

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machines électriques

Présenté par :

CHEBBOUB Chaouki    CHENINI Abdelkarim

**Thème:**

**Etude et évaluation d'un système photovoltaïque  
électrolyseur –pile à combustible de génération  
d'électricité**

Soutenu publiquement

Le : 09/07/2019

Devant le jury :

M <sup>r</sup> LOUAZENE Med Lakhdar	MCA	Président	UKM Ouargla
M <sup>r</sup> DJAFOUR Ahmed	MCA	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M <sup>r</sup> GOUGUI Abdelmoumen	doctorant	Co-encadreur	UKM Ouargla
M <sup>r</sup> BENMIR Abdelkader	MCB	Examineur	UKM Ouargla

**Année universitaire 2018/2019**



*Dédicace*

*Je dédie ce travail, à mes parents, à mes frères, à tous mes amis, à tous mes collègues, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.*

*CHENINE Abdelkarim*



*Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à:*

*Ma très chère mère,*

*Mon cher père que Dieu bénisse son âme,*

*Mes très chers frères et sœurs,*

*Toute ma famille,*

*Et tous mes amis*

*CHEBBOUB Chaouki*



## *Remerciement*

*Avant tout nous tenons à remercier **ALLAH** qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage de finir le mémoire.*

*Nous tenons à remercier vivement **Dr. DJAFOUR Ahmed** notre Rapporteur qui a fourni des efforts énormes, par ses informations et ses conseils.*

*Nous voudrions remercier spécialement **Mr. GOUGUI***

***A.abdelmoumen**, chercheur à l'université d'Ouargla, Co-encadreur de cette mémoire, pour ses compétences scientifiques, ses conseils, sa disponibilité, et sa qualité humaine.*

*Nos remerciements les plus vifs s'adressent aux messieurs le président et les membres de jury d'avoir accepté, d'examiner et d'évaluer notre travail et tous les professeurs de département de Génie électrique.*

*Nos plus chaleureux remerciements à tous ceux qui de près et de loin ont contribué à la réalisation de cette mémoire*

# ***Sommaire***

Sommaire.....	I
Liste des Acronymes.....	V
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux.....	IX
Introduction général .....	1

## CHAPITRE I : Ressources énergétiques renouvelables

I.1. Introduction .....	3
I.2. Définition d'énergie renouvelable .....	3
I.3. Production d'électricité d'origine renouvelable.....	3
I.3.1. les différents types des énergies.....	3
I.3.1.1.L'énergie solaire (photovoltaïque).....	3
I.3.1.2.L'énergie hydroélectrique.....	4
I.3.1.3.L'énergie nucléaire.....	4
I.3.1.4.L'énergie éolienne.....	4
I.3.1.5.L'énergie thermique.....	4
I.3.2.Les avantages et les inconvénients de l'énergie renouvelable.....	4
I.4. Les méthodes du stockage d'énergie renouvelable .....	6
I.4.1. Stockage sous forme d'énergie mécanique.....	6
I.4.1.1. Station de Transfert d'Energie par Pompage-turbinage ou STEP (Stockage de la pompe hydroélectrique).....	6
I.4.1.2. Volant d'inertie.....	6
I.4.1.3. L'air comprimé.....	7
I.4.2. Stockage sous forme d'énergie chimique.....	8
I.4.2.1. Hydrocarbure.....	8
I.4.2.2. Biomasse.....	8
I.4.2.3. Piles à combustible à hydrogène.....	8
I.4.3. Stockage sous forme d'énergie thermique.....	9
I.4.3.1. Par chaleur sensible.....	9
I.4.3.2. Par chaleur latente.....	9
I.4.4. Stockage sous forme d'énergie électrochimique.....	10
I.5. Gisement solaire.....	10
I.5.1. Contexte général sur le gisement solaire .....	10
I.5.1.1.Spectrale de rayonnement solaire.....	11

I.5.2. Déclinaison du soleil.....	13
I.5.3. Influence de l'atmosphère.....	14
I.5.3.1. Masse d'air.....	14
I.5.3.2. Rayonnement solaire au niveau de sol.....	15
I.5.3.3. Trajectoire du soleil.....	15
I.5.4 La distribution de l'énergie solaire en Algérie.....	16
I.5.4.1 Rayonnement solaire en Algérie.....	16
I.6. Conclusion .....	17
<b>CHAPITRE II: Système photovoltaïque- pile à combustible</b>	
II.1. Introduction.....	18
II.2. Systèmes hybrides.....	18
II.2.1. Définition des systèmes hybrides de production d'électricité.....	18
II.2.2 Typologies de configurations des systèmes hybrides .....	18
II.2.2.1. Les configurations selon le type de bus (AC, CC ou AC/CC).....	18
II.2.3. Les configurations parallèle, série ou commuté.....	19
II.2.4. Différents types du système hybride.....	20
II.2.4.1. système hybride photovoltaïque-éolien.....	20
II.2.4.3. Le système hybride éolien-générateur du diesel.....	20
II.2.4.4. Système hybride photovoltaïque – éolien-pile à combustible (PV-E-PAC)....	21
II.2.4.5. Système hybride photovoltaïque/stockage.....	21
II.2.4.6. Système hybride photovoltaïque/source conventionnelle (groupe électrogène).....	22
II.3. Principaux composants.....	22
II.3.1. Systèmes PV.....	22
II.3.1.1. Générateur photovoltaïque.....	22
II.3.1.2. Principe de fonctionnement.....	22
II.3.1.3. Technologie de la cellule photovoltaïque.....	23
II.3.1.4. Module de Générateur photovoltaïque.....	24
II.3.2. Electrolyse de l'eau.....	27
II.3.2.1. Les différentes technologies d'électrolyseurs.....	27
II.3.2.2. Electrolyseurs alcalins.....	27
II.3.2.3. Electrolyseurs PEM.....	28
II.3.2.4. Electrolyseurs à haute température.....	29

II.3.4. Piles à combustibles.....	30
II.3.4.1. Historique.....	30
II.3.4.2. Description générale d'une pile à combustible (PAC).....	30
II.3.4.3. Pile à membrane polymère échangeuse de proton PEMFC .....	31
II.3.4.4. Principe fonctionnement d'une pile à combustible à membrane d'échange de protons PEMFC.....	31
II.3.4.5. Types de pile combustible.....	32
II.3.4.6. Différents types de pile combustible.....	32
II.3.4.7. Avantages et inconvénients des piles à combustible.....	34
II.3.4.8. Caractéristique électrique d'une pile à combustible.....	35
II.3.5. Les auxiliaires du système hybride.....	35
II.3.5.1. Les convertisseurs.....	35
II.3.5.2. Convertisseur DC/AC (Onduleur).....	36
II.3.5.3. Convertisseur DC/DC.....	36
II.3.5.4. Convertisseur abaisseur "Buck" .....	36
II.3.5.5. Convertisseur élévateur " Boost".....	37
II.3.5.6. Convertisseur bi-directionnel en courant.....	37
II.4. Conclusion.....	37
<b>CHAPITRE III : Etude technico-économique du système PV-PAC</b>	
III.1. Introduction.....	38
III.2. Présentation du système d'étude.....	38
III.4. Exploitation du logiciel HOMER.....	39
III.4.1. Présentation du logiciel HOMER.....	39
III.4.2. Les fonctions principales du logiciel HOMER.....	39
III.4.3. Présentation de l'interface de HOMER.....	40
III.4.4. Détails de la charge dans HOMER.....	44
III.4.5. Détails des composants du système.....	44
III.4.5.1. Détails du convertisseur.....	44
III.4.6. Procédure d'évaluation de coût global du système dans l'HOMER.....	45
III.4.6.1. Coût initial (Ci).....	45
III.4.6.2. Coût de remplacement (Cr).....	45
III.4.6.3. Coût d'opération et de maintenance (Co).....	45
III.4.6.4. Coût de salvage (Cs).....	45



---

III.4.6.5. Coût total net actuel du système (NPC).....	45
III.4.6.6. Déclaration des contraintes du système dans HOMER.....	45
III.4.6.7. Sélection le temps de fonctionnement du composant du système .....	46
III.4.6.8. Déclaration les données nécessaire des composants.....	47
III.4.7.Etude techno économique Système PV-Electrolyseur- PAC.....	48
III.4.7.1. Description le site d'étude.....	48
III.4.7.2.Analyse de la Charge .....	48
III.4.7.3. Potentiel solaire de la ville d'Ouargla .....	51
III.4.7.4. Les données relatives à la température ambiante.....	52
III.5. L'optimisation du système PV-PAC –Electrolyseur dans HOMER.....	52
III.5.1. Le générateur photovoltaïque.....	52
III.5.2. La pile à combustible.....	52
III.5.3. L'électrolyseur.....	53
III.5.4. La batterie.....	53
III.5.5. Le réservoir d'hydrogène.....	53
III.5.6.Le convertisseur.....	54
III.5.7. Données économique.....	54
III.6. Interprétation des résultats de simulation .....	54
III.6.1. Les résultats de l'énergie produite.....	55
III.6.2. Panneaux solaires (PV).....	57
III.6.3. Pile à combustible.....	57
III.6.4. Electrolyseur.....	58
III.6.5. Production mensuelle moyenne d'hydrogène.....	58
III.7.Conclusion.....	58
Conclusion générale .....	60
Références Bibliographiques.....	62
Annexe.....	65

## Listes des Acronymes et Symboles

**EnRI** Energie Renouvelable Intermittente  
**SSE** Systèmes du Stockage d'Énergie  
**STEP** Station de Transfert d'Énergie par Pompage-turbinage  
**CAES** Compressed Air Energy Storage  
**MA** Masse d'air  
**MCP** Matériaux à Changement de Phase  
**HOMER** Hybrid Optimisation of Energy Ressources  
**LAGE** LABORATOIRE DE GENIE ELECTRIQUE  
**NPC** Net Present Cost  
**Cr** Coût de remplacement  
**Ci** Coût initial  
**Co** Coût d'opération et de maintenance  
**Cs** Coût de salvage  
**CC** Courant continu  
**CA** Courant alternatif  
**SER** Système Energie Renouvelable  
**PV** Photovoltaïque  
**KOH** Hydroxyde de potassium  
**K +** Potassium  
**OH -** Ion hydroxyde  
**Pt** Points triples  
**PAC** Pile à combustible  
**PEM** Proton Exchange Membrane  
**AFC** Alkaline Fuel Cell  
**MCFC** Molten Carbonate Fuel Cell  
**SOFC** Solid Oxide Fuel Cell  
**PAFC** Phosphoric Acid Fuel Cell  
**DMFC** Direct Methanol Fuel Cell  
**PEMFC** Proton Exchange Membrane Fuel Cell  
**AM** Masse d'air  
**SOEC** Solid Oxide Electrolyser Cell  
**I<sub>ph</sub>** : Photo-courant.

## Listes des Acronymes et Symboles

---

**$I_D$**  : Courant de la diode.

**$T$**  : Température absolue en °K.

**$T_c$**  : Température de circuit.

**$I_0$**  : Courant de saturation de diode.

**$R_S$**  : Résistance série ( $\Omega$ ).

**$R_P$**  : Résistances parallèle ( $\Omega$ ).

**$e$**  : Charge de l'électron ( $1.6021 \cdot 10^{-19}$  C)

**$K$**  : Constant de Boltzmann ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  J / K).

**$A$**  : Facteur d'idéalité de la jonction ( $1 < A < 2$ ).

**$V_{C0}$**  : Tension de circuit ouvert.

**$I$**  : Le courant généré

**$P_{in}$** : est la puissance incidente (W)

**$G_a$** : est l'éclairement ( $W/m^2$ )

**$A_0$** : est la surface de la cellule ( $m^2$ )

Liste des figures

Chapitre I

Fig. (I.1) Schéma de principe d'un Volant d'inertie..... 7

Fig. (I.2) Schéma de principe d'un stockage à air comprimé en caverne..... 7

Fig. (I.3) Schéma de principe d'une batterie Lithium-Ion..... 10

Fig. (I.4) Spectre du rayonnement solaire..... 12

Fig. (I.5) Composante du rayonnement global sur un plan horizontal..... 13

Fig. (I.6) Plan de l'écliptique L'orbite terrestre et les saisons..... 14

Fig. (I.7) Définition de masse d'air..... 14

Fig. (I.8) Bilan du rayonnement solaire au niveau de sol..... 15

Fig. (I.9) Définitions de la position du soleil..... 16

Fig. (I.10) Carte du rayonnement solaire en Algérie..... 17

Chapitre II

Fig. (II.1) Schéma synoptique du système hybride..... 20

Fig. (II.2) Schéma de principe d'un système hybride éolien-diesel ..... 21

Fig. (II.3) Schéma d'un système PV-E-PC..... 21

Fig. (II.4) Effet photovoltaïque à l'échelle de la cellule..... 23

Fig. (II.5) Circuit équivalent Générateur photovoltaïque à une diode..... 24

Fig. (II.6) Courbes caractéristiques d'une cellule photovoltaïque..... 26

Fig. (II.7) L'électrolyse de l'eau..... 27

Fig. (II.8) Principe de l'électrolyse alcaline..... 28

Fig. (II.19) Principe schématique de l'électrolyse PEM..... 29

Fig. (II.10) Principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte..... 29

Fig. (II.11) Représentation d'une cellule électrochimique d'une pile à combustible..... 30

Fig. (II.12) Schéma de principe d'une pile à combustible échangeuse de protons (PEM)..... 32

Fig. (II.13) Caractéristique électrique d'une cellule de pile à combustible..... 35

Fig. (II.14) Convertisseur continue- continue..... 36

Fig. (II.15) Convertisseur Buck..... 36

Fig. (II.16) Convertisseur Boost..... 37

Fig. (II.17) Convertisseur DC/DC bidirectionnel..... 37

Chapitre III

Fig. (III.1) Le schéma global du système étudié..... 38

Fig. (III.2) Les Opérations principale de HOMER..... 40

Fig. (III.3) Logo du logiciel HOMER version beta 2.81.....	40
Fig. (III.4) Interface du logiciel HOMER 2.81.....	41
Fig. (III.5) La fenêtre des Équipements disponible dans HOMER 2.81.....	42
Fig. (III.6) Équipements sélectionnés à partir la zone 1.....	40
Fig. (III.7) Les ressources dans HOMER 2.81.....	43
Fig. (III.8) Méthode de Sélection le type de charge dans HOMER 2.81.....	44
Fig. (III.9) Détaille des données de convertisseur choisie.....	44
Fig. (III.10) Fenêtre de déclaration des contraintes du système.....	46
Fig. (III.11) Le choix de temps de fonctionnement de composant.....	47
Fig. (III.12) Lancement de simulation dans HOMER.....	47
Fig. (III.13) Schéma générale du système PV-PAC-Electrolyseur sur HOMER.....	48
Fig. (III.14) Emplacement géographique de site.....	48
Fig. (III.15) Logo du laboratoire gène électrique.....	49
Fig. (III.16) Le profil de charge journalière suivant les saisons.....	50
Fig. (III.17) Irradiation solaire annuelle.....	49
Fig. (III.18) DMAP d'irradiation solaire globale horizontale.....	49
Fig. (III.19) Profil de la température ambiante moyenne mensuelle.....	50
Fig. (III.20) Le tempe qui fonctionnée la pile.....	53
Fig. (III.21) Résultats de l'optimisation du système (LAGE).....	54
Fig. (III.22) Conception du système hybride.....	55
Fig. (III.23) Résumé des flux de trésorerie pour le système hybride.....	55
Fig. (III.24) Résultats de production électrique.....	56
Fig. (III.25) Le Graphique résume la production et consommation d 'électrique.....	56
Fig. (III.26) Énergie mensuelle totale produite par le système hybride pendant un année.....	57
Fig. (III.27) La quantité d'énergie totale quotidienne produite par le PV pendant une année...	57
Fig. (III.28) La quantité d'énergie totale quotidienne produite par le PAC pendant une année.....	57
Fig. (III.29) Le tempe qui fonxione par l'électrolyseur d 'eau.....	58
Fig. (III.30) Résultat de production hydrogène dan années.....	58

## Liste des tableaux

### CHAPITRE I

Tab. (I.1) Les avantages et les inconvénients de l'énergie renouvelable.....	5
Tab. (I.2) Potentiel solaire en Algérie.....	16

### CHAPITRE II

Tab. (II.1) Différents types de pile à combustible.....	33
---	----

### CHAPITRE III

Tab. (III.1) Détail des ressources dans HOMER 2.81.....	43
Tab. (III.2) La consommation des appareils considérés dans une LAGE.....	50
Tab. (III.3) Estimation de la consommation de puissance en janvier KW.....	51

# **Introduction générale**

## Introduction général

Depuis le début du siècle, la consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde. Il semble que tendanciellement, les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part, quels que soient les cas de figures envisagés.

Pour cela les énergies renouvelables apparaissent à nos jours et à long terme comme la solution adéquate qui couvre ce besoin énergétique en diminuant l'inconvénient majeur émis par les énergies fossiles.

Elles sont devenues une forme d'énergie indispensable par leur souplesse, la simplicité d'utilisation et la multiplicité des domaines d'activités où elles sont appelées à jouer un rôle. Ces modes de production ainsi que les moyens de distribution associés sont amenés à subir de profonds changements au cours des prochaines décennies.

Ces énergies sont exploitées en mono source ou en hybride et en mode autonome ou connectés au réseau. Vu la dépendance de leur production des conditions météorologiques, ces sources sont intermittentes. Ainsi, l'association de plusieurs sources (mode hybride) s'avère utile pour couvrir les saisons de l'année. Afin d'assurer l'équilibre production-consommation, des systèmes de stockage d'énergie sont nécessaires [1].

De plus, des sources d'énergie complémentaires telles que les groupes électrogènes sont sollicités en cas de manque d'énergies renouvelables. Il existe plusieurs types des systèmes hybrides de production électrique autonomes comme le Photovoltaïque-Pile à combustible (PV-FC), Éolienne-Pile à combustible (W-FC) ou le Photovoltaïque-Éolienne-Pile à combustible (PV-W-FC).

Dans ce mémoire, nous présentons une étude technico-économique à l'aide du logiciel HOMER d'un système hybride conçu pour alimenter le laboratoire de génie électrique à l'université de Ouargla), le système étudié est composé essentiellement du générateur photovoltaïque une pile à combustible et l'électrolyseur de l'eau pour produire l'hydrogène avec la présence des batteries et des convertisseurs.

Ce mémoire est structuré comme suit :

Le premier chapitre sera consacré à la production d'électricité renouvelable par le biais de diverses sources d'énergie renouvelables, avec la présentation des méthodes de stockage de cette énergie, nous terminons ce chapitre par des aides sur le gisement solaire sur terre et en Algérie.



## INTRODUCTION GENERAL

---

Le deuxième chapitre porte sur la présentation des configurations des systèmes hybrides de production d'énergie électrique, à la fin de ce chapitre nous mentionnons les principes de fonctionnements des outils constitutifs de ces systèmes.

Dans le troisième chapitre nous présentons une description générale du logiciel HOMER et les diverses opérations qui peut être effectuées, en suite nous entamons l'étude technico-économique de l'installation PV-PAC qui peut satisfaire l'alimentations de notre laboratoire de génie électrique.

Enfin nous terminons notre travail par une conclusion générale.

# **CHAPITRE I**

## **Ressources énergétiques renouvelables**

## **I.1. Introduction**

L'énergie est l'une des composantes les plus importantes de l'univers et des formes d'existence. Il est divisé en énergies renouvelables basées sur des ressources naturelles et d'autres sources non renouvelables. L'énergie renouvelable est une énergie imperméable, permanente et immortelle, disponible dans la nature et constamment renouvelable, car elle provient de la nature et de ses composants tels que le vent, l'eau, le soleil, diffère des autres sources et pour ce la il est préférable de l'utilisation car, à l'avenir tout est basé sur l'utilisation des ces ressources dans tous les domaines de la vie.

Dans ce chapitre, nous discuterons sur les moyens de production de l'énergie renouvelable et les différentes méthodes du stockage.

## **I.2. Définition d'énergie renouvelable**

L'énergie renouvelable est une énergie qui n'est pas mise en œuvre et inépuisable qui provient de ressources naturelles telles que l'énergie solaire, le vent et l'eau, et qui est fondamentalement différente de l'énergie non renouvelable en plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes.

## **I.3. Production d'électricité d'origine renouvelable**

La production d'électricité est le processus de conversion de l'énergie de forme à un autre. Selon les sources d'énergie disponibles dans les centres de demande d'énergie électrique et en fonction des quantités requises pour cette énergie, ce qui nécessite l'identification de types de centrales ainsi les types de consommation, les combustibles et leurs sources.

### **I.3.1. Les différents types des énergies**

- L'énergie solaire (photovoltaïque)
- L'énergie hydroélectrique
- L'énergie nucléaire
- L'énergie éolienne
- L'énergie thermique

#### **I.3.1.1. L'énergie solaire (photovoltaïque)**

L'énergie solaire produite à partir des rayons solaires, incident sur des cellules photovoltaïques (PV) pour produire de l'électricité soit du rayonnement direct pour chauffer un fluide caloporteur permettant de produire de l'électricité dans le cas des centrales solaires thermodynamiques [2].

**I.3.1.2. L'énergie hydroélectrique**

L'hydroélectricité est l'énergie dérivée de l'énergie hydraulique en mouvement, qui est largement utilisée pour produire de l'électricité, et aussi produite à partir des barrages situés sur des rivières, fleuves ou lacs artificiels et équipés de turbines entraînant un générateur.

**I.3.1.3. L'énergie nucléaire**

L'énergie nucléaire est obtenue à partir de réactions de fission de l'uranium et le plutonium est la source de chaleur utilisée. Il produit environ 15% de l'électricité mondiale.

**I.3.1.4. L'énergie éolienne**

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif [3].

**I.3.1.5. L'énergie thermique**

Les énergies thermiques produisent l'électricité à partir de la chaleur qui se dégage de la combustion du charbon, du mazout ou du gaz naturel. On la trouve souvent près d'une rivière ou d'un lac, car d'énormes quantités d'eau sont requises pour refroidir et condenser la vapeur sortant des turbines.

La combustion dégage une grande quantité de chaleur utilisée pour chauffer de l'eau dans la chaudière (ou générateur de vapeur). On dispose alors de vapeur d'eau sous pression. Cette vapeur sous pression fait tourner à grande vitesse une turbine qui entraîne elle-même un alternateur qui produit une tension alternative sinusoïdale, dans la sortie de la turbine la vapeur est refroidie pour se transformer en eau, puis renvoyée dans la chaudière.

**I.3.2. Les avantages et les inconvénients de l'énergie renouvelable**

En classe les avantages et les inconvénients de l'énergie renouvelable dans le tableau suivants:

Tab. (I.1) Les avantages et les inconvénients de l'énergie renouvelable

L'énergie renouvelable	Les avantages	Les inconvénients
L'énergie solaire	Acceptation du public. Frais de maintenance relativement faibles. Adapté aux pays chauds et aux sites isolés.	Coût encore élevé. Puissance assez faible. Disponibilité.
L'énergie hydroélectriques	Faible coût du KWh pour le gros hydraulique. Souplesse d'utilisation. Possibilité de « stocker » de l'électricité pour le turbinage.	Aléas climatiques. Impacts sur l'environnement à la construction. Contrainte géographique.
L'énergie nucléaire	Disponibilité élevée. Stabilité des coûts. Réserves d'uranium importantes.	Lourds investissements. Risque industriel. Acceptation du public.
L'énergie éolienne	L'énergie éolienne est propre et peut être associée à des panneaux de photopiles et à une batterie d'accumulateur afin d'optimiser la fourniture d'électricité.	Surface au sol Acceptation du public. Faible disponibilité (20 à 30%). Difficultés de raccordement au réseau.
L'énergie thermique	Facilité d'exploitation. Facilité de transport (pétrole). Compétitivité.	Il faut un plan d'eau à proximité. Prix fluctuants. Géostratégie des ressources.

## I.4. Les méthodes du Stockage d'énergie renouvelable

Pour stocker l'énergie c'est garder une quantité d'énergie pour une utilisation future. Par extension, le stockage d'énergie désigne aussi le stockage de la matière contenant l'énergie. Il existe deux sortes d'applications : le stockage stationnaire (ou fixe) et le stockage embarqué (ou mobile).

