

الجامعة الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الدكتور الطاهر مولاي سعيدة -

Université Saida Dr Tahar Moulay -

Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

Projet de recherche présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

**En :** Électrotechnique

**Spécialité :** Réseaux Électriques

**Par :** Fekih Abderrahmane et Caidi Fatima

**Sujet**

### Gestion optimale d'une source électrique hybride d'une exploitation autonome animalière par le logiciel HOMER

Soutenue publiquement en **28/06/2022** devant le jury composé de :

**Mr. Bouanane Abdelkrim**

Univ. Saida

Président

**Mr. Raouti Driss**

Univ. Saida

Rapporteur

**Mr. Mezian Rachid**

Univ. Saida

Examinateur

Année universitaire 2021/2022

## *Remerciement*

---

### *Remerciements*

Ce mémoire est le fruit des efforts fournis et des sacrifices consentis par plusieurs personnes que je ne pourrai oublier de remercier. Mes remerciements s'adressent d'abord à Dieu, pour tous ses innombrables bienfaits. Aussi, je remercie mon Directeur de mémoire, **le Professeur RAOUTI DRISS** pour sa patience, ses conseils, il a toujours été présent pour répondre à mes questions

Je tiens également à remercier les membres du jury qui ont bien voulu lire mon travail de recherche et qui sont venus m'écouter.

En fin. Nous remercions nos parents. Nos sœurs. Nos frères et nos copines qui ont toujours été présentes. Avec leur soutien inconditionnel et leur encouragement .

## *Dédicace*

---

### *Dédicace*

#### *Je dédie ce travail :*

A mes chers parents (***KhELIFA ET MOKHTARIA***) pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A mes chères sœurs (***DALEL, AMANI, IKHLAS, ABDEL MADJID***) pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

A ma plus belle (***MAMAN AICHA***) et mes chers tantes (***WIDED ET NANO***) pour leur appui et leur encouragement.

A mes amis (***BOUMAZA FATIMA ET ABDERRAHMEN, HABIB***)

Je vous remercie tout pour votre soutien tout au long de mon parcours universitaire, que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux et le fruit de votre soutien. Merci d'être toujours là pour moi.



*Caidi Fatima*

## *Dédicace*

---

### *Dédicace*

#### *Je dédie ce travail :*

A mes chers parents pour tous leurs sacrifices,  
leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières  
tout au long de mes études.

A mes chères frères et mes sœurs pour leurs  
encouragements permanents, et leur soutien moral.

A ma plus belle pour leur appui et leur  
encouragement.

A tous mes amis

Je vous remercie tout pour votre soutien tout au long de  
mon parcours universitaire, que ce travail soit  
l'accomplissement de vos vœux et le fruit de votre  
soutien. Merci d'être toujours là pour moi.

<b>Introduction général.....</b>	<b>01</b>
<b>I.1 Introduction .....</b>	<b>04</b>
<b>I.2 Contribution des différentes sources d'énergies primaires dans la production d'énergie électrique mondiale .....</b>	<b>04</b>
<b>I.2 Définition d'une énergie renouvelable .....</b>	<b>05</b>
<b>I.3 Différents types d'énergies renouvelables .....</b>	<b>05</b>
<b>I.3.1 Energie hydraulique .....</b>	<b>06</b>
<b>I.3.1.1 Principe d'énergie hydraulique.....</b>	<b>06</b>
<b>I.3.1.2 Déférents types de l'énergie hydraulique .....</b>	<b>06</b>
<b>I.3.1.3 Avantages et inconvénients de l'énergie hydraulique.....</b>	<b>07</b>
<b>I.3.2 Energie solaire.....</b>	<b>07</b>
<b>I.3.2.1 Solaire thermodynamique .....</b>	<b>08</b>
<b>I.3.2.1.1 Principe d'énergie solaire thermodynamique .....</b>	<b>08</b>
<b>I.3.2.1.2 Déférents types de l'énergie solaire thermodynamique .....</b>	<b>08</b>
<b>I.3.2.3 Avantages et inconvénients d'énergie solaire thermodynamique .....</b>	<b>10</b>
<b>I.3.2.2 Solaire photovoltaïque.....</b>	<b>11</b>
<b>I.3.2.2.1 Principe d'énergie photovoltaïque .....</b>	<b>11</b>
<b>I.3.2.2.2 Cellule photovoltaïques .....</b>	<b>12</b>
<b>I.3.2.2.3 Différents types des cellules photovoltaïques .....</b>	<b>12</b>
<b>I.3.2.4 Avantages et inconvénients d'énergie solaire photovoltaïque .....</b>	<b>14</b>
<b>I.3.3 Energie d'Aérogénération (éoliennes).....</b>	<b>15</b>
<b>I.3.3.1 Principe de fonctionnement d'une éolienne .....</b>	<b>15</b>
<b>I.3.3.2 Eléments fondamentaux constructifs d'une éolienne .....</b>	<b>15</b>
<b>I.3.3.3 Différents types d'éoliennes.....</b>	<b>16</b>
<b>I.3.3.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne .....</b>	<b>17</b>
<b>I.3.4 Générateurs utilisant la houle.....</b>	<b>17</b>
<b>I.3.4.1 Principe de générateurs utilisant la houle .....</b>	<b>18</b>
<b>I.3.4.2 Types des générateurs utilisant la houle.....</b>	<b>18</b>
<b>I.3.5 Géothermie .....</b>	<b>19</b>
<b>I.3.5.1 Principe d'exploitation de la géothermie.....</b>	<b>19</b>
<b>I.3.5.2 Différents types de géothermie.....</b>	<b>20</b>
<b>I.3.5.3 Avantages et inconvénients de l'énergie géothermique .....</b>	<b>21</b>
<b>I.3.6 Source de la marée-motrice et des courants marins .....</b>	<b>21</b>
<b>I.3.6.1 Principe Production marée-motrice et par les courants marins.....</b>	<b>21</b>
<b>I.3.6.2 Types de sources de la marée motrice .....</b>	<b>22</b>
<b>I.3.6.3 Avantages et inconvénients de l'énergie de production marée-motrice et par les courants marins .....</b>	<b>22</b>
<b>I.3.7 Génération et cogénération à partir de la biomasse ou de déchets.....</b>	<b>23</b>
<b>I.3.7.1 Types déférents de génération et cogénération à partir de la biomasse ou de déchets .....</b>	<b>24</b>
<b>I.3.7.2 Principe de fonctionnement de la cogénération .....</b>	<b>24</b>
<b>I.4 Conclusion.....</b>	<b>25</b>

---

<b>II.1 Introduction .....</b>	<b>27</b>
<b>II.2 Définition et missions des systèmes hybrides .....</b>	<b>27</b>
<b>II.3 Intégration et combinaison de plusieurs sources à énergie renouvelable .....</b>	<b>28</b>
<b>II.4 Présentation du système hybride .....</b>	<b>28</b>
<b>II.4.1 Principaux Composants des systèmes hybrides .....</b>	<b>28</b>
<b>II.4.1.1 Générateurs photovoltaïques .....</b>	<b>30</b>
<b>II.4.1.2 Aérogénérateurs .....</b>	<b>30</b>
<b>II.4.1.3 Piles à combustibles .....</b>	<b>31</b>
<b>II.4.1.4 Systèmes de stockage .....</b>	<b>32</b>
<b>II.4.1.5 Système de supervision .....</b>	<b>32</b>
<b>II.4.1.6 Convertisseurs .....</b>	<b>32</b>
<b>II.4.1.7 Charge .....</b>	<b>33</b>
<b>II.5 Classification des systèmes hybride .....</b>	<b>33</b>
<b>II.5.1 Classification selon le régime de fonctionnement .....</b>	<b>33</b>
<b>II.5.2 Classification selon la structure du système hybride .....</b>	<b>33</b>
<b>II.6 Nécessité de l'intégration .....</b>	<b>34</b>
<b>II.7 Gestion optimale d'un système hybride .....</b>	<b>34</b>
<b>II.8 Méthodes d'optimisation .....</b>	<b>34</b>
<b>II.9 Outils logiciels disponibles dans le commerce pour le dimensionnement du système hybride .....</b>	<b>35</b>
<b>II.10 Conclusion .....</b>	<b>36</b>

<b>III.1 Introduction .....</b>	<b>37</b>
<b>III.2 Présentation de logiciel HOMER .....</b>	<b>37</b>
<b>III.3 Comment utiliser HOMER ? .....</b>	<b>37</b>
<b>III.4 Fonctionnement du logiciel HOMER .....</b>	<b>38</b>
<b>III.5 Étapes de modélisation, simulation, optimisation par HOMER .....</b>	<b>39</b>
<b>III.5.1Définition du projet .....</b>	<b>39</b>
<b>III.5.2Implantation du modèle à simulé .....</b>	<b>39</b>
<b>III.5.2.1 Introduction de charge .....</b>	<b>39</b>
<b>III.5.2.2 Choix des composantes .....</b>	<b>40</b>
<b>III.5.2.3 Introduction de la répartition détaillée des puissances des ressources .....</b>	<b>41</b>
<b>III.6 Analyse des résultats de la simulation .....</b>	<b>43</b>
<b>III.7 Analyse des résultats de L'optimisation .....</b>	<b>43</b>
<b>III.8 Conclusion .....</b>	<b>43</b>

<b>IV.1 Introduction .....</b>	<b>45</b>
<b>IV.2 Présentation du cas réel étudie :.....</b>	<b>45</b>
<b>IV.2.1 Situation géographique et architecture de l'exploitation agricole.....</b>	<b>45</b>
<b>IV. 2.2 Constitution et répartition des charges électriques de l'exploitation agricole.....</b>	<b>46</b>
<b>IV. 2.2.1 Détails de la répartition de la charge .....</b>	<b>46</b>
<b>IV. 2.3 Evaluation et quantification de la puissance par unité de l'exploitation.....</b>	<b>46</b>
<b>IV.3 Formulation et Implantation du modèle de simulation de l'exploitation agricole .....</b>	<b>47</b>
<b>IV.4 Résultat de simulation et discussions .....</b>	<b>48</b>
<b>IV.5 Conclusion .....</b>	<b>53</b>

## *Liste des figures*

---

### **Chapitre 01 : Généralité sue les sources d'énergie renouvelables**

<b>Figure I.1</b> : Réparation des taux de contribution par source renouvelable dans la production d'électricité en 2020.....	<b>04</b>
<b>Figure I.2</b> : Déferentes sources d'énergie renouvelable .....	<b>05</b>
<b>Figure I.3</b> : une photographie d'une énergie hydraulique .....	<b>06</b>
<b>Figure I.4</b> : Photographie d'une centrale hydraulique haute chute .....	<b>07</b>
<b>Figure I.5</b> : Schéma simplifié d'une centrale solaire a miroir de Fresnel .....	<b>09</b>
<b>Figure I.6</b> : Photographie d'une centrale à capteurs cylindro-paraboliques .....	<b>09</b>
<b>Figure I.7</b> : une photographie dune centrale solaire à tour.....	<b>10</b>
<b>Figure I.8</b> : Photographie d'une cellule photovoltaïque.....	<b>12</b>
<b>Figure I.9</b> : Photographie d'une cellule photovoltaïque monocristalline.....	<b>13</b>
<b>Figure I.10</b> : Photographie d'une Cellule photovoltaïque poly cristalline.....	<b>13</b>
<b>Figure I.11</b> : Cellule photovoltaïque amorphe.....	<b>14</b>
<b>Figure I.12</b> : Photographie dune ferme éolienne .....	<b>15</b>
<b>Figure I.13</b> : schéma d'une composition d'une éolienne .....	<b>16</b>
<b>Figure I.14</b> : éolienne à axe vertical .....	<b>16</b>
<b>Figure I.15</b> : Eolienne à axe horizontal .....	<b>17</b>
<b>Figure I.16</b> : Schéma explicatif du principe de l'exploitation de la géothermie.....	<b>20</b>
<b>Figure I.17</b> : schéma expliquant la géothermie haute énergie.....	<b>20</b>
<b>Figure I.18</b> : schéma expliquant la géothermie basse énergie.....	<b>21</b>
<b>Figure I.19</b> : Principe d'exploitation de l'énergie de la biomasse .....	<b>23</b>

## *Liste des figures*

### **Chapitre 02 : Intégration et gestion Optimale de plusieurs sources d'energies renouvelables**

<b>Figure II.20 :</b> Photographe expliquant d'un système hybride (SEH) .....	<b>27</b>
<b>Figure II.21 :</b> Schéma d'un principal composant du système hybride.....	<b>29</b>

### **Chapitre 03 : Présentation du logiciel HOMER**

<b>Figure III.22 :</b> Interface d'entrée du logiciel homer .....	<b>39</b>
<b>Figure III.23 :</b> Interface d'introduction de la charge .....	<b>40</b>
<b>Figure III.24 :</b> Interface de conception du modèle de système hybride.....	<b>41</b>
<b>Figure III.25 :</b> Interface de caractérisation de la source solaire.....	<b>42</b>
<b>Figure III.26 :</b> Interface de caractérisation de générateur diesel (source électrogène)	<b>42</b>
<b>Figure III.27 :</b> Interface d'affichage des résultats de simulation.....	<b>43</b>

### **Chapitre 04 : Etude de la gestion optimale d'un système à sources d'énergies hybride alimentant une exploitation agricole**

<b>Figure IV.28 :</b> Photographie de localisation et vue panoramique de plan de masse de la firme .....	<b>45</b>
<b>Figure IV.29 :</b> Schéma du modèle Homer de système électrique implanté .....	<b>48</b>
<b>Figure IV.30 :</b> Détail des puissances produites par chaque source dans le système hybride optimisé .....	<b>49</b>
<b>Figure IV.31 :</b> Répartition annuelle des puissances produites par source.....	<b>50</b>
<b>Figure IV.32 :</b> Coût total et partiel de différentes opérations durant un cycle de vie de 25 ans de système hybride .....	<b>51</b>
<b>Figure IV.33 :</b> puissance débité par le système photovoltaïque durant l'année.....	<b>52</b>
<b>Figure IV.34 :</b> coût écologique et taux d'émissions des différents effluents.....	<b>52</b>

## *Liste des Tableaux*

---

### **Chapitre 4 : Etude de la gestion optimale d'un système à sources d'énergies hybride alimentant une exploitation agricole**

<b>Tableau IV.1</b> : récapitulatif journalières; puissances, temps, consommation de la première charge .....	<b>47</b>
<b>Tableau IV.2</b> : récapitulatif journalières; puissances, temps, consommation de la deuxième charge .....	<b>47</b>

## **Liste Des Abréviations**

---

PV : photovoltaïque

GPV : Générateur photovoltaïque

GE : Groupes électrogéne

SEH : Un Système d'Energie Hybride.

CA : courant alternatif

CC : courant continu

AC/AC : Série

AC/DC : Parallèle

P : puissance

C : consommation

E<sub>p</sub> : énergie produite par jour

I<sub>r</sub> : irradiation quotidienne moyenne annuelle

P<sub>c</sub> : puissance crête en Watt crête

E<sub>c</sub> : énergie consommée par jour

U : tension de la batterie

H : Hangar

HA : Habitation

H.V.L : Hangar d'élevage de vaches litières

H.V.P : Hangars d'élevage de poules

# Introduction générale

### **Introduction générale**

Economiquement géopolitiquement et sur tout les plans, l'énergie est le premier souci de l'ensemble des pays dans le monde. L'abondance et le caractère écologique et économique d'une source d'énergie sont les têtes des priorités lors du choix d'une source d'énergie par rapport à une autre. On parle ici sur les impacts écologiques des sources d'énergie et ces coûts économiques et techniques. Ces contraintes écologiques et économique impose actuellement une tendance mondiale vers des sources dites renouvelables moins polluantes mais qui restent jusqu'à maintenant couteuses économiquement par rapport aux sources classiques qui sont en majorité non renouvelable. Cette situation pousse l'ensemble des acteurs dans ce domaine soit d'autorités politico-économiques soit des ces sources. Parmi les solutions trouvées c'est bénéficier de plusieurs sources simultanément d'une manière optimale. Il s'agit des systèmes dits hybrides dont on bascule entre les sources basant sur des méthodes d'optimisation exploitant des techniques et des outils de logiciels informatiques.

Notre travail, rentre dans cette perspective qui vise l'étude de la gestion optimale de plusieurs sources d'énergie alimentant une exploitation agricole animalière. Nous utilisons comme outil d'optimisation le logiciel de gestion optimale de plusieurs sources d'énergies renouvelable HOMMER.

Dans ce mémoire on présente notre travail en quatre chapitres comme suit :

Chapitre 1, regroupe des généralités sur les différentes sources d'énergies renouvelables avec plus de détails.

Chapitre 2, est consacré à la définition des systèmes d'énergie hybrides multi-sources surtout l'aspect formulation et gestion optimale des puissances de ces systèmes.

Chapitre 3, présente le logiciel HOMER qui est un outil de simulation et de gestion optimale des systèmes hybrides.

Chapitre 4, présente notre étude de cas d'une exploitation agricole alimentée par un système hybride multi-sources.

Ce mémoire est clôturé par une conclusion générale sur l'ensemble du travail effectué.

# Chapitre I

## Généralité sur les sources d'énergie renouvelables

## I.1 Introduction

L'énergie est une grandeur physique nécessaire à la réalisation d'un travail (mécanique, chimique, ...) matérialisée sous différentes formes: énergie nucléaire calorifique ou énergie thermique (chaleur), énergie électrique (électricité), énergie mécanique, énergie chimique, énergie nucléaire. [1]

les énergies renouvelables (ou ENR) désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limite de temps ou reconstituables plus rapidement qu'elles ne sont consommées .

