

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

UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA 1

DEPARTEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master
En : énergie renouvelable

Spécialité : Conversion Thermique

Par : **HAMOUNI KHALED**

Sujet

**Etude d'une Installation solaire de
production d'hydrogène par Électrolyse
de la vapeur d'eau**

Soutenu publiquement, 2017, devant le jury composé de :

M. H. ABDI

Maitre-Assistant « MAA » à l'USDB

Directeur de mémoire

Remerciements

*En premier lieu, nous remercions Dieu qui nous a procuré
.ce succès*

*Promoteur "M. H. ABDI " pour ses conseils
Précieux et pour toutes les commodités et aisances qui
Nous a apportés durant l'étude et la réalisation de ce
.document*

*Nos remerciements les plus vifs s'adressent aux messieurs
Le président et les membres de jury d'avoir accepté
.d'examiner et d'évaluer notre travail*

*Sans omettre bien sûr de remercier profondément tous
Ceux qui ont contribué de près ou de loin à réalisation du
.présent travail*

Et enfin,

*L'expression de nos remerciement les
Plus profonds Tous les gens qui mon donnée un
Soutien et m'encouragement.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à

Mes très chers parents, pour leur sacrifice

Mes très chères sœurs

Mes très chers frères

Toute ma famille

Tous mes amis

Résumé

L'hydrogène est un combustible et un porteur potentiel d'énergie du futur, ce dernier peut être produit par l'utilisation des énergies renouvelables, particulièrement l'énergie solaire. Il est considéré comme une solution pour la demande croissante en énergie.

L'Algérie bénéficie d'une situation géographique très favorable pour l'utilisation d'énergie solaire, elle dispose d'une durée d'ensoleillement et d'une quantité d'énergie incidente très importante, de ce fait, l'Algérie occupe une place de choix pour la production d'hydrogène solaire.

L'objectif de notre travail est d'étudier et dimensionner une installation de production d'hydrogène solaire. Pour ce faire, nous avons fixé les paramètres de fonctionnement de l'installation tel que le débit massique, la pression et la température d'électrolyseur afin de déterminer le besoin en hydrogène.

Un modèle mathématique a été établi afin de dimensionner les éléments principaux de l'installation en introduisant les caractéristiques techniques nécessaires ainsi que les paramètres météorologiques du site. Ensuite, nous avons effectué une étude comparative de la production d'hydrogène pour les différents sites à savoir: Alger, Annaba, Djelfa et Tamanrasset. Les résultats obtenus montrent l'influence de quelques paramètres tels que l'éclairement solaire sur la production d'hydrogène et que la meilleure production d'hydrogène est obtenue par le site de Tamanrasset.

Abstract

Hydrogen is a fuel and is a potential energy of the future that is produced by the use of renewable energy, particularly solar energy. This last is considered as a solution for the growing demand for energy

Algeria benefits from a geographical location which is very favorable for the use of solar energy, it has a duration of sunning and a quantity of very important incidental energy, thus Algeria occupies a choice place for the solar hydrogen production. This production will offer not only clean energy but more especially will make it possible to increase and diversify its energy resources.

The objective of our work is to study and dimension a solar hydrogen production. In order to do this, we fixed the parameters of operation of the installation such as mass flow, pressure and the temperature of electrolyser in order to determine the requirement into hydrogenated.

A mathematical model was established in order to dimension the principal elements of the installation by introducing the necessary technical characteristics as well as the meteorological parameters of the site. then, we carried out a comparative study of the hydrogen production for the various sites namely: Algiers, Annaba, Djelfa and Tamanrasset. The results obtained in this work shows the influence of some parameters such as solar irradiance on the production of hydrogen and that the best production of hydrogen is obtained in the site of Tamanrasset.

مختصر

الهيدروجين هو وقود وناقل لقوة الطاقة في المستقبل والتي تنتج عن طريق استخدام الطاقة المتجددة، خاصة الطاقة الشمسية. ويعتبر هذا الأخير كحل للمطالب المتزايدة من الطاقة

للجزائر موقع ملائم لاستخدام الطاقة الشمسية، ولها مدة الإشعاع الشمسي وكمية الطاقة الساطعة مهمة جدا، لذلك، تحتل الجزائر المكان المفضل لإنتاج الهيدروجين الشمسي. وهذا الإنتاج ليس فقط توفير الطاقة النظيفة ولكن أيضا تسمح بزيادة وتنويع مصادر الطاقة لديها

والهدف من هذه الدراسة هو تصميم هيكل لإنتاج الهيدروجين الشمسي. للقيام بذلك، وضعنا معايير التشغيل الهيكل. مثل التدفق الكتلي والضغط ودرجة الحرارة التحليل الكهربائي لتحديد مدى الحاجة للهيدروجين

تم إنشاء نموذج رياضي لتصميم العناصر الرئيسية للنظام عن طريق إدخال الخصائص التقنية اللازمة وعوامل الأرصاد الجوية للموقع. بعد ذلك، أجرينا دراسة مقارنة لإنتاج الهيدروجين لمواقع مختلفة منها: الجزائر، عنابة، الجلفة وتمنراست وأظهرت النتائج التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة تأثير بعض العوامل مثل الإضاءة الشمسية لإنتاج الهيدروجين وتم الحصول على أفضل إنتاج الهيدروجين من قبل الموقع تمنراست

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Chapitre I: Généralité

I.1. Introduction	1
I.2. Énergie	1
I.2.1. Consommation énergétique selon le type d'énergie utilisé	1
I.2.2. Production annuelle énergétique mondiale	2
I.2.6. Impact des activités énergétiques	2
I.2.7. Evolution des rejets de CO ₂ dans l'atmosphère	2
I.3. Energie renouvelable	3
I.4. Hydrogène	3
I.4.1. Propriété physique	3
I.4.2. Production d'hydrogène	5
I.4.3. Production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables	5
I.4.3.1. Energie éolienne	6
I.4.3.2. Biomasse	6
I.4.3.3. Energie solaire	6
I.4.3.3.1. Energie Solaire Photovoltaïque	7
I.4.3.3.2. Energie Solaire Thermique	7
I.4.4. Modes de stockage hydrogène	8

Chapitre II: Modélisation et Procédure de Simulation

II.1. Description de l'installation	9
II.1.1. Principe de fonctionnement de l'installation	10
II.2. Dimensionnement de la centrale	10
II.2.1. Objectif	10
II.2.2. Présentation du système de production d'hydrogène proposé	10
II.2.3. Simulation de l'électrolyse de la vapeur d'eau	11
II.2.3.1. Principe	12
II.2.3.2. Energie minimale d'électrolyse	14
II.2.3.3. Caractéristique	14
II.2.3.4. Simulation de la production d'hydrogène	16
II.2.4. Simulation de l'unité de production de la vapeur	17
II.2.4.1. Le circuit d'eau	18

SOMMAIRE

II.2.4.2. Le circuit du fluide caloporteur	19
II.2.4.3. Concentrateurs solaires : procédure de modélisation	20
II.2.5. Simulation de la production d'électricité par les cellules photovoltaïques	21
II.2.5.1. Le dimensionnement de l'unité de production d'électricité réside en la détermination	22
II.2.5.1.1. Estimation du nombre des modules photovoltaïque	23
II.2.5.1.2. Estimation du nombre des modules photovoltaïque en série	23
II.2.5.1.3. Estimation du nombre des modules photovoltaïque en parallèle	24

Chapitre III:

Résultat et Discussion

III.1. Méthodologie de résolution	25
III.2. Calculs thermodynamiques aux différents points de l'installation	25
III.2.1. Calcul des puissances de l'installation	25
III.2.1.1. La puissance de la chaudière solaire Q_{12}	25
III.2.2.1. Détermination les différentes puissances en « kW »	28
III.3. Calculer la surface des concentrateurs cylindro parabolique	28
III.3.1. Détermination des surfaces A_{12} , A_{45}	29
III.3.1.1. Chaudière solaire	29
III.3.1.2. Réchauffeur solaire	29
III.4. Détermination la production d'électricité	29
III.4.1. Détermination des caractéristiques des cellules d'électrolyse	30
III.5. Dimensionnement des cellules photovoltaïques	30
III.6. Estimation du taux de production d'hydrogène	31
III.6.1. Irradiation solaire moyenne mensuelle sur plan horizontal	31
III.6.2 Puissance thermique moyenne mensuelle produite par les concentrateurs cylindro paraboliques	32
III.6.3. Rayonnement global moyenne	33
III.6.4. Puissance électrique moyenne mensuelle fournie par les cellules Photovoltaïques « KW/mois »	35
III.6.5. Débit moyenne mensuelle d'hydrogène	36
III.6.6. Débit moyenne d'hydrogène	38

SOMMAIRE

III.7. Estimation des émissions de CO₂ pour une consommation électrique donnée, assurée par différentes sources d'énergie	40
---	-----------

NOMENCLATURE

S_a : La surface d'absorbeur, m ² ;	k : Constante de Boltzmann = $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K ;
T : Température, K ;	e : La charge d'un électron = $1.062 \cdot 10^{-19}$ As ;
C : Concentration géométrique ;	T : Température absolue de la cellule photovoltaïque °K ;
U : Tension, V ;	A_c : La surface de concentrateurs, m ² ;
E : Charge d'un électron, C ;	A_u : la surface unitaire de concentrateurs, m ² ;
U_R : Tension minimum réversible d'électrolyse, V ;	U_E : Tension appliquée aux bornes des électrodes V ;
U_{thermo-neutre} : Tension imposée à la cellule, V ;	I : L'intensité du courant traversant les électrodes A ;
F : Constante de Faraday, C/mole ;	A_E : Surface des électrodes [cm ²] ;
V : Tension délivrée des cellules PV, V ;	Z : nombre d'électrons mis en jeu ;
ΔG_{T,p} : l'enthalpie libre de réaction, J/mol ;	I_g : rayonnement global, W/m ² ;
ΔH_{T,p} : enthalpies de réaction, J/mol ;	Z : Nombre d'électrons mis en jeu ;
ΔS_{T,p} : l'entropie de réaction, J/mol ;	I₀ : Intensité du courant d'obscurité ;
ΔH⁰_r : enthalpies standards, J/mol ;	I_{ph} : Photo courant, A ;
ΔG⁰_r : l'enthalpie libre standard, J/mol ;	J : Densité de courant, A/m ² ;
ΔS⁰_r : l'entropie standard, J/mol ;	η₀ : Rendement optique du capteur % ;
T⁰ : Température standard, 298 K ;	η_f : Rendement faradique, % ;
h : Enthalpie, kJ/Kg ;	P : Puissance délivrée par la cellule W ;
W : puissance nécessaire pour l'électrolyse, W ;	Q_u : Energie utile d'un convertisseur, KW ;
I : courant délivré par la cellule, A ;	Q₁₂ : Puissance de la chaudière sol, KW ;
W₅₆ : Travail de compression, KW ;	Q₄₅ : Puissance du réchauffeur sol, KW ;
I_b : rayonnement direct, W/m ² ;	R : Constante des gaz parfait kJ/kmole °K ;
X : Titre, % ;	S : Entropie, kJ/°C ;
m : Débit massique, kg/s ;	t : Temps, s ;
M : Masse moléculaire, kg/kmole ;	I_{ph} : Photo courant.
J : Densité de courant, A/cm ² ;	
W₂₃ : Le travail fourni par la turbine, KW ;	
m : Facteur d'idéalité de la diode ;	

INTRODUCTION

GENERAL

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Un très grand pourcentage de l'énergie nécessaire provient des ressources fossiles « hydrocarbures, charbon... ». L'utilisation de ces sources d'énergie engendre en outre des effets secondaires indésirables. Il devient aujourd'hui indispensable de réduire les émissions de gaz à effet de serre notamment de CO₂ pour limiter les changements climatiques. La recherche de sources alternatives d'énergie renouvelables est donc un secteur en pleine progression. Non seulement ces sources doivent être renouvelables, mais il faut aussi que celles-ci soient non nuisibles pour l'environnement.

Dans ce contexte, l'hydrogène se confirme d'être un candidat très sérieux, même s'il ne constitue qu'un vecteur énergétique et non une ressource primaire. De plus, l'hydrogène peut apporter une réponse aux enjeux climatiques en permettant de rationaliser l'utilisation des énergies renouvelables par nature dispersées et aléatoires. L'hydrogène, qui n'existe pas à l'état naturel, peut en effet être synthétisé à partir des énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. La filière étudiée dans ce projet est l'énergie solaire thermique et photovoltaïque. Il s'agit alors de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie thermique et électrique.

Le but poursuivi dans le cadre de ce travail est d'évaluer la possibilité d'étudier l'une des solutions de production d'hydrogène par voie solaire sans émissions des gaz à effet de serre. En effet, cette énergie est soumise aux conditions météorologiques. Elle présente donc une fluctuation de production qui peut être importante en fonction du site d'installation, ce qui pose des problèmes sur les réseaux locaux qu'elle participe à alimenter.

Notre travail est subdivisé en trois chapitres :

1. Le premier chapitre est consacré aux généralités, qui constitue dans un premier temps la situation énergétique mondiale et les émissions des gaz à effet de serre, en suit les différentes sources d'énergie renouvelable et en fin ce chapitre comporte la production d'hydrogène pour différentes sources d'énergie ;
2. Dans le deuxième chapitre nous avons donné une description de notre installation a fin de modéliser le système de production d'hydrogène ;
3. Le troisième chapitre est consacré à l'interprétation des résultats obtenus.

GÉNÉRALITÉ

L'ÉTAT D'ART

Dans cette période de crise où les préoccupations environnementales prennent un intervalle considérable, et les ressources fossiles tendent à être insuffisantes, l'hydrogène est présenté comme la technologie apportant la solution la plus adéquate. Il peut rendre le vaste gisement solaire en Algérie beaucoup plus accessible. L'abondance de la matière première pour la production, la propreté et le recyclage naturel sont les propriétés qui feront que l'hydrogène sera amené à jouer un rôle de premier rang dans le futur.

L'Electrolyse de la vapeur d'eau à Haute Température (EHT) semble encourageant pour une production massive d'hydrogène plus respectueuse de l'environnement. Jusqu'à aujourd'hui, beaucoup de chercheur ont réalisé des études sur ce domaine. Les études effectuées ont concerné principalement la possibilité des procédés de couplage des sources d'énergie thermique renouvelable à Haute Température.

Parmi les études qui ont été faites sur le domaine de production d'hydrogène par voie solaire en utilisant l'électrolyse de la vapeur d'eau à très hautes températures, on cite :

Houcheng Zhang et all, ont présenté dans leur étude un nouveau système d'électrolyse de la vapeur d'eau à haute température pour la production d'hydrogéné par énergie solaire. Le système se compose d'un dispositif de concentration solaire de double faisceau, un SOSE «solid oxide steam electrolysis», deux échangeurs de chaleur et deux compresseurs. Ce dispositif permettre de convertir l'énergie solaire en électricité et en énergie thermique. L'énergie produit de ce dernier permettre de transmettre à l'électrolyseur « SOSE » qui est très sensible aux changements d'opérations à cause du rayonnement. Pour cela le dispositif est actionné à une irradiation solaire constante. Les résultats obtenu sont très motivée pour l'électrolyseur de la vapeur à haute température par vois solaire pour la production d'hydrogéné [1].

S. Koumi Ngoh et all, ont présenté dans leurs travail un système de production d'hydrogène par l'utilisation d'un système solaire hybride «photovoltaïque et thermique». Le système contienne un électrolyseur de vapeur à haute température qui est couplé a un rangée de panneau photovoltaïque dans le but d'assurer l'alimentation de l'électrolyseur en courant continu et un collecteur parabolique pour la production d'énergie thermique à haute température environ «850 – 900°C» et une pression d'environ 5 MPa. L'étude est réalisée dans des conditions tropicales locales. A la basse d'une simulation du système, les mesures théoriques d'hydrogène enregistrées sont 0.064 Kg/s et 1843.2 Kg/jour [2].

Le travail de **N. Monnerie et all**, a pour but de la production d'hydrogène par l'accouplement d'un électrolyseur à haute température qui fonction a des températures environne 750°C et 15 bar. Dans cette étude, la technologie qui a été utilisé est basée sur un

concentrateur solaire à tour qui a pour but d'assurer une température constante, le type de fluide utilisé sont des sels fondus d'une capacité de stockage élevée. Ce travail est composé de deux parties : la première concerne la production d'hydrogène à un débit de 400 Kg/jour ou la demande en énergie thermique est de 6 MW pour des petites stations ; alors que la deuxième est pour un débit de 4000 Kg/jour ou la demande en énergie thermique est de 50 MW pour usage industriel [3].

J. Padin et al., représente dans leurs étude un nouveau système de production d'hydrogène par énergie solaire. Le système fonctionne à une température élevée où un capteur solaire hybride est intégré pour assurer l'alimentation d'un électrolyseur à haute température. Les résultats montrent que le système solaire hybride de production d'hydrogène à haute température est plus efficace que celui d'un système classique. Pour différentes températures, la comparaison de ce système avec celle du système classique montre que l'efficacité de système hybride atteint 27% pour une température de 200°C, 45% à 600°C et à 1000°C son efficacité atteint les 63% [4].

La particularité principale de notre travail concerne l'estimation de la production de l'hydrogène par voie solaire pour différents sites d'implantations à savoir, le nord, le sud et le moyen sud.

I.1.Introduction

Les prévisions de consommation d'énergie dans les décennies à venir sont en croissance significative et conduisent donc forcément à un fort développement des énergies renouvelables, compte tenu des limitations imposées par l'épuisement inévitable des ressources fossiles, de surcroît socialement mal acceptées dans de nombreux pays, même si les énergies nucléaires peuvent prétendre satisfaire une partie de la demande. Les énergies renouvelables seront de plus en plus sollicitées dans l'avenir [5]. **Fethi Amri**, a fait une étude économique en Algérie pour la consommation d'énergie par habitat entre année 1980 jusqu'à 2012, au il a comparé entre deux sources d'énergie «renouvelable et non renouvelable» [6].

