrit finalement sous la forme :

$$\begin{cases} \text{eq 1 } I_{cc} - I_{phr} = 0 \\ \text{eq 2 } V_{oc} - \ln \left\{ \frac{I_{phr} + I_{Sr}}{I_{Sr}} \right\} \cdot VT_r \cdot m_r = 0 \\ \text{eq 3 } I_{mp} - I_{phr} + I_{Sr} \cdot \left\{ e^{\left[ \frac{V_{mp}}{VT_r \cdot m_r} \right]} - 1 \right\} = 0 \end{cases}$$

Pour la résolution du système nous procédons comme suit :

De la première équation, on tire la valeur de  $I_{ph}$  :

$$I_{ph} = I_{cc}$$

de la deuxième équation, on a l'expression en fonction du module de  $I_S$  :

$$I_S = \frac{-I_{mp} + I_{cc}}{e^{\left[ \frac{V_{mp}}{VT \cdot m} \right]} - 1}$$

de la troisième équation, et après avoir injecter l'expression de  $I_S$  on trouve après développement mathématiques :

$$m = \frac{V_{mp}}{\ln \left( \frac{\text{Rootof} \left\{ -Z V_{mp} - V_{oc} \cdot \ln \left[ \frac{-e^{-Z} I_{mp} + e^{-Z} I_{cc} + I_{mp}}{I_{cc}} \right] \right\} I_{mp} + e^{-Z} I_{cc} + I_{mp}}{-e^{-Z} I_{mp} + e^{-Z} I_{cc} + I_{mp}} \right) V_T}$$

et finalement l'expression de  $I_s$  :

$$I_s = \frac{-I_{mp} + I_{cc}}{e^{\frac{V_{mp}}{V_T} \left( \frac{\text{Rootof} \left\{ -Z V_{mp} - V_{oc} \cdot \ln \left[ \frac{-e^{-Z} I_{mp} + e^{-Z} I_{cc} + I_{mp}}{I_{cc}} \right] \right\} I_{mp} + e^{-Z} I_{cc} + I_{mp}}{-e^{-Z} I_{mp} + e^{-Z} I_{cc} + I_{mp}} \right) - 1}}$$

Calculons maintenant les paramètres de référence :

les données prélevées directement de la plaque signalétique des panneaux photovoltaïques sont les suivants :

$$I_{cc} = 4.8 \text{ A}$$

$$V_{oc} = \frac{21}{36} \text{ V}$$

$$I_{mp} = 4.4 \text{ A}$$

$$V_{mp} = \frac{17}{36} \text{ V}$$

$$VT = \frac{1.38065 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{1.6022 \cdot 10^{-19}}$$

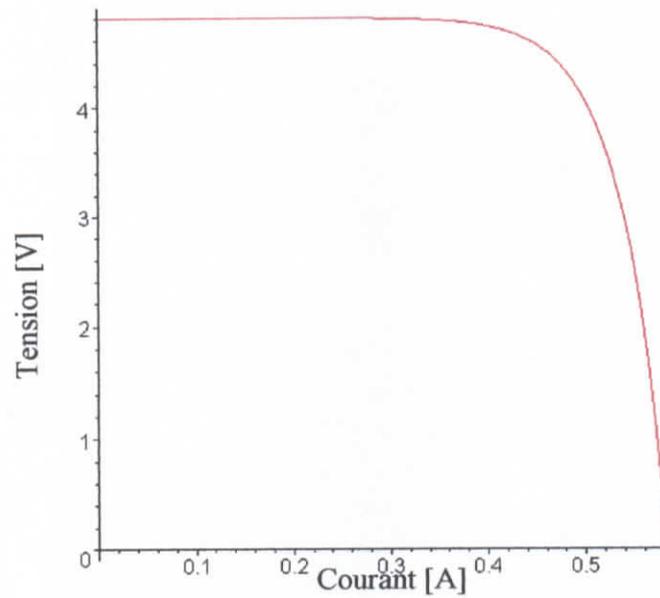
On obtient après calcul les grandeurs de références suivantes:

$$m = 1.7412792708676248150$$

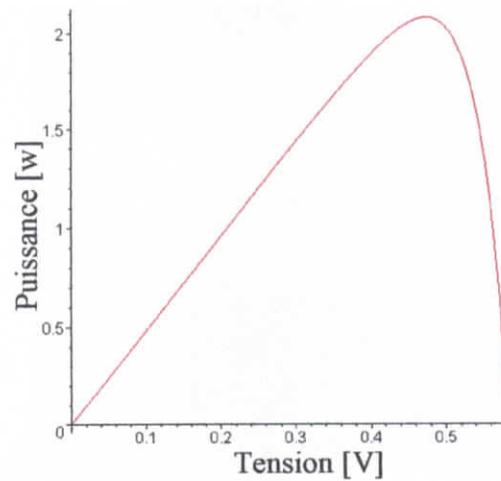
$$I_s = 0.000010365608314588783592 \text{ A}$$

$$I_{ph} = 4.8 \text{ A}$$

A partir de ces valeurs nous traçons les courbes caractéristiques des panneaux photovoltaïques utilisés :



**Fig. 5.3 Variation de la tension en fonction du courant.**



**Fig. 5.4 Variation de la puissance en fonction de la tension.**

Nous calculons les paramètres instantanés en déterminant d'abord la température des cellules photovoltaïques [7] :

$$T = T_{\text{ambiante}} + \Delta T + 273 \quad (5-59)$$

Tel que :

$$\Delta T = a_3 \cdot Irr$$

$$a_3 = \{2.96 \cdot (7 - v) + 12.8\} \cdot 10^{-3} \quad (5-60)$$

$v$  : la vitesse du vent.

Puis on calcule  $m$  :

$$m = m_{ref} \frac{T}{T_{ref}} \quad (5-61)$$

tels que :

$m_{ref}$  : module de référence 1.74

$T_{ref}$  : température de référence 293 k .

Puis on calcule la tension thermodynamique :

$$VT = \frac{kT}{q} \quad (5-62)$$

puis on calcule le courant des photovoltaïques :

$$I_{ph} = C_1 \cdot Irr (1 + 0.001(T - T_{ref})) \quad (5-63)$$

avec :

$$C_1 = \frac{I_{ph_{ref}}}{Irr_{ref}} \quad (5-64)$$

tels que :

$I_{ph_{ref}}$  : 4.8 A

$Irr_{ref}$  : 1000 kwh/m<sup>2</sup>

Puis on calcule le courant de court circuit :

$$I_s = C_0 \cdot T^3 \exp\left(\frac{-E_g}{m \cdot VT}\right) \quad (5-65)$$

avec :

$$C_0 = \frac{I_{s_{ref}}}{T_{ref}^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{m_{ref} \cdot VT_{ref}}\right)}$$

Puis finalement la puissance maximale d'un module photovoltaïque :

$$P_{\max} = \frac{I_{ph} \cdot VT \cdot m \cdot [\text{lambertW}(\frac{I_{ph} \cdot e^2}{I_s}) - 1]^2 \cdot 36}{\text{lambertW}(\frac{I_{ph} \cdot e^2}{I_s}) \cdot 0.63} \quad (5-66)$$

36 : Le nombre des cellules dans un module photovoltaïque.

0.63 : Surface d'un module en m<sup>2</sup>.

Puis on calcul le rendement instantané des panneaux photovoltaïques :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{H_t} \quad (5-67)$$

Pour calculer le rendement horaire :

$$\eta_h = \frac{\sum_{i=1}^{3600} P_{\max, i}}{\sum_{i=1}^{3600} H_{t, i}} \quad (5-68)$$

$P_{\max, i}$  : La puissance maximale instantanée .

$H_{t, i}$  : Irradiation totale instantanées sur les panneaux .

## V.6 Calcul du débit d'hydrogène produit

Calculons d'abord la tension réversible d'une cellule de l'électrolyseur par la formule donnée dans le chapitre « électrolyseur » [21] :

$$U_{rev} = \frac{\Delta G}{z \cdot F} \quad (5-69)$$

Tel que :

z: 2, Nombre d'électrons transmis par réaction .

F : 96485 C.mol<sup>-1</sup> .

$\Delta G$  : Variation de l'énergie de Gibbs, elle est donnée par [15] :

$$\Delta G = \Delta G^\circ - RT \ln\left(\frac{P^\circ}{P}\right) \quad (5-70)$$

$\Delta G^\circ$  : Gibbs standard 273.2 kJ/mol

T : Température ambiante.

$P^\circ$  : Pression de référence 1 bar.

P : Pression ambiante.

R : Constante des gaz parfait .

Puis nous utiliserons la formule donnée par l'auteur pour la détermination de la tension d'une cellule :

$$U = U_{rev} + \frac{r}{A}I + s.\ln\left(\frac{t}{A}I + 1\right) \quad (5-71)$$

Tel que :

$$r = r_1 + r_2 I'$$

$$t = t_1 + \frac{t_2}{T} + \frac{t_3}{T^2}$$

avec :

I : Le courant qui traverse une cellule.

A : Surface de l'électrode 0.25 m<sup>2</sup>.

T : Température de l'électrolyseur.

$$r_1 : 8.05.10^{-5} \Omega m^2$$

$$r_2 : -2.5.10^{-7} \Omega m^2 C^{\circ-1}$$

$$t_1 : -1.002 A^{-1} m^2$$

$$t_2 : 8.424 A^{-1} m^2 C^{\circ}$$

$$t_3 : 247.3 A^{-1} m^2 C^{\circ 2}$$

Pour trouver la valeur du courant qui traverse une cellule de l'électrolyseur, multiplions les deux membres de l'égalité de l'équation de la tension par le courant I pour avoir l'expression de la puissance:

$$P_{elec} = IU_{rev} + \frac{r}{A}I^2 + I.s.\ln\left(\frac{t}{A}I + 1\right) \quad (5-72)$$

Tel que :

$P_{elec}$  : La puissance de l'électrolyseur.

s : 0.185 V

Nous supposons que la puissance transmise a l'électrolyseur est égale a 93% de la puissance produite par les panneaux photovoltaïques.

Nous calculons la puissance d'une cellule d'électrolyseur comme suit :

$$P = \frac{P_{\max} \cdot 0.93}{N_c \cdot N_e} \quad (5-73)$$

$P_{\max}$  : Puissance produite par les panneaux photovoltaïques .

$N_c$  : 21, Nombre de cellules dans un électrolyseur .

$N_e$  : Nombre d'électrolyseur en marche .

Ensuite nous écrivons l'expression du courant, qui est :

$$I = \frac{1}{U_{rev}} \cdot \left\{ P + \frac{r}{A} I^2 + I \cdot s \cdot \ln\left(\frac{I}{A} I + 1\right) \right\} \quad (5-74)$$

C'est une équation non linéaire dont la résolution nécessite l'utilisation d'une méthode numérique qui dans notre cas on utilise la méthode du point fixe [12].

Puis on calcule le débit d'hydrogène produit par :

$$\dot{n}_{H_2} = \eta_F \frac{n_e I}{z \cdot F} \quad [\text{mol} / \text{s}] \quad (5-75)$$

Tel que :

$$\eta_F = \frac{\left\{ \frac{I}{A} \right\}^2}{f_1 + \left\{ \frac{I}{A} \right\}^2} f_2 \quad (5-76)$$

$$f_1 = 15000 \text{ A}^2 \cdot \text{m}^2$$

$$f_2 = 0.990$$

Ainsi on aura déterminé la totalité des paramètres de l'installation d'hydrogène .

Les résultats obtenus après exécution du code de calcul pour les différents cas figures de disposition des panneaux photovoltaïques et en utilisant chacune des méthodes précédemment citées sont donnés ci dessous :

## V.7 Résultats

On a fait les calculs pour un véhicule électrique roulant avec des piles au plomb .

