

N°d'ordre : 01/2004-M/C.I

**UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI  
BOUMEDIENE**



FACULTE DE GENIE MECANIQUE ET DE GENIE DES PROCÉDES

**MEMOIRE**

**Présenté pour l'obtention du diplôme de MAGISTER**

**En : CHIMIE INDUSTRIELLE**

**Spécialité : Procédés chimiques et environnement**

**Par : Fadila AYATI**

## **Sujet**

# **TECHNOLOGIE DE PRODUCTION D'HYDROGENE APPLIQUE A LA PILE À COMBUSTIBLE**

**Soutenue publiquement le 08 / 01 / 04, devant le jury composé de :**

<b>Mme A.Bensmaili</b>	<b>Professeur USTHB</b>	<b>Président</b>
<b>MM R.Rebiai</b>	<b>Professeur ISM/BOUSMAIL</b>	<b>Directeur de thèse</b>
<b>M.Belhamel</b>	<b>Directeur de recherche CDER</b>	<b>Examineur</b>
<b>A.Benchettara</b>	<b>Maître de conférences USTHB</b>	<b>Examineur</b>
<b>M. Belmedani</b>	<b>Chargé de cours USTHB</b>	<b>Examineur</b>

## *Dédicaces*

*A la mémoire de mon père*

*A ma mère*

*A Khoukha, Hafid, et Moumen*

*A mes sœurs et à mes beaux frères*

*A mes frères et mes belles sœurs*

*A toutes mes nièces à tous mes neveux*

*A mes ami(e)s*

*A mes cousines, à mes cousins et à leurs parents*

*A tous ceux que j'aime et que j'estime.*

## Remerciements

*Je commence par remercier ALLAH le tout puissant.*

*AU terme de cette étude réalisée au sein du laboratoire Gisement du Centre de Développement des Energies Renouvelables CDER, J'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur Belhamel directeur du CDER, ainsi qu'à Messieurs Yousfi, Mraoui, Mahmah et Lias pour m'avoir permis, de mener à bien mes expériences au sein de leur établissement et pour m'avoir aidé techniquement, et soutenu moralement durant toute la période de la réalisation de ce travail.*

*Je dois une reconnaissance toute particulière à Monsieur le Professeur R.Rebiai pour avoir proposé et dirigé ce travail. Il m'a apporté son soutien sur les plans scientifique, technique et humain.*

*Mes remerciements sont adressés aux personnels du centre de cryogénie, de la bibliothèque de génie des procédés, et de la bibliothèque de génie mécanique, à tous je leur témoigne toute ma reconnaissance pour leur soutien moral et pour leur amitié.*

*Je voudrais exprimer toute ma gratitude aux enseignants et chercheurs du laboratoire Phénomènes de Transferts de l'USTHB pour leur soutien moral, leurs conseils et leurs disponibilités.*

*Je tiens à présenter mes respects et mes remerciements à Madame H. Bensmaili, pour l'honneur qu'elle me fait en acceptant de présider le jury.*

*A Monsieur A. Benchettara j'adresse mes plus vifs remerciements, d'abord pour ses précieux conseils puis pour avoir pris le temps de juger ce travail.*

*Je remercie vivement Monsieur M. Belmedani pour son aide, ses précieux conseils et pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Que Monsieur Benzaoui trouve l'expression de mon profond respect ses conseils et son aide m'ont été très bénéfiques.*

*Je tiens à remercier tous ceux qui par leur savoir, leur expérience, et leur amitié m'ont aidé dans l'accomplissement de mon travail.*

*Enfin je ne s'aurais oublié dans ces remerciements mes collègues de l'administration du département de génie des procédés pour leur dynamisme et leur sympathie à mon égard.*

# SOMMAIRE

<b>NOMENCLATURE</b>	<b>10</b>
<b>INTORODUCTION GENERALE</b>	<b>11</b>
<b>CHAPITRE I METHODES DE PRODUCTION ET DE STOCKAGE DE L'HYDROGENE</b>	<b>13</b>
<b>I.1 Découverte de l'élément hydrogène</b>	<b>14</b>
<b>I.2 Origine de l'hydrogène</b>	<b>14</b>
<b>I.3 Propriétés de l'hydrogène</b>	<b>14</b>
<b>I.3.1 configurations de l'hydrogène</b>	<b>15</b>
<b>I.3.2 Les isotopes de l'hydrogène</b>	<b>17</b>
<b>I.4 Les méthodes de production de l'hydrogène</b>	<b>17</b>
<b>I.4.1 Production de l'hydrogène au laboratoire</b>	<b>17</b>
<b>I.4.2 Production de l'hydrogène dans l'industrie</b>	<b>17</b>
<b>I.4.2.1 Production d'hydrogène à partir du gaz naturel</b>	<b>18</b>
<b>I.4.2.2 Production d'Hydrogène à partir des biomasses</b>	<b>24</b>
<b>I.4.2.3 Production de l'hydrogène à partir de cycles thermochimiques</b>	<b>25</b>
<b>I.4.2.4 Production d'hydrogène à partir des procédés photo électrolyse</b>	<b>25</b>
<b>I.4.2.5 Hydrogène obtenu par Electrolyse de l'eau</b>	<b>25</b>
<b>1 Electrolyseur conventionnel</b>	<b>25</b>
<b>2 Electrolyseur à membrane</b>	<b>26</b>
<b>I.5 Synthèse des méthodes de préparations</b>	<b>26</b>
<b>I.6 Stockage de l'hydrogène et procédés de liquéfaction</b>	<b>28</b>
<b>I.6.1 Stockage sous pression</b>	<b>28</b>
<b>I.6.2 Stockage de l'hydrogène sous la forme d'hydrures chimiques</b>	<b>28</b>
<b>I.6.3 Stockage de l'hydrogène sous la forme d'hydrures métalliques</b>	<b>29</b>
<b>I.6.4 Stockage d'hydrogène dans les Nanotubes</b>	<b>30</b>
<b>I.6.5 Stockage de l'hydrogène sous forme liquide</b>	<b>30</b>
<b>I.6.5.1 Méthodes de productions des basses températures</b>	<b>31</b>
<b>1 Effet Joule Thomson</b>	<b>31</b>
<b>2 Détente adiabatique</b>	<b>32</b>

3	<i>Design d'un échangeur de chaleur cryogénique</i>	34
I.6.5.2	Systèmes de liquéfaction de l'hydrogène	36
1	<i>Système utilisant la détente isenthalpique (Linde Hampson Pré refroidi)</i>	39
2	<i>Système utilisant la détente isentropique (Claude pré refroidi)</i>	42
I.6.5.3	Conversion ortho-para dans le liquéfacteur de l'hydrogène	43
I.6.5.4	Description d'un réservoir de stockage pour hydrogène liquide	45
1	<i>Isolation des bacs de stockage</i>	48
2	<i>Système de sécurité d'un bac de stockage</i>	48
I.7	Sécurité liée à l'utilisation de l'hydrogène	49
I.7.1	Extrêmement inflammable	49
1	<i>Conséquences d'un feu sur l'homme</i>	50
2	<i>Conséquence d'une explosion sur l'homme</i>	50
I.7.2	Beaucoup plus léger que l'air	50
I.7.3	Qui fragilisent certains matériaux	51
<b>CHAPITRE II</b>	<b>CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE</b>	<b>52</b>
<b>II.1</b>	<b>ETUDE THEORIQUE DE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE</b>	<b>53</b>
II.1.1	Définition	53
II.1.2	Les semi-conducteurs	53
II.1.2	Principe de fonctionnement	53
II.1.3	La jonction p-n	55
II.1.4	Rendement d'une photopile	55
II.1.5	Association de cellules en série	56
II.1.6	Association de cellules en parallèle	56
II.1.7	Paramètres influant le rendement des cellules photovoltaïques	57
<b>II.2</b>	<b>ETUDE EXPERIMENTALE DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE</b>	<b>58</b>
II.2.1	Influence de la lumière sur les caractéristiques électriques de la cellule	59
II.2.1-a	Influence de la lumière sur $V_{co}$	60
II.2.1-b	Influence de la lumière sur $I_{cc}$	62
II.2. 2	Influence de la température sur le fonctionnement de la cellule	63

II.2.3	Influence des conditions météorologiques sur la température de la cellule	63
II.2.4	Influence de la surface	64
II.2.5	Influence de la charge	64
II.2.6	Influence de l'irradiance sur les caractéristiques électriques du panneau	67
II.2.7	Calcul du rendement du panneau photovoltaïque	68
II.2.8	Comportement électrique du panneau photovoltaïque pendant quatre jours de fonctionnement	69
	a Variation du flux lumineux en fonction du temps	69
	b Variation de la température ambiante et de la température de la cellule en fonction du temps	69
	c Variation de l'intensité de courant durant le temps	69
	d Variation de la tension du panneau durant le temps	71
	e Variation de la puissance en fonction du temps	71
	Conclusion	72
Chapitre III	<b>ELECTROLYSEUR</b>	73
III.	<b>ETUDE EXPERIMENTALE DE L'ELECTROLYSEUR</b>	74
III.1	Courbe caractéristique de l'électrolyseur	75
	Dispositif expérimental	76
	Mode opératoire	76
III.2	Calcul de l'efficacité de l'électrolyseur	78
	Dispositif expérimental	78
	Mode opératoire	78
III.2.1	Electrolyseur alimenté par un générateur de courant	79
	a début de mise en marche	79
	b l'électrolyseur a fonctionné pendant quatre heures	79
III.2.2	Electrolyseur alimenté avec un panneau photovoltaïque	80
	Conclusion	81
CHAPITRE IV	<b>PILE À COMBUSTIBLE</b>	82
IV. I	<b>ETUDE THEORIQUE DE LA PILE A COMBUSTIBLE</b>	83
IV.1.1	Généralité	83
IV.1.2	Principe de fonctionnement	85

<b>IV.I.3</b>	<b>Les différents types de piles à combustible</b>	<b>87</b>
<b>IV.1.4</b>	<b>Thermodynamique des piles à combustible</b>	<b>88</b>
<b>IV.1.4.1</b>	<b>Rendement de la pile</b>	<b>88</b>
<b>IV.1.4.2</b>	<b>Paramètres influant le rendement de la pile</b>	<b>89</b>
<b>IV.1.4.3</b>	<b>Influence de la température et de la pression sur la valeur de la force électromotrice</b>	<b>90</b>
<b>IV.1.5</b>	<b>Critères de choix d'une pile à combustible</b>	<b>91</b>
<b>IV.II</b>	<b>ETUDE EXPERIMENTALE DE LA PILE À COMBUSTIBLE</b>	<b>93</b>
<b>IV.II.1</b>	<b>Courbe caractéristique de la pile PEMFC</b>	<b>94</b>
<b>IV.II.1.1</b>	<b>La pile est directement connectée à l'électrolyseur</b>	<b>95</b>
	<b>Préparation de l'électrolyseur</b>	<b>95</b>
	<b>Potentiel thermodynamique théorique de la pile</b>	<b>97</b>
<b>IV.II.1.2</b>	<b>La pile branchée sur une résistance fixe <math>R=20\Omega</math></b>	<b>98</b>
<b>IV.II.1.3</b>	<b>La pile connectée aux réservoirs de stockage du combustible et comburant</b>	<b>99</b>
<b>IV.II.2</b>	<b>Calcul de la quantité d'hydrogène nécessaire à la production d'un courant I</b>	<b>101</b>
<b>IV.II.3</b>	<b>Consommation massique d'une pile à membrane</b>	<b>102</b>
<b>IV.II.4</b>	<b>Efficacité de la pile à combustible</b>	<b>103</b>
<b>IV.II.5</b>	<b>Calcul de la quantité d'eau rejetée par la pile</b>	<b>103</b>
<b>IV.II.6</b>	<b>Décharge de la pile</b>	<b>104</b>
	<b>Conclusion</b>	<b>105</b>
<b>CHAPITRE V</b>	<b>MODELISATION DU SYSTEME DE PRODUCTION D'HYDROGENE PAR VOIE SOLAIRE (PV-H<sub>2</sub>)</b>	<b>106</b>
<b>V.1</b>	<b>MODELISATION DU PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE</b>	<b>107</b>
<b>V.1.1</b>	<b>Procédure Expérimentale</b>	<b>110</b>
<b>V.1.2</b>	<b>Modélisation Mathématique</b>	<b>112</b>
<b>V.1.3</b>	<b>Calcul de la puissance maximale du panneau</b>	<b>117</b>
<b>V.1.4</b>	<b>Influence de l'irradiation solaire sur le panneau</b>	<b>117</b>
<b>V.1.5</b>	<b>Influence de la température sur les caractéristiques électriques du panneau</b>	<b>118</b>
<b>V.2</b>	<b>Modélisation de l'Electrolyseur</b>	<b>120</b>
<b>V.2.1</b>	<b>Description générale</b>	<b>120</b>
<b>V.2.2</b>	<b>Relation entre la variation de l'énergie de Gibbs et le potentiel de la cellule</b>	<b>121</b>

<b>V.2.3</b>	<b>Modélisation mathématique</b>	<b>122</b>
<b>V.3</b>	<b>SIMULATION DU SYSTEME DE PRODUCTION D'HYDROGENE SOLAIRE</b>	<b>124</b>
<b>V.3.1</b>	<b>Calcul du point de fonctionnement et de la production</b>	<b>125</b>
<b>V.3.2</b>	<b>Simulation de la production d'hydrogène</b>	<b>125</b>
	<b>CONCLUSION</b>	<b>132</b>
	<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>133</b>
	<b>ANNEXES</b>	<b>135</b>
<b>Annexes n°1</b>	<b>Diagramme T-S du para hydrogène</b>	<b>135</b>
	<b>Quelques propriétés de l'hydrogène</b>	<b>137</b>
<b>Annexes n° 2 A</b>	<b>Différents types de piles à combustible</b>	<b>138</b>
<b>Annexes n°2 B</b>	<b>Cinétique des réactions aux électrodes d'une pile à combustible</b>	<b>140</b>
	<b>Chute de potentiel à l'intérieur de la membrane</b>	<b>140</b>
<b>Annexes n°3 A</b>	<b>Description de l'Algorithme de la méthode des intervalles</b>	<b>142</b>
<b>Annexes n°3 B</b>	<b>Principe de la méthode de Newton</b>	<b>143</b>
<b>Annexes n°4</b>	<b>Résultats expérimentaux</b>	<b>145</b>
	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>168</b>

## NOMENCLATURE

a	Facteur de correction
a,b, c, d, e	Constante à température ambiante expérimentale
$C_o$	Constante réduite du courant de saturation
$C_1$	Constante réduite du photocourant
$E_g$	Energie de la bande interdite du silicium
E	Efficacité de la pile
FF	Facteur de forme
F	Constante de Faraday
H	Enthalpie molaire de la réaction (dissociation et formation de l'eau)
$I_{cc}$	Intensité de courant du panneau en court circuit
$I_{cel}$	Intensité de courant de la cellule d'électrolyse
$I_{max}$	Intensité de courant maximale délivrée par le panneau
$I_{rr}$	Irradiance ou insolation émise par le soleil
$I_f$	Intensité de courant au point de fonctionnement
I	Intensité de courant fournie par la pile
$I_{ph}$	Photocourant
$I_{s1}$	Courant de saturation de la diode1
$I_{s2}$	Courant de saturation de la diode2
$I_{rr,ref}$	Irradiance référence égale à 1000W/m <sup>2</sup>
$I_{s,ref}$	Courant de saturation correspondant à l'irradiance de référence
m	Facteur d'idéalité
$m_{ref}$	Facteur d'idéalité à la température de référence
$P_{max}$	Puissance maximale fournie par le panneau
P	Pression atmosphérique
$Q_{hydrogène}$	La production théorique d'hydrogène
$R_s$	Résistance série du panneau photovoltaïque
$R_{sh}$	Résistance shunt du panneau photovoltaïque
$R_{opt}$	Résistance optimale
R	Constante des gaz parfaits
S	Surface du panneau
T	Température ambiante
$T_{ref}$	Température de référence
t	Temps correspondant à la production du volume v
$\frac{v}{t}$	Quantité d'hydrogène consommée par la pile par unité de temps
v	Volume d'hydrogène produit
$V_{co}$	Tension du panneau à circuit ouvert.
$V_{max}$	Tension maximale fournie par le panneau
$V_{cel}$	Tension de la cellule d'électrolyse
$W_{El}$	Energie électrique fournie par la pile
$W_{H2}$	Energie chimique consommée par la pile
z	Nombre d'électron requis pour libérer une molécule
$\eta$	Rendement du panneau

## INTRODUCTION GENERALE

L'énergie constitue, à l'échelle humaine, le moteur principal de tout développement économique.

Si l'énergie des combustibles fossiles qui n'a jamais été aussi abondamment consommée, éveille de plus en plus d'échos, c'est parce qu'elle cristallise de multiples inquiétudes objectivement fondées tant sur les risques qu'elle fait courir à l'environnement que sur la menace d'épuisement de ses réserves exploitables, dans un proche avenir.

Etant donné que cette forme d'énergie couvre une partie très importante de la production énergétique actuelle, il s'avère nécessaire de trouver une autre forme d'énergie économique, peu polluante et durable.

Comme substitut aux énergies fossiles, l'hydrogène possède d'excellentes propriétés physico-chimiques et thermiques lui conférant la qualité de combustible universel. Ce vecteur d'énergie est le seul qui peut être produit à partir de l'eau et d'une large variété de sources d'énergies renouvelables, puis utilisé sans être préjudiciable pour l'environnement.

De nombreux travaux proposent des améliorations des voies classiques de production chimique à partir des hydrocarbures par reformage à la vapeur ou oxydation partielle du méthane et du méthanol à l'aide de catalyseurs [1].

Le stockage de l'hydrogène demeure l'un des problèmes principaux qui limite l'utilisation de l'hydrogène à grande échelle. Aux techniques classiques compression du gaz, liquéfaction, hydrures métalliques vient s'ajouter actuellement le stockage par adsorption du gaz comprimé. Des progrès sont réalisés que ce soit sur la durée de conservation du gaz liquéfié dans un réservoir cryogénique, ou sur l'optimisation des performances des systèmes à hydrures métalliques par un contrôle de température ou par la maîtrise de la cinétique d'adsorption. L'adsorption et la physisorption de l'hydrogène comprimé sur un solide microporeux est une nouvelle tentative de stockage datant de quelques années et dont les résultats, jusque là, sont encore incertains [2].

L'objectif de notre mémoire est de contribuer à une meilleure compréhension d'une nouvelle technologie de production et de stockage d'une énergie propre. Cette étude est conçue pour susciter de futures expériences dans ce domaine.

Nous avons mené notre étude expérimentale au laboratoire Gisement du Centre de Développement des **Energies Renouvelables C.D.E.R** sis à Bouzareah en collaboration avec le laboratoire « **Phénomènes de Transferts** » de l'USTHB.

Le centre a mis à notre disposition un nouveau procédé de production d'énergie propre. Le système est constitué d'un panneau photovoltaïque, d'un électrolyseur et d'une pile à combustible,

Le panneau photovoltaïque, alimente l'électrolyseur en énergie électrique. L'électrolyseur à (électrolyte) membrane échangeuse de proton produit l'hydrogène et l'oxygène. Les produits de l'électrolyse respectivement combustible et comburant alimentent l'anode et la cathode de la pile à combustible.

Le premier chapitre de cette étude relate la théorie liée aux méthodes de production et de stockage de l'hydrogène ainsi que certaines propriétés qui le distinguent des autres combustibles. Quelques procédés de liquéfaction de l'hydrogène sont cités en fin du chapitre et un bref calcul sur le dimensionnement d'un bac de stockage pour hydrogène liquide y est présenté.

Dans les chapitres II, III, et VI sont présentés les composants du système, l'appareillage, les principes de fonctionnement, et les tests réalisés sur chacun des appareils. Concernant les tests réalisés, nous avons étudié l'influence des paramètres météorologiques sur l'efficacité de la production d'hydrogène et déterminé les caractéristiques énergétiques et électriques du panneau, de l'électrolyseur et de la pile à combustible.

Les résultats obtenus sont exposés et commentés en fin de chaque chapitre.

Dans le chapitre modélisation, nous avons adapté un modèle mathématique qui décrit le comportement électrique du panneau photovoltaïque et de l'électrolyseur.

La fin du chapitre concerne la proposition d'un modèle mathématique simulant la production de l'hydrogène. Le modèle est résolu par des méthodes numériques actuelles afin de déterminer les paramètres spécifiques de chacun des éléments du système.

Sur la base des résultats précités, et en utilisant le programme élaboré, il est possible de choisir le système adéquat de production d'hydrogène.

## METHODE DE PRODUCTION ET DE STOCKAGE DE L'HYDROGENE

*Ce chapitre traitera les propriétés de l'hydrogène liées à la sécurité de fonctionnement ainsi qu'à l'efficacité du système.*

*Les différentes méthodes de productions sont discutées et une synthèse de ces méthodes est faite selon plusieurs critères.*

*Nous avons également énuméré certains procédés de purification du produit, ainsi que les différentes méthodes de stockage du gaz avec leurs avantages et leurs inconvénients.*

*Ayant opté pour le stockage sous forme liquide, nous avons présenté très brièvement le principe de production des basses températures ainsi que certains procédés de liquéfaction de l'hydrogène et les particularités qui le différencient de la liquéfaction des autres gaz.*

*La fin du chapitre relate l'aspect sécurité ainsi que quelques généralités sur les risques liés à l'utilisation de l'hydrogène.*

### I.1 Découverte de l'élément hydrogène

Découvert par **Cavendish**, l'hydrogène" doit son nom à **Lavoisier** [3]. Celui ci avait découvert qu'en approchant une bougie allumée près d'une éprouvette, il y a apparition d'une flamme et que la combustion de ce gaz provoquait la formation d'eau sur les parois de l'éprouvette. Antoine Lavoisier décida alors d'appeler ce gaz hydrogène, du grec "hydro": eau et "gene" (producteur, créateur).

### I.2 Origine de l'hydrogène

L'hydrogène est l'élément le plus abondant de l'Univers, puisqu'il représente plus de 90 % de tous les atomes. En revanche, l'hydrogène ne représente que 0,76 % de la masse de l'écorce terrestre. En fait, sur Terre, c'est l'eau qui est le composé d'hydrogène le plus abondant. L'hydrogène libre est rare: c'est un constituant des gaz émis par les volcans; sa diffusion dans l'espace explique que l'atmosphère terrestre ne contienne qu'une partie par million (ppm) de ce gaz [3,4].

### I.3 Propriétés de l'hydrogène

Le gaz hydrogène est formé de molécules  $H_2$ , les deux atomes sont unis par une liaison covalente simple, de sorte que chaque atome possède la configuration stable de l'atome d'hélium. La molécule d'hydrogène ( $H_2$ ) est non polaire, et du fait de la faible force d'attraction entre les molécules (force intermoléculaire) les points d'ébullition et de fusion sont très bas: - 252,87 °C et - 259,14 °C respectivement[5].

La masse molaire de l'hydrogène est très faible, elle est quatorze fois plus faible que celle de l'azote: son énergie cinétique est donc faible.

D'autres propriétés sont regroupées dans le tableau 1 de l'annexe n°1.

L'hydrogène a un large domaine d'inflammabilité dans l'air: 4 à 75%, et son énergie d'inflammation est très faible (tableau 2 annexe n°1).

L'hydrogène possède le coefficient de diffusion le plus élevé: il peut traverser des parois poreuses comme l'argile ou le caoutchouc, et même certains métaux.

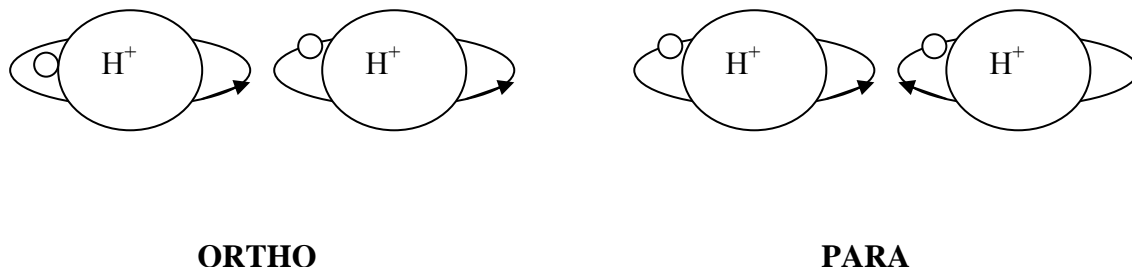
Néanmoins, l'hydrogène diffuse très vite dans l'air: de ce fait, en cas de fuite, il s'échappe vers le haut et sa concentration diminue très rapidement, passant sous la Limite Inférieure d'Inflammabilité.

L'hydrogène possède un haut pouvoir énergétique gravimétrique (tableau 2 annexe n°1,): 120 MJ/kg comparé au pétrole (45 MJ/kg), au méthanol (20 MJ/kg) et au gaz naturel (50 MJ/kg).

Cependant comme c'est le gaz le plus léger (2,016g/mol H<sub>2</sub>), son pouvoir énergétique par unité de volume est faible: 8960 MJ/m<sup>3</sup> face au pétrole (311170 MJ/m<sup>3</sup>), méthanol (16020 MJ/m<sup>3</sup>), gaz naturel (21250 MJ/m<sup>3</sup>) (tableau 3 annexe n°1).

### I.3.1 Configurations de l'hydrogène

La molécule d'hydrogène existe sous deux formes correspondant aux deux orientations possibles des spins des deux atomes, l'un par rapport à l'autre (figure I.1).



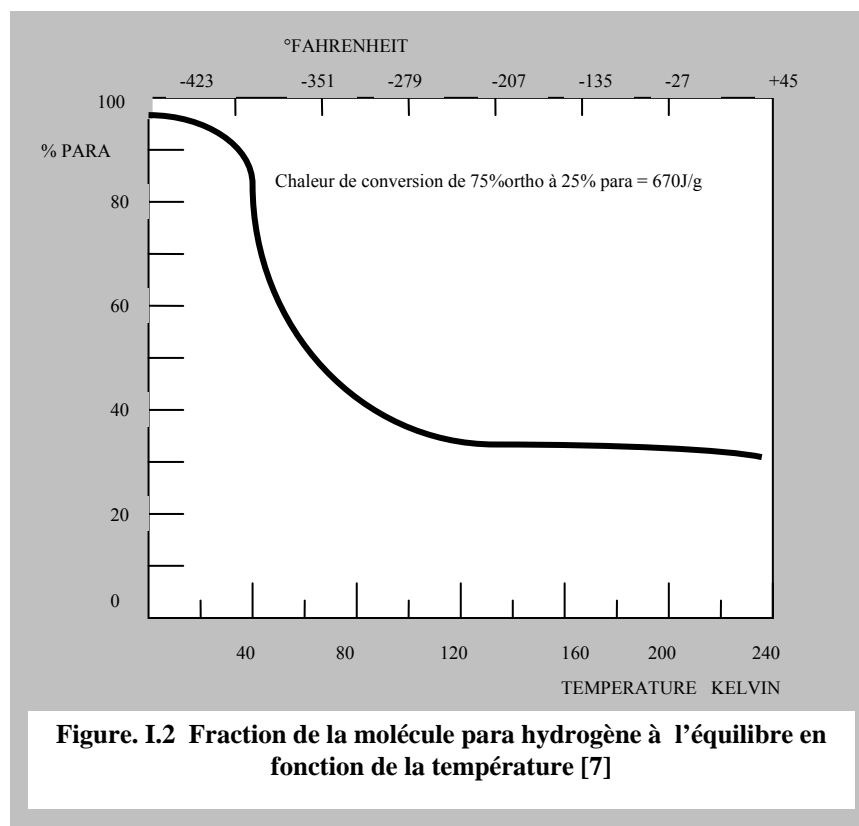
**Figure.I.1 orientation des spins de l'hydrogène**

Le parallélisme des spins caractérise la forme ortho tandis que leur opposition caractérise la forme para. Les propriétés physiques de l'hydrogène telles que la tension de vapeur, la densité, la chaleur spécifique, la température et la pression au point triple varient légèrement d'une forme à l'autre [6].

La proportion d'équilibre des deux formes est fonction de la température (figure.I.2). A la température ambiante l'hydrogène existe à 75% ortho et 25% para c'est l'hydrogène normal.

L'équilibre se déplace aux basses températures et atteint 99.8% para et 0.2% ortho c'est l'hydrogène liquide.

La conversion de l'ortho hydrogène en para hydrogène est exothermique, et la chaleur dégagée est fonction de la température à laquelle cette conversion a lieu [7].



**Figure. I.2 Fraction de la molécule para hydrogène à l'équilibre en fonction de la température [7]**

La conversion ortho - para suit la loi [7]:

$$\ln(C - C_E) = -Kt(1 - C_E) + \ln(C_F - C_E) \quad (1)$$

où :

$C$  : concentration en ortho hydrogène,

$1-C_E$  : concentration en para hydrogène,

$K$  : constante d'équilibre,

$C_F$  : concentration en ortho hydrogène du gaz à traiter,

$C_E$  : concentration en ortho hydrogène à l'équilibre,

$t$  : durée de contact.

### I.3.2 Les isotopes de l'hydrogène

Le protium ( ${}^1\text{H}$ ) est l'isotope ordinaire de l'hydrogène.

En 1932, Harold Urey [8] découvre l'isotope naturel stable de cet élément: l'hydrogène lourd ( ${}^2\text{H}$ ), ou deutérium (D), dont le noyau possède un neutron associé au proton.

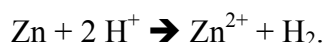
En 1935, Ernest Rutherford [8] obtient un troisième isotope, le tritium ( ${}^3\text{H}$ ), en bombardant de l'acide deutérophosphorique avec des deutérons rapides; le noyau de cet isotope est formé d'un proton et de deux neutrons. Le tritium est radioactif.

### I.4 Les méthodes de production de l'hydrogène

Selon la quantité désirée, nous distinguons [9] :

#### I.4.1 Production de l'hydrogène au laboratoire

La préparation de l'hydrogène est réalisée par l'action d'acides dilués sur différents métaux. Tous les métaux de potentiels redox inférieurs à celui du couple  $2\text{H}^+ / \text{H}_2$ , produisent de l'hydrogène lorsqu'ils entrent en contact avec de l'acide chlorhydrique ou sulfurique dilué. Le zinc, métal le plus communément employé, réagit de la façon suivante:

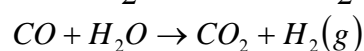
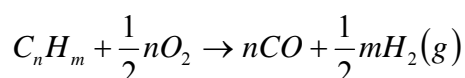


L'électrolyse de l'eau est fréquemment employée: l'eau est décomposée en ses deux éléments constitutifs en faisant passer un courant électrique entre deux électrodes de platine ou de carbone plongées dans de l'eau acidifiée afin d'augmenter la conductibilité électrique.

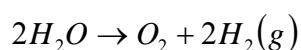
#### I.4.2 Production de l'hydrogène dans l'industrie

Il existe plusieurs méthodes de production d'hydrogène gaz, nous citons :

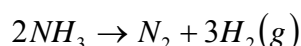
- Traitement du gaz de four ou autre hydrocarbure,
- Reformage du gaz naturel,
- Oxydation partielle des hydrocarbures, les réactions mises en jeu sont :



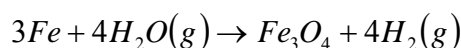
- Electrolyse de l'eau :



- Dissociation de l'ammoniac gaz



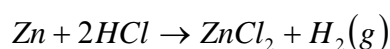
- Vaporeformage du fer



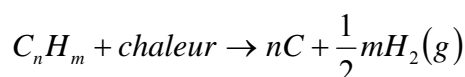
- Réaction de la vapeur d'eau avec le gaz à eau



- Action des acides sur les métaux



- La décomposition thermique des hydrocarbures



Ces différents procédés varient en terme de matière première, de complexité, de rendement, de pureté et de coût de l'hydrogène obtenu. Le choix du procédé de préparation de l'hydrogène se fait en fonction:

- des débits souhaités
- des disponibilités énergétiques.

#### **I.4.2.1 Production d'Hydrogène à partir du gaz naturel**

Parmi les méthodes de production d'hydrogène à partir du gaz naturel, nous citons [10] :

##### **i) Gazéification du charbon**

Cette technique fut la source principale de l'hydrogène avant le reformage, mais n'est plus utilisée actuellement, sauf en Afrique du Sud ou en Chine. Le principe consiste à mélanger le charbon à de l'eau et de l'air à 1000°C sous haute pression, le gaz obtenu contient en majorité du CO et de l'hydrogène.

Principe : formation du gaz à l'eau ou gaz de synthèse, à 1000°C.



La réaction est endothermique elle nécessite un soufflage de O<sub>2</sub> pour maintenir la température par combustion du carbone. La composition du mélange obtenu est : 50 % H<sub>2</sub> - 40 % CO.

## ii) Reformage du gaz naturel

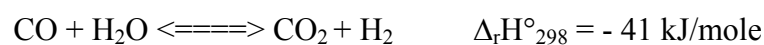
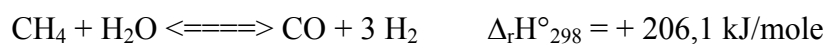
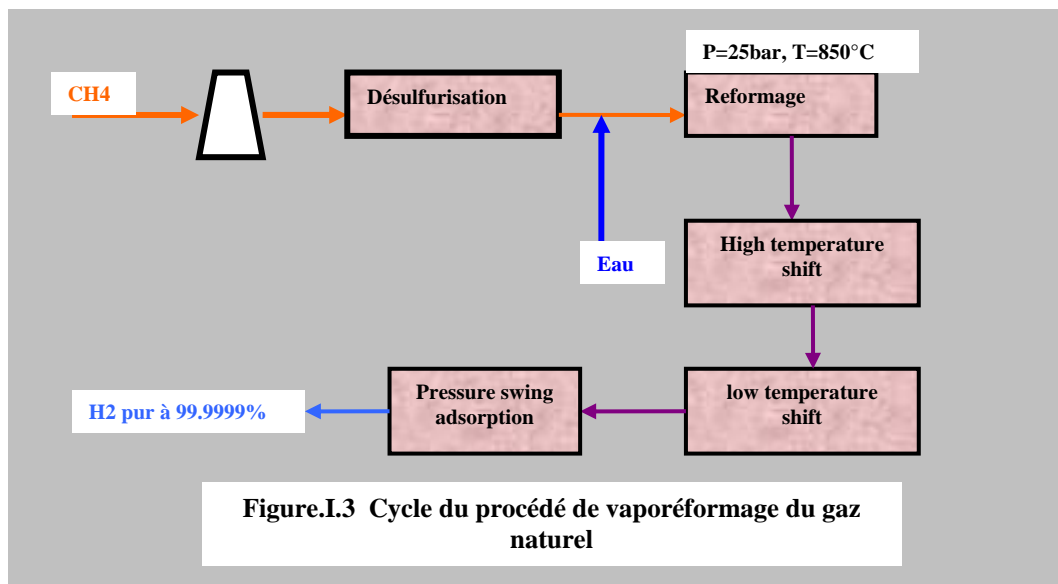
Il existe **trois techniques de reformage** selon le mélange utilisé à l'entrée:

- le **vaporeformage**: le carburant réagit avec l'eau,
- l'**oxydation partielle**: le carburant réagit avec l'air,
- le **reformage autotherme**: le carburant réagit avec l'eau et l'air.

## iii) Le vaporeformage du gaz naturel

C'est un procédé utilisé pour des alcools ou des hydrocarbures légers [10,11]. La réaction de vaporeformage est endothermique, par ailleurs, les réactifs sont sous forme gazeuse: il faut donc les vaporiser et les amener à la température du reformage, d'où la nécessité d'apporter de la chaleur.

Le gaz naturel est composé en majeure partie de méthane, mais contient aussi du CO<sub>2</sub> et du soufre. Ce dernier doit être d'abord éliminé par **désulfuration** (figure.I.3). Le procédé de vaporeformage se scinde en deux réactions, la première est la réaction du méthane avec l'eau qui produit du CO et de l'hydrogène, la seconde est la réaction de Water Gas Shift entre l'eau et le CO:



La première réaction du reformage a lieu entre 800-900°C pour une pression de 25 bars, le gaz

obtenue est un mélange riche en CO, H<sub>2</sub>, et en CO<sub>2</sub>.

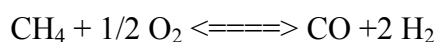
Le CO du gaz de synthèse est ensuite transformé, par conversion, en CO<sub>2</sub> avec production complémentaire de H<sub>2</sub>. Nous obtenons ainsi un gaz contenant 70 % de H<sub>2</sub>.

Le CO<sub>2</sub> est éliminé par dissolution dans une solution d'amines à 35 bars ou dans une solution de carbonate de potassium. Par détente à la pression atmosphérique, CO<sub>2</sub> est libéré, et la solution recyclée.

L'inconvénient essentiel de ce procédé vient des temps de réactivité du système lors du démarrage. En revanche, le vaporeformage permet d'obtenir les concentrations les plus importantes en hydrogène.

### **Vii) Oxydation partielle**

A la différence du vaporeformage, l'oxydation partielle est très exothermique[10,11]: la chaleur de la réaction peut ainsi être utilisée pour vaporiser et chauffer le carburant, ce qui est un avantage pour le démarrage et permet de simplifier le système. En revanche, le rendement en hydrogène est plus faible que celui du vaporeformage car celui-ci est dilué par l'azote (alimentation en air) et le CO<sub>2</sub>.



### **Vi) Le reformage autotherme**

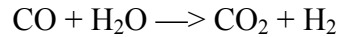
Le reformage autotherme est une combinaison des deux procédés précédents [10,11]: le carburant est mélangé avec de l'air et de l'eau. L'oxydation partielle est exothermique et la chaleur dégagée permet de fournir de la chaleur au vaporeformage qui est une réaction endothermique.

A la sortie du reformeur, le mélange gazeux est composé d'hydrogène, d'eau, de monoxyde de carbone CO, de dioxyde de carbone, de méthane, de diazote (dans le cas d'oxydation partielle ou de reformage autotherme). Le procédé de purification est une étape importante car son efficacité influera sur le rendement du système d'application (l'assemblage de piles à combustible). Il s'agit de diminuer la teneur en CO pour l'amener de quelques pourcents à moins d'un pourcent.

Il existe actuellement plusieurs techniques de purification. Nous distinguons les procédés "*chimiques*" et les procédés "*physiques*" [12].

### Vi 1) Conversion catalytique ou Le Water Gas Shift

C'est l'un des procédés "chimiques" les plus couramment utilisés. Cette réaction consiste à faire réagir le monoxyde de carbone CO avec l'eau selon la réaction:

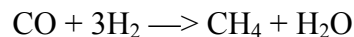


C'est une réaction catalysée (catalyseur à base de CuO-ZnO) et exothermique. Elle a le double avantage de permettre la disparition du CO et la formation simultanée d'hydrogène. Une sur-stoechiométrie en eau (p. e. un rapport Eau/CO de 3), favorise la disparition du CO. L'eau utilisée provient soit directement de la sortie du reformeur, soit est injectée en complément avant le Shift. Selon la teneur en CO en sortie du reformeur, un ou deux réacteurs de Water Gas Shift peuvent être utilisés:

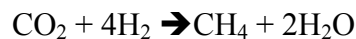
- a. **HTS (High Temperature Shift)** à des températures entre 350 et 450°C
- b. **LTS (Low Temperature Shift)** à des températures entre 200 et 250°C.

### Vi 2) Réaction de méthanation

Cette réaction se produit à 200°C, avec le catalyseur approprié. Le monoxyde de carbone est réduit à un niveau inférieur à 10 ppm.



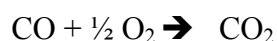
Le méthane formé en fin de réaction n'empoisonne pas l'électrode des piles, Il agit comme diluant pour l'hydrogène. L'inconvénient de cette méthode vient de la réaction possible avec le dioxyde de carbone selon:



Cette réaction est favorisée vers 200°C. La méthanation serait donc plutôt à réaliser à basse température.

### Vi 3) Réaction d'oxydation sélective

Aussi appelée **PROX (preferential oxidation)**, l'élimination du CO se fait selon la réaction :



Un mélange d'air et de combustible réformé passe sur un catalyseur. Il y a adsorption du monoxyde de carbone sur le catalyseur alors que l'hydrogène est inaltéré. L'oxygène et l'hydrogène étant mélangés pendant le procédé, l'oxydation est contrôlée pour éviter les réactions explosives.

#### Vi 4) Réacteurs à membrane

C'est une méthode physique. La technique se base sur la haute **sélectivité** des membranes telles que le palladium et ses alliages vis à vis de l'hydrogène.

Dans ce procédé (figure.I.4), l'hydrogène est adsorbé à la surface de la membrane et passe de l'état de molécule  $H_2$  à celui de deux atomes H. Ce dernier diffuse alors à travers la membrane. La quantité d'hydrogène passant à travers la membrane dépend de la surface de la membrane et du gradient de pression entre les deux faces de la membrane: le procédé nécessite des pressions et des températures élevées. Deux inconvénients majeurs freinent l'utilisation de ce procédé :

- besoins énergétiques élevés, d'où un impact sur le rendement énergétique du système.
- le coût élevé des membranes, ainsi que leur fragilité et leur sensibilité au CO.

Un avantage de cette méthode est la très haute pureté de l'hydrogène obtenu.

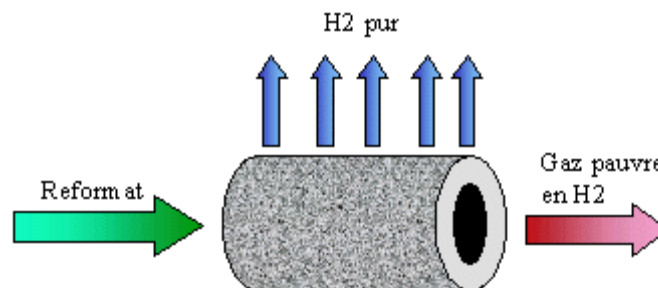


Figure.I.4 Représentation schématique d'une Membrane

#### Vi 5) Adsorption modulée en pression (AMP)

C'est une méthode physique qui permet d'obtenir de l'hydrogène très pur. Elle est basée sur la séparation des composés en phase gazeuse grâce à des lits de tamis moléculaires. Ce procédé réalisé à température ambiante nécessite des pressions de l'ordre de 20 à 25 bars ou des cycles de pression, d'où le nom de PSA (Pressure Swing Adsorption): il est donc nécessaire d'employer des compresseurs supplémentaires, d'où une diminution du rendement.

Nous décrivons ci-dessous le cycle de purification d'un mélange de gaz de four pour produire de l'hydrogène pur :

La composition du gaz d'alimentation est donnée dans le tableau I.1:

constituants	Température d'ébullition (K)	% volumique
Hydrogène	20.3	4.5
Azote	77.4	13.1
Monoxyde de carbone	81.6	6.3
Oxygène	90.2	1.0
Dioxyde de carbone	---	3.2
Méthane	111.7	26.2
Ethane	184.5	1
Hydrocarbures lourds	---	2.6
Divers	---	0.1

Tableau I.1 : composition du gaz naturel [10]

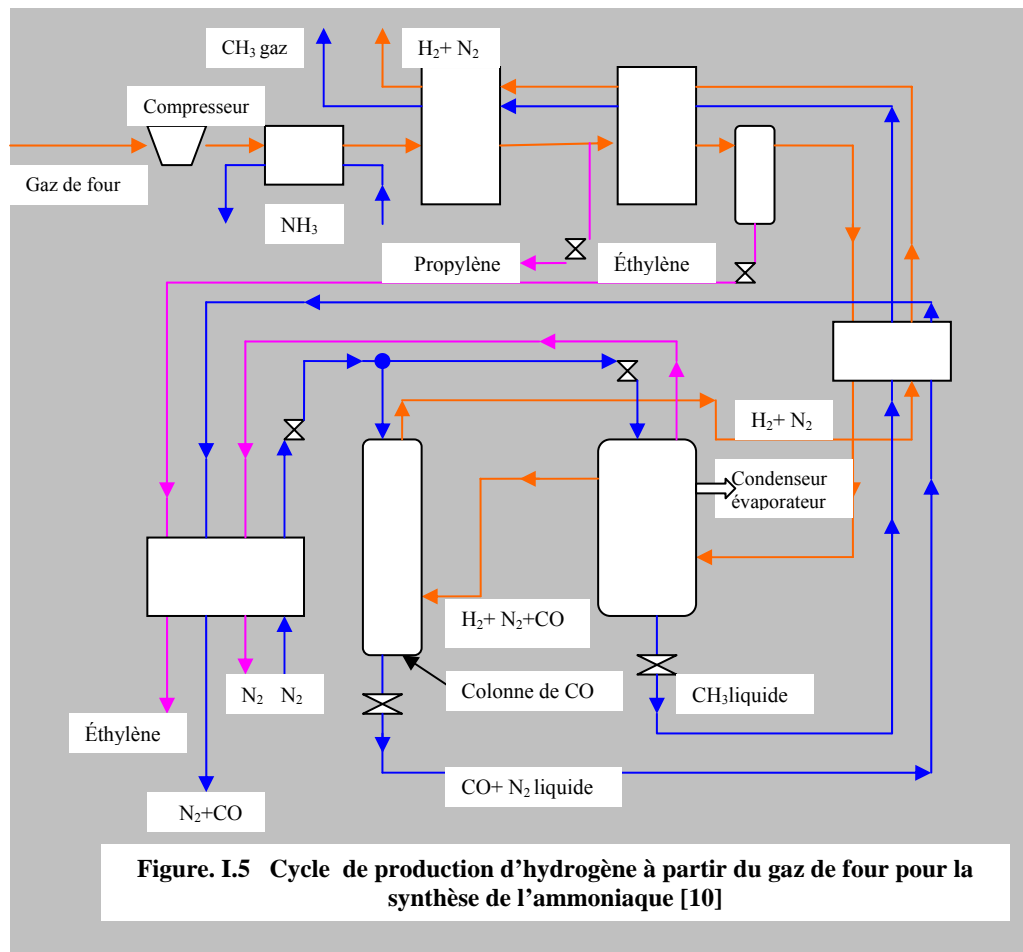
Le schéma du système de purification du mélange proposé est donné en figure.I.5

Le gaz d'alimentation est comprimé à une pression de 13 atm puis refroidi dans un système de réfrigération à l'ammoniaque à une température de  $-45^{\circ}\text{C}$ , le gaz refroidi passe à travers un échangeur dans lequel la température atteint  $-100^{\circ}\text{C}$ , à ce niveau, du propylène est condensé puis éliminé.

Après avoir traversé un deuxième échangeur, la température atteint  $-145^{\circ}\text{C}$ , de l'éthylène, de l'éthane, du propylène et une quantité de méthane sont condensés puis éliminés du mélange. Dans le troisième échangeur la température est abaissée à  $-180^{\circ}\text{C}$  et la majeure partie du méthane est supprimée. A cause de la chaleur de vaporisation élevée du méthane ce dernier n'est pas complètement éliminé à la sortie de cet échangeur.

Le mélange passe dans un condenseur évaporateur refroidi à l'azote liquide, le méthane est liquéfié à  $-190^{\circ}\text{C}$  et passe à travers les trois échangeurs de chaleur où il cède ses frigories avant d'être récupéré sous forme gazeuse.

Le mélange gazeux restant est composé d'hydrogène, d'azote, et du monoxyde de carbone. Le monoxyde de carbone est éliminé à travers un épurateur dans lequel de l'azote est introduit par le sommet et le mélange  $\text{H}_2 + \text{N}_2 + \text{CO}$  est introduit par le bas.



La composition du mélange formé dans le bas de l'épurateur est de 18% CO, 7% CH<sub>4</sub>, 2%O<sub>2</sub> au sommet de la colonne, le mélange récupéré a une composition de 75% H<sub>2</sub> et 25% N<sub>2</sub>. Il s'agit de la composition utilisée dans la synthèse de l'ammoniaque.

Pour obtenir de l'hydrogène pur, il est nécessaire d'introduire dans le système un condenseur évaporateur après l'épurateur de CO. L'azote sera condensé dans le condenseur et l'hydrogène passe à travers un adsorbant en silicagel où toutes les traces d'impuretés sont éliminées.

