

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique

Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -

Tasdawit Akli Muḥend Ulḥağ - Tubirett -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة أكلي محمد أولحاج  
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Référence : ...../MM/ 2023

المرجع: ...../م / 2023

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Par :

**Mohamed SEHALI**

**Ziri BOUAKLINE**

**Thème**

---

*Conception et analyse d'un système photovoltaïque  
éolien-pile à combustible -Batterie pour alimenter  
une petite communauté*

---

Soutenu le .....2023 devant le jury composé de :

Mr.

Président

Mr.

Examineur

Mme.

**Fazia BAGHDADI**

Encadrant



## نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة) *Bouabline Ziri*.....الصفة: طالب، استاذ، باحث *étudiant*

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: *110651193*.....والصادرة بتاريخ *17/09/2018*

المسجل(ة) بكلية / معهد *Sciences et sciences appliquées* قسم *Génie mécanique*

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوانها *conception et analyse d'un système photovoltaïque*

*éolien - pile à combustible - Batterie pour l'alimentation*

تحت إشراف الأستاذ(ة): *une petite communauté*  
*Bouabdadi fozia*

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة  
في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: *14/09/2023*

توقيع المعني(ة)

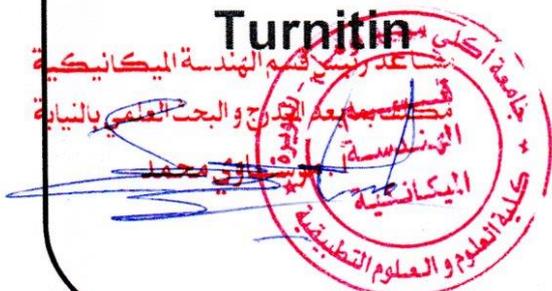
### رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

النسبة:

%

*25*

الامضاء:





## نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة) *Sekali Mohamed* الصفة: طالب، باحث، *étudiant*

الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: *100726543* والصادرة بتاريخ *27/04/2016*

المسجل(ة) بكلية / *Sciences et sciences appliquées* قسم *Génie mécanique*

والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث (مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوان: *conception et analyse d'un système photovoltaïque*

*éolien - Pile à combustible Batterie pour l'alimentation*  
*une petite commune*

تحت إشراف الأستاذ(ة): *Baghdadi Farja*

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: *14/09/2023*

توقيع المعني (ة)  
*[Signature]*

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

Turnitin

%

*25*

النسبة:

جامعة أكلي محمد أولحاج  
مساعد رئيس قسم الهندسة الميكانيكية  
البيزنطية ببنك التخرج والبحث العلمي بالنيابة  
الميكانيكية  
بوساوي محمد

الامضاء



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique  
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -  
X:07.6X .K1E C:8:1A :11.8.8 - X:0E0:t -



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة أكلي محمد أولحاج  
- البويرة -  
كلية العلوم والعلوم التطبيقية

**Génie mécanique**

**Spécialité:** *Énergétique*

**Autorisation de déposer un mémoire de Master  
pour soutenance**

Je soussigné, l'enseignant (e) :

*Fazja Baghdadati*

L'encadreur du mémoire de fin d'études des étudiants :

- 1- *Bouakline Zirij*
- 2- *Sehali Mohamed*

Ayant le mémoire de fin d'études de Master intitulé :

*Conception et analyse d'un système photovoltaïque  
éolien pile à combustible Batterie pour l'alimentation  
une petite communauté.*

**Promotion** : 20..... / 20.....

Et après voir et consulté le mémoire dans sa forme finale j'autorise les étudiants à l'imprimer  
et la déposer pour la soutenance.

**Signature du L'encadreur**

*Bagl*

**Bouira le :** *14/09/2023*

**Signature du chef de département**



# *Remerciements*

*Avant tout nous, tenons à remercier Allah qui nous a donné la foi et la patience pour réaliser ce travail.*

*Nous tenons à remercier Mm Baghdadí Faíza l'encadrant de ce mémoire pour les conseils et les efforts fournis pour réaliser ce travail.*

*Nous remercions chaleureusement messieurs le président et les membres de jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail.*

*Nos remerciements les plus vifs à notre collègue et ami monsieur Demouche Sofiane pour les conseils et sa contribution à la réalisation de ce travail.*

*Nous tenons à remercier les professeurs et tout le staff de département Génie Mécanique d'avoir fourni leurs efforts durant les années de formation.*

*Nos chaleureux remerciements à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce modeste travail.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes parents et mes grands  
parents que*

*Le bon dieu les gardes,*

*Mes frères et sœurs*

*Mes oncles Larbi et Toufik*

*Mes collègues et mes amis*

**Ziri Bouakline**

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Je le dédie à l'esprit de mon père,  
que j'aurais aimé être avec moi à  
cette occasion*

*Ma mère ma sœur wrida*

*Ma femme*

*Et tous mes frères et sœurs*

*La famille sehali*

*Ma famille théâtrale achmumah n  
wagdud*

**Sehali mohamed**

## Résumé

L'objectif de ce travail est d'effectuer une étude technique et économique pour un système hybride de génération d'électricité à base des sources renouvelable , afin d'alimenter un site isolé par une charge de 165.4 KW/jour , notre système se compose des générateurs PV et éolien pour la production électrique , un électrolyseur pour la production d'hydrogène pendant les périodes de surproduction et un réservoir d'hydrogène pour le stockage de  $H_2$  produit , qui sera ultérieurement utilisé par la PAC pour générer l'énergie quand la production est diminuée , et des batteries pour le stockage . L'enregistrement des données d'irradiation solaire et de vitesse du vent pour la communauté d'In Guezzam seront utilisées par le logiciel HOMER pour la simulation de la configuration.

Après la simulation et l'optimisation du logiciel, nous avons choisit la configuration la plus économique puisque la production électrique ne diffère pas grand-chose dans la différente configuration simulées par HOMER .

**Mots clés :** Générateur PV, générateur éolien, PAC, électrolyseur, HOMER, système hybride, batterie de stockage

## Abstract

The objective of this work is to carry out a technical and economic study for a hybrid electricity generation system based on renewable sources, in order to power an isolated site with a load of 165.4 Kw/day, our system consists of PV and wind generators for electricity production, an electrolyser for the production of hydrogen during periods of overproduction and a hydrogen tank for the storage of  $H_2$  produced, which will subsequently be used by the PAC to generate energy when the production is reduced, and batteries for storage. The recording of solar irradiation and wind speed data for the community of In Guezzam will be used by the HOMER software for configuration simulation.

After the simulation and optimization of the software, we chose the most economical configuration since the electrical production does not differ much in the different configurations simulated by HOMER.

**Keywords :** PV generator, wind generator, fuel cell , electrolyser, HOMER, hybrid system, storage battery

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>CHAPITRE I :</b>	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Les énergies renouvelables .....	3
I.2.1 L'énergie solaire.....	4
I.2.2 L'énergie éolienne .....	4
I.2.3 L'énergie hydraulique .....	5
I.2.4 La biomasse .....	6
I.2.5 La géothermie .....	7
I.2.6 L'hydrogène : .....	8
I.2.7 La pile à combustibles : .....	9
I.2.8 Le système hybride .....	9
I.2.8.1 Définition .....	9
I.2.8.2 Les avantages des systèmes hybrides .....	9
I.2.8.3 Présentation du système hybride .....	9
I.2.8.4 Les composants du système hybride.....	9
I.2.8.5 La classification des systèmes hybrides .....	13
I.2.8.6 Selon le régime de fonctionnement .....	13
I.2.8.7 La structure de système :.....	13
I.2.8.8 Critères d'optimisation du système hybride .....	15
I.3 Logiciels d'étude des systèmes hybrides .....	15
I.4 Etat de l'art des systèmes hybrides d'énergie .....	16
I.5 Conclusion .....	19
<b>CHAPITRE II :</b>	
II.1 Introduction.....	20
II.2 L'hydrogène vecteur énergétique .....	20
II.2.1 Définition .....	20
II.2.2 Les propriétés de l'hydrogène .....	20

II.2.3	La décomposition de l'eau .....	21
II.2.3.1	Les type d'électrolyseurs .....	22
II.3.	Stockage et transport de l'hydrogène .....	23
II.3.1	Le stockage de l'hydrogène .....	23
II.3.1.1	Stockage gazeux .....	23
II.3.1.2	Stockage liquide .....	24
II.3.1.3	Stockage moléculaire .....	24
II.4	Pile à combustible .....	27
II.4.1	Définition .....	27
II.4.2	Structure d'une pile à combustible .....	27
II.4.2.1	La puissance fournie par une pile à combustible .....	28
II.4.2.2	Les types des piles à combustibles .....	28
II.5	Conclusion .....	39
<b>CHAPITRE III :</b>		
III.1	Introduction .....	40
III.2	l'énergie solaire .....	40
III.2.1	Définition du soleil .....	40
III.3	Types d'énergie solaire .....	41
III.3.1	Energie solaire passive .....	41
III.3.2	L'éclairage naturel .....	42
III.3.3	L'énergie solaire thermique .....	42
III.4	L'énergie solaire photovoltaïque (PV).....	44
III.4.1	Histoire de l'énergie photovoltaïque (PV) .....	45
III.4.2	Les composants d'un système solaire photovoltaïque (PV) .....	45
III.4.3	La base de fonctionnement de système PV .....	46
III.4.4	Caractéristiques des panneaux photovoltaïques .....	47
III.4.4.1	Explication des caractéristiques .....	48
III.4.5	Avantages et Inconvénients de l'énergie photovoltaïque .....	49
III.5	Energie éolienne .....	50

III.5.1	Le vent et l'éolienne .....	50
III.5.2	Historique des éoliennes .....	51
III.5.3	Les différents types d'éolienne .....	51
III.5.4	Principe de fonctionnement .....	53
III.5.5	Les composants des éoliennes .....	54
III.6	Conclusion.....	55
<b>CHAPITRE IV :</b>		
IV.1	Introduction .....	56
IV.2	Présentation du logiciel HOMER .....	56
IV.2.1	Présentation de l'interface du logiciel .....	57
IV.2.2	Détails de la charges sur le logiciel .....	59
IV.3	Simulation .....	59
IV.3.1	Présentation de site d'étude .....	59
IV.3.2	Présentation du système a étudié .....	60
IV.3.3	Les ressources naturelles à In Guezzam .....	61
IV.3.3.1	Les données du vent .....	61
IV.3.3.2	Les données solaires sur le site .....	61
IV.3.3.3	La température .....	62
IV.3.4	La configuration du système hybride .....	62
IV.3.4.1	La charge électrique .....	62
IV.3.4.2	Le générateur photovoltaïque .....	64
IV.3.4.3	L'électrolyseur .....	64
IV.3.4.4	Le convertisseur .....	65
IV.3.4.5	L'aérogénérateur .....	65
IV.3.4.6	La pile à combustible .....	66
IV.3.4.7	Les batteries .....	67
IV.3.4.8	Le réservoir d'hydrogène .....	68
IV.4	Résultats et discussions .....	68
IV.4.1	L'aérogénérateur .....	70

IV.4.2	Résultats des batteries .....	70
IV.4.3	Les résultats du PV .....	71
IV.4.4	Les résultats du convertisseur .....	72
IV.4.5	Les résultats de la PAC .....	73
IV.4.6	Résultats d'électrolyseur .....	73
IV.4.7	Le réservoir d'hydrogène .....	74
IV.5	Interprétation de résultats .....	75
IV.6	Conclusion .....	76
	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>77</b>

### Références bibliographiques

### Annexes

## *Liste des figures*

Figure	Titre	Page
<b>CHAPITRE I :</b>		
<b>I.1</b>	Les énergies renouvelables	<b>3</b>
<b>I.2</b>	Energie solaire photovoltaïque	<b>4</b>
<b>I.3</b>	L'éolienne	<b>5</b>
<b>I.4</b>	Système d'exploitation d'énergie hydraulique	<b>6</b>
<b>I.5</b>	Système d'exploitation d'énergie de la biomasse	<b>7</b>
<b>I.6</b>	Système d'exploitation d'énergie de la géothermie	<b>7</b>
<b>I.7</b>	Exploitation d'énergie d'hydrogène	<b>8</b>
<b>I.8</b>	Pile à Combustible	<b>11</b>
<b>I.9</b>	Classification des systèmes hybrides	<b>14</b>
<b>I.10</b>	Schéma global du système hybride étudié.	<b>17</b>
<b>I.11</b>	Les systèmes photovoltaïques/thermiques	<b>17</b>
<b>I.12</b>	Les systèmes éoliennes/hydrauliques.	<b>18</b>

<b>I.13</b>	Les systèmes photovoltaïques/thermiques/éoliennes	<b>18</b>
<b>CHAPITRE II :</b>		
<b>II.1</b>	Propriétés de l'hydrogène	<b>21</b>
<b>II.2</b>	Schéma de la structure d'une pile à combustible	<b>27</b>
<b>II.3</b>	Pile à combustible à membrane polymère ou membrane échangeuse de protons	<b>29</b>
<b>II.4</b>	Pile à combustible au méthanol direct.	<b>31</b>
<b>II.5</b>	Pile à combustible à l'éthanol direct	<b>32</b>
<b>II.6</b>	Pile à combustible à acide phosphorique	<b>33</b>
<b>II.7</b>	Pile à combustible alcaline.	<b>35</b>
<b>II.8</b>	Pile à combustible à carbonate fondu	<b>36</b>
<b>II.9</b>	Pile à combustible à oxyde solide.	<b>37</b>
<b>CHAPITRE III :</b>		
<b>III.1</b>	Soleil	<b>41</b>
<b>III.2</b>	Energie solaire thermique à basse température	<b>42</b>
<b>III.3</b>	Centrale thermodynamique parabolique	<b>43</b>
<b>III.4</b>	Centrale solaire thermodynamique.	<b>43</b>
<b>III.5</b>	Centrale thermodynamique cylindre-parabolique	<b>44</b>
<b>III.6</b>	Système Photovoltaïque	<b>44</b>
<b>III.7</b>	Composants d'un système solaire photovoltaïque	<b>46</b>
<b>III.8</b>	Principe de fonctionnement de système photovoltaïque	<b>47</b>
<b>III.9</b>	Système Photovoltaïque énergie éolienne	<b>50</b>
<b>III.10</b>	Eoliennes à axes horizontal.	<b>52</b>
<b>III.11</b>	Eoliennes à axes vertical	<b>53</b>
<b>III.12</b>	Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent	<b>54</b>
<b>III.13</b>	Les composants des éoliennes	<b>55</b>
<b>CHAPITRE IV :</b>		
<b>IV.1</b>	Logo de HOMER Pro	<b>57</b>
<b>IV.2</b>	Interface de HOMER pro	<b>57</b>
<b>IV.3</b>	Ressources dans le logiciel HOMER	<b>58</b>
<b>IV.4</b>	Composantes du logiciel HOMER	<b>58</b>
<b>IV.5</b>	Ressources dans logiciel HOMER	<b>58</b>

<b>IV.6</b>	Configuration d'un système hybride	<b>59</b>
<b>IV.7</b>	Détails de la charge électrique dans HOMER	<b>59</b>
<b>IV.8</b>	Position géographique du site	<b>60</b>
<b>IV.9</b>	Configuration du système	<b>60</b>
<b>IV.10</b>	Variation de la vitesse du vent à In Guezzam	<b>61</b>
<b>IV.11</b>	Rayonnement solaire annuel à In Guezzam	<b>61</b>
<b>IV.12</b>	Variation de la température a In Guezzam	<b>62</b>
<b>IV.13</b>	Charge électrique	<b>63</b>
<b>IV.14</b>	Profil des moyennes des charges mensuelles	<b>63</b>
<b>IV.15</b>	Eolienne EOCYCLE EO10	<b>65</b>
<b>IV.16</b>	Puissance d'EOCYCLE EO10 en fonction de la vitesse du vent	<b>66</b>
<b>IV.17</b>	Temps de fonctionnement de la PAC	<b>67</b>
<b>IV.18</b>	Résultats optimisés pour le système hybride	<b>68</b>
<b>IV.19</b>	La meilleure configuration choisit par HOMER	<b>69</b>
<b>IV.20</b>	Résultats optimisés du système choisit	<b>69</b>
<b>IV.21</b>	Résultats mensuelle de la production électrique	<b>69</b>
<b>IV.22</b>	Fonctionnement annuel de l'aérogénérateur	<b>70</b>
<b>IV.23</b>	Résultats des batteries	<b>70</b>
<b>IV.24</b>	Profil annuel de chargement des batteries	<b>71</b>
<b>IV.25</b>	La production électrique annuelle des PV	<b>71</b>
<b>IV.26</b>	Les résultats du convertisseur solar X X3 hybride 10	<b>72</b>
<b>IV.27</b>	La simulation des résultats de l'onduleur et de redresseur	<b>72</b>
<b>IV.28</b>	Le résultat de la PAC	<b>73</b>
<b>IV.29</b>	La simulation des résultats de la PAC	<b>73</b>
<b>IV.30</b>	Les résultats d'électrolyseur	<b>73</b>
<b>IV.31</b>	La simulation des résultats annuels de l'électrolyseur	<b>74</b>
<b>IV.32</b>	La moyenne journalière de la production de l'hydrogène	<b>74</b>
<b>IV.33</b>	Les données mensuelles sur l'hydrogène	<b>74</b>
<b>IV.34</b>	Le coût total par type	<b>75</b>
<b>IV.35</b>	Le coût de différentes composantes du système	<b>76</b>

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>CHAPITRE II :</b>		
<b>II.1</b>	Technologies d'électrolyse de l'eau	<b>23</b>
<b>II.2</b>	Types des piles à combustibles	<b>28</b>
<b>II.3</b>	Types des piles à combustibles	<b>38</b>
<b>CHAPITRE IV :</b>		
<b>IV.1</b>	Caractéristiques du système photovoltaïque CS6X-325P	<b>64</b>
<b>IV.2</b>	Propriétés d'électrolyseur	<b>64</b>
<b>IV.3</b>	Propriétés du convertisseur	<b>65</b>
<b>IV.4</b>	Propriétés de l'EOCYCLE EO10	<b>66</b>
<b>IV.5</b>	Pile à combustible	<b>67</b>
<b>IV.6</b>	Propriété de batteries	<b>68</b>
<b>IV.7</b>	Propriétés du réservoir	<b>68</b>
<b>IV.8</b>	Informations sur la production de l'aérogénérateur	<b>70</b>
<b>IV.9</b>	Résultats du système PV	<b>71</b>
<b>IV.10</b>	Statistiques sur le réservoir	<b>75</b>

## Liste des symboles et des acronymes

**PV:** Photovoltaïque

**WT:** Wind turbine

**HOMER:** Electric Renewable Energy Hybrid Optimization Model

**SAM:** System Advisor Model

**NREL:** United States' National Renewable Energy Laboratory

**KOH :** Hydroxyde de potassium

**NaOH :** Hydroxyde de sodium

**$OH^-$  :** Ion hydroxyde

**EHT :** Electrolyseur de la vapeur a haute température

**YDC :** Oxyde de cérium dopé à l'yttrium

**PEM :** Membrane échangeuse de protons

**PAC :** Pile à combustible

**PEMFC :** Pile à combustible A membrane échangeuse de protons

**DMFC :** Pile à combustible au méthanol direct

**PAFC :** Pile à combustible à acide phosphorique

**DEFC :** pile à combustible à éthanol direct

**AFC :** Pile à combustible alcaline

**MCFC :** Pile à combustible à carbonate fondu

**SOFC :** Pile à combustible à oxyde solide

**CC :** Courant continu

**DC :** Courant continu

**AC :** Courant alternatif

**CA :** Courant alternatif

**IC :** Capital initial

**NPC :** Net present cost

**Pc** : Puissance crête

**I(V)**: Courbe qui représente le courant débité par un module photovoltaïque en fonction de la tension aux bornes du module

**Vco** : Tension à vide

**Icc** : Courant de court-circuit

**A** : ampère

**V**: volts

**W**: watts

**MW**: Mega watts

**KW**: Kilo watts

**EnR/H2**: Utilisation de l'hydrogène dans le cadre des énergies renouvelables et du stockage de l'énergie

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

# Introduction générale

---

L'accès à une alimentation électrique fiable et durable est un enjeu fondamental pour les communautés, en particulier dans des régions éloignées ou isolées. Dans le contexte actuel de transition énergétique et de préoccupation croissante pour l'environnement, la conception et l'analyse de systèmes d'alimentation novateurs deviennent cruciales pour répondre aux besoins énergétiques de manière efficace, propre et durable.

Pour notre travail on a choisi une région reculée d'Algérie qui est Ain Guezzam, qui est confrontée à des défis liés à l'approvisionnement énergétique, tels que l'éloignement des infrastructures électriques traditionnelles et la dépendance à l'égard de sources d'énergie fossile. Cependant, la position de cet endroit lui confère un potentiel considérable en termes d'énergie solaire et éolienne, qui pourrait être exploités pour répondre à ses besoins énergétiques.

Cette étude vise à concevoir, analyser et évaluer un système intégré d'énergie renouvelable pour cette communauté. Le système comprendra des panneaux photovoltaïques, des éoliennes, une pile à combustible et des batteries, afin de garantir une alimentation électrique continue, stable et respectueuse de l'environnement.

L'étude explorera les avantages et les défis liés à l'intégration de ces différentes sources d'énergie, ainsi que les implications technologiques, économiques et environnementales de la mise en œuvre d'un tel système. L'objectif est de contribuer à l'autonomie énergétique d'Ain Guezzam et de démontrer le potentiel de cette approche pour d'autres communautés.

Cette étude vise à réaliser une comparaison en termes de résultats en matière d'énergie renouvelable, suivant plusieurs scénarios de systèmes hybride. L'étude utilise le logiciel HOMER pro pour simuler différents systèmes d'énergie renouvelable et comparer leurs performances en termes d'aspects environnementaux et économiques. Pour ce faire, le travail est organisé comme suit :

**Premier chapitre :** est un bref aperçu sur les différentes sources d'énergies renouvelable ainsi que leur principe de fonctionnement.

**Deuxième chapitre :** concerne l'hydrogène en tant que combustible et les deux technologies d'électrolyse et des piles à combustible.

**Troisième chapitre :** est une présentation détaillée de l'énergie solaire et éolienne (types, composants, Caractère..).

**Quatrième chapitre :** est une présentation du logiciel HOMER pro et la partie simulation ainsi que les résultats de simulation.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale

**CHAPITRE 01 :**  
**LES DÉFÉRENTES SOURCES**  
**D'ÉNERGIE**  
**RENOUVELABLE**

## I.1. Introduction

La demande croissante des énergies et le risque d'épuisement des énergies fossiles pousse les énergéticiens à trouver des sources énergétiques nouvelles et durables tenant en compte des effets secondaires de leurs exploitation sur la nature (réchauffement climatique ) mais aussi des limitations de stockage énergétiques ,en particulier le stockage des énergies renouvelable.

Dans le domaine des énergies renouvelable, il existe plusieurs types d'énergies comme l'éolien pour le vent, les panneaux solaire pour le soleil etc. Le caractère intermittent de ces énergies, exige une solution plus efficace combinant plusieurs sources d'énergies nommé système hybride, afin d'assurer la continuité de production.

Dans ce chapitre nous exposerons est un aperçu des énergies renouvelables principales et des systèmes hybrides et leurs composants

## I.2. Les énergies renouvelables :

Par définition, les énergies dites renouvelables, sont potentiellement inépuisables.la nature peut les reconstituer assez rapidement, contrairement au gaz, au charbon et au pétrole, dont les réserves, constituées après les millions d'années, sont limitées. Les énergies solaires, éoliennes, hydrauliques, géothermiques, et de biomasse en sont les formes les plus courantes.

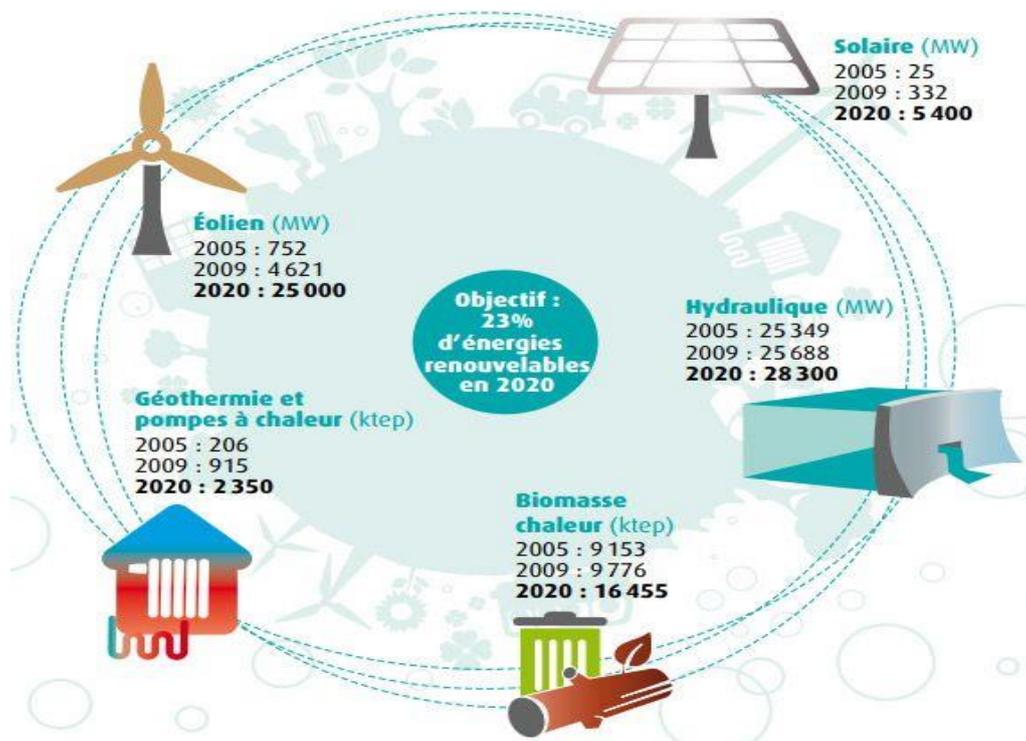


Figure I.1: Les énergies renouvelables

## I.2.1. L'énergie solaire:

La protection de l'environnement est devenue une préoccupation majeure. De nombreuses voies de recherches se sont, donc, orientées vers l'utilisation des énergies renouvelables, dont l'énergie solaire.