ADVISOR , nous donne la charge journalière et qui vaut a 18333.34 kWh .

Pour que les batteries puissent donner cette quantité d'énergie , les P.V. doivent fournir une

puissance égale a 19.12 Kwh .

- Les panneaux photovoltaïques sont de type FIXE .
- La latitude du lieu égale a 45.5 .
- La longitude du lieu égale a 73 .
- Fuseau horaire du lieu 5 .
- Inclinaison  $70^{\circ}$  .
- Azimut des panneaux  $0^{\circ}$  .

On a :

- La surface des panneaux qu'il faut utiliser :  $183 \text{ m}^2$  .

$$m = \frac{V_{mp}}{\ln \left( \frac{-e \left[ \text{Rootof} \left\{ Z V_{mp} V_{oc} \ln \left[ \frac{-e^{-Z} I_{mp} + e^{-Z} I_{cc} + I_{mp}}{I_{cc}} \right] \right\}}{I_{mp} + e} \right) + I_{cc} + I_{mp}}{I_{cc}} \right) V_T$$

et finalement l'expression de  $I_s$  :

$$I_s = \frac{-I_{mp} + I_{cc}}{e \left[ \frac{V_T}{\ln \left( \frac{-e \left[ \text{Rootof} \left\{ Z V_{mp} V_{oc} \ln \left[ \frac{-e^{-Z} I_{mp} + e^{-Z} I_{cc} + I_{mp}}{I_{cc}} \right] \right\}}{I_{mp} + e} \right) + I_{cc} + I_{mp}}{I_{cc}} \right) + 1 \right]}$$

Calculons maintenant les paramètres de référence :

les données prélevées directement de la plaque signalétique des panneaux photovoltaïques sont les suivants :

$$I_{cc} = 4.8 \text{ A}$$

$$V_{oc} = \frac{21}{36} \text{ V}$$

$$I_{mp} = 4.4 \text{ A}$$

$$V_{mp} = \frac{17}{36} \text{ V}$$

$$VT = \frac{1.38065 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{1.6022 \cdot 10^{-19}}$$

On obtient après calcul les grandeurs de références suivantes:

$$m = 1.7412792708676248150$$

$$I_s = 0.000010365608314588783592 \text{ A}$$

$$I_{ph} = 4.8 \text{ A}$$

A partir de ces valeurs nous traçons les courbes caractéristiques des panneaux photovoltaïques utilisés :

Nous calculons la puissance d'une cellule d'électrolyseur comme suit :

$$P = \frac{P_{\max} \cdot 0.93}{N_c \cdot N_e} \quad (5-73)$$

$P_{\max}$  : Puissance produite par les panneaux photovoltaïques .

$N_c$  : 21, Nombre de cellules dans un électrolyseur .

$N_e$  : Nombre d'électrolyseur en marche .

Ensuite nous écrivons l'expression du courant, qui est :

$$I = \frac{1}{U_{rev}} \cdot \left\{ P + \frac{r}{A} I^2 + I \cdot s \cdot \ln\left(\frac{t}{A} I + 1\right) \right\} \quad (5-74)$$

C'est une équation non linéaire dont la résolution nécessite l'utilisation d'une méthode numérique qui dans notre cas on utilise la méthode du point fixe [12].

Puis on calcule le débit d'hydrogène produit par :

$$n_{H_2} = \eta_r \frac{n_c I}{z \cdot F} \quad [\text{mol / s}] \quad (5-75)$$

Tel que :

$$\eta_r = \frac{\left\{ \frac{I}{A} \right\}^2}{f_1 + \left\{ \frac{I}{A} \right\}^2} f_2 \quad (5-76)$$

$$f_1 = 15000 \text{ A}^2 \cdot \text{m}^2$$

$$f_2 = 0.990 .$$

Ainsi on aura déterminer la totalité des paramètres de l'installation d'hydrogène .

Les résultats obtenus après exécution du code de calcul pour les différents cas figures de disposition des panneaux photovoltaïques et en utilisant chacune des méthodes précédemment citées sont donnés ci dessous :

## V.7 Résultats

On a fait les calculs pour un véhicule électrique roulant avec des piles au plomb .

ADVISOR ,nous donne la charge journalière et qui vaut a 18333.34 kWh .

Pour que les batteries puissent donner cette quantité d'énergie ,les P.V. doivent fournir une

puissance égale a 19.12 Kwh .

- Les panneaux photovoltaïques sont de type FIXE .
- La latitude du lieu égale a 45.5 .
- La longitude du lieu égale a 73 .
- Fuseau horaire du lieu 5 .
- Inclinaison  $70^{\circ}$  .
- Azimut des panneaux  $0^{\circ}$  .

On a :

- La surface des panneaux qu'il faut utiliser :  $183 \text{ m}^2$ .

# CHAPITRE VI

## *RESULTATS ET DISCUSSIONS*

Dans le présent chapitre nous allons donner les résultats obtenus après exécution du code, nous avons fait les calculs pour le site de Bouzareah – Alger avec des données de rayonnement et des températures des années entre 1987 et 1991.

Nous déterminerons la quantité d'énergie électrique horaire, quotidienne, mensuelle, annuelle produites, nous calculerons aussi les rendements horaires, journaliers, mensuel et annuel ainsi que les débits d'hydrogène produit et cela pour les deux méthodes utilisées thermique et électrique et pour chaque configuration des panneaux fixes, semi-asservis, totalement asservis.

## VI.1 Les irradiances

Nous présentons ci dessous la variation des irradiances totale et diffuse et de la température ambiante moyennes des journées typiques des mois de l'année entre 1987 et 1991:

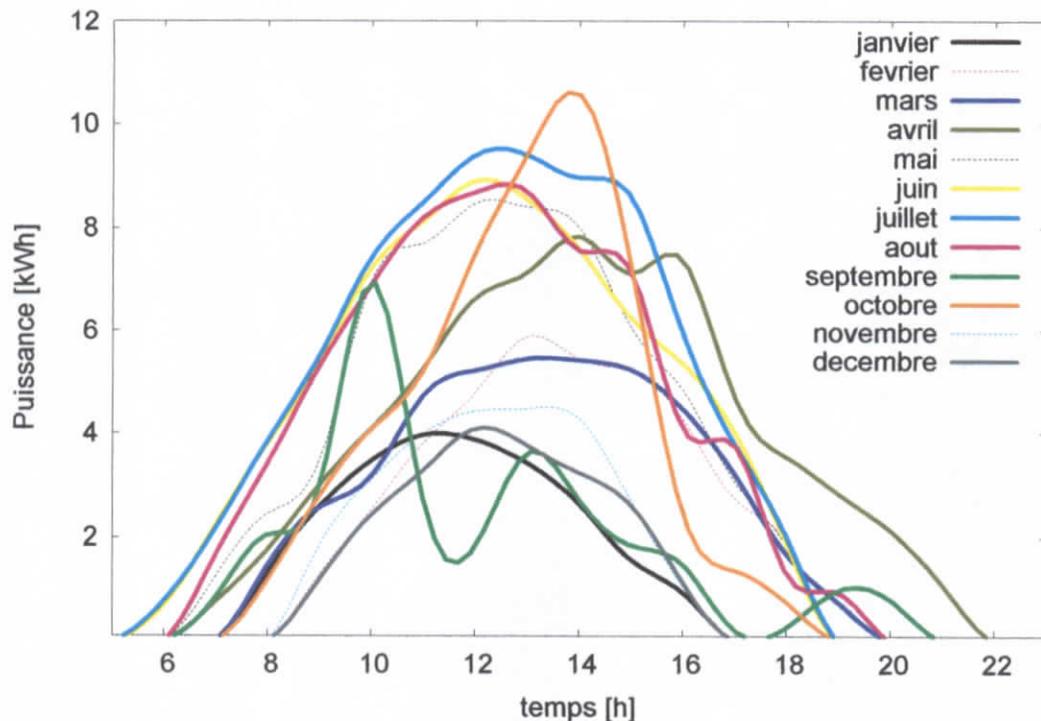
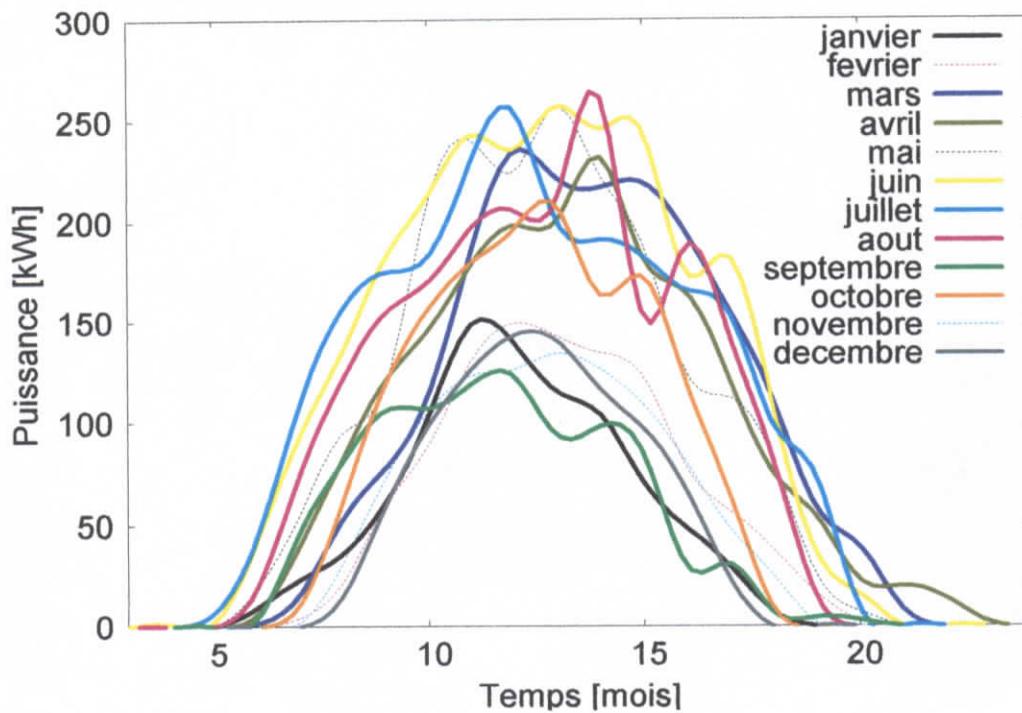


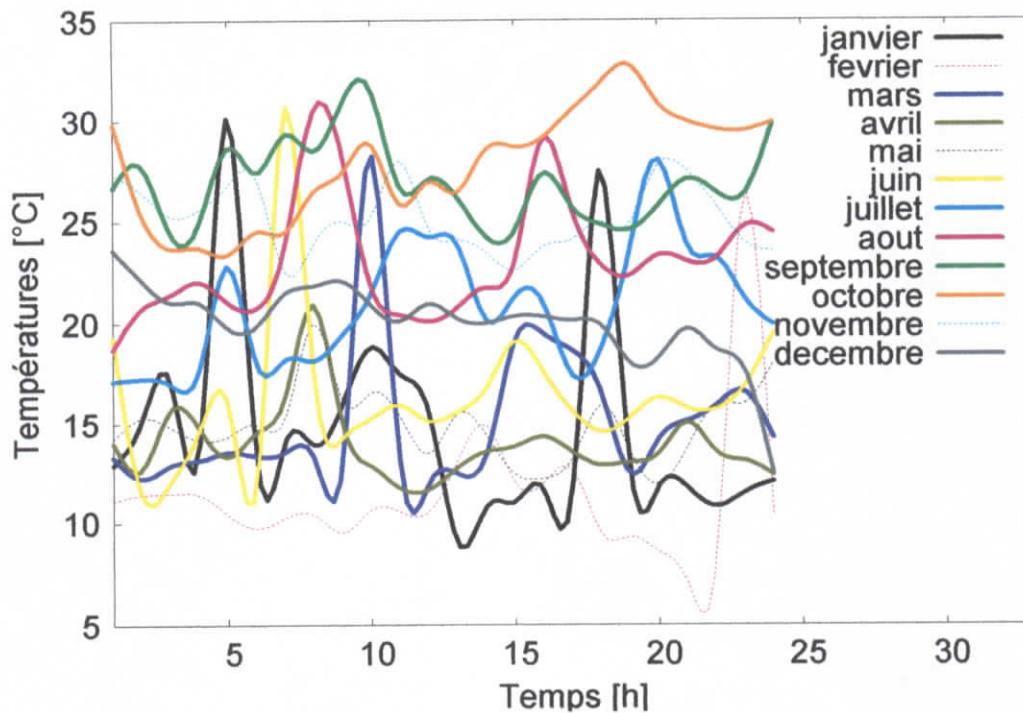
Fig.6.1 Variation du flux global.