#### I.4.2.2 Production d'Hydrogène à partir des biomasses

Pour produire de l'hydrogène à partir de la biomasse, deux procédés sont utilisés [13] :

- Gazéification des produits municipaux ;
- Gazéification de biomasses: Les biomasses injectées dans le réacteur vapo-reforming sont converties en hydrogène à haute pression. Le chauffage intense en combinaison avec de

nouveaux catalyseurs évite la formation de dépôts carboniques et permet d'obtenir une transformation complète de la biomasse.

### **I.4.2.3 Production de l'hydrogène à partir de cycles thermochimiques**

Il y a trois manières de produire l'hydrogène à partir de l'eau [14,15] :

- la décomposition directe qui exige des températures voisines de 2900 K;
- l'électrolyse;
- la décomposition thermochimique.

La thermochimie de dissociation de l'eau est un procédé endothermique ; il doit donc être alimenté par une source de chaleur extérieure et cette chaleur doit être disponible à un niveau de température compris entre 750 et 850°C selon les procédés.

Il y a - hors sources fossiles- deux moyens de disposer d'une telle source :

- un concentrateur solaire;
- un réacteur nucléaire à haute température.

### **I.4.2.4 Production d'hydrogène à partir des procédés photo – électrolyse**

La photo électrolyse de l'eau est le procédé par lequel de la lumière est utilisée pour dissocier la molécule d'eau en hydrogène et oxygène [14, 16,17].

Les difficultés technologiques résident dans le fait que les semi-conducteurs fournissent la tension suffisante pour la décomposition de l'eau mais ils n'absorbent qu'une partie du spectre lumineux et le rendement de conversion reste faible. Il est donc nécessaire d'améliorer l'absorption lumineuse. Cette amélioration peut être obtenue par modification de la structure du semi-conducteur.

### **I.4.2.5 Hydrogène obtenu par Electrolyse de l'eau**

Nous distinguons deux types d'électrolyseur [18,19]

#### **1) Electrolyseur conventionnel :**

L'électrolyseur est alimenté:

- en matière première par une solution de potasse
- et en électricité par un courant continu de très basse tension. Sous l'action de l'électricité, l'eau est décomposée en:

- hydrogène qui se forme à la cathode,
- et en oxygène qui se forme à l'anode.

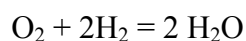
L'eau consommée est remplacée par de l'eau déminéralisée. La potasse qui ne sert qu'à conduire l'électricité au sein de la solution est recyclée.

Une partie de l'énergie électrique consommée chauffe la solution de potasse qu'il faut continuellement refroidir.

L'hydrogène extrait à pression atmosphérique de la cuve d'électrolyse, est pollué par de l'oxygène. L'hydrogène issu de l'électrolyse de l'eau contient de l'oxygène qui peut être éliminé par la réaction avec l'hydrogène présent.

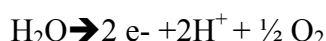
Le flux à purifier est traité vers 350°C sur un catalyseur au Palladium déposé sur alumine.

L'oxygène réagit avec l'hydrogène pour donner de l'eau selon la réaction:

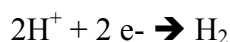


## 2) Electrolyseur à membrane :

La cellule d'électrolyse est constituée de deux électrodes (cathode et anode), d'un électrolyte et d'un générateur de courant. L'électrolyte peut être une membrane polymère échangeuse de protons ou une membrane céramique conductrice d'ions oxygène. Dans le cas d'une membrane échangeuse de protons, les réactions suivantes ont lieu: A l'anode, l'eau s'oxyde en oxygène. Les électrons partent dans le circuit.



A la cathode, les protons, passés à travers la membrane, se recombinent avec les électrons pour donner l'hydrogène.



L'eau utilisée pour ce type d'électrolyseur est très pure (déionisée) pour éviter que les impuretés ne perturbent le fonctionnement de l'électrolyse.

## I.5 Synthèse des méthodes de préparations

1. A partir des hydrocarbures (pétrole raffiné, gaz naturel ou charbon gazéifié), un reformage à la vapeur permet d'obtenir un mélange riche en hydrogène.

Le mélange obtenu doit être traité pour séparer, le monoxyde et le dioxyde de carbone, considérés comme des polluants, pour certains types de pile. C'est le procédé industriel le plus employé.

2. La deuxième source industrielle d'hydrogène est issue de la purification de sous produits de l'industrie chimique et pétrolière. Cet hydrogène est très souvent réutilisé sur place, ce qui le rend peu disponible pour d'autres besoins.

3. L'électrolyse de l'eau, est un moyen simple de production d'hydrogène. Dans le cas de l'électrolyse il faut choisir les matériaux les mieux adaptés aux anodes et cathodes des électrolyseurs pour en augmenter le rendement, comme par exemple, des cathodes revêtues d'alliages nickel-fer-zinc, de nickel ou nickel chrome à grande surface spécifique, des anodes en spinelle  $\text{NiCO}_2\text{O}_4$  revêtues de nickel ou de titane et également des électrodes améliorées par implantation d'ions ou par dépôt électrolytique d'oxyde de cobalt.

De 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.

Pour réduire significativement –si non éliminer- la production de  $\text{CO}_2$  et ainsi résoudre le problème de l'effet de serre, il n'existe que deux solutions :

- soit l'électrolyse de l'eau à partir d'électricité fournie par les énergies renouvelables;
- soit le reformage de combustibles issus de la biomasse.

À long terme, les deux procédés de production d'hydrogène consommant peu d'énergie qui offrent le plus de potentiel sont :

- la transformation directe de la biomasse en hydrogène – sans passer par la production d'électricité –
- les méthodes basées sur l'utilisation directe de la lumière solaire, dans lesquelles la production de l'hydrogène est catalysée par les photons, ce qui élimine l'étape d'électrolyse.

Parmi ces divers procédés de fabrication industrielle d'hydrogène, le choix de celui à adopter dépend des circonstances économiques du lieu et du temps et des circonstances environnementales [4].

## **I.6 Stockage de l'hydrogène et procédés de liquéfaction**

Les propriétés physico-chimiques de l'hydrogène imposent de lourdes contraintes pour son utilisation sûre.

Le problème de stockage de l'hydrogène dépend des contraintes inhérentes à l'utilisation du gaz comme la pureté, la quantité, le débit et la température d'utilisation [20]. Il est nécessaire de prendre en compte les caractéristiques de l'hydrogène telles que l'explosibilité et l'inflammabilité d'une part, et la faible valeur du rayon de l'atome d'hydrogène (H) d'autre part.

La faible taille des molécules H<sub>2</sub> facilite la diffusion dans les matériaux, métalliques ou non, et génère ainsi des fuites par perméation, altère les propriétés mécaniques par interaction avec des défauts (fragilisation) et accélère les phénomènes de corrosion.

Les risques directement liés à la pression du gaz sont limités, par l'emploi des techniques basse pression.

### **I.6.1 Stockage sous pression**

Le stockage sous forme comprimée est l'un des plus utilisés actuellement: la pression de stockage est de 200-350 à 700 bars. La compression nécessite de l'énergie, l'évaluation de celle ci dépend du processus considéré: le processus de compression isotherme obtenu par une compression à plusieurs étages avec un refroidissement entre chaque étage ou le processus adiabatique.

Le réservoir est fait de métal très résistant à la corrosion, souvent de l'aluminium. Des polymères ou des fibres en carbone sont introduits dans la structure pour réduire le poids.

Cette technique présente de multiples inconvénients tels que:

- un faible densité volumétrique,
- assurer la résistance aux chocs du réservoirs

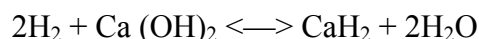
### **1.6.2 Stockage de l'hydrogène sous forme d'hydrures chimiques**

Pour le stocker sous forme d'hydrures chimiques, l'hydrogène réagit avec :

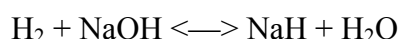
- **un métal alcalino - terreux**
- **un métal alcalin,**
- **ou un métal complexe.**

Ces réactions sont endothermiques de gauche à droite, et fortement exothermiques de droite à gauche.

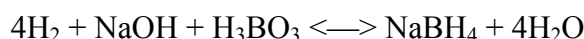
Réaction avec **un hydrure alcalino-terreux** tel que l'hydrure de calcium ( $\text{CaH}_2$ ), ce dernier réagit violemment avec l'eau à une pression normale :



La réaction avec **un hydrure alcalin** est courante et coûte très peu :



La réaction avec **un hydrure complexe** tel que L'hydrolyse du borohydrure de sodium ( $\text{NaBH}_4$ ) est fortement exothermique :



Ces réactions peuvent prendre place dans de petits contenants d'où l'hydrogène peut être libéré par réaction avec l'eau. Par ailleurs, l'emploi de ces méthodes est limité par la présence de substances hautement corrosives (l'hydroxyde de sodium  $\text{NaOH}$ ).

### I.6.3 Stockage de l'hydrogène sous la forme d'hydrures métalliques

Les hydrures métalliques sont obtenues par réaction directe de certains métaux ou alliages métalliques avec l'hydrogène, ils absorbent l'hydrogène et le restituer lorsque cela est nécessaire. Les critères de sélection d'un hydrure métallique pour le stockage de l'hydrogène dépendent de l'application envisagée (mobile : transports, objets portatifs..., stationnaire ou fixe) et de son environnement (thermique...).

Ces matériaux doivent surtout posséder :

- Une capacité massique d'absorption élevée (rapport entre la masse d'hydrogène stockée et la masse de métal employée),
- Une cinétique d'absorption/ désorption rapide,
- Une pression d'équilibre à température ambiante faible (inférieure à la pression atmosphérique) pour éviter les fuites et garantir l'intégrité du confinement,
- Et être peu sensibles aux impuretés présentes dans l'hydrogène à stocker.

Les avantages de ce mode de stockage sont:

- la sûreté, résultant de la mise en œuvre de pressions faibles,

- la compacité, la grande majorité des hydrures métalliques possédant par ailleurs des capacités volumiques d'absorption élevées (rapport entre le volume d'hydrogène stocké et le volume de métal employé).

Toutefois, ce moyen de stockage présente une limitation majeure :

- une capacité massique d'absorption réduite, comprise entre 1 et 2 %.
- D'autre part, son coût est relativement important.

Seul l'hydrure de magnésium permet d'atteindre des capacités massiques d'absorption élevées (environ 7 %) mais son utilisation est limitée par une cinétique d'absorption/désorption très lente, incompatible avec la plupart des applications envisagées.

#### **I.6.4 Stockage d'hydrogène dans les Nanotubes**

Les nanotubes de carbone, observés pour la première fois en 1991 au microscope électronique, sont composés d'une ou plusieurs feuilles de graphite enroulée(s) en forme de cylindre, d'un diamètre de l'ordre du nanomètre.

Ce sont des composés très résistants aux forces mécaniques, aptes à changer de propriétés en fonction de facteurs extérieurs, bons conducteurs électriques et thermiques.

Ces matériaux, constitués de plans graphitiques organisés en tubes concentriques sont dotés de propriétés exceptionnelles en terme d'absorption de l'hydrogène.

Le stockage dans les nanotubes de carbone repose sur le principe suivant: un gaz peut être adsorbé en surface d'un solide, où il est retenu par les forces de Van der Waals.

Une des multiples propriétés des nanotubes, est de faciliter la diffusion des gaz (remplissage et vidange rapide).

La densité de stockage d'hydrogène causée par la condensation de l'hydrogène dans la cavité du tube dépend linéairement du diamètre du tube, la majorité de l'hydrogène stocké est restitué à température et à pression ambiantes, le reste pouvant être extrait après chauffage des nanotubes.

#### **I.6.5 Stockage de l'hydrogène sous forme liquide**

Dans cette méthode, l'hydrogène est stocké sous forme liquide à  $-253^{\circ}\text{C}$  [21]. Le réservoir est à double paroi, avec entre les deux :

- un espace sous vide (pour éviter les pertes thermiques par convection)
- des super isolants
- rempli d'air liquide.

Au vu de la faible température, les pertes thermiques de même que l'évaporation d'une partie de l'hydrogène sont inévitables.

*Avant de décrire la conception d'un bac de stockage pour l'hydrogène liquide, nous nous attacherons de donner dans ce qui suit une idée générale sur les méthodes de productions des basses températures ainsi que les méthodes de liquéfaction de l'hydrogène et les particularités liées à ce fluide.*

### **I.6.5.1 Méthodes de productions des basses températures**

Il existe deux méthodes principales pour produire les basses températures [22] :

- Production par effet Joule Thomson,
- Production par détente adiabatique.

#### 1) Production des basses températures par effet Joule Thomson :

Cette méthode est caractérisée par le coefficient Joule Thomson qui est défini par :

$\mu_{JT} = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_H$  il traduit le changement de la température dû à la variation de la pression à

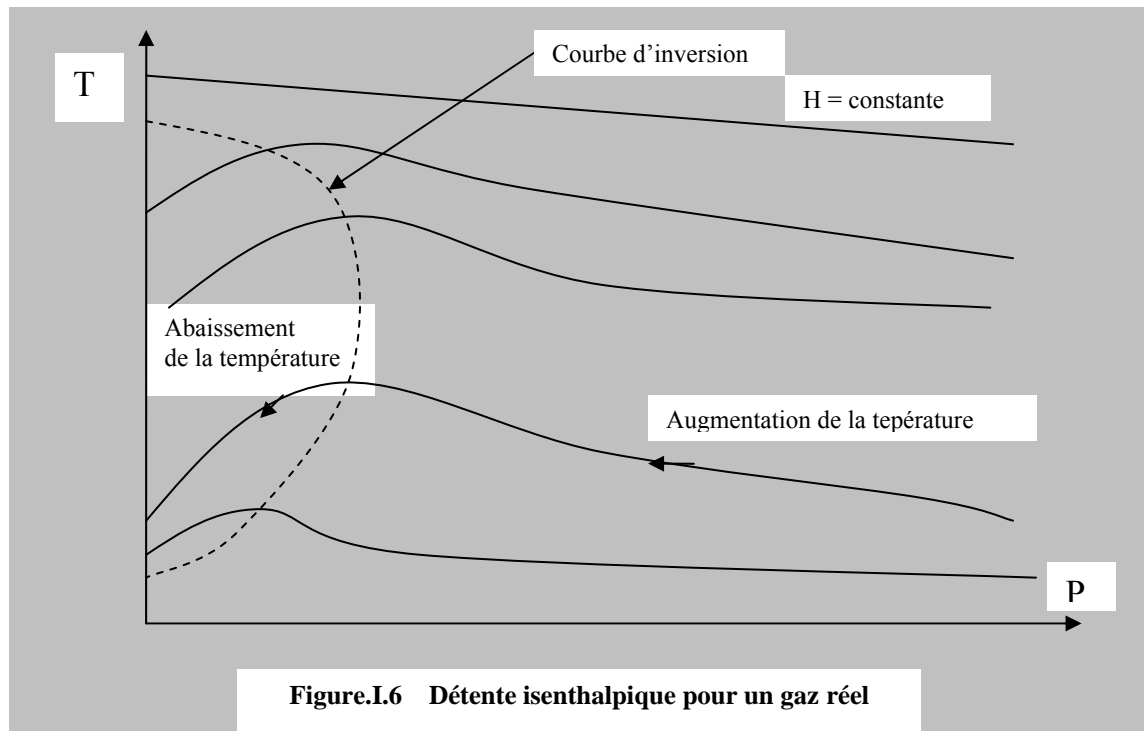
enthalpie constante. Dans le tracé du diagramme température en fonction de la pression à enthalpie constante, ce coefficient représente les pentes des lignes isenthalpiques, il s'annule tout au long de la courbe d'inversion qui est la ligne qui passe par les points maximum des enthalpies (voir Figure.I.6)

Nous observons d'après ce graphe qu'un abaissement de température est obtenu pour  $\mu_{JT} < 0$ , en revanche pour  $\mu_{JT} > 0$  la détente isenthalpique entraîne une augmentation de température.

De la figure I.6, nous pouvons conclure que les gaz sont regroupés en deux grandes catégories : la première est celle qui contient les gaz ayant une température d'inversion supérieure à la température ambiante ce groupe rassemble la plupart des gaz.

La deuxième catégorie où sont inclus les gaz tels que le néon, l'hélium et l'hydrogène rassemble les gaz ayant une température d'inversion inférieure à la température ambiante.

Cette particularité dans la différence des niveaux de températures d'inversion détermine la nature du système de liquéfaction à utiliser.



## 2) Production des basses températures par détente adiabatique :

Dans cette méthode la production des basses températures est obtenue par détente à travers une turbine. Le cas idéal serait que la détente soit réversible, adiabatique, et isentropique. Comme pour la détente Joule Thomson, nous définissons le coefficient isentropique d'expansion  $\mu_s$

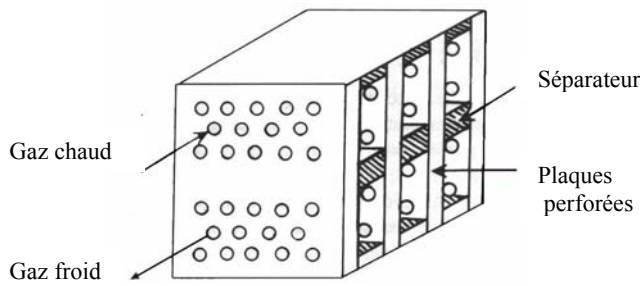
$$\text{donnés par : } \mu_s = \left( \frac{\partial T}{\partial P} \right)_s .$$

$\mu_s$  étant positif, une chute de pression entraîne par conséquent une chute de température. Donc contrairement à la détente J.T, la détente d'un gaz à travers une turbine entraîne toujours un abaissement de température, ce qui fait de cette méthode un meilleur moyen de production des basses températures.

La réfrigération du cycle est maintenue grâce à l'emploi des échangeurs de chaleur cryogéniques qui constituent l'un des composants principaux des systèmes cryogéniques.

L'efficacité d'un échangeur de chaleur dans un système cryogénique doit être de l'ordre de 85% [23] au moins, alors que pour les systèmes conventionnels, l'efficacité exigée est de 50%.

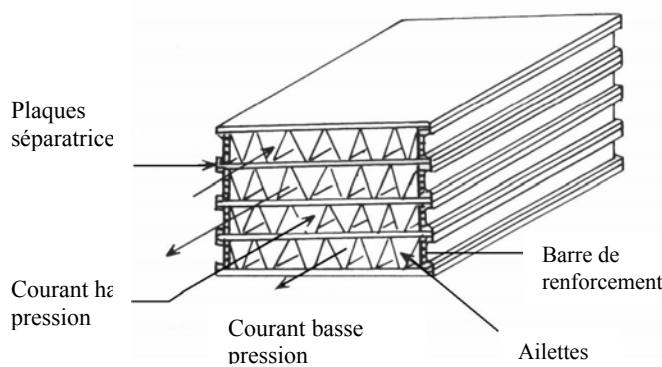
Les différents types d'échangeurs utilisés dans les systèmes cryogéniques sont représentés par les figures suivantes :



**Figure.I.7 Echangeurs à plaques perforées**

Ce sont des échangeurs à contre courant, composés d'une série de plaques perforées disposées en parallèle, séparées par des plaques en métal de faible conductivité thermique.

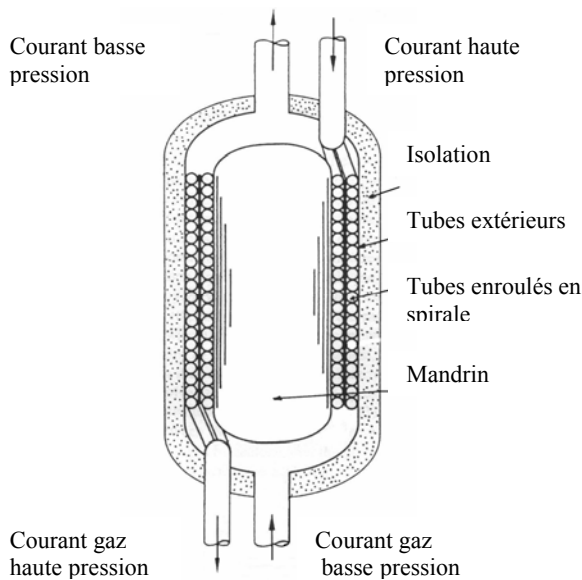
Les plaques perforées sont fabriquées avec un métal de conductivité thermique élevée tel que l'aluminium ou le cuivre.



**Figure. I.8 Echangeurs à fines plaques**

Ils sont constitués d'un empilement alternatif de plaques ondulées et de plaques plates.

Suivant le type d'arrangement employé pour la disposition des empilements, il est possible d'obtenir plusieurs configurations de l'écoulement (contre courant, courants croisés, échangeur multi phases,...) pour les systèmes cryogéniques c'est la configuration contre courant qui est la plus utilisée, étant donné qu'elle offre de meilleures performances thermiques pour une surface de transfert donnée.



**Figure. I.9 Echangeurs Giauque-Hampson**

Ils sont constitués d'un enroulement d'une série de couches de tubes de faibles diamètres autour d'un mandrin.

Le mandrin assure une stabilité mécanique, et joue le rôle de support durant la fabrication de l'échangeur.

Les couches de tubes sont successivement enroulées en directions opposées et sont séparées par des bandes séparatrices.

Les tubes sont rassemblés à chaque extrémité de l'échangeur de sorte que le fluide traverse l'extrémité de l'échangeur dans un seul tube.

Le serpentin ainsi constitué est encastré dans une enveloppe isolée, munie de deux ouvertures à chacune de ces extrémités.

Le courant haute pression traverse l'intérieur des tubes, et le courant basse pression passe à contre courant dans l'espace compris entre le revêtement extérieur et le mandrin.

### 3) Design d'un échangeur de chaleur cryogénique

Il existe deux approches dans le design d'un échangeur de chaleur :

- Efficacité ou Nombre d'Unité de Transfert NUT
- Différence des Températures Moyennes Logarithmique DTML

Concernant les problèmes de dimensionnement d'un échangeur, pour lesquels le taux de transfert et les températures finales sont connues et la surface d'échange est à déterminer, les deux méthodes donnent le même résultat.

Par ailleurs, concernant les problèmes d'évaluation, où la surface d'échange ainsi que la température d'entrée sont connues et pour lesquels il faut déterminer le taux de transfert, la méthode NUT est celle qui présente plus d'avantages, en effet :

- pour ce type de problème la méthode DTML, utilise des itérations, alors que la méthode NUT est directe.
- La méthode DTML, ne donne pas d'indications explicites concernant les performances ou l'efficacité de l'échangeur.

Dans le cas où nous voulons déterminer les températures de sorties du fluide chaud et celle du fluide froid d'un échangeur de chaleur connaissant sa surface d'échange ainsi que les températures d'entrées, les étapes de calculs sont :

1) déterminer la capacité calorifique horaire :

$$\text{Courant chaud } C_h = m_h \cdot c_h = C_{\max} \quad (2)$$

$$\text{Courant froid } C_c = m_c \cdot c_c = C_{\min} \quad (3)$$

Avec respectivement  $m_h$ ,  $m_c$  débits massiques du courant chaud et du courant froid.

Et  $c_h$ ,  $c_c$  chaleur spécifique du courant chaud et du courant froid.

2) calculer le rapport des chaleurs massiques  $C_R$  :

$$C_R = C_{\min} / C_{\max} \quad (4)$$

3) déterminer le nombre d'unité de transfert :

$$NUT = U_0 A_0 / C_{\min} \quad (5)$$

Avec  $U_0$  coefficient de transfert global et  $A_0$  surface d'échange.

4) déterminer l'inefficacité  $(1-\varepsilon)$ , ce paramètre diffère d'un type d'échangeur à l'autre, il est fonction de  $C_R$  et de  $NUT$  déterminés précédemment.

L'efficacité  $\varepsilon$  est définie par le rapport :

$$\varepsilon = \text{flux du transfert de chaleur actuel} / \text{flux du transfert de chaleur maximum possible}$$

À titre d'exemple pour un échangeur à contre courant l'inefficacité est déterminée par l'expression :

$$1 - \varepsilon = \frac{(1 - C_R) \exp[-NUT(1 - C_R)]}{1 - C_R \exp[-NUT(1 - C_R)]} \quad (6)$$

Et en fin le flux de transfert réel étant lié à l'efficacité de l'échangeur par la relation :

$$Q = \varepsilon C_{\min} (T_{h1} - T_{c1}) \quad (7)$$

Et le flux de transfert idéal est calculé par l'expression du principe de conservation de l'énergie :

$$\begin{aligned} Q &= C_h (T_{h1} - T_{h2}) \\ Q &= C_c (T_{c1} - T_{c2}) \end{aligned} \quad (8)$$

Ainsi nous pouvons déterminer les températures de sortie de fluide chaud et du fluide froid.

La méthode DTML utilise les relations :  $Q = U_0 A_0 \Delta T_m$

Avec :

$$\Delta T_m = \frac{GTD - LTD}{\ln\left(\frac{GTD}{LTD}\right)} \quad (9)$$

Où  $GTD$  : plus grande différence des températures finales

Et  $LTD$  : plus petite différence des températures finales.

Pour résoudre le même problème avec cette méthode il faut plusieurs itérations

### I.6.5.2 Systèmes de liquéfaction de l'hydrogène

La très basse température d'ébullition de L'hydrogène 20,4 K (à 1 atm) a les conséquences suivantes pour le procédé de liquéfaction [10,24]:

- L'épuration préliminaire de l'hydrogène gazeux à liquéfier.
- L'isolation thermique doit être excellente tant pour le liquéfacteur dans sa partie la plus froide que pour le stockage.

L'état liquide est obtenu en mettant en jeu une technologie de liquéfaction très sophistiquée. Cette dernière pose deux problèmes majeurs pour le cas de l'hydrogène:

1) D'une part au delà de  $-70^{\circ}\text{C}$  (température d'inversion) la détente de l'hydrogène entraîne un réchauffement des gaz et non un refroidissement. Pour palier à ce problème, il faut prévoir un pré refroidissement dans le procédé de liquéfaction.

2) D'autre part, il y a deux variétés allotropiques : ortho et para de l'hydrogène. La transformation ortho-para est exothermique, à 20K, la chaleur de conversion est supérieure à la chaleur latente de vaporisation. Il est donc nécessaire d'effectuer cette conversion dans le liquéfacteur pour éviter une vaporisation et donc une perte d'hydrogène liquide durant le stockage.

Les procédés de liquéfaction d'hydrogène comprennent obligatoirement :

- Purification et compression de l'hydrogène,
- pré refroidissement,
- conversion ortho-para à l'aide de catalyseur tel que l'oxyde de chrome,
- liquéfaction, stockage

Le choix d'un système de liquéfaction est dicté par trois fonctions [10,24]:

1. travail requis par unité de masse de gaz comprimé  $\left( -\frac{\dot{W}}{\dot{m}} \right)$
2. travail requis par unité de masse de gaz liquéfié  $\left( -\frac{\dot{W}}{\dot{m}_f} \right)$

3. fraction massique du gaz liquéfié  $y = \left( -\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} \right)$

La combinaison de ces trois fonctions donne :  $\left( -\frac{\dot{W}}{\dot{m}} \right) = \left( -\frac{\dot{W}}{\dot{m}_f} \right) y$

L'objectif est donc d'obtenir une fraction liquide maximale pour un travail requis minimal.

L'introduction du paramètre figure de mérite (FOM) défini par le rapport du travail théorique minimal au travail réel requis par le système:

$$FOM = \frac{\dot{W}_i}{\dot{W}} = \frac{\frac{-\dot{W}_i}{\dot{m}_f}}{\frac{\dot{W}}{\dot{m}_f}}$$

nous renseigne sur l'efficacité du système .

Le travail théorique minimal pour liquéfier un gaz est donné en appliquant le premier principe de la thermodynamique au cycle de Carnot (voir Figure. I.10.):

$$-\frac{\dot{W}_i}{\dot{m}} = T_1(s_1 - s_f) - (h_1 - h_f) = -\frac{\dot{W}_i}{\dot{m}_f}$$

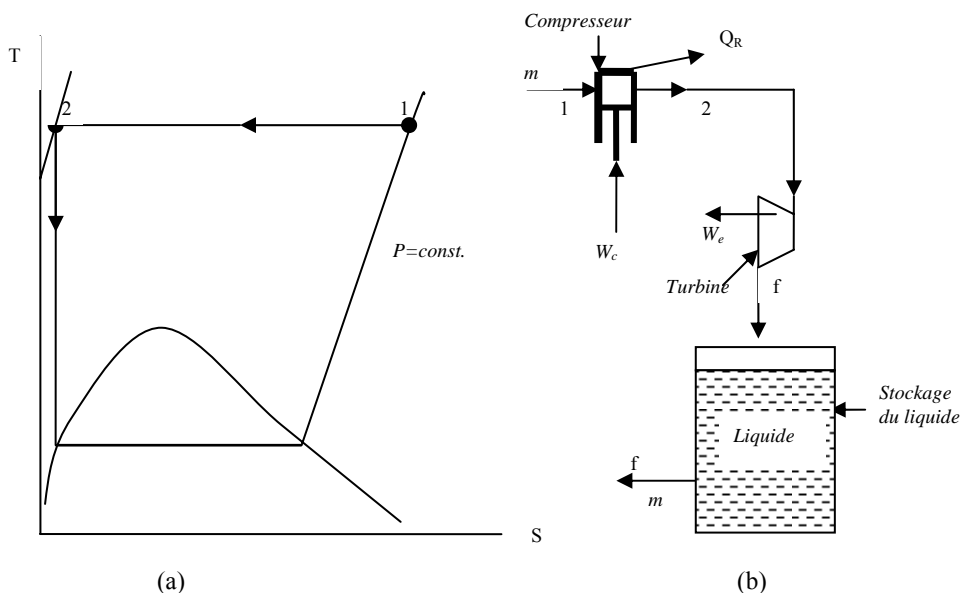


Figure. I.10 (a) cycle de Carnot, (b) production d'hydrogène en utilisant un système idéal

Les paramètres qui interviennent dans le choix d'un liquéfacteur d'hydrogène sont :

- Choix du type de réfrigérant,
- Choix du type de compresseur et de détente,
- Pression de fonctionnement du cycle épuration : le choix de la plage de la pression d'épuration adéquate minimisera les pertes en hydrogène et facilitera l'élimination d'un maximum d'impuretés.
- Pression de fonctionnement du cycle de liquéfaction : deux cas peuvent se présenter :
  - ✓ Le gaz à liquéfier est à la même pression que le gaz épuré, dans ce cas les échangeurs de chaleur utiles au refroidissement et au chauffage du gaz ne sont pas nécessaires, et le gaz n'est pas contaminé.
  - ✓ Le gaz à liquéfier est comprimé, dans ce cas, il existe une pression optimum de liquéfaction qui est indépendante de la pression utilisée dans le système d'épuration.
- Pression de fonctionnement du fluide de réfrigération : le fluide de réfrigération (généralement de l'azote ou de l'hydrogène) refroidit le gaz à traiter, les adsorbants après régénération et compense la production de chaleur qui apparaît au niveau des premières étapes de conversion.

La production du froid en dessous de la température de l'azote liquide est obtenue grâce au cycle du néon, hélium ou hydrogène.

Parmi les systèmes de liquéfaction de l'hydrogène les plus utilisés nous citons [10,24] :

- 1) *Système utilisant la détente isenthalpique (Linde Hampson Pré refroidi),*
- 2) *Système utilisant la détente isentropique (Claude pré refroidi).*

### 1) Système utilisant la détente isenthalpique (Linde Hampson Pré refroidi):

Le choix du réfrigérant du circuit de pré refroidissement dépend principalement du point triple de ce dernier, tout fluide ayant un point triple au dessous de la température d'inversion du gaz à liquéfier peut être utilisé comme réfrigérant, c'est le cas de la fluorine, l'oxygène, air, méthane, argon, et l'azote. Les quatre premiers sont à éviter pour des mesures de sécurité (explosif en contact de l'hydrogène), entre l'azote et l'argon le choix devient économique, l'argon étant plus coûteux, il est préférable d'utiliser l'azote liquide comme réfrigérant.

Principe du circuit (figure.I.11) après une compression isotherme, le gaz de production est refroidi dans un premier échangeur à trois voies : une voie pour le courant de gaz de production, une voie véhiculant les vapeurs froides provenant de l'évaporation de l'azote liquide, et la dernière voie récupère les vapeurs froides résultant de l'évaporation de l'hydrogène

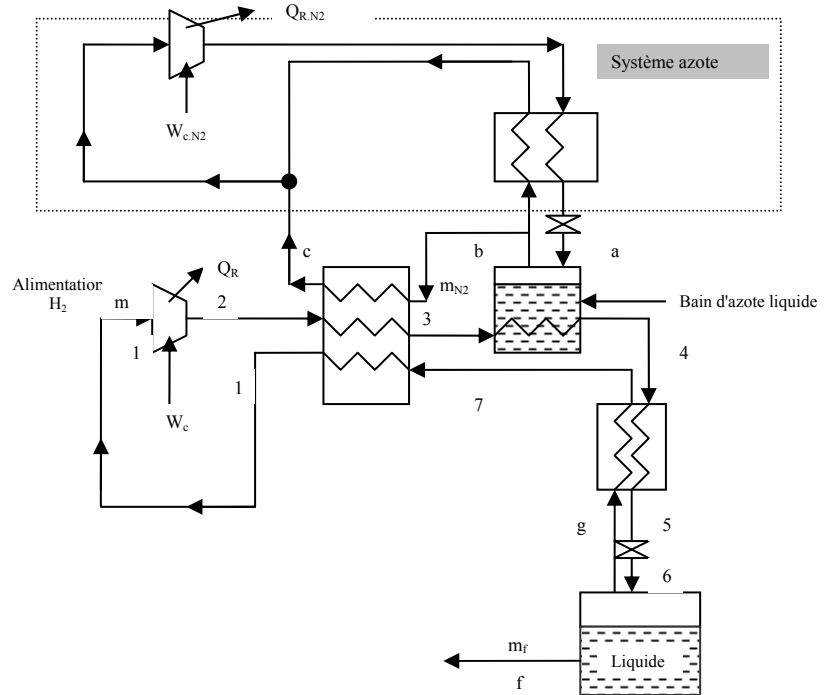


Figure.I.11 circuit de Linde Hampson pré refroidit

liquéfié. A la sortie de l'échangeur, le gaz haute pression refroidi, passe dans le bain d'azote liquide et atteint une température, approximative de 70K puis dans un dernier échangeur de chaleur à contre courant des vapeurs froides de l'hydrogène liquéfié. En fin le gaz sera détendu à travers une vanne Joule Thomson et est liquéfié à la pression atmosphérique et à une température de 20K.

Vu sa simplicité ce système est le plus utilisé à l'échelle laboratoire, il y a lieu de prévoir des réserves en azote liquide pour assurer un pré refroidissement continu du gaz d'appoint.

A échelle industrielle, il serait plus intéressant de faire une étude économique nous permettant de décider de la nécessité ou non d'installer un liquéfacteur d'azote à proximité de l'installation de liquéfaction de l'hydrogène.

A cet effet le taux d'évaporation d'azote liquide par unité de masse d'hydrogène comprimé  $z=m_{N_2}/m$  est déterminé en appliquant aux deux compresseurs la loi de conservation relative à un écoulement continu :

$$m_{N_2} h_c + \left( m - m_f \right) h_1 + m_f h_f - m_{N_2} h_a - m h_2 = 0 \quad (10)$$

Nous trouvons :

$$z = \frac{h_2 - h_1}{h_c - h_a} + y \frac{h_1 - h_f}{h_c - h_a} \quad (11)$$

En appliquant toujours la même loi, nous déterminons la fraction liquide d'hydrogène obtenu :

$$\left( m - m_f \right) h_7 + m_f h_f - m h_4 = 0 \quad (12)$$

D'où

$$y = \frac{m_f}{m} = \frac{h_7 - h_4}{h_7 - h_f} \quad (13)$$

Dans ce qui suit, nous illustrerons par un exemple numérique le calcul de :

- de la fraction liquide y,
- quantité d'azote évaporée par unité de gaz hydrogène liquéfié,
- le travail requis par unité de masse liquéfiée,
- le travail idéal,
- la figure de mérite.

Si nous considérons un cycle de Linde Hampson pré refroidi opérant dans les conditions suivantes :

Le gaz entre dans le compresseur à une température  $T=300K$  et une pression  $P = 1atm$

Il en sort à  $T=300K$  (compression isotherme) et  $P=50atm$

A la sortie du bain d'azote le gaz haute pression  $P=50atm$  et refroidi et atteint une température de  $70K$ .

A partir du diagramme T-S donné en annexe n°1, les propriétés énergétiques de l'hydrogène, sont regroupées dans le tableau I.2

Enthalpie (J/g) [hydrogène]	Entropie (J/gK) [hydrogène]	Température (K) [hydrogène]	Pression (atm) [hydrogène]
<b>h1=4200</b>	<b>S1=64.8</b>	<b>300</b>	<b>1</b>
<b>h2=4222</b>	<b>S2=48.6</b>	<b>300</b>	<b>50</b>
<b>h4=593</b>		<b>70</b>	<b>50</b>
<b>h7=726</b>		<b>70</b>	<b>1</b>
<b>hf=-256</b>		<b>20</b>	<b>1</b>
Enthalpie (J/g) [azote]	Entropie (J/gK) [azote]	Température (K) [azote]	Pression (atm) [azote]
<b>ha=14.1</b>		<b>70</b>	<b>0.38</b>
<b>hc=462.3</b>		<b>70</b>	<b>0.38</b>

Tableau I.2 propriété énergétique de l'hydrogène [25]

Nous trouvons :

$$y = \frac{h_7 - h_4}{h_7 - h_f} = \frac{726 - 593}{726 + 256} = 0.1354 \quad (14)$$

La quantité d'azote évaporée par unité d'hydrogène comprimée est :

$$z = \frac{h_2 - h_1}{h_c - h_a} + y \frac{h_1 - h_f}{h_c - h_a}$$

$$z = 1.3952 \text{ gN}_2 / \text{gH}_2 \text{liquéfier} \quad (15)$$

Le travail requis est déterminé en appliquant la première loi de la thermodynamique relative au compresseur :

$$\frac{\dot{W}}{m} = T_1(S_1 - S_2) - (h_1 - h_2) = 4882 \text{ J/g d'hydrogène comprimé} \quad (16)$$

Le travail idéal requis pour la liquéfaction de l'hydrogène est calculé comme suit :

$$-\frac{W_i}{m} = T_1(S_1 - S_f) - (h_1 - h_f) = -\frac{\dot{W}_i}{\dot{m}_f} \quad (17)$$

Ce qui donne :

$$-\frac{\dot{W}_i}{\dot{m}_f} = 12019 \text{ kJ/kg}$$

De la même façon le travail idéal requis pour la liquéfaction de l'azote est calculé égal à 768.1kJ/kg. Le système requiert un travail total égal :

$$-\frac{\dot{W}}{\dot{m}} = 4482 + 1.3952 \cdot 768.1 = 5553.65 J / g \text{ comprimé}$$

Le travail par unité de masse liquéfié est :

$$\frac{\dot{W}}{m_f} = \frac{5553.65}{0.1354} = 411016.62 J / g \text{ liquéfié.}$$

La figure de mérite du système est alors :

$$F.O.M = \frac{12.019}{41.1017} = 0.2924$$

## 2) Système utilisant la détente isentropique (Claude pré refroidi)

Dans le cycle de Claude, tel que schématisé dans la figure I.12, le gaz à liquéfier est d'abord comprimé à une pression de l'ordre de 4MPa, puis passe à travers le premier échangeur. Après le deuxième échangeur, 60 à 80% du gaz est dévié vers la turbine, où il est détendu, et rejoint par la suite le circuit des vapeurs froides récupérées à partir de l'hydrogène liquéfié. Le reste du gaz passe par le troisième et le quatrième échangeur, et est détendu à travers la vanne Joule Thomson.

En plus de la détente Joule Thomson, la turbine permet la réalisation d'une détente isentropique. Cette détente provoque une chute de pression qui entraîne une chute de température importante.

Le travail extrait de la détente du gaz est cédé au compresseur améliorant ainsi le rendement énergétique du système.

Les deux cycles cités, utilisent la réfrigération classique basée sur la compression et l'expansion pour produire les frigorifiques nécessaires à la liquéfaction, c'est une technologie maîtrisée mais les

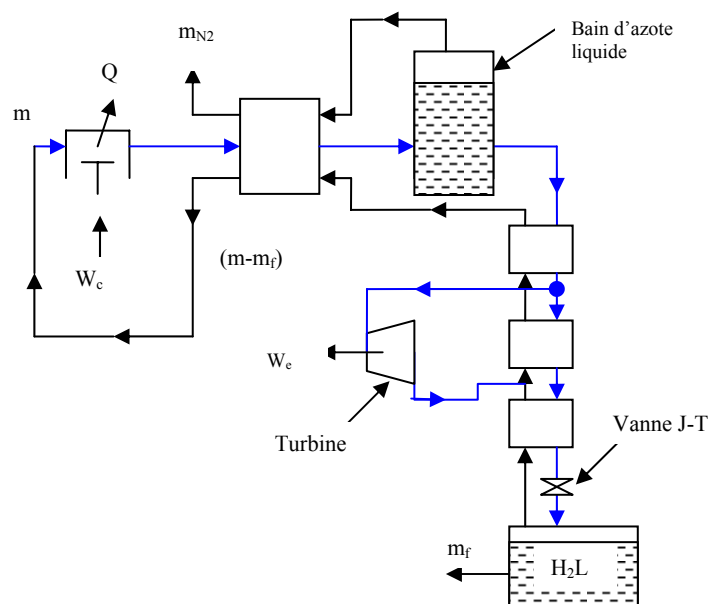


Figure I. 12 Cycle de Claude pré refroidie

pertes engendrées par le circuit de réfrigération freinent son utilisation pour la production de grande capacité de gaz liquéfié.

Les recherches actuelles développent comme alternative aux réfrigérateurs classiques, d'autres techniques de réfrigération, nous citons la réfrigération magnétique qui utilise un réfrigérant solide au lieu de gaz, elle est basée sur l'effet magnéto calorifique de matériaux utilisés à des températures proche de leur température de transition, c'est-à-dire que l'élimination et l'absorption de la chaleur se fait par le changement de température produit par la magnétisation/démagnétisation adiabatique du matériau réfrigérant.

Comme nous l'avons déjà souligné en page 35, la transformation ortho-para est exothermique, il est donc nécessaire d'effectuer cette conversion dans le liquéfacteur pour éviter une vaporisation et donc une perte d'hydrogène liquide durant le stockage.

### **I.6.5.3 Conversion ortho-para dans le liquéfacteur de l'hydrogène**

Lors de la liquéfaction de l'hydrogène la durée de séjour du gaz dans les échangeurs de chaleur est très court ce qui a pour conséquence l'obtention d'un liquide ayant la composition du gaz de départ (75%ortho). Le liquide produit et stocké tend à reprendre sa concentration originale (99.8% para) et se convertira donc en para hydrogène. La chaleur de conversion (703.3Kj/kg) requise pour le passage de l'ortho à para est plus élevée que la chaleur de vaporisation du para hydrogène (443kJ/kg), les pertes par évaporation seront par conséquent très perceptibles si des précautions ne sont pas prise.

L'utilisation de catalyseur tels que [hydroxyde de fer, oxyde chromique, ...] dont le rôle est d'augmenter la vitesse de réaction est la solution préconisée pour ce type de problème.

Le catalyseur le mieux adapté est l'hydroxyde de fer, offrant une meilleure activité, il permet d'obtenir une conversion complète avec un minimum de volume de catalyseur.

▪ En l'absence de catalyseur la transformation ortho-para suit une cinétique du second ordre [Scott et all. 1934] [24] ; la vitesse de transformation de la fraction molaire o-H<sub>2</sub> est de la forme :

$$\frac{dx_0}{dt} = -C_2 x_0^2$$

C<sub>2</sub> : constante de la vitesse de réaction, 0.0114 mole<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup> pour l'hydrogène à son point d'ébullition.

x<sub>0</sub> : fraction molaire de l'ortho H<sub>2</sub> existant à tout temps t.

L'intégration de l'expression ci-dessus au temps  $t_i$  correspondant à la composition de l'hydrogène à température ambiante (0.75 ortho) donne la fraction d'hydrogène liquide au point d'ébullition:

$$x_0 = \frac{0.75}{1 + 0.75C_2t}$$

- Si un catalyseur est mélangé à l'H<sub>2</sub> gaz un, la vitesse de réaction en phase gazeuse sera du premier ordre [Chapin et al. 1960] :

$$\frac{dx_0}{dt} = -C_1x_0$$

Avec  $C_1$  étant la constante de vitesse de réaction qui dépend de la nature du catalyseur utilisé, la température et la pression du gaz.

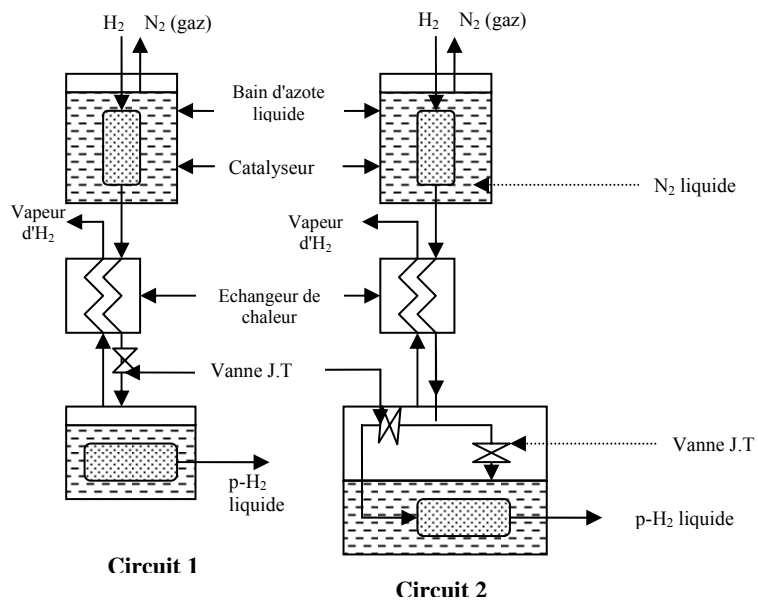
- Si le catalyseur est introduit dans la phase liquide, la réaction est d'ordre zéro [Cunningham et al 1960] :

$$\frac{dx_0}{dt} = -C_0$$

Où  $C_0$  est la constante de la vitesse de réaction qui dépend dans ce cas également de la nature du catalyseur utilisé, la température et la pression d gaz.

Dans le cas où le catalyseur est introduit dans le système de liquéfaction, les circuits possibles sont ceux schématisés ci-contre:

Dans le premier circuit, le produit obtenu après détente Joule Thompson traverse le lit catalytique, le para H<sub>2</sub> obtenu sera stocké, la vapeur dégagée servira de reflux réfrigérant dans l'échangeur de chaleur situé juste avant la détente.



Dans le deuxième circuit, le courant d'hydrogène haute pression refroidi est divisé en deux parties, l'une sera détendue et le para hydrogène obtenu rejoindra le bac de stockage et l'autre est

détendu à travers une autre vanne fournissant ainsi des frigories pour le lit catalytique et améliorant par conséquent l'efficacité du catalyseur.

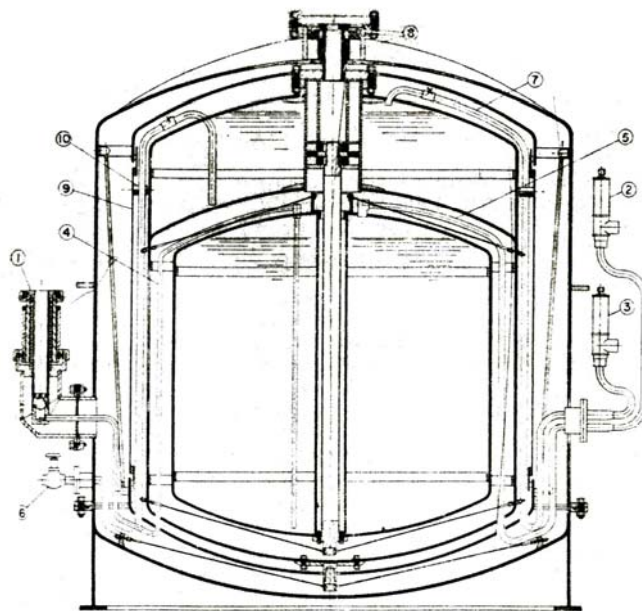
#### I.6.5.4 Description d'un réservoir de stockage pour hydrogène liquide

Le dimensionnement d'un réservoir de stockage pour fluide cryogénique a été homologué par le code ASME section VIII (1983) relatif aux réservoirs sous pression [25].