Nous nous intéressons plus particulièrement dans cette partie au stockage stationnaire qui concerne les productions d'électricité, notamment issues **d'EnRI (Energie Renouvelable Intermittente)**, connectées au réseau ou en site isolé. Le stockage n'est pas une installation de production d'énergie comme les autres puisque le fonctionnement d'un système de stockage connecté au réseau ne peut pas être envisagé seul. En effet, un stockage seul est un « outil de production » qui consomme de l'énergie : Les pertes techniques induites par le stockage entraînent un bilan énergétique du système négatif. Un ouvrage de stockage absorbe donc plus d'énergie qu'il n'en restitue, le ratio entre énergie restituée et énergie absorbée définissant alors le rendement global du SSE (Systèmes du Stockage d'Energie).

Les Systèmes du Stockage d'Energie (SSE) permettent de convertir l'électricité, difficilement stockable directement, en énergie potentielle, cinétique ou chimique. Il existe cinq catégories physico-chimiques du stockage stationnaire selon que l'énergie stockée soit sous forme mécanique, chimique, thermique, électrochimique ou électromagnétique [2].

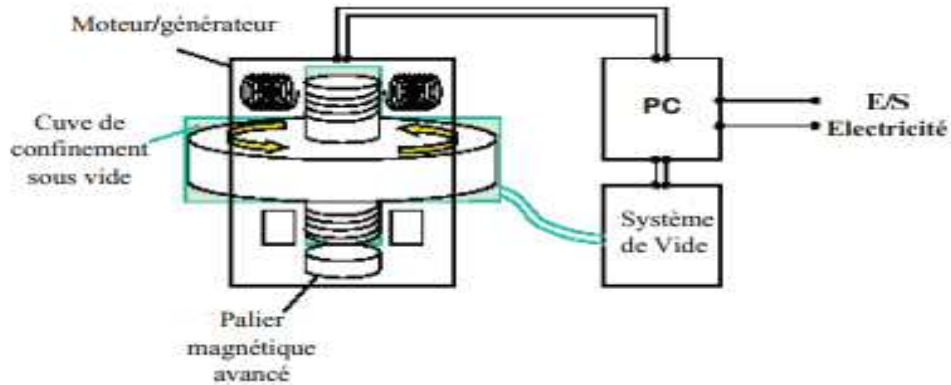
### I.4.1. Stockage sous forme d'énergie mécanique

#### I.4.1.1. Station de Transfert d'Energie par Pompage-turbinage ou STEP (Stockage de la pompe hydroélectrique)

La STEP permet de stocker de grande quantité d'énergie électrique par l'intermédiaire de l'énergie potentielle de l'eau, ce type dans les centrales hydroélectriques est utilisé pour transférer l'eau entre deux bassins situés à des altitudes différentes. Lorsque le réseau fournit un surplus d'électricité, l'eau du bassin inférieur est pompée dans le bassin supérieur. Sous l'effet de la pesanteur, cette masse d'eau représente une future capacité de production électrique. Lors d'un déficit de production électrique, la circulation de l'eau est inversée : la pompe devient turbine et restitue l'énergie accumulée. Avec un rendement pouvant atteindre plus de 80%, il s'agit de la solution la plus employée pour stocker l'énergie des centrales électriques [2].

#### I.4.1.2. Volant d'inertie (flywheels)

L'énergie peut être stockée sous forme d'énergie cinétique d'un dispositif en forme de roue tournant autour de son axe central, comme indiqué dans la **Fig. (I.1)**.

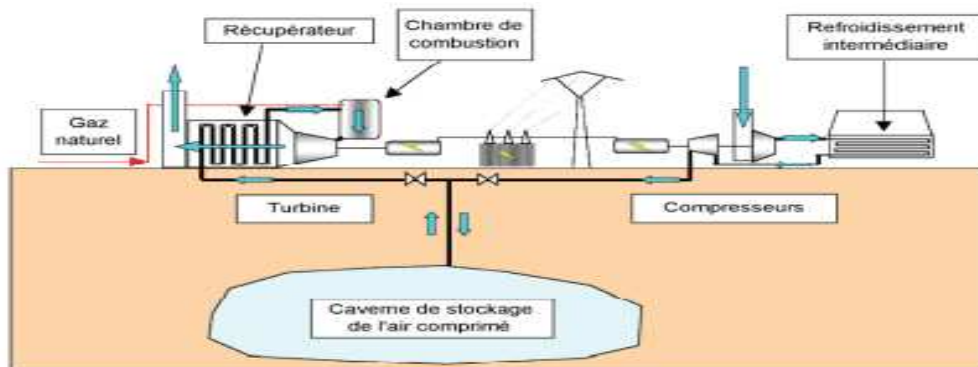


**Fig. (I.1)** Schéma de principe d'un Volant d'inertie.

Une machine électrique lui fournit l'énergie cinétique (fonctionnement moteur) et la récupère selon les besoins (fonctionnement générateur), entraînant une baisse de la vitesse de rotation du volant d'inertie. L'ensemble fonctionne sous vide afin d'éliminer les pertes d'énergie par frottement. Ce système permet de restituer plus de 80% de l'énergie accumulée mais pour un temps du stockage limité. En pratique, le volant d'inertie est utilisé pour un lissage à très court terme de la fourniture d'énergie au sein d'appareils de production. C'est notamment le cas des moteurs thermiques et surtout des moteurs Diesel [4].

#### I.4.1.3. L'air comprimé (Compressed Air Energy Storage ou CAES)

Quand la demande d'électricité est faible, les systèmes existants utilisent d'anciennes mines de sel comme réservoirs et un ensemble moteur-générateur-turbine. Quand la demande d'électricité est importante, l'air comprimé en caverne est utilisé pour faire tourner une turbine couplée à un alternateur produisant de l'électricité **Fig. (I.2)** [4].



**Fig. (I.2)** Schéma de principe d'un stockage à air comprimé en caverne.

Le rendement, actuellement aux environs de 50%, est un axe de recherche et de développement. Le stockage à air comprimé en caverne à partir des énergies éolienne et solaire fait l'objet

d'installations pilotes en Allemagne et aux Etats-Unis.

#### **I.4.2. Stockage sous forme d'énergie chimique**

##### **I.4.2.1. Hydrocarbure**

Les hydrocarbures liquides sont actuellement la forme dominante du stockage d'énergie en volume, notamment pour le secteur du transport. Les carburants proviennent des énergies fossiles et ont un rendement de 75% de la "source à la pompe", le rendement source - électricité étant souvent inférieur à 50%. Les biocarburants sont eux issus de la biomasse, avec un rendement de 70% "de la biomasse à la pompe".

##### **I.4.2.2. Biomasse**

Tout combustible peut être considéré comme un stock d'énergie sous forme chimique. En brûlant, le composé dégage de l'énergie sous forme de chaleur qui peut être récupérée et valorisée.

Le terme « biomasse » désigne l'ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie. Dans le cas des végétaux, elle est une forme du stockage de l'énergie solaire : les matières organiques sont issues du CO<sub>2</sub> capté lors de la photosynthèse. Toutefois, ce processus de stockage d'énergie est long, de l'ordre de plusieurs mois, et d'un rendement faible. En effet, seul 1% des rayonnements solaires utilisés lors de la photosynthèse est restitué sous la forme de biomasse.

##### **I.4.2.3. Piles à combustible à hydrogène**

Le dihydrogène (H<sub>2</sub>), communément appelé hydrogène qui n'existe pas à l'état naturel mais est très abondant sur Terre sous forme atomique H (eau, hydrocarbures...). L'électrolyse, qui consiste à décomposer la molécule d'eau en hydrogène et en dioxygène, nécessite de l'électricité (rentable si la production d'électricité présente elle-même un coût peu élevé). L'hydrogène a la faculté de restituer de l'énergie, ce qui en fait une forme particulièrement intéressante du stockage.

Il peut être stocké hydrogène sous forme liquide, gazeuse ou encore solides

- **Le stockage sous forme gazeux**

Le conditionnement de l'hydrogène sous forme gazeuse est une option prometteuse. Les contraintes sont toutefois nombreuses. Léger et volumineux, l'hydrogène doit être comprimé au maximum pour réduire l'encombrement des réservoirs. Des progrès ont été faits : de 200 bars, pression des bouteilles distribuées dans l'industrie, la pression est passée à 350 bars aujourd'hui et les développements concernent maintenant des réservoirs pouvant résister à des pressions de 700 bars. De plus, l'hydrogène est l'élément le plus petit de l'univers, il faut donc trouver des matériaux pouvant contenir l'hydrogène sans risque de fuite [5].



- **Le stockage sous forme liquide**

Pour cette technique, beaucoup d'énergie est utilisés pour le refroidissement aux températures qu'exige l'opération :  $-253^{\circ}\text{C}$ . Stocker l'hydrogène sous cette forme est possible mais nécessite un développement plus poussé. En effet, cette méthode est déjà utilisée dans le domaine spatial. Mais l'hydrogène est le gaz le plus difficile à liquéfier juste après l'hélium. Il est donc possible d'utiliser de l'hydrogène sous forme liquide pour le stocker mais cela revient très cher, ce qui rend son application impossible aux particuliers pour le moment [5].

- **Le stockage sous forme d'hydrures métalliques**

Dans cette méthode, l'hydrogène est « capturer » dans les interstices d'une poudre d'alliage métallique comprimée, un peu comme une éponge absorbe de l'eau. Cette technique est très avantageuse notamment une construction simple et un niveau élevé de sécurité [5].

- **Le stockage sous basse pression**

Cette technique serait une alternative au stockage sous pression gazeuse. Elle consisterait à stocker l'hydrogène dans des matériaux capables d'absorber l'hydrogène et de restituer lorsque cela est nécessaire. Il pourrait s'agir de matériaux carbonés ou encore certains alliages métalliques [5].

### **I.4.3. Stockage sous forme d'énergie thermique**

Actuellement, le stockage thermique est peu exploité. Son usage devrait croître à l'occasion du développement des fermes solaires thermodynamiques.

#### **I.4.3.1. Par chaleur sensible**

L'élévation de la température d'un matériau permet de stocker de l'énergie. Ce principe est, entre autres, celui des chauffe-eau solaires : ils récupèrent la chaleur dans la journée pour la restituer ensuite, avec un rendement moyen de l'ordre de 40% pour les systèmes les plus récents. Les matériaux privilégiés sont l'eau, l'huile de synthèse, la roche ou encore le béton. Pour de grands volumes, la chaleur de capteurs solaires ou des rejets industriels peut être stockée dans le sous-sol.

Le stockage géologique, pouvant être couple à des opérations de géothermie, est encore assez peu répandu.

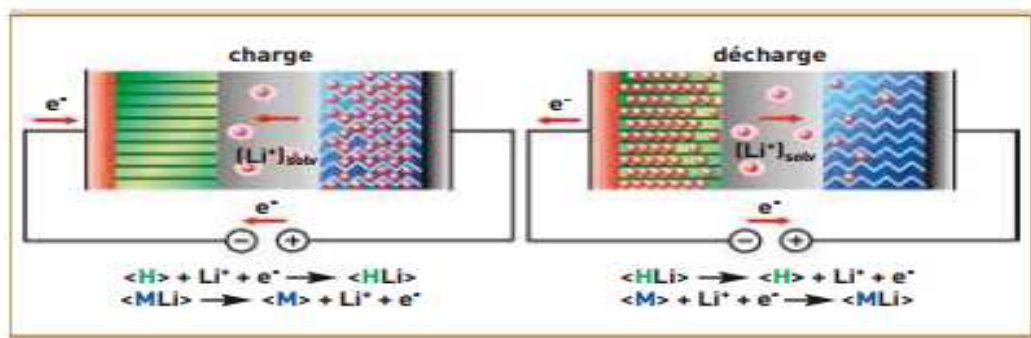
#### **I.4.3.2. Par chaleur latente**

Ce mode du stockage est basé sur l'énergie mise en jeu lorsqu'un matériau change d'état (par exemple solide-liquide). La transformation inverse permet de libérer l'énergie accumulée sous forme de chaleur ou de roide, avec un rendement d'environ 60%. Cette technique peut être appliquée dans les bâtiments, par l'intermédiaire des Matériaux à Changement de Phase (MCP). Incorporés aux parois, ils servent de régulateur thermique en fonction de la chaleur apportée par le soleil.

#### I.4.4. Stockage sous forme d'énergie électrochimique

##### ➤ Batteries électrochimiques

Le stockage de l'énergie dans les batteries électrochimiques est la technique la plus répandue pour les petites quantités d'énergie électrique. En fonction du type de batterie (plomb-acide, lithium-ion, nickel-métal hydrure, etc.), différentes réactions chimiques sont provoquées à partir de l'électricité : il s'agit de la phase de charge de la batterie. Selon la demande, les réactions chimiques inversées produisent ensuite de l'électricité et déchargent le système. Ce principe est illustré dans la **Fig. (I.3)**.



**Fig. (I.3)** Schéma de principe d'une batterie Lithium-Ion.

Les batteries électrochimiques sont souvent destinées à des applications portables. De puissance relativement faible, elles présentent néanmoins une grande capacité de stockage pour des durées de décharge élevées (jusqu'à plusieurs heures) avec un taux de rendement de 70 à 90%. Ces dispositifs peuvent également avoir des fonctions de secours lorsque le réseau électrique est défaillant ou dans le cas d'une production d'électricité issue des énergies renouvelables, avec des valeurs d'énergie stockée de quelques Wh jusqu'à 40 MWh.

L'inconvénient majeur est lié à leur durée de vie, limitée par les dégradations chimiques des réactions et leur coût.

#### I.5. Gisement solaire

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est l'une des plus facilement exploitables. Comme la plus part des énergies douces, elle donne à l'utilisateur la possibilité de subvenir sans intermédiaire à une partie de ses besoins. La connaissance de la position du soleil dans le ciel à tout instant et en tout lieu est nécessaire pour l'étude de l'énergie interceptée. Les heures du lever et du coucher ainsi que la trajectoire du soleil dans le ciel au cours d'une journée permettent d'évaluer certaines grandeurs telles que la durée maximale d'insolation, l'irradiation globale.

Dans cette partie nous allons définir certaines grandeurs solaires à savoir :

- Spectrale de rayonnement solaire
- Le rayonnement direct, diffus et global
- Trajectoire du soleil

### I.5.1. Contexte général sur le gisement solaire

Le rayonnement solaire est une variable climatique importante qui rend la vie sur terre possible en apportant de la chaleur et de la lumière. Abondant, renouvelable et disponible au sol, il est constitué de rayons lumineux transportant de l'énergie provenant du soleil dans toutes les longueurs d'onde. L'éclairement total est défini comme l'éclairement intégré sur tout le spectre. Plus de 97 % du rayonnement solaire extra-atmosphérique est inclus dans le domaine spectral entre 0,30  $\mu\text{m}$  et 3,00  $\mu\text{m}$ . Cette partie de l'éclairement solaire joue un rôle significatif dans notre bien-être et notre environnement.

#### a) Spectrale de rayonnement solaire

Le spectre du soleil est sa décomposition en longueurs d'onde ou en couleurs comme on l'a vu plus haut. La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnement de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde [4].

Sa relation est

$$E = h \cdot \gamma = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

E : énergie du photon en [ev] (électron-volt)

h: La constante de Planck  $h \approx 6.626070040 \cdot 10^{-34}$  [J.s] (Joule.seconde)

$\gamma$ : La fréquence.

C : La vitesse de la lumière 300.000.000 m/s et  $\lambda$ : La longueur d'onde en  $\mu\text{m}$

#### b) Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'ensemble du rayonnement émis par le Soleil. En plus des rayons cosmiques, particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées, le Soleil émet des ondes électromagnétiques dont le spectre s'étend des ondes radio aux rayons gamma, en passant par la lumière visible.

L'émission d'ondes électromagnétiques par le Soleil est bien modélisée par un corps noir à 5800 Kelvin, donc par la loi de Planck. Le pic d'émission est dans le jaune ( $\lambda=570$  nm), et la répartition du rayonnement est à peu près pour moitié dans la lumière visible, pour moitié dans l'infrarouge, avec 1% d'ultraviolets 1.

Arrivé au niveau de la mer, c'est-à-dire ayant traversé toute l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire a subi plusieurs « filtrations ».

On peut repérer notamment sur le spectre ci-contre les bandes d'absorption de l'ozone (connu pour stopper une bonne partie des ultraviolets) [6].

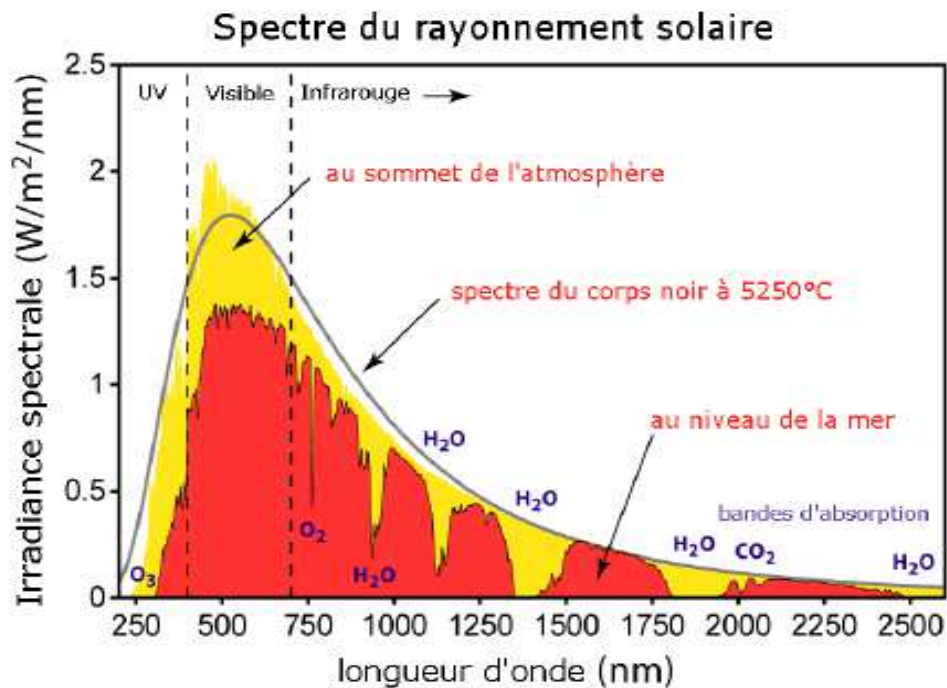


Fig. (I.4) Spectre du rayonnement solaire

#### c) Le rayonnement direct

Est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un pyréliomètre.

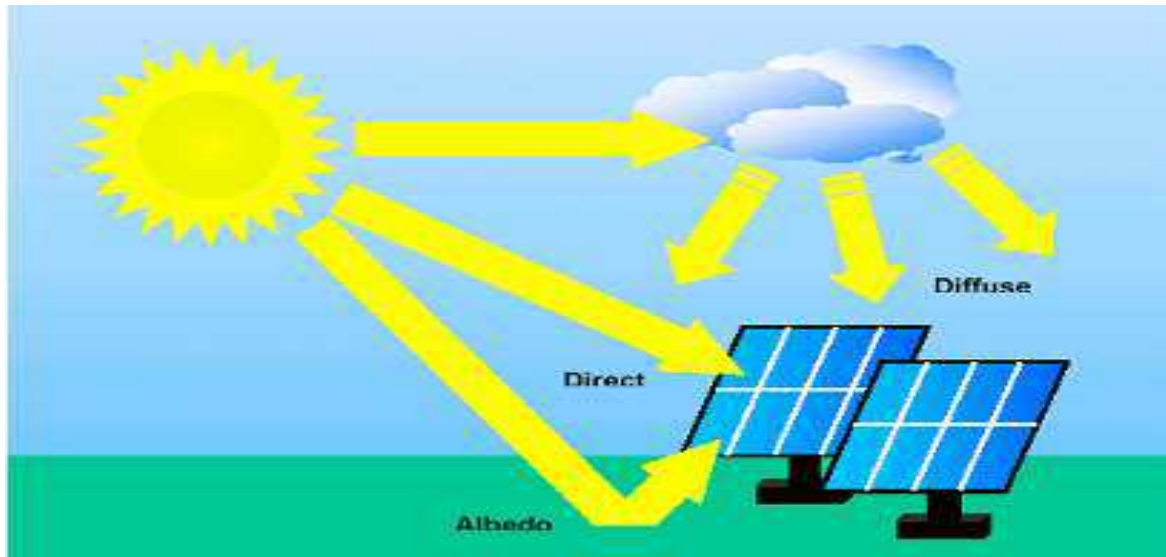
#### d) Le rayonnement diffus

Est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions.

Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent ce (éclatement) des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.

#### e) Le rayonnement solaire réfléchi

Ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).



**Fig. (I.5)** Composante du rayonnement global sur un plan horizontal

#### f) Le rayonnement global

Est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran. Les stations météorologiques généralement mesurer le rayonnement global horizontal par un pyranomètre placé horizontalement à l'endroit requis.

#### I.5.2. Déclinaison du soleil

La déclinaison solaire est l'angle formé par la droite reliant la terre au soleil et le plan équatorial (positif vers le nord). La déclinaison est égale à zéro aux équinoxes et varie de  $+ 23,45^\circ$  (22 juin) à  $- 23,45^\circ$  (22 décembre).

Les équinoxes sont les deux dates de l'année où le soleil traverse le plan équatorial : sa déclinaison est alors nulle et les durées du jour et de la nuit sont égales. L'équinoxe d'automne intervient vers le 22 septembre et l'équinoxe de printemps vers le 22 mars, dans l'hémisphère Nord. Dans l'hémisphère Nord, le solstice d'été (vers le 21 juin) est la période au cours de laquelle la durée qui sépare le lever et le coucher du soleil cesse de croître (maximum 16 h 8 mn).

Le solstice d'hiver (vers le 21 décembre) est la période au cours de laquelle cette durée cesse de décroître (minimum 8h 12mn), les saisons sont inversées dans l'hémisphère sud [7].

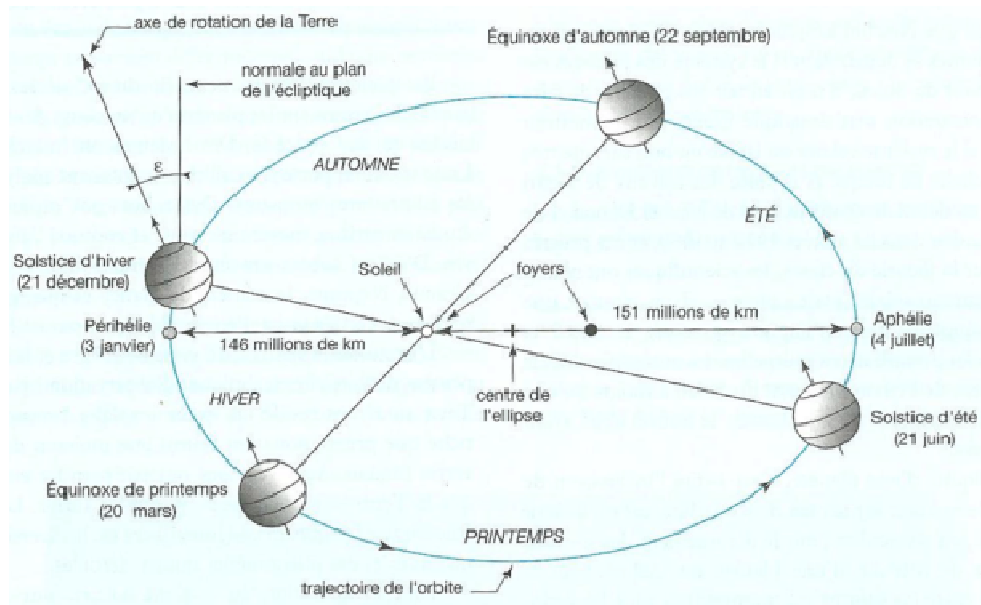


Fig. (I.6) Plan de l'écliptique l'orbite terrestre et les saisons

### I.5.3. Influence de l'atmosphère

Les couches atmosphériques modifient profondément la distribution spectrale du rayonnement solaire. Il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite des phénomènes complexes d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols (les poussières des cendres, des micros cristaux, des micros gouttelette, des fumées de pollution industrielle dont la taille varie de 0.5 à 10  $\mu\text{m}$ .) ainsi la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge [8].

#### I.5.3.1. Masse d'air

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante D'atmosphère et plus il va subir de transformation. On appelle «masse d'air» la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer Fig. (I.7).