**Fig.6.2 Variation du flux direct.**

Nous remarquons que les irradiances directes et diffuses les plus fortes sont en mois mai, juin, juillet, et août. Nous remarquons aussi que la valeur instantanée maximale est en mois d'octobre pour les irradiances diffuses et au mois d'août pour les irradiances totales.

Nous remarquons que les irradiances les plus faibles sont notées en mois de septembre, novembre, décembre, janvier, février avec pour les deux cas une valeur minimale en septembre.



**Fig.6.3 Variation de la température annuelle à Alger.**

Nous remarquons que les mois les plus froids sont janvier, février, mars, novembre, décembre avec un pique de 33°C en mois d'octobre et les mois les plus chauds sont juin, juillet, août, septembre, octobre avec un pique de 9°C en mois de janvier.

## VI.2 Méthode thermique

Nous présentons ci dessous la variation des rendements horaires et mensuels ainsi que la production électrique horaire en utilisant une première méthode de dimensionnement pour les trois cas d'étude suivant :

- Panneaux photovoltaïques fixes.
- Panneaux photovoltaïques semi-asservis.
- Panneaux photovoltaïques totalement asservis.

Le programme nous a donné une superficie des panneaux égale à 183.33 m<sup>2</sup> pour les panneaux fixes et 88.83 m<sup>2</sup> pour les configurations semi et totalement asservis.

### VI.2.1 Les rendements horaires

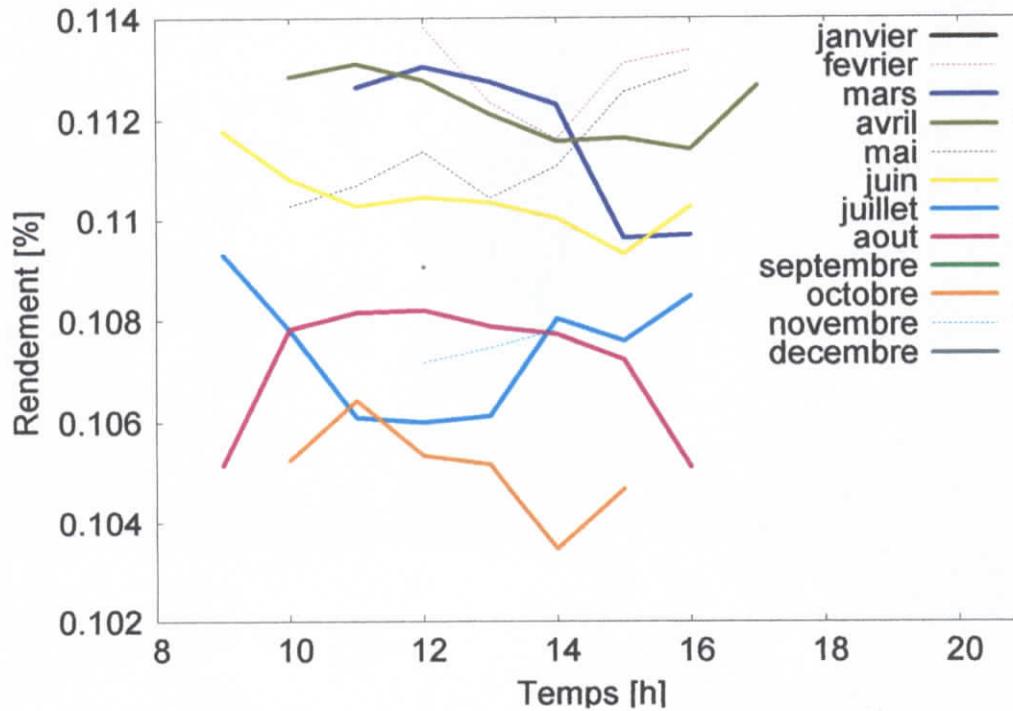


Fig.6.4 Variation du rendement horaire des panneaux fixes.

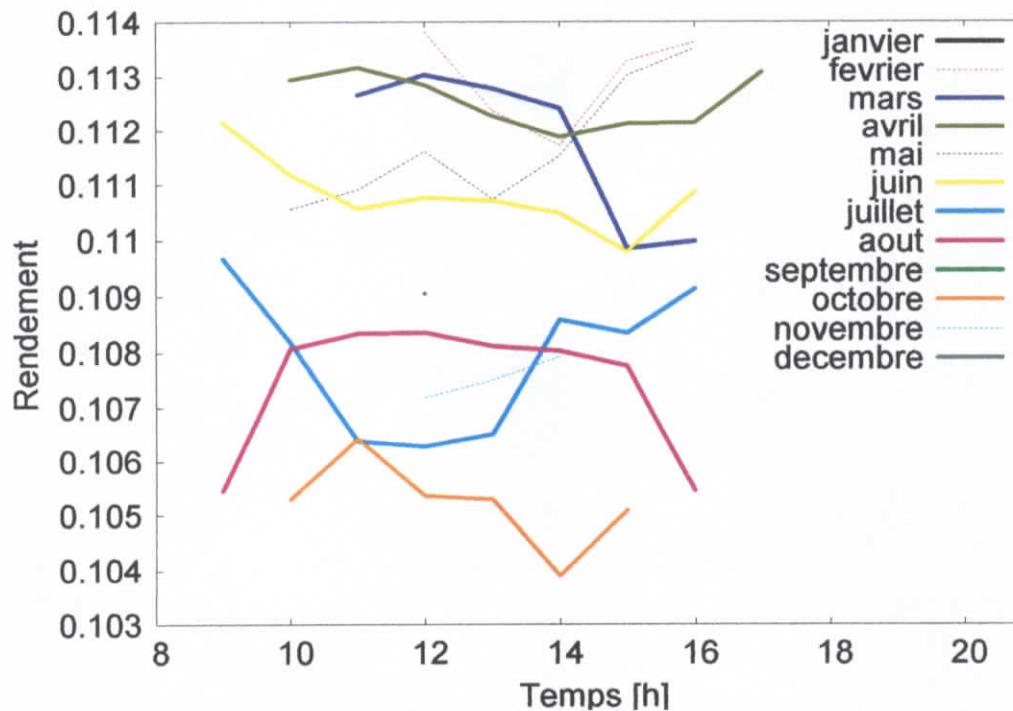
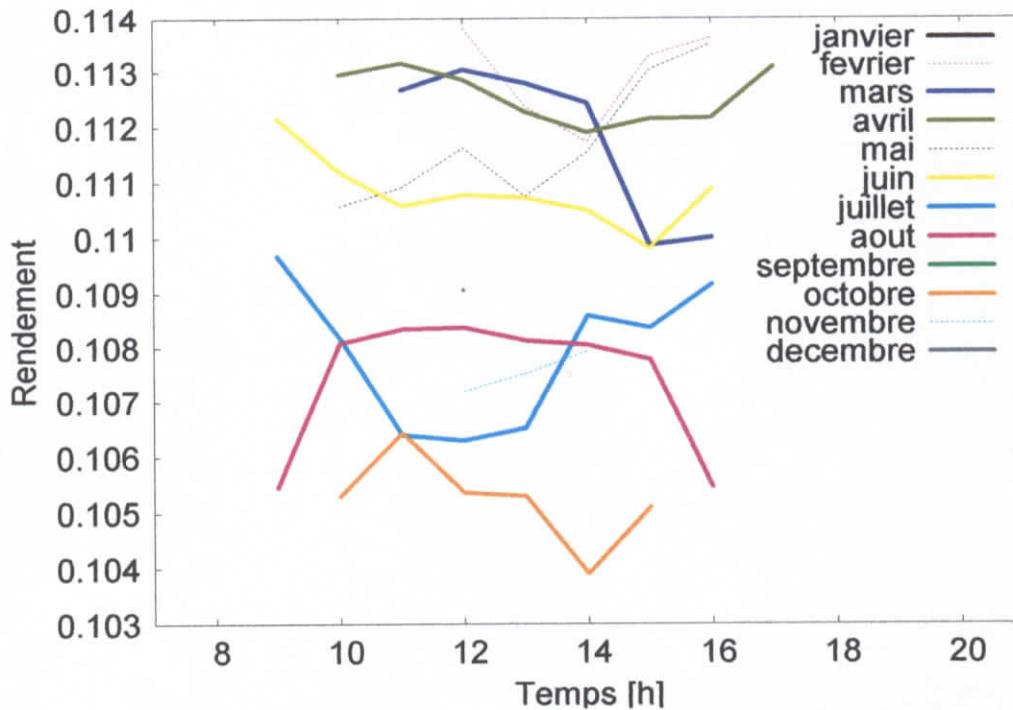


Fig.6.5 Variation du rendement horaire des panneaux semi asservis.



**Fig.6.6 Variation du rendement horaire des panneaux totalement asservis.**

Nous remarquons que pour les trois cas les rendements horaires des mois de janvier, septembre sont nuls et cela est due à la valeur seuil des irradiances qui n'est pas atteinte pour donner une bonne fiabilité de la méthode de calcul utilisée.

Nous remarquons aussi que c'est en février qu'on observe le rendement horaire le plus important et cela à cause d'un compromis irradiances - températures adéquat pour un bon fonctionnement des cellules photovoltaïques, contrairement au mois d'octobre qui a le rendement horaire le plus faible à cause de ses températures moyennes qui sont relativement hautes et des irradiances qui sont relativement moins importantes.

### VI.2.2 Production électrique

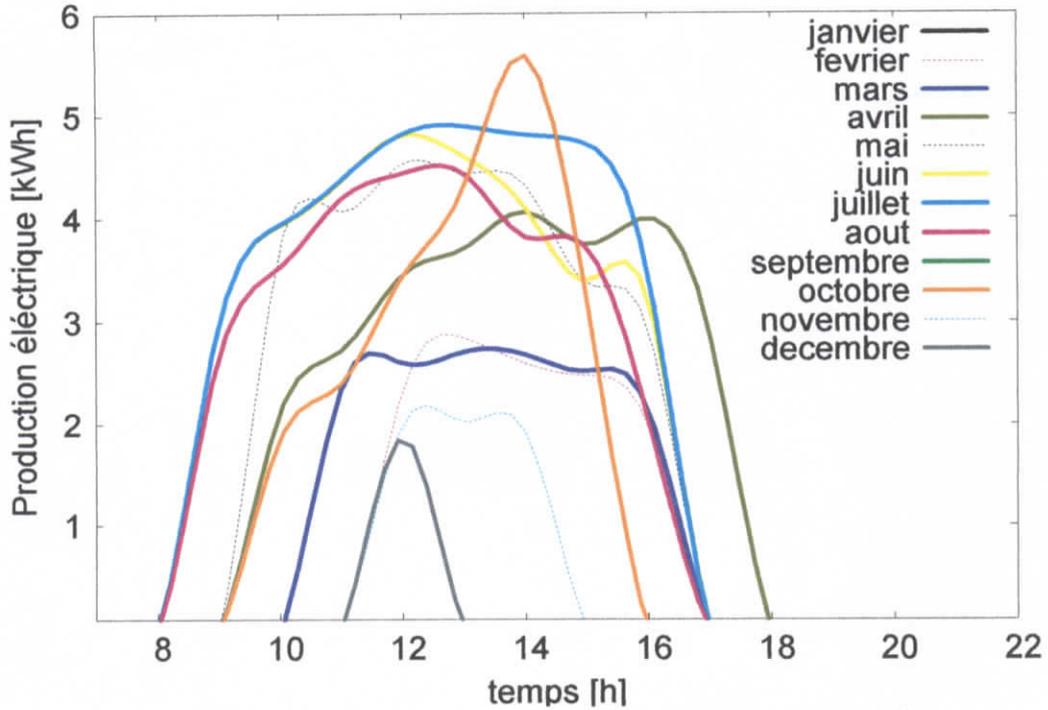


Fig.6.7 Variation de la production électrique des panneaux fixes.