I.2.Énergie

I.2.1. Consommation énergétique selon le type d'énergie utilisé

Le tableau suivant présente la consommation d'énergie pour les types d'énergie utilisés selon l'Agence Internationale d'énergie :

Tableau .I.1.Consommation d'énergie selon le type d'énergie utilisé [7].

	Production Mtep '2006'	Consommation Mtep '2006'	Part dans la consommation
Pétrole	4 030	3 470	43%
Gaz Naturel	2 440	1 233	15%
Charbon	3 070	698	9%
Energie Nucléaire	728	-	-
Energie hydro-électrique	261	-	-
Electricité	-	1 350	17%
Combustible renouvelable et déchets	1 185	1 040	13%
Chaleur	10	293	3%
Total	11 724	8 084	100%

De manière générale, Il est nécessaire de distinguer deux types de consommation d'énergie :

- ✓ La consommation primaire : concerne la quantité d'énergie totale potentielle de la ressource utilisée ;
- ✓ La consommation finale : correspond à ce qui achète l'utilisateur «essence».

I.2.2. Production annuelle énergétique mondiale

La production mondiale d'énergie primaire est estimée à environ douze milliards de tonnes équivalent pétrole par an. Avec le nucléaire, 93% de cette production reposent sur des ressources primaires non renouvelables. La répartition des énergies est ainsi mise en évidence dans le tableau ci-dessous.

Tableau .I.2. Production énergétique mondiale commercialisée selon la source d'énergie [7].

	Production en 1998	Production en 2008	Production en 2008 « Mtep »	Augmentation 2008/1998	Part dans la production
Pétrole	73 538 000 Bl/j	81 820 000 Bl/j	3 928	11%	34.5%
Gaz Naturel	2273 Gm ³	2 945 Gm ³	2 768	35%	24.2%
Charbon	2 227 Mtep	3 325 Mtep	3 325	49%	29%
Nucléaire	550 Mtep	620 Mtep	620	13%	5.5%
Hydraulique	2 593 Twh	3 075 Twh	696	19%	6%
éolien	22 Twh	260 Twh	59	1 200%	0.5%
Solaire Photovoltaïque	4 Twh	35 Twh	8	8 750%	0.08%
Total			11 402	27.1%	100%

I.2.3. Impact des activités énergétiques

Les manipulations énergétiques conduisent à l'épuisement de ressources naturelles ainsi une pollution dont les rejets de gaz à effet de serre. **Claude Lorius**, a parlé sur la dégradation de l'environnement ou elle est inévitable qui est liée aux activités humaines et aux conditions de vie de nos sociétés, la croissance économique. Le réchauffement de la planète et les émissions de gaz à effet de serre, notamment du CO₂, sont essentiellement liées à la combustion des carburants fossiles [8].

I.2.4. Evolution des rejets de CO₂ dans l'atmosphère

Les résultats des modèles climatiques prévoient pour la fin du 21^{ème} siècle, avec une probabilité de 90%, une hausse des températures comprise entre environ 1,5 et 6 °C.

Une corrélation entre la consommation de carburants fossiles et la concentration de CO₂ dans l'atmosphère est montrée sur la Figure .I.1, qui constitue l'une des indices les plus justes de l'impact des activités humaines. **Fateh Bélaïd et all**, ont fait une étude sur les

émissions de CO₂ et la production d'électricité en Algérie sur une période de 1980 jusqu'à 2012 entre deux différents types d'énergie «renouvelable et non renouvelable» [9].

La figure .I.1 représente la corrélation de la consommation du carburant fossile et concentration de CO₂.

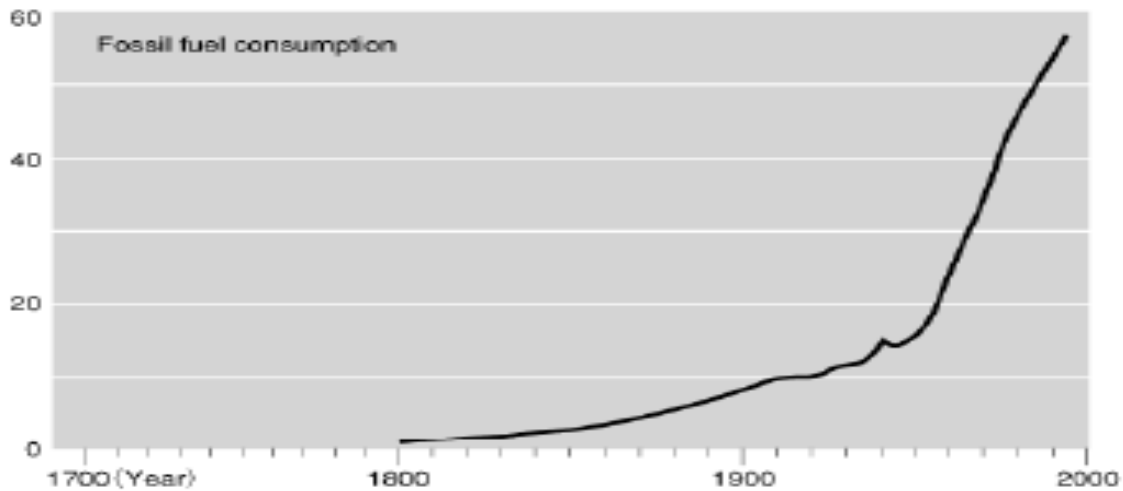


Figure .I.1.Corrélation de la consommation du carburant fossile et concentration de CO₂ [10].

I.3. Energie renouvelable

On parle de nos jours d'énergies renouvelables pour désigner en fait des sources anciennes, dont la mise en œuvre est optimisée avec des technologies modernes, ou bien d'énergies dont le principe est entièrement nouveau.

Parfois, le terme "énergies renouvelables" recouvre des réalités différentes pour désigner toute source d'énergie alternative utilisée plus ou moins récemment ou elle remplace les énergies fossiles. Une source d'énergie renouvelable se régénère ou se renouvelle naturellement selon un cycle relativement court [11]. **Jean-Louis Bal et all**, ont cité les différentes sources d'énergie tel que : le solaire, l'éolien et l'hydraulique, pour la production d'électricité ou il a donné un exemple sur la France qui a augmenté la partie des énergies renouvelables de 15 à 21% [12]. **Petra Luňáčková et all**, ont montré l'impact des énergies renouvelables dans la république de tchèque dans le domaine de photovoltaïque [13].

Les différentes sources des énergies renouvelables selon leurs origines sont : L'hydraulique, l'éolien, la biomasse, la géothermie et l'énergie solaire.

I.4. Hydrogène

L'hydrogène c'est l'élément le plus abondant dans l'univers, 75% de la masse des étoiles et les galaxies. C'est le carburant du soleil «chaque seconde, 620 millions de tonnes d'hydrogène sont converties en 615,7 millions de tonnes d'hélium».

I.4.1. Propriété physique

Les propriétés physiques de l'hydrogène sont récapitulées dans le tableau.I.3 :

Tableau.I.3. Propriétés thermo physiques de l'hydrogène [14].

Poids moléculaire		2.016
Electronégative		2.1
Densité (Gaz)		0.0838 Kg/m³
Densité (Liquide)		70.8 Kg/m³
Température d'ébullition		20.3 °K
Température de fusion		13.8 °K
Chaleur de fusion		58.23 KJ/Kg
Chaleur de Vaporisation		445.59 KJ/Kg
Chaleur de sublimation		507.39 KJ/Kg
Capacité calorifique	Gaz	14.89 KJ/Kg °K
	Liquide	9.69 KJ/Kg °K
Pouvoir calorifique	Supérieur	140 MJ/Kg
	Inferieur	120 MJ/Kg
Point critique	Température	32.94 °K
	Pression	12.84 bars
	Densité	31.4 Kg/m³

D'un point de vue énergétique, l'hydrogène présente plusieurs avantages [15] :

- ✓ Tenant compte des impacts environnementaux, l'hydrogène solaire est un carburant propre [4]. Le tableau .I.4 qui présente les polluants produits par différents carburants.

Tableau .I.4. Polluants émis par différents carburants [15].

Polluant	Hydrocarbure « Kg/GJ »	Charbon « Kg/GJ »	Hydrogéné « Kg/GJ »
CO ₂	72.4	100	0
CO	0.8	0.65	0
S O ₂	0.38	0.5	0
NO _x	0.34	0.32	0.1

- ✓ Les propriétés liées aux risques d'utilisation de certains carburants indiquent dans tableau I.5. L'hydrogène est le carburant qui présente le moins de risque [15].

Tableau .I.5. Propriétés d'inflammation et de toxicité de certains carburants [15].

Propriété	Essence	Gaz naturel	Hydrogéné
Coefficient de diffusion dans l'air (cm ² /s)	0.05	0.16	0.61
Température d'inflammation (°C)	228 - 471	540	585
Limites d'inflammation dans l'air (Vol %)	1 - 7.6	5.3 - 15	4 - 75
Energie d'allumage dans l'air (mJ)	0.24	0.29	0.02
Température de la flamme dans l'air (°C)	2197	1875	2045
Vitesse maximale de la flamme (m/s)		0.43	3.46
Energie d'explosion (G TNT/KJ)	0.25	0.19	0.17
Toxicité du carburant	haute	moyenne	faible
Toxicité de la combustion du carburant	haute	moyenne	moyenne

I.4.2. Production d'hydrogène

Pour produire de l'hydrogène, plusieurs possibilités sont étudiées, certaines sont déjà arrivées à effectuer sa technologie et d'autres sont encore au stade du développement [14].

I.4.3 Production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables

La production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables englobe l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie solaire, l'énergie géothermique, l'énergie mare motrice et hydrolienne, la biomasse et l'énergie solaire photovoltaïque.

I.4.3.1. Energie éolienne

L'activité solaire est la principale cause des phénomènes météorologiques. Ces derniers sont notamment caractérisés par des déplacements de masse d'air à l'intérieur de l'atmosphère. Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif électromécanique qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Il existe plusieurs configurations d'aérogénérateur [16].

La production d'hydrogène à partir d'énergie éolienne est souvent présentée comme un moyen d'augmenter la part de l'éolien dans le mix énergétique. La production d'électricité d'une éolienne, peut être exclusivement dédiée à la production d'hydrogène, sans raccordement au réseau électrique [17].

Plusieurs travaux réalisées sur ce type d'énergie ; **S. Bousalem et al** qui ont travaillé sur l'étude d'un procédé de production d'hydrogène par énergie éolienne [18]. Ainsi, l'étude de **L. Aïche-Hamane et al**, qui ont effectué une estimation de la production d'hydrogène à partir de différentes tailles d'éoliennes dans le sud de l'Algérie [17]. Une étude d'évaluation de ressource de vent en Algérie est effectuée par **Sidi Mohammed Boudia et all** qui ont utilisé une analyse statistique basée sur les données de mesure du vent à partir de 63 stations météorologiques pour différentes régions algériennes. L'étude de **Sidi Mohammed Boudia et all** a pour but d'actualiser la carte de vent en Algérie [19].

I.4.3.2. Biomasse

Depuis une dizaine d'années, il existe un regain d'intérêt pour l'utilisation de la biomasse comme source d'énergie [20]. La production de l'hydrogène par la biomasse est très prometteuse de sa valorisation énergétique. Cette valorisation, bien qu'elle soit techniquement et technologiquement complexe, donne un défi dans notre contexte énergétique [21]. **Amine Akbi et all**, dans son travail a cité le potentiel important de la bioénergie en Algérie et l'intègre dans un programme national. Ils ont prouvé que les déchets urbains peuvent produire 1685 GWh par mois par le procédé de digestion anaérobie [22].

I.4.3.3. Energie solaire

L'énergie solaire, à l'origine de la vie sur terre, est exploitée depuis la nuit des temps par l'homme ; le plus souvent de façon indirecte (pétrole, gaz, charbon et bois), moins de façon directe. Il existe pourtant de nombreuses technologies permettant de produire de la chaleur et ou d'électricité en utilisant directement l'énergie solaire thermique et photovoltaïque.

La production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire, est une méthode simple à partir de l'électricité produite par les panneaux photovoltaïques.

Jean-Louis Bouvier et al, ont travaillé sur l'énergie solaire pour une étude expérimentale d'un concentrateur solaire parabolique à génération directe de vapeur alimentant une centrale de micro-cogénération, ils ont fait chauffer de l'eau déminéralisée par des concentrateurs jusqu'à arriver à la surchauffée où saturée à une température comprise entre 180 et 250°C. En suit, ils ont fait une simulation sur la charge thermique d'un bâtiment pour chauffage et production d'eau chaud sanitaire. **Jean-Louis Bouvier et al** ont trouvé une puissance thermique produite est de l'ordre de 20 kW pour 3 kW électrique [23].

Nasreddine CHENNOUF et al, ont travaillé sur l'étude d'une installation de production d'hydrogène solaire par électrolyse de l'eau dans la région d'Ouargla. La réalisation d'une installation photovoltaïque a pour but de la production d'hydrogène par électrolyse d'eau ; ils ont utilisé un électrolyseur de type alcalin avec Na-OH comme électrolyte dans le site d'Ouargla [24].

On peut trouver deux types d'énergie solaire à savoir : Energie Solaire Photovoltaïque et Energie Solaire Thermique.

I.4.3.3.1. Energie Solaire Photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques, Elle résulte de la conversion directe dans un semi-conducteur d'un photon en électron. Celui-ci permet de créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Le soleil émettant ce type de rayonnement a donc l'avantage d'être inépuisable et utilisable en tout point d'un territoire. Cette ressource a toutefois deux inconvénients, en concernant la production qui est invariablement liée aux conditions climatiques et d'autre part concernant la surface considérable qui est nécessaire pour produire de grande quantité d'énergie puisque le rendement des panneaux PV est relativement faible (typiquement entre 10 et 18%) [25]. **Amira Balaska et all**, ont établi une étude d'évaluation de la performance pour but de comparer la différence d'efficacité des modules photovoltaïque [26] et ainsi le travail de **R. Eke et all** montre l'influence des spectres solaire pour différent saisons sur plusieurs modules photovoltaïques [27].

I.4.3.3.2. Energie Solaire Thermique

L'énergie solaire thermique est la transformation du rayonnement solaire. Cette transformation peut être utilisée directement pour chauffer un bâtiment par exemple ou indirectement comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des turboalternateurs et ainsi d'obtenir l'énergie électrique [25].

Muhammed Arslan Omar et all, ont présents dans leurs étude, un système de production d'hydrogène par simulation mathématique. Ils ont utilisé un capteur solaire hybride et un électrolyseur dans trois villes différentes en Turquie. La simulation de cette étude ce fait en deux étape, en gardant la température constante à 373°K et en augmentant la

pression à 0.1 MPa et à 0.5 MPa. Les résultats montrent que à la pression 0.1 MPa la température augmente jusqu'à 573°K [28].

I.4.4. Modes de stockage hydrogène

Le problème majeur de l'implantation de la technologie pile à combustible dans les différents domaines est l'approvisionnement en hydrogène et son stockage. De nombreuses recherches se sont alors penchées sur le problème afin d'y remédier et développer des systèmes de stockage fiables. Il existe trois types de stockage d'hydrogène soit sous forme liquide, sous forme solide ou bien sous forme comprimée

Conclusion

L'hydrogène est un vecteur énergétique d'avenir, il répond aux principaux défis énergétiques actuels. Il y a plusieurs façons de produire de l'hydrogène, actuellement le procédé le plus répandu est la production à partir d'énergie fossiles ; mais pour rester toujours dans les principaux défis énergétique et environnementaux il est impératif de produire l'Hydrogène à partir de sources d'énergies largement renouvelables et non polluantes sans émissions de gaz à effet de serre.

Nous en concluons qu'à long terme nous ne pouvons qu'envisager une production d'hydrogène à partir d'énergies renouvelables tel que l'énergie solaire ou l'éolienne. L'une des technologies les plus prometteuses pour la production d'hydrogène en matière de respect de l'environnement est l'électrolyse de la vapeur d'eau à haute température en utilisant une source d'énergie renouvelable.

De plus notre pays (spécialement le sud Algérien) est situé dans la zone la plus ensoleillée du monde (ceinture solaire) ce qui lui offre un potentiel énorme en rayonnement solaire. Dans notre mémoire, nous présentons l'étude de production d'hydrogène par électrolyse de vapeur d'eau en utilisant l'énergie solaire comme source d'énergie.

MODÉLISATION

ET

PROCÉDURE

DE

SIMULATION

II.1. Description de l'installation

L'énergie solaire disponible dépend principalement de l'emplacement géographique, de la position du soleil dans le ciel, des conditions météorologiques, de la technologie utilisée et de l'application «chauffage, refroidissement, production d'énergie électrique». L'énergie solaire n'émet aucun gaz à effet de serre, elle est disponible partout, gratuite, inépuisable, non polluante et facile à transformer. On utilise généralement la chaleur transmise par le rayonnement, plutôt que le rayonnement lui-même. La technologie qui nous permet l'exploitation de l'énergie solaire utilise des systèmes appelés capteurs solaires «sans ou avec concentration».

Notre étude est basée sur la modélisation d'une installation de production d'hydrogène par l'énergie solaire. Cette étude est effectuée pour différentes conditions climatiques en Algérie telles que «Alger, Annaba, Djelfa, Tamanrasset». L'installation étudiée est une combinaison entre deux options d'énergie renouvelable «thermique et photovoltaïque». Cette dernière est composée d'un électrolyseur à vapeur d'eau à très haute température qui est alimenté en électricité par un générateur photovoltaïque ; l'alimentation en vapeur d'eau est assurée par une centrale solaire à concentration.