En une semaine, la planète reçoit sous forme de rayonnement solaire l'équivalent de ses réserves d'énergie fossiles. Une couverture de 0.1% de la surface du globe par les capteurs au rendement de 10% suffirait à satisfaire la consommation en énergie de l'humanité.

L'énergie solaire est une énergie renouvelable car elle utilise une source d'énergie d'origine naturelle qui est le soleil.

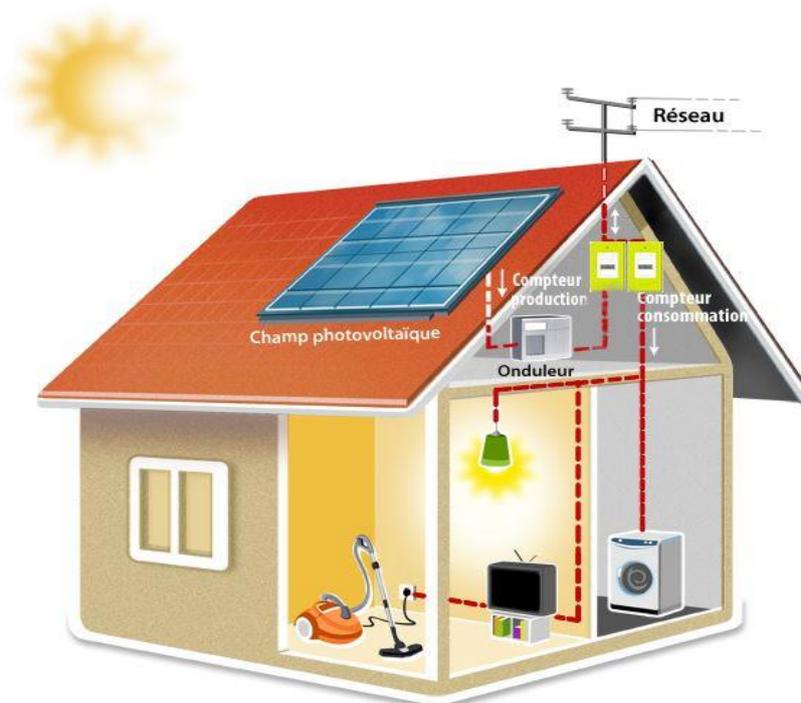


Figure I.2: Energie solaire photovoltaïque

## I.2.2. L'énergie éolienne :

Les éoliennes sont des machines qui convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, qui est ensuite transformée en énergie électrique par un alternateur.

La puissance d'une éolienne dépend de la vitesse du vent et de la taille des pales. Les éoliennes modernes sont capables de produire des puissances allant jusqu'à plusieurs mégawatts.

Le marché mondial des éoliennes terrestres est en croissance constante. Cette croissance est due à plusieurs facteurs, notamment la baisse des coûts de production et l'augmentation de la demande d'énergie renouvelable.

Les éoliennes sont une source d'énergie renouvelable, ce qui signifie qu'elles ne génèrent ni pollution ni émissions de gaz à effet de serre. Elles sont donc une alternative écologique aux sources d'énergie fossiles.



**Figure I.3 : L'éolienne**

### **I.2.3. L'énergie hydraulique :**

L'énergie hydraulique est une source d'énergie renouvelable qui utilise la force de l'eau pour produire de l'électricité ou de l'énergie mécanique.

L'eau est une ressource naturelle abondante et renouvelable. Elle est présente sur toute la planète et son cycle naturel d'évaporation et de précipitations assure son renouvellement constant.

L'énergie hydraulique peut être exploitée de différentes manières.

- Les moulins à eau utilisent la force de l'eau pour faire tourner des roues à aubes. Cette énergie mécanique peut être utilisée pour entraîner des machines, comme des moulins à grains ou des machines à tisser.

- Les barrages utilisent la force de l'eau pour faire tourner des turbines. Ces turbines sont reliées à des générateurs électriques qui produisent de l'électricité.
- Les marées utilisent l'énergie de l'eau qui monte et descend pour faire tourner des turbines. Cette énergie peut être utilisée pour produire de l'électricité ou pour pomper de l'eau.

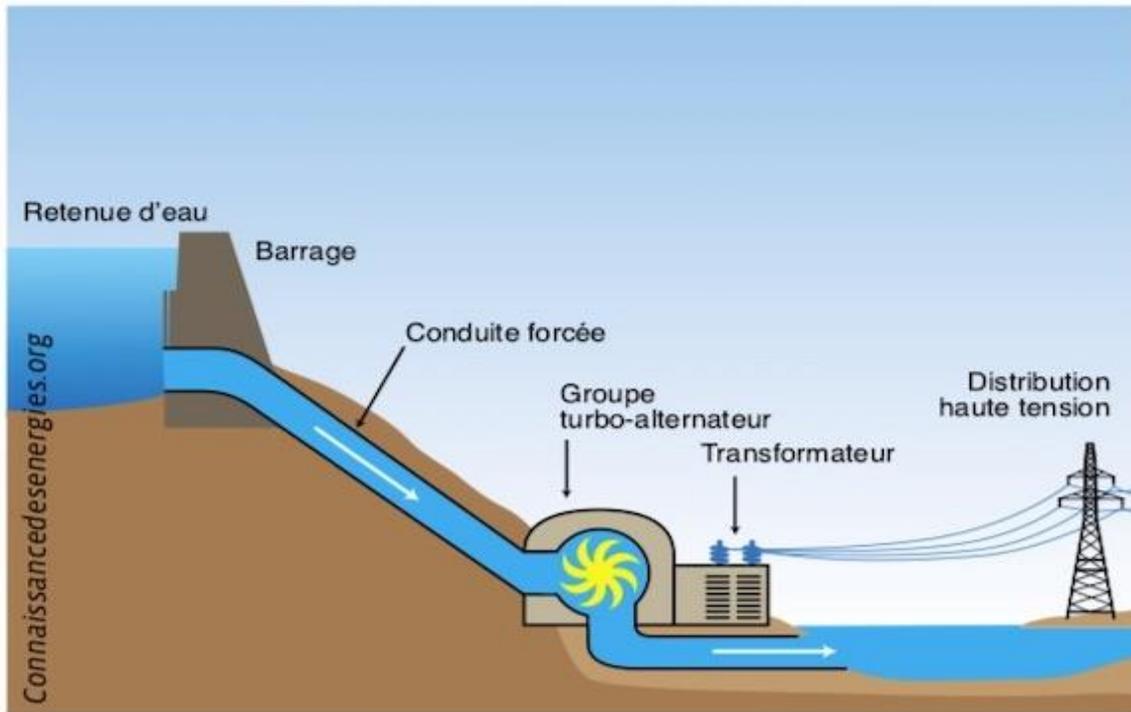


Figure I.4 : Système d'exploitation d'énergie hydraulique

### I.2.4. La biomasse :

La biomasse est l'énergie contenue dans les plantes et les matières organiques. Elle est constituée de tous les végétaux qui poussent sur Terre, ainsi que des déchets agricoles et forestiers, des déchets alimentaires et des matières organiques des déchets municipaux et industriels.

La biomasse est une source d'énergie renouvelable, ce qui signifie qu'elle peut être remplacée au fur et à mesure qu'elle est utilisée. Elle est également une source d'énergie propre, car elle ne produit pas de gaz à effet de serre.

La biomasse peut être utilisée pour produire de l'énergie de différentes manières. Elle peut être brûlée pour produire de la chaleur, qui peut ensuite être utilisée pour chauffer des bâtiments ou produire de l'électricité. Elle peut également être transformée en biocarburants, qui peuvent être utilisés pour alimenter les véhicules.

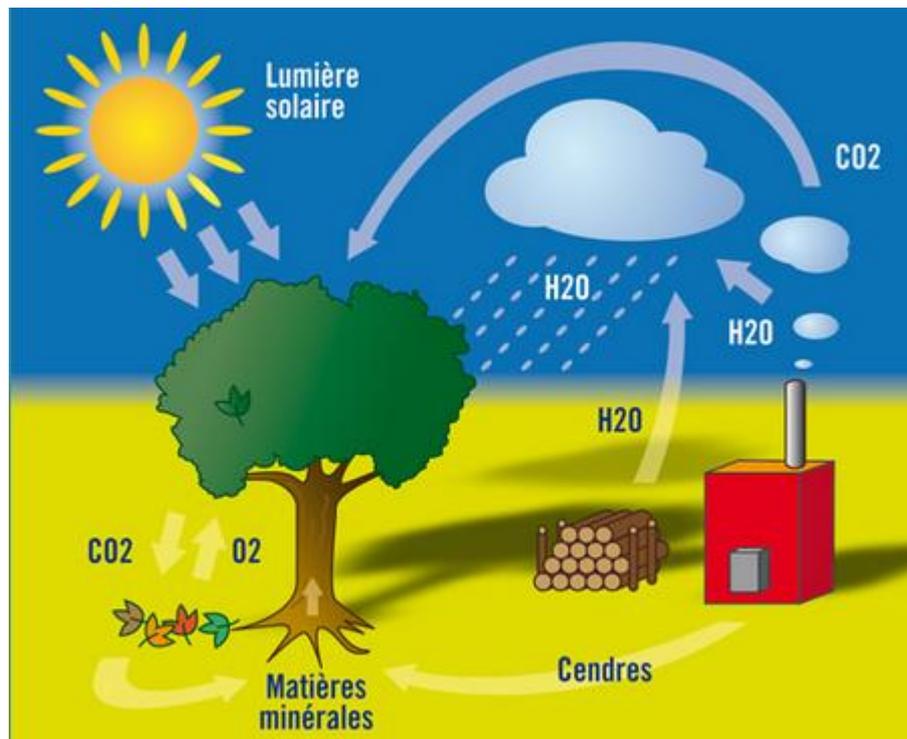


Figure I.5 : Système d'exploitation d'énergie de la biomasse

### I.2.5. La géothermie :

La géothermie est un mot complexe de géo (géographique) qui désigne tout ce qui à une relation au sein de la terre, et thermique qui veut dire la chaleur, en brève sens la géothermie est la science qui étudie les phénomènes thermique internes de la terre, que la technique qui vise à les exploite.

Les centrales géothermiques, le gysier et les centrales thermales illustrent vraiment cette source comme l'indique la figure suivante les PAC (pompes à chaleurs).

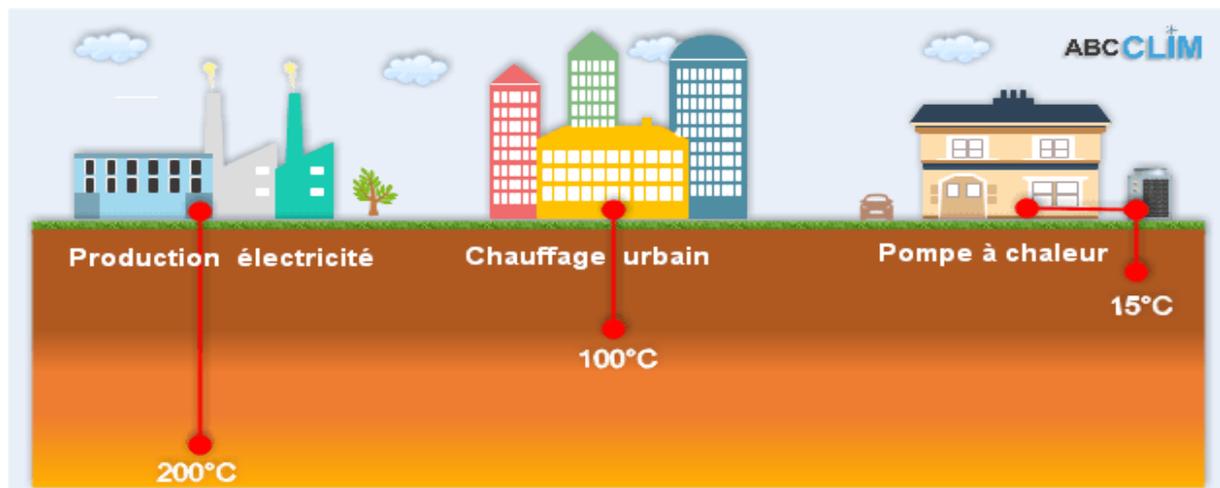
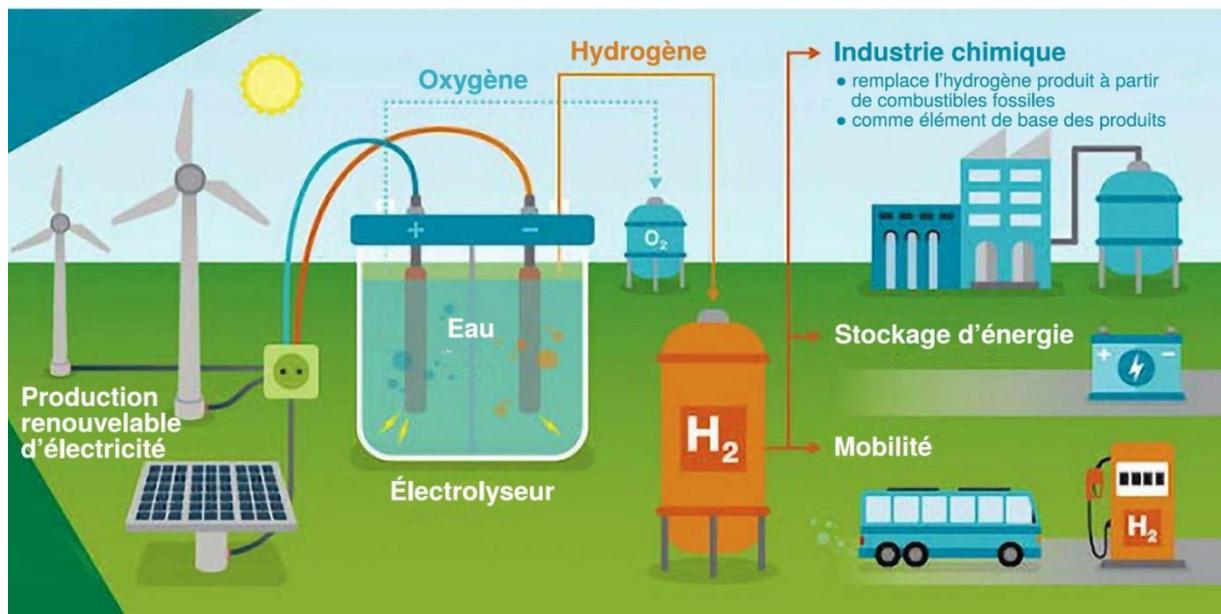


Figure I.6 : Système d'exploitation d'énergie de la géothermie

## I.2.6. L'hydrogène :

L'hydrogène est considéré comme une énergie très abondante et forte en énergie plus que le pétrole ou le gaz naturel. Il considère un ami de la nature et en plus de ça il pourrait répondre à l'ensemble de nos besoins énergétiques :

- L'hydrogène peut être produit à partir de sources d'énergie non polluantes (eau, hydrocarbures, etc.).
- L'hydrogène peut se substituer aux combustibles fossiles afin de fournir de l'électricité différemment.
- Il peut être utilisé en tant que combustible pour alimenter le moteur à combustion pour la production d'électricité en faisant fonctionner la machine.
- Il peut également être utilisé directement par un électro réacteur chimique dans les piles à combustible afin de générer de l'électricité. À haut niveau d'énergie, la conversion la plus efficace de l'hydrogène en électricité peut être réalisée dans la production combinée de chaleur.



**Figure I.7 :** Exploitation d'énergie d'hydrogène

L'exploitation de l'énergie ne réside pas que dans leur production mais aussi dans le stockage et le transport, pour le stockage il existe plusieurs moyens de stockage comme les batteries et les pile à combustibles.

### **I.2.7. La pile à combustibles :**

La pile à combustible est un générateur électrochimique qui convertit l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique, elle fonctionne par la réaction de l'électrolyse inversé (la réaction chimique entre l'hydrogène et l'oxygène), cette interaction produit de la chaleur, de l'eau et de l'électricité. Généralement les piles à combustibles utilisent de l'hydrogène vient des sources propres et ne génère que de l'eau, ce qui la rend comme un dispositif non polluant.

### **I.2.8. Le système hybride :**

#### **I.2.8.1. Définition :**

Le système hybride d'une manière générale est un système de production d'électricité qui combine plusieurs sources d'énergies renouvelables facilement mobilisables comme l'éolienne, photovoltaïque, Etc. Il sert à associer de différentes technologies complémentaires pour une meilleure disponibilité d'énergie. Les sources d'énergie comme le soleil et le vent ne produisent pas des capacités énergétiques stables, mais l'assemblage de ces deux sources peut assurer une production stable d'électricité.

#### **I.2.8.2. Les avantages des systèmes hybrides**

- La réduction de taux de consommation des carburants qui engendrent une diminution du pourcentage des gaz à effet de serre
- Disponibilité et indépendance énergétique
- Assurer une durée de vie des groupes électrogènes plus élevée et une maintenance des appareils atténués.

#### **I.2.8.3. Présentation du système hybride**

Dans les termes les plus généraux, un système de production d'énergie hybride est un système qui combine plusieurs sources d'énergie disponibles

#### **I.2.8.4. Les composants du système hybride**

Les systèmes énergétiques hybrides combinent généralement plusieurs sources d'énergie, notamment les énergies traditionnelles et renouvelables. Ils peuvent également intégrer d'autres sources d'énergie, telles que l'hydroélectricité, les marées, la géothermie. En outre, ils peuvent être équipés de dispositifs de conversion, de stockage et de surveillance de l'énergie.

Notre système inclus :

### **I.2.8.4.1. Générateur photovoltaïque :**

Une cellule solaire est un composant électronique qui transforme la lumière en électricité. Elle est constituée d'un matériau semi-conducteur, comme le silicium. Lorsque la lumière frappe la cellule, elle excite les électrons du matériau. Ces électrons sont libérés et se déplacent à travers le matériau, créant une différence de potentiel. Cette différence de potentiel est à l'origine du courant électrique qui circule dans la cellule solaire.

Pour produire une quantité d'électricité suffisante pour répondre aux besoins d'un usage domestique ou industriel, on assemble plusieurs cellules solaires en un module solaire. Un module solaire est capable de produire de l'électricité dans diverses conditions de luminosité et de température.

Pour répondre à des besoins spécifiques, on peut assembler plusieurs modules solaires en un générateur photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque est dimensionné en fonction de la puissance électrique nécessaire.

### **I.2.8.4.2. Aérogénérateur :**

L'aérogénérateur est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en électricité. Elle est composée de pales qui tournent sous l'effet du vent. Ces pales sont reliées à un générateur, qui produit de l'électricité.

L'électricité produite par l'éolienne peut être stockée dans des batteries ou injectée directement dans le réseau électrique. Elle est une source d'énergie renouvelable, car elle ne consomme pas de ressources naturelles et ne produit pas de pollution.

### **I.2.8.4.3. La Pile à Combustible :**

La pile à combustible est une technologie qui transforme l'énergie chimique de l'hydrogène en électricité et en chaleur. Elle est considérée comme une solution prometteuse pour la production d'électricité, car elle est propre, efficace et peut produire de la chaleur.

La pile à combustible est composée de deux électrodes, une anode et une cathode, séparées par un électrolyte. L'hydrogène est injecté à l'anode, où il réagit avec un oxydant, généralement l'oxygène de l'air. Cette réaction produit de l'électricité et de l'eau.

Les piles à combustible ont plusieurs avantages par rapport aux autres sources d'énergie électrique. Elles sont propres, car elles ne produisent pas d'émissions polluantes. Elles sont efficaces, car elles peuvent convertir jusqu'à 80 % de l'énergie chimique de l'hydrogène en électricité. Elles peuvent également produire de la chaleur, ce qui peut être utilisé pour le chauffage ou la production d'eau chaude.

Les piles à combustible sont encore en développement, mais elles ont le potentiel de devenir une source d'énergie importante dans le futur. Elles pourraient être utilisées dans une grande variété d'applications, notamment la production d'électricité pour les bâtiments, les transports et l'industrie.

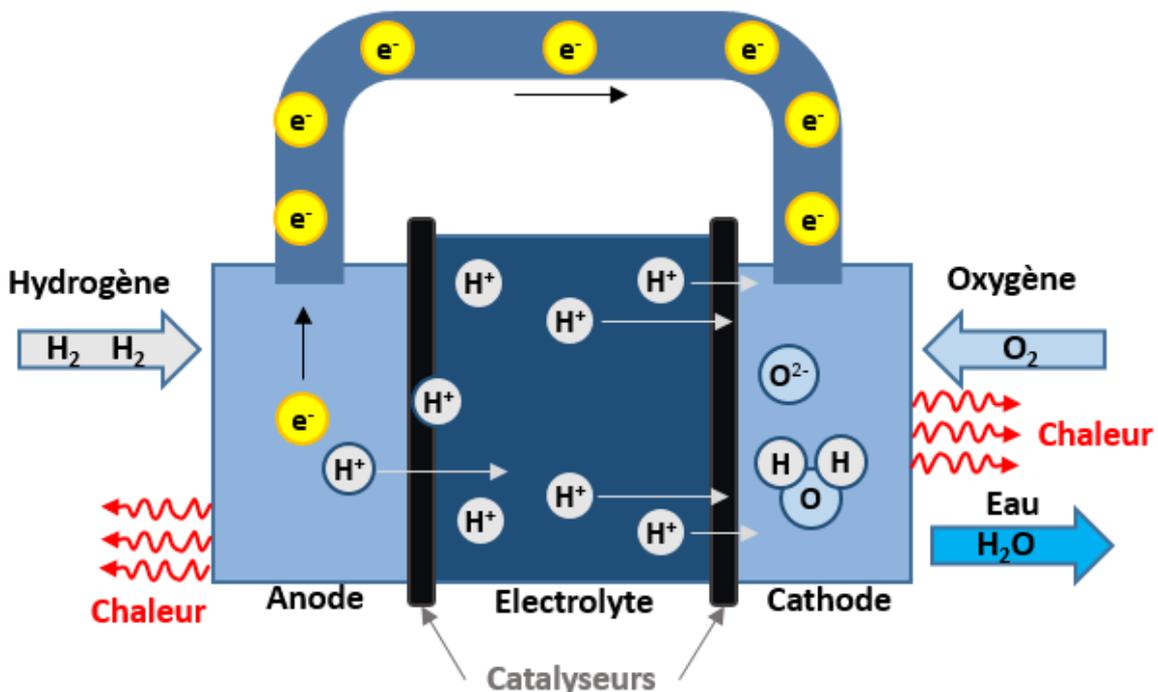


Figure I.8 : Pile à Combustible

#### I.2.8.4.4. Système de stockage :

Les systèmes d'alimentation hybrides hors réseau nécessitent un système de stockage d'énergie pour garantir une fourniture constante d'électricité. Les batteries plomb-acide sont la technologie la plus courante, car elles sont économiques et durables. Les piles au nickel-cadmium sont moins utilisées car elles doivent être utilisées régulièrement pour éviter une perte de capacité.

L'hydrogène est une solution prometteuse pour l'accumulation d'énergie dans les systèmes hybrides. Lorsque de l'électricité excédentaire est disponible, elle peut être utilisée pour produire de l'hydrogène par électrolyse. Cet hydrogène peut ensuite être utilisé pour alimenter des piles à combustible qui produisent de l'électricité et de la chaleur.

### **I.2.8.4.5. Convertisseurs :**

Les convertisseurs sont des dispositifs électroniques essentiels qui permettent de charger les batteries de stockage et de convertir le courant continu (CC) peut être converti en courant alternatif (CA) et vice versa au sein des systèmes hybrides.

Les systèmes hybrides utilisent généralement un ou plusieurs des types de convertisseurs suivants :

- Les redresseurs convertissent le courant alternatif (CA) en courant continu (CC). Ils peuvent être monophasés ou triphasés, selon le nombre de sources d'alimentation.
- Les onduleurs ont la capacité de transférer le courant continu (CC) en courant alternatif (CA). Ils peuvent opérer de manière autonome ou en conjonction avec des sources en CA. Les onduleurs autonomes génèrent eux-mêmes la fréquence de sortie nécessaire pour alimenter la charge.
- Les hacheurs effectuent la conversion CC/CC, c'est-à-dire qu'ils ajustent la tension entre deux sources d'alimentation en transformant un courant continu à une tension donnée en un courant continu à une autre tension.

Les convertisseurs remplissent plusieurs fonctions essentielles dans les systèmes hybrides :

- Chargement des batteries : les convertisseurs permettent de charger les batteries à partir de sources d'énergie renouvelables ou de sources conventionnelles.
- Conversion du courant : les convertisseurs permettent de convertir le courant continu (CC) en courant alternatif (CA) pour alimenter les charges électriques.
- Régulation de la tension : les convertisseurs permettent d'ajuster la tension du courant continu ou du courant alternatif pour répondre aux besoins des charges.

Les convertisseurs sont des éléments essentiels des systèmes hybrides. Ils permettent de garantir un approvisionnement électrique fiable et efficace, même en cas de fluctuations des sources d'énergie renouvelables.

### **I.2.8.4.6. Charge :**

Les charges électriques permettent d'utiliser l'énergie électrique, on trouve des charges à caractère résistif et d'inductif. Les charges résistives sont généralement utilisé comme des générateur de chaleur ou ampoules incandescentes, ils sont en objectif de convertir de l'énergie électrique en énergie thermique en passant de chaque composant du système au composant suivant ce qui génère de la chaleur, cette dernières seras expulsé de système en utilisant un fluide(air , eau , huile ...) . Les charges inductifs sont présentent dans la plupart des appareils d'industriels et lourds, ils dépendent généralement des bobine qui utilise l'énergie magnétique pour produire du travail.