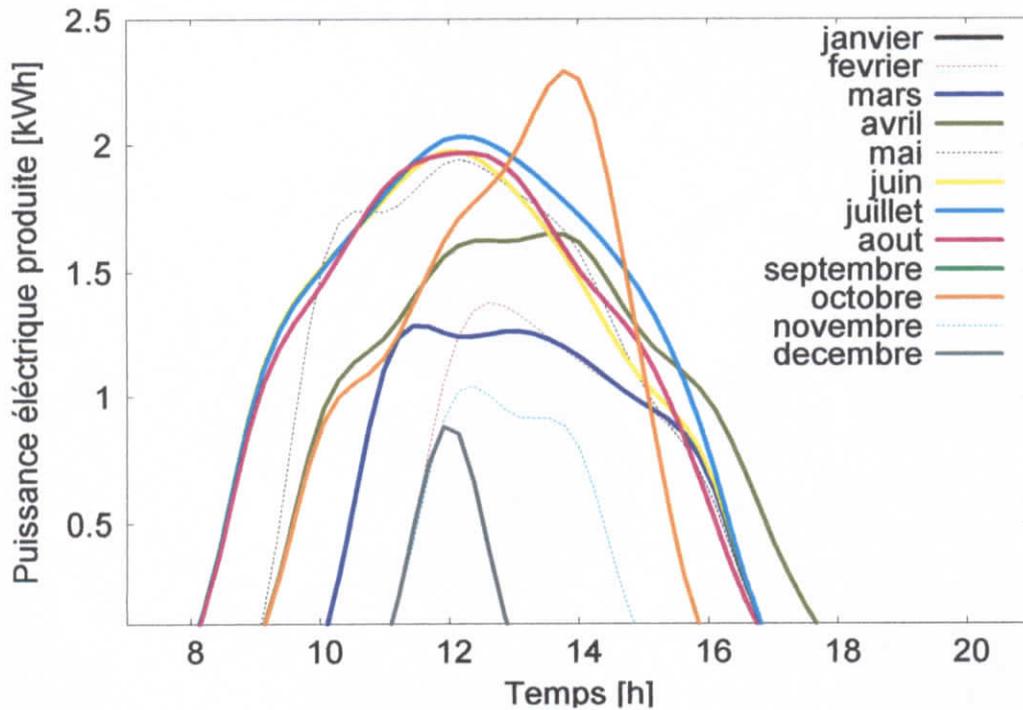


Fig.6.8 Variation de la production électrique des panneaux semi-asservi.

Nous constatons que pour les mois dont les rendements sont nuls qu'ils n'ont pas de production électrique pour la même raison que pour les rendements.

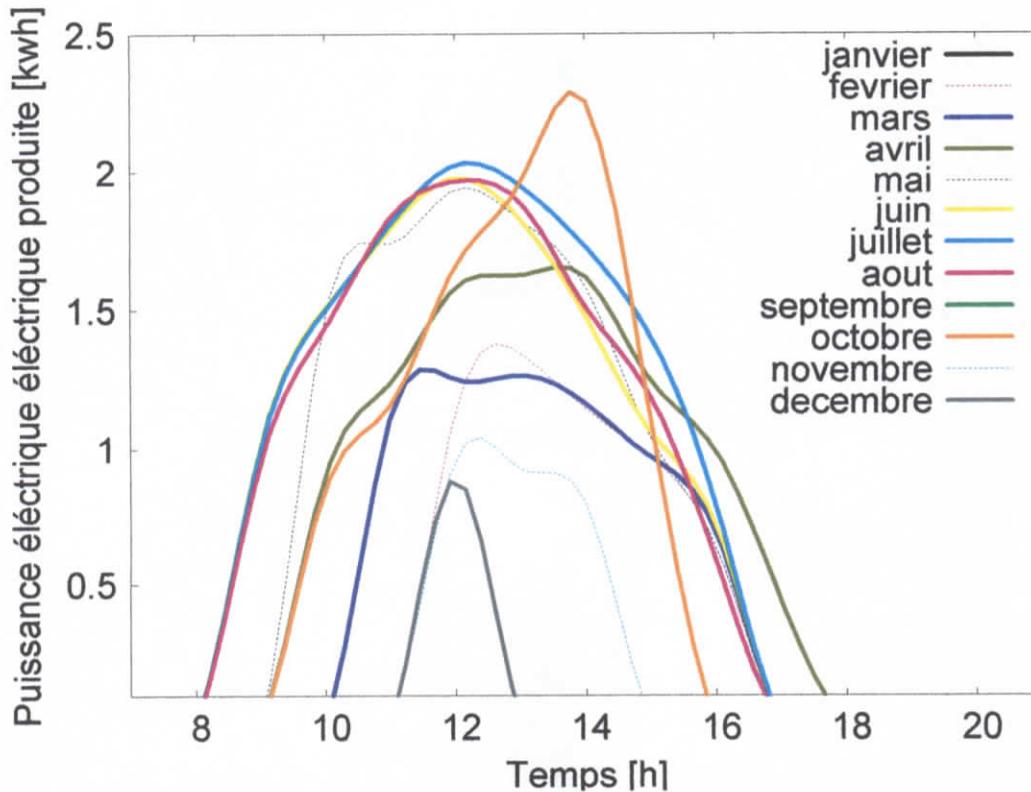


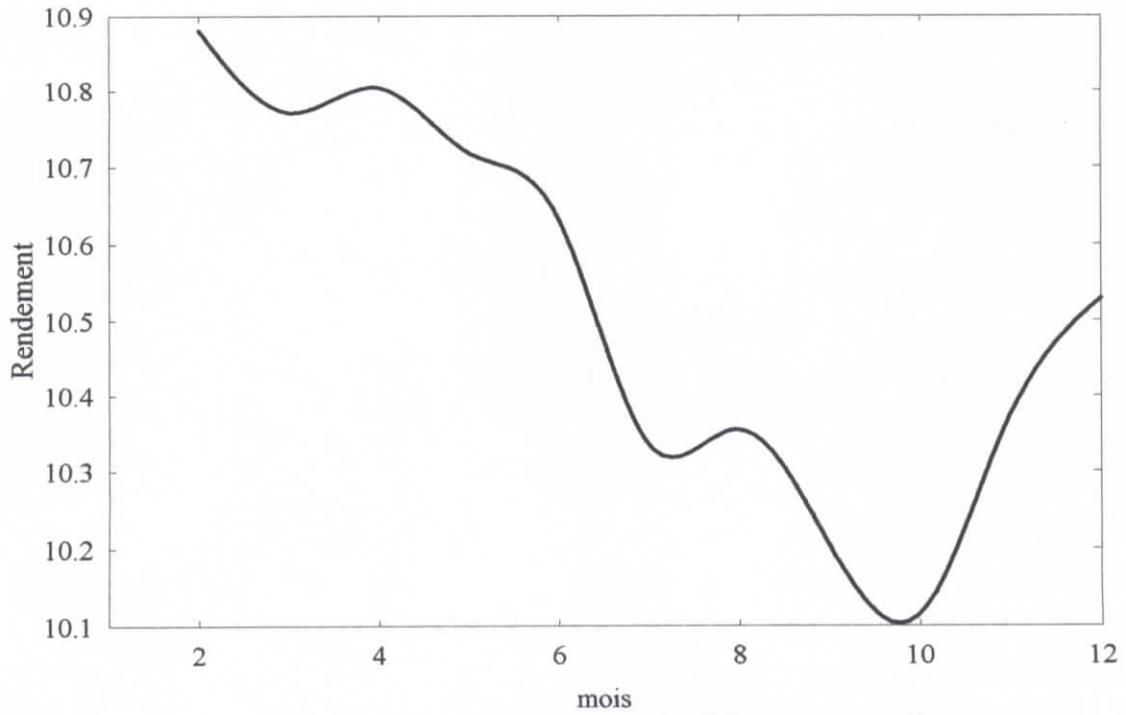
Fig. 6.9 Variation de la production électrique des panneaux totalement asservis.

Nous remarquons que pour les mois de mai, juin, juillet, et août la production électrique est la plus importante et cela est dû aux fortes irradiances globale et diffuse.

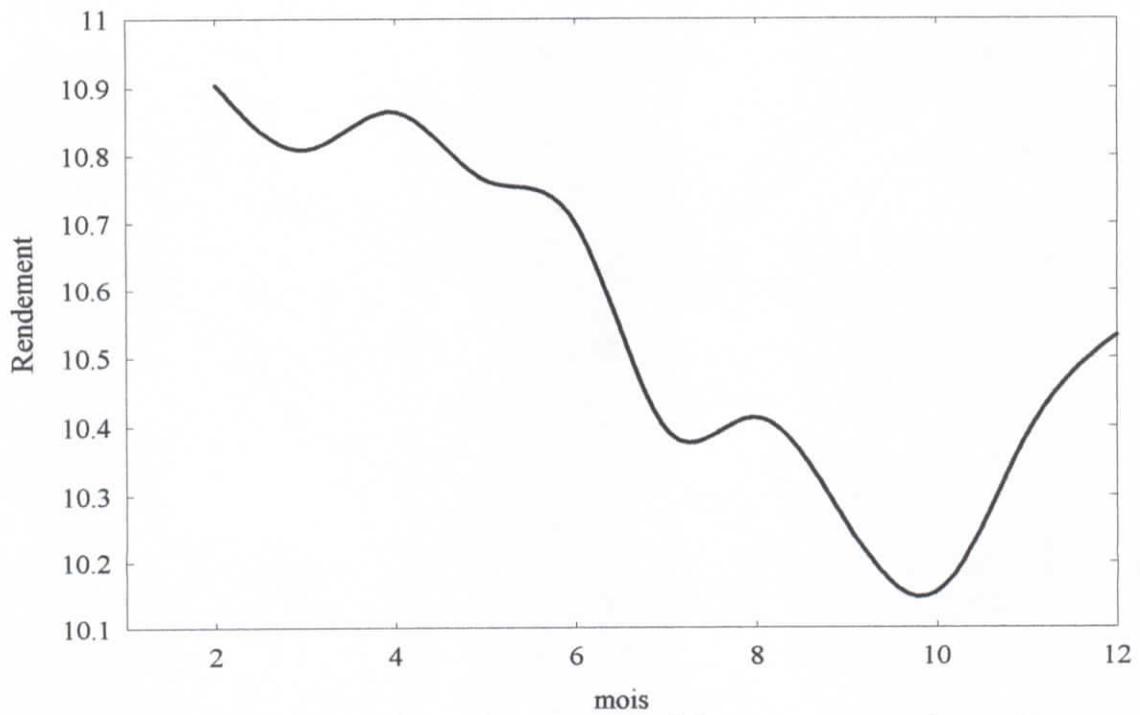
Nous remarquons aussi qu'en novembre et décembre la production électrique est la plus faible et cela est dû au faible taux d'irradiance.