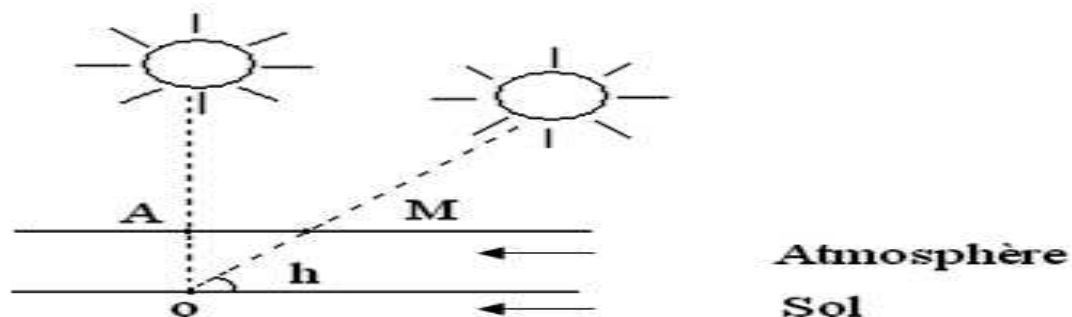


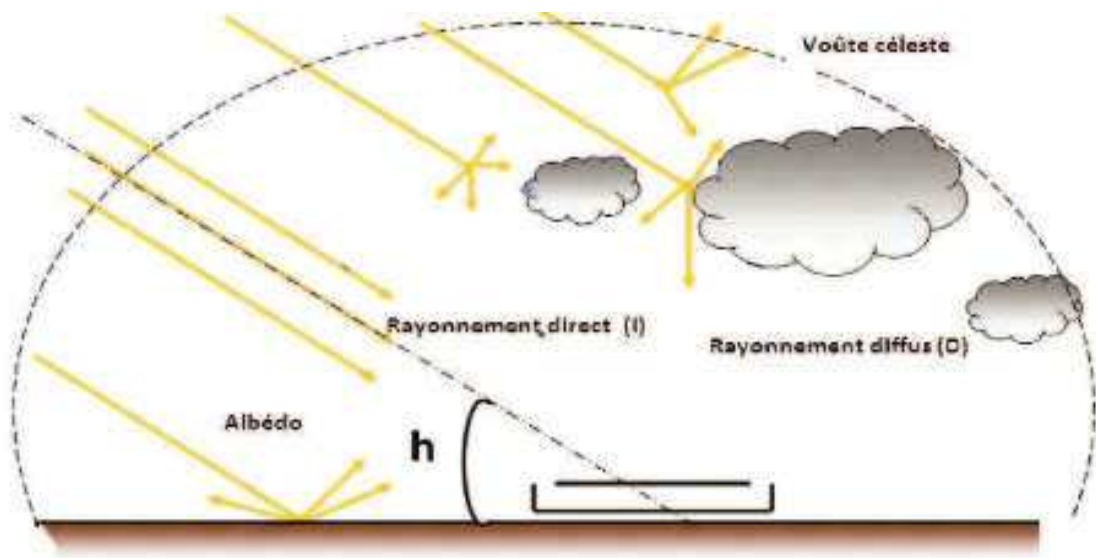
Fig. (I.7) Définition de masse d'air

Cela dépend surtout de la hauteur angulaire du Soleil. À l'aide des points O, A, M et L, l'angle  $h$  représenté à la figure, on écrit la longueur du trajet du soleil à travers l'atmosphère :

$$OM = \frac{OA}{\sin h} \quad (I.2)$$

### I.5.3.2. Rayonnement solaire au niveau de sol

Après avoir traversé l'atmosphère, une partie du rayonnement incident parvient directement au sol, l'autre sera diffusé, une autre composante du rayonnement est mise en évidence, c'est la partie renvoyée vers l'atmosphère après réflexion diffusée par le sol, et qui varie en fonction du sol et de son état. Quelle que soit la surface réceptrice, le rayonnement global incident est la somme des rayonnements direct et diffus parvenant à cette surface **Fig. (I.8)** [9].



**Fig. (I.8)** Bilan du rayonnement solaire au niveau de sol

### I.5.3.3. Trajectoire du soleil

Toute application solaire nécessite la connaissance du mouvement apparent du soleil pour un point donné de la surface terrestre, caractérisé par sa latitude (positive pour l'hémisphère nord) et sa longitude (définie par rapport au méridien de Greenwich, pour un observateur terrestre, en considérant la déclinaison comme constante sur une journée, le soleil décrit un cercle autour de l'axe de rotation de la terre, à raison de  $15^\circ$  par heure ( $360^\circ/24h$ ). Ce cercle est parallèle au plan de l'équateur, et sa hauteur apparente sur ce plan est donnée par la déclinaison.

La position du soleil est définie par deux angles: sa hauteur  $HS$  - l'angle entre le soleil et le plan horizontal du lieu - et son azimut  $AZ$  - l'angle avec la direction du sud, compté négativement vers l'est (sens anti trigonométrique dans l'hémisphère nord).

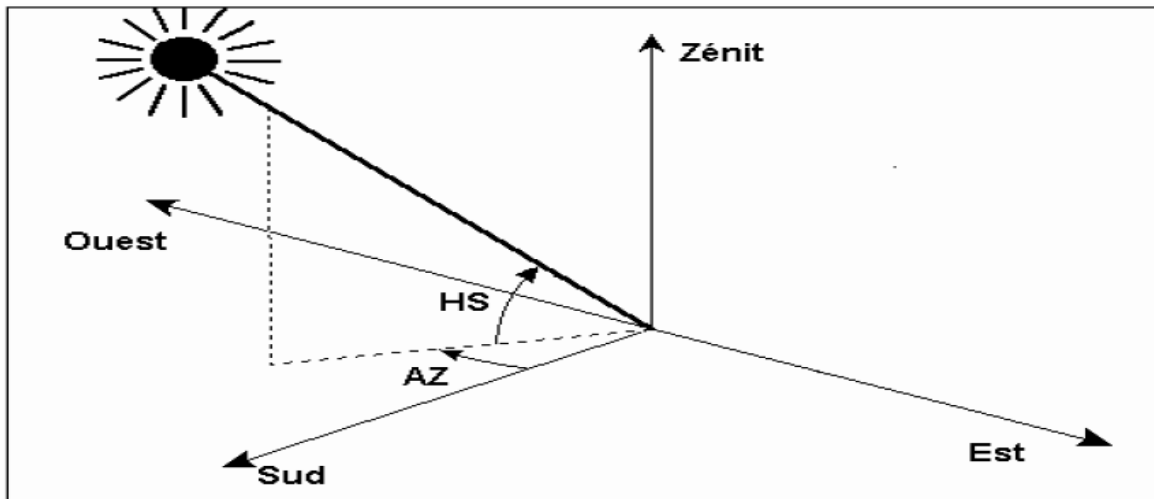


Fig. (I.9) Définitions de la position du soleil

#### I.5.4 La distribution de l'énergie solaire en Algérie

Une source énergétique renouvelable comme l'énergie solaire représente une énergie propre, gratuite et prometteuse. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur le quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). (162,5 jours).

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1 m^2$  est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de  $700 KWh/m^2/an$  au Nord et  $2263 kWh/m^2/an$  au sud de pays [10]. Ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable, s'il est exploité de manière rationnelle.

(Tab I.2) Potentiel solaire en Algérie [10].

Régions	Région côtière	Hauts-plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KW/h/ $m^2$ /an)	1700	1900	2650

##### I.5.4.1 Rayonnement solaire en Algérie

L'Algérie en égard de sa situation géographique constitue sur le globe terrestre une zone qui est particulièrement bien ensoleillée. En effet les estimations faites sur la base des relevés météorologiques donnent les Résultats suivants: les durées d'ensoleillement moyen varient de



2650heure/an dans le nord à 3500 heure/an dans le sud. Les quantités d'énergie reçues sur une surface horizontale vont de  $1700 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$  Au nord à  $2260 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$  dans le sud [11].

Le territoire algérien est partagé en huit zones énergétiques ou zones homogènes d'ensoleillement [12].

La zone d'Ouargla est la station solaire numéro 22, elle est dans la zone énergétique Z.E 4 elle a les coordonnées suivantes:

-Latitude  $31^{\circ}57'N$

-Longitude :  $5^{\circ}24' E$

- Altitude : 141 m

-Albédo:0.35

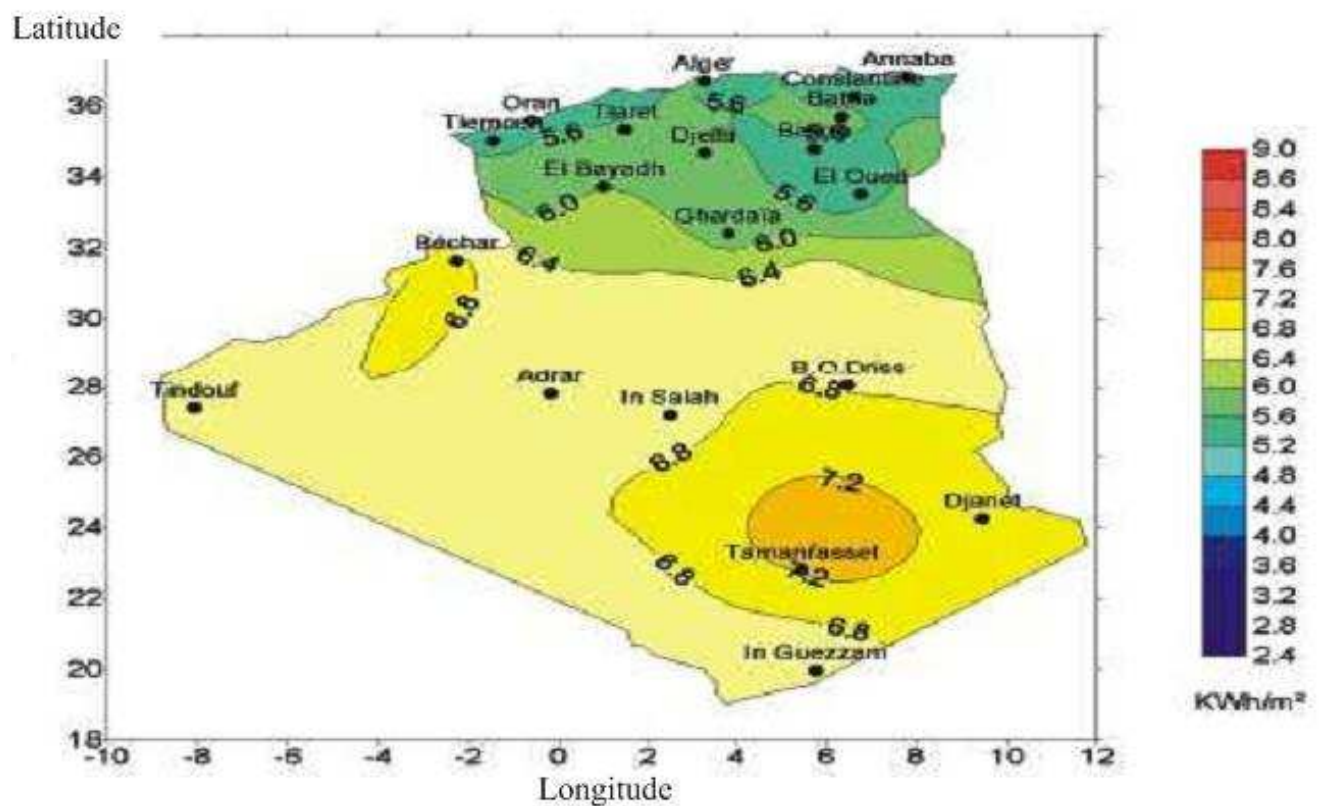


Fig. (I.10) Carte du rayonnement solaire en Algérie

## I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les sorte d'énergie renouvelable en donnant des illustrations sur la procédé de la génération d'électricité par cette ressource sur mentionné.

Ce chapitre aussi inclus les avantages et les inconvénients de l'exploitation de chaque source, on à également cité les types varie du stockage, en outre la source et l'origine de l'énergie solaire (espace solaire) en rappeler quelques idées sur la radiation solaire et l'énergie solaire dans la terre sur Algérie.

## **CHAPITRE II**

### **Systeme photovoltaïque- pile à combustible**

**II.1. Introduction**

L'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, la flambée des cours du brut et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent urgentes la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie, et développement des énergies renouvelables. Et afin d'atténuer le caractère aléatoire d'un gisement d'énergie renouvelable donné, on peut combiner les sources de natures différentes par le système énergétique hybride.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différentes configurations du système hybride en suite on présente la description générale de notre système photovoltaïque - électrolyseur-pile à combustible.

**II.2. Systèmes hybrides****II.2.1. Définition des systèmes hybrides de production d'électricité**

Les systèmes hybrides sont les technologies émergentes de production d'électricité qui intègrent deux ou plusieurs sources de production issues autant des sources renouvelables, que des sources conventionnelles (généralement les générateurs diesel. ou d'une combinaison des deux sources.

Les systèmes hybrides se caractérisent par l'utilisation d'au moins deux sources d'énergie. En effet, un générateur photovoltaïque pourrait être combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène, ou aux deux à la fois. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée. Également, les systèmes hybrides, photovoltaïque/éolien sont une solution pour réduire les coûts dans les parties générateur photovoltaïque et/ou accumulateurs du stockage dans le cas d'un site très bien éventé [13], pour technologies complémentaires de manière à accroître la fourniture d'énergie par une meilleure disponibilité.

**II.2.2 Typologies de configurations des systèmes hybrides**

Il existe plusieurs typologies de configurations des systèmes hybrides. On peut les regrouper suivant le type de tension (AC-CC), suivant le type de montage électrique des composants (parallèle, série).

**II.2.2.1. Les configurations selon le type de bus (AC, CC ou AC/CC)**

Une façon de définir et comparer les systèmes hybrides est de les classer en fonction du type de tension qu'ils utiliseront principalement et le type de bus qui relie les différents composants entre eux dans cette classification, l'accent est mis sur le type de bus, [14]. On distingue :

➤ **La configuration à bus CC (courant continu)**

Un système hybride d'électricité est dit à bus CC lorsque toutes les sources de production (générateurs Diesel et technologies d'énergies renouvelables) sont centralisées sur un bus CC. Ainsi, les

sources qui génèrent naturellement un courant AC doivent être précédées d'un ou plusieurs redresseurs avant d'être connectées au bus CC.

➤ **La configuration à bus AC (courant alternatif)**

De même que pour le cas précédent, la configuration AC implique que tous les composants de production d'électricité soient connectés à un bus AC. Cette configuration peut offrir des performances meilleures que celles de la configuration précédente dépendamment de la charge. En effet, chaque source de production peut alimenter la charge indépendamment ou simultanément avec les autres sources de production du système.

➤ **La configuration à bus AC/CC**

Les configurations à bus AC/CC des systèmes hybrides sont celles pour lesquelles les composants qui génèrent le courant AC et CC sont mis de part et d'autres des onduleurs bidirectionnels. Il est possible d'avoir recours à un onduleur /un redresseur pour connecter un composant AC sur le bus CC ou un composant CC sur le bus AC, au détriment des rendements.

### **II.2.3. Les configurations parallèle, série ou commuté**

Les systèmes hybrides peuvent être classifiés suivant le type de montage électrique des composants. On distingue ainsi [15] :

➤ La configuration série: un système hybride est dit de configuration série lorsque l'énergie produite par toutes les sources d'énergies (conventionnelles ou renouvelables) est d'abord stockée dans un grand parc de batteries, puis reconvertie en AC pour alimenter les charges. Le parc de batteries est donc dimensionné pour alimenter entièrement la charge.

➤ La configuration commutée: comme dans une configuration série, les sources d'énergies renouvelables et conventionnelles du système hybride sont stockées dans un parc de batteries capable d'alimenter tout ou partie de la charge. En fonctionnement, les générateurs diesel (ou les sources conventionnelles) alimentent la charge. Lorsqu'à un moment quelconque, l'énergie stockée dans les batteries est suffisante pour alimenter la charge, les générateurs diesel sont débrayés au moyen d'un commutateur manuel ou automatique. Rappelons que l'énergie stockée dans les batteries est d'abord convertie en AC par un onduleur pour alimenter la charge.

➤ La configuration parallèle: une configuration parallèle des systèmes hybrides implique que toutes les sources de production soient couplées de manière à fonctionner en parallèle. C'est-à-dire que la charge est alimentée par l'énergie résultant de la combinaison des productions de toutes les sources

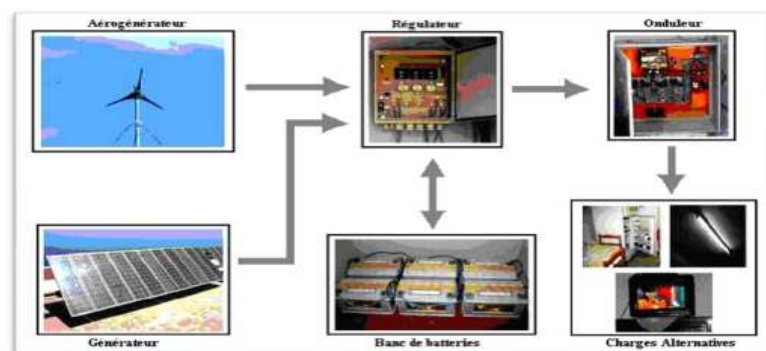
présentes dans le système. De plus, en cas de faible demande, certaines unités peuvent être éteintes sans compromettre le fonctionnement des autres.

### II.2.4. Différents types du système hybride

#### II.2.4.1. Système hybride photovoltaïque-éolien

Ces types des systèmes regroupent entre deux parties à savoir l'éolienne et les panneaux solaires. Ces deux sources de production de l'énergie passent par un stockage électrochimique (Voir **Fig. (II.1)**), et produisent du courant continu facilement convertible en courant alternatif, grâce à l'intégration d'un onduleur autonome dans le circuit [16]. En couplant ces systèmes et en les associant à un dispositif de stockage de l'énergie, nous aurons alors les avantages suivants :

- Exploitation du système sans interruption
- Possibilité de préserver le surplus d'énergie produite par ce système
- Sécurité d'approvisionnement quelles que soient les conditions météorologiques [17]



**Fig. (II.1):** Schéma synoptique du système hybride.

#### II.2.4.3. Le système hybride éolien-générateur du diesel

C'est un système qui combine entre la turbine éolienne et un générateur à combustible (le diesel...). Le système éolien qui produit une puissance électrique instable (énergie cinétique du vent instable) est accompli par le générateur diesel pour assurer la stabilité de ce dernier, un schéma de principe est donné en **Fig. (II.2)**.

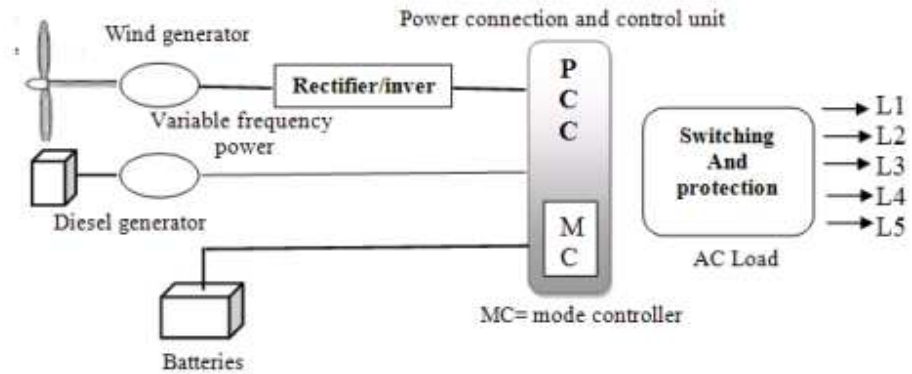


Fig. (II.2) Schéma de principe d'un système hybride éolien-diesel

**II.2.4.4. Système hybride photovoltaïque – éolien-pile à combustible (PV-E -PAC)**

Ce système constitue d'un générateur photovoltaïque et générateur éolien avec pile a combustible, l'intérêt d'un tel couplage est d'avoir plus d'énergie, mais, comme pour tout système Solaire, le risque demeure d'avoir trop d'énergie à certains moments et pas assez à d'autres (absence de vent par ciel couvert, par exemple). Il s'agit donc, par l'intermédiaire d'un système du stockage, d'emmagasiner l'excès énergétique lorsqu'il existe et du restituer lors des périodes de manque d'apport [18].

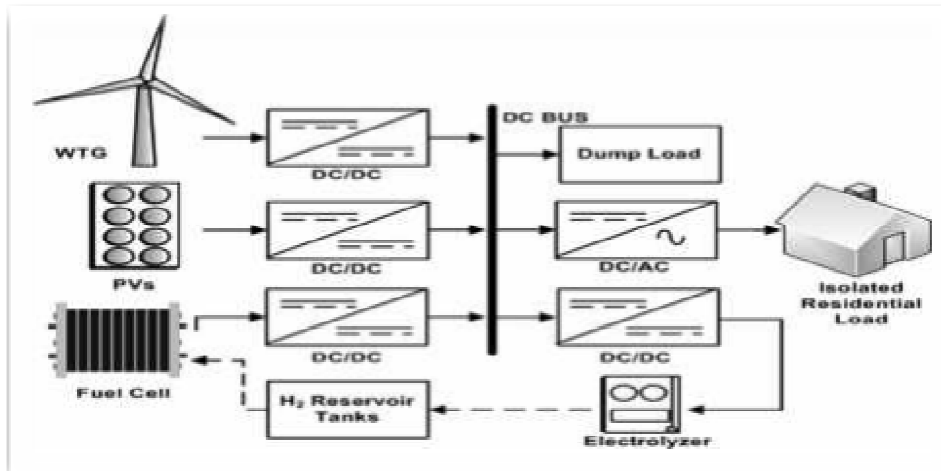


Fig. (II.3) Schéma d'un système PV-E-PAC.

**II.2.4.5. Système hybride photovoltaïque/stockage**

L'installation photovoltaïque doit être raccordée avec une autre source d'énergie, pour qu'il soit possible de satisfaire la charge durant la nuit ou par temps nuageux. Ces systèmes alimentent soit des maisons, soit des villages. Différent type du stockage existe comme un banc de batterie, un électrolyseur d'hydrogène et les super condensateurs. L'utilisation de super condensateur est une conception très

récente elles sont utilisées pour un stockage très court avec une réactivité de quelques dixièmes de secondes, tandis que l'électrolyseur et le réservoir d'hydrogène permettent un stockage plus important en terme de quantité stockée mais plus lent et aussi se sont des dispositifs très chers, pour un banc de batteries est un dispositif du stockage qui est largement disponible dans le marché et elle est la plus intéressante car elle peut alimenter une charge pour une durée plus importante mais parfois elle ne peut pas satisfaire la charge en cas d'absence d'énergie photovoltaïque. Alors parfois en fait appel à d'autre source d'énergie conventionnelle [19].

### II.2.4.6. Système hybride photovoltaïque/source conventionnelle (groupe électrogène)

Ce type du système hybride est utilisé le plus souvent dans des sites qui se caractérisent par un climat chaud ou le potentiel solaire est important. Ce système couplé à un groupe électrogène s'applique particulièrement bien à des sites éloignés, ou il est important d'avoir l'électricité à tout moment ,car en intégrant un groupe électrogène avec un système photovoltaïque, il a la mesure de booster l'approvisionnement en électricité au cours de l'augmentation soudaine de la demande d'énergie ou lorsque la capacité des batteries diminue, donc il contribue à l'augmentation de la durée de vie des batteries et aucune interruption de l'alimentation des installations . Parmi les systèmes que nous avons présentés, le système le plus approprié pour le site choisi est le système photovoltaïque/groupe électrogène avec dispositif du stockage [20].

## II.3. Principaux composants

### II.3.1. Systèmes PV

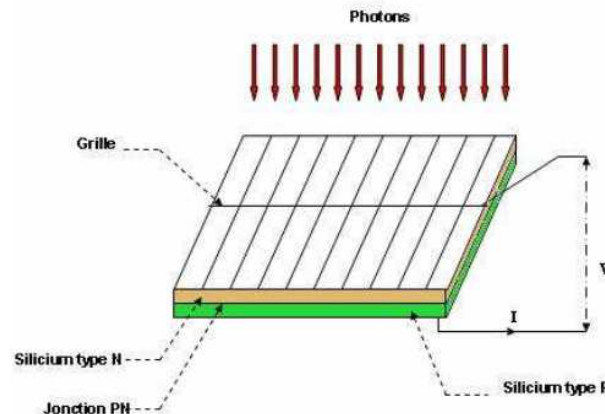
#### II.3.1.1. Générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque est constitué principalement d'un ou plusieurs panneaux Photovoltaïques, d'un régulateur de charge/décharge, de batteries et d'un convertisseur. Un panneau photovoltaïque est un assemblage en série et photovoltaïques. La cellule photovoltaïque est un élément semi-conducteur (généralement du silicium dopé) qui convertit l'énergie solaire en une énergie électrique [21].