### **I.2.8.5. La classification des systèmes hybrides:**

On peut classer les systèmes hybrides en plusieurs classes selon installation et les critères choisi. Parmi les classifications les plus courantes, on cite :

### **I.2.8.6. Selon le régime de fonctionnement :**

Les systèmes hybrides peuvent être classés en deux catégories :

Dans le premier groupe, nous trouvons des systèmes hybrides, fonctionnant en parallèle avec le réseau d'électricité, également appelé réseau connecté. Ces systèmes aident à satisfaire aux exigences du système électrique.

### **I.2.8.7.La structure de système :**

Le classement peut tenir compte de trois éléments, selon la structure du système.

**A. Premier élément :** Correspond à la présence ou à l'absence de toute source d'énergie classique. Cette source classique peut être un groupe électrogène diesel.

Les systèmes hybrides avec sources classique :

- ✓ Les Systèmes PV /source classique
- ✓ Les Systèmes éolienne /source classique

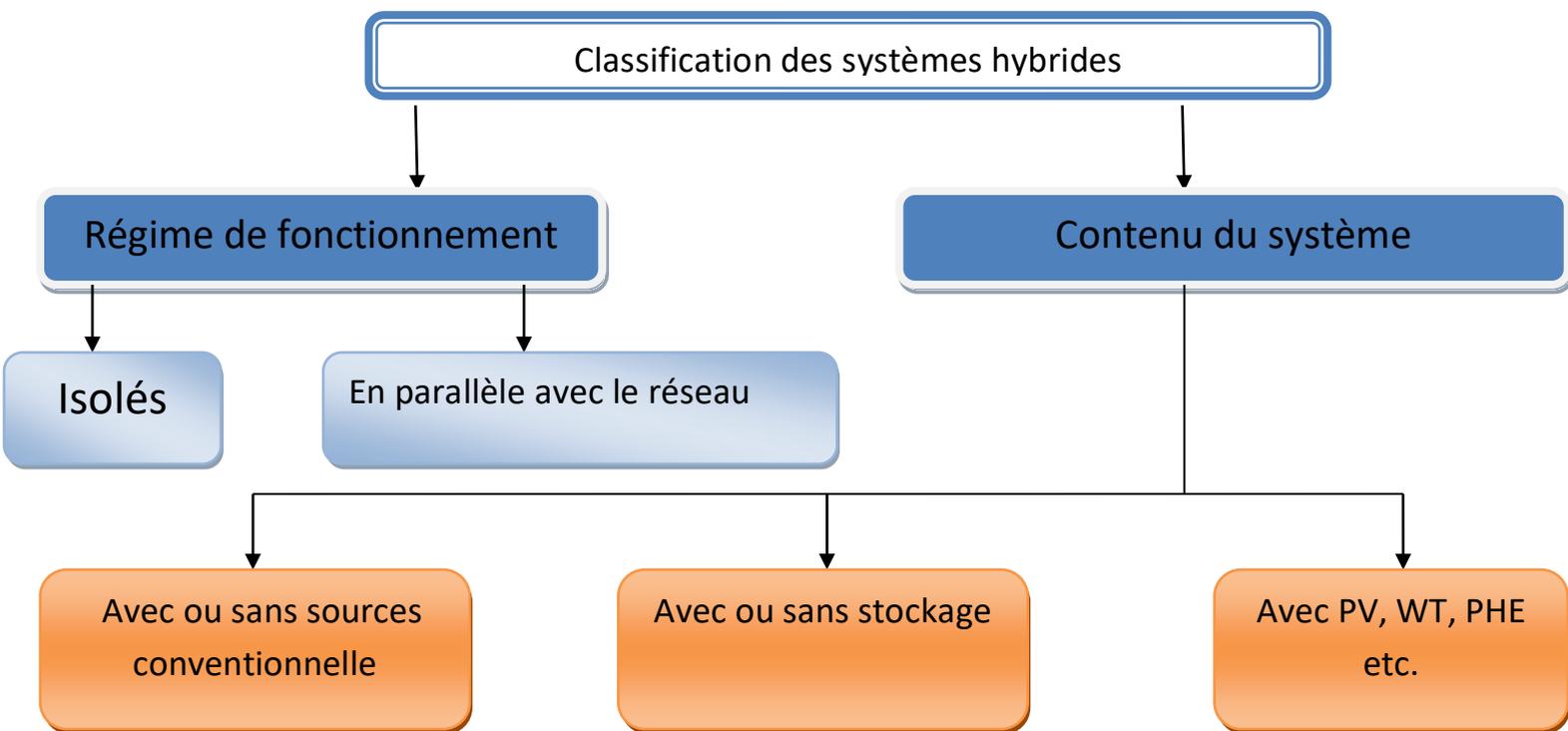
Les systèmes hybrides sans source classique :

- ✓ Les Systèmes hybrides PV/batterie
- ✓ Le Système hybride PV/éolienne/batterie
- ✓ Le Système hybride éolienne/batterie

**B. Deuxième élément :** La présence ou l'absence d'un dispositif de stockage influence la gestion des charges électriques lorsque la ressource primaire est indisponible. Les dispositifs de stockage existent sous différentes formes, notamment les piles rechargeables, les électrolyseurs équipés de réservoirs d'hydrogène, les volants d'inertie, etc.

**C. Troisième élément :** Le choix des sources d'énergie pour les systèmes hybrides est influencé par le potentiel énergétique disponible et la demande en énergie électrique. Les systèmes hybrides peuvent inclure des panneaux solaires photovoltaïques (PV), des éoliennes, des convertisseurs d'énergie hydroélectrique, voire même une combinaison de ces différentes sources.

Nous pouvons résumer tout ce qui précède dans le schéma suivant :



**Figure I.9 :** Classification des systèmes hybrides

### I.2.8.8. Critères d'optimisation du système hybride :

Pour l'optimisation du système hybride on trouve des différents critères parmi les plus connus on cite :

- **L'efficacité énergétique :** il s'agit d'augmenter la conversion de l'énergie primaire en énergie électrique et réduire les pertes énergétiques et pour accomplir cette tâche il est nécessaire de choisir les technologies performantes et d'intégrer et améliorer les systèmes de stockage.
- **La fiabilité :** elle est nécessaire pour consolider une fourniture énergétique continue et plus stable.
- **La disponibilité et la maintenance :** la disponibilité des sources d'énergie et la maintenance des pannes techniques du système visent à accroître le taux de production énergétique.
- **Aspect économiques :** l'objectif c'est d'atteindre l'équilibre entre les coûts d'investissement (les sources d'énergie, la maintenance, les combustibles...etc.) et la rentabilité à long terme du système.

### I.3. Logiciels d'étude des systèmes hybrides :

- **HOMER (Electric Renewable Energy Hybrid Optimization Model) :** est un logiciel largement utilisé pour analyser et optimiser les systèmes hybrides. Il permet de modéliser différentes configurations de groupes motopropulseurs hybrides en intégrant des énergies renouvelables, des générateurs diesel, des batteries, des piles à combustible, etc. HOMER prend en compte les données météorologiques, le coût de l'équipement, les contraintes de charge et d'autres paramètres pour optimiser les performances et les coûts du système.
- **RET Screen :** un logiciel d'analyse et de simulation énergétique développé par le gouvernement canadien. Il fournit des capacités d'évaluation technique, économique et environnementale pour les projets d'énergie renouvelable et d'efficacité énergétique. RET Screen peut modéliser des systèmes hybrides en intégrant différentes sources d'énergie et technologies tout en fournissant une analyse détaillée de la production d'énergie, des coûts, des émissions et des économies.

- **Energy PLAN** : est un logiciel d'analyse énergétique open source pour la modélisation et l'optimisation de grands systèmes énergétiques, y compris les systèmes hybrides. Il évalue les performances et optimise les stratégies énergétiques en tenant compte des différents types de sources d'énergie, des réseaux, de la demande énergétique, des coûts, des émissions et d'autres contraintes. Performances énergétiques, économiques et environnementales des motorisations hybrides.
- **SAM (System Advisor Model)** : SAM est un logiciel développé par l'US National Renewable Energy Laboratory (NREL). Utilisé pour l'analyse et l'optimisation des systèmes d'énergie renouvelable, y compris les systèmes hybrides. SAM permet la modélisation et la simulation de diverses configurations de systèmes hybrides en intégrant des technologies solaires, éoliennes, hydrauliques, de batterie et autres. Fournit une analyse détaillée des performances, des coûts, des émissions et des économies.

### **I.4. Etat de l'art des systèmes hybrides d'énergie :**

Les systèmes hybrides d'énergie (SHEI) sont des systèmes qui combinent deux ou plusieurs sources d'énergie pour produire de l'électricité, du chauffage ou du refroidissement. Ils sont de plus en plus populaires, car ils offrent une série d'avantages par rapport aux systèmes qui utilisent une seule source d'énergie.

Les principaux avantages des SHEI sont :

- ❖ **La fiabilité** : Les SHEI peuvent fournir une production d'énergie plus fiable, car ils sont moins sensibles aux fluctuations des conditions météorologiques.
- ❖ **L'efficacité** : Les SHEI peuvent être plus efficaces que les systèmes à source unique, car ils peuvent utiliser les sources d'énergie les plus efficaces à tout moment.
- ❖ **La durabilité** : Les SHEI peuvent contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre, car ils utilisent des sources d'énergie renouvelables.

Il existe de nombreux types de SHEI différents, chacun avec ses propres avantages et inconvénients. Certains des types de SHEI les plus courants sont :

- ❖ **Les systèmes photovoltaïques (PV)/éoliennes** : Ces systèmes combinent des panneaux solaires et des éoliennes pour produire de l'électricité. Ils sont une option populaire pour les applications résidentielles et commerciales.

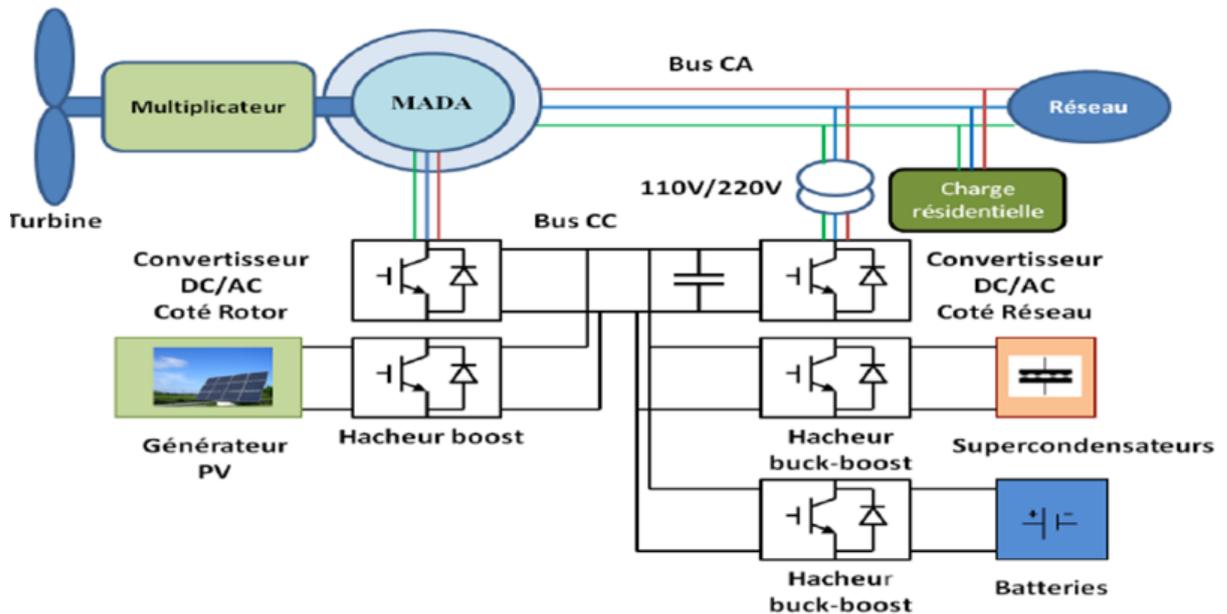


Figure I.10 : Schéma global du système hybride étudié.

- ❖ **Les systèmes photovoltaïques (PV)/thermiques** : Ces systèmes combinent des panneaux solaires et des collecteurs solaires pour produire de l'électricité et de l'eau chaude sanitaire. Ils sont une option populaire pour les maisons individuelles.

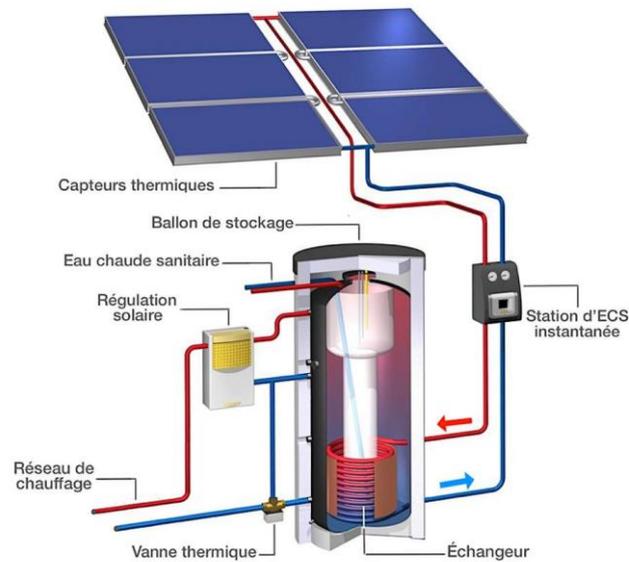


Figure I.11 : Les systèmes photovoltaïques/thermiques

- ❖ **Les systèmes éoliennes/hydrauliques** : Ces systèmes combinent des éoliennes et des centrales hydroélectriques pour produire de l'électricité. Ils sont une option populaire pour les réseaux électriques.

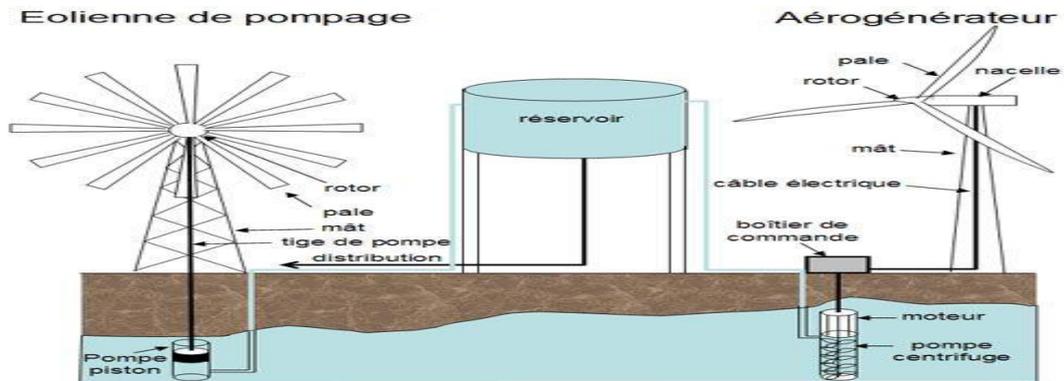


Figure I.12 : Les systèmes éoliennes/hydrauliques.

- ❖ **Les systèmes photovoltaïques/thermiques/éoliens** : Ces systèmes combinent les trois technologies précédentes pour produire de l'électricité, de l'eau chaude sanitaire et du chauffage. Ils sont une option populaire pour les communautés isolées.

Les SHEI sont encore en développement, mais ils ont le potentiel de révolutionner la production et la distribution d'énergie. Avec la baisse du coût des technologies renouvelables et le développement de nouvelles technologies de stockage de l'énergie, les SHEI devraient devenir de plus en plus populaires dans les années à venir.

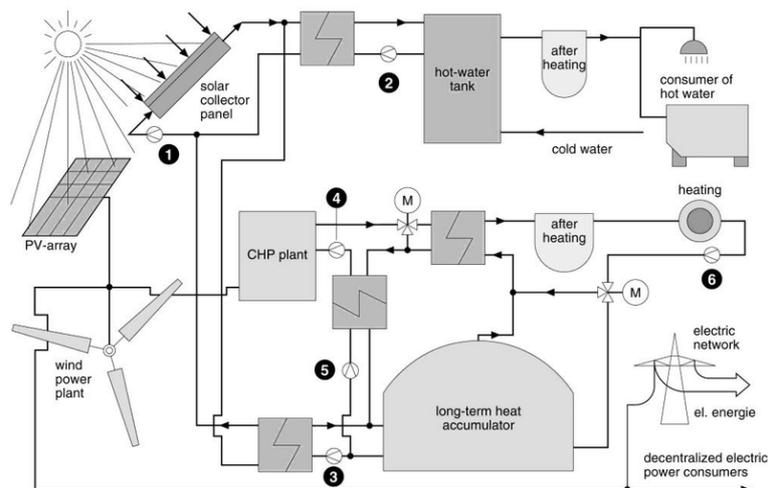


Figure I.13 : Les systèmes photovoltaïques/thermiques/éoliens

### **I.5. Conclusion :**

La demande mondiale en énergie ne cesse d'augmenter, tandis que les réserves d'énergies fossiles sont limitées et que le réchauffement climatique est une menace croissante. Les énergies renouvelables, qui sont inépuisables et ne génèrent que peu ou pas d'émissions de gaz à effet de serre, constituent une solution prometteuse à ces défis. Nous avons examiné les principales sources d'énergie renouvelable, telles que l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, biomasse et hydrogène. Ces sources d'énergie ont des caractéristiques et des avantages différents, mais elles sont toutes essentielles pour réduire notre dépendance aux énergies fossiles et contribuer à un avenir énergétique plus propre et durable.

Nous avons également examiné les systèmes hybrides d'énergie, qui combinent différentes sources d'énergie pour garantir une production d'électricité continue et fiable. Ces systèmes sont de plus en plus utilisés en raison de leur efficacité, de leur fiabilité et de leur impact environnemental réduit. Dans les chapitres à venir, nous approfondirons chaque type de source d'énergie renouvelable, les systèmes hybrides spécifiques et leurs composants, ainsi que les méthodologies d'optimisation pour répondre aux besoins énergétiques tout en minimisant les coûts et les impacts environnementaux.

**CHAPITRE 02 :**

**L'HYDROGENE ET LA PILLE**

**A COMBUSTIBLE**

## II. Introduction :

Face à ce réchauffement climatique qui constitue une menace réelle pour la sécurité environnementale, face au problème auquel le monde est confronté en matière d'épuisement des sources d'énergie fossiles qui sont de l'origine polluantes, il est nécessaire de recourir à d'autres sources plus sûres et de remplacer les sources non renouvelables par d'autres sources d'énergies renouvelables. Aujourd'hui les chercheurs dans le domaine énergétique visent à développer des technologies pour la fabrication de l'énergie électrique plus fiables et plus durables.

L'hydrogène est considéré la source la plus prometteuse dans le domaine énergétique en raison de ses différents avantages, son abondance dans la nature, sa production dans diverses sources, son utilisation ne génère pas des substances nocives pour dans la nature...etc.

Dans cette section en va examiner les différents concepts sur l'hydrogène et ses caractéristiques énergétiques, puis les technologies associées notamment les piles a combustibles.

### II.2 L'hydrogène vecteur énergétique :

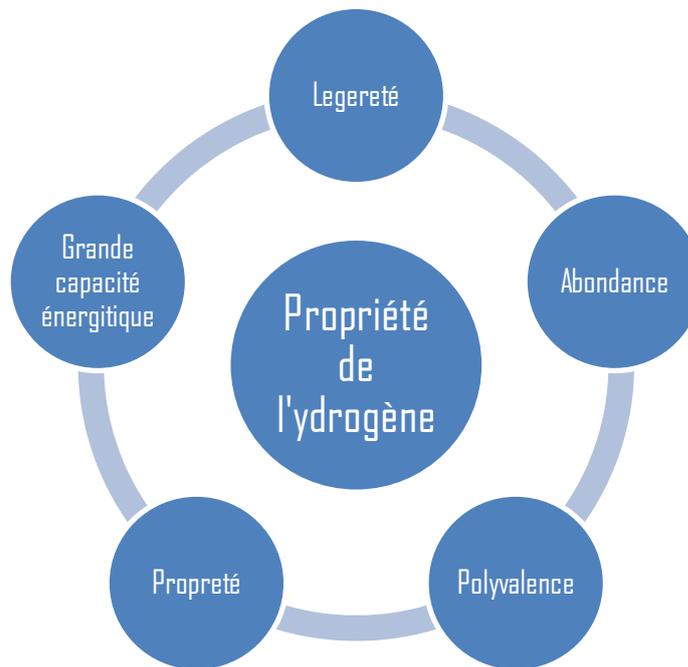
#### II.2.1 Définition :

L'énergie de l'hydrogène , c'est le synonyme de l'énergie qui peut être générée a partir de l'hydrogène utilisant de différentes technologies , particulièrement les piles à combustibles par oxydation électrochimique , l'hydrogène est considéré comme une source d'énergies prometteuse pour l'avenir de la technologie des énergies renouvelables , grâce a ses divers caractéristiques de transport et de stockage d'énergie mais aussi la production énergétique propre parce que son utilisation dans la pile a combustible ne produit que de l'eau et la chaleur , et les émissions des gaz a effet de serre est presque invisible .

#### II.2.2 Les propriétés de l'hydrogène :

- ✚ La légèreté : c'est l'élément le plus léger dans le tableau de Mendeliev avec une masse atomique de 1,008u et de densité de 0,0899 g/L, ce qui le rend le combustible le plus préférable dans les domaines aérospatiaux et les véhicules à hydrogène.
- ✚ Grande capacité énergétique : l'hydrogène est considéré comme une source énergétique d'un potentiel élevé avec une capacité énergétique de 120 MJ/kg et de capacité calorifique d'environ 14,26 J/kg.

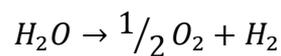
- ✚ Propreté : la combustion de l'hydrogène avec l'oxygène dans la pile à combustible ne produit que de  $H_2O$ , aucune émission de gaz polluant n'est produite
- ✚ L'abondance : c'est l'élément le plus abondant de l'univers y compris le globe terrestre, on le trouve souvent lié a d'autres éléments comme l'oxygène et le carbone, on peut être l'extraire par l'électrolyse de l'eau ou le reformage du gaz
- ✚ La polyvalence : l'hydrogène peut être utilisé dans divers domaines d'applications énergétiques, de plus son utilisation dans les PAC, l'hydrogène est utilisé dans l'industrie chimique notamment pour la production d'ammoniac et de méthanol ...etc.



**Figure II.1** : Propriétés de l'hydrogène

### II.2.3 La décomposition de l'eau

Cette opération sert à séparer les particules de l'eau ( $H_2O$ ) en oxygène et hydrogène selon la réaction suivante :



La réaction peut être produite par de différentes opérations connues (l'électrolyse de l'eau, réaction thermochimique et la photolyse de l'eau).

**L'électrolyse de l'eau :** c'est l'opération la plus utilisée pour la décomposition de l'eau , elle nécessite une tension externe afin de provoquer la dissociation des molécules d'eau , la solution d'eau se place dans la cellule d'électrolyte électrique et quand le courant traverse l'intérieur de la solution l'hydrogène se libère vers l'anode et l'oxygène à la cathode

**Réaction thermochimique :** cette opération est rarement utilisée, vue ses exigences de condition thermique très élevée, dans les températures supérieurs de 2000°C l'eau peut se décomposer en oxygène et hydrogène par la méthode de décomposition thermique.

**La photolyse de l'eau :** cette méthode sert a produire de l'hydrogène a partir des sources d'énergies renouvelables comme l'énergie solaire. Utilisant l'énergie lumineuse et des catalyseurs appropriés l'eau peut se décomposer en hydrogène et oxygène sous l'effet de la lumière.

### II.2.3.1 Les type d'électrolyseurs

**Electrolyseur alcalin :** L'électrolyseur alcalin est une technologie d'électrolyse de l'eau qui utilise une solution alcaline, comme l'hydroxyde de potassium (KOH) ou l'hydroxyde de sodium (NaOH), pour séparer l'hydrogène et l'oxygène. Les électrolyseurs alcalins peuvent fonctionner à température ambiante entre 20°C et 27°C ou à des températures plus élevées, généralement entre 50 et 90 °C.

**Electrolyseur de la vapeur à haute température (EHT) :** Un électrolyseur de vapeur à haute température (EHT) est un appareil électrochimique qui permet de produire de l'hydrogène et de l'oxygène à partir de vapeur d'eau à des températures élevées supérieurs de 700°C.

L'EHT fonctionne en utilisant un électrolyte conducteur d'ions, généralement un oxyde de céramique dopé à l'yttrium, tel que l'oxyde de cérium dopé à l'yttrium (YDC). La vapeur d'eau est introduite dans l'électrolyte et, sous l'effet d'une tension électrique élevée, se décompose en hydrogène à l'anode et en oxygène à la cathode.

**Electrolyseur à membrane échangeuse de protons :** Ce sont des appareils qui utilisent l'énergie électrique pour décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. Ils fonctionnent à une température relativement basse ( 20° – 100°C ), ce qui les rend plus efficaces et plus compacts que les autres types d'électrolyseurs.

**Le principe de fonctionnement des PEM est simple.** Une membrane conductrice de protons  $H^+$  sépare deux électrodes, l'une chargée positivement (anode) et l'autre chargée négativement (cathode). L'eau est introduite dans l'électrolyseur par l'anode, où elle est oxygénée. Les protons libérés lors de l'oxydation de l'eau traversent la membrane pour atteindre la cathode, où ils sont réduits en hydrogène.

Voici un tableau explicatif sur les électrolyseurs :

**Tableau II.1:** Technologies d'électrolyse de l'eau

Technologie	Température T°C	Réaction à l'anode	Réaction à la cathode	La charge
<b>Alcaline</b>	40 – 90	$2OH^- \rightarrow$ $1/2O_2 + H_2O + 2e^-$	$2H_2O + 2e^- \rightarrow$ $H_2 + 2OH^-$	$OH^-$
<b>EHT</b>	700 – 1000	$O^{2-}$ $\rightarrow 1/2O_2 + 2e^-$	$H_2O + 2e^-$ $\rightarrow H_2 + O^{2-}$	$O^{2-}$
<b>PEM</b>	20 – 100	$H_2O$ $\rightarrow 1/2O_2 + 2H^+$ $+ 2e^-$	$2H^+ + 2e^-$ $\rightarrow H_2$	$H^+$

## II.3 Stockage et transport de l'hydrogène :

### II.3.1 Le stockage de l'hydrogène :

L'hydrogène est un gaz très léger, cette légèreté engendre l'occupation d'un volume énorme dans les conditions naturelle (pression et température) donc il est difficile de le transporter et stocker dans ces conditions. Pour un stockage et transport valable ce volume doit être réduit.

