

**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 hydrogéné.

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

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

## Chapitre II: Modélisation et Procédure de Simulation

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

# 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

<b>III.7. Estimation des émissions de CO<sub>2</sub> pour une consommation électrique donnée, assurée par différentes sources d'énergie</b>	<b>40</b>
---	-----------

# NOMENCLATURE

<b>S<sub>a</sub></b> : La surface d'absorbeur, m <sup>2</sup> ;	<b>k</b> : Constante de Boltzmann = $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K ;
<b>T</b> : Température, K ;	<b>e</b> : La charge d'un électron = $1.062 \cdot 10^{-19}$ As ;
<b>C</b> : Concentration géométrique ;	<b>T</b> : Température absolue de la cellule photovoltaïque °K ;
<b>U</b> : Tension, V ;	<b>A<sub>c</sub></b> : La surface de concentrateurs, m <sup>2</sup> ;
<b>E</b> : Charge d'un électron, C ;	<b>A<sub>u</sub></b> : la surface unitaire de concentrateurs, m <sup>2</sup> ;
<b>U<sub>R</sub></b> : Tension minimum réversible d'électrolyse, V ;	<b>U<sub>E</sub></b> : Tension appliquée aux bornes des électrodes V ;
<b>U<sub>thermo-neutre</sub></b> : Tension imposée à la cellule, V ;	<b>I</b> : L'intensité du courant traversant les électrodes A ;
<b>F</b> : Constante de Faraday, C/mole ;	<b>A<sub>E</sub></b> : Surface des électrodes [cm <sup>2</sup> ] ;
<b>V</b> : Tension délivrée des cellules PV, V ;	<b>Z</b> : nombre d'électrons mis en jeu ;
<b>ΔG<sub>T,p</sub></b> : l'enthalpie libre de réaction, J/mol ;	<b>I<sub>g</sub></b> : rayonnement global, W/m <sup>2</sup> ;
<b>ΔH<sub>T,p</sub></b> : enthalpies de réaction, J/mol ;	<b>Z</b> : Nombre d'électrons mis en jeu ;
<b>ΔS<sub>T,p</sub></b> : l'entropie de réaction, J/mol ;	<b>I<sub>0</sub></b> : Intensité du courant d'obscurité ;
<b>ΔH<sup>0</sup><sub>r</sub></b> : enthalpies standards, J/mol ;	<b>I<sub>ph</sub></b> : Photo courant, A ;
<b>ΔG<sup>0</sup><sub>r</sub></b> : l'enthalpie libre standard, J/mol ;	<b>J</b> : Densité de courant, A/m <sup>2</sup> ;
<b>ΔS<sup>0</sup><sub>r</sub></b> : l'entropie standard, J/mol ;	<b>η<sub>0</sub></b> : Rendement optique du capteur % ;
<b>T<sup>0</sup></b> : Température standard, 298 K ;	<b>η<sub>f</sub></b> : Rendement faradique, % ;
<b>h</b> : Enthalpie, kJ/Kg ;	<b>P</b> : Puissance délivrée par la cellule W ;
<b>W</b> : puissance nécessaire pour l'électrolyse, W ;	<b>Q<sub>u</sub></b> : Energie utile d'un convertisseur, KW ;
<b>I</b> : courant délivré par la cellule, A ;	<b>Q<sub>12</sub></b> : Puissance de la chaudière sol, KW ;
<b>W<sub>56</sub></b> : Travail de compression, KW ;	<b>Q<sub>45</sub></b> : Puissance du réchauffeur sol, KW ;
<b>I<sub>b</sub></b> : rayonnement direct, W/m <sup>2</sup> ;	<b>R</b> : Constante des gaz parfait kJ/kmole °K ;
<b>X</b> : Titre, % ;	<b>S</b> : Entropie, kJ/°C ;
<b>m</b> : Débit massique, kg/s ;	<b>t</b> : Temps, s ;
<b>M</b> : Masse moléculaire, kg/kmole ;	<b>I<sub>ph</sub></b> : Photo courant.
<b>J</b> : Densité de courant, A/cm <sup>2</sup> ;	
<b>W<sub>23</sub></b> : Le travail fourni par la turbine, KW ;	
<b>m</b> : 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 CO<sub>2</sub> 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].

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

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 <sup>3</sup>	2 945 Gm <sup>3</sup>	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%
<b>Total</b>			<b>11 402</b>	<b>27.1%</b>	<b>100%</b>

### 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 CO<sub>2</sub>, sont essentiellement liées à la combustion des carburants fossiles [8].

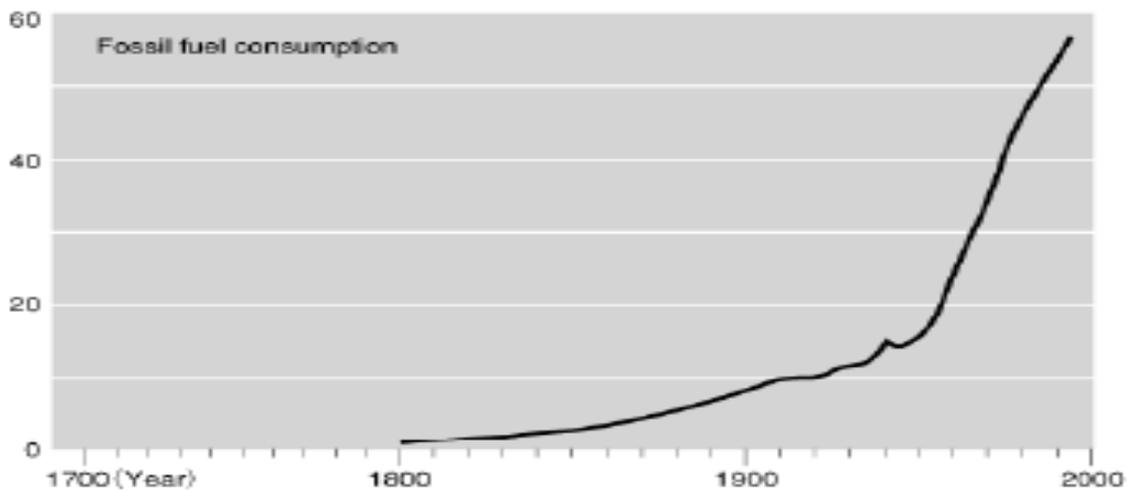
### I.2.4. Evolution des rejets de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère

Les résultats des modèles climatiques prévoient pour la fin du 21<sup>ème</sup> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>.



**Figure .I.1.**Corrélation de la consommation du carburant fossile et concentration de CO<sub>2</sub> [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].

<b>Poids moléculaire</b>		<b>2.016</b>
<b>Electronégative</b>		<b>2.1</b>
<b>Densité (Gaz)</b>		<b>0.0838 Kg/m<sup>3</sup></b>
<b>Densité (Liquide)</b>		<b>70.8 Kg/m<sup>3</sup></b>
<b>Température d'ébullition</b>		<b>20.3 °K</b>
<b>Température de fusion</b>		<b>13.8 °K</b>
<b>Chaleur de fusion</b>		<b>58.23 KJ/Kg</b>
<b>Chaleur de Vaporisation</b>		<b>445.59 KJ/Kg</b>
<b>Chaleur de sublimation</b>		<b>507.39 KJ/Kg</b>
<b>Capacité calorifique</b>	<b>Gaz</b>	<b>14.89 KJ/Kg °K</b>
	<b>Liquide</b>	<b>9.69 KJ/Kg °K</b>
<b>Pouvoir calorifique</b>	<b>Supérieur</b>	<b>140 MJ/Kg</b>
	<b>Inferieur</b>	<b>120 MJ/Kg</b>
<b>Point critique</b>	<b>Température</b>	<b>32.94 °K</b>
	<b>Pression</b>	<b>12.84 bars</b>
	<b>Densité</b>	<b>31.4 Kg/m<sup>3</sup></b>

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 <sub>2</sub>	72.4	100	0
CO	0.8	0.65	0
S O <sub>2</sub>	0.38	0.5	0
NO <sub>x</sub>	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 <sup>2</sup> /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 diffèrent 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 divisée, 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.

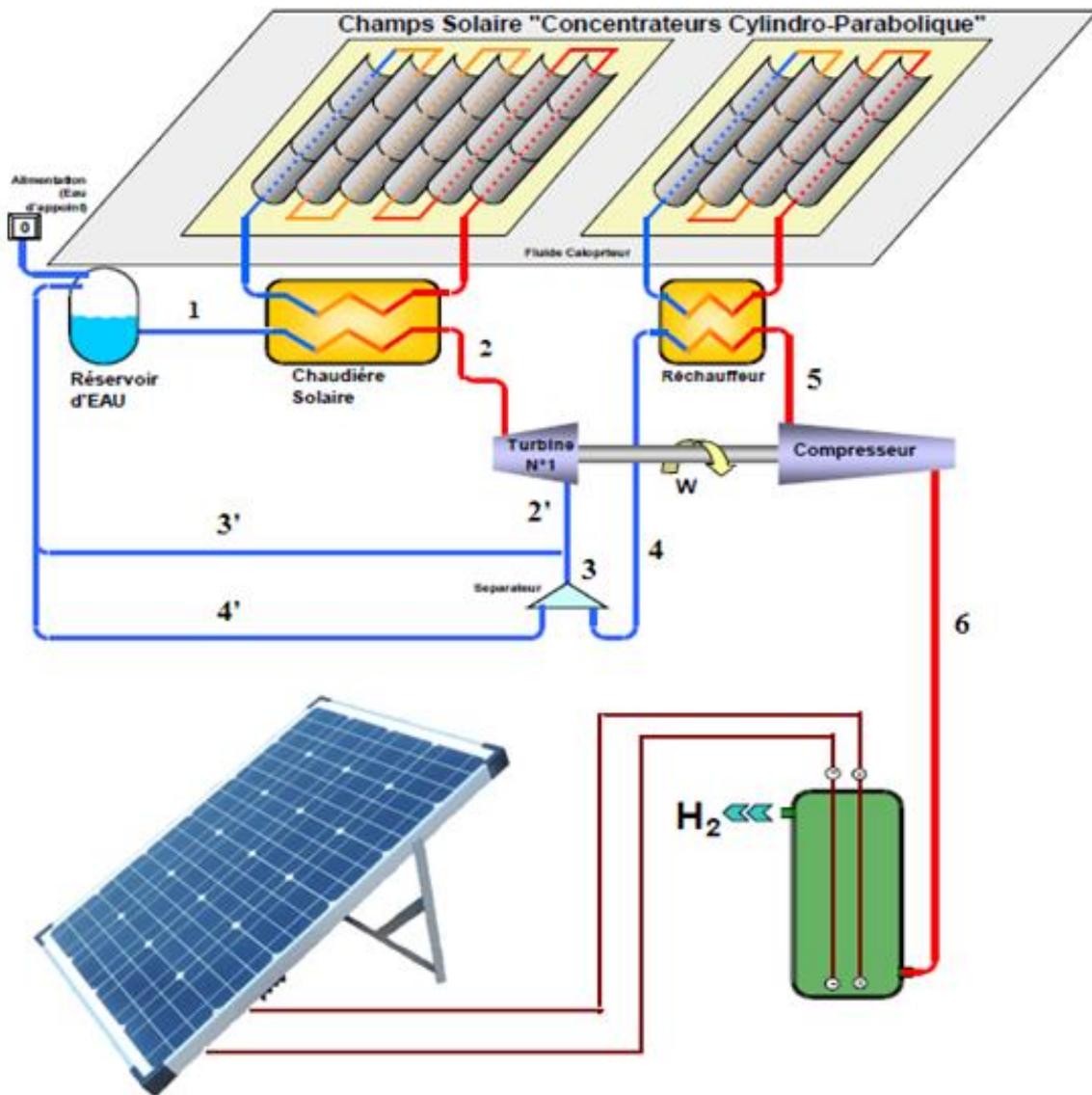


Figure II.1. Schéma de principe de l'installation de production d'hydrogène.

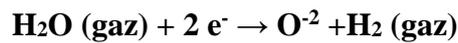
### II.2.3. Simulation de l'électrolyse de la vapeur d'eau :

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.

