



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université KASDI Merbah Ouargla



Faculté Des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique

Présente pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : GENIE MECANIQUE

Spécialité : Energétique

Thème :

**Simulation d'un système de production
d'hydrogène solaire**

Encadré :

Mr. Lotfi ZIANI

Réalise par :

Marif EL HADJ BACHIR

Lebbaz MOHAMED EL AMINE

Soutenu publiquement le 12/06/2024 devant le jury composé de :

Mr.	KABDI Zakaria	Président	Université de Ouargla
Mr.	ZIANI Lotfi	Encadreur	Université de Ouargla
Mr.	BIN HIZIA Ousama	Examineur	Université de Ouargla

2023/2024

REMERCIEMENTS

NOUS TENONS AVANT TOUT À REMERCIER DIEU LE CLÉMENT, LE TOUT-PUISSANT DE M'AVOIR DONNÉ LA SANTÉ, LE COURAGE, LA VOLONTÉ ET LA PATIENCE POUR MENER CE TRAVAIL.

J'EXPRIME MES SINCÈRES REMERCIEMENTS À MA FAMILLE POUR LEUR SOUTIEN MATÉRIEL ET MORAL.

JE TIENS ÉGALEMENT À EXPRIMER MA GRATITUDE AU PROFESSEUR LOTFI ZIANI POUR LA QUALITÉ DE SA SUPERVISION, SES PRÉCIEUX CONSEILS, SES RECOMMANDATIONS ET SA PATIENCE.

NOUS EXPRIMONS ÉGALEMENT NOTRE GRATITUDE ENVERS LES MEMBRES DU JURY QUI ONT ACCEPTÉ DE LIRE ET D'ÉVALUER NOTRE TRAVAIL

Dédicaces

JE DÉDIE LE FRUIT DE CET EFFORT AUX PERSONNES LES PLUS CHÈRES ET LES PLUS PRÉCIEUSES À MES YEUX. GRÂCE À ELLES ET APRÈS DIEU, NOUS AVONS ATTEINT CE QUE NOUS AVONS ATTEINT. JE DÉDIE L'ESSENCE DE MON TRAVAIL ET LE FRUIT DE MES MODESTES EFFORTS

À

MES PARENTS GÉNÉREUX, QUE DIEU LES BÉNISSE ET PROLONGE LEUR VIE,

À

TOUS LES MEMBRES DE MA CHÈRE FAMILLE, MON SOUTIEN DANS LA VIE,

JE N'OUBLIE PAS NON PLUS MES AMIS ET COLLÈGUES, AINSI QUE TOUS CEUX QUI M'ONT TENDU LA MAIN POUR M'AIDER DE PRÈS OU DE LOIN.

Résumé

L'hydrogène est considéré comme le carburant du futur et un vecteur énergétique clé, offrant des solutions prometteuses pour la sécurité énergétique et le développement durable, notamment lorsqu'il est produit à partir de l'énergie solaire. L'Algérie, avec ses capacités techniques et économiques favorables, ainsi que sa position stratégique avantageuse pour l'exploitation de l'énergie solaire, peut devenir un acteur régional majeur dans la production d'hydrogène solaire.

Dans ce contexte, nous avons utilisé le programme Matlab pour simuler un système combinant un générateur photovoltaïque et un électrolyseur afin de produire de l'hydrogène. Cette étude a été réalisée sur trois wilayas algériennes, permettant une analyse comparative des performances saisonnières du système. Les résultats mettent en évidence les potentiels et les défis de l'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'hydrogène en Algérie.

Mots clés : énergie solaire, électrolyseur de l'eau, hydrogène, panneau photovoltaïque, Matlab.

Abstract

Hydrogen is considered the fuel of the future and a key energy vector, offering promising solutions for energy security and sustainable development, especially when produced from solar energy. Algeria, with its favorable technical and economic capabilities, as well as its strategic position for solar energy exploitation, can become a regional leader in solar hydrogen production.

In this context, we used the Matlab program to simulate a system combining a photovoltaic generator and an electrolyzer to produce hydrogen. This study was conducted for three Algerian provinces, allowing for a comparative analysis of the system's seasonal performance. The results highlight the potentials and challenges of using solar energy for hydrogen production in Algeria.

Keywords : solar energy, water electrolyzer, hydrogen, photovoltaic panel, Matlab.

ملخص

يُعتبر الهيدروجين وقود المستقبل وموجهًا رئيسيًا للطاقة، حيث يقدم حلولًا واعدة لتحقيق الأمن الطاقوي والتنمية المستدامة، خاصةً عند إنتاجه من الطاقة الشمسية. تمتلك الجزائر قدرات تقنية واقتصادية مواتية، بالإضافة إلى موقعها الاستراتيجي للاستفادة من الطاقة الشمسية، مما يمكنها من أن تصبح رائدة إقليميًا في إنتاج الهيدروجين الشمسي.

في هذا السياق، استخدمنا برنامج Matlab لمحاكاة نظام يجمع بين مولد كهروضوئي ومحلل كهربائي لإنتاج الهيدروجين. أُجريت هذه الدراسة في ثلاث ولايات جزائرية، مما أتاح لنا إجراء تحليل مقارنة لأداء النظام في الفصول المختلفة. تُبرز النتائج الإمكانيات والتحديات لاستخدام الطاقة الشمسية لإنتاج الهيدروجين في الجزائر.

كلمات دلالية : الطاقة الشمسية، المحلل الكهربائي للماء، الهيدروجين الشمسي، اللوح الكهروضوئي، ماتلاب.

Sommaire

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

CHAPITRE I : Généralités sur le système de production d'hydrogène solaire

Introduction.....	3
--------------------------	----------

I. Généralité sur le panneaux photovoltaïque.....	3
--	----------

I.1. La définition.....	3
-------------------------	---

I.2. Cellule solaire (cellule PV).....	3
--	---

I.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	4
---	---

I.4. Matériaux utilisés et production.....	5
--	---

II. Généralité sur l'électrolyseur.....	5
--	----------

II.1. Electrolyseur.....	5
--------------------------	---

II.1.1. Les différentes technologies d'électrolyseur.....	6
---	---

II.1.1.a. Electrolyseurs Alcalins.....	6
--	---

II.1.1.a.1. Principe.....	6
---------------------------	---

II.1.1.a.2. Les matériaux.....	7
--------------------------------	---

II.1.1.b. Electrolyseurs à membrane échangeuse protons (PEM).....	8
---	---

II.1.1.b.1. Principe.....	8
---------------------------	---

II.1.1.b.2. Les matériaux.....	9
--------------------------------	---

II.1.1.c. Electrolyseurs à haute température.....	9
---	---

II.1.1.c.1. Principe.....	9
---------------------------	---

II.1.1.c.2. Les matériaux.....	10
--------------------------------	----

Conclusion.....	10
------------------------	-----------

CHAPITRE II : Gisement solaire

Introduction.....	11
--------------------------	-----------

I. L'énergie solaire.....	11
----------------------------------	-----------

I.1 Mouvement de la terre.....	11
--------------------------------	----

I.2 Trajectoire apparente du soleil.....	12
--	----

I.3 Le rayonnement solaire.....	13
---------------------------------	----

I.3.1 Masse d'air.....	14
I.3.2 L'effet cosinus.....	14
I.4 Instruments de mesure.....	15
I.4.1 Le pyranomètre.....	15
I.4.2 Le Solarimètre.....	16
Conclusion.....	16

CHAPITRE III : Modélisation

Introduction.....	17
I. Modélisation d'un module Panneau photovoltaïque.....	17
II. La modélisation de l'électrolyseur alcalin.....	19
II.1. Modèle thermodynamique.....	19
II.2. Modèle électrochimique.....	20
III. Couplage et programmation.....	21
Conclusion.....	24

CHAPITRE IV : Résultats et discussion

Introduction.....	25
I. Caractéristiques du système.....	25
II. Données de l'irradiation solaire et température.....	26
III. Simulation du système de production.....	26
III.1. Simulation pour le 21 Décembre.....	27
III.2. Simulation pour le 21 Mars.....	29
III.3. Simulation pour le 21 Juin.....	31
III.4. Simulation pour le 21 septembre.....	34
IV. Production annuelle.....	36
Conclusion.....	37

Conclusion générale.....	38
---------------------------------	-----------

Références bibliographies.....	40
---------------------------------------	-----------

Annexe	
---------------	--

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Cellule photoélectrique.....	4
Figure I.2 : Comment fonctionne un panneau photovoltaïque.....	4
Figure I.3 : Schéma d'un électrolyseur.....	5
Figure I.4 : Schéma de principe de fonctionnement des 3 types d'électrolyseurs : alcalin, PEM et à vapeur d'eau.....	6
Figure I.5 : Principe schématique de l'électrolyse alcaline.....	7
Figure I.6 : Principe schématique de l'électrolyse PEM.....	8
Figure I.7 : Principe de l'électrolyse à haute température selon le type de l'électrolyte.....	10
Figure II.1 : Mouvement de la terre autour du soleil.....	11
Figure II.2 : Position du soleil (hauteur et azimut).....	12
Figure II.3 : Spectre du rayonnement solaire.....	13
Figure II.4 : Définition de l'Air mass.....	14
Figure II.5 : l'effet cosinus.....	15
Figure II.6 : Le document représente une image du pyranomètre.....	15
Figure II.7 : Solarimètre.....	16
Figure III.1 : Modèle a une diode d'une cellule PV.....	17
Figure III.2 : Courbes I-U typiques pour une cellule électrolytique à haute et basse températures.....	20
Figure III.3 : Schémas du système de production d'hydrogène.....	22
Figure III.4 : Organigramme du programme utilisé.....	23
Figure IV.1 : évolution de la température ambiante durant la journée du 21 décembre.....	27
Figure IV.2 : évolution de l'irradiation solaire durant la journée du 21 décembre.....	27
Figure IV.3 : La puissance produite par le panneau photovoltaïque durant la journée du 21 décembre.....	28
Figure IV.4 : Débit d'hydrogène durant la journée du 21 décembre.....	28
Figure IV.5 : évolution de la température ambiante durant la journée du 21 mars.....	29
Figure IV.6 : évolution de l'irradiation solaire durant la journée du 21 mars.....	30
Figure IV.7 : La puissance produite par le panneau photovoltaïque durant la journée du 21 mars.....	30

Figure IV.8 : Débit d'hydrogène durant la journée du 21 mars.....	31
Figure IV.9 : évolution de la température ambiante durant la journée du 21 juin.....	32
Figure IV.10 : évolution de l'irradiation solaire durant la journée du 21 juin.....	32
Figure IV.11 : La puissance produite par le panneau photovoltaïque durant la journée du 21 juin.....	33
Figure IV.12 : débit de production d'hydrogène durant la journée du 21 juin.....	33
Figure IV.13 : évolution de la température ambiante durant la journée du 21 septembre.....	34
Figure IV.14 : évolution de l'irradiation solaire durant la journée du 21 septembr.....	35
Figure IV.15 : La puissance produite par le panneau photovoltaïque durant la journée du 21 septembre.....	36
Figure IV.16 : Débit d'hydrogène durant la journée du 21 septembre.....	36

LISTE DES TABLEAUX

Tableau IV.1 : Caractéristiques du panneau photovoltaïque.....	25
Tableau IV.2 : Caractéristiques de l'électrolyseur.....	26

NOMENCLATURE

a_s	L'azimute
α_{Icc}	Le coefficient de température du courant à court-circuit
A_{cell}	La surface des électrodes
E	L'éclairement
EHT	électrolyse à haute température
ET	Le facteur de correction
$E_{réf}$	L'éclairement nominal de 1000W/m ²
F	Le nombre de Faraday 96 485 C mol ⁻¹
f	Paramètre lié à l'efficacité de Faraday
G_d	L'énergie libre de dissociation de l'eau
h	La hauteur angulaire
H	L'angle horaire
H_d	L'enthalpie de dissociation de l'eau
I	Le courant électrique
I_{pv}	Le courant généré par la cellule photovoltaïque
I_{cc}	Le courant de court circuit
I_d	Le courant circulant dans la diode
I_{ph}	Le courant de la cellule photovoltaïque
I_{ely}	Le courant d'électrolyseur
K	La constante de Boltzmann 1.381 x 10 ⁻²³ J/K
L_{st}	La méridienne standard
L_{oc}	La longitude locale
M	Le correcteur de masse d'aire
NOCT	Température nominale de fonctionnement de cellule

n	L'indice de réfraction effectif
η_F	Le rendement Faraday
n_{H_2}	Le débit de production d'hydrogène
n_{O_2}	La quantité d'oxygène produite
PEM	Proton Exchange Membrane
q	La charge de l'électron $1,602 \times 10^{-19}$ C
R_{sh}	La résistance en parallèle ou résistance de fuite
R_{se}	La résistance en série
r	Paramètre lié à la résistance ohmique de l'électrolyte
réf	L'indice qui veut dire que les valeurs sont prises aux conditions de référence
S_d	L'entropie de dissociation de l'eau
s	Coefficient de sution sur les électrodes, V
TSV	Temps solaire vrai en min
TL	Le temps local en min
TSM	Le temps solaire moyen en min
T	La température effective de la jonction
$T_{réf}$	La température de reference
T_{cell}	La température de la cellule photovoltaïque
T_a	La temperature ambiante
T	La température
t	Coefficient de sution sur les électrodes, $A^{-1}m^2$
U_{rev}	La tension thermodynamique d'électrolyse
U_{tn}	La tension enthalpique ou thermoneutre
U_{cell}	La tension de la cellule

Nomenclature

V	La tension électrique
V_T	Le potentiel thermodynamique
V_{oc}	La tension de circuit ouvert
δ	L'angle formé par l'axe Terre Soleil avec le plan de l'équateur
φ	La latitude
η	Le facteur d'idéalité de la jonction

Introduction générale

La production d'énergie est l'une des principales sources de gaz à effet de serre qui polluent l'air et retiennent la chaleur du soleil autour de la Terre. La combustion de combustibles fossiles pour générer de l'électricité et de la chaleur est au cœur de ce problème [1]. Pour atténuer ce défi environnemental majeur, il est crucial de réduire notre dépendance aux combustibles fossiles et d'investir dans des sources d'énergie alternatives qui soient propres, accessibles, abordables, durables et fiables comme les ressources renouvelables [1,2].

Les ressources renouvelables, variées et inépuisables, offrent une solution prometteuse. Leur conversion en énergie thermique, chimique ou électrique présente peu de dangers pour l'homme et l'environnement. Parmi les différentes sources d'énergie renouvelable, on trouve l'énergie éolienne, géothermique, hydroélectrique et solaire, cette dernière étant la plus abondante. Cependant, l'intermittence de l'énergie solaire et sa dépendance aux conditions climatiques rendent nécessaire le stockage de l'énergie produite. À cet égard, l'hydrogène se distingue comme le meilleur vecteur énergétique en raison de sa propreté et de son pouvoir énergétique élevé [3,4].

L'hydrogène, souvent décrit comme le carburant de l'avenir, peut être produit de manière écologique en utilisant des ressources renouvelables par électrolyse de l'eau. Ce processus est particulièrement pertinent pour des pays comme l'Algérie, qui bénéficie d'un ensoleillement exceptionnel [3,4]. Grâce à son emplacement géographique stratégique, l'Algérie possède l'un des plus grands champs solaires au monde, ce qui la place idéalement pour devenir un leader dans la production d'hydrogène vert.