De différentes techniques utilisables pour cela :

**II.3.1.1 Stockage gazeux :** c'est la méthode la plus simple et couramment utilisée pour le stockage du gaz, l'hydrogène peut être comprimé sous forme gazeuse dans des réservoirs spéciaux à haute pression, ces derniers généralement sont fabriqués en acier renforcé, peuvent résister des hautes pressions allant jusqu'à 700 bars.

**II.3.1.2 Stockage liquide :** Le stockage d'hydrogène liquide est une autre méthode courante de stockage de cette énergie. L'hydrogène gazeux peut être liquéfié en abaissant sa température à des températures cryogéniques environ  $-253$  degrés Celsius, ce qui le transforme en un liquide très froid et dense en énergie. Le stockage de liquide présente plusieurs avantages par rapport au stockage de gaz, notamment une densité plus élevée et de masse volumique d'environ  $70,8\text{kg}/\text{m}^3$ , ce qui signifie que plus d'hydrogène peut être stocké dans un volume donné.

Cependant, le stockage liquide d'hydrogène nécessite des réservoirs spéciaux appelés réservoirs cryogéniques, la structure de ces réservoirs généralement est en acier inoxydable ou de matériaux composites résistibles à des températures plus basses et qui doivent être parfaitement isolés pour éviter les pertes d'hydrogène par évaporation.

L'hydrogène liquide est couramment utilisé dans divers domaines :

- ✚ propulsion spatiale (carburant pour fusées et lanceurs spatiaux)
- ✚ stockage énergétique (moyen de stockage d'énergie à long terme)
- ✚ l'industrie (la cryogénie, la production électrique et l'industrie chimique)
- ✚ domaine médicale

**II.3.1.3 Stockage moléculaire :** c'est la méthode de stockage de l'hydrogène sous forme des molécules liées à d'autres matériaux de support, cette technique sert à augmenter la densité de l'hydrogène pour faciliter son transport, son stockage.

On trouve de différents matériaux disponibles pour le stockage moléculaire comme les hydrures métalliques, les nanomatériaux et les matériaux poreux par la méthode d'adsorption ou absorption moléculaire.

Le stockage moléculaire de l'hydrogène prend l'avantage par rapport à la méthode de stockage gazeux et liquide, il permet le stockage d'une plus grande quantité d'hydrogène dans un volume réduit, par conséquent cette méthode présente des défis, particulièrement de trouver des astuces de développement d'efficacité de matériaux de stockage et de trouver des solutions viables pour la production et la régénération de ces matériaux, aussi de mieux comprendre le mécanisme d'adsorption et de désorption de l'hydrogène.

## **Le transport de l'hydrogène :**

Le transport de l'hydrogène dépend de son état :

- ✚ A l'état liquide : Le transport liquide de l'hydrogène s'effectue par train, par camions citernes cryogéniques, par bateau et repose sur une isolation et des systèmes qui maintiennent les températures très basses pour minimiser les pertes d'hydrogène par évaporation.
- ✚ A l'état gazeux : Hydrogène basse, moyenne et haute pression de 200 à 700 bar voir plus. Le transport s'effectue via des gazoducs ou des biais de camions-citernes ou par les pipelines dédiés.
- ✚ A l'état solide : L'hydrogène peut devenir un solide par absorption sous forme d'hydrure. Selon les matériaux utilisés, le transport peut s'effectuer à très basse température et en citernes

## **Les applications de l'hydrogène :**

Obtenir l'énergie sans gaz à effet de serre est possible grâce à l'hydrogène comme vecteur énergétique. L'obtention d'hydrogène propre grâce à des méthodes de production spécifiques peut conduire à une chaîne d'approvisionnement en énergie propre pour une application pratique. Les industries chimiques et pétrochimiques utilisent depuis longtemps l'hydrogène comme composant fondamental.

Les métaux peuvent être traités par réduction en l'utilisant, tandis qu'il est également utilisé dans l'industrie alimentaire (hydrogénation des sucres ou des graisses), la pharmacologie et l'électronique (création de semi-conducteurs). Il est également possible de l'adapter à une industrie particulière ou de le produire accessoirement, par exemple lors de la création de chlore ou d'éthylène. De plus, il est utilisé dans l'industrie verrière.

**L'industrie chimique et pétrochimique :** l'hydrogène est largement utilisé dans l'industrie chimique et pétrochimique.

Voici quelques applications parmi plusieurs :

- ✚ l'hydrogénation
- ✚ la désulfuration des produits pétroliers
- ✚ le craquage catalytique
- ✚ production d'ammoniac
- ✚ l'hydrocraquage

### **L'application stationnaire :**

Le stockage de l'énergie dans les bâtiments est possible grâce à la production combinée de chaleur et d'électricité. Cette technologie permet de produire de l'électricité et de la chaleur à partir d'une seule source d'énergie, ce qui favorise le développement des bâtiments à énergie propre.

### **L'application mobile :**

L'hydrogène peut propulser des véhicules équipés de moteurs à essence. De plus, les réservoirs à hydrogène peuvent être associés à des piles à combustible pour augmenter l'autonomie des véhicules électriques en cours de développement).

### **Moteur à combustion interne :**

L'hydrogène peut être utilisé comme carburant dans les moteurs à combustion interne conventionnels. Il réagit avec l'oxygène pour produire une explosion qui fait tourner les pistons, ce qui crée de l'énergie mécanique. Cette technologie réduit considérablement les émissions de gaz à effet de serre, ce qui la rend prometteuse pour une mobilité plus durable et respectueuse de l'environnement.

### **La gestion de l'intermittence énergétique :**

L'intermittence énergétique est un défi majeur associé aux énergies renouvelables telle que l'énergie solaire et l'énergie éolienne, à cause de leur dépendance aux conditions météorologiques ces sources peuvent produire de l'électricité de manière intermittente ce qui peut poser des problèmes de satisfaction des exigences énergétique.

L'hydrogène joue un rôle principal dans la gestion de l'intermittence énergétique, il peut être utilisé comme un moyen de stockage de l'excès d'électricité produite par des sources renouvelables pendant les périodes de surproductions et la restituer quand la production est insuffisante, et voici comment l'hydrogène peut contribuer pour atteindre l'intermittence énergétique :

- ✚ Le stockage de l'énergie excédentaire, en produisant de l'hydrogène par l'électrolyse de l'eau et le stocker dans des réservoirs pour une utilisation ultérieure
- ✚ L'hydrogène stocké peut être converti en électricité pendant les périodes d'insuffisance de production, par l'électrolyse inversé dans les piles à combustibles sans aucune émission polluante.
- ✚ Le couplage avec les dispositifs de stockage, l'hydrogène peut être utilisé en combinaison avec des batteries de stockage dans des systèmes hybrides de stockage

pour optimiser la gestion de l'intermittence énergétique, en utilisant l'hydrogène pour le stockage à long terme et les batteries pour les périodes les plus courtes.

## II.4 Pile à combustible :

### II.4.1 Définition :

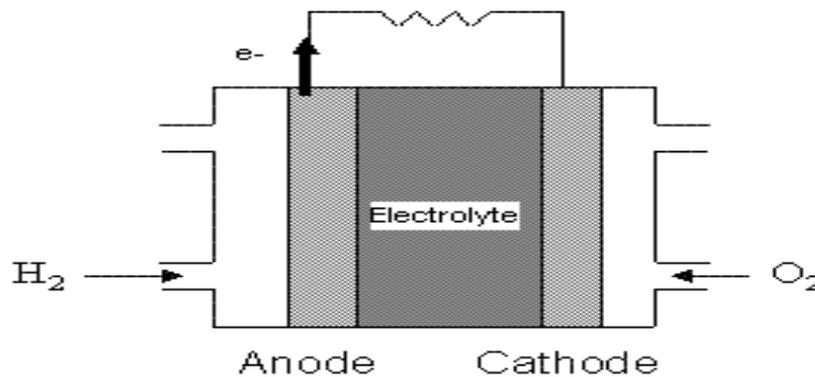
Une pile à combustible est une batterie qui génère une tension par l'oxydation d'un combustible réducteur (tel que l'hydrogène) sur une électrode et la réduction d'un agent oxydant (tel que l'oxygène de l'air) sur une autre électrode.

Une pile à combustible est un moyen de générer de l'énergie électrique, considérée comme une source d'énergie en raison de sa haute densité d'énergie. Le diagramme d'Argon permet de comparer les performances énergétiques de différents appareils et équipement. Ce dernier montre que les piles à combustible ont la densité d'énergie la plus élevée par rapport aux autres dispositifs.

### II.4.2 Structure d'une pile à combustible :

Les composants d'une pile à combustible sont :

- ✓ L'électrolyte : est un dispositif qui permet le passage des ions et de flux du courant électrique.
- ✓ Les électrodes poreuses : permettent le passage des gaz (oxygène, hydrogène).
- ✓ Les électrodes (anode cathode) : la récupération du courant électrique produit et l'alimentation.



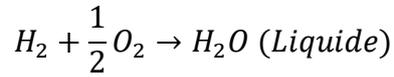
**Figure II.2 :** Schéma de la structure d'une pile à combustible

L'équation de la réaction qui se produit dans la pile à combustible est :



#### 4.2.1 La puissance fournie par une pile à combustible :

Pour calculer l'énergie transformée en énergie électrique on utilise les équations thermodynamiques exemple pour la réaction suivante :



Conformément, on a **1 mole** d'hydrogène (**2g**) réagit avec  $\frac{1}{2}$ **mole** d'oxygène (**16g**), et l'énergie maximale fournie par 2g par une pile à combustible où la température et la pression sont constantes est égale à l'énergie libre de Gibbs  $\Delta G^0 = 237,2 \text{ kJ/mol}$ , soit une puissance théorique :

$$237,2/3600=0,066 \text{ kWh (Avec } 1 \text{ kWh}=3600 \text{ kJ)}$$

Soit 66 Wh pour une consommation de 2g d'hydrogène.

#### 4.2.2 Les types des piles à combustibles :

Il existe 6 types de piles à combustible (**PAC**) et aussi sont classés selon le type d'électrolyte, pour la nomination on utilise des abréviations en langue anglaise voir le (tableau II.1) :

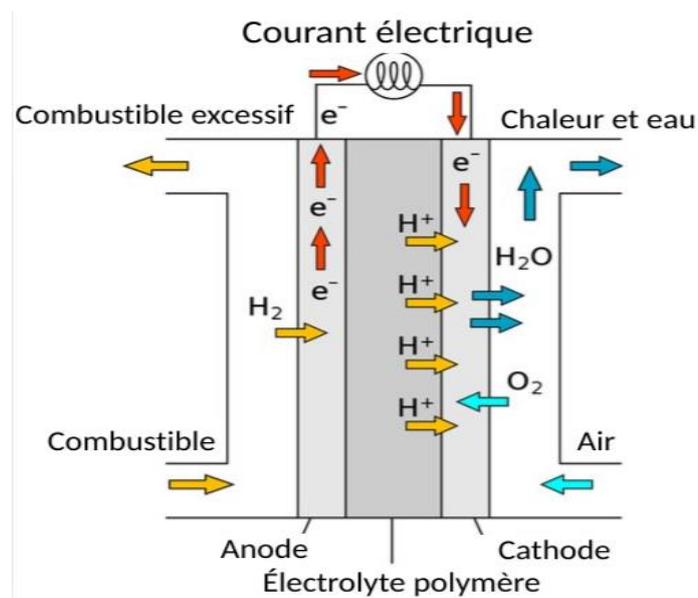
**Tableau II.2** : Types des piles à combustibles

Type	Electrolyte	
PEMFC	Proton exchange membrane fuel cell	<b>PAC</b> à membrane polymère ou à membrane échangeuse de protons
DMFC	Direct méthanol fuel cell	<b>PAC</b> au méthanol direct
DEFC	Direct éthanol fuel cell	<b>PAC</b> à éthanol direct
PAFC	Phosphoric acid fuel cell	<b>PAC</b> à acide phosphorique
AFC	Alcaline fuel cell	<b>PAC</b> alcaline
MCFC	Molten carbonate fuel cell	<b>PAC</b> à carbonate fondu
SOFC	Solid oxide fuel cell	<b>PAC</b> à oxyde solide

#### 4.2.2.1 Les PEMFC (pile à combustible à membrane polymère ou membrane échangeuse de protons) :

PEMFC il est constitué de deux plaque bipolaires l'une sert à distribuer de l'oxygène et l'autre pour distribuer l'hydrogène et extraire de l'eau, ce type de PAC est composé de :

- ❖ L'électrode : est une surface où les réactions se déroulent et faire circuler les électrons libérés de l'hydrogène, l'électrode doit avoir les caractéristiques suivantes :
  - ✚ Grande conductivité électrique
  - ✚ Diffusion de gaz
  - ✚ Stabilité chimique
  - ✚ Importante conductivité électrique
- ❖ électrolyte : son rôle est de garantir la circulation des ions et empêcher les électrons et les gaz de passer.
- ❖ Catalyseur : pour l'accélération des réactions surtout quand il s'agit de températures de fonctionnement plus basses.
- ❖ Avantages de **PEMFC** :
  - ✚ Démarrage et réponse très rapide
  - ✚ Fonctionne à basse température
  - ✚ Structure solide
- ❖ Inconvénients de **PEMFC** :
  - ✚ Très chère
  - ✚ La membrane doit être hydratée
  - ✚ Durée de vie moyenne



**Figure II.3 :** Pile à combustible à membrane polymère ou membrane échangeuse de protons.

**4.2.2.2 DMFC (pile à combustible au méthanol direct) :**

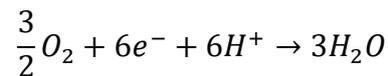
Ce type de pile est issue de la catégorie des piles à combustibles à membrane d'échange de proton, ou le combustible utilisé est le méthanol  $CH_3OH$ .

**Réactions :**

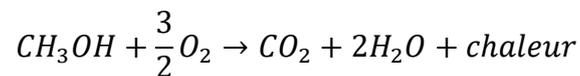
A l'anode :



A la cathode :

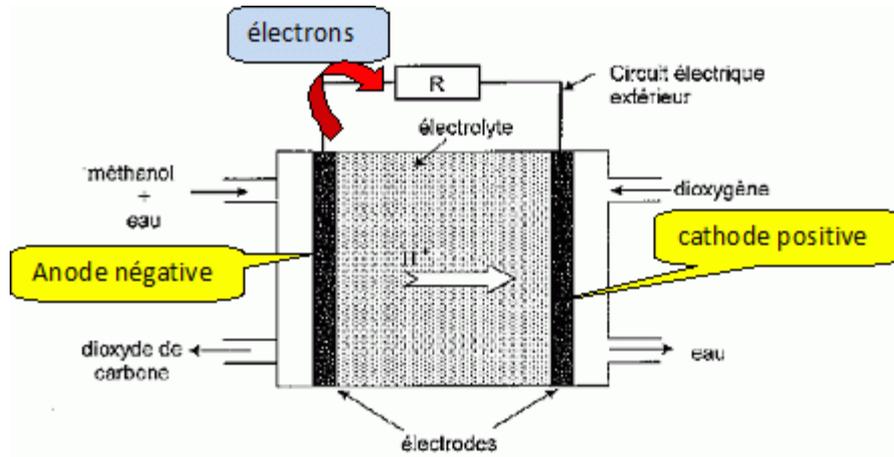


Bilan :



Les avantages de la **DMFC** :

- ❖ Désigne et système de fonctionnement simple
- ❖ Sachant que le méthanol est liquide a la température ambiante, il n'est pas affecté par les facteurs températures et pression
- ❖ Le temps de démarrage et de réponse très rapide
- ❖ Absence d'humidité supplémentaire de la membrane
- ❖ Une importante quantité d'énergie produite par le méthanol.

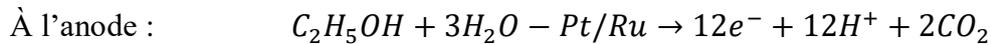


**Figure II.4 :** Pile à combustible au méthanol direct.

#### 4.2.2.3 DEFC (pile à combustible à l'éthanol direct) :

La DEFC (Direct-Ethanol Fuel Cells) est une sous-catégorie de piles à membrane d'échange de protons dans lesquelles le combustible (l'éthanol) ne subit aucune transformation mais sera utiliser directement dans la pile à combustible, la réaction d'oxydation de l'éthanol produit une tension théorique de 1'45 V.

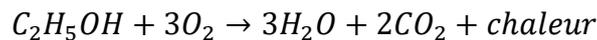
##### Les réactions :



À la cathode :

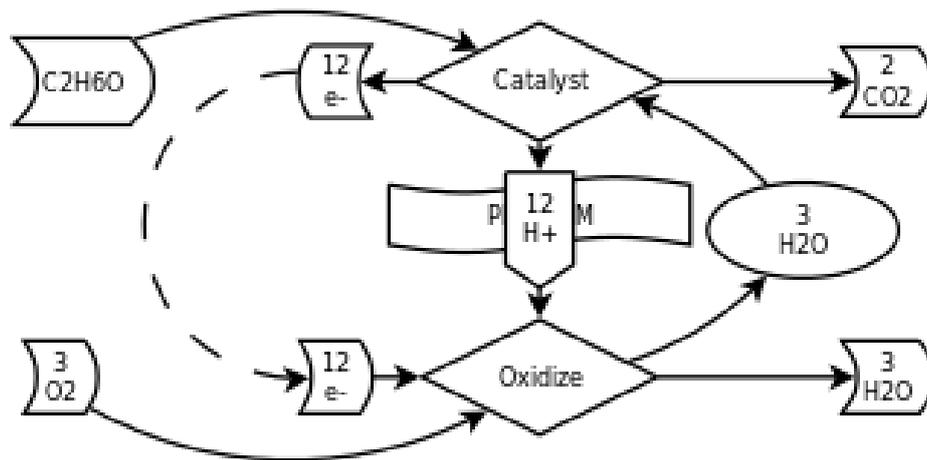


##### Bilan



La pile à combustible à éthanol direct est plus efficace par rapport a celle du méthanol sur le plan énergétique, mais sa progression est beaucoup moins évoluer à cause des difficultés d'avoir un catalyseur qui permet l'amélioration des réactions secondaires.

Direct Ethanol Fuel Cell

**Figure II.5 :** Pile à combustible à l'éthanol direct.**4.2.2.4 PAFC (pile à combustible à acide phosphorique) :**

C'est une pile qui utilise de l'acide phosphorique concentré ( $H_3PO_4$ ) comme un électrolyte, pour une meilleure conduction des ions d'hydrogène dans la membrane, elle fonctionne dans des moyennes températures environ (200°C) dans une gamme de puissance 50-200 KW.

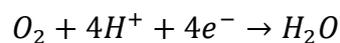
Les PAFC sont souvent utilisées dans des différents domaines comme le militaire et en stationnaire (générateur électrique et chauffage) pour des puissances moyennes

**Réactions :**

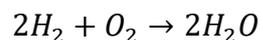
A l'anode :



A la cathode :



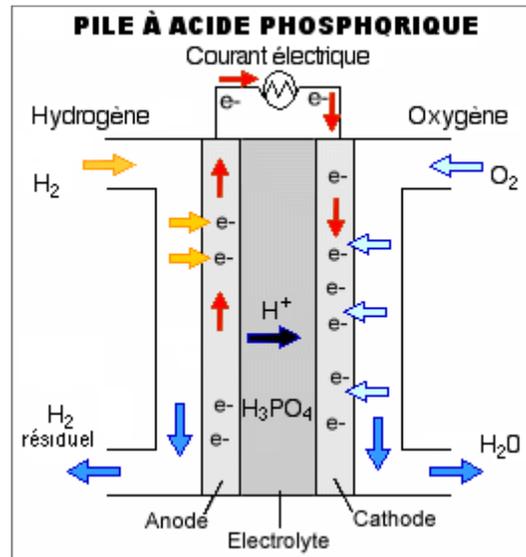
Globale :

**Avantages :**

- ❖ Le fonctionnement à faible température
- ❖ Insensible au  $CO_2$
- ❖ Régénération de la chaleur

**Inconvénients :**

- ❖ Cout de catalyseur (platine)
- ❖ Lent démarrage
- ❖ Dégradation de dispositifs et sensibilité au soufre
- ❖ Difficulté de contrôle de température



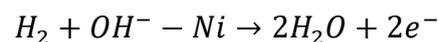
**Figure II.6 :** Pile à combustible à acide phosphorique.

**4.2.2.5 AFC (pile à combustible alcaline) :**

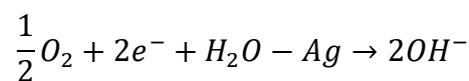
Est la technologie la plus évoluée des piles a combustibles et considéré parmi les PAC les plus efficaces pouvant y arriver un rendement de 70%, les AFC utilisent de l'oxygène et de l'hydrogène produisant de l'eau de l'électricité et de la chaleur. Les AFC sont massivement employés dans les expéditions lunaires et dans les agences spatiales à partir des années 1960

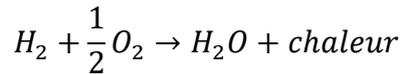
**Réactions :**

A l'anode :



A la cathode :

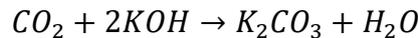


**Bilan :**

Dans les AFC, ce sont les anions hydroxydes (hydroxydes) qui circulent dans l'électrolyte.

Une cellule élémentaire dans la AFC se compose de :

**Electrolyte :** c'est de l'hydroxyde de potassium (KOH) d'une concentration varie de 30% à 85% en fonction de la température .L'hydroxyde de potassium réagit avec le  $CO_2$  selon la réaction suivante :



Le carbonate produit  $K_2CO_3$  , ne se dissout pas dans l'électrolyte, ce qui provoque la diminution du rendement de la pile et une conductivité ionique limitée.

**Electrodes :** généralement dans les AFC les électrodes sont de nickel ou de graphite.

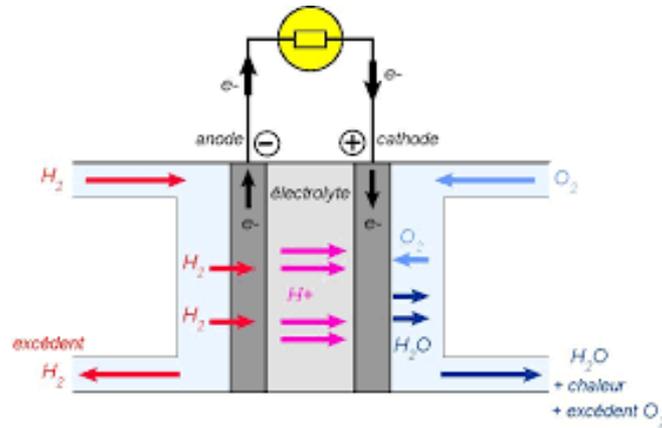
**Catalyseur :** les catalyseurs dans la AFC sont souvent du Nickel et de l'Argent. On trouve d'autres combinaisons avec des métaux précieux exemple (platine/palladium, platine/or).

**Les avantages :**

- ❖ la mise en marche dans des basses températures et dans la pression atmosphérique
- ❖ des électrolytes et de catalyseurs peut couteux
- ❖ Taux de rendement électrique considérable

**Les inconvénients :**

- ❖ la sensibilité au  $CO_2$
- ❖ la corrosion
- ❖ exige la présence des gaz purs



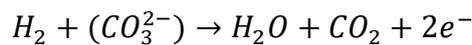
**Figure II.7:** Pile à combustible alcaline.

#### 4.2.2.6 MCFC (pile à combustible à carbonate fondu) :

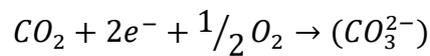
Ce type de piles fonctionnent à des températures élevées à partir de 600°C jusqu'à 700°C. Elle est considérée la pile la plus efficace parmi les autres piles à combustible.

#### Réactions :

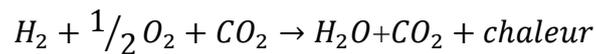
A l'anode



A la cathode :



#### Bilan :



La structure de la cellule élémentaire de la MCFC se compose de :

- ✚ Electrolyte : un mélange de carbonate ( $Li_2CO_3, K_2CO_3$ ) dans un alliage d'oxyde d'aluminium et de lithium ( $LiAlO_2$ ) sous forme des plaques d'épaisseur de 0,5 à 1 mm, ce qui donne une bonne conductivité ionique à des températures de 600 à 700°C.