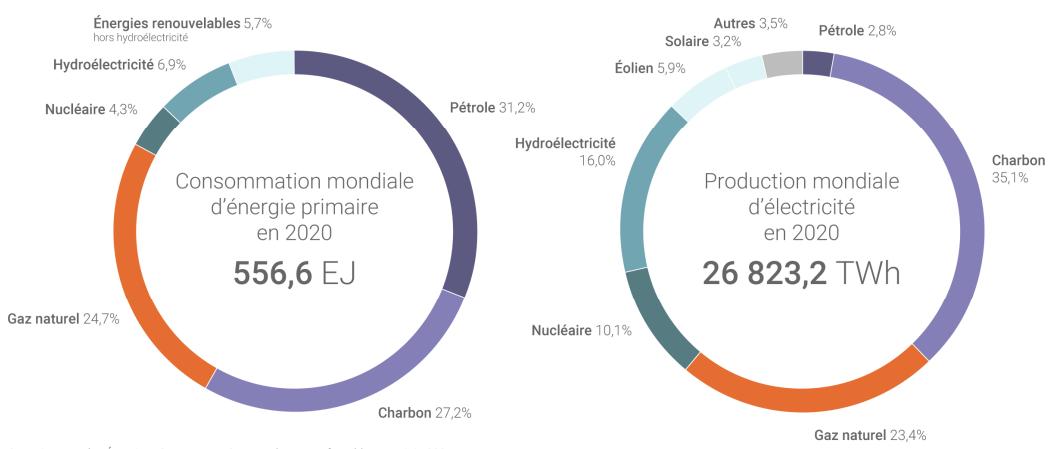
On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux énergies tirées des combustibles fossiles dont les stocks sont limités et non renouvelables à l'échelle du temps humain : charbon, pétrole, gaz naturel... Au contraire, les énergies renouvelables sont produites à partir de sources comme les rayons du soleil, ou le vent, qui sont théoriquement illimitées à l'échelle humaine.Les énergies renouvelables sont également désignées par les termes « énergies vertes » ou « énergies propres ». [2]

La production d'énergie renouvelable consiste à convertir, selon des méthodes qui sont sans impact sur sa viabilité, une forme d'énergie primaire présente dans la nature en une énergie électrique, thermique ou mécanique [3]

## I.2 Contribution des différentes sources d'énergies primaires dans la production d'énergie électrique mondiale

Selon l'AIE (Agence Internationale d'Energie), la figure (I.1), représente la répartition des parts de contributions des différentes sources primaires dans la production d'énergie électrique mondiale. La figure (I.1), montre les taux des consommations totales d'énergies et du production d'électricité enregistrée en 2020.

**Monde** La consommation d'énergie totale et la production d'électricité en 2020



*Figure I.1 : Réparation des taux de contribution par source renouvelable dans la production d'électricité en [2020]*

## I.2 Définition d'une énergie renouvelable

Une source d'énergie est dite renouvelable lorsqu'elle est générée ou régénérée par la nature dans un temps relativement moins que celui de sa consommation en permanence, dont elle est considérée comme étant une inépuisable. Les énergies renouvelables sont très diverses mais elles proviennent toutes de deux sources naturelles principales :

Le Soleil : il émet des rayonnements transformables en électricité ou en chaleur, il génère des zones de températures et de pression inégales à l'origine des vents, il engendre le cycle de l'eau, il permet la croissance des plantes et la génération de la biomasse ;

La Terre, dont la chaleur interne peut être récupérée à la surface [4].

Les principales énergies renouvelables sont [5] :

- Hydraulique.
- Solaire thermodynamique.
- Solaire photovoltaïque.
- Aérogénération (éoliennes).
- Générateurs utilisant la houle.
- Production marée-motrice et par les courants marins.
- Électricité géothermique.
- Génération et cogénération à partir de la biomasse ou de déchets.

## 1.3 Différents types d'énergies renouvelables

La figure I.2, présente une vue générale sur l'ensemble des sources d'énergies renouvelables qui seront détaillées par la suite.

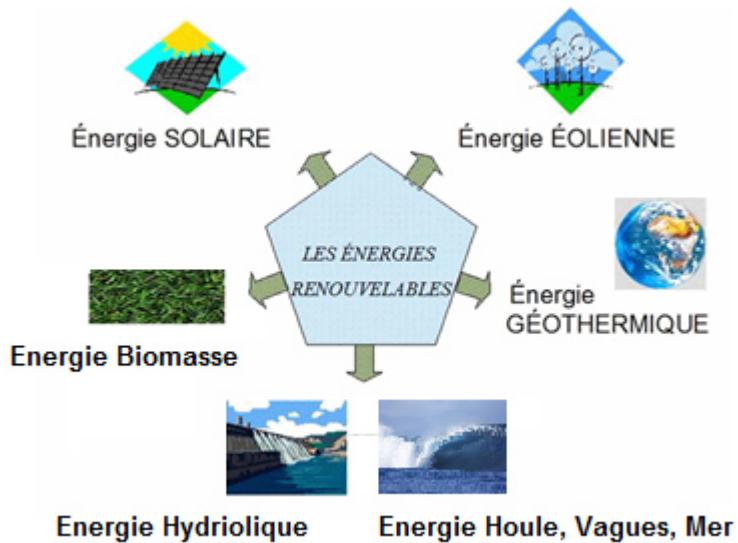


Figure I.2: Déférentes sources d'énergie renouvelable

### I.3.1 Energie hydraulique

L'énergie hydraulique est en fait une énergie cinétique liée au déplacement de l'eau comme dans les courants marins, les cours d'eau, les marées les vagues ou l'utilisation d'une énergie potentielle comme dans le cas des chutes d'eau et des barrages [6]

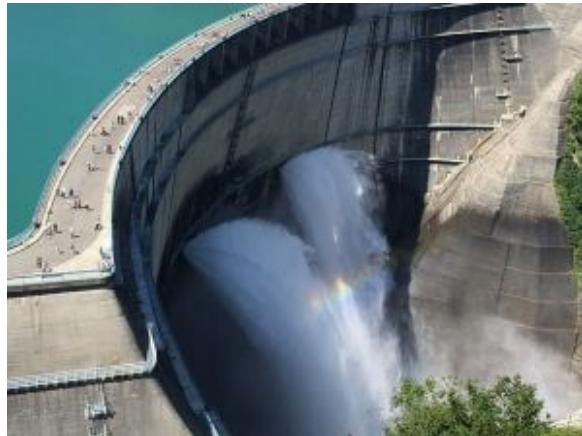


Figure I.3 : une photographie d'une énergie hydraulique

#### I.3.1.1 Principe d'énergie hydraulique

L'énergie hydroélectrique nécessite un cours d'eau ou une retenue d'eau. La centrale exploite l'énergie potentielle créée par le dénivelé de la chute d'eau. La centrale se compose d'un réservoir, d'une chute d'eau caractérisée par sa hauteur. L'énergie hydraulique est convertie en électricité par le passage de l'eau dans une turbine reliée à un alternateur. La puissance de la centrale dépend également du débit d'eau. [7]

#### I.3.1.2 Définitions types de l'énergie hydraulique

Il existe une grande diversité d'installations hydroélectriques, en fonction de leur situation géographique, du type de cours d'eau, de la hauteur de la chute, de la nature du barrage et de sa situation par rapport à l'usine de production électrique. [8]

Il existe 3 grandes catégories d'aménagements hydrauliques

- De lac ou de haute chute. Elles sont surtout présentes dans les sites de haute montagne. ...
- D'éclusée ou de moyenne chute. Elles sont surtout installées en moyenne montagne et dans les régions de bas relief. ...
- Au fil de l'eau ou de basse chute

##### De lac ou de haute chute

Elles sont caractérisées par un débit faible et un dénivelé très fort avec une chute supérieure à 300 m. Le barrage s'oppose à l'écoulement naturel de l'eau pour former un lac de retenue. Ce lac est alimenté par l'eau des torrents, la fonte des neiges et des glaciers. [9]



Figure I.4 : Photographie d'une centrale hydraulique haute chute

#### ✚ Eclusée ou de moyenne chute

Elles sont surtout installées en moyenne montagne et dans les régions de bas relief. Elles sont caractérisées par un débit moyen et un dénivelé assez fort avec une chute comprise entre 30 et 300 m. Les centrales d'éclusée utilisent des turbines de type Francis [10]

#### ✚ Au fil de l'eau ou de basse chute

Elles sont implantées sur le cours de grands fleuves ou de grandes rivières. Elles sont caractérisées par un débit très fort et un dénivelé faible avec une chute de moins de 30 m. Dans ce cas, il n'y a pas de retenue d'eau et l'électricité est produite en temps réel.[11]

### I.3.1.3 Avantages et inconvénients de l'énergie hydraulique

#### a) Avantages

- Tant que le cours d'eau n'est pas à sec, l'énergie est disponible. C'est donc une source d'énergie assez disponible (sauf en cas de sécheresse persistante)
- l'énergie hydraulique est une énergie renouvelable. Sa production n'entraîne pas d'émissions de CO<sub>2</sub> et ne génère pas de déchets toxiques.
- L'énergie hydraulique est modulable : en cas de panne générale d'électricité, il est possible d'augmenter très rapidement sa puissance électrique.

#### b) Inconvénients

- La construction de barrages peut bouleverser, voire détruire, certains écosystèmes.
- L'installation de centrales hydroélectriques entraîne souvent d'importants déplacements de population ainsi que la disparition de surfaces agricoles.
- L'installation d'une centrale hydroélectrique est très coûteuse et doit répondre à un cahier des charges très contraignant (résistance aux crues et aux séismes, études d'impact environnemental...). [12]

### I.3.2 Energie solaire

Cette énergie est de source solaire directe et elle est exploitée sous deux formes distinctes, thermiques et photovoltaïques. Les deux formes seront détaillées dans ce qui suit.

### I.3.2.1 Solaire thermodynamique

Le solaire thermodynamique ou CSP (Concentrated Solar Power) désigne l'ensemble des techniques visant à transformer l'énergie du rayonnement solaire en chaleur pour la convertir en énergie électrique, au moyen d'un cycle thermodynamique moteur couplé à une génératrice électrique (une turbine et un générateur, par exemple). Le solaire thermodynamique est principalement destinée aux pays à fort ensoleillement et permet, contrairement aux centrales photovoltaïques, de lisser plus facilement la production grâce à un stockage thermique tampon moins onéreux que les systèmes de batterie.[13]

#### I.3.2.1.1 Principe d'énergie solaire thermodynamique

Le solaire thermodynamique est un terme regroupant toutes les techniques de transformation des rayons du soleil en chaleur. Grâce à un dispositif optique de concentration du rayonnement solaire, il est possible de chauffer des fluides à très hautes températures. Une fois produite, cette chaleur peut être utilisée pour générer de l'hydrogène ou produire de l'électricité [14]

#### I.3.2.1.2 Déferréents types de l'énergie solaire thermodynamique

Les différents modèles d'installations solaires thermodynamiques quatre modèles sont expérimentés à ce jour :

- la centrale à miroir de Fresnel ;
- la centrale à capteurs cylindro-paraboliques ;
- la centrale parabolique ;
- les centrales à tour

 **Centrale à miroir de Fresnel ;**

Le principe d'un concentrateur de Fresnel réside dans ses miroirs plans (plats) dits "réflecteurs compacts linéaires". Chacun de ces miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube absorbeur.

Un fluide caloporteur est chauffé jusqu'à 500° en circulant dans ce tube horizontal. Cette énergie est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité.

Principal avantage de cette technologie, les miroirs plats sont bien meilleur marché que les miroirs paraboliques. [15]

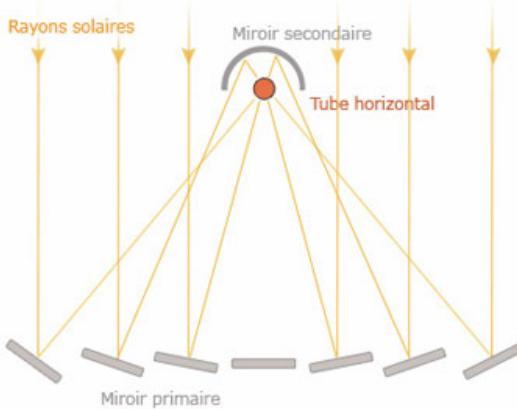


Figure I.5 : Schéma simplifié d'une centrale solaire à miroir de Fresnel

#### ✚ Centrale à capteurs cylindro-paraboliques ;

Ayant la même forme que les paraboles de réception satellite, les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils s'orientent automatiquement et suivent le soleil sur deux axes afin de réfléchir et de concentrer les rayons du soleil vers un point de convergence appelé foyer. Ce foyer est le récepteur du système. Il s'agit le plus souvent d'une enceinte fermée contenant du gaz qui est monté en température sous l'effet de la concentration. Cela entraîne un moteur Stirling qui convertit l'énergie solaire thermique en énergie mécanique puis en électricité. Le rapport de concentration de ce système est souvent supérieur à 2000 et le récepteur peut atteindre une température de 1000 °C. [16]



Figure I.6 : Photographie d'une centrale à capteurs cylindro-paraboliques

#### ✚ Centrale parabolique

Ce type de centrale se compose de rangées parallèles de longs miroirs cylindro-paraboliques qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Les rayons solaires sont concentrés sur un tube récepteur horizontal, dans lequel circule un fluide caloporteur dont la température atteint en général 400°C. Ce fluide est ensuite pompé à travers des échangeurs afin de produire de la vapeur surchauffée qui actionne une turbine ou un générateur électrique.

#### ✚ Centrales à tour

Les centrales solaires à tour sont constituées de nombreux miroirs concentrant les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour. Les miroirs uniformément

répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat est orientable, et suit le soleil individuellement et le réfléchit précisément en direction du receveur au sommet de la tour solaire. Le facteur de concentration peut dépasser 1000, ce qui permet d'atteindre des températures importantes, de 600 ° C à 1000 ° C. L'énergie concentrée sur le receveur est ensuite soit directement transférée au fluide thermodynamique (génération directe de vapeur entraînant une turbine ou chauffage d'air alimentant une turbine à gaz), soit utilisée pour chauffer un fluide caloporteur intermédiaire. Ce liquide caloporteur est ensuite envoyé dans une chaudière et la vapeur générée actionne des turbines. Dans tous les cas, les turbines entraînent des alternateurs produisant de l'électricité.



*Figure I.7 : une photographie d'une centrale solaire à tour*

### I.3.2.3 Avantages et inconvénients d'énergie solaire thermodynamique

#### a) Avantages

- Coûts réduits: L'un des principaux avantages des centrales solaires thermodynamiques est qu'elles sont beaucoup moins chères à construire que les centrales solaires traditionnelles. En effet, ils ne nécessitent pas autant de composants coûteux, tels que des miroirs et des lentilles. En conséquence, les entreprises peuvent économiser de l'argent sur les coûts de construction.
- Efficacité accrue : Un autre avantage des centrales solaires thermodynamiques est qu'elles sont plus efficaces que les centrales solaires traditionnelles. Cela signifie que vous pouvez produire plus d'électricité avec moins de ressources. En conséquence, votre entreprise pourra économiser de l'argent sur les coûts énergétiques.
- Émissions réduites : Les centrales solaires thermodynamiques produisent également moins d'émissions que les centrales solaires traditionnelles. Cela signifie que l'entreprise pourra réduire son empreinte carbone et améliorer sa durabilité environnementale. Inconvénients des centrales solaires thermodynamiques Si les centrales solaires thermodynamiques présentent de nombreux avantages, elles présentent également certains inconvénients

#### b) Inconvénients

- Capacité limitée: Un inconvénient des centrales solaires thermodynamiques est qu'elles ont une capacité limitée. Cela signifie que vous ne pouvez générer qu'une certaine quantité d'électricité avec ces centrales
- Coûts de maintenance élevés: Un autre inconvénient des centrales solaires thermodynamiques est qu'elles nécessitent des coûts de maintenance élevés. Cela signifie que les entreprises

devront investir dans un entretien et des réparations réguliers afin de maintenir le bon fonctionnement des usines.

- Disponibilité limitée: Enfin, les centrales solaires thermodynamiques ne sont pas encore largement disponibles. Cela signifie que les entreprises peuvent avoir de la difficulté à trouver une usine qui répond à leurs besoins spécifiques. [17]

Il ya deux formes du solaire, le solaire photovoltaïque et le solaire thermique

- D'une part le solaire photovoltaïque, qui transforme directement le rayonnement du soleil en électricité grâce à des panneaux formés de cellules de semi-conducteurs,
- d'autre part le solaire thermique qui capte la chaleur du soleil.

### I.3.2.2 Solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire grâce à des panneaux ou des centrales solaires photovoltaïques. Elle est dite renouvelable, car sa source est considérée comme inépuisable à l'échelle du temps humain. [18]

Énergie solaire photovoltaïque est obtenue par l'énergie des rayonnements du soleil. C'est la raison pour laquelle les panneaux photovoltaïques qui vont les récolter, se trouvent installés sur les toits, avec la meilleure orientation possible.

Le but aux rayonnements du soleil, pour récolter les photons du soleil, et en faire ensuite de l'électricité La composition des panneaux solaires est conçue de telle sorte que la superposition des couches, chargées négativement ou positivement, produit une tension électrique quand un photon les traverse. Un fil raccordé à une borne positive et un autre à la borne négative, un peu à l'image d'une pile, permet de mettre à profit l'énergie ainsi produite. [19]

#### I.3.2.2.1 Principe d'énergie photovoltaïque

La conversion photovoltaïque, aujourd'hui largement utilisée, peut-être simplement définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique. Généralement, la paire électron-trou revient rapidement à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique.