Notons aussi que la production électrique la plus faible est 27.64 kWh/j en mois de décembre, ce qui fait qu'il faut deux journées de recharge des batteries à plomb des voitures pour un ravitaillement énergétique complet, mais nous remarquons aussi que pour les autres mois la production électrique est beaucoup plus importante que la demande, par exemple 1053.347 kWh en juin, ce qui donne la possibilité de faire une réserve de batteries pour les jours de moindre production de puissance.

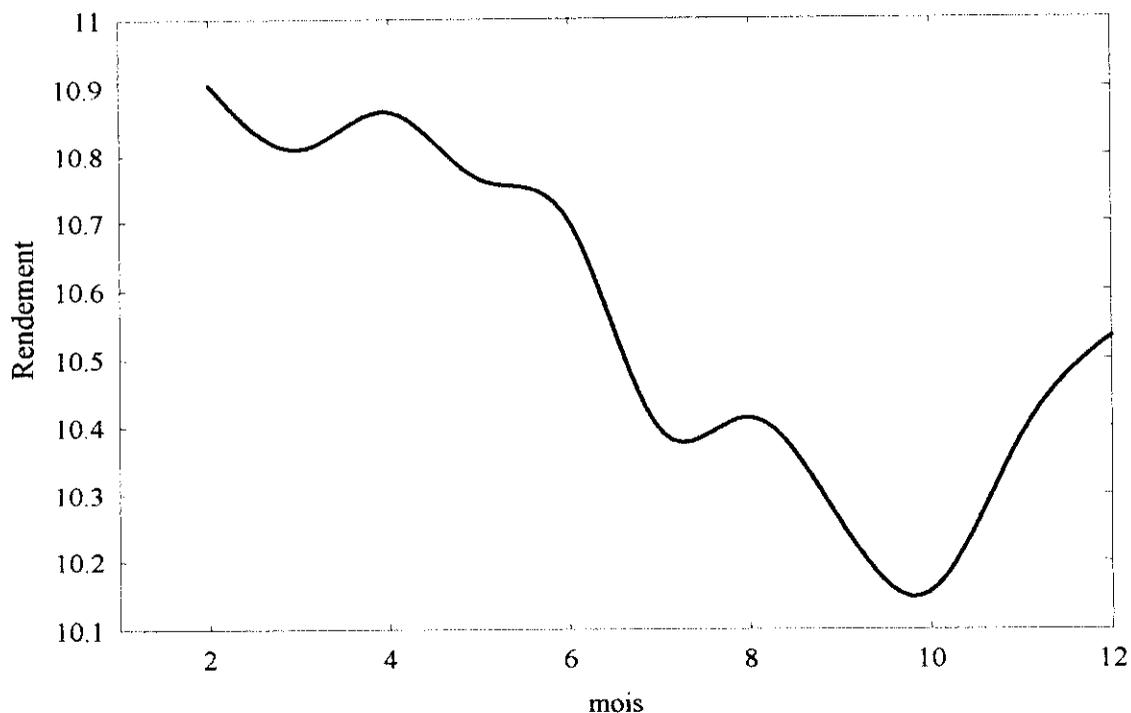
### VI.2.3 Rendement annuel



**Fig. 6.10** Variation du rendement annuel des panneaux fixes.



**Fig. 6.11** Variation du rendement annuel des panneaux semi-asservi.



**Fig. 6.12 Variation du rendement annuel des panneaux totalement asservis.**

Nous remarquons que l'allure des graphiques est sinusoïdale, et qu'en mois de janvier le rendement est nul et cela à cause des raisons données précédemment.

Nous observons aussi que nous avons un petit gain du rendement en systèmes semi et totalement asservis par rapport au système fixe, on remarque que la valeur maximale du rendement dans la configuration semi-asservi et totalement asservis est égale à 10.9 % et la valeur minimale de 10.15 %, et que pour des panneaux fixes la valeur maximale du rendement est de 10.88 % et minimale de 10.1 %.

## VI.3 Méthode électrique

### VI.3.1 Les rendements horaires

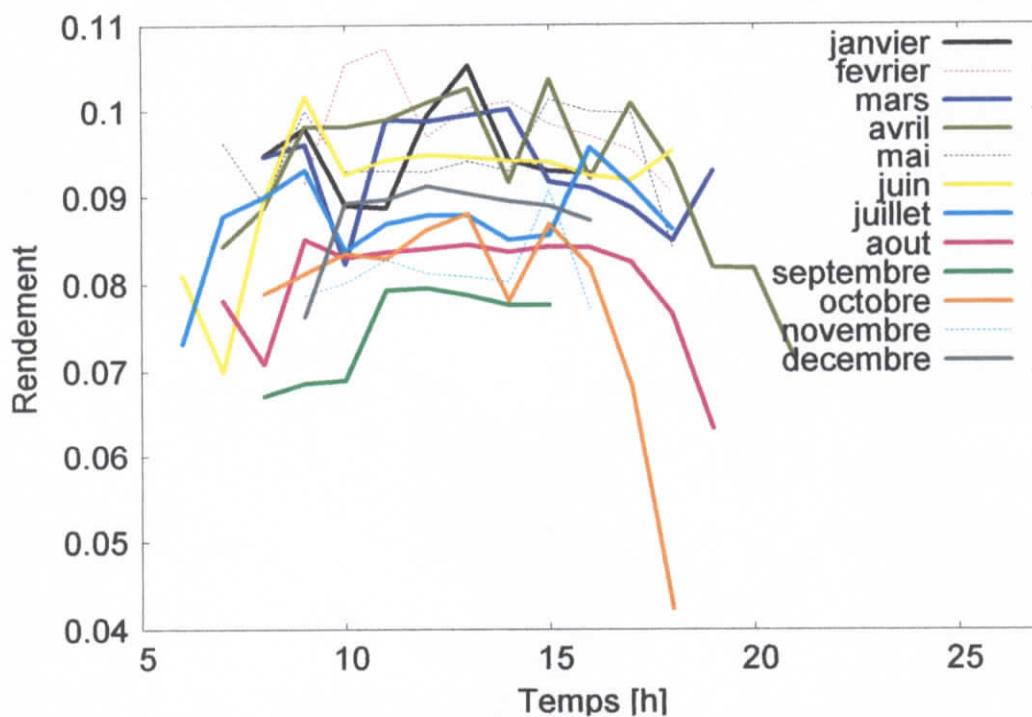


Fig. 6.13 Variation du rendement horaire des panneaux fixes.

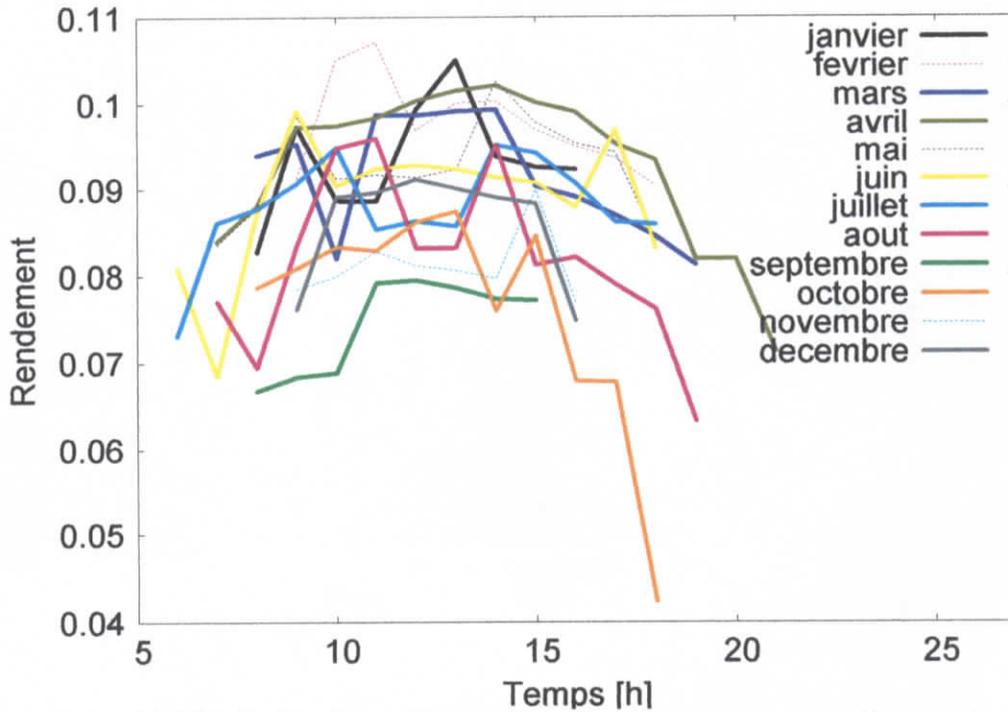


Fig. 6.14 Variation du rendement horaire des panneaux semi-asservi.

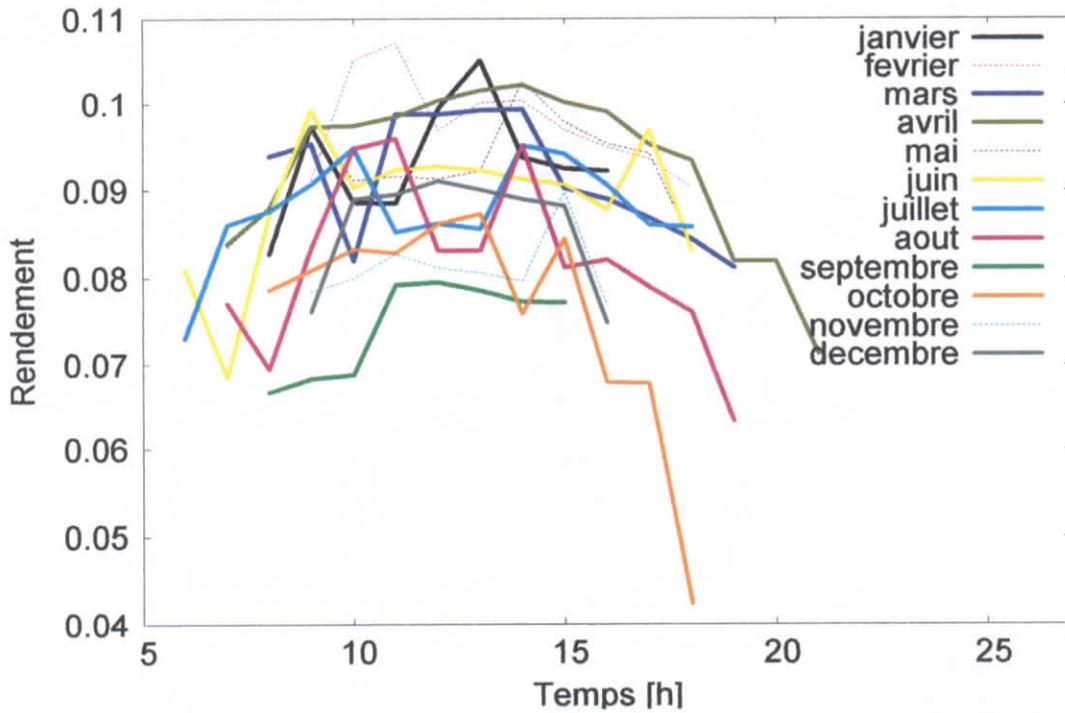


Fig. 6.15 Variation du rendement horaire des panneaux totalement asservis.