L'installation de production d'hydrogène est composée principalement de trois parties :

- ✓ L'électrolyseur à vapeur d'eau à très haute température ;
- ✓ Des panneaux photovoltaïques afin de capter et convertir l'énergie solaire en énergie électrique requise par l'électrolyseur pour la décomposition de la vapeur d'eau en hydrogène et oxygène.
- ✓ Une centrale solaire à concentration qui sert à chauffer l'eau dans le but d'avoir de la vapeur qui alimente l'électrolyseur. L'unité d'alimentation en vapeur d'eau est composée d'un réchauffeur solaire et d'un compresseur dont la puissance mécanique est générée par une turbine à vapeur, l'échange thermique au niveau du réchauffeur se fait avec le fluide caloporteur qui circule à travers les concentrateurs cylindro-paraboliques.

II.1.1. Principe de fonctionnement de l'installation

L'eau entre dans la chaudière solaire à l'état 1 et un débit (m_1) et elle en sort à haute pression et à haute température (état 2) où elle est reçue et détendue par la turbine qui va produire le travail W nécessaire au compresseur. A la sortie de la turbine, un mélange liquide vapeur est récupéré : Le liquide, à l'état 3' et avec un débit ($m_{3'}$) est recyclé vers le réservoir d'eau et la vapeur d'eau, à l'état 3, avec un débit (m_3) est déviée, grâce à un séparateur, en deux quantités :

- ✓ la première (état 4) avec un débit (m_4) sert, une fois traitée (réchauffée et comprimée) aux conditions désirées (état 5), à alimenter les cellules d'électrolyse ;
- ✓ la seconde (état 4') avec un débit ($m_{4'}$) est recyclée vers le réservoir d'eau.

L'installation de production de vapeur d'eau possède deux générateurs de chaleur à savoir : le premier alimente la chaudière solaire ; et le second alimente le réchauffeur solaire. Chaque générateur de chaleur est alimenté par le fluide caloporteur provenant d'un groupe de concentrateurs solaires. La chaleur cédée par le fluide caloporteur du circuit primaire est absorbée par l'eau.

II.2. Dimensionnement de la centrale

Dans ce chapitre, nous proposons le couplage du procédé d'Electrolyse Haute Température à deux sources solaire une source d'énergie thermique à haute température (centrale solaire thermique a concentrateurs cylindro-paraboliques) afin de fournir de l'énergie au procédé pour la vaporisation de l'eau et un champ photovoltaïque pour produire d'électricité. Nous considérons que l'installation ou l'énergie thermique et l'énergie électrique sont dans ce cas sont séparé, groupée à l'unité de production d'hydrogène.

Nous précisons dans un premier temps les hypothèses concernant les conditions opératoires de l'installation qui aliment l'électrolyseur et celle d'électrolyseur par :

- Un débit massique de l'installation et d' 1 Kg/s ;
- La température et la pression à la sortie de chaudière solaire et de 300 °C et 30 bars ;
- L'électrolyseur travaille à un débit d' 1 Kg/s une température de 900°C et une pression de 30 bars.

II.2.1. Objectif

Le but du dimensionnement consiste alors à choisir et fixer les paramètres internes et externes de fonctionnement du cycle pour l'obtention des puissances électriques et thermiques nécessaires à l'électrolyse :

- A. Débits, pressions et températures de fonctionnement nécessaires pour la production électrique et thermiques nécessaires à l'électrolyse.
- B. Les puissances des différents organes de l'installation (compresseur, turbine).

II.2.2. Présentation du système de production d'hydrogène proposé

L'installation de production d'hydrogène est composée principalement de trois parties en basant sur les éléments présentés dans la figure .II.1. Ces composées de l'installation sont :

- ✓ L'électrolyseur à vapeur d'eau à très haute température ;
- ✓ Un champ des modules photovoltaïques pour alimenter l'électrolyseur en électricité ;
- ✓ Une centrale solaire à concentration pour alimenter l'électrolyseur en vapeur d'eau.

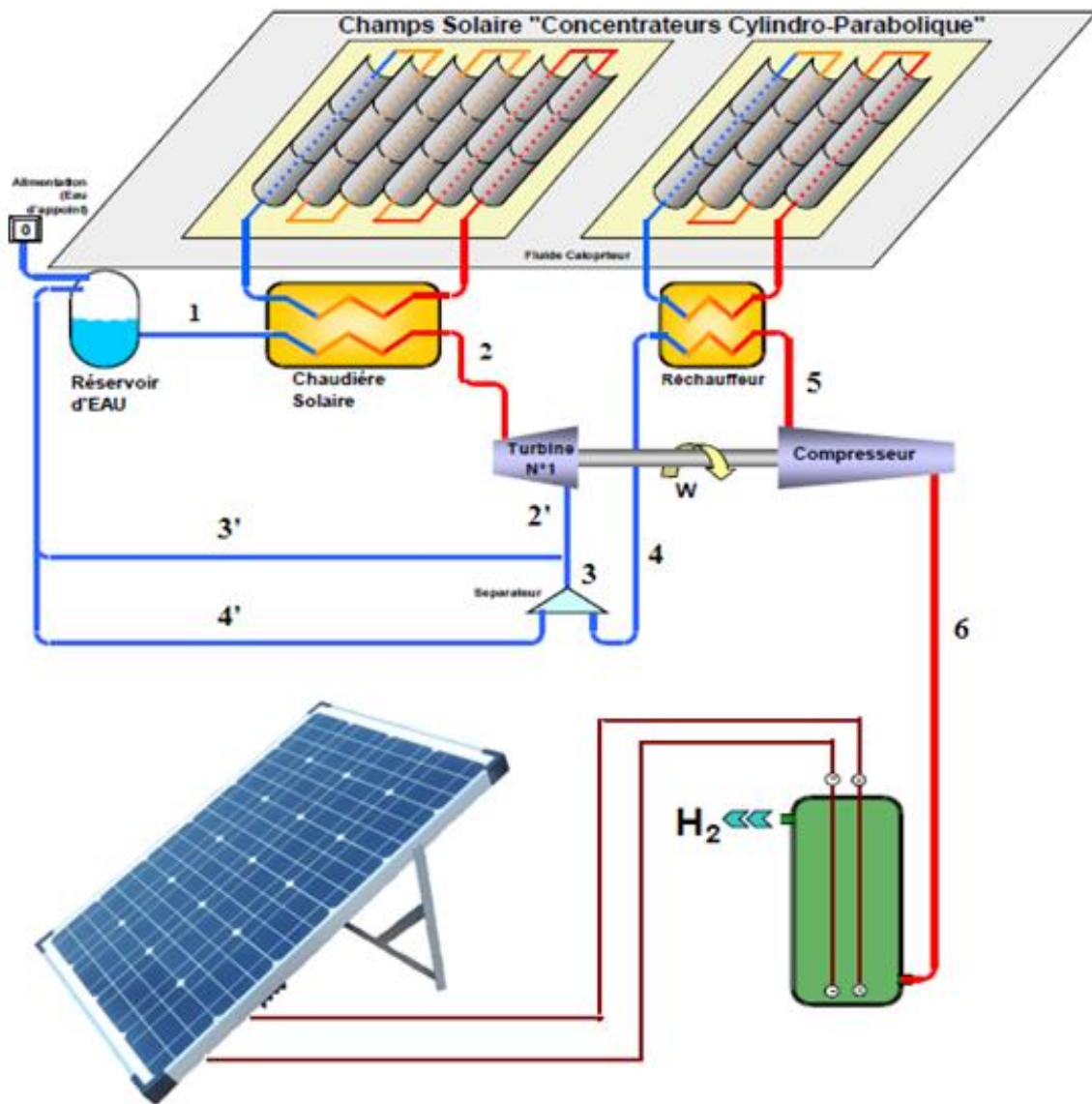


Figure II.1. Schéma de principe de l'installation de production d'hydrogène.

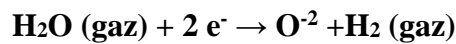
II.2.3. Simulation de l'électrolyse de la vapeur d'eau :

La conception de l'électrolyseur EHT repose sur un ensemble de composants. La cellule électrochimique comprend trois couches céramiques : anode, électrolyte, cathode. L'électrolyseur EHT fonctionne dans une gamme de températures comprise entre 700°C et 1000°C et à des pressions de l'ordre de 10 à 30 bars, une compression est nécessaire pour élever la pression et la température de la vapeur d'eau. La vapeur d'eau sort du compresseur aux conditions désirées et entre en quantité réglable dans l'électrolyseur.

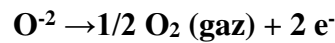
II.2.3.1. Principe

La figure suivante illustre le schéma de principe du processus électrochimique. Une paroi étanche d'oxyde électrolyte solide (OES) conducteur par ions O^{2-} est recouverte de deux conducteurs électroniques (électrodes métalliques) assurant respectivement la fonction d'anode et de cathode.

Cette paroi sépare deux atmosphères en circulation contenant un mélange H_2-H_2O d'une part et de l'oxygène pur d'autre part. Sous la tension appliquée U , les molécules de vapeur d'eau sont dissociées à la cathode en ions O^{2-} et en hydrogène selon la réaction :



Les ions O^{2-} migrent au travers de la paroi d'OES. A l'anode se produit l'oxydation des ions O^{2-} en oxygène selon la réaction :



La réaction globale de cette décomposition est :

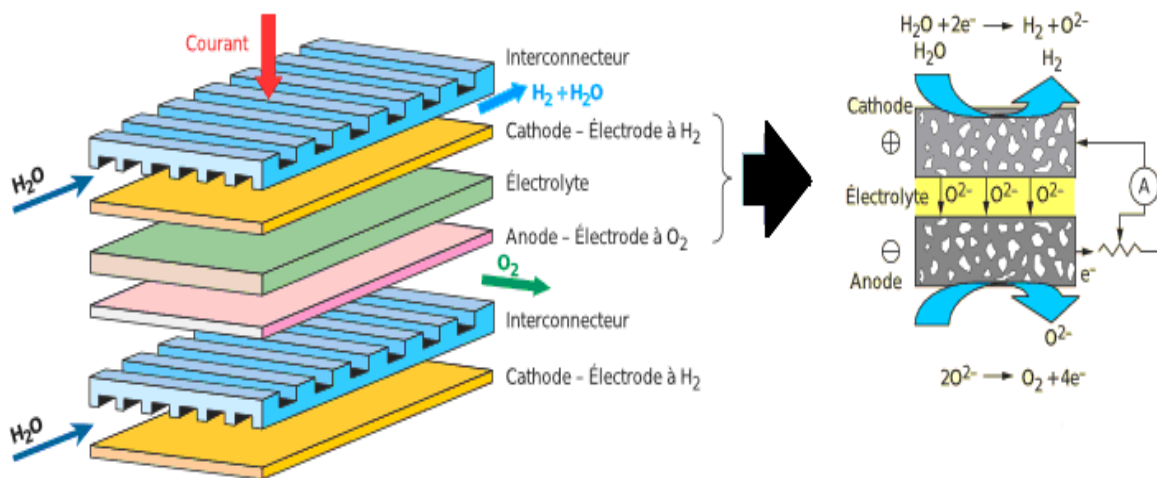
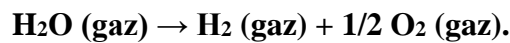


Figure II.2. Principe de fonctionnement de l'électrolyseur à vapeur d'eau.

L'énergie globale nécessaire pour effectuer cette réaction est égale à la variation d'enthalpie ΔH de cette réaction qui est équivalente à la somme de la variation d'énergie libre ΔG et la variation de l'entropie de la réaction ΔS :

$$\Delta H_{T,p} = \Delta G_{T,p} + T \Delta S_{T,p} \tag{II-1}$$

La tension notée par U_R correspond à l'enthalpie libre de Gibbs nécessaire pour que la réaction d'électrolyse s'effectue aux conditions opératoires de la cellule. Nous calculons

l'enthalpie libre de réaction ΔG_r à partir des enthalpies de réaction ΔH_r et de l'entropie de réaction ΔS_r aux conditions opératoires de la cellule en considérant uniquement l'influence de la température sur l'équilibre thermodynamique de la réaction (nous négligeons l'influence de la pression sur l'enthalpie de réaction). Les deux derniers termes ΔH_r , ΔS_r sont déterminés à partir des valeurs d'enthalpie et d'entropie de formation standard, des chaleurs spécifiques des gaz qui réagissent dans la cellule et de leurs coefficients stœchiométriques dans la réaction chimique [29].

La détermination de l'enthalpie de réaction d'électrolyse à partir des enthalpies standards ce faite Dans un premier temps, l'enthalpie de réaction, l'enthalpie libre de Gibbs et l'entropie de réaction dans des conditions standard sont estimées à l'aide des équations suivantes :

$$\Delta H_r^0 = \Delta H_{f-H_2}^0 + \frac{1}{2} \Delta H_{f-O_2}^0 - \Delta H_{f-H_2O}^0 \quad (\text{II-2})$$

$$\Delta G_r^0 = \Delta G_{f-H_2}^0 + \frac{1}{2} \Delta G_{f-O_2}^0 - \Delta G_{f-H_2O}^0 \quad (\text{II-3})$$

$$\Delta S_r^0 = (\Delta H_r^0 - \Delta G_r^0) / T^0 \quad (\text{II-4})$$

Ensuite, en faisant appel aux coefficients des chaleurs spécifiques des gaz qui réagissent dans la cellule d'électrolyse, exprimés par les équations (VI-5) – (VI-8) [29].

$$\Delta A_{CP} = A_{CP-H_2} + \frac{1}{2} A_{CP-O_2} - A_{CP-H_2O} \quad (\text{II-5})$$

$$\Delta B_{CP} = B_{CP-H_2} + \frac{1}{2} B_{CP-O_2} - B_{CP-H_2O} \quad (\text{II-6})$$

$$\Delta C_{CP} = C_{CP-H_2} + \frac{1}{2} C_{CP-O_2} - C_{CP-H_2O} \quad (\text{II-7})$$

$$\Delta D_{CP} = D_{CP-H_2} + \frac{1}{2} D_{CP-O_2} - D_{CP-H_2O} \quad (\text{II-8})$$

À partir des données du Tableau .II.1. Les valeurs des enthalpies, enthalpies libres de Gibbs standard et coefficients de chaleur spécifique des gaz qui réagissent dans une cellule d'électrolyse ou nous pouvons déterminer l'enthalpie de réaction (VI-9) et l'entropie (VI-10) aux conditions opératoires fixées dans la cellule [29].

$$\Delta H_r = \Delta H_r^0 + R [\Delta A_{CP} (T - T^0) + (\Delta B_{CP} / 2) * (T^2 - T^{02}) + (\Delta C_{CP} / 2) * (T^3 - T^{03}) - \Delta D_{CP} / (T - T^0)] \quad (\text{II-9})$$

$$\Delta S_r = \Delta S_r^0 + R [\Delta A_{CP} \log(T / T^0) + (\Delta B_{CP}) * (T - T^0) + (\Delta C_{CP} / 2) * (T^2 - T^{02}) - \Delta D_{CP} / (T^2 - T^{02})] \quad (\text{II-10})$$

Où **R** : Constante des gaz parfait (**R**= 8.3144 J/mole °K).

Tableau .II.1. Valeurs des enthalpies, enthalpies libres de Gibbs standard et Coefficients de chaleur spécifique des gaz qui réagissent dans une cellule d'électrolyse [29].

Gaz	Enthalpie de formation standard J/mol	Enthalpie libre de formation standard J/mol	Coefficients de la chaleur spécifique $C_p/R = A+BT+CT^2+DT^{-2}$			
			A	B	C	D
Eau "état gazeux"	-241 808	-228 572	3.470	$1.45 \cdot 10^{-3}$	0	$0.121 \cdot 10^5$
Hydrogène	0	0	3.249	$0.422 \cdot 10^{-3}$	0	$0.083 \cdot 10^5$
Oxygène	0	0	3.639	$0.56 \cdot 10^{-3}$	0	$-0.227 \cdot 10^5$

II.2.3.2. Energie minimale d'électrolyse

Dans les conditions réversibles, il existe une relation d'équivalence entre l'énergie électrique W absorbée par la cellule d'électrolyse et la variation d'énergie libre ΔG :

L'énergie électrique W est liée à la tension minimale réversible d'électrolyse U_R par la relation :

$$W = Z * F * U_R = - \Delta G \quad (\text{II-11})$$

Z : nombre d'électrons mis en jeu égale à 2 ;

F : constante de Faraday égale à 96487 C/ mole = 26.8A.h/mole.

L'enthalpie libre ΔG permet d'écrire :

$$- \Delta G = Z * F * U_R \quad (\text{II-12})$$

Finalement, pour produire une mole d'hydrogène, la quantité d'énergie apportée sous forme électrique U_R correspondant à l'enthalpie libre de Gibbs est déterminée sous forme de tension (Volts). Ce qui donne l'expression de la tension minimale réversible exprimée comme suit :

$$U_R = - \Delta G / (Z * F) \quad (\text{II-13})$$

II.2.3.3. Caractéristique

La cinétique d'électrolyse à haute température peut être modélisée par l'emploi de relations empiriques courant tension. Faisant partie d'une nouvelle technologie, la documentation sur la modélisation des électrolyseurs à vapeur à haute température est difficilement accessible ; nous avons cependant trouvé dans la littérature différentes courbes caractéristiques $U = f(I)$ en fonction de la température du service, par exemple la courbe présentée ci-dessous est proposée par P. Aujollet:

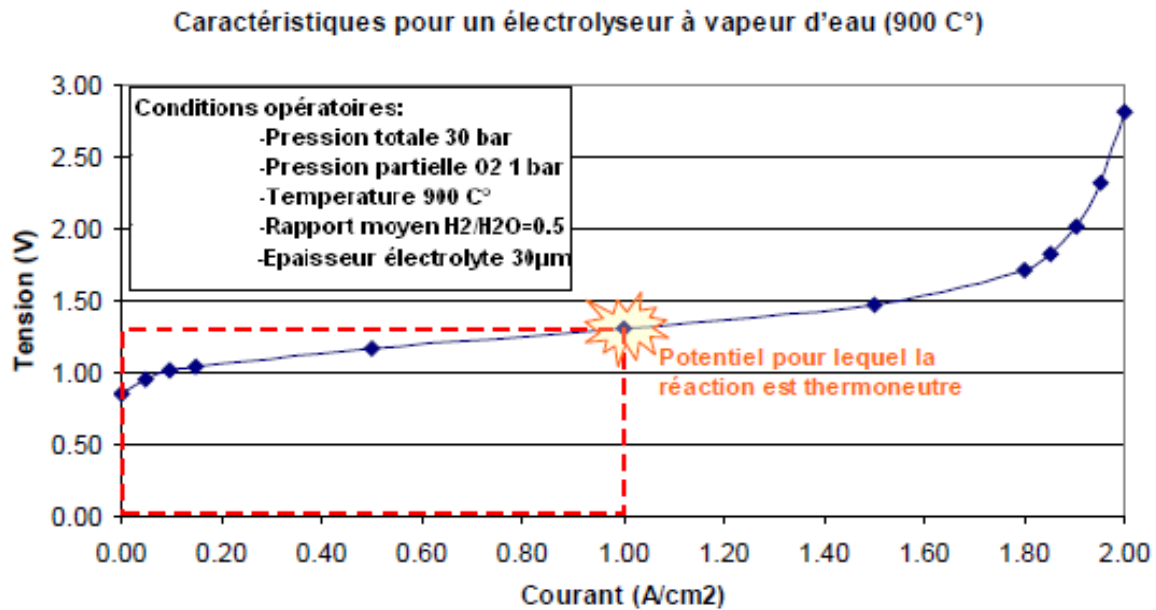


Figure.II.3. Variation de la tension en fonction de la densité du courant pour un électrolyseur à vapeur d'eau.