Tout réservoir de stockage pour fluide cryogénique est constitué d'une double paroi

- Une paroi interne devant résister à la pression interne, le poids du fluide, et le stress de courbure, est fabriquée avec un matériau compatible avec la nature du fluide cryogénique. L'acier inoxydable, l'aluminium, monel, et dans certains cas le cuivre sont le plus souvent utilisés. Leurs prix excessifs nous incitent à utiliser un minimum de matière en réduisant l'épaisseur du matériau choisi. Par ailleurs une épaisseur élevée nécessite une quantité de fluide très importante pour le refroidissement de la paroi pouvant provoquer ainsi des chocs thermiques.
- La paroi externe est soumise à la pression atmosphérique, n'étant pas en contact avec le fluide, cette paroi peut être fabriquée avec de l'acier au carbone.

Entre les deux parois existe une isolation (figure.I.12) dont le rôle est de réduire l'évaporation du fluide en réduisant l'apport de chaleur par les différents modes de transfert.



1. vanne d'hydrogène liquide
2. soupape de sécurité H<sub>2</sub>
3. soupape de sécurité N<sub>2</sub>
4. ligne de remplissage d'H<sub>2</sub> liquide
5. ligne d'aération H<sub>2</sub>
6. ligne de remplissage d'N<sub>2</sub>
7. ligne d'aération N<sub>2</sub>
8. contact multiple isolation-support
9. Ecran protecteur
10. Tampon en téflon
- x. soudure entre acier inox et

Figure.1.13 schéma descriptif d'un réservoir de stockage pour hydrogène liquide

La nature des matériaux à utiliser, les conditions d'assemblage (nature des soudures, forme des joints...) ainsi que toutes les informations nécessaires à la conception d'un bac de stockage se trouve dans le code ASME section VIII (1983)

Nous nous limiterons dans ce qui suit, à donner quelques renseignements concernant les différentes relations qui nous permettent de déterminer l'épaisseur de l'enveloppe et la longueur du cylindre.

Dans la construction des conteneurs des fluides cryogéniques, il faudra trouver l'épaisseur de métal compatible avec une bonne résistance mécanique et des pertes par conduction minimales. La détermination des épaisseurs minimales entraîne une diminution du poids et par conséquent du prix de revient.

Le calcul de l'épaisseur  $e$  de la paroi interne de forme cylindrique et de l'épaisseur  $e_h$  des deux couvercles de forme hémisphériques est donné selon le code ASME section VIII par:

$$e = \frac{pD}{2s_a e_w - 1.2p} = \frac{pD_0}{2s_a e_w + 0.8p} \quad \text{et} \quad e = \frac{pDK}{2s_a e_w - 0.2p} = \frac{pD_0 K}{2s_a e_w + 2p(K + 0.1)} \quad (18)$$

Où :

$p$  : pression interne du fluide,

$D$  : diamètre interne du cylindre,

$D_0$  : diamètre externe du cylindre,

$s_a$  : pression admissible du matériau,

$e_w$  : efficacité de la soudure .

$$K : \text{constante relative au diamètre} : K = \frac{1}{6} \left[ 2 + \left( \frac{D}{D_1} \right)^2 \right] \quad (19)$$

$D_1$  : diamètre minimal du couvercle elliptique.

Dans le cas d'un réservoir cylindrique en acier inoxydable 304 de capacité choisi égal à  $45\text{m}^3$  de diamètre interne 2.5m, et soumis à une pression interne de 0.8atm.

$$s_a = 129.2 \text{ MPa}$$

$$e_w = 1 \text{ (soudure par radiographie à pénétration complète)}$$

L'épaisseur de la paroi interne est égale :

$$e = \frac{(800)(2500)}{2(129200) - 1.2(800)} = 7.77 \text{ mm}$$

Tenant compte de la marge de sécurité estimée à 0.3mm selon le code ASME, l'épaisseur devient égale :  $e = 8.07 \text{ mm}$ .

L'épaisseur nominale correspondante est  $e = 9 \text{ mm}$

L'épaisseur de chacun des deux couvercles de forme hémisphérique est :

Pour 
$$K = \frac{1}{6} \left[ 2 + \left( \frac{1}{1} \right)^2 \right] = 0.5$$

$$e_h = \frac{(800)(2500)(0.5)}{2(129200) - (0.2)(800)} = 3.87 \text{ mm}$$

De même que précédemment, en tenant compte de la marge de sécurité, l'épaisseur de chacun des deux couvercles est  $e_h = 4.17 \text{ mm}$ .

L'épaisseur nominale correspondante est  $e_h = 5 \text{ mm}$

Le volume total du réservoir intérieur  $V =$  volume du cylindre intérieur + 2 fois le volume du couvercle hémisphérique.

$$V = \frac{1}{4} \Pi D^2 L + 2 * \frac{1}{12} \Pi D^3 = \frac{1}{4} \Pi (2.5)^2 L + \frac{1}{6} \Pi (2.5)^3 \quad (20)$$

Où  $L$  est la longueur du cylindre.

Pour des mesures de sécurité (évaporation du fluide) nous estimons le remplissage du réservoir à 90% au lieu de 100%.

Donc  $V = 45 + 0.1 * 45 = 49.5 \text{ m}^3$

La longueur du cylindre est :

$$L = \frac{49.5 - \frac{1}{6} \Pi (2.5)^3}{\frac{1}{4} \Pi (2.5)^2} = 8.42 \text{ m}$$

La longueur nominale correspondante est  $L = 9 \text{ m}$ .

### **1) Isolation des bacs de stockage**

La faible valeur de la chaleur de vaporisation de l'hydrogène, conduit à utiliser des conteneurs très bien isolés thermiquement [25]. La réduction des échanges thermiques avec l'extérieur est réduite par le choix des matériaux de construction du conteneur et par le choix de l'isolant.

La conduction due aux gaz est supprimée par la réalisation d'un vide entre les parois. L'argenteure de ces dernières réduit l'apport de chaleur par rayonnement, et la chaleur transmise au fluide cryogénique par conduction dans les parois est limitée par l'emploi de matériaux de faible conductivité thermique.

Le désir de supprimer tout apport de chaleur conduit à l'utilisation de matériaux plus complexes. Les paramètres essentiels qui interviennent dans le choix de l'isolant sont la conductibilité thermique, le poids et le coût.

Les performances des différents types d'isolants entre 300 et 20K ont été établies par Mac Grew [22], dans cette gamme de température, la superisolation qui est un ensemble constitué par un grand nombre d'écrans métalliques réflecteurs (aluminium) séparés par un isolant (fibre de verre, plastique ...) présente la meilleur efficacité pour un minimum de poids.

L'idée de base de la superisolation consiste en la réduction des échanges thermiques par rayonnement. Son efficacité est caractérisée par le coefficient moyen de conductibilité thermique  $K$  du matériau utilisé ou par la valeur du flux thermique  $W/A$  ( $W/cm^2$ ), ces deux grandeurs sont

liées par la relation de Fourier  $W = \frac{\overline{KA}}{X}(T_2 - T_1)$ , avec  $X$  étant l'épaisseur de l'isolant placé entre les parois aux températures  $T_1$  et  $T_2$

Les conteneurs d'hydrogène liquide de faible capacité sont souvent superisolés, par contre pour les grandes capacités, la perlite qui est une poudre constituée de fines particules minérales associées au vide est couramment utilisée.

### **2) Système de sécurité d'un bac de stockage :**

Le système de sécurité d'un bac de stockage est composé essentiellement [26]:

- 1) D'une soupape de sécurité pour l'enveloppe interne, c'est une valve chargée à ressort, réglée à une pression inférieure de 10% à la pression maximale que peut supporter l'enveloppe interne. Cette surpression est causée par l'évaporation continue de liquide stocké.
- 2) Disque de rupture, cette valve intervient au cas où l'évaporation du liquide est excessive et la soupape de sécurité citée précédemment est inopérante.

- 3) Disque de rupture de l'espace annulaire, il est utilisé pour protéger l'enveloppe externe de l'augmentation de la pression interne et protège l'enveloppe interne des fluctuations de la pression externe. Cette soupape agit en cas de fuite pouvant apparaître au niveau de l'enveloppe interne ou de l'enveloppe externe du bac de stockage.

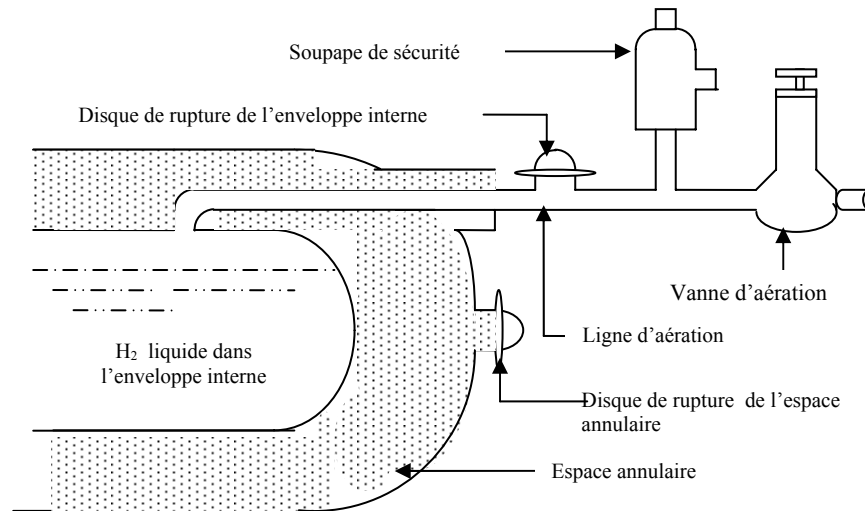


Figure. I.14 position des sécurités principales d'un conteneur d (hydrogène liquide)

### I.7 Sécurité liée à l'utilisation de l'hydrogène

Le risque majeur lié à l'utilisation de l'hydrogène est un risque de fuite [26]. Il faut l'éviter ou la contrôler grâce aux caractéristiques de l'hydrogène.

En effet l'hydrogène est un gaz:

- Extrêmement inflammable,
- Beaucoup plus léger que l'air,
- Incompatible avec certains matériaux.

#### **I.7.1 Extrêmement inflammable**

Son domaine d'inflammabilité est très vaste (4 à 75 % en volume). Une fuite d'hydrogène provoque des effets thermiques tels que les flammes, brûlures, ... en cas d'inflammation et des effets mécaniques en cas d'explosion.

#### **1) Conséquences d'un feu sur l'homme**

La flamme d'hydrogène est très peu visible et très peu rayonnante.

Le rayonnement thermique d'un feu peut causer des brûlures sur la peau si l'intensité du

rayonnement ainsi que le temps d'exposition sont suffisamment grands.

Pour un flux de  $5 \text{ kW.m}^{-2}$  les seuils de douleur et de brûlures du second degré sont :

- le seuil douloureux est atteint après 15 secondes,
- les brûlures du second degré apparaissent au bout de 40 secondes.

Pour une exposition de 40 secondes le flux incident nécessaire pour l'inflammation spontanée de divers tissus est de :

tissu	flux incident
coton	$15 \text{ kW.m}^{-2}$
laine	$17 \text{ kW.m}^{-2}$

Avec cette valeur de flux et un temps d'exposition de 40 secondes, l'inflammation de vêtements est peu probable.

## 2) Conséquence d'une explosion sur l'homme

Pour les tympans :

importance de l'explosion	conséquence
35 mbar	5 % de rupture
90 mbar	40 % de rupture
350 mbar	100 % de rupture

Pour les poumons:

importance de l'explosion	conséquence
700 mbar	début d'éclatement
3000 mbar	100 % d'éclatement

### I.7.2 Beaucoup plus léger que l'air

L'hydrogène est le plus léger de tous les gaz. A température égale. Il est 14 fois plus léger que l'air. En cas de fuite à l'air libre, le risque est donc faible car l'hydrogène va s'élever et se disperser très rapidement.

En cas de fuite à l'intérieur d'un bâtiment, il faut des aérations aux points les plus hauts pour éviter toute accumulation.

### **I.7.3 Qui fragilisent certains matériaux**

L'hydrogène n'est pas corrosif, mais avec certains matériaux, il peut provoquer un phénomène particulier appelé la fragilisation. Les connaissances actuelles sur ce phénomène permettent de choisir correctement les matériaux (et notamment les aciers) compatibles avec l'hydrogène.

L'hydrogène liquide permet de diminuer le risque global en diminuant les nombres de remplissage n de transport, et de connections.

Le risque provenant des fuites est du même ordre de grandeur pour l'hydrogène liquide que pour l'hydrogène gazeux.

Pour l'hydrogène liquide le phénomène de fragilisation est plus important, car en plus de la diffusion du gaz il y a l'effet de la très basse température du liquide.

Le contact direct avec le liquide provoque des brûlures cryogéniques qui sont de même nature que les brûlures causées par les hautes températures.

## LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

*L'ensemble de l'énergie solaire que reçoit la terre chaque année représente dix fois toutes les réserves connues d'énergie non renouvelable (c'est à dire 15000 fois la consommation annuelle mondiale [27]).*

*L'énergie solaire recèle d'énormes potentialités : en ALGERIE, un mètre carré de sol horizontal reçoit annuellement de 1000 à 3000 kWh d'énergie solaire [28].*

*L'énergie solaire se caractérise par une absence de pollution et une disponibilité exceptionnelle. D'autre part, les systèmes d'exploitation qui utilisent cette forme d'énergie demandent une maintenance légère et présentent une bonne fiabilité de fonctionnement, une autonomie de plus en plus accrue, une résistance extrême aux conditions naturelles et donc une grande longévité.*

*Le problème de cette technologie survient plus en termes de coûts qu'en termes techniques.*

*Avant, donc, d'aborder le fonctionnement de la cellule photovoltaïque en elle-même, nous nous attacherons dans la première partie de ce deuxième chapitre à expliquer quelques notions indispensables de photométrie. Nous étudierons la cellule photovoltaïque, ses composants, ses caractéristiques, son fonctionnement. Nous donnerons les différentes contraintes d'utilisation d'un tel dispositif, et les conditions nécessaires pour une utilisation optimale.*

*La deuxième partie du chapitre II, concerne la réalisation de plusieurs tests sur le panneau. L'influence des facteurs tels que l'intensité de l'ensoleillement, la température, les dimensions ... sur le fonctionnement du panneau sont discutés.*

## II.1 ETUDE THEORIQUE DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

### II.1.1 Définition

Les cellules solaires, appelées aussi cellules photovoltaïques ou photopiles transforment directement la lumière du soleil en électricité. Elles n'utilisent pas la chaleur du soleil mais l'énergie de ses photons [29].

L'effet de conversion photovoltaïque est obtenu dans tous les semi-conducteurs. Les isolants ne conviennent pas du fait de leur faible absorptivité de la lumière ; quant aux métaux, leurs concentrations élevées en électrons dans l'obscurité empêchent tout effet photovoltaïque.

Ce sont les semi-conducteurs qui sont les mieux adaptés à la conversion de la lumière visible en puissance électrique : ils donnent le produit courant-tension le plus élevé.

### II.1.2) Les semi-conducteurs

Les cristaux se séparent en deux grandes familles au voisinage du zéro absolu (- 273°C) : les métaux conducteurs de l'électricité et les isolants. Certains isolants deviennent conducteurs à plus haute température, en particulier s'ils contiennent des impuretés, des défauts cristallins ou des défauts de stœchiométrie; ce sont par définition les semi-conducteurs.

Un semi-conducteur est donc un cristal qui est isolant s'il est pur et au zéro absolu, et dont la conductivité électrique est due à l'agitation thermique, à des impuretés ou à différents types de défauts. La conductivité électrique des semi conducteurs se situe entre celle des métaux et celle des isolants.

- Dans un isolant électrique, les électrons de la matière sont liés aux atomes et ne peuvent se déplacer.
- Dans un conducteur électrique, les électrons sont totalement libres de circuler et permettent le passage d'un courant.
- Dans un semi-conducteur, la situation est intermédiaire : les électrons de valence ne peuvent circuler que s'il y a apport d'une énergie pour les libérer de leurs atomes .

### II.1.3) Principe de fonctionnement

La première étape de la conversion de la lumière en courant électrique est la génération au sein du semi-conducteur des porteurs de charges que sont les **électrons libres** et les **trous** [30].

Dans un semi-conducteur les électrons périphériques peuvent facilement s'arracher des liaisons de valence et devenir des électrons libres au sein du matériau.

Pour échapper aux liaisons atomiques et devenir des électrons libres à l'intérieur du semi-conducteur, les électrons de valence doivent acquérir un supplément d'énergie pour passer dans la bande de conduction. Ce supplément d'énergie est représenté par la bande interdite (ou band gap en anglais)  $\Delta E_g$ .

Les semi-conducteurs ont une largeur de bande interdite très faible. La quantité d'énergie requise est donc moindre. Ce supplément d'énergie peut être apporté par :

- de l'énergie thermique.
- l'énergie des photons du soleil.

Un électron qui s'arrache d'une liaison de valence laisse un "trou" derrière lui. Un trou est la liaison laissée libre par l'électron partant dans la bande de conduction.

L'atome ayant perdu un électron de valence de charge négative devient un ion positif. Il va attirer un électron d'une liaison proche qui en quittant son site fait apparaître un trou. Le trou est mobile.

L'électron étant affecté de la charge  $-e$ , le trou, qui est une absence d'électron, lui sera affecté de la charge  $+e$ .

Les atomes à quatre électrons de valence (structure en  $ns^2 np^2$ ) tel que le silicium ou le carbone ont deux ensembles de niveaux d'énergies très proches les uns des autres.

Ces deux ensembles forment deux bandes d'énergie :

- une bande liante contenant  $2n$  niveaux (pouvant recevoir  $4n$  électrons)
- une bande anti-liante à  $2n$  niveaux également :

Par mise en commun d'électrons, il se forme autour de chaque atome une couche saturée à huit électrons. La bande de valence est entièrement pleine et la bande de conduction, est vide.

Si le cristal est chauffé, un nombre  $n$  d'électrons peut être excité et passe dans la bande de conduction, laissant des places vides (en nombre  $p$ ) ou trous dans la bande de valence.

D'après le mécanisme de création de ces électrons et de ces trous,  $n = p = n_i$ ,  $n_i$  appelée concentration intrinsèque. La variation de cette quantité est donnée par la loi de Maxwell - Boltzmann [30].

$$n \cdot p = n_i^2 = N_c \cdot N_v \exp\left\{\frac{E_g(T)}{kT}\right\} \quad (1)$$

T : la température absolue (K) ;

k : la constante de Boltzmann ;

$N_c$ ,  $N_v$  : respectivement densité effective d'électrons dans la bande de conduction, densité effective de trous dans la bande de valence ( $\text{cm}^{-3}$ )

Pour séparer cette paire de charges électriques de signes opposés (positive et négative) et recueillir un courant électrique, il faut introduire un champ électrique E dans le semi-conducteur. La méthode utilisée pour créer ce champ est l'introduction d'impuretés (ou dopage) dans le semi-conducteur de la cellule.

#### **II.I.4) La jonction p-n**

La jonction **p-n** est un dispositif semi-conducteur constitué d'un cristal dont une partie a été dopée **n** et l'autre dopée **p**, les deux parties étant séparées par un plan dit de jonction.

Lorsque la jonction **p-n** est éclairée, par l'absorption de photons d'énergie  $h\nu$  supérieure ou égale à la largeur de la bande interdite, un électron de la bande de valence passe dans la bande de conduction et devient libre de se déplacer dans le cristal. Il laisse derrière lui un trou également capable de se mouvoir. Le champ électrique  $E_0$  qui règne à la jonction, a tendance à les séparer et à déplacer les électrons vers la zone **n** et les trous vers la zone **p**.

Par rapport à l'équilibre, il y a donc un excès d'électrons dans la zone **n** et de trous dans la zone **p**, ce qui se traduit par l'apparition d'un champ électrique  $E'$  opposé à  $E_0$  et d'une différence de potentiel aux bornes de la jonction éclairée: le potentiel du côté **n** est plus petit que du côté **p**: c'est l'effet photovoltaïque.

Si la cellule reste en circuit ouvert, les électrons s'accumulent dans la zone **n** et les trous dans la zone **p** jusqu'à ce que le champ  $E'$  soit égal et opposé au champ  $E_0$ . La barrière séparant la zone **n** et la zone **p** disparaît. La tension est alors maximale aux bornes de la jonction.

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone **n** rejoignent les trous de la zone **p** via la connexion extérieure: un courant électrique est alors généré [31].

#### **II.I.5) Rendement d'une photopile**

Le rendement de conversion d'une cellule photovoltaïque défini sous le spectre de référence et à une température de 25°C est le rapport de la puissance maximale pouvant être extraite, à la puissance du rayonnement incident sur la surface S de la cellule[32].

$$\eta = \frac{V_M I_M}{\text{energie totale incidente}} \quad (2)$$

Pour une énergie totale incidente de 1 kW/m<sup>2</sup> (spectre de référence), le rendement d'une photopile silicium de structure simple (à jonction p-n) aura un rendement qui ne dépassera pas les 20%.

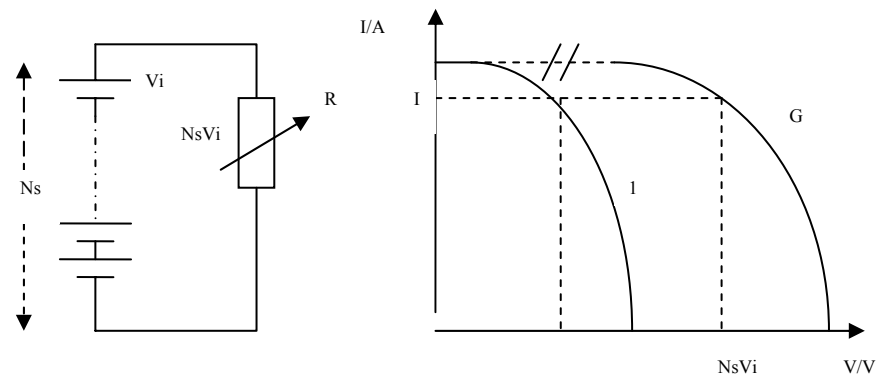
**II.I.6) Association de cellules en série :**

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné.

La courbe 1 de la figure II.1 est la caractéristique de l'une des N<sub>s</sub> cellules du groupement série

La courbe G est obtenue en multipliant point par point et pour un même courant, la tension par N<sub>s</sub> fermée sur

une charge R, le groupement série délivrera le courant I sous la tension N<sub>s</sub>V<sub>i</sub> la charge optimale R pour le groupement série est N<sub>s</sub> fois plus grande que la charge optimale pour une cellule de base [33].

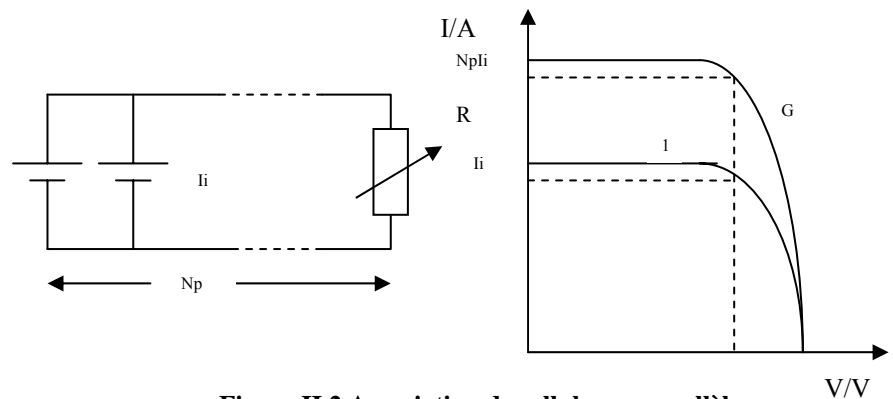


**Figure II.1 Association de cellules en série**

**II.I.7) Association de cellules en parallèle :**

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle figure II.2, les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent.

La caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée.



**Figure II.2 Association de cellules en parallèle**

La courbe 1 est la caractéristique de l'une des  $N_p$  cellules du regroupement en parallèle. La courbe G est obtenue en multipliant point par point et pour une même tension le courant par  $N_p$ .

Fermé sur une charge R, le groupement parallèle délivrera le courant  $N_p I_i$  sous la tension V. Dans ce cas la charge optimale pour le groupement parallèle est  $N_p$  fois plus faible que la charge optimale pour une cellule de base.

### **II.1.8) Paramètres influant sur le rendement des cellules photovoltaïques**

Le rendement maximum actuellement atteint par les cellules solaires au silicium est d'environ 14%, le rendement moyen de fabrication se situant aux environs de 11%. Ces faibles valeurs de rendement sont attribuées à des causes d'ordre soit purement physiques, soit technologiques [34]:

1°/ une partie des photons incidents est réfléchi par la surface du semi conducteur. Certains traitements permettent de diminuer le coefficient de réflexion de la surface, cependant il reste encore élevé, et est de l'ordre de 10%

2°/ les photons qui ont pénétré dans le matériau ne sont pas tous utilisés : ceux dont l'énergie est inférieure au saut d'énergie du semi conducteur traversent le matériau, par contre, chaque photon dont l'énergie est supérieure à ce saut d'énergie libère une paire électron – trou, et une seule, quelque soit l'énergie correspondante du photon, l'énergie excédentaire étant cédée très rapidement au réseau cristallin sous forme de chaleur.

3°/ D'autres causes de pertes de rendement sont plus directement liées à la technologie.

L'efficacité de collection, définie comme étant le rapport entre le débit de charges participants au courant photoélectrique et le nombre de paire d'électron - trou libérées par unité de temps, est très inférieur à 1, les traitements thermiques et chimiques subits par le semi conducteur au cours de la fabrication, en sont les principaux responsables.

## II. II ETUDE EXPERIMENTALE DU PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE

Avant d'entamer cette partie de l'étude, les quelques informations que nous avons concernant les cellules photovoltaïques se limitaient au fait qu'il s'agissait d'éléments dont le fonctionnement est proche de celui des piles électriques possédant un pôle positif et un pôle négatif, nous savions également que l'électricité est obtenue lorsque la surface de la cellule est exposée à la lumière.

La meilleure façon de comprendre le fonctionnement d'un appareillage donné, est de lui faire subir des tests spécifiques.

Les cellules solaires sont soumises à des conditions très variables dont certaines augmentent leurs qualités, d'autre au contraire les limitent.

Les variables ayant une influence significative sur la quantité d'énergie que nous pouvons extraire d'une cellule photovoltaïque et sur les conditions optimales de fonctionnement de ces cellules sont [35]:

1. la lumière : elle atteint la surface de la cellule avec des quantités variables.
2. La température : la cellule photovoltaïque est adaptée non seulement aux régions ensoleillées mais également pour les endroits qui connaissent un faible ensoleillement
3. La surface : les cellules solaires sont fabriquées avec des dimensions variables.
4. La charge : la cellule photovoltaïque est conçue pour alimenter divers appareils.

Pour connaître le degré de l'influence de chaque variable sur le fonctionnement de la cellule, nous faisons varier chacune des variables tout en maintenant les autres fixes.

A cet effet nous avons mis au point un dispositif expérimental constitué :

- D'un panneau photovoltaïque, comprenant 4 cellules au silicium disposées en parallèle, de dimensions  $2.5 \times 5 \text{ cm}^2$  chacune (photo n°II.1);
- D'une charge à résistances variables [ $7.10^{-3}$  à  $2\text{k}\Omega$ ];
- D'un pyranomètre, instrument de mesure qui capte l'intensité de l'éclairement du soleil ;
- De deux thermocouples, le premier mesure la température ambiante et le deuxième mesure la température du panneau ;
- D'une chaîne d'acquisition qui enregistre simultanément les variations de tension, courant, températures et ensoleillement global.



Photo n°II.1: panneau photovoltaïque

Dans les expérimentations, un pyranomètre (figureII.3) a été utilisé, il livre une irradiance indépendante du spectre de lumière.

Le pyranomètre est couvert par deux miroirs sphériques ; les radiations solaires frappent une surface plane qui s'échauffe. Plus les radiations sont fortes plus la plaque s'échauffe ; la température est mesurée par un thermocouple ; un autre thermocouple mesure la

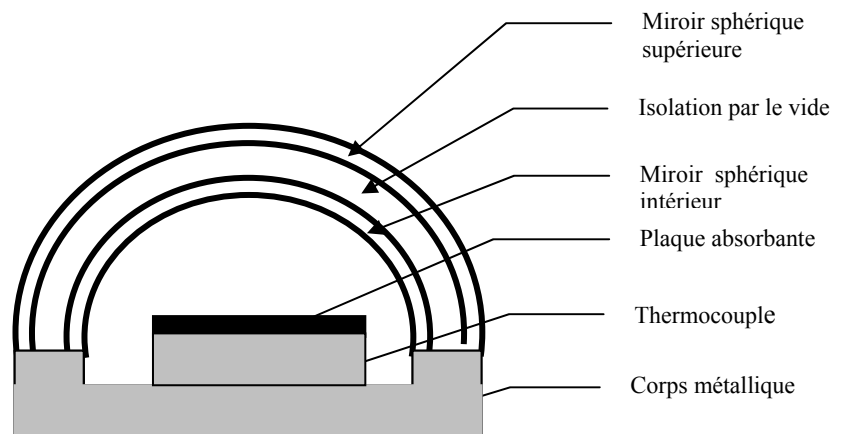


Figure II.3 Schéma d'un pyranomètre

température d'une seconde plaque non soumise aux radiations solaires prises comme référence. Les thermocouples délivrent une tension directement proportionnelle à l'irradiance solaire[36,37].

### II.2.1) influence de la lumière sur les caractéristiques électriques de la cellule

Le but de cette manipulation est d'étudier l'influence de la lumière du soleil sur l'intensité du courant court circuit  $I_{cc}$  et sur la tension à circuit ouvert  $V_{co}$ ,

Par définition  $I_{cc}$  représente le courant maximal que le panneau peut fournir, il est obtenu en connectant les bornes du panneau à une résistance négligeable.

La tension à circuit ouvert est obtenue en branchant la cellule sur une résistance infinie, c'est la tension maximale délivrée par le panneau. [33,34]

Nous avons pour cela réalisé le dispositif expérimental représenté par la figure II.2

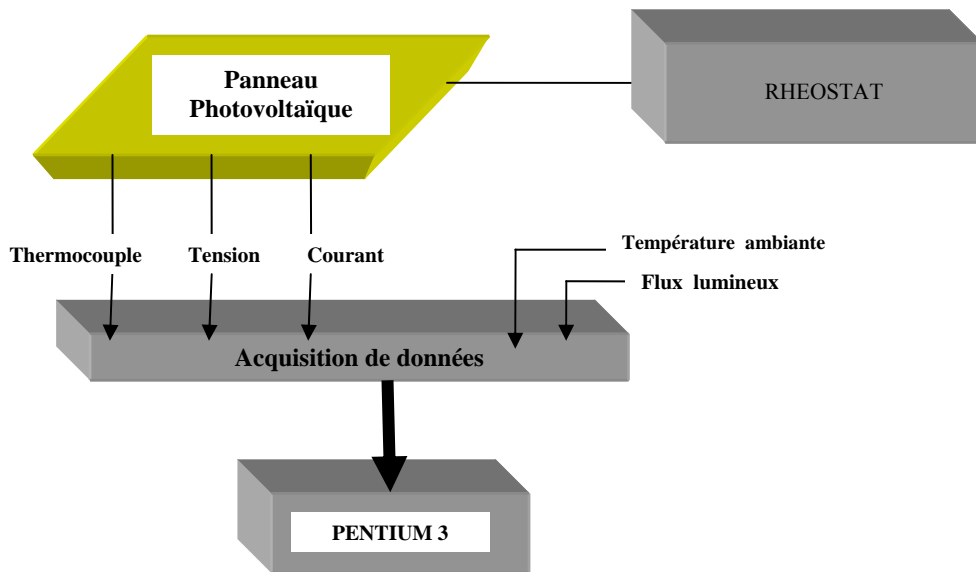


Figure II.4 Configuration du système expérimental

### II.2.1-a) Influence de la lumière sur $V_{co}$ :

Pour réaliser ce test nous avons connecté le panneau photovoltaïque sur une résistance élevée de l'ordre de  $2k\Omega$  et avons enregistré la variation de  $V_{co}$ . Pour avoir une idée sur les conditions climatiques dans lesquelles s'est déroulée l'expérience, nous traçons en premier la variation de l'éclairement du soleil durant toute la période de l'expérience pour la journée du 29/07/02 à 13h17mn au 30/07/02 à 13h17 mn ; le tracé des points expérimentaux donne la courbe de la figure II.5:

L'allure de la courbe indique un temps très clair sans nuage, l'ensoleillement maximal est mesuré égal à  $918,580 \text{ W/m}^2$  à 13h17, la température moyenne de la cellule est de  $27,1^\circ\text{C}$  pour un pas d'une heure choisi, nous observons la diminution graduelle de l'éclairement jusqu'à atteindre la valeur zéro à 20h 17mn correspondant au coucher du soleil,

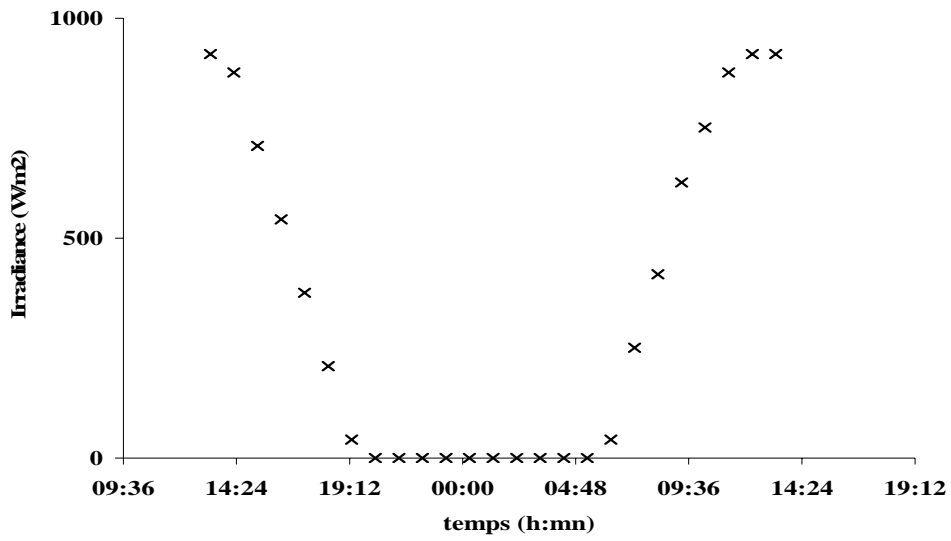


Figure II.5 Eclairage solaire de la journée

L'enregistrement de la tension à circuit ouvert  $V_{co}$  se faisant simultanément, nous obtenons la courbe de la figure II.6:

Avant le lever du soleil correspondant à un éclairage faible ou nul, la tension délivrée est négligeable  $V_{co} = 0,073 \text{ V}$ .

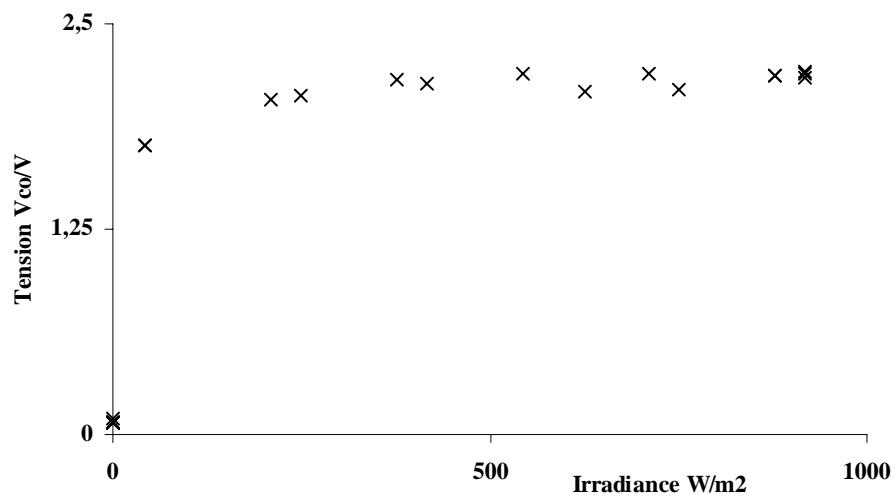


Figure II.6. Influence de l'irradiance sur la tension circuit ouvert

Dès l'apparition de la lumière,  $V_{co}$  passe de 0,073V à 1,762V pendant une durée  $t$  égal à une heure, puis se stabilise à une valeur moyenne de 2,135V, pendant toute la période de fonctionnement du panneau, jusqu'à disparition du faisceau lumineux.

Globalement, nous concluons que la tension du panneau n'est influencée par l'éclairement qu'au début de l'injection de la lumière.

### II.2.1-b) Influence de la lumière sur $I_{cc}$ :

Pour mesurer  $I_{cc}$ , le panneau est branché à une résistance négligeable de l'ordre de  $0,007\Omega$ .

La mesure des paramètres étant réalisée grâce à une chaîne de mesure où l'acquisition des données est faite via un Pentium 3. En une première étape, et comme pour le cas précédent, nous traçons la courbe de variation de l'ensoleillement en fonction du temps figure II.7, l'expérience étant réalisée du 30/07/02 à 13 h 32 au 31/07/02 à 12h 32 l'allure du graphe obtenu est:

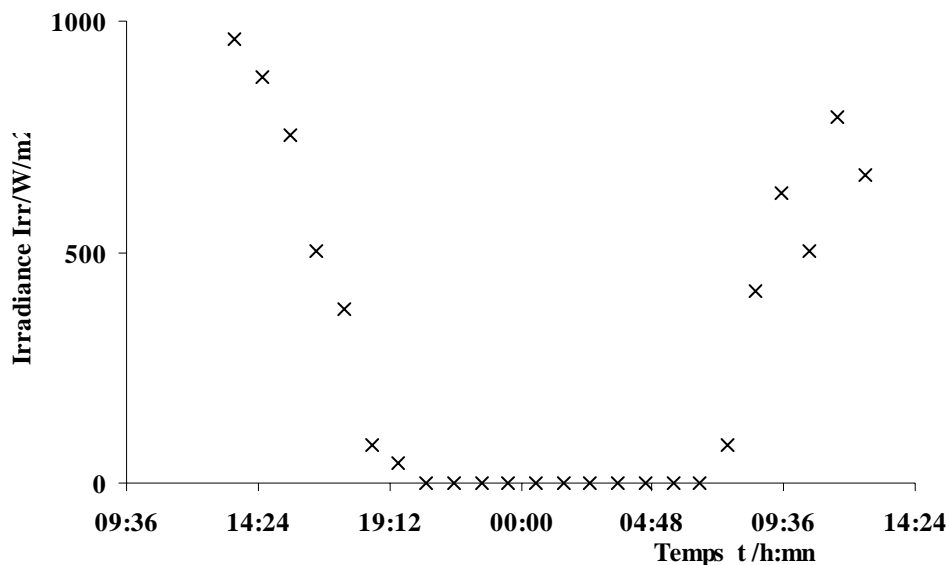


Figure II.7 Eclairement solaire de la journée

Pour la demi journée du 30, le ciel était clair d'où la diminution graduelle de l'éclairement, dans la journée du 31, nous avons relevé l'existence de quelques nuages, ce qui explique la présence des points aberrants dans la deuxième partie de la courbe.

L'ensoleillement maximal est enregistré à 13h32 égal à  $960,33\text{W/m}^2$  la température moyenne de la cellule est de  $T = 26^\circ\text{C}$

L'enregistrement du courant  $I_{cc}$  se faisant simultanément, nous obtenons la courbe de la figure II.8 :

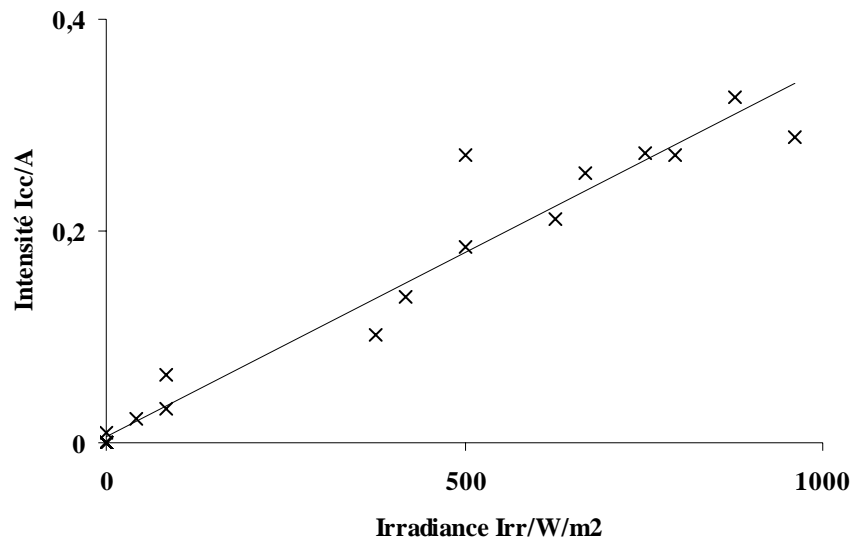


Figure II.8 Influence de l'irradiance sur le courant court circuit

Contrairement à la tension à circuit ouvert, nous constatons l'allure linéaire de la courbe  $I_{cc}$  en fonction de l'ensoleillement  $Irr$ ;  $I_{cc}$  augmente avec l'intensité de l'éclairement, nous déduisons que le courant à circuit fermé est très sensible à l'intensité de la lumière.

### II.2.2) influence de la température sur le fonctionnement de la cellule.

Dans les conditions naturelles, ce test consisterait à varier le climat de la terre, tout en maintenant la position du soleil fixe. Malheureusement tout au long de la réalisation des expériences la température ambiante et par conséquent la température de la cellule n'a pas trop varié, il nous a donc été impossible d'étudier expérimentalement la variation de la tension à circuit ouvert et du courant court circuit en fonction de la température.

La théorie indique que la tension  $V_{co}$  est inversement proportionnelle à la température contrairement au courant qui varie peu avec la température.

En terme de puissance, qui n'est autre que le produit du courant par la tension, nous pouvons conclure que la puissance extraite du panneau augmente avec la diminution de la température.

### II.2.3) influence des conditions météorologiques sur la température de la cellule

Pour concevoir un système photovoltaïque, il faut estimer la tension de la cellule et le débit de puissance sous différentes conditions.

Comme nous venons de le voir, ces deux paramètres sont largement influencés par la température de la cellule, il serait par conséquent utile d'examiner comment varie cette température en fonction des conditions météorologiques à savoir la température ambiante, la vitesse du vent et l'ensoleillement

Étant donné la couleur sombre de la cellule, la température de cette dernière est supérieure à la température ambiante.

Par ailleurs si l'emplacement du panneau photovoltaïque favorise la convection du vent, la température de la cellule dans ce cas est plus basse que la température ambiante.

La littérature [33,34], indique que le gradient de température est une fonction linéaire de l'irradiance globale,  $\Delta T = a \text{ Irr}$ , où le facteur de proportionnalité « a » [ $^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$ ] est fonction de la vitesse du vent, la détermination de la vitesse du vent n'étant pas accessible, nous n'avons donc pas pu vérifier l'équation sus citée expérimentalement.

#### **II.2.4) influence de la surface**

Ne disposant que d'un seul panneau photovoltaïque, nous n'avons malheureusement pas pu mettre en évidence expérimentalement l'influence des dimensions de la cellule sur ses paramètres électriques, néanmoins, la théorie indique que l'augmentation de la surface de la cellule influe considérablement sur le courant de sorte que l'intensité du courant croît par le même facteur de croissance que celui de la surface.

Contrairement, la tension ne varie pas quelque soit les dimensions de la cellule.

#### **II.2.5) influence de la charge**

Nous avons réalisé cette expérience, dans les conditions suivantes :

Le panneau est exposé au soleil suivant une position horizontale ;

Il est branché aux extrémités d'une charge à résistances variables ;

Nous faisons varier la résistance dans une gamme de  $7 \cdot 10^{-3}$  à  $2 \text{ k}\Omega$ , les valeurs de la tension, du courant, des températures et de l'éclairement du soleil, sont enregistrées via la chaîne de mesure, nous obtenons la courbe de la figure II.9 :

Pour une température moyenne de la cellule  $T = 28^{\circ}\text{C}$ , l'expérience débute pour une résistance très faible  $R = 0,007\Omega$ , il lui correspond un courant court circuit  $I_{cc} = 0,216\text{A}$ , le courant est constant pour les faibles résistances puis à partir d'une résistance  $R = 7\Omega$  (calculée) nous

constatons une diminution linéaire de courant, jusqu'à atteindre la valeur zéro, pour lequel la tension circuit ouvert  $V_{co} = 2,117V$

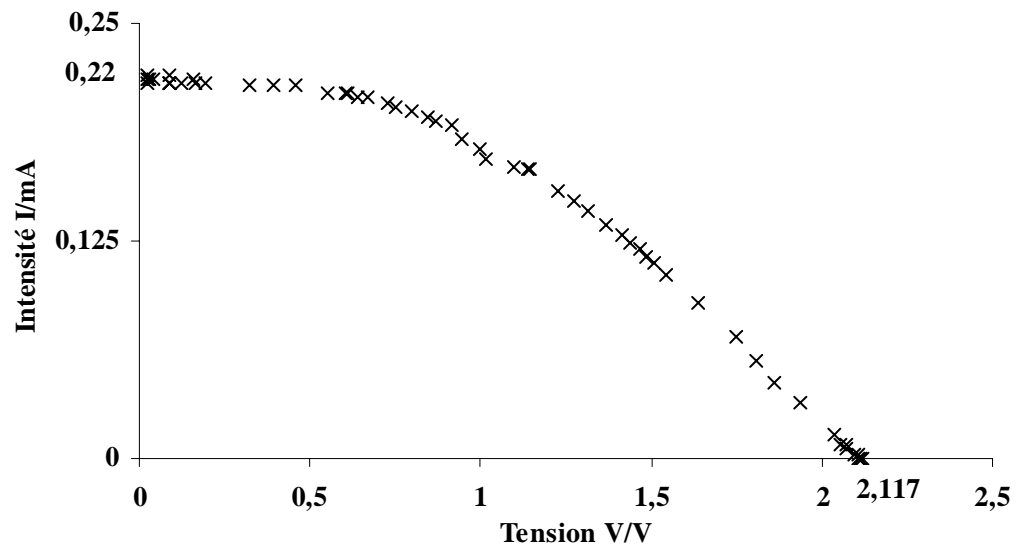


Figure II.9 Influence de la charge sur la caractéristique I-V

Pour tirer profit de ces mesures, il serait plus intéressant de connaître la variation de la puissance extraite à partir du panneau, pour cela nous traçons la courbe de puissance  $P = I \cdot V$  en fonction de V et obtenons la courbe de la figure II.10

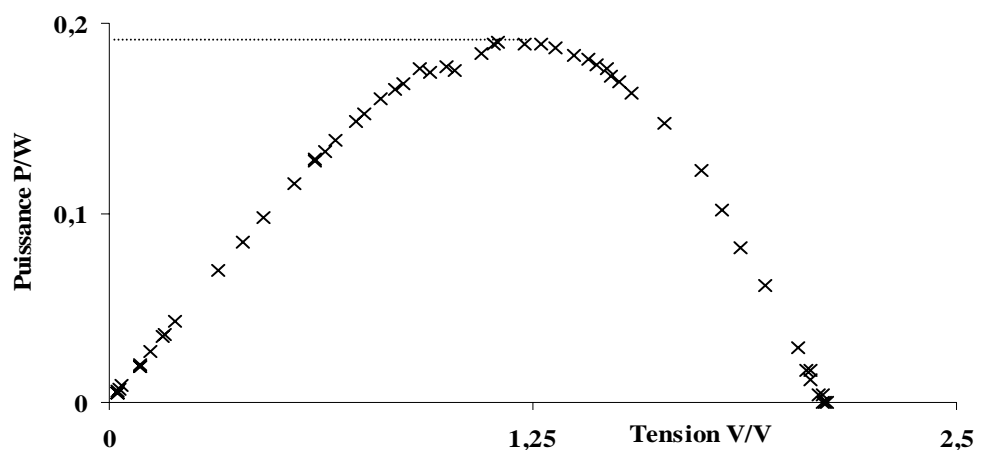


Figure II.10 Courbe de puissance

Le sommet de la courbe correspond au maximum de puissance que l'on peut extraire du panneau, il lui correspond nécessairement une résistance de la charge optimale.