Même si le phénomène électrique est secondaire devant le phénomène thermique (incluant la chauffe du matériau par les rayons solaires), récupérer toute ou une partie de l'énergie électrique est le premier objectif des capteurs photovoltaïques sous forme de cellules

ou de générateurs. Cela est possible grâce par exemple à des cellules solaires réalisées en associant un matériau semi-conducteur dopé N à un autre semi-conducteur dopé P. L'énergie produite par l'absorption d'un photon dans un matériau se traduit du point de vue électrique par la création d'une paire électron-trou. Cette réaction entraîne une différence de répartition des charges créant ainsi une différence de potentiel électrique, c'est l'effet photovoltaïque. [20]

### I.3.2.2.2 Cellule photovoltaïques

La cellule Photovoltaïque est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Elle est réalisée à partir de matériaux semi-conducteurs (par exemple le silicium). Sa réalisation est comparable à une diode classique. La cellule est composée de deux différentes couches, la couche supérieure est dopée N et la couche inférieure est dopée P créant ainsi une jonction PN. [21]



Figure I.8: Photographie d'une cellule photovoltaïque

### I.3.2.2.3 Différents types des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [22]

#### ➤ **Cellules monocristallines**

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal (Figure 1.8). 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 antireflet, 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 15 à 22 %, mais la méthode de production est laborieuse.



Figure I.9 : Photographie d'une cellule photovoltaïque monocristalline.

#### ➤ **Cellules poly cristallines**

Les cellules poly cristallines sont élaborées 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), (Figure 1.9). Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. 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 forcée a créé une structure Poly cristalline. Durée de vie estimée : 30 ans.

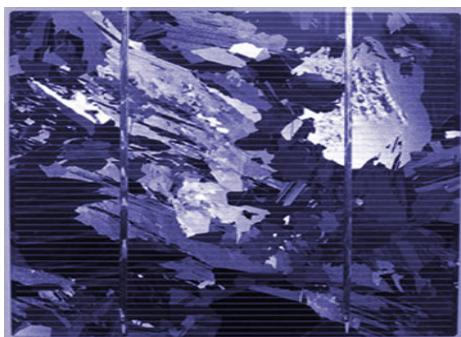
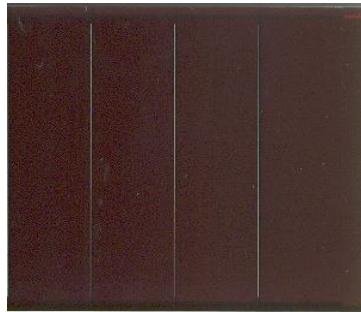


Figure I.10: Photographie d'une Cellule photovoltaïque poly cristalline.

#### ➤ **Cellules amorphes :**

Les modules photovoltaïques amorphes 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. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première.



*Figure I.11 : Cellule photovoltaïque amorphe.*

#### I.3.2.4 Avantages et inconvénients d'énergie solaire photovoltaïque

##### a) Avantages

- Energie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.
- Génère l'énergie requise.
- Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.
- L'extension des systèmes est facile, la taille d'une installation peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de la charge.
- La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voir de générer des revenus.

##### b) Inconvénients

- La fabrication des panneaux photovoltaïques relèvent de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.
- Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher.[23]

#### I.3.3 Energie d'Aérogénération (éoliennes)

Par définition, l'énergie éolienne est l'énergie produite par le vent. Elle est le fruit de l'action d'aérogénérateurs, de machines électriques mues par le vent et dont la fonction est de produire de l'électricité. [24]

Une hélice entraînée en rotation par la force du vent permet la production d'énergie mécanique ou électrique en tout lieu suffisamment venté. L'énergie du vent captée sur les pales entraîne le rotor qui, couplé à une génératrice, convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. La quantité d'énergie produite par une éolienne dépend principalement de la vitesse du vent mais aussi de la surface balayée par les pales et de la densité de l'air. [25]

Les éoliennes peuvent être utilisées soit pour pomper de l'eau soit pour produire de l'électricité, elle est devenue, en moins de 10 ans, la forme d'énergie renouvelable dont la marge de progression est la plus importante.



Figure I.12: Photographie d'une ferme éolienne

### I.3.3.1 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est relativement simple : le vent fait tourner des pales qui font-elles même tourner le générateur de l'éolienne. A son tour le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique de type éolienne. L'électricité éolienne est dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage d'électricité éolienne. [26]

### I.3.3.2 Eléments fondamentaux constructifs d'une éolienne

#### a) Ailes ou pales d'une éolienne

Les éoliennes modernes sont composées de 2 à 3 ailes, tournant autour d'un rotor à axe horizontal. Les pales de l'hélice d'une éolienne peuvent être en bois lamellé-collé, en plastique renforcé de fibre de verre, ou en métal... Le diamètre qu'elles balaiennent varie de 40 m à 120 m.

#### b) La tour ou le mât d'une éolienne

L'hélice de l'éolienne est située en haut d'une tour de 50 m à 110 m. le mât peut être des assemblages de croisillons métalliques, en béton ou en métal.

#### c) La partie électrique d'une éolienne

Dans les éoliennes destinées à produire de l'électricité, l'hélice fait tourner un générateur électrique situé en haut de la tour, dans le prolongement de l'axe de l'hélice de l'éolienne.

Entre l'hélice et le générateur électrique de l'éolienne se trouve en général un multiplicateur de vitesse, car l'hélice de l'éolienne tourne à des vitesses d'environ 100 à 650 tours min alors qu'un générateur électrique doit être entraîné à environ 1500 à 3000 tours / min. [27]

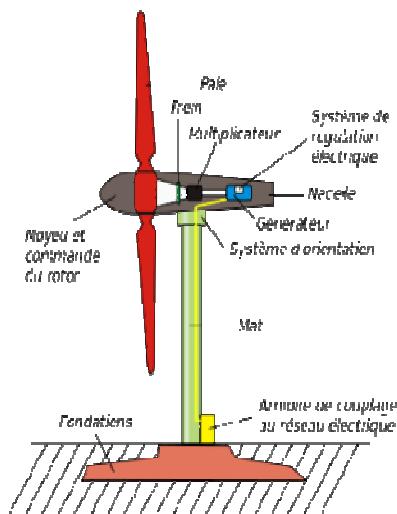


Figure I.13 : schéma d'une composition d'une éolienne

### I.3.3.3 Différents types d'éoliennes

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux types de turbines éoliennes :

- Eolienne à axe vertical.
- Eolienne à axe horizontal.

➤ **Éoliennes à axe vertical :**

Elles présentent certains avantages : machineries au sol, pas besoin d'orientation en fonction de la direction du vent, construction souvent simple. Elles tournent à faible vitesse et sont de ce fait peu bruyantes. Elles présentent par contre des difficultés pour leur guidage mécanique, le palier bas devant supporter le poids de l'ensemble de la turbine. Il existe principalement trois technologies de ce type d'éoliennes. (Figure 1.13)

- Turbines Darrieus classiques,
- Turbines Darrieus à pales droites (type H)
- Turbines Savonius.



Figure I.14 : éolienne à axe vertical

### ➤ éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.



Figure I.15 : Eolienne à axe horizontal

#### I.3.3.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

##### a) Avantages

- Les frais de fonctionnement sont assez limités étant donné le haut niveau de fiabilité et la relative simplicité des technologies mises en œuvre.
- le prix de revient d'une éolienne va probablement diminuer dans les années à venir suite aux économies d'échelle qui pourront être réalisées sur leur fabrication.
- Techniquement, les éoliennes sont rentables dans les régions bien ventées.
- La période de haute productivité, située souvent en hiver où les vents sont plus forts, correspond à la période de l'année où la demande d'énergie est la plus importante.

##### b) Inconvénients

- Énergie renouvelable toujours dépendante du vent. En utilisation isolée, il faut donc prévoir un système de batterie de stockage de l'électricité pour les journées sans vent.
- La très grande variabilité (direction, vitesse, jour/nuit, saison) de cette énergie.
- Les éoliennes sont parfois critiquées pour leur impact sur l'environnement.

#### I.3.4 Générateurs utilisant la houle

Origine de la houle La houle est générée par l'effet du vent sur la surface des océans. Plus il souffle fort, longtemps et sur une grande distance, et plus la hauteur des vagues générées va être importante. Ces vagues, ondes de gravité, ont la particularité

de se propager sans dissipation d'énergie et peuvent donc voyager sur de longues distances avant d'être dissipées sur les côtes. La houle est donc un concentré d'énergie éolienne, certains journalistes l'ont surnommée « houille bleue ». [28]

#### I.3.4.1 Principe de générateurs utilisant la houle

La maturité de ces nombreux générateurs est encore très faible et il est difficile de fournir des valeurs de coût de production sérieuses. Le fort développement de l'énergie éolienne offshore, qui va s'accompagner d'infrastructures lourdes tant sur le plan du génie civil que des installations de transport de l'électricité à terre, pourrait être complété par des générateurs à houle. Mais il reste à imaginer les solutions qui offriraient le meilleur mix énergétique.

#### I.3.4.2 Types des générateurs utilisant la houle

Il existe plusieurs types des générateurs à la houle selon le principe et la technique d'exploitation de cette source qui seront détaillés comme suit.

##### ➤ *Barrages à houle situés sur les côtes*

Par déferlement, l'eau de mer remplit un réservoir et est ensuite turbinée. Ces systèmes présentent l'avantage de lisser la puissance et d'obtenir une production relativement régulière, en tout cas, qui ne fluctue pas au rythme des vagues, mais ils occupent de l'espace sur les côtes.

##### ➤ *Systèmes à flotteur en surface ou semi-immérgé*

de très nombreux systèmes flottants ont été imaginés. Exemple « Pelamis » le projet japonais MightyWhale un prototype flottant de 50 sur 30 m et 12 m de profondeur à une capacité dégénération de 110 kW pour une productivité annuelle d'environ 120 MWh .

##### ➤ *Systèmes à colonne oscillante,*

Également placés sur les côtes, une cavité ouverte sous le niveau de la mer et contenant de l'air entre la surface libre et un piston. L'air est poussé ou aspiré à travers une turbine dont le sens de rotation ne change pas en fonction de son sens de circulation. La turbine entraîne un alternateur qui produit ainsi en continu de l'énergie. Plusieurs prototypes ont été réalisés dont un de 500 kW en Norvège (Toftesfalten).

L'inconvénient majeur de ce dispositif est le bruit acoustique émis par la turbine.

##### ➤ *Système à flotteur immergé*

Une partie fixe du système est ancrée et une partie mobile sollicitée par la poussée d'Archimède subit les ondulations de pression hydrauliques de la houle et oscille. Le système « Archimedes Wave Swing » décrit ci-après est l'un des plus avancés.

### I.3.5 Géothermie

L'énergie géothermique, c'est la chaleur stockée au-dessous de la surface du sol. Cette chaleur provient pour l'essentiel de la radioactivité naturelle des roches de la croûte terrestre, et pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones plus profondes de la Terre. Ce que l'on appelle géothermie, c'est l'utilisation de cette chaleur. Dans la plupart des régions, les roches possèdent une température d'environ 25-30°C à 500 m de profondeur, et de 35-45°C à 1000 m. Dans d'autres régions, où les conditions géologiques sont différentes (écorce terrestre amincie, volcanisme), ces températures peuvent atteindre 100°C, voire 200°C ou plus ! La chaleur terrestre est une source d'énergie quasiment inépuisable. Sur la base de ce constat, la géothermie a sensiblement gagné en importance ces dernières années et suscite de grands espoirs dans le domaine de l'approvisionnement en énergie. L'importance de la géothermie dans les scénarios d'avenir en matière de politique énergétique ne cesse de croître[29].

#### I.3.5.1 Principe d'exploitation de la géothermie

Il existe deux grands types de l'énergie géothermique, il s'agit de la **Géothermie de Surface** et la **Géothermie dite « verticale » ou en profondeur** dont le principe d'exploitation est le suivant.

- **Géothermie de Surface**

Le rayonnement du soleil et le ruissellement de l'eau de pluie permettent au sol de jouer un rôle d'inertie thermique, il y règne à quelques mètres de profondeur une température pratiquement constante tout l'année. La géothermie de surface utilise cette inertie pour obtenir des températures plus basses que les températures à la surface en été, et à l'inverse obtenir des températures plus élevées que les températures à la surface en hiver. En Hiver, la chaleur du sol ou de l'air est captée par une tuyauterie conduisant un fluide caloporteur. La chaleur est restituée dans le logement par la pompe à chaleur. En été, L'excès de chaleur dans la maison est restitué dans l'air par la pompe à chaleur.

- **Géothermie dite « verticale » ou en profondeur**

Le principe est de récupérer la chaleur en profondeur dans les nappes d'eau chaudes cette chaleur traverse « l'échangeur de chaleur » (système de pompe à chaleur), où l'excès de chaleur est rejeté dans le tuyau de réjection. La chaleur restante est envoyée aux radiateurs situés dans le logement. Ce type de géothermie est très pratique pour le chauffage, mais, contrairement à la géothermie de surface, on ne peut pas abaisser la chaleur dans la maison.

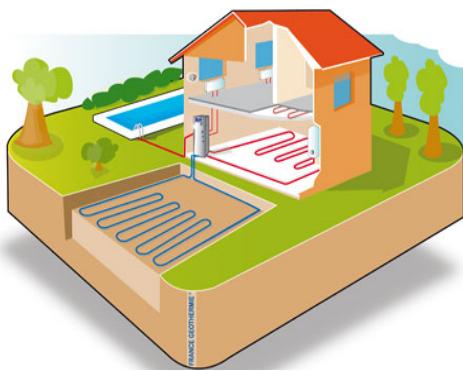


Figure I.16 : Schéma explicatif du principe de l'exploitation de la géothermie.

### I.3.5.2 Différents types de géothermie

#### ➤ Géothermie haute énergie

(Aux températures supérieures à 150 °C) qui permet la production d'électricité grâce à la vapeur qui jaillit avec assez de pression pour alimenter une turbine.

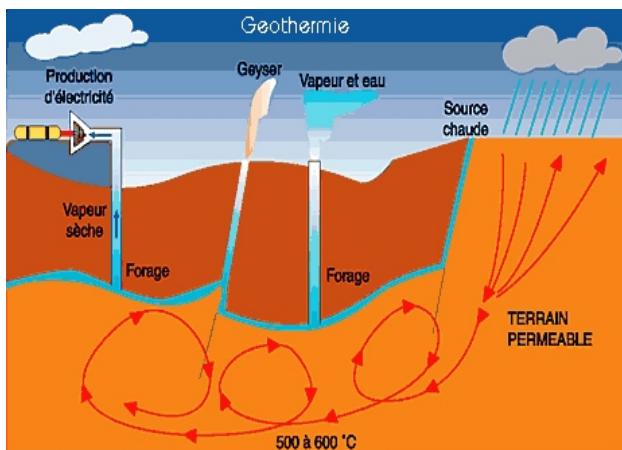


Figure I.17 : schéma expliquant la géothermie haute énergie.

#### ➤ Géothermie moyenne énergie

(Aux températures comprises entre 100 °C et 150 °C) par laquelle la production d'électricité nécessite une technologie utilisant un fluide intermédiaire.

#### ➤ La géothermie de basse énergie

Géothermie des nappes profondes (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) aux températures situées entre 30 °C et 100 °C. Principale utilisation : les réseaux de chauffage urbain.

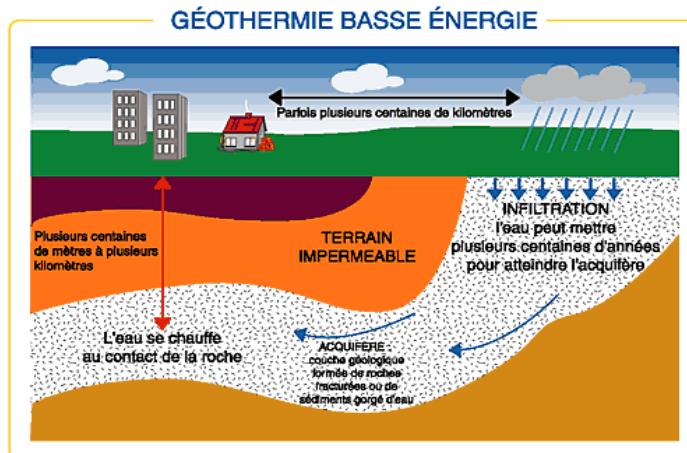


Figure 1.18 : schéma expliquant la géothermie basse énergie.

#### ➤ géothermie de très basse énergie

Géothermie des faibles profondeurs aux niveaux de température compris entre 10 °C et 30 °C. [30]

#### I.3.5.3 Avantages et inconvénients de l'énergie géothermique

##### a) Avantages

- Energie inépuisable et renouvelable.
- Durée de vie : supérieure à 30 ans
- Fonctionnement double : - en Hiver, avec le chauffage.  
- en Eté, avec le refroidissement.
- Energie propre : aucune pollution n'est dégagée. Pas d'émission de CO<sub>2</sub>

##### b) Inconvénients :

- Prix d'installation relativement élevé.
- Géothermie verticale : il faut se situer sur une zone propice à l'installation de tuyaux pouvant descendre loin en profondeur.
- N'est utilisable en domestique que pour le chauffage, l'électricité pouvant être développée en centrale Géothermique.