Nous remarquons que les rendements les plus importants sont en mois de janvier, février, mars, avril et cela à cause des températures qui sont basses.

Nous remarquons aussi que les mois de septembre et octobre ont les rendements les plus faibles à cause de la moyenne des températures qui est forte, car si on observe le graphique illustrant la variation moyenne annuelle de la température on remarque que ces deux mois sont parmi les mois les plus chauds, ce qui affecte directement le rendement horaire des panneaux photovoltaïques.

### VI.3.2 Energie électrique

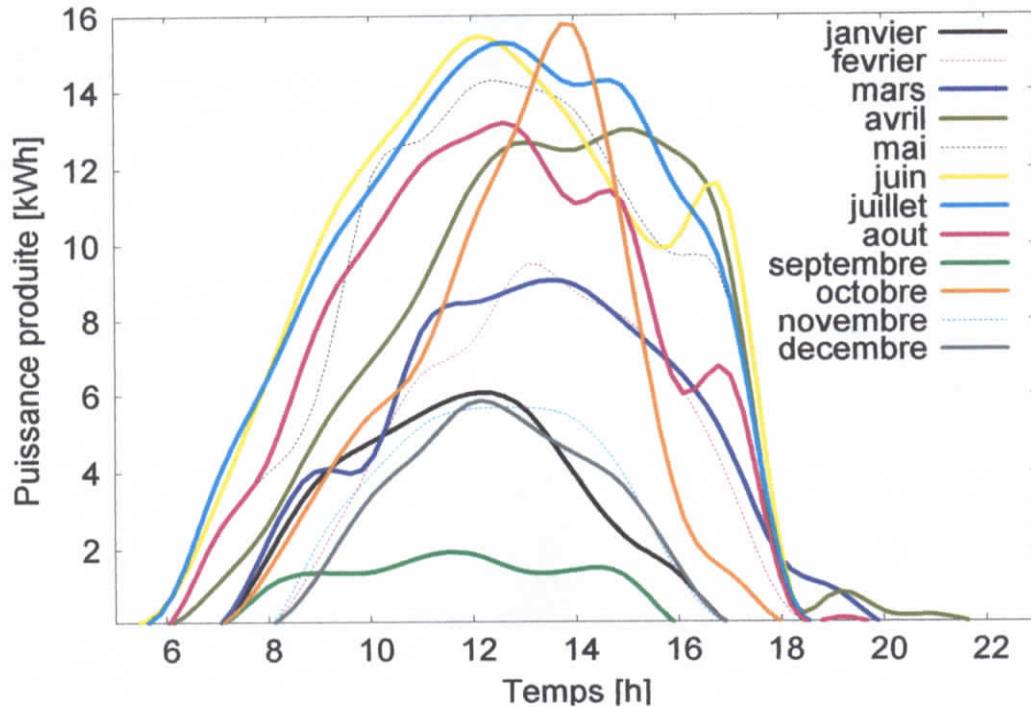


Fig. 6.16 Variation de la production électrique des panneaux fixes.

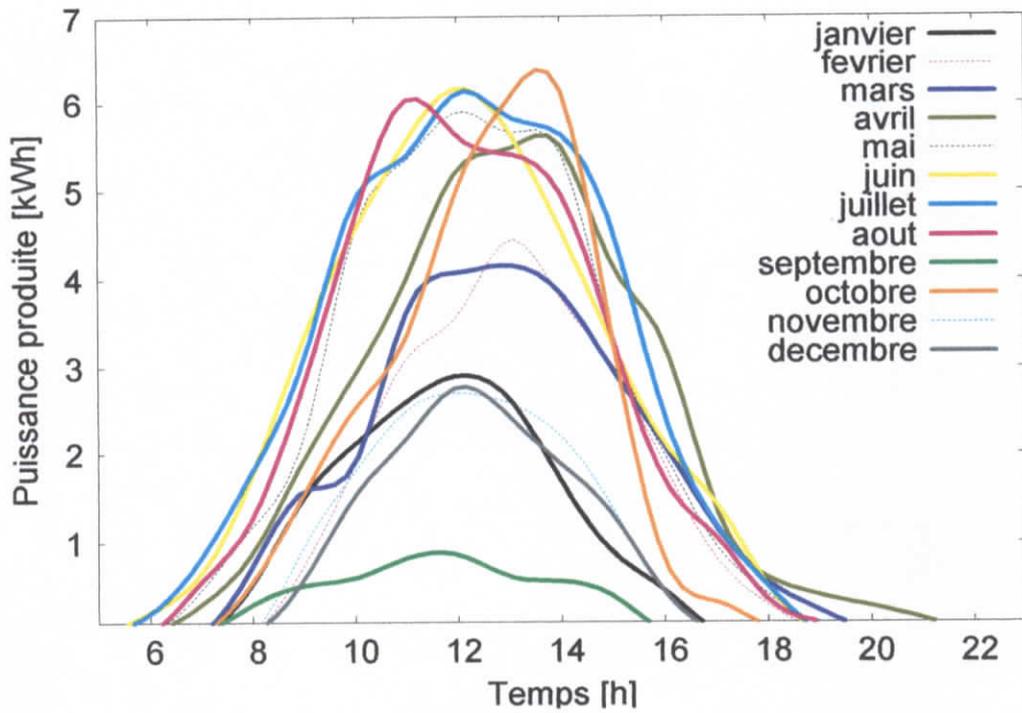


Fig. 6.17 Variation de la production électrique des panneaux semi-asservis.

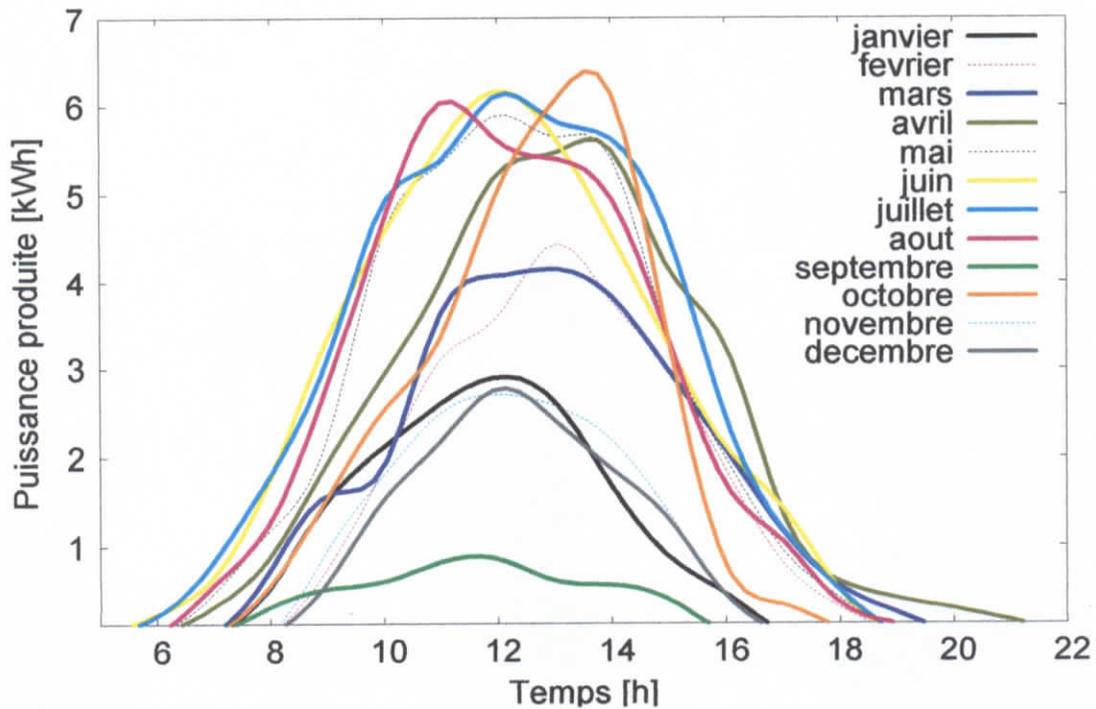


Fig. 6.18 Variation de la production électrique des panneaux totalement asservis.

Nous remarquons pour les trois cas d'études que les mois de juillet, juin, mai et août donnent

la production électrique la plus importante et que les mois de septembre, décembre, novembre, janvier donnent la production électrique la plus faible, ce comportement est expliqué directement par la quantité d'irradiance reçue sur les panneaux, car si on remarque les graphiques des irradiances on trouve que le taux de rayonnement le plus important est dans la période où la production électrique est importante et c'est la même remarque pour le taux de production électrique la plus faible ce qui permet de dire que la production électrique des panneaux photovoltaïques est proportionnelle aux l'irradiance reçues sur les panneaux.

On note aussi que la production électrique minimale est en septembre avec 140.07kwh/j une quantité largement importante pour une recharge complète des batteries du véhicule qui ne demande que 38.76 kwh.

### VI.3.3 Production d'hydrogène

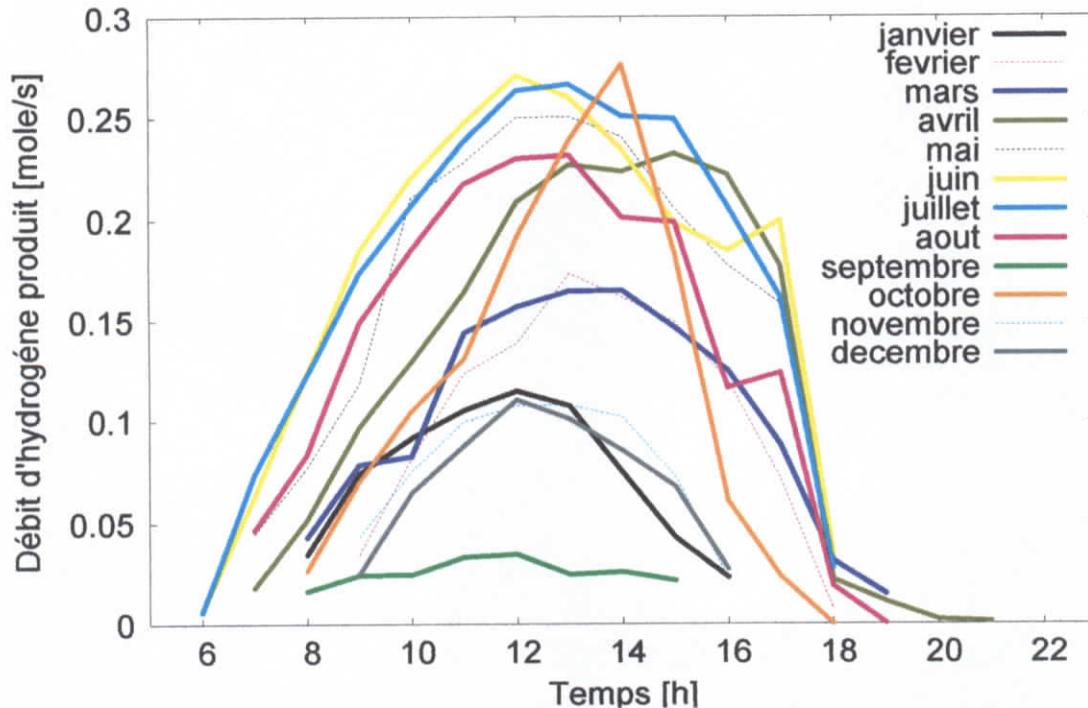


Fig. 6.19 Variation de la production d'hydrogène des panneaux fixes.