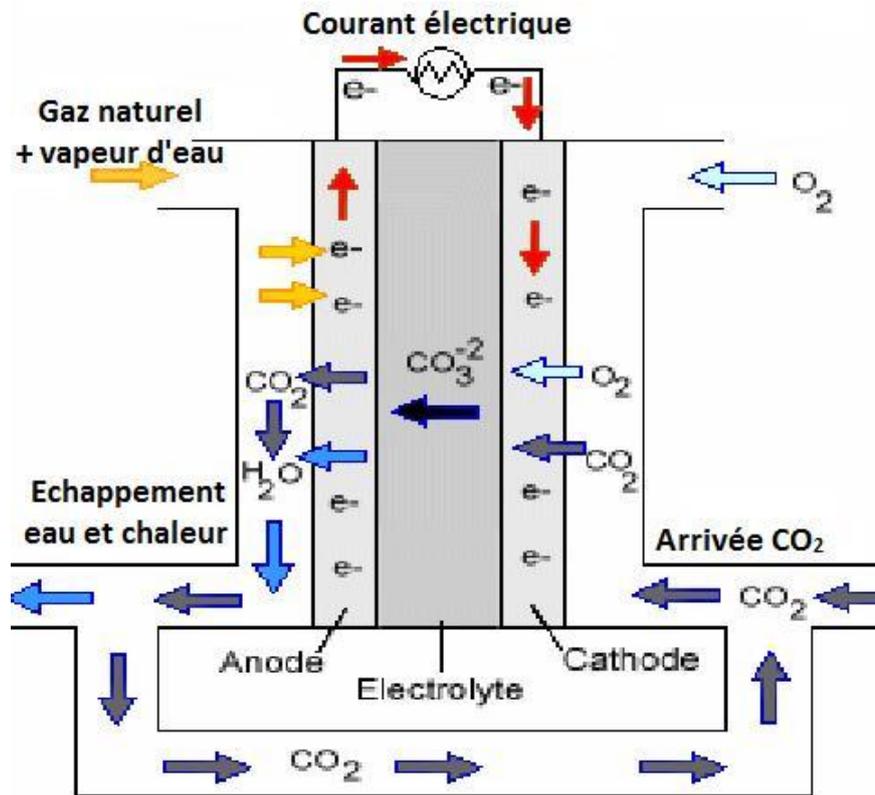
- ✚ Electrodes et catalyseur :

#### Avantages :

- ❖ résistible au dioxyde de carbone
- ❖ La production d'hydrogène par réaction chimique avec des hydrocarbures.
- ❖ une haute efficacité de fabrication d'électricité
- ❖ la cogénération

**Inconvénients :**

- ❖ la corrosion d'anode et la cathode par l'électrolyte
- ❖ non résistant au soufre
- ❖ Difficulté d'extraction de  $CO_2$
- ❖ La décomposition de la cathode et la perte d'électrolyte



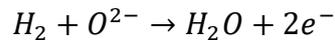
**Figure II.8:** Pile à combustible à carbonate fondu

#### 4.2.2.7 SOFC (pile à combustible à oxyde solide) :

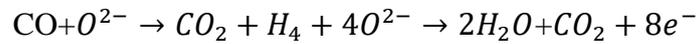
La pile de type SOFC est développée dès les années 1940 par Bauer et Preis basant sur les découvertes de Nernst. Elle fonctionne à températures élevées entre 450 et 1000°C, sa puissance varie de 1 kW à 2MW avec un rendement qui peut atteindre jusqu'à 70% dans les systèmes de cogénération (systèmes à puissance et chaleur combinées). Les SOFC généralement sont destinées aux applications stationnaires.

**Réactions :**

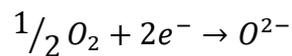
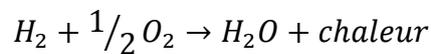
A l'anode :



Ou



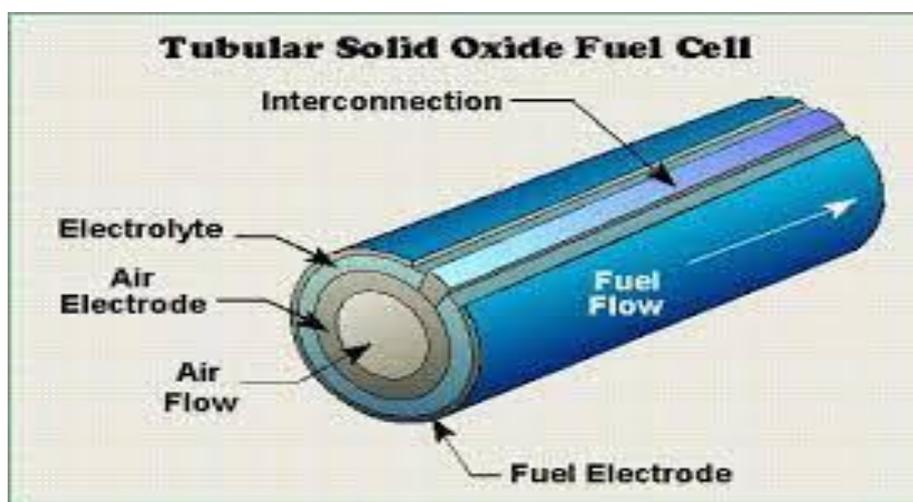
A la cathode :

**Bilan :**

C'est les ions  $O^{2-}$  qui circulent dans les SOFC, la tension fournie par ce type de pile à combustible dépend de la température et de pression et ainsi de rapport des pressions partielles d'oxygène aux électrodes.

Dans les piles à combustibles de type SOFC, on trouve deux principales structures (tubulaire et planaire).

- ✚ Tubulaire : c'est la structure la plus classique, l'ensemble (membrane, électrodes) de la forme d'un tube fermé à l'extrémité, le comburant (air) circule à l'intérieur du tube et le combustible à l'extérieur. Les tubes de diamètre 22 mm et une longueur de 1500 mm, chaque tube délivre une puissance de 150W à 900C°.



**Figure II.9 :** Pile à combustible à oxyde solide.

✚ Structure planaire : dans ce type de pile , il existe deux variantes (une anode utilisée comme substrat ou un électrolyte servant comme substrat) .par rapport aux structures tubulaires , les structures planes présentes une compacité remarquable .La conductivité ionique de l'électrolyte dépend de la température et la réduction de l'épaisseur de l'électrolyte peut abaisser la température de fonctionnement de sorte qu'une structure dans laquelle l'anode supporte l'électrolyte qui peut ainsi être déposé sur couche mince .

### Avantages :

- ❖ Un système cogénération efficace.
- ❖ Un rendement considérable.
- ❖ Utilisation d'autres combustibles.
- ❖ Catalyseurs en Nickel moins coûteux

### Inconvénients :

- ❖ Matériaux sensible au soufre.
- ❖ Temps de démarrage faible.
- ❖ Transport de la chaleur.
- ❖ L'influence de l'instabilité de la température.

**Tableau II.3 : Types des piles à combustibles**

Abréviation	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Caractéristique						
Nom en anglais	Alkaline Fuel Cell	Proton Exchange Membrane FC	Direct Methanol Fuel Cell	Phosphoric Acid Fuel Cell	Molten Carbonate Fuel Cell	Solid Oxide Fuel Cell
Electrolyte	Solution KOH (liquide)	Membrane polymère (solide)	Membrane polymère (solide)	Acide phosphorique (liquide)	Li <sub>3</sub> CO <sub>3</sub> et KCO <sub>3</sub> fondu dans une matrice de LiAlO <sub>2</sub> (liquide)	ZrO <sub>2</sub> et Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (solide)
Catalyseur	Pt	Pt	Pt	Pt	carbonates de lithium et de potassium	Ni
Ion mobile dans l'électrolyte	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	O <sup>2-</sup>
Température	60-80 °C	60-100 °C	60-100 °C	180-220 °C	600-660 °C	700-1000 °C
	Piles à combustible à faible température			Piles à combustible à forte température		
Combustible	H <sub>2</sub> pur	H <sub>2</sub> pur ou reformé	Méthanol	H <sub>2</sub> pur ou reformé	H <sub>2</sub> pur ou reformé	H <sub>2</sub> et CO pur ou reformé
Oxydant	O <sub>2</sub> pur	Air	Air	Air	Air	Air
Domaines d'application	Spatial, transport (sous-marins)	Electronique portable, transport, cogénération	Electronique portable	Transport, cogénération	Cogénération, production centralisée d'électricité	Cogénération, production centralisée d'électricité, transport (APU)
Rendement électrique	55-60 %	32-40 %	15-25 %	40-45 %	50 % 55 % avec réutilisation de la chaleur	45-50 % 60 % avec réutilisation de la chaleur

## **II.5 Conclusion :**

Dans cette section, nous avons présenté les technologies liées à l'hydrogène, couvrant la production, le stockage, le transport et les utilisations. Nous avons également souligné l'importance de l'électrolyse de l'eau et de l'électrolyse inversée par piles à combustibles, deux techniques essentielles pour le secteur énergétique.

L'hydrogène est une ressource énergétique renouvelable et propre, qui a le potentiel de jouer un rôle majeur dans la transition vers un futur plus durable et écologique.

**CHAPITRE III :**  
**L'ÉNERGIE SOLAIRE ET**  
**ÉOLIENNE**

### **III.1 Introduction :**

Dans chaque coin du globe, l'électricité revêt une importance cruciale dans le contexte du progrès économique. Son rôle s'est considérablement renforcé grâce aux avancées technologiques, à l'essor de l'industrialisation, et à la demande croissante en confort moderne. Par conséquent, l'accroissement de la production électrique engendre une amélioration substantielle de la qualité de vie et favorise la création de richesses.

Actuellement, les principales sources d'énergie utilisées pour produire de l'électricité sont les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon). Cependant, ces ressources se sont révélées limitées et non renouvelables, et leur combustion produit des gaz à effet de serre.

L'avantage des énergies renouvelables est qu'elles sont illimitées en quantité et n'émettent pas de gaz à effet de serre sauf pour le processus de fabrication du système utilisant les énergies renouvelables. Son exploitation permet de répondre aux besoins énergétiques tout en préservant l'environnement. Les principales sources d'énergie renouvelable sont l'énergie hydraulique, solaire, éolienne, biomasse, géothermique et océanique.

Dans ce chapitre, nous présentons ces différentes sources d'énergies renouvelables et leurs parts au niveau mondial et français. Nous examinerons ensuite différentes manières de stocker l'énergie, et nous examinerons plus particulièrement le cas des transporteurs d'hydrogène via les électrolyseurs et les piles à combustible. Nous présenterons également différents projets globaux basés sur de tels systèmes (EnR/H<sub>2</sub>), ainsi que différents logiciels informatiques permettant de dimensionner les composants de ces systèmes hybrides.

### **III.2 l'énergie solaire :**

#### **III.2.1. Définition du soleil :**

Le Soleil est une étoile naine jaune, située à environ 150 millions de kilomètres de la Terre. Il s'agit d'une boule de gaz composée à 75 % d'hydrogène et à 25 % d'hélium. Au centre du Soleil, des réactions de fusion nucléaire produisent de l'énergie sous forme de chaleur et de lumière.

La température au centre du Soleil est d'environ 15 millions de degrés Celsius. Cette énergie est ensuite transportée vers l'extérieur par la convection et la diffusion. La surface du Soleil, appelée photosphère, est à une température d'environ 5 500 degrés Celsius.

Le Soleil est la source d'énergie principale de la Terre. Il fournit la lumière et la chaleur nécessaires à la vie sur notre planète. L'énergie solaire est également une source d'énergie renouvelable qui pourrait remplacer les combustibles fossiles.



**Figure III.1 : Soleil**

### **III.3 Types d'énergie solaire :**

L'énergie solaire, issue de soleil, est une source d'énergie propre et renouvelable qui peut être captée et convertie en différentes formes d'énergie utiles pour la production électrique, le chauffage et la propulsion. Elle se décline en deux catégories principales : l'énergie solaire passive, l'éclairage naturel, le photovoltaïque et le solaire thermique.

#### **III.3.1 Énergie solaire passive :**

L'énergie solaire passive est une méthode de chauffage qui utilise la conception architecturale pour capter et redistribuer la chaleur du soleil. Elle est propre et renouvelable, et elle peut être économique à installer. Le chauffage solaire passif fonctionne en utilisant la lumière du soleil pour chauffer les murs, les sols et les meubles d'une maison. Ces surfaces absorbent la chaleur et la restituent ensuite dans l'espace. Cela peut améliorer le confort des occupants et réduire la dépendance aux combustibles fossiles.

### III.3.2 L'éclairage naturel :

L'éclairage naturel est la lumière provenant du soleil. C'est une source naturelle et gratuite, mais elle peut être variable en fonction de la météo et de l'heure de la journée. Pour tirer pleinement parti de l'éclairage naturel, un système d'éclairage manuel peut être nécessaire pour compléter la lumière du soleil lors des périodes de faible luminosité.

### III.3.3 L'énergie solaire thermique :

L'énergie solaire thermique utilise des capteurs solaires pour convertir la lumière du soleil en chaleur. Les capteurs solaires sont généralement constitués de verre, qui capture la lumière du soleil, et d'un matériau absorbant, qui convertit la lumière en chaleur. L'énergie thermique peut ensuite être utilisée pour chauffer des bâtiments, produire de l'eau chaude sanitaire ou alimenter des applications industrielles.

Il existe deux types d'énergie solaire thermique :

#### A. Énergie solaire thermique à basse température :

L'énergie solaire thermique à basse température utilise des capteurs solaires pour capter la chaleur du soleil. Les capteurs sont généralement constitués de verre, qui capture la lumière du soleil, et d'un matériau absorbant, qui convertit la lumière en chaleur. Cette chaleur est ensuite transférée à un fluide caloporteur, qui circule dans un réseau de tubes en cuivre. Le fluide caloporteur transporte ensuite la chaleur vers un ballon d'eau chaude, où elle est stockée pour être utilisée ultérieurement pour chauffer l'eau ou pour le chauffage.

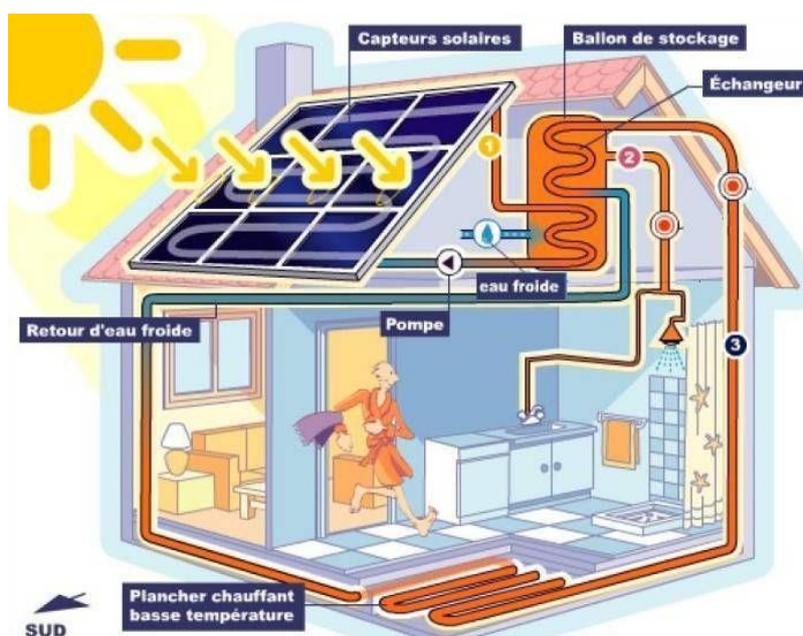


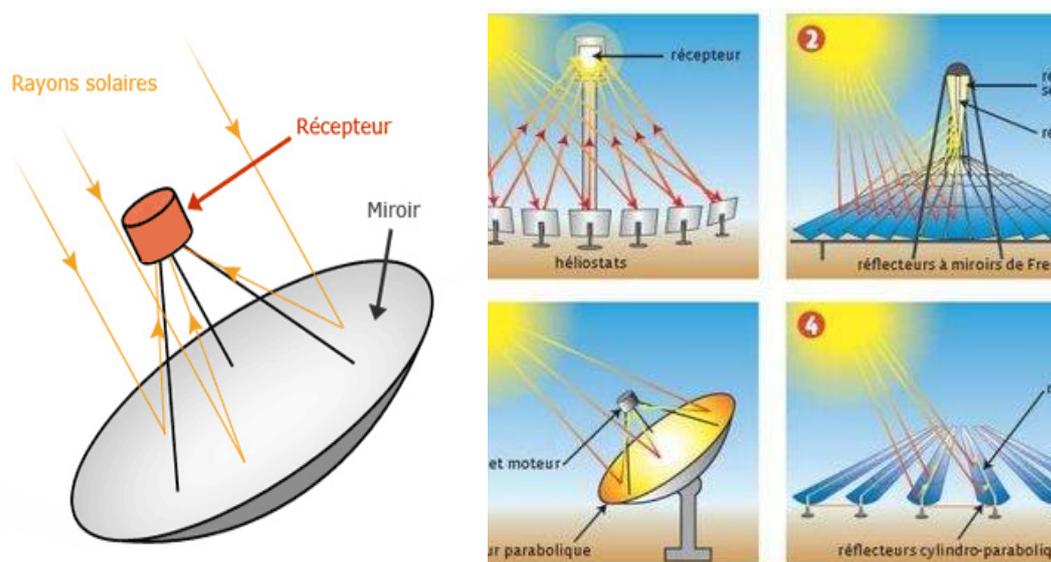
Figure III.2 : Energie solaire thermique à basse température.

## B. Énergie solaire thermique à haute température :

Le rayonnement solaire est concentré sur la surface collectrice, qui peut atteindre des températures très élevées, généralement comprises entre 400°C et 1 000°C.

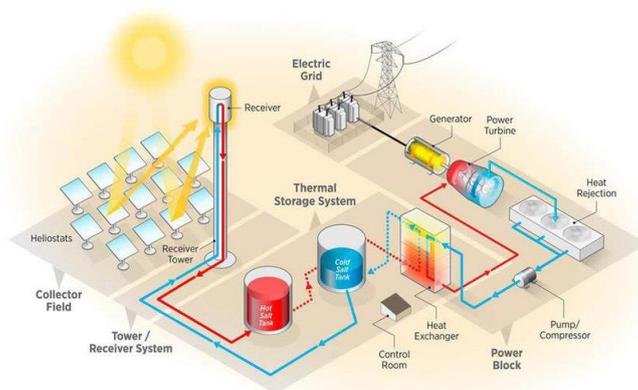
La chaleur solaire crée de la vapeur qui alimente une turbine, qui elle-même alimente un générateur, ce qui relève de la thermodynamique solaire. Les centrales solaires à concentration utilisent trois technologies différentes :

1 • Dans un concentrateur parabolique, les rayons du soleil convergent en un point, le foyer de la parabole.



**Figure III.3 :** Centrale thermodynamique parabolique

2 • Dans les centrales à tour, des centaines, voire des milliers de miroirs (héliostats) se succèdent suivre le soleil et concentrer son rayonnement sur un récepteur central placé au sommet d'une tour.



**Figure III.4 :** Centrale solaire thermodynamique

3• La troisième technologie : Des collecteurs paraboliques cylindriques pour concentrer les rayons du soleil au caloduc au point focal du capteur solaire.

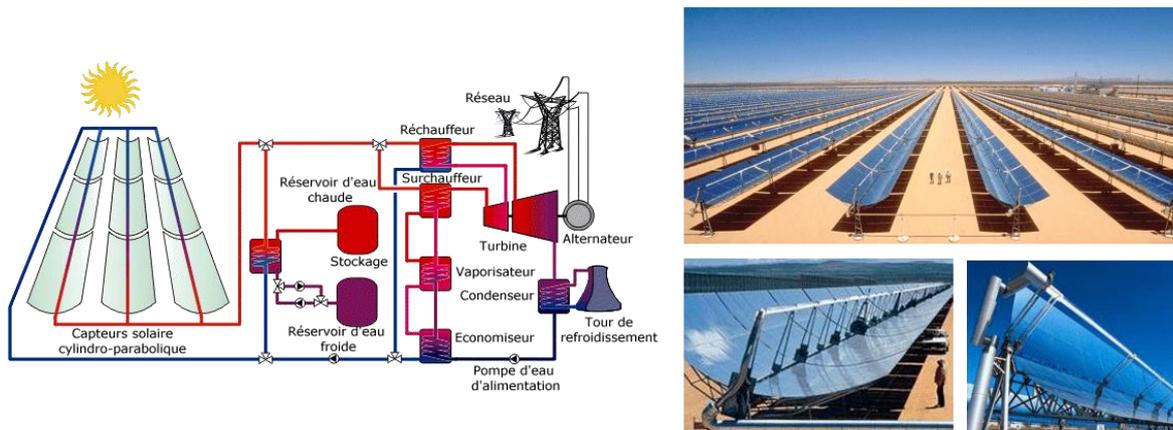


Figure III.5 : Centrale thermodynamique cylindre-parabolique

### III.4 L'énergie solaire photovoltaïque (PV)

En utilisant des panneaux photovoltaïques, une partie du rayonnement solaire directement en électricité. Ces panneaux solaires sont constitués de batteries, le photovoltaïque est principalement constitué de silicium.

Le principe des cellules photovoltaïques pour obtenir du courant s'appelle l'effet photoélectrique, qui consiste en l'émission d'électrons à partir d'un matériau tiré lumière. L'énergie électrique générée peut être stockée dans une batterie ou Conversion à l'aide d'onduleurs pour la distribution dans le réseau.

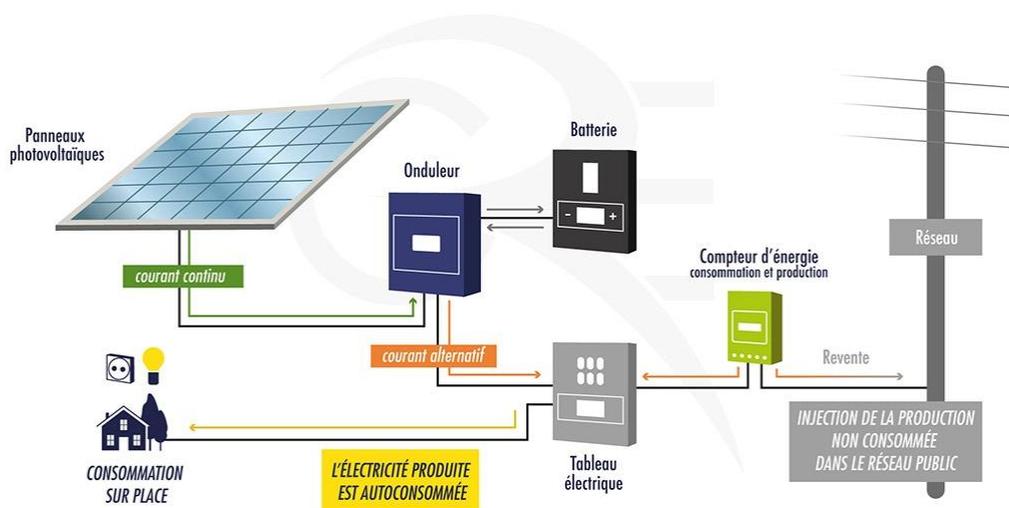


Figure III.6 : Système Photovoltaïque.

### III.4.1 Histoire de l'énergie photovoltaïque(PV)

Quelques dates importantes pour l'énergie photovoltaïque

En 1839, le physicien français Edmond Becquerel fait la découverte de l'effet photovoltaïque.

En 1875, Werner von Siemens rédige un article consacré à l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

En 1954, trois chercheurs américains, Daryl Chapin, Gerald Pearson et Calvin Fuller, ont développé la première cellule photovoltaïque au silicium.

En 1958, deux avancées majeures ont été réalisées dans le domaine de l'énergie solaire. Tout d'abord, une batterie atteignant une efficacité de 9 % a été développée, ce qui représentait un progrès significatif par rapport aux batteries précédentes. Ensuite, le tout premier satellite alimenté par des cellules solaires a été lancé dans l'espace, marquant ainsi le début de l'utilisation de l'énergie solaire pour les missions spatiales.

En 1973, l'Université du Delaware a construit la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques.

En 1983, une voiture à énergie photovoltaïque a parcouru 4 000 kilomètres en Australie.

### III.4.2 Les composants d'un système solaire photovoltaïque (PV)

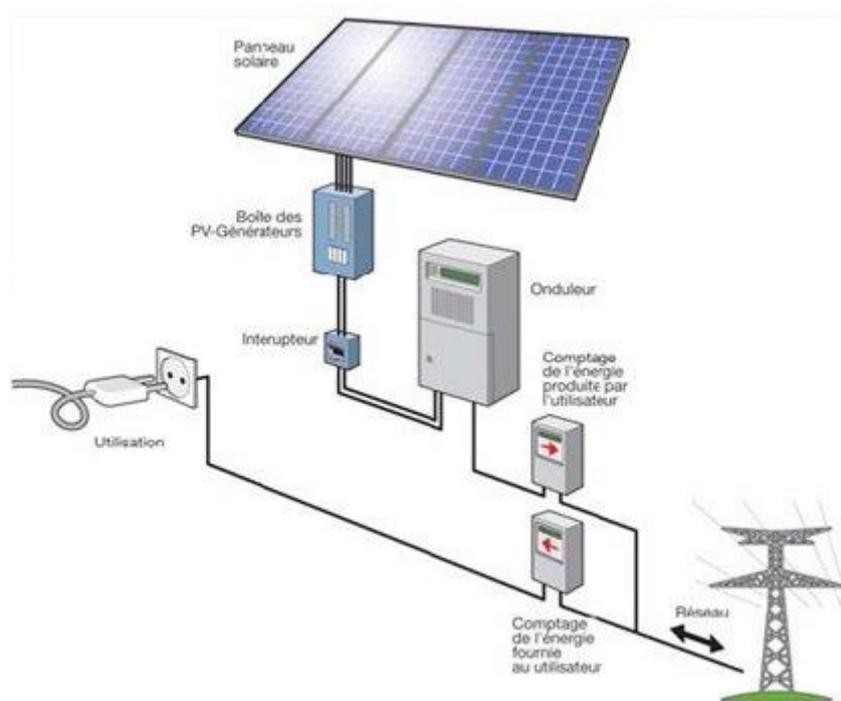
Le courant continu généré par les panneaux solaires peut être utilisé de différentes manières. Il peut être intégré à un circuit électrique qui le dirige vers un ensemble de composants appelés "système photovoltaïque". La conception et la taille de ce système sont adaptées à l'application spécifique et à l'utilisation prévue de l'électricité produite.

Une centrale photovoltaïque reliée au réseau est composée des éléments suivants :

- **Structure de support** : elle supporte le poids des panneaux solaires et résiste aux conditions environnementales.
- **Panneaux photovoltaïques** : ils convertissent la lumière du soleil en courant continu.
- **Composants de distribution** : ils transportent le courant continu des panneaux solaires vers l'onduleur.
- **Onduleur** : il convertit le courant continu en courant alternatif, qui est compatible avec le réseau électrique.

- **Système de surveillance** : il surveille le fonctionnement de la centrale et détecte les anomalies.
- **Compteur de production** : il mesure la production d'électricité de la centrale.