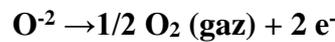
II.2.3.1. Principe

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 :

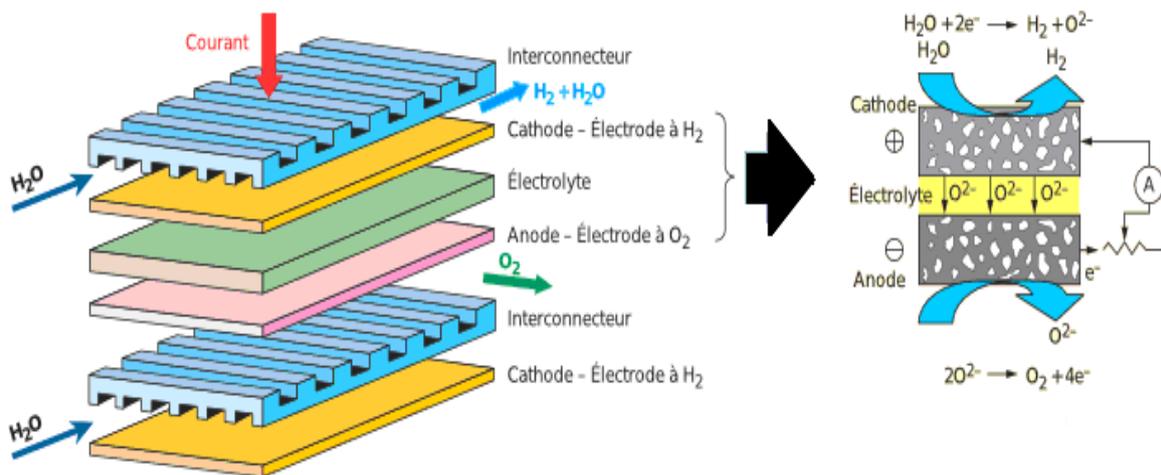
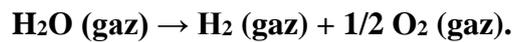


Figure II.2. Principe de fonctionnement de l'électrolyseur à vapeur d'eau.

L'énergie globale nécessaire pour effectuer cette réaction est égale à la variation d'enthalpie  $\Delta H$  de cette réaction qui est équivalente à la somme de la variation d'énergie libre  $\Delta G$  et la variation de l'entropie de la réaction  $\Delta S$  :

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

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  $\Delta G_r$  à partir des enthalpies de réaction  $\Delta H_r$  et de l'entropie de réaction  $\Delta S_r$  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  $\Delta H_r$ ,  $\Delta S_r$  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  $\Delta G$  :

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  $\Delta G$  permet d'écrire :

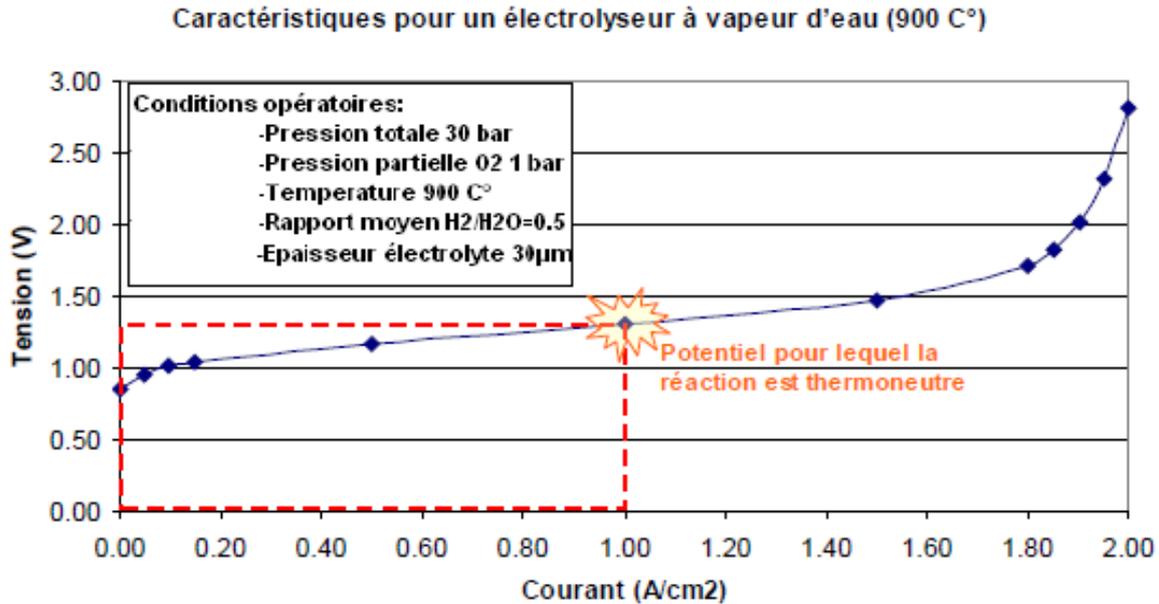
$$- \Delta G = Z * F * U_R \quad (\text{II-12})$$

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 :

$$U_E = f(I)$$

$$U_E = a I / A_E + b \tag{II-14}$$

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 :

$$U_E = 0.32 I / A_E + 1.025 \tag{II-15}$$

**U<sub>E</sub>** : Tension appliquée aux bornes des électrodes [V] ;

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

**A<sub>E</sub>** : Surface des électrodes [cm<sup>2</sup>].

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<sub>thermoneutre</sub> = 1.3 V** correspond au fonctionnement de l'électrolyseur. Elle est donnée par **ΔH/(n\*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  $\eta_f$ , 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/cm<sup>2</sup>) 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 ( $300^\circ\text{C}$ ) 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  $1 \rightarrow 2$  : 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  $2 \rightarrow 2'$  : 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 :

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

$\eta_0$  : 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) :

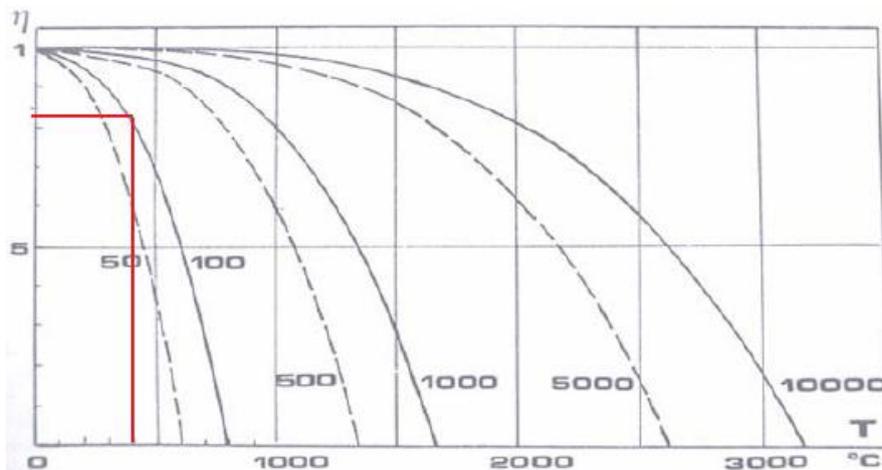
$$N = A_C / A_U \tag{II-41}$$

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.

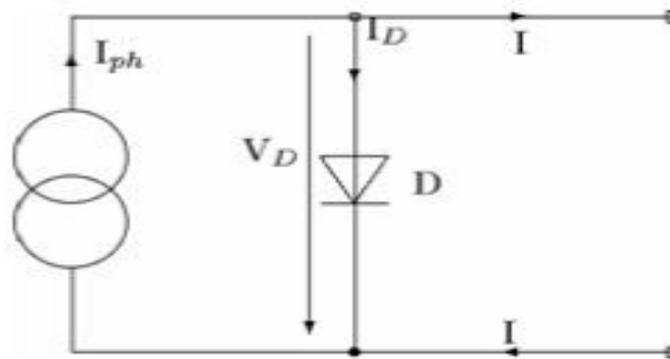
La figure II.4. Nous donne la variation du rendement de conversion rendement, en fonction de la température de l'absorbeur, pour certaines valeurs de Concentration :



**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

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

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 sature qui rentre au réservoir d'eau.

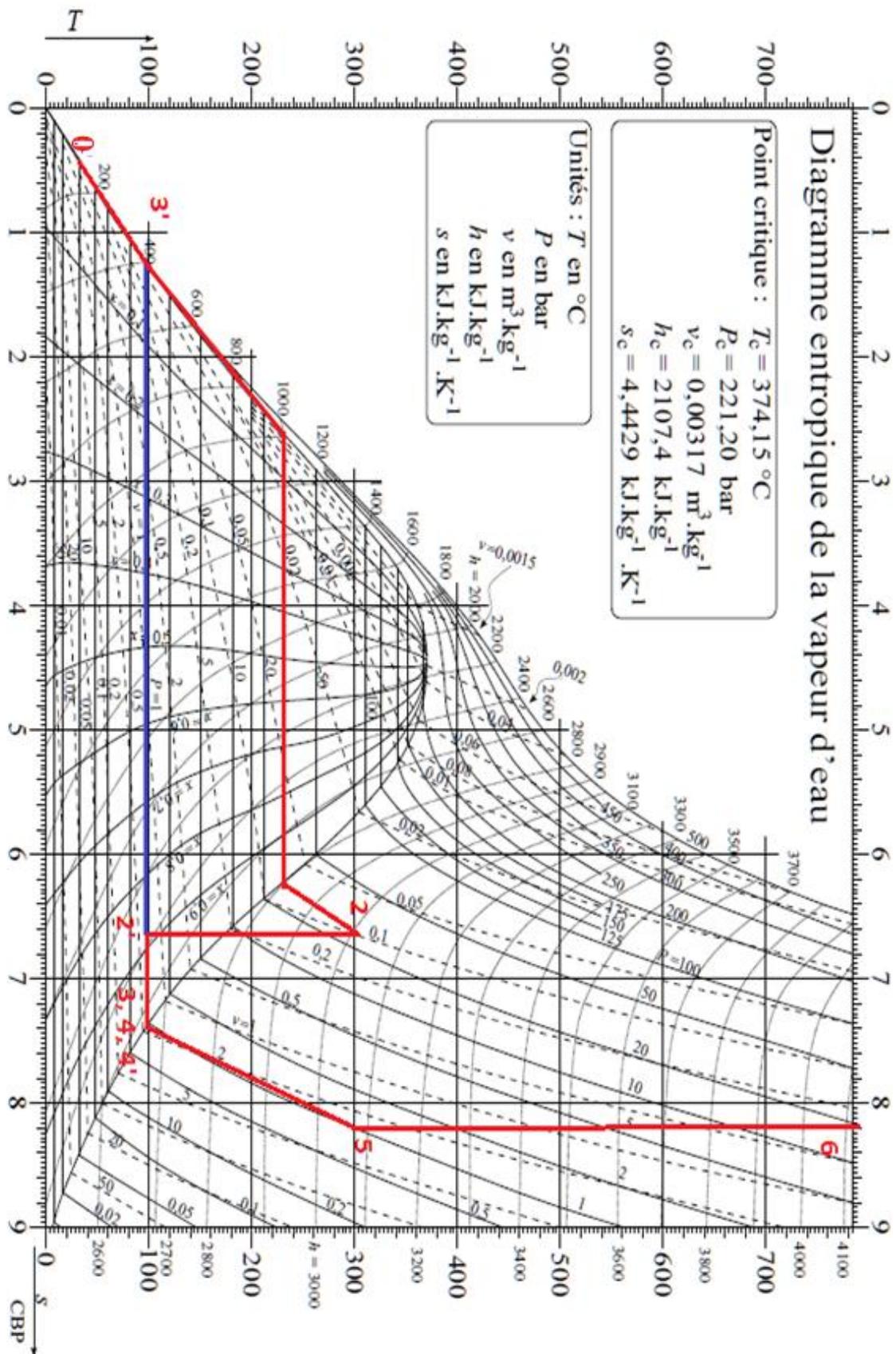


Figure .III.1. Diagramme T-S de la vapeur d'eau à travers l'unité de production de vapeur.

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 m<sup>2</sup>**. 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  $1 \text{ A/m}^2$ . 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 m<sup>2</sup>**.