#### II.3.1.2. Principe de fonctionnement

L'énergie solaire photovoltaïque est l'énergie obtenue par la conversion de la lumière en électricité. Cette énergie est obtenue grâce au phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque. Rapporté par Edmond Becquerel en 1839, le principe est assez simple et consiste en l'émergence d'une différence de

potentiel aux extrémités d'une structure de matériel semi-conducteur, produit par l'absorption de la lumière.



**Fig. (II.4)** Effet photovoltaïque à l'échelle de la cellule

Plus précisément, comme le montre la **Fig. (II.4)**, l'effet Photovoltaïque est propre à la cellule (unité fondamentale de conversion). Dans le cas des panneaux photovoltaïques, les cellules sont réalisées à partir de deux couches de silicium, une dopée P (en général dopée au bore) et l'autre dopée N (en général dopée au phosphore). Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. La tension ainsi générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [21].

### II.3.1.3. Technologie de la cellule photovoltaïque

#### a) Silicium poly cristallin

Sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes).

Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallin. Ces cellules grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure poly [22].



**b) Silicium monocristallin**

Sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie, plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium poly cristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche anti-reflet, pose des collecteurs), le wafer devient cellule. Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 12 à 18%, mais la méthode de production est laborieuse

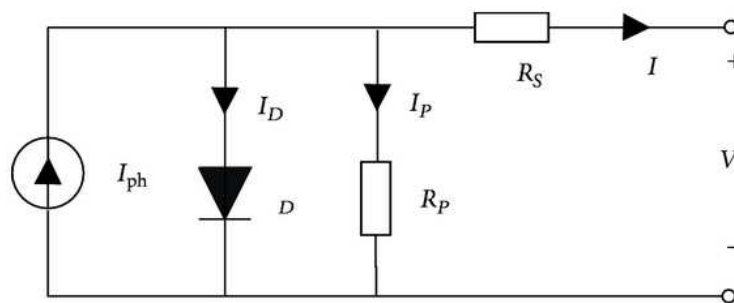
**c) Silicium amorphe en couche mince**

Ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies poly cristallines ou monocristallines.

**II.3.1.4. Module de Générateur photovoltaïque**

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque peut être modélisé sur la base du circuit électrique, où la cellule est représentée par une source de courant associée à une résistance en série, une autre en parallèle et une diode. Le modèle le plus communément utilisé pour la cellule photovoltaïque est le circuit équivalent à une diode de la **Fig. (II.5)**.



**Fig. (II.5)** circuit équivalent Générateur photovoltaïque à une diode

$R_s$ : Résistance série : permet de considérer les pertes de tensions aux niveaux des contacts électriques et à la résistivité du silicium au mouvement des électrons.

$R_p$ : Résistance parallèle : permet de considérer les pertes au niveau de la jonction N-P sur laquelle circule le courant  $I_D$ .

$I$  : Le courant généré : c'est le courant produit à la sortie de la cellule photovoltaïque.

$I_{ph}$ : Le photo-courant : c'est le courant produit par la lumière soleil incidente sur la cellule photovoltaïque. Il est proportionnel au rayonnement solaire ( $W/m^2$ ).

$I_D$ : Le courant de diode : courant de diode équivalente polarisée en direct.

$$I = I_{ph} - I_p - I_D \quad (\text{II.1})$$

Le développement de l'équation (II.1) donne une expression qui peut être résolue par les méthodes numériques.

$$I = I_{Ph} - I_0 \left( e^{\frac{q(V + I.R_s)}{A.K.T}} - 1 \right) - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (\text{II.2})$$

Où  $I_0$  est le courant inverse de saturation de la diode,  $V$  est la tension aux bornes la cellule,  $q$  représente la charge de l'électron ( $1.6021.10^{-19}$  C)

- $K$  est la constante de Boltzman ( $1.380658.110^{-23}$  J/K).
- $T$  est la température absolue interne de la cellule (K) et  $A$  est le facteur.

Idéal de la diode (diode idéal  $A=1$ ). Le facteur  $KT/q$  s'appelle tension thermique et a une valeur de 25mV pour une température interne de la cellule de 25 C.

La puissance générée par la cellule photovoltaïque s'obtient en multipliant l'expression précédente par la tension de sortie ( $V$ ).

Les courbes représentant les caractéristiques courant / tension  $I=f(V)$  et puissance / tension  $P = f(V)$  d'une cellule photovoltaïque peuvent être construites à partir des équations étudiées ci-dessus, **Fig. (II.6)** [23].

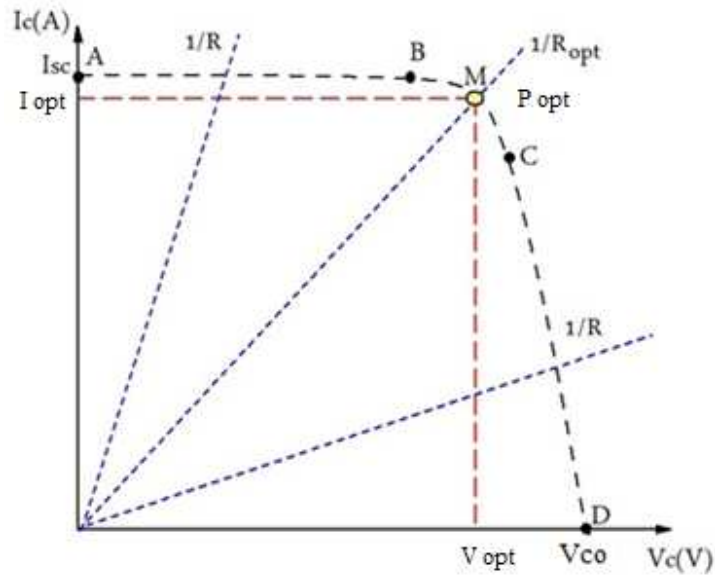


Fig. (II.6) Courbes caractéristiques d’une cellule photovoltaïque

Une cellule réelle peut être caractérisée par les paramètres principaux:

- **Le courant de court circuit**

$I_{sc} \approx I_{ph}$ , est proportionnel à l’éclairement et représente le courant maximal généré par la cellule. Il est produit dans des conditions de court circuit ( $V_c = 0$ ).

- **La tension à vide**

Correspond à la chute de tension sur la diode, quand elle est traversée par le photo-courant  $I_{ph}$  ( $I_d \approx I_{ph}$ ),  $I = 0$ . Cette tension peut être exprimée mathématiquement par:

$$V_{co} = \frac{m K T_e}{e} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_0} \right) \tag{II.3}$$

$\frac{m K T_e}{e}$ : est la tension thermique et  $T_c$  est la température absolue de la cellule.

- **Le Point de Puissance Maximale**

Est le point de fonctionnement MPP ( $V_{opt}$ ,  $I_{opt}$ ) dans la Fig. (II.6) pour lequel la puissance dissipée dans la charge résistive est maximale.

- **Le rendement maximale**

Est le rapport entre la puissance maximale et la puissance incidente:

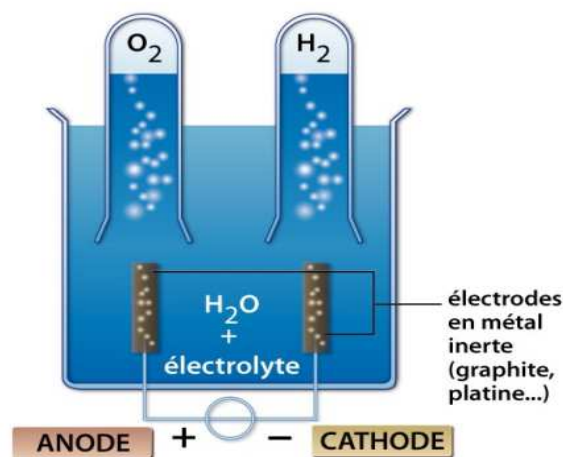
$$\frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{opt} \cdot I_{opt}}{A_0 G_a} \tag{II.4}$$

- $P_{in}$  : est la puissance incidente (W)
- $G_a$  : est l'éclairement ( $W/m^2$ )
- $A_0$  : est la surface de la cellule ( $m^2$ )

### II.3.2. Electrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique de décomposition de l'eau en hydrogène et en oxygène. Pour ce processus nous appliquons une différence de potentiel entre les deux électrodes immergées au l'eau, qui crée un champ orienté dans lequel les ions se mettent en mouvement **Fig. (II.7)**.

La dissociation de l'eau en hydrogène et oxygène nécessite un apport d'énergie électrique. Elle peut provenir d'énergies renouvelables : solaire, éolienne, hydraulique et biomasse, sachant que l'enthalpie de dissociation de l'eau est de 285 KJ/mole. Cela correspond à un potentiel théorique de 1.481 V à 25 °C. Dans la pratique, le potentiel nécessaire au processus se situe entre 1.7 à 2.3 V Ceci correspond à des rendements de l'électrolyse de 70 à 85 [24].



**Fig. (II.7)** L'électrolyse de l'eau

#### II.3.2.1. Les différentes technologies d'électrolyseurs

##### II.3.2.2. Electrolyseurs alcalins

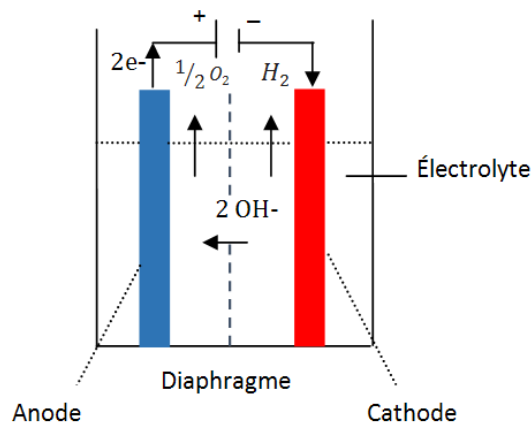
L'électrolyse alcaline est la technologie la plus répandue pour la production d'hydrogène électrolytique mais également pour la production de nombreux composés chimiques dont le chlore. Elle bénéficie ainsi d'une très grande maturité industrielle.

Dans un électrolyseur à technologie alcaline, l'électrolyte est une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH). La conduction ionique est alors assurée par les ions hydroxyde (OH<sup>-</sup>) et potassium (K<sup>+</sup>) [25].

Les réactions anodiques et cathodiques sont décrites ci-dessous :



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



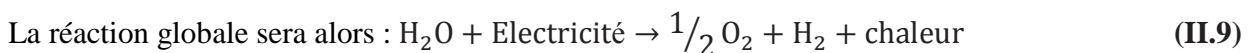
**Fig. (II.8)** Principe de l'électrolyse alcaline.

**II.3.2.3. Electrolyseurs PEM**

L'électrolyseur PEM a un fonctionnement inverse à celui de la pile à combustible de type PEMFC qui produit, en présence d'oxygène à sa cathode et d'hydrogène à son anode, de l'électricité et de l'eau. L'électrolyseur PEM nécessite une alimentation en eau à son anode et grâce à une différence de potentiel suffisante appliquée à ses bornes, l'eau est dissociée pour générer de l'oxygène à l'anode et de l'hydrogène à la cathode.

Grâce à une tuyauterie inhérente, l'eau est acheminée à l'interface réactionnelle anodique. Les réactions chimiques ci-après synthétisent le processus présenté dans le point précédent [26].

La réaction chimique anodique (II .6) sera :



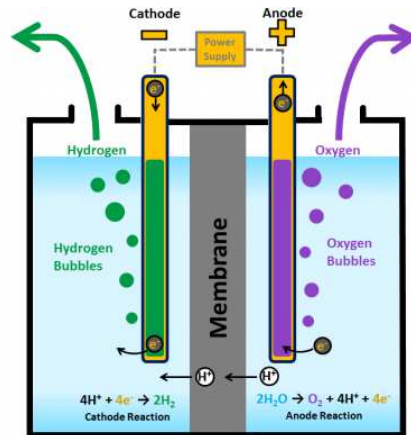
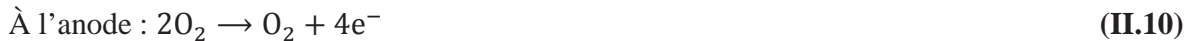


Fig. (II.9) Principe schématique de l'électrolyse PEM.

II.3.2.4. Electrolyseurs à haute température

Le principe de l'électrolyse à haute température repose sur la décomposition des molécules d'eau sous forme vapeur au niveau de la cathode. Cette décomposition dépend alors de la nature de l'électrolyte. Celui-ci peut assurer soit une conduction protonique soit une conduction d'ions super oxydes  $O_2$ . Les réactions mises en jeu au niveau des électrodes [27], sont décrites ci-dessous en fonction du type d'électrolyte :

- Electrolyte à conduction d'ions super oxydes :



- Electrolyte à conduction protonique :

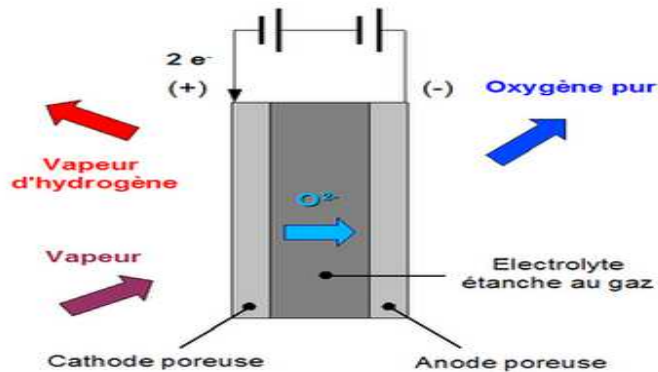


Fig. (II.10) Principe de l'électrolyse à haute température selon le type d'électrolyte.

II.3.4. Piles à combustibles

II.3.4.1. Historique

Le principe de la pile à combustible est découvert en 1839 par William R. Grove, et en 1842, Grove a édité des résultats expérimentaux sur le ‘gaseous voltaic battery’, comme le terme ‘fuel cell’ n’a été inventé que en 1922 par Rideal et Evans. Le premier générateur d’une puissance d’un kilowatt a été réalisé en 1953, à partir des travaux de F. T. Bacon en 1930.

Depuis l’utilisation de piles à combustible dans les projets spatiaux Gemini de la NASA en 1965 l’intérêt pour ces systèmes s’est accru et de nombreux travaux ont été réalisés, fondamentaux et appliqués, afin d’améliorer et de commercialiser cette source d’énergie électrochimiques dans des diverses applications [28] [29].

II.3.4.2. Description générale d’une pile à combustible (PAC)

Une pile à combustible est un appareil qui converti l’énergie chimique d’un combustible en électricité au travers une réaction chimique contrôlée avec l’oxygène ou d’un autre oxydant. Les piles à combustibles se distinguent des batteries et des piles par le fait qu’elles ont besoin d’un apport constant de combustible pour fonctionner, mais que leur production d’électricité est constante tant que le combustible est approvisionné. La pile à combustible est un générateur de courant à haut rendement énergétique. Celui-ci est généralement proche de 50% [30].

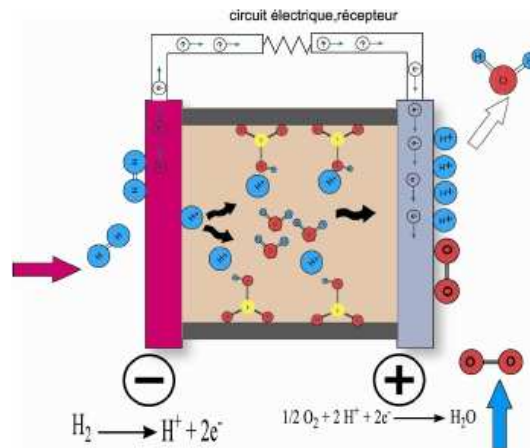


Fig. (II.11) Représentation d’une cellule électrochimique d’une pile à combustible.

Le cœur d’une pile à combustible est l’association de deux conducteurs : une anode et une cathode, les deux séparés par un électrolyte liquide ou solide, Fig. (II.11). Dans le compartiment anodique s’effectue la combustion d’un carburant, en occurrence de l’hydrogène, le passage d’une conduction électronique à une conduction ionique permet aux électrons porteurs de charge négative est issues de l’oxydation

anodique, de se déplacer dans le circuit électrique extérieur. L'électrolyte joue le rôle d'un support au transfert de charges de l'anode vers la cathode où se réalise la réduction, une décharge des électrons.

Au contact d'un comburant, comme l'air ou l'oxygène pur, il y a production d'eau et dégagement de chaleur. Ainsi, aussi longtemps que l'anode est alimentée en hydrogène et la cathode en oxygène, on observera les phénomènes suivants :

- Production d'électricité par la réaction oxydo-réduction catalytique.
- Production d'eau
- Dégagement de chaleur

Afin d'obtenir une puissance utile, une pile à combustible se présente sous l'aspect d'un empilement de cellules élémentaires appelées stack.

### II.3.4.3. Pile à membrane polymère échangeuse de proton PEMFC

La pile du PEMFC utilise une membrane échangeuse de protons, responsable de la conductivité ionique. Comme une pile classique elle consommait son oxydant (ici l'oxygène  $O_2$ ) et son réducteur (ici l'hydrogène  $H_2$ ). elle continue de fonctionner tant qu'elle est approvisionnée en hydrogène et oxygène. Le réducteur peut-être du méthanol ou du gaz naturel

À l'anode, a lieu la réaction suivante:



Il y a donc production de 2 électrons par molécule de dihydrogène. L'ion  $H^+$  passe de l'anode à la cathode et provoque un courant électrique par transfert des électrons dans le circuit électrique.

À la cathode, les ions  $H^+$  sont consommés suivant la réaction:



Les réactions sont rendues possibles par la présence d'un catalyseur de dissociation de la molécule de dihydrogène, qui peut être une fine couche de platine divisé sur un support poreux qui constitue l'électrode à hydrogène [31].

### II.3.4.4. Principe fonctionnement d'une pile à combustible à membrane d'échange de protons PEMFC

Le principe électrochimique de fonctionnement d'une PEMFC est représenté sur la Fig.(II.12), une PEMFC est constituée d'une membrane Polymère ionique disposée entre une anode et une



cathode, la membrane et l'électrode forment un assemblage membrane électrode désigné par MEA (Membrane Electrode Assembly).

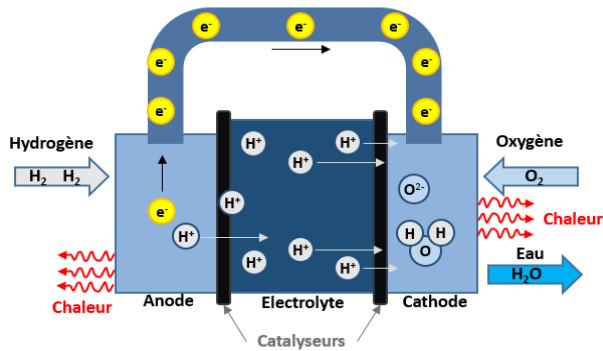


Fig. (II.12) Schéma de principe d'une pile à combustible échangeuse de protons(PEM).

Un jet d'hydrogène est dirigé vers le côté anode de l'assemblage de la membrane-électrode (MEA). Il est à cet instant divisé catalytiquement en protonset électrons. Cette réaction d'oxydation dans la demi-cellule est décrite par les équations suivantes :

Au niveau de l'anode, il y a oxydation de l'hydrogène,  $H_2$  en réducteur Protonique H:



Dans le même temps, un flux d'oxygène est dirigé du côté cathode de MEA. Les molécules de dioxygène réagissent avec les protons traversant la membrane électrolyte polymère et les électrons arrivent par le circuit externe afin de former de molécules d'eau

Cette réaction de réduction dans la demi-cellule électrolytique est :

Au niveau de la cathode, il y a réduction de l'oxygène,  $O_2$



La réaction globale est la suivante :



**II.3.4.5. Types de pile combustible :**

On compte actuellement 7 types de pile à combustible :

- AFC (pile à combustible alcaline).
- PEMFC (pile à combustible à membrane à échange polymère).

- **DMFC** (pile à combustible à méthanol direct).
- **DEFC** (pile à combustible à éthanol direct).
- **PAFC** (pile à combustible à acide phosphorique).
- **MCFC** (pile à combustible à carbonate fusionnée).
- **SOFC** (pile à combustible à oxyde solide).

**II.3.4.6. Différents types de pile combustible**

La pile à combustible peut être classifiée selon les différents technologies et la puissance qui produit. Ceci est illustré dans le tableau suivant [32]:

**Tab. (II.1)** Différents types de pile à combustible

	<b>AFC</b>	<b>PAFC</b>	<b>PEMFC</b>	<b>DMEC</b>	<b>MCFC</b>	<b>SOFC</b>
	Basse température				Haute température	
<b>Température</b>	50 à 250°C	150 à 220°C	70 à 200°C	70 à 90°C	600 à 800°C	700 à 1050°C
<b>Electrolyte</b>	Potasse liquid	Acide Phosphorique liquide	Membrane en Polymère solide	Membrane en polymère solide	Sel de Carbonate fondu liquide	Céramique Solide
<b>Combustibles Possibles</b>	Hydrogène	Hydrogène, gaz naturel (reformage)	Hydrogène	Méthanol	Hydrogène, gaz naturel, méthanol...	Hydrogène, gaz naturel, méthanol.
<b>Gamme de puissance</b>	1W à 100KW	200 kW à 10M	1W -10 kW	Jusqu'à 10M W	Jusqu'à 100M W	1W à 100MW
<b>Rendement</b>	55 à 60%	35 - 45%	35-45%	-	50-60%	50-65%
<b>Applications</b>	Spatial, défense, équipements portables	Stationnaire, cogénération, Transport	Spatial, Transport, Stationnaire, Equipements, portables	Transport, Equipements, Portables	Stationnaire, Transport, cogénération, production, décentralisée	Stationnaire, cogénération

**II.3.4.7. Avantages et inconvénients des piles à combustible [33].**

- **Avantages des utilisations piles à combustible :**
  - ✓ Elles produisent de très bons rendements énergétiques.
  - ✓ Elles sont très peu ou pas polluantes (selon le combustible utilisé).
  - ✓ Elles sont silencieuses.
  - ✓ Elles prennent peu de place.
  - ✓ Elles peuvent fonctionner à basse température
- **Inconvénients des piles à combustible:**
  - ✓ Le cout
  - ✓ Durée de vie
  - ✓ Gestion thermique

**II.3.4.8. Caractéristique électrique d'une pile à combustible**

La caractéristique électrique d'une pile à combustible est déterminée par le nombre de cellules en série, définissant la tension totale et par la taille de la surface active, déterminant le courant délivré. Les caractéristiques électriques d'une cellule de pile à combustible basse température sont décrites à la **Fig. (II.13)**.

La tension à vide est d'environ 1 V. Lorsque la densité de courant augmente, les pertes sont plus importantes : la tension diminue. Pour de fortes densités de courant, la tension chute rapidement : la réaction est limitée par des problèmes de diffusion des ions vers les sites de réaction. On limite généralement la tension à 0,4-0,5 V, tension du point de puissance maximale. L'influence des différents paramètres est décrite plus loin.

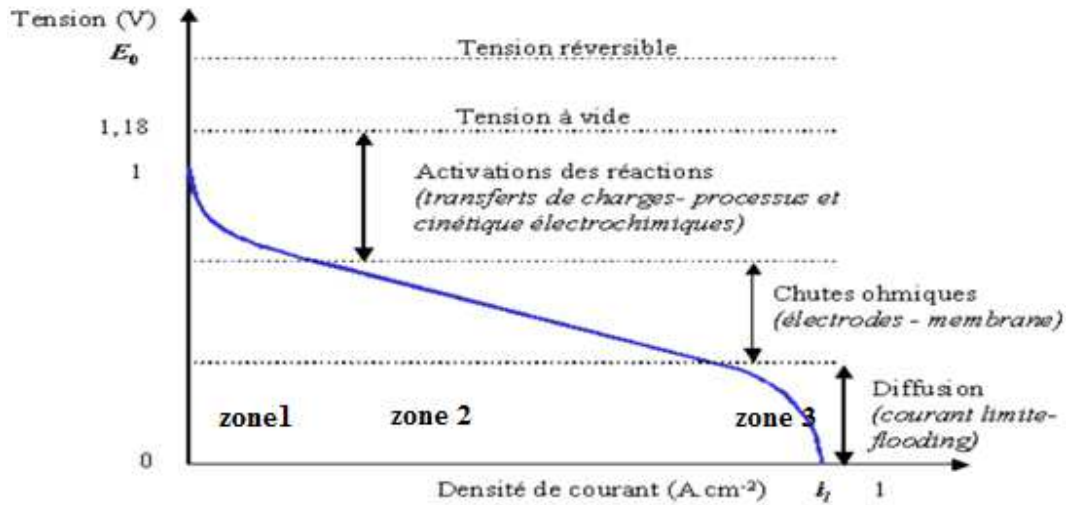


Fig. (II.13) Caractéristique électrique d'une cellule de pile à combustible

Trois régimes de fonctionnement de la pile à combustible apparaissent sur la figure ci-dessus [34].