#### I.3.6 Source de marée-motrice et des courants marins

L'énergie marémotrice consiste à exploiter l'énergie issue des marées dans des zones littorales de fort marnage (différence de hauteur d'eau entre la marée haute et la marée basse se succédant). Le phénomène de marée est induit par l'effet gravitationnel sur l'océan de deux astres à proximité de notre planète : la Lune et le Soleil. [31]

#### I.3.6.1 Principe production marée-motrice et par les courants marins

Le principe de fonctionnement est semblable à celui d'une centrale au fil de l'eau mais, contrairement à cette dernière, il est intéressant de fonctionner dans les deux sens ; donc des groupes spéciaux de turbines réversibles ont été développés

Dans certaines zones favorisées, il est possible d'exploiter les grandes amplitudes de marées (environ 2 cycles par jour) et de récupérer une quantité considérable d'énergie, pour cela il faut construire des barrages et modifier la configuration de sites côtiers. [32]

### I.3.6.2 Types de sources de la marée motrice

#### ➤ *Energie des vagues*

La force des vagues peut actionner des systèmes mécaniques capables de produire de l'électricité. D'abord situées sur les côtes, des installations expérimentales de plus en plus grandes se déplacent maintenant vers la pleine mer.

#### ➤ *Energie des courants marins*

Elle est, sous la surface des eaux, comparable à celle du vent au-dessus. Pour la capter, on a recours à des hydroliennes, sortes de grandes hélices arrimées au fond marin.

#### ➤ *Energie marine thermique*

La mer est une énorme réserve de chaleur. La différence de température entre eaux de surface et eaux profondes dans les régions intertropicales peut être utilisée pour produire de la vapeur et, à partir de celle-ci, de l'électricité.

#### ➤ *Energie osmotique*

Cette technique, la plus surprenante, exploite, à travers une membrane, le mouvement de l'eau entre une réserve salée et une réserve douce. [33]

### I.3.6.3 Avantages et inconvénients de l'énergie de production marée-motrice et par les courants marins

#### a) Avantages

- Nous sommes face à un type d'énergie renouvelable, puisque les marées sont le résultat de l'attraction gravitationnelle de la lune et du soleil sur la Terre. Il s'agit donc d'une énergie illimitée, qui peut également être obtenue à tout moment de l'année.
- C'est une énergie propre, son utilisation n'émet pas de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.
- Ses installations sont silencieuses, grâce à cela il n'y a pas de pollution sonore.
- On peut dire qu'il s'agit d'une énergie prévisible, grâce aux avancées scientifiques, il est possible de savoir quand les marées hautes et basses vont se produire, ce qui permet de connaître la puissance qui sera générée. Grâce à cela, il est possible d'orienter la conception des systèmes de manière à ce qu'ils soient adéquats par rapport au potentiel attendu.
- C'est aussi une énergie efficace grâce à la densité de l'eau, on peut donc obtenir de l'énergie en faisant fonctionner les turbines à faible vitesse.

- Une fois les installations construites, elles sont faciles à entretenir et la production d'électricité est économiquement abordable.

### b) Inconvénient

- Impact visuel, car les structures sont construites près des côtes, là où se produisent les différences de marée.
- L'énergie produite est plus chère, car il s'agit d'un nouveau type d'énergie qui ne peut pas concurrencer celles qui sont établies depuis plus longtemps, comme celles obtenues à partir de combustibles fossiles ou de centrales nucléaires.
- La conception et la construction de ses infrastructures entraînent un coût élevé.
- Bien qu'il s'agisse d'une énergie que l'on peut obtenir tout au long de l'année, cela n'est pas possible dans toutes les régions du monde car, à certains endroits, les marées ne sont pas assez fortes pour produire de l'électricité. [34]

### I.3.7 Génération et cogénération à partir de la biomasse ou de déchets

À la place des combustibles fossiles, on peut brûler des carburants issus de la biomasse-cultivée ou non ou encore des déchets pour produire de la chaleur puis de la vapeur et enfin de l'électricité. Mais dans un souci d'accroissement de l'efficacité, on réalise de plus en plus souvent des systèmes de cogénération dans lesquels la chaleur, habituellement perdue, est valorisée pour des applications variées (chauffage des locaux, besoins industriels, agriculture...).

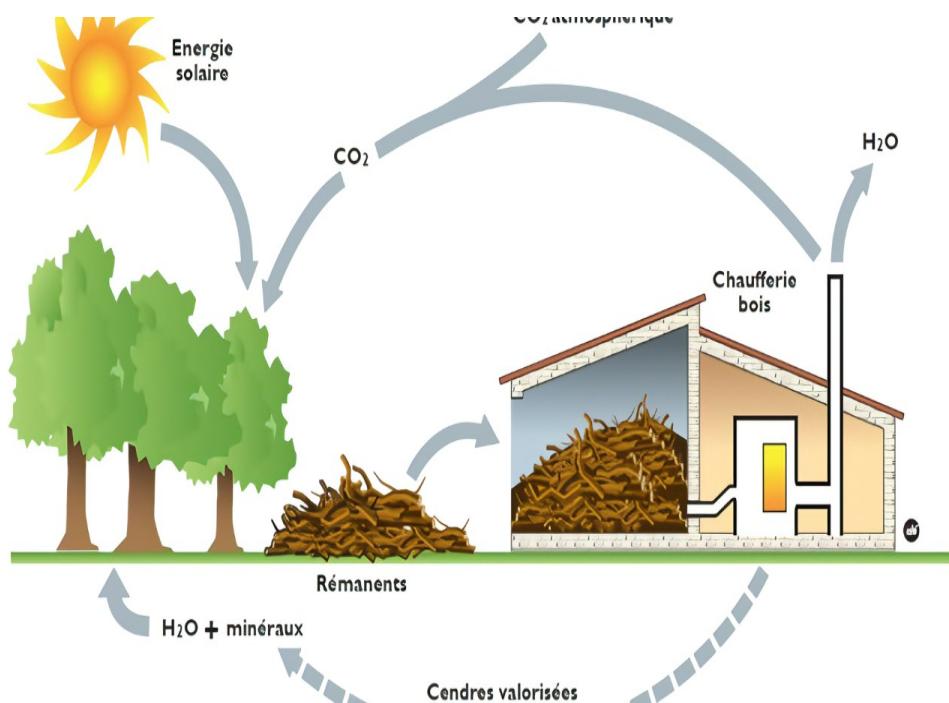


Figure I.19 : Principe d'exploitation de l'énergie de la biomasse

Ce sont surtout des incitations tarifaires de rachat de l'électricité cogénérée qui ont permis le décollage de ces filières énergétiques aujourd'hui très développées dans de nombreux pays. [35]

La cogénération est une technique efficace d'utilisation des énergies fossiles et renouvelables, qui valorise une énergie généralement rejetée dans l'environnement, comme la chaleur. [36]

### I.3.7.1 Types différents de génération et cogénération à partir de la biomasse ou de déchets

#### ➤ **Biogaz**

Ce sont les matières organiques qui libèrent le biogaz lors de leur décomposition selon un processus de fermentation (méthanisation). On l'appelle aussi « gaz naturel renouvelable » ou encore “gaz de marais”, par opposition au gaz d'origine fossile. Mélange de méthane et de gaz carbonique additionné de quelques autres composants, le biogaz est un gaz combustible. Il sert à la production de chaleur, d'électricité ou de biocarburant.

#### ➤ **Biocarburants**

Ce sont des bio carburants issus de plusieurs types produits agricoles tels que les sérails et d'autres comme le blé, orge, colza, Maïs, tournesol, betterave etc

#### ➤ **Déchets secs**

Regroupe de culture sec tel que la paille, la bagasse, le bois , l'alfa etc...

##### ✓ **la paille**

La paille est la partie de la tige de certaines graminées, dites « céréales à paille », coupée avec l'épi à la moisson. C'est le plus souvent un coproduit de la production de grains.

##### ✓ **la bagasse**

La bagasse est le résidu fibreux de la canne à sucre qu'on a passée par le moulin pour en extraire le suc. Elle est composée principalement de la cellulose de la plante. Ce terme désigne également les tiges de la plante qui fournit l'indigo, quand on les retire de la cuve après la fermentation

##### ✓ **le bois**

Le bois peut également être exploité à moyenne échelle. Sa valeur énergétique est d'environ 2 kWh/kg.4.4.

#### ➤ **Déchets ménagères**

Regroupe l'ensemble des déchets ménagères à énergie résiduelle valorisable comme le plastique, les huiles, le carton, les déchets végétaux etc...

**I.3.7.2 Principe de fonctionnement de la cogénération :**

Comprendre le fonctionnement d'une installation de cogénération est assez simple et

Suit les étapes suivantes :

Une source d'énergie unique, fossile ou renouvelable, fait tourner un moteur ou une turbine ;

Le moteur ou la turbine déclenche alors la mise en route d'un alternateur qui va créer de l'électricité ;

Celle-ci va ensuite être collectée puis stockée ;

Mis en mouvement, l'alternateur chauffe et pour éviter sa surchauffe, un liquide de refroidissement est utilisé provoquant la vaporisation de la chaleur ;

La vapeur d'eau est alors récupérée par un échangeur thermique qui va l'employer pour produire de l'eau chaude ;

L'eau chaude produite va alimenter des systèmes industriels, le système de chauffage des entreprises et bâtiments publics ou des installations sanitaires[38]

**I.4 Conclusion**

Dans ce premier chapitre on a commencé par une introduction sur les énergies renouvelables comportant leurs définitions et ces différents types dont on a détaillé les énergies : Hydraulique, solaire Thermodynamique, solaire photovoltaïque, aérogénération (éoliennes), énergie de la houle, énergie de la marée-motrice et des courants marins, géothermique et l'Energie générée et co-générée à partir de la biomasse ou de déchets).

Nous avons évoqué également les différents avantages et inconvénients de ces types d'énergies.

Ce chapitre est indispensable pour entamer le deuxième chapitre dont on va présenter la question de la gestion optimale de différentes sources de l'énergie renouvelable.

# Chapitre II

## Intégration et gestion optimale de plusieurs sources d'énergie renouvelables

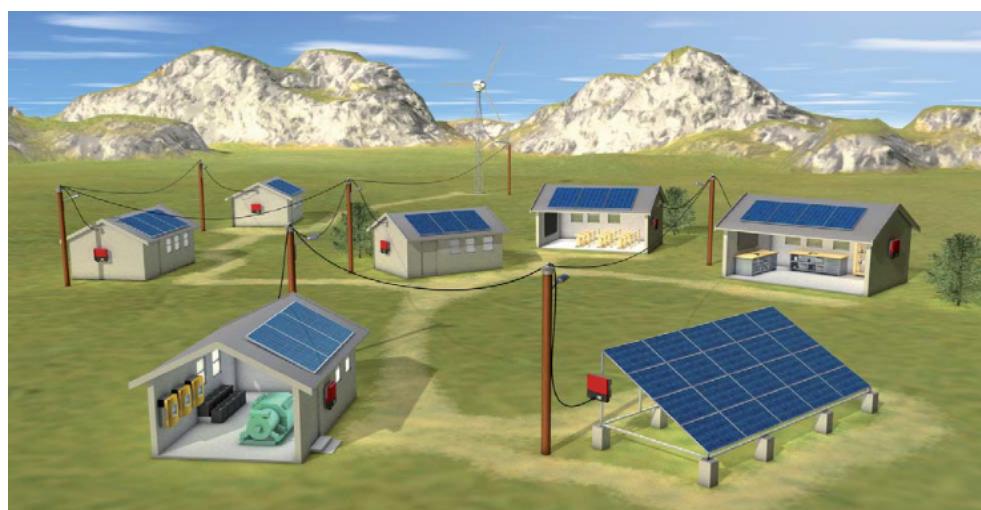
## **II.1 Introduction**

Parmi les systèmes les plus prometteurs pour l'utilisation des énergies renouvelables, il y'a les systèmes d'énergie hybrides. Le terme système d'énergie hybride fait allusion aux systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types de sources. La combinaison des sources d'énergie renouvelable comme l'éolienne, l'énergie photovoltaïque ou les petites centrales hydroélectriques peut constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes diesel utilisés généralement pour produire l'électricité dans les régions isolées. Les systèmes d'énergie hybride sont généralement conçus pour répondre à un besoin énergétique allant du simple éclairage jusqu'à l'électrification complète de villages ou de petites îles. Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi. [39]

## **II.2 Définition et missions des systèmes hybrides**

Un système d'énergie hybride (SEH) est défini comme une installation qui utilise deux ou plus des technologies de la génération d'énergies : une ou plusieurs sources de production d'énergie classique (réseaux publics ou groupe diesel en général) et au moins une source de production d'énergies renouvelables. L'objectif d'utiliser des technologies multiples est de réunir les avantages et les meilleures caractéristiques opérationnelles de chaque système [40] et [41].

Les performances d'un système d'énergie hybride (le rendement et la durée de vie) sont influencées d'une part par sa conception, c'est-à-dire le dimensionnement des composants, le type de composants, l'architecture etc., et d'autre part par le choix de la stratégie de fonctionnement. Quelques paramètres permettant d'évaluer ces performances sont : l'économie de carburant, le coût du kW, le nombre et la durée des pannes, le nombre d'arrêts pour l'entretien etc.



*Figure II.20 : Photographe expliquant d'un système hybride (SEH)*

### **II.3 Intégration et combinaison de plusieurs sources à énergie renouvelable**

La combinaison des sources d'énergies renouvelables comme l'éolienne, le photovoltaïque ou les petites centrales hydroélectriques peut constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes utilisés généralement pour la génération d'électricité dans les régions isolées.

L'intégration dans les réseaux électriques des sources d'énergies renouvelables et d'une manière plus générale de la production décentralisée, si elle présente un intérêt incontestable à divers point de vue, implique aussi le respect de contraintes techniques pour assurer aux citoyens et aux entreprises une alimentation en énergie électrique fiable et de qualité. Dans les réseaux de distribution qui n'ont pas été conçus à l'origine pour accueillir de la production, les problèmes à résoudre dépendent du taux de pénétration de la production décentralisée. [42]

### **II.4 Présentation du système hybride**

Le système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale est celui qui combine et exploite plusieurs sources d'énergies disponibles pour une exploitation optimale sous contraintes de certains critères techniques, économiques et écologique imposés.

#### **II.4.1 Principaux Composants des systèmes hybrides**

Les systèmes d'énergie hybride sont en général constitués de sources d'énergie classique soit réseaux publiques et/ou groupe électrogène, de sources d'énergie renouvelable les plus utilisées éolienne, solaire ou d'autres sources moins utilisées comme l'énergie hydroélectrique, marémotrice, géothermique etc.). Ils peuvent aussi inclure des convertisseurs statiques et dynamiques, des systèmes de stockage (batterie, volant d'inertie, le stockage hydrogène...), des charges principales et de délestages et un système de surveillance.

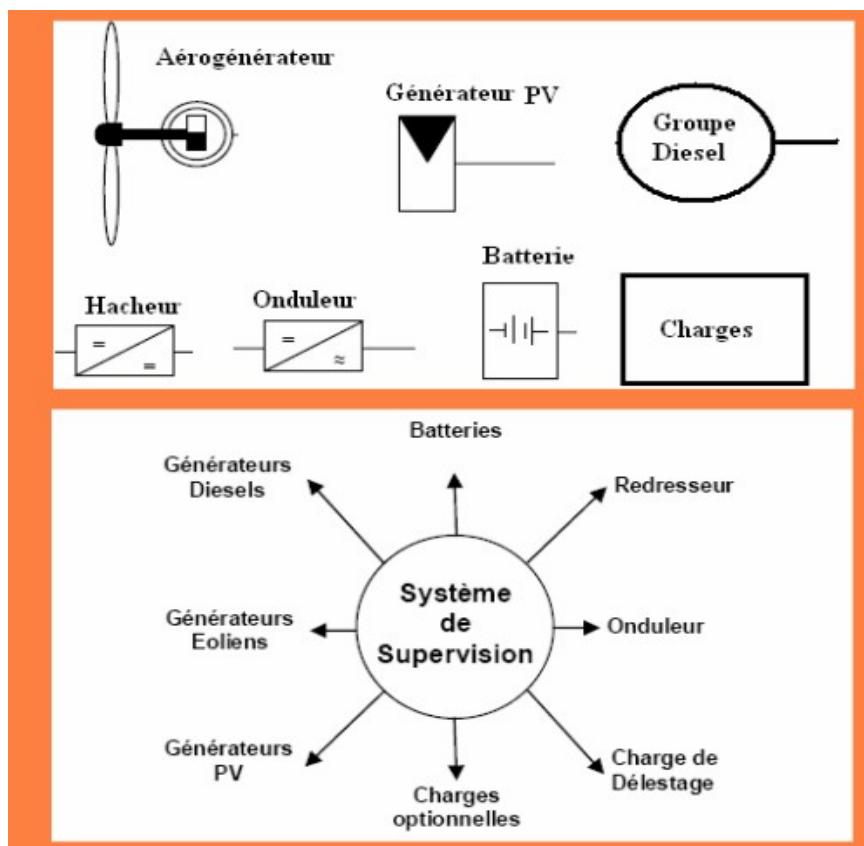


Figure II.21 : Schéma d'un principal composant du système hybride

#### II.4.1.1 Générateurs photovoltaïques

Une cellule élémentaire composée de matériaux semi-conducteurs est capable de convertir l'énergie de photons reçus à sa surface en une différence de potentiel, créée par une délocalisation d'électrons dans le matériau. La circulation des électrons dans le circuit extérieur permet à la cellule PV de fonctionner comme un générateur. Les cellules PV sont combinées ensemble pour former un module PV qui peut produire une certaine quantité d'énergie sous des conditions d'éclairement et de température variables. Par la suite les modules PV peuvent être regroupés à leur tour afin de former un générateur photovoltaïque. Il est dimensionné selon la puissance nécessaire pour une installation donnée [43]

La plupart des cellules PV mesurent autour de 100 cm<sup>2</sup> et ne produisent qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt [44] [45] [46]

#### II.4.1.2 Aérogénérateurs

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Un aérogénérateur (couramment appelé « éolienne ») est une

machine qui utilise l'énergie éolienne pour produire de l'énergie électrique. La technologie des aérogénérateurs a énormément évolué ces 20 dernières années entraînant une spécialisation des différents types d'éolienne.