Dans cette étude, nous nous concentrons sur la production d'hydrogène solaire en couplant un électrolyseur avec un champ photovoltaïque. Ce système sera évalué dans trois wilayas algériennes : Ouargla, El Oued et Naâma. Chaque site a été choisi pour ses caractéristiques climatiques uniques, permettant une analyse comparative approfondie.

Notre travail vise à réaliser une étude de faisabilité d'une unité de production d'hydrogène solaire en simulant l'association d'un générateur photovoltaïque et d'un électrolyseur. La méthodologie suivie comprend une simulation annuelle des performances du système, avec une attention particulière portée à l'impact des variations saisonnières et climatiques sur la production d'hydrogène.

La structure de ce mémoire est organisée en quatre chapitres principaux :

Le premier chapitre présente une introduction générale et décrit les composants essentiels de la technique utilisée pour produire de l'hydrogène solaire.

Le deuxième chapitre explore le rayonnement solaire, ses caractéristiques, et les facteurs externes influençant le système de production d'hydrogène.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation des panneaux photovoltaïques et de l'électrolyseur en utilisant le logiciel MATLAB, offrant une vue détaillée des paramètres techniques et opérationnels.

Le quatrième et dernier chapitre présente les modèles de simulation du système, ainsi que les résultats des simulations pour les trois sites étudiés, permettant une comparaison et une analyse approfondie des performances.

Enfin, notre travail se conclut par une synthèse des résultats obtenus et des recommandations pour les futurs développements dans le domaine de la production d'hydrogène solaire en Algérie.

CHAPITRE I :
***Généralités sur le système de
production d'hydrogène solaire***

Introduction

En utilisant l'eau et l'énergie électrique résultant des systèmes photovoltaïques, de l'hydrogène peut être produit. Ce chapitre explore diverses méthodes de production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire. En raison de sa popularité et de son efficacité, nous avons opté pour une installation combinant un électrolyseur alcalin à un champ photovoltaïque, une approche largement adoptée et considérée comme l'une des meilleures méthodes actuelles de production d'hydrogène.

Nous nous intéresserons dans ce chapitre aux types d'équipement disponible mais aussi aux principes de fonctionnement de chacun des composants.

I. Généralité sur le panneaux photovoltaïque

Dans notre recherche, nous visons à étudier la productivité de l'hydrogène à travers des expériences scientifiques basées sur les énergies renouvelables, où nous utilisons des panneaux photovoltaïques pour convertir le rayonnement solaire en électricité. Ensuite, grâce à l'électrolyse de l'eau, nous obtenons de l'hydrogène et de l'oxygène.

I.1. La définition

L'énergie solaire est la lumière et la chaleur émises par le soleil, que nous exploitons grâce à différentes méthodes et technologies pour produire de l'énergie électrique : soit par le chauffage direct des concentrateurs solaires, soit par l'utilisation de l'énergie photovoltaïque à l'aide de cellules solaires. C'est sur cette énergie que les installations de production d'hydrogène se basent largement.

I.2. Cellule solaire (cellule PV)

Elle est la plus petite partie du panneau solaire et est l'élément essentiel de celui-ci où elle convertit le rayonnement solaire direct en énergie électrique en exploitant l'effet photoélectrique qui active les électrons à l'intérieur de la cellule pour produire un courant. L'efficacité de la cellule dépend de deux facteurs : le premier est l'efficacité de conversion à l'intérieur de la cellule et le second est la capacité de la cellule solaire à absorber les photons.

C'est l'un des meilleurs moyens de produire de l'électricité propre si de grandes surfaces lui sont dédiées [5].



Figure I.1 : Cellule photoélectrique [6]

I.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La cellule solaire est principalement constituée de silicium, dont les particules possèdent quatre électrons dans leur couche externe. Lorsque les atomes de silicium se lient à quatre autres atomes de silicium, aucun électron libre n'est présent et donc aucune conductivité électrique. Les photons émis par les rayons du soleil transportent de l'énergie. Lorsqu'un photon frappe l'un des électrons de valence de l'atome de silicium, cet électron absorbe l'énergie du photon, se libérant ainsi de son orbite et créant un électron libre. Cela facilite le passage du courant électrique et laisse derrière lui un trou, une charge positive également appelée trou [5].

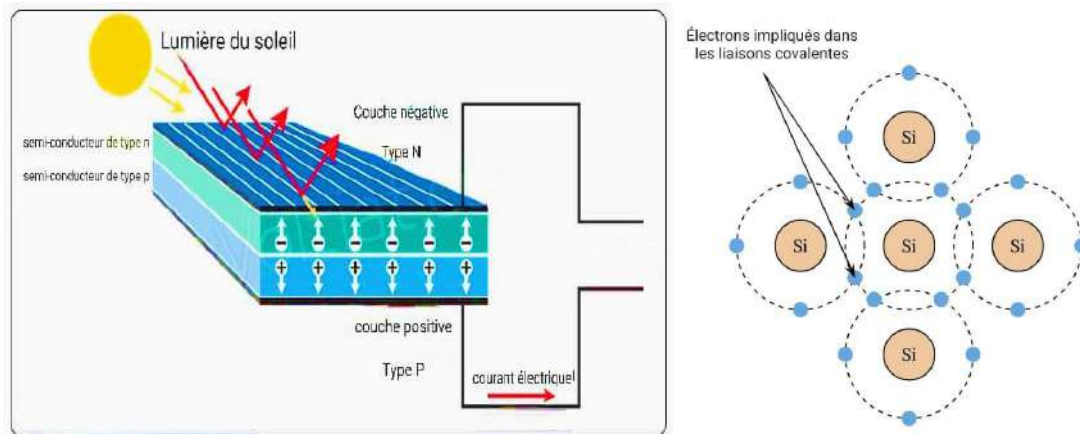


Figure I.2 : Comment fonctionne un panneau photovoltaïque [6]

Pour augmenter la conductivité électrique de la cellule, un processus appelé dopage est effectué. Il consiste à injecter une petite quantité de phosphore à l'intérieur du cristal de silicium pour obtenir des charges négatives (type N), et du bore dans la couche opposée pour obtenir des charges positives (type P). Cette différence de charge crée un champ électrique entre les deux

régions. Lorsque les rayons du soleil frappent la cellule, ce champ électrique repousse les charges négatives vers le haut et les charges positives vers le bas, créant ainsi une concentration élevée. En connectant deux fils entre les deux régions, les électrons libres peuvent traverser le fil pour remplir les trous dans la région P, créant ainsi un courant électrique et une différence de potentiel que nous pouvons exploiter.

I.4. Matériaux utilisés et production

Le matériau de base dans le panneau solaire est le silicium, qui est l'élément principal du sable, ce qui signifie qu'il est largement disponible dans la croûte terrestre et peu coûteux. En plus de ses excellentes propriétés d'absorption avec le spectre solaire, les statistiques dans ce domaine indiquent que 80 % des cellules solaires disponibles sur le marché mondial sont en silicium. Sous le nom de silicium, on trouve des cellules amorphes, polycristallines et monocristallines. Si nous considérons que les cristaux sont des matériaux de première génération, il existe d'autres matériaux de deuxième génération utilisés dans la fabrication des cellules solaires, tels que le Gallium Arsenide (GaAs), le Cu (Ina), Se2 (CiGs), et le Tellurure de Cadmium (CdTe) [7].

II. Généralité sur l'électrolyseur

II.1. Electrolyseur

L'électrolyseur est un dispositif composé de cellules électrolytiques qui rassemble deux électrodes (anode et cathode, conducteur électrique) reliées à un générateur de courant continu et immergées dans un électrolyte (milieu conducteur ionique). Ce processus électrochimique vise à séparer les composants de base de l'eau (oxygène et hydrogène), comme illustré dans la figure (I.3) et l'équation (I. 1) [8].

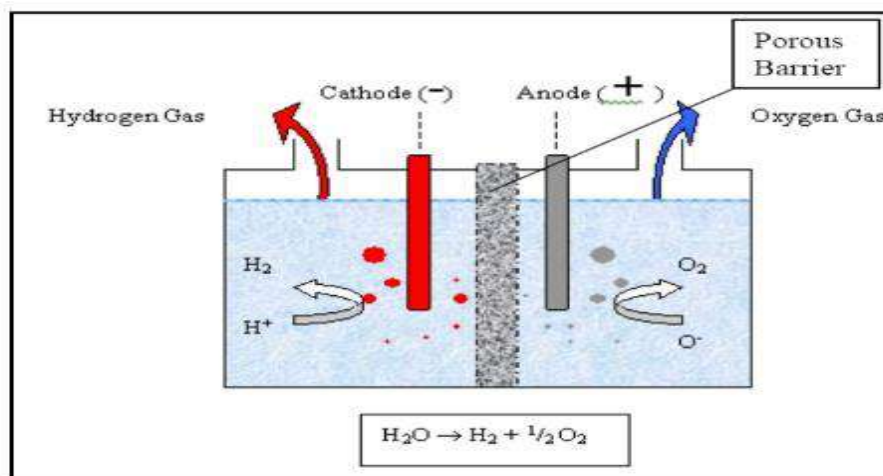
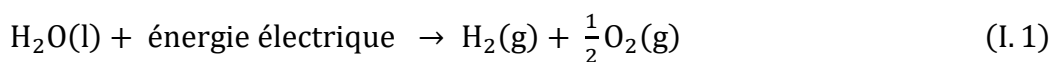


Figure I.3 : Schéma d'un électrolyseur [8]

II.1.1. Les différentes technologies d'électrolyseur

Actuellement, il existe trois types de technologies pour l'électrolyse de l'eau (voir Figure I.4) :

- a) Electrolyseur Alcalin;
- b) Electrolyseur à membrane échangeuse protons (PEM);
- c) Electrolyseur à haute température.

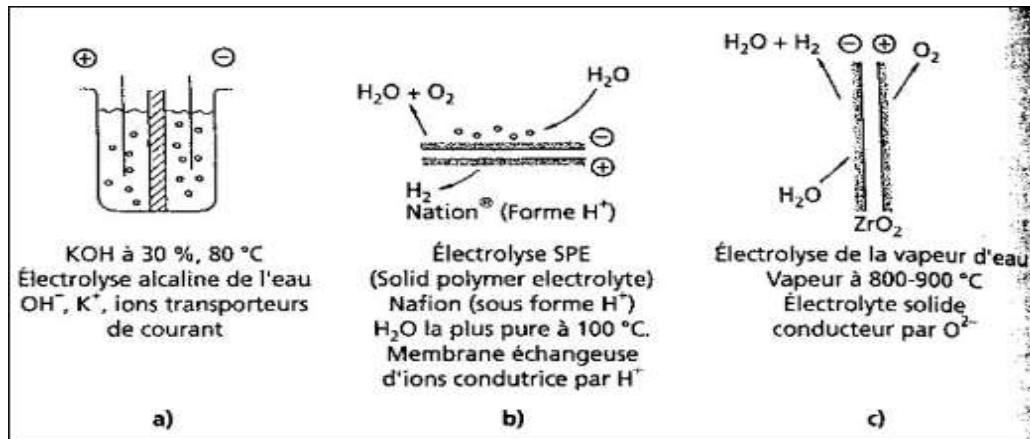


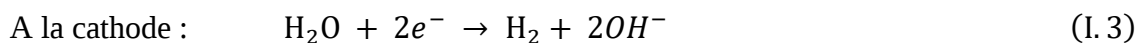
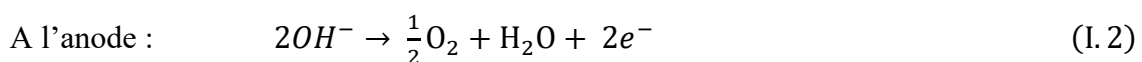
Figure I.4 : Schéma de principe de fonctionnement des 3 types d'électrolyseurs : alcalin, PEM et à vapeur d'eau [9]

II.1.1.a. Electrolyseur Alcalin

II.1.1.a.1. Principe

Constatée pour la première fois en 1800, l'électrolyse alcaline est actuellement la technologie la plus utilisée pour la production d'hydrogène électrolytique et également pour la production de nombreux composés chimiques dont le chlore. Elle bénéficie ainsi d'une très grande maturité industrielle [10].

Dans un électrolyseur à technologie alcaline, l'électrolyte est, généralement, une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH). La conduction ionique est alors assurée par les ions hydroxyde (OH^-) et potassium (K^+). et les électrodes sont généralement métalliques (Fer et Palladium) et séparées par une membrane en céramique. Les réactions anodiques et cathodiques sont décrites ci-dessous [8], [11] :



La figure ci-après illustre de manière schématique l'électrolyse alcaline :

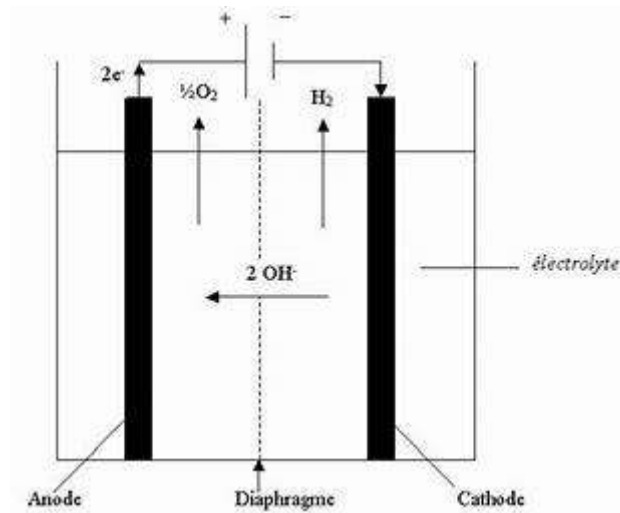


Figure I.5 : Principe schématique de l'électrolyse alcaline [12]

II.1.1.a.2. Les matériaux

Le plus souvent, l'anode est fabriquée en nickel et en acier doux, et pour réduire la surtension sur le cathode, qui est composé d'acier plaqué de nickel ou de nickel solide, un dépôt surfacique catalytique est utilisé en surface.

Et comme les électrodes, les cellules électrolytiques alcalines se composent d'une partie principale qui est le diaphragme. Jusqu'au milieu des années 90, le matériau le plus utilisé pour constituer le diaphragme est l'amiante. Et pour des raisons de santé la zircone était proposée mais non compatible avec une utilisation industrielle en raison de son coût élevé.

Aujourd'hui, le matériau de base des diaphragmes semble être le nickel sous formes d'oxydes.

L'électrolyte est généralement constitué d'une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH). Sa concentration massique est déterminée afin que l'électrolyte présente une conductivité maximale à la température de fonctionnement de l'électrolyseur. Et les solutions de potasse sont préférées aux solutions de soude car elles présentent une meilleure conductivité à une température donnée [12].

Le procédé alcalin présente un certain nombre d'avantages :

- Il permet l'utilisation de catalyseurs non nobles (à base de nickel), moins onéreux car plus abondants.
- Les catalyseurs sont moins sensibles à l'empoisonnement, la qualité de l'eau utilisée y est moins importante, bien que la présence d'ions chlorure soit proscrite.