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

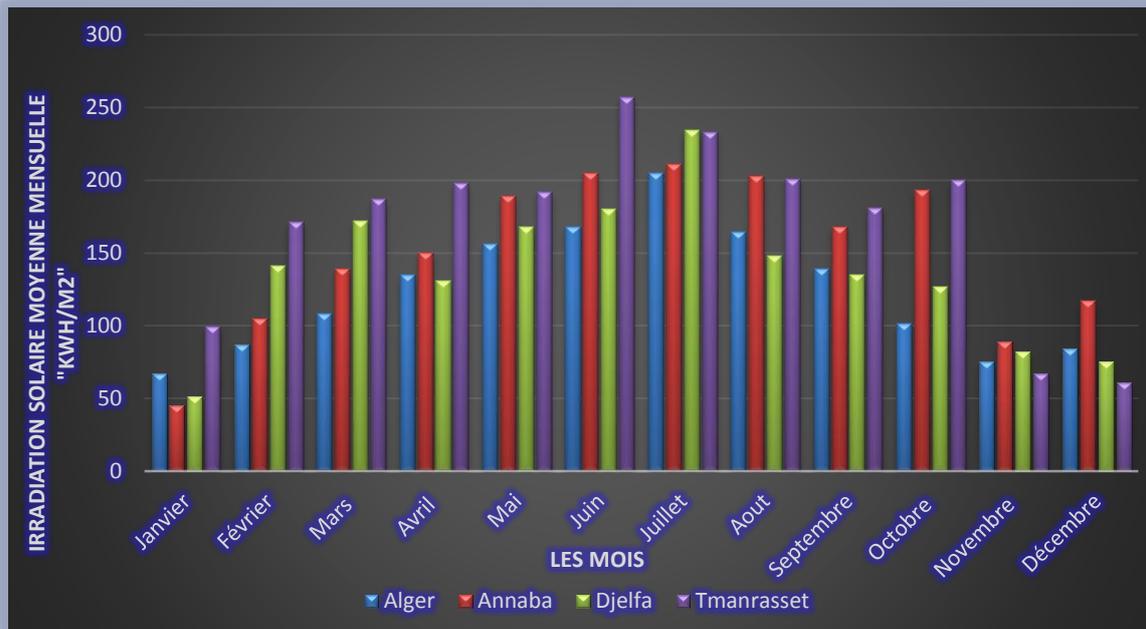
#### III.6.1. Irradiation solaire moyenne mensuelle sur plan horizontal

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/m<sup>2</sup>/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/m<sup>2</sup> /mois».

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

**Figure .III.2.** Irradiation solaire moyenne mensuelle incident pour différent sites « KWh/m<sup>2</sup>/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

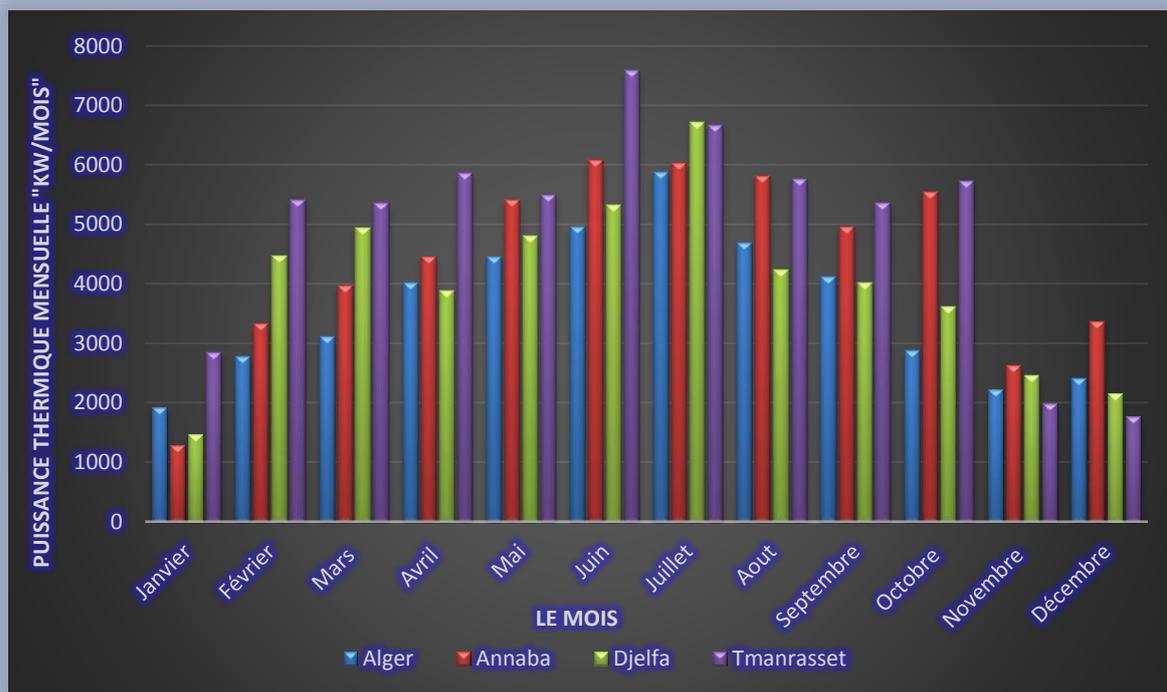


Figure .III.3. Les puissances thermiques moyenne mensuelle fournies par les concentrateurs cylindro paraboliques pour différent sites « KW/mois».

### 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>	<b>Alger</b>	<b>Annaba</b>	<b>Djelfa</b>	<b>Tamanrasset</b>
<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

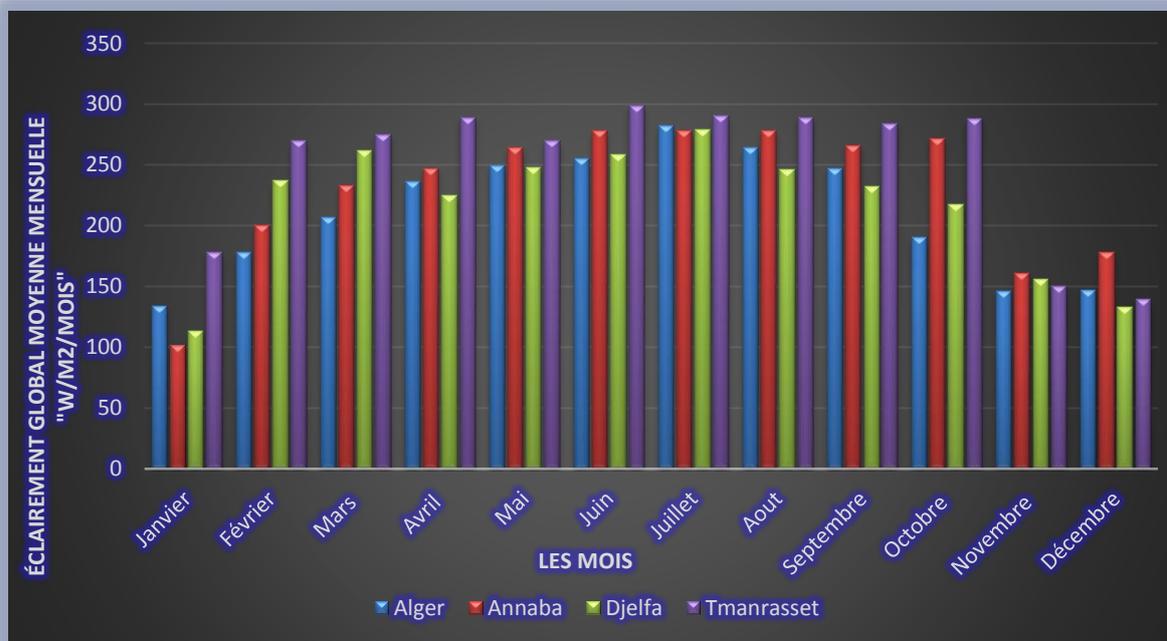


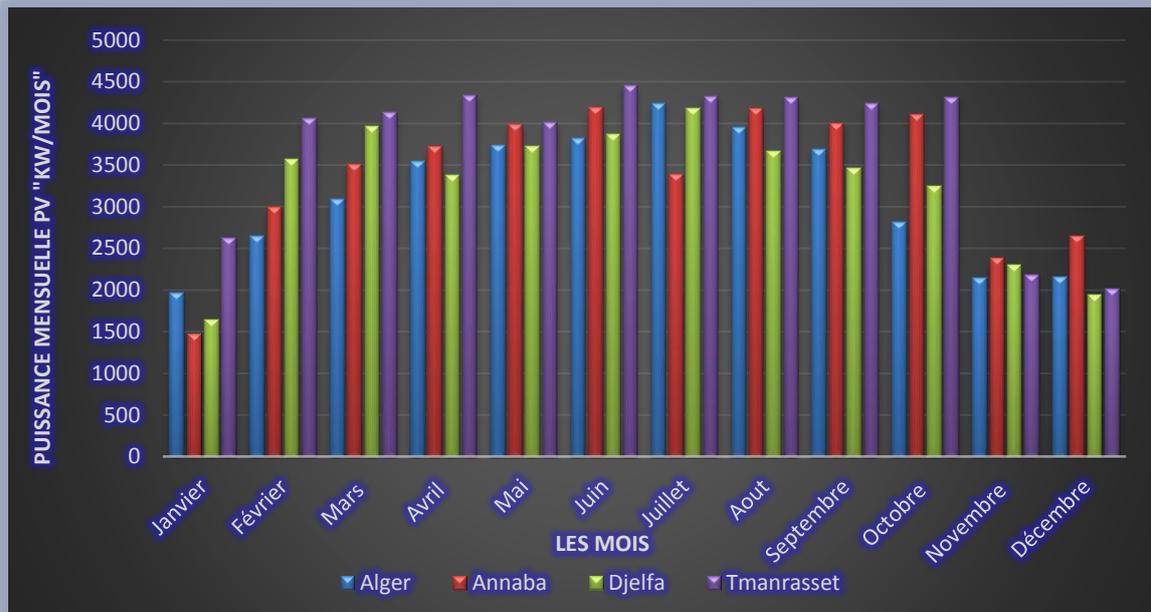
Figure .III.4. Eclaircement global moyenne pour différent sites

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



**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** ».

<i>Le mois</i>	Alger	Annaba	Djelfa	Tamanrasset
<i>Janvier</i>	15931,26	11968,1	13458,68	23694,81
<i>Février</i>	21143,38	23926,65	28844,21	34615,87
<i>Mars</i>	30216,53	34268,37	38738,49	40649,63
<i>Avril</i>	36916,21	38783,02	34854,36	44034,41
<i>Mai</i>	43345,15	46161,74	42550,98	43186,57
<i>Juin</i>	44414,94	48665,23	44267,43	47465,91
<i>Juillet</i>	50167,22	40120,71	48799,03	46841,41
<i>Aout</i>	43837,99	46315,23	40350,22	45353,17
<i>Septembre</i>	36395,41	39434,38	34102,48	41022,58
<i>Octobre</i>	25854,5	37779,37	30050,32	41022,84
<i>Novembre</i>	17145,53	19043,2	18786,9	19184,54
<i>Décembre</i>	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>	<b>Alger</b>	<b>Annaba</b>	<b>Djelfa</b>	<b>Tamanrasset</b>
<i>Janvier</i>	<b>52,44</b>	<b>39,39</b>	<b>43,85</b>	<b>70,12</b>
<i>Février</i>	<b>70,57</b>	<b>79,86</b>	<b>95,38</b>	<b>108,45</b>
<i>Mars</i>	<b>82,6</b>	<b>93,68</b>	<b>105,9</b>	<b>110,19</b>
<i>Avril</i>	<b>94,66</b>	<b>99,44</b>	<b>90,06</b>	<b>115,58</b>
<i>Mai</i>	<b>99,87</b>	<b>106,36</b>	<b>99,46</b>	<b>107,16</b>
<i>Juin</i>	<b>102,1</b>	<b>111,87</b>	<b>103,19</b>	<b>118,96</b>
<i>Juillet</i>	<b>113,17</b>	<b>90,5</b>	<b>111,64</b>	<b>115,34</b>
<i>Aout</i>	<b>105,53</b>	<b>111,5</b>	<b>97,87</b>	<b>115,2</b>
<i>Septembre</i>	<b>98,63</b>	<b>106,87</b>	<b>92,42</b>	<b>113,01</b>
<i>Octobre</i>	<b>75,14</b>	<b>109,79</b>	<b>86,55</b>	<b>115,07</b>
<i>Novembre</i>	<b>57,15</b>	<b>63,48</b>	<b>61,4</b>	<b>58,13</b>
<i>Décembre</i>	<b>57,72</b>	<b>70,67</b>	<b>52,01</b>	<b>53,95</b>