Le petit éolien, désigne les éoliennes de petites et moyennes puissances, de 100 watts à 20 kilowatts, montées sur des mâts de 10 à 35 mètres, raccordées au réseau ou bien autonomes en site isolé. Le petit éolien est utilisé pour produire de l'électricité et alimenter des appareils électriques (pompes, éclairage, ...) de manière économique et durable, principalement en milieu rural. Par exemple, une petite éolienne accompagnée d'un module solaire photovoltaïque et d'un parc de batteries peut garantir l'autonomie énergétique d'un voilier (éclairage, instruments de bord...). L'élément essentiel pour qu'une petite éolienne soit économiquement rentable est le vent, qui doit être à la fois puissant et fréquent. Les petites éoliennes classiques sont généralement à axe horizontal. Elles comprennent le plus souvent deux à trois pales [47]

Les petites éoliennes peuvent avoir un système mécanique de modification de l'angle de calage des pales ou d'orientation face au vent, alors que les grandes éoliennes utilisent des systèmes de commande électroniques. Les différents types de protections utilisées par les petits systèmes éoliens sont :

- Basculement (relèvement) de l'axe, normalement horizontal [48] :
- Pas variable par pression du vent. Les pales en fibre se déforment et provoquent un décrochage;
- Déviation par rapport à l'axe du vent. Le rotor se trouve légèrement décalé par rapport à l'axe de rotation et crée une force de déviation qui régule la puissance aérodynamique.

#### **II.4.1.3 Piles à combustibles**

Parmi les technologies envisagées pour l'avenir en termes de production d'énergie électrique décentralisée, la pile à combustible est considérée comme une solution très prometteuse [49]

#### **II.4.1.4 Systèmes de stockage**

Les systèmes de stockage d'énergie est un facteur clef dans un système d'énergie hybride en site isolé. Dans la plupart des cas, les batteries représentent encore la technologie la plus rentable. Elles sont d'habitude du type plomb-acide. Les batteries nickel-cadmium sont rarement utilisées. La technologie des batteries plomb-acide bénéficie en effet d'avantages, tels son faible coût (par rapport à d'autres technologies) et une maturité étayée par un retour d'expérience conséquent. Cette technologie est par ailleurs largement disponible dans le commerce.

Le stockage d'énergie est souvent utilisé dans les petits systèmes hybrides à fin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours). Il est parfois aussi utilisé avec les SEH connectés à des grands réseaux de courant alternatif isolés. Dans ce cas, il est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme [50]

#### **II.4.1.5 Système de supervision**

La plupart des systèmes hybrides comportent une certaine forme de commande. Parfois, la commande est intégrée individuellement dans chaque composant du système. Un autre type de commande plus global permet la surveillance de certains ou de tous les composants. Les fonctions spécifiques peuvent inclure la commande de démarrage et d'arrêt des générateurs diesels, l'ajustement de leurs points de fonctionnement, le chargement des batteries et la répartition de la puissance pour les différents types de charges.

#### **II.4.1.6 Convertisseurs**

Dans un système d'énergie hybride. Des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le courant continu (CC) en à courant alternatif (CA) et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les systèmes d'énergie hybride : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs.

- Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Dans le système d'énergie hybride, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement ils sont généralement monophasés ou triphasés.
- Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu' ils imposent leur propre fréquence à la charge.
- Les hacheurs, le troisième type de convertisseurs, permettent de réaliser la conversion CC/CC pour adapter la tension entre deux sources.

#### **II.4.1.7 Charges**

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges à CC peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont les variations transitoires de tension et courant pendant les changements dans le fonctionnement du système.

### **II.5 Classification des systèmes hybride**

Plusieurs classification de système hybride son réalisées selon le critère choisi... dans la suite sont présentées la classification les plus répandues:

#### **II.5.1 Classification selon le régime de fonctionnement**

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes

Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides travaillant en parallèle avec le réseau électrique appelés aussi des systèmes hybrides connectés au réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique.

Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome.

Ils doivent répondre aux besoins de consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique : refuges de montagne, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc.

#### **II.5.2 Classification selon la structure du système hybride :**

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système.

##### **✓ Premier critère**

Est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet – une centrale tout entière.

##### **✓ Second critère**

Possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc. ...

##### **✓ Troisième critère**

Classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle etc.

## **II.6 Nécessité de l'intégration**

L'atteinte des objectifs de développement des énergies renouvelables électriques, pose de nouveaux enjeux d'intégration. Une transformation réussie du système électrique, sur la base d'une composante renouvelable importante, nécessite une approche systémique tenant compte des trajectoires d'évolution de l'offre et de la demande (électrique et toutes énergies), des interactions et mise en concurrence de diverses options de flexibilité permettant d'assurer la stabilité du système (interconnexions, gestion active de la demande, stockage), du développement des infrastructures et de l'articulation entre le système technique et l'organisation du marché. L'analyse prospective des systèmes électriques permet d'évaluer ce besoin de flexibilité croissant tout en identifiant de nombreux leviers d'optimisation pour faciliter l'intégration des énergies renouvelables, à commencer par la coordination à l'échelle régionale.

## **II.7 Gestion optimale d'un système hybride**

Les gestionnaires d'énergie des systèmes hybrides de production d'électricité sont contraints à satisfaire la demande électrique à tout moment avec un minimum de défaillances, une qualité acceptable de l'énergie fournie et un coût de production le plus faible que possible. Toutes ces contraintes combinées avec le caractère intermittent des sources d'énergie renouvelable telles que le solaire conduisent à un système souvent complexe avec de nombreux degrés de liberté. Fort de ces considérations, le développement et la mise en place de système de gestion et de supervision des systèmes multi-sources comme les systèmes PV/Diesel par exemple ou d'autres s'imposent.

## **II.8 Méthodes d'optimisation**

De nombreux outils logiciels sont disponibles dans le commerce, lesquels peuvent être utilisés pour l'intégration du système en temps réel. Par ailleurs, plusieurs techniques d'optimisation ont également été appliquées par de nombreux chercheurs pour le dimensionnement des systèmes multi-sources à base d'énergie renouvelable (hybrides).

## **II.9 Outils logiciels disponibles dans le commerce pour le dimensionnement du système hybride**

Les programmes de simulation sont les outils les plus courants pour l'évaluation des performances des systèmes hybrides à base d'énergie renouvelable. À l'heure actuelle, il existe de nombreux programmes de logiciels qui peuvent être téléchargés à partir des sites Web de plusieurs laboratoires de recherche et des universités. En utilisant ces programmes de simulation, la configuration optimale peut être trouvée en comparant la performance et le coût de production de l'énergie des différentes configurations du système. Parmi les programmes de dimensionnement les plus célèbres pour les systèmes hybrides figure le logiciel HOMER développé par National Renewable Energy Laboratory (NREL), aux États-Unis. HOMER comprend plusieurs modèles de composants d'énergie, comme l'énergie photovoltaïque (PV), éolienne, hydro, batteries, générateur diesel et autres dispositifs nécessitant du carburant, unités d'électrolyse, piles à combustible, et évalue les options appropriées en tenant compte des coûts et de la disponibilité des ressources énergétiques.

Le raccordement au réseau est également pris en compte dans la procédure de conception de HOMER. Le logiciel nécessite des informations initiales, y compris les ressources énergétiques, les contraintes économiques et techniques, les exigences de stockage d'énergie et les stratégies de contrôle du système. Les entrées comme le type de composant, le capital, le remplacement, les coûts d'exploitation et de maintenance, l'efficacité, la durée de vie opérationnelle, etc. sont également nécessaires.

HOMER a été largement utilisé dans plusieurs études de cas de système d'énergie renouvelable existant dans la littérature. Les deux types de systèmes, autonomes et raccordés aux réseaux, ont été largement étudiés. En outre, la combinaison parallèle de sources d'énergie renouvelables et les systèmes conventionnels tels que les générateurs diesel a également été examiné dans de nombreuses études.

Plusieurs autres outils logiciels sont également disponibles pour la conception de systèmes hybrides, tels que :

- Hybrid2: " Simulation Hybrid Power System Model ", [178],
- GAMS: " The General Algebraic Modeling System, " [179],
- ORIENTE: " Optimization of Renewable Intermittent Energies with Hydrogen for Autonomous Electrification " [180],
- OptQuest [181], - LINDO [182],
- WDILOG2 [183], - DIRECT: " Dividing Rectangles" [184],
- DOIRES: " Determining Optimum Integration of RES (DOIRES) " [185],
- SimPhoSys: " Simulation of Photovoltaic Energy Systems " [186],
- GSPEIS: " Geo-Spatial Planner for Energy Investment Strategies" [187],
- GRHYSO: " Grid-connected Renewable Hybrid Systems Optimization" [188],
- H2RES [189]

## **II.10 Conclusion**

L'électricité actuellement est produite principalement à partir de combustibles fossiles. Les impacts économiques et écologiques de ces combustibles non renouvelables qui s'ajoutent aux contraintes techniques liées aux distances d'approvisionnement pour des endroits plus au moins isolés imposent le recourt à l'intégration de plusieurs sources d'énergies surtout de caractère renouvelable via des systèmes hybrides. Nous avons consacré ce chapitre à la question de l'intégration de sources d'énergie renouvelables ou non, qui constitue donc une solution écologique et économique et qui répond aux besoins énergétiques des communautés et des sites industriels ou ordinaires isolés. Toutefois, l'intégration de plusieurs sources d'énergie pose certains défis à l'exploitation optimale de l'énergie offerte par ces systèmes pour cela une gestion optimale sera nécessaire pour une exploitation idéal au maximum de profit. Plusieurs méthodes d'optimisation utilisées sous forme de logiciels qui s'intègrent dans ces systèmes hybrides pour leurs gestions optimales.

Dans le troisième chapitre nous présentons le logiciel de gestion optimale HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources), qu'on va utiliser par la suite pour la simulation et l'étude d'optimisation de notre cas d'étude proposé.

# Chapitre III

## Présentation du logiciel HOMER

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre on va présenter le logiciel de la gestion optimale de plusieurs sources d'énergie électrique connu sous le nom HOMER.

Nous détaillons au fil de ce chapitre les étapes nécessaires pour l'implantation du modèle d'un système hybride et la simulation de ce dernier et finalement l'obtention des résultats de simulation.

La méthode d'analyse des résultats de simulation et d'optimisation sera aussi présenté vers la fin de ce chapitre.

### III.2 Présentation de logiciel HOMER

Le logiciel de modélisation énergétique HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) est un outil puissant pour la conception et l'analyse des systèmes de production d'électricité hybrides composés de groupes électrogènes, de systèmes de cogénération, d'éoliennes, de systèmes photovoltaïques, de systèmes hydrauliques, de batteries, de piles à combustible, de la biomasse et bien d'autres. Les ingénieurs et les non-professionnels utilisent HOMER afin d'effectuer des simulations de différents systèmes énergétiques, de comparer les résultats et d'obtenir une projection réaliste de leur capital et des dépenses d'exploitation. Il est actuellement utilisé dans le monde entier par des dizaines de milliers de personnes.

HOMER a été initialement développé dès 1993 par le National Renewable Energy Laboratory pour les programmes d'électrification rurale. Depuis 2009, il est disponible sous la licence HOMER Energy. HOMER détermine la faisabilité économique d'un système d'énergie hybride, permet d'optimiser la conception du système et permet aux utilisateurs de comprendre vraiment comment les systèmes hybrides d'énergies renouvelables fonctionnent. Comme la production distribuée et les projets d'énergies renouvelables continueront d'être le segment le plus dynamique de l'industrie de l'énergie, HOMER peut servir les compagnies publics, les télécommunications et de nombreux autres types de développeurs de projets – afin d'atténuer le risque financier de leurs projets de centrales hybrides.

### III.3 Comment utiliser HOMER ?

Pour utiliser HOMER, vous fournissez au modèle des entrées qui décrivent les options technologiques les composants les coûts et la disponibilité des ressources.

HOMER utilise ces entrées pour simuler différentes configurations de système, ou combinaisons de composants et génère des résultats que vous pouvez afficher sous forme de liste de configurations possibles triés par coût actuel.

HOMER affiche également les résultats de la simulation dans une grande variété de tableaux et de graphiques.

Qui vous aident à comparer les configurations et à les évaluer sur leurs mérites économiques et techniques. Tu peux exporter les tableaux et les graphiques pour les utiliser dans des rapports et des présentations. Lorsque vous souhaitez explorer l'effet que des changements dans des facteurs tels que la disponibilité des ressources et la situation économique conditions peuvent avoir sur la rentabilité des différentes configurations de système, vous pouvez utiliser le modèle pour effectuer des analyses de sensibilité. Pour effectuer une analyse de sensibilité, vous fournissez à HOMER des valeurs de sensibilité qui décrivent une plage de disponibilité des ressources et des coûts des composants. HOMER simule chaque configuration système sur la plage de valeurs. Vous pouvez utiliser les résultats d'une analyse de sensibilité pour identifier les facteurs qui ont le plus d'impact sur la conception et l'exploitation d'un système électrique. Tu peux également utiliser les résultats de l'analyse de sensibilité HOMER pour répondre aux questions générales sur les options technologiques à informer la planification et les décisions politiques.

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

### **III.4 Fonctionnement du logiciel HOMER**

HOMER Energie permet de simuler, d'optimiser et aussi réaliser une analyse de sensibilité pour les systèmes d'énergie renouvelable. Il est utile aussi bien pour les centrales électriques villageoises, les camps, les chalets, les bases militaires que pour les habitats individuelles, reliés ou non au réseau.

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 calcule le rendement énergétique, le coût du système et le % d'émission de gaz à effet de serre pour chaque configuration.

Dans un deuxième temps, HOMER optimise le(s) système(s) déjà simulé(s). 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

En dernier temps, HOMER peut modéliser l'impact des variables qui sont hors de 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.

### III.5 Étapes de modélisation, simulation, optimisation par HOMER

La mise en œuvre du logiciel passe par les étapes d'implantation du modèle puis la simulation et finalement l'obtention des résultats comme suit :

#### III.5.1 Définition du projet

À la première ouverture du logiciel, un environnement pour définir le projet s'offre à nous. Il sert à entrer le nom du projet, l'auteur, une description sommaire du projet et la localisation du projet. Cette dernière servira à télécharger les données des ressources.

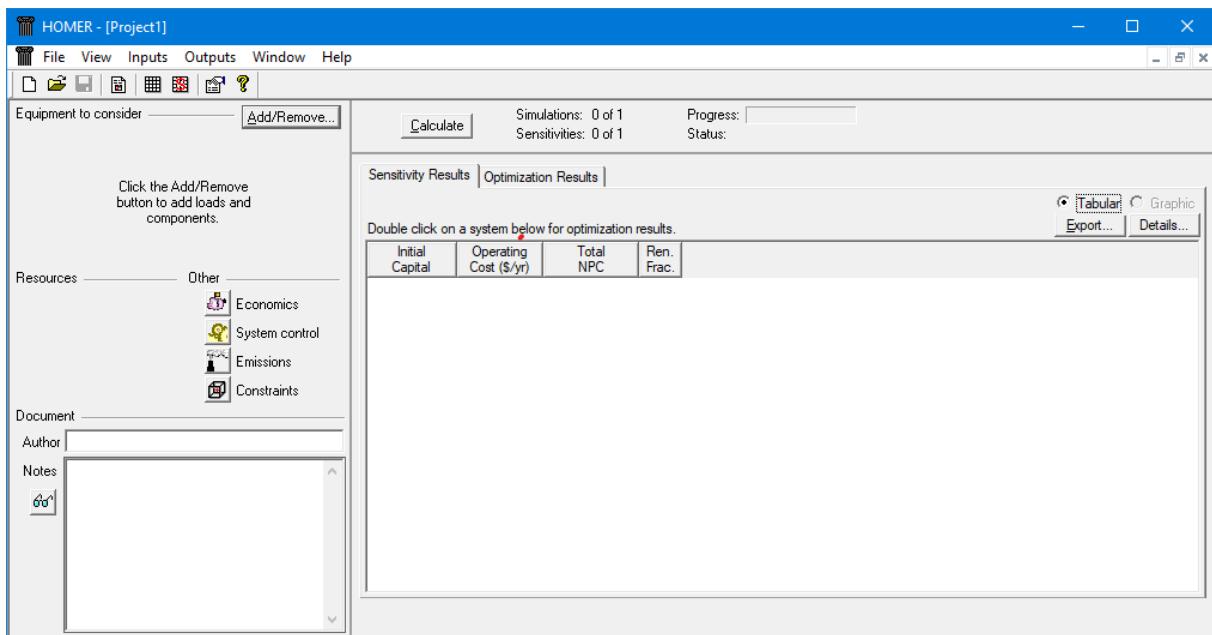


Figure III.22 : Interface d'entrée du logiciel HOMER

#### III.5.2 Implantation du modèle à simulé

##### III.5.2.1 Introduction de charge

Sous le menu Load nous pouvons définir les charges à supporter par le système. Nous devons ajouter le profil de la charge au modèle, modifier les spécifications de chargement après l'ajout de la charge au modèle et spécifier le type de la charge ( primaire, thermique, secondaire ou d'hydrogène).