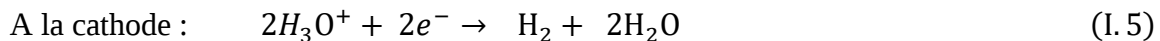
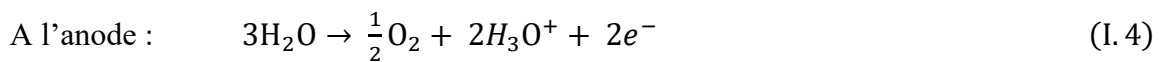
Ses inconvénients sont :

- Absorption du CO_2 qui conduit à des problèmes de carbonatation.
- La corrosion des joints pose des problèmes de maintenance.
- Il y a, de plus, des problèmes de sécurité en fonctionnement à haute pression, domaine en croissance rapide pour le stockage direct de l'hydrogène [8].

II.1.1.b. Electrolyseur à membrane échangeuse protons (PEM)

II.1.1.b.1. Principe

Le mécanisme de fonctionnement d'un électrolyseur PEM (Proton Exchange Membrane) est fondé sur le même concept qu'une pile à combustible PEM. La caractéristique principale de l'électrolyseur PEM réside dans son électrolyte solide, constitué d'une membrane polymère. Cette membrane assure ainsi la conduction des ions (H_3O^+) générés à l'anode et permet la séparation des gaz produits (H_2 et O_2), selon les réactions suivantes :



Les performances de l'électrolyseur PEM dépendent essentiellement des caractéristiques de la membrane et des catalyseurs utilisés. Ces deux composants constituent encore aujourd'hui les principaux verrous technologiques de l'électrolyse PEM [14].

La figure ci-après illustre de manière schématique l'électrolyse PEM :

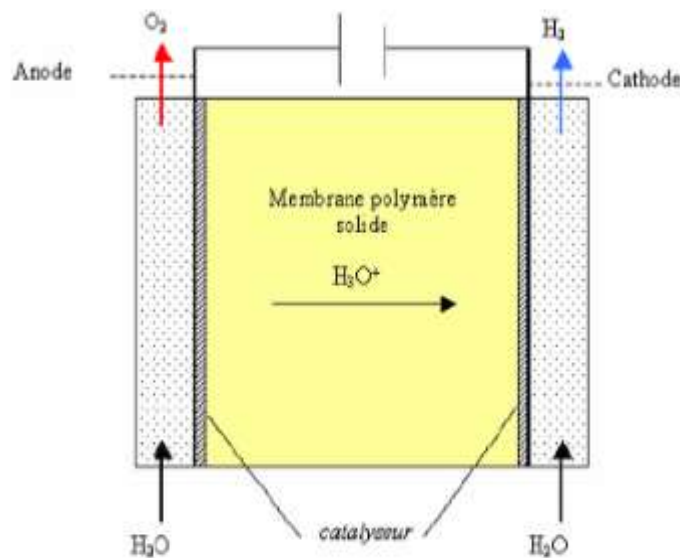


Figure I.6 : Principe schématique de l'électrolyse PEM [14]

II.1.1.b.2. Les matériaux

L'anode est composée d'un composite graphite collé à un treillis métallique en laiton, le collecteur de courant étant composé pour sa part de titane. Le catalyseur est constitué d'oxydes de métaux nobles à base de ruthénium (Ru) et d'iridium (Ir).

La cathode est constituée de graphite poreux avec un dépôt catalytique de platine ou d'oxyde métallique. Les études et recherches actuelles visent à remplacer ce catalyseur en raison des prix élevés du platine.

L'électrolyte de l'électrolyseur PEM représente le rôle de conducteur protonique et de diaphragme. Il est constitué d'une membrane composée de fluoropolymère solide comprenant des groupements acides sulfoniques (SO_3H). Ces groupes se transforment aisément en leur base conjuguée, selon la réaction suivante, sous l'action d'un champ électrique :



La membrane joue donc le rôle d'un conducteur protonique puisque la migration des ions (H^+) est assurée par la transformation des groupements sulfoniques en ions (SO_3^-). Elle nécessite d'être constamment humidifiée sous peine de voir sa conductivité diminuer.

DuPont de Nemours commercialise la membrane Nafion, considérée comme la plus utilisée actuellement. Des recherches sont en cours afin de trouver un matériau de substitution au Nafion [13].

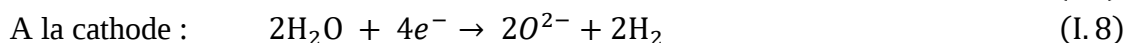
II.1.1.c. Electrolyseur à haute température

II.1.1.c.1. Principe

Le principe de l'électrolyse à haute température (EHT) repose sur la décomposition des molécules d'eau sous forme vapeur au niveau de la cathode. Cette décomposition dépend alors de la nature de l'électrolyte. Celui-ci peut assurer soit une conduction protonique soit une conduction d'ions superoxydes (O_2^-) [12]. L'électrolyse de la vapeur d'eau à haute température se caractérise par la possibilité de substituer une partie de l'énergie électrique nécessaire à la dissociation de la molécule d'eau par de l'énergie thermique [15]. Ceci permet un gain en rendement par rapport aux autres technologies d'électrolyse.

Les réactions mises en jeu au niveau des électrodes sont décrites cidessous en fonction du type d'électrolyte [12] :

» Electrolyte à conduction d'ions superoxydes :



» Electrolyte à conduction protonique :

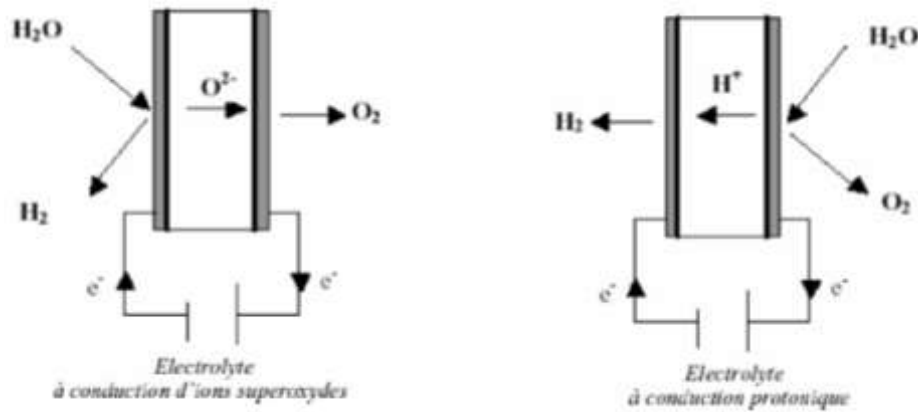
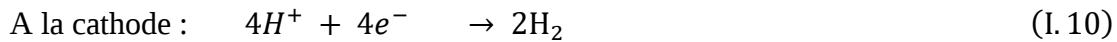
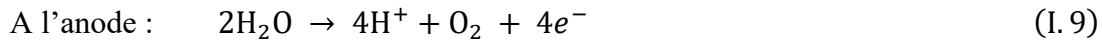


Figure I.7 : Principe de l'électrolyse à haute température selon le type de l'électrolyte [12]

II.1.1.c.2. Les matériaux

L'anode est constituée soit de manganites, soit de chromites de lanthane, avec comme catalyseur du nickel de Cermet ($\text{Ni}+\text{ZrO}_2$).

La cathode est constituée de billes de nickel fritté ou de cobalt, voire de nickel de Cermet. L'emploi de cobalt est limité en raison de sa trop grande réactivité. Les catalyseurs employés à la cathode sont à base d'oxyde de cérium.

Il existe deux types d'électrolyte :

Les électrolytes à conduction d'ions superoxydes et ceux à conduction protonique. Dans le cas de l'électrolyte à conduction d'ions superoxydes, on utilise une céramique en zircone.

Concernant l'électrolyte à conduction protonique, on utilise les oxydes de cérium et de zircone [12].

Conclusion

En conclusion, ce chapitre a examiné différentes méthodes de production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire. Parmi celles-ci, l'installation combinant un électrolyseur alcalin à un champ photovoltaïque se distingue comme l'une des approches les plus utilisées et les plus efficaces actuellement disponibles. Cette méthode représente une solution prometteuse pour la production d'hydrogène à grande échelle, bénéficiant à la fois des avantages de l'électrolyseur alcalin et de la technologie photovoltaïque.

Dans le chapitre suivante, une étude approfondie du gisement solaire est prévue afin de déterminer le potentiel de production d'électricité solaire à l'aide de panneaux photovoltaïques.

CHAPITRE II :

Gisement solaire

Introduction

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus importantes disponibles actuellement, grâce à sa capacité à fournir une énergie propre et durable. De nombreux systèmes photovoltaïques et thermiques dépendent d'une compréhension précise du parcours du soleil et de ses angles. Divers appareils de mesure du rayonnement solaire et de la température sont utilisés pour atteindre une efficacité maximale dans l'exploitation de l'énergie solaire, ce que nous aborderons dans ce chapitre.

I. L'énergie solaire

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1.391.000 km (100 fois celui de la terre), sa masse est de l'ordre de 2.10^{27} tonnes. Toute l'énergie du soleil provient de réactions thermonucléaires qui se produisent. Elles transforment à chaque seconde 564.106 tonnes d'hydrogène en 560.106 tonnes d'Hélium, la différence de 4 millions de tonnes est dissipée sous forme d'énergie ($E = m c^2$), ce qui représente une énergie totale sous forme de rayonnement, estimée à $3,7.10^{26}$ J/s [16].

I.1 Mouvement de la terre

La Terre tourne autour de son axe toutes les 24 heures, ce qui équivaut à un jour complet, et elle orbite autour du soleil dans une trajectoire elliptique sur une période de 365,25 jours. Ce plan orbital est appelé le plan de l'écliptique. Son axe de rotation (l'axe des pôles) a une orientation fixe dans l'espace. Il fait un angle $\delta=23^\circ 5'$ avec la normale au plan de l'écliptique. Au solstice d'hiver (21 décembre), la Terre est plus proche du soleil, tandis qu'au solstice d'été (22 juin), elle en est la plus éloignée.. [17].

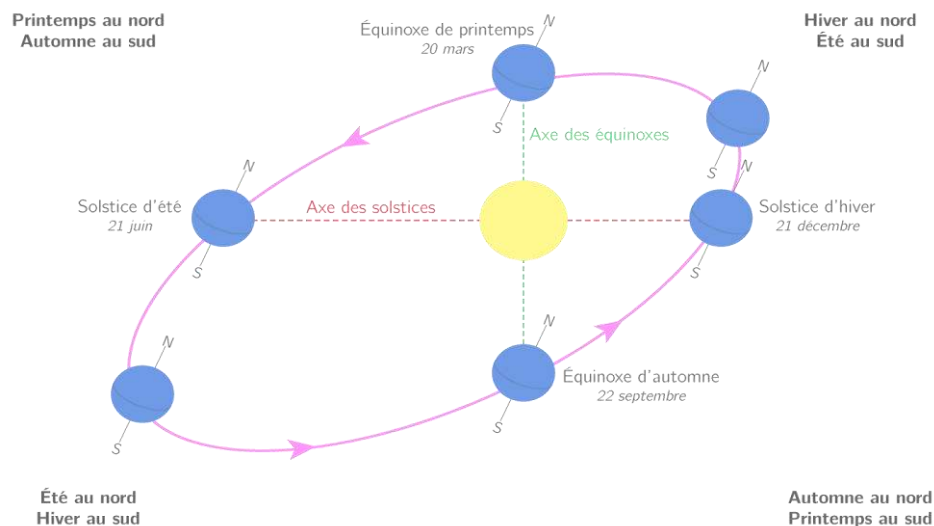


Figure II.1 : Mouvement de la terre autour du soleil [18]

I.2 Trajectoire apparente du soleil

Pour un observateur situé sur la surface de la terre, le soleil décrit une trajectoire apparente qui dépend de la latitude et de la longitude du lieu où il se trouve. Rappelons que la latitude est la distance angulaire d'un point quelconque du globe par rapport à l'équateur. Quant à la longitude, c'est également un angle, donné par rapport au méridien de Greenwich en se déplaçant vers l'est [8].

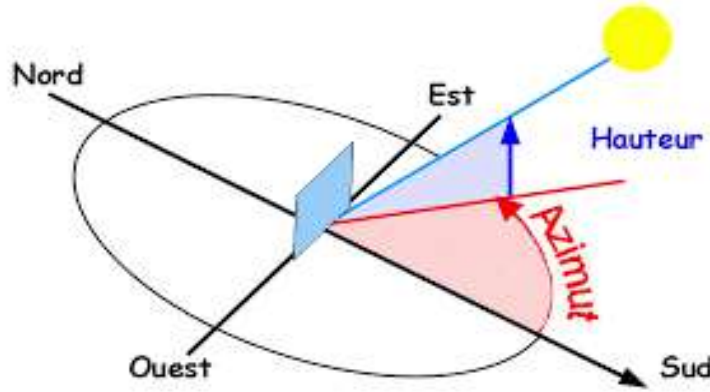


Figure II.2 : Position du soleil (hauteur et azimut) [8]

La position du soleil est définie par deux angles : sa hauteur angulaire h - l'angle entre la direction du soleil et le plan horizontal du lieu- et son azimut a_s - l'angle entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil, compté négativement vers l'est. Et qui sont données par :

$$a_s = \sin^{-1}((\csc \delta \sin h) / \cos h) \quad (\text{II. 1})$$

$$h = \sin^{-1}(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos H) \quad (\text{II. 2})$$

avec:

φ : La latitude du lieu d'observation;

H : L'angle horaire.

L'angle horaire H (l'angle formé entre la projection du soleil sur le plan équatorial à un moment donné et la projection du Soleil sur ce même plan au midi vrai), est donné par :

$$H = 360(TSV - 12)/24 \quad (\text{II. 3})$$

Avec : TSV temps solaire vrai en min

Comme la rotation de la terre s'effectue en vingt-quatre heures autour de son axe polaire, l'angle solaire du soleil varie de 15° par heure. On définit ainsi un temps solaire moyen TSM (en min) :

$$TSM = TL + 4(L_{st} - L_{oc}) \quad (\text{II. 4})$$

où: TL est le temps local (en min), L_{st} la méridienne standard et L_{oc} est la longitude locale.

Donc :

$$TSV = TSM + ET \quad (II.5)$$

Où ET est un facteur de correction qui tient compte de la non uniformité de la vitesse de rotation de la terre autour du soleil ce qui engendre que les passages du soleil au méridien du lieu considéré n'obéissent pas à une parfaite périodicité de 24 heures. Elle est donnée par la relation empirique suivante :

$$ET = 9.87 \cdot \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad (II.6)$$

$$\text{Où } B = 360(n - 81)/364 \quad (II.7)$$

I.3 Le rayonnement solaire

L'énergie solaire est une énergie rayonnante qui est générée par le soleil grâce à la fusion nucléaire des atomes d'hydrogène, où les atomes d'hydrogène se transforment en atomes d'hélium. Dans cette fusion, une énergie ou une chaleur élevée estimée à 15 millions de degrés Celsius est produite. L'énergie rayonnante se déplace du soleil vers la terre sous forme d'ondes électromagnétiques à la vitesse de la lumière et arrive en environ 8 minutes. Le transfert de l'onde électromagnétique du soleil vers la terre est appelé le spectre solaire, qui est divisé en rayons visibles (les sept couleurs du spectre solaire) et en rayons invisibles (gamma, infrarouge, ultraviolet). Environ 47% seulement des rayonnements émis par le soleil atteignent la terre, le reste étant réfléchi dès son arrivée dans l'atmosphère Terrestre.