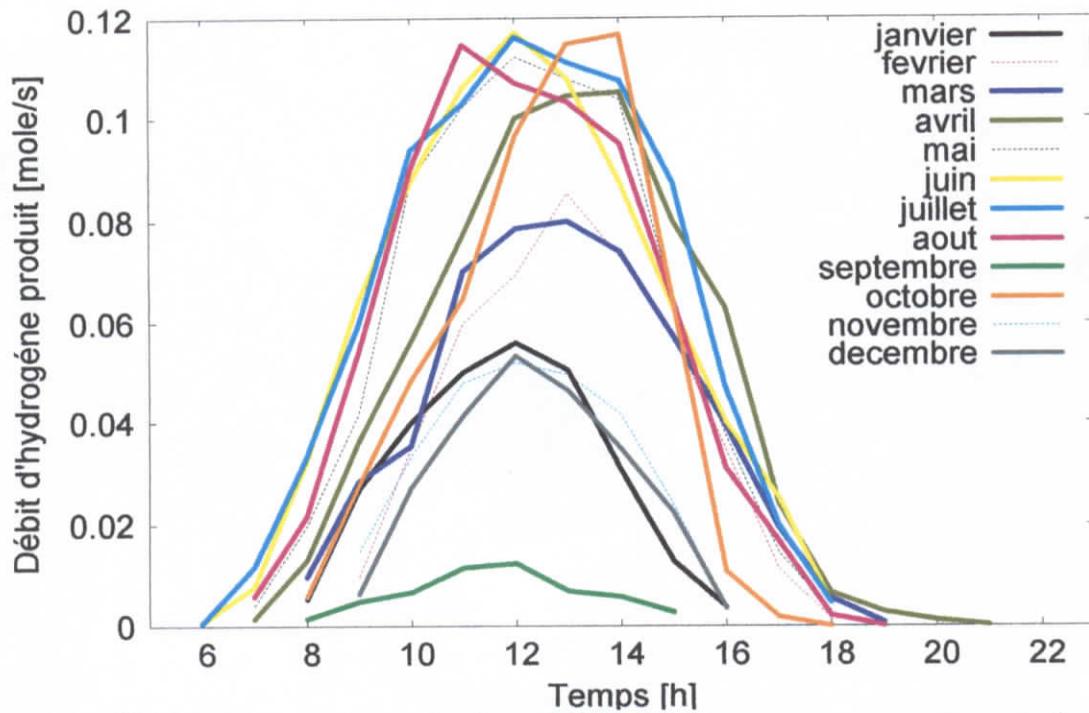


Fig. 6.20 Variation de la production d'hydrogène des panneaux semis asservis.

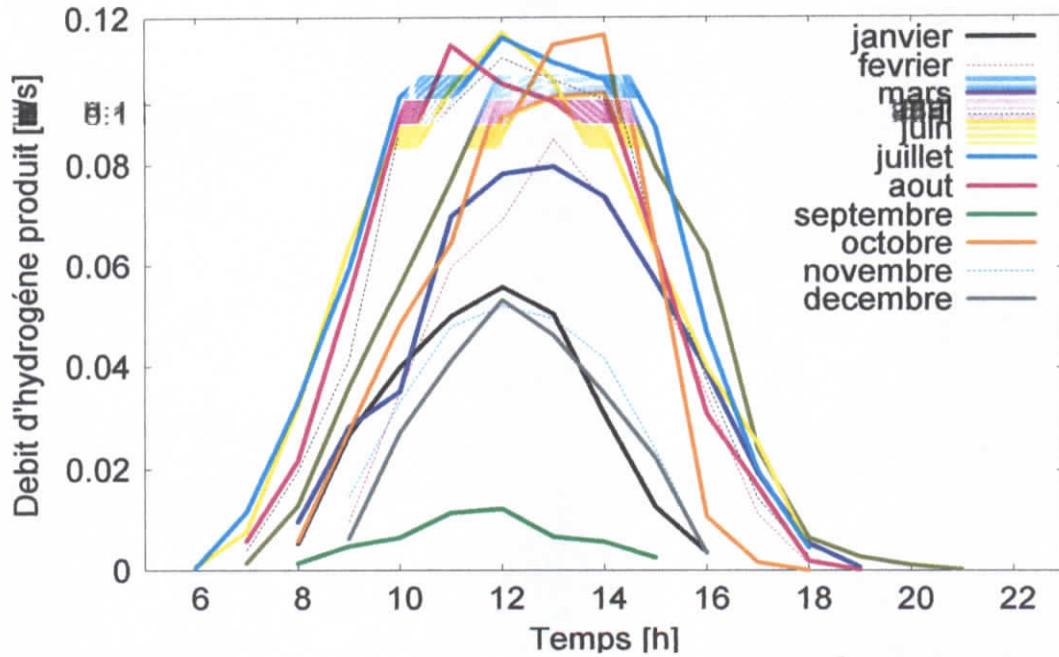


Fig. 6.21 Variation de la production d'hydrogène des panneaux totalement asservis.

On sait que la production d'hydrogène est faite par des électrolyseurs qui fonctionnent avec du courant électrique produit par des panneaux photovoltaïques.

Si on compare la production électrique de chaque type de configuration des panneaux avec leurs productions d'hydrogène on constate que c'est le même comportement pour chaque mois donc les graphiques de productions d'hydrogène sont extrapolable de ceux de la production électrique, et cela à cause de la proportionnalité qui existe entre les deux productions.

Notons aussi que la production minimale d'hydrogène est en décembre avec 2.65 kg/j, une quantité suffisante pour une recharge des piles à combustibles qui ne demandent que 0.312kg H<sub>2</sub> et du réservoir du véhicule à combustion interne à hydrogène qui à besoin de 2 à 3 Kg H<sub>2</sub>.

### VI.3.4 Rendement annuel

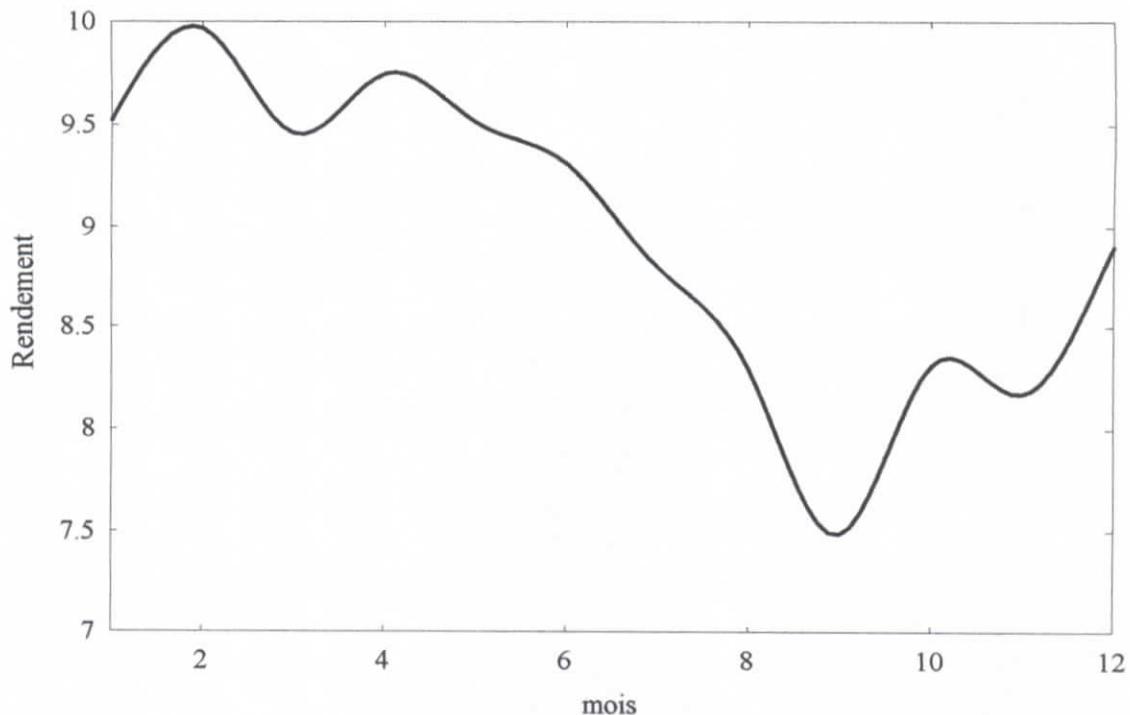
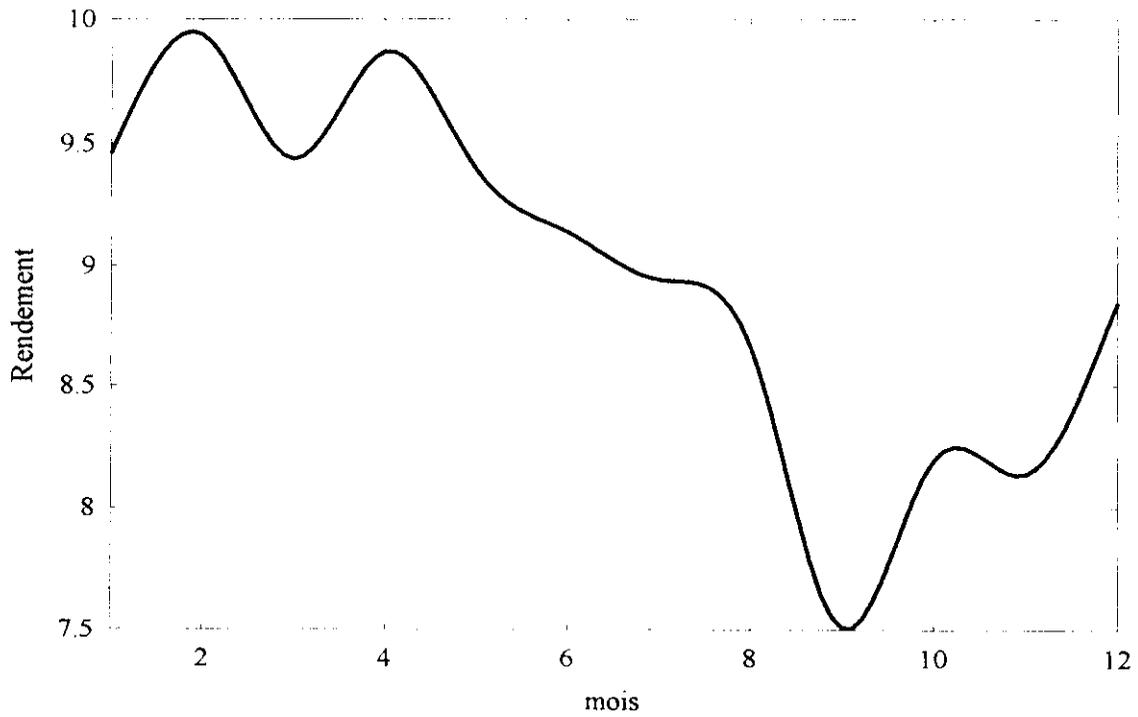
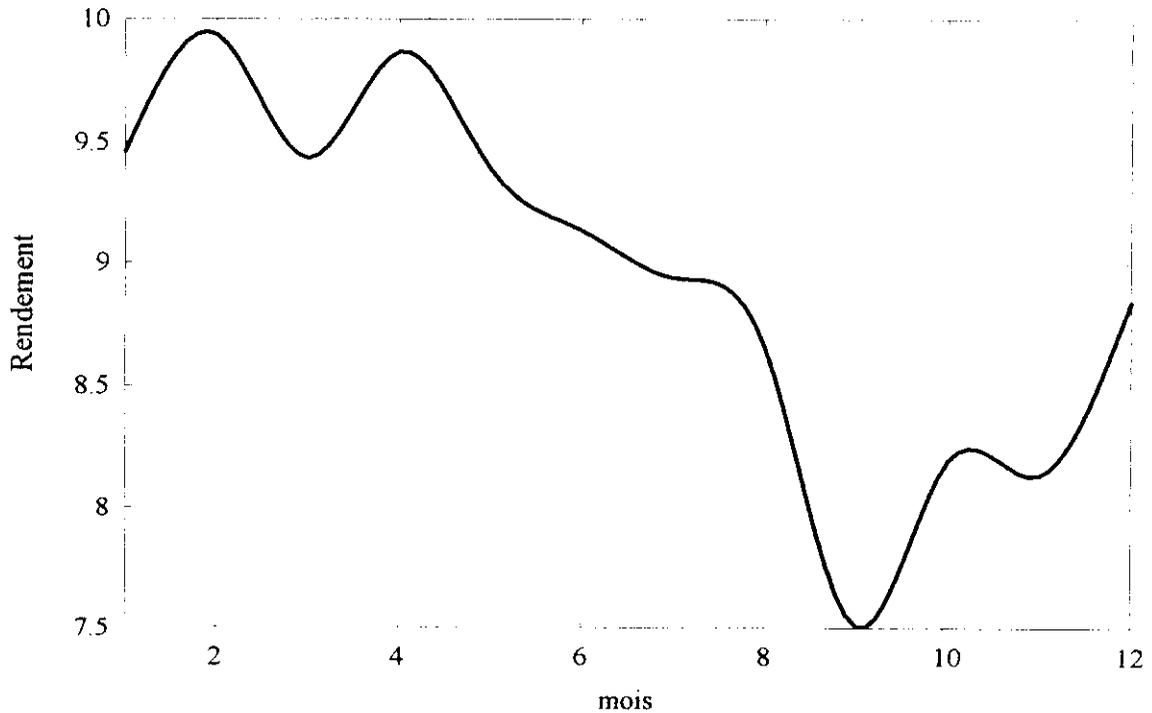


Fig. 6.22 Variation du rendement annuel des panneaux fixes.