Le système peut être équipé de batteries pour stocker l'électricité produite pendant les périodes de forte production et la restituer lorsque la demande est élevée.



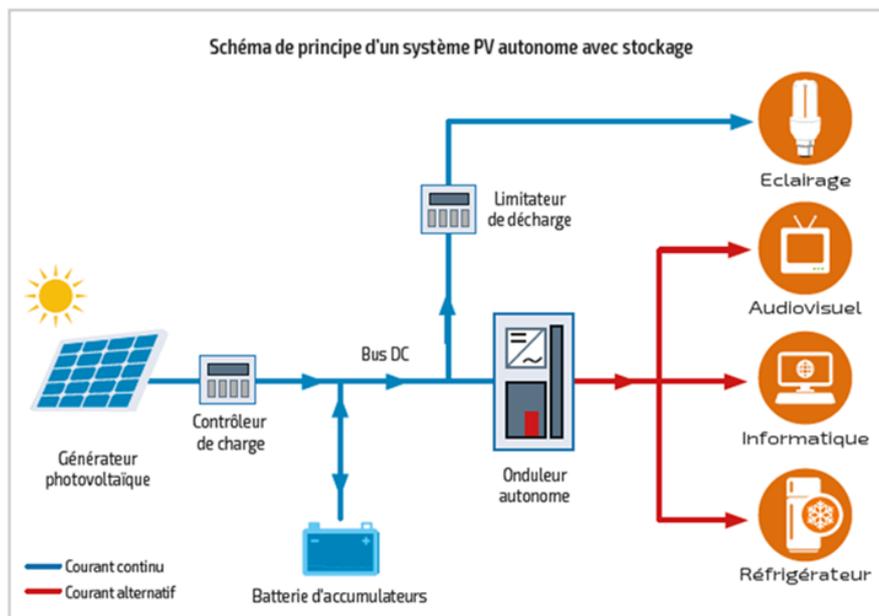
**Figure III.7** : Composants d'un système solaire photovoltaïque

### III.4.3 La base de fonctionnement de système PV :

Les panneaux solaires photovoltaïques sont des dispositifs qui transforment la lumière en électricité. Ils sont constitués d'un assemblage de cellules photovoltaïques, qui sont des dispositifs semi-conducteurs qui produisent un courant électrique lorsque la lumière les frappe. Chaque cellule photovoltaïque génère une tension d'environ 0,5 à 0,6 V. Plusieurs cellules photovoltaïques sont regroupées pour former des modules photovoltaïques, qui ont une tension nominale de 12 V.

La cellule photovoltaïque est constituée de deux couches de silicium, un matériau semi-conducteur. La première couche, appelée couche P, est dopée au bore, ce qui signifie qu'elle contient moins d'électrons que le silicium pur. La deuxième couche, appelée couche N, est dopée au phosphore, ce qui signifie qu'elle contient plus d'électrons que le silicium pur.

Lorsqu'un photon de lumière atteint la cellule photovoltaïque, son énergie provoque la séparation d'un atome de silicium et d'un électron, provoquant ainsi un changement dans les charges électriques. Cela est Coni sous le nom d'effet photovoltaïque. Les atomes, chargés positivement, se déplacent vers la zone P, tandis que les électrons, chargés négativement, se déplacent vers la zone N. cela crée une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique.



**Figure III.8:** Principe de fonctionnement de système photovoltaïque

### III.4.4 Caractéristiques des panneaux photovoltaïques

Les panneaux photovoltaïques sont des dispositifs qui convertissent l'énergie solaire en électricité. Ils sont composés de cellules photovoltaïques, qui sont des semi-conducteurs capables de générer un courant électrique lorsque la lumière les frappe.

Les principales caractéristiques d'un panneau photovoltaïque sont :

- La puissance crête, qui est la puissance maximale que le panneau peut produire dans des conditions standard. Elle est exprimée en watts (W).
- La caractéristique de  $I(V)$ , qui est une courbe représentant le courant débité par le panneau en fonction de la tension aux bornes du panneau. Cette courbe permet de déterminer les points de puissance maximale et de court-circuit.
- La tension à vide, qui est la tension aux bornes du panneau lorsque le courant est nul. Elle est exprimée en volts (V).

- Le courant de court-circuit, qui est le courant débité par le panneau lorsque la tension aux bornes est nulle. Il est exprimé en ampères (A).

#### **III.4.4.1 Explication des caractéristiques**

La puissance crête est la caractéristique la plus importante d'un panneau photovoltaïque. Elle permet de déterminer la quantité d'électricité qu'un panneau peut produire dans les conditions standards.

La caractéristique de  $I(V)$  permet de visualiser le comportement d'un panneau photovoltaïque en fonction de la tension et du courant. Cette caractéristique est importante pour le dimensionnement d'une installation photovoltaïque.

La tension à vide est la tension maximale que peut atteindre un panneau photovoltaïque en l'absence de courant. La tension à vide est importante pour le dimensionnement des onduleurs, qui sont les appareils qui convertissent la tension continue produite par les panneaux photovoltaïques en tension alternative.

Le courant de court-circuit est le courant maximal que peut débiter un panneau photovoltaïque en court-circuit. Le courant de court-circuit est important pour le dimensionnement des protections électriques, qui doivent empêcher les panneaux photovoltaïques de subir des dommages en cas de court-circuit.

#### **Autres caractéristiques**

Outre les caractéristiques principales ci-dessus, les panneaux photovoltaïques peuvent également présenter d'autres caractéristiques, telles que :

- Rendement : fraction de l'énergie solaire captée par le panneau qui est convertie en électricité. Le rendement est exprimé en pourcentage.
- Taux de dégradation : perte de puissance d'un panneau photovoltaïque au fil du temps. Le taux de dégradation est exprimé en pourcentage par an.
- Durée de vie : durée pendant laquelle un panneau photovoltaïque peut fonctionner de manière fiable. La durée de vie est exprimée en années.

Ces caractéristiques sont importantes pour choisir le panneau photovoltaïque le plus adapté à ses besoins.

### III.4.5 Avantages et Inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque offre une panoplie d'avantages et d'inconvénients à considérer dans le cadre de sa mise en place.

#### **Avantages :**

- 1. Énergie indépendante :** cette source d'énergie tire son pouvoir du rayonnement solaire, qui est à la fois renouvelable et gratuit, offrant une autonomie énergétique inestimable.
- 2. Propreté environnementale :** l'énergie photovoltaïque est propre et respectueuse de l'environnement, ne produisant aucun gaz à effet de serre ni de déchets nocifs.
- 3. Production d'énergie adaptée :** elle génère l'énergie nécessaire pour répondre aux besoins, contribuant ainsi à une utilisation plus efficace des ressources.
- 4. Fiabilité accrue :** réduisant la vulnérabilité aux pannes d'électricité, elle assure une alimentation électrique plus fiable, ce qui est crucial dans de nombreuses situations.
- 5. Extensibilité :** les systèmes photovoltaïques peuvent être facilement agrandis pour répondre à une demande croissante en énergie.
- 6. Revente du surplus :** la possibilité de revendre l'excédent d'énergie générée peut amortir les coûts initiaux et même générer des revenus supplémentaires.
- 7. Entretien minimal :** les panneaux photovoltaïques nécessitent peu d'entretien, ce qui permet de réduire les coûts à long terme.
- 8. Silencieux :** contrairement à certaines sources d'énergie, l'énergie photovoltaïque ne produit aucun bruit, préservant ainsi la tranquillité des lieux.

#### **Inconvénients :**

- 1. Haute technologie coûteuse :** la fabrication des panneaux photovoltaïques implique une technologie avancée qui exige d'importants investissements en recherche et développement, ce qui peut faire monter les coûts.
- 2. Rendements encore faibles :** bien que les progrès aient été réalisés, les rendements des panneaux photovoltaïques demeurent inférieurs à ceux d'autres sources d'énergie, limitant ainsi leur efficacité.

**3. Besoin de stockage :** pour les installations domestiques, un système d'appoint, généralement des batteries, est nécessaire pour stocker l'énergie produite et l'utiliser en l'absence de lumière solaire.

**4. Investissement initial élevé :** le cout d'investissement dans une installation photovoltaïque est souvent considérable, bien que les économies à long terme puissent compenser ce désavantage initial.

En somme l'énergie photovoltaïque représente une solution énergétique prometteuse, mais elle nécessite des investissements importants et présente encore certains défis technologiques à surmonter pour optimiser son rendement. Cependant, ses avantages environnementaux et sa durabilité à long terme en font une option attrayante pour répondre aux besoins énergétiques du futur.

## **III.5 Energie éolienne :**

### **III.5.1 le vent et l'éolienne :**

Le vent est une énergie renouvelable qui peut être utilisée pour produire de l'électricité. Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne repose sur la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

Lorsque le vent frappe les pales d'une éolienne, celles-ci tournent. Le mouvement des pales est transmis à un rotor, qui à son tour entraîne un générateur. Le générateur produit alors de l'électricité, qui est transmise au réseau électrique.



**Figure III.9:** Système Photovoltaïque énergie éolienne

### **III.5.2 Historique des éoliennes :**

L'énergie du vent est utilisée depuis l'Antiquité. En Mésopotamie, on utilisait le vent pour faire tourner des pompes hydrauliques, irriguer les cultures et moudre le grain.

Au cours des siècles suivants, l'énergie éolienne a été utilisée de plus en plus largement. En Perse, les premiers moulins à vent ont été construits au 6e ou 7e siècle, et en Chine, on a construit des roues hydrauliques actionnées par le vent.

Au 19e siècle, l'énergie éolienne a connu un nouvel essor. En 1887, Charles F. Brush a construit la première éolienne entièrement automatisée aux États-Unis. Cette éolienne produisait 12 kW d'électricité.

Au début du 20e siècle, Albert Betz a découvert que l'énergie cinétique du vent ne peut être exploitée qu'à hauteur de 59,3 %. Cette loi est toujours utilisée aujourd'hui dans la conception des éoliennes.

La crise du pétrole de 1973 a été un facteur majeur dans le renouveau de l'intérêt pour l'énergie éolienne. Les pays du monde entier ont commencé à investir dans les éoliennes comme source d'énergie renouvelable pour réduire leur dépendance au pétrole.

Dans les années 1970 et 1980, les éoliennes ont connu des progrès technologiques majeurs. Les turbines éoliennes sont devenues plus grandes, plus efficaces et plus rentables. En 1978, les Danois ont construit la première turbine éolienne tripale de 54 mètres de diamètre et d'une puissance de 2 MW.

Aujourd'hui, l'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable majeure dans de nombreux pays. Elle représente une part croissante de la production d'électricité dans le monde.

### **III.5.3 Les différents types d'éolienne :**

Les éoliennes peuvent être classées en deux grandes familles : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal.

### a. Les éoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont les machines les plus répandues actuellement. Elles présentent plusieurs avantages, notamment :

- Un rendement élevé : les éoliennes à axe horizontal sont capables de convertir une plus grande quantité d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique que les autres types d'éoliennes.
- Une conception simple : les éoliennes à axe horizontal sont constituées de pièces mécaniques relativement simples, ce qui les rend moins coûteuses à fabriquer et à entretenir.
- Une grande polyvalence : les éoliennes à axe horizontal peuvent être utilisées pour produire de l'électricité, pomper de l'eau ou alimenter des machines agricoles.

En outre, les éoliennes à axe horizontal sont adaptées à une large gamme de conditions de vent. Elles peuvent être installées sur des sites côtiers, en montagne ou en plaine.

Les éoliennes à axe horizontal sont donc une solution efficace et rentable pour la production d'énergie renouvelable.

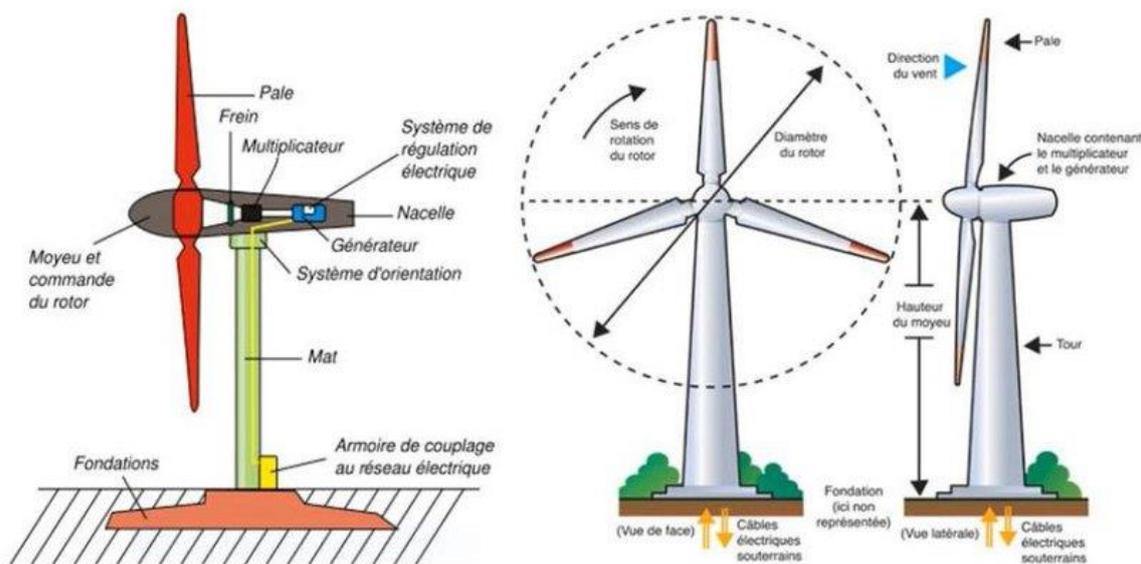
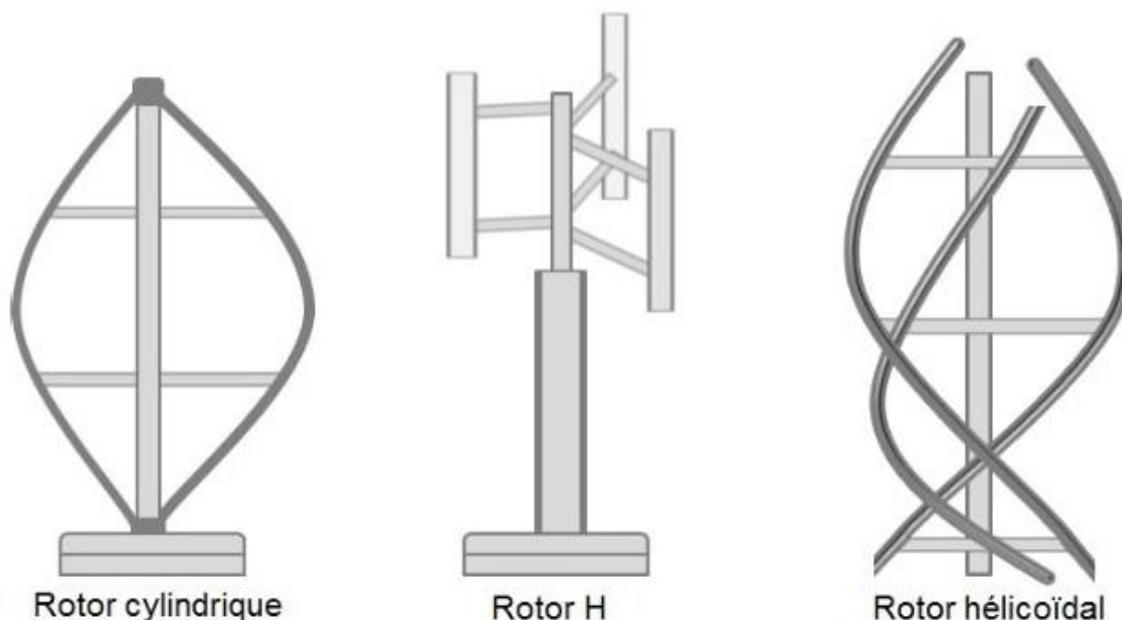


Figure III.10 : Eoliennes à axes horizontal.

**b. Eolienne à axe vertical :**

Les éoliennes à axe vertical ont été largement étudiées. Elles présentent plusieurs avantages, notamment l'absence de système d'orientation des pales et l'emplacement de la partie mécanique au sol, ce qui facilite la maintenance. Cependant, certaines d'entre elles doivent être démarrées manuellement et le mat, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques. Ces inconvénients ont conduit les constructeurs à les abandonner, sauf pour les applications de faible puissance.



**Figure III.11:** Eoliennes à axes vertical.

**III5.4 Principe de fonctionnement :**

Les éoliennes sont des machines qui convertissent l'énergie du vent en énergie électrique. Ce processus se déroule en deux étapes :

- La turbine, qui est constituée de trois pales, capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en énergie mécanique. Les pales sont conçues pour créer une poussée lorsqu'elles sont traversées par le vent, ce qui fait tourner la turbine.
- La génératrice, qui est reliée à la turbine, convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. L'électricité produite est ensuite transmise au réseau électrique.

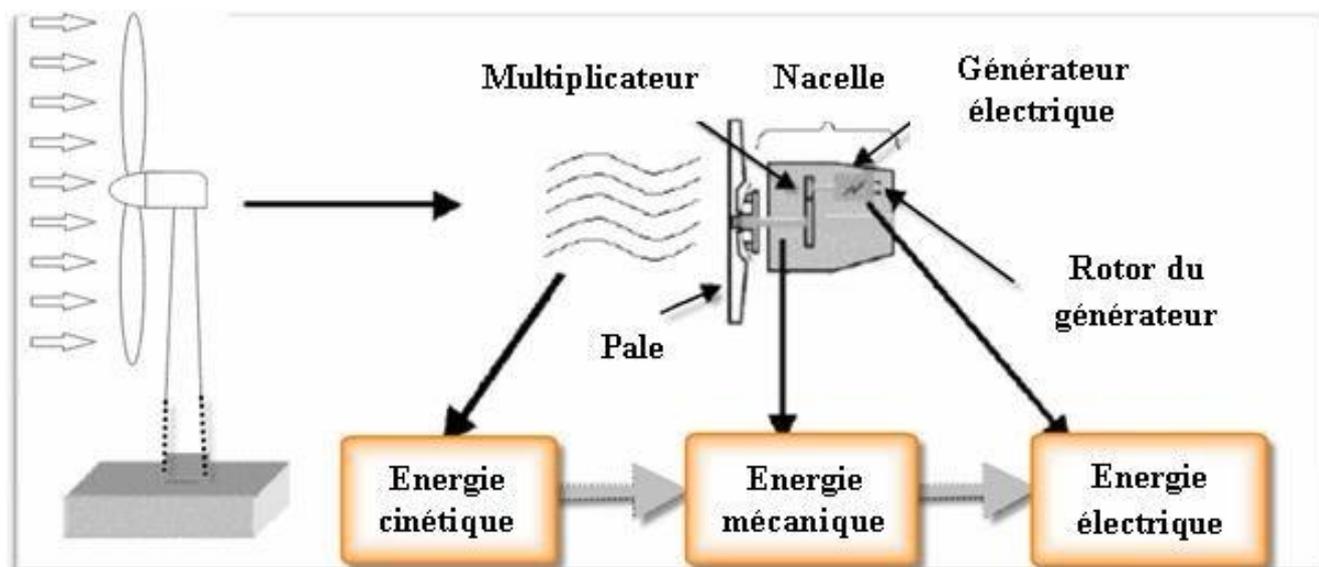


Figure III.12: Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent

### III.5.5 Les composants des éoliennes :

Une éolienne est une machine qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en énergie électrique. Elle est constituée de plusieurs composants principaux :

- Le rotor est composé de pales qui tournent sous l'effet du vent. Il est relié à un arbre qui transmet la puissance au générateur.
- Le générateur convertit l'énergie mécanique du rotor en énergie électrique. Il est généralement un moteur asynchrone ou synchrone.
- La boîte de vitesse augmente la vitesse de rotation du générateur pour qu'il puisse fonctionner efficacement.
- Le système de contrôle permet de réguler la vitesse de rotation du rotor et de la puissance produite par l'éolienne.
- Le système de freinage permet d'arrêter l'éolienne en cas de besoin, par exemple en cas de vent trop fort.
- La tour supporte le rotor et le générateur. Elle doit être suffisamment élevée pour que le rotor soit au-dessus du gradient de vent, qui est plus faible près du sol.

### Récapitulatif des composants

- Rotor : capte l'énergie du vent
- Générateur : convertit l'énergie mécanique en énergie électrique
- Boîte de vitesse : augmente la vitesse de rotation du générateur
- Système de contrôle : régule la vitesse de rotation du rotor et la puissance produite
- Système de freinage : arrête l'éolienne en cas de besoin
- Tour : supporte le rotor et le générateur.

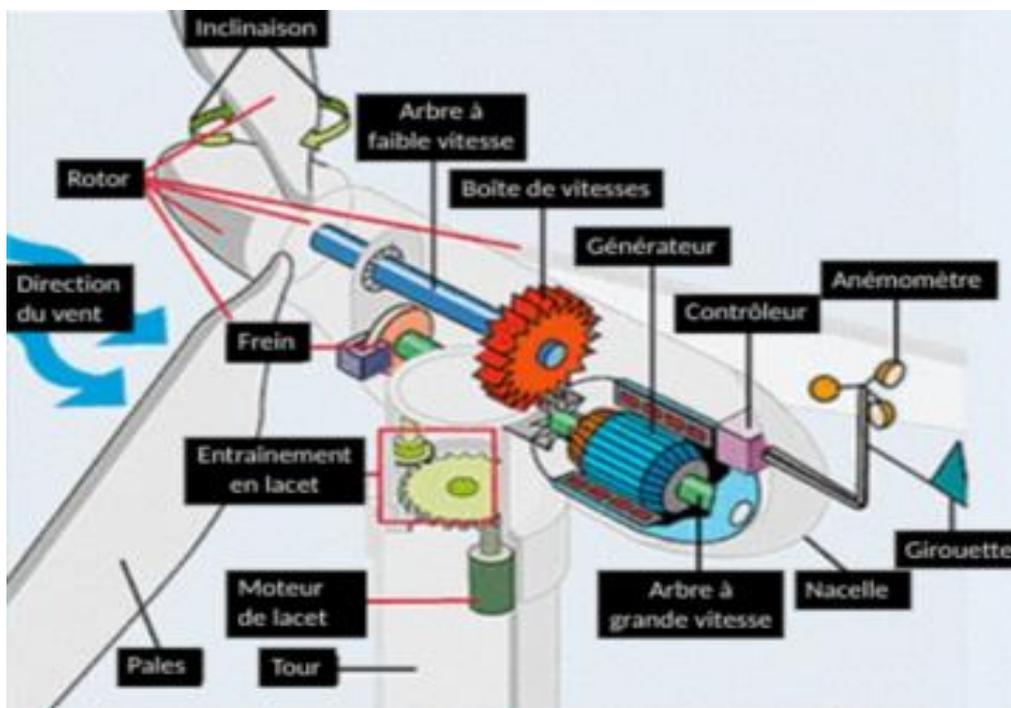


Figure III.13 : Les composants des éoliennes

### III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions de base des énergies solaire photovoltaïque et éolienne. Nous avons également décrit les éléments constitutifs de ces deux systèmes et leurs principes de fonctionnement.

**CHAPITRE 04**  
**SIMULATION ET**  
**RÉSULTATS**

## **Iv.1 Introduction**

La simulation dans HOMER est un outil qui permet aux ingénieurs, planificateurs énergétiques, chercheurs et professionnels du secteur de l'énergie de modéliser et d'analyser le comportement de systèmes énergétiques complexes. Elle offre une vision précieuse des performances potentielles d'un système énergétique donné et permet de prendre des décisions éclairées pour la planification, la conception et l'optimisation de projets énergétiques.

## **IV.2 Présentation du logiciel HOMER :**

HOMER (hybride optimisation model for electric renewable) est un logiciel de modélisation énergétique, est un instrument très efficace pour la conception et l'optimisation des systèmes électrique hybrides de différentes sources d'énergie renouvelable

Le logiciel développé par l'entreprise (National Renewable Energy Laboratory) depuis 1993, pour le programme d'électrification des sites isolés

Il s'agit d'un logiciel de simulation qui fonctionne à base du temps. La durée de la simulation est basée sur un an. Ainsi, l'évolution de paramètres tels que la demande électrique, la contribution solaire ou éolienne peut être prise en compte. Il est même possible d'importer des données expérimentales à partir de fichiers correctement formatés.

HOMER peut donner des résultats de sensibilité pour les différentes configurations ainsi l'optimisation du cout économique. Le logiciel peut être utilisé pour évaluer les différentes combinaisons de tailles et de quantités de composants, et pour étudier comment les variations de disponibilité des ressources ont un effet sur les dépenses d'installation et d'exécution de différentes solutions système.

Pour la simulation d'un système de production d'énergie hybride, il faut d'abord bien définir les éléments combinés dans ce système, en utilisant les composants de la bibliothèque logicielle, tels que l'éolienne, le panneau solaire, les générateurs et les convertisseurs etc. Si un composant est requis qui n'existent dans la liste des composants définis par défaut, le logiciel permettra de le faire en ajoutant toutes les propriétés techniques ainsi que son coût. Il est possible également modifier les attributs d'un composant qui fait déjà partie de la bibliothèque.

### IV.2.1 Présentation de l'interface du logiciel :

L'étude est réalisée par la version 3.16.2 du logiciel HOMER Pro sortie le 6 juillet 2023. La figure ci-dessous présente le logo de cette version :



Figure IV.1 : Logo de HOMER Pro

Le logiciel HOMER Pro est l'équivalent des logiciels courants, son utilisation est à la portée de l'utilisateur, il dispose sur son interface des icônes et des paramètres de configurations bien exposés à manipuler directement.