Le domaine de longueur d'onde utile pour les applications solaires est situé entre $0.25\mu\text{m}$ et $2.5\mu\text{m}$, l'énergie émise dans cette bande (contenant les zones UV, Visible et IR) représente 95% environ du total. En traversant l'atmosphère, l'énergie radiative solaire est atténuée par absorption et diffusion, et l'énergie enregistrée au niveau de la mer est de l'ordre de 1000 W/m^2 . Cette valeur variera ensuite en fonction de l'angle d'incidence sur le récepteur, de l'intensité et de la durée d'ensoleillement. Pour récupérer un maximum d'énergie en provenance du soleil, il est donc nécessaire de connaître les différents paramètres de la source d'énergie, soleil, en fonction du temps et d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux [16].

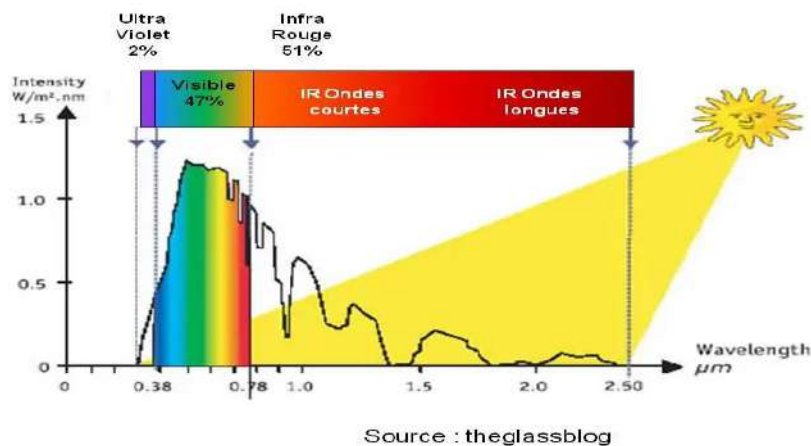


Figure II.3 : Spectre du rayonnement solaire [19]

I.3.1 Masse d'air

La masse d'air se réfère au rapport entre l'épaisseur de l'atmosphère traversée par le rayonnement solaire direct pour atteindre la surface et l'épaisseur traversée verticalement au lieu. Ce terme est utilisé dans les études météorologiques et climatiques pour estimer la densité de l'atmosphère traversée par le rayonnement solaire.

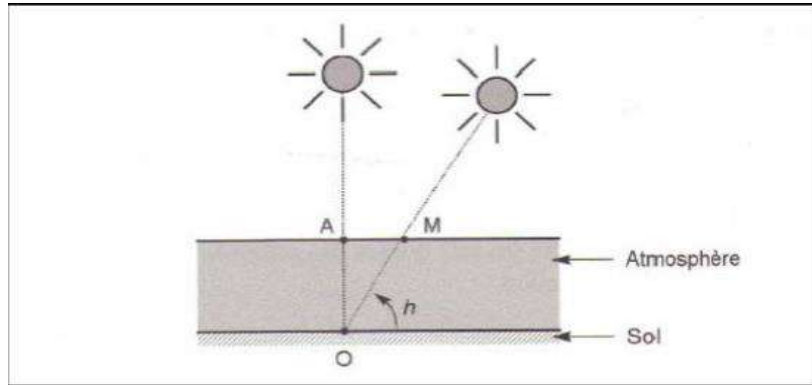


Figure II.4 : Définition de l'Air mass [8]

A l'aide des points O, A et M et cet angle h représentés à la Figure II.4, on écrit la longueur du trajet du soleil à travers l'atmosphère :

$$OM = \frac{OA}{\sin h} \quad (\text{II. 8})$$

$$\text{Donc l'air mass } \frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} \quad (\text{II. 9})$$

Dans l'expression AMx , x désigne ce rapport $\frac{OM}{OA}$.

Exemples :

- Soleil au zénith : AM1;
- Soleil à 30°: AM2;
- Soleil à 41.8°: AM1.5.

Et par convention, AM0 désigne le rayonnement solaire hors atmosphere [8].

I.3.2 L'effet cosinus

Le flux incident sur un plan dépend de l'intensité du rayonnement incident et de l'angle entre le rayonnement et le plan (effet cosinus).

Effet cosinus I : Rayonnement perpendiculaire à une surface horizontale

L'angle d'élévation du soleil affecte l'éclairement solaire reçu sur la surface terrestre.

Les rayons solaires qui arrivent perpendiculairement à la surface de la terre bénéficient du maximum d'éclairement, tandis que les angles inclinés réduisent l'intensité lumineuse. Cette

différence est due à la projection de l'énergie solaire sur la surface, ce qui affecte directement la quantité de rayonnement reçue. Des études se penchent sur l'impact de cet effet sur la production d'énergie solaire et les performances des systèmes de suivi solaire, mettant en lumière l'importance d'améliorer l'angle d'incidence pour atteindre un maximum d'efficacité.

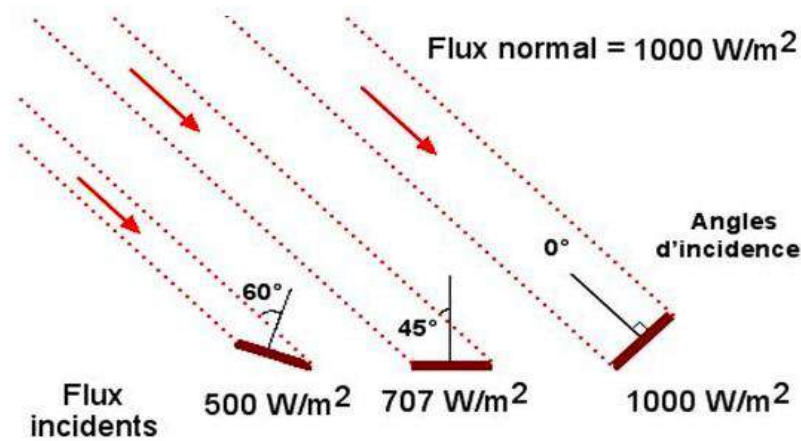


Figure II.5 : l'effet cosinus

I.4 Instruments de mesure

Il existe plusieurs types d'appareils permettant la mesure de l'irradiation solaire dont les plus importants sont :

I.4.1 Le pyranomètre

C'est un type d'instrument de mesure utilisé en météorologie pour mesurer la quantité totale de rayonnement solaire direct ou indirect (rayonnement atmosphérique) atteignant la surface de la terre. C'est donc un instrument de mesure idéal qui ne nécessite pas beaucoup d'énergie électrique pour fonctionner [20].



Figure II.6 : Le document représente une image du pyranomètre [21]

I.4.2 Le Solarimètre

Un solaromètre évalue l'énergie générée par le rayonnement solaire en mesurant l'absorption de chaleur par un corps noir. Ce dispositif repose sur le principe de conception développé pour la première fois par le prêtre italien, le père Angelo Bellani. Il est à l'origine de la méthode actinométrique permettant de mesurer l'intensité des rayonnements solaires, qui s'appuie sur des techniques à la fois physiques et chimiques [20].



Figure II.7 : Solarimètre [20]

Conclusion

On peut dire que la recherche et le développement dans le domaine de l'énergie solaire jouent un rôle vital dans la réalisation des objectifs de durabilité environnementale et économique. Nous avons vu dans ce chapitre des informations importantes sur le soleil au niveau atomique et radiatif, ainsi que sur la manière d'exploiter son énergie au maximum en utilisant des appareils de mesure agréés dans ce domaine et grâce aux panneaux solaires et aux dispositifs d'électrolyse de l'eau utilisés dans notre recherche. Cela peut permettre d'accomplir une véritable transition vers un système énergétique propre et durable, bénéfique tant pour l'environnement que pour l'économie. C'est ce que nous verrons dans le prochain chapitre.

CHAPITRE III :

Modélisation

Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons abordé des concepts généraux concernant les électrolyseurs, les panneaux photovoltaïques ainsi que le gisement solaire. Il est maintenant temps de décrire les éléments permettant la simulation du système de production d'hydrogène.

Ce chapitre est dédié à la présentation des équations permettant la modélisation des panneaux photovoltaïques et des électrolyseurs ainsi que le programme matlab utiliser pour la simulation du couplage du panneau photovoltaïque et de l'électrolyseur.

I. Modélisation d'un module Panneau photovoltaïque

Un panneau photovoltaïque est un assemblage de plusieurs cellules photovoltaïques regroupées ensemble pour former une unité fonctionnelle plus grande. La modélisation d'un panneau photovoltaïque revient à modéliser l'élément fondamental qui est la cellule solaire.

Une cellule photovoltaïque est considérée comme une source de production de courant électrique grâce à ses composants spécifiques (Figure III.1), qui se composent d'une diode et d'une résistance spécifique pour le courant électrique I dans la cellule, R_{sh} , connectée en parallèle, ainsi que d'une résistance R_{se} spécifique pour la tension électrique V , la résistance en série R_{se} correspond aux diverses résistances de contact et de connexion réalisées sur une cellule et la diode en parallèle modélise la jonction PN. Les deux résistances représentent les différentes pertes au niveau d'une cellule [22].

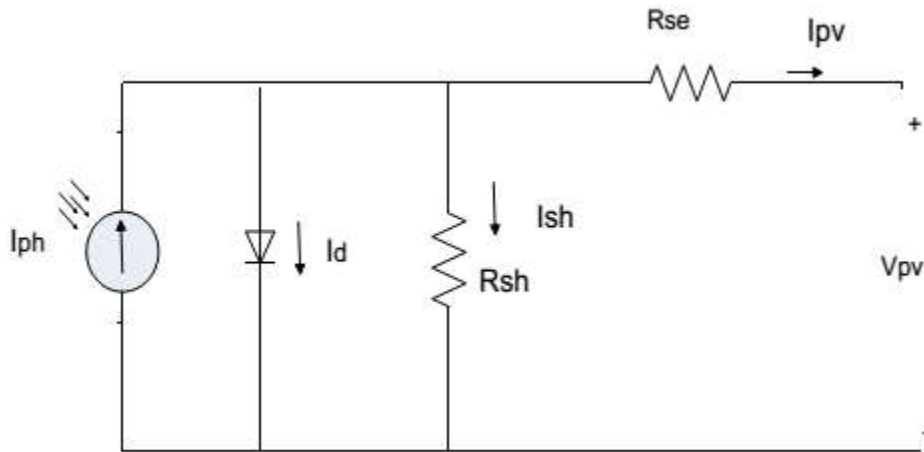


Figure III.1 : Modèle a une diode d'une cellule PV [22].

Le modèle dit à une diode a l'avantage d'être simple. Il permet d'obtenir le comportement statique d'une cellule PV sous polarisation. A partir du circuit équivalent, le courant généré par la cellule photovoltaïque est :

$$I_{PV} = I_{cc} - I_d - I_{Rsh} \quad (III. 1)$$

Avec I_{cc} est le courant de court-circuit, il est proportionnel à l'éclairement.

I_d est le courant circulant dans la diode idéale D polarisée par la tension V_d . Il peut être exprimé

par :
$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{qV_d}{\eta KT}\right) - 1 \right] \quad (\text{III. 2})$$

où

q : La charge de l'électron ($1,602 \times 10^{-19}$ C);

η : Le facteur d'idéalité de la jonction. Il est compris entre 1 et 2, selon le type du silicium;

T : La température effective de la jonction (en Kelvin);

K : La constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} J/K).

L'équation du courant généré par la cellule photovoltaïque devient :

$$I_{PV} = I_{cc} - I_s \left[\exp\left(\frac{V_{PV} + (R_{se} * I_{PV})}{\eta V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + (R_{se} * I_{PV})}{R_{sh}} \quad (\text{III. 3})$$

Avec $V_T = \frac{KT}{q}$ le potentiel thermodynamique;

I_{cc} est le courant de court-circuit, il est proportionnel à l'éclairement.

$$I_{cc/E} = I_{cc/Eréf} \left(\frac{E}{E_{réf}} \right) \quad (\text{III. 4})$$

Où $E_{réf}$ est l'éclairement nominal de 1000 W/m^2 .

$$I_{s/T} = I_{cc/Tréf} \left(\frac{T}{T_{réf}} \right)^{\frac{3}{n}} \cdot \exp\left(\frac{-q E_g}{nk} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{réf}} \right)\right) \quad (\text{III. 5})$$

Pour une valeur de température T donnée, il s'exprime par :

$$I_{cc/T} = I_{cc/Tréf} [1 + \alpha(T - T_{réf})] \quad (\text{III. 6})$$

Avec : $I_{cc/Tréf}$ à la température de reference ($T_{réf}=298\text{K}=25^\circ\text{C}$) est une donnée du constructeur, mesurée sous un éclairement $E=1000 \text{ W/m}^2$. Le coefficient α est un pourcentage de I_{cc} , il donne la variation du courant I_{cc} pour une variation de un degré de température (donnée du constructeur).

R_{se} Représente les diverses résistances des contacts métalliques et de connexion. Elle est très faible. Lorsqu'elle est anormalement élevée, elle peut diminuer notablement la valeur du courant de court-circuit. Pour qu'une cellule ait 1% de perte due à la résistance série, R_{se} doit

$$R_{se} < \left(\frac{0.01 \cdot V_{oc}}{I_{cc}} \right) \quad (\text{III. 7})$$

Ce qui donne pour une large cellule de $I_{cc}=5\text{A}$ et $V_{oc}=0.6\text{V}$, R_s ne doit pas dépasser 0.0012Ω .

R_{sh} Caractérise les divers courants de fuite dus à la diode et aux effets de bords de la jonction.

Elle est très importante (de l'ordre du mégohm). Une résistance shunt faible aura un impact la tension du circuit ouvert ; en outre, une cellule dont R_{sh} est trop faible ne donnera plus de tension sous faible éclairement.

Pour qu'une cellule ait 1% de perte due à la résistance parallèle ; R_{sh} doit être supérieure

$$R_{sh} > \left(\frac{100 \cdot V_{oc}}{I_{cc}} \right) \quad (III. 8)$$

Ce qui donne pour une large cellule de $I_{cc} = 5A$ et $V_{oc} = 0.6V$, R_{sh} doit être supérieure à 12Ω .

La variation de la température se traduit au total par une variation relative de la puissance disponible. Il existe des formules empiriques qui expriment la température de la cellule photovoltaïque en fonction de la température ambiante et l'ensoleillement telles que :

$$T_{cell} = T_a + \left(\frac{NOCT - 20^\circ}{0.8} \right) \cdot E \quad (III. 9)$$

Avec : Température NOCT d'utilisation de la cellule « Nominal Operating Cell Temperature » elle est donnée par le constructeur.

L'ensemble des équations (III. 2 à III. 7) a été introduit dans un programme Matlab pour calculer le courant généré par un module photovoltaïque, en considérant la résistance parallèle R_{sh} assez grande.