Pour trouver l'intensité, la tension et la résistance au point maximal de puissance, nous procédons comme suit:

Sur le même graphe (figure II.11), nous traçons les deux courbes  $I = f(V)$  et  $P=f(V)$ , à partir du point maximal de la courbe puissance, nous traçons la perpendiculaire, l'intersection de cette dernière avec la caractéristique de la cellule  $I=f(V)$  donne  $I_{max}$  et  $V_{max}$  ; en divisant la tension par le courant nous obtenons la valeur de la résistance correspondant au point maximal de puissance. Ainsi l'utilisation de cette résistance aux bornes de la cellule correspond aux conditions optimales opératoires de la cellule.

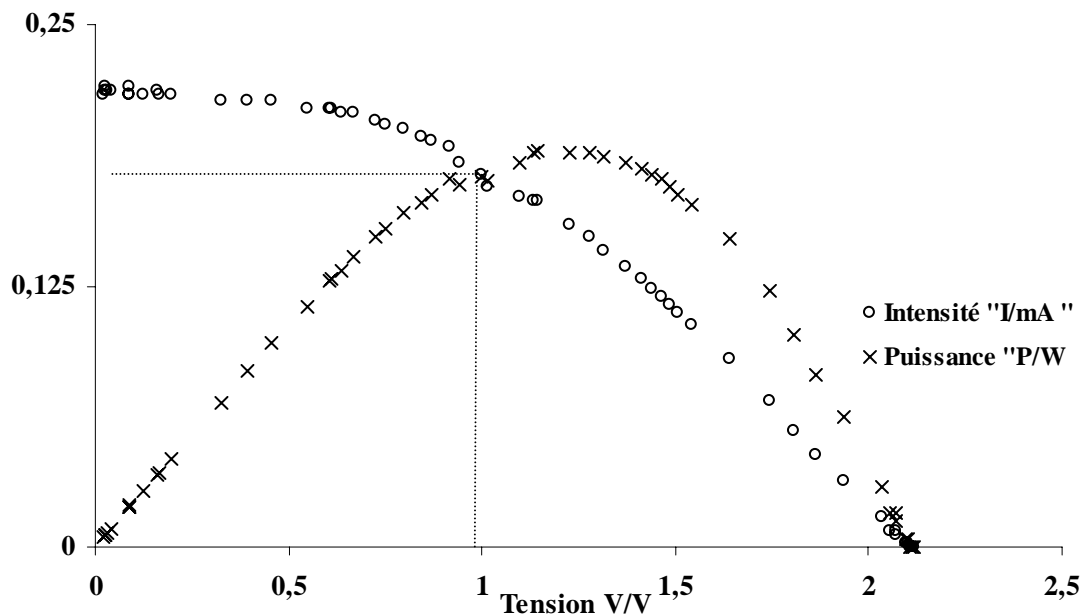


Figure II.11 détermination de la charge optimale

Dans ce cas nous trouvons à  $T_c = 28^\circ\text{C}$  et  $I_{rr} = 667.313\text{W/m}^2$

P (W)	$V_{max}$ (V)	$I_{max}$ (A)	$R_{opt}$ ( $\Omega$ )	$V_{co}$ (V)	$I_{cc}$ (A)
0,19	1,145	0,166	6.89 ~7	2,117	0,22

Dans ce contexte, nous introduisons le facteur de forme FF défini par [34]:

$$FF = \frac{I_{max} * V_{max}}{I_{cc} * V_{co}} = \frac{0.166 * 1.145}{0.22 * 2.117} \approx 41\%$$

L'ordre de grandeur de ce facteur pour les panneaux commerciaux est de 70% [38].

### II.2.6) Influence de l'irradiance sur les caractéristiques électriques du panneau

Comme le panneau photovoltaïque en fonctionnement est soumis à différents éclairagements, il serait également intéressant d'étudier sa caractéristique  $I=f(V)$  en fonction des différentes intensités de la lumière, pour cela, nous avons réalisé l'expérience de la caractéristique I-V pour différents éclairagements de la journée, les résultats obtenus sont regroupés sur la figure II.12 :

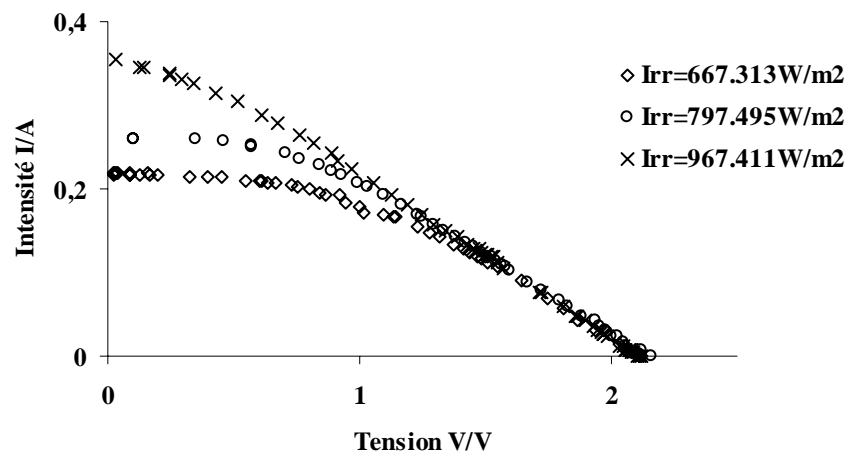


Figure II.12 Influence de l'irradiance sur la caractéristique I-V

#### Commentaires:

Ce graphique indique que le courant produit par la cellule est très sensible à la variation de l'intensité de la lumière, il croît avec l'augmentation de l'intensité de l'éclairage, ce qui signifie que pour un éclairage maximal se produisant dans les conditions naturelles quand le soleil est au zénith, il lui correspond un courant élevé.

Contrairement, l'influence de l'intensité de l'éclairage sur la tension délivrée par le panneau n'est apparente, qu'en début de l'apparition de la lumière, puis reste constante pour n'importe quelle valeur de l'éclairage différent de zéro.

Nous déduisons à partir de ce test que la puissance extraite du panneau est maximale pour un éclairage élevé, en effet le tracé des courbes de puissances en fonction de la tension pour différentes intensités de l'éclairage, donne des paraboles présentant un maximum chacune, dont le plus élevé est celui correspondant à l'intensité de l'éclairage le plus élevé comme indiqué dans figure II.13:

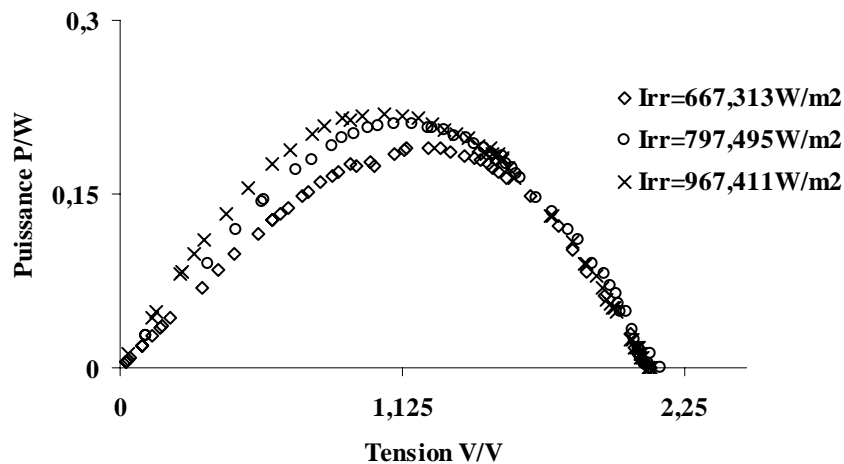


Figure II.13 Les courbes de puissances

### II.2.7) Calcul du rendement du panneau photovoltaïque :

Le rendement du panneau est défini par la relation [32,34]:

$$\eta = \frac{I_{\max} * V_{\max}}{Irr * S} = \frac{P_{\max}}{Irr * S}$$

Il est fonction de l'irradiance Irr du soleil, de la puissance  $P_{\max}$ , extraite et de la surface S du panneau.

Pour une irradiance maximale de 967,41 W/m<sup>2</sup>

$P = 0,21$  W

$S = 50$  cm<sup>2</sup>

Nous trouvons  $\eta = 4,34\%$

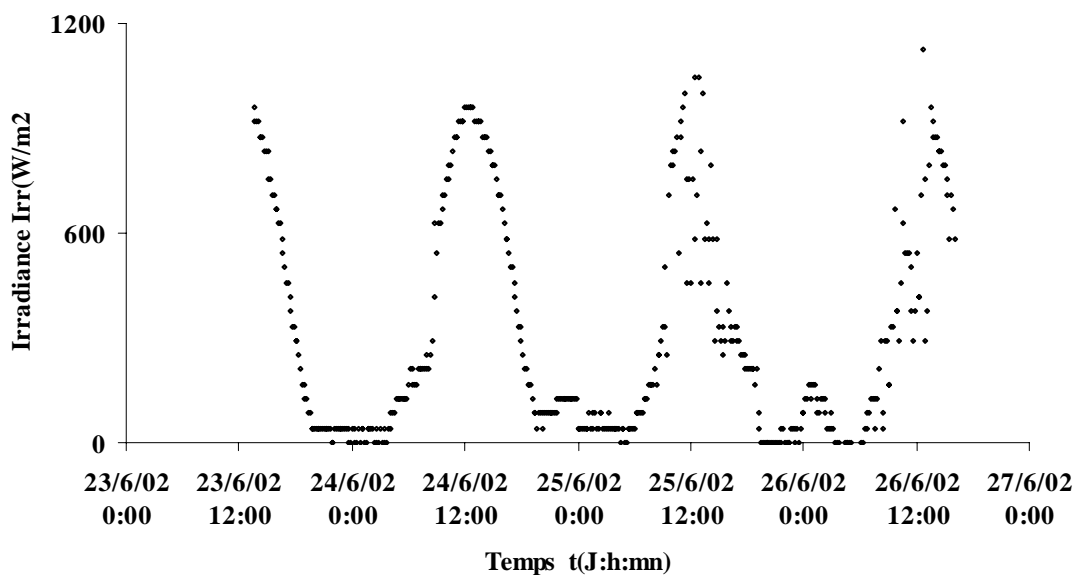
Généralement les panneaux au silicium présentent un rendement de l'ordre de 12%, la valeur du rendement trouvé, indique l'état détérioré de notre panneau.

Au termes de ces expériences, nous avons fait fonctionner le panneau pendant quatre jours consécutifs en enregistrant simultanément les paramètres électriques tels que le flux lumineux, la température ambiante, la température de la cellule, l'intensité du courant et la tension délivrée par le panneau en fonction du temps, les résultats obtenus sont regroupés sur les figures 14, 15, 16, 17 et 18.

## II.2.8) Comportement électrique du panneau photovoltaïque pendant quatre jours de fonctionnement

### a) variation du flux lumineux en fonction du temps.

La figure II.14 nous renseigne sur la variation du flux lumineux émis par le soleil durant les quatre jours considérés.



**Figure II,14 Irradiance globale en fonction du temps pendants quatre jours de fonctionnement**

La demi journée du 23 et la journée du 24 sont des journées à temps clair et ciel dégagé.

Pour les journées du 25, 26 et la demi journée du 27, nous observons une distribution des points non uniforme, résultat du passage de nuages.

L'irradiance maximale pour la durée de l'expérience est obtenue le 26 06 02 à 12h41 et est égale à  $1127,35\text{W/m}^2$ .

### b) Variation de la température ambiante et de la température de la cellule en fonction du temps

La figure II.15 mesure la température ambiante et la température de la cellule durant les quatre jours :

La température ambiante moyenne est de  $27^\circ\text{C}$ , alors que la température de la cellule atteint des pics allant jusqu'à  $52^\circ\text{C}$ . Cette température maximale est atteinte quand le soleil est au Zénith (12h00).

La température minimale de la cellule est égale à la température ambiante moyenne.

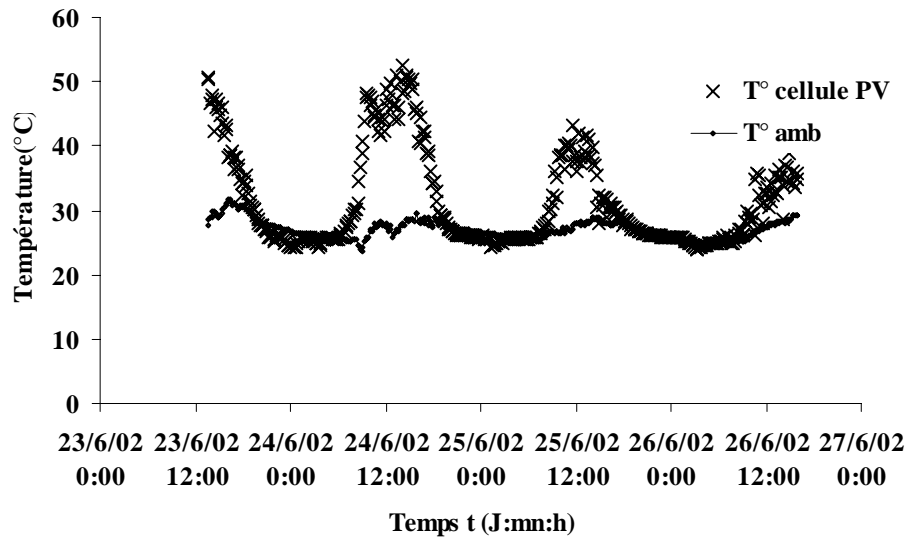


Figure II,15 Température de la cellule et température ambiante durant le temps

c) Variation de l'intensité de courant durant le temps

La figure II.16 nous donne les valeurs des intensités du courant fourni par le panneau durant les quatre jours. L'intensité du courant, mesurée pendant les quatre jours indique des courants maximum de 0.28A atteint quand l'éclairement du soleil est maximal. La présence des pics est expliquée par le fait que l'intensité de courant est très sensible au flux lumineux. Des courants nuls sont enregistrés à éclairement solaire nul.

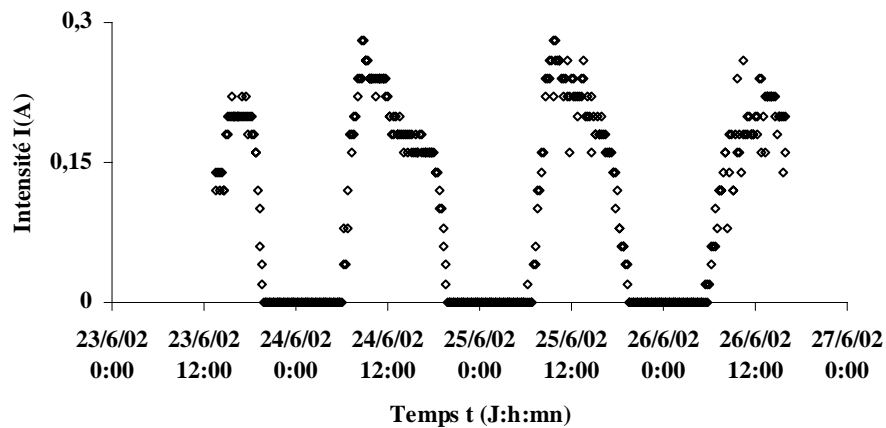


Figure II,16 Intensité du courant du panneau en fonction du temps

d) *Variation de la tension du panneau durant le temps*

La figure II.17 donne la variation de la tension délivrée par le panneau pendant toute la durée de fonctionnement du panneau photovoltaïque.

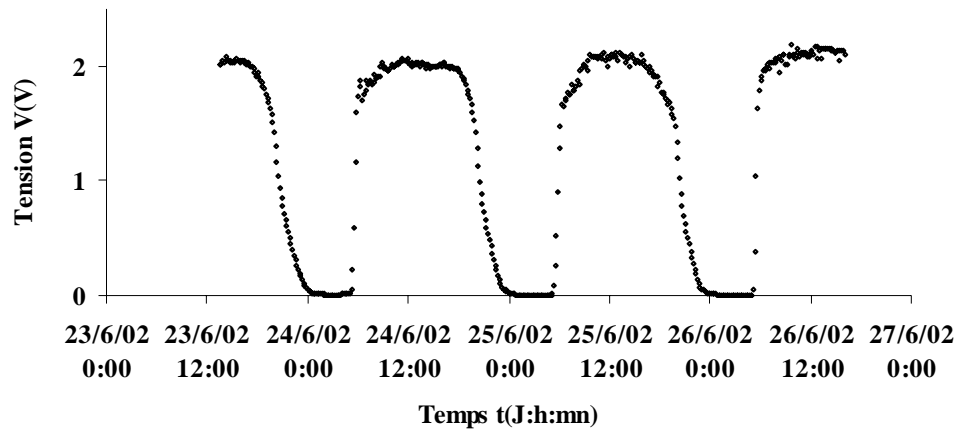


Figure II,17 Tension du panneau pendant quatre jours de fonctionnement

L'enregistrement de la tension pendant les quatre jours montre la présence de paliers dont la longueur correspond à la durée de l'éclairage de la journée, ce qui confirme que l'intensité de la lumière n'a aucune influence sur la valeur de la tension aux bornes du panneau.

e) *Variation de la puissance en fonction du temps.*

La courbe de puissance est déduite à partir des deux derniers graphes et est donnée par la figure II.18. La forme de la courbe de puissance est comparable à la courbe de l'intensité de courant en fonction du temps, nous observons donc la présence de pics et non de paliers.

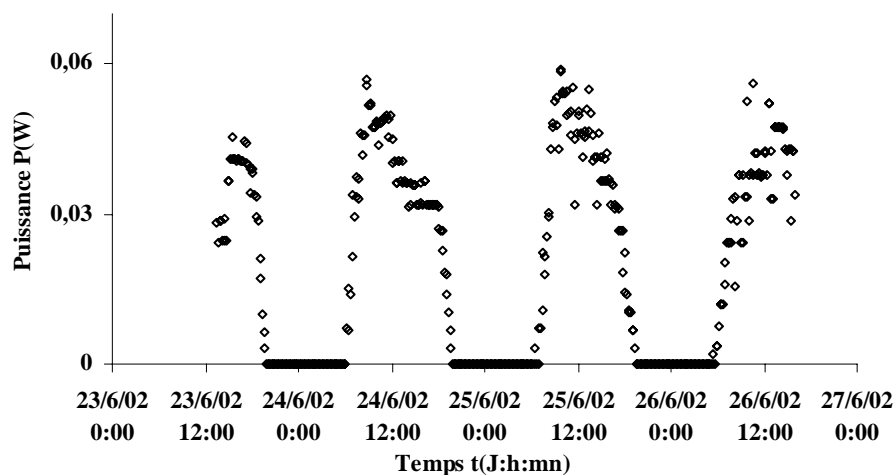


Figure II,18 Puissance du panneau pendant quatre jours de fonctionnement

## **CONCLUSION**

*A travers cette série de tests réalisés sur le panneau photovoltaïque, nous déduisons que son fonctionnement optimal est étroitement lié aux conditions climatiques d'une part et à la charge utilisée d'autre part.*

*Nous avons constaté que les caractéristiques électriques avec charge maximale (tension à circuit ouvert  $V_{co}$ ) et avec charge minimale (courant court circuit  $I_{cc}$ ) sont très sensibles à la température et à l'intensité de la lumière, l'importance de ces deux facteurs réside dans le calcul du facteur de forme dont la valeur nous renseigne sur l'état du panneau.*

*Le deuxième paramètre ayant une influence sur le choix du panneau est la charge utilisée, l'optimisation du design du panneau passe par l'optimisation de la charge.*

## L' ELECTROLYSEUR

*L'électrolyseur est une chaîne électrochimique dont le fonctionnement est caractérisé par:*

- *la production horaire,*
- *le rendement faradique,*
- *la consommation énergétique*
- *le rendement énergétique.*

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

*Etant donné que le principe de fonctionnement de la pile à combustible (objet du chapitre VI) est l'inverse de celui de l'électrolyseur, la théorie relative à cet élément et à l'opération d'électrolyse est la même que celle relative à la pile à combustible. Nous avons donc jugé utile de développer la théorie relative à la pile à combustible, étant donné que cette dernière constitue une nouvelle technologie et où d'intenses recherches sont menées.*

*Le chapitre III, présente la réalisation de tests liés au fonctionnement de l'électrolyseur, nous avons en un premier lieu déterminé sa courbe caractéristique par le tracé des points expérimentaux de l'intensité en fonction de la tension, puis nous avons déterminé l'efficacité de l'électrolyseur en l'alimentant avec différentes sources d'énergies électriques.*

.

### III. ETUDE EXPERIMENTALE DE ELECTROLYSEUR

L'électrolyseur que nous avons utilisé est de type PEM (Proton Exchange Membrane) photon°III.1. L'électrolyseur à membrane polymère conductrice de protons offre l'avantage de la simplicité du design, du fonctionnement et la limitation des problèmes de corrosion.

L'opération d'électrolyse consiste à décomposer une molécule en ses éléments simples sous l'action d'un courant électrique. Dans le cas présent l'eau est décomposée en hydrogène et oxygène qui se dégagent sous forme gazeuse. Dans un électrolyseur PEM, c'est la membrane qui transporte les électrolytes (proton) et non le milieu aqueux, avec ce procédé l'électrolyse de l'eau distillée ou de la vapeur d'eau est possible.

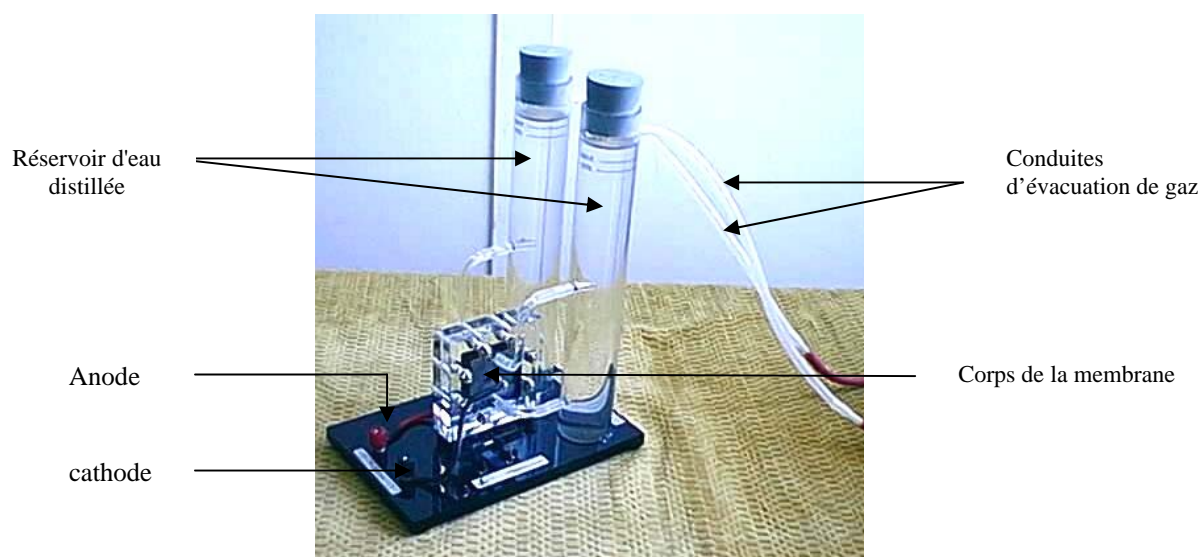
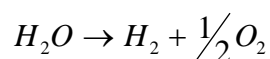


Photo n°III.1: électrolyseur PEM

La décomposition de l'eau par électrolyse s'écrit de manière globale :



Avec une enthalpie de dissociation de l'eau :  $\Delta H=285$  kJ/mole [38].

Cette décomposition nécessite un apport d'énergie électrique, dépendant essentiellement de l'enthalpie et de l'entropie de réaction.

Le principe de fonctionnement d'un électrolyseur type PEM est schématisé par la figure III.1 :

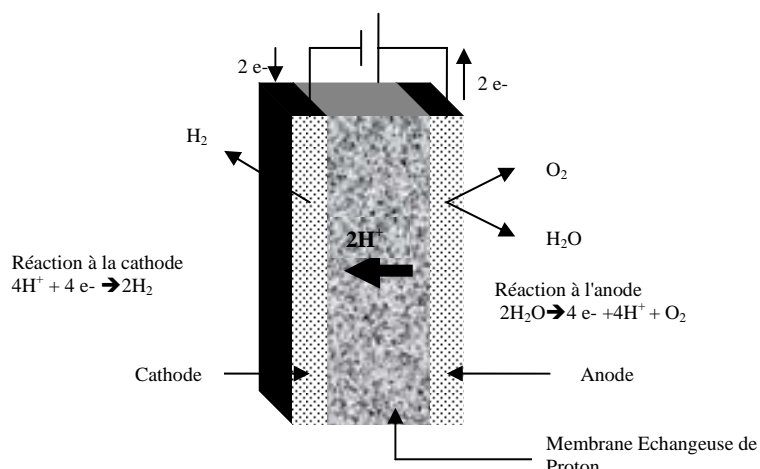
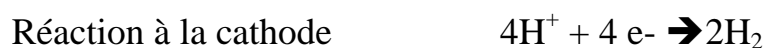


Figure III.1 Principe de fonctionnement d'un électrolyseur PEM

Quand une tension est appliquée à l'électrolyseur, des ions  $H^+$  et de l'oxygène sont formés au niveau de l'anode. Les ions  $H^+$  traversent la membrane échangeuse de protons et passent à la cathode, où l'hydrogène est formé.

L'élément principal de l'électrolyseur PEM est la membrane cette dernière joue le rôle d'électrodes. Une couche de catalyseur est appliquée de part et d'autre de la membrane. Cette disposition forme l'anode et la cathode de l'électrolyseur.

Les réactions qui ont lieu lorsqu'un courant traverse la cellule sont :



### III.1) Courbe caractéristique de l'électrolyseur

Nous procédons de la même manière que celle utilisée dans le cas du panneau photovoltaïque, après avoir enregistré les mesures de l'intensité du courant en fonction de la tension, nous traçons la courbe caractéristique  $I = f(V)$  de l'électrolyseur.

Cette courbe nous renseignera sur :

- les conditions de fonctionnement pratique de l'électrolyseur,
- le courant maximal consommé par l'électrolyseur,

- la tension seuil de l'électrolyseur correspondant à la tension de dissociation de la molécule d'eau.

En termes de puissance, l'exploitation de ces courbes nous renseignera sur la puissance maximale consommée par l'électrolyseur.

### **Dispositif expérimental**

Le dispositif expérimental utilisé pour réaliser ce test comprend (Photo n°III.2) :

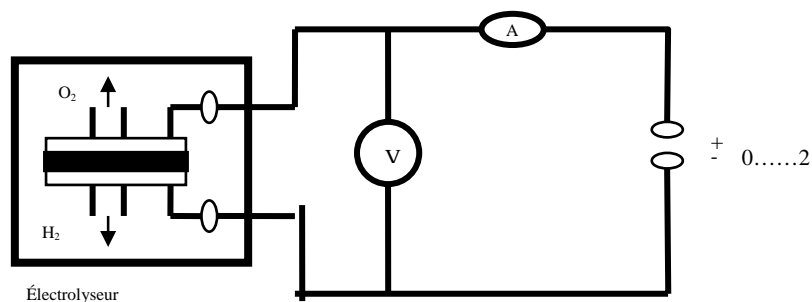
- un électrolyseur,
- un générateur de courant,
- un millivoltmètre,
- un milliampèremètre.



**Photo n°III.2 Dispositif expérimental pour caractériser l'électrolyseur**

### **Mode opératoire**

- Remplir les deux réservoirs de l'électrolyseur avec de l'eau distillée, et mettre le niveau d'eau entre le repère min et max du réservoir.
- S'assurer que l'eau passe à travers les deux conduites d'évacuation de l'électrolyseur,
- Fermer l'évacuation de ces deux conduites, de sorte à éliminer les bulles d'air pouvant se former, provoquant ainsi une diminution de débit de production de gaz.
  - Connecter l'électrolyseur au générateur DC tel que décrit dans la figure III.2



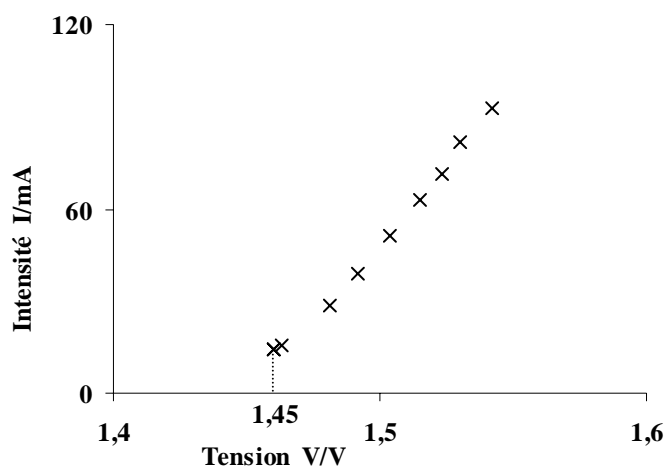
**Figure III.2 Diagramme du circuit électrique, rendement et caractérisation de l'électrolyseur**

Nous commençons l'expérience avec les tensions élevées ( $U=2V$ ), puis nous diminuons progressivement la valeur de la tension  $U$  en utilisant le bouton d'ajustement du générateur de tension.

Au début de l'opération la valeur du courant est élevée, après environ 1 min de fonctionnement le système devient stable.

Pour les faibles valeurs du courant, les résultats sont instables, dans ce cas nous attendons 05 minutes avant de prendre la mesure.

Les valeurs du courant et de la tension sont enregistrées et la courbe caractéristique de l'électrolyseur est tracée (figure III.3).



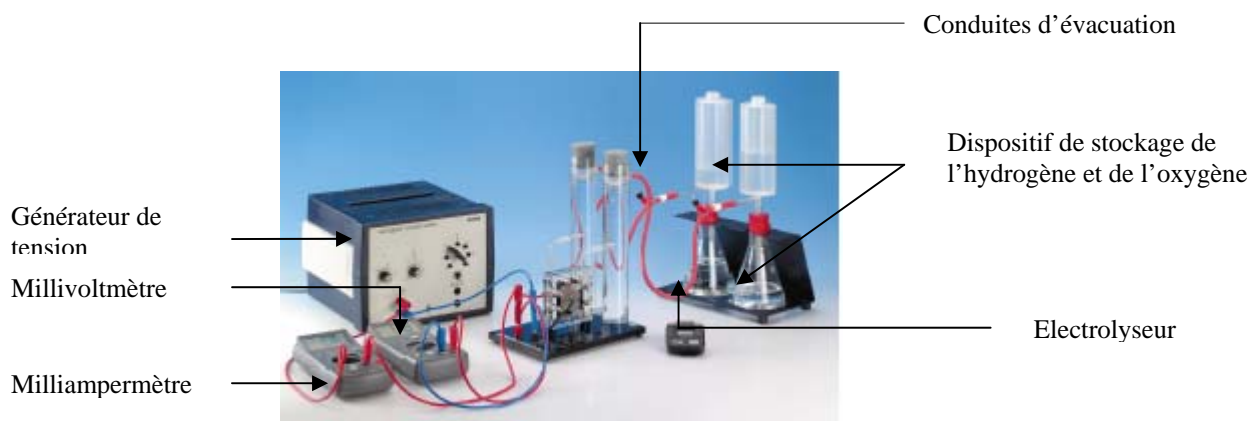
**Figure III.3 caractérisation de l'électrolyseur  
T=30°C**

L'intensité du courant est une fonction croissante de la tension, nous observons que la dissociation de l'eau débute à partir d'une tension seuil  $V_0 = 1.45V$ .

### III.2) Calcul de l'efficacité de l'électrolyseur

#### Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé pour réaliser ce test est le même que celui utilisé précédemment, sauf que dans ce cas les conduites d'évacuation de l'hydrogène et de l'oxygène produit par l'électrolyseur, sont connectées chacune à un réservoir de stockage respectivement pour l'hydrogène et pour l'oxygène.



**Photo n° III.3 dispositif expérimental pour déterminer l'efficacité de l'électrolyseur**

#### Mode opératoire

La quantité de gaz produite est mesurée comme suit :

Le système de stockage de l'hydrogène gazeux est constitué de deux réservoirs de capacité 250ml, un réservoir inférieur rempli d'eau distillée relié par une conduite étanche à un réservoir supérieur vide et gradué à 25 ml, le gaz produit exerce une pression sur l'eau induisant son ascension vers le réservoir supérieur.

Le temps  $t = 0$  correspond à un niveau zéro dans le réservoir.

Dans cette expérience nous avons réalisé deux manipulations :

- dans la première l'alimentation de l'électrolyseur est assurée par un générateur de courant, nous avons mesuré la production d'hydrogène en deux cas :
  - a) dès la mise en marche de l'électrolyseur.
  - b) après une durée de fonctionnement de l'électrolyseur de quatre heures.
- dans la deuxième expérience, l'alimentation de l'électrolyseur est assurée par un panneau photovoltaïque

Nous déterminons le rendement de l'électrolyseur en faisant le rapport de la production mesurée par la production théorique calculée,

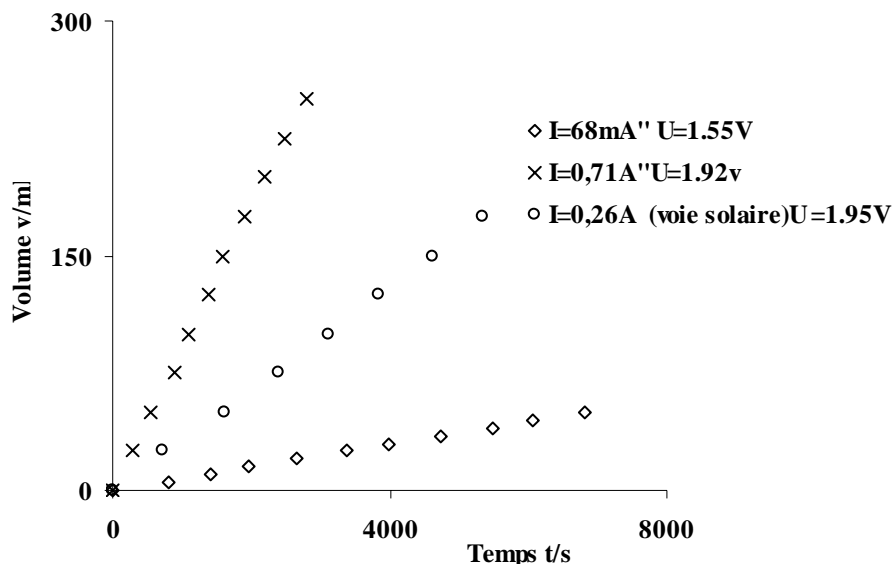


Figure III,4 Production d'hydrogène à différentes intensités de courant

### III.2.1 L'électrolyseur est alimenté par un générateur de courant :

#### Cas a1) début de mise en marche

La production d'hydrogène au début de la mise en marche de l'électrolyseur est faible et est donnée par la pente de droite  $v/t = 0.0074\text{ml/s}$ , ceci est due principalement à la faible valeur de l'intensité du courant consommé  $I = 68\text{mA}$

La puissance consommée correspondante est  $P = V.I = 0.068.1.55 = 0.1054\text{W}$

#### Cas a2) l'électrolyseur a fonctionné pendant quatre heures

Au bout de quatre heures de fonctionnement, l'électrolyseur a atteint un régime établi, sa consommation en électricité a augmenté et a atteint une intensité de courant de  $0.71\text{A}$ , entraînant par la suite l'augmentation de la production de gaz.

Nous obtenons dans ce cas une meilleure production, comparée au premier cas, soit une production par unité de temps de  $0.0909\text{ml/s}$ .

La puissance consommée dans ce cas est augmentée  $P = 0.71.1.92 = 1.3632\text{W}$

### III.2.2 l'électrolyseur est alimenté avec un panneau photovoltaïque



**Photon°III.4: dispositif expérimental**

De même que pour le premier cas, le tracé du volume  $v$  du gaz produit en fonction du temps, donne une droite passant par l'origine. Il faut noter que durant cette expérience l'électrolyseur était placé à l'air libre, donc il était soumis à des conditions météorologiques spécifiques à la journée, s'agissant d'une journée d'été bien ensoleillée, la température ambiante étant de 29.9°C, la température de l'eau d'électrolyse a augmenté, en contact du soleil ce qui explique la meilleure production de gaz.

La production théorique d'hydrogène est donnée par la loi des gaz parfaits :

$$Q_{\text{hydrogène}} = \frac{8,32 I_f T}{2 * 96500 * 1,013 \cdot 10^{-1}} \quad (1)$$

Intensité I (A)	Température (K)	Production théorique (ml/s)	Production mesurée (ml/s)	Efficacité (%)
0.0685	301	0.0088	0.0074	84
0.26	302.9	0.0335	0.0334	99
0.71	301	0.091	0.0909	98

**Tableau n°III.1 Production de l'hydrogène en fonction de différentes intensités de courant**

À travers ces trois tests, nous pouvons conclure que le rendement augmente avec la durée de fonctionnement de l'électrolyseur ce qui correspond à l'établissement du régime stable.

### CONCLUSION

*En dehors des tests énumérés ci-dessus, nous avons fait fonctionner l'électrolyseur pendant une journée et une nuit entière, le courant maximal consommé atteint, était de 0.95A pour une tension fournie par le générateur de 2V. La puissance consommée est alors  $P = 0.95 \times 2 = 1.9W$*

*Il est à noter qu'avec le panneau dont nous disposons nous ne pouvons pas atteindre cette puissance puisque la puissance maximale extraite du panneau est de 0.21W pour un éclairement maximal de 967.41W/m<sup>2</sup>. Nous déduisons que le panneau dont nous disposons est sous dimensionné pour l'électrolyseur, la charge du panneau n'est donc pas optimisée.*

## LA PILE À COMBUSTIBLE

*La pile à combustible a été découverte il y a 250 ans, mais elle ne fut vraiment expérimentée qu'à la fin du 20<sup>e</sup> siècle [38]. Son intérêt réside dans son efficacité d'énergie, son rendement élevé et son double rôle de convertisseurs et de stockage d'énergies.*

*Du fait de ses performances énergétiques et environnementales élevées, la pile à combustible a atteint aujourd'hui un stade de développement avancé. L'hydrogène produit par électrolyse de l'eau y est utilisé pour son énergie chimique et son pouvoir calorifique massique élevé.*

*La première partie du chapitre IV présente un aperçu de la caractérisation et de la thermodynamique des piles à combustible. Nous donnons le principe de fonctionnement ainsi qu'une comparaison entre les systèmes de production d'énergie conventionnelle et la pile à combustible. En fin de cette partie nous énumérons les critères de choix d'une pile.*

*La deuxième partie de ce chapitre concerne la réalisation de quelques tests sur une pile à combustible de type membrane échangeuse de protons.*

*Nous avons fait fonctionner la pile, en l'alimentant, de deux façons différentes et avons tracé sa courbe caractéristique. Des calculs tels que la détermination de sa consommation massique, de sa consommation en combustible, de son efficacité ..., sont discutés en fin du chapitre.*

## IV.1) ETUDE THEORIQUE DE LA PILE À COMBUSTIBLE

### IV.1.1 Généralités

Une pile à combustible est un générateur qui convertit directement l'énergie interne d'un combustible en énergie électrique, en utilisant un procédé électrochimique contrôlé. Elle met en jeu, sans les mélanger un combustible (hydrogène, méthanol, monoxyde de carbone ...) et un comburant (généralement de l'oxygène pris dans l'air). Elle est composée de l'assemblage de cellules élémentaires, qui comportent une chambre cathodique (alimentée en comburant) et une chambre anodique (alimentée en combustible), séparées par deux électrodes (qui canalisent les électrons), et un électrolyte intermédiaire, solide ou liquide suivant le type de pile [38] (voir fig.IV.1).

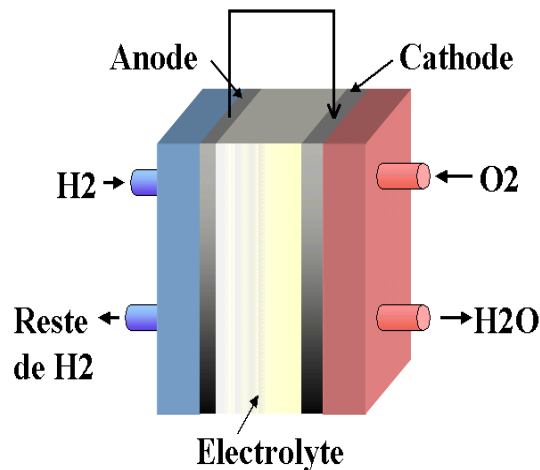


Figure.IV.1 Schéma d'une pile à combustible

Elle se différencie des autres piles électrochimiques :

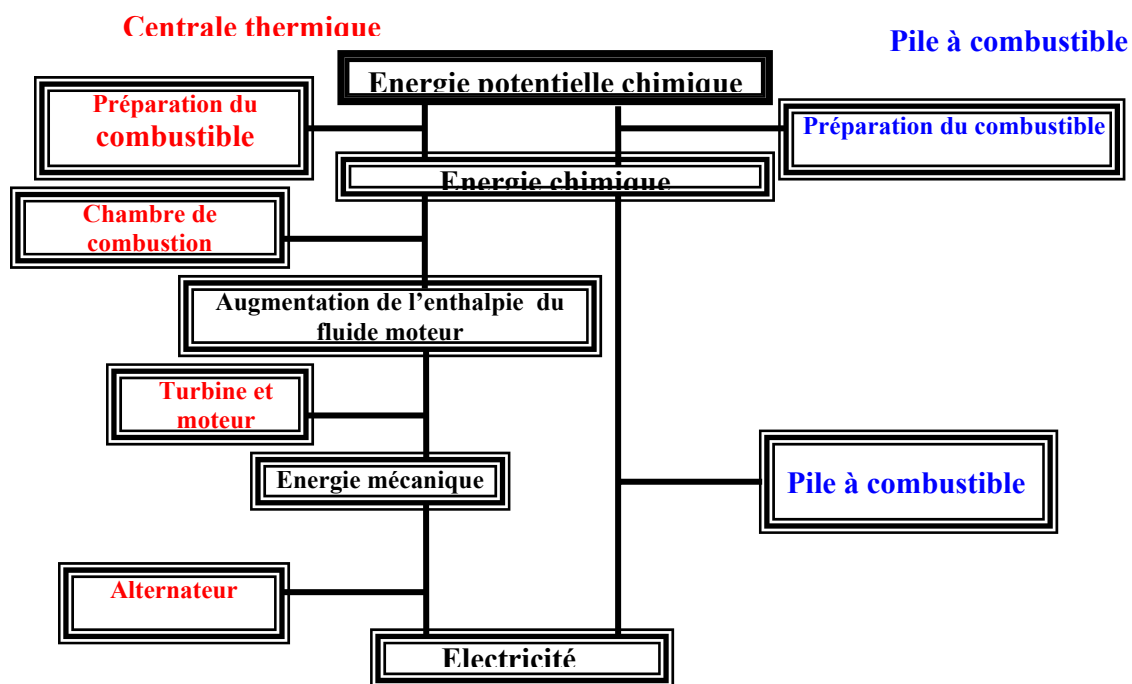
- Par le fait que les réactifs (combustible et comburant) sont renouvelés et les produits (eau, chaleur et électricité) évacués en permanence.
- Sa structure (électrodes, électrolyte et sites réactifs) ne réagit pas, et reste invariante dans le temps, en effet dans une pile classique, les matériaux constituant les électrodes sont consommables. Avec le temps, en fonction de l'usage, ils se dégradent (oxydation de l'anode et réduction de la cathode) pour finalement rendre le processus inactif : la pile est usée.

L'intérêt présenté par la pile à combustible comme source d'énergie électrique repose essentiellement sur leur rendement élevé puisque du point de vue de la thermodynamique, les limites imposées par le cycle de Carnot ne s'appliquent plus [39].

Les trois principaux avantages des piles à combustible sont les suivants :

1. La qualité de l'air (pas de particules en suspension ou de fumée urbaine);
2. Contribue à réduire le réchauffement du globe;
3. La sécurité et l'économie de l'énergie (épuisement des carburants fossiles).

Les étapes mises en jeu pour produire de l'énergie dans une pile à combustible sont réduites par rapport à celle intervenant dans une centrale thermique ; ceci est illustré par le schéma comparatif ci-dessous :



**Comparaison de la conversion d'énergie entre une pile à combustible et une centrale thermique [40]**

Les principaux inconvénients sont les suivants [41] :

1. Le coût des piles - elles coûtent de 3 à 10 fois plus que les autres technologies;
2. Les infrastructures de ravitaillement en combustible et leur coût élevé.
3. L'acceptation par les consommateurs (sécurité, éducation, apparences,...)

L'ensemble des appareils nécessaires au bon fonctionnement d'une pile à combustible dans un environnement industriel dépend fortement de l'application et de la localisation du système [42] :

- Les auxiliaires situés en amont de la pile, permettent, l'alimentation de la pile en gaz réactifs compatibles, ainsi qu'en énergie auxiliaire, souvent nécessaire pendant la phase de démarrage.
- Les auxiliaires ayant pour charge d'évacuer les produits issus des réactions internes à la pile, tels que les vecteurs énergétiques utiles (électricité, chaleur) et les sous produits indésirables qui sont les combustibles imbrûlés, le comburant appauvri, l'eau électrochimique....
- L'ensemble des organes de régulation et commande, permettant un bon fonctionnement de l'installation, tant en terme d'efficacité que de sécurité.

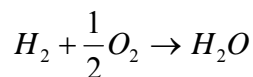
Le combustible alimentant l'anode pour la réaction électrochimique étant l'hydrogène trois possibilités sont à considérer [43]:

1. Une production centralisée de l'hydrogène suivie d'une distribution aux utilisateurs,
2. Une production de l'hydrogène décentralisée par électrolyse ou par reformage,
3. Une production intégrée dans les piles à combustible avec un reformage interne à partir du gaz naturel, méthanol, essence...

#### IV.I.2 Le principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'une pile à combustible est celui d'une combustion (oxydation), où l'énergie libérée n'est pas captée comme chaleur, mais comme courant électrique. C'est une **combustion froide** [38].

Il s'agit donc d'une combustion électrochimique et contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon une réaction électrochimique globale universellement connue :



Cette réaction électrochimique peut intervenir dans une large gamme de températures, de 70°C à 1000°C. Selon le niveau de température retenu, la nature de l'électrolyte et des électrodes, les réactions chimiques intermédiaires mises en jeu varient, mais le principe général est inchangé.