**Zone 1** : pour les faibles densités de courant le transfert de charge à la cathode est prédominant, le potentiel est fonction de  $\ln(j)$ , les autres termes de l'équation caractéristique sont négligeables.

**Zone 2** : pour les densités de courant moyennes, la courbe caractéristique suit un régime linéaire, la chute ohmique (principalement due à la résistance de l'électrolyte  $R_e$ ) est prépondérante.

**Zone 3** : à densité de courant élevée, la tension de cellule est gouvernée par le transport de matière par diffusion. Lorsque  $j$  s'approche de l'une des deux densités de courant limites  $j_{la}$  ou  $j_{lc}$ , l'épuisement de matière active au voisinage des électrodes conduit à l'effondrement de la tension de cellule. Le fonctionnement de la pile dans cette zone peut engendrer des dégradations au niveau des matériaux d'électrode.

## II.3.5. Les auxiliaires du système hybride

### II.3.5.1. Les convertisseurs

Les convertisseurs sont des appareils servent à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative.

II.3.5.2. Convertisseur DC/AC (Onduleur)

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Un onduleur est habituellement conçu pour fonctionner sur une plage assez réduite. Il est très efficace pour des caractéristiques d'entrées et de sortie fixe. Son coût assez élevé et la nature variable de l'ensoleillement et du couple résistant des pompes en générale ont longtemps exclu l'emploi des moteurs à courant alternatif pour le pompage solaire [35].

II.3.5.3. Convertisseur DC/DC

Un convertisseur de tension continue DC/DC est un module (ou mini module) générant une tension de sortie régulée, isolée de la tension d'entrée.

Cette conversion d'énergie s'effectue grâce à un "découpage" haute fréquence caractérisée par un rendement élevé jusqu'à 94%.

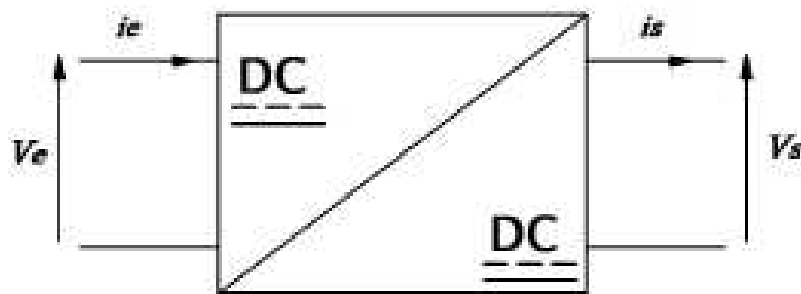


Fig. (II.14) Convertisseur continue continue

Dans la littérature il y a plusieurs types des convertisseurs DC/DC, le choix de l'un par rapport à l'autre dépend de l'application. Par la suite, nous verrons quelques types de Convertisseur DC/DC.

II.3.5.4. Convertisseur abaisseur "Buck"

Hacheur abaisseur, hacheur dévolteur, hacheur série, hacheur de type BUCK, buck chopper.

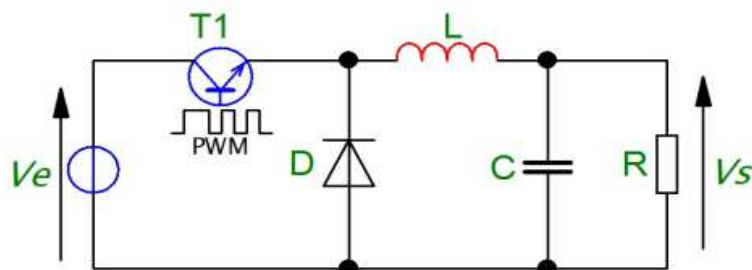


Fig. (II.15) Convertisseur Buck

II.3.5.5. Convertisseur élévateur "Boost"

Hacheur élévateur, hacheur survolteur, hacheur parallèle, hacheur de type BOOST, boost chopper.

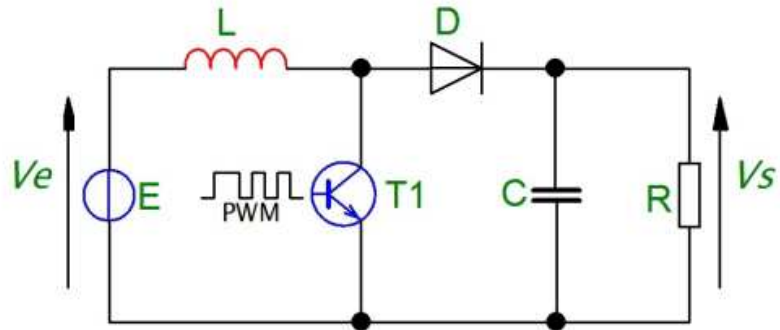


Fig.(II.16) Convertseur Boost

II.3.5.6. Convertisseur bi-directionnel en courant

L'idée de ce type convertisseur est d'associer un hacheur série et un hacheur parallèle pour obtenir un hacheur réversible en puissance.

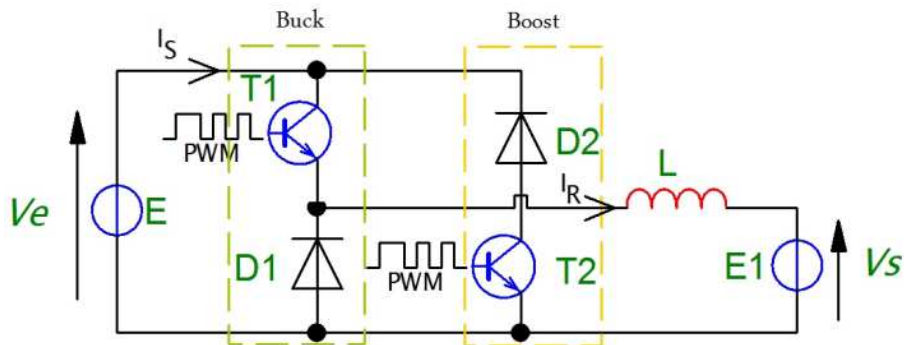


Fig.(II.17) Convertseur DC/DC bidirectionnel

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le système hybride en général et les principaux composants du système à l'étude, qui sont les éléments auxiliaires pouvant accompagner ces systèmes en général, et mis en évidence les principaux avantages et inconvénients de l'utilisation des composants du système étudiés.

Dans le prochain chapitre, nous commencerons l'étude technique et économique de notre système PV-PAC.

**CHAPITRE III**

**Etude technico-économique du  
système PV-PAC**

## III.1. Introduction

Dans la littérature il existe de nombreux logiciels de dimensionnement et d'optimisation des systèmes hybride, parmi ces logiciels qui ont été dédiés pour réaliser ces tâches est le HOMER.

Le HOMER est un outil connu pour sa fiabilité dans la conception et l'analyse des systèmes d'énergies hybrides, qui contiennent un ensemble des différents générateurs conventionnels tels que (des éoliennes, des générateurs photovoltaïques, de l'hydroélectricité, etc) ainsi pour une ou plusieurs installations connectées au réseau ou autonomes, ce logiciel permet d'obtenir la configuration optimale après une étude technico-économique.

Dans ce chapitre nous avons expliqué les différentes étapes à suivre pour développer une installation de telle configuration sous HOMER, ensuite on a présenté le schéma général d'un système hybride autonome, finalement nous avons entamé une étude technico-économique d'un système hybride PV / PAC pour alimenter le laboratoire de génie électrique dans le centre de recherche à l'université d'Ouargla .

## III.2. Présentation du système d'étude

Le système considéré dans ce travail et schématisé dans la **Fig. (III.1)**, il est composé d'un générateur photovoltaïque, électrolyseur, pile à combustible et réservoir de stockage d'hydrogène et les batteries d'accumulateur, des convertisseurs, la charge (les dispositifs électriques de laboratoire de génie électrique dans le centre de recherche à l'université de Ouargla).

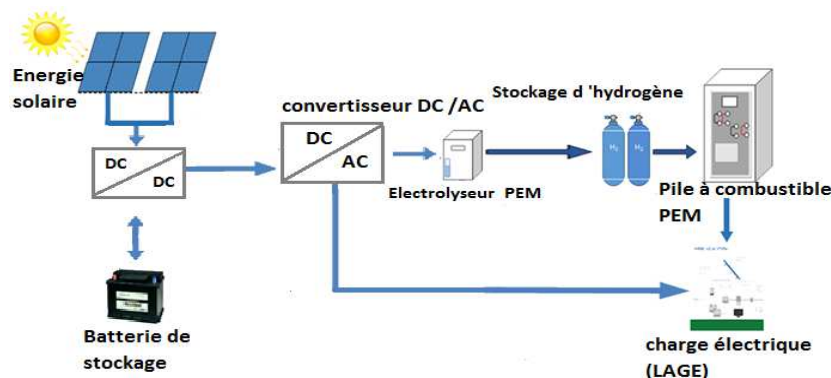


Fig. (III.1) Le schéma global du système étudié

## III.3.Principe de fonctionnement du système

Le système à étudier est un système hybride basé sur deux sources d'énergie renouvelable solaire et une pile à combustible pour l'alimentation du laboratoire de génie électrique LAGE qui contient l'ensemble des dispositifs électriques (ordinateur portable, imprimant, lampe, climatiseur).



Pendant la journée, Les panneaux solaires alimentent notre charge et l'excédent d'énergie sera chargé dans les batteries et alimente aussi l'électrolyseur d'eau, ce dernier produise de l'hydrogène afin de stocker le réservoir d'hydrogène pour alimenter la pile à combustible.

Pendant la nuit, la pile à combustible consomme l'hydrogène qui à été stocké dans les bouteilles afin d'assure l'alimentation de la charge à l'aide la pile a combustible et lorsque la pile ne peut pas accomplir le besoin de la charge la batterie aussi rentre pour compenser l'alimentation.

### III.4.Exploitation du logiciel HOMER

#### III.4.1.Présentation du logiciel HOMER

HOMER (Hybrid Optimisation of Energy Ressources ) est un logiciel de simulation d'optimisation destiné à l'étude d'instaltion de prouduction d'nergie multi – sources (éolien, PV , stockage, diesel...), Il est principalement destiné à la simulation de mini-réseaux connecté ou non –connectés (off-grid) . Il a été développé en premier lieu par le national Renewable Energy lab dépendent lui –mémé du ministère américain de l'énergie. L'entreprise Homer Energy à été spécialement créé pour sa commercialisation et ensuite de son développement [36].

#### III.4.2. Les fonctions principales du logiciel HOMER

HOMER Energy permet de simuler, d'optimiser et aussi réaliser une analyse de sensibilité pour les SER. Il est utile aussi bien pour les centrales électriques villageoises, les camps, les chalets, les bases militaires que pour les habitats individuelles [37].

Dans un premier temps, HOMER peut **simuler** le fonctionnement d'un ou plusieurs systèmes à la fois. Pour chaque configuration, Il établit le bilan énergétique avec un pas allant d'une minute à une heure pour une période d'une année. Ainsi, pour chaque pas, HOMER compare la demande d'électricité et de chaleur dans cet intervalle de temps à l'énergie que le système peut fournir. C'est ainsi qu'il détermine la faisabilité technique du système. Aussi, suivant les données techniques et de coût de chaque composant du système, HOMER calcul le rendement énergétique, le cout du système et le pourcentage d'émission de gaz à effet de serre pour chaque configuration.

Dans un deuxième temps, HOMER **optimise** le système déjà simulé en effet, selon les critères que nous définissons, il trie et filtre les systèmes, déjà simulé, de sorte à ce que nous pouvons voir les meilleurs ajustements possibles. Par défaut, il trie les systèmes en fonction du coût actuels net du système (NPC). En dernier temps, HOMER peut modéliser l'impact des variables qui sont hors de

## CHAPITRE III Etude technico-économique du système PV-PAC

contrôle, tel que le vent, la vitesse, les coûts de carburant...etc, et de voir comment le système optimal change avec ces variations : C'est l'**analyse de sensibilité**.



**Fig. (III.2)** Les opérations principale de HOMER

Le logiciel aussi permet de faire des simulations avec différents systèmes de production d'énergie renouvelable ou non renouvelable notamment:

Panneaux solaires photovoltaïque - éolienne -barrage hydroélectrique au fil de l'eau - biomasse-génératrices (diesel, essence, biogaz, combustibles alternatifs et combustibles personnalisés)- micro turbines-Piles à combustible.

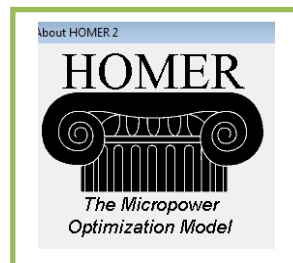
Le HOMER offre aussi une vaste gamme de dispositifs d'accumulation ou de récupération d'énergie : banque des batteries - volants d'inertie - hydrogène...etc.

Pourraient aussi entrer divers types de besoins énergétiques : profils de consommation journaliers avec des variations selon les saisons, charge différée pour le pompage d'eau ou pour la réfrigération, charge thermique, mesures d'efficacité énergétique.

### III.4.3. Présentation de l'interface de HOMER

Il y a plusieurs version de HOMER la premier version HOMER Original Version 1.0 qui été développé au (February 14, 2000) et la dernier version dite HOMER Pro Version 3.13.0 développé au (April 29, 2019), dans notre étude nous avons utilisé la version beta de HOMER energy V 2.81 parce que cette version possède une durée de vie d'exploitation long par rapport aux autres version, il est simple de manipulation toute les choix de simulation existe.

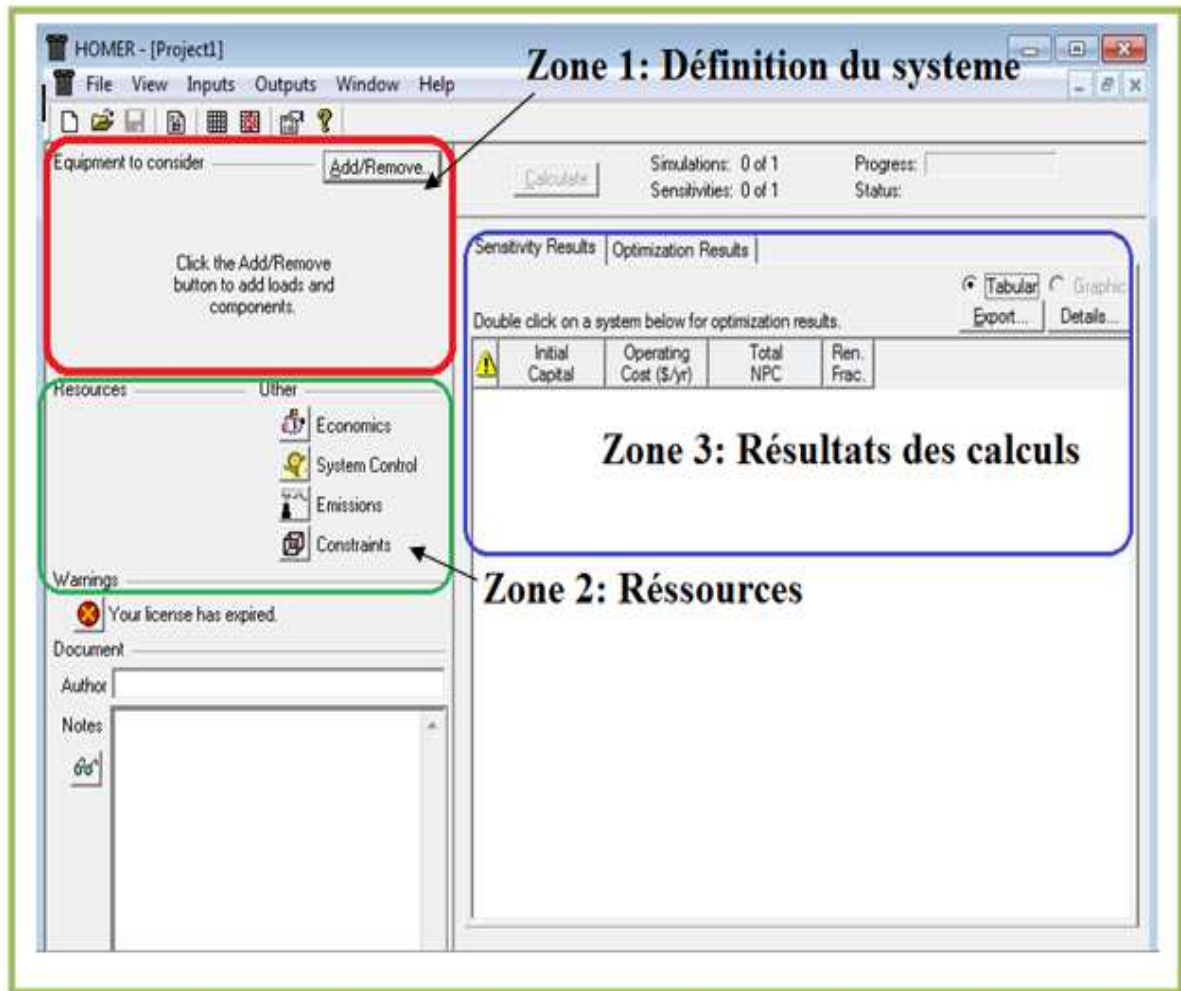
Le logo de cette version est présenté ci-dessous:



**Fig. (III.3)** Logo du logiciel HOMER version beta 2.81

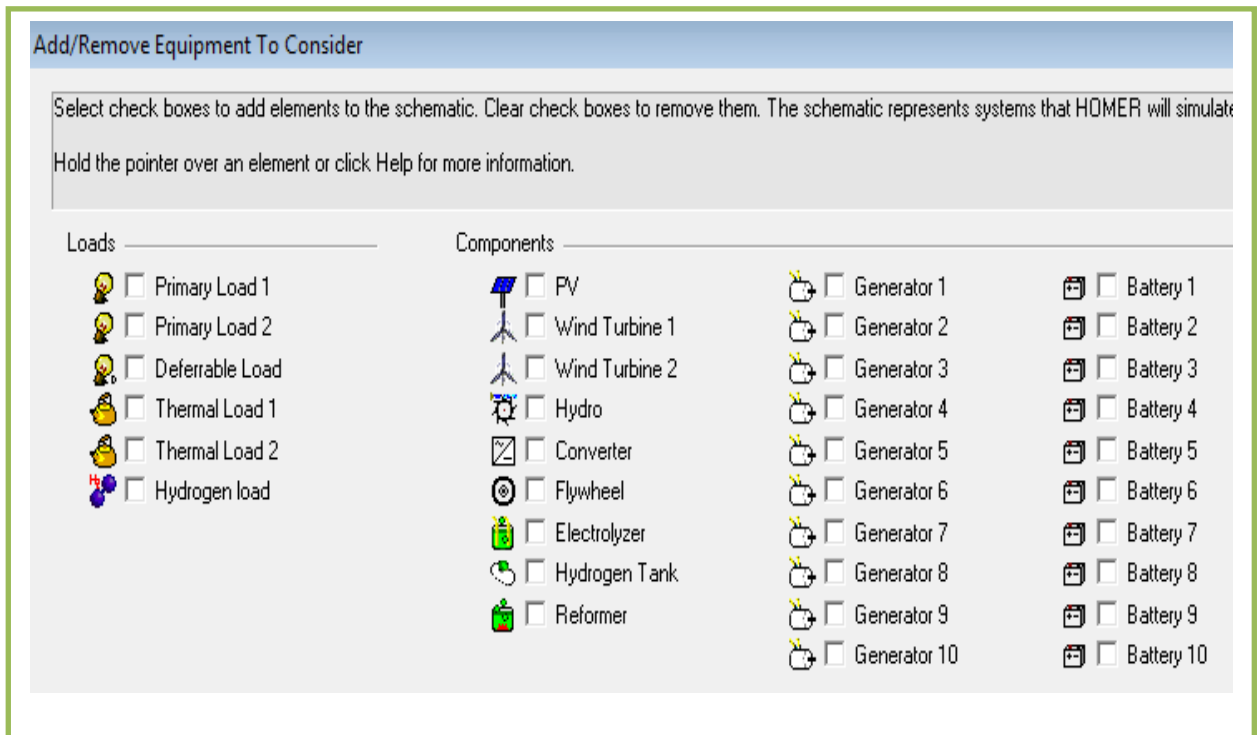
## CHAPITRE III Etude technico-économique du système PV-PAC

Le logiciel HOMER est facile à utiliser et son interface est similaire aux logiciels usuels, il contient donc un Menu dans le haut ainsi que des icônes que l'on peut utiliser sans aller dans les menus. On peut considérer que l'interface d'HOMER contient trois zones importantes comme indiqué sur la **Fig. (III.04)**: la zone de définition du système.



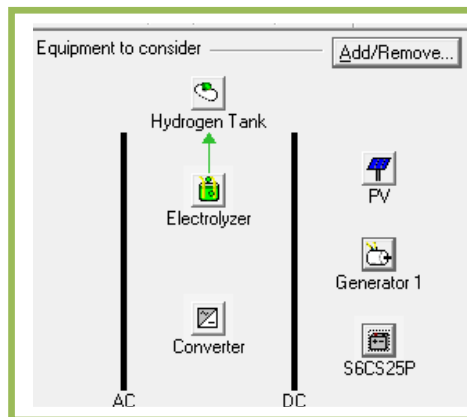
**Fig. (III.4)** Interface du logiciel HOMER

**La zone 1:** Dans cette zone on peut faire la définition du système et aussi en fait le choix des équipements qui seront inclus dans le système à modélisé, ainsi qu'il suffit de cocher les éléments à utiliser selon les choix illustrés à la **Fig. (III.5)**.



**Fig. (III.5)** La fenêtre des équipements disponible dans HOMER

Lorsque on a sélectionné les divers équipements et les sources nécessaires à l’installation dans la **zone 1** de définition nous obtenons le système comme il est illustré dans la **Fig. (III.6)** puis on définit les ressources dans la **zone 02** comme il est présenté dans la **Fig. (III.6)**









**Fig. (III.06)** Équipements sélectionnés à partir de la zone 1



**Fig. (III.7)** Les ressources dans HOMER

Dans le tableau suivant on a présenté les détails des données des ressources qu'il faut remplir après la simulation (détaille de **Fig. (III.7)**)

**Tab. (III .1) :** Détaille des ressources dans HOMER

	Dans cette icône il y a les détails économiques du système (la durée de vie du projet, les coûts fixes du système en capital, les coûts fixe du système en opération et maintenance et les pénalités dues aux coupures de courant, Renseigner le taux d'intérêt réel annuel)
	Dans cette icône on a rentré les détails de contrôle du système (Renseigner l'échantillonnage en temps, les différents modes de fonctionnement et de contrôle du groupe électrogène,
	HOMER utilise la température afin de calculer la production d'électricité par les panneaux photovoltaïques. En effet, plus la température est élevée, plus le rendement des panneaux photovoltaïques est faible.
	Dans cette icône il y a ressources solaires: Il existe deux méthodes pour récupérer les données de radiation du soleil :1 rentrer les coordonnées géographique, HOMER se charge ensuite de récupérer l'irradiation moyenne mensuelle- 2à récupérer des données plus précise sur le site Research Center of the European Commission – PVGIS : <a href="http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/">http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/</a> .
	On a utilisé cette fenêtre pour rentrer les émissions pour spécifier une pénalité de coût associée à un polluant ou une limite d'émissions d'un polluant.
	Les contraintes sont les conditions que le système doit satisfaire. HOMER met de côté les systèmes ne satisfaisant pas les contraintes, ils n'apparaissent donc pas dans les résultats d'optimisation.

### III.4.4. Détails de la charge dans HOMER


Les détails de la charge sont les entrées des simulations exécutées par le logiciel. La charge en entrée correspond à la demande en électricité auquel le système doit répondre soit cette charge AC ou DC, et pour sélectionner le type de charge on appuie sur l'icône  [38].




Fig. (III.8) Méthode de Sélection le type de charge dans HOMER 2.81

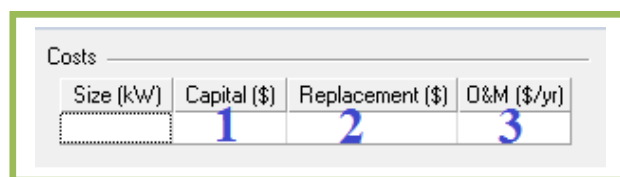
### III.4.5. Détails des composants du système

Les détails des composants décrivent les options technologiques, les coûts, la taille et le nombre de chaque composants que HOMER va utiliser dans ses simulations, nous prendre par exemple le convertisseur.