II. La modélisation de l'électrolyseur alcalin

Certains nombre des modélisations couramment utilisées font référence au modèle d'ULLEBERG [23], c'est pourquoi nous l'avons choisi pour notre travail. Dans ce modèle, un électrolyseur est conceptualisé comme un ensemble de cellules d'électrolyse. Le modèle proposé par Ulleberg [23] permet de décrire le comportement électrique, thermodynamique et thermique d'une cellule de manière détaillée.

II.1. Modèle thermodynamique

La thermodynamique a l'avantage de révéler les descriptions de l'équilibre des réactions et les effets thermiques du réacteur électrochimique. Elle permet également de jeter les bases pour la définition des forces provoquant des phénomènes de transport dans l'électrolyte et conduit à décrire les propriétés de l'électrolyte. Ci-dessous se trouve une brève description de la thermodynamique des réactions électrochimiques hydrogène-oxygène à basse température utilisées dans le modèle d'électrolyseur.

Les hypothèses suivantes peuvent être faites concernant la réaction d'électrolyse de l'eau :

- L'hydrogène, l'air et l'oxygène sont considérés comme des gaz idéaux;
- L'eau est un fluide incompressible;
- Les phases liquides et gaz sont séparées.

Basé sur ces hypothèses, le changement d'enthalpie, d'entropie et d'énergie de la réaction de décomposition de l'eau peuvent être calculé en référence à l'hydrogène, à l'oxygène et à l'eau pure à température et pression standard (25 °C et 1 bar). Le changement d'enthalpie total pour

la division de l'eau est la différence d'enthalpie entre les produits (hydrogène et oxygène) et les réactifs (l'eau). Il en va de même pour le changement d'entropie total.

Le changement d'énergie libre s'exprime par :

$$\Delta G_d = \Delta H_d - T \cdot \Delta S_d \quad (\text{III. 10})$$

- Le voltage réversible

La loi de Faraday relie l'énergie électrique (force électromotrice) nécessaire pour diviser l'eau au taux de conversion chimique en quantités molaires. La force électromotrice pour un processus électrochimique réversible. L'expression de la tension réversible est donnée comme suit :

$$U_{rev} = \frac{\Delta G_d}{n \cdot F} \quad (\text{III. 11})$$

- La tension thermoneutre

L'expression de la tension thermoneutre est donnée comme suit :

$$U_{tn} = \frac{\Delta H_d}{n \cdot F} \quad (\text{III. 12})$$

II.2. Modèle électrochimique

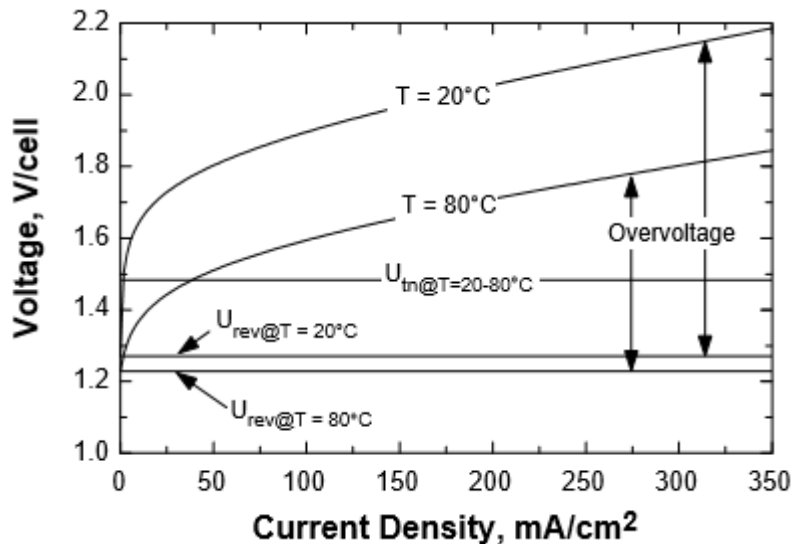


Figure III.2 : Courbes I-U typiques pour une cellule électrolytique à haute et basse températures [23].

La figure (III.2) montre la tension de la cellule en fonction de la densité de courant à des températures de fonctionnement élevée et basse pour un électrolyseur d'eau alcaline typique. On remarque, que la différence entre les deux courbes I-U est principalement due à la dépendance des surtensions à la température.

$$U_{cell} = U_{rev} + \frac{r_1 + r_2 \cdot T}{A_{cell}} \cdot I_{ely} + s \cdot \log \left(\frac{t_1 + t_2/T + t_3/T^2}{A_{cell}} \cdot I_{ely} + 1 \right) \quad (\text{III. 13})$$

Le rapport entre la quantité réelle et la quantité théorique d'hydrogène produite par l'électrolyseur s'appelle le rendement Faraday et résulte de la perte de courant parasite le long des canaux gazeux. L'augmentation de la proportion d'électrolyte provoque une diminution de la densité de courant, ce qui entraîne une augmentation des courants parasites et une diminution de la résistance, augmentant ainsi les pertes de courants parasites et un faible rendement de Faraday.

Ce phénomène est traduit par l'expression empirique suivante pour une température donnée :

$$\eta_F = \frac{(I/A)^2}{f_1 + (I/A)^2} \cdot f_2 \quad (\text{III. 14})$$

la production d'hydrogène dans une cellule d'un électrolyseur est proportionnelle au débit de transfert d'électron aux électrodes, qui à son tour est équivalent au courant dans le circuit externe. Le débit de production d'hydrogène dans un électrolyseur, qui consiste en plusieurs cellules connectées en série, peut être exprimé comme suit :

$$n_{H_2} = n_f \cdot N_{cell} \cdot \frac{I_{ely}}{n \cdot F} \quad (\text{III. 11})$$

Et la quantité d'oxygène produite est simplement déduite par la stœchiométrie qui s'exprime simplement en fonction de la quantité d'hydrogène comme suit :

$$n_{O_2} = \frac{1}{2} n_{H_2} \quad (\text{III. 15})$$

n_{O_2} : le Flux molaire d'oxygène.

III. Couplage et programmation

Dans les sections précédentes de ce chapitre, nous avons introduit le modèle mathématique pour décrire le comportement d'un panneau photovoltaïque, ainsi que celui décrivant le comportement électrochimique d'un électrolyseur. Afin de modéliser et simuler le fonctionnement d'un système de production d'hydrogène composé d'un panneau photovoltaïque et d'un électrolyseur, il est essentiel de comprendre le comportement de ces deux dispositifs pour déterminer leur point de fonctionnement. En effet, dans notre système, le panneau photovoltaïque et l'électrolyseur sont directement connectés (voir Figure III.3), et ils s'influencent mutuellement de telle sorte que le courant produit par le panneau photovoltaïque équivaut à celui consommé par l'électrolyseur, de même pour la tension produite.

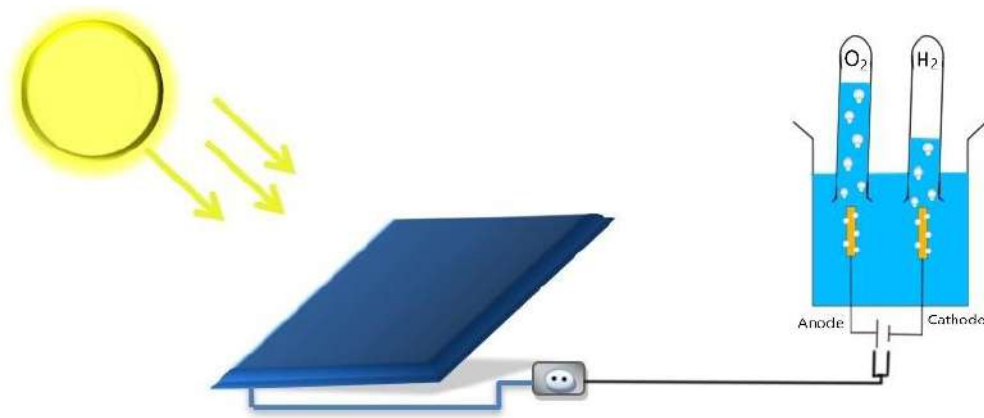


Figure III.3 : schémas du système de production d'hydrogène

Le programme a été développé en utilisant le logiciel Matlab (voir annexe), conformément à l'organigramme présenté à la figure (III.4).

La première étape du programme consiste à lire les caractéristiques du panneau photovoltaïque et de l'électrolyseur, telles que la puissance, la surface des électrodes et les constantes relatives aux modèles utilisés.

La deuxième étape implique la lecture du fichier de données, qui est un fichier au format Excel. À partir de ce fichier, le programme extrait les valeurs de l'irradiation solaire et de la température heure par heure.

Une fois toutes les données nécessaires disponibles, la troisième étape consiste à déterminer le point de fonctionnement du système pour chaque heure, en fonction de la valeur de l'irradiation solaire et de la température. Cette étape comprend premièrement la détermination de la courbe caractéristique tension-courant du panneau photovoltaïque pour chaque valeur de l'irradiation solaire et de la température. Deuxièmement, pour chaque valeur de courant de la courbe caractéristique, le programme calcule la tension d'électrolyse, ce qui permet de déterminer la courbe caractéristique de l'électrolyseur. Enfin, le point de fonctionnement est calculé en déterminant les intersections des deux courbes caractéristiques.

La quatrième étape consiste à utiliser les points de fonctionnement obtenus pour chaque heure afin de calculer la puissance électrique produite par le panneau photovoltaïque, ce qui permet ensuite de calculer le débit instantané de production d'hydrogène pour chaque heure.

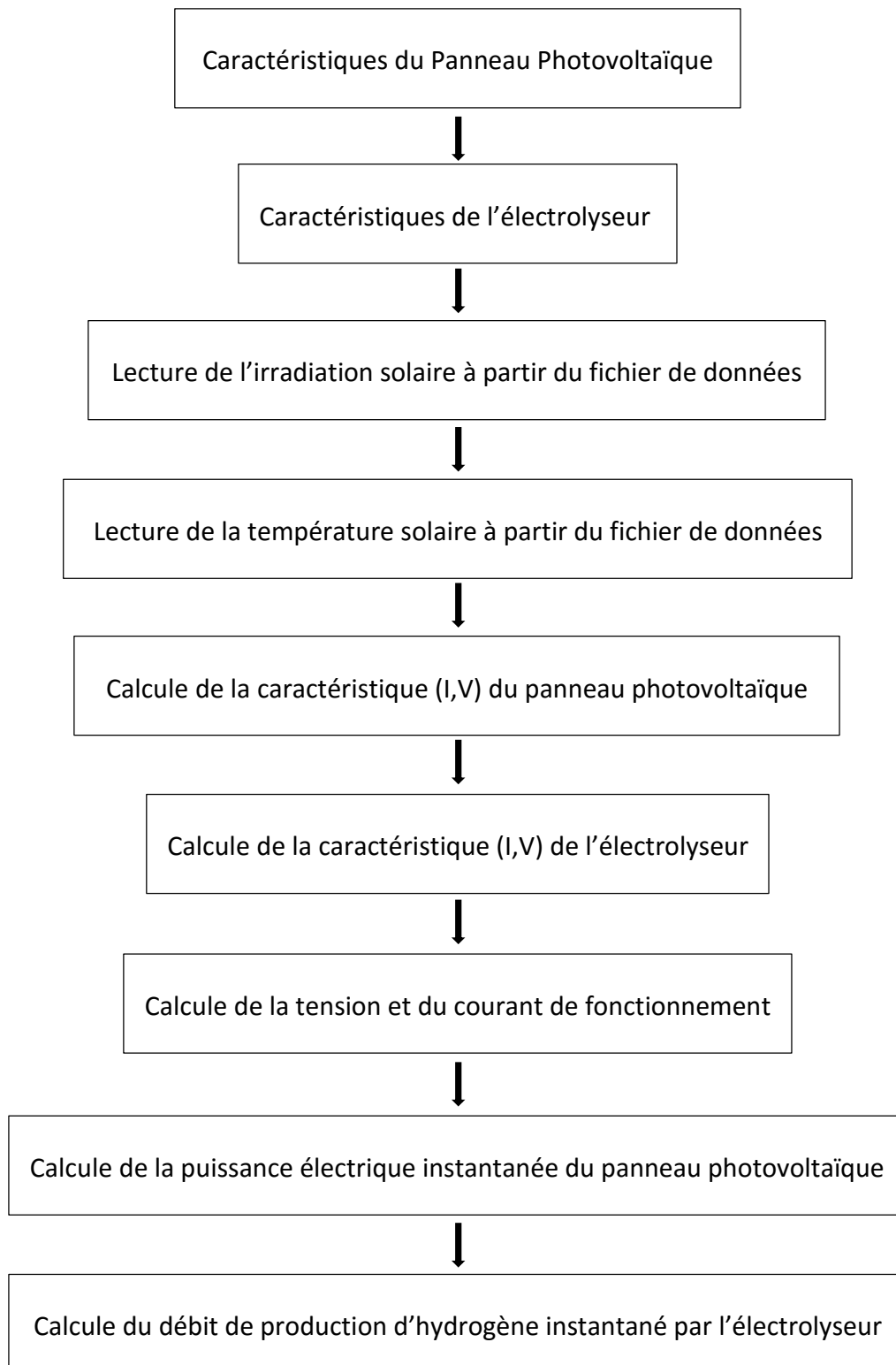


Figure III.4 : Organigramme du programme utilisé

Conclusion

En conclusion, ce chapitre a présenté les différentes étapes de modélisation d'un système de production d'hydrogène à partir de panneaux photovoltaïques et d'électrolyseurs. Nous avons commencé par décrire les modèles mathématiques utilisés pour décrire le comportement des panneaux photovoltaïques et des électrolyseurs. Ensuite, nous avons expliqué comment ces modèles ont été utilisés pour déterminer le point de fonctionnement du système en fonction de l'irradiation solaire et de la température.

Dans le prochain chapitre, nous présenterons les résultats obtenus grâce à la simulation réalisée à l'aide du l'organigramme décrit ici.

CHAPITRE IV :
Résultats et discussion

Introduction

Dans le dernier chapitre, nous avons exposé les modèles utilisés pour concevoir le programme de simulation du système de production d'hydrogène. Le présent chapitre se concentrera sur la présentation des résultats de simulation pour trois wilayas différentes: Naâma, El Oued et Ouargla.

I. Caractéristiques du système

Afin de pouvoir lancer les simulations de notre système de production d'hydrogène il faut disposer des caractéristiques du panneau photovoltaïque et celles de l'électrolyseur. De plus il faut identifier les constantes utilisées dans le programme de simulation.

Le tableau (IV.1) ci-dessous présente les caractéristiques du panneau photovoltaïque sélectionné pour la simulation. Il s'agit d'un panneau photovoltaïque de la marque Photowatt, référencé PWX500.