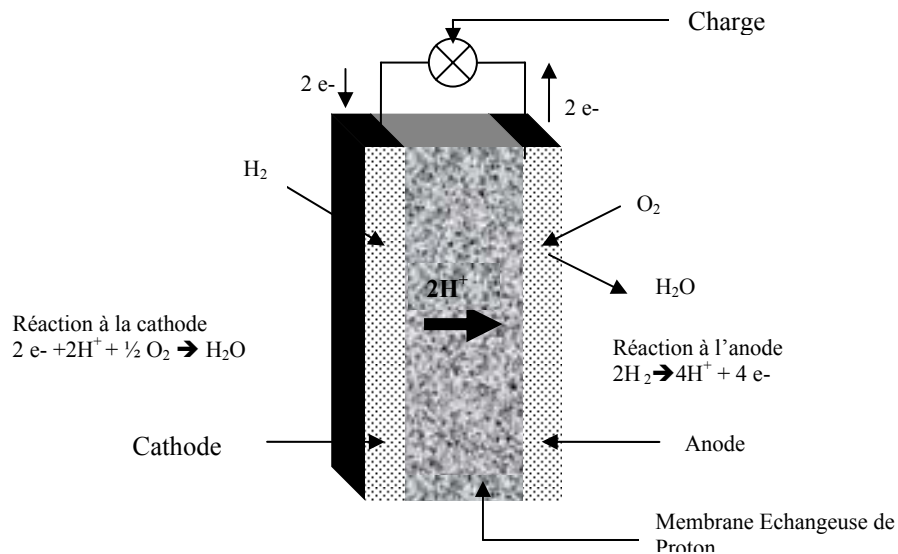
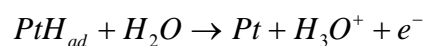
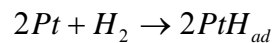


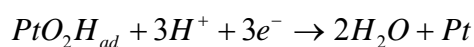
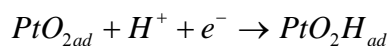
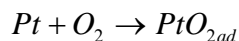
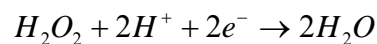
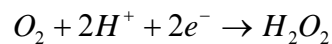
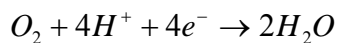
Figure IV. 2 Principe de fonctionnement d'une pile PEM

De façon générale, le fonctionnement électrochimique d'une cellule unitaire de la pile à combustible peut se schématiser sous la forme donnée dans la figure IV.2

A l'**anode**, l'hydrogène diffuse à travers le matériau jusqu'à ce qu'il rencontre une particule de platine. Sous l'action du catalyseur, la molécule d'hydrogène se scinde en deux atomes d'hydrogène. Ceux-ci forment alors une liaison avec deux atomes de platine, puis chacun se scinde en un électron et un proton  $H^+$  qui pourra alors traverser la membrane de l'anode vers la cathode.



A la **cathode**, les catalyseurs utilisés sont à base de platine. Le mécanisme de réaction est :



### IV.I.3 Les différents types de piles à combustible

Plusieurs technologies des piles à combustible existent, elles peuvent être classées selon leur température de fonctionnement, allant de 80 °C à 1000°C, leur capacité de fonctionnement en cogénération, leur faible impact et selon la nature de l'électrolyte qui donne son nom à la pile (**annexe n°2A**):

Il existe deux grandes catégories de piles à combustible [45] :

- les piles alcalines,
- les piles à électrolyte acide.

Les piles alcalines (**AFC** pour **Alkaline Fuel Cell**) sont basées sur l'usage d'un seul électrolyte, tandis que les piles à électrolyte acide représentent une gamme beaucoup plus variée. Nous distinguons :

1. les piles à haute température (> 500 °C), avec pour électrolyte du carbonate fondu (**MCFC** pour **Molten Carbonate Fuel Cell**) ou des oxydes solides (**SOFC** pour **Solid Oxyde Fuel Cell**) ;
2. les piles à basse température (<200 °C), avec pour électrolyte des membranes polymères (**PEMFC** pour **Proton Exchange Membrane Fuel Cell**) ou de l'acide phosphorique (**PAFC** pour **Phosphoric Acid Fuel Cell**).

Suivant la nature de l'électrolyte, acide ou basique (alcaline), l'eau formée par oxydation de l'hydrogène est produite à l'anode ou à la cathode.

<i>Pour une pile alcaline</i>	<i>Pour une pile acide</i>
l'anode $2H_2 + 4OH^- \rightarrow 4H_2O + 4e^-$	<b>l'anode</b> $2H_2 + 4H_2O \rightarrow 4H_3O^+ + 4e^-$
La cathode $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$	<b>La cathode</b> $O_2 + 4H_3O^+ + 4e^- \rightarrow 6H_2O$
<b>Réaction globale</b>	$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

Le passage des ions ( $H^+$ ,  $OH^-$  ...) se fait au travers de l'électrolyte, sous une forme hydratée. Les électrons sont collectés par l'anode et rejoignent la cathode à travers la charge (par exemple, un moteur électrique).

## IV.I.4 Thermodynamique des piles à combustible

### IV.I.4.1 *Rendement de la pile:*

Si la pile qui transforme une fraction de l'énergie chimique du combustible en énergie électrique [38], est considérée comme un système isolé sauf aux quatre points de contact définis par :

1. entrée du combustible et du comburant, cédant à la machine une énergie interne  $U_1$  contenue dans le combustible et le comburant, la pile reçoit également une énergie mécanique empruntée aux pompes d'alimentation ou à la pression atmosphérique. L'ensemble de l'énergie reçue peut se mettre sous la forme
 
$$(U_1 + P_1V_1). \quad (1)$$
2. sortie des produits de combustion (eau) emportant une énergie équivalente à celle reçue
 
$$(U_2 + P_2V_2). \quad (2)$$
3. récupération de l'énergie électrique utile  $W$  produite par la machine,
4. contact avec l'atmosphère de température  $T_a$  à laquelle elle cède ou absorbe une quantité de chaleur  $Q$

Le premier principe de la thermodynamique nous permet d'écrire :

$$(U_1 + P_1V_1) - (U_2 + P_2V_2) = W + Q \quad (3)$$

Le deuxième membre de cette équation exprime la fonction caractéristique enthalpie  $\Delta H$  définie par

$$\Delta H = W + Q \quad (4)$$

La relation (4) représente l'énergie disponible dans le combustible.

Le rendement est par conséquent le rapport du travail utile produit  $W$  par l'énergie disponible

dans le combustible  $\Delta H$  : 
$$\eta = \frac{W}{\Delta H} \quad (5)$$

Le rendement maximal qu'il est théoriquement possible d'obtenir avec une pile idéale est calculé en utilisant le deuxième principe de la thermodynamique exprimé par la relation :

$$T_a(S_2 - S_1) + Q \geq 0 \quad (6)$$

$T_a$  est la température de la source extérieure recevant de la chaleur  $Q$

Ceci dans le cas où une masse  $m$  de matière composée du combustible et du comburant (ne sont pas mélangés) se transforme en passant de l'état 1 à un état 2 et à chaque état correspond l'entropie  $S$ .

De la combinaison des équations (4) et (6) nous déduisons la relation fondamentale de l'enthalpie libre  $\Delta G_a$  relative à la température  $T_a$  :

$$W \leq [H - T_a S]_2^1 = \Delta G_a \quad (7)$$

L'expression (7) montre que l'énergie utile  $W$  est maximale dans le cas où nous avons l'égalité :

$$W = \Delta G_a .$$

Le rendement théorique maximal est : 
$$\eta_{\max} = \frac{\Delta G_a}{\Delta H} \quad (8).$$

Si  $S_1 - S_2$  est négatif,  $Q$  est négatif ce qui signifie que la pile reçoit des calories de l'atmosphère qu'elle convertit en énergie électrique, le rendement dans ce cas est supérieur à 1 et la pile a tendance à se refroidir en fonctionnant.

#### IV.I.4.2 Paramètres influant le rendement de la pile

Les principaux facteurs ayant une influence significative sur le rendement de la pile sont [41]:

- Le catalyseur utilisé, l'état des électrodes, l'utilisation de l'air au lieu de l'oxygène pur ainsi que les conditions de température et de pression ont une influence déterminante sur la dissociation de l'hydrogène et de l'oxygène. Ce rendement se calcule par le rapport entre la tension de la pile et la tension  $E_{\text{rev}}$  à la température concernée.
- Le rendement faradique qui tient compte du nombre d'électrons effectivement obtenus par mole de carburant présent. Pour l'hydrogène, le rendement est de 1 (c'est à dire 2 électrons par mole d'hydrogène). Le rendement faradique tient aussi compte des possibilités de court circuit interne, soit par conduction électronique dans l'électrolyte, soit par mise en contact du combustible et du comburant.
- le rendement de matière concerne l'utilisation des réactifs au niveau des électrodes. En effet, dans une pile, l'alimentation de l'ensemble "membrane-électrodes" doit se faire avec un même débit et des pressions partielles identiques.

- Rendement du système ; des composants périphériques (compresseur, système de contrôle, échangeurs de chaleur,...) sont nécessaires au fonctionnement d'une pile. Ces composants ont une consommation qui diminue le rendement.

#### IV.I.4.3 Influence de la température et de la pression sur la valeur de la force électromotrice

La force électromotrice  $E$  d'une pile est donnée par l'expression :  $E.q = -\Delta G_a$  (9) où  $q$  est la quantité d'électricité débitée [38].

La fonction caractéristique  $G$  des composants chimiques réagissant dans la pile est :

$$G = U + PV - TS = H - TS \quad (10)$$

La variation de l'énergie interne :

$$dU = TdS - PdV - Edq$$

Nous avons :

$$dG = TdS - PdV - Edq + PdV + VdP - TdS - SdT$$

$$dG = -SdT + VdP - Edq \quad (11)$$

$dG$  étant une différentielle totale exacte, nous déduisons l'expression :

$$\left(\frac{\partial E}{\partial P}\right)_{T,q} = -\left(\frac{\partial V}{\partial q}\right)_{T,P} \quad (12)$$

Cette dernière expression montre que la force électromotrice de la pile est fonction de la pression, en effet en remplaçant dans (12) le volume tiré à partir de la loi des gaz parfait nous aurons :

$$P\left(\frac{\partial E}{\partial P}\right)_{T,q} = -\frac{n}{F}RT \quad (13)$$

Où  $n$  représente l'accroissement du nombre de moles de gaz dû au passage de 1 Faraday

Pour une température et une charge constante, l'expression (13) devient :

$$dE = -\frac{n}{F} RT \frac{dP}{P}$$

D'où par intégration :

$$E - E_0 = -\frac{n}{F} RT \log \frac{P}{P_0} \quad (14)$$

De cette relation il en résulte qu'un accroissement de la pression des gaz augmente la force électromotrice.

#### **IV.I.5 Critères de choix d'une pile à combustible:**

Le choix d'une pile à combustible se fait selon les critères suivants [45]:

- la température de fonctionnement : ce choix influe sur le temps de démarrage et la valorisation de la chaleur produite. la basse température permettant à la fois un démarrage rapide et une évacuation facile de la chaleur.
- La durée de vie : la durée de vie des piles " tout solide " (PEMFC et SOFC) est sensiblement supérieure à celle qui exigent la manipulation et le transfert d'électrolyte liquide, lequel est à l'origine de phénomène de corrosion.
- les contraintes de volume et masse : selon que l'application est mobile (portable, transports) ou fixe (générateurs stationnaires), nous pouvons être amené à faire des choix différents.
- l'échéance : les divers types de piles ne sont pas aujourd'hui au même stade de développement
- le coût attendu : dépend principalement du domaine d'application de la pile et des considérations tels que le coût du système, son intégration dans un procédé complexe, la nécessité de valoriser les rejets thermiques, la nature du combustible, ..
- La nature du combustible : selon le type de combustible dont nous disposons (hydrogène, hydrocarbure ou alcool), il est nécessaire ou non de le reformer pour

alimenter la pile en hydrogène. La PEM, utilise de l'hydrogène ultra pur (moins de 10 ppm de CO) tandis que la SOFC transforme des combustibles complexes par reformage interne progressif, sans être aussi sensible aux impuretés.

- énergie: elle est liée à la quantité d'électricité disponible dans un volume donné, proportionnelle à la tension et fonction de la quantité des produits réagissants introduits dans la pile;

Pour une puissance moyenne nécessaire à alimenter des équipements électroniques mobiles, ainsi que dans des domaines particuliers, où, par exemple, le faible poids et la mobilité sont des facteurs déterminants, notre choix s'oriente principalement vers la pile à membrane échangeuse d'ions qui offre des avantages attractifs.

En effet fonctionnant dès la température ambiante et pouvant être alimentée avec des gaz à pression atmosphérique, entraîne des conséquences importantes sur le plan de la réalisation pratique.

En revanche, elle impose l'emploi d'un catalyseur très actif tel le noir de platine ; sa préparation et sa mise en œuvre ont une incidence directe sur les performances électriques de la pile et pose le problème de résistance spécifique de la membrane, où, un compromis entre l'épaisseur et la résistance mécanique est difficile à réaliser.

Pour illustrer ce dernier point, il faut s'intéresser à l'étude de la chute de potentiel à l'intérieur de la membrane (voir annexe n°2B).

## IV.II ETUDE EXPERIMENTALE DE LA PILE À COMBUSTIBLE

La pile dont nous disposons est de type PEMFC (*Proton Exchange Membrane fuel Cell*), photo n° IV.1

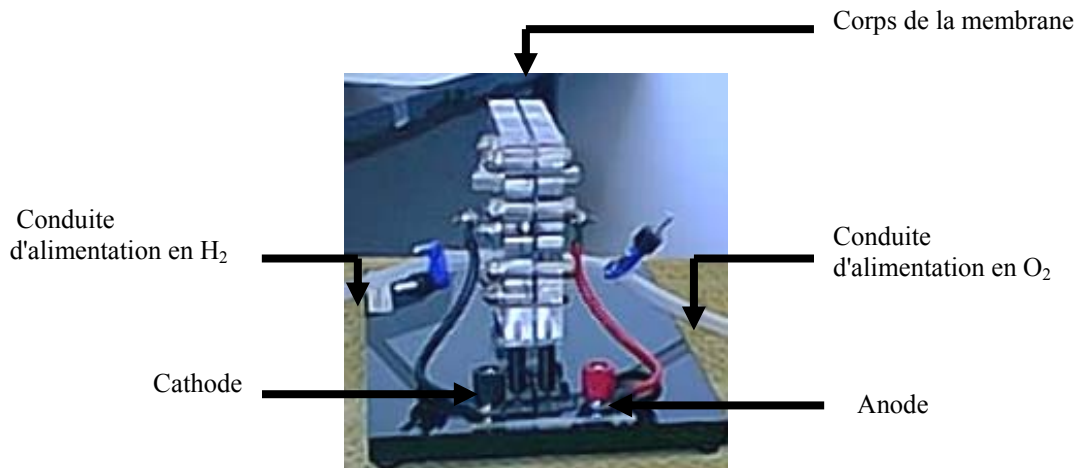


Photo n°IV.1 : la pile à combustible

L'électrolyte est une membrane polymère ionique de type acide: c'est une membrane perfluorée sur laquelle sont greffés des groupements acides sulfonates  $\text{SO}_3^-$  ou  $\text{COOH}$  [39,41].

Dans ce type d'électrolyte, les ions négatifs sont retenus dans la structure de la membrane. Les ions hydrogène  $\text{H}^+$  sont mobiles et transportent la charge positive à travers la membrane, de la cathode vers l'anode.

Ces membranes fonctionnent à une température entre 60 et 90°C et à des pressions entre 1 et 5 bars. L'épaisseur de ces membranes varie entre 50 et 200 $\mu\text{m}$ .

Les électrodes constituant la PEMFC sont en platine elles doivent permettre de dissocier l'hydrogène et le transfert des protons vers l'électrolyte.

Pour effectuer les tests sur la pile nous avons utilisé le matériel suivant :

- Pile à combustible type PEMFC,
- Electrolyseur type PEM+ Eau distillée,
- Boite de connections électrique,
- Boite de résistance,
- Système de stockage composé de : 2 Flacons en verre de 250ml surmonté de deux cylindres en plastique, gradué de 25ml,
- Tube en caoutchouc de 4 et 6 mm,

- Chronomètre,
- Thermocouple type K -10. . +100 °C,
- Multimètre + voltmètre digital,
- Générateur de courant.

Dans cette partie expérimentale, nous déterminons :

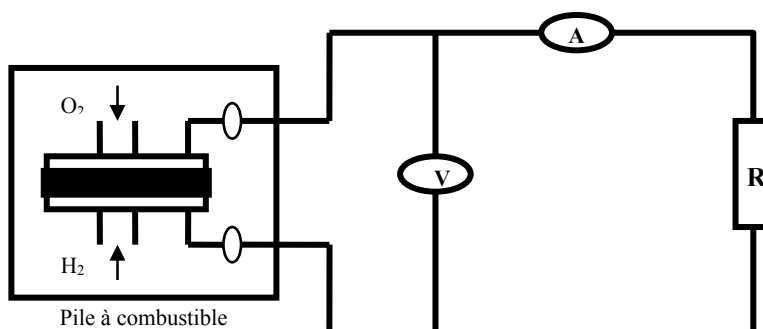
- a) la caractéristique de la pile en traçant la courbe  $I = f(V)$ , grâce à cette courbe nous déterminons :
  - les conditions de fonctionnement pratique de la pile :
  - le courant maximal débité par la pile
  - la tension seuil de la pile correspondant à la recombinaison de la molécule d'eau, pour générer de l'électricité.
  - la puissance maximale que nous pouvons extraire de la pile.
- b) le rendement de la pile à partir du quel nous concluons quant aux performances de notre système

#### IV.II.1) Courbe caractéristique de la pile PEMFC

nous avons essayé de caractériser la pile de deux façons :

- 1) En branchant la pile directement à l'électrolyseur en fonctionnement, la pile est alors alimentée en continue, durant toute la période de fonctionnement de l'électrolyseur.
- 2) en alimentant la pile à partir des réservoirs de stockage des gaz.

Pour réaliser ces tests nous avons réalisé le montage électrique de la figure IV.3:



**Figure IV.3 Diagramme du circuit électrique, rendement et caractérisation de la pile à combustible**

#### IV.II.1.1) La pile est directement connectée à l'électrolyseur.

##### **Préparation de l'électrolyseur:**

- Connecter aux parties supérieures de l'électrolyseur deux conduites de 40 cm de long, et de 4mm diamètre intérieur,
- Remplir les réservoirs de stockage de l'électrolyseur avec de l'eau distillée, de sorte que l'eau remplisse également les conduites connectées, plonger ces conduites dans deux flacons d'eau distillée, et obturer leurs sorties, ce qui chassera les bulles d'air présentes dans les conduites,
- Connecter l'électrolyseur à l'alimentation de tension, et régler la tension à une valeur maximale de 2V,
- Dès le début de la production de l'hydrogène et de l'oxygène, ouvrir rapidement l'obturation des conduites, et les connecter à la pile,
- S'assurer qu'il ne reste aucune goutte d'eau dans les conduites, afin d'éviter un bouchage et par conséquent un faible débit d'alimentation de la pile.
- Les mesures électriques obtenues dépendent du débit d'alimentation de la pile, et du degré d'humidité de la pile. Pour créer des conditions stables dans la pile, nous avons fait fonctionner la pile sans charge pendant 5mn, puis pendant 5 autres minutes sous une charge fixe,
- Connecter à la pile une charge à résistance variable ( $2k\Omega$  à  $0.37\Omega$ ), et pour chaque résistance nous enregistrons la valeur de la tension et du courant correspondant, nous commençons les mesures par les résistances élevées.

**Remarque** : pour de faibles valeurs de la résistance (de l'ordre de 1Ohm), la tension et l'intensité sont instables, si l'alimentation en gaz est insuffisante, pour remédier à ce problème, nous ouvrons le circuit électrique pendant 30s, pour assurer une bonne alimentation en gaz.

##### **Résultat** :

1) Le tracé de la courbe tension en fonction de la résistance, figure IV.4, indique que la tension de la pile augmente de la valeur seuil  $V_0 = 0.514V$  à une valeur moyenne  $V_\infty = 0.895V$  puis reste constante pour toutes les valeurs des résistances, la tension n'est donc pas influencée par la variation de la résistance.

Par contre, la pile débite un courant maximal  $I_{\max} = 1.18\text{A}$ , correspondant à une résistance minimale de  $0.37\Omega$ , puis décroît jusqu'à atteindre un courant minimal  $I_{\min} = 0$  correspondant à une résistance de  $28\Omega$ .

Les densités de courant que nous pouvons obtenir (en  $\text{A}/\text{m}^2$ ) varient en fonction du type de la pile, de sa température de fonctionnement, de la densité du catalyseur, et de la stœchiométrie de l'alimentation en gaz réactifs.

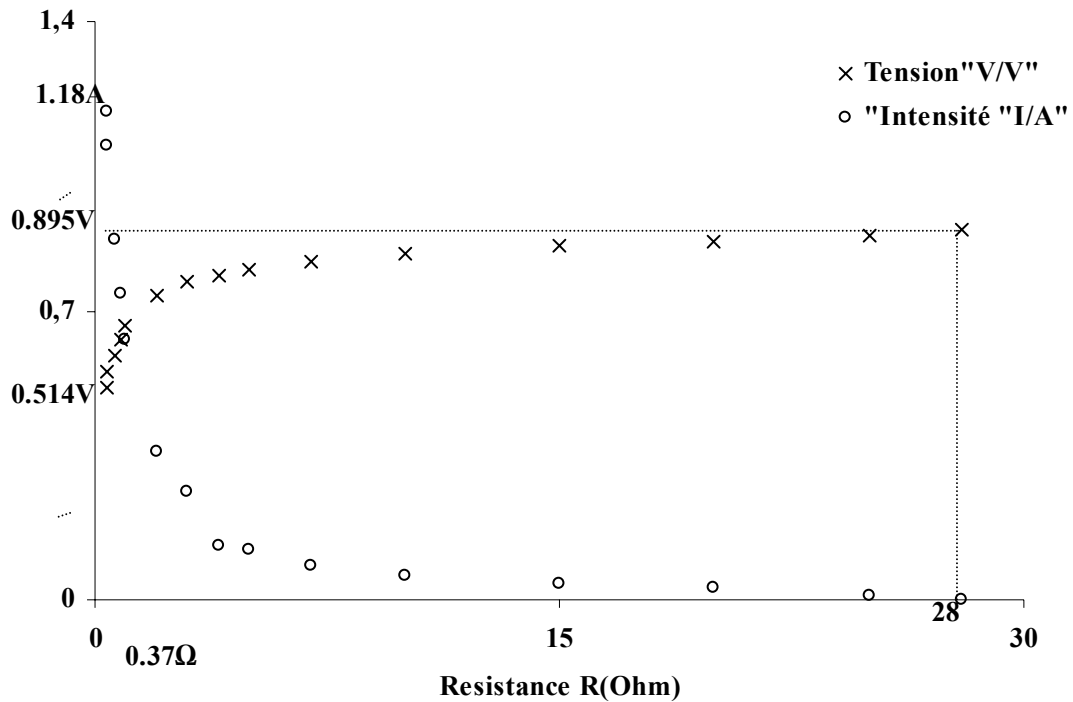


Figure IV,.4 Influence de la charge sur les propriétés électriques de la pile

Nous avons réalisé la même manipulation mais cette fois nous traçons la courbe caractéristique I-V nous obtenons la figure IV.5:

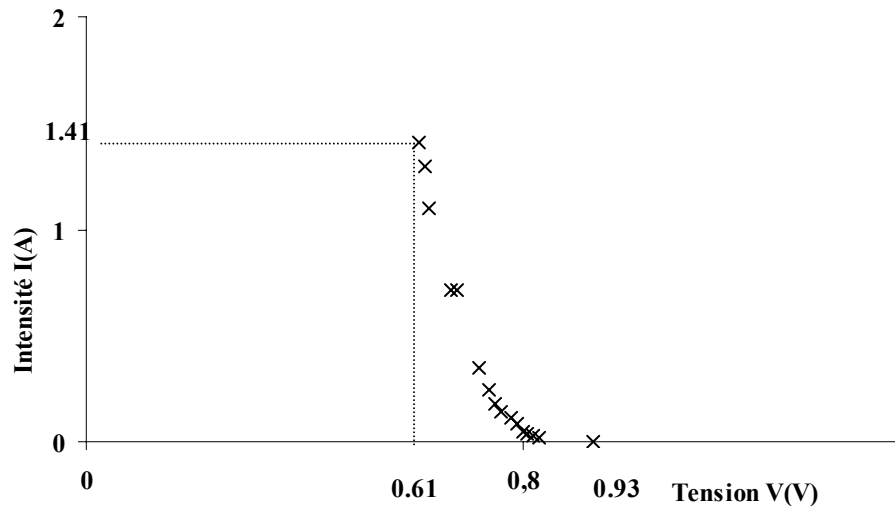


Figure IV,5 Caractéristique I-V de la pile

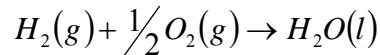
Ce graphe indique que la tension à circuit ouvert est de 0.93V, pour les faibles valeurs de tension, le courant est élevé et la courbe croît linéairement pour atteindre un courant maximal de 1.41A correspondant à une puissance de 0.86W.

**Remarque** : entre la première manipulation et la deuxième, le courant maximal débité par la pile est différent, ceci est lié à l'amélioration du débit de production de l'hydrogène et de l'oxygène par l'électrolyseur.

Pour obtenir des puissances plus importantes il faut utiliser un groupement de piles, l'augmentation du courant est obtenue en associant plusieurs piles en parallèles et l'augmentation de la tension sera obtenue en regroupant des cellules en séries, selon la charge à alimenter, il est possible à partir de la courbe I-V d'une seule pile de prévoir le nombre de piles nécessaires et la manière de les associer.

### Potentiel thermodynamique théorique de la pile

Le potentiel thermodynamique théorique de la pile se calcule à partir des données thermodynamiques relatives à la réaction de synthèse de l'eau liquide à partir de ses constituants gazeux :



Sous 1 atmosphère de gaz et à une température de 25 °C : [38]

$\Delta G^0 = -237$  kJ/mole d' $H_2$  consommée ;

$\Delta H^0 = -285$  kJ/mole ;

$\Delta S^0 = -0.164$  kJ/mole/K

$$E_{eq} = -\frac{\Delta G}{nF} = \frac{237 \cdot 10^3}{2 \cdot 96500} = 1,23V \quad (15)$$

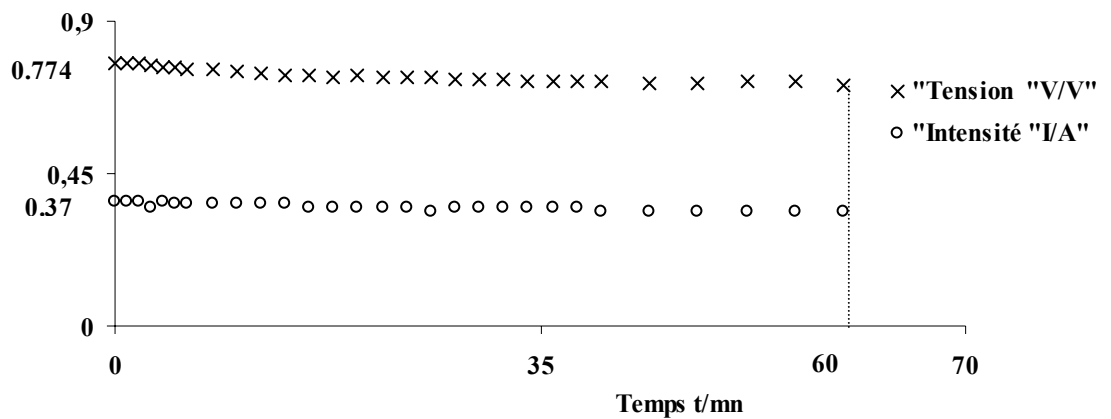
Cette valeur est théorique, et est valable à courant nul. En effet un débit d'électrons entraîne des irréversibilités, qui dépendent de l'intensité du courant fourni.

La tension à circuit ouvert ( $I = 0$ ) varie en réalité entre 0,9 et 1,1 V, dans notre cas elle est égale à 0.93V

- Cette première réduction est liée aux irréversibilités des réactions électrochimiques, notamment de la réduction de l'oxygène à la cathode.
- De plus, étant en présence de faibles densités de courant, des contre réaction sur les électrodes, dont l'importance est liée à leur cinétique, génèrent des surtensions d'activation. Ensuite, les pertes liées aux résistances électroniques et ioniques internes qui diminuent la tension entre électrodes.

#### **IV.II.1.2) Pile branchée sur une résistance fixe $R=20\Omega$**

Le but de cette expérience est d'observer le fonctionnement de la pile pendant un temps  $t = 60$  mn ; dans cette manipulation nous avons fixé la résistance à  $20\Omega$  et avons enregistré les valeurs de la tension et de l'intensité de courant en fonction du temps ; le résultat obtenu est illustré par la figure IV.6:



Figur IV, 6 Fonctionnement de la pile avec électrolyseur T=28,7°C, t=60mn, R=20hm

Il apparaît dans ce graphe que si nous voulons alimenter une charge ayant une résistance de  $20\Omega$  pendant une durée de 60 mn, le courant moyen est de 0,35 A, lequel correspond à une tension de l'ordre de 0,724 V.

#### IV.II.1.3) La pile est connectée aux réservoirs de stockage du combustible et comburant

Pour réaliser ce test, nous avons d'abord produit de l'hydrogène et de l'oxygène par électrolyse de l'eau ; ces gaz sont stockés dans des réservoirs de capacité 250ml.

Après avoir obturé les conduites d'évacuation des deux réservoirs, nous avons connecté l'alimentation en hydrogène à l'anode de la pile et l'alimentation en oxygène à la cathode photo n IV.2.

Etant donnée les difficultés rencontrées lors de cette manipulation en rapport avec la chute rapide de la pression de gaz, nous avons utilisé une valeur maximale de la résistance égale à  $10\Omega$  au lieu de  $28\Omega$  pour le cas de l'expérience 1.

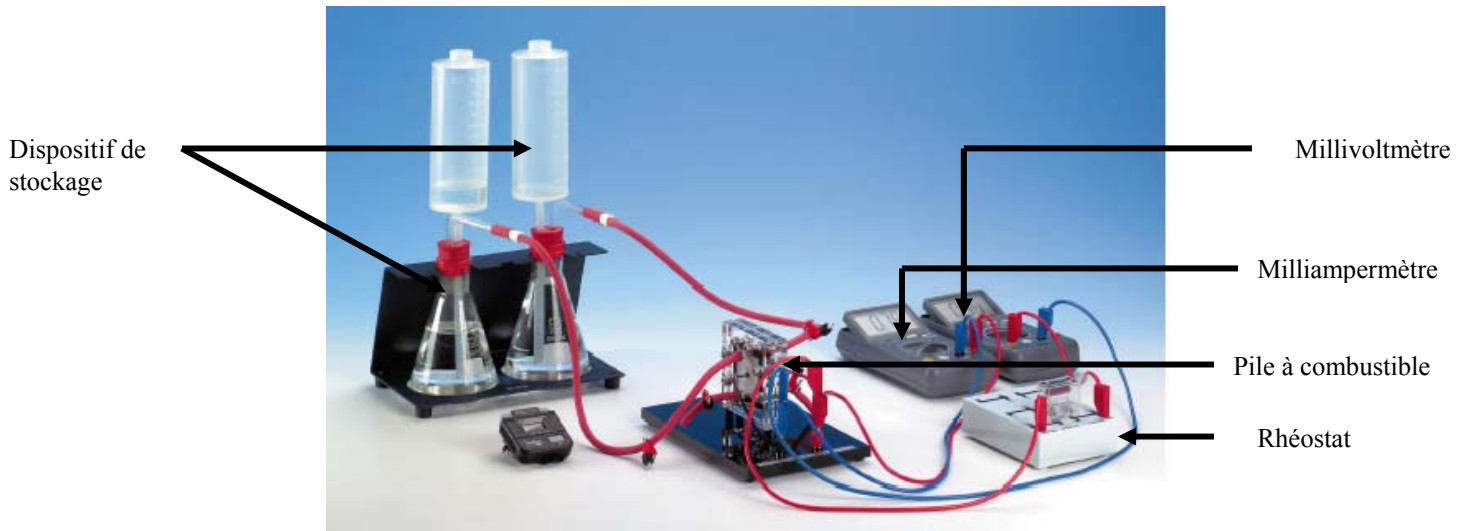


Photo n° IV.2 Pile à combustible connectée aux réservoirs de stockage

Le tracé de l'intensité de courant et de la tension en fonction du temps donne les courbes de la figure IV.7

Dans ce cas la pile débite un faible courant de 49.3mA correspondant à une résistance de  $10\Omega$ , et un courant maximal de 125.75mA pour une résistance faible de  $0.36\Omega$ .

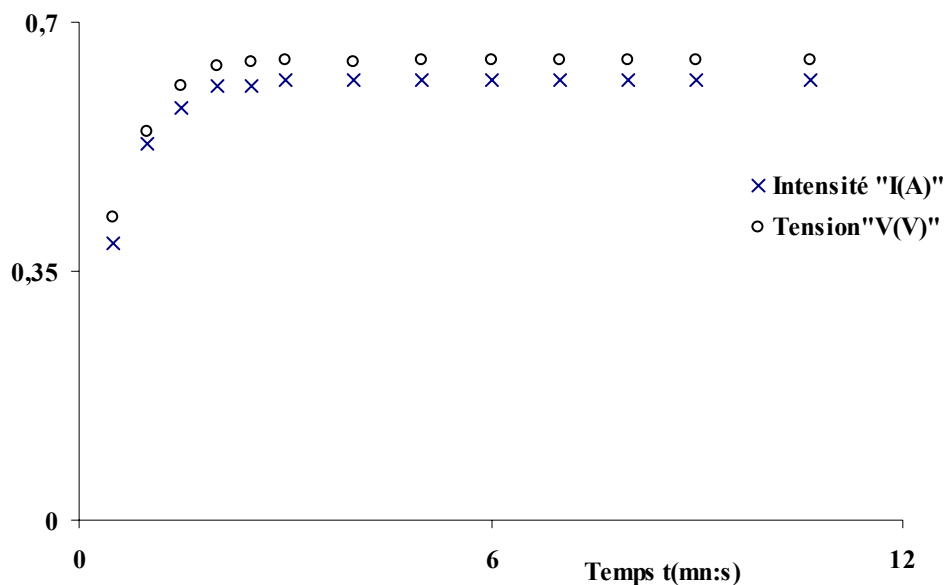


Figure IV,7 Charge de la pile avec électrolyseur  $T=28^{\circ}\text{C}$ ,  $v=50\text{mL}$ ,  $t=10\text{mn}40\text{s}$   
 $R=10\text{ Ohm}$

La tension de la pile reste constante pour toutes les résistances et est égale à 0.729V. Le problème de chute rapide de la pression de gaz, et l'impossibilité de contrôler la pression d'alimentation en combustible, ne nous a pas permis de réaliser les deux expériences dans les mêmes conditions, c.a.d à résistances égales.

Mais de cette deuxième manipulation, nous déduisons que le paramètre physique « pression », influe sur le fonctionnement de la pile.

**VI.II.2) Calcul de la quantité d'hydrogène nécessaire à la production d'un courant d'intensité I**  
D'après la loi de Faraday, la quantité de substance  $n$  formée à une électrode est proportionnelle à la quantité totale d'électricité  $Q$  traversant l'électrolyseur, nous pouvons appliquer cette même loi dans le cas d'une pile, et nous aurons :

$$Q = z.n.F \quad [38] \quad (16)$$

$z$  étant le nombre d'électrons nécessaires pour libérer une molécule de la substance.

Dans le cas d'un électrolyseur traversé par un courant d'intensité  $I$  pendant un temps  $t$ , la quantité d'électricité  $Q$  est donnée par l'égalité :

$$Q = I.t \quad (17)$$

De la combinaison de ces deux équations, nous déduisons la quantité de substance formée à l'électrode :

$$n = \frac{I.t}{z.F} \quad (18)$$

S'agissant de la formation d'un gaz, nous appliquons la loi générale des gaz tel que :

$$v = \frac{n.R.T}{P} = \frac{I.t.R.T}{z.F.P} \quad (19)$$

Le volume de gaz par unité de temps nécessaire pour la production d'un courant  $I$  est :

$$\frac{v}{t} = \frac{I.R.T}{z.F.P} \quad (20)$$

Pour déterminer cette quantité, nous avons réalisé la manipulation suivante :

1. connecter la pile sur une charge de résistance  $1\Omega$ ,
2. alimenter la pile avec 225ml d'hydrogène et 112.5ml d'oxygène,
3. pour chaque 25ml d'hydrogène consommé par la pile nous enregistrons le temps correspondant,

4. les valeurs de la tension et du courant sont enregistrées simultanément.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau IV.1 :

Niveau	vH <sub>2</sub> (ml)	t (s)	V(V)	I(A)
225 200	25	0	0.68	0.67
		282	0.66	0.65
175 150	25	0	0.67	0.66
		287	0.66	0.64
125 100	25	0	0.67	0.65
		297	0.65	0.64
75 50	25	0	0.67	0.65
		282	0.65	0.63
Valeurs moyennes		287s	0.66	0.65

Tableau n°IV.1, mesure du débit volumique nécessaire pour générer un courant I

Dans le tableau IV.2 nous comparons le débit de gaz requis, théorique, à celui mesuré :

Conditions opératoires	vH <sub>2</sub> /t (ml/s) mesuré	vH <sub>2</sub> /t (ml/s) théorique
I=0.65A, V=0.66V T= 22°C, P=10 <sup>5</sup> Pa	0.0871	0.0832

Tableau n°IV.2 comparaison entre débit théorique et débit mesuré

### VI.II.3) Consommation massique d'une pile à membrane

Compte tenu du fait que la membrane soit imperméable à l'hydrogène, nous pouvons admettre que tout l'hydrogène se transforme en ions H<sup>+</sup> au niveau des électrodes, le rendement d'ionisation est donc considéré égal à 1.

La production d'un Faraday (96500A/s) correspond à la consommation de 1g d'hydrogène, par un calcul simple de règle de trois, nous trouvons que pour fournir 1A/h il faut disposer de 37.3.10<sup>-3</sup>g d'hydrogène et de 298.4.10<sup>-3</sup>g d'oxygène, ceci produira 335.7.10<sup>-3</sup> g.

En divisant ces quantités par la tension élémentaire fixée en fonction des caractéristiques de fonctionnement demandées à la pile, nous trouvons les consommations par Wattheure.

#### VI.II.4) Efficacité de la pile à combustible

L'efficacité de la pile est déterminée après avoir calculé l'énergie électrique  $W_{\text{él}}$  produite et l'énergie chimique  $W_{\text{H}_2}$  fournie pendant la réaction :

$$W_{\text{él}} = V.I.t \quad \text{et} \quad W_{\text{H}_2} = n.H \quad [39] \quad (21)$$

V : est la tension de la pile.

I : le courant produit

H : enthalpie molaire de la réaction

L'efficacité est donnée par le rapport des deux quantités d'énergie :

$$\eta = \frac{W_{EL}}{W_{H_2}} = \frac{V.I.t}{n.H} = \frac{R.T.V.I.t}{H.P.v} \quad (22)$$

Conditions opératoires	Efficacité
I=0.65A, V=0.66V T= 295K, P=10 <sup>5</sup> Pa H = 266.1kJ/mole	42%

L'expression (22) indique que pour augmenter l'efficacité de la pile il faut :

- Diminuer le nombre de moles de gaz c'est-à-dire varier le volume total des constituants de la réaction au cours de leur traversée de la pile
- Augmenter la température et diminuer la pression de fonctionnement.

#### IV.II.5) Calcul de la quantité d'eau rejetée par la pile

La réaction ayant lieu dans la pile est :  $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

Une mole d'hydrogène correspond donc à la formation d'une molécule d'eau, en terme de volume nous pouvons écrire :

$$\begin{aligned} 22414 \text{cm}^3 H_2 &\rightarrow 18 \text{cm}^3 H_2O \\ 250 \text{cm}^3 H_2 &\rightarrow v \\ v &= \frac{250.18}{22414} = 0.20 \text{ml} \end{aligned}$$

Sachant que 1ml d'eau correspond à 20 gouttes d'eau, notre pile rejette l'équivalent de 4 gouttes (quantité très faible) si elle consomme les 250 ml d'hydrogène disponible.

Il est clair que la quantité d'eau rejetée augmente avec la quantité d'hydrogène consommé, pour des installations industrielles, il est nécessaire de prévoir l'évacuation de l'eau produite au risque d'inonder la membrane.

#### IV.II.6) Décharge de la pile

Pour observer la décharge de la pile, nous avons arrêté l'apport du combustible et du comburant, en déconnectant l'électrolyseur de la pile. La pile étant branchée sur une résistance fixe de  $10\Omega$ , nous avons enregistré simultanément la variation de la tension et du courant en fonction du temps, nous obtenons les courbes de la figure IV.8 :

Dès l'arrêt de l'alimentation de la pile, la valeur de sa tension chute de  $0,719\text{ V}$  à  $0,163\text{ V}$  en un temps très court mesuré égale à  $4\text{mn}$  et pour la même durée de temps l'intensité de courant a diminué de  $0,1274$  à  $0,0293\text{A}$ .

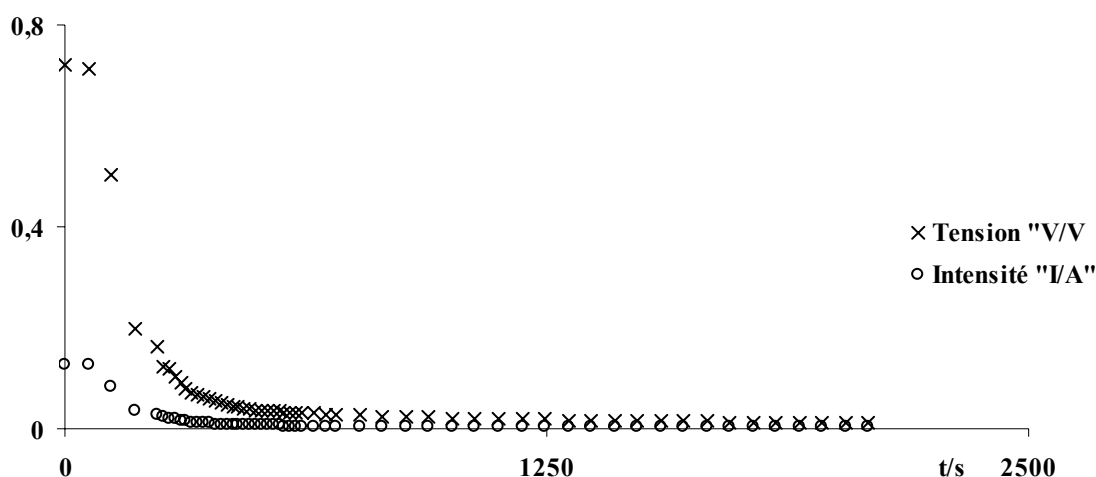


Figure IV, 8 Décharge de la pile

L'intensité de courant débitée par une pile autre que la pile à combustible, décroît en fonction du temps et finit par atteindre au bout d'un temps  $t_m$  des valeurs trop faibles pour être utilisable pratiquement, la pile se dépolarise.

Pour ce type de pile, la caractéristique de la décharge qui est la courbe donnant la tension de la pile en fonction du temps présente normalement un palier horizontal, dont la fin correspond à la durée maximale utile d'emploi.

Dans notre cas, la pile à combustible débite un courant tant qu'un combustible alimente l'anode et qu'un comburant alimente la cathode.

## **CONCLUSION**

*Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur la caractérisation de la pile à combustible type PEM, et avons fait état des résultats obtenus expérimentalement lors de la mise à l'essai de la pile.*

*Les caractéristiques électriques (tension, courant), la température, la pression des fluides en amont ou en aval sont de bons indicateurs de l'état de la pile.*

*La pile PEM est alimentée en hydrogène et en air dont il faut ajuster le débit et la pression ; nous avons remarqué que quand la pile est directement connectée à l'électrolyseur il faut également gérer les sous-produits eau et chaleur générées.*

## MODELISATION DU SYSTEME DE PRODUCTION DE L'HYDROGENE PAR VOIE SOLAIRE (PV-H<sub>2</sub>)

*Le concept de l'utilisation de l'énergie solaire pour conduire la conversion de l'eau en hydrogène a été examiné par la réalisation d'une série de tests sur le panneau photovoltaïque constituant la source d'énergie électrique et l'électrolyseur générateur d'une énergie chimique. Les paramètres météorologiques, particulièrement, l'intensité de la lumière influent considérablement sur les performances du panneau photovoltaïque et par conséquent sur le rendement de la production de l'hydrogène. La puissance maximale extraite du panneau est fonction des conditions climatiques et de la charge à alimenter. L'efficacité de l'électrolyseur est améliorée pour une longue durée de fonctionnement et pour une température de fonctionnement supérieure à la température ambiante.*

*La tension de dissociation de la molécule d'eau mesurée est de 1.45V, la différence avec la tension théorique est liée aux conditions expérimentales (température et pression), résistance ohmique et surtensions anodique et cathodique. En revanche pour former la molécule d'eau, la pile à combustible fournit une tension seuil de 0.95V au lieu de 1.23V et ce en raison des conditions expérimentales de température et de pression, des fluctuations des débits d'alimentation en combustible et en comburant ainsi qu'aux surtensions anodique et cathodique.*

*Au terme de l'exploitation des résultats expérimentaux, nous décrivons mathématiquement dans cette partie de l'étude, le comportement de l'électrolyseur, du panneau photovoltaïque, et nous élaborons un programme informatique grâce auquel il nous est possible de choisir le système de production répondant à des conditions de fonctionnement bien spécifiques.*

## V.1 MODELISATION DU PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque générant une intensité de courant, la courbe de la variation de l'intensité du courant en fonction de la tension ( $I/V$ ), montre que quand la cellule alimente des faibles charges, elle est équivalente à une source de courant constant, donc pour une première étape, la cellule peut être considérée comme une source idéale de courant.

La jonction p-n utilisée pour produire de l'électricité photovoltaïque, est l'équivalent de celle d'une diode où le courant suit une seule direction passant d'un pôle positif vers un pôle négatif, la différence fondamentale entre les deux jonctions, est le fait que la première est active et produit de l'énergie, alors que la seconde est passive et absorbe de l'énergie.

le schéma électrique équivalent à une cellule photovoltaïque est représenté par la figure V.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 [31].

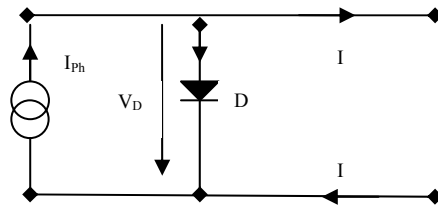


Figure V.1 Schéma électrique d'une diode

L'équation I-V de ce schéma déduite directement à partir de la loi de Kirchhoff [46] est :

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{qV}{m k T}} - 1 \right) \quad (1)$$

Avec :

$I_{ph}$  : Photo courant

$I$  : Courant de diode

$I_s$  : Courant de saturation de la diode

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

$VT$  : Tension thermodynamique  $VT=kTq$

$k$  : Constante de Boltzman =  $1.380658.10^{-23}$  JK<sup>-1</sup>

$q$  : Charge d'un électron =  $-1.60217733.10^{-19}$  As

$T$  : Température absolue

Par ailleurs, il faut noter qu'une cellule solaire présente des imperfections assimilées à des résistances séries et shunt (figure V.2):

- La résistance série  $R_s$  est liée à la résistance des électrodes et à celle du matériau, il en résulte que la tension  $V$  aux bornes de la cellule est différente de celle aux bornes de la jonction.
- La résistance shunt  $R_{sh}$  correspond à une résistance de fuite entre les deux zones n et p de la jonction, il en résulte qu'une partie du courant photovoltaïque sera dévié et ne pourra être délivrée à la charge.

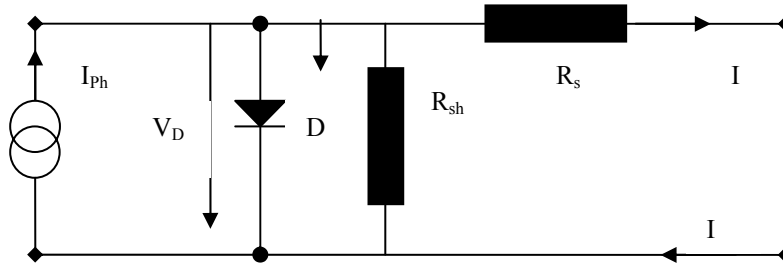


Figure V.2 Schéma électrique d'un panneau photovoltaïque

Le cas idéal serait donc d'avoir  $R_s$  très faible et  $R_{sh}$  très élevée.

La littérature propose trois modèles principaux décrivant la caractéristique de la cellule :

1. Le modèle à une diode décrit par Rauschenbach (1980) [36,46], dans ce modèle la caractéristique de la cellule satisfait l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{V - R_s I}{mVT}} - 1 \right) - \left( \frac{V - R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (2)$$

Souvent cette équation est écrite sous la forme  $f(I, V) = 0$

2. le modèle à deux diodes, basé sur le premier modèle, décrit par Bishop (1988), est représenté par l'équation  $f(V, I) = 0$  :

$$I = I_{ph1} - I_{s1} \left( e^{\frac{V - R_s I}{m_1VT}} - 1 \right) - \left( \frac{V - R_s I}{R_{sh}} \right) + I_{ph2} - I_{s2} \left( e^{\frac{V - R_s I}{m_2VT}} - 1 \right) - \left( \frac{V - R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (3)$$

3. le troisième modèle, plus général, diffère de celui à deux diodes par un terme d'extension de la forme :

$$-I - a(V + IR_s) \left( 1 - \frac{V + IR_s}{V_{Br}} \right)^{-n} \quad (4)$$

Ce terme décrit le cas où des tensions négatives élevées sont délivrées suite au recouvrement de la cellule.