D'où nous pouvons tirer l'expression suivante :

$$U_E = f(I)$$

$$U_E = a I / A_E + b \quad (\text{II-14})$$

A partir de la Figure. II.3. les valeurs des constantes trouvées sont : **a= 0.32 et b = 1.025**

Ce qui nous permet d'écrire :

$$U_E = 0.32 I / A_E + 1.025 \quad (\text{II-15})$$

U_E : Tension appliquée aux bornes des électrodes [V] ;

I : L'intensité du courant traversant les électrodes [A] ;

A_E : Surface des électrodes [cm²].

La tension réversible (minimale) à appliquer aux bornes des électrodes est égale à **1.025V**. Cette valeur peut être vérifiée en utilisant l'équation (II-13).

Comme nous la montre la figure II.3. Une tension plus importante doit être appliquée pour pouvoir générer l'hydrogène. Aussi, la tension thermo-neutre d'une valeur de **U_{thermoneutre} = 1.3 V** correspond au fonctionnement de l'électrolyseur. Elle est donnée par $\Delta H / (n \cdot F)$.

Cette tension est appliquée dans le but de réaliser un procédé d'électrolyse dans des conditions adiabatiques sans changement de température de l'électrolyte, $U_{\text{thermo-neutre}}$ étant la tension imposée à la cellule.

II.2.3.4. Simulation de la production d'hydrogène

La masse m [kg] du gaz d'hydrogène produit à la cathode (dans le cas idéal) est, quant à lui, proportionnelle à la quantité de courant ayant traversé la cellule, à la masse atomique M de l'hydrogène et inversement proportionnelle à la valence n de celui-ci :

$$m_{\text{H}_2} = (1/F) * (M/n) * I * t \quad (\text{II-16})$$

t : est le temps en (s).

La production réelle étant inférieure, le rapport entre la production réelle et idéale est appelé rendement de courant ou rendement faradique η_f , qui dépend exclusivement de l'importance des réactions secondaires ou parasites et non des surtensions. L'expression de la **masse d'hydrogène** produite m devient alors :

$$m_{\text{H}_2} = (1/F) * (M/n) * I * t * \eta_f \quad (\text{II-17})$$

En termes de **débit**, cette dernière expression s'écrit :

$$m_{\text{H}_2} = (m_{\text{H}_2}/t) = (1/F) * (M/n) * I * \eta_f \quad (\text{II-18})$$

En posant : $K = F * (n/M) = 96487000$ ($M = 10^{-3}$ Kg/mole, $n = 1$) pour un débit d'hydrogène donné, l'intensité du courant nécessaire à sa production devient :

$$I = (96487000 * m_{\text{H}_2}) / \eta_f \quad (\text{II-19})$$

A partir de l'abaque des caractéristiques de l'électrolyseur, nous pouvons déterminer la valeur de la densité de courant J (A/cm²) correspondant à la tension thermo neutre. Ainsi, la surface des électrodes A_E sera calculée comme suit :

$$A_E = I / J \quad (\text{II-20})$$

L'énergie globale d'électrolyse W (en W) s'exprime en fonction de la tension réelle U (en V) et de l'intensité I (en A) par l'expression suivante :

$$W = U * I \quad (\text{II-21})$$

La puissance nécessaire pour l'électrolyse de l'eau est donnée par la relation :

$$W = U_{\text{thermo-neutre}} * I \quad (\text{II-22})$$

En remplaçant la valeur de I issue de la relation (II-19) dans l'équation précédente, l'expression de la puissance W devient alors :

$$W = (96487000 * U_{\text{thermo-neutre}} * m_{\text{H}_2}) / \eta_f \quad (\text{II-23})$$

Si les cellules d'électrolyses sont alimentées par un débit de vapeur $m_{\text{H}_2\text{O}}$ en (kg/s), la quantité d'hydrogène produite est donnée par la relation suivante :

$$m_{\text{H}_2} = m_{\text{H}_2\text{O}} / 9 \quad (\text{II-24})$$

La puissance nécessaire [W] pour l'électrolyse d'un débit de vapeur d'eau $m_{\text{H}_2\text{O}}$ est donc :

$$W = (10720778 * U_{\text{thermo-neutre}} * m_{\text{H}_2\text{O}}) / \eta_f \quad (\text{II-25})$$

II.2.4. Simulation de l'unité de production de la vapeur

Nous avons élaboré le schéma suivant afin de détailler le positionnement et le fonctionnement des différents éléments qui constituent cette installation :

Le principe de fonctionnement de l'unité est le suivant :

Les capteurs sont orientés automatiquement vers le soleil à l'aide d'un système de poursuite. Dans le circuit primaire le fluide caloporteur circule grâce à une pompe entre les capteurs et le réservoir de stockage. Entre temps, la pompe du circuit secondaire fait circuler l'eau depuis le réservoir jusqu'à l'échangeur de chaleur (générateur de vapeur) ou elle emprunte la chaleur au fluide caloporteur HTF. La vapeur d'eau peut atteindre au maximum 400°C.

On supposera que l'alimentation de l'installation en eau se fait à l'aide d'un réservoir d'appoint à l'état '0' avec un débit nominal $m_0=1\text{kg/s}$ et à température et pression atmosphérique.

L'eau sort du réservoir avec un débit m_1 puis rentre dans une chaudière solaire où il subit un échange de chaleur avec le fluide caloporteur qui traverse le concentrateur solaire (sa température augmente), nous obtenons la vapeur surchauffée (30 bars, 300 °C) avec un débit m_2 .

La détente de la vapeur surchauffée de débit m_2 traverse la turbine va créer une puissance mécanique (un travail W) ; qui va être utilisée pour faire fonctionner le compresseur qui fournit de la vapeur d'eau à l'électrolyseur.

A la sortie de la turbine après détente on obtient un mélange de liquide saturé + vapeur saturé, on les regroupe pour former un débit m_2' (1atm, 100°C). On sépare le liquide de la vapeur ; le liquide saturé avec un débit m_3' est recyclé vers le réservoir d'appoint.

Il nous reste donc de la vapeur saturée avec un débit m_3 , on sélectionne un débit $m_6=1\text{kg/s}$ qui va alimenter le compresseur par la suite, et le reste va vers le réservoir d'appoint après condensation.

Notre vapeur saturée de débit m_3 va rentrer dans un réchauffeur solaire où il subit un échange de chaleur avec le fluide caloporteur qui circule à travers les concentrateurs solaires (il va être surchauffé).

Il en sort de la vapeur surchauffée (300°C) avec un débit de m_5 qui sera comprimée dans le compresseur. Cette vapeur surchauffée sera comprimée pour atteindre les propriétés thermodynamiques ($P=30\text{bar}$, $T=900^\circ\text{C}$) nécessaires à l'alimentation de l'électrolyseur.

L'électrolyseur alimenté en électricité, fournie par les modules photovoltaïques pour produit de l'hydrogène à partir de cette vapeur d'eau.

II.2.4.1. Le circuit d'eau

Les évolutions que subit l'eau depuis sa sortie du réservoir (état 1) jusqu'à l'entrée en électrolyseur (état 9) sont représentées sur les diagrammes élémentaires (PH) donnés plus bas dans ce chapitre. **Annexe 1.**

L'évolution **1→2** : Génération de la vapeur d'eau à travers la chaudière solaire ; l'eau passe de l'état liquide (1) à l'état vapeur surchauffée (2).

- 1) **L'état 1** de l'eau dans le réservoir, mêmes propriétés que l'état 0 ;
- 2) **L'état 2** vapeurs surchauffées jusqu'à la pression P_2 et la température T_2 .

Etats thermodynamiques de l'état 1 à 2. La chaleur nécessaire Q_{12} [kW] pour passer de l'état (1) à l'état (2) est :

$$Q_{12} = m_1 (h_2 - h_1) \quad (\text{II-32})$$

m_1 : Le débit d'eau à la sortie du réservoir [kg/s] ;

h_1 : l'enthalpie de l'eau à la sortie du réservoir [kJ/kg] ;

h_2 : l'enthalpie de la vapeur d'eau surchauffée à l'état 2 [kJ/kg].

L'évolution **2→2'** : représente la **détente supposée isentropique** ($2\rightarrow 2'S$), de la vapeur d'eau à travers la turbine. L'eau, à l'état **2'**, est un mélange de vapeur (état 3) et de liquide (état 3').

- ✓ Point 2 vapeur surchauffée a $P_2 = 30\text{bar}$ et $T_2=300^\circ\text{C}$
- ✓ Point 2'un mélange liquide + vapeur a pression et température constantes (à déterminer les propriétés de ce point).

Le travail fourni par la turbine (groupe de turbines) est :

$$W_{23} = m_2 (h_2 - h_3) \quad (\text{II-33})$$

m_2 : Le débit de la vapeur d'eau à l'état 2 [kg/s] ;

h_2' : l'enthalpie du mélange liquide +vapeur à l'état 2' [kJ/kg].

La détente isentropique de notre turbine ce fera jusqu'à atteindre la température et pression atmosphérique ($T=100^\circ\text{C}$; $P=1.0132\text{bars}$), on aura ainsi : $S_2's = S_2$ (**connue**).

Cette relation nous permet de calculer le débit m_2 : $m_2 = m_2'$

L'évolution 4→5 : Réchauffeur solaire (sur chauffage) de la vapeur d'eau à travers un réchauffeur solaire qui travaille sous des conditions états 4 et 5 déterminées.

La chaleur nécessaire Q_{45} [kW] au réchauffage est égale :

$$Q_{45} = m_4 (h_5 - h_4) \quad (\text{II-34})$$

m_4 : Le débit de la vapeur d'eau à l'état 4 [kg/s] ;

h_4 : l'enthalpie de la vapeur d'eau à l'état 4 [kJ/kg] ;

h_5 : l'enthalpie de la vapeur d'eau surchauffée à l'état 5 [kJ/kg].

L'évolution 5→6 : Compression supposé isentropique, de la vapeur d'eau de l'état 5 à l'état 6 qui désigne les conditions de fonctionnement des cellules d'électrolyses (conditions imposées).

Le travail nécessaire pour assurer cette compression est :

$$W_{56} = m_5 (h_6 - h_5) \quad (\text{II-35})$$

Où :

m_5 : Le débit de la vapeur surchauffée à l'état 5 [kg/s] ;

h_6 : représente l'enthalpie de la vapeur d'eau surchauffée aux conditions T_6 et P_6 (conditions de fonctionnement des cellules d'électrolyses) [kJ/kg].

h_5 : représente l'enthalpie de la vapeur d'eau surchauffée. Elle est limitée par le type de l'échangeur solaire utilisé [kJ/kg].

II.2.4.2. Le circuit du fluide caloporteur

L'installation de production de vapeur et d'électricité possède deux générateurs de chaleur (la chaudière solaire et le réchauffeur solaire), ce qui nécessite deux circuits des fluides caloporteurs :

- ✓ Le premier alimente la chaudière solaire de puissance Q_{12} .
- ✓ Le second alimente le réchauffeur solaire de puissance Q_{45} .

Chaque générateur est alimenté par le fluide caloporteur provenant d'un groupe des concentrateurs solaire. La chaleur cédée par le fluide caloporteur du circuit primaire est absorbée par l'eau qui est donc pour la chaudière solaire la puissance débitée est de Q_{12} . Cette chaleur est correspond à la puissance utile qui doit être délivrée par la chaudière solaire.

Dans notre cas, c'est un ensemble de concentrateurs cylindro Paraboliques. L'expression de cette puissance est donnée par :

$$Q_U = \eta_0 I_b A_c - U_c (T_c - T_a) a \quad (\text{II-36})$$

η_0 : le rendement optique du capteur, il est donné par la figure.

Le terme « $U_c (T_c - T_a) a$ » représente les pertes thermiques de l'absorbeur par conduction, convection et rayonnement.

Donc, la puissance utile devient :

$$Q_U = \eta_0 I_b A_c - q_{\text{perte}} \quad (\text{II-37})$$

II.2.4.3. Concentrateurs solaires : procédure de modélisation

Dans notre installation, nous prévoyons l'utilisation de concentrateurs cylindro-paraboliques qui possèdent des absorbeurs sous vide. Ce qui nous permet de négliger les pertes thermiques par conduction et par convection.

Dans le cas d'un dimensionnement théorique de notre installation et en prenant en considération l'effet de serre produit par l'enveloppe vitrée de l'absorbeur sous vide, opaque aux rayonnement infrarouges de grandes longueurs d'ondes émis par l'absorbeur, les pertes thermiques par rayonnement peuvent être aussi négligées. Ce qui permet d'écrire la relation sous la forme :

$$Q_U = \eta_0 I_b A_c \quad (\text{II-38})$$

Suivant le même raisonnement, la chaleur nécessaire au réchauffage de l'eau est donnée par la relation suivante :

$$W_{45} = m_4 (h_5 - h_4) = \eta_0 I_b A_{c45} \quad (\text{II-39})$$

La surface totale (m^2) des concentrateurs cylindro paraboliques de l'installation est donc :

$$A_c = A_{c12} + A_{c45} \quad (\text{II-40})$$

Selon la surface unitaire A_U choisie, il est possible de déterminer le nombre de concentrateur approprié (N) :

$$N = A_C / A_U \tag{II-41}$$

La surface de chaque absorbeur (S_a) (m^2) est donnée par la relation :

$$S_a = A_U / C \tag{II-42}$$

C : est la concentration du rayonnement solaire (figure), choisie en fonction de la température imposée du fluide de travail et du rendement de conversion désiré.

La figure II.4. Nous donne la variation du rendement de conversion rendement, en fonction de la température de l'absorbeur, pour certaines valeurs de Concentration :

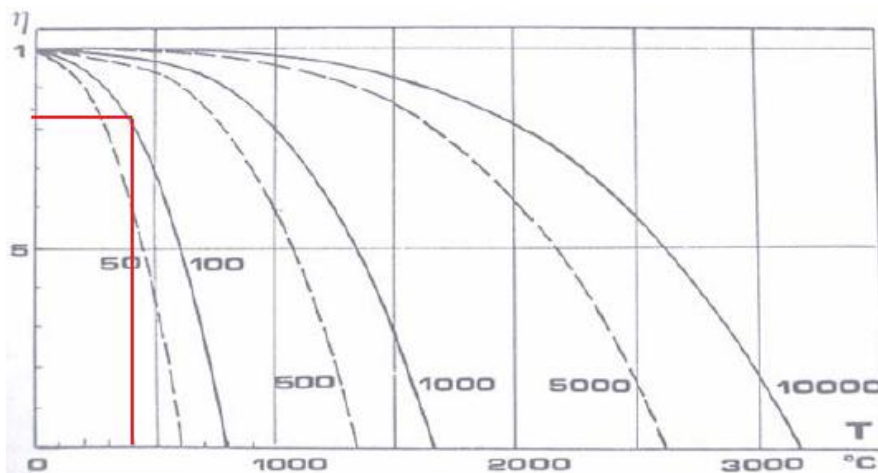


Figure. II.4. Variation de rendement en fonction de Température ($^{\circ}C$) et la Concentration.

II.2.5. Simulation de la production d'électricité par les cellules photovoltaïques

Le schéma électrique équivalent à une cellule photovoltaïque est représenté par la Figure.II.5. Ce circuit est constitué d'une source de courant et d'une diode montée en parallèle. 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.

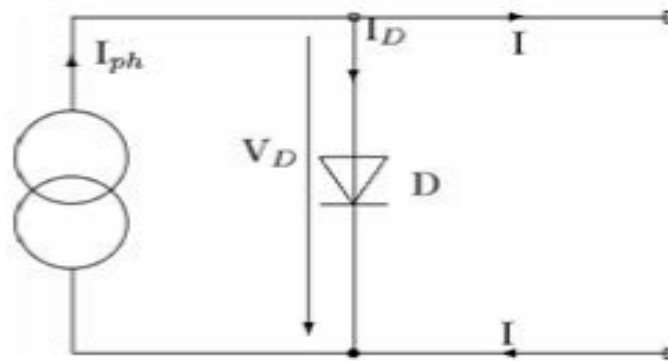


Figure.II.5. Schéma électrique équivalent d'un panneau photovoltaïque

Le courant I, délivré par la cellule photovoltaïque s'écrit comme suit :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{eV}{mkT}} - 1 \right) \quad \text{(II-43)}$$

I : courant délivré par la cellule ;

I_{ph} : Photo courant ;

I_0 : Courant obscurité « de saturation » de la diode ;

m : Facteur d'idéalité de la diode ;

k : Constante de Boltzmann = $1.38 * 10^{-23}$ J/K ;

e : La charge d'un électron = $1.062 * 10^{-19}$ As ;

T : Température absolue de la cellule photovoltaïque °K.