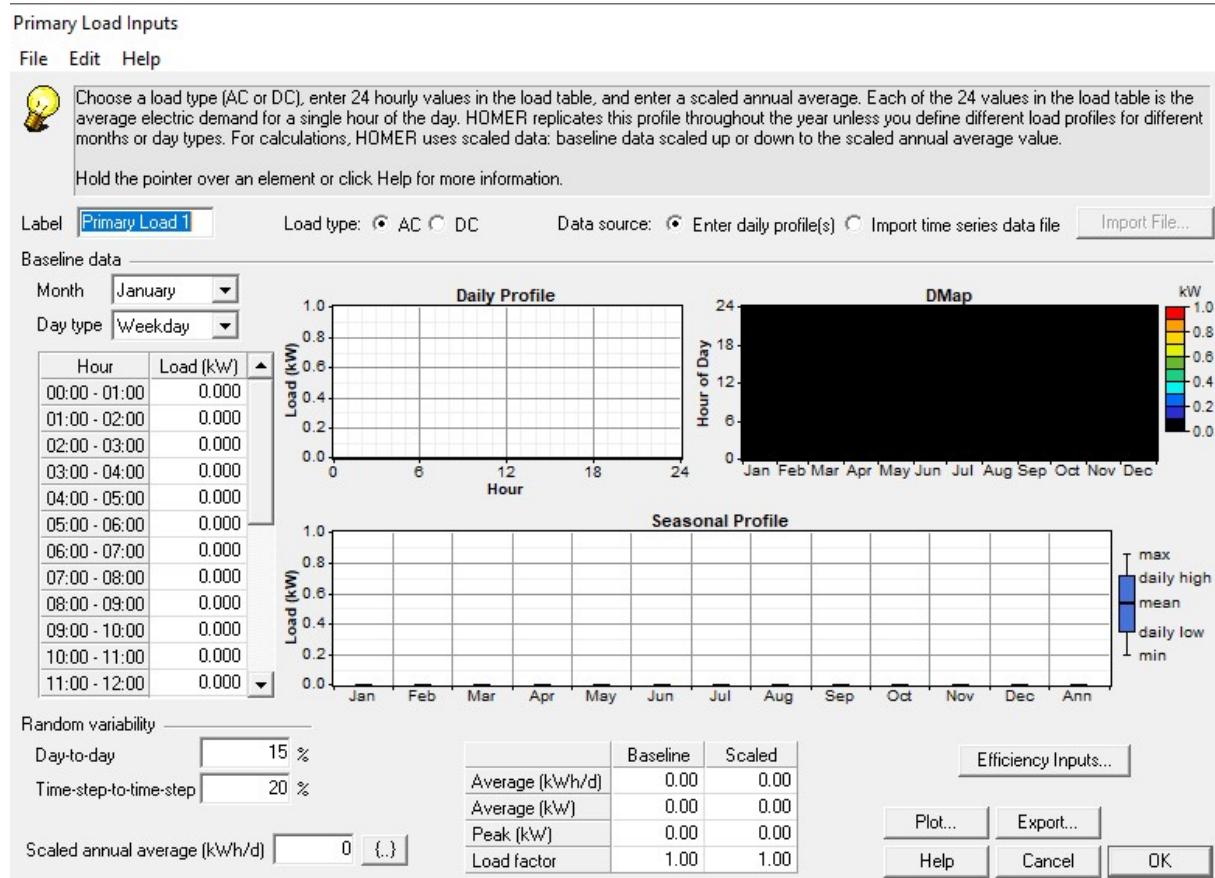


Figure III.23 : Interface d'introduction de la charge

### III.5.2.2 Choix des composantes

En utilisant le menu component, nous pouvons choisir tous les composants que nous voulons considérer dans notre système d'alimentation. HOMER offre un nombre considérable de composants à savoir générateur, PV, éolienne, différents dispositifs de stockages, convertisseur, hydro, reformer, électrolyseur, réservoir d'hydrogène, hydro cinétique, réseau et contrôleur de charge thermique. D'autres modules concernant l'énergie biomasse sont aussi disponibles via l'ajout d'un module supplémentaire du logiciel. Lors du choix des composants, il est important de sélectionner tous les composants des différents systèmes que nous voulons considérer et d'entrer les spécifications techniques et les différents coûts pour chaque composant.

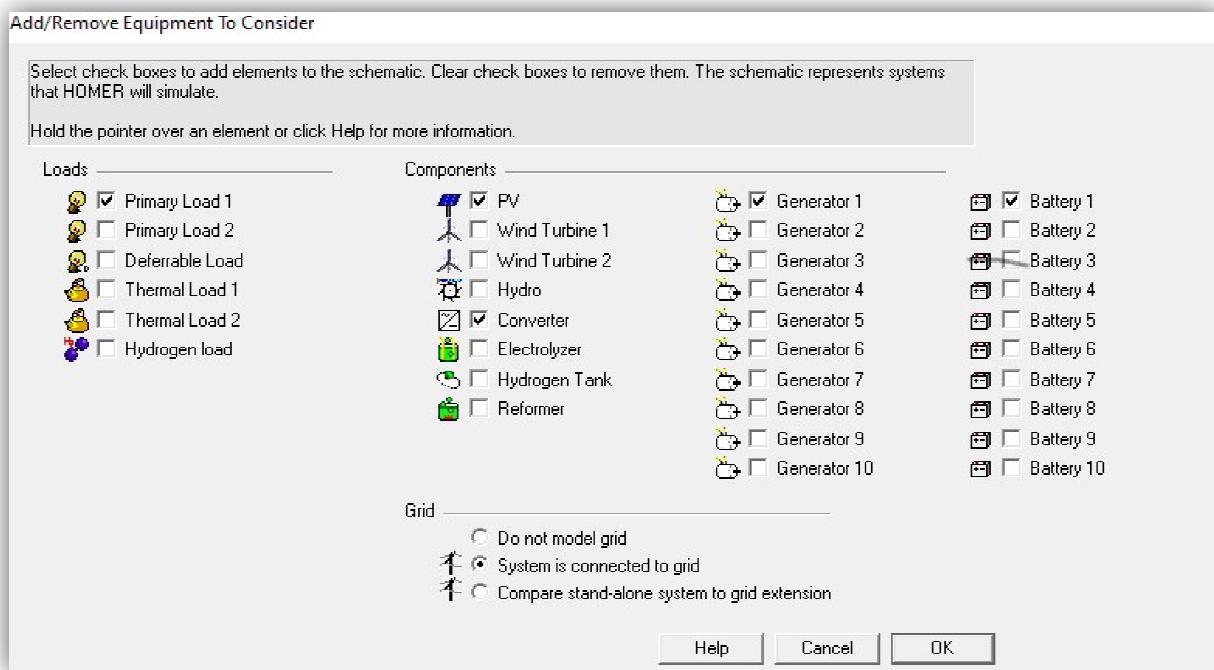


Figure III.24 : Interface de conception du modèle de système hybride

### III.5.2.3 Introduction de la répartition détaillée des puissances des ressources

HOMER définit une ressource comme étant tout ce qui provient de l'extérieur du système. Chaque ressource est liée à un composant (exemple les données de vent pour l'éolienne). Le menu Ressources permet d'introduire les données de la ressource. Ces dernières peuvent être importées à partir des bases de données de HOMER suivant la localisation du projet. Ils peuvent être téléchargés à partir d'un fichier ou entrer directement.

2-4- Entrer les données relatives à l'aspect économique, le système de contrôle, les émissions et les contraintes du projet. Ces données peuvent être spécifiées sous le menu Project. Ces données sont :

Les données économiques concernent le taux d'intérêt réel annuel, la durée de vie du projet, le coût de la charge non satisfaite, le coût du capital fixe du système, le coût fixe du fonctionnement et de l'entretien du système. La taxe sur le carbone.

Les données du Contrôle du système : concernent principalement la stratégie d'expédition (charge suivante, cycle de charge), qui détermine comment le ou les générateurs chargent le banc de batterie.

Les contraintes s'associent à la réserve d'exploitation, la capacité maximale de stockage annuelle, fraction minime de l'énergie renouvelable que le système devrait satisfaire.

Les données sur les émissions permettent de spécifier la pénalité associée à un polluant, ou la limite acceptable aux émissions des polluants.

Dans le même onglet, nous pouvons entrer les valeurs de chaque variable qui serviront à l'optimisation du système ou définir certains systèmes que nous voulons exclure de l'optimisation

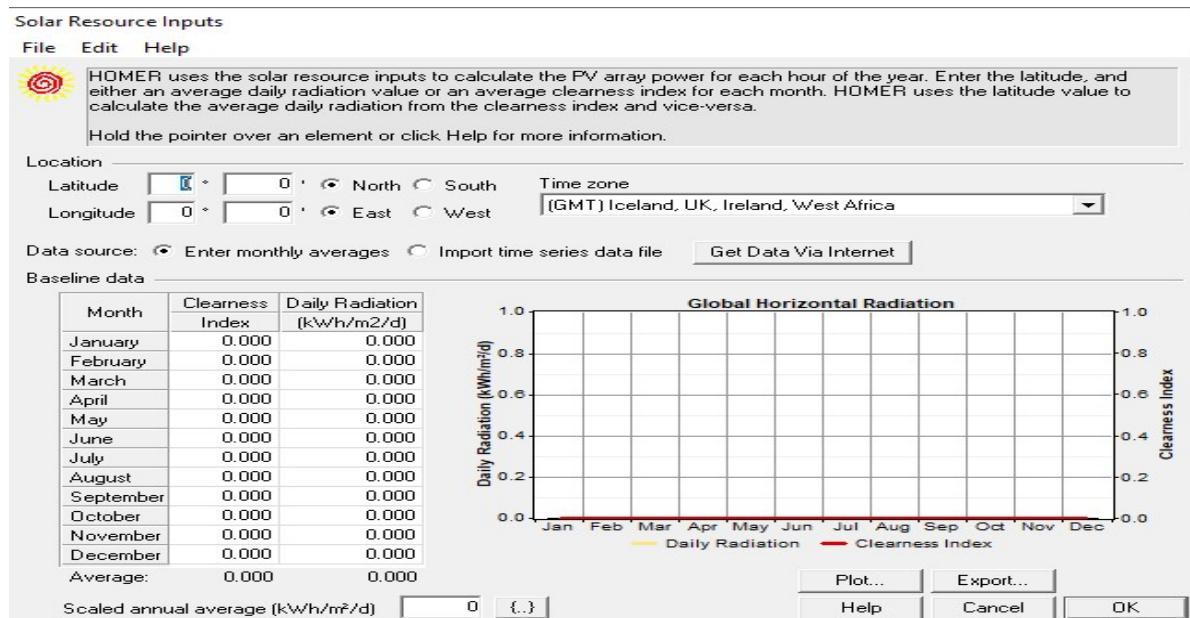


Figure III.25 : Interface de caractérisation de la source solaire

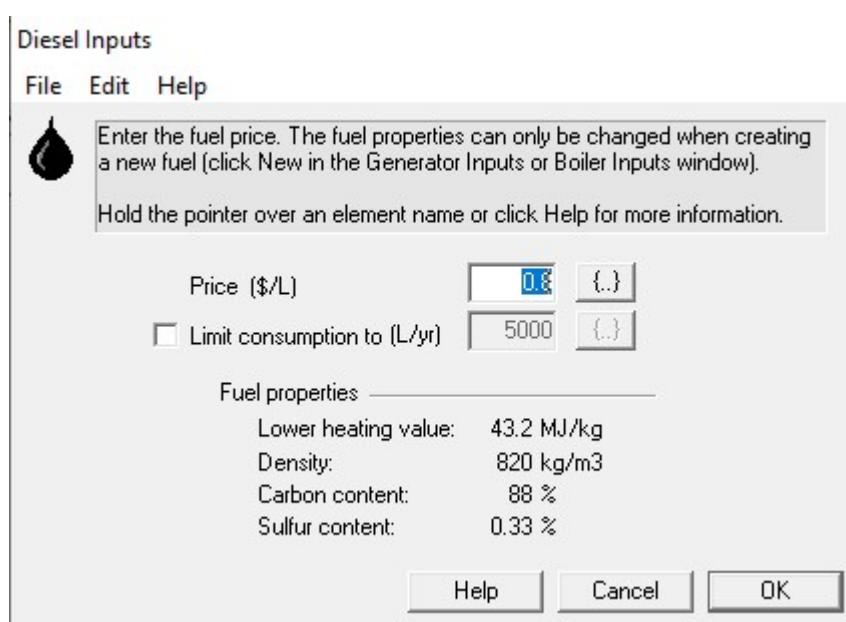


Figure III.26 : Interface de caractérisation de générateur diesel (source électrogène)

### III.6 Analyse des résultats de la simulation

Il s'agit de faire une analyse des coûts, du flux de trésorerie, de la consommation et la production de l'électricité du système, des émissions, des détails d'opération pour chaque composant, du carburant, du stockage et du réseau de chaque système simulé. Les différentes analyses se font en se basant sur les différents rapports, tables et graphes que Homer met à la disposition de l'utilisateur.

### III.7 Analyse des résultats de L'optimisation

Les résultats de l'optimisation peuvent être affichés sous forme de tableau ou de graphe. En effet après la simulation, Homer répertorie dans le tableau des simulations tous les systèmes réalisables. Par défaut, il les trie selon la plus grande valeur actuelle nette.

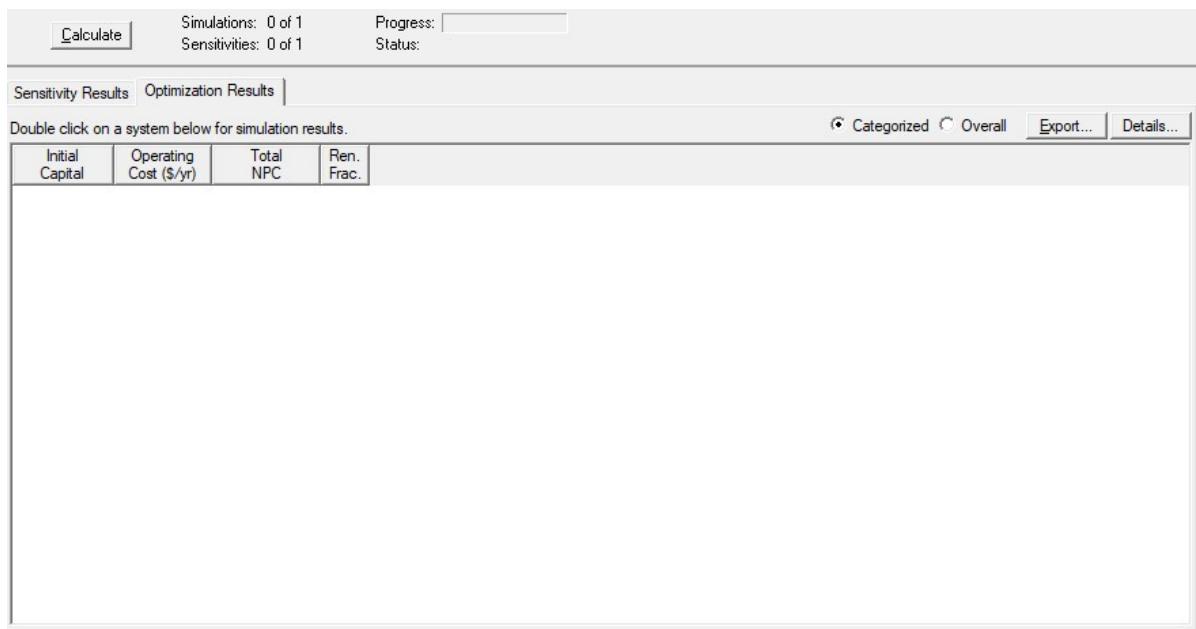


Figure III.27 : Interface d'affichage des résultats de simulation

### III.8 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation du logiciel HOMER et son mode d'emploi. Nous avons récapitulé l'ensemble des Étapes de modélisation, simulation, optimisation d'un système hybride par HOMER.

La présentation de ces étapes est renforcée par des captures d'écran tirées de l'interface du logiciel afin de rendre facile la familiarisation des lecteurs de notre mémoire avec ce logiciel.

# Chapitre IV

Etude de la gestion optimale  
système à sources d'énergies  
hybride alimentant une  
exploitation agricole

#### IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons l'étude de la gestion optimale d'un système à sources d'énergies hybride alimentant une exploitation agricole. Cette étude base sur les connaissances acquises aux chapitres précédent et passe dans sa projection pratique et sa mise en œuvre par les étapes détaillées au troisième chapitre. Cette étude commence donc par la conception de modèle du système hybride à simulé, puis par sa simulation et arrivant aux résultats qui seront analysés et finalement à l'analyse d'optimisation du ce système.

#### IV.2 Présentation du cas réel étudié :

Nous étudions dans ce travail la gestion optimale de plusieurs sources d'énergies électriques. Pour mettre cette étude en évidence nous appliquons le principe de la gestion optimale sur un cas réel qui est une exploitation agricole destinée à l'élevage animalier. Dans ce qui suit nous présentons les caractéristiques techniques de cette exploitation.

##### IV.2.1 Situation géographique et architecture de l'exploitation agricole

L'exploitation agricole est une ferme privée d'élevage animalier d'ovins et bovins avec quelques hectares de bouturage. Elle s'étale sur 5 hectares près du douar knadssa à la commune de Saida. Son plan de masse comporte : trois hangars d'élevage, une habitation et une surface agricole arrosée.

Les besoins énergétiques de chaque partie seront détaillées par la suite, cela afin d'évaluer la puissance nominale totale demandée par la charge globale.