I_{cc} courant de court-circuit	3.45 A
V_{oc} tension à circuit ouvert	21.7 V
I_{opt} courant au point MPP	3.2 A
V_{opt} tension au point MPP	17.3 V
P_{opt} Puissance maximale	55 W
n_s Nombre de cellules en série	36
Coefficient de température de I_{cc}	0.95 % /°C
Coefficient de température de V_{oc}	79 mV/°C
NOCT	75±2°C
Dimensions (mm)	1042 X 490 X 45

Tableau IV.1 : Caractéristiques du panneau photovoltaïque [22]

L'électrolyseur choisi pour notre simulation est un électrolyseur alcalin avec une surface d'électrode de 0,05 m². Les constantes du modèle utilisé pour la simulation de cet électrolyseur sont calculées par Ulleberg [23] et proviennent du projet PHOEBUS HYSOLAR. Le tableau (IV.2) ci-dessous présente les valeurs des constantes utilisées.

r_1	$8.05e - 5 \text{ M } \Omega \text{ m}^2$
r_2	$-2.5e - 7 \text{ } \Omega \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
s	0.185 V
t_1	$-1.002 \text{ A}^{-1} \text{ m}^2$
t_2	$8.424 \text{ A}^{-1} \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
t_3	$247.3 \text{ A}^{-1} \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
f_1	150
f_2	0.990

Tableau IV.2 : Caractéristiques de l'électrolyseur [23]

II. Données de l'irradiation solaire et température

Nous avons décidé de simuler le fonctionnement de notre système pour trois wilayas différentes. Pour mener à bien ces simulations, nous devons disposer de données relatives à l'irradiation solaire et à la température ambiante. Pour ce faire, nous avons utilisé le logiciel Meteonorm.

Le logiciel Meteonorm est une source très complète de données météorologiques. Il propose également des algorithmes permettant de générer des fichiers météorologiques à partir de valeurs mesurées, pour n'importe quel endroit sur la planète. Il est largement utilisé, notamment en conjonction avec le logiciel TRNSYS.

Les données fournies par Le logiciel Meteonorm pour les wilayas sélectionnées sont le résultat d'un calcul basé sur la moyenne des valeurs mesurées sur une longue période. Pour la température, la période de mesure s'étend de 1996 à 2005, tandis que pour l'irradiation solaire, elle va de 1981 à 2000.

Ces données fournissent la température et l'irradiation solaire pour chaque heure, sur une période d'une année. La première valeur correspond à l'heure une et la dernière valeur à l'heure 8760. Les valeurs de l'irradiation sont celles de l'irradiation globale reçue sur une surface inclinée à la latitude du lieu et orientée plein sud.

III. Simulation du système de production

Afin d'évaluer les performances du système de production d'hydrogène pour les trois wilayas, nous avons choisi de comparer les résultats obtenus pour les trois sites pour quatre jours différents :

- Le 21 décembre : le jour le plus court de l'année, correspondant au solstice d'hiver.
- Le 21 mars : le premier jour du printemps, marquant l'équinoxe du printemps.

- Le 21 juin : le jour le plus long de l'année, correspondant au solstice d'été.
- Le 21 septembre : le premier jour de l'automne.

III.1. Simulation pour le 21 Décembre

Le 21 décembre représente le jour le plus court de l'année c'est aussi appelé le solstice d'hiver mais c'est aussi le premier jour de l'hiver. La figure (IV.1) donne l'évolution de la température durant cette journée pour les trois sites.

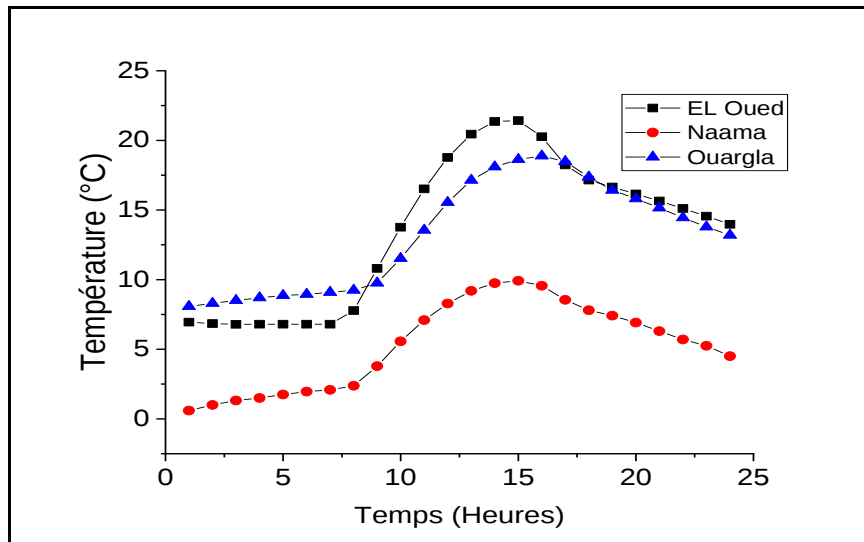


Figure IV.1 : évolution de la température ambiante durant la journée du 21 décembre

On remarque de la figure (IV.1) que pour les trois sites les températures sont relativement proches sauf pour le site de la wilaya de Naâma qui fait apparaitre une différence d'environ 5 degrés par rapport aux autres sites. Il est à noter que la température ne dépasse pas les 25 °C pour les trois sites ce qui permet un bon fonctionnement du panneau solaire.

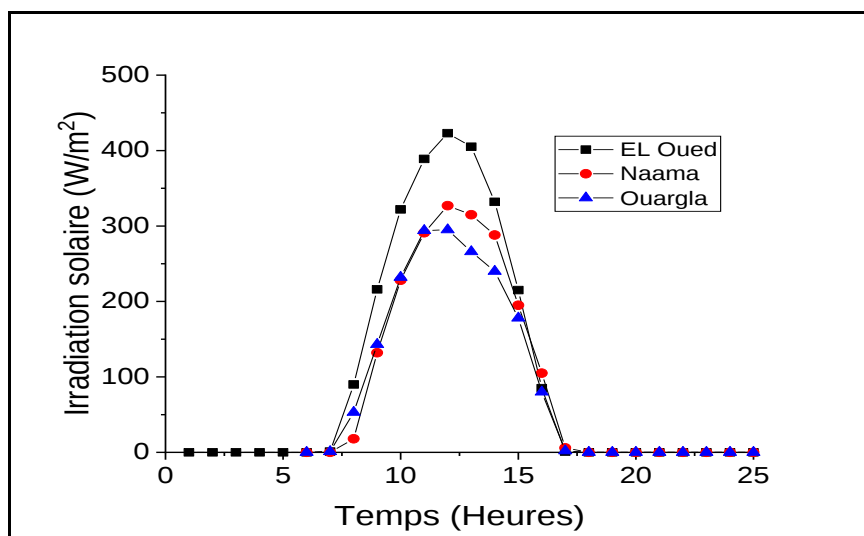


Figure IV.2 : évolution de l'irradiation solaire durant la journée du 21 décembre

La figure (IV.2) montre les variations de l'intensité de l'irradiation solaire en fonction du temps au cours de la journée du 21 décembre. On observe que les variations de l'irradiation solaire sont similaires pour les trois sites au lever du soleil. L'irradiation solaire atteint son maximum vers midi. Il est également notable que l'intensité du rayonnement solaire est légèrement plus élevée pour la wilaya d'El Oued.

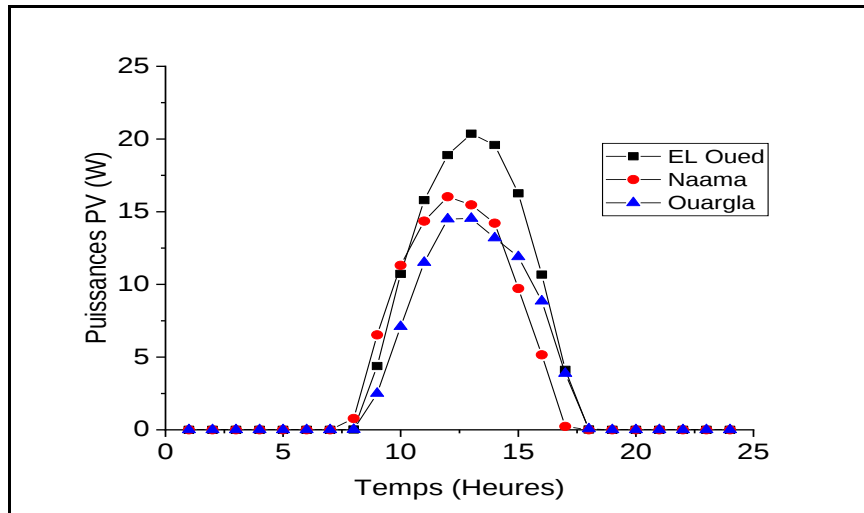


Figure IV.3 : La puissance produite par le panneau photovoltaïque durant la journée du 21 décembre.

L'évolution de la puissance électrique produite par le panneau photovoltaïque durant la journée du 21 décembre est donnée par la figure (IV.3). On peut y remarquer un comportement similaire pour les trois wilayas et c'est aussi similaire à la figure (IV.2).

Durant la journée du 21 décembre la production totale d'énergie électrique pour les trois sites est de :

- 435.165 kJ pour la wilaya de d'El Oued;
- 337.679 kJ pour la wilaya de Naâma;
- 316.959 kJ pour la wilaya de Ouargla.

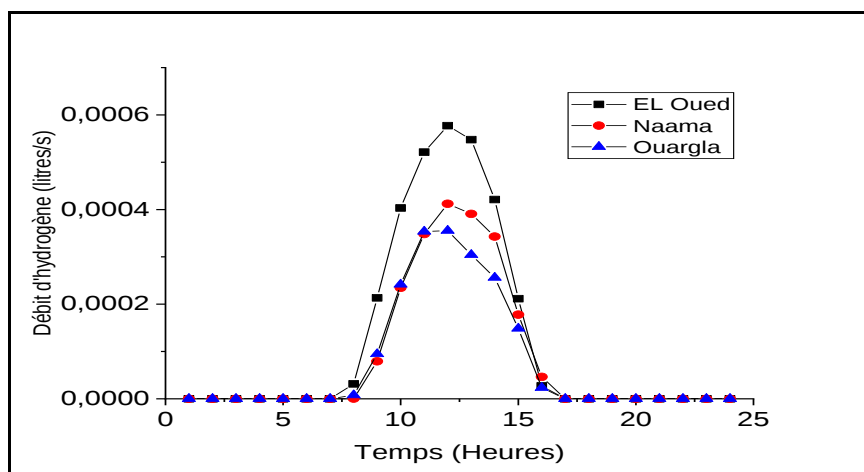


Figure IV.4 : Débit d'hydrogène durant la journée du 21 décembre.

La figure (IV.4) représente l'évolution du débit d'hydrogène durant la journée du 21 décembre. La figure montre un comportement similaire à la figure (IV.3) tel que la production d'hydrogène est liée à la quantité d'énergie produite par le panneau.

La quantité d'hydrogène produite pour la journée du 21 décembre pour les trois sites est de :

- 10,6 litres pour la wilaya d'El Oued;
- 7,3 litres pour la wilaya de Naâma;
- 6,4 litres pour la wilaya de Ouargla.

III.2. Simulation pour le 21 Mars

Le 21 mars représente le premier jour du printemps, marquant l'équinoxe du printemps. Une journée d'une durée moyenne.

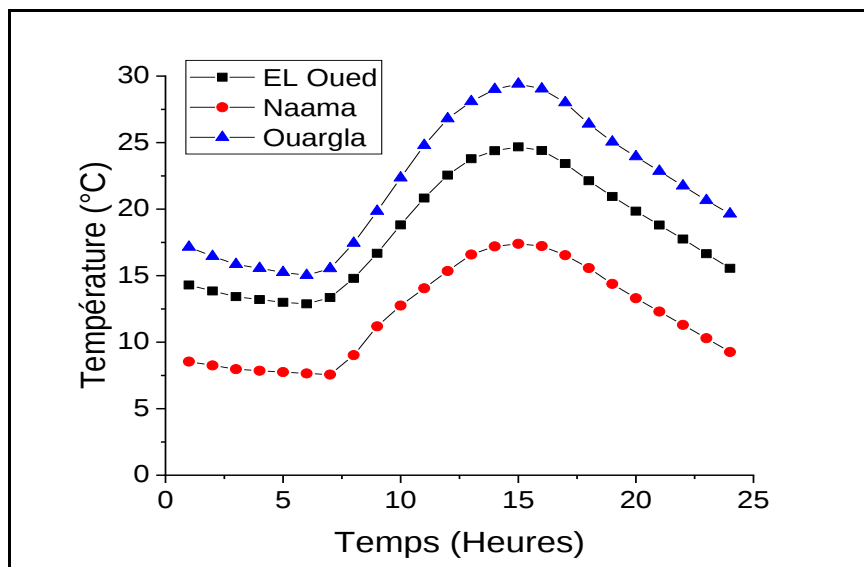


Figure IV.5 : évolution de la température ambiante durant la journée du 21 mars.

La figure (IV.5) donne l'évolution de la température durant cette journée pour les trois sites. On remarque que pour les trois sites les courbes de température ont la même allure avec une différence sensible dans les valeurs de température. Le site de Ouargla est le plus chaud puis le site d'El Oued et enfin le site de Naâma. Par ailleurs la température reste inférieure à 30°C permettant un fonctionnement optimal du panneau notamment pour les sites de Ouargla et El Oued où la température évolue autour de 25 °C.

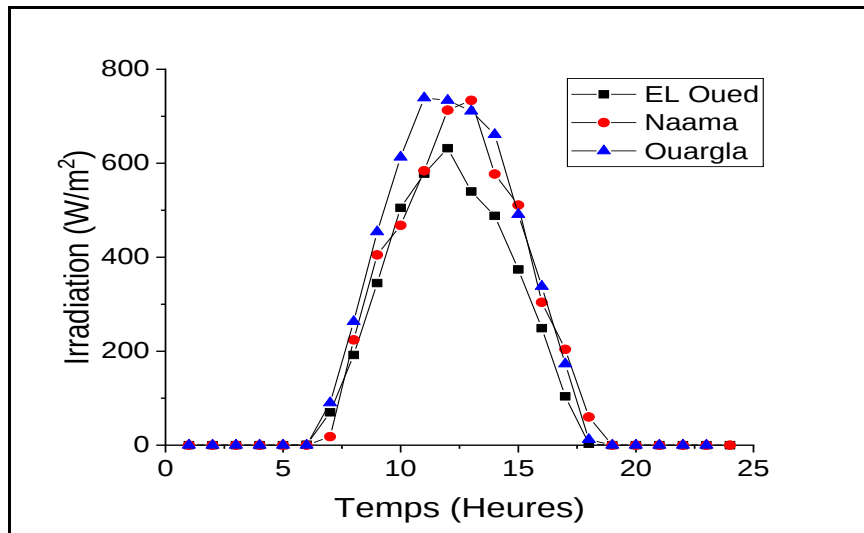


Figure IV.6 : évolution de l'irradiation solaire durant la journée du 21 mars.

On remarque sur la figure (IV.6) que l'évolution de l'irradiation solaire pour les trois sites est quasi similaire, à l'exception du site d'El Oued. En effet, l'intensité de l'irradiation solaire est légèrement inférieure à celle des deux autres sites autour de midi.