La puissance étant le produit de la tension par le courant, son expression dans le cas de Notre système est donc :

$$P = V * [I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{eV}{mkT}} - 1 \right)] \quad \text{(II-44)}$$

L'organigramme pour tracer la caractéristique « I - V ». **Annexe 2.**

II.2.5.1. Le dimensionnement de l'unité de production d'électricité réside en la détermination

Le dimensionnement de l'unité de production d'électricité réside en la détermination du nombre des panneaux photovoltaïques, ainsi que leurs connections. Il dépend des caractéristiques de l'appareil consommateur d'électricité qui est dans notre cas l'électrolyseur de la vapeur d'eau à très haute température.

Le générateur photovoltaïque est constitué de plusieurs modules qui peuvent être reliés en série et / ou en parallèle selon la puissance requise. Le module solaires utilise dans notre système sont de type black module monocristalline **ET-M572190BB**. Et qui possèdent les caractéristiques présentées dans le Tableau .II.2.

Tableau .II.2. Représente les caractéristiques de module

Puissance maximale	190	W
Tension maximale	36.68	V
Courant maximale	5.18	A
Courant de cours circuit	5.56	A
Tension de cours circuit	45.21	V
NOTC	44.4	°C
Rendement de module	14.88	%
Coefficient de température de courant	0.02	A/°C
Coefficient de température de Tension	-0.31	V/°C
Coefficient de température de puissance max	-0.44	
Nombres de cellules	72	

Les caractéristiques de l'électrolyseur sont données principalement par ce qui suit :

- ✓ La puissance nécessaire pour l'électrolyse de l'eau W , en watt ;
- ✓ La tension à appliquer aux bornes de la cellule $U_{\text{thermo-neutre}}$, en volt ;
- ✓ Le courant délivré I , en ampère.

II.2.5.1.1. Estimation du nombre des modules photovoltaïque

Le nombre des modules nécessaire N_m pour le générateur photovoltaïque est le rapport entre la puissance du champ requis et la puissance unitaire du module.

$$N_m = \frac{W}{P_{\max}} \quad (\text{II-46})$$

II.2.5.1.2. Estimation du nombre des modules photovoltaïque en série

Elle consiste à évaluer le nombre des modules en série dans chaque branche $N_{m\text{-série}}$. Cette configuration est déterminée en fonction de la tension de travaille du système et la puissance optimale.

$$N_{m\text{-série}} = \frac{V_t}{V_m} \quad (\text{II-47})$$

V_m : La tension des modules au point de la puissance maximale ;

V_t : Tension de travaille du système photovoltaïque ;

$N_{m\text{-série}}$: nombre de modules en série dans chaque branche.

II.2.5.1.3. Estimation du nombre des modules photovoltaïque en parallèle

Le nombre des modules photovoltaïque qui est on parallèle $N_{\text{paralleles}}$ et donné par la relation Suivante :

$$N_{\text{m-paralleles}} = N_{\text{m}} / N_{\text{m-série}} \quad (\text{II-48})$$

RÉSULTAT

ET

DISCUSSION

III.1. Méthodologie de résolution

Une fois les équations fondamentales nécessaires à la simulation des différentes parties de l'installation de production de l'hydrogène par voie solaire (centrale de production de vapeur à haute température, le champ des modules photovoltaïques, l'électrolyseur de vapeur à haute température), sont établies, on procède aux applications numériques qui nous permettent de déterminer les performances de notre installation. Cette étape sera consacrée aux :

- ✓ dimensionnement de l'installation de production d'hydrogène par énergie solaire.
- ✓ Faire une estimation du taux de production d'hydrogène par cette installation sur quelque site en Algérie dans le but de connaître les conditions les plus favorables pour une meilleure production

III.2. Calculs thermodynamiques aux différents points de l'installation

III.2.1. Calcul des puissances de l'installation

- ✓ La puissance nécessaire à la compression W_{56} [kW]
- ✓ La puissance du réchauffeur solaire Q_{45} [kW]
- ✓ La puissance de la chaudière solaire Q_{12} [kW]

III.2.1.1. La puissance de la chaudière solaire Q_{12}

Elle est donnée par l'équation

$$Q_{12} = m_1 (h_2 - h_1)$$

m_1 : Le débit d'eau à la sortie du réservoir [kg/s] ;

Remarque : $m_1 = m_2$

$$W_{22'} = W_{56}$$

De la relation suivante qui est tirée de l'équation :

$$m_2 (h_2 - h_{2'}) = m_4 (h_6 - h_5)$$

m_2 : Le débit de la vapeur d'eau qui alimente la turbine [kg/s] ;

m_4 : Le débit de la vapeur d'eau qui alimente le réchauffeur [kg/s] ;

h_6 : l'enthalpie de la vapeur d'eau surchauffée à l'état 6 [kJ/kg] ;

h_5 : l'enthalpie de la vapeur d'eau surchauffée à l'état 5 [kJ/kg] ;

h_2 : l'enthalpie de la vapeur d'eau surchauffée à l'état 2 [kJ/kg] ;

$h_{2'}$: l'enthalpie de l'eau (mélange liquide + vapeur) à la sortie des turbines [kJ/kg].

A. Calculer h_2' :

L'enthalpie de l'eau (mélange liquide + vapeur) à la sortie des turbines [kJ/kg], elle est donnée par la relation :

$$h_2' = x h_3 + (1-x) h_3'$$

h_2' : l'enthalpie de l'eau (mélange liquide + vapeur) à la sortie des turbines [kJ/kg] ;

h_3 : l'enthalpie de la vapeur saturée à la sortie de la turbine ;

h_3' : l'enthalpie du liquide saturée à la sortie de la turbine.

$$S_2' = x S_3 + (1-x) S_3'$$

$$S_2' = S_2 = x S_3 + (1-x) S_3' \quad \Longrightarrow \quad x = 0.87$$

S_2' : l'entropie de l'eau (mélange liquide + vapeur) à la sortie des turbines [KJ/Kg °C].

S_3 : l'entropie de la vapeur saturée à la sortie de la turbine [KJ/Kg °C] ;

S_3' : l'entropie du liquide saturée à la sortie de la turbine [KJ/Kg °C] ;

x : Le titre à la sortie de la turbine, il est déterminé à partir de la relation.

B. Calculer m_1 :

Le débit d'eau à la sortie du réservoir [kg/s] ; il est calculé à partir du bilan thermique du groupe turbines et séparateur :

$$m_1 = m_2 = [m_4 (h_6 - h_5)] / (h_2 - h_2')$$

m_4 : Débit de vapeur qui alimente l'électrolyse ;

h_6 : l'enthalpie de la vapeur d'eau surchauffée à l'état 6 [kJ/kg].

h_5 : l'enthalpie de la vapeur d'eau surchauffée à l'état 5 [kJ/kg].

h_2 : l'enthalpie de la vapeur d'eau surchauffée à l'état 2 [kJ/kg].

h_2' : l'enthalpie de l'eau (mélange liquide + vapeur) à la sortie des turbines [kJ/kg].

C. Calculer h_1 :

L'enthalpie h_1 de l'eau à la sortie du réservoir [kJ/kg], est donnée par la relation :
Bilan du réservoir :

$$m_1 h_1 = m_0 h_0 + m_3' h_3' + m_4' h_4'$$

$$m_1 = m_0 + m_3' + m_4'$$

m_1 : Débit d'eau qui rentre à la chaudière solaire ;

m_0 : Débit d'eau qui rentre au réservoir d'eau ;

m_3' : Débit de liquide saturée qui rentre au réservoir d'eau ;

m_4' : Débit de la vapeur saturée qui rentre au réservoir d'eau.

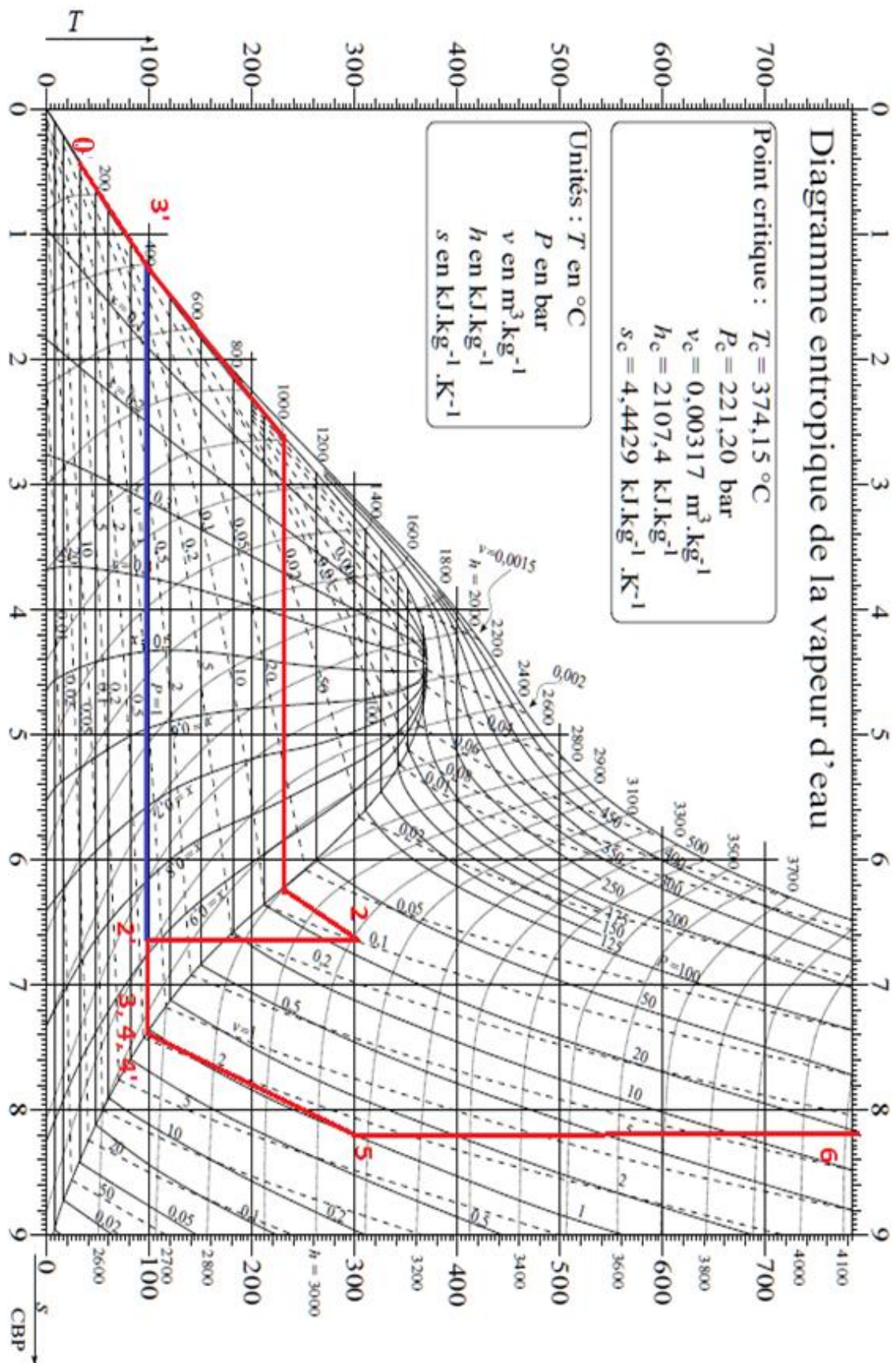


Figure .III.1. Diagramme T-S de la vapeur d'eau à travers l'unité de production de vapeur.

Les résultats des calculs permettant de déterminer les caractéristiques de l'eau, aux différents points du système, Ces derniers sont résumés dans le Tableau .III.1:

Tableau .III.1. Paramètres thermodynamiques du fluide aux différents points de l'installation.

Etat	Phase	T (°C)	P (bar)	h (kJ/kg)	S (KJ/Kg K)	m (Kg/s)
0	Liquide	30	1	125.08	-	1
1	Liquide	-	-	1189.44	-	2.14
2	Vapeur surchauffée	300	30	2993.5	6.5390	2.14
2`	Liquide Vapeur	100	1	2382.68	6.5390	2.14
3	Vapeur Sature	100	1	2676.1	7.28	1.86
3`	Liquide Saturé	100	1	419.04	1.24	0.278
4	Vapeur Sature	100	1	2676.1	7.28	1
4`	Vapeur Sature	100	1	2676.1	7.28	0.86
5	Vapeur surchauffée	300	1	3076.5	9.2813	1
6	Vapeur surchauffée	900	30	4385.9	8.1999	1

III.2.2.1. Détermination les déférentes puissances en « kW »

Tableau .III.2. Montre la déférence de puissance en « kW ».

La puissance da la chaudière solaire Q_{12}	La puissance da la chaudière solaire Q_{45}	La puissance nécessaire à la compression W_{56}
3860.69	400.4	1309.4

III.3. Calculer la surface des concentrateurs cylindro parabolique

Après une fois la fourniture de chaleur assurée par la chaudière et pour le réchauffeur par les concentrateurs solaire, ainsi que la vapeur d'eau à haute température et à haute pression sera disponible pour alimenter les cellules d'électrolyses.

III.3.1. Détermination des surfaces A_{12} , A_{45}

Les valeurs des surfaces des concentrateurs ne varient plus selon le site choisi car la valeur du rayonnement solaire moyenne direct par ciel clair incident sur les concentrateurs solaires $I_b = 500 \text{ (W/m}^2\text{)}$ est fixe sur le territoire national.

Les calculs sont faits comme suit :

Nous pouvons constater que le rendement optique (qui a un lien direct avec la production, donc au taux d'exploitation de l'installation) des concentrateurs cylindro paraboliques varie entre **0.80** et **0.90** a une concentration de 100. Dans notre étude, nous choisissons un rendement optique moyen de **85%** avec une concentration de **100**. Elle est déterminée par la figure.II.4.

Pour les concentrateurs, on prend comme surface unitaire A_u de **128.82 m²**. D'une longueur de **12 m** et d'une largeur de **5.77 m** et c'est des concentrateurs type « **euro-trough** ». Son des concentrateurs avec une bonne concentration optique ou elle est étudié par Michael Geyer, Eckhard Lüpfer et all.

III.3.1.1. Chaudière solaire

La surface totale des concentrateurs A_{C12} , nécessaire pour produire une puissance de Q_{12} est égale à :

$$A_{C12} = Q_{12} / (\eta_0 I_b) \quad \Longrightarrow \quad A_{C12} = 9083.97 \text{ m}^2$$

Le nombre de concentrateurs nécessaire pour la chaudière solaire et définie selon l'équation (II-40). Qui égale à **50 concentrateurs**

III.3.1.2. Réchauffeur solaire

La surface totale des concentrateurs A_{C45} , nécessaire pour produire une puissance de Q_{45} est égale à :

$$A_{C45} = Q_{45} / (\eta_0 I_b) \quad \Longrightarrow \quad A_{C45} = 942.11 \text{ m}^2$$

Le nombre de concentrateurs nécessaire pour le réchauffeur solaire qui est définie selon l'équation (II-40). Qui égale à **8 concentrateurs**

La surface de chaque absorbeur pour une concentration de 100 qui est calculée par la relation :

$$C = A_U / A_{abs} \quad \Longrightarrow \quad A_{abs} = 1.28 \text{ m}^2$$

III.4. Détermination la production d'électricité

La détermination consiste au dimensionnement du circuit des cellules photovoltaïques qui dépend essentiellement des caractéristiques des cellules d'électrolyse (courant-tension)

III.4.1. Détermination des caractéristiques des cellules d'électrolyse

L'intensité du courant qui traverse les cellules d'électrolyse dépend uniquement du débit d'hydrogène à produire. Ce dernier dépend directement du débit de vapeur d'eau d'alimentation produit par la centrale solaire.

En utilisant les équations (II-19 et II-24), nous obtenons :

$$I = 10720778 * m_{H_2O} / \eta_f$$

Pour un débit d'eau de **1kg/s** et un rendement faradique de **0.93%**, l'intensité du courant qui doit traverser les cellules d'électrolyses pour produire **0.11kg** d'hydrogène (équation II-24) est égale à :

$$I = 11.52 \text{ MA}$$

La tension à appliquer aux bornes des cellules d'électrolyses la tension thermo neutre donnée par la figure. II.3 est de :

$$U = 1.3V$$

Nous allons prendre une valeur du débit $m_{H_2O} = 1\text{kg/s}$. Toujours à l'aide de la figure. II.3, la valeur de la densité du courant qui correspond à la valeur thermo-neutre est de 1 A/m^2 . Nous savons que la puissance nécessaire pour l'électrolyse se calcule par la formule suivant :

$$W = U_{\text{thermo-neutre}} * I$$

D'après l'équation, la puissance nécessaire à l'électrolyse de la vapeur d'eau a pour valeur :

$$W = 14.98 \text{ MW}$$

A partir des valeurs de I et U et en utilisant l'abaque de l'électrolyse, figure.II.3, la surface des électrodes doit être logiquement égale à :

$$A_E = 11.52 \cdot 10^6 \text{ cm}^2$$

III.5. Dimensionnement des panneaux photovoltaïques

Le nombre des panneaux photovoltaïques nécessaires Le module solaires utilisés dans notre système sont de type black module monocristalline **ET-M572190BB** est égale à :

$$N_m = 7.88 \cdot 10^4$$

Le nombre des cellules dans une guirlande (en série) est :

$$N_{m\text{-série}} = 1$$

Le nombre de guirlandes montées en parallèle est :

$$N_{m\text{-parallèle}} = 7.88 \cdot 10^4$$

La surface nécessaire des panneaux photovoltaïques est approximativement de **100599,23 m²**.