Dans le but de modéliser la courbe caractéristique de la cellule solaire, le courant  $I$  doit être calculé pour chaque valeur de tension délivrée, la forme générale de l'équation décrivant la caractéristique de la cellule n'est pas explicite (pour les trois modèles). Certains auteurs ont mis au point des méthodes itératives faisant appel à une estimation initiale d'un paramètre, c'est le cas par exemple de la méthode de POWELL, la réussite de cette méthode est liée directement au bon choix de la valeur estimée.

D'autres ont suggéré l'emploi de la méthode de NEWTON - RAPHSON [Mathew 1987] [47], cette méthode suppose  $f(I, V)$  dérivable, et consiste à choisir une valeur initiale  $I_0$ , puis d'exécuter l'itération suivante :

$$I_{i+1} = I_i - \frac{f(V, I_i)}{\frac{\partial f(V, I_i)}{\partial I}} \quad (5)$$

Pour  $|I_{i+1} - I_i| < \varepsilon$  arrêter l'itération.

Le choix de l'algorithme de NEWTON - RAPHSON est en rapport direct avec sa rapidité de convergence (convergence quadratique) au voisinage de la solution. À proximité de la diode et pour les tensions négatives élevées la vitesse de convergence diminue et peut même diverger, dans ce cas la méthode suggérée est celle de la bissectrice de convergence linéaire, qui consiste à choisir un intervalle où il est probable de trouver la solution, le diviser en deux, et trouver la valeur de l'estimé et l'utiliser comme valeur initiale dans l'algorithme de NEWTON - RAPHSON

Concernant notre cas, les résultats expérimentaux que nous avons obtenus indiquent l'état détérioré du panneau, nous avons donc jugé utile d'établir la simulation du panneau en utilisant les résultats du constructeur.

Les expériences de caractérisation de la cellule étant réalisées au laboratoire, la cellule n'est donc pas soumise à des recouvrements, les tensions délivrées sont positives, dans ce cas et pour un éclairement donné, nous considérons que les propriétés

électriques de la cellule sont bien représentées par le modèle dissipatif classique, à une diode.

L'équation complète de la cellule photovoltaïque s'écrira donc (modèle à une diode) :

$$I = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{V - R_s I}{mVT}} - 1 \right) - \left( \frac{V - R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (6)$$

### V.1.1 Procédure expérimentale

En soumettant des cellules photovoltaïques à une lumière, et en mettant une charge  $R$  à leurs bornes (figure V.3) nous mesurons le courant et la tension induite par la cellule en fonction de divers paramètres (intensité de la lumière, température, charge,..).

Nous nous intéresserons notamment au rendement donné par le rapport entre la puissance  $P$  absorbée par la cellule et la puissance incidente  $P_{inc.}$ , et nous déterminerons la résistance idéale  $R$  de la charge correspondant à la puissance maximale fournie pour obtenir le rendement maximal.

Le panneau dont nous disposons contient quatre (4) cellules disposées en parallèle. La surface utile est de  $50 \text{ cm}^2$ , et les cellules sont polycristallines au silicium [48].

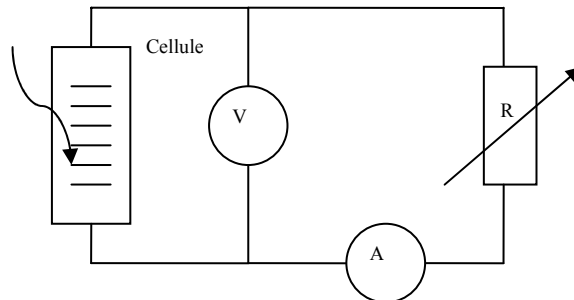


Figure V.3 Schéma du dispositif expérimental

Pour calculer le rendement d'une cellule, nous devons connaître la puissance incidente; elle est mesurée avec un capteur qui donne une tension à la sortie, proportionnelle à la puissance de la lumière. En mesurant la tension avec un voltmètre, nous avons directement la valeur de la tension  $V_{et}$  en faisant varier la charge  $R$  aux bornes de la cellule nous retrouvons la courbe caractéristique I-V du panneau (figure V.4). Les caractéristiques principales ( $V_{co}$ ,  $I_{cc}$ ,  $P_{max}$ ,...) peuvent en être déduites.

Pour la modélisation d'une cellule du panneau un programme est nécessaire.

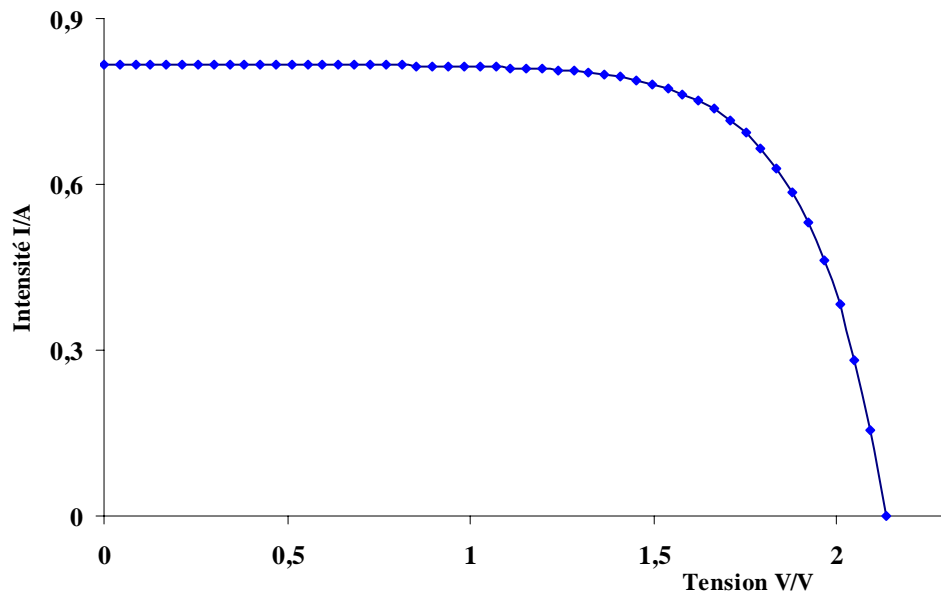


Figure V.4 Caractéristique I-V,  $I_{rr}=667.313$ ,  $T=26.1^{\circ}\text{C}$

Le modèle choisi coïncide parfaitement avec les points expérimentaux du constructeur, il s'agit donc d'un panneau photovoltaïque à une diode, régi par l'équation (6).

Dans le but de comparer la caractéristique du panneau obtenue expérimentalement avec le panneau utilisé (nos résultats) à ceux obtenus par simulation (résultats donnés par le constructeur), nous traçons les deux courbes dans le même diagramme. Et nous obtenons les courbes de la figure V.5 :

La courbe simulée et les points expérimentaux sont obtenus pour les mêmes conditions météorologiques (T et  $I_{rr}$ ).

La figure V.5 montre que la tension à circuit ouvert n'est pas modifiée pour les deux cas, mais l'allure de la caractéristique se déforme très rapidement, et la zone basse tension présente une pente, cette déformation est le résultat de l'influence des résistances séries et shunt.

Contrairement à la tension, le courant court circuit délivré par le panneau est beaucoup plus faible que celui prévu par le constructeur, nous déduisons que la valeur de la résistance shunt  $R_{sh}$  est faible il en résulte qu'une partie du courant photovoltaïque sera dévié et ne pourra être délivré à la charge.

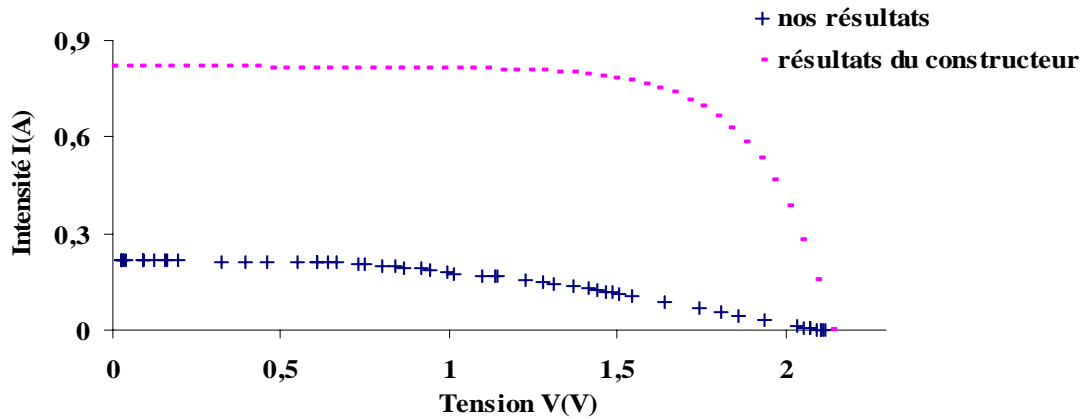


Figure V.5 Comparaison des caractéristiques I-V

### V.1.2 Modélisation Mathématique

Ayant la courbe caractéristique du panneau, la recherche des grandeurs inconnues de l'équation (6) est possible. Pour cela nous développons l'algorithme suivant:

En premier, supposons que le panneau soit idéal, nous annulons la résistance shunt et la résistance série, considérons aussi comme première approximation  $I_{ph}=I_{cc}$  (courant de court-circuit). En ne considérant que les points expérimentaux  $V_i$  supérieurs à  $V_{co}/2$ , le terme exponentiel est bien supérieur à 1, après simplification de l'équation (1) nous obtenons la relation suivante:

$$I = I_{cc} - I_s e^{\frac{V}{mVT}} \quad (7)$$

En réarrangeant les termes, cette équation peut se linéariser sous la forme:

$$\ln(I_{cc} - I) = \ln(I_s) + \frac{1}{m} \frac{V}{VT} \quad (8)$$

Une régression linéaire est effectuée en ne prenant que les points supérieurs à  $V_{co}/2$ , nous obtenons ainsi à partir de la pente et l'ordonnée à l'origine les valeurs de  $m$  et  $I_s$ . Ces valeurs constituent une estimation initiale des valeurs recherchées.

La résolution mathématique de l'équation (6) décrivant le comportement d'une cellule photovoltaïque donne l'équation suivante :

$$I = -\frac{VTm}{R_s} LambertW \left( \frac{R_s I_s R_{sh}}{VTm(R_s + R_{sh})} e^{\frac{R_{sh}(R_s I_{ph} + R_s I_s + V)}{VTm(R_s + R_{sh})}} \right) - \left( \frac{VR_s - R_s I_{ph} R_{sh} - R_s I_s R_{sh}}{R_s(R_s + R_{sh})} \right) \quad (9)$$

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

Nous obtenons aussi une autre solution par rapport à la tension :

$$V = -VTm LambertW \left( \frac{I_s R_{sh}}{VTm} e^{\frac{R_{sh}(I_{ph} - I + I_s)}{VTm}} \right) - I(R_s + R_{sh}) + I_{ph} R_{sh} + I_s R_{sh} \quad (10)$$

Bien que la seconde solution apparaît plus simple, d'un point de vue numérique la première est meilleure, ceci est causé par la précision de calculs des compilateurs, qui est limitée. Chaque type réel a une plage définie, la seconde solution pose problème, car généralement la valeur de  $R_{sh}$  est très grande, augmentée d'un terme exponentiel, celle-ci dépasse la limite admise pour les types réels des logiciels de calculs. Donc pour le calcul numérique, nous utiliserons la première expression.

A partir de l'équation (10) nous pouvons déduire l'équation décrivant la tension du circuit ouvert  $V_{co}$  :

$$V_{co} = I_{ph} R_{sh} - VTm LambertW \left( \frac{I_s R_{sh}}{VTm} e^{\frac{R_{sh}(I_{ph} + I_s)}{VTm}} \right) + I_s R_{sh} \quad (11)$$

Et l'intensité du courant en court-circuit est exprimée par la relation :

$$I_{cc} = \frac{VTm}{R_s} LambertW \left( \frac{R_s I_s R_{sh}}{VTm(R_s + R_{sh})} e^{\frac{R_{sh}(R_s I_{ph} + R_s I_s)}{VTm(R_s + R_{sh})}} \right) - \frac{-R_s I_{ph} R_{sh} - R_s I_s R_{sh}}{R_s(R_s + R_{sh})} \quad (12)$$

La tangente au point  $V_{co}$  est :

$$\left. \frac{\partial V}{\partial I} \right|_{I=0} = -R_s + R_{sh} \left( \frac{Lambert \left( I_s R_{sh} e^{\frac{R_{sh}(I_{ph} + I_s)}{mVT}} \right)}{1 + Lambert \left( I_s R_{sh} e^{\frac{R_{sh}(I_{ph} + I_s)}{mVT}} \right)} - 1 \right) \quad (13)$$

A partir des estimations initiales des paramètres  $I_{ph}$ ,  $I_s$  et  $m$  ainsi qu'en combinant l'équation (11), nous obtenons une estimation initiale de la résistance shunt par l'expression :

$$R_{sh} = -V_{co} \left( -I_{ph} - I_s + I_s e^{\frac{V_{co}}{VTm}} \right) \quad (14)$$

Aussi en combinant l'équation (13), nous obtenons une estimation initiale de la résistance série, la valeur de la tangente est déduite à partir des résultats expérimentaux.

$$R_s = - \frac{\left( R_{sh} + \tan gente + \tan gente LambertW \left( \frac{I_s R_{sh}}{VTm} e^{\frac{R_{sh}(I_{ph} + I_s)}{VTm}} \right) \right)}{1 + LambertW \left( \frac{I_s R_{sh}}{VTm} e^{\frac{R_{sh}(I_{ph} + I_s)}{VTm}} \right)} \quad (15)$$

Cette gymnastique mathématique permet d'avoir une estimation initiale de toutes les grandeurs intervenant dans la modélisation du panneau photovoltaïque. Une méthode des moindres carrés non-linéaire est à appliquer pour obtenir les valeurs finales de ces paramètres, dans ce but nous avons opté pour l'algorithme de Powell [49].

Avec cette méthode, pour le panneau dont nous disposons nous avons obtenus les résultats suivants:

$$R_s = 6 \cdot 10^{-17}$$

$$R_{sh} = 10^{15}$$

$$I_s = 3.3159 \cdot 10^{-6}$$

$$I_{ph} = 0.217969$$

$$m = 1.9705$$

Ces résultats démontrent que le panneau utilisé peut être considéré comme idéal. La résistance série est très faible et la résistance shunt est très importante, donc, le courant  $I_s$  est très faible devant le courant photovoltaïque  $I_{ph}$ . De plus le facteur d'idéalité est proche de 2.

Les différentes grandeurs du panneau  $m, VT, I_s, I_{ph}$  sont calculées à une température et irradiance de référence, connaissant leur dépendance, il est possible d'estimer ces

variables à différentes températures du panneau et irradiance solaire, les formules sont les suivantes :

$$m = m_{ref} \frac{T}{T_{ref}}$$

$$VT = T \frac{1,38.10^{-23}}{1,6.10^{-19}} \quad (16)$$

$$I_s = C_0 * T^3 \exp(-E_g / m / VT) \quad [50]$$

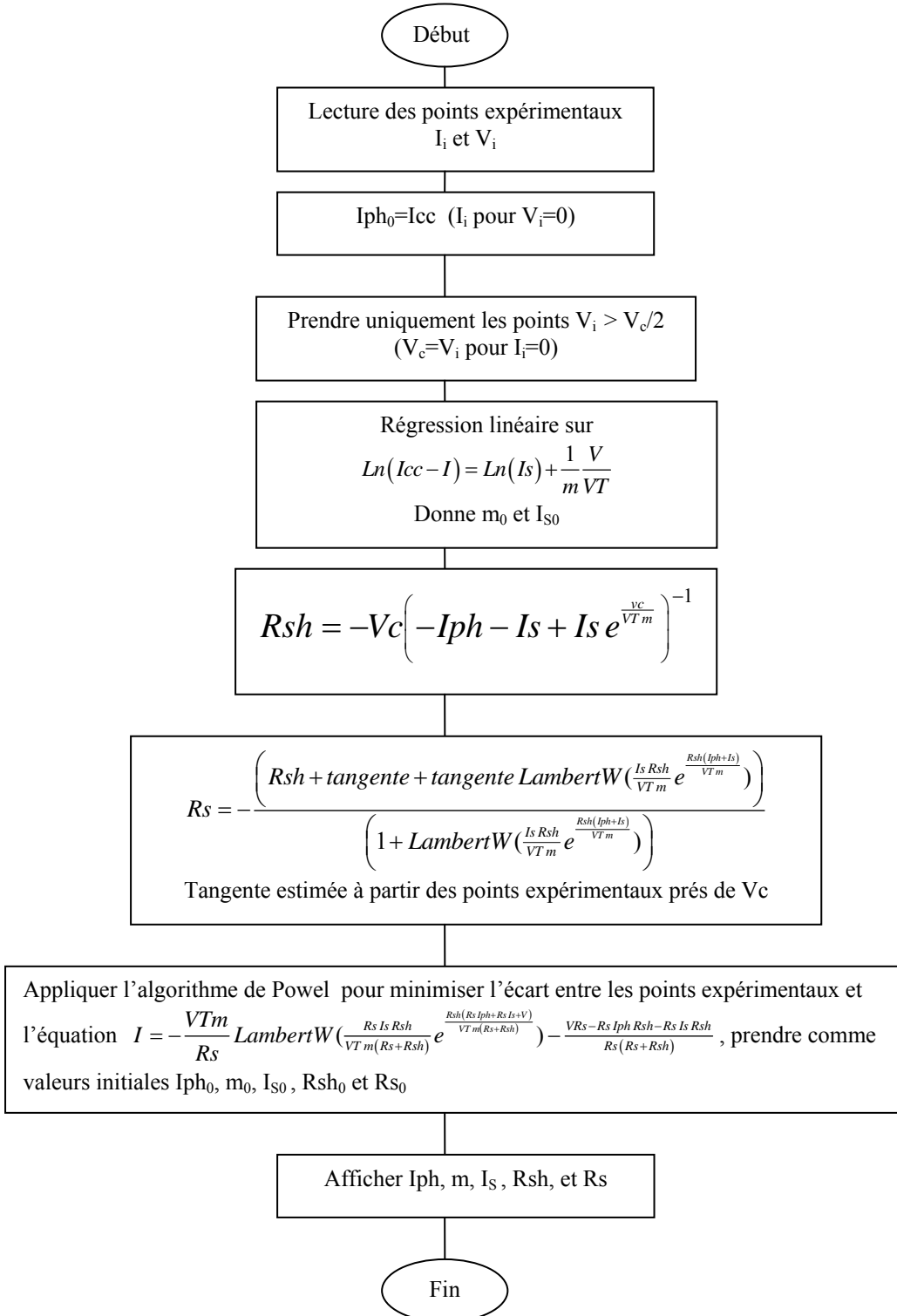
$$I_{ph} = C_1 I_{rr} (1 + 0.001(T - T_{ref}))$$

Avec :

$$C_0 = \frac{I_{sref}}{T_{ref}^3 \exp(-E_g / m / VT)}$$

$$C_1 = \frac{I_{ph}}{I_{rrref}} \quad (17)$$

**Algorithme correspondant :**



### V.1.3 Calcul de la puissance maximale du panneau

La puissance est le produit  $I.V$ , pour calculer la puissance maximale, nous calculons sa dérivée par rapport à  $V$ , puis nous résolvons cette équation pour obtenir l'extremum, l'expression de la puissance est:

$$P = -\frac{VVTm}{Rs} \text{LambertW} \left( \frac{RsIsRsh}{VTm(Rs + Rsh)} e^{\frac{Rsh(Rs)Iph + RsIs + V}{VTm(Rs + Rsh)}} \right) - V \frac{VRs - RsIphRsh - RsIsRsh}{Rs(Rs + Rsh)} \quad (18)$$

Sa dérivée est donnée par la relation:

$$\frac{\partial P(V)}{\partial V} = - \left( Rs + \frac{\alpha(Rsh^2 + RshRs)}{(1 + \alpha)(Rsh + Rs)} \right) V (Rsh + Rs)^{-1} Rs^{-1} - \frac{VRs + cmVT(Rsh + Rs) - RsRsh(Iph + Is)}{(Rsh + Rs)Rs} \quad (19)$$

Avec :

$$\alpha = \text{LambertW} \left( \frac{RsIsRshe}{RsIsRshe} \frac{Rsh(RsIph + RsIs + V)}{mVT(Rsh + Rs)} m^{-1} VT^{-1} (Rsh + Rs)^{-1} \right) \quad (20)$$

Cette équation est résolue par la méthode de Regula-Falsi [47], les bornes de l'intervalle sont 0 et  $V_{co}$  calculées par l'équation (11). Le point correspondant à la puissance maximale  $V_{max}$ ,  $I_{max}$  ainsi calculé, nous pouvons estimer le rendement du panneau, le facteur de forme et la résistance de charge idéale :

$$\text{Rendement} = \frac{I_{max} V_{max}}{\text{Surface} * \text{Irradiance}} \quad (21)$$

$$\text{FacteurForme} = \frac{I_{max} V_{max}}{V_{co} I_{cc}} \quad (22)$$

### V.1.4 Influence de l'irradiation solaire sur le panneau

Grace au programme développé, nous faisons varier l'irradiance solaire en maintenant une température constante, le tracé de la courbe I-V (figure V.6) nous renseigne sur l'influence de l'irradiance sur les paramètres électriques du panneau , le résultat obtenu est conforme à celui donné par la théorie et concorde bien avec les données expérimentales du constructeur.

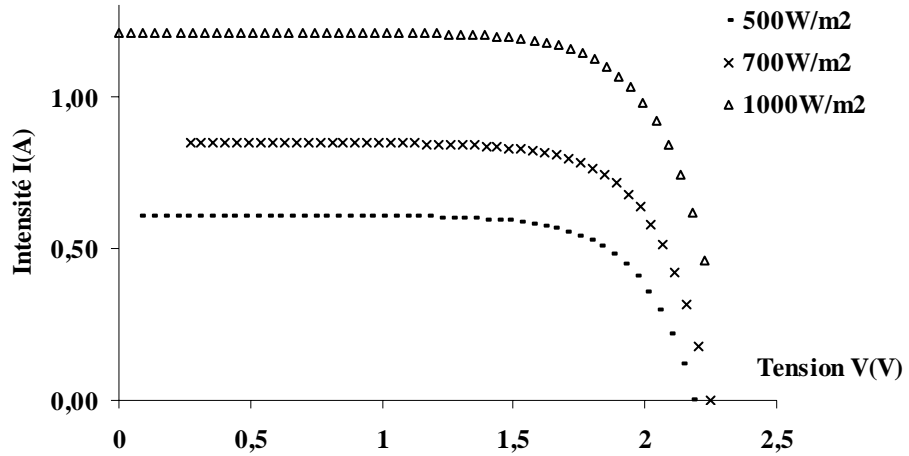


Figure V.6 Influence de l'irradiance sur la caractéristique I-V T=15°C Ns=4 Np=4

**V.1.5 Influence de la température sur les caractéristiques électriques du panneau**

Dans ce cas nous avons effectué une simulation où nous maintenons une irradiance constante pour différentes températures, remarquer, que dans le cas expérimental nous n'avons pas pu réaliser l'expérience. Les courbes obtenues sont illustrées dans la figure V.7

L'augmentation de la température entraîne une augmentation du photocourant en

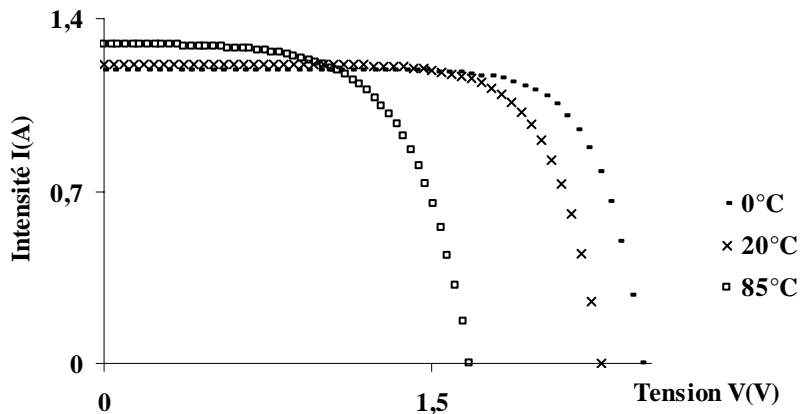


Figure V.7 Influence de la température sur la caractéristique I-V

raison principalement de la diminution de la largeur de la bande interdite  $E_g$  du matériau semiconducteur.

En revanche, la tension à circuit ouvert diminue avec l'augmentation de la température, le point de puissance maximal se trouve par conséquent décalé vers les faibles tensions.

Globalement, l'augmentation de la température de travail se traduit par une diminution de puissance disponible. Ainsi une cellule pouvant délivrer 2.17W à 0°C ne pourrait fournir que 1.33W si elle était amenée à travailler à 85°C (condition extrême de température)

## V.2 MODELISATION DE L'ELECTROLYSEUR

### V.2.1 *Description générale*

La décomposition de l'eau en hydrogène et oxygène gazeux est obtenue en faisant traverser un courant électrique continu aux bornes de deux électrodes séparées par un électrolyte ayant une conductivité ionique élevée (Diviseck 1990) [18].



L'électrolyte utilisé dans notre cas est une membrane échangeuse de protons, l'hydrogène est produit à la cathode et l'oxygène est produit à l'anode

Si nous considérons les hypothèses suivantes :

- L'hydrogène et l'oxygène sont des gaz idéaux
- L'eau d'électrolyse est un fluide incompressible;
- Le gaz et l'eau sont des phases séparées.

Les variations d'enthalpie, d'entropie et l'énergie de Gibbs de la réaction ci-dessus sont calculées comme suit :

$$\Delta H = \Delta H_{\text{H}_2} + \frac{1}{2}\Delta H_{\text{O}_2} - \Delta H_{\text{H}_2\text{O}} \quad (23)$$

Avec

$$\Delta H_x = C_{p,x}(T - T_{ref}) + \Delta H_{f,x}^0 \quad (24)$$

x=H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> ou H<sub>2</sub>O

De même, la variation totale de l'entropie est :

$$\Delta S = \Delta S_{\text{H}_2} + \frac{1}{2}\Delta S_{\text{O}_2} - \Delta S_{\text{H}_2\text{O}} \quad (25)$$

Où :

$$\Delta S_x = C_{px} \ln\left(\frac{T}{T_{ref}}\right) - R \ln\left(\frac{P}{P_{ref}}\right) + S_{fx}^0 \quad (26)$$

x=H<sub>2</sub> ou O<sub>2</sub>

$$\Delta S_{H_2O} = C_{pH_2O} \ln\left(\frac{T}{T_{ref}}\right) + S_{fH_2O}^0 \quad (27)$$

$$\text{L'enthalpie de Gibbs est donnée par : } \Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (28)$$

$C_{px}$  : chaleur spécifique standard,  $\text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$

$\Delta H_x$  : variation de l'enthalpie,  $\text{Jmol}^{-1}$

$\Delta H_{fx}^0$  : enthalpie de formation standard,  $\text{Jmol}^{-1}$

P : pression, bar

R : constante des gaz parfaits,  $\text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$

$\Delta S_x$  : variation de l'entropie,  $\text{Jmol}^{-1}$

$S_{fx}^0$  : entropie standard de formation  $\text{Jmol}^{-1}$

T : température, K

Dans les conditions standard, la dissociation de l'eau n'est pas une réaction spontanée ( $\Delta G_{fH_2O}^0 = 237\text{kJ mole}^{-1}$ ), elle requiert une tension, à l'opposé de la pile qui délivre une tension; dans les deux cas la tension standard réversible est égale à 1,23V.

Le travail utile maximal (travail réversible) requis dans un procédé électrochimique fonctionnant à température et pression constantes est égal à la variation de l'énergie de Gibbs  $\Delta G$ .

Dans une cellule d'électrolyse idéale, ce travail réversible est équivalent au travail électrique. Ainsi,  $W_{el} = \Delta G$ , il est considéré positif pour un électrolyseur et négatif dans le cas d'une pile.

La quantité d'énergie totale nécessaire à l'électrolyse de l'eau est équivalente à la variation d'enthalpie libre.

### V.2.2 Relation entre la variation de l'énergie de Gibbs et le potentiel de la cellule.

Du point de vue thermodynamique, pour une relation réversible, le travail électrique requis pour dissocier une molécule d'eau est [39] :  $W_{el} = \Delta G$ .

Par ailleurs le potentiel d'électrode E ou la différence de potentiel à travers les électrodes, est lié au travail électrique par la relation:

$W_{el} = q.E$ , q étant la charge électrique transférée du circuit externe à la cellule.

Sachant que :  $q=n.F$  (loi de Faraday) , nous obtenons :  $W_{el} = \Delta G = q.E = n.F.E$  (29)

Dans un procédé électrochimique réversible, la force électromotrice  $E$  est appelée tension réversible  $U_{rév}$  et est exprimée par :  $U_{rév} = \Delta G / nF$  (30)

Dans les conditions standard  $U_{rév}=1.229V$ , cette valeur varie en fonction de la température.

### V.2.3 Modélisation mathématique

L'électrolyseur utilisé est constitué d'une seule cellule. Le modèle développé est basé sur les caractéristiques d'une seule cellule.

Pour des débits de production et des tensions plus élevés il suffit d'associer un nombre  $n$  de cellules en séries ou en parallèle correspondant au débit et la tension désirée.

#### Caractéristique I-V

la cinétique des électrodes dans une cellule d'électrolyse peut être modélisée par l'emploi de relations empiriques courant-tension.

Dans le cas d'un électrolyseur type alcalin, des modèles empiriques ont été suggérés par Griesshaber et Sck (1991) [51], Hug et al (1992), Havreet al (1995) et Vanhanen (1996);

Le modèle de Griesshaber et Sick est sous la forme :

$$U = U_{rev} + \frac{r}{A} I + s \log \left( \frac{t}{A} I + 1 \right) \quad (31)$$

$U$  : tension de fonctionnement (V);

$U_{rev}$  : tension réversible de la cellule (V);

$r$  : résistance ohmique de l'électrode ( $\Omega$ );

$s, t$  : coefficients de surtension aux électrodes;

$A$  : surface des électrodes ( $m^2$ );

$I$  : courant consommé par la cellule .

Faisant partie d'une nouvelle technologie, la documentation sur la modélisation des électrolyseurs type PEM est très difficilement accessible; nous avons cependant trouvé le modèle proposé par T.TANI, (2000) [50] que nous avons testé sur nos résultats expérimentaux .

Nous décrivons le comportement électrique de l'électrolyseur par les équations mathématiques adaptées :

$$V_{cel} < a \quad I_{cel} = bV_{cel}^c \quad (32)$$

$$V_{cel} \geq a \quad I_{cel} = dV_{cel} + e \quad (33)$$

Le coefficient « a » correspond à l'établissement du régime de l'électrolyseur .

L'algorithme utilisé dans ce cas pour obtenir ces coefficients est une modification de l'algorithme de Csendes d'optimisation globale par la méthode des intervalles [52] (voir annexe n°3 A). Cette méthode est très puissante et permet de converger vers la solution en peu de temps comparé à d'autres techniques, mais la principale difficulté est l'estimation initiale de l'ordre de grandeur des coefficients.

Nous obtenons ainsi les coefficients suivants :

$$a = 1.61$$

$$b = 1.059328 \cdot 10^{-2}$$

$$c = 4.9032$$

$$d = 6.651525$$

$$e = -10.516734$$

l'application du programme de simulation au modèle choisi donne la courbe de la courbe V.8 :

Les points expérimentaux coïncident parfaitement avec le modèle choisi, le comportement électrique de l'électrolyseur est donc bien décrit par les équations (32) et (33)

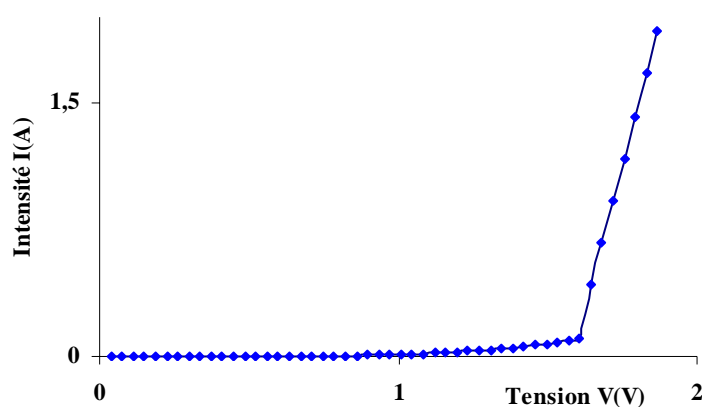


Figure V,8 Caractéristique I-V simulée

### V.3 SIMULATION DU SYSTEME DE PRODUCTION D'HYDROGENE SOLAIRE

Pour prévoir les performances d'un système donné et obtenir une meilleure analyse des résultats, il serait préférable de proposer un modèle mathématique qui serait en conformité avec les résultats expérimentaux et qui faciliterait, le choix du système.

Le but de ce travail est d'établir une méthodologie de modélisation d'un système de production d'hydrogène par électrolyse dont l'électricité est fournie par un panneau photovoltaïque (figure V.9). Pour cela nous posons les équations décrivant le comportement électrique du panneau et celui de l'électrolyseur, et nous proposons une méthode pour la détermination des différentes grandeurs qui nous permettrons de simuler ce comportement à différentes conditions opératoires.

Après obtention des modèles mathématiques décrivant le comportement de l'électrolyseur et du panneau photovoltaïque. Nous nous intéressons au système constitué des deux éléments, nous déterminerons le point de fonctionnement, ainsi que la production annuelle en hydrogène de l'électrolyseur.

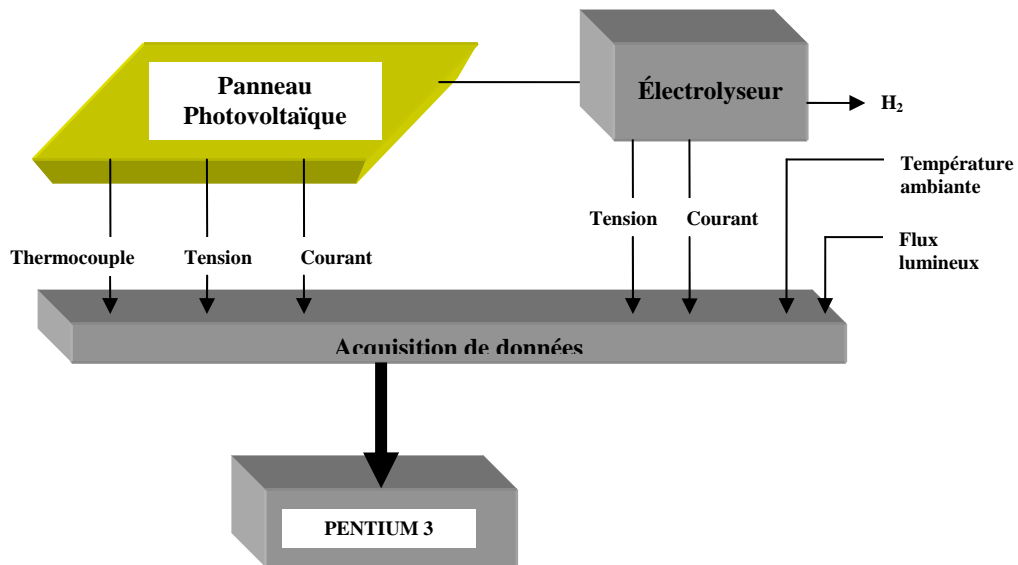


Figure V. 9 Configuration du système expérimental

### V.3.1 Calcul du point de fonctionnement et de la production

Graphiquement, le point de fonctionnement du système est défini par l'intersection de la courbe I-V du panneau avec la courbe I-V de l'électrolyseur [50], figure V.10.

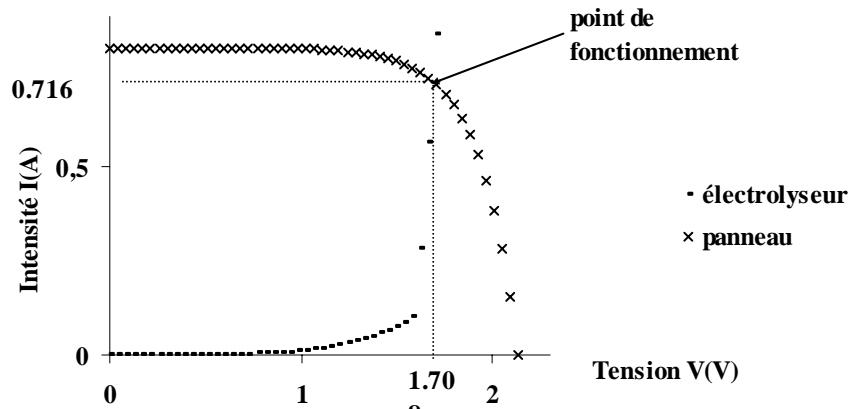


Figure V,10 Point de fonctionnement  $I_{rr}=667.313W/m^2$ ,  $T=26^{\circ}C$

Mathématiquement, ceci revient à résoudre le système d'équations constitué de l'équation du panneau  $f(x, y)$  et des deux équations de l'électrolyseur  $g(x, y)$  et  $h(x, y)$ . Nous utilisons pour cela la méthode de Newton en multidimension [47] voir annexe n°3 B.

Nous obtenons ainsi le courant  $I_f$  et la tension  $V_f$  de fonctionnement du système pour n'importe quelles conditions météorologiques

Après application du programme de simulation pour la résolution des équations décrivant l'électrolyseur et le panneau, puis l'application de la méthode de Newton multidimensionnel pour déterminer le point de fonctionnement, nous obtenons le graphe de la figure V.10.

Le point de fonctionnement obtenu est localisé au point, de puissance maximale délivrée par le panneau et consommée par l'électrolyseur. Pour un éclairement du soleil  $I_{rr} = 667.313W/m^2$  et à une température

$T= 26^{\circ}C$ , le point de fonctionnement est  $P_f(V_f, I_f) = (1.7089V, 0.7167A)$ .

### V.3.2 Simulation de la production d'hydrogène

La production de gaz est obtenue en utilisant la loi des gaz parfaits

$(v = \frac{n.R.T}{P} = \frac{I.t.R.T}{z.F.P})$  où la valeur de l'intensité du courant est celle obtenue au point

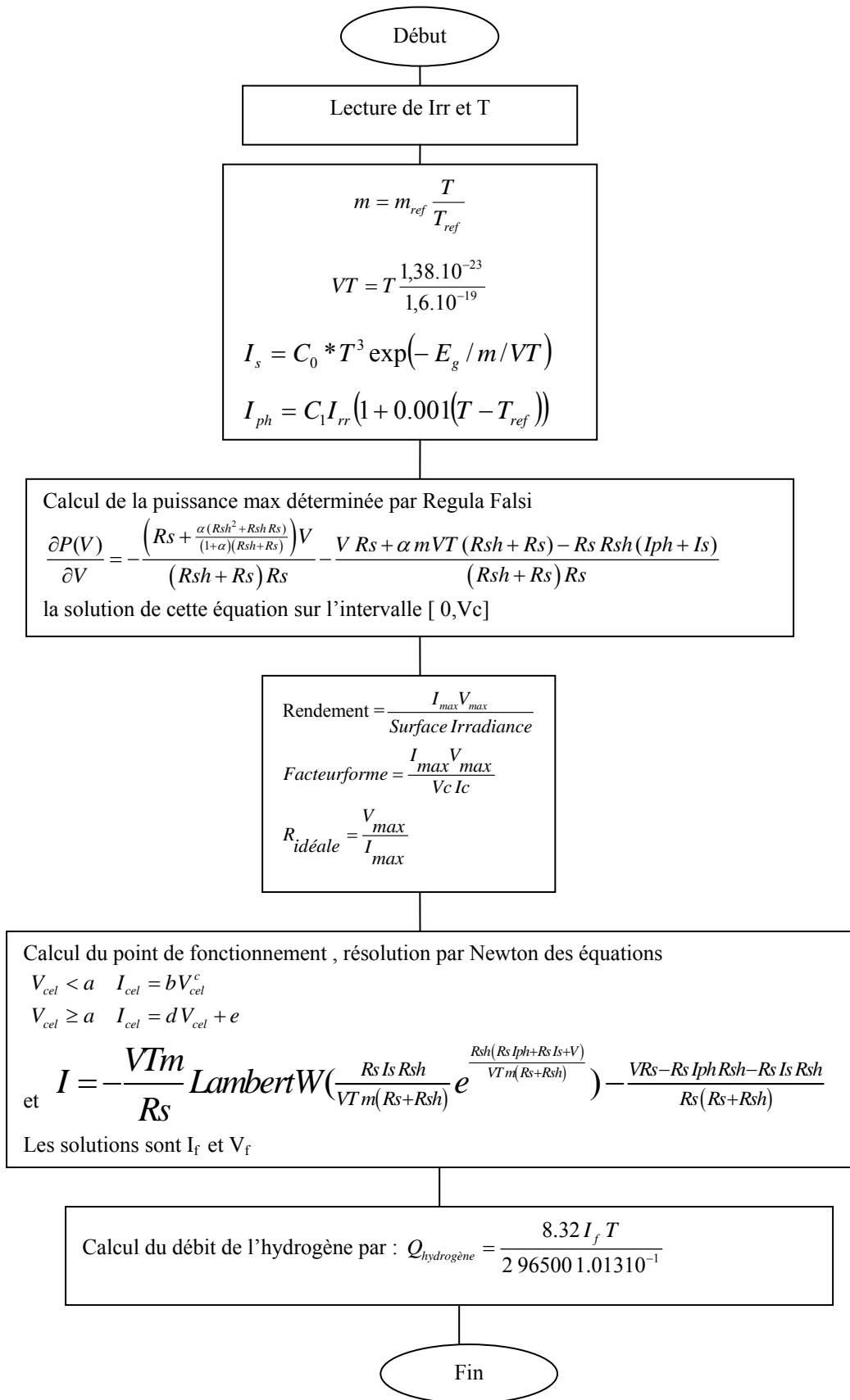
de fonctionnement .

Le programme développé nous permet de simuler puis d'optimiser un système de production d'hydrogène par voie solaire.

En effet, tenant compte des paramètres météorologiques (Irradiance et température) puis des dimensions du panneau ( nombre de cellules en série et en parallèle) il est possible de déterminer :

- le courant court circuit et la tension à circuit ouvert du panneau photovoltaïque .
- la puissance maximale délivrée.
- Le facteur de forme ainsi que le rendement .
- Le point de fonctionnement du système.
- La production annuelle au point de fonctionnement .

**L’algorithme correspondant :**



Comme exemple, nous regroupons quelques résultats dans les tableaux V.1, V.2, et V.3 pour trois cas différents :

Dans un premier cas, nous avons fait varier l'irradiance et le nombre de cellule en parallèle  $N_p$  (pour augmenter le courant généré par le panneau) tout en maintenant la température de la cellule et le nombre de cellules en série  $N_s$  constant, les résultats sont regroupés dans le tableau V.1.

#### Cas a)

Irr (Wm <sup>2</sup> )	T (°C)	Ns	Np	V <sub>co</sub> (V)	I <sub>cc</sub> (A)	P <sub>max</sub> (W)	FF	Rd	V <sub>f</sub> (V)	I <sub>f</sub> (A)	Pr. (l/an)
100	20	4	40	1,816	1,216	1,492	0,676	0,075	1,674	0,619	2433,894
200	20	4	36	1,94	2,9	2,951	0,690	0,082	1,776	1,294	5088,142
300	20	4	32	2,034	2,918	4,143	0,698	0,086	1,848	1,775	6978,385
400	20	4	28	2,092	3,405	5,007	0,703	0,089	1,899	2,113	8307,897
500	20	4	24	2,136	3,648	5,510	0,707	0,092	1,932	2,337	9187,854
600	20	4	20	2,172	3,648	5,628	0,710	0,094	1,950	2,454	9649,103
700	20	4	16	2,203	3,405	5,347	0,713	0,095	1,950	2,451	9639,102
800	20	4	12	2,230	2,918	4,652	0,715	0,097	1,925	2,287	8992,351
900	20	4	8	2,253	2,189	3,536	0,717	0,098	1,864	1,879	7389,917
1000	20	4	1	2,274	0,304	0,497	0,719	0,099	1,625	0,292	1149,527

Tableau n°V.1 Résultat de la variation de l'irradiance et du nombre de cellule en parallèle

#### Constatations

L'idéal serait d'avoir un maximum de puissance délivrée par le panneau pour une surface minimale. Il n'est pas possible d'établir un consensus entre ces deux facteurs, puisque la puissance augmente avec la surface du panneau.

la surface minimale dans notre cas est celle choisie pour une irradiance maximale (1000w/m<sup>2</sup>, choix purement économique) la production annuelle est dans ce cas minimale, nous concluons que ce système n'est pas performant.

Par ailleurs, pour une irradiance minimale (100W/m<sup>2</sup> → temps nuageux), la production est meilleure que pour un temps bien ensoleillé (1000W/m<sup>2</sup>) mais il lui correspond une surface de panneau maximale, de même, le système n'est pas performant.

Selon les résultats de ce tableau, le système idéal correspond à une irradiance moyenne de  $600\text{W/m}^2$ , la puissance délivrée par le panneau est maximale, et par conséquent la production est également maximale, la surface du panneau correspondant optimale est de  $(2.5 \times 5) \times 4 \times 20 = 0.1\text{m}^2$ .

Globalement, nous concluons qu'un panneau de  $0.1\text{m}^2$  éclairé par une lumière ayant une intensité du courant de  $600\text{W/m}^2$ , à une température de  $20^\circ\text{C}$  génère une puissance maximale de  $5.63\text{W}$ .

Cette puissance est consommée par un électrolyseur pour produire l'équivalent de  $9649\text{ l/an}$  d'hydrogène gazeux.

Dans un deuxième cas, nous avons fait varier l'irradiance, le nombre de cellule en parallèle  $N_p$  et nous avons augmenté la température de la cellule de 20 à 35°C. Le nombre de cellules en série  $N_s$  est maintenu constant, les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau V.2

Cas b)

Irr (W/m <sup>2</sup> )	T (C°)	Ns	Np	V <sub>co</sub> (V)	I <sub>cc</sub> (A)	P <sub>max</sub> (W)	FF	Rd	V <sub>f</sub> (V)	I <sub>f</sub> (A)	Pr. (l/an)
100	35	4	40	1,655	1,234	1,321	0,647	0,066	1,614	0,220	909,445
200	35	4	36	1,800	2,222	2,655	0,664	0,074	1,704	0,818	3382,364
300	35	4	32	1,885	2,962	3,759	0,673	0,078	1,770	1,255	5187,009
400	35	4	28	1,945	3,456	4,567	0,679	0,082	1,818	1,575	6511,071
500	35	4	24	1,992	3,703	5,045	0,684	0,084	1,852	1,803	7454,317
600	35	4	20	2,030	3,703	5,170	0,688	0,086	1,874	1,947	8049,465
700	35	4	16	2,062	3,456	4,924	0,691	0,088	1,882	1,999	8261,867
800	35	4	12	2,090	2,962	4,294	0,693	0,089	1,871	1,925	7958,798
900	35	4	8	2,115	2,222	3,269	0,696	0,091	1,830	1,653	6833,803
1000	35	4	1	2,137	0,309	0,460	0,698	0,092	1,624	0,282	1165,840

Tableau n°V.2 Résultat de l'augmentation de la température avec variation de l'irradiance et du nombre de cellule en parallèle

Constatations :

Comparé aux résultats du tableau n°1, nous avons changé seulement la température de la cellule, la première conséquence est la diminution du rendement du panneau, pour 20°C le rendement du panneau est compris entre 7.5% et 9.9%, pour 35°C, le rendement est entre 6.6% et 9.2% ceci est dû au fait que les propriétés électriques des semi conducteurs sont très sensibles à la température

L'augmentation de la température influe considérablement sur les performances du panneau, la puissance maximale a diminué, elle est de 5.17W pour un flux lumineux de 600W/m<sup>2</sup> au lieu de 5.628W .