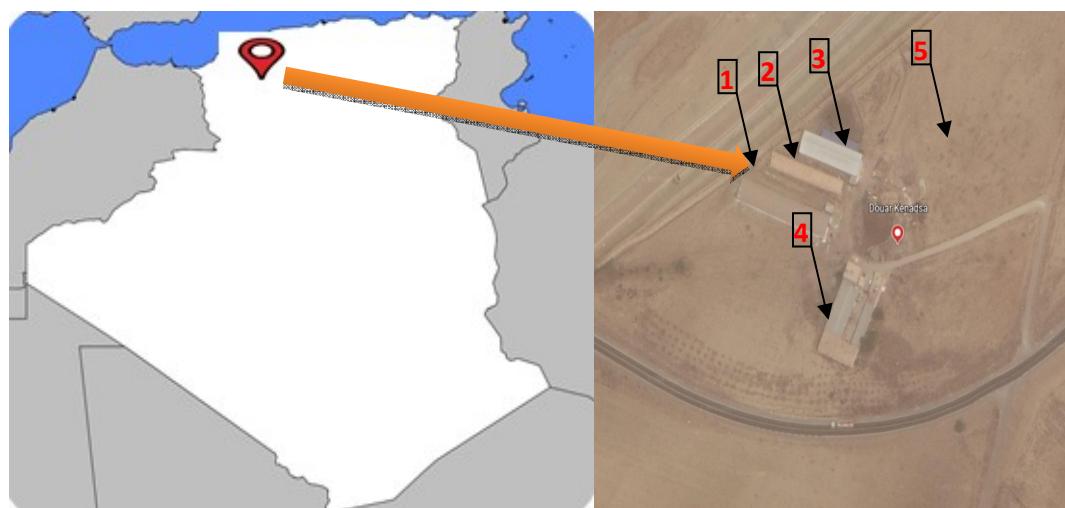


Figure IV.28: Photographie de localisation et vue panoramique de plan de masse de la firme

1- Hangard d'élevage de vaches litières (**H.V.L**) ;

2- Hangars d'élevage de poules (**H.V.P**)

- 3- Hangar (**H**) ;
- 4- Habitations (**HA**) ;
- 5- Groupes électrogène (**G.E**) ;

#### **IV. 2.2Constitution et répartition des charges électriques de l'exploitation agricole**

Dans cette partie nous détaillons l'ensemble des besoins énergétique des différentes parties de l'exploitation agricole. Ce détail base sur le recensement des équipements utilisé par les utilisateurs en exerçant leurs tâches journalières

##### **IV. 2.2.1 Détails de la répartition de la charge**

###### **➤ *Habitation***

La puissance demandée est de 1.5 kw représente les besoins d'éclairage et d'équipements ménagères

###### **➤ *Hangar d'élevage de vaches litières (H.V.L)***

C'est un hangar de surface de 25 x 8 m, il comporte de deux machines litières d'une puissance unitaire nominale de 4800 w chacune et 15 lampes d'une puissance unitaire de 80w soit une puissance globale de 1200 w et deux ventilateurs d'une puissance unitaire de 1500w.

###### **➤ *Hangars d'élevage de poules (H.V.P)***

C'est un hangar d'une surface 25x 8 m, il contient deux climatiseurs d'une puissance unitaire de 1500 w et 15 lampes d'une puissance unitaire de 80 w soit une puissance globale de 1200w.

###### **➤ *Hangars d'élevage de vauts(H.V)***

C'est hangars d'élevage de vaches d'une surface de 40 x 12 m, il contient 15 lampes d'une puissance unitaire de 80 soit une puissance de 1200 w globale, et deux ventilateurs d'une puissance unitaire de 1500 w.

#### **IV. 2.3Evaluation et quantification de la puissance par unité de l'exploitation**

On regroupe les charges de même vocation dans deux charges globales, tel qu'il est montré sur les tableaux 1 et 2.

➤ Charge 1 :

Désignation	Puissance (w)	Temps (h/j)	Consommation (wh/j)
<b>Chambre adulte</b>	48	4	192
<b>Chambre d'enfant</b>	48	4	192
<b>Salon</b>	96	5	480
<b>Couloire</b>	180	6	1080
<b>Cuisine</b>	48	5	240
<b>Salle de bain</b>	24	4	96
<b>Sanitaire</b>	12	1	12
<b>Télévision</b>	80	4	320
<b>Réfrigérateur</b>	240	24	5760
<b>Climatiseur</b>	480	4	1920
<b>Divers</b>	150	1	150
<b>Total (wh/j)</b>			10442

Tableau IV.1 : récapitulatif journalières; puissances, temps, consommation de la première charge

➤ Charge 2 :

Désignation	Puissance (w)	Temps (h/j)	Consommation (Wh/j)
<b>Hangar vœux</b>	1200	4	4800
<b>Hangar vache litière</b>	1200	4	4800
<b>Hangar poulier</b>	1200	4	4800
<b>Machine Industrielle</b>	4800	4	19200
<b>Ventilateur</b>	4500	3	13500
<b>Total (WH/j)</b>			47100

Tableau IV.2 : récapitulatif journalières; puissances, temps, consommation de la deuxième charge

#### IV.3 Formulation et Implantation du modèle de simulation de l'exploitation agricole

Le schéma suivant présente le modèle implanté sur le logiciel HOMER pour la simulation de système hybride, le schéma du système montre les différents éléments constituant ce dernier. Il s'agit de sources d'alimentation : le réseau public (grid), le groupe électrogène (generator1), PV (source photovoltaïque), 6FM200D (la batterie).

Le schéma regroupe aussi les deux charges définies précédemment sur les tableaux 1 et 2, convertir (convertisseur AC/DC/AC) et les interconnexions entre les différents éléments du système.

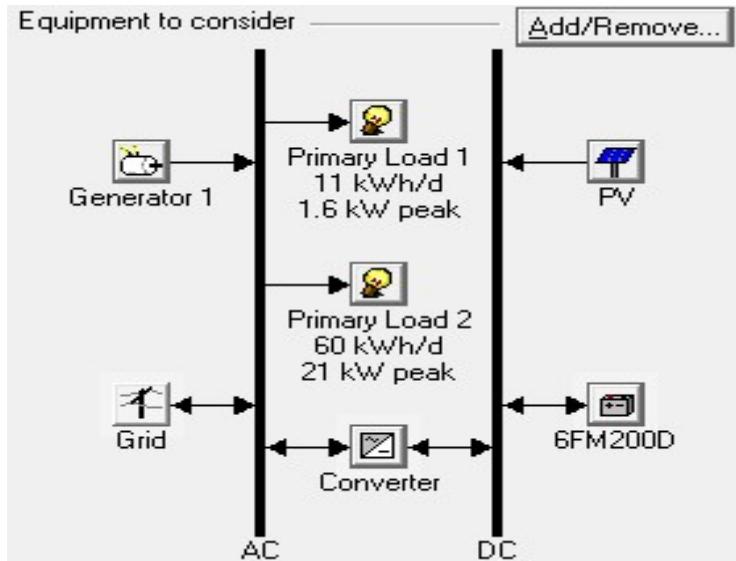


Figure IV.29 : Schéma du modèle Homer de système électrique implanté

#### IV.4 Résultat de simulation et discussions

La figure VI. 30 :représente plusieurs éléments de résultats. Nous essayons d'expliquer ceux qui sont indiqués en rouge.

- 1- Le premier élément de résultat, présente le détail des puissances nominales de chaque composant de notre système hybride. On remarque que les puissances de chaque composant source couvre au minimum la puissance demandé de la charge.
- 2- Le deuxième élément de résultat, montre le coût moyen obtenu d'un Kwh qui est de 0,126 \$, environ 18,37 DA, qui est relativement très élevé par rapport au prix offert pour un Kwheur sur le réseau public qui est d'environ 5,6 DA au maximum.
- 3- Le troisième élément de résultat présente les taux des contributions par chaque source impliquée en l'approvisionnement de la charge.

On remarque que les deux sources réseau public et photovoltaïque sont majoritaires en approvisionnement de la charge malgré que leurs coûts de kwheur, sont très élevées par rapport aux autres sources. Cela est dû forcement par les critères considérés.

## Chapitre 4 Etude de la gestion optimale d'un système à sources d'énergies hybride alimentant une exploitation agricole

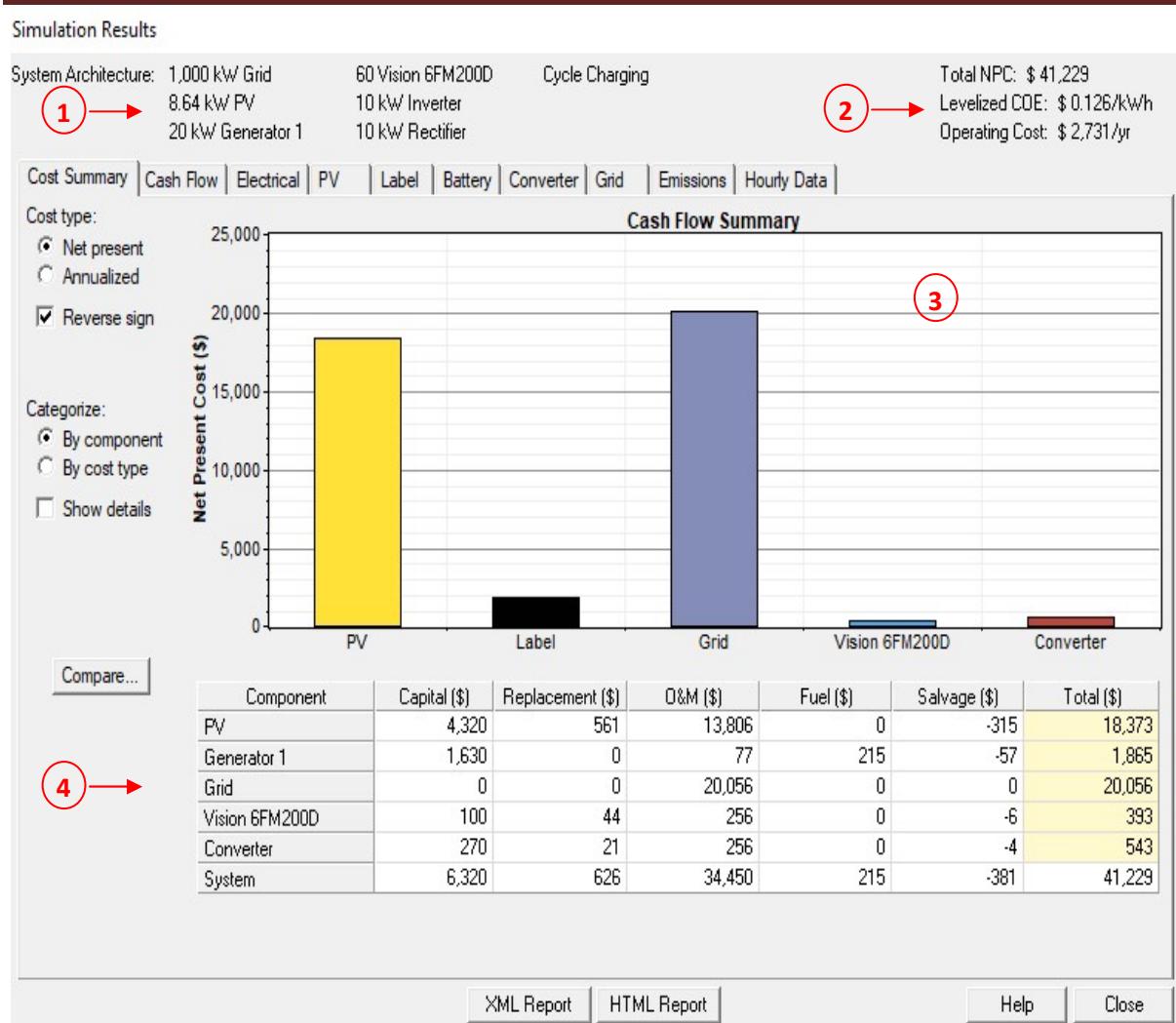


Figure IV.30 : Détail des puissances produites par chaque source dans le système hybride optimisé

On peut remarqué que le réseau public et la source photovoltaïque présentent en total les coûts les plus élevés avec 20056\$ et 18373\$, environ 48,6% et 44,6% respectivement du coût total du système.

On peut conclure que la simulation implique pour une gestion optimale en considérant les critères imposés implique majoritairement le réseau public et le système photovoltaïque pour assurer l'alimentation des charges de notre système hybride.

## Chapitre 4 Etude de la gestion optimale d'un système à sources d'énergies hybride alimentant une exploitation agricole

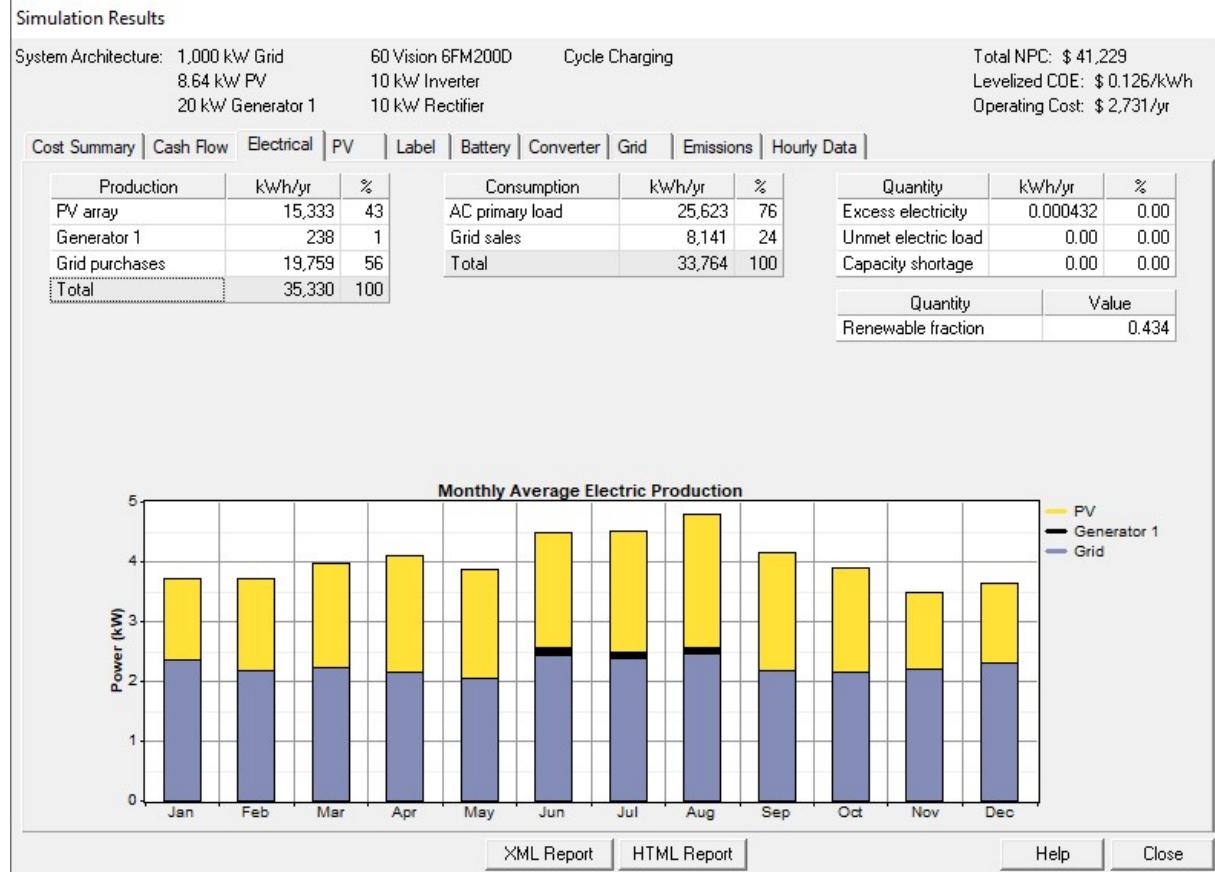


Figure IV.31 : Répartition annuelle des puissances produites par source

La figure IV.31 , montre la production électrique et ces pourcentages de chaque source en système hybride par mois.

On peut clairement remarquer le réseau et le système photovoltaïque dominent la production annuelle avec des pourcentages de 56 et 43% chacune.

Pour la consommation on remarque la charge primaire domine la consommation d'énergie avec un pourcentage de 76%. Cela veut dire que si on veut déminer la consommation totale, il faut réduire la demande énergétique par les différentes composantes de cette charge.

On remarque aussi sur l'histogramme de la production annuelle que durant les mois de juin, juillet et aout le système hybride intègre trois sources de production qui sont, le réseau public, le système photovoltaïque et le générateur diesel contrairement autres mois de l'années où il fait appelle uniquement au deux premiers sources.

## Chapitre 4 Etude de la gestion optimale d'un système à sources d'énergies hybride alimentant une exploitation agricole

La justification de cela est l'augmentation de la puissance de la charge demandée durant cette période.