**Fig. 6.23** Variation du rendement annuel des panneaux semis asservis.



**Fig. 6.24** Variation du rendement annuel des panneaux totalement asservis.

On remarque que pour les mois de mars, avril, mai, juin, juillet, août, le rendement des configurations semis asservis et totalement asservis est plus important que celui de la

configuration fixe. Et que pour les mois de janvier, février, septembre, octobre novembre, et décembre le contraire.

Tableau 6.1 Récapitulatif des productions des différentes configurations.

		ALGER						
		Methode 1			Methode 2			
		ac	eh	rendement	ac	eh	rendement	H2
FIXE	janvier	183.33 m2	0	0	183.33	1090.249	9.524772	5.842904
	fevrier	183.33 m2	342.6768	10.88	183.33	1594.516	9.967813	9.979126
	mars	183.33 m2	464.9739	10.77	183.33	2060.25	9.46	15.31762
	avril	183.33 m2	800.647	10.8	183.33	2971.45	9.75	19.20729
	mai	183.33 m2	847.8622	10.71	183.33	3395.64	9.52	20.43224
	juin	183.33 m2	941.1926	10.63	183.33	3713.42	9.31	22.39515
	juillet	183.33 m2	1053.347	10.33	183.33	3877.05	8.80	25.59664
	août	183.33 m2	893.2303	10.35	183.33	3063.28	8.29	18.37513
	septembre	183.33 m2	0	0	183.33	349.46	7.49	12.77682
	octobre	183.33 m2	645.4033	10.11	183.33	2226.64	8.31	8.228553
	novembre	183.33 m2	178.0624	10.37	183.33	992.88	8.17	4.083824
	décembre	183.33 m2	57.7937	10.52	183.33	928.23	8.90	3.692694
TOTALEMENT ASSERVIS	janvier	88.83 m2	0	0	88.83	474.85	9.46	4.36687
	fevrier	88.83 m2	146.2	10.9	88.83	658.34	9.94	7.397701
	mars	88.83 m2	199.97	10.8	88.83	834.33	9.44	10.89378
	avril	88.83 m2	289.2	10.86	88.83	1094.158	9.867452	12.21579
	mai	88.83 m2	317.23	10.76	88.83	1160.736	9.393171	12.09024
	juin	88.83 m2	340.74	10.7	88.83	1193.75	9.137626	12.67475
	juillet	88.83 m2	378.31	10.39	88.83	1317.267	8.940989	12.91995
	août	88.83 m2	351.98	10.41	88.83	1174.363	8.658035	11.37954
	septembre	88.83 m2	0	0	88.83	140.0722	7.509024	8.771844
	octobre	88.83 m2	278.9	10.15	88.83	920.9276	8.192155	5.874066
	novembre	88.83 m2	80.47	10.38	88.83	437.2065	8.135411	2.920916
	décembre	88.83 m2	27.64	10.53	88.83	406.1524	8.84136	2.65149
SEMIS ASSERVIS	janvier	88.83 m2	0.00E+00	0.00	88.83	474.8495	9.460752	4.36687
	fevrier	88.83 m2	146.2064	10.90	88.83	658.3412	9.937943	7.397701
	mars	88.83 m2	199.9725	10.81	88.83	834.3278	9.436796	10.89378
	avril	88.83 m2	289.2028	10.86	88.83	1094.158	9.867452	12.21579
	mai	88.83 m2	317.2301	10.76	88.83	1160.736	9.393171	12.09024
	juin	88.83 m2	340.7418	10.70	88.83	1193.75	9.137626	12.67475
	juillet	88.83 m2	378.3167	10.40	88.83	1317.267	8.940989	12.91995
	août	88.83 m2	351.9843	10.41	88.83	1174.363	8.658035	11.37954
	septembre	88.83 m2	0	0.00	88.83	140.0722	7.509024	8.771844
	octobre	88.83 m2	278.9048	10.15	88.83	920.9276	8.192155	5.874066
	novembre	88.83 m2	80.47062	10.39	88.83	437.2065	8.135411	2.920916
	décembre	88.83 m2	27.64754	10.53	88.83	406.1524	8.84136	2.65149

## CONCLUSION

La préoccupation environnementale a amené les constructeurs automobile à penser à fabriquer des voitures propres, silencieuses et peu consommatrice en carburant. Ce type de voiture a déjà été produit et même commercialisé dans certains pays tel que les U.S.A. (Californie), en France, Allemagne ...

Dans le présent travail nous avons mis au point un code de calcul permettant de dimensionner une installation photovoltaïque pour des besoins énergétiques d'une famille pour la recharge d'un véhicule tout électrique utilisant des batteries à plomb rechargeables ou des piles à combustibles ou de l'hydrogène cryogénique.

Pour cela nous avons établi une base de données de la moyenne des cinq années entre 1987 à 1991 du rayonnement solaire global et diffus ainsi que la température du site considéré à savoir Bouzeréah-Alger.

Dans un premier lieu nous avons utilisé les données du rayonnement ainsi que les données géo-spatiales du lieu à savoir la latitude, la longitude et le fuseau horaire. Le code calcule les caractéristiques solaires à savoir les coordonnées du soleil, sa déclinaison, l'angle horaire, le temps solaire vrai et les différents angles d'incidences du rayonnement et leurs puissances.

En second lieu nous avons utilisé ADVISOR un simulateur élaboré par National Renewable Energy Laboratory (N.R.E.L. - U.S.A.) en collaboration avec des firmes d'automobiles internationales pour déterminer les besoins énergétiques des véhicules traités dans notre étude. Le code utilise cette donnée pour dimensionner le nombre et le volume de batteries nécessaires pour pouvoir fournir la quantité d'énergie demandée; puis il dimensionne la superficie nécessaire des panneaux photovoltaïques pour répondre aux besoins, leurs rendements horaires, journaliers, mensuels, et annuel ainsi que leurs productions électriques et le débit d'hydrogène et cela en utilisant deux méthodes, la première thermique et la seconde électrique.

Les résultats obtenus montrent la faisabilité de l'installation avec des rendements très acceptables par rapport à la technologie qui existe actuellement. L'installation garantit des recharges énergétiques quotidiennes du véhicule avec même une possibilité de réserve dans les journées très ensoleillées et cela avec une superficie des panneaux photovoltaïques convenables.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Alain storck, Francois coeuret, **Elements de génie electrochimique**, tecdoc 1984
- [2] <http://www.annso.freesurf.fr/H2.html>
- [3] <http://www.autoparts.globalsources.com/magazin/apa/0208/apa0702.htm>
- [4] Benjamin Dessus et François Pharabod, **L'énergie solaire**, collection « Que sais-je ? »
- [5] Sol Wieder , **An introduction to solar scientists and engineers** , John wiley and sons, 1982, P.286
- [6] J.O'M. Bockris, and T.N. Veziroglu, **A solar-hydrogen energy system for environmental compatibility**, Environmental Conservation, Vol. 12, No. 2, pp. 105-118, 1985
- [7] L.thione ,R.bucciani, **photovoltaic pilot projects held in brussels 30 novembre –2 decembre 1981, chapitre :electrical batteries for energy storage in photovoltaic generation plants** , p100, p103 .
- [8] <http://e2phy.in2p3.fr/2001/jourdeppt/sld008.htm> EDF
- [9] M. Edouard Freund, **Énergies et matières premières** n° 20, Institut Français du Pétrole
- [10] **Encyclopédie Universalis 2002**, mot clé : Photovoltaïque .
- [11] **Encyclopédie Universalis 2002** , mot clé : Pile à combustible .
- [12] Samuel D.Conte, Carl de Boor, **Elementary numerical analysis an algorithmic approach**, Mc Graw Hill, third edition, 1980
- [13] <http://www.grc.nasa.gov/WWW/PAO/PAIS/fs06grc.htm>
- [14] <http://www.industrie.gouv.fr/energie/prospect/textes/hydrogene.htm>
- [15] James R.Bolton, **Solar photovoltaic of hydrogen**, Departement of chimisty ,the university of western ontario london,ontario,Canada,septembre 1996 .
- [16] Jacques Vernier, **Les énergies renouvelables**, « Que sais-je ? »
- [17] Luc Chancelier et Eric Laurent, **L'électricité voltaïque**, Ademe et le GRET.
- [18] R. Monna, A. Slaoui, A. Lachiq, J. Kopp, J.C. Muller, **Polycrystalline silicon thin films solar cells obtained by rapid thermal atmospheric-pressure chemical vapor deposition**, 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Nice, 23-27 octobre 1995, p. 1605
- [19] National Renewable Energy Laboratory ,**photovoltaics basic design principles and components** , U.S. departement of energy by the national Renewable Energy Laboratory

a DOE national laboratory , DOE / GO-10097-377 fs 231 ,march 1997

[20] <http://www.oksolar.com>

[21] Oystein ulleberg ,**Modeling of advanced alkaline electrolyzers : a system simulation approach**, international hydrogen energy, 28 fevrier 2003 .

[22] <http://perso.wanadoo.fr/hespul/capteurphoto.htm> HEPSUL

[23] T.Tani, N.Sekiguchi, M.Sakai, D.Ohta ,**Optimization of solar hydrogen systems based on hydrogen production cost** ,elsevier,03 septembre 1999 .

[24] P<sup>R</sup> E.Bilgen ,Z.zkirem ,**étude des panneaux photovoltaïques** ,école polytechnique Montréal ,automne 1984 .

[25] D,Yogi Goswami ,Frank Kreith ,Jan F.Kreider , **solar engineering** , Taylor and Francis, chapitre 2

[26] [http://site.voila.fr/bonhomme\\_gildas/photov2.htm](http://site.voila.fr/bonhomme_gildas/photov2.htm)

[27] W.PATZ,l'electricité solaire,dunod,1981

[28] <http://www.tpg.ch/Environnement/Equipements/Photovoltaïque.Fr.html>

[29] <http://www.total-energie.fr/photo/>

[30] <http://www.sfc.fr/Donnees/mine/hyd/texhyd.htm>