Les figures ci-dessous représentent l'interface du logiciel HOMER Pro :



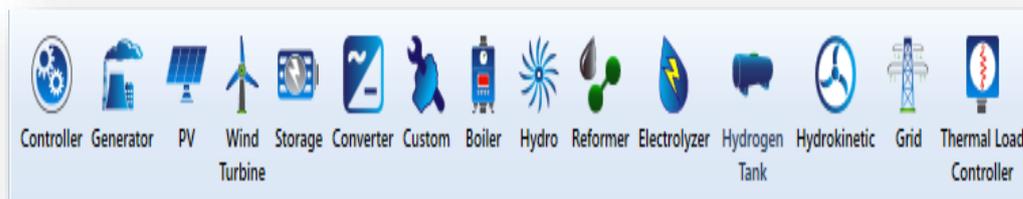
Figure IV.2 : Interface de HOMER pro

La barre des charges permet de choisir la charge voulue soit électriques ou thermique et aussi d'hydrogène



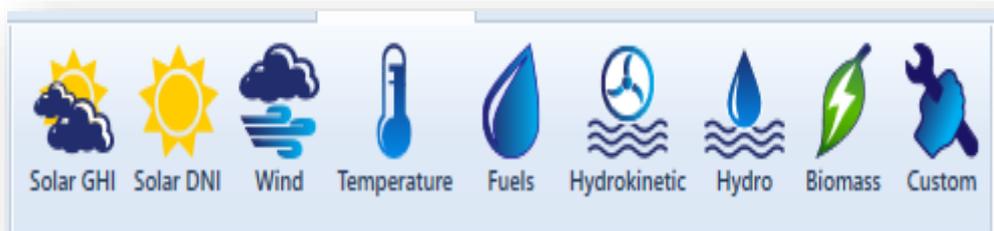
**Figure IV.3 :** Ressources dans le logiciel HOMER

La barre des composantes comme elle est illustrée dans la figure nous donne les divers choix des outils et les sources d'énergies pour la configuration du système hybride



**Figure IV.4 :** Composantes du logiciel HOMER

Le logiciel HOMER nous donne la possibilité de prendre des informations sur les ressources que dépend le système à simuler dans un site donné , des informations sur la température , la vitesse du vent , ensoleillement...etc



**Figure IV.5 :** Ressources dans logiciel HOMER

L'arrangement des différents outils et de sources correspond pour l'installation permet l'obtention du système hybride requis , tel qu'il est figuré ci-dessous

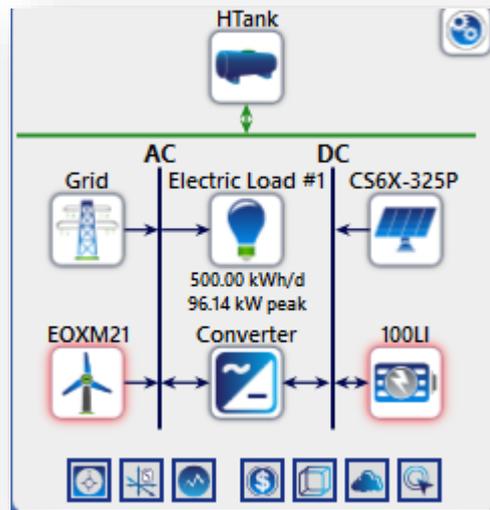


Figure IV.6 : Configuration d’un système hybride

**IV.2.2 Détails de la charges sur le logiciel :**

Pour effectuer une configuration d’un système sur HOMER il faut d’abord sélectionner la charge qu’on doit alimenter et la complétion de ses informations soit sur le type de la charge ou sur les cout.

Metric	Baseline	Scaled
Average (kWh/day)	165.44	165.44
Average(kW)	6.89	6.89
Peak (kW)	20.46	20.46
Load factor	.34	.34

Load Type:  AC  DC

Figure IV.7 : Détails de la charge électrique dans HOMER

**IV.3 Simulation :**

**IV.3.1 Présentation de site d’étude :**

Notre étude est sur la ville de In Guezzam une région saharienne à l’extrême sud de pays , elles est à 388 km de Tamarasset et à 2320 km de la capitale Alger, sa population est environ 7045 hab d’une densité de 0,15 hab/km<sup>2</sup> ( statistiques de 2008 ) les coordonnées géographique d’Aoulef dans le tableau ci-dessous :

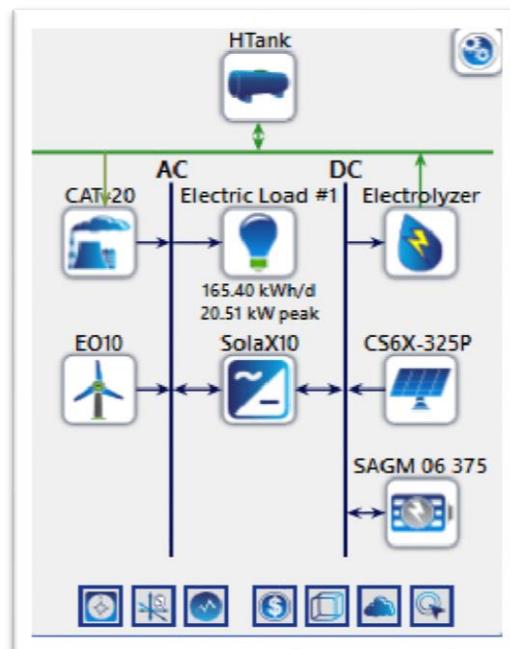
Altitude : 455m	Latitude : 19,5709	Longitude : 5,7694
-----------------	--------------------	--------------------



**Figure IV.8 :** Position géographique du site

### IV.3.2 Présentation du système a étudié :

Notre travail c'est une étude analytique sur le sensibilité d'un système hybride de production électrique. Notre système combine la configuration suivante :éolien-photovoltaïque-pile à combustible et les batteries. La production électrique du système sert à alimenter une petite zone d'habitants. Le système de génération d'énergie simulé par le logiciel HOMER Pro est présenté sur la figure ci-dessou :



**Figure IV.9 :** Configuration du système

### IV.3.3 Les ressources naturelles à In Guezzam

#### IV.3.3.1 Les données du vent :

La vitesse mensuelle du vent dans le site selon les résultats du logiciel varie en fonction des mois entre 5.2 et 6.8 m/s, les vitesses les plus élevées sont enregistrées en à la saison d’hiver (entre Décembre et Mars). La figure ci-dessous montre les changements de la vitesse mensuelle du vent durant l’année.



Figure IV.10 : Variation de la vitesse du vent à In Guezzam

#### 3.3.2 Les données solaires sur le site :

Les résultats du rayonnement solaire donnés par le logiciel sont constitués de l’indice de clarté et l’irradiation mensuelle, on voit que l’irradiation varie en fonction des mois entre 4,2 et 7,7 kWh/m<sup>2</sup>/jour , et l’indice de clarté est autour de 0,6 et 0,7 durant l’année ;

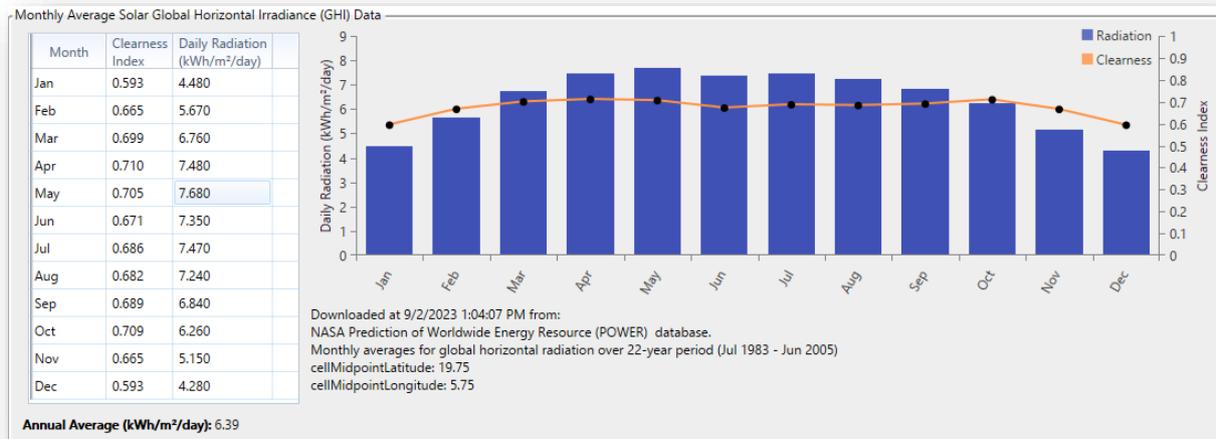


Figure IV11: Rayonnement solaire annuel à In Guezzam

### 3.3.3 La température :

La température moyenne mensuelle minimale est relevée en mois de janvier avec 16°C tandis que la température moyenne mensuelle maximale été prise en mois de juin avec 35°C ce qui donne une température moyenne annuelle de 25,5°C

La variation des températures moyennes mensuelles est représentée dans la figure ci-dessous

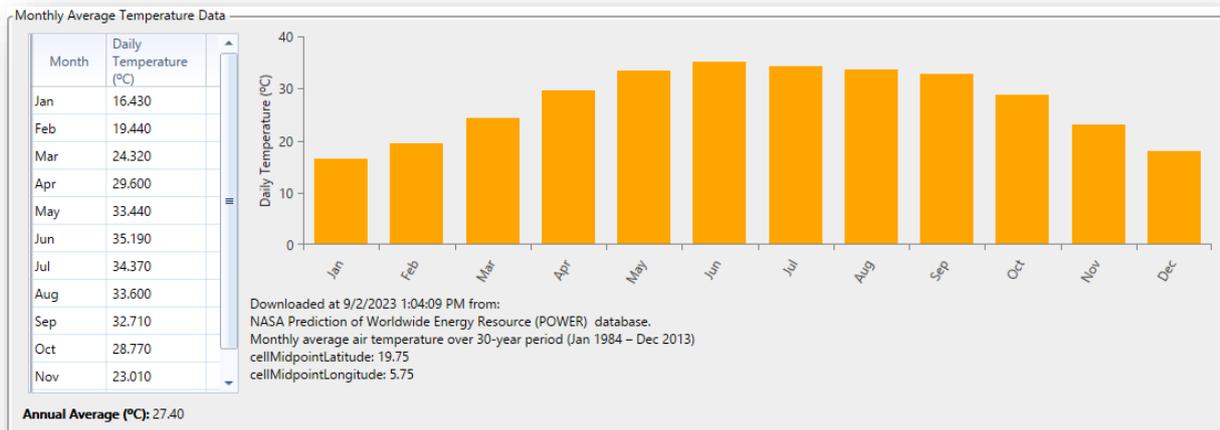


Figure IV.12 : Variation de la température a In Guezzam

## IV.3.4 La configuration du système hybride

### IV.3.4.1 La charge électrique

Le but de notre installation hybride c'est d'assurer une alimentation électrique avec une charge continue de 165,4 kWh/jour quotidiennement et non-stop. La figure représente la simulation de la charge électrique et dans le bas de la figure on voit les puissances minimales et maximales, fournit pour atteindre la charge donnée.

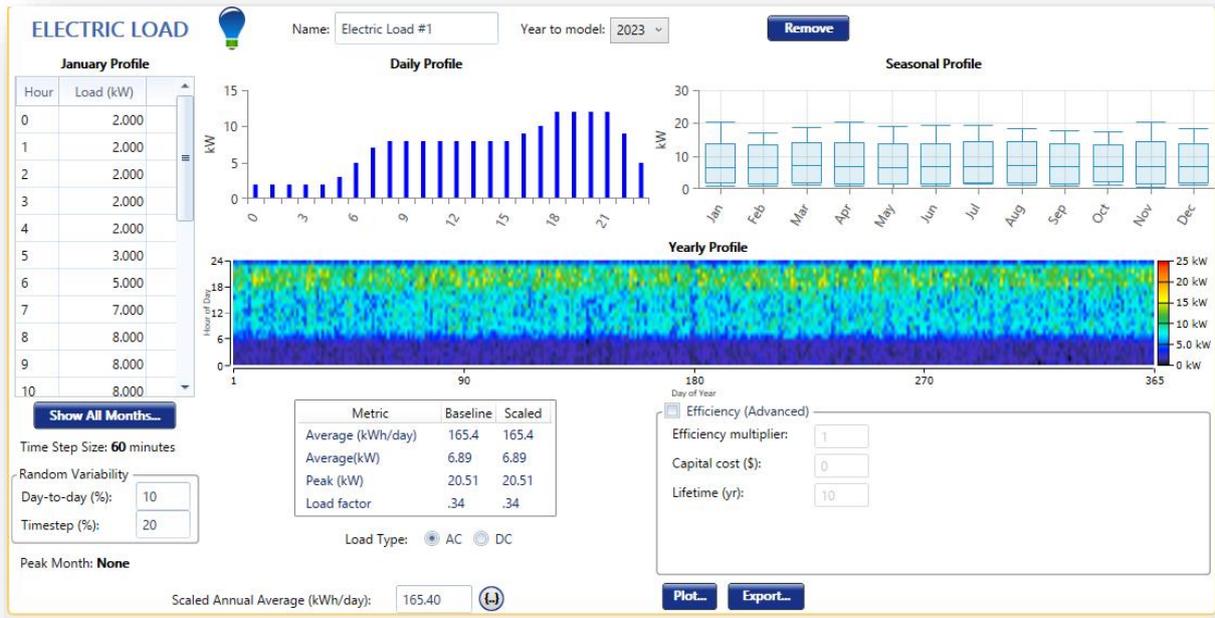


Figure IV.13 : Charge électrique

Le profil de la moyenne mensuelle de la charge électrique est illustré dans la figure ci-dessous, nous voyons que la charge varie du mois à l'autre et la moyenne minimale est enregistrée en mois de février, en contrepartie elle atteint ses valeurs maximales pendant les mois de janvier et avril et novembre.

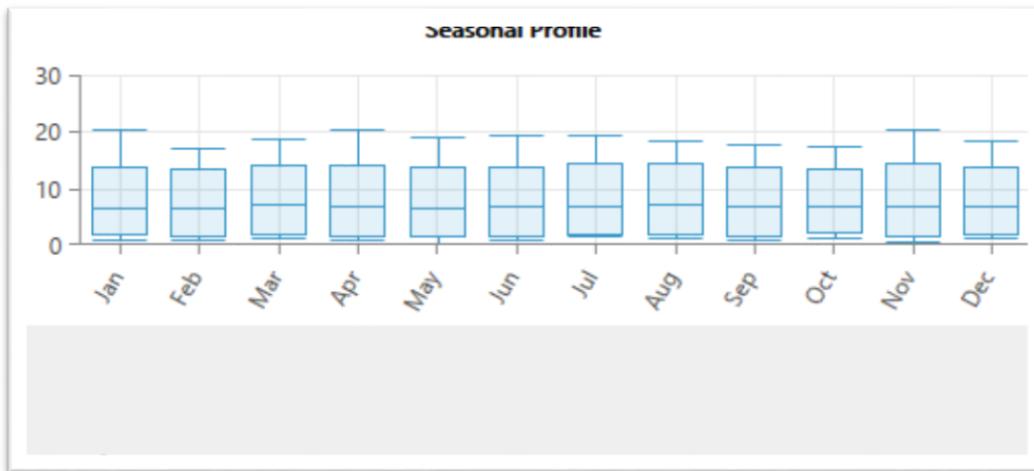


Figure IV.14 : Profil des moyennes des charges mensuelles

### 3.4.2 Le générateur photovoltaïque :

Les caractéristiques du système photovoltaïque CS6X-325P sont présentées dans le tableau :

**Tableau IV.01** : Caractéristiques du système photovoltaïque CS6X-325P

Propriétés	Valeurs
Technologies	Poly cristallin (Poly)
Cellules	72 cellules poly
Durée de vie	25ans
Puissance	325W
Coefficient de perte de charges du à la température	-0 ,31%
Tension de fonctionnement optimale	37,0 volts
Efficacité des modules	16 ,94%
Température nominale d'utilisation	45±2°C

### 3.4.3 L'électrolyseur :

Lorsque la production électrique des générateurs éoliens et photovoltaïques est affaiblie, l'électrolyseur produit de l'hydrogène automatiquement. Dans notre système on à choisit l'électrolyseur alcalin ses caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant

**Tableau IV.02** : Propriétés d'électrolyseur

Propriétés	Valeurs
Type	Alcalin
Durée de vie	15ans
Puissance	10 kW
Mode de fonctionnement	CC
Rendement	85%
Rapport de la charge minimale	20%

### 3.4.4 Le convertisseur :

Un convertisseur est un système qui permet d'ajuster la puissance afin d'adapter la puissance électrique de sortie d'un système à la puissance d'entrée d'un autre système. Ce composant peut convertir le courant alternatif en courant continu et vice versa. Étant donné que les composants d'un système d'énergie renouvelable ont des courbes tension-courant différentes, il peut également s'adapter à la tension DC/DC.

Il existe trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les systèmes hybrides : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs.

Dans notre étude on a choisi le convertisseur solar X X3-hybride10 le tableau ci-dessous représente ses caractéristiques

**Tableau IV.3 :** Propriétés du convertisseur

Propriétés	Valeurs
Puissance	10 Kw
Durée de vie	25ans
Rendement	97%
Tension d'entrée DC	1100 V
Tension de sortie AC	380 V

### 3.4.5 L'aérogénérateur :

L'éolienne EOCYCLE EO10 une petite éolienne qui génère l'électricité abondamment, la figure ci-dessous représente l'éolienne EOCYCLE EO10

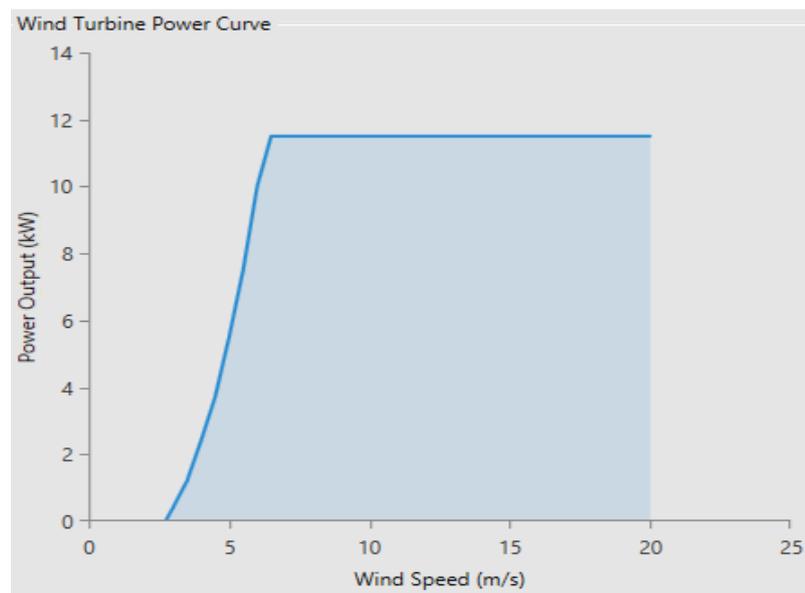


**Figure IV15:** Eolienne EOCYCLE EO10

On a utilisé dans notre système l'aérogénérateur **EOCYCLE EO10** 10 Kw ses caractéristiques sont illustrés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau IV.4** : Propriétés de l'EOCYCLE EO10

Propriétés	Valeurs
Puissance	10 KW
Diamètre du rotor	15,81 m
Vitesse minimale de fonctionnement	2,75 m/s
Vitesse maximale de fonctionnement	20 m/s
Durée de vie	20 ans
Longueur des pales	16 m et 23 m



**Figure IV.16:** Puissance d'EOCYCLE EO10 en fonction de la vitesse du vent

### 3.4.6 La pile à combustible :

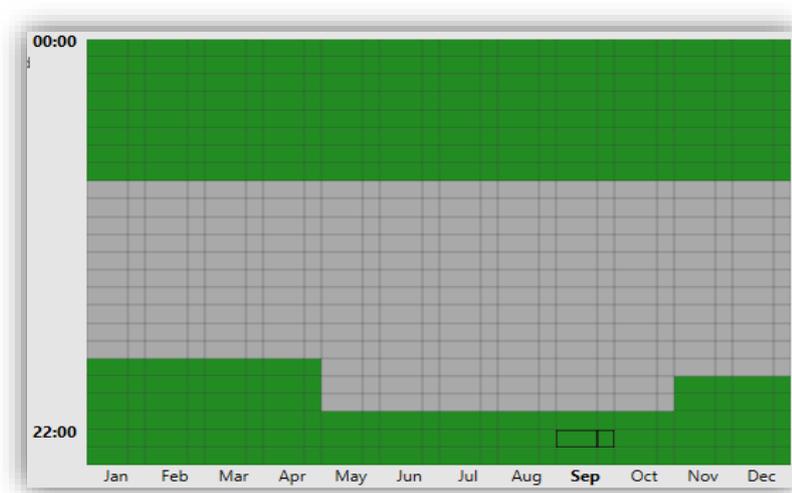
Au moment où la production des autres sources n'atteint pas le potentiel de la charge, dans ce cas c'est la PAC qui intervient pour satisfaire le déficit électrique.

Le type de la PAC choisit c'est la PEM, ses propriétés sont illustrées dans le tableau suivant :

**Tableau IV.5 : Pile à combustible**

Propriétés	Valeurs
Type	PEM
Puissance	16 kW
Durée de vie	40000h
Mode de fonctionnement	AC
Consommation spécifique	0,058kg/kWh

Les heures de fonctionnement de la PAC durant l'année sont illustrés dans la figure ci-dessous :



**Figure IV17 : Temps de fonctionnement de la PAC**

### 3.4.7 Les batteries :

Pour le stockage d'excès d'énergie des générateurs et la restituer durant la nuit, les batteries doivent être installées dans le système.

Pour le stockage d'électricité dans notre système on a choisi la batterie de type SAGM 06 375 ses propriétés techniques sont présentées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau IV.6 : Propriété de batterie**

Propriétés	Valeurs
Type	SAGM 06 375
Température de fonctionnement	-20°C 50°C
Capacité nominale	2,46kWh
Efficacité	85%
Mode de fonctionnement	CC

### 3.4.8 Le réservoir d'hydrogène :

L'hydrogène produit par l'électrolyseur sera stocké dans le réservoir d'hydrogène pour une utilisation ultérieure par la PAC pour satisfaire la demande d'énergie

Les caractéristiques du réservoir utilisé sont dans le tableau

**Tableau IV.7 : Propriétés du réservoir**

Propriétés	Valeurs
Capacité	500 kg
Durée de vie	25 ans
Volume réservé	15%

## IV.4 Résultats et discussions :

Après avoir installé les différentes composantes de la configuration du système hybride , le but c'est d'alimenter la communauté de In Guezzam par une charge de 165,4 Kw/jour.

Les résultats de simulation donnés par le logiciel HOMER pour la configuration du système hybride sont comme suit :

Architecture											Cost		
	CS6X-325P (kW)	EO10	CAT-20 (kW)	SAGM 06 375 (#)	Electrolyzer (kW)	HTank (kg)	SolaX10 (kW)	Dispatch	NPC (\$)	LCOE (\$/kWh)	Operativ (\$/yr)		
	30.0	2	16.0	30	20.0	100	10.0	CC	\$264,265	\$0.339	\$2,576		
	30.0	5	16.0		20.0	500	5.00	CC	\$587,218	\$0.753	\$4,614		
	30.0	10	16.0		20.0	500		CC	\$852,621	\$1.09	\$6,862		
	30.0	10	16.0	10	20.0	500		CC	\$860,867	\$1.10	\$6,772		

**Figure IV.18 : Résultats optimisés pour le système hybride**

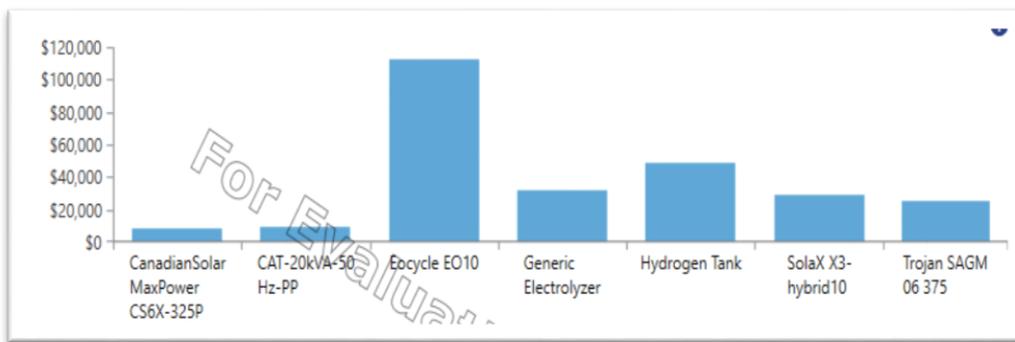
On voit que le logiciel HOMER classe les configurations optimisées selon les valeurs du NPC (Le cout actuel net) et IC (capital initial), par ordre croissant, nous remarquons que la première ligne dans le tableau des résultats est le résultat le plus optimale.

Icon	LS6X-325P (kW)	EO10	LAI-2U (kW)	SAGM UB 375 (#)	electrolyzer (kW)	H tank (kg)	SolaX IU (kW)	Dispatch	NPC (\$)	LLCt (\$/kWh)	Operating cost (\$/yr)
Icon	30.0	2	16.0	30	20.0	100	10.0	CC	\$264,265	\$0.339	\$2,576

**Figure IV.19 :** La meilleure configuration choisit par HOMER

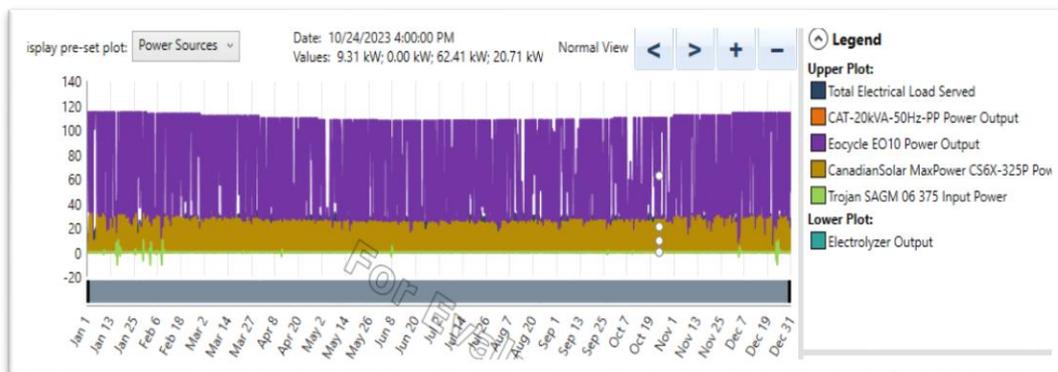
Dans notre analyse technico-économique on va choisir la combinaison la moins couteuse afin de faire une analyse approfondie sur les différents couts et sur les capacités énergétiques que le système généré.