#### III.4.5.1. Détails du convertisseur

Chaque système contenant à la fois des éléments à courant continu et à courant alternatif qui doivent être doté d'un convertisseur, pour accéder aux détails du convertisseur, on cliqué lorsque en

appuie sur l'icône , on obtient la figure (III.09) qui contient le coût, la taille d'un convertisseur (en kW), son coût à l'achat (en \$), son coût en remplacement (en \$) et ses coûts d'opération et maintenance (en \$).



Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
	1	2	3

Fig. (III.9) Détail des données de convertisseur choisie

Lorsque on a rempli le tableau des tailles à considérer, on a remplir les données de puissance qui seront utilisées pour notre simulation puis on a renseigné ensuite les propriétés du convertisseur: la durée de vie et le rendement, la capacité à fonctionner en mode onduleur, et la capacité à fonctionner en mode redresseur.

### III.4.6. Procédure d'évaluation de coût global du système dans l'HOMER

Lorsque on démarre une étude dans l'Homer, il faut spécifier le coût des composantes utilisées et les autres coûts tel que le coût initial, le coût de remplacement et le coût d'opération et de maintenance ( $C_o$ ), la définition de chaque coût est détaillé ci-dessous:

#### III.4.6.1. Coût initial ( $C_i$ )

Pour toutes les sources nous avons un coût initial correspondant à l'achat des différents éléments, ces coûts ne sont pas actualisés car nous considérons que les achats sont faits au début du projet. En réalité ils sont faits un peu avant le début du projet.

#### III.4.6.2. Coût de remplacement ( $C_r$ )

Chaque composant du système a une durée de vie. Il doit être remplacé périodiquement sur toute la durée du fonctionnement du système hybride, dans la plupart des cas, le générateur éolien et le générateur photovoltaïque ont une durée de vie proche de la durée de vie du système, donc un coût de remplacement pratiquement nul.

#### III.4.6.3. Coût d'opération et de maintenance ( $C_o$ )

Doivent être calculés, déterminer les coûts d'opération et de maintenance des différentes sources durant les années du projet. Ces coûts doivent donc être actualisés et correspondent à une maintenance de révision, de renouvellement de consommables (huiles, filtres, etc) et de vérification des éléments.

#### III.4.6.4. Coût de salvage ( $C_s$ )

Le coût dit de salvage (terme Anglais) est le prix que l'on peut récupérer à la fin de vie si l'on revendait le reste de vie de chacun de nos éléments. Pour calculer ceci nous devons calculer la portion de vie utilisée à partir du dernier remplacement.

#### III.4.6.5. Coût total net actuel du système (NPC)

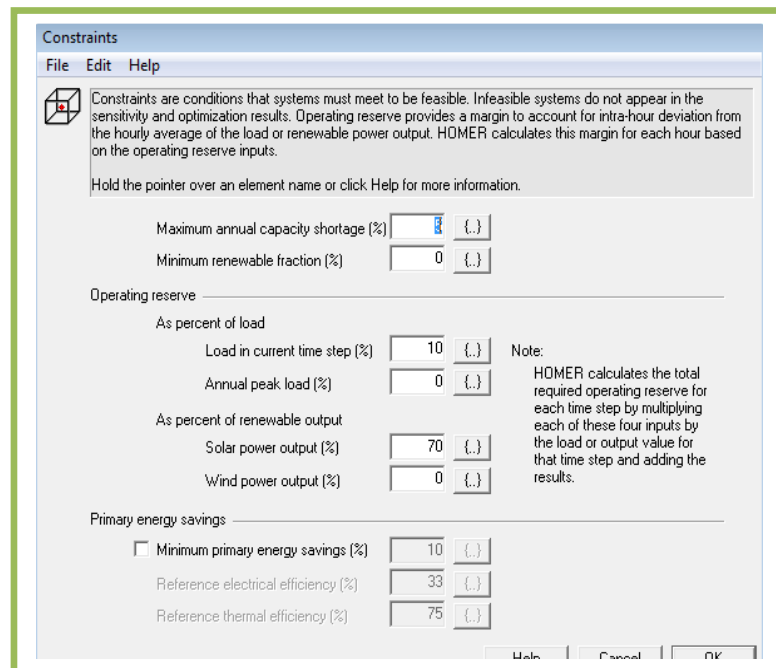
Est une valeur actualisée de tous les coûts encourus par le système pendant sa durée de vie, moins la valeur actualisée de tous les revenus qu'il génère pendant sa durée de vie. Les coûts comprennent les coûts en capital, les coûts de remplacement, les coûts d'exploitation et d'entretien, les coûts du combustible, les pénalités sur les émissions et les coûts d'achat de l'électricité du réseau. Les produits comprennent la valeur de récupération et les produits tirés de la vente des réseaux.

#### III.4.6.6. Déclaration des contraintes du système dans HOMER

Les contraintes s'associent à la réserve d'exploitation, la capacité maximale du stockage annuelle, fraction minimale de l'énergie renouvelable que le système devrait satisfaire, la valeur la plus connue

## CHAPITRE III Etude technico-économique du système PV-PAC

pour le déficit de capacité annuelle maximale du système est zéro, de telle sorte que lorsque le système fonctionne à cette valeur, les sources d'alimentation doivent satisfaire à 100 % la charge électrique avec plus de réserve de fonctionnement requise dans ce cas les chances ou les moments d'interruption d'énergie sont très minimes et ce critère plus important lorsque le système est dédié à alimenter des charges sensibles à l'interruption d'énergie où les systèmes qui sont approvisionnés en tout temps, et dans ce cas sont nécessaires de laisser la capacité annuelle maximale à zéro mais le système devient coûteux, par contre lorsqu'on a accepté un déficit de capacité annuelle maximale du système entre 1% et 5% c'est-à-dire on a augmenté la possibilité de l'interruption de l'énergie électrique à la charge qui provoque une diminution de coût par rapport au premier cas, la figure suivante montre la fenêtre de sélection des contraintes **Fig. (III.10)**.



**Fig. (III.10)** Fenêtre de déclaration des contraintes du système

### III.4.6.7. Sélection le temps de fonctionnement du composant du système

Dans l'HOMER il y a la possibilité de sélectionner le temps de fonctionnement de quelque composant dont dans ce logiciel il y a le choix de fonctionnement de telle sorte que :

Soit l'HOMER choisit seul le temps de fonctionnement du système ou l'utilisateur qui choisit le temps de fonctionnement ou le temps de repos de ce composant, par exemple la pile à combustible ou l'électrolyseur, la **Fig. (III.11)** montre la matrice de choix de temps de fonctionnement.



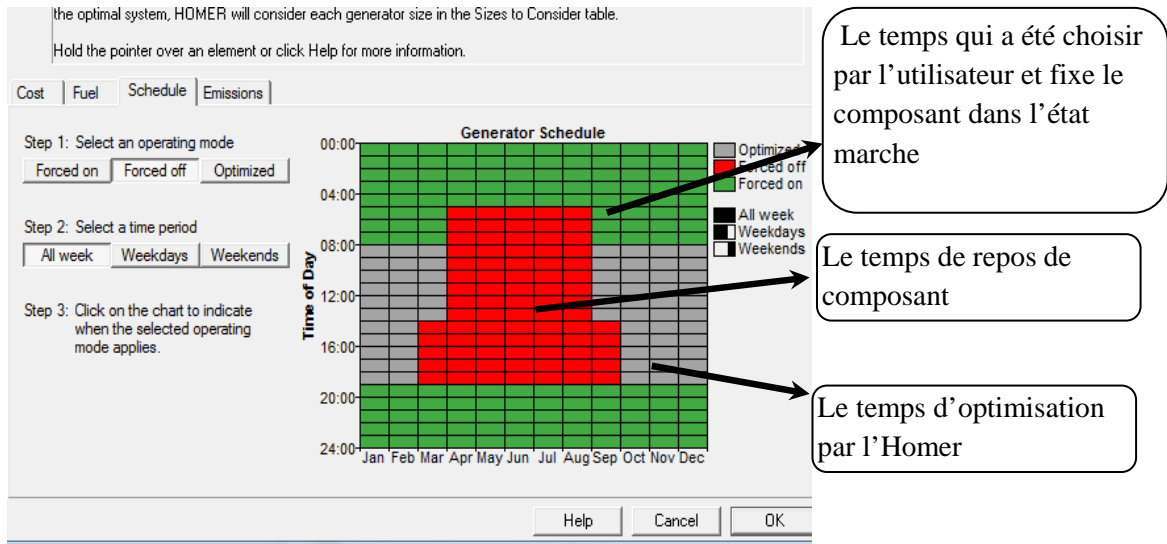


Fig. (III.11) Le choix de temps de fonctionnement de composant

III.4.6.8. Déclaration les donnees nécessaire des composants

Les données à faire rentrer sont celles reliées à la zone 1 et 2 du logiciel HOMER. Il s’agit des données reliées à la consommation énergétique, aux équipements (panneaux solaires photovoltaïques, éoliennes, génératrices, onduleurs, batteries ou autres équipements) et aux ressources nécessaires comme les données de gisement solaire ou éolien, aussi bien que les données reliées au combustible utilisé par la génératrice, il y a aussi certains paramètres économiques que l’on peut modifier. D’autres paramètres permettent différents contrôles du système (surtout au niveau de la simulation des banques des batteries et des génératrices). Dans la zone des ressources, on peut aussi mettre des pénalités monétaires pour les émissions émises ou bien un seuil limite d’émissions à ne pas dépasser lorsque la simulation sera effectuée. Finalement, certaines contraintes peuvent être exigées comme une fraction minimale d’énergie renouvelable à avoir dans le système. Une fois toutes les sections remplies, on peut lancer la simulation en cliquant sur l’icône « calculer » Fig. (III.12).

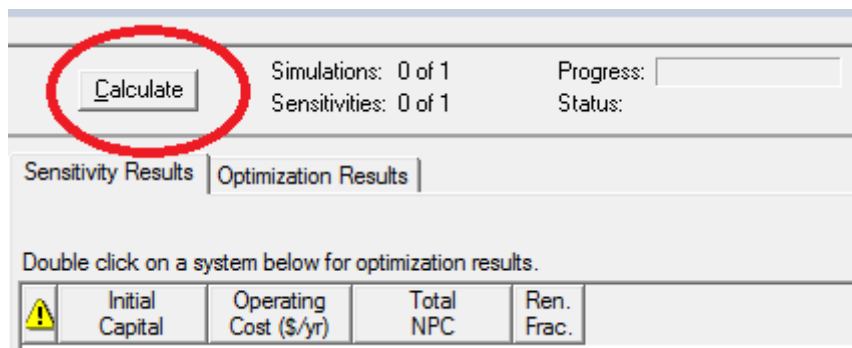
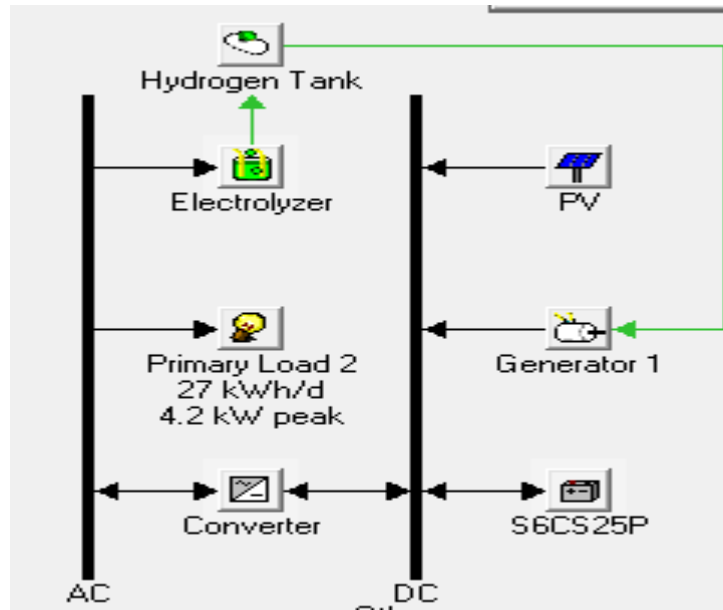


Fig. (III.12) Lancement de simulation dans HOMER

### III.4.7 Etude techno économique Système PV-Electrolyseur- PAC

Le système étudié dans notre cas est illustre ci-dessous:



**Fig. (III.13)** Schéma générale du système PV-PAC –Electrolyseur sur HOMER.

#### III.4.7.1. Description le site d'étude

Le cas choisi de cette étude est le LABORATOIRE DE GENIE ELECTRIQUE ce dernier située dans La ville de Ouargla au SUD de l'Algérie à l'altitude :  $31^{\circ},95''$  N et longitude :  $5^{\circ},33''$  E.



**Fig. (III.14)** Emplacement géographique de site

#### III.4.7.2. Analyse de la Charge

Pour concevoir et optimiser tout système, il est essentiel de comprendre et d'étudier les exigences de la charge de l'emplacement souhaité. Cette étape est cruciale lors de la conception d'un système, sans laquelle elle pourrait mener à une sous-estimation ou à une surestimation de la consommation. Par conséquent, il est très important de comprendre le comportement stochastique de l'énergie disponible pour servir la charge. Nous avons choisi le système d'énergie renouvelable hybride à

## CHAPITRE III Etude technico-économique du système PV-PAC

étudié dans la région de Ouargla au noter charge est LAGE (LABORATOIRE DE GENIE ELECTIQUE).



**Fig. (III.15) :** Logo du laboratoire gène électrique

La consommation moyenne d'énergie de LABO est de 27 kWh/jour pour les différentes charges, la valeur de peak de mois est estimée à 4,2 kW. L'équipement le plus fréquemment utilisé se résume à : l'éclairage, Ordinateur portable la Pressé (chargeur de la batterie pour mobile..), réfrigération, Climatiseur, et plus d'autres appareils.

La pic d'énergie demandée situé le matin entre 8:00h -12:00h avec demande moyenne d'énergie dans l'intervalle de 15 :00h - 17 :00 h.

**Tab. (III.2) :** La consommation des appareils considérés dans une LAGE

Type d'appareille électrique	Nombre	La puissance électrique (W/h)	Durée d'utilisation
Ordinateur portable	3	50	11
Imprimant	1	500	6
Lampe d'éclairage	3	72	11
Fontaine fraiche d'eau	1	100	24
Routeur Wifi	1	20	11
Pressé (chargeur smart phone)	6	20	11
Climatiseur	1	1200	11
Réfrigérateur	1	100	24

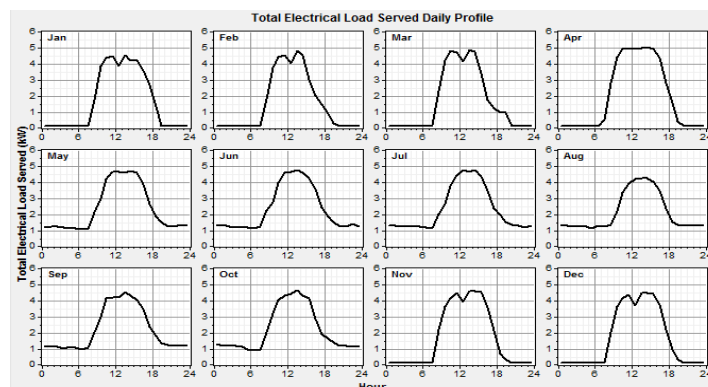
Dans le tableau suivant (**Tab III.3**) on a présenté un exemple sur la charge qui a été consommé dans le mois de janvier avec le temps de fonctionnement de chaque composante.

## CHAPITRE III Etude technico-économique du système PV-PAC

**Tab. (III.3).** Estimation de la consommation de puissance en janvier en KW

Houer	Imprimant	Réfrigérateur	Lampe d'éclairag	Climatiseur	Ordinateur portable	Pressé (chargeur smart phone	Routeur Wifi	Fontaine fraiche	total on (KW)
00 :00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
01 :00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
02 :00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
03:00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
04:00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
05:00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
06:00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
07:00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
08:00	0,5	0,1	0,21	0	0,5	0,12	0,02	0	1,45
09:00	0,5	0,1	0,21	0	0,5	0,12	0,02	0	1,45
10:00	0,5	0,1	0,21	0	0,5	0,12	0,02	0	1,45
11:00	0,5	0,1	0,21	0	0,5	0,12	0,02	0	1,45
12:00	0	0,1	0	0	0	0	0,02	0	0,12
13:00	0,5	0,1	0,21	0	0,5	0,12	0,02	0	1,45
14:00	0,5	0,1	0,21	0	0,5	0,12	0,02	0	1,45
15:00	0,5	0,1	0,21	0	0,5	0,12	0,02	0	1,45
16:00	0	0,1	0,21	0	0,5	0,12	0,02	0	0,95
17:00	0	0,1	0,21	0	0,5	0,12	0,02	0	0,95
18:00	0	0,1	0,21	0	0,5	0,12	0,02	0	0,95
19:00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
20:00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
21:00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
22:00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
23:00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0,1
<b>Totale</b>									<b>14.42</b>

La profile de consommation de ce mois dans HOMER est illustré ci-dessous



**Fig. (III.16)** Le profil de charge journalière suivant les saisons

## III.4.7.3. Potentiel solaire de la ville d'Ouargla

L'irradiation solaire est donnée pour l'endroit de **longitude : 5°,33" Est** et **l'altitude : 31°,95" Nord**. Les données solaires pour cette ville ont été obtenues à partir du site d'évaluation du gisement solaire " **PV-GIS** "[39] qui est un outil on-line pour estimer l'irradiation solaire de plusieurs villes selon l'endroit, l'inclinaison et l'orientation.

Les graphique **Fig. (III.17)** montrent le profil solaire de ressource sur une période d'une année telle que mesurée sur une surface horizontale, le rayonnement solaire mensuel varie entre 3.6 [kWh/m<sup>2</sup>/j] Au mois de janvier et 7.9 [kWh/m<sup>2</sup>/j] en juillet, une irradiation solaire globale horizontale, moyenne annuelle de 5.552 kWh/m<sup>2</sup>/j . Sur la surface incliné à 30°C.

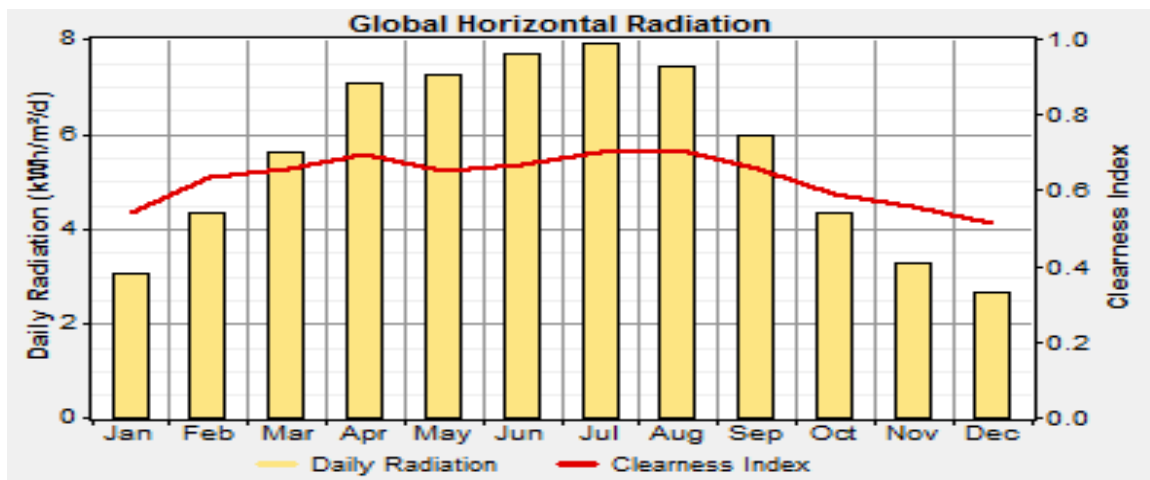


Fig. (III.17) Irradiation solaire annuelle

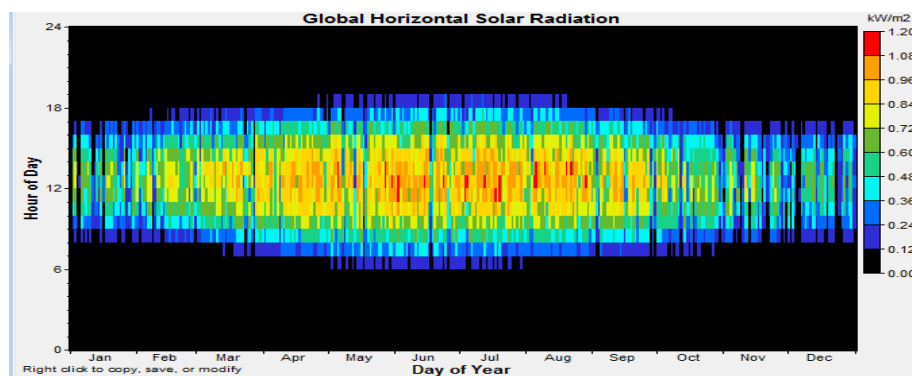


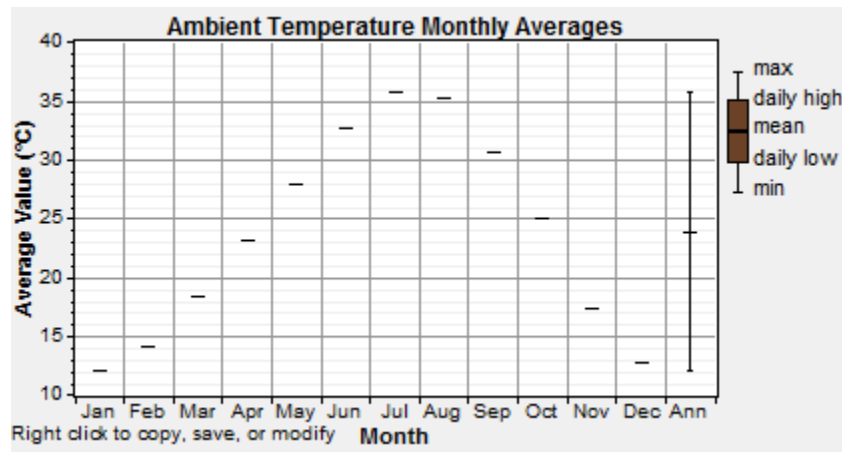
Fig. (III.18) DMAP d'irradiation solaire globale horizontale

La **Fig. (III.18)** montre l'irradiation, solaire globale horizontale dans le graphe **DATA MAP**, On peut remarquer que l'irradiation existe toute la journée avec de grandes valeurs cette irradiation situe dans un mois d'été.

### III.4.7.4. Les données relatives à la température ambiante

La température moyenne mensuelle maximale est de 37 [°C] au mois de Juillet, tandis que la température moyenne minimale est de 13 [°C] au mois de Janvier, ce qui fait une moyenne annuelle de 29 [°C].

Le profil de la température ambiante moyenne mensuelle, est représenté par la **Fig. (III.19)**.



**Fig. (III.19)** Profil de la température ambiante moyenne mensuelle

## III.5. L'optimisation du système PV-PAC –Electrolyseur dans HOMER

L'optimisation du système dans HOMER est basé sur le coûts et le dimensionnement , dans cette partie nous définissons les spécification technique le coût initial et le coût de remplacement du chaque composant.

### III.5.1. Le générateur photovoltaïque

Le coût initiale et de remplacement des panneaux photovoltaïque étant de 1000 \$ / KW [40]. Le coût de maintenance considéré pratiquement nul [41], et La durée de vie des panneaux PV 25 ans, le rendement de la cellule est considéré de 13% dans la condition standard, le panneau est fixé à l'angle d'altitude d'Ouargla.

### III.5.2. La pile à combustible

Le coût des piles à combustible varie selon le type de la technologie, de la taille, des auxiliaires installés,... etc. Le coût de pile à combustible est 1500\$/ KW [40]. Et Le coût de remplacement est de 1500 \$ et de maintenance de 0.080 \$ / h. La durée de vie est de 40000 heures de fonctionnement, le rendement est de 42%.