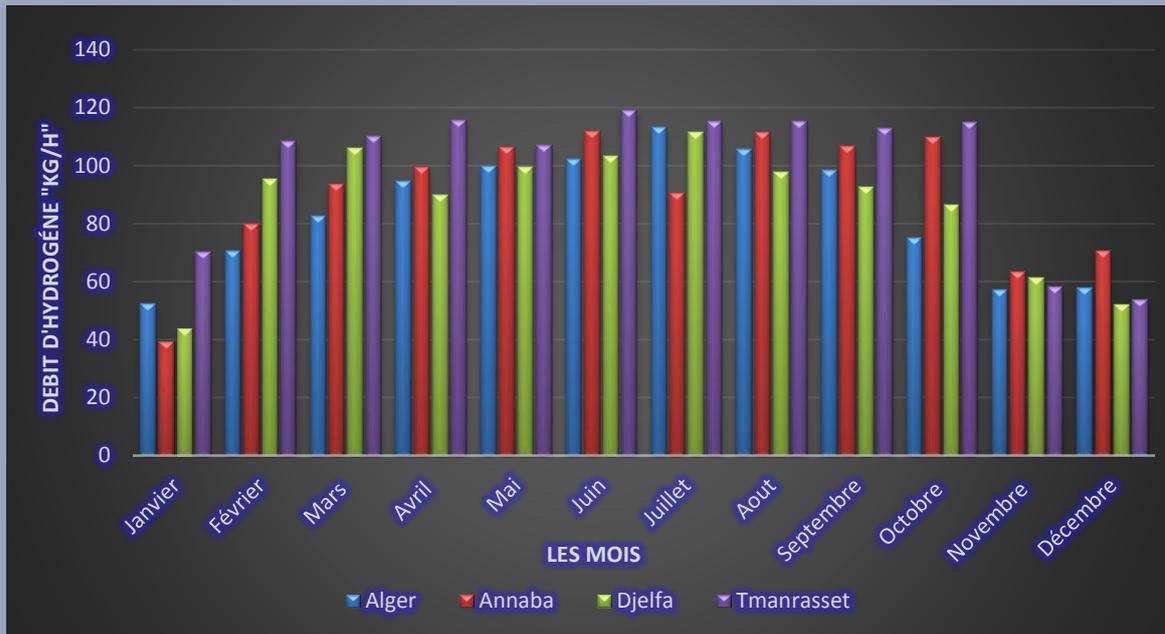


Figure .VII.7 : Débit mensuelle d’hydrogène produit pour différent sites « Kg/h ».

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.**

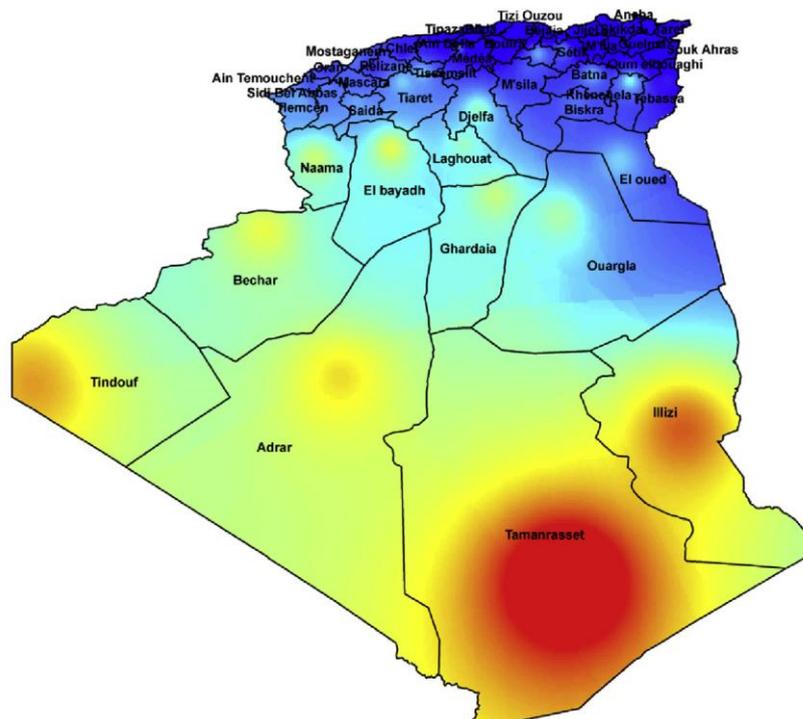


Figure .VII.8. Potentiel d'hydrogéné par solaire

### III.7. Estimation des émissions de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> qui est en fonction de chaque consommation, est indiqué au Tableau III.9.

**Tableau III.9.** Estimation des émissions de CO<sub>2</sub> pour une consommation de **41681,53 KWh**.

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

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

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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>.

## 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 ICRES-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

Vapeur saturée: table de la température

Temp. °C $T$	Pres. kPa $P$	Volume massique m <sup>3</sup> /kg		Énergie interne kJ/kg			Enthalpie kJ/kg			Entropie kJ/kg·K		
		Liquide sat. $v_f$	Vapeur sat. $v_g$	Liquide sat. $u_f$	Évap. $u_{fg}$	Vapeur sat. $u_g$	Liquide sat. $h_f$	Évap. $h_{fg}$	Vapeur sat. $h_g$	Liquide sat. $s_f$	Évap. $s_{fg}$	Vapeur sat. $s_g$
		0.01	0.6113	0.001 000	206.14	.00	2375.3	2375.3	.01	2501.3	2501.4	.0000
5	0.8721	0.001 000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001 000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001 001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001 002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001 003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001 004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001 006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001 008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001 010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001 012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001 015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001 017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001 020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001 023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001 026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001 029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001 033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001 036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001 040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159
100	Mpa 0.101 35	0.001 044	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	6.0480	7.3549
105	0.120 82	0.001 048	1.4194	440.02	2072.3	2512.4	440.15	2243.7	2683.8	1.3630	5.9328	7.2958
110	0.143 27	0.001 052	1.2102	461.14	2057.0	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	5.8202	7.2387
115	0.169 06	0.001 056	1.0366	482.30	2041.4	2523.7	482.48	2216.5	2699.0	1.4734	5.7100	7.1833
120	0.198 53	0.001 060	0.8919	503.50	2025.8	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	5.6020	7.1296
125	0.2321	0.001 065	0.7706	524.74	2009.9	2534.6	524.99	2188.5	2713.5	1.5813	5.4962	7.0775
130	0.2701	0.001 070	0.6685	546.02	1993.9	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	5.3925	7.0269
135	0.3130	0.001 075	0.5822	567.35	1977.7	2545.0	567.69	2159.6	2727.3	1.6870	5.2907	6.9777
140	0.3613	0.001 080	0.5089	588.74	1961.3	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	5.1908	6.9299
145	0.4154	0.001 085	0.4463	610.18	1944.7	2554.9	610.63	2129.6	2740.3	1.7907	5.0926	6.8833
150	0.4758	0.001 091	0.3928	631.68	1927.9	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	4.9960	6.8379
155	0.5431	0.001 096	0.3468	653.24	1910.8	2564.1	653.84	2098.6	2752.4	1.8925	4.9010	6.7935
160	0.6178	0.001 102	0.3071	674.87	1893.5	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	4.8075	6.7502
165	0.7005	0.001 108	0.2727	696.56	1876.0	2572.5	697.34	2066.2	2763.5	1.9925	4.7153	6.7078
170	0.7917	0.001 114	0.2428	718.33	1858.1	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	4.6244	6.6663
175	0.8920	0.001 121	0.2168	740.17	1840.0	2580.2	741.17	2032.4	2773.6	2.0909	4.5347	6.6256
180	1.0021	0.001 127	0.194 05	762.09	1821.6	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	4.4461	6.5857
185	1.1227	0.001 134	0.174 09	784.10	1802.9	2587.0	785.37	1997.1	2782.4	2.1879	4.3586	6.5465
190	1.2544	0.001 141	0.156 54	806.19	1783.8	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	4.2720	6.5079
195	1.3978	0.001 149	0.141 05	828.37	1764.4	2592.8	829.98	1960.0	2790.0	2.2835	4.1863	6.4698
200	1.5538	0.001 157	0.127 36	850.65	1744.7	2595.3	852.45	1940.7	2793.2	2.3309	4.1014	6.4323
205	1.7230	0.001 164	0.115 21	873.04	1724.5	2597.5	875.04	1921.0	2796.0	2.3780	4.0172	6.3952
210	1.9062	0.001 173	0.104 41	895.53	1703.9	2599.5	897.76	1900.7	2798.5	2.4248	3.9337	6.3585
215	2.104	0.001 181	0.094 79	918.14	1682.9	2601.1	920.62	1879.9	2800.5	2.4714	3.8507	6.3221
220	2.318	0.001 190	0.086 19	940.87	1661.5	2602.4	943.62	1858.5	2802.1	2.5178	3.7683	6.2861
225	2.548	0.001 199	0.078 49	963.73	1639.6	2603.3	966.78	1836.5	2803.3	2.5639	3.6863	6.2503
230	2.795	0.001 209	0.071 58	986.74	1617.2	2603.9	990.12	1813.8	2804.0	2.6099	3.6047	6.2146
235	3.060	0.001 219	0.065 37	1009.89	1594.2	2604.1	1013.62	1790.5	2804.2	2.6558	3.5233	6.1791
240	3.344	0.001 229	0.059 76	1033.21	1570.8	2604.0	1037.32	1766.5	2803.8	2.7015	3.4422	6.1437
245	3.648	0.001 240	0.054 71	1056.71	1546.7	2603.4	1061.23	1741.7	2803.0	2.7472	3.3612	6.1083
250	3.973	0.001 251	0.050 13	1080.39	1522.0	2602.4	1085.36	1716.2	2801.5	2.7927	3.2802	6.0730
255	4.319	0.001 263	0.045 98	1104.28	1496.7	2600.9	1109.73	1689.8	2799.5	2.8383	3.1992	6.0375
260	4.688	0.001 276	0.042 21	1128.39	1470.6	2599.0	1134.37	1662.5	2796.9	2.8838	3.1181	6.0019
265	5.081	0.001 289	0.038 77	1152.74	1443.9	2596.6	1159.28	1634.4	2793.6	2.9294	3.0368	5.9662
270	5.499	0.001 302	0.035 64	1177.36	1416.3	2593.7	1184.51	1605.2	2789.7	2.9751	2.9551	5.9301
275	5.942	0.001 317	0.032 79	1202.25	1387.9	2590.2	1210.07	1574.9	2785.0	3.0208	2.8730	5.8938
280	6.412	0.001 332	0.030 17	1227.46	1358.7	2586.1	1235.99	1543.6	2779.6	3.0668	2.7903	5.8571
285	6.909	0.001 348	0.027 77	1253.00	1328.4	2581.4	1262.31	1511.0	2773.3	3.1130	2.7070	5.8199
290	7.436	0.001 366	0.025 57	1278.92	1297.1	2576.0	1289.07	1477.1	2766.2	3.1594	2.6227	5.7821
295	7.993	0.001 384	0.023 54	1305.2	1264.7	2569.9	1316.3	1441.8	2758.1	3.2062	2.5375	5.7437
300	8.581	0.001 404	0.021 67	1332.0	1231.0	2563.0	1344.0	1404.9	2749.0	3.2534	2.4511	5.7045
305	9.202	0.001 425	0.019 948	1359.3	1195.9	2555.2	1372.4	1366.4	2738.7	3.3010	2.3633	5.6643
310	9.856	0.001 447	0.018 350	1387.1	1159.4	2546.4	1401.3	1326.0	2727.3	3.3493	2.2737	5.6230
315	10.547	0.001 472	0.016 867	1415.5	1121.1	2536.6	1431.0	1283.5	2714.5	3.3982	2.1821	5.5804
320	11.274	0.001 499	0.015 488	1444.6	1080.9	2525.5	1461.5	1238.6	2700.1	3.4480	2.0882	5.5362
330	12.845	0.001 561	0.012 996	1505.3	993.7	2498.9	1525.3	1140.6	2665.9	3.5507	1.8909	5.4417
340	14.586	0.001 638	0.010 797	1570.3	894.3	2464.6	1594.2	1027.9	2622.0	3.6594	1.6763	5.3357
350	16.513	0.001 740	0.008 813	1641.9	776.6	2418.4	1670.6	893.4	2563.9	3.7777	1.4335	5.2112
360	18.651	0.001 893	0.006 945	1725.2	626.3	2351.5	1760.5	720.5	2481.0	3.9147	1.1379	5.0526
370	21.03	0.002 213	0.004 925	1844.0	384.5	2228.5	1890.5	441.6	2332.1	4.1106	.6865	4.7971
374.14	22.09	0.003 155	0.003 155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298