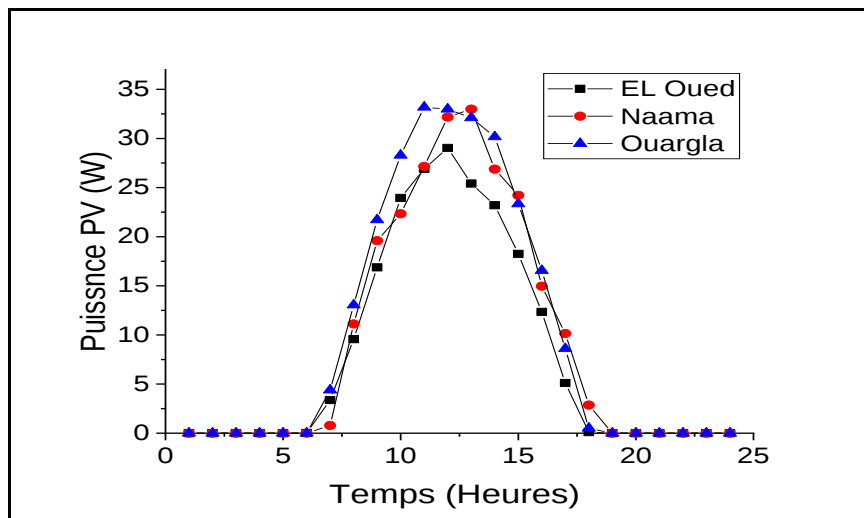


Figure IV.7 : La puissance produite par le panneau photovoltaïque durant la journée du 21 mars.

La figure (IV.7) montre l'évolution de la puissance électrique produite par le panneau photovoltaïque durant la journée du 21 mars. On remarque que les courbes ont la même allure que dans la figure (IV.6) (évolution de l'irradiation solaire).

Durant la journée du 21 mars la production totale d'énergie électrique pour les trois sites est de :

- 698.90 kJ pour la wilaya de d'El Oued;
- 810.56 kJ pour la wilaya de Naâma;
- 881.35 kJ pour la wilaya de Ouargla.

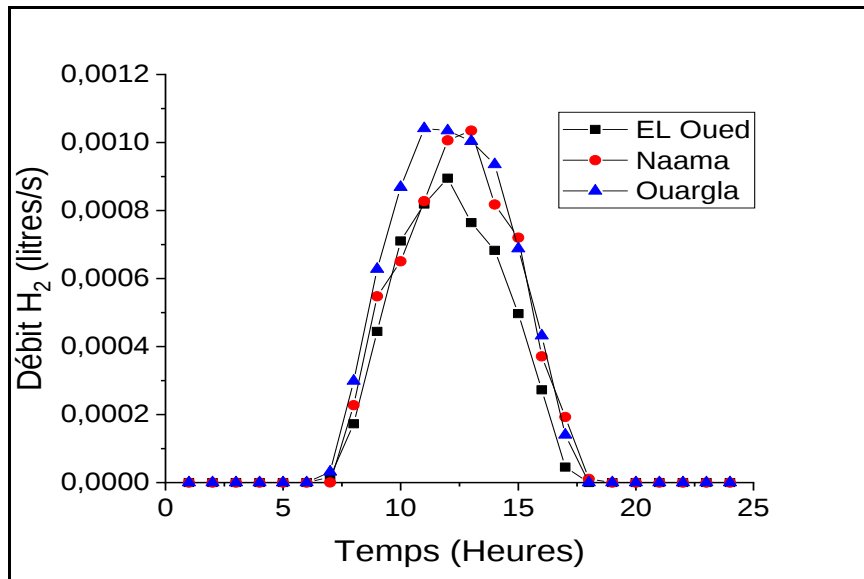


Figure IV.8 : Débit d'hydrogène durant la journée du 21 mars.

La figure (IV.8) représente l'évolution du débit de production d'hydrogène durant la journée du 21 mars. On y remarque une tendance similaire à celle des courbes de puissance électrique dans la figure (IV.7).

La quantité d'hydrogène produite pour la journée du 21 mars pour les trois sites est de :

- 19,15 litres pour la wilaya d'El Oued;
- 23,06 litres pour la wilaya de Naâma;
- 25,53 litres pour la wilaya de Ouargla.

III.3. Simulation pour le 21 Juin

Le 21 juin représente le jour le plus long de l'année, également appelé le solstice d'été, et marque aussi le premier jour de l'été. La figure (IV.9) montre l'évolution des températures au cours de cette journée pour les trois sites.

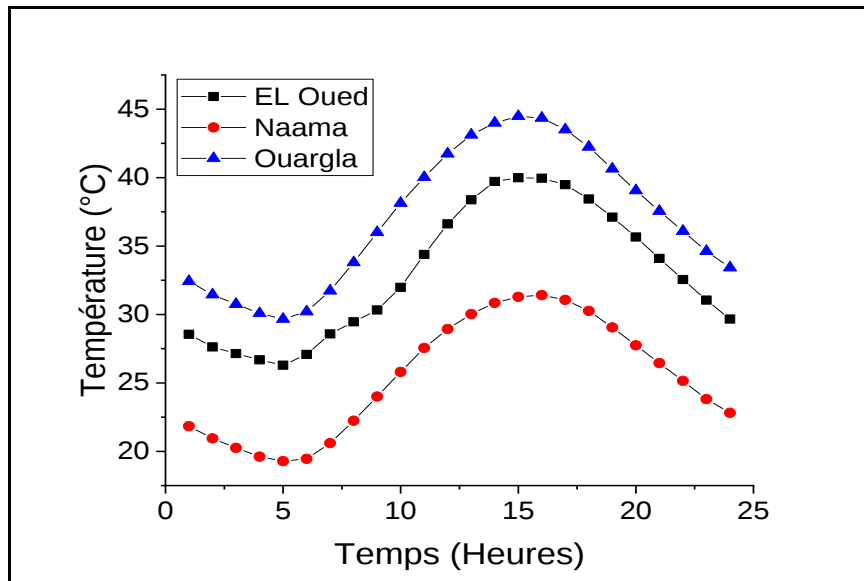


Figure IV.9 : évolution de la température ambiante durant la journée du 21 juin.

On remarque de la figure (IV.9) que les courbes des températures des trois sites ont la même allure. Les courbes sont décalées indiquant des différences de température entre les trois sites. La température au site de Naâma ne dépasse pas 30 °C pour le site de Ouargla celle-ci atteint 45 °C. Cela pourrait avoir des conséquences sur l'efficacité du panneau photovoltaïque.

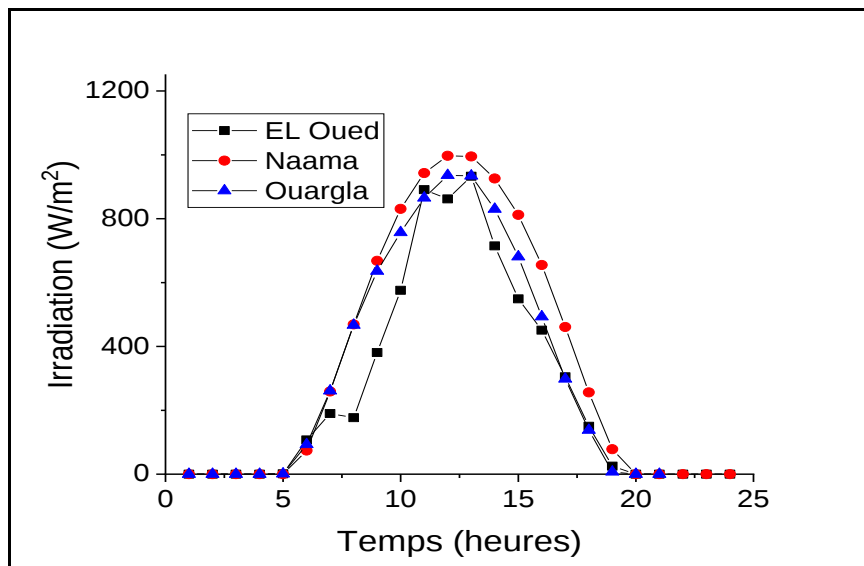


Figure IV.10 : évolution de l'irradiation solaire durant la journée du 21 juin.

Nous remarquons de la figure (IV.10) que l'évolution de l'intensité de l'irradiation solaire est relativement similaire. Cela se répercute sur la production d'électricité par le panneau solaire. En effet, on remarque dans la figure (IV.11) que la production d'électricité n'est pas très différente pour les trois sites.

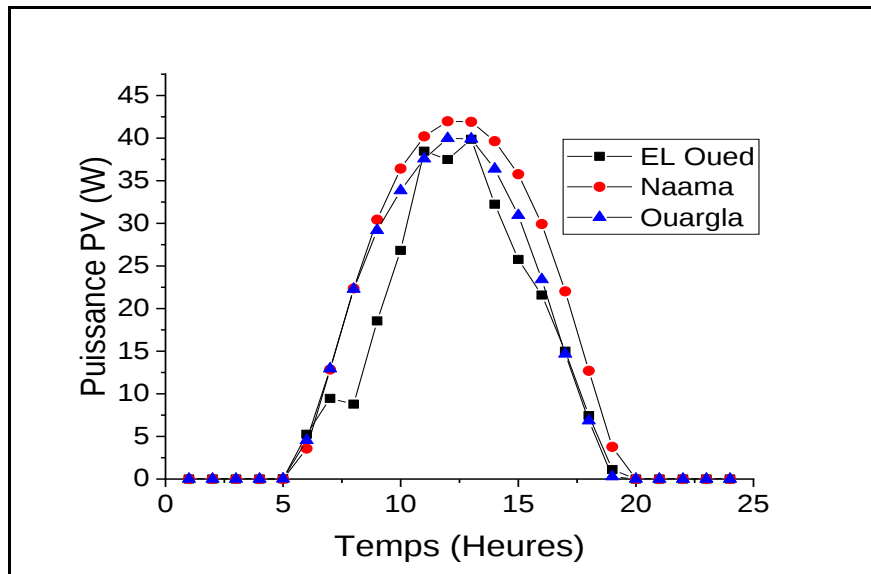


Figure IV.11 : La puissance produite par le panneau photovoltaïque durant la journée du 21 juin.

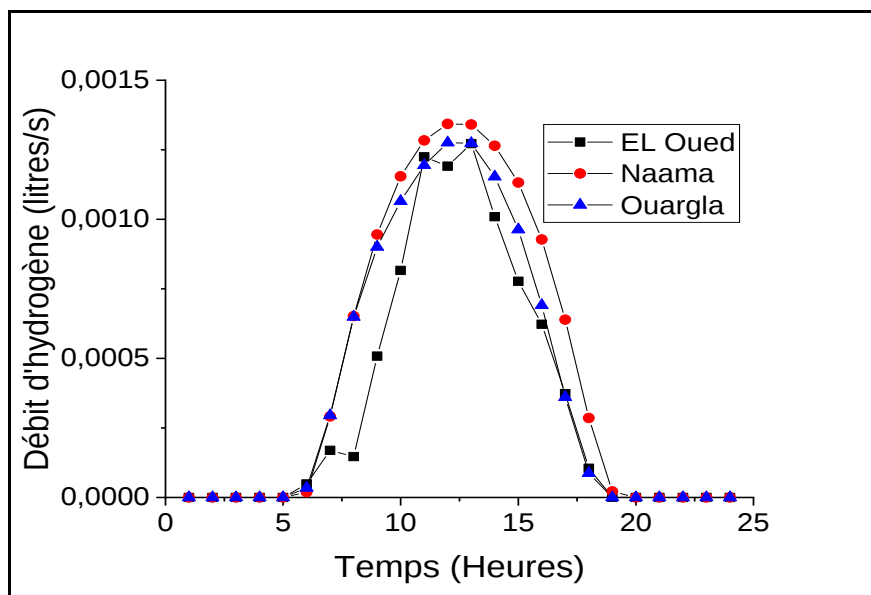


Figure IV.12 : débit de production d'hydrogène durant la journée du 21 juin.

Durant la journée du 21 juin la production totale d'énergie électrique pour les trois sites est de :

- 1036.44 kJ pour la wilaya de d'El Oued;
- 1344.79 kJ pour la wilaya de Naâma;
- 1198.15 kJ pour la wilaya de Ouargla.

La figure (IV.12) donne l'évolution du débit de production d'hydrogène durant la journée du 21 juin. Nous remarquons que les courbes de production d'hydrogène sont similaires aux courbes de puissance électrique produit par le panneau photovoltaïque de la figure (IV.11).

La quantité d'hydrogène produite pour la journée du 21 juin pour les trois sites est de :

- 29,7 litres pour la wilaya d'El Oued;
- 40,6 litres pour la wilaya de Naâma;
- 35,7 litres pour la wilaya de Ouargla.

III.4. Simulation pour le 21 septembre

Le 12 septembre représente le premier jour de l'automne. C'est aussi une journée dont la durée est moyenne.

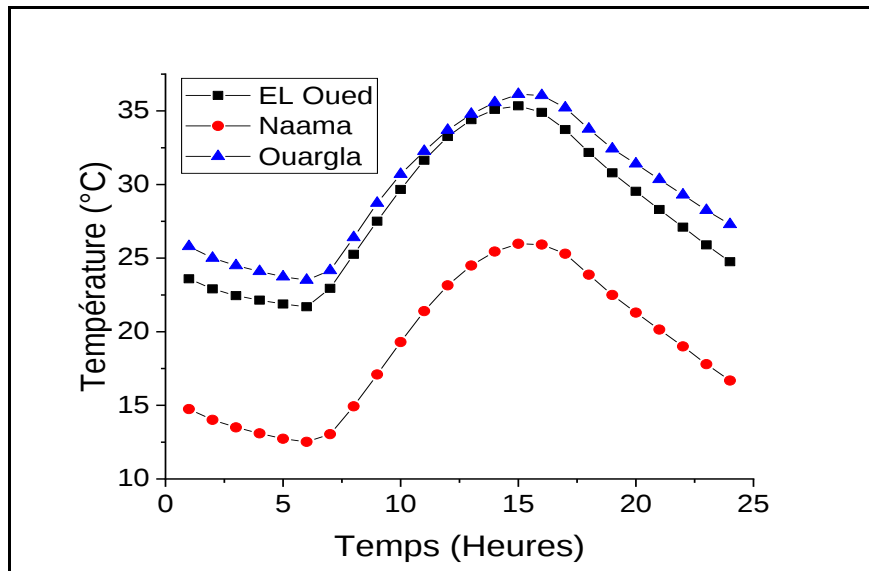


Figure IV.13 : évolution de la température ambiante durant la journée du 21 septembre.

La figure (IV.13) représente la variation de la température durant la journée du 21 septembre. On remarque que les courbes pour les trois sites sont similaires. Elles sont presque identiques pour les sites de Ouargla et El Oued. La température pour le site de Naâma est inférieure d'environ 10 °C.

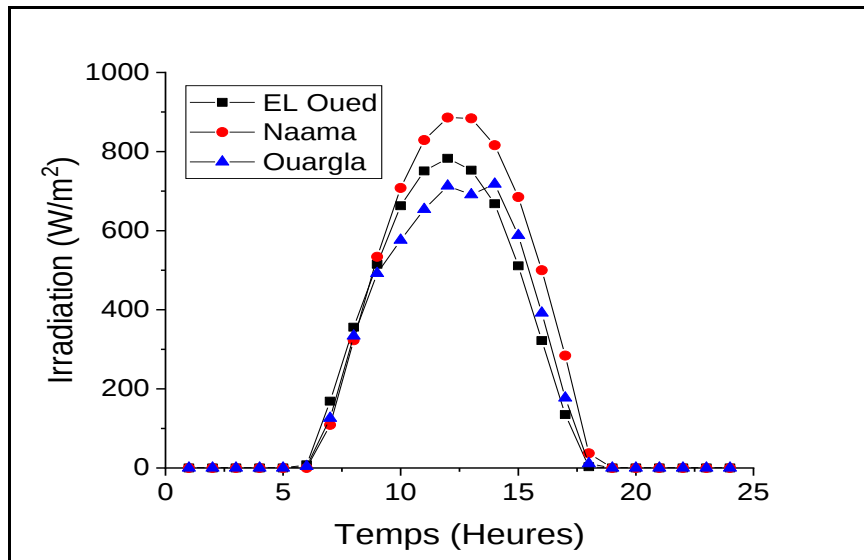


Figure IV.14 : évolution de l'irradiation solaire durant la journée du 21 septembre.