Le déplacement du point de puissance maximale implique que l'impédance de charge doit être modifié pour que l'on puisse extraire toute la puissance disponible.

Dans un troisième cas, nous avons choisi de garder une irradiance et une température constantes. En revanche nous avons fait varier le nombre de cellule en parallèle  $N_p$  et le nombre de cellules en série  $N_s$ , les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau V.3.

Cas c)

Irr (W/m <sup>2</sup> )	T (C°)	Ns	Np	V <sub>co</sub> (V)	I <sub>cc</sub> (A)	P <sub>max</sub> (W)	FF	Rd	V <sub>f</sub> (V)	I <sub>f</sub> (A)	Pr. (l/an)
1000	25	1	1	0,557	0,306	0,121	0,712	0,097	0,557	0,001	2,404
1000	25	1	4	0,557	1,222	0,485	0,712	0,097	0,557	0,001	2,405
1000	25	1	24	0,557	7,333	2,908	0,712	0,097	0,557	0,001	2,406
1000	25	1	36	0,557	10,999	4,362	0,712	0,097	0,557	0,001	2,406
1000	25	6	36	3,343	10,999	26,169	0,712	0,097	2,877	8,622	34483,018
1000	25	6	90	3,343	27,497	65,423	0,712	0,097	3,193	10,719	42867,486

Tableau n°V.3, résultat de la variation du nombre de cellule en parallèle et du nombre de cellule en série pour une irradiance et une température de référence.

#### Constatations

Sachant que les caractéristiques techniques d'un panneau photovoltaïque commercial sont données pour une irradiance solaire de 1000W/m<sup>2</sup> et une température moyenne de 25°C, nous avons dans ce troisième tableau voulu choisir notre système en optant pour une production approximatif de 45000 l/an.

Pour cela nous avons d'abord déterminé les propriétés d'une seule cellule à savoir  $N_s=1$  et  $N_p=1$

Les résultats donnent :

$I_{cc} = 0.306A$ ,  $V_{co} = 0.557V$  et une puissance maximale de  $P_{max} = 0.121W$ , la production annuelle correspondante est bien sûr négligeable.

Dans une deuxième étape, nous avons fait augmenter le nombre de cellule en parallèle pour augmenter le courant délivré, un courant de 27.5 A est obtenue pour  $N_p = 90$ .

Finalement, dans la troisième étape nous avons augmenté le nombre de cellule en série à  $N_s= 6$  pour obtenir une tension de 3.34V.

La puissance maximale obtenue est alors de 65,423 W, et la production annuelle est de 42867.486l Cette production est obtenue en utilisant un panneau de surface égale à  $6 \times 90 \times 2.5 \times 5 = 0.675m^2$

## CONCLUSION

*A fin d'optimiser la production de l'hydrogène par voie solaire, nous avons utilisé un programme informatique permettant d'étudier les effets des paramètres physiques et météorologiques sur l'efficacité de fonctionnement du système PV-H<sub>2</sub>*

*Les modèles mathématiques décrivant le comportement du panneau photovoltaïque sont variés, les uns simulent le panneau au modèle décrivant une diode et les autres au modèle à deux diodes.*

*Dans notre cas le modèle à une diode décrit parfaitement le comportement électrique du panneau.*

*En revanche les modèles décrivant l'électrolyseur type PEM sont peu nombreux du fait qu'il constitue une technologie à l'état embryonnaire. L'unique modèle rencontré dans la recherche bibliographique concorde bien avec nos résultats expérimentaux.*

*Le programme informatique élaboré pour la résolution des équations des modèles offre la possibilité de déterminer les conditions optimales de fonctionnement du système.*

## CONCLUSION GENERALE

La photoproduction de l'hydrogène par décomposition de la molécule d'eau utilisant le soleil comme source d'énergie fait objet de recherche depuis 1970, le but est d'aboutir à une technologie de production d'énergie propre et économique. Le compromis entre ces deux objectifs est difficilement accessible. L'obtention d'une énergie propre fait intervenir les procédés à base d'énergie renouvelable de faible rendement et à des coûts élevés. Une énergie économique est obtenue au moyen d'énergie fossile épuisable et polluante.

Les avantages de cette technologie ne sont pas des moindres, l'impact direct étant l'économie des énergies fossiles d'une part et la protection de l'environnement d'autre part.

L'hydrogène dont les qualités énergétiques sont nettement meilleures que celle du pétrole est choisi par la communauté scientifique comme étant le combustible du futur, corps simple et le plus léger des gaz, il existe à l'état combiné avec d'autres éléments chimiques.

Elément le plus répandu de la terre, l'hydrogène est obtenu par une grande variété de procédés, le choix de la méthode de production et de stockage de l'hydrogène est inhérent aux débits souhaités, à la matière première et à son application.

Possédant un pouvoir calorifique élevé, l'hydrogène combiné avec l'oxygène, est actuellement utilisé principalement dans la pile à combustible pour générer une énergie électrique, de la chaleur et de l'eau.

Dans cette étude, la technologie liée à l'hydrogène solaire a été évaluée d'un point de vue technique. Les principaux éléments constituant le système n'étant pas encore commercialisés, l'évaluation économique de ce type de système a été délibérément omise.

Le fonctionnement optimal du panneau photovoltaïque, est étroitement lié aux conditions climatiques d'une part et à la charge utilisée d'autre part. Concernant les conditions climatiques, le panneau doit être placé dans une localité à forte insolation de sorte à extraire le maximum de puissance, tout en tenant compte, que l'augmentation de la température ambiante diminue le rendement du panneau.

Le deuxième paramètre ayant une influence sur le choix du panneau est la charge utilisée, l'optimisation du design du panneau passe par la minimisation de la charge. Pour notre système, la charge n'est autre que l'électrolyseur, ce dernier doit pouvoir fonctionner à puissances variables.

Pour éviter un sous-dimensionnement ou un surdimensionnement du panneau, nous déterminons en premier la puissance maximale consommée par l'électrolyseur puis nous

choisissons le panneau adéquat, la détermination du point de fonctionnement du système PV-H<sub>2</sub> nous renseigne sur les conditions optimales de fonctionnement du système.

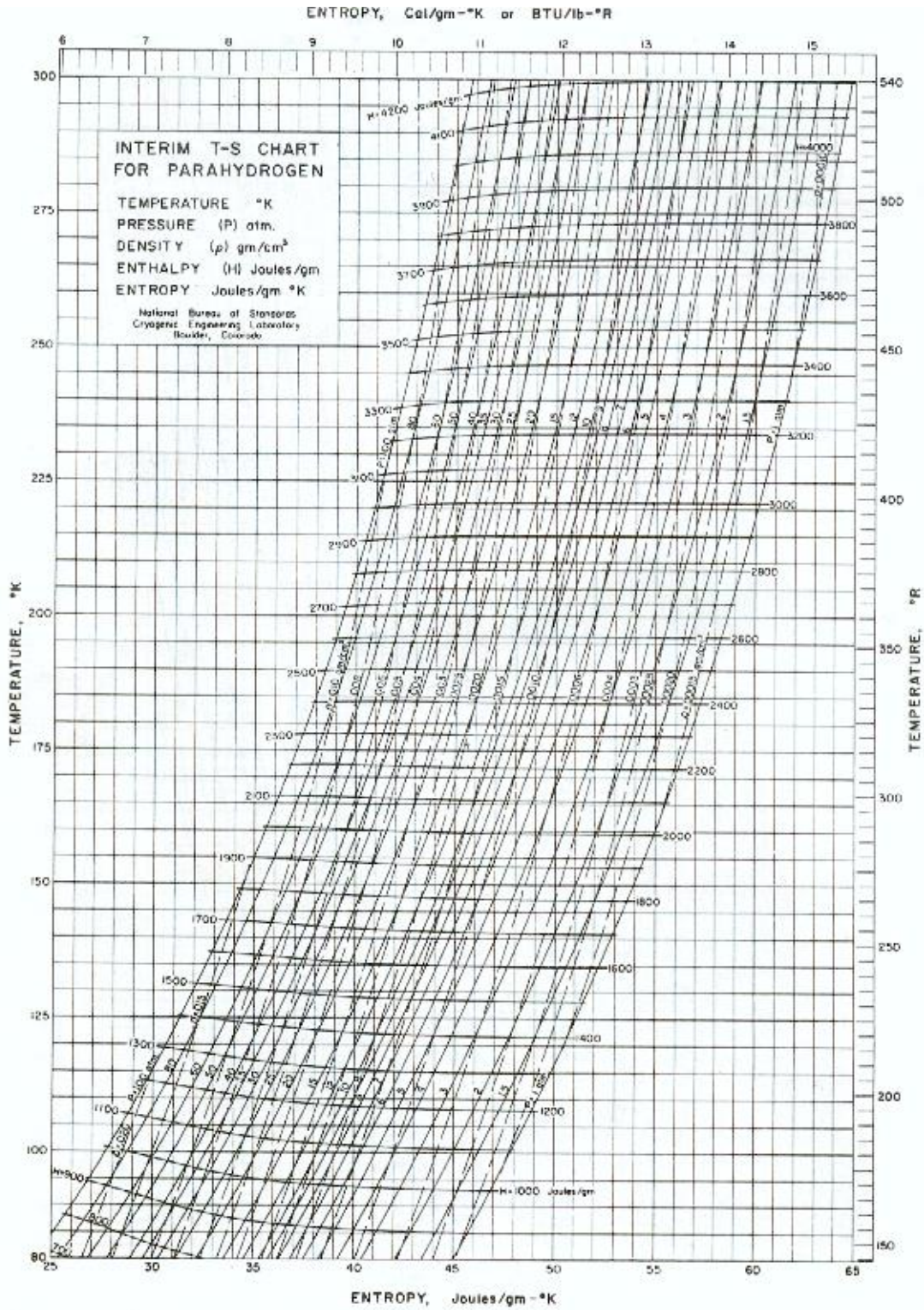
L'efficacité de l'électrolyseur est améliorée par l'augmentation de la température de fonctionnement. La valeur de la température étant limitée par la structure technique de l'électrolyte qui est dans notre cas une membrane échangeuse de protons. Les débits d'oxygène et d'hydrogène produits par l'électrolyseur sont inhérents à la température de fonctionnement et à l'état saturé ou non de la membrane.

La pile à combustible type PEM est caractérisée par une tension seuil correspondant à la formation de la molécule d'eau, le débit de courant produit par la pile est fonction de la température et des débits d'alimentation en combustible et en comburant, son efficacité théorique est meilleure comparé aux autres types de convertisseur d'énergie.

La tension, le courant fourni, la température, la pression des fluides en amont ou en aval sont des bons indicateurs de l'état de la pile.

Pour assurer un fonctionnement optimum de la pile il faut ajuster le débit et la pression en hydrogène et oxygène d'une part et gérer les sous-produits eau et chaleur générés d'autre part.





Masse atomique	1,0079 g/mol
Température de solidification	14 K
Température d'ébullition	20,3 K
Densité liquide à (20,3 K)	70.79 kg/m <sup>3</sup>
Densité gazeuse à (20,3 K)	1.34 kg/Nm <sup>3</sup>
Densité gazeuse à (273 K)	0.08988 kg/Nm <sup>3</sup>
Energie d'évaporation	445 kJ/kg
Energie de liquéfaction	14112 kJ/kg
Cp (20°C)	14,3 kJ/kg K
Cv (20°C)	10,3 kJ/kg K

**Tableau 1 : propriétés physico-chimiques de l'hydrogène [5]**

	Hydrogène	Gaz naturel	Essence
Diffusion dans l'air (cm <sup>2</sup> /s)	<b>0,61</b>	<b>0,16</b>	<b>0,05</b>
Température d'auto - inflammation (°C)	<b>585</b>	<b>540</b>	<b>228-501</b>
Température de la flamme en présence d'air (°C)	<b>2045</b>	<b>1875</b>	<b>2200</b>
Energie minimale d'allumage (mJ)	<b>0,02</b>	<b>0,29</b>	<b>0,24</b>
Vitesse de propagation de la flamme dans l'air (cm/s)	<b>265</b>	<b>40</b>	<b>40</b>
Les limites d'inflammation dans l'air (Vol %)	<b>4 - 75</b>	<b>5,3 - 15</b>	<b>1 - 7,6</b>
Les limites de détonation (Vol %)	<b>18,3 - 59</b>	<b>6,3 - 13,5</b>	<b>1,1 - 3,3</b>
Vitesse de propagation de l'explosion (km/s)	<b>1,48 - 2,15</b>	<b>1,39 - 1,64</b>	<b>1,4 - 1,7</b>
Energie de l'explosion (g TNT/m <sup>3</sup> )	<b>2,02</b>	<b>7,03</b>	<b>44,22</b>

**Tableau 2 : Quelques propriétés physico-chimiques de l'hydrogène [5]**

Densité (D.)	D. volumique d'énergie (MJ/l)	D. massique d'énergie (MJ/kg)	D. volumique (kg/m <sup>3</sup> )
Hydrogène gaz (16 MPa)	<b>1,76</b>	<b>120,2</b>	<b>14,7</b>
Hydrogène liquide (-253°C)	<b>8,4</b>	<b>120,2</b>	<b>71</b>
Méthane gaz (16 MPa)	<b>5,51</b>	<b>50,0</b>	<b>111</b>
Méthane liquide (-161°C)	<b>21,5</b>	<b>39,1</b>	<b>550</b>
Essence	<b>32,3</b>	<b>43,0</b>	<b>720</b>

**Tableau 3 : Densité énergétique de l'hydrogène comparée à celles d'autres combustibles [5]**

## ANNEXE n °2A

**Différents types de piles à combustible****Les piles alcalines (AFC)**

Bien que parmi les plus anciennement développées, et utilisées dans les programmes spatiaux, les piles alcalines ont été mises à l'écart depuis quelques années [45]. Elles travaillent à “ basse température ”, entre 60 et 80 °C, à pression atmosphérique, mais peuvent supporter jusqu'à 230 °C à plus forte pression. Elles nécessitent la présence de catalyseurs “ nobles ” à la cathode, mais peuvent s'en passer à l'anode (où le nickel est suffisant).

Elles utilisent de la potasse sous forme aqueuse (KOH) comme électrolyte.

Cette technologie est simple et pourrait permettre d'atteindre des coûts assez bas mais, de par son principe, elle est handicapée par deux inconvénients majeurs :

- le premier, lié à la nécessité de devoir traiter l'air (source de comburant oxygène pour la pile) pour éliminer d'abord le CO<sub>2</sub>, considéré comme polluant majeur de la potasse électrolyte et éviter ainsi tout problème de consommation de l'électrolyte par précipitation de carbonates, puis le CO qui empoisonne les catalyseurs à base de platine.
- le second lié à la circulation de potasse liquide, fluide corrosif.

**Les piles à carbonates fondus (MCFC)**

Ces piles ont pour électrolyte des carbonates de lithium et de potassium fondus.

Fonctionnant à haute température, (entre 600 et 700 °C sous 1 à 6 atmosphères) [45], elles ont l'avantage d'avoir des rendements théoriques élevés, et de pouvoir transformer directement un composé hydrogéné (reformage interne) tel qu'un hydrocarbure. Elles sont insensibles aux polluants, et peuvent même consommer du CO comme carburant.

De plus, elles peuvent facilement travailler sans catalyseur noble, et utilisent pour cette fonction des composés à base de nickel.

Elles permettent de récupérer de la chaleur à un haut niveau de température, pour des applications “ industrielles ”.

Leurs principaux inconvénients sont aussi liés à ce niveau de température,

**Les piles à oxydes solides (SOFC)**

C'est sur ces piles que sont menés, depuis quelques années, les plus gros efforts de recherche, car elles permettent d'envisager des densités de puissance élevées et des rendements proches de 60 % en génération d'électricité [45]. Ce sont celles qui travaillent à la plus haute température (de 850 à 1000 °C). Cette température est nécessaire pour permettre à l'électrolyte composé d'oxydes de zirconium ZrO<sub>2</sub> et d'ytterbium Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de posséder une conductivité protonique suffisante, l'utilisation des céramiques comme électrolyte limite les problèmes de corrosion des matériels posés par les autres types des piles. Les recherches actuelles tentent de baisser cette température de fonctionnement en dopant l'électrolyte d'autres composés.

Les catalyseurs utilisés sont à base de nickel et d'oxydes, et l'ensemble est insensible aux polluants. Les combustibles admis sont très variés, et le reformage interne est possible.

### **Les piles à acide phosphorique (PAFC)**

Elles sont à un stade de développement pré commercial et produisent de l'électricité avec un rendement de 40 % à partir de gaz naturel, et un rendement total de 85 % en cogénération (électricité – chaleur) [45].

Avec un électrolyte sous forme gélifiée, elles fonctionnent à une température utile comprise entre 180 à 210 °C, pour des pressions allant jusqu'à 6 atmosphères.

A ces niveaux de température, il y a nécessité d'utiliser des catalyseurs nobles (du platine, 0,8 gramme par kW de puissance électrique nominale).

Le combustible le plus souvent utilisé est un mélange riche en hydrogène, issu du reformage du gaz naturel, au moyen de techniques conventionnelles.

### **Les piles à membranes échangeuses de protons (PEMFC)**

La pile à combustible à membrane échangeuse d'ions se distingue des autres piles par le fait que la fonction d'électrolyte est assurée par une membrane ionique, cette dernière laisse passer les cations (cations  $H^+$  provenant de l'oxydation de l' $H_2$ ) et constitue une barrière infranchissable pour le gaz et les anions.

Comparé aux piles à électrolyte liquide, la densité de courant par unité de surface de membrane est modeste [45]. Ceci est dû essentiellement au fait que la membrane est un mauvais électrolyte et que les réactions électrochimiques sont des réactions solide – gaz dont la cinétique doit être améliorée par l'emploi de catalyseur très actifs.

Il faut noter que le développement de ces piles n'a pu s'accomplir qu'en parallèle avec les progrès réalisés par les membranes.

Les qualités demandées à la membrane portent sur la faible résistance, imperméabilité aux gaz, constance dimensionnelle quelque soit sa teneur en eau et bonne résistance à l'éclatement.

Les électrodes sont d'une structure très simplifiée, Chacune est enduite sur un côté d'un électrocatalyseur. Leur rôle consiste à mettre le catalyseur dont elles sont recouvertes en contact avec la membrane et à collecter les charges mise en jeu par les réactions électrochimiques qui rendent compte du fonctionnement de la pile.

Fonctionnant dès la température ambiante elles nécessitent des catalyseurs précieux. Elles craignent la présence de CO, qui doit être limité à quelques ppm. Leurs avantages sont des temps de démarrage quasiment instantanés.

Par contre, la teneur en eau des membranes des PEMFC doit être contrôlée soigneusement : celles ci doivent être maintenues humides pour favoriser le transport des ions, et éloigner ainsi le risque de se rompre en cas de dessèchement. Le passage par un système spécifique d'humidification est donc indispensable.

## ANNEXE n°2 B

**Cinétique des réactions aux électrodes d'une pile à combustible**

Lorsque la pile débite, l'intensité de courant est non nulle et des surtensions apparaissent aux électrodes et dans la membrane, elles sont dues à des phénomènes de transfert de charge, de diffusion des espèces, de vitesse limitée aux électrodes.

Pour une réaction électrochimique à une électrode, la vitesse de la réaction, selon que l'on soit en présence d'une oxydation ou d'une réduction est donné par:

$$v_{ox} = C_{red} k_{ox} nF \left( \exp\left(-\frac{\Delta G^a}{RT}\right) \exp\left((1-\alpha)\frac{nF}{RT}\eta\right) \right) \quad [43]$$

$$v_{red} = C_{ox} k_{red} nF \left( \exp\left(-\frac{\Delta G^a}{RT}\right) \exp\left(-\alpha\frac{nF}{RT}\eta\right) \right) \quad [43]$$

Où :

C : concentrations en réactifs,

k : constantes de vitesse de réaction,

$\Delta G^a$  : L'enthalpie libre d'activation,

$\alpha$  : facteur lié à la présence d'un champ électrique à l'interface électrode-électrolyte.

L'intensité à chaque électrode est directement liée aux vitesses des réactions par :

$I_a = nFv_{ox}$  (intensité de courant d'oxydation)

$I_c = -nFv_{red}$  (intensité de courant de réduction)

**Chute de potentiel à l'intérieur de la membrane**

En un point de potentiel électrique  $\phi$ , le potentiel électrochimique  $\lambda_{H^+}$  de l'ion  $H^+$  correspond à la somme de son énergie chimique et électrique, il est donnée par l'expression [38] :

$$\lambda_{H^+} = \mu_{H^+} + F \cdot \phi$$

Où : F : 96500C/ég.g

$\mu_{H^+}$  : potentiel chimique de l'ion  $H^+$

L'ion  $H^+$  diffuse suivant un axe x à travers la membrane avec une vitesse  $V_{H^+}$  dont l'expression a été établi par Planck et Nernst :

$$V_{H^+} = -\frac{D_{H^+}}{RT} \frac{d\lambda_{H^+}}{dx}$$

$D_{H^+}$  : coefficient de diffusion de l'ion  $H^+$  dans la membrane

Sachant que

$$\mu_{H^+} = RT \log |H^+|_M$$

Avec :  $|H^+|_M$  concentration de l'ion  $H^+$  dans la membrane, la vitesse aura comme expression

$$V_{H^+} = -D_{H^+} \left[ \frac{d}{dx} \text{Log}|H^+|_M + \frac{F}{RT} \frac{d\varphi}{dx} \right]$$

Le courant ionique dans la membrane est donné par le produit de la vitesse de diffusion  $V_{H^+}$  par  $|H^+|_M$ , selon l'expression :

$$J_{H^+} = V_{H^+} |H^+|_M = -D_{H^+} |H^+|_M \left[ \frac{I}{|H^+|_M} \cdot \frac{d|H^+|_M}{dx} + \frac{F}{RT} \frac{d\varphi}{dx} \right]$$

Ce qui correspond à un courant électrique de densité :

$$I = -FJ_{H^+} = FD_{H^+} \left[ \frac{d|H^+|_M}{dx} + \frac{F|H^+|_M}{RT} \frac{d\varphi}{dx} \right]$$

dans le cas où la concentration des ions  $H^+$  est constante et est égale à  $C$ , la densité de courant d'ions  $H^+$  aura pour expression :

$$J_{H^+} = -D_{H^+} C \frac{F}{RT} \frac{d\varphi}{dx}$$

Et

$$I = -D_{H^+} F^2 \frac{C}{RT} \frac{d\varphi}{dx}$$

$\frac{d\varphi}{dx}$  Est le gradient de potentiel électrique dans la membrane

La chute de potentiel dans une pile à gaz est obtenue par intégration de l'expression du courant électrique selon l'épaisseur de la membrane, l'expression trouvée est :

$$\Delta\varphi = \frac{IeRT}{D_{H^+} F^2 C}$$

La résistance de la membrane est donnée par le rapport :

$$\rho = \frac{\Delta\varphi}{I} = \frac{eRT}{D_{H^+} F^2 C}$$

D'après cette expression pour réduire  $\rho$  il faut :

- diminuer l'épaisseur de la membrane, tout en préservant l'imperméabilité de la membrane aux gaz ;
- diminuer la température de fonctionnement ;
- augmenter la concentration  $C$  des ions fixes de la membrane ;
- utiliser des ions ayant des coefficients de diffusions élevés.

## ANNEXE n°3 A

Description de l'Algorithme de la méthode des intervalles

La méthode de division des intervalles est utilisée pour résoudre le problème d'optimisation globale. Le problème de l'optimisation globale est la présence de différents optimums locaux. L'algorithme doit distinguer entre les différents optimums locaux, les classer et rechercher l'optimum global.

Ces algorithmes sont utilisés dans le cas de régression où les données expérimentales sont soumises à certaines erreurs de mesures, et donc il existe une certaine déviation par rapport au modèles mathématiques. Ces cas demandent une méthode de minimisation de l'écart entre les données expérimentales et le modèle mathématique très puissante et robuste. Le principal inconvénient est le nombre d'évaluation de fonction très élevé, une méthode de minimisation locale requière environ 70 évaluations de fonction par contre une méthode globale requière 10 fois plus, ce qui augmente le temps de calcul.

L'algorithme que nous avons choisi a été élaboré par T. Csendes [52] :

L'objectif est de résoudre le problème :

$$\min_{x \in X} f(x)$$

L'algorithme est décrit par les étapes suivantes :

Etape 0 : soit  $Y=X$  et  $y = \min F(X)$

Initialiser la liste  $L = (Y, y)$

et le niveau  $z = \max (F(X))$

Etape 1 : Choisir une direction  $k \in \{1, 2, \dots, n\}$

Etape 2 : Diviser  $Y$  dans la direction  $k$  ;  $Y = V^1 \cup V^2$ .

Etape 3 : Calculer  $F(V^1)$  et  $F(V^2)$  et poser  $v^i = \min F(V^i) \quad i=1,2$

$z = \min \{ z, \max F(V^1), \max F(V^2) \}$

Etape 4 : soustraire  $(Y, y)$  de  $L$

Etape 5 : Eliminer la paire  $(V^i, v^i)$  si  $v^i > z \quad i \in \{1, 2\}$

Etape 6 : Tester la monotonie

Etape 7 : Ajouter la paire  $(V^i, v^i)$  restante dans la liste  $L$ . Si la liste est vide STOP.

Etape 8 : Noter la paire avec l'élément le plus petit par  $(Y, y)$

Etape 9 : Si la largeur de  $F(Y)$  est inférieure à  $\varepsilon$  imprimer  $F(Y)$ ,  $Y$ . STOP

Etape 10 : Aller à Etape 1.

$Y$  est initialisé à l'étape 0 et actualisé à l'étape 8.

A l'étape 1 (choix de la direction) la règle suivante est adoptée :

On définit la fonction de mérite :

$$k = \min \{ j \mid j \in \{1, 2, \dots, n\} \text{ et } D(j) = \max_{i=1, n} D(i) \}$$

avec  $D(i)$  déterminer par la règle suivante :

$$D(i) = w(X_i)$$

$$w(X) = \max X - \min X \quad \text{si } X \text{ est un élément}$$

$$w(X) = \max w(X_i) \quad \text{si } X \text{ vecteur}$$

Cette règle se justifie par l'idée que l'intervalle d'origine est subdivisé de manière uniforme et donc sa largeur tend vers zéro.

L'avantage de cette fonction ne nécessite pas le test de monotonie (Etape 6). Mais sa convergence est plus lente par rapport à d'autres fonctions de mérite.

Dans l'étape 3, l'auteur propose deux méthodes de minimisation locale de la fonction dans l'intervalle considéré. La première est la méthode de Powell-Davidson<sup>1</sup> ne nécessitant pas

l'évaluation de la matrice jacobienne, et la seconde est la méthode de Jarvi<sup>ii</sup> mieux adaptée aux fonctions discontinues ou bien au fonction dont la jacobienne est difficile à évaluer.

### ANNEXE n° 3 B

#### Principe de la méthode de Newton :

Le principe de cette méthode est le suivant[47] :

$$\text{Soit à résoudre le système non linéaire } \begin{cases} f(x, y) = 0 \\ g(x, y) = 0 \\ h(x, y) = 0 \end{cases}$$

Notons  $x = r$ ,  $y = s$  et  $z = t$  le vecteur solution de ce système

Si chacune des trois fonctions est continue et différentiable, alors le développement de en série de Taylor au voisinage d'un estimé  $(x_i, y_i, z_i)$  proche de la solution donne :

$$\begin{aligned} f(r, s) = 0 &= f(x_i, y_i) + f_x(x_i, y_i)(r - x_i) + f_y(x_i, y_i)(s - y_i) + f_z(t - z_i) + \dots \\ g(r, s) = 0 &= g(x_i, y_i) + g_x(x_i, y_i)(r - x_i) + g_y(x_i, y_i)(s - y_i) + g_z(t - z_i) + \dots \\ h(r, s) = 0 &= h(x_i, y_i) + h_x(x_i, y_i)(r - x_i) + h_y(x_i, y_i)(s - y_i) + h_z(t - z_i) + \dots \end{aligned}$$

$f_x$ ,  $f_y$ ,  $g_x$  et  $g_y$  sont les dérivées partielles des fonctions  $f$  et  $g$  par rapport à  $x$  et  $y$  si  $(x_i, y_i)$  est un estimé proche de la solution alors les éléments  $(r - x_i)^2$  et  $(s - y_i)^2$  sont négligeables

la série de Taylor tronquée à la dérivée seconde donne :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(x_i, y_i) \\ g(x_i, y_i) \\ h(x_i, y_i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_x(x_i, y_i) & f_y(x_i, y_i) \\ g_x(x_i, y_i) & g_y(x_i, y_i) \\ h_x(x_i, y_i) & h_y(x_i, y_i) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} r - x_i \\ s - y_i \\ t - z_i \end{bmatrix}$$

une autre façon d'écrire ce système donnera :

$$\begin{bmatrix} f_x(x_i, y_i) & f_y(x_i, y_i) \\ g_x(x_i, y_i) & g_y(x_i, y_i) \\ h_x(x_i, y_i) & h_y(x_i, y_i) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f(x_i, y_i) \\ g(x_i, y_i) \\ h(x_i, y_i) \end{bmatrix}$$

où  $\Delta x_i = (r - x_i)$

$\Delta y_i = (s - y_i)$

et  $\Delta z_i = (t - z_i)$

Ce dernier système est linéaire, toutes les quantités hormis  $\Delta x_i$ ,  $\Delta y_i$  et  $\Delta z_i$  sont connues, les méthodes de résolution des systèmes linéaires telles que la méthode par élimination de Gauss sont applicables pour déterminer  $\Delta x_i$ ,  $\Delta y_i$  et  $\Delta z_i$

Si pour l'étape suivante nous prenons comme solution :

$$\begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \\ z_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \end{bmatrix}$$

l'estimation de la solution ( r , s , t ) est améliorée, cette procédure sera répétée jusqu'à ce que f - g et f - h deviennent nulle.

L'inconnue étant ( r , s , t ), on arrête les itérations par l'un des test suivant :

$$|x_i^{(k+1)} - x_i^{(k)}| < \varepsilon_1$$

$$\frac{x_i^{(k+1)} - x_i^{(k)}}{x_i^{(k+1)}} < \varepsilon_2$$

$$|f_i(x^{(k+1)})| < \varepsilon_3$$

$$k > k_{\max}$$

où  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  sont les bornes supérieures de l'erreur fixées a priori, et  $k_{\max}$  est le nombre maximum admissible d'itérations.

La méthode de Newton ne converge que si l'estimé initiale choisit est très proche de la racine cherché.

En fait le domaine de convergence de la méthode de Newton est très réduit, ce qui constitue d'ailleurs son inconvénient majeur, en revanche s'il y a convergence, elle est rapide et donc  $k_{\max}$  doit être choisi petit.

## ANNEXE n°4

## RESULTATS EXPERIMENTAUX

TABLEAU N°1, FIGURES :

II.5 : Eclairage solaire de la journée

II.6 : Influence de l'irradiance sur la tension à circuit ouvert

Période	Vco/V	Irr/W/m2	Tc/°C
29/07/2002 13:17	2,191	918,580	27,4
29/07/2002 14:17	2,189	876,826	27,8
29/07/2002 15:17	2,196	709,812	26
29/07/2002 16:17	2,2	542,797	25,9
29/07/2002 17:17	2,164	375,782	26,6
29/07/2002 18:17	2,042	208,768	26,8
29/07/2002 19:17	1,755	41,753	28
29/07/2002 20:17	0,093	0	27,6
29/07/2002 21:17	0,068	0	26,9
29/07/2002 22:17	0,069	0	27
29/07/2002 23:17	0,069	0	26,9
30/07/2002 00:17	0,069	0	26,6
30/07/2002 01:17	0,069	0	26,4
30/07/2002 02:17	0,069	0	26,3
30/07/2002 03:17	0,069	0	25,9
30/07/2002 04:17	0,069	0	25,7
30/07/2002 05:17	0,073	0	25,9
30/07/2002 06:17	1,762	41,753	25,1
30/07/2002 07:17	2,063	250,521	25,3
30/07/2002 08:17	2,132	417,536	26,2
30/07/2002 09:17	2,088	626,304	28,1
30/07/2002 10:17	2,101	751,565	29,4
30/07/2002 11:17	2,179	876,826	28,9
30/07/2002 12:17	2,212	918,580	29,7

TABLEAU N°2, FIGURES :

II.7 : Eclairage solaire de la journée

II.8 : Influence de l'irradiance sur le courant court circuit

période	Irr/W/m2	Icc/A	Tc°C
30/07/2002 13:32	960,334	0,288	30.1
30/07/2002 14:32	876,826	0,326	28.8
30/07/2002 15:32	751,565	0,274	25.4
30/07/2002 16:32	501,043	0,184	24.4
30/07/2002 17:32	375,782	0,102	24.3

30/07/2002 18:32	83,507	0,032	27.7
30/07/2002 19:32	41,753	0,022	27.8
30/07/2002 20:32	0	0	27.7
30/07/2002 21:32	0	0	27.5
30/07/2002 22:32	0	0	27.3
30/07/2002 23:32	0	0	27.1
31/07/2002 00:32	0	0	26.9
31/07/2002 01:32	0	0	26.6
31/07/2002 02:32	0	0	26.4
31/07/2002 03:32	0	0	26.3
31/07/2002 04:32	0	0	26.2
31/07/2002 05:32	0	0	26
31/07/2002 06:32	0	0,01	26
31/07/2002 07:32	83,507	0,064	26
31/07/2002 08:32	417,536	0,138	27.4
31/07/2002 09:32	626,304	0,212	26.3
31/07/2002 10:32	501,043	0,272	25.5
31/07/2002 11:32	793,319	0,272	25.4
31/07/2002 12:32	668,058	0,254	25.8

**TABLEAU N°3, FIGURES :**

**II.9 : Influence de la charge sur la caractéristique I-V**

**II.10 : Courbe de puissance**

**II.11 : Détermination de la charge optimale**

période	V/V	I/A	Tc/°C	Tamb/°C	Irr/W/m2	P/W
24/07/02 09:12	2,111	0	25,8	10,4	626,305	0,000
24/07/02 09:13	2,108	0	23,9	10,2	626,305	0,000
24/07/02 09:13	2,104	0,002	23,7	10	626,305	0,004
24/07/02 09:13	2,095	0,002	24,8	9,9	626,305	0,004
24/07/02 09:14	2,071	0,006	25,7	9,8	626,305	0,012
24/07/02 09:14	2,071	0,008	25,5	9,7	626,305	0,017
24/07/02 09:14	2,055	0,008	25	9,5	626,305	0,016
24/07/02 09:15	2,034	0,014	25,2	9,4	668,058	0,028
24/07/02 09:15	1,935	0,032	25,3	9,4	626,305	0,062
24/07/02 09:15	1,862	0,044	25,2	9,5	626,305	0,082
24/07/02 09:16	1,809	0,056	25,3	9,5	584,551	0,101
24/07/02 09:16	1,746	0,07	24,6	10,1	668,058	0,122
24/07/02 09:17	1,544	0,106	25,8	9,6	668,058	0,164
24/07/02 09:17	1,506	0,112	25,3	9,6	668,058	0,169
24/07/02 09:18	1,466	0,12	24,9	9,8	668,058	0,176
24/07/02 09:18	1,440	0,124	25,1	9,6	668,058	0,179
24/07/02 09:18	1,415	0,128	25,9	9,2	668,058	0,181
24/07/02 09:19	1,37	0,134	25,9	9,2	668,058	0,184

24/07/02 09:19	1,314	0,142	26,5	9,2	668,058	0,187
24/07/02 09:19	1,276	0,148	26,1	9,2	668,058	0,189
24/07/02 09:20	1,228	0,154	25,9	9,2	668,058	0,189
24/07/02 09:20	1,145	0,166	24,6	9,6	668,058	0,190
24/07/02 09:20	2,117	0	25,4	9,4	668,058	0,000
24/07/02 09:21	1,136	0,166	23,4	9,4	668,058	0,189
24/07/02 09:21	1,097	0,168	24,4	9,3	668,058	0,184
24/07/02 09:21	1,017	0,172	25,1	9,2	626,305	0,175
24/07/02 09:22	0,997	0,178	25,5	9,2	626,305	0,177
24/07/02 09:22	0,944	0,184	26,5	9	668,058	0,174
24/07/02 09:22	0,917	0,192	25,1	8,7	668,058	0,176
24/07/02 09:23	0,867	0,194	25,8	8,5	668,058	0,168
24/07/02 09:23	0,843	0,196	25,8	8,5	668,058	0,165
24/07/02 09:23	0,799	0,2	26,3	8,5	668,058	0,160
24/07/02 09:24	0,752	0,202	26,2	8,5	668,058	0,152
24/07/02 09:24	0,727	0,204	26,7	8,5	709,812	0,148
24/07/02 09:24	0,667	0,208	25,5	8,4	668,058	0,139
24/07/02 09:25	0,637	0,208	24,6	8,2	668,058	0,132
24/07/02 09:25	0,609	0,21	24,5	8,1	709,812	0,128
24/07/02 09:25	0,606	0,21	25,5	9,1	668,058	0,127
24/07/02 09:26	0,549	0,21	25,8	8,5	668,058	0,115
24/07/02 09:26	0,456	0,214	24,8	10,6	668,058	0,098
24/07/02 09:26	0,393	0,214	26,1	9,7	709,812	0,084
24/07/02 09:27	0,324	0,214	26,1	9,7	709,812	0,069
24/07/02 09:27	0,196	0,216	25,1	10,9	709,812	0,042
24/07/02 09:27	0,164	0,216	24,7	10,4	668,058	0,035
24/07/02 09:28	0,158	0,218	25,4	9,9	709,812	0,034
24/07/02 09:28	0,124	0,216	25,3	9,5	668,058	0,027
24/07/02 09:28	0,089	0,216	25,7	9,5	709,812	0,019
24/07/02 09:29	0,089	0,216	26,6	9,3	709,812	0,019
24/07/02 09:29	0,023	0,216	25,9	9,6	709,812	0,005
24/07/02 09:29	0,031	0,218	25,9	9,3	709,812	0,007
24/07/02 09:30	0,025	0,218	25,8	9,1	668,058	0,005
24/07/02 09:30	0,09	0,22	26,2	9	709,812	0,020
24/07/02 09:30	0,039	0,218	26,2	8,8	709,812	0,009
24/07/02 09:31	0,026	0,22	26,4	8,6	709,812	0,006

## TABLEAU N°4, FIGURES :

II.12 : Influence de l'irradiance sur la caractéristique I-V

II.13 : Courbes de puissance

(1) Irr (moyen) = 667.313W/m<sup>2</sup>

Irr/W/m2	V /V	I /A	P/W
626,305	2,111	0	0
626,305	2,108	0	0
626,305	2,104	0,002	0,004
626,305	2,095	0,002	0,004
626,305	2,071	0,006	0,012
626,305	2,071	0,008	0,016
626,305	2,055	0,008	0,016
668,058	2,034	0,014	0,028
626,305	1,935	0,032	0,062
626,305	1,862	0,044	0,082
584,551	1,809	0,056	0,101
668,058	1,746	0,07	0,122
626,305	1,639	0,09	0,147
668,058	1,544	0,106	0,163
668,058	1,506	0,112	0,168
668,058	1,483	0,116	0,172
668,058	1,466	0,12	0,176
668,058	1,440	0,124	0,178
668,058	1,415	0,128	0,181
668,058	1,370	0,134	0,183
668,058	1,314	0,142	0,186
668,058	1,276	0,148	0,188
668,058	1,228	0,154	0,189
668,058	1,145	0,166	0,190
668,058	2,117	0	0
668,058	1,136	0,166	0,188
668,058	1,097	0,168	0,184
626,305	1,017	0,172	0,175
626,305	0,997	0,178	0,177
668,058	0,944	0,184	0,174
668,058	0,917	0,192	0,176
668,058	0,867	0,194	0,168
668,058	0,843	0,196	0,165
668,058	0,799	0,2	0,159
668,058	0,752	0,202	0,151
709,812	0,727	0,204	0,148
668,058	0,667	0,208	0,138
668,058	0,637	0,208	0,132

709,812	0,609	0,21	0,128
668,058	0,606	0,21	0,127
668,058	0,549	0,21	0,115
668,058	0,456	0,214	0,097
709,812	0,393	0,214	0,084
709,812	0,324	0,214	0,069
709,812	0,196	0,216	0,042
668,058	0,164	0,216	0,035
709,812	0,158	0,218	0,034
668,058	0,124	0,216	0,027
709,812	0,089	0,216	0,019
709,812	0,089	0,216	0,019

TABLEAU N°5, FIGURES :

II.12 : Influence de l'irradiance sur la caractéristique I-V

II.13 : Courbes de puissance

(2) Irr (moyen)= 797.495W/m<sup>2</sup>

Irr/W/m2	V/V	I/A	P/W
793,319	2,117	0,006	0,013
793,319	2,155	0	0
793,319	2,024	0,024	0,048
751,566	0,105	0,26	0,027
793,319	0,105	0,26	0,027
793,319	0,570	0,25	0,142
793,319	0,348	0,26	0,090
793,319	0,463	0,256	0,118
793,319	0,572	0,252	0,144
793,319	0,703	0,242	0,170
793,319	0,763	0,236	0,180
793,319	0,843	0,228	0,192
793,319	0,890	0,222	0,197
793,319	0,931	0,216	0,201
793,319	0,992	0,208	0,206
793,319	1,030	0,202	0,208
793,319	1,094	0,192	0,210
793,319	1,166	0,180	0,209
793,319	1,231	0,168	0,206
793,319	1,243	0,166	0,206
793,319	1,296	0,158	0,205
793,319	1,335	0,150	0,200
793,319	1,380	0,144	0,198
793,319	1,417	0,136	0,193
793,319	1,455	0,130	0,189

793,319	1,483	0,124	0,184
793,319	1,522	0,120	0,183
793,319	1,543	0,114	0,176
793,319	1,567	0,110	0,172
793,319	1,583	0,106	0,167
793,319	1,599	0,102	0,163
793,319	1,665	0,088	0,146
793,319	1,724	0,078	0,134
835,073	1,790	0,066	0,118
793,319	1,826	0,060	0,109
793,319	1,883	0,048	0,090
793,319	1,933	0,042	0,081
793,319	1,953	0,036	0,070
835,073	1,977	0,032	0,063
835,073	1,988	0,028	0,055
793,319	1,997	0,024	0,048
835,073	2,044	0,016	0,033
793,319	2,052	0,012	0,024
793,319	2,067	0,008	0,016
793,319	2,072	0,006	0,012
793,319	2,074	0,004	0,008
793,319	2,089	0,002	0,004
835,073	2,094	0,002	0,004

**TABLEAU N°6, FIGURES :**

**II.12 : Influence de l'irradiance sur la caractéristique I-V**

**II.13 : Courbes de puissance**

**(3) Irr (moyen)=967.411W/m<sup>2</sup>**

Irr/W/m2	V/V	I/A	P/W
960,334	2,119	0	0
960,334	2,087	0,004	0,008
960,334	2,109	0	0
960,334	2,056	0,008	0,016
960,334	2,057	0,008	0,016
960,334	2,034	0,012	0,024
960,334	1,97	0,026	0,051
960,334	1,966	0,026	0,051
960,334	2,105	0	0
960,334	2,077	0,004	0,008
960,334	2,079	0,006	0,012
1002,088	2,08	0,006	0,012
960,334	2,071	0,008	0,016

Irr/W/m2	V/V	I/A	P/W
1002,088	2,07	0,008	0,016
1002,088	2,048	0,012	0,024
960,334	1,984	0,024	0,047
960,334	1,960	0,028	0,055
960,334	1,941	0,030	0,058
960,334	1,926	0,036	0,069
1002,088	1,897	0,042	0,079
960,334	1,862	0,048	0,089
960,334	1,857	0,048	0,089
960,334	1,806	0,060	0,108
960,334	1,722	0,076	0,130
960,334	1,714	0,076	0,130
960,334	1,572	0,104	0,163
960,334	1,546	0,112	0,173
1002,088	1,528	0,118	0,180
960,334	1,507	0,122	0,183
960,334	1,477	0,128	0,189
960,334	1,522	0,118	0,179
960,334	1,499	0,122	0,183
960,334	1,486	0,124	0,184
960,334	1,462	0,126	0,184
960,334	1,451	0,128	0,185
960,334	1,429	0,134	0,191
960,334	1,391	0,142	0,197
960,334	1,344	0,150	0,201
960,334	1,297	0,158	0,205
960,334	1,248	0,168	0,209
1002,088	1,193	0,180	0,215
960,334	1,128	0,192	0,216
1002,088	1,055	0,208	0,219
960,334	0,97	0,224	0,217
1002,088	0,915	0,234	0,214
960,334	0,89	0,242	0,215
960,334	0,818	0,254	0,207
1002,088	0,764	0,264	0,202
960,334	0,677	0,278	0,188
960,334	0,610	0,288	0,175
1002,088	0,513	0,304	0,156
960,334	0,425	0,314	0,133
960,334	0,339	0,326	0,110
960,334	0,294	0,332	0,097
960,334	0,246	0,338	0,083

960,334	0,243	0,336	0,082
960,334	0,140	0,346	0,048
960,334	0,127	0,346	0,044
960,334	0,033	0,354	0,012

TABLEAU N°7, FIGURES :

II.14 : Irradiance globale en fonction du temps pendant quatre (4) jours de fonctionnement

II.15 : Température ambiante et température de la cellule durant le temps

II.16 : Intensité du courant du panneau en fonction du temps

II.17 : Tension du panneau pendant quatre jours de fonctionnement

II.18 : Puissance du panneau pendant quatre jours de fonctionnement

Période	Tc/°C	Tamb/°C	I/A	Irr / W/m2	V /V	P/W
23/06/02 13:31	50,6	27,7	0,014	960,334	2,015	0,028
23/06/02 13:41	50,4	28,5	0,012	918,580	2,011	0,024
23/06/02 13:51	46,7	28,8	0,014	918,580	2,043	0,028
23/06/02 14:01	47,4	29,7	0,014	918,580	2,037	0,028
23/06/02 14:11	47,9	28,8	0,012	876,826	2,05	0,024
23/06/02 14:21	42,4	29,8	0,014	876,826	2,075	0,029
23/06/02 14:31	47,3	29,1	0,012	876,826	2,052	0,024
23/06/02 14:41	46	29,6	0,012	835,073	2,052	0,025
23/06/02 14:51	46,6	29	0,018	835,073	2,034	0,036
23/06/02 15:01	45,7	29	0,018	835,073	2,034	0,036
23/06/02 15:11	44,9	29,3	0,02	751,565	2,052	0,041
23/06/02 15:21	46	29,6	0,02	751,565	2,039	0,041
23/06/02 15:31	43,4	30,1	0,022	709,812	2,058	0,045
23/06/02 15:41	41,8	30,4	0,02	709,812	2,048	0,041
23/06/02 15:51	42,6	31	0,02	668,058	2,043	0,041
23/06/02 16:01	43,1	30,8	0,02	668,058	2,03	0,041
23/06/02 16:11	38,1	31,8	0,02	626,304	2,05	0,041
23/06/02 16:21	38,6	31,4	0,02	626,305	2,044	0,041
23/06/02 16:31	38,6	31,6	0,02	584,551	2,03	0,041
23/06/02 16:41	39,2	30,9	0,02	542,797	2,02	0,040
23/06/02 16:51	38,3	31	0,02	501,045	2,021	0,040
23/06/02 17:01	36,4	31	0,022	459,290	2,024	0,044
23/06/02 17:11	38,2	30,8	0,02	459,290	2,002	0,040
23/06/02 17:21	37	30,2	0,022	417,536	2,001	0,044
23/06/02 17:31	36,4	30,2	0,02	375,783	1,981	0,039
23/06/02 17:41	34,9	30,7	0,02	334,029	1,951	0,039
23/06/02 17:51	32,4	30,6	0,018	334,029	1,911	0,034
23/06/02 18:01	34,2	30,7	0,02	292,275	1,945	0,038
23/06/02 18:11	34,6	30,7	0,02	292,275	1,917	0,038
23/06/02 18:21	35,5	31,1	0,018	250,522	1,881	0,034
23/06/02 18:31	34	30,3	0,018	208,768	1,855	0,033