Vapeur saturée: table de la pression

Pres. kPa <i>P</i>	Temp. °C <i>T</i>	Volume massique m <sup>3</sup> /kg		Énergie interne kJ/kg			Enthalpie kJ/kg			Entropie kJ/kg·K		
		Liquide sat. <i>v<sub>f</sub></i>	Vapeur sat. <i>v<sub>g</sub></i>	Liquide sat. <i>u<sub>f</sub></i>	Évap. <i>u<sub>fg</sub></i>	Vapeur sat. <i>u<sub>g</sub></i>	Liquide sat. <i>h<sub>f</sub></i>	Évap. <i>h<sub>fg</sub></i>	Vapeur sat. <i>h<sub>g</sub></i>	Liquide sat. <i>s<sub>f</sub></i>	Évap. <i>s<sub>fg</sub></i>	Vapeur sat. <i>s<sub>g</sub></i>
		0.6113	0.01	0.001 000	206.14	.00	2375.3	2375.3	.01	2501.3	2501.4	.0000
1.0	6.98	0.001 000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001 001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001 001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001 002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001 003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001 004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001 005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001 008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001 010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001 014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001 017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001 020	6.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001 022	5.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001 027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001 030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001 037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564
MPa												
0.100	99.63	0.001 043	1.6940	417.36	2088.7	2506.1	417.46	2258.0	2675.5	1.3026	6.0568	7.3594
0.125	105.99	0.001 048	1.3749	444.19	2069.3	2513.5	444.32	2241.0	2685.4	1.3740	5.9104	7.2844
0.150	111.37	0.001 053	1.1593	466.94	2052.7	2519.7	467.11	2226.5	2693.6	1.4336	5.7897	7.2233
0.175	116.06	0.001 057	1.0036	486.80	2038.1	2524.9	486.99	2213.6	2700.6	1.4849	5.6868	7.1717
0.200	120.23	0.001 061	0.8857	504.49	2025.0	2529.5	504.70	2201.9	2706.7	1.5301	5.5970	7.1271
0.225	124.00	0.001 064	0.7933	520.47	2013.1	2533.6	520.72	2191.3	2712.1	1.5706	5.5173	7.0878
0.250	127.44	0.001 067	0.7187	535.10	2002.1	2537.2	535.37	2181.5	2716.9	1.6072	5.4455	7.0527
0.275	130.60	0.001 070	0.6573	548.59	1991.9	2540.5	548.89	2172.4	2721.3	1.6408	5.3801	7.0209
0.300	133.55	0.001 073	0.6058	561.15	1982.4	2543.6	561.47	2163.8	2725.3	1.6718	5.3201	6.9919
0.325	136.30	0.001 076	0.5620	572.90	1973.5	2546.4	573.25	2155.8	2729.0	1.7006	5.2646	6.9652
0.350	138.88	0.001 079	0.5243	583.95	1965.0	2548.9	584.33	2148.1	2732.4	1.7275	5.2130	6.9405
0.375	141.32	0.001 081	0.4914	594.40	1956.9	2551.3	594.81	2140.8	2735.6	1.7528	5.1647	6.9175
0.40	143.63	0.001 084	0.4625	604.31	1949.3	2553.6	604.74	2133.8	2738.6	1.7766	5.1193	6.8959
0.45	147.93	0.001 088	0.4140	622.77	1934.9	2557.6	623.25	2120.7	2743.9	1.8207	5.0359	6.8565
0.50	151.86	0.001 093	0.3749	639.68	1921.6	2561.2	640.23	2108.5	2748.7	1.8607	4.9606	6.8213
0.55	155.48	0.001 097	0.3427	655.32	1909.2	2564.5	655.93	2097.0	2753.0	1.8973	4.8920	6.7893
0.60	158.85	0.001 101	0.3157	669.90	1897.5	2567.4	670.56	2086.3	2756.8	1.9312	4.8288	6.7600
0.65	162.01	0.001 104	0.2927	683.56	1886.5	2570.1	684.28	2076.0	2760.3	1.9627	4.7703	6.7331
0.70	164.97	0.001 108	0.2729	696.44	1876.1	2572.5	697.22	2066.3	2763.5	1.9922	4.7158	6.7080
0.75	167.78	0.001 112	0.2556	708.64	1866.1	2574.7	709.47	2057.0	2766.4	2.0200	4.6647	6.6847
0.80	170.43	0.001 115	0.2404	720.22	1856.6	2576.8	721.11	2048.0	2769.1	2.0462	4.6166	6.6628
0.85	172.96	0.001 118	0.2270	731.27	1847.4	2578.7	732.22	2039.4	2771.6	2.0710	4.5711	6.6421
0.90	175.38	0.001 121	0.2150	741.83	1838.6	2580.5	742.83	2031.1	2773.9	2.0946	4.5280	6.6226
0.95	177.69	0.001 124	0.2042	751.95	1830.2	2582.1	753.02	2023.1	2776.1	2.1172	4.4869	6.6041
1.00	179.91	0.001 127	0.1944	761.68	1822.0	2583.6	762.81	2015.3	2778.1	2.1387	4.4478	6.5865
1.10	184.09	0.001 133	0.177 53	780.09	1806.3	2586.4	781.34	2000.4	2781.7	2.1792	4.3744	6.5536
1.20	187.99	0.001 139	0.163 33	797.29	1791.5	2588.8	798.65	1986.2	2784.8	2.2166	4.3067	6.5233
1.30	191.64	0.001 144	0.151 25	813.44	1777.5	2591.0	814.93	1972.7	2787.6	2.2515	4.2438	6.4953
1.40	195.07	0.001 149	0.140 84	828.70	1764.1	2592.8	830.30	1959.7	2790.0	2.2842	4.1850	6.4693
1.50	198.32	0.001 154	0.131 77	843.16	1751.3	2594.5	844.89	1947.3	2792.2	2.3150	4.1298	6.4448
1.75	205.76	0.001 166	0.113 49	876.46	1721.4	2597.8	878.50	1917.9	2796.4	2.3851	4.0044	6.3896
2.00	212.42	0.001 177	0.099 63	906.44	1693.8	2600.3	908.79	1890.7	2799.5	2.4474	3.8935	6.3409
2.25	218.45	0.001 187	0.088 75	933.83	1668.2	2602.0	936.49	1865.2	2801.7	2.5035	3.7937	6.2972
2.5	223.99	0.001 197	0.079 98	959.11	1644.0	2603.1	962.11	1841.0	2803.1	2.5547	3.7028	6.2575
3.0	233.90	0.001 217	0.066 68	1004.78	1599.3	2604.1	1008.42	1795.7	2804.2	2.6457	3.5412	6.1869
3.5	242.60	0.001 235	0.057 07	1045.43	1558.3	2603.7	1049.75	1753.7	2803.4	2.7253	3.4000	6.1253
4	250.40	0.001 252	0.049 78	1082.31	1520.0	2602.3	1087.31	1714.1	2801.4	2.7964	3.2737	6.0701
5	263.99	0.001 286	0.039 44	1147.81	1449.3	2597.1	1154.23	1640.1	2794.3	2.9202	3.0532	5.9734
6	275.64	0.001 319	0.032 44	1205.44	1384.3	2589.7	1213.35	1571.0	2784.3	3.0267	2.8625	5.8892
7	285.88	0.001 351	0.027 37	1257.55	1323.0	2580.5	1267.00	1505.1	2772.1	3.1211	2.6922	5.8133
8	295.06	0.001 384	0.023 52	1305.57	1264.2	2569.8	1316.64	1441.3	2758.0	3.2068	2.5364	5.7432
9	303.40	0.001 418	0.020 48	1350.51	1207.3	2557.8	1363.26	1378.9	2742.1	3.2858	2.3915	5.6772
10	311.06	0.001 452	0.018 026	1393.04	1151.4	2544.4	1407.56	1317.1	2724.7	3.3596	2.2544	5.6141
11	318.15	0.001 489	0.015 987	1433.7	1096.0	2529.8	1450.1	1255.5	2705.6	3.4295	2.1233	5.5527
12	324.75	0.001 527	0.014 263	1473.0	1040.7	2513.7	1491.3	1193.6	2684.9	3.4962	1.9962	5.4924
13	330.93	0.001 567	0.012 780	1511.1	985.0	2496.1	1531.5	1130.7	2662.2	3.5606	1.8718	5.4323
14	336.75	0.001 611	0.011 485	1548.6	928.2	2476.8	1571.1	1066.5	2637.6	3.6232	1.7485	5.3717
15	342.24	0.001 658	0.010 337	1585.6	869.8	2455.5	1610.5	1000.0	2610.5	3.6848	1.6249	5.3098
16	347.44	0.001 711	0.009 306	1622.7	809.0	2431.7	1650.1	930.6	2580.6	3.7461	1.4994	5.2455
17	352.37	0.001 770	0.008 364	1660.2	744.8	2405.0	1690.3	856.9	2547.2	3.8079	1.3698	5.1777
18	357.06	0.001 840	0.007 489	1698.9	675.4	2374.3	1732.0	777.1	2509.1	3.8715	1.2329	5.1044
19	361.54	0.001 924	0.006 657	1739.9	598.1	2338.1	1776.5	688.0	2464.5	3.9388	1.0839	5.0228
20	365.81	0.002 036	0.005 834	1785.6	507.5	2293.0	1826.3	583.4	2409.7	4.0139	0.9130	4.9269
21	369.89	0.002 207	0.004 952	1842.1	388.5	2230.6	1888.4	446.2	2334.6	4.1075	.6938	4.8013
22	373.80	0.002 742	0.003 568	1961.9	125.2	2087.1	2022.2	143.4	2165.6	4.3110	.2216	4.5327
22.09	374.14	0.003 155	0.003 155	2029.6	0	2029.6	2099.3	0	2099.3	4.4298	0	4.4298