Sur la figure ci-dessous les différents couts des composantes du système hybride.



**Figure IV.20:** Résultats optimisés du système choisit

La production moyenne mensuelle d’électricité du système est présentée dans la figure ci-dessous



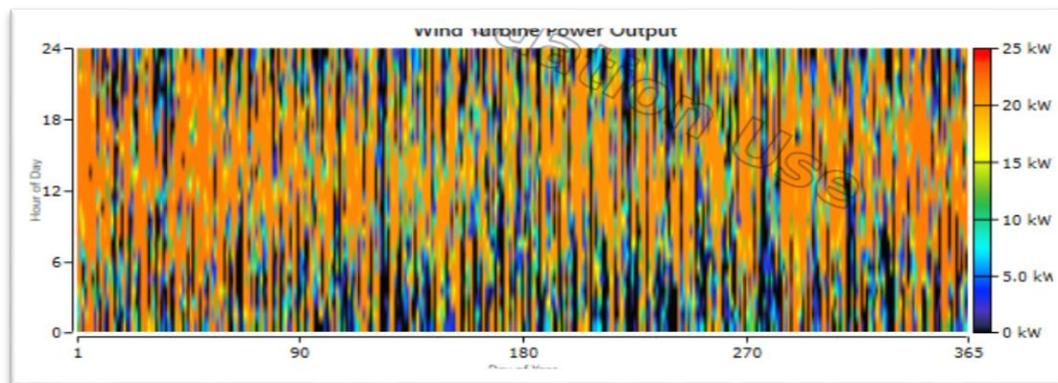
**Figure IV.21 :** Résultats mensuelle de la production électrique

#### IV.4.1 L'aérogénérateur :

Les paramètres liés au générateur éolien dans le tableau suivant :

**Tableau IV.8 :** Informations sur la production de l'aérogénérateur

Variables	valeurs	Unités
Minimum output	0	KW
Maximum output	22,9	KW
Wind pénétration	116	%
Hours of opération	7.499	hrs/yr
Levelized cost	0.0258	\$ / KWh



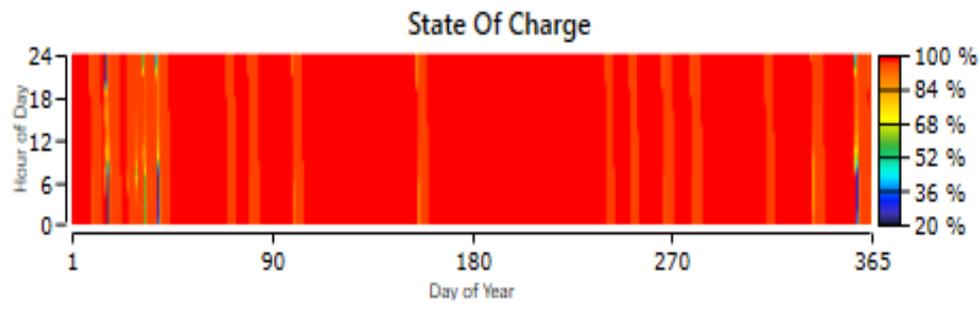
**Figure IV.22 :** Fonctionnement annuel de l'aérogénérateur

#### IV.4.2 Résultats des batteries :

Quantity	Value	Units
Autonomy	8.02	hr
Storage Wear Cost	0.478	\$/kWh
Nominal Capacity	73.7	kWh
Usable Nominal Capacity	55.2	kWh
Lifetime Throughput	64,083	kWh
Expected Life	197	yr

**Figure IV.23:** Résultats des batteries

La présence du système batteries dans notre installation est indispensable, vu que le site dont est installé est isolé donc l'utilisation est quotidienne notamment durant les heures de la nuit et dans des conditions météorologiques défavorables ou le rendement du système est réduit.



**Figure IV.24:** Profil annuel de chargement des batteries

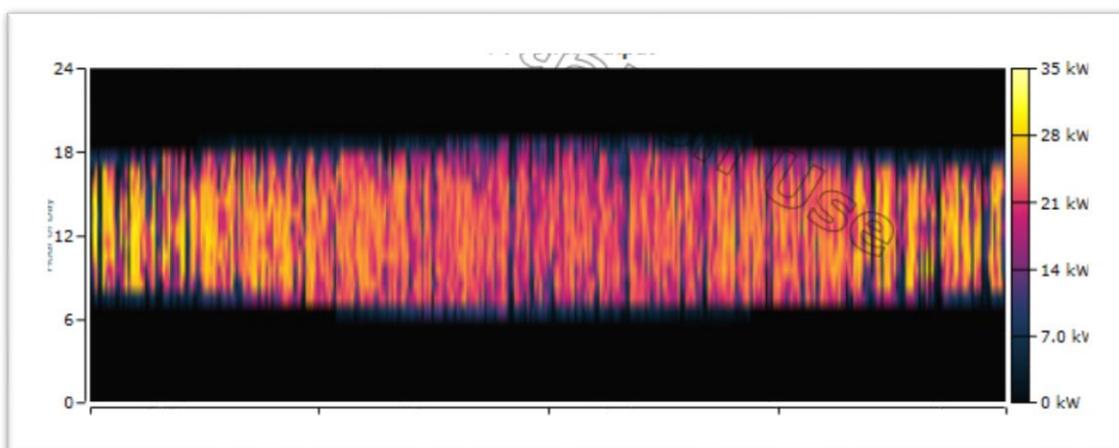
### IV.4.3 Les résultats du PV :

Les résultats donnés par le logiciel HOMER sur les panneaux photovoltaïques dans le tableau :

**Tableau IV.9 :** Résultats du système PV

Quantités	Valeurs	unités
Maximum output	0	KW
Minimum output	31.5	KW
Heurs de fonctionnement	4401	H
PV pénétration	131	%
Levelized cost	0.009	\$/KWh

La production électrique annuelle de générateur photovoltaïque est par le logiciel comme montré la figure ci-dessous :



**Figure IV.25:** La production électrique annuelle des PV

Ce type de graphes présentent les données horaires durant un an, chaque heure est définit par une couleur qui simule des informations bien déterminantes sur une telle valeur.

On remarque que les heures de travail du générateur changent en fonction de l'intensité d'irradiation solaire, en hiver le système PV mis en fonction entre 8h et 18h, beaucoup plus en été de 6h jusqu'à 20h. En contrepartie on remarque que le rendement du générateur PV augmente pendant les mois plus frais, ce qui montre l'abaissement d'activité des autres générateurs.

**IV.4.4 Les résultats du convertisseur :**

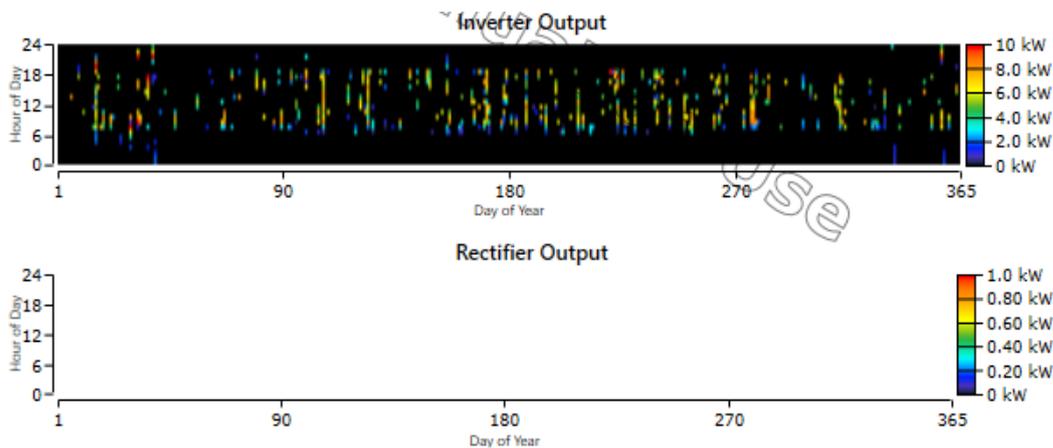
Quantity	Inverter	Rectifier	Unit
Capacity	10.0	0	kW
Mean Output	0.566	0	kW
Minimum Output	0	0	kW
Maximum Output	10.0	0	kW
Capacity Factor	5.66	0	%

Quantity	Inverter	Rectifier	Units
Hours of Operation	1,125	0	hrs/yr
Energy Out	4,960	0	kWh/y
Energy In	5,113	0	kWh/y
Losses	153	0	kWh/y

**Figure IV.26 :** Les résultats du convertisseur solar X X3 hybride 10

Notre système combiné de la production électrique nécessite une conversion de type DC/AC donc le logiciel nous donne les opérations menées par l'onduleur pour convertir le courant continu des batteries de stockage a un courant alternatif pour alimenter le site pendant les instants de la réduction de la production des générateurs .



**Figure IV.27 :** La simulation des résultats de l'onduleur et de redresseur

**IV.4.5 Les résultats de la PAC**

Quantity	Value	Units
Hours of Operation	4,174	hrs/yr
Number of Starts	524	starts/yr
Operational Life	9.58	yr
Capacity Factor	14.0	%
Fixed Generation Cost	0.149	\$/hr
Marginal Generation Cost	0	\$/kWh

Quantity	Value	Units
Electrical Production	19,628	kWh/yr
Mean Electrical Output	4.70	kW
Minimum Electrical Output	4.00	kW
Maximum Electrical Output	16.0	kW

**Figure IV.28:** Le résultat de la PAC



**Figure IV.29:** La simulation des résultats de la PAC

D’après les résultats annuels de la production énergétique de la PAC simulés par HOMER, on remarque qu’elle est mise en activité pendant les heures de la nuit ( 21h à 8h ) la période où la production des autres générateurs est faible , aussi nous voyons la production doublée durant les mois les plus chauds ce qui montre l’augmentation de la consommation électrique.

**IV.4.6 Résultats d’électrolyseur :**

Quantity	Value	Units
Rated capacity	20.0	kW
Mean input	7.30	kW
Minimum input	0	kW
Maximum input	20.0	kW
Total input energy	63,986	kWh/yr
Capacity Factor	36.5	%

Quantity	Value	Units
Mean output	0.157	kg/hr
Minimum Output	0	kg/hr
Maximum Output	0.431	kg/hr
Total production	1,379	kg/yr
Specific consumption	46.4	kWh/kg

**Figure IV.30 :** Les résultats d’électrolyseur

La production totale d'hydrogène est de 1379 kg/ans avec une moyenne de production de 0,157kg/h, l'hydrogène produit sera alimenté la PAC.

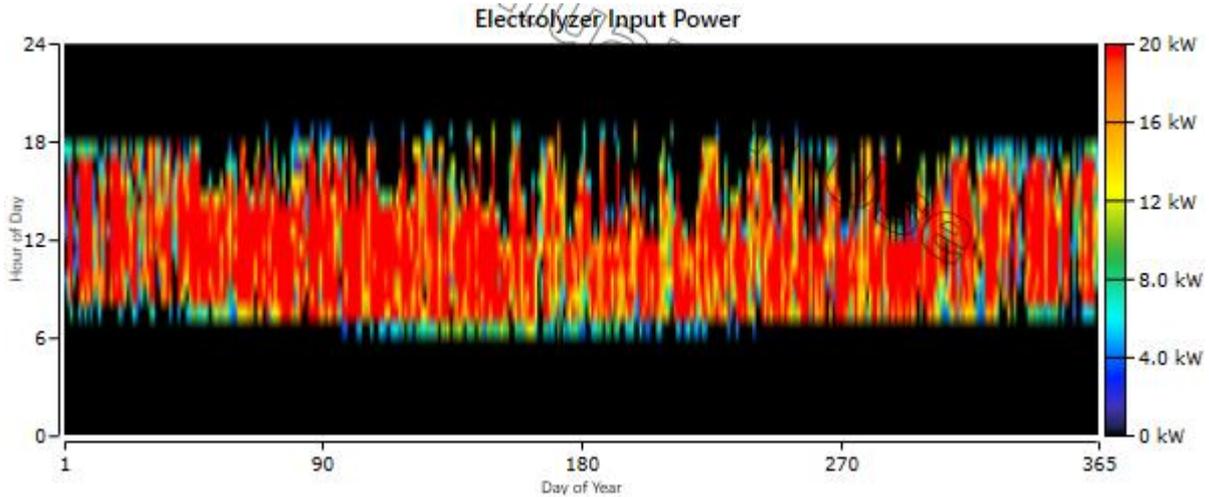


Figure IV.31: La simulation des résultats annuels de l'électrolyseur

On remarque que l'électrolyseur fonctionne pendant les heures de la journée durant l'année et on conclut que la production d'hydrogène s'effectue dans les périodes où la production électrique est élevée.

#### IV.4.7 Le réservoir d'hydrogène :

Pour un bon fonctionnement de la PAC, la production d'hydrogène doit être régulière durant l'année, la tâche est assurée par l'électrolyseur.

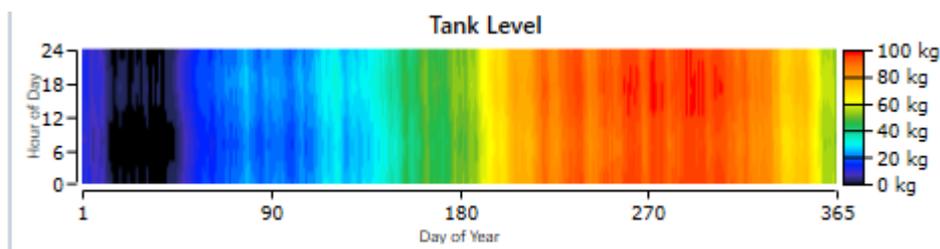


Figure IV.32: La moyenne journalière de la production d'hydrogène

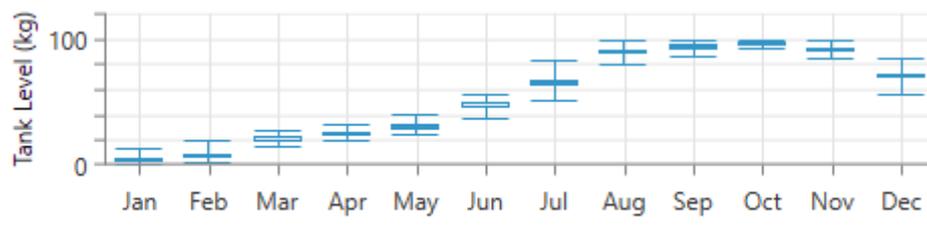


Figure IV.33 : Les données mensuelles sur l'hydrogène

**Tableau IV.10:** Statistiques sur le réservoir

Quantité	Valeurs	Unités
Capacité de stockage d'hydrogène	100	Kg
Capacité de stockage d'énergie	3330	KWh
Autonomie	484	h

L'hydrogène est une source d'énergie fiable et abordable pour les zones isolées. Comme si le cas sur notre site d'étude. Il est utilisé dans notre système d'alimentation qui combine l'énergie renouvelable et l'hydrogène, pendant les heures de la nuit, lorsque la production d'énergie renouvelable est insuffisante.

#### IV.5 Interprétation de résultats :

Le coût total d'une année est estimé comme suit :

Le coût initial : -230966,00\$

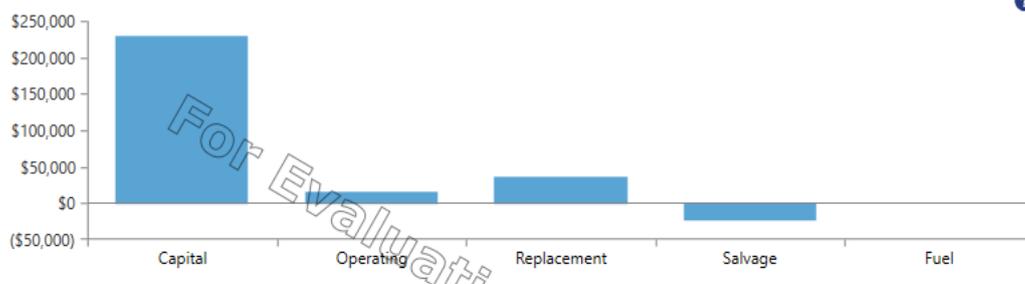
Le coût des opérations : -18381,89\$

Le coût de remplacement : -37766,77 \$

Le coût de salvage : 22849,99\$

Ce qui donne un coût total de 264265,00\$ le résultat le plus économique optimisé par le logiciel parmi les combinaisons simulées.

La figure ci-dessous représente les différents coûts de l'installation

**Figure IV.34:** Le coût total par type.

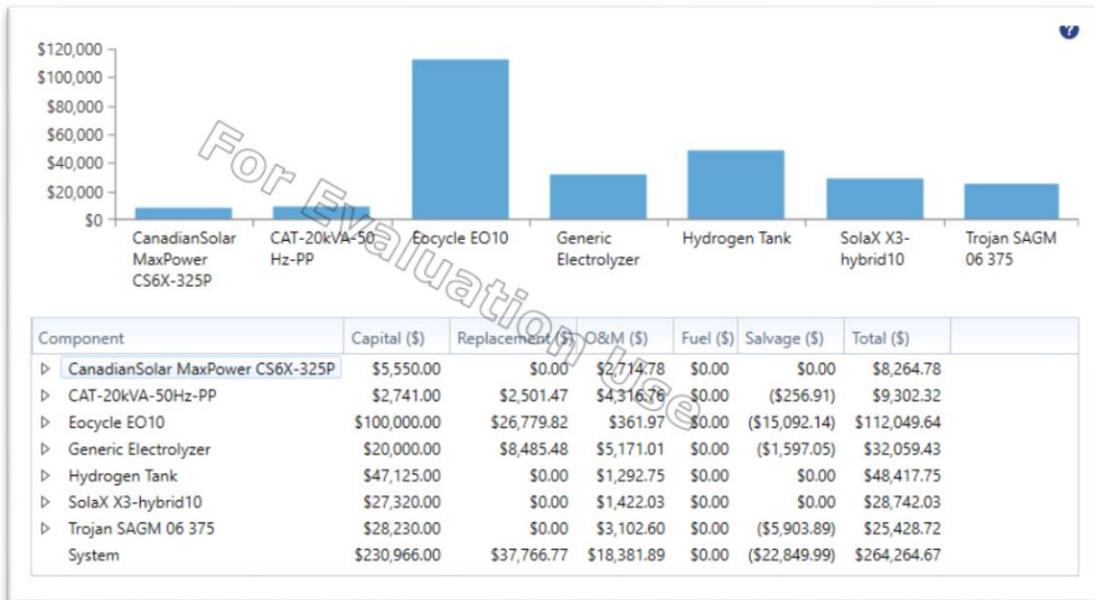


Figure IV.35 : Le coût de différentes composantes du système.

### IV.6 Conclusion :

Dans ce présent chapitre on a réalisés une étude sur un système hybride autonome de génération d'électricité pour un site isolé.

Premièrement nous avons expliqués HOMER Pro un logiciel de simulation et d'optimisation des systèmes d'installations électriques, lequel on s'est basés pour faire une étude économique pour une installation hybride à In Guezzam avant la réalisation.

A l'aide du logiciel on a réalisé une installation hybride qui combine (éolienne-PV-la pile a combustible-batteries).

Les résultats que nous avons obtenus pour la réalisation du projet sont comme suit :

Le coût initial : 230966,00\$ ↔ 31726182,66 DA

Le coût total du projet : 264265,00\$ ↔ 36231788,56DA

Le coût de la production électrique : 0,339\$/kWh ↔ 46.57 DA/ kWh

A partir de ces résultats, on conclue qu'une installation électrique hybride a partir des sources renouvelables pour un site isolé, a des avantages écologiques (la réduction considérable des gaz polluants), et des inconvénients notamment le coût élevé de l'installation.

L'installation énergétique pareille pour un site connecté au réseau national peut-être rentable à long terme.

**CONCLUSION**  
**GENERALE**

La lecture de ces chapitres offre une perspective complète sur les défis et les solutions liés à notre avenir énergétique durable. Les trois chapitres abordent des aspects différents de la transition énergétique, mais ils convergent tous sur l'idée que la diversification des sources d'énergie est essentielle pour répondre aux défis du changement climatique et de la dépendance aux énergies fossiles.

En premier lieu nous avons décrit les défis auxquels nous sommes confrontés, tels que la demande croissante en énergie, l'épuisement des énergies fossiles et les impacts environnementaux. Il souligne également l'importance de trouver des sources d'énergie nouvelles et durables.

En deuxième ordre on a expliqué comment l'hydrogène peut être une solution prometteuse pour répondre à ces défis. Nous avons décrit les caractéristiques de l'hydrogène, les méthodes de production, le stockage et les nombreuses applications. Il reconnaît également les défis techniques et économiques qui doivent être surmontés pour que l'hydrogène puisse jouer un rôle majeur dans la transition énergétique.

Le troisième chapitre se penche sur les énergies photovoltaïque et éolienne, deux sources d'énergie renouvelables qui ont connu un développement rapide ces dernières années. Il met en avant leurs avantages en termes de propreté, de durabilité et de compétitivité.

Dans l'ensemble, ces chapitres soulignent l'importance de la recherche et du développement pour surmonter les défis techniques et économiques liés aux énergies renouvelables et à l'hydrogène. Ils fournissent également une base solide pour la compréhension des solutions énergétiques durables et pour la recherche de nouvelles approches pour relever les défis énergétiques mondiaux.

Ensuite, nous avons utilisé le logiciel HOMER Pro, un logiciel d'optimisation et de dimensionnement des systèmes énergétiques hybrides, pour réaliser une étude technico-économique d'un système énergétique destiné à alimenter la communauté isolée de ain Guezzam en électricité. Le système combine trois générateurs (pile à combustible, photovoltaïque, éolien) ainsi que d'autres équipements tels qu'un électrolyseur pour la production d'hydrogène, un réservoir d'hydrogène, des convertisseurs et des batteries pour le stockage.

## Conclusion générale

---

Après avoir décrit le logiciel et les différentes opérations qu'il permet de réaliser, nous avons commencé l'étude par l'enregistrement des informations sur les ressources naturelles à Ain Guezzam (vitesse du vent, température et irradiation solaire). Nous avons ensuite configuré les différentes composantes du système en tenant compte de toutes les informations sur les coûts de chaque composante. La simulation du logiciel nous a proposé quatre solutions optimales.

Nous avons choisi la meilleure configuration, qui combine les composantes (pile à combustible, photovoltaïque, éolienne, convertisseur, électrolyseur, batterie, réservoir d'hydrogène) avec un cout total de **264265,00\$** soit **36231788,56DA** pour assurer une continuité énergétique, une qualité de service satisfaisante et un coût économiquement viable.

En conclusion, malgré les coûts élevés, une installation hybride renouvelable pour un site isolé présente plusieurs avantages, notamment sur les plans écologique, énergétique et de la continuité de la durée de vie des systèmes.

**REFERENCES**

**BIBLIOGRAPHIQUES**

## References Bibliographiques

---

- [1] : Raous R, 'étude d'un système hybride éolien-photovoltaïque' thèse doctorat, université de Tizi ouzou 2018.
- [2] : Houssam MEHIBEL, 'Dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque-diesel-batterie' mémoire master, EPN Alger 2017.
- [3] : Aidoun A, Bourahla A, 'Optimisation d'un système hybride photovoltaïque/éolienne pour l'électrification d'un site isolé' mémoire master, université Medea 2021.
- [4] : Chebboub CH, Chenni A 'étude et évaluation d'un système photovoltaïque électrolyseur-pile à combustible de génération d'électricité' mémoire master, université de Ouargla 2019.
- [5] : Benkherouf Y, Mouffok 'l'étude d'un système hybride «éolien-photovoltaïque-pile à combustible», mémoire master, université de Blida 2017.
- [6] : Boukamoum Y, 'étude de la stratégie de contrôle dans un système énergétique multi sources' mémoire master, université de Bouira 2022.
- [7] : Gabour A, 'optimisation et commande d'un système énergétique multi sources' mémoire master, université de Skikda 2019.
- [8] : Essamaali H, 'étude et installation d'un système de pompage d'eau dans un champ agricole' mémoire master professionnel, université de Gafsa 2021.
- [9] : Boukari A, Mabrouka O, 'l'impact des énergies renouvelables sur l'environnement' mémoire master, université d'Adrar 2017.
- [10] : Abdeldjouad med T, Saadi A, 'étude et modélisation d'un panneau photovoltaïque' mémoire licence, université de ANNABA 2020.
- [11] : Mebrouki A, Djaafri A, 'étude d'un système hybride cas des centrales KABERTENE' mémoire master, université d'Adrar 2016.
- [12] : Tarki A, 'support de cours gestion de l'énergie' cours 1 année licence, université de Biskra 2017.
- [13] : Bidi M, 'conception d'une centrale photovoltaïque pour recharge de voitures' mémoire master, université de M'sila 2019.
- [14] : Beghdadi F, 'modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables' mémoire magister, université de tizi ouzou 2011.

## References Bibliographiques

---

[15] : Idaa A,'hybridation d'une centrale diesel en energie photovoltaïque:faisabilité technique et rentabilité économique'memoire master,université d'adrar 2013.

[16] : Ammar H,'modelisation energetique et optimisation économique d'un systeme hybride dedié au pompage'memoire master,université de Biskra 2017

[17] : Kandia F,'conception et montage d'un systeme hybride solaire pv/diesel de congeneration (electricite et froid)'memoire master,institut International d'ingenierie de l'eau et de l'environnement Burkina faso 2011.

[18] : Khelifa A,'contribution a la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermiqu PVT'these doctorat,université de Batna 2017 .

[19] : <http://www.cat.com/electricpower>. Consulté en 2023