Le temps de fonctionnement de la pile est entre 17:00-8:00 en hiver 19:00-6:00 h en en été

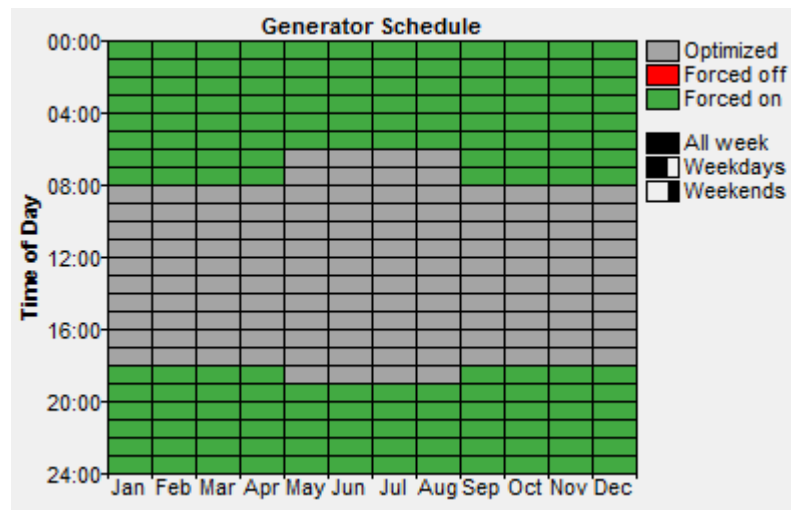


Fig. (III.20) Le temps de fonctionnement de la pile

### III.5.3. L'électrolyseur

Le coût de l'électrolyseur est de 1500 \$/kW, le coût de remplacement est de 1000\$/kW et le coût de maintenance est de 20 \$/an [40]. La durée de vie est de 25 ans, et l'efficacité considérée est de 85%. Et le taux de charge minimal est de 10%.

### III.5.4. La batterie

Pour stocker l'énergie des générateurs photoélectriques et l'alimentation pendant la nuit, les batteries doivent être installées dans le système.

Pour stocker l'énergie des générateurs PV et l'alimentation pendant la nuit, nous devons utiliser des batteries dans le système. le type des batteries utilisé dans ce système est les batteries du plomb-acide Surrette 6CS25P. De tension de 6 V et une capacité de 1156 Ah. Le rendement aller-retour est de 80 %. La durée de vie minimale de batterie est de 3 ans, qui peut varier en fonction du nombre de cycles de charge.

Le coût initial et le coût de remplacement de chaque batterie sont considérés 1150 \$ et 110 \$[40]. Le coût de fonctionnement et de maintenance des batteries est 10\$.

### III.5.5. Le réservoir d'hydrogène

Le coût du réservoir est 1200 \$/kW, le coût de remplacement est 800\$/kW et le coût de maintenance est 15 \$/an [40]. La durée de vie est 25 ans.

# CHAPITRE III Etude technico-économique du système PV-PAC

## III.5.6. Le convertisseur

Les sources d'énergie du système d'énergie sont toutes basées sur le courant continu, mais la charge est basée sur le courant alternatif. , l'utilisation d'onduleurs est nécessaire pour la conversion du courant continu en courant alternatif.

Le coût initial et le coût de remplacement par kilowatt d'onduleur sont considérés 800 \$ et 750 \$[40]. Le rendement d'onduleur 90%.

## III.5.7. Données économiques :

Nous définissons les données économiques comme suit :

- Capacité annuelle du stockage : 0%
- Durée de vie du projet : 25 ans.
- la déficit de capacité annuel maximale du système: 5%

## III.6. Interprétation des résultats de simulation

Après le démarrage de calcul d'optimisation, nous avons obtenu les résultats suivants :

	PV (kW)	Label (kW)	S6CS25P	Conv. (kW)	Elec. (kW)	H2 Tank (kg)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	Label (hrs)	Batt. Lf. (yr)
	14.50	1.5	8	5.1	3.8	3.5	\$ 39,930	946	\$ 52,028	0.426	1.00	0.05	2,967	12.0
	14.44	1.5	8	5.1	4.0	3.5	\$ 40,170	959	\$ 52,427	0.430	1.00	0.05	2,986	12.0
	14.50	1.5	8	5.1	4.0	3.5	\$ 40,230	960	\$ 52,496	0.430	1.00	0.05	2,990	12.0
	14.44	1.5	8	5.1	4.0	3.6	\$ 40,290	961	\$ 52,575	0.431	1.00	0.05	2,987	12.0
	14.50	1.5	8	5.0	4.0	3.7	\$ 40,390	958	\$ 52,633	0.431	1.00	0.05	2,973	12.0
	14.44	1.5	8	5.1	4.1	3.5	\$ 40,320	964	\$ 52,641	0.431	1.00	0.05	2,988	12.0
	14.50	1.5	8	5.1	4.0	3.6	\$ 40,350	962	\$ 52,644	0.431	1.00	0.05	2,991	12.0
	14.50	1.5	8	5.0	4.1	3.6	\$ 40,420	961	\$ 52,709	0.432	1.00	0.05	2,979	12.0
	14.50	1.5	8	5.1	4.1	3.5	\$ 40,380	965	\$ 52,710	0.432	1.00	0.05	2,992	12.0
	14.44	1.5	8	5.1	4.0	3.7	\$ 40,410	963	\$ 52,723	0.432	1.00	0.05	2,988	12.0
	14.44	1.5	8	5.1	4.1	3.6	\$ 40,440	966	\$ 52,789	0.433	1.00	0.05	2,989	12.0
	14.50	1.5	8	5.1	4.0	3.7	\$ 40,470	964	\$ 52,794	0.432	1.00	0.05	2,993	12.0
	14.44	1.5	8	5.1	4.2	3.5	\$ 40,470	969	\$ 52,851	0.433	1.00	0.05	2,988	12.0
	14.50	1.5	8	5.0	4.1	3.7	\$ 40,540	964	\$ 52,857	0.433	1.00	0.05	2,980	12.0
	14.50	1.5	8	5.1	4.1	3.6	\$ 40,500	967	\$ 52,857	0.433	1.00	0.05	2,993	12.0
	14.50	1.5	8	5.1	4.2	3.5	\$ 40,530	969	\$ 52,921	0.433	1.00	0.05	2,993	12.0
	14.50	1.5	8	5.0	4.2	3.6	\$ 40,570	966	\$ 52,923	0.434	1.00	0.05	2,981	12.0
	14.44	1.5	8	5.1	4.1	3.7	\$ 40,560	968	\$ 52,937	0.434	1.00	0.05	2,990	12.0
	14.44	1.5	8	5.1	4.2	3.6	\$ 40,590	971	\$ 52,998	0.434	1.00	0.05	2,989	12.0
	14.50	1.5	8	5.1	4.1	3.7	\$ 40,620	969	\$ 53,007	0.434	1.00	0.05	2,995	12.0

Fig. (III.21) : Résultats de l'optimisation du système (LAGE)

A partir de ces résultats, nous constatons que le système hybride idéal utilisé est celui qui contient :

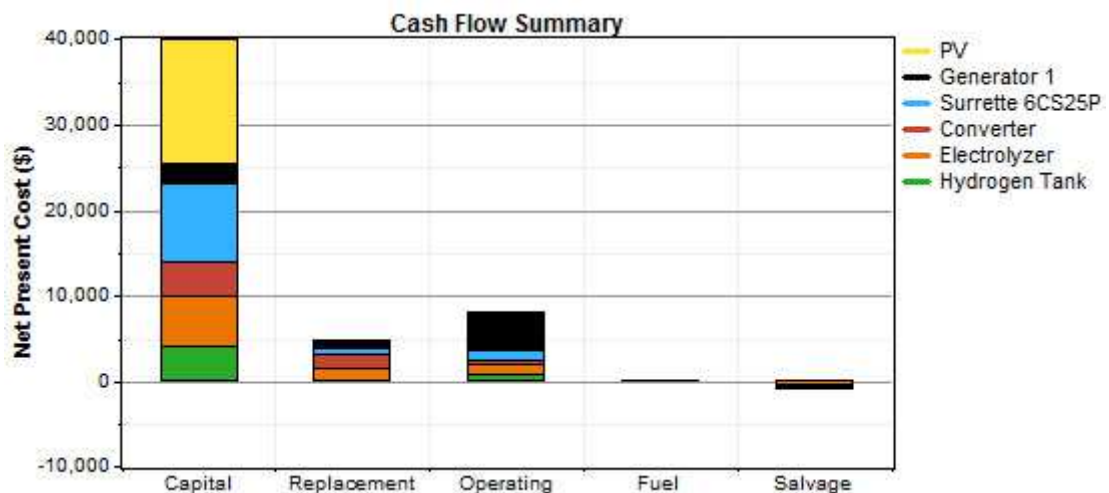


PV 4.5 KW	L'électrolyseur 3.8 KW
PAC 1.5 KW	batterie S6CS25P 8
Réservoir de $H_2$ 3.5 Kg	Convertisseur 5.1 KW

**Fig. (III.22)** Conception du système hybride

L'HOMER classe les résultats dans la liste de la **Fig. (III.21)** selon la valeur du NPC (Net Present Cost) et le coût initial de projet, On remarque que le meilleur système utilisé et le système de premier résultat. Dans la figure **Fig. (III.21)** le système montré a un coût initial de projet 39 930 \$ l'équivalente 4743684.00 DA, un coût total net actuel du système 52 028 \$/25 ans avec (0.426\$/KWh). Les résultats ont été répartis comme suit :

Nous trouvons que le coût le plus élevé dans le système utilisé est représenté par le prix des panneaux photovoltaïques (avec initiale coût de : 14,500\$ ), et les batteries (a initiale coût de: 9200\$ )avec un coût de remplacement égale (4,862\$) et (salvage) de (-857\$).



**Fig. (III.23)** Résumé des flux de trésorerie pour le système hybride

De la **Fig. (III.23)** l'inducteur de remplacement on trouve que le projet n'a pas changé complètement tous les dispositifs comme était prévu il y a 20 ans, Sauf la pile à combustible et en ce qui concerne certaines petites pièces après environ tous les 4 ans et sauf les batteries qui ne durent pas plus de 5 ans.

### III.6.1. Les résultats de l'énergie produite

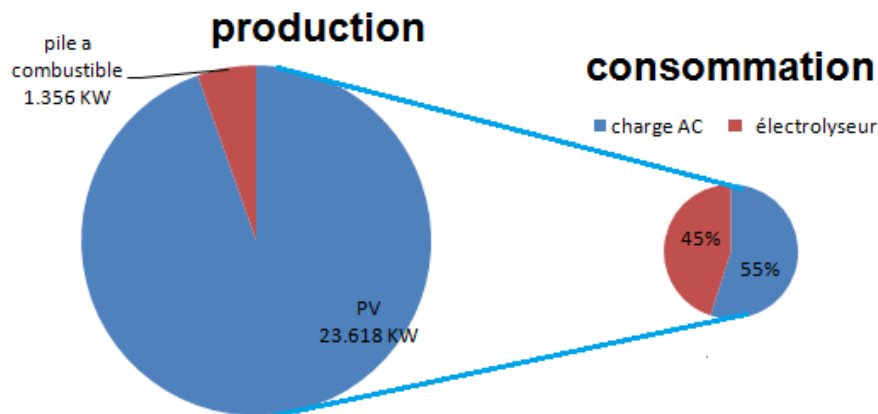
D'après les résultats l'optimisation, la pile à combustible fonctionne 2967 h/an, Il consomme environ 168 kg/an de  $H_2$ . En conséquence, la durée de vie est estimée à 3,22 ans.

## CHAPITRE III Etude technico-économique du système PV-PAC

Le système PV-PAC-Électrolyseur de production annuelle totale d'énergie électrique de 24.97 KWh/an, dont 90% a été produite par le générateur photovoltaïque et 10% par la pile à combustible. Les résultats sont présentés à la **Fig.(III.24)**.

Production	kWh/yr	%	Consumption	kWh/yr	%
PV array	23,618	95	AC primary load	9,552	55
Generator 1	1,356	5	Electrolyzer load	7,815	45
Total	24,973	100	Total	17,367	100

**Fig. (III.24)** Résultats de production électrique



**Fig. (III.25)** Le graphique résume la production et la consommation électrique

De la **Fig. (III.25)** on constate que la production de l'énergie par le système hybride optimal durant une année complète de fonctionnement présente une continuité de production d'énergie, On a remarqué que la quantité d'énergie produite par le système hybride est de (24.97KWh/an) divisé par :

Le photovoltaïque produit la plus grande quantité, soit (23.61KWh/an) avec 53 %.

La pile à combustible a produit (4726KWh/an) avec 25%.

On a remarqué que l'énergie électrique totale produite (1.35KWh/an) est consommée comme suit :

- ❖ Le laboratoire LAGE (9.55KWh/an).
- ❖ La quantité restante qui est (7.81 KWh/an), utilisée par l'électrolyseur

La **Fig. (III.26)** indiquée ci-après la puissance électrique produite par (générateur PV, PAC) au cours des mois de l'année, nous remarquons que la plus grande valeur de production d'énergie solaire sera en mois de mai, environ (2.3 KWh), et la plus faible valeur en janvier environ (1.8 KWh) Cette baisse est due au changement du rayonnement solaire au cours de l'année à Ouargla.

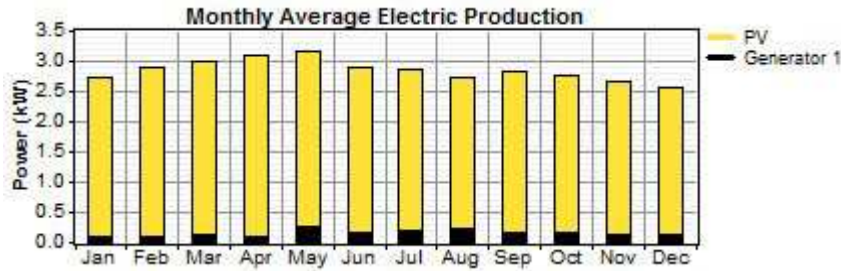


Fig. (III.26) Énergie mensuelle totale produite par le système hybride pendant un année

### III.6.2. Panneaux solaires (PV)

La production de l'énergie électrique commence après le lever du soleil à tout moment, entre (7 h et 9 h), en automne et en hiver, et entre (5h et 7h) en printemps et à l'été d'une très faible quantité d'environ (1.2 à 2.5kW) , Mais après ce temps, depuis (10h et 11h) elle augmente entre (4.2 et 7 kW), mais à midi elle atteint son sommet de (9.8 kW), Diminuant progressivement voire inexistante au coucher du soleil soit entre (16h à 17:30h) dans chacun des deux saisons : l'hiver et l'automne et entre (17h à 19h) en été et au printemps. Pour une durée totale de fonctionnement de 4379 h/an à un prix de 0,048 \$/kWh.

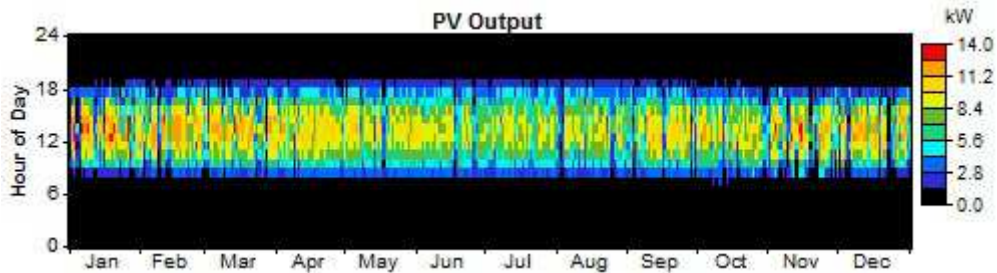


Fig. (III.27) La quantité d'énergie totale quotidienne produite par le PV pendant une année

### III.6.3. Pile à combustible

Dans le cas normale la pile produit l'énergie électrique dans la nuit (17:00h à 8:00h) en automne et en hiver ce production est faible 0.16 KW/ h par ce que la demande de charge est faible, dans l'été et au printemps la pile fonctionne (18:00 à 00:00h) et la production augmente elle varie entre 0.96 et 1.96 KW/h , la pile consomme 168 kg/ ans d'hydrogène avec à un prix de production électrique de 0,176 \$/kWh.

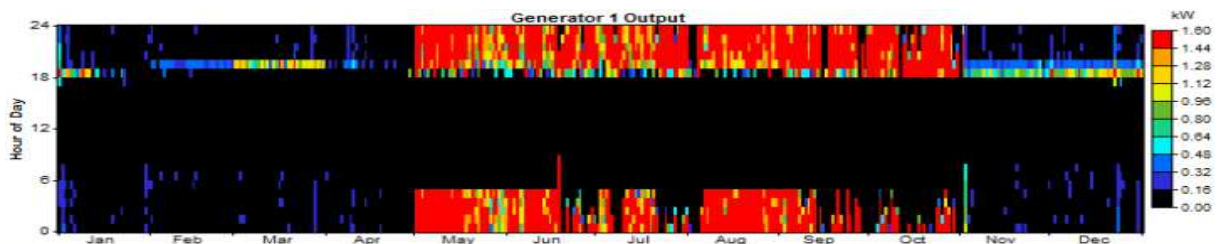
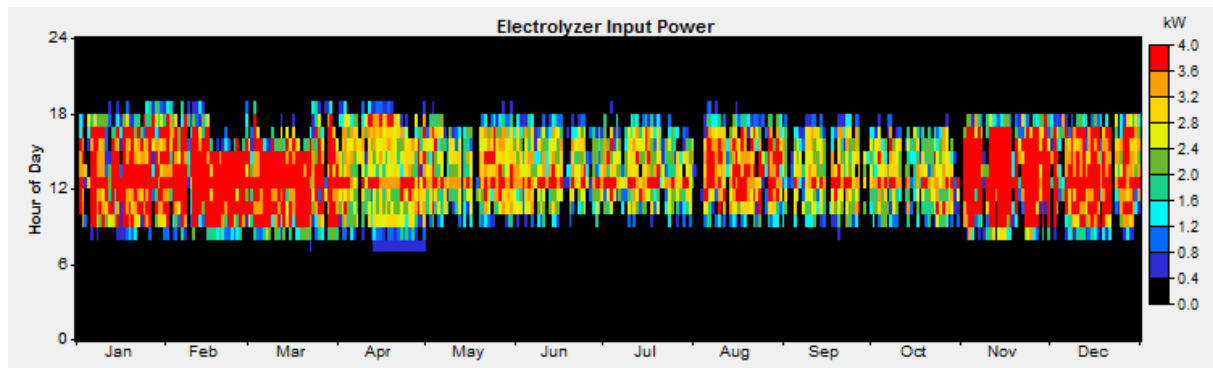


Fig. (III.28) La quantité d'énergie totale quotidienne produite par le PAC pendant une année

## III.6.4. Electrolyseur

On remarque que l'électrolyseur fonctionne toute la journée dans l'année, la durée de fonctionnement est de 5543 h/ans, et produit 0.019 kg/h avec une production totale d'hydrogène de 168 kg/ans.

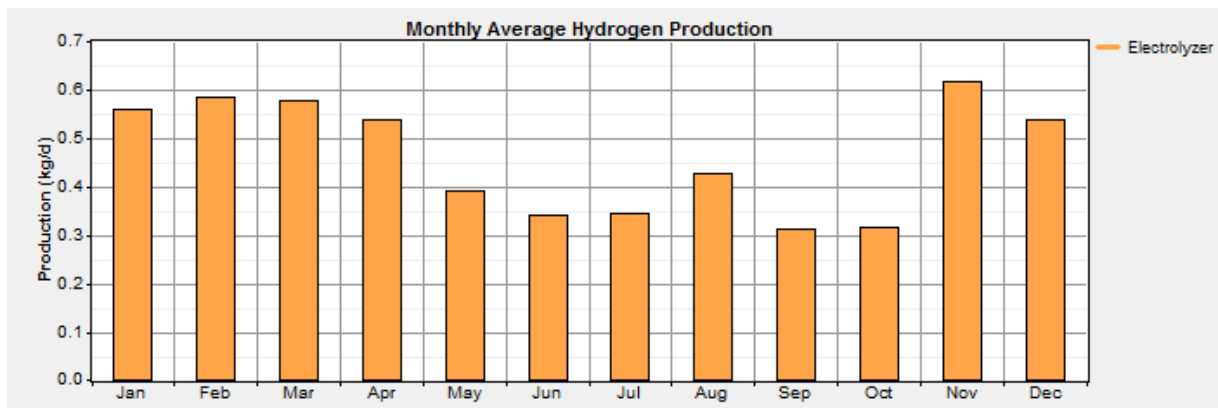


Fig(III.29) Le temps de fonctionnement de l'électrolyseur d'eau

## III.6.5. Production mensuelle moyenne d'hydrogène

Pour assurer la continuité de fonctionnement de la pile à combustible, l'électrolyseur doit produire de l'hydrogène toute l'année, la figure Fig(III.30) montre la production journalière moyenne dans chaque mois.

Dans les premiers mois de l'année l'électrolyseur produit une valeur de 0.55 kg/j, puis cette valeur diminue à (0.32 kg/j) à cause de la consommation par la pile qui va diminuer dans les mois de juin et juillet, ensuite dans le mois de novembre l'électrolyseur produit une valeur de 0.63 kg/j.



Fig(III.30) Resultat de production hydrogène pendant une année

## III.7. Conclusion

Dans ce chapitre une brève description d'un système hybride de génération de l'énergie électrique et les principales notions liées au type d'architecture du système ont été aussi présentés, en suite nous avons expliqué et donné une vue d'ensemble sur le logiciel HOMER, qui permettant une compréhension idéale du fonctionnement du programme, l'objectif de l'utilisation de l'Homer est

## CHAPITRE III Etude technico-économique du système PV-PAC

---

la simulation et l'optimisation destiné à l'étude d'installation de production d'énergie avant la réalisation du système .

Nous avons fait une étude technico-économique du système hybride PV / PAC par le logiciel Homer. Nous avons constaté qu'à partir des résultats de cette étude notre système hybride utilisé dans les régions de Ouargla à :

- Un cout initial de projet 39 930 \$ /439 230 000DA
- le coût total net du système 52 028 \$ / 572 308 000 DA pour 25 ans.
- le coût production électrique 0.426\$/KWh 426DA/KWh.

On concluons :

Dans ce chapitre on a présenté les résultats de l'étude par HOMER, d'une installation PV-FC. Les inconvénients de l'installation d'un système PV-FC autonome est sont coût élevé de la technologie photovoltaïque. Les faibles émissions des gaz à effet de serre est l'avantage le plus important de notre installation.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Dans cette étude, nous avons effectué l'analyse technico-économique d'un système d'énergie renouvelable conçu pour alimenter un profil de charge (Laboratoire de génie électrique à l'université de Ouargla), le système étudié est composé essentiellement du générateur photovoltaïque une pile à combustible et l'électrolyseur de l'eau pour produire l'hydrogène avec la présence des batteries et des convertisseurs.

Dans le but d'établir un dimensionnement optimal de notre système, nous avons utilisé le logiciel HOMER ce logiciel spécialisé pour l'optimisation économique et le dimensionnement du système pour évaluer la compatibilité technique ainsi que la fiabilité économique avant l'exécution du projet. Pour cela nous avons présenté une description générale de l'HOMER et les diverses opérations qui peut être effectuées, en suite nous avons commencé l'étude économique de l'installation PV-PAC qui peut satisfaire l'alimentations de notre laboratoire de génie électrique qui consommé une énergie de 27 KWh/jour, en premier lieu nous avons présenté les ressources énergétiques et les coûts de chaque composant des sous systèmes avec les données de radiation du soleil, ensuite l' HOMER propose le système le plus optimum avec le dimensionnement du système hybride qui pourras être utilisé.

Dans cette étude nous avons pris en considération tous les coûts sur toute la durée de vie de projet. Ceux-ci incluent non seulement les coûts initial mais aussi les coûts de remplacement - le coût l'exploitation, d'entretien et d'installation)

Les résultats de l'analyse économique obtenus montrent que:

(4 DA le kilowattheure en moyenne)

- Le coût initial de projet : **39 930 \$ / 4743684.00 DA**
- Le coût présent net (NPC): **52 028 \$ / 572 308 000 DA**
- Le coût de production d'énergie électrique: **0.426\$/KWh 426 DA/KWh.**

Nous remarquons que le prix du kilowattheure de notre système est élevé par rapport au prix de l'énergies conventionnelles la différence dans le prix revient au coût initiale des équipements ( les panneaux photovoltaïques =**14,500 \$ /159 500 000 DA** ,les batteries = **9,200\$/101 200 000 DA**), malgré que le prix du kWh est élevé pour notre cas, notre système a plusieurs avantages qui sont :

- Le système étudié permet d'alimenter (LAGE) d'une façon continue.
- la dure de vie de SEH est de **25 ans**
- système indépendant du réseau
- plus propres que les énergies fossiles

## CONCLUSION GENERALE

---

Bien que les techniques d'énergies renouvelables aient généralement un coût d'investissement supérieur à celui des énergies conventionnelles, ce qui induit des réactions stipulant leur non admissibilité, ce point de vue ignore totalement le coût d'exploitation et d'entretien de tout système énergétique. En effet, les techniques d'énergies renouvelables présentent un moindre coût d'exploitation.