## Vapeur surchauffée

<i>T</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
<b><i>P</i> = .010 MPa (45.81)</b>				<b><i>P</i> = .050 MPa (81.33)</b>				<b><i>P</i> = .10 MPa (99.63)</b>				
Sat.	14.674	2437.9	2584.7	8.1502	3.240	2483.9	2645.9	7.5939	1.6940	2506.1	2675.5	7.3594
50	14.869	2443.9	2592.6	8.1749								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4479	3.418	2511.6	2682.5	7.6947	1.6958	2506.7	2676.2	7.3614
150	19.512	2587.9	2783.0	8.6882	3.889	2585.6	2780.1	7.9401	1.9364	2582.8	2776.4	7.6134
200	21.825	2661.3	2879.5	8.9038	4.356	2659.9	2877.7	8.1580	2.172	2658.1	2875.3	7.8343
250	24.136	2736.0	2977.3	9.1002	4.820	2735.0	2976.0	8.3556	2.406	2733.7	2974.3	8.0333
300	26.445	2812.1	3076.5	9.2813	5.284	2811.3	3075.5	8.5373	2.639	2810.4	3074.3	8.2158
400	31.063	2968.9	3279.6	9.6077	6.209	2968.5	3278.9	8.8642	3.103	2967.9	3278.2	8.5435
500	35.679	3132.3	3489.1	9.8978	7.134	3132.0	3488.7	9.1546	3.565	3131.6	3488.1	8.8342
600	40.295	3302.5	3705.4	10.1608	8.057	3302.2	3705.1	9.4178	4.028	3301.9	3704.7	9.0976
700	44.911	3479.6	3928.7	10.4028	8.981	3479.4	3928.5	9.6599	4.490	3479.2	3928.2	9.3398
800	49.526	3663.8	4159.0	10.6281	9.904	3663.6	4158.9	9.8852	4.952	3663.5	4158.6	9.5652
900	54.141	3855.0	4396.4	10.8396	10.828	3854.9	4396.3	10.0967	5.414	3854.8	4396.1	9.7767
1000	58.757	4053.0	4640.6	11.0393	11.751	4052.9	4640.5	10.2964	5.875	4052.8	4640.3	9.9764
1100	63.372	4257.5	4891.2	11.2287	12.674	4257.4	4891.1	10.4859	6.337	4257.3	4891.0	10.1659
1200	67.987	4467.9	5147.8	11.4091	13.597	4467.8	5147.7	10.6662	6.799	4467.7	5147.6	10.3463
1300	72.602	4683.7	5409.7	11.5811	14.521	4683.6	5409.6	10.8382	7.260	4683.5	5409.5	10.5183
<b><i>P</i> = .20 MPa (120.23)</b>				<b><i>P</i> = .30 MPa (133.55)</b>				<b><i>P</i> = .40 MPa (143.63)</b>				
Sat.	.8857	2529.5	2706.7	7.1272	.6058	2543.6	2725.3	6.9919	.4625	2553.6	2738.6	6.8959
150	.9596	2576.9	2768.8	7.2795	.6339	2570.8	2761.0	7.0778	.4708	2564.5	2752.8	6.9299
200	1.0803	2654.4	2870.5	7.5066	.7163	2650.7	2865.6	7.3115	.5342	2646.8	2860.5	7.1706
250	1.1988	2731.2	2971.0	7.7086	.7964	2728.7	2967.6	7.5166	.5951	2726.1	2964.2	7.3789
300	1.3162	2808.6	3071.8	7.8926	.8753	2806.7	3069.3	7.7022	.6548	2804.8	3066.8	7.5662
400	1.5493	2966.7	3276.6	8.2218	1.0315	2965.6	3275.0	8.0330	.7726	2964.4	3273.4	7.8985
500	1.7814	3130.8	3487.1	8.5133	1.1867	3130.0	3486.0	8.3251	.8893	3129.2	3484.9	8.1913
600	2.013	3301.4	3704.0	8.7770	1.3414	3300.8	3703.2	8.5892	1.0055	3300.2	3702.4	8.4558
700	2.244	3478.8	3927.6	9.0194	1.4957	3478.4	3927.1	8.8319	1.1215	3477.9	3926.5	8.6987
800	2.475	3663.1	4158.2	9.2449	1.6499	3662.9	4157.8	9.0576	1.2372	3662.4	4157.3	8.9244
900	2.706	3854.5	4395.8	9.4566	1.8041	3854.2	4395.4	9.2692	1.3529	3853.9	4395.1	9.1362
1000	2.937	4052.5	4640.0	9.6563	1.9581	4052.3	4639.7	9.4690	1.4685	4052.0	4639.4	9.3360
1100	3.168	4257.0	4890.7	9.8458	2.1121	4256.8	4890.4	9.6585	1.5840	4256.5	4890.2	9.5256
1200	3.399	4467.5	5147.3	10.0262	2.2661	4467.2	5147.1	9.8389	1.6996	4467.0	5146.8	9.7060
1300	3.630	4683.2	5409.3	10.1982	2.4201	4683.0	5409.0	10.0110	1.8151	4682.8	5408.8	9.8780
<b><i>P</i> = .50 MPa (151.86)</b>				<b><i>P</i> = .60 MPa (158.85)</b>				<b><i>P</i> = .80 MPa (170.43)</b>				
Sat.	.3749	2561.2	2748.7	6.8213	.3157	2567.4	2756.8	6.7600	.2404	2576.8	2769.1	6.6628
200	.4249	2642.9	2855.4	7.0592	.3520	2638.9	2850.1	6.9665	.2608	2630.6	2839.3	6.8158
250	.4744	2723.5	2960.7	7.2709	.3938	2720.9	2957.2	7.1816	.2931	2715.5	2950.0	7.0384
300	.5226	2802.9	3064.2	7.4599	.4344	2801.0	3061.6	7.3724	.3241	2797.2	3056.5	7.2328
350	.5701	2882.6	3167.7	7.6329	.4742	2881.2	3165.7	7.5464	.3544	2878.2	3161.7	7.4089
400	.6173	2963.2	3271.9	7.7938	.5137	2962.1	3270.3	7.7079	.3843	2959.7	3267.1	7.5716
500	.7109	3128.4	3483.9	8.0873	.5920	3127.6	3482.8	8.0021	.4433	3126.0	3480.6	7.8673
600	.8041	3299.6	3701.7	8.3522	.6697	3299.1	3700.9	8.2674	.5018	3297.9	3699.4	8.1333
700	.8969	3477.5	3925.9	8.5952	.7472	3477.0	3925.3	8.5107	.5601	3476.2	3924.2	8.3770
800	.9896	3662.1	4156.9	8.8211	.8245	3661.8	4156.5	8.7367	.6181	3661.1	4155.6	8.6033
900	1.0822	3853.6	4394.7	9.0329	.9017	3853.4	4394.4	8.9486	.6761	3852.8	4393.7	8.8153
1000	1.1747	4051.8	4639.1	9.2328	.9788	4051.5	4638.8	9.1485	.7340	4051.0	4638.2	9.0153
1100	1.2672	4256.3	4889.9	9.4224	1.0559	4256.1	4889.6	9.3381	.7919	4255.6	4889.1	9.2050
1200	1.3596	4466.8	5146.6	9.6029	1.1330	4466.5	5146.3	9.5185	.8497	4466.1	5145.9	9.3855
1300	1.4521	4682.5	5408.6	9.7749	1.2101	4682.3	5408.3	9.6906	.9076	4681.8	5407.9	9.5575
<b><i>P</i> = 1.00 MPa (179.91)</b>				<b><i>P</i> = 1.20 MPa (187.99)</b>				<b><i>P</i> = 1.40 MPa (195.07)</b>				
Sat.	.194 44	2583.6	2778.1	6.5865	.163 33	2588.8	2784.8	6.5233	.140 84	2592.8	2790.0	6.4693
200	.2060	2621.9	2827.9	6.6940	.169 30	2612.8	2815.9	6.5898	.143 02	2603.1	2803.3	6.4975
250	.2327	2709.9	2942.6	6.9247	.192 34	2704.2	2935.0	6.8294	.163 50	2698.3	2927.2	6.7467
300	.2579	2793.2	3051.2	7.1229	.2138	2789.2	3045.8	7.0317	.182 28	2785.2	3040.4	6.9534
350	.2825	2875.2	3157.7	7.3011	.2345	2872.2	3153.6	7.2121	.2003	2869.2	3149.5	7.1360
400	.3066	2957.3	3263.9	7.4651	.2548	2954.9	3260.7	7.3774	.2178	2952.5	3257.5	7.3026
500	.3541	3124.4	3478.5	7.7622	.2946	3122.8	3476.3	7.6759	.2521	3121.1	3474.1	7.6027
600	.4011	3296.8	3697.9	8.0290	.3339	3295.6	3696.3	7.9435	.2860	3294.4	3694.8	7.8710
700	.4478	3475.3	3923.1	8.2731	.3729	3474.4	3922.0	8.1881	.3195	3473.6	3920.8	8.1160
800	.4943	3660.4	4154.7	8.4996	.4118	3659.7	4153.8	8.4148	.3528	3659.0	4153.0	8.3431
900	.5407	3852.2	4392.9	8.7118	.4505	3851.6	4392.2	8.6272	.3861	3851.1	4391.5	8.5556
1000	.5871	4050.5	4637.6	8.9119	.4892	4050.0	4637.0	8.8274	.4192	4049.5	4636.4	8.7559
1100	.6335	4255.1	4888.6	9.1017	.5278	4254.6	4888.0	9.0172	.4524	4254.1	4887.5	8.9457
1200	.6798	4465.6	5145.4	9.2822	.5665	4465.1	5144.9	9.1977	.4855	4464.7	5144.4	9.1262
1300	.7261	4681.3	5407.4	9.4543	.6051	4680.9	5407.0	9.3698	.5186	4680.4	5406.5	9.2984
<b><i>P</i> = 1.60 MPa (201.41)</b>				<b><i>P</i> = 1.80 MPa (207.15)</b>				<b><i>P</i> = 2.00 MPa (212.42)</b>				
Sat.	.123 80	2596.0	2794.0	6.4218	.110 42	2598.4	2797.1	6.3794	.099 63	2600.3	2799.5	6.3409
225	.132 87	2644.7	2857.3	6.5518	.116 73	2636.6	2846.7	6.4808	.103 77	2628.3	2835.8	6.4147
250	.141 84	2692.3	2919.2	6.6732	.124 97	2686.0	2911.0	6.6066	.111 44	2679.6	2902.5	6.5453
300	.158 62	2781.1	3034.8	6.8844	.140 21	2776.9	3029.2	6.8226	.125 47	2772.6	3023.5	6.7664
350	.174 56	2866.1	3145.4	7.0694	.154 57	2863.0	3141.2	7.0100	.138 57	2859.8	3137.0	6.9563
400	.190 05	2950.1	3254.2	7.2374	.168 47	2947.7	3250.9	7.1794	.151 20	2945.2	3247.6	7.1271
500	.2203	3119.5	3472.0	7.5390	.195 50	3117.9	3469.8	7.4825	.175 68	3116.2	3467.6	7.4317
600	.2500	3293.3	3693.2	7.8080	.2220	3292.1	3691.7	7.7523	.199 60	3290.9	3690.1	7.7024
700	.2794	3472.7	3919.7	8.0535	.2482	3471.8	3918.5	7.9983	.2232	3470.9	3917.4	7.9487
800	.3086	3658.3	4152.1	8.2808	.2742	3657.6	4151.2	8.2258	.2467	3657.0	4150.3	8.1765
900	.3377	3850.5	4390.8	8.4935	.3001	3849.9	4390.1	8.4386	.2700	3849.3	4389.4	8.3895
1000	.3668	4049.0	4635.8	8.6938	.3260	4048.5	4635.2	8.6391	.2933	4048.0	4634.6	8.5901
1100	.3958	4253.7	4887.0									