III.6. Estimation du taux de production d'hydrogène

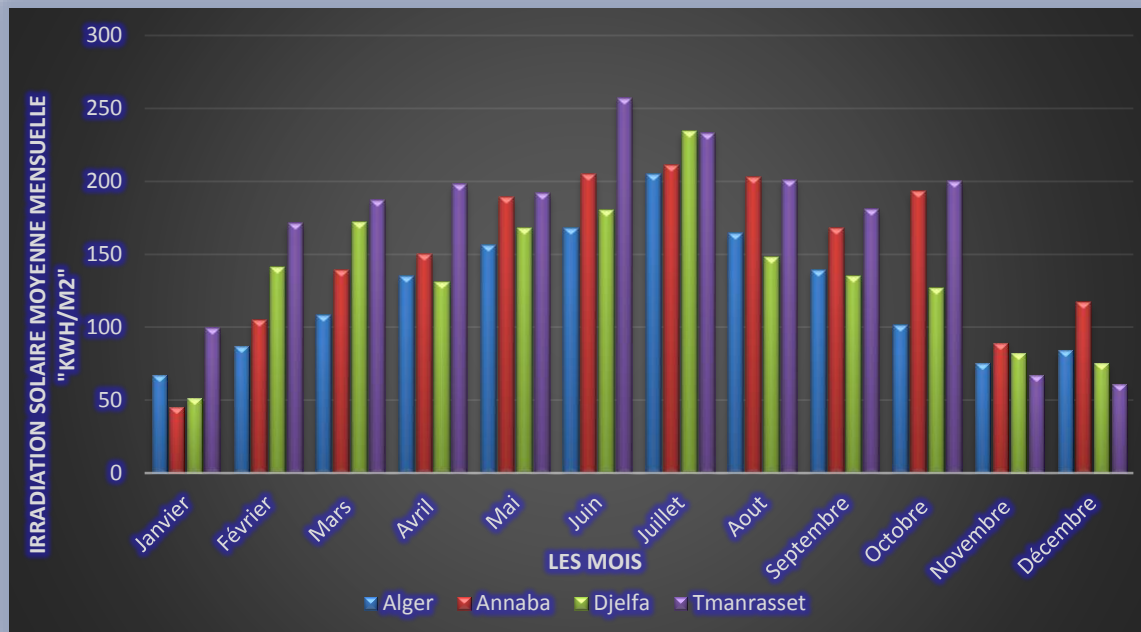
III.6.1. Irradiation solaire moyenne mensuelle sur plan horizontal

Les valeurs d'irradiation solaire moyenne captée par la surface entière des champs solaire est présentées dans le **Tableau III.3** qui nous permet de nous faire une idée sur le gisement solaire moyen mensuel en KWh/m²/mois pour quelques sites en Algérie. Les valeurs moyennes d'irradiation les plus importantes sont constatées au sud algérien, au mois de juin dans la wilaya de Tamanrasset.

Tableau .III.3: Irradiation solaire moyenne mensuelle sur l'horizontal « KWh/m² /mois».

<i>Le mois</i>	Alger	Annaba	Djelfa	Tamanrasset
<i>Latitude</i>	36,45	36,55	34,43	20,51
<i>Longitude</i>	3,00	7,46	3,17	4,01
<i>Altitude</i>	25	0	823	665
<i>Janvier</i>	67	45	51	99
<i>Février</i>	87	105	141	171
<i>Mars</i>	108	139	172	187
<i>Avril</i>	135	150	131	198
<i>Mai</i>	156	189	168	192
<i>Juin</i>	168	205	180	257
<i>Juillet</i>	205	211	234	233
<i>Aout</i>	164	203	148	201
<i>Septembre</i>	139	168	135	181
<i>Octobre</i>	101	193	127	200
<i>Novembre</i>	75	89	82	67
<i>Décembre</i>	84	117	75	61

Figure .III.2. Irradiation solaire moyenne mensuelle incident pour différent sites « KWh/m²/mois».



III.6.2 Puissance thermique moyenne mensuelle produite par les concentrateurs cylindro paraboliques

Les valeurs de la puissance thermique moyenne mensuelle qui est délivre par le champ solaire sont présentées dans le **Tableau III.4**. Les puissances thermiques fournies par les concentrateurs cylindro paraboliques qui ont pour but de produire de la vapeur d'eau au niveau de la chaudière et du réchauffeur solaire.

Les valeurs maximales sont enregistrées pendant le mois de Juin. Le site le plus intéressant pour l'installation des centrales solaires à concentrateurs cylindro paraboliques doivent être implantés au sud algérien dans la wilaya de Tamanrasset.

Tableau .III.4. Puissance thermique moyenne mensuelle produite par les concentrateurs cylindro paraboliques pour déferent sites « KW/mois».

<i>Le mois</i>	Alger	Annaba	Djelfa	Tamanrasset
<i>Janvier</i>	1917,49	1278,33	1470,08	2833,63
<i>Février</i>	2769,71	3323,65	4474,15	5411,59
<i>Mars</i>	3110,6	3962,81	4942,87	5347,67
<i>Avril</i>	4005,43	4452,84	3877,59	5859
<i>Mai</i>	4452,84	5411,59	4793,73	5496,81
<i>Juin</i>	4964,17	6072,05	5326,36	7584,74
<i>Juillet</i>	5880,31	6029,44	6711,22	6668,61
<i>Aout</i>	4687,2	5816,39	4239,79	5752,47
<i>Septembre</i>	4111,95	4964,17	4005,43	5347,67
<i>Octobre</i>	2876,24	5539,42	3621,93	5731,17
<i>Novembre</i>	2215,77	2620,57	2450,13	1981,41
<i>Décembre</i>	2407,52	3366,26	2151,85	1768,35

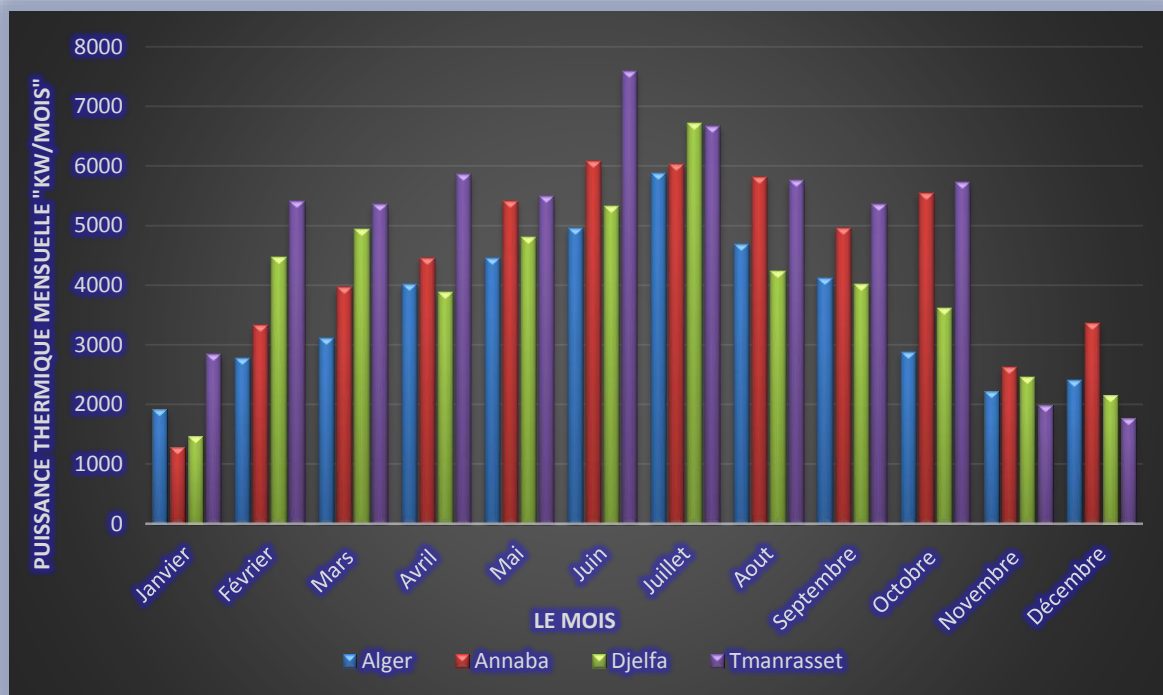


Figure III.3. Les puissances thermiques moyenne mensuelle fournies par les concentrateurs cylindro paraboliques pour différent sites « KW/mois».

III.6.3. Rayonnement global moyenne

Les valeurs de rayonnement global moyen sur le plan incliné à l’altitude de lieu qui est captée par la surface entière des panneaux photovoltaïques est présentées dans le **Tableau**

.III.5 qui donne une idée sur le rayonnement global moyenne en W/m^2 dans quelques sites en Algérie.

Tableau .III.5. Les valeurs rayonnement global moyennent pour différent sites « W/m^2 ».

<i>Le mois</i>	Alger	Annaba	Djelfa	Tamanrasset
<i>Janvier</i>	134	102	113	178
<i>Février</i>	178	200	237	270
<i>Mars</i>	207	233	262	275
<i>Avril</i>	236	247	225	289
<i>Mai</i>	249	264	248	270
<i>Juin</i>	255	278	258	299
<i>Juillet</i>	282	278	279	290
<i>Aout</i>	264	278	246	289
<i>Septembre</i>	247	266	232	284
<i>Octobre</i>	190	272	217	288
<i>Novembre</i>	146	161	156	150
<i>Décembre</i>	147	178	133	139

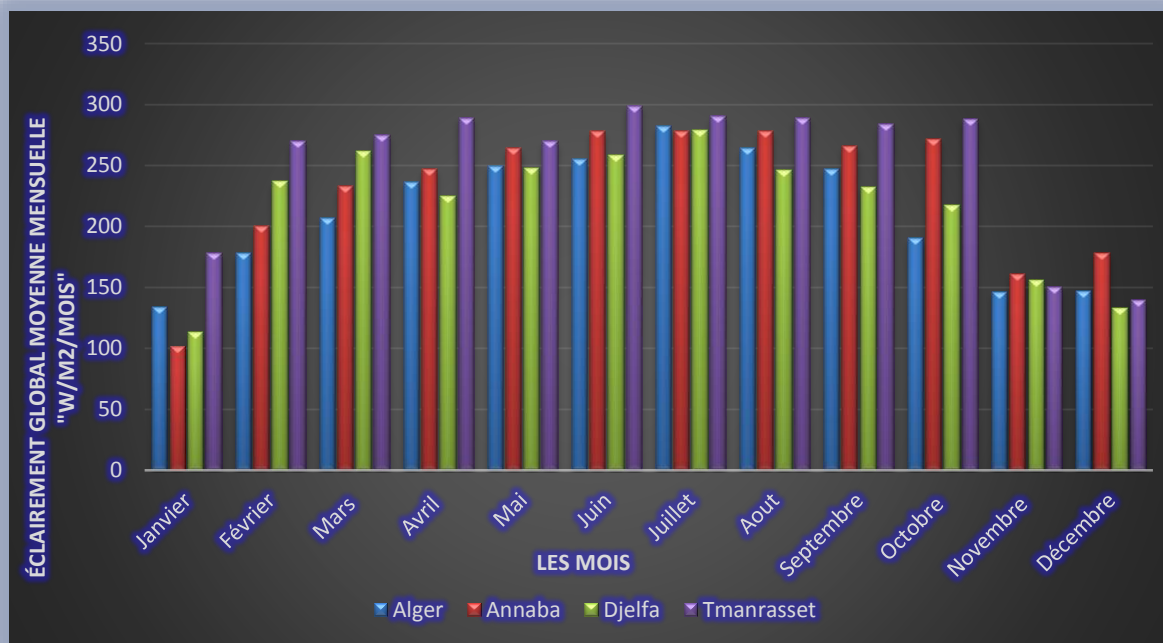


Figure .III.4. Eclairage global moyenne pour différent sites

III.6.4. Puissance électrique moyenne mensuelle fournie par les cellules Photovoltaïques « KW/mois »

Les valeurs présentées dans le **Tableau III.6** donnent les puissances maximales moyennes mensuelles fournies par les panneaux Photovoltaïques pour quelques sites en Algérie. Nous avons constaté que ces valeurs évoluent proportionnellement au rayonnement moyen solaire capté par les modules photovoltaïques pour chaque mois. Les valeurs maximales sont obtenues pendant le mois de juin dans la wilaya de Tamanrasset.

Tableau .III.6: Puissance électrique moyenne mensuelle fournie par les cellules Photovoltaïques « KW/mois ».

<i>Le mois</i>	Alger	Annaba	Djelfa	Tamanrasset
<i>Janvier</i>	1964,48	1475,92	1642,98	2627,19
<i>Février</i>	2643,74	2992,03	3573,58	4062,92
<i>Mars</i>	3094,476	3509,75	3967,58	4128,33
<i>Avril</i>	3546	3725,66	3374,216	4330,06
<i>Mai</i>	3741,42	3984,91	3726,452	4014,86
<i>Juin</i>	3824,95	4191,37	3865,928	4456,92
<i>Juillet</i>	4239,44	3390,764	4182,704	4321,39
<i>Aout</i>	3953,39	4177,18	3666,56	4315,87
<i>Septembre</i>	3694,93	4003,82	3462,47	4233,92
<i>Octobre</i>	2814,73	4113,36	3242,62	4311,14
<i>Novembre</i>	2140,99	2378,18	2300,17	2178,03
<i>Décembre</i>	2162,27	2647,68	1948,72	2021,22

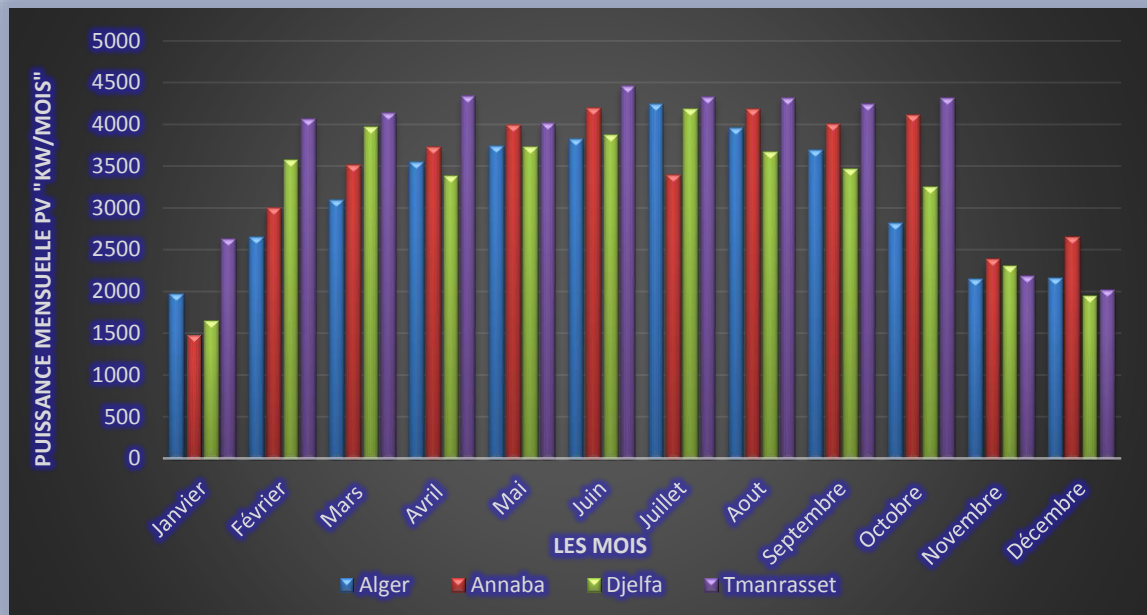


Figure .III.5. Puissances électriques moyenne mensuelle fournie par les cellules Photovoltaïques

III.6.5. Débit moyenne mensuelle d'hydrogène

Les valeurs indiquées dans le **Tableau III.7**, présentent les productions moyennes mensuelles d'hydrogènes en **Kg/mois** pour quelques sites en Algérie. Ces valeurs ne sont pas proportionnelles au rayonnement solaire ou la production est maximale à Alger pour le mois de juin.

Nous constatons dans ce tableau, l'influence de durée de jours et celle de rayonnement moyenne solaire qui ne varie pas beaucoup entre le nord et le sud. Ces résultats permettent d'avoir une estimation du débit moyenne mensuelle d'hydrogène produit par année au nord de pays.

Tableau .III.7. Débit moyenne mensuelle d'hydrogène produit « **Kg/mois** ».