Pour la poursuite de notre travail nous proposons comme des perspectives:

- L'évaluation de la gestion d'énergie au sein du système hybride et les phénomènes transitoires liés à la connexion de plusieurs composants électriques.
- L'insertion du coût de la surface d'installation du système dans l'étude technico-économique.



# **Références Bibliographiques**

### Références bibliographiques

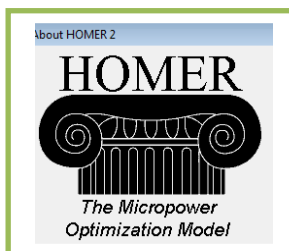
- [1] K.Mahmoude, A.Tsamda « Développement d'un logiciel de dimensionnement des installations photovoltaïques » projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état Ecole National polytechnique 2007.
- [2] Laurent BRIDIER, « Modélisation et optimisation d'un système du stockage couplé à une production électrique renouvelable intermittente», Thèse docteur de l'université de la REUNION, 27 mai 2017.
- [3] F. POITIERS « étude et commande de generatrices, asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes 2003.
- [4] A.labouret, M.villoz, «Installations photovoltaïques»5<sup>e</sup> edition, Dunod, paris, 2012.
- [5] <http://pile-a-hydrogene.e-monsite.com/pages/l-hydrogene/comment-stocker-l-hydrogene.html>
- [6] Labouret, Anne et Villoz, Michel, « Installations photovoltaïques-5e éd, Conception et dimensionnement d'installations raccordées au réseau » Dunod, 2012.
- [7] Chabane, Foued, « Modélisation des paramètres de la conversion thermique de l'énergie solaire», Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, 2015.
- [8] A. Lauger.J.A.Roger « Les photopiles solaire» technique et documentation ,1981.
- [9] A. Betka, «Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque » thèse de Magister, 2004.
- [10] Hania, AMARDJIA-ADNANI, « Algérie énergie solaire et hydrogène développement durable », Edition OPU 2007.
- [11] Algérie énergie N°2 « Revue de ministère de l'énergie et de l'industrie pétrochimique» Aout 1983.
- [12] M. Capderou, « Atlas solaire de l'Algérie », Office des publications universitaire Tome 2, Algérie 1986.
- [13] David Blaise TSUANYO «Approches technico-économiques d'optimisation des systèmes énergétiques décentralisés: cas des systèmes hybrides PV/Diesel » Thèse de doctorat, université de perpignan via domitia, 2015.
- [14] S.Diaf, G.Notton,M.Belhamel,M.Maddadi,and A.Louche, « Design and techno economical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions », Appl. Energy, vol. 85, no. 10, pp. 968–987, Oct. 2008.
- [15] S. Rolland and G. Glania, « Hybrid mini-grids for rural electrification: lessons learned », Alliance Rural Electrification ARE Bruss. Belg. Mar, 2011.

- [16] A. KAABECHE, M. BELHAMEL, R. IBTIOUEN, S. MOUSSA et M. R. BENHADDADI, « Optimisation d'un système hybride (éolien – photovoltaïque) totalement autonome », *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 9, N°3 199 – 209, 2006.
- [17] B. BOURGESM, « Improvement in solar declination computation », *Solar Energy*, Vol. 35, N°4, pp. 367 - 369, 1985.
- [18] Phatiphat THOUNTHONG, thèse « Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs », institut national polytechnique de lorraine 2005.
- [19] S. Abada « étude et Optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur SEPIC » Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en génie électrique pour l'obtention du grade de Maîtrés Sciences (M,Sc).2011.
- [20] Elhadidy, M.A, Shaahid, S.M, Feasibility of hybrid (wind + solar) power systems for Dhahran, Saudi Arabia. *Renewable Energy*, vol. 16, pp. 970-976, 1999.
- [21] B.Azoui « Concept and realization of a three phase Brushless DC Motor (BLDCM) for solar application », Thèse de doctorat en science, University of Batna 2002.
- [22] R. Baños, F. Manzano-Agugliaro, F. G. Montoya, C. Gil, A. Alcayde, and J.Gómez, « Optimization methods applied to renewable and sustainable energy. A review », *Renew. Sustain. Energy Rev*, vol. 15, no. 4, pp. 1753–1766, mai 2011.
- [23] HADJAISSA Aboubakeur, thèse de doctorat « la gestion optimisée d'énergie électrique photovoltaïque / pile à combustible » école nationale polytechnique 2016.
- [24] J. L. Bernal-Agustín and R. Dufo-López, « Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems, » *Renew. Sustain. Energy Rev*, vol. 13, no. 8, pp. 2111–2118, Oct. 2009.
- [25] M. Muselli, G. Notton, and A. Louche, « design of hybrid photovoltaic power generator, with optimization of energy management », *Sol. Energy*, vol. 65, no. 3, pp. 143–157, février 1999.
- [26] Kréhi Serge AGBLI « Modélisation multiphysique des flux énergétiques d'un Couplage Photovoltaïque-Electrolyseur PEM–Pile à Combustible PEM en vue d'une application stationnaire », Thèse de doctorat l'Université de Franche-Comté. 2012.
- [27] B. BOURGESM, « Improvement in Solar Declination Computation », *Solar Energy*, Vol. 35, N°4, pp. 367 - 369, 1985.
- [28] W. E. Outlook, the IEA World Energy Outlook 2014. *World Energy Outlook*, 2014.
- [29] Y. S. Mohammed, M. W. Mustafa, and N. Bashir, « Hybrid renewable energy systems for off-grid electric power: Review of substantial issues » *Renew. Sustain. Energy Rev*, vol. 35, pp. 527–539, juill 2014.

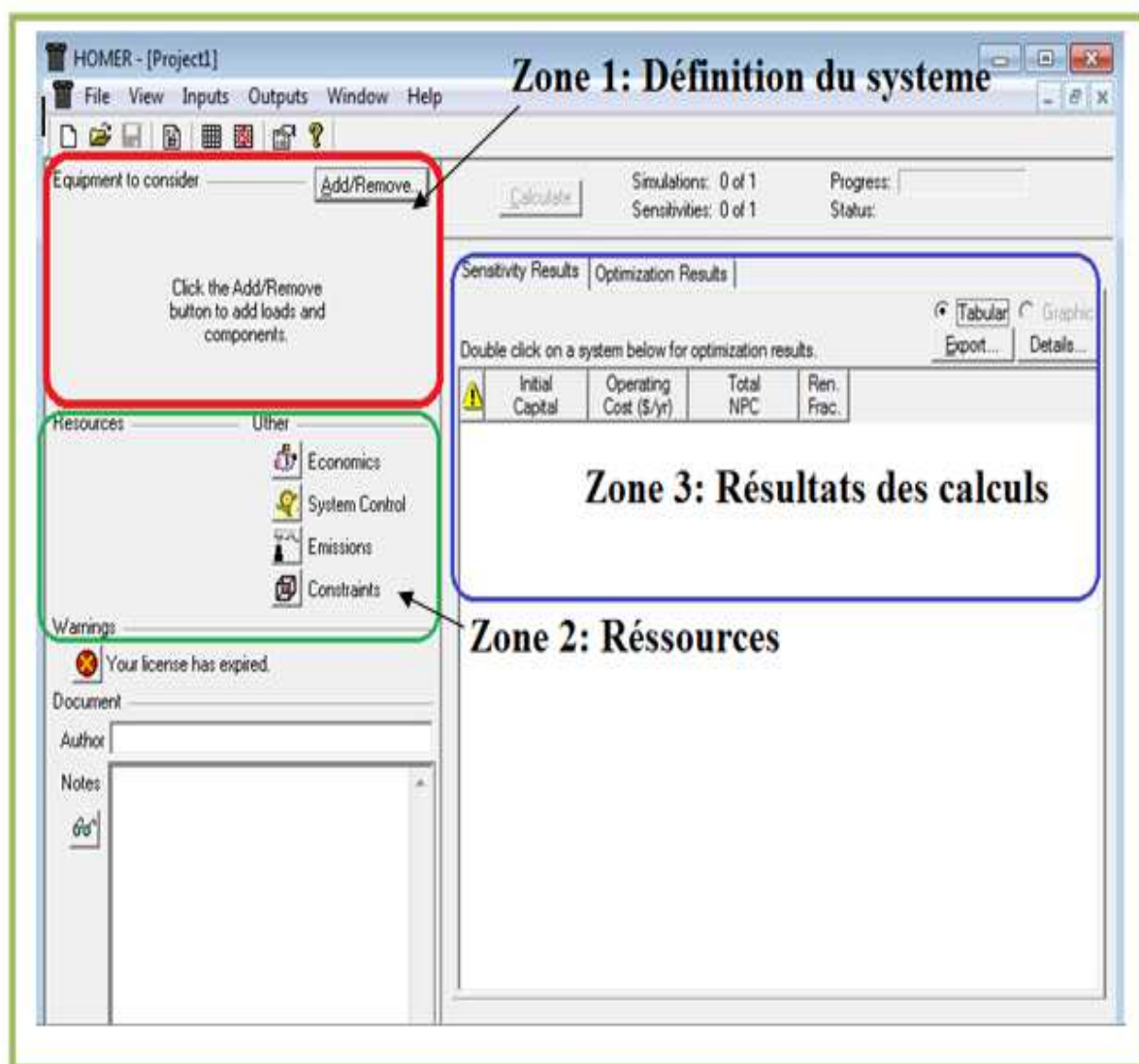
- [30] CANDUSSO, Denis. «Contribution à l'expérimentation de générateurs à piles à combustible de type PEM pour les systèmes de transport » Thèse de doctorat, école normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2013.
- [31] Boudellal, Méziane, « La pile à combustible: structure, fonctionnement, applications », Dunod ,2007.
- [32] Lefèvre, Guillaume, « Conception de convertisseurs statiques pour l'utilisation de la pile à combustible » thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier-Grenoble ,2004.
- [33] TIGREAT, Delphine, « Les techniques de production de l'hydrogène et les risques associés », Rapport d'étude DRA-08-95313-07833B,INERIS ,2008.
- [34] Boudellal, Méziane, «La pile à combustible: structure, fonctionnement, applications». Dunod ,2007.
- [35] J.Royer, T.Djiako, E.Schiller et B.S.Sy, « Le pompage photovoltaïque manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens », Université d'Otatawa , 1998.
- [36] <https://www.homerenergy.com/>
- [37] ASEE-2014-Teaching Renewable Energy System Design with HOMER
- [38] HOMER gettin gstarted guide\_french\_homer\_mode\_demploi. Présentation du logiciel HOMER juillet 2011.
- [39] PV-GIS, photovoltaic-software.com
- [40] Himadry Shekhar Das, Chee Wei Tan, A.H.M. Yatim, Kwan Yiew Lau «Feasibility analysis of hybrid photovoltaic/battery/fuel cell energy system for an indigenous residence in East Malaysia», 2017.
- [41] Abderrezzaq ,Bouharchouche, Conception et réalisation un logiciel de dimensionnement un système énergie hybride éolien-photovoltaïque. Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°3 (2014) 359 – 376 September 2014.

# **Annexe**

## ❖ Présentation de l'interface de HOMER



**Fig. 1** Logo du logiciel HOMER version beta 2.81



**Fig.2** Interface du logiciel HOMER

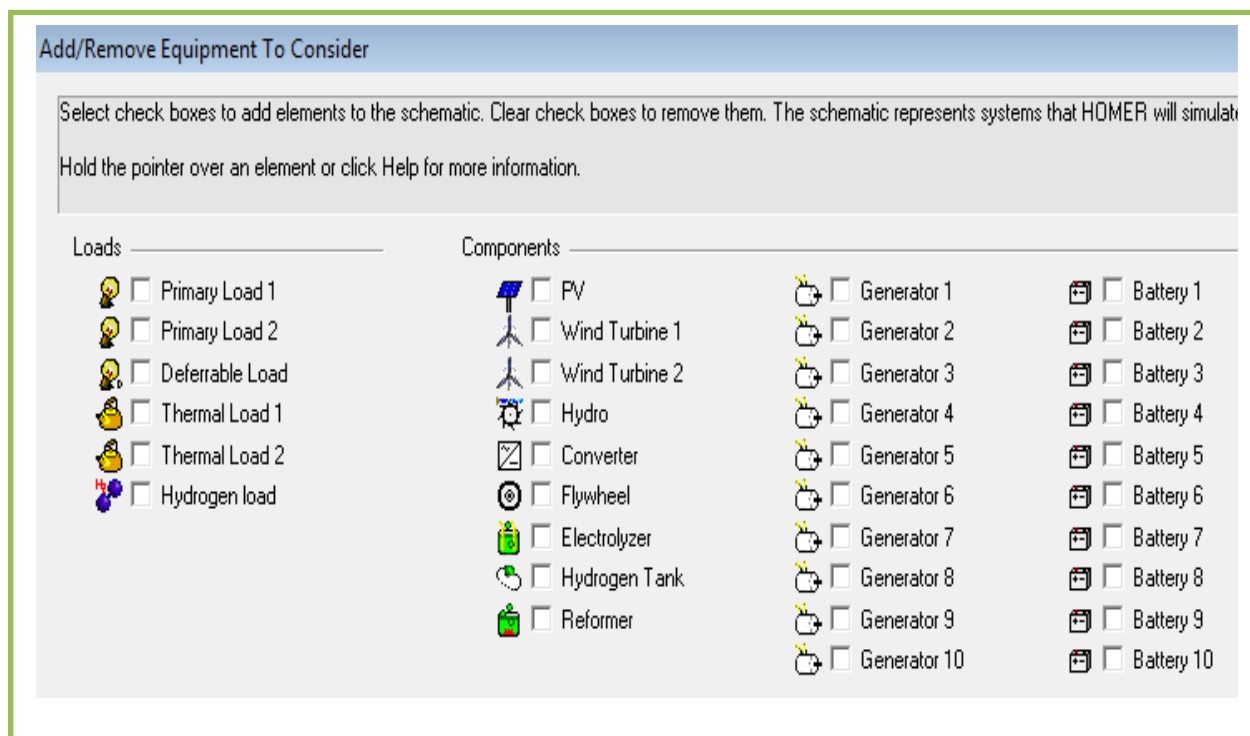


Fig. 3 La fenêtre des équipements disponible dans HOMER

## ❖ Déclaration des contraintes du système dans HOMER

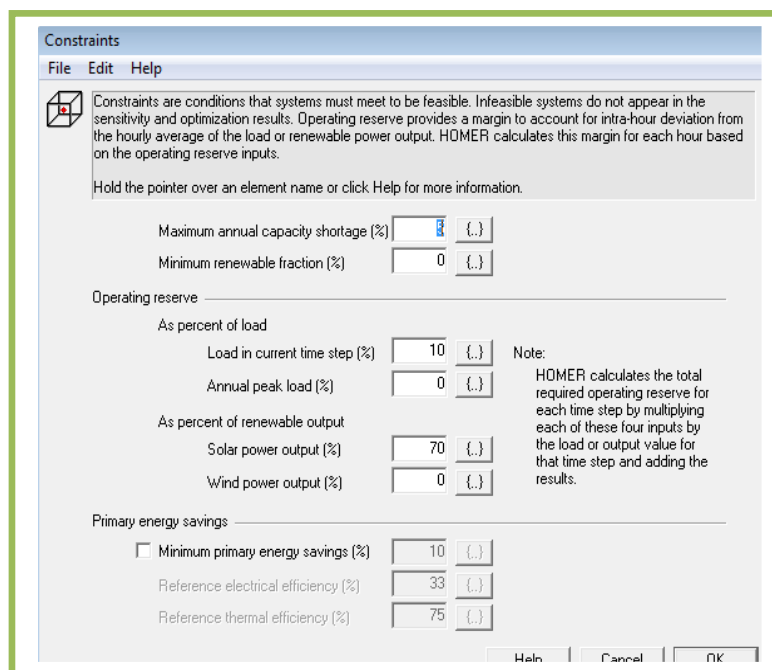


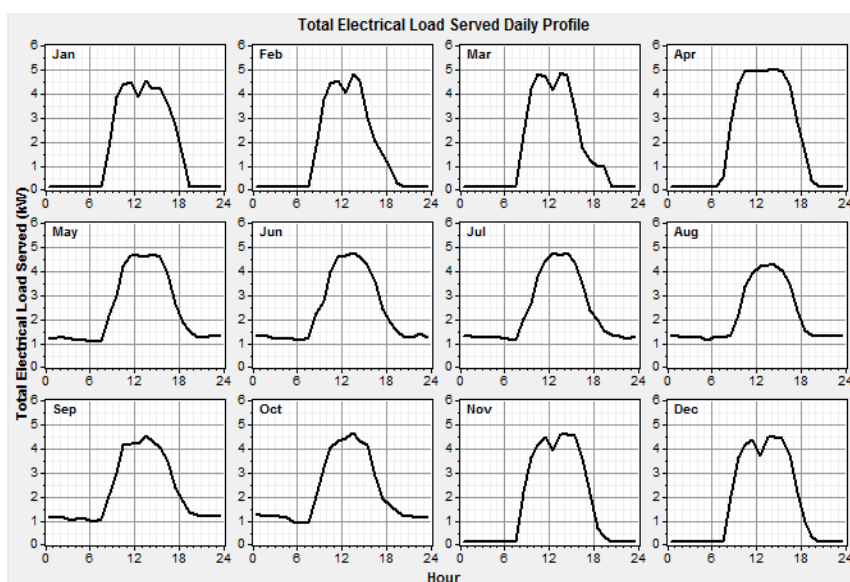
Fig. 4 Fenêtre de déclaration des contraintes du système

❖ **La consommation des appareils considérés dans un laboratoire gène électrique**

**Tab. 1** La consommation des appareils considérés dans une LAGE

Type d'appareille électrique	Nombre	La puissance électrique (W/h)	Durée d'utilisation
Ordinateur portable	<b>3</b>	<b>50</b>	<b>11</b>
Imprimant	<b>1</b>	<b>500</b>	<b>6</b>
Lampe d'éclairage	<b>3</b>	<b>72</b>	<b>11</b>
Fontaine fraiche d'eau	<b>1</b>	<b>100</b>	<b>24</b>
Routeur Wifi	<b>1</b>	<b>20</b>	<b>11</b>
Pressé (chargeur smart phone)	<b>6</b>	<b>20</b>	<b>11</b>
Climatiseur	<b>1</b>	<b>1200</b>	<b>11</b>
Réfrigérateur	<b>1</b>	<b>100</b>	<b>24</b>

❖ **La profile de consommation de ce mois dans HOMER est illustré ci-dessous**



**Fig. 5** Le profil de charge journalière suivant les saisons



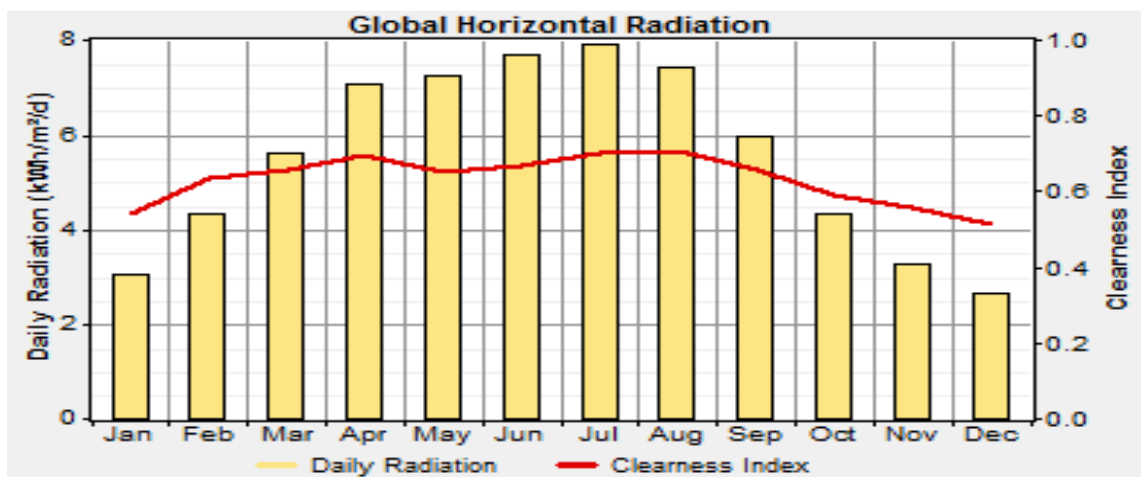
❖ **Potentiel solaire de la ville d'Ouargla**

Fig.6 Irradiation solaire annuelle

❖ **Construction du système hybride de génération d'énergie**

Tab. 2 Présente la configuration optimale du système PV /PAC

L'équipement du système	La puissance
Panneaux photovoltaïque	14,5 kW
Pile à combustible	1,5 kW
Batterie	8 Surette 6CS25P
Onduleur	5.1 kW
Redresseur	5.1 kW
Électrolyseur	3.8 kW
Réservoir d'hydrogène	3,5 kg

❖ **Résultat énergétique**

Sur le deux tableau suivant en présente la Production PV et pile a combustible avec la consommation de LAGE pendant une année :

**Tab. 3** La Production PV et pile a combustible pendant une année

	(kWh/Année )
Panneaux photovoltaïque	23,618
Pile a combustible	1,356
totale	24.973

**Tab. 4** La consommation de LAGE pendant une année

	(kWh/Année)
<b>Consommation de LAGE</b>	<b>9,552</b>

### ❖ Résultat économique

**Tab.5** Résultat économique du système PV/PAC

Composant	Capital	Replacement	O&M	Salvage	Total
	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)
<b>PV</b>	14,500	0	0	0	14,500
<b>Pile à combustible</b>	2,250	1,026	4,551	-76	7,751
<b>Batterie</b>	9,200	655	1,023	-188	10,689
<b>Convertisseur</b>	4,080	1,596	652	-297	6,031
<b>Electrolyseur</b>	5,700	1,586	972	-295	7,962
<b>Réservoir de Hydrogène</b>	4,200	0	895	0	5,095
<b>System</b>	<b>39,930</b>	<b>4,862</b>	<b>8,092</b>	<b>-857</b>	<b>52,028</b>

## المخلص

في هذه المذكرة قمنا بمحاكاة النظام الهجين باستعمال برنامج الطاقة هومر ، حيث يتكون النظام الهجين (الألواح الشمسية ، خلايا الوقود ، المحلل الكهربائي) مع بطاريات التخزين لتزويد مخبر الهندسة الكهربائية بجامعة قاصدي مرباح ورقلة .

وبأخذ النتائج المقدمة من برنامج هومر لمنطقة ورقلة ، تحصلنا على تكلفة مشروع لمدة 25 سنة ( دولار ) ، وتكلفة الطاقة (1كيلوات ساعي / دولار) و كذلك العدد الأمثل والخصائص لكل من(الألواح الشمسية ، خلايا الوقود ، المحلل الكهربائي) مع بطاريات التخزين .

الكلمات المفتاحية : النظام الهجين ، طاقة كهروضوئية ، خلية الوقود الهيدروجينية ،محلل كهربائي، هومر.

## Abstract

In this work, we simulated hybrid system using HOMER logiciel, which the hybrid system consists of (solar panels, fuel cells, electrolyser) works with storage batteries to supply the electrical engineering laboratory of Kasdi Merbah university of Ouargla.

From the results of the simulator HOMER for the Ouargla region, we obtained a project cost of 25 years (US \$), energy cost (1 kWh / \$) and the optimum number and characteristics (solar panels, fuel cells, electrolysis) with storage batteries.

**Keys Words:** Renewable Energies, hybrid system, PV, Fuel cell, Electrolyser, HOMER Energy.

## Résumé

Dans ce travail, nous avons simulés système hybride à l'aide du logiciel HOMER, le système hybride constitue (panneaux solaires, piles à combustible, électrolyseur) fonctionnant avec des batteries d'accumulateurs pour alimenter le laboratoire d'ingénierie électrique de l'université Kasdi Merbah Ouargla.

D'après les résultats du logiciel HOMER pour la région de Ouargla, nous avons obtenu un coût de projet de 25 ans (US \$), un coût énergétique (1 kWh / \$), ainsi que le nombre optimale et les caractéristiques optimaux (panneaux solaires, piles à combustible, électrolyseur) avec stockage dans les batteries.

**Mots clés :** Énergie Renouvelable, système hybride, photovoltaïque, pile à combustible, Electrolyseur, HOMER Energie.