## Vapeur surchauffée

<i>T</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>h</i>	<i>s</i>
<b><i>P</i> = 2.50 MPa (223.99)</b>												
Sat.	.079 98	2603.1	2803.1	6.2575	.066 68	2604.1	2804.2	6.1869	.057 07	2603.7	2803.4	6.1253
225	.080 27	2605.6	2806.3	6.2639								
250	.087 00	2662.6	2880.1	6.4085	.070 58	2644.0	2855.8	6.2872	.058 72	2623.7	2829.2	6.1749
300	.098 90	2761.6	3008.8	6.6438	.081 14	2750.1	2993.5	6.5390	.068 42	2738.0	2977.5	6.4461
350	.109 76	2851.9	3126.3	6.8403	.090 53	2843.7	3115.3	6.7428	.076 78	2835.3	3104.0	6.6579
400	.120 10	2939.1	3239.3	7.0148	.099 36	2932.8	3230.9	6.9212	.084 53	2926.4	3222.3	6.8405
450	.130 14	3025.5	3350.8	7.1746	.107 87	3020.4	3344.0	7.0834	.091 96	3015.3	3337.2	7.0052
500	.139 98	3112.1	3462.1	7.3234	.116 19	3108.0	3456.5	7.2338	.099 18	3103.0	3450.9	7.1572
600	.159 30	3288.0	3686.3	7.5960	.132 43	3285.0	3682.3	7.5085	.113 24	3282.1	3678.4	7.4339
700	.178 32	3468.7	3914.5	7.8435	.148 38	3466.5	3911.7	7.7571	.126 99	3464.3	3908.8	7.6837
800	.197 16	3655.3	4148.2	8.0720	.164 14	3653.5	4145.9	7.9862	.140 56	3651.8	4143.7	7.9134
900	.215 90	3847.9	4387.6	8.2853	.179 80	3846.5	4385.9	8.1999	.154 02	3845.0	4384.1	8.1276
1000	.2346	4046.7	4633.1	8.4861	.195 41	4045.4	4631.6	8.4009	.167 43	4044.1	4630.1	8.3288
1100	.2532	4251.5	4884.6	8.6762	.210 98	4250.3	4883.3	8.5912	.180 80	4249.2	4881.9	8.5192
1200	.2718	4462.1	5141.7	8.8569	.226 52	4460.9	5140.5	8.7720	.194 15	4459.8	5139.3	8.7000
1300	.2905	4677.8	5404.0	9.0291	.242 06	4676.6	5402.8	8.9442	.207 49	4675.5	5401.7	8.8723
<b><i>P</i> = 3.00 MPa (233.90)</b>												
<b><i>P</i> = 3.50 MPa (242.60)</b>												
<b><i>P</i> = 4.0 MPa (250.40)</b>												
<b><i>P</i> = 4.5 MPa (257.49)</b>												
<b><i>P</i> = 5.0 MPa (263.99)</b>												
Sat.	.049 78	2602.3	2801.4	6.0701	.044 06	2600.1	2798.3	6.0198	.039 44	2597.1	2794.3	5.9734
275	.054 57	2667.9	2886.2	6.2285	.047 30	2650.3	2863.2	6.1401	.041 41	2631.3	2838.3	6.0544
300	.058 84	2725.3	2960.7	6.3615	.051 35	2712.0	2943.1	6.2828	.045 32	2698.0	2924.5	6.2084
350	.066 45	2826.7	3092.5	6.5821	.058 40	2817.8	3080.6	6.5131	.051 94	2808.7	3068.4	6.4493
400	.073 41	2919.9	3213.6	6.7690	.064 75	2913.3	3204.7	6.7047	.057 81	2906.6	3195.7	6.6459
450	.080 02	3010.2	3330.3	6.9363	.070 74	3005.0	3323.3	6.8746	.063 30	2999.7	3316.2	6.8186
500	.086 43	3099.5	3445.3	7.0901	.076 51	3095.3	3439.6	7.0301	.068 57	3091.0	3433.8	6.9759
600	.098 85	3279.1	3674.4	7.3688	.087 65	3276.0	3670.5	7.3110	.078 69	3273.0	3666.5	7.2589
700	.110 95	3462.1	3905.9	7.6198	.098 47	3459.9	3903.0	7.5631	.088 49	3457.6	3900.1	7.5122
800	.122 87	3650.0	4141.5	7.8502	.109 11	3648.3	4139.3	7.7942	.098 11	3646.6	4137.1	7.7440
900	.134 69	3843.6	4382.3	8.0647	.119 65	3842.2	4380.6	8.0091	.107 62	3840.7	4378.8	7.9593
1000	.146 45	4042.9	4628.7	8.2662	.130 13	4041.6	4627.2	8.2108	.117 07	4040.4	4625.7	8.1612
1100	.158 17	4248.0	4880.6	8.4567	.140 56	4246.8	4879.3	8.4015	.126 48	4245.6	4878.0	8.3520
1200	.169 87	4458.6	5138.1	8.6376	.150 98	4457.5	5136.9	8.5825	.135 87	4456.3	5135.7	8.5331
1300	.181 56	4674.3	5400.5	8.8100	.161 39	4673.1	5399.4	8.7549	.145 26	4672.0	5398.2	8.7055
<b><i>P</i> = 6.0 MPa (275.64)</b>												
<b><i>P</i> = 7.0 MPa (285.88)</b>												
<b><i>P</i> = 8.0 MPa (295.06)</b>												
Sat.	.032 44	2589.7	2784.3	5.8892	.027 37	2580.5	2772.1	5.8133	.023 52	2569.8	2758.0	5.7432
300	.036 16	2667.2	2884.2	6.0674	.029 47	2632.2	2838.4	5.9305	.024 26	2590.9	2785.0	5.7906
350	.042 23	2789.6	3043.0	6.3335	.035 24	2769.4	3016.0	6.2283	.029 95	2747.7	2987.3	6.1301
400	.047 39	2892.9	3177.2	6.5408	.039 93	2878.6	3158.1	6.4478	.034 32	2863.8	3138.3	6.3634
450	.052 14	2988.9	3301.8	6.7193	.044 16	2978.0	3287.1	6.6327	.038 17	2966.7	3272.0	6.5551
500	.056 65	3082.2	3422.2	6.8803	.048 14	3073.4	3410.3	6.7975	.041 75	3064.3	3398.3	6.7240
550	.061 01	3174.6	3540.6	7.0288	.051 95	3167.2	3530.9	6.9486	.045 16	3159.8	3521.0	6.8778
600	.065 25	3266.9	3658.4	7.1677	.055 65	3260.7	3650.3	7.0894	.048 45	3254.4	3642.0	7.0206
700	.073 52	3453.1	3894.2	7.4234	.062 83	3448.5	3888.3	7.3476	.054 81	3443.9	3882.4	7.2812
800	.081 60	3643.1	4132.7	7.6566	.069 81	3639.5	4128.2	7.5822	.060 97	3636.0	4123.8	7.5173
900	.089 58	3837.8	4375.3	7.8727	.076 69	3835.0	4371.8	7.7991	.067 02	3832.1	4368.3	7.7351
1000	.097 49	4037.8	4622.7	8.0751	.083 50	4035.3	4619.8	8.0020	.073 01	4032.8	4616.9	7.9384
1100	.105 36	4243.3	4875.4	8.2661	.090 27	4240.9	4872.8	8.1933	.078 96	4238.6	4870.3	8.1300
1200	.113 21	4454.0	5133.3	8.4474	.097 03	4451.7	5130.9	8.3747	.084 89	4449.5	5128.5	8.3115
1300	.121 06	4669.6	5396.0	8.6199	.103 77	4667.3	5393.7	8.5473	.090 80	4665.0	5391.5	8.4842
<b><i>P</i> = 9.0 MPa (303.40)</b>												
<b><i>P</i> = 10.0 MPa (311.06)</b>												
<b><i>P</i> = 12.5 MPa (327.89)</b>												
Sat.	.020 48	2557.8	2742.1	5.6772	.018 026	2544.4	2724.7	5.6141	.013 495	2505.1	2673.8	5.4624
325	.023 27	2646.6	2856.0	5.8712	.019 861	2610.4	2809.1	5.7568				
350	.025 80	2724.4	2956.6	6.0361	.022 42	2699.2	2923.4	5.9443	.016 126	2624.6	2826.2	5.7118
400	.029 93	2848.4	3117.8	6.2854	.026 41	2832.4	3096.5	6.2120	.020 00	2789.3	3039.3	6.0417
450	.033 50	2955.2	3256.6	6.4844	.029 75	2943.4	3240.9	6.4190	.022 99	2912.5	3199.8	6.2719
500	.036 77	3055.2	3386.1	6.6576	.032 79	3045.8	3373.7	6.5966	.025 60	3021.7	3341.8	6.4618
550	.039 87	3152.2	3511.0	6.8142	.035 64	3144.6	3500.9	6.7561	.028 01	3125.0	3475.2	6.6290
600	.042 85	3248.1	3633.7	6.9589	.038 37	3241.7	3625.3	6.9029	.030 29	3225.4	3604.0	6.7810
650	.045 74	3343.6	3755.3	7.0943	.041 01	3338.2	3748.2	7.0398	.032 48	3324.4	3730.4	6.9218
700	.048 57	3439.3	3876.5	7.2221	.043 58	3434.7	3870.5	7.1687	.034 60	3422.9	3855.3	7.0536
800	.054 09	3632.5	4119.3	7.4596	.048 59	3628.9	4114.8	7.4077	.038 69	3620.0	4103.6	7.2965
900	.059 50	3829.2	4364.8	7.6783	.053 49	3826.3	4361.2	7.6272	.042 67	3819.1	4352.5	7.5182
1000	.064 85	4030.3	4614.0	7.8821	.058 32	4027.8	4611.0	7.8315	.046 58	4021.6	4603.8	7.7237
1100	.070 16	4236.3	4867.7	8.0740	.063 12	4234.0	4865.1	8.0237	.050 45	4228.2	4858.8	7.9165
1200	.075 44	4447.2	5126.2	8.2556	.067 89	4444.9	5123.8	8.2055	.054 30	4439.3	5118.0	8.0987
1300	.080 72	4662.7	5389.2	8.4284	.072 65	4460.5	5387.0	8.3783	.058 13	4654.8	5381.4	8.2717
<b><i>P</i> = 15.0 MPa (342.24)</b>												
<b><i>P</i> = 17.5 MPa (354.75)</b>												
<b><i>P</i> = 20.0 MPa (365.81)</b>												
Sat.	.010 337	2455.5	2610.5	5.3098	.007 920	2390.2	2528.8	5.1419	.005 834	2293.0	2409.7	4.9269
350	.011 470	2520.4	2692.4	5.4421								
400	.015 649	2740.7	2975.5	5.8811	.012 447	2685.0	2902.9	5.7213	.009 942	2619.3	2818.1	5.5540
450	.018 445	2879.5	3156.2	6.1404	.015 174	2844.2	3109.7	6.0184	.012 695	2806.2	3060.1	5.9017
500	.020 80	2996.6	3308.6	6.3443	.017 358	2970.3	3274.1	6.2383	.014 768	2942.9	3238.2	6.1401
550	.022 93	3104.7	3448.6	6.5199	.019 288	3083.9	3421.4	6.4230	.016 555	3062.4	3393.5	6.3348
600	.024 91	3208.6	3582.3	6.6776	.021 06	3191.5	3560.1	6.5866	.018 178	3174.0	3537.6	6.5048
650	.026 80	3310.3	3712.3	6.8224	.022 74	3296.0	3693.9	6.7357	.019 693	3281.4	3675.3	6.6582
700	.028 61	3410.9	3840.1	6.9572	.024 34	3398.7	3824.6	6.8736	.021 13	3386.4	3809.0	6.7993
800	.032 10	3610.9	4092.4	7.2040	.027 38	3601.8	4081.1	7.1244	.023 85	3592.7	4069.7	7.0544
900	.035 46	3811.										