**Annexes**

23/06/02 18:41	32,7	30,1	0,016	167,014	1,828	0,029
23/06/02 18:51	31,4	29,5	0,016	167,014	1,797	0,028
23/06/02 19:01	30,9	29,5	0,012	125,261	1,757	0,021
23/06/02 19:11	30,6	28,9	0,01	125,261	1,715	0,017
23/06/02 19:21	30,2	28,7	0,006	83,507	1,676	0,010
23/06/02 19:31	30,1	28,1	0,004	83,507	1,632	0,006
23/06/02 19:41	29,2	28,3	0,002	41,753	1,58	0,003
23/06/02 19:51	28,5	28	0	41,753	1,511	0
23/06/02 20:01	27,9	28,1	0	41,753	1,422	0
23/06/02 20:11	27,8	28,1	0	41,753	1,297	0
23/06/02 20:21	27,6	28	0	41,753	1,161	0
23/06/02 20:31	27,6	28	0	41,753	1,035	0
23/06/02 20:41	27,1	28	0	41,753	0,936	0
23/06/02 20:51	26,8	28	0	41,753	0,853	0
23/06/02 21:01	26,9	27,8	0	41,753	0,781	0
23/06/02 21:11	25,7	27,8	0	41,753	0,72	0
23/06/02 21:21	25,8	27,8	0	41,753	0,665	0
23/06/02 21:31	26,2	27,6	0	41,753	0,61	0
23/06/02 21:41	26,5	27,6	0	41,753	0,558	0
23/06/02 21:51	25,5	27,6	0	0	0,507	0
23/06/02 22:01	25,3	27,4	0	0	0,455	0
23/06/02 22:11	26,1	27,4	0	41,753	0,4	0
23/06/02 22:21	25,8	27,4	0	41,753	0,35	0
23/06/02 22:31	26	27,3	0	41,753	0,304	0
23/06/02 22:41	26,1	27,3	0	41,753	0,263	0
23/06/02 22:51	25,7	27,3	0	41,753	0,229	0
23/06/02 23:01	25,7	27,1	0	41,753	0,197	0
23/06/02 23:11	25,6	27,1	0	41,753	0,166	0
23/06/02 23:21	25	26,8	0	41,753	0,135	0
23/06/02 23:31	25,2	26,9	0	41,753	0,105	0
23/06/02 23:41	24,5	26,9	0	0	0,08	0
23/06/02 23:51	24,7	26,9	0	0	0,061	0
Période	Tc/°C	Tamb/°C	I/A	Irr / W/m2	V /V	P/W
24/06/02 00:01	24,1	26,7	0	41,753	0	0
24/06/02 00:11	24,6	26,7	0	41,753	0	0
24/06/02 00:21	24,5	26,4	0	0	0	0
24/06/02 00:31	24,4	26,3	0	0	0	0
24/06/02 00:41	24,4	26,5	0	41,754	0	0
24/06/02 00:51	25	26,4	0	0	0	0
24/06/02 01:01	25,3	26,3	0	41,754	0	0
24/06/02 01:11	25,7	26,4	0	41,754	0	0
24/06/02 01:21	25,9	26,3	0	0	0	0
24/06/02 01:31	25,8	26,3	0	0	0	0

24/06/02 01:41	25,9	26,2	0	41,754	0	0
24/06/02 01:51	25,9	26,2	0	41,754	0	0
24/06/02 02:01	25,8	26,2	0	41,754	0	0
24/06/02 02:11	25,9	26,1	0	41,754	0	0
24/06/02 02:21	25,3	26,2	0	0	0	0
24/06/02 02:31	25,7	26,2	0	41,754	0	0
24/06/02 02:41	25,5	26,2	0	0	0	0
24/06/02 02:51	25,3	26,2	0	0	0	0
24/06/02 03:01	25,1	25,9	0	41,754	0	0
24/06/02 03:11	24,8	26,1	0	0	0	0
24/06/02 03:21	24,8	26	0	0	0	0
24/06/02 03:31	24,4	25,9	0	41,754	0	0
24/06/02 03:41	24,7	26	0	0	0	0
24/06/02 03:51	25	25,9	0	41,754	0	0
24/06/02 04:01	25,4	25,9	0	41,754	0	0
24/06/02 04:11	25,4	26	0	83,507	0	0
24/06/02 04:21	25,5	25,8	0	83,507	0	0
24/06/02 04:31	25,8	25,8	0	83,507	0	0
24/06/02 04:41	25,7	25,8	0	125,26	0	0
24/06/02 04:51	25,7	25,8	0	125,26	0	0
24/06/02 05:01	25,7	25,8	0	125,26	0	0
24/06/02 05:11	25,7	25,8	0	125,26	0	0
24/06/02 05:21	25,5	25,7	0	125,26	0	0
24/06/02 05:31	25,5	25,7	0	125,26	0	0
24/06/02 05:41	25,6	25,7	0	125,26	0	0
24/06/02 05:51	25,6	25,6	0	125,26	0	0
24/06/02 06:01	25,5	25,5	0	167,014	0	0
24/06/02 06:11	26	25,4	0,004	208,768	0,04	0,007
24/06/02 06:21	26,5	25,2	0,008	208,768	0,08	0,015
24/06/02 06:31	26	25,4	0,004	167,014	0,04	0,006
24/06/02 06:41	26,1	25,5	0,008	167,015	0,08	0,014
24/06/02 06:51	26,6	25,5	0,012	167,015	0,12	0,021
24/06/02 07:01	27,5	25,4	0,018	208,768	0,18	0,033
24/06/02 07:11	27,8	25,2	0,016	208,768	0,16	0,029
24/06/02 07:21	28,1	25,2	0,018	208,768	0,18	0,033
24/06/02 07:31	28,3	25,3	0,02	208,768	0,2	0,037
24/06/02 07:41	28,2	25,3	0,018	208,768	0,18	0,033
24/06/02 07:51	29,1	25,4	0,02	208,768	0,2	0,037
24/06/02 08:01	29,6	25,4	0,024	250,521	0,24	0,046
24/06/02 08:11	30,3	25,4	0,022	208,768	0,22	0,041
24/06/02 08:21	30,2	25,5	0,024	250,522	0,24	0,046
24/06/02 08:31	31,2	24,7	0,024	292,275	0,24	0,046
24/06/02 08:41	34,5	24,7	0,028	417,536	0,28	0,055

24/06/02 08:51	36,7	24	0,028	626,305	0,28	0,0566
24/06/02 09:01	38,8	23,6	0,026	542,797	0,26	0,051
24/06/02 09:11	40,6	24,4	0,026	626,305	0,26	0,052
24/06/02 09:21	43,9	25,1	0,026	626,305	0,26	0,051
24/06/02 09:31	47,5	25,7	0,024	668,058	0,24	0,047
24/06/02 09:41	48,1	25,5	0,024	709,812	0,24	0,047
24/06/02 09:51	48	25,8	0,024	709,812	0,24	0,047
24/06/02 10:01	46,3	27	0,024	751,565	0,24	0,048
24/06/02 10:11	47,5	26,6	0,024	751,565	0,24	0,048
24/06/02 10:21	47	26,7	0,022	793,319	0,22	0,044
24/06/02 10:31	44,8	27,9	0,024	793,319	0,24	0,048
24/06/02 10:41	44,6	27,3	0,024	835,073	0,24	0,048
24/06/02 10:51	45,8	27,3	0,024	876,826	0,24	0,048
24/06/02 11:01	44,2	27,7	0,024	876,826	0,24	0,048
24/06/02 11:11	42,4	28	0,024	876,826	0,24	0,049
24/06/02 11:21	41,7	28,4	0,024	918,580	0,24	0,049
24/06/02 11:31	44,6	27,7	0,024	918,580	0,24	0,049
24/06/02 11:41	43,8	28	0,022	918,580	0,22	0,045
24/06/02 11:51	42,2	27,7	0,024	918,580	0,24	0,049
24/06/02 12:01	46,2	27,4	0,022	960,334	0,22	0,044
24/06/02 12:11	48,8	28	0,02	960,334	0,2	0,040
24/06/02 12:21	47,1	26,7	0,02	960,334	0,2	0,040
24/06/02 12:31	49,8	27,8	0,018	960,334	0,18	0,036
24/06/02 12:41	48,3	26,9	0,018	960,334	0,18	0,036
24/06/02 12:51	46,2	25,9	0,02	960,334	0,2	0,040
24/06/02 13:01	44,3	26,4	0,02	918,580	0,2	0,040
24/06/02 13:11	46,2	26,5	0,018	918,580	0,18	0,036
24/06/02 13:21	50,9	27,2	0,018	918,580	0,18	0,036
24/06/02 13:31	44,2	26,7	0,02	918,580	0,2	0,040
24/06/02 13:41	45,9	26,9	0,018	918,580	0,18	0,036
24/06/02 13:51	49,9	27,6	0,018	876,826	0,18	0,036
24/06/02 14:01	48,3	27,9	0,018	876,826	0,18	0,036
24/06/02 14:11	52,6	27,8	0,016	876,826	0,16	0,032
24/06/02 14:21	48,4	27,6	0,018	876,826	0,18	0,036
24/06/02 14:31	51	28,6	0,016	835,073	0,16	0,032
24/06/02 14:41	50,6	28,5	0,018	835,073	0,18	0,035
24/06/02 14:51	49,4	28,3	0,018	793,319	0,18	0,036
24/06/02 15:01	50,4	28,6	0,018	793,319	0,18	0,036
24/06/02 15:11	49,6	28,6	0,016	793,319	0,16	0,032
24/06/02 15:21	50,5	28,7	0,016	751,565	0,16	0,032
24/06/02 15:31	48,7	28,7	0,016	709,812	0,16	0,032
24/06/02 15:41	45,6	28,4	0,018	709,812	0,18	0,036
24/06/02 15:51	45,1	29,6	0,016	709,812	0,16	0,032

24/06/02 16:01	45,9	29,5	0,016	668,058	0,16	0,032
24/06/02 16:11	40,8	28,3	0,018	626,304	0,18	0,036
24/06/02 16:21	40,4	28,5	0,018	584,551	0,18	0,036
24/06/02 16:31	44,4	28,1	0,016	584,551	0,16	0,032
24/06/02 16:41	42,4	28,6	0,016	542,797	0,16	0,032
24/06/02 16:51	41,4	28,1	0,016	501,044	0,16	0,032
24/06/02 17:01	42,2	29	0,016	501,044	0,16	0,032
24/06/02 17:11	38,8	28,5	0,016	459,290	0,16	0,032
24/06/02 17:21	39,3	28,8	0,016	417,536	0,16	0,032
24/06/02 17:31	38,6	27,7	0,016	375,783	0,16	0,031
24/06/02 17:41	36,2	28,2	0,016	334,029	0,16	0,031
24/06/02 17:51	34,1	27,3	0,016	334,029	0,16	0,031
24/06/02 18:01	34,1	27,8	0,016	292,275	0,16	0,031
24/06/02 18:11	34,4	28,8	0,014	250,522	0,14	0,027
24/06/02 18:21	33	28,7	0,014	208,768	0,14	0,027
24/06/02 18:31	31,4	28,4	0,014	208,768	0,14	0,026
24/06/02 18:41	29,8	27,8	0,012	167,014	0,12	0,023
24/06/02 18:51	29,3	28,4	0,01	167,014	0,1	0,018
24/06/02 19:01	29,3	28,5	0,01	167,014	0,1	0,018
24/06/02 19:11	28,8	27,9	0,008	125,261	0,08	0,014
24/06/02 19:21	28,8	27,6	0,006	83,507	0,06	0,010
24/06/02 19:31	28,7	27,3	0,004	83,507	0,04	0,006
24/06/02 19:41	27,9	27,3	0,002	41,754	0,02	0,003
24/06/02 19:51	27,4	27,3	0	83,507	0	0
24/06/02 20:01	27,2	27,3	0	83,507	0	0
24/06/02 20:11	26,9	27,4	0	83,507	0	0
24/06/02 20:21	26,7	27,3	0	41,754	0	0
24/06/02 20:31	26,7	27,3	0	83,507	0	0
24/06/02 20:41	26,3	27,3	0	83,507	0	0
24/06/02 20:51	26,4	27,3	0	83,507	0	0
24/06/02 21:01	26,2	27,2	0	83,507	0	0
24/06/02 21:11	26,1	27,2	0	83,507	0	0
24/06/02 21:21	26,1	27,1	0	83,507	0	0
24/06/02 21:31	26	27,1	0	83,507	0	0
24/06/02 21:41	26	27	0	125,261	0	0
24/06/02 21:51	26,1	27	0	83,507	0	0
24/06/02 22:01	26,2	27	0	125,261	0	0
24/06/02 22:11	26,1	26,9	0	125,261	0	0
24/06/02 22:21	26,2	26,9	0	125,261	0	0
24/06/02 22:31	26,2	26,9	0	125,261	0	0
24/06/02 22:41	26,1	26,8	0	125,261	0	0
24/06/02 22:51	25,9	26,8	0	125,261	0	0
24/06/02 23:01	25,7	26,7	0	125,261	0	0

24/06/02 23:11	25,8	26,7	0	125,261	0	0
24/06/02 23:21	25,7	26,7	0	125,261	0	0
24/06/02 23:31	25,7	26,6	0	125,261	0	0
24/06/02 23:41	25,7	26,6	0	125,261	0	0
24/06/02 23:51	25,6	26,6	0	125,261	0	0
Période	Tc/°C	Tamb/°C	I/A	Irr / W/m2	V /V	P/W
25/06/02 00:01	25,8	26,6	0	41,754	0	0
25/06/02 00:11	25,7	26,5	0	41,754	0	0
25/06/02 00:21	26	26,5	0	41,754	0	0
25/06/02 00:31	25,4	26,5	0	41,754	0	0
25/06/02 00:41	25,6	26,4	0	41,754	0	0
25/06/02 00:51	25,6	26,3	0	41,754	0	0
25/06/02 01:01	25,7	26,3	0	41,754	0	0
25/06/02 01:11	25,4	26,3	0	83,507	0	0
25/06/02 01:21	24,4	26,2	0	41,754	0	0
25/06/02 01:31	24,5	26,4	0	41,754	0	0
25/06/02 01:41	24,8	26,3	0	83,507	0	0
25/06/02 01:51	24,6	26,2	0	83,507	0	0
25/06/02 02:01	25	26,2	0	41,754	0	0
25/06/02 02:11	25,3	26	0	41,754	0	0
25/06/02 02:21	25,1	25,9	0	83,507	0	0
25/06/02 02:31	25,1	26	0	83,507	0	0
25/06/02 02:41	25	25,9	0	41,754	0	0
25/06/02 02:51	25,6	25,9	0	41,754	0	0
25/06/02 03:01	25,4	25,8	0	41,754	0	0
25/06/02 03:11	25,4	25,8	0	83,507	0	0
25/06/02 03:21	25,5	25,7	0	41,754	0	0
25/06/02 03:31	25,5	25,6	0	41,754	0	0
25/06/02 03:41	25,6	25,9	0	41,754	0	0
25/06/02 03:51	25,7	25,8	0	41,754	0	0
25/06/02 04:01	25,8	25,8	0	41,754	0	0
25/06/02 04:11	25,7	25,8	0	41,754	0	0
25/06/02 04:21	25,7	25,6	0	41,754	0	0
25/06/02 04:31	25,7	25,1	0	0	0	0
25/06/02 04:41	25,7	24,9	0	41,754	0	0
25/06/02 04:51	25,7	25	0	41,754	0	0
25/06/02 05:01	25,7	25	0	0	0	0
25/06/02 05:11	25,7	25,2	0	0	0	0
25/06/02 05:21	25,6	25,1	0	41,754	0	0
25/06/02 05:31	25,6	25	0	41,754	0	0
25/06/02 05:41	25,6	25,2	0	41,754	0	0
25/06/02 05:51	25,6	25,1	0	41,754	0	0
25/06/02 06:01	25,6	25,1	0	41,754	0	0

25/06/02 06:11	25,7	25,2	0	83,507	0	0
25/06/02 06:21	25,9	25,4	0,002	83,507	0,02	0,003
25/06/02 06:31	25,8	25,3	0	83,507	0	0
25/06/02 06:41	25,8	25,5	0	83,507	0	0
25/06/02 06:51	25,9	25,4	0	83,507	0	0
25/06/02 07:01	25,7	25,6	0,004	125,261	0,04	0,007
25/06/02 07:11	25,8	25,4	0,004	125,261	0,04	0,007
25/06/02 07:21	26,4	25,4	0,006	125,261	0,06	0,011
25/06/02 07:31	26,3	25,6	0,012	167,014	0,12	0,022
25/06/02 07:41	26,7	25,5	0,01	167,014	0,1	0,018
25/06/02 07:51	27,3	25,9	0,012	167,014	0,12	0,022
25/06/02 08:01	27,1	26,1	0,014	167,014	0,14	0,025
25/06/02 08:11	27,8	26,3	0,016	208,768	0,16	0,030
25/06/02 08:21	28,1	26,2	0,016	167,014	0,16	0,029
25/06/02 08:31	28,4	26,5	0,022	250,522	0,22	0,043
25/06/02 08:41	29,8	26,7	0,024	250,522	0,24	0,047
25/06/02 08:51	30,3	26,7	0,024	292,275	0,24	0,048
25/06/02 09:01	31	26,7	0,026	334,029	0,26	0,052
25/06/02 09:11	32,3	26,7	0,024	334,029	0,24	0,047
25/06/02 09:21	36,1	26,5	0,026	501,044	0,26	0,053
25/06/02 09:31	32,1	26,8	0,022	250,522	0,22	0,043
25/06/02 09:41	35	26,8	0,028	709,812	0,28	0,058
25/06/02 09:51	38,2	26,5	0,028	793,319	0,28	0,058
25/06/02 10:01	38,4	26,4	0,026	793,319	0,26	0,054
25/06/02 10:11	38,6	26,6	0,026	835,073	0,26	0,054
25/06/02 10:21	38,6	27,3	0,026	835,073	0,26	0,054
25/06/02 10:31	40,2	26,8	0,026	876,826	0,26	0,054
25/06/02 10:41	36,4	26,4	0,024	542,797	0,24	0,049
25/06/02 10:51	40	27,3	0,024	918,580	0,24	0,050
25/06/02 11:01	40,4	27,2	0,022	876,826	0,22	0,045
25/06/02 11:11	39,5	27	0,024	960,334	0,24	0,050
25/06/02 11:21	40,1	26,8	0,026	1002,087	0,26	0,055
25/06/02 11:31	43,2	27,1	0,022	751,565	0,22	0,045
25/06/02 11:41	37,7	27,7	0,016	459,290	0,16	0,032
25/06/02 11:51	38,7	28,1	0,022	751,565	0,22	0,046
25/06/02 12:01	36,1	28,1	0,024	459,290	0,24	0,049
25/06/02 12:11	37,6	28,1	0,024	751,565	0,24	0,050
25/06/02 12:21	42	28	0,022	1043,841	0,22	0,046
25/06/02 12:31	37,4	27,8	0,022	584,551	0,22	0,045
25/06/02 12:41	38,2	28,2	0,02	709,812	0,2	0,041
25/06/02 12:51	41,4	28	0,022	1043,841	0,22	0,046
25/06/02 13:01	38,3	28	0,022	459,290	0,22	0,045
25/06/02 13:11	39,1	27,8	0,024	835,0739	0,24	0,051

25/06/02 13:21	41,7	28,2	0,022	1002,087	0,22	0,046
25/06/02 13:31	38,5	28,1	0,026	584,551	0,26	0,055
25/06/02 13:41	40,9	28,4	0,024	626,304	0,24	0,050
25/06/02 13:51	38,3	28,3	0,02	459,290	0,2	0,040
25/06/02 14:01	37,2	28,8	0,022	584,551	0,22	0,045
25/06/02 14:11	39,8	28,8	0,02	793,319	0,2	0,041
25/06/02 14:21	36,9	28,5	0,02	584,551	0,2	0,041
25/06/02 14:31	30,4	28,9	0,016	292,275	0,16	0,032
25/06/02 14:41	35,4	28,6	0,022	584,551	0,22	0,046
25/06/02 14:51	28,1	28,9	0,02	375,783	0,2	0,041
25/06/02 15:01	32,2	28,6	0,018	334,029	0,18	0,036
25/06/02 15:11	31	28,7	0,018	292,275	0,18	0,036
25/06/02 15:21	31,9	28,2	0,02	334,029	0,2	0,041
25/06/02 15:31	30,9	28	0,018	250,522	0,18	0,036
25/06/02 15:41	31,9	28	0,018	292,275	0,18	0,036
25/06/02 15:51	31,8	28	0,02	459,290	0,2	0,042
25/06/02 16:01	28,9	28	0,018	375,782	0,18	0,036
25/06/02 16:11	30,4	27,9	0,018	334,029	0,18	0,036
25/06/02 16:21	31	27,8	0,016	292,275	0,16	0,032
25/06/02 16:31	30,5	27,7	0,018	292,275	0,18	0,035
25/06/02 16:41	30,4	27,7	0,016	334,029	0,16	0,032
25/06/02 16:51	30,5	28	0,016	292,275	0,16	0,031
25/06/02 17:01	29,5	28,3	0,016	334,029	0,16	0,031
25/06/02 17:11	29,9	28,6	0,016	292,275	0,16	0,031
25/06/02 17:21	29,2	28,5	0,014	250,522	0,14	0,026
25/06/02 17:31	28,7	28,4	0,014	250,522	0,14	0,026
25/06/02 17:41	29,3	28,1	0,014	250,522	0,14	0,026
25/06/02 17:51	28,5	28	0,01	208,768	0,1	0,018
25/06/02 18:01	27,7	28	0,012	208,768	0,12	0,022
25/06/02 18:11	28,4	28	0,008	208,768	0,08	0,014
25/06/02 18:21	28,5	27,9	0,008	208,768	0,08	0,014
25/06/02 18:31	28,2	27,7	0,006	208,768	0,06	0,010
25/06/02 18:41	27,9	27,8	0,006	208,768	0,06	0,010
25/06/02 18:51	27,7	27,5	0,006	167,014	0,06	0,010
25/06/02 19:01	27,1	27,5	0,004	208,768	0,04	0,007
25/06/02 19:11	27,4	27,1	0,004	83,507	0,04	0,006
25/06/02 19:21	27,1	27	0,002	41,753	0,02	0,003
25/06/02 19:31	27,1	26,8	0	0	0	0
25/06/02 19:41	27,1	26,7	0	0	0	0
25/06/02 19:51	26,6	26,5	0	0	0	0
25/06/02 20:01	26,8	26,5	0	0	0	0
25/06/02 20:11	26,7	26,4	0	0	0	0
25/06/02 20:21	26,5	26,5	0	0	0	0

25/06/02 20:31	26,5	26,4	0	0	0	0
25/06/02 20:41	26,4	26,2	0	-41,754	0	0
25/06/02 20:51	26,4	26,2	0	0	0	0
25/06/02 21:01	26,3	26	0	0	0	0
25/06/02 21:11	26,2	26	0	0	0	0
25/06/02 21:21	26	25,9	0	0	0	0
25/06/02 21:31	26,2	25,8	0	0	0	0
25/06/02 21:41	26,1	26	0	41,754	0	0
25/06/02 21:51	26	25,9	0	41,754	0	0
25/06/02 22:01	26	25,9	0	0	0	0
25/06/02 22:11	26	26,3	0	0	0	0
25/06/02 22:21	26	26	0	0	0	0
25/06/02 22:31	26	26	0	0	0	0
25/06/02 22:41	26	25,6	0	41,754	0	0
25/06/02 22:51	25,9	25,6	0	41,754	0	0
25/06/02 23:01	25,9	25,5	0	41,754	0	0
25/06/02 23:11	25,9	25,4	0	0	0	0
25/06/02 23:21	25,7	25,4	0	41,754	0	0
25/06/02 23:31	25,9	25,4	0	0	0	0
25/06/02 23:41	25,8	25,5	0	41,754	0	0
25/06/02 23:51	25,9	25,4	0	83,507	0	0
Période	Tc/°C	Tamb/°C	I/A	Irr / W/m2	V /V	P/W
26/06/02 00:01	25,9	25,4	0	83,507	0	0
26/06/02 00:11	25,9	25,4	0	125,261	0	0
26/06/02 00:21	25,8	25,3	0	125,261	0	0
26/06/02 00:31	25,8	25,4	0	167,014	0	0
26/06/02 00:41	25,8	25,4	0	167,014	0	0
26/06/02 00:51	25,8	25,3	0	125,261	0	0
26/06/02 01:01	25,8	25,7	0	167,014	0	0
26/06/02 01:11	25,7	25,6	0	167,014	0	0
26/06/02 01:21	25,8	25,5	0	125,261	0	0
26/06/02 01:31	25,7	25,5	0	83,507	0	0
26/06/02 01:41	25,6	25,4	0	83,507	0	0
26/06/02 01:51	25,3	25,3	0	125,261	0	0
26/06/02 02:01	25,2	25,5	0	125,261	0	0
26/06/02 02:11	24,9	25,6	0	125,261	0	0
26/06/02 02:21	25,1	25,4	0	83,507	0	0
26/06/02 02:31	24,9	25	0	41,754	0	0
26/06/02 02:41	24,7	25,1	0	41,754	0	0
26/06/02 02:51	24,6	24,7	0	83,507	0	0
26/06/02 03:01	24,4	24,4	0	41,754	0	0
26/06/02 03:11	23,8	24,2	0	41,754	0	0
26/06/02 03:21	24	24,8	0	0	0	0

26/06/02 03:31	24,1	24,6	0	0	0	0
26/06/02 03:41	24,7	24,8	0	0	0	0
26/06/02 03:51	24,4	24,9	0	-41,754	0	0
26/06/02 04:01	24,5	25	0	-41,754	0	0
26/06/02 04:11	24,5	25,1	0	-83,507	0	0
26/06/02 04:21	24,7	25	0	0	0	0
26/06/02 04:31	24,7	25	0	0	0	0
26/06/02 04:41	24,9	24,7	0	0	0	0
26/06/02 04:51	24,8	24,9	0	0	0	0
26/06/02 05:01	24,8	25	0	0	0	0
26/06/02 05:11	24,8	24,9	0	-41,754	0	0
26/06/02 05:21	24,9	24,9	0	-208,768	0	0
26/06/02 05:31	24,8	24,8	0,002	-83,507	0,02	0,002
26/06/02 05:41	24,9	24,8	0	-125,261	0	0
26/06/02 05:51	25	24,8	0,002	-83,507	0,02	0,003
26/06/02 06:01	25,1	25	0,002	-41,754	0,02	0,004
26/06/02 06:11	25,2	24,9	0,004	0	0,04	0,007
26/06/02 06:21	25,2	25	0,006	0	0,06	0,012
26/06/02 06:31	25,4	25,1	0,006	41,754	0,06	0,012
26/06/02 06:41	25,7	24,9	0,006	41,754	0,06	0,012
26/06/02 06:51	25,3	25	0,01	83,507	0,1	0,020
26/06/02 07:01	25,1	25	0,008	83,507	0,08	0,016
26/06/02 07:11	26	24,8	0,012	125,261	0,12	0,024
26/06/02 07:21	25,6	24,9	0,012	125,261	0,12	0,024
26/06/02 07:31	25,7	25	0,012	41,754	0,12	0,024
26/06/02 07:41	25	25,1	0,012	125,261	0,12	0,024
26/06/02 07:51	25	25,2	0,014	125,261	0,14	0,028
26/06/02 08:01	26,2	25,1	0,016	208,768	0,16	0,033
26/06/02 08:11	25,2	25,3	0,016	292,275	0,16	0,033
26/06/02 08:21	25,7	25,2	0,008	41,754	0,08	0,015
26/06/02 08:31	26,3	25,2	0,014	83,507	0,14	0,028
26/06/02 08:41	26,9	25,3	0,018	292,275	0,18	0,037
26/06/02 08:51	27,2	25,4	0,018	292,275	0,18	0,037
26/06/02 09:01	26,2	25,3	0,012	167,014	0,12	0,024
26/06/02 09:11	26,1	25,2	0,012	167,014	0,12	0,024
26/06/02 09:21	28,3	25,2	0,018	334,029	0,18	0,038
26/06/02 09:31	28	25,4	0,016	334,029	0,16	0,033
26/06/02 09:41	29,7	25,5	0,024	668,058	0,24	0,052
26/06/02 09:51	28,9	26	0,016	375,783	0,16	0,033
26/06/02 10:01	28,4	26,1	0,018	375,783	0,18	0,037
26/06/02 10:11	29,5	26,2	0,014	292,275	0,14	0,028
26/06/02 10:21	28,7	26,6	0,018	459,290	0,18	0,038
26/06/02 10:31	26,2	26,6	0,026	918,580	0,26	0,056

26/06/02 10:41	34,9	26,4	0,018	626,304	0,18	0,037
26/06/02 10:51	35,6	26,9	0,02	542,797	0,2	0,042
26/06/02 11:01	35,4	26,8	0,018	542,797	0,18	0,037782
26/06/02 11:11	32,3	27,2	0,02	542,797	0,2	0,042
26/06/02 11:21	30,8	27,8	0,018	501,044	0,18	0,038
26/06/02 11:31	31,1	27,2	0,018	375,783	0,18	0,037
26/06/02 11:41	28,1	27,6	0,018	292,275	0,18	0,037
26/06/02 11:51	32,7	27,4	0,018	375,783	0,18	0,037
26/06/02 12:01	33,7	27,5	0,02	542,797	0,2	0,043
26/06/02 12:11	32,5	27,4	0,02	417,536	0,2	0,042
26/06/02 12:21	30,5	27,9	0,018	417,536	0,18	0,037
26/06/02 12:31	31,4	27,9	0,024	709,812	0,24	0,052
26/06/02 12:41	34,1	27,6	0,024	1127,348	0,24	0,052
26/06/02 12:51	32,4	27,9	0,016	292,275	0,16	0,033
26/06/02 13:01	35,3	27,6	0,02	751,565	0,2	0,042
26/06/02 13:11	33,1	28	0,016	375,783	0,16	0,033
26/06/02 13:21	32,6	28,3	0,022	793,319	0,22	0,047
26/06/02 13:31	35,1	28,3	0,022	960,334	0,22	0,047
26/06/02 13:41	36,3	28,1	0,022	918,580	0,22	0,047
26/06/02 13:51	35	28,2	0,022	876,826	0,22	0,047
26/06/02 14:01	28,7	28,2	0,022	876,826	0,22	0,047
26/06/02 14:11	34	28,3	0,022	876,826	0,22	0,047
26/06/02 14:21	36,9	27,9	0,022	835,073	0,22	0,047
26/06/02 14:31	34,4	28,5	0,022	835,073	0,22	0,047
26/06/02 14:41	36,6	28,3	0,02	835,073	0,2	0,043
26/06/02 14:51	41,3	28,2	0,018	793,319	0,18	0,038
26/06/02 15:01	38,9	28,5	0,02	793,319	0,2	0,042
26/06/02 15:11	34,5	28,5	0,02	751,565	0,2	0,042
26/06/02 15:21	34,2	29,2	0,02	709,812	0,2	0,042
26/06/02 15:31	36	29,1	0,014	584,551	0,14	0,028
26/06/02 15:41	33,6	29,1	0,02	709,812	0,2	0,043
26/06/02 15:51	34,7	29,3	0,02	668,058	0,2	0,043
26/06/02 16:01	35,9	29,3	0,016	584,551	0,16	0,033

**TABLEAU N°8, FIGURE :**  
**III.3 : Caractérisation de l'électrolyseur T=30°C**

<b>U [V]</b>	<b>I [mA]</b>
92,50	1,542
82 ,00	1,530
71,30	1,523
62,70	1,515
51,00	1,504
38,70	1,492
28,40	1,481
15,50	1,463
14,23	1,460
13,99	1,460

**TABLEAU N°9, FIGURE :**  
**III.4 : Production d'hydrogène à différentes intensités du courant**

<b>t[s]</b>	<b>v[mL] I=68Ma V=1.55V</b>	<b>t/s</b>	<b>v/mL I=0.71A V=1.92V</b>	<b>t[s]</b>	<b>v[mL] I=0.26A V=1.95V</b>
0	0	0	0	0	0
800	5	300	25	720	25
1407	10	555	50	1620	50
1957	15	890	75	2400	75
2643	20	1095	100	3120	100
3388	25	1380	125	3840	125
3980	30	1590	150	4620	150
4739	35	1920	175	5340	175
5499	40	2190	200	6000	200
6059	45	2475	225	6720	225
6806	50	2810	250	-	-

TABLEAU N°10, FIGURE:

IV.4 : Influence de la charge sur les caractéristiques électrique de la pile

R[Ohm]	V[V]	I[A]	r[kOHm]	Ig[A]
28	0,895	0	0,894	0,69
25	0,882	0,01	0,881	0,69
20	0,869	0,03	0,868	0,69
15	0,857	0,04	0,853	0,68
10	0,837	0,06		0,69
7	0,818	0,08	0,811	0,68
5	0,799	0,12	0,787	0,69
4	0,785	0,13	0,769	0,68
3	0,768	0,26	0,747	0,68
2	0,736	0,36	0,701	0,67
1	0,662	0,63	0,598	0,65
0,83	0,628	0,74	0,557	0,68
0,67	0,591	0,87	0,504	0,70
0,41	0,551	1,1	0,409	0,69
0,37	0,514	1,18	0,396	0,70

TABLEAU N°11, FIGURE :

IV.5 : Caractéristique I-V de la pile

R(ohm)	V(V)	I(A)
2000	0,93	0
28	0,83	0,02
25	0,82	0,03
20	0,81	0,04
15	0,8	0,05
10	0,79	0,08
7	0,78	0,11
5	0,76	0,14
4	0,75	0,18
3	0,74	0,24
2	0,72	0,35
1	0,68	0,71
0,83	0,67	0,71
0,67	0,63	1,10
0,4	0,62	1,30
0,37	0,61	1,41

**TABLEAU N°12, FIGURE :**  
**IV.6 : Fonctionnement de la pile connectée à l'électrolyseur**  
**T=28.7°C, t=60mn, R= 20Ω**

t[mn]	V[V]	I[A]
0	0,774	0,37
1	0,776	0,37
2	0,773	0,37
3	0,772	0,35
4	0,765	0,37
5	0,763	0,36
6	0,76	0,36
8	0,756	0,36
10	0,751	0,36
12	0,747	0,36
14	0,741	0,36
16	0,739	0,35
18	0,737	0,35
20	0,738	0,35
22	0,736	0,35
24	0,733	0,35
26	0,734	0,34
28	0,730	0,35
30	0,729	0,35
32	0,729	0,35
34	0,724	0,35
36	0,723	0,35
38	0,723	0,35
40	0,724	0,34
44	0,717	0,34
48	0,717	0,34
52	0,720	0,34
56	0,720	0,34
60	0,709	0,34

**TABLEAU N°13, FIGURE :**  
**VI.7 : Charge de la pile avec électrolyseur**  
**T = 28°C, v = 50ml, t = 10mn40s, R=10 Ω**

t[mn]	I[A]	V[V]
0,5	0,39	0,425
1	0,53	0,547
1,5	0,58	0,611
2	0,61	0,637
2,5	0,61	0,644
3	0,62	0,646
4	0,62	0,644
5	0,62	0,646
6	0,62	0,648
7	0,62	0,648
8	0,62	0,647
9	0,62	0,648
10,67	0,62	0,648

**TABLEAU N°14, FIGURE :**  
**IV.8 : Décharge de la pile**

t[s]	V[V]	I[mA]	I[A]
0	0,719	127,40	0,127
60	0,711	125,80	0,126
120	0,502	83,00	0,083
180	0,200	36,10	0,036
240	0,163	29,30	0,029
255	0,122	24,40	0,024
270	0,117	21,06	0,021
285	0,102	18,31	0,018
300	0,090	16,11	0,016
315	0,081	14,24	0,014
330	0,072	13,05	0,013
345	0,067	11,95	0,012
360	0,062	11,08	0,011
375	0,058	10,35	0,010
390	0,0542	9,68	0,009
405	0,0519	9,10	0,009
420	0,0472	8,53	0,008
435	0,0451	8,12	0,008
450	0,0428	7,69	0,008

465	0,041	7,31	0,007
480	0,039	7,07	0,007
495	0,037	7,65	0,007
510	0,035	6,43	0,006
525	0,035	6,25	0,006
540	0,034	6,19	0,006
555	0,033	6,07	0,006
570	0,033	5,88	0,006
585	0,032	5,72	0,006
600	0,031	5,65	0,005
615	0,031	5,54	0,005
645	0,030	5,4	0,005
675	0,029	5,25	0,005
705	0,028	5,13	0,005
765	0,027	4,93	0,005
825	0,024	4,48	0,005
885	0,024	4,33	0,004
945	0,022	4,05	0,004
1005	0,020	3,62	0,004
1065	0,020	3,68	0,004
1125	0,020	3,63	0,003
1185	0,019	3,43	0,003
1245	0,018	3,27	0,003
1305	0,017	3,15	0,003
1365	0,016	3,02	0,003
1425	0,016	2,91	0,003
1485	0,014	2,71	0,003
1545	0,014	2,66	0,003
1605	0,014	2,58	0,003
1665	0,014	2,55	0,002
1725	0,014	2,49	0,002
1785	0,013	2,4	0,002
1845	0,0126	2,3	0,002
1905	0,0123	2,24	0,002
1965	0,0119	2,17	0,002
2025	0,0115	2,11	0,002
2085	0,0112	2,05	0,002



*Explore everything around you, penetrate to the furthest limits of human knowledge, and always you will come up with something inexplicable in the end. It is called life.*

Albert Schweitzer

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Société Française de Chimie : **L'actualité chimique, l'hydrogène, carburant de demain ?** n° 12, décembre 2001.
2. Association Française de l'hydrogène : **Pourquoi l'hydrogène.** Version 4.1 Nov.2002
3. R.RAMAKUMAR: **An assessment of hydrogen as a means to store solar energy.** Education Vol.8. A joint conference of the American Section of the International Solar Energy Society and Solar Energy Society of Canada Inc. August 15th -20th 1976. Editor : K.W.BÖER .
4. LUCIANO BARRA: **Hydrogen technology: status and perspectives.** European Directory Suppliers and Services (1994).
5. PAMELA SPATH, MARGARET MANN : **Life Cycle Assessment of Hydrogen Production via Natural Gas Steam Reforming,** National Renewable Energy Laboratory. August.
6. FREDERICK J. EDESKUTY and WALTER F. STEWART. **Safety in the handling of cryogenic fluids.** Plenum Press.1996
7. A.J.KIDNAY, M.J.HIZA, and P.F.DICKSON. **The kinetics of adsorption of methane and nitrogen from hydrogen.** NBS Institute for basic standards. Volume 14 advances in cryogenic engineering. Plenum press
8. R.J.CORRUCCINI. **Propriétés de l'hydrogène liquide. PURE & APPLIED CRYOGENICS.** Volume 5 LIQUID HYDROGEN. Institut International du Froid and Pergamon Press 1966.
9. ANDREASSEN K. : **Hydrogen production by electrolysis » Hydrogen Power Theoretical and Engineering solutions, 1998,** Kluwer Academic Publishers, the Netherlands
10. CHAUVEL, **Procédés de pétrochimie,** tome 1, Technip, 1985.
11. DUPUIS, G.E., et al « **Hydrogen Membrane Recovery Estimates,** » hydrocarbon processing, april 1993, 99.61-64

12. ROWELS, H.C., et al., **Hydrogen purification via cryogenics for refiners**, NPRA proceedings 1985
13. J. Chen : **Production of Methanol & Hydrogen from Municipal Solid Waste --**, Princeton University, Center for Energy & Environmental Studies, Center Report, March 1995
14. JAMES R.BOLTON : **Solar photoproduction of hydrogen. A technology assesement**. The World Directory of Renewabel Energy Suppliers and Services 1997.
15. A.BANSAL, O.KHASELEV and J.A.Turner: **Photoelectrechimical System Studies**. Proceedings of the 2000 DOE Hydrogen Program Review
16. E.BILGEN: **Solar hydrogen from photovoltaïc-electrolyzer systems**. Energy Conversion and Management Vol.42, pp 1047-1057, 2001.
17. JAMES R.BOLTON (1996): **Solar Photoproduction of hydrogen: A review**. Solar Energy, Vol.57, N°1, pp.37-50, 1996.
18. ROGER PAPP: **Cellules d'électrolyse**. Technique de l'ingénieur, 1980
19. NUTTAL (L.J.) et TITTERINGTON (W.A.): **General Electric's solid polymer electrolyte water electrolysis**. Conf. SEE, RGE tome 85, n°6, pp 542-550, juin 1976
20. VAN NESTE, ANDRÉ : **Les matériaux nanocristallins pour le stockage de l'hydrogène**. Colloque: C202 : *L'hydrogène: énergie de demain* l'Acfas Mai 1997
21. KAZUHO IWAMOTO : **Theoretical Calculation of the Large Hydrogen Liquefaction Process** Nippon Sanso Corp. 6-2, Kojima-cho, Kawasaki-ku, kawasaki-city, 210 Japan
22. F.E.HOARE, L.C.JACKSON, N.KURTI: **Experimental cryogenics**. Edition London Butterworths 1961
23. RANDALL F. BARRON. **Cryogenic heat transfer**. Copyright Taylor & Francis **1999**
24. RUSSELL B. SCOTT. **Cryogenic engineering**. Copyright D.Van Nostrand Company.INC. 1959.
25. RANDALL.F.BARRON : **Cryogenic systems**, second edition. Oxford university press (1985)
26. **Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems**, Guidelines for Hydrogen System design, Materials selection, Operations, Storage, and Transportation, Document NSS 1740.16, NASA
27. BERNARD EQUER. **Energie solaire photovoltaïque, volume 1 : physique et technologie de la conversion photovoltaïque**. Edition Ellipses (1993).

28. A.HADJ ARAB, B.AIT IDRIS, R.AMINEUR, E.LORENZO : **Photovoltaic systems sizing for Algeria.** *Solar Energy*, Vol.54, N°2, pp.99-104, 1995
29. BERNARD SAPOVAL, CLAUDINZ HERMANN: **Physique des semi-conducteurs.** Edition Ellipses (1990).
30. J.M.CHASSERIAUX: **Conversion thermique du rayonnement solaire.** Edition Bordas 1984.
31. ARCHIE W.CULP.JR: **Principles of Energy Conversion.** Edition International Student 1979
32. CHARLES E. BACKUS : **Photovoltaic conversion. Solar Energy Engineering.** Edited by A.A.M.SAYIGH Academic Press, Inc.85
33. R.PEREZ, J.DOTY, B.BAILEY, R.STEWART: **Experimental evaluation of photovoltaic simulation program.** *Solar Energy*, Vol.52, N°4, pp.359-365,1994.
34. MATTHEW BURESCH: **Photovoltaic Energy System Design and installation,** McGraw Hill Book Company 1983.
35. S.LABED. **Une méthode simple pour dimensionner les installations photovoltaïques.** Congrès sur les énergies renouvelables, la maîtrise de l'environnement (Biskra du 03 au 05 Npv. 1997)
36. BERNARD EQUER, JACQUES PERCEBOIS). **Energie solaire photovoltaïque, volume 2 : Aspects Socio Economiques.** Edition Ellipses (1993).
37. W.PALZ: **L'électricité solaire, les énergies nouvelles.** Edition DUNOD. UNESCO, 1981 Paris.
38. G.LEHMANN. **Les piles à combustible. Thermodynamique des piles à combustible.** Editions Technip 1965.
39. TRONDHEIM OYSTEIN ULLEBERG. **Stand- Alone Power systems for the future: Optimal design, operation and control of solar-hydrogen energy systems.** Ph. D. dissertation Department of Thermal Energy and Hydropower Norwegian University of Science and Technology. December 1998.
40. GERARD GAVE : **Pile à combustible.** technique de l'ingénieur 6-1988
41. JEAN JACQUES BEZIAN : **Système de piles à combustible pour la cogénération état de l'art.** Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris, octobre 1998.
42. GOPAL, RAVI B.,BOSE, TAPAN K... : **Caractérisation de piles à combustible commerciales.** Session: C-202 L'hydrogène: *énergie de demain.* ACFAS, MAI 1997.
43. EDS.BLOMEN, JMJ and MUGERWA, MN: **Fuel cell systems. Plenum press, 1993**

44. GUY LALANDE : **le point sur l'hydrogène et les piles à combustibles**. INRS-Energie et Matériaux 1995.
45. K. KORDESCH ET G. SIMADER: **Fuel Cells and Their Applications**. VCH,1996
46. VOLKER QUASCHNING, ROLF HANITSCH: **Numerical simulation of current-voltage characteristics of photovoltaic systems with shaded solar cells**. Solar Energy Vol. 56, N°6, pp. 513-520 (1996).
47. A GOURDIN, M.BOUMAHARAT: **Méthodes Numériques Appliquées**. Office des publications universitaires 1991.
48. **LEP4.1.09 Characteristic curves of a solar cell**. PHYWE series of publications • Laboratory Experiments • Physics • PHYWE SYSTEME GMBH • 37070 Göttingen, Germany 24109
49. W.PRESS, S.TEUKOLSKY, W.VETTERLING, B.FLANNERY: **Numerical Recipes in Fortran 77: the art of scientific computing, Direction Set (POWELL's) Methods in Multidimensions**. Cambridge University Press 1996.
50. T.TANI, N.SEKIGUCHI, M.SAKAI, and D.OHTA: **Optimization of Solar hydrogen systems based on hydrogen production cost**. Solar Energy Vol. 68, N°2, pp 143-149, 2000.
51. R.G.M.CROCKETT, M.NEWBOROUGH, D.J.HIGHGATE: **Electrolyser – based energy management: a means for optimising the exploitation of variable renewable energy resources in stand-alone application**. Solar Energy Vol.61, N°5, pp293-302, 1997.
52. T.CSENDESE, D. RATZ: **Subdivision direction selection in interval methods for global optimization**. S.I.A.M. journal Vol.34, N°3, pp 922-938, 1997.

## NOMENCLATURE

$I_{cc}$	Intensité de courant du panneau en court circuit
$V_{co}$	Tension du panneau à circuit ouvert.
$I_{max}$	Intensité de courant maximale délivrée par le panneau
$V_{max}$	Tension maximale fournie par le panneau
FF	Facteur de forme
$P_{max}$	Puissance maximale fournie par le panneau
Irr	Irradiance ou insolation émise par le soleil
S	Surface du panneau
$\eta$	Rendement du panneau
$I_f$	Intensité de courant au point de fonctionnement
T	Température ambiante
$Q_{hydrogène}$	La production théorique d'hydrogène
v	Volume d'hydrogène produit
t	Temps correspondant à la production du volume v
I	Intensité de courant fournie par la pile
R	Constante des gaz parfaits
z	Nombre d'électron requis pour libérer une molécule
F	Constante de Faraday
P	Pression atmosphérique
$\frac{v}{t}$	Quantité d'hydrogène consommée par la pile par unité de temps
H	Enthalpie molaire de la réaction (dissociation et formation de l'eau)
E	Efficacité de la pile
$W_{El}$	Energie électrique fournie par la pile
$W_{H2}$	Energie chimique consommée par la pile
$I_{ph}$	Photocourant
$R_s$	Résistance série du panneau photovoltaïque
$R_{sh}$	Résistance shunt du panneau photovoltaïque
$I_{s1}$	Courant de saturation de la diode1
$I_{s2}$	Courant de saturation de la diode2
a	Facteur de correction
m	Facteur d'idéalité
$m_{ref}$	Facteur d'idéalité à la température de référence
$T_{ref}$	Température de référence
$C_o$	Constante réduite du courant de saturation
$E_g$	Energie de la bande interdite du silicium
$C_1$	Constante réduite du photocourant
Irr <sub>réf</sub>	Irradiance référence égale à 1000W/m <sup>2</sup>
$I_{s_{réf}}$	Courant de saturation correspondant à l'irradiance de référence
$R_{opt}$	Résistance optimale
$V_{cel}$	Tension de la cellule d'électrolyse
$I_{cel}$	Intensité de courant de la cellule d'électrolyse
a, b, c, d, e	Constante à température ambiante expérimentale