La figure (IV.14) montre l'évolution de l'intensité de l'irradiation solaire au cours de la journée du 21 septembre. On peut observer que les courbes sont relativement proches et présentent une allure similaire, à l'exception d'un pic plus prononcé pour le site de Naama.

Cette tendance est remarquable sur la figure (IV.15) et la figure (IV.16). Ces figures représentent respectivement l'évolution de la production d'électricité par le panneau photovoltaïque et celle du débit d'hydrogène.

Durant la journée du 21 septembre la production totale d'énergie électrique pour les trois sites est de :

- 936.2 kJ pour la wilaya de d'El Oued;
- 1071.6 kJ pour la wilaya de Naâma;
- 915.3 kJ pour la wilaya de Ouargla.

Cela s'accorde avec les remarques de la figure (IV.14) mais aussi par le fait que la température du site de Naâma est inférieure à 25 °C.

La quantité d'hydrogène produite pour la journée du 21 septembre pour les trois sites est de :

- 27,5 litres pour la wilaya d'El Oued;
- 32,2 litres pour la wilaya de Naâma;
- 26,7 litres pour la wilaya de Ouargla.

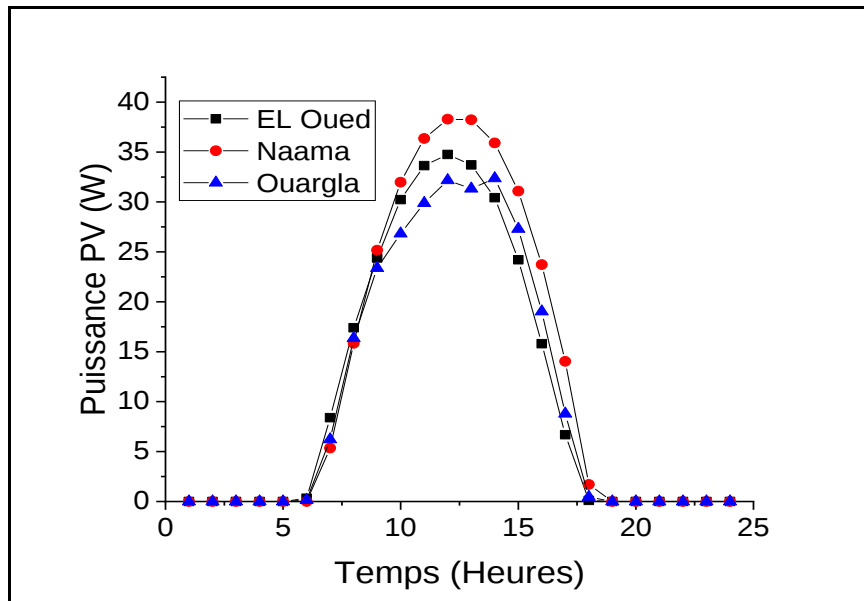


Figure IV.15 : La puissance produite par le panneau photovoltaïque durant la journée du 21 septembre.

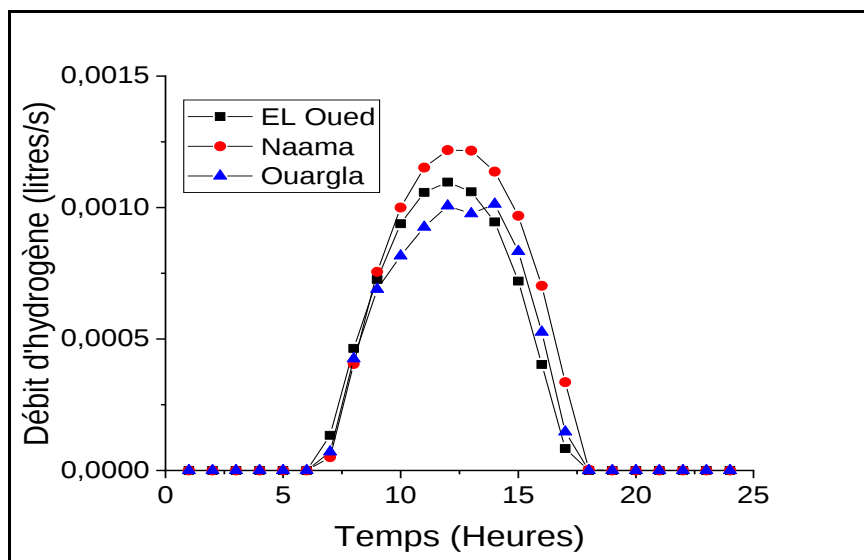


Figure IV.16 : Débit d'hydrogène durant la journée du 21 septembre.

IV. Production annuelle

Une simulation pour les trois sites a été effectuée pour une durée d'une année. Cette simulation fait ressortir les chiffres suivants.

Durant une année la production totale d'énergie électrique pour les trois sites est de :

- 263747,9 kJ pour la wilaya de d'El Oued;
- 346581,5 kJ pour la wilaya de Naâma;
- 291182,6 kJ pour la wilaya de Ouargla.

On remarque que le site de Naama produit le plus d'électricité sur une année. Cela est probablement dû au fait qu'en plus de bénéficier d'un bon ensoleillement, le site présente des températures relativement clémentes comparativement aux deux autres sites. Cette efficacité dans la production électrique se répercute sur la production d'hydrogène. En effet la quantité totale d'hydrogène produite sur une année est donnée comme suit :

- 7300,7 litres pour la wilaya d'El Oued;
- 10187,3 litres pour la wilaya de Naâma;
- 8250,0 litres pour la wilaya de Ouargla.

Conclusion

Trois régions d'Algérie, chacune présentant un type de climat différent, ont été sélectionnées pour simuler le fonctionnement d'un système de production d'hydrogène solaire.

Nous avons réalisé une simulation annuelle pour ces régions et avons analysé en détail les performances du système sur quatre jours spécifiques de l'année, chacun représentant une saison.

Les résultats montrent des variations significatives entre les sites selon les saisons. Par exemple, en hiver, à El Oued, nous avons observé une augmentation de la puissance de production d'électricité, ce qui a conduit à une production d'hydrogène plus élevée par rapport aux autres régions, contrairement aux résultats observés au printemps.

En général, sur une année complète, le site de Naâma produit plus d'hydrogène que les deux autres sites.

Conclusion générale

La transition vers des sources d'énergie renouvelables est devenue une nécessité urgente face aux défis environnementaux posés par la production traditionnelle d'énergie à base de combustibles fossiles. Ce mémoire a exploré la faisabilité et l'efficacité d'un système de production d'hydrogène solaire en Algérie, en exploitant l'abondant rayonnement solaire du pays.

Notre étude a porté sur la simulation d'un système combinant un générateur photovoltaïque et un électrolyseur, évalué sur une année complète dans trois wilayas algériennes : Ouargla, El Oued et Naâma. Ces sites ont été choisis pour leurs conditions climatiques distinctes, permettant une analyse comparative approfondie des performances saisonnières du système.

Les résultats obtenus montrent que les performances du système varient considérablement en fonction des saisons et des localisations géographiques. En hiver, El Oued a démontré une augmentation significative de la production d'électricité, entraînant ainsi une production d'hydrogène plus élevée par rapport aux autres sites. Au printemps, c'est le site de Ouargla qui a obtenu les meilleurs résultats. En été et en automne, c'est le site de Naâma qui a montré des performances supérieures, soulignant l'importance de la variabilité climatique.

Globalement, notre analyse sur une année complète a révélé que Naâma est le site le plus performant en termes de production d'hydrogène, surpassant les autres sites étudiés. Ces résultats mettent en évidence le potentiel de l'Algérie pour devenir un leader dans la production d'hydrogène vert, grâce à ses ressources solaires abondantes.

En conclusion, ce travail démontre la viabilité de l'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'hydrogène en Algérie, en mettant en avant les avantages environnementaux et économiques d'une telle approche. La réussite de cette transition énergétique nécessite des investissements continus dans la recherche et le développement, ainsi que des politiques favorables pour soutenir l'adoption des technologies renouvelables.

L'Algérie, avec ses vastes champs solaires et son potentiel inexploré, est en bonne position pour devenir un acteur majeur dans le domaine de l'hydrogène vert, contribuant ainsi à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la promotion d'un avenir énergétique durable.

En perspective ; différents axes peuvent être explorés pour approfondir et améliorer cette étude :

Étude Plus Précise de la Région des Hauts Plateaux :

Une analyse plus détaillée de la région des Hauts Plateaux pourrait offrir des insights supplémentaires sur le potentiel de production d'hydrogène solaire. En prenant en compte les particularités climatiques, géographiques et socio-économiques de cette région, il serait possible de mieux comprendre les variations saisonnières et les défis spécifiques liés à la production d'énergie solaire.

Affinage du Modèle de Simulation :

Le modèle de simulation utilisé pour cette étude pourrait être affiné pour améliorer sa précision et sa fiabilité. Cela pourrait inclure l'intégration de données météorologiques à haute résolution, l'utilisation de modèles plus sophistiqués pour la prédiction des performances des panneaux photovoltaïques et des électrolyseurs, ainsi que la modélisation de scénarios de variation climatique à long terme.

Références bibliographies

- [1] A. Sharma, N. Gunreddy, A. R. Mulamalla, S. Duraisamy, S. Sivan, G. K. Poongavanam, B. Kumar. Conductive and convective heat transfer augmentation in flat plate solar collector from energy, economic and environmental perspectives—a comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(58), 87019-87067, 2022.
- [2] A. M. Manokar, A. Karthick. Review on progress in concrete solar water collectors. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(18), 22296-22309, 2021.
- [3] M. R. Yaiche, A. Bouhanik. Atlas solaire algérien. Portail des Energies Renouvelables, Centre de Développement des Energies Renouvelables, 16, 2002.
- [4] A. B. Stambouli. Algerian renewable energy assessment: The challenge of sustainability. *Energy Policy*, 39(8), 4507-4519, 2011.
- [5] F. Sylvie. L'oxyde de zinc par dépôt chimique en phase vapeur comme contact électrique transparent et diffuseur de lumière pour les cellules solaires. No. 2899. EPFL, 2003.
- [6] : www.voltiate.com.
- [7] Menad, Toumi, and Messaoudi Hamid. Etude de fonctionnement d'une cellule solaire GRATZEL. Diss. Université Mouloud Mammeri, 2017.
- [8] ZIANI Lotfi. ETUDE, DIMENSIONNEMENT ET MODELISATION D'UNE UNITE PILOTE DE PRODUCTION D'HYDROGENE SOLAIRE, MIMOIRE de MAGISTER. HOUARI BOUMEDIENNE, 2010.
- [9] Séverine Busquet. Étude d'un système autonome de production d'énergie couplant un champ photovoltaïque, un électrolyseur et une pile à combustible: réalisation d'un banc d'essai et modélisation. Sciences de l'ingénieur [physics]. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2003.
- [10] www.discoverthegreentech.
- [11] Katia OUMAILIA, Tinhinane OULDLAMARA. Etude d'un système Photovoltaïque-Hydrogène OULDLAMARA mémoire de master académique, Tizi Ouzou. 2018.
- [12] www.hqe.guidenr.fr.
- [13] Julien Labbé. L'Hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés. Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Ecole des Mines de Paris Spécialité énergétique, 2006.
- [14] SIBOUKEUR Mohammed Houcine. Etude d'une installation de production d'Hydrogène par voie photovoltaïque. mémoire de master académique, BLIDA. 2013.
- [15] J.MOUGin – action.maison.de.la.chimie.com. 2019.

- [16] A. Fadila, K. Berkane, L. Ould Abdessalam. Simulation d'une centrale solaire cylindro-parabolique intégré dans un cycle combiné. Diss. UMMTO, 2019.
- [17] M. CHÉDALA- R. MERIKHI. Conception et réalisation d'un concentrateur cylindro-parabolique pour production d'énergie thermique, 2016.
- [18] La terre dans le système solaire - 5e - Cours STV-Kartable.
- [19] Tyes-de-rayonnement-solaire-bshopfr.ibermaticoss.com.
- [20] <https://sciences24.com>.
- [21] <https://thesolarest.com>.
- [22] A .Belfedhal Post graduant Magistère en Modélisation et simulation de systèmes énergétiques Université Ahmed Draïa Adrar. 2013.
- [23] Ø. Ulleberg. Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach, Int. J. of Hydrogen Energy 28, 21-33, 2003.

Annexe

L'équation et les caractéristiques I-V des panneaux solaires

```
function x=pvfun(g,t,v,x)
x=0 ;
ns=36;
rs=0.008*ns;
rsh=1000*ns;
isc=3.8;
voc=21.1;
kv=-80*10^(-3);
ki=2.4;
kk=1.381*10^(-23);
q=1.602*10^(-19);
a=1.2;
i0=(isc+ki*(t-298.15))/(exp(q*(voc+kv*(t-298.15))/(a*kk*t*ns))-1);
iph=(isc+ki*(t-298.15))*g/1000;
x1=iph-i0*(exp(q*(v+rs*x)/(a*kk*t*ns))-1)-(v+rs*x)/rsh;
while abs(x1-x)>0.001
    x1=x;
    x=iph-i0*(exp(q*(v+rs*x1)/(a*kk*t*ns))-1)-(v+rs*x1)/rsh;
end
x=x;
end
```

Code de calcul le débit instantané de production d'hydrogène

```
clc
clear
num=xlsread('fely.xlsx')
nn=size(num,1)
for ir=1:nn
    clear uely;
    clear iely;
    clear vpp;
```

```
clear ii;
g=num(ir,3);
t=298;
if g>0
vp=0.5:0.5:21;
eps=0.01;

for i=1:42
x=0 ;
ii0=30/vp(i);
x=pvfun(g,t,vp(i),ii0) ; %point fixe
if x>0
ii(i)=x;
n=i;
vpp(i)=vp(i) ;
end
end
hold on
grid on
plot(vpp,ii)

%pause

%partie elctrolyse

r1=8.05*10^(-5);
r2=-2.5*10^(-7);
s=0.185;
t1=1.002;
t2=8.424;
t3=247.3;
urev=1.229;
a=0.05;
```

```
for i=1:n
iely(i)=ii(i);
end

for i=1:n
uelyc(i)=urev+(r1+r2*t)*iely(i)/a+s*log((t1+t2/t+t3/t^2)*iely(i)/a+1);
uely(i)=uelyc(i)*10;
end
plot(uely,iely)
[ui(ir),ij(ir)] = polyxpoly(uely,iely,vpp,iely,'unique')
else
    ui(ir)= 0;
    ij(ir)=0;
end
%pause
end
fefy=ij.*ij*0.96./(a*a*150+ij.*ij)
nhh=fefy*6.*ij/(2*96485)
vhh=nhh*22.41
ppv=ui.*ij
```