## Vapeur surchauffée

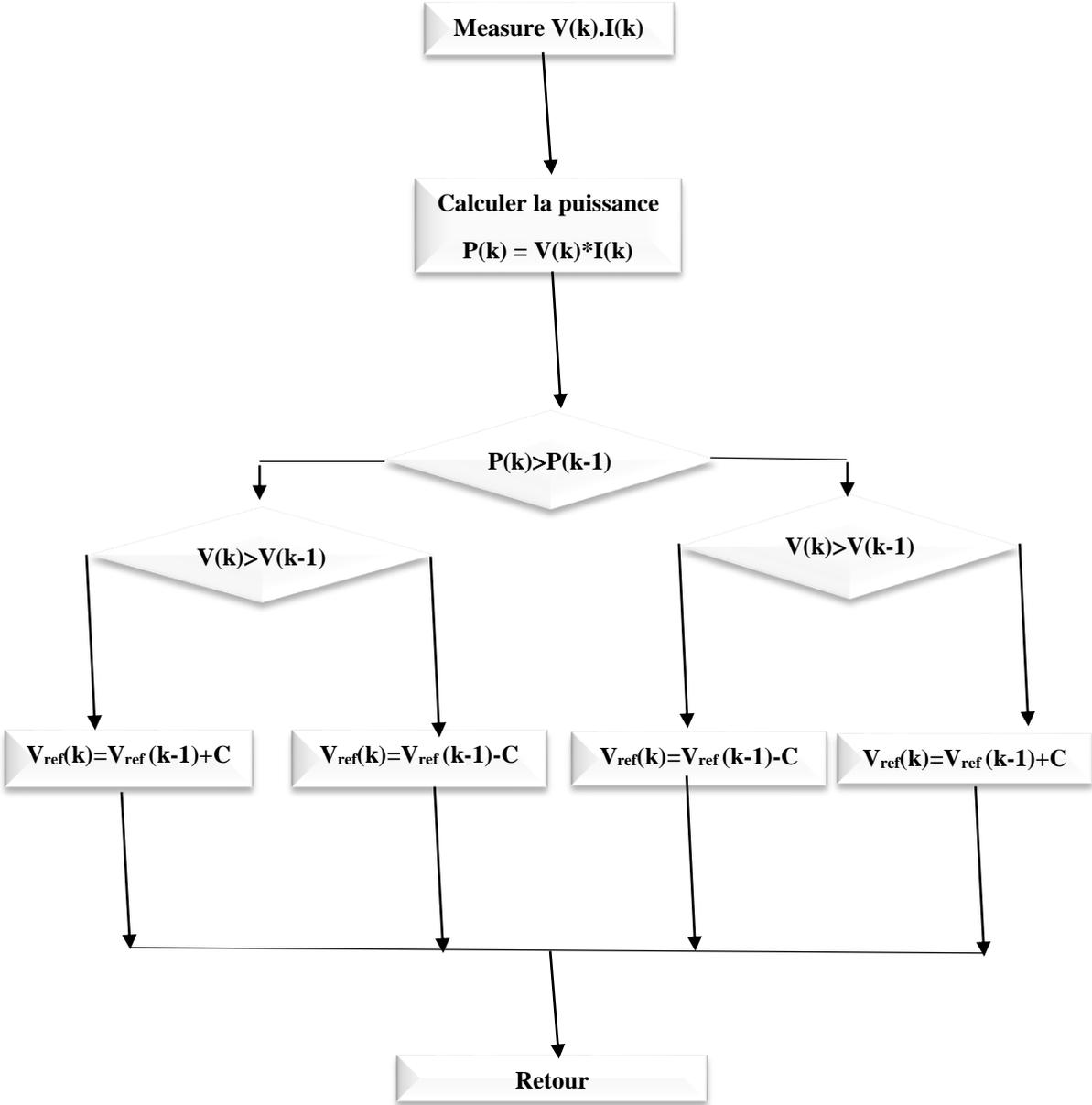
T	v	u	h	s	v	u	h	s	v	u	h	s								
<b>P = 25.0 MPa</b>													<b>P = 30.0 MPa</b>				<b>P = 35.0 MPa</b>			
375	.001 973 1	1798.7	1848.0	4.0320	.001 789 2	1737.8	1791.5	3.9305	.001 700 3	1702.9	1762.4	3.8722								
400	.006 004	2430.1	2580.2	5.1418	.002 790	2067.4	2151.1	4.4728	.002 100	1914.1	1987.6	4.2126								
425	.007 881	2609.2	2806.3	5.4723	.005 303	2455.1	2614.2	5.1504	.003 428	2253.4	2373.4	4.7747								
450	.009 162	2720.7	2949.7	5.6744	.006 735	2619.3	2821.4	5.4424	.004 961	2498.7	2672.4	5.1962								
500	.011 123	2884.3	3162.4	5.9592	.008 678	2820.7	3081.1	5.7905	.006 927	2751.9	2994.4	5.6282								
550	.012 724	3017.5	3335.6	6.1765	.010 168	2970.3	3275.4	6.0342	.008 345	2921.0	3213.0	5.9026								
600	.014 137	3137.9	3491.4	6.3602	.011 446	3100.5	3443.9	6.2331	.009 527	3062.0	3395.5	6.1179								
650	.015 433	3251.6	3637.4	6.5229	.012 596	3221.0	3598.9	6.4058	.010 575	3189.8	3559.9	6.3010								
700	.016 646	3361.3	3777.5	6.6707	.013 661	3335.8	3745.6	6.5606	.011 533	3309.8	3713.5	6.4631								
800	.018 912	3574.3	4047.1	6.9345	.015 623	3555.5	4024.2	6.8332	.013 278	3536.7	4001.5	6.7450								
900	.021 045	3783.0	4309.1	7.1680	.017 448	3768.5	4291.9	7.0718	.014 883	3754.0	4274.9	6.9886								
1000	.023 10	3990.9	4568.5	7.3802	.019 196	3978.8	4554.7	7.2867	.016 410	3966.7	4541.1	7.2064								
1100	.025 12	4200.2	4828.2	7.5765	.020 903	4189.2	4816.3	7.4845	.017 895	4178.3	4804.6	7.4057								
1200	.027 11	4412.0	5089.9	7.7605	.022 589	4401.3	5079.0	7.6692	.019 360	4390.7	5068.3	7.5910								
1300	.029 10	4626.9	5354.4	7.9342	.024 266	4616.0	5344.0	7.8432	.020 815	4605.1	5333.6	7.7653								
<b>P = 40.0 MPa</b>													<b>P = 50.0 MPa</b>				<b>P = 60.0 MPa</b>			
375	.001 640 7	1677.1	1742.8	3.8290	.001 559 4	1638.6	1716.6	3.7639	.001 502 8	1609.4	1699.5	3.7141								
400	.001 907 7	1854.6	1930.9	4.1135	.001 730 9	1788.1	1874.6	4.0031	.001 633 5	1745.4	1843.4	3.9318								
425	.002 532	2096.9	2198.1	4.5029	.002 007	1959.7	2060.0	4.2734	.001 816 5	1892.7	2001.7	4.1626								
450	.003 693	2365.1	2512.8	4.9459	.002 486	2159.6	2284.0	4.5884	.002 085	2053.9	2179.0	4.4121								
500	.005 622	2678.4	2903.3	5.4700	.003 892	2525.5	2720.1	5.1726	.002 956	2390.6	2567.9	4.9321								
550	.006 984	2869.7	3149.1	5.7785	.005 118	2763.6	3019.5	5.5485	.003 956	2658.8	2896.2	5.3441								
600	.008 094	3022.6	3346.4	6.0114	.006 112	2942.0	3247.6	5.8178	.004 834	2861.1	3151.2	5.6452								
650	.009 063	3158.0	3520.6	6.2054	.006 966	3093.5	3441.8	6.0342	.005 595	3028.8	3364.5	5.8829								
700	.009 941	3283.6	3681.2	6.3750	.007 727	3230.5	3616.8	6.2189	.006 272	3177.2	3553.5	6.0824								
800	.011 523	3517.8	3978.7	6.6662	.009 076	3479.8	3933.6	6.5290	.007 459	3441.5	3889.1	6.4109								
900	.012 962	3739.4	4257.9	6.9150	.010 283	3710.3	4224.4	6.7882	.008 508	3681.0	4191.5	6.6805								
1000	.014 324	3954.6	4527.6	7.1356	.011 411	3930.5	4501.1	7.0146	.009 480	3906.4	4475.2	6.9127								
1100	.015 642	4167.4	4793.1	7.3364	.012 496	4145.7	4770.5	7.2184	.010 409	4124.1	4748.6	7.1195								
1200	.016 940	4380.1	5057.7	7.5224	.013 561	4359.1	5037.2	7.4058	.011 317	4338.2	5017.2	7.3083								
1300	.018 229	4594.3	5323.5	7.6969	.014 616	4572.8	5303.6	7.5808	.012 215	4551.4	5284.3	7.4837								

## Liquide comprimé

T	v	u	h	s	v	u	h	s	v	u	h	s								
<b>P = 5 MPa (263.99)</b>													<b>P = 10 MPa (311.06)</b>				<b>P = 15 MPa (342.24)</b>			
Sat.	.001 285 9	1147.8	1154.2	2.9202	.001 452 4	1393.0	1407.6	3.3596	.001 658 1	1585.6	1610.5	3.6848								
0	.000 997 7	.04	5.04	.0001	.000 995 2	.09	10.04	.0002	.000 992 8	.15	15.05	.0004								
20	.000 999 5	83.65	88.65	.2956	.000 997 2	83.36	93.33	.2945	.000 995 0	83.06	97.99	.2934								
40	.001 005 6	166.95	171.97	.5705	.001 003 4	166.35	176.38	.5686	.001 001 3	165.76	180.78	.5666								
60	.001 014 9	250.23	255.30	.8285	.001 012 7	249.36	259.49	.8258	.001 010 5	248.51	263.67	.8232								
80	.001 026 8	333.72	338.85	1.0720	.001 024 5	332.59	342.83	1.0688	.001 022 2	331.48	346.81	1.0656								
100	.001 041 0	417.52	422.72	1.3030	.001 038 5	416.12	426.50	1.2992	.001 036 1	414.74	430.28	1.2955								
120	.001 057 6	501.80	507.09	1.5233	.001 054 9	500.08	510.64	1.5189	.001 052 2	498.40	514.19	1.5145								
140	.001 076 8	586.76	592.15	1.7343	.001 073 7	584.68	595.42	1.7292	.001 070 7	582.66	598.72	1.7242								
160	.001 098 8	672.62	678.12	1.9375	.001 095 3	670.13	681.08	1.9317	.001 091 8	667.71	684.09	1.9260								
180	.001 124 0	759.63	765.25	2.1341	.001 119 9	756.65	767.84	2.1275	.001 115 9	753.76	770.50	2.1210								
200	.001 153 0	848.1	853.9	2.3255	.001 148 0	844.5	856.0	2.3178	.001 143 3	841.0	858.2	2.3104								
220	.001 186 6	938.4	944.4	2.5128	.001 180 5	934.1	945.9	2.5039	.001 174 8	929.9	947.5	2.4953								
240	.001 226 4	1031.4	1037.5	2.6979	.001 218 7	1026.0	1038.1	2.6872	.001 211 4	1020.8	1039.0	2.6771								
260	.001 274 9	1127.9	1134.3	2.8830	.001 264 5	1121.1	1133.7	2.8699	.001 255 0	1114.6	1133.4	2.8576								
280					.001 321 6	1220.9	1234.1	3.0548	.001 308 4	1212.5	1232.1	3.0393								
300					.001 397 2	1328.4	1342.3	3.2469	.001 377 0	1316.6	1337.3	3.2260								
320									.001 472 4	1431.1	1453.2	3.4247								
340									.001 631 1	1567.5	1591.9	3.6546								
<b>P = 20 MPa (365.81)</b>													<b>P = 30 MPa</b>				<b>P = 50 MPa</b>			
Sat.	.002 036	1785.6	1826.3	4.0139	.000 985 6	.25	29.82	.0001	.000 976 6	.20	49.03	.0014								
0	.000 990 4	.19	20.01	.0004	.000 988 6	82.17	111.84	.2899	.000 980 4	81.00	130.02	.2848								
20	.000 992 8	82.77	102.62	.2923	.000 995 1	164.04	193.89	.5607	.000 987 2	161.86	211.21	.5527								
40	.001 008 4	247.68	267.85	.8206	.001 004 2	246.06	276.19	.8154	.000 996 2	242.98	292.79	.8052								
60	.001 019 9	330.40	350.80	1.0624	.001 015 6	328.30	358.77	1.0561	.001 007 3	324.34	374.70	1.0440								
100	.001 033 7	413.39	434.06	1.2917	.001 029 0	410.78	441.66	1.2844	.001 020 1	405.88	456.89	1.2703								
120	.001 049 6	496.76	517.76	1.5102	.001 044 5	493.59	524.93	1.5018	.001 034 8	487.65	539.39	1.4857								
140	.001 067 8	580.69	602.04	1.7193	.001 062 1	576.88	608.75	1.7098	.001 051 5	569.77	622.35	1.6915								
160	.001 088 5	665.35	687.12	1.9204	.001 082 1	660.82	693.28	1.9096	.001 070 3	652.41	705.92	1.8891								
180	.001 112 0	750.95	773.20	2.1147	.001 104 7	745.59	778.73	2.1024	.001 091 2	735.69	790.25	2.0794								
200	.001 138 8	837.7	860.5	2.3031	.001 130 2	831.4	865.3	2.2893	.001 114 6	819.7	875.5	2.2634								
220	.001 169 3	925.9	949.3	2.4870	.001 159 0	918.3	953.1	2.4711	.001 140 8	904.7	961.7	2.4419								
240	.001 204 6	1016.0	1040.0	2.6674	.001 192 0	1006.9	1042.6	2.6490	.001 170 2	990.7	1049.2	2.6158								
260	.001 246 2	1108.6	1133.5	2.8459	.001 230 3	1097.4	1134.3	2.8243	.001 203 4	1078.1	1138.2	2.7860								
280	.001 296 5	1204.7	1230.6	3.0248	.001 275 5	1190.7	1229.0	2.9986	.001 241 5	1167.2	1229.3	2.9537								
300	.001 359 6	1306.1	1333.3	3.2071	.001 330 4	1287.9	1327.8	3.1741	.001 286 0	1258.7	1323.0	3.1200								
320	.001 443 7	1415.7	1444.6	3.3979	.001 399 7	1390.7	1432.7	3.3539	.001 338 8	1353.3	1420.2	3.2868								
340	.001 568 4	1539.7	1571.0	3.6075	.001 492 0	1501.7	1546.5	3.5426	.001 403 2	1452.0	1522.1	3.4557								
360	.001 822 6	1702.8	1739.3	3.8772	.001 626 5	1626.6	1675.4	3.7494	.001 483 8	1556.0	1630.2	3.6291								
380					.001 869 1	1781.4	1837.5	4.0012	.001 588 4	1667.2	1746.6	3.8101								

# ANNEXE N°2

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



# ANNEXE N°3

**Tableau:** Lifecycle estimation for electricity generators [45].

<i>Technology</i>	<b>Capacity/ Configuration / Fuel</b>	<b>Estimate « g CO<sub>2</sub>/ KWh »</b>
<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 <sub>L</sub> 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 <sub>L</sub> Gh:	Irradiation du rayonnement global horizontal		

Température en [°C]

Vitesse du vent en [m/s]

Durée d'insolation en [h/jour]

Rayonnement en [kWh/m<sup>2</sup>]



# 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) - Annexe 1 - 2010-2019

# **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 <sub>L</sub> 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 <sub>L</sub> 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]