Le mois	Alger	Annaba	Djelfa	Tamanrasset
Janvier	15931,26	11968,1	13458,68	23694,81
Février	21143,38	23926,65	28844,21	34615,87
Mars	30216,53	34268,37	38738,49	40649,63
Avril	36916,21	38783,02	34854,36	44034,41
Mai	43345,15	46161,74	42550,98	43186,57
Juin	44414,94	48665,23	44267,43	47465,91
Juillet	50167,22	40120,71	48799,03	46841,41
Aout	43837,99	46315,23	40350,22	45353,17
Septembre	36395,41	39434,38	34102,48	41022,58
Octobre	25854,5	37779,37	30050,32	41022,84
Novembre	17145,53	19043,2	18786,9	19184,54
Décembre	16998,45	20812,49	15640,73	17895,03

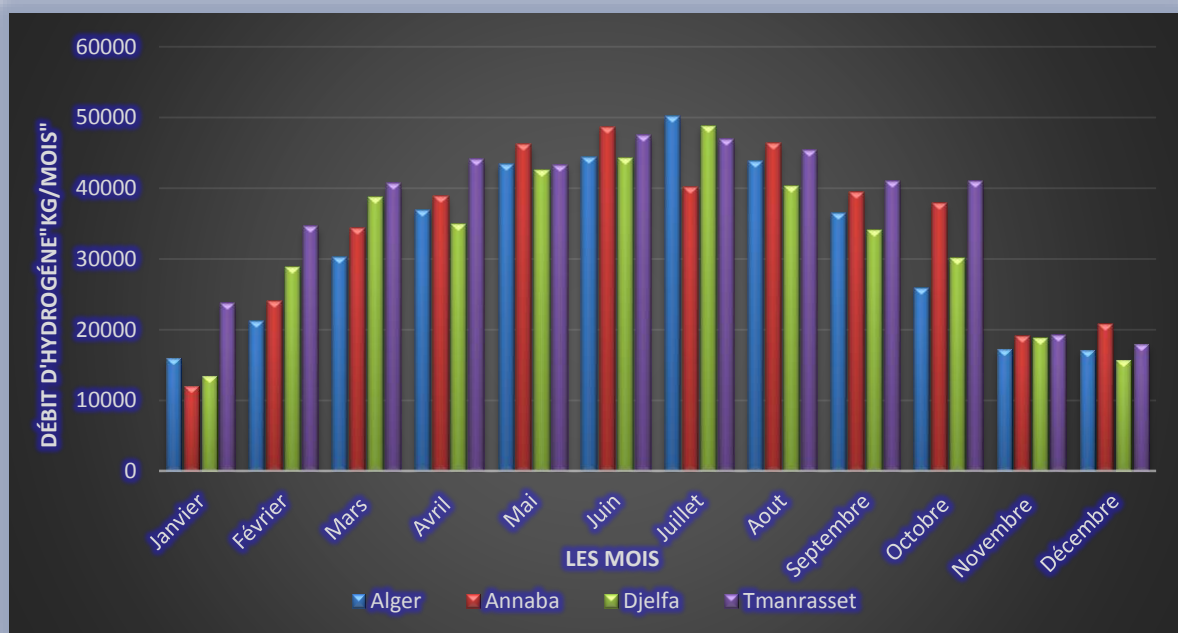


Figure .III.6. Débit mensuelle d'hydrogène produit pour différent sites « Kg/mois ».

III.6.6. Débit moyenne d'hydrogène

Les valeurs présentées dans le **Tableau .III.8**, montrent les productions d'hydrogènes pour quelques sites en Algérie en **Kg/h**. Les valeurs sont proportionnelles au rayonnement solaire.

Le débit d'hydrogéné maximale est enregistrées pendant le mois de Juin. En effet, le site le plus intéressant pour l'installation de cette centrale doit être implanté au sud Algérien dans la wilaya de Tamanrasset.

Tableau .III.8. Débit mensuelle d'hydrogène produit pour différent sites « **Kg/h** ».

<i>Le mois</i>	Alger	Annaba	Djelfa	Tamanrasset
<i>Janvier</i>	52,44	39,39	43,85	70,12
<i>Février</i>	70,57	79,86	95,38	108,45
<i>Mars</i>	82,6	93,68	105,9	110,19
<i>Avril</i>	94,66	99,44	90,06	115,58
<i>Mai</i>	99,87	106,36	99,46	107,16
<i>Juin</i>	102,1	111,87	103,19	118,96
<i>Juillet</i>	113,17	90,5	111,64	115,34
<i>Aout</i>	105,53	111,5	97,87	115,2
<i>Septembre</i>	98,63	106,87	92,42	113,01
<i>Octobre</i>	75,14	109,79	86,55	115,07
<i>Novembre</i>	57,15	63,48	61,4	58,13
<i>Décembre</i>	57,72	70,67	52,01	53,95

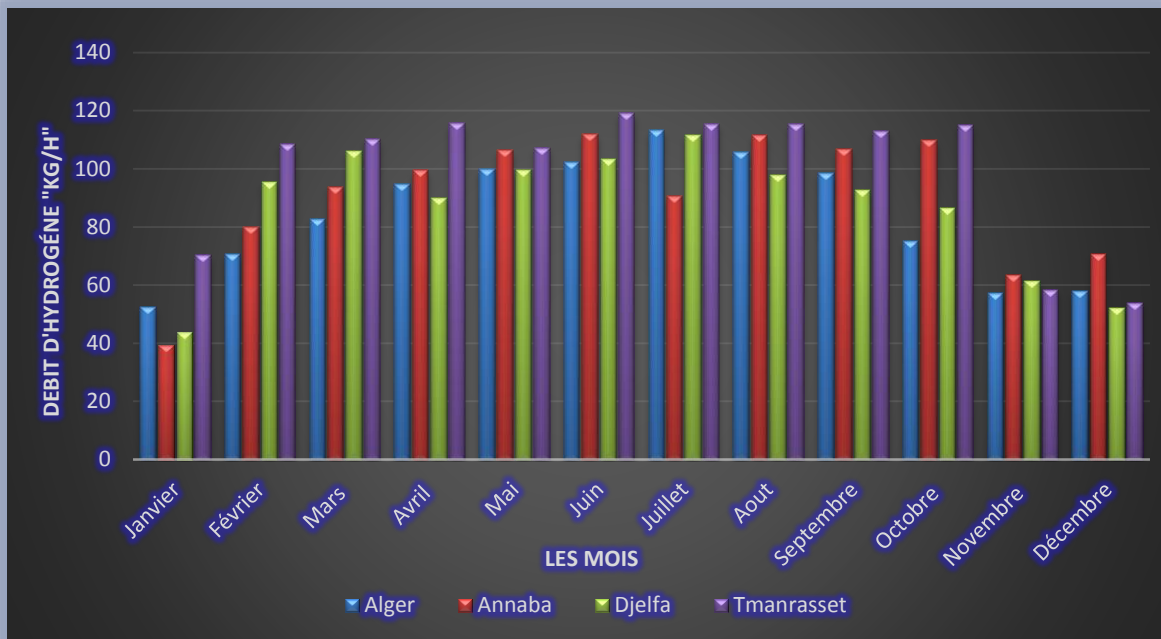


Figure .VII.7 : Débit mensuelle d’hydrogène produit pour différent sites « Kg/h ».

D’après les **Tableau .III.6.** Et **Tableau .III.4,** les puissances électrique et thermique générées par notre installation sont directement proportionnelles au rayonnement solaire dont l’intensité est maximale au sud algérien. Les valeurs de la production d’hydrogène les plus importantes sont évidemment détectées à Tmanrasset avec une quantité de production d’hydrogène au sud sont plus importantes. L’estimation de la production annuelle d’hydrogène au sud elle est d’ordre de **444966,77 Kg/an.**

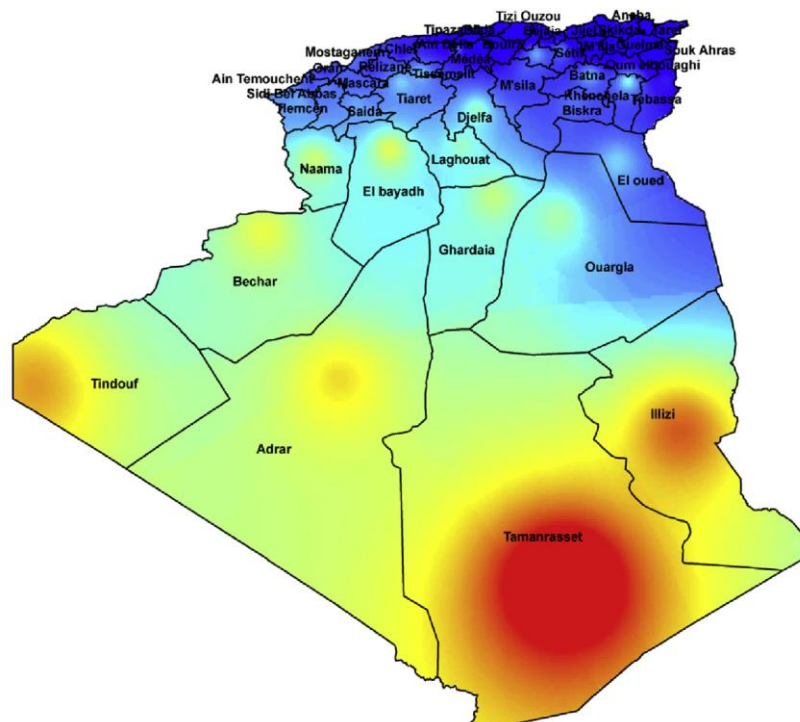


Figure .VII.8. Potentiel d'hydrogéné par solaire

III.7. Estimation des émissions de CO₂ pour une consommation électrique donnée, assurée par différentes sources d'énergie

Toutes les ressources d'énergies renouvelables et non-renouvelables sont envisagées pour permettre la production de l'hydrogène afin de satisfaire la demande en énergie sans estimer dans le futur environnemental de notre planète. Le Tableau ci-dessous indique les émissions de CO₂ en **KWh** d'énergie électrique produite pour différente source d'énergie [30]. Annexe 3.

Dans notre étude ou nous avons traité un électrolyseur à haute température pour la production d'hydrogéné d'une consommation moyenne d'énergie électrique est de **41681,53 KWh**, pour cette dernier la détermination des émissions de CO₂ qui est en fonction de chaque consommation, est indiqué au Tableau III.9.

Tableau III.9. Estimation des émissions de CO₂ pour une consommation de **41681,53 KWh**.

Technologie	Capacité/ Configuration / Carburant	Estimation emission « gr CO ₂ / KWh »	Émission de CO ₂ en “gr” pour une énergie de 41681,53 KWh
Eolien	2.5 MW « en mer »	9	375133,77
Hydroélectrique	3.1 MW « Réservoir »	10	416815,3
Eolien	1.5 MW « Terrestre »	10	416815,3
Biogaz	Méthanisation « Digestion Anaérobique »	11	458496,83
Hydroélectrique	300 KW « Courant du Fleuve »	13	541859,89
Solaire Thermique	80 MW « Cylindro Parabolique »	13	541859,89
Biomasse	Co-combustion « Bois Forestière avec le Charbon »	14	583541,42
Biomasse	Turbine à Vapeur « Bois Forestier »	22	916993,66
Biomasse	Court de Tailis a Rotation Co-combustion/ Charbon	23	958675,19
Biomasse	Moteur Réciproque / Bois Forest	27	1125401,31
Biomasse	Turbine à Vapeur « Déchets de Bois »	31	1292127,43
Solaire PV	Le Silicium Poly Cristallin	32	1333808,96

Biomasse	Turbine à Vapeur Coute Rotation Forestière	35	1458853,55
Géothermie	80 MW	38	1583898,14
Biomasse	Court Moteur Alternatif a la Foresterie de Rotation	41	1708942,73
Nucléaire	Divers Types de Réacteur	66	2750980,98
Gaz Naturel	Diverses Turbines à Cycle Combiné	433	18048102,5
Pile à Combustible	Hydrogéné à Partir de Gaz de Reformage	664	27676535,9
Diesel	Divers Types de Générateur et Turbine	778	32428230,3
Le Pétrole Lourd	Divers Types de Générateurs et Turbine	778	32428230,3
Charbon	Différents Types de Générateur à Récurer « avec Frottement »	960	40014268,8
Charbon	Différent Type de Générateur Sans Frotter	1050	43765606,5

Toutes les sources de production d'énergie, renouvelables ou non, ont un impact sur l'environnement souvent visible, comme pour central à charbon. Toutefois les énergies fossiles – charbon, pétrole et gaz naturel ont un impact plus important sur les émissions de CO₂ que les sources de production renouvelables.

Nous constatons, qu'il est plus intéressant d'utiliser des sources d'énergie d'origine renouvelable pour la production d'énergie électrique afin de minimiser les émissions de CO₂.

Conclusion

D'après les résultats obtenus, la production maximale d'hydrogène gazeux est d'ordre **400 kg/h** pour une électrolyse de l'eau à très haute température «900 °C, 30 bars ». L'alimentation énergétique des cellules d'électrolyses est assurée par conversion de l'énergie solaire hybride : thermique et photovoltaïque.

La conversion thermique est utilisée pour alimenter les cellules d'électrolyses par un débit de **1 kg/s** de vapeur d'eau à très hautes températures et de pression. Une centrale thermique est conçue par des concentrateurs solaires cylindro-paraboliques pour produire la vapeur d'eau à 1 bar et à 300 °C. Cette vapeur d'eau est ensuite comprimée grâce à un compresseur pour atteindre les conditions désirées de « 900 °C, 30 bars ». La puissance nécessaire pour la compression, est égale à 1.309 MW est fournie par un alternateur entraîné

par une turbine alimentée par la vapeur d'eau provenant des concentrateurs solaires. La puissance délivrée par cette centrale solaire thermique, est de l'ordre de 5.5 MW. Les concentrateurs cylindro paraboliques nécessaires sont au nombre de 78 concentrateurs et ils occupent approximativement une superficie de 1,0026 hectares.

La conversion photovoltaïque est utilisée pour alimenter les cellules d'électrolyses par la puissance électrique nécessaire qui est de l'ordre de 15 MW grâce à une centrale électrique à base de convertisseurs solaires photovoltaïques. Le champ des cellules solaires nécessite une superficie égale à 10,09 hectares. Les valeurs maximales de production annuelle d'hydrogène elle est d'ordre de **444966,77 Kg/an** (Tamanrasset).

Il est évident que le fonctionnement optimal de notre installation est étroitement lié aux conditions climatiques. L'installation doit être placée dans une localité à forte irradiation solaire de sorte qu'elle peut extraire le maximum de puissance.

CONCLUSION

GENERAL

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les problèmes écologiques qui sont liés aux énergies fossiles et nucléaires ainsi que la limitation des ressources, risquent le développement économique d'avenir de notre planète. Le système d'énergie basé sur l'hydrogène d'origine solaire a été proposé comme solution devant ces problèmes. Ce système permettrait de stopper l'effet de serre et favoriser une restitution de la qualité de l'atmosphère.

Nos raisonnements pour le mode de production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire sont très optimistes, car nous considérons qu'il mérite tout à fait sa place parmi les différents systèmes énergétiques existants. En effet, l'énergie solaire présente des avantages qui pourraient participer à sa généralisation dans un contexte de remise le réchauffement climatique.

L'étude du procédé électrolytique utilisé dans notre travail, a permis de bien comprendre le principe de l'électrolyse à haute température qui a pour avantage d'une moindre consommation électrique avec un rendement plus appréciable comparé aux autres dispositifs électrolytiques pour la même production d'hydrogène. Le procédé électrolytique sera peut-être considéré comme solution dans la recherche des nouvelles énergies renouvelables.

Nous constatons d'après les résultats obtenus, que la centrale solaire thermique à concentrateurs cylindro-paraboliques d'une puissance d'ordre **5.5 MW** pour produire **1 Kg/s** de vapeur d'eau à une température **900 °C** et une pression de **30 bars**, afin d'assurer les besoins en énergie thermique de l'électrolyseur,

La conversion photovoltaïque est utilisée pour alimenter les cellules d'électrolyses par la puissance électrique nécessaire qui est de l'ordre de **15 MW** grâce à une centrale électrique à base de convertisseurs solaires photovoltaïques. Les valeurs annuelles de production d'hydrogène est d'ordre de **444966,77 Kg/an** (Tamanrasset).

Le fonctionnement optimal de notre installation est étroitement lié aux conditions climatiques. L'installation doit être placée dans une localité à forte irradiation solaire de sorte qu'elle peut extraire le maximum de puissance.

Il faut noter à la fin que la filière d'hydrogène est certainement incontournable. Cependant, un travail important reste à faire au niveau des développements techniques, afin de pouvoir la confronter aux filières parallèles notamment celles qui prédominent les systèmes énergétiques actuels.

RÉFÉRENCE
BIBLIOGRAPHIE

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIE

1. Houcheng Zhang, Shanhe Su, Xiaohang Chen, Guoxing Lin, Jincan Chen, Configuration design and performance optimum analysis of a solar-driven high temperature steam electrolysis system for hydrogen production, 38 (4298-4307), 2013.
2. S. Koumi Ngoh, L.M. Ayina Ohandja, Alexis Kemajou, Louis Monkam, Design and simulation of hybrid solar high-temperature hydrogen production system using both solar photovoltaic and thermal energy, 2014.
3. N. Monnerie, H. von Storch, A. Houaijia, M. Roeb, C. Sattler, Hydrogen production by coupling pressurized high temperature electrolyser with solar tower technology, 2016.
4. J. Padin, T.N. Veziroglu, A. Shahin, Hybrid solar high-temperature hydrogen production system, 295-317, 2000.
5. Bouziane khadidja, «Etude d'une installation photovoltaïque de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau», 2011.
6. Fethi Amri, The relationship amongst energy consumption (renewable and nonrenewable), and GDP in Algeria, Renewable and Sustainable Energy Reviews 76 (62–71), 2017.
7. A Réserves minières d'uranium prouvées. Ne tiennent pas compte des réserves secondaires (stocks civils et militaires, uranium appauvri,...) qui comptent pour plus d'1/3 de la consommation actuelle.
8. Claude Lorius, Énergies et climat : quels enseignements pour le futur ?, 841–843, 2001.
9. Fateh Bélaïd, Meriem Youssef, Environmental degradation, renewable and non-renewable electricity consumption, and economic growth: Assessing the evidence from Algeria, Energy Policy 102 (277–287), 2017.
10. Bernard Multon, Gael Robin, Marie Ruellan, Hamid Ben Ahmed, Situation énergétique mondiale à l'aube du 3eme millénaire. Perspectives offertes par les ressources Renouvelables, 2012.
11. El Mezouar Farah, « Contribution à la Production D'Hydrogène par le Solaire Thermique », 2012.
12. Jean-Louis Bal, Bernard Chabot, Les énergies renouvelables. État de l'art et perspectives de développement, 827–834, 2001.
13. Petra Luňáčková, Jan Průša, Karel Janda, The merit order effect of Czech photovoltaic plants, Energy Policy 106 (138–147), 2017.
14. Rafika Boudriès, « Etude Technico-économique de la Production de l'Hydrogène Solaire en Algérie », 2009.
15. R. Boudries-Khellaf, Etude d'un Système de Production d'Hydrogène Solaire en Algérie, Rev. Energ. Ren. : Zones Arides 17-29, 2002.
16. Madjid si Brahim, Etude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base de la machine asynchrone, 2015.
17. L. Aïche-Hamane, M. Hamane and M. Belhamel, «Estimation of hydrogen production from different wind turbine sizes in the south of Algeria», Revue des Energies Renouvelables ICRESD-07 Tlemcen (129 – 134), 2007.
18. S.Bousalem, L.Aici, B.Benyoucef, «Etude d'un procédé de production d'hydrogène par énergie éolienne».
19. Sidi Mohammed Boudia, Abdelhalim Benmansour, Mohammed Abdellatif Tabet Hellal, Wind resource assessment in Algeria, 171–183, 2016.

RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIE

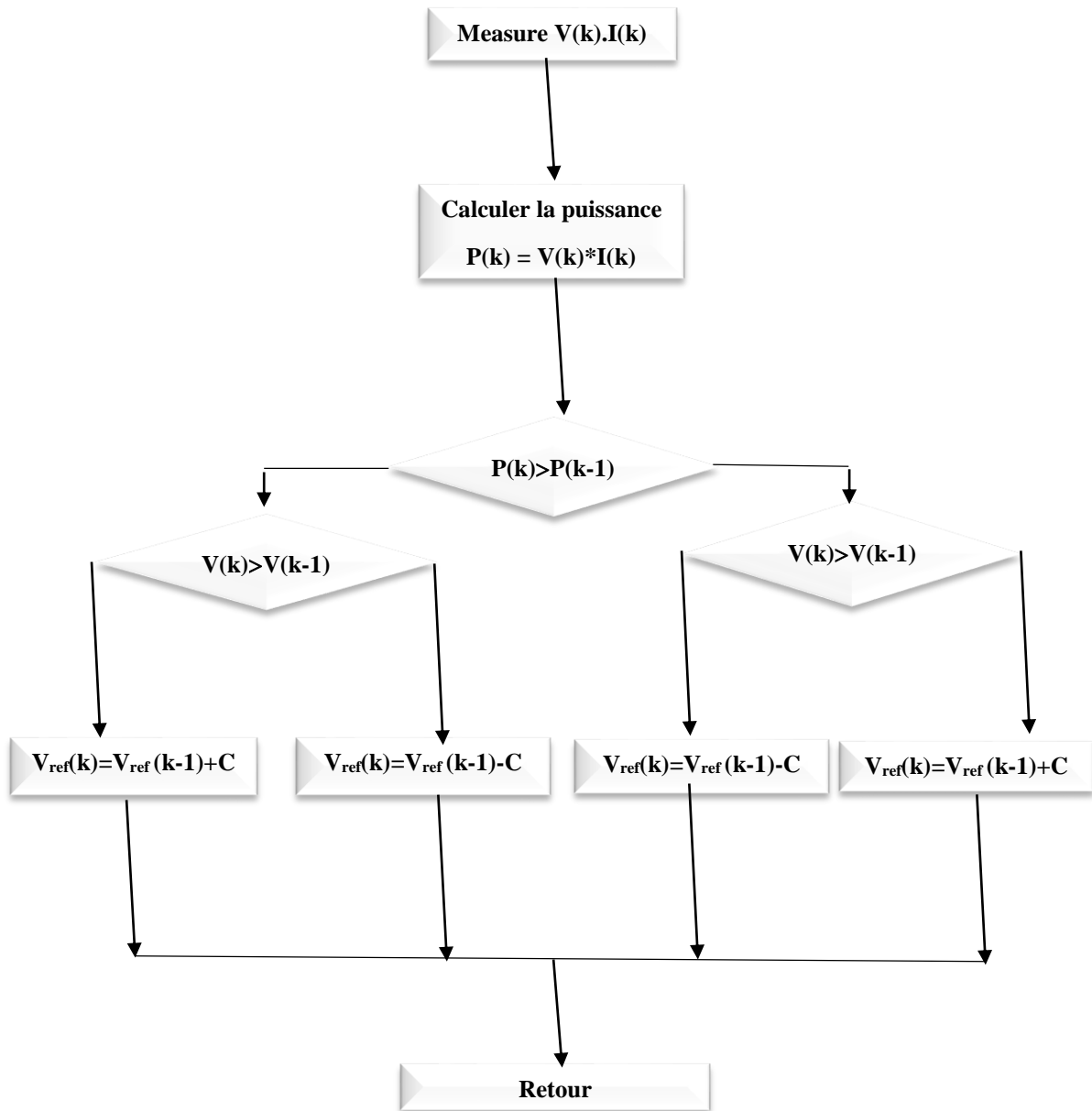
20. Faradji née Kherbouche Djamilia, Contribution à la valorisation énergétique de la Biomasse, 2011.
21. Nouredine Hajjaji, analyse de cycle de vie exégétique de systèmes de production d'hydrogène, 2011.
22. Amine Akbi, Meryem Saber, Majda Aziza, Nouredine Yassaa, An overview of sustainable bioenergy potential in Algeria, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72 (240–245), 2017.
23. Jean-Louis Bouvier, «Étude expérimentale d'un concentrateur solaire parabolique à génération directe de vapeur alimentant une centrale de micro-cogénération».
24. Nasreddine CHENNOUF, étude d'une installation de production d'hydrogène Solaire par électrolyse de l'eau dans la région d'Ouargla, Vol. 5, N° 1, 2013.
25. Kheridla Youcef et Khineche Kaddour, «Modélisation Et Simulation D'un Système De Production D'hydrogène Par Voie Photovoltaïque», 2014.
26. Amira Balaska, Ali Tahri, Fatima Tahri, Amine Boudghene Stambouli, Performance assessment of five different photovoltaic module technologies under outdoor conditions in Algeria, *RENE* 8496, 2016.
27. R. Eke, T.R. Betts, R., Gottschalg, Spectral irradiance effects on the outdoor performance of photovoltaic Modules, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69 (429–434), 2017.
28. Muhammed Arslan Omar, Kemal Altinisik, Simulation of hydrogen production system with hybrid solar collector, 2016.
29. Rodrigo Rivera-Tinoco, « Etude technico-économique de la production d'hydrogène à partir de l'électrolyse haute température pour différentes sources d'énergie thermique », 2009.
30. Benjamin K. Sovacool, Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey, *Energy Policy* 36 (2940– 2953), 2008.

ANNEXE

ANNEXE 1

ANNEXE N°2

L'organigramme pour tracer la caractéristique « I - V »



ANNEXE N°3

Tableau: Lifecycle estimation for electricity generators [45].

<i>Technology</i>	Capacity/ Configuration / Fuel	Estimate « g CO₂/ KWh »
<i>Wind</i>	2.5 MW « Offshore »	9
<i>Hydroelectric</i>	3.1 MW « Reservoir »	10
<i>Wind</i>	1.5 MW « Onshore »	10
<i>Biogas</i>	Méthanisation « Anaerobic Digestion »	11
<i>Hydroelectric</i>	300 KW « Run of River»	13
<i>Solar Thermal</i>	80 MW « Parabolic trough »	13
<i>Biomass</i>	Forest Wood Co-combustion With Hard Coal	14
<i>Biomass</i>	Forest Wood Steam Turbine	22
<i>Biomass</i>	Short Rotation Forestry Co-combustion With Hard Coal	23
<i>Biomass</i>	Forest Wood Reciprocating engine	27
<i>Biomass</i>	Waste Wood Steam Turbine	31
<i>Solar PV</i>	PolyCristalline Silicone	32
<i>Biomass</i>	Short Rotation Forestry Steam Turbine	35
<i>Géothermal</i>	80 MW, Hot Dry Rock	38
<i>Biomass</i>	Short Rotation Forestry Reciprocating Engine	41
<i>Nuclear</i>	Various Reactor Types	66
<i>Natural Gas</i>	Various Combined Cycle Turbine	433
<i>Full Cell</i>	Hydrogen From Gas Reforming	664
<i>Diesel</i>	Various Generator and Turbine Types	778
<i>Heavy Oil</i>	Various Generator and Turbine Types	778
<i>Coal</i>	Various Generator Types With Scrubbing	960
<i>Coal</i>	Various Generator Types Without Scrubbing	1050

ANNEXE N°4

Mois	Ta	Ta min	Ta dmin	Ta dmax	Ta max	RH
Janv.	9,6	-1,8	4,0	15,4	22,0	84
Fév.	10,7	-1,0	4,2	16,7	24,3	81
Mars	12,4	0,3	5,6	18,9	27,2	78
Avr.	14,8	1,9	7,6	20,8	27,2	75
Mai	18,0	5,5	11,7	23,5	29,9	74
Juin	21,6	9,5	14,7	26,7	31,7	70
Juil.	24,6	13,6	18,0	30,4	37,9	69
Août	24,9	14,6	18,5	30,5	36,2	71
Sept.	22,4	10,8	16,1	27,6	34,4	75
Oct.	18,4	7,3	12,2	24,1	31,6	77
Nov.	14,1	1,6	8,4	19,5	28,0	80
Déc.	10,6	-0,3	4,7	16,4	22,9	84
Année	16,8					76

Mois	H_Gh	SDm	SDd	SD astr.	RR	RD	FF	DD
Janv.	65	142	4,6	9,8	80	9	1,4	248
Fév.	85	154	5,5	10,7	82	8	1,2	270
Mars	127	195	6,3	11,8	73	7	1,1	270
Avr.	161	221	7,4	13,0	61	6	1,7	270
Mai	196	277	8,9	14,0	40	5	1,7	270
Juin	204	303	10,1	14,5	17	3	2,0	68
Juil.	227	350	11,3	14,3	5	2	1,8	68
Août	193	324	10,5	13,4	7	2	1,6	68
Sept.	153	254	8,5	12,3	34	3	1,7	68
Oct.	107	213	6,9	11,1	76	6	1,0	270
Nov.	71	169	5,6	10,0	96	7	1,5	270
Déc.	65	143	4,6	9,5	115	9	1,3	270
Année	1651	2744	7,4		686	67	1,5	291

Légende:

Ta:	Temp. de l'air	RH:	Humidité relative
Ta min:	10 a. minimum (approx.)	Ta max:	10 a. maximum (approx.)
Ta dmin:	Moyenne minimum journ. Ta	Ta dmax:	Moyenne maximum journ. Ta
SD:	Durée d'insolation	RR:	Précipitations
RD:	Jours avec precipitation	FF:	Vitesse du vent
SD astr.:	Durée d'insolation, astronomique	DD:	Direction du vent
H_Gh:	Irradiation du rayonnement global horizontal		

Température en [°C]

Vitesse du vent en [m/s]

ANNEXE N°4

ANNEXE N°4

Mois	Ta	Ta min	Ta dmin	Ta dmax	Ta max	RH
Janv.	11,6	2,1	6,9	16,3	22,0	76
Fév.	11,9	2,1	7,0	16,8	22,3	75
Mars	12,9	3,2	7,3	18,2	24,4	75
Avr.	14,9	3,8	8,9	20,1	28,1	72
Mai	18,0	7,5	12,4	23,0	29,8	78
Juin	21,3	12,0	15,6	25,9	33,3	76
Juil.	24,3	14,8	18,5	29,8	37,8	71
Août	25,0	15,6	19,5	30,1	36,2	74
Sept.	23,2	13,5	17,6	27,9	34,8	72
Oct.	19,7	9,5	14,3	25,1	31,7	74
Nov.	15,6	5,2	10,3	20,5	27,4	73
Déc.	12,5	2,4	7,6	17,5	22,6	76
Année	17,6					74

Mois	H _L Gh	SDm	SDd	SD astr.	RR	RD	FF	DD
Janv.	77	141	4,5	9,8	93	13	3,6	270
Fév.	89	152	5,4	10,7	75	11	4,0	270
Mars	139	194	6,3	11,8	68	14	3,7	270
Avr.	164	220	7,3	13,0	50	13	3,9	270
Mai	207	276	8,9	14,0	31	5	3,6	113
Juin	224	302	10,1	14,5	15	3	4,0	90
Juil.	235	348	11,2	14,3	3	2	4,2	90
Août	207	322	10,4	13,4	8	2	4,0	90
Sept.	164	253	8,4	12,3	30	2	3,7	270
Oct.	127	212	6,8	11,1	72	3	3,5	270
Nov.	89	167	5,6	10,0	74	5	3,8	270
Déc.	74	141	4,5	9,5	96	11	4,0	270
Année	1792	2728	7,3		616	83	3,8	264

Légende:

Ta:	Temp. de l'air	RH:	Humidité relative
Ta min:	10 a. minimum (approx.)	Ta max:	10 a. maximum (approx.)
Ta dmin:	Moyenne minimum journ. Ta	Ta dmax:	Moyenne maximum journ. Ta
SD:	Durée d'insolation	RR:	Précipitations
RD:	Jours avec precipitation	FF:	Vitesse du vent
SD astr.:	Durée d'insolation, astronomique	DD:	Direction du vent
H _L Gh:	Irradiation du rayonnement global horizontal		

Température en [°C]

Vitesse du vent en [m/s]

Durée d'insolation en [h/jour]

Rayonnement en [kWh/m²]

ANNEXE N°4

Mois	Ta	Ta min	Ta dmin	Ta dmax	Ta max	RH
Janv.	6,6	-2,4	1,9	11,2	18,5	80
Fév.	8,0	-3,5	1,9	13,7	20,2	65
Mars	9,9	-2,5	3,1	16,4	24,6	62
Avr.	13,5	-0,5	6,1	19,7	27,3	51
Mai	17,9	3,3	10,0	24,9	34,4	49
Juin	23,6	7,7	14,5	30,7	39,9	41
Juil.	27,3	11,3	18,3	35,2	42,6	36
Août	26,5	11,7	18,2	34,1	38,9	41
Sept.	22,0	9,1	14,5	28,0	36,9	55
Oct.	15,9	4,2	9,7	21,9	27,1	69
Nov.	10,7	-0,3	5,2	15,8	24,6	73
Déc.	7,5	-2,9	2,5	12,6	19,3	78
Année	15,8					58

Mois	H_Gh	SDm	SDd	SD astr.	RR	RD	FF	DD
Janv.	61	146	4,7	9,9	33	3	4,5	248
Fév.	109	160	5,7	10,8	32	3	4,7	270
Mars	159	198	6,4	11,8	38	3	4,4	270
Avr.	155	225	7,5	12,9	31	1	5,9	270
Mai	197	282	9,1	13,8	36	0	5,7	270
Juin	208	309	10,3	14,3	30	0	4,9	68
Juil.	228	357	11,5	14,1	9	0	4,7	68
Août	184	329	10,6	13,3	19	0	4,2	68
Sept.	148	258	8,6	12,3	26	0	4,6	68
Oct.	123	217	7,0	11,2	25	1	4,0	270
Nov.	77	174	5,8	10,2	37	2	4,5	270
Déc.	63	149	4,8	9,7	31	3	4,3	270
Année	1711	2804	7,5		347	16	4,7	291

Légende:

Ta:	Temp. de l'air	RH:	Humidité relative
Ta min:	10 a. minimum (approx.)	Ta max:	10 a. maximum (approx.)
Ta dmin:	Moyenne minimum journ. Ta	Ta dmax:	Moyenne maximum journ. Ta
SD:	Durée d'insolation	RR:	Précipitations
RD:	Jours avec precipitation	FF:	Vitesse du vent
SD astr.:	Durée d'insolation, astronomique	DD:	Direction du vent
H_Gh:	Irradiation du rayonnement global horizontal		

Température en [°C]

Vitesse du vent en [m/s]

Durée d'insolation en [h/jour]

Rayonnement en [kWh/m²]

Source : Station (a) de l'Observatoire

ANNEXE N°4

ANNEXE N°4

Mois	Ta	Ta min	Ta dmin	Ta dmax	Ta max	RH
Janv.	18,7	4,7	11,0	26,2	32,0	21
Fév.	21,3	8,1	13,4	29,0	34,1	18
Mars	24,6	10,2	17,1	31,7	37,6	18
Avr.	28,8	15,6	20,8	35,4	40,2	17
Mai	32,2	18,6	25,3	38,4	42,4	17
Juin	34,6	22,7	27,6	40,0	43,6	18
Juil.	33,5	23,1	27,2	39,4	43,0	24
Août	31,6	21,7	25,6	37,2	40,2	33
Sept.	32,4	22,1	25,6	37,6	42,3	26
Oct.	29,6	16,8	22,8	35,8	40,3	21
Nov.	25,4	10,7	17,6	32,1	37,5	20
Déc.	20,5	7,4	13,1	28,0	33,2	22
Année	27,8					21

Mois	H_Gh	SDm	SDd	SD astr.	RR	RD	FF	DD
Janv.	110	230	7,4	10,9	1	1	2,5	136
Fév.	153	234	8,4	11,4	0	1	2,6	180
Mars	188	261	8,4	11,9	2	1	2,5	200
Avr.	208	282	9,4	12,5	1	1	2,2	200
Mai	215	322	10,4	13,0	4	0	2,6	179
Juin	242	336	11,2	13,3	6	0	3,3	211
Juil.	237	335	10,8	13,1	18	1	3,6	208
Août	221	324	10,5	12,7	39	1	3,1	201
Sept.	194	293	9,8	12,1	20	1	2,8	185
Oct.	185	282	9,1	11,5	2	1	2,5	197
Nov.	94	249	8,3	11,0	1	1	2,1	166
Déc.	87	221	7,1	10,7	1	1	2,9	172
Année	2135	3369	9,1		94	10	2,7	188

Légende:

Ta:	Temp. de l'air	RH:	Humidité relative
Ta min:	10 a. minimum (approx.)	Ta max:	10 a. maximum (approx.)
Ta dmin:	Moyenne minimum journ. Ta	Ta dmax:	Moyenne maximum journ. Ta
SD:	Durée d'insolation	RR:	Précipitations
RD:	Jours avec precipitation	FF:	Vitesse du vent
SD astr.:	Durée d'insolation, astronomique	DD:	Direction du vent
H_Gh:	Irradiation du rayonnement global horizontal		

Température en [°C]

Vitesse du vent en [m/s]

Durée d'insolation en [h/jour]

Rayonnement en [kWh/m²]