Figure IV.32 : Coût total et partiel de différentes opérations durant un cycle de vie de 25 ans de système hybride

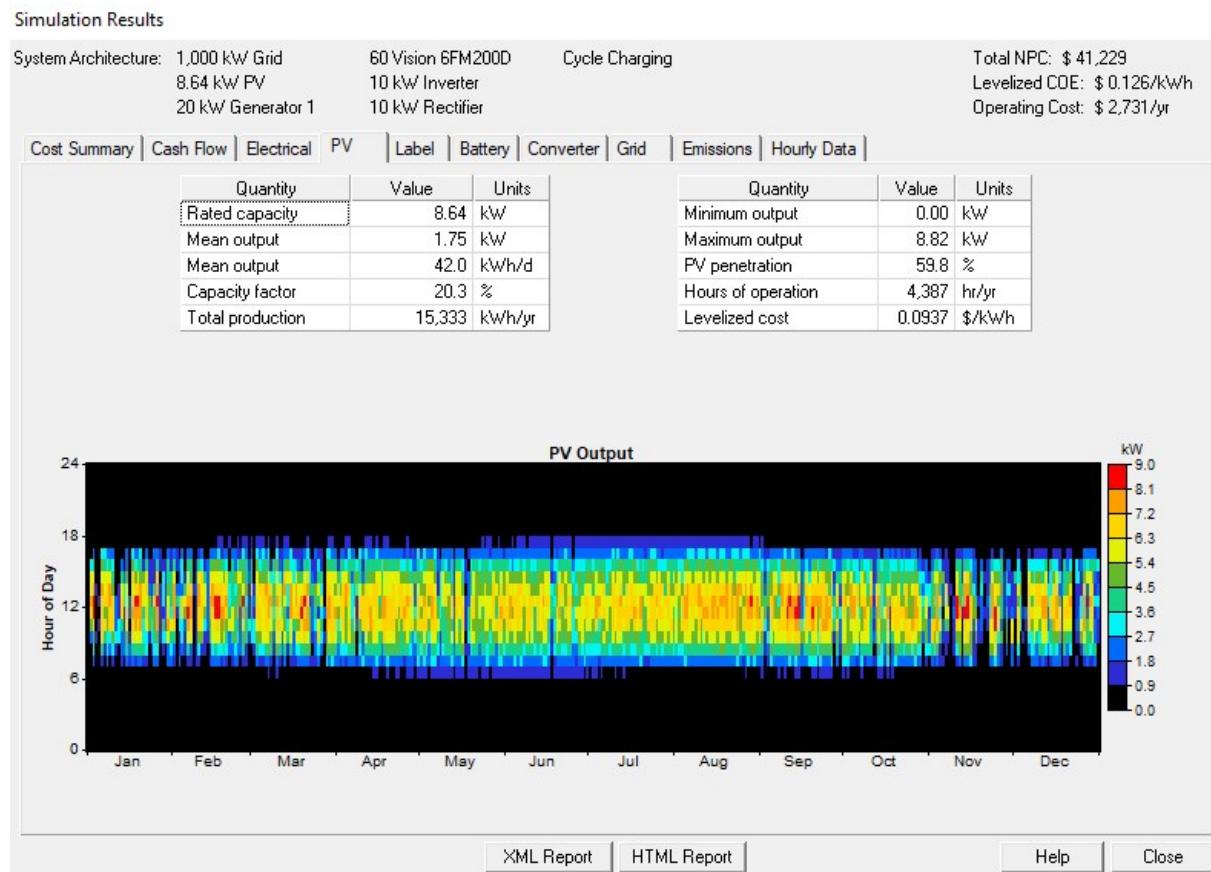
L'histogramme de la figure IV.32 , montre le capital total et les capitaux partiels sont de signe négatif sauf celui de démentiellement. Sachant qu'on achète de l'énergie et on injecte plus une quantité produite sur le réseau, donc l'ensemble des opérations sont des dépenses sauf celle de démentiellement où on récupère un taux de capital par le procédé de récupération via le recyclage.

On remarque la dépense lié au carburons est négligeable car le générateur diesel est très peu intégrer par le système hybride est cela uniquement sur les mois de juin, juillet et aout.

La majeure partie des dépenses est celle des opérations de maintenance et qui est d'une valeur constante.

La dépense liée à l'opération de remplacement apparue une seule fois car cette opération est périodique.

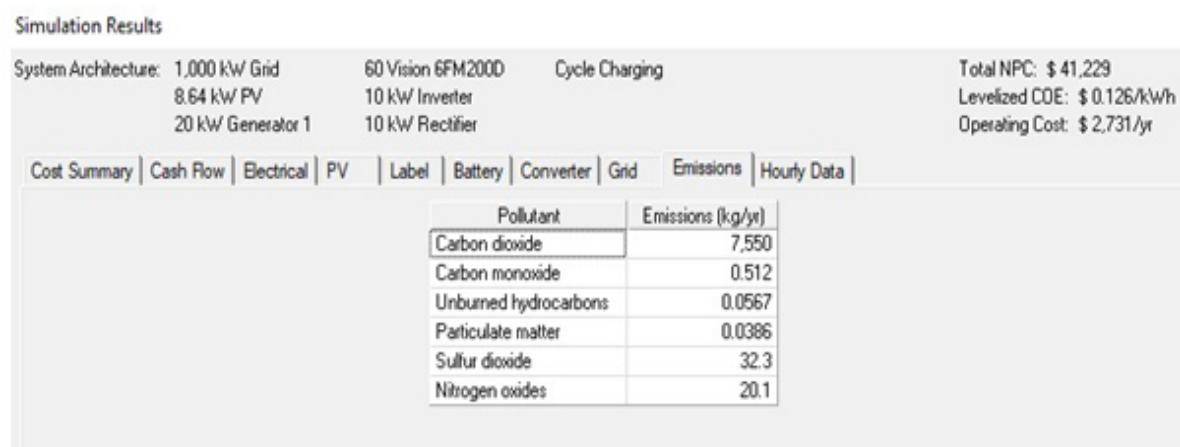
## Chapitre 4 Etude de la gestion optimale d'un système à sources d'énergies hybride alimentant une exploitation agricole



*Figure IV.33 : puissance débité par le système photovoltaïque durant l'année*

La figure IV.33 , montre la puissance débité par le système photovoltaïque durant l'année.

On peut remarquer que cette puissance est entre 6h et 18h dans journée. Cette plage temporelle est élargie surtout sur les mois d'été (juin, juillet et aout). Cette tendance est strictement liée à la localisation géographique de l'exploitation agricole qui se situe dans une région de bon indexe d'ensoleillement.



*Figure IV.34 : coût écologique et taux d'émissions des différents effluents*

## Chapitre 4      Etude de la gestion optimale d'un système à sources d'énergies hybride alimentant une exploitation agricole

---

Les résultats de la figure IV .34, présentent les valeurs des émissions polluantes accompagnant la production énergétique du système hybride. Le tableau récapitulatif des émissions montre des valeurs très élevées des oxydes sulfuriques SO<sub>2</sub> (32,3 kg/an) et d'azote NO<sub>2</sub> (20,1 kg/an) et une valeur importante aussi de CO<sub>2</sub> (7,55 kg/an).

Ces émissions représentent surtout l'équivalent issu de l'incinération des carburants au centrale de réseau publique et d'un degré moins de l'équivalent d'émission estimées du système photovoltaïque.

Ces valeurs importante sont justifiables car les deux sources sontles impliquées en production selon les résultats précédents avec des pourcentages de 56 et 43% chacune.

### IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude surla gestion optimale d'un système électrique à sources d'énergies hybride alimentant une exploitation agricole commençant par la présentation du cas étudié à partir de sa situation géographique et son architecture puis la détermination et la répartition des charges électriques de l'exploitation agricole et sa puissance demandée. Cela nous a permit de formulé et implanté le modèle de simulation sur le logiciel de gestion optimale des systèmes hybrides HOMER. Les résultats obtenus sont discuté soit sur le plan de la gestion des ressources soit sur le plan d'optimisation de la puissance.

Les résultats qui représente un premier pas dans cet axe de recherche, ont était logiques et significatifs dont on peut les exploités pour d'autre étapes ou d'autres cas plus compliqué.

# Conclusion générale

### **Conclusion générale**

Les problèmes de continuité de service, la bonne gestion des sources d'énergie et les complications d'approvisionnement des sites isolés, imposent vivement un nouveau concept dit la gestion optimale des systèmes hybrides à multi sources. Dans ce cadre nous avons et dans le but d'approfondir nos connaissances dans ce domaine à travers la réalisation d'une étude sur la gestion optimale des puissances d'un cas réel implanté sur le logiciel d'optimisation HOMER.

Le cas étudié est une exploitation agricole alimentée par un système hybride multi-sources comportant une source de réseau public, un générateur diesel (groupe électrogène), un système photovoltaïque et une batterie.

Afin de réaliser cette étude le travail a franchi les étapes présentées sur les chapitres de notre mémoire qui sont les suivants :

Le premier chapitre donne une vue théorique détaillée sur les énergies renouvelables commençant par leurs définitions, ces différents types et leurs principes d'exploitation finissant par leurs avantages et désavantages.

Le deuxième chapitre traite dans un premier point la question d'intégration de plusieurs sources énergétiques dans des systèmes hybrides afin de combler les problèmes de continuité et de qualité de service remarquées souvent dans des systèmes à sources unique. Dans deuxième nous avons traité la question de la gestion

Le troisième chapitre présente un outil logiciel destiné à la simulation et l'optimisation des systèmes hybrides multi-source qui est l'HOMER. L'ensemble des étapes de l'étude de ces systèmes par ce logiciel dès l'implantation du modèle du système à sa simulation jusqu'à l'obtention des résultats ont été très bien exposées.

Le quatrième chapitre présente une étude de cas réel appliquée par la simulation via le logiciel HOMER d'un système électrique à sources d'énergies hybride alimentant une exploitation agricole dans le but de simuler et analyser la gestion optimale de système proposé pour l'alimentation de cette exploitation.

Les résultats, ont était en concordance logique avec l'état de l'art de cette discipline et ils nous ont permis d'élaborer une idée claire sur la modélisation, la simulation et l'optimisation de notre cas et des cas échéants. Ce travail nous a aussi donné des perspectives d'avancer notre recherche sur des cas plus compliqués dans le domaine d'optimisation de tels systèmes.

## Références bibliographiques

---

- [1] <https://www.climamaison.com/lexique/energie.htm>
- [2] <https://youmatter.world/fr/definition/energies-renouvelables-definition/>
- [3] <https://aqper.com/fr/quest-ce-que-la-production-d-energie-renouvelable-8>
- [4] <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-energies-renouvelables>
- [5] Cours de professeur DRISS .ROAUTI énergie renouvelable 2020 2021
- [6] [Énergie hydraulique — Wikipédia \(wikipedia.org\)](#)
- [7] [http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/eedd/climat/dossiers/energie\\_demain/hydraulique/fiche%20technique%20hydraulique.pdf](http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/eedd/climat/dossiers/energie_demain/hydraulique/fiche%20technique%20hydraulique.pdf)
- [8] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/les-differents-types-de-centrales-hydrauliques>
- [9]  
[https://www.google.com/search?q=%E2%80%A2%09De+lac+ou+de+haute+chute&biw=1366&bih=610&sxsrf=APq-WBvWvvUmOMGWVc7zNWxrAdVOtv1W0A%3A1646233306125&ei=2oYfYtekB6Sci-gP2ZycsAk&ved=0ahUKEwjX-bb72Kf2AhUkwQIHhvkOB5YQ4dUDCA4&uact=5&oq=%E2%80%A2%09De+lac+ou+de+haute+chute&gs\\_lcp=Cgdnd3Mtd2l6EAMyBggAEBYQHjoHCCMQ6glQJ0oECEYYAEoECEYYAFDWEVjWEwdxGwgBcAF4AIABzwOIAc8DkgEDNC0xmAEAoAEBoAECsAEKwAEB&sclient=gws-wiz](https://www.google.com/search?q=%E2%80%A2%09De+lac+ou+de+haute+chute&biw=1366&bih=610&sxsrf=APq-WBvWvvUmOMGWVc7zNWxrAdVOtv1W0A%3A1646233306125&ei=2oYfYtekB6Sci-gP2ZycsAk&ved=0ahUKEwjX-bb72Kf2AhUkwQIHhvkOB5YQ4dUDCA4&uact=5&oq=%E2%80%A2%09De+lac+ou+de+haute+chute&gs_lcp=Cgdnd3Mtd2l6EAMyBggAEBYQHjoHCCMQ6glQJ0oECEYYAEoECEYYAFDWEVjWEwdxGwgBcAF4AIABzwOIAc8DkgEDNC0xmAEAoAEBoAECsAEKwAEB&sclient=gws-wiz)
- [10]  
[https://www.google.com/search?q=%E2%80%A2%09D%27%C3%A9clus%C3%A9e+ou+de+moyenne+chute&biw=1366&bih=610&sxsrf=APq-WBvwh\\_AbN4Tem\\_ij9OicXVrHugMA0A%3A1646233596313&ei=IcfYuzDEof5sAehgbqoCg&ved=0ahUKEwjsseaF2qf2AhWHPOwKHaGADqUQ4dUDCA4&uact=5&oq=%E2%80%A2%09D%27%C3%A9clus%C3%A9e+ou+de+moyenne+chute&gs\\_lcp=Cgdnd3Mtd2l6EAMyBQghEKABOgclxDqAhAnSgQlQRgASgQIRhgAUlOSWI0SYPAWaAFwAXgAgAHtAYgB7QGSAQMyLTGYAQCgAQGgAQKwAQuAAQE&sclient=gws-wiz](https://www.google.com/search?q=%E2%80%A2%09D%27%C3%A9clus%C3%A9e+ou+de+moyenne+chute&biw=1366&bih=610&sxsrf=APq-WBvwh_AbN4Tem_ij9OicXVrHugMA0A%3A1646233596313&ei=IcfYuzDEof5sAehgbqoCg&ved=0ahUKEwjsseaF2qf2AhWHPOwKHaGADqUQ4dUDCA4&uact=5&oq=%E2%80%A2%09D%27%C3%A9clus%C3%A9e+ou+de+moyenne+chute&gs_lcp=Cgdnd3Mtd2l6EAMyBQghEKABOgclxDqAhAnSgQlQRgASgQIRhgAUlOSWI0SYPAWaAFwAXgAgAHtAYgB7QGSAQMyLTGYAQCgAQGgAQKwAQuAAQE&sclient=gws-wiz)
- [11]  
[https://www.google.com/search?q=%E2%80%A2%09Au+fil+de+l%27eau+ou+de+basse+chute&biw=1366&bih=610&sxsrf=APq-WBvwh\\_AbN4Tem\\_ij9OicXVrHugMA0A%3A1646233596313&ei=IcfYuzDEof5sAehgbqoCg&ved=0ahUKEwjsseaF2qf2AhWHPOwKHaGADqUQ4dUDCA4&uact=5&oq=%E2%80%A2%09Au+fil+de+l%27eau+ou+de+basse+chute&gs\\_lcp=Cgdnd3Mtd2l6EAM6BwgjEOoCECdKBAhBGABKBAhGGABQmhVYmhVgkBhoxAXABeACAACoBiAHKAZIBAzItMZgBAKABAaABAQABCsABAQ&sclient=gws-wiz](https://www.google.com/search?q=%E2%80%A2%09Au+fil+de+l%27eau+ou+de+basse+chute&biw=1366&bih=610&sxsrf=APq-WBvwh_AbN4Tem_ij9OicXVrHugMA0A%3A1646233596313&ei=IcfYuzDEof5sAehgbqoCg&ved=0ahUKEwjsseaF2qf2AhWHPOwKHaGADqUQ4dUDCA4&uact=5&oq=%E2%80%A2%09Au+fil+de+l%27eau+ou+de+basse+chute&gs_lcp=Cgdnd3Mtd2l6EAM6BwgjEOoCECdKBAhBGABKBAhGGABQmhVYmhVgkBhoxAXABeACAACoBiAHKAZIBAzItMZgBAKABAaABAQABCsABAQ&sclient=gws-wiz)
- [12] <https://www.geo.fr/environnement/energie-barrage-electricite-hydraulique-46223#:~:text=%2D%20L%C3%A9nergie%20hydraulique%20est%20modulable,%2C%20voire%20d%C3%A9truire%2C%20certains%20%C3%A9cosyst%C3%A8mes.>

## Références bibliographiques

---

- [13] <https://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-laction/produire-lelectricite/solaire-thermodynamique>
- [14] <https://www.lenergietoutcompris.fr/actualites-conseils/solaire-thermodynamique-fonctionnement-et-types-de-centrales-48118#id-838b59150754695c5b7fa3182234feca>
- [15] <https://www.ecosources.org/centrale-solaire-miroir-fresnel>
- [16] <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/techniques/5124/5124-principe-solaire-thermodynamique.pdf>
- [17] [Quels sont les avantages inconvénients des centrales solaires thermodynamiques ? \(energie-ecolo.com\)](https://www.energie-ecolo.com/quels-sont-les-avantages-inconvénients-des-centrales-solaires-thermodynamiques)
- [18] [https://www.google.com/search?sxsr=APq-WBufjGa9QMyuVX5OtEG4eXmyWGF7TA:1646335807817&q=%C3%89nergie+photovolta%C3%AFque+%C3%A9+D%C3%A9finition&sa=X&ved=2ahUKEwj23IXo1qr2AhXGNOwKHd\\_YBMEQ1QJ6BAgiEAE&biw=1366&bih=610&dpr=1](https://www.google.com/search?sxsr=APq-WBufjGa9QMyuVX5OtEG4eXmyWGF7TA:1646335807817&q=%C3%89nergie+photovolta%C3%AFque+%C3%A9+D%C3%A9finition&sa=X&ved=2ahUKEwj23IXo1qr2AhXGNOwKHd_YBMEQ1QJ6BAgiEAE&biw=1366&bih=610&dpr=1)
- [19] <https://opera-energie.com/energie-solaire/>
- [20] Y. Azzoug, Commande de la charge d'une batterie dans une installation photovoltaïque, vol. 2790. ProQuest, 2008.
- [21] Anne Labouret-Michel Villoz, Energie solaire photovoltaïque « 3 ème édition », DUNOD.
- [22] O, Boukli-hacene, "Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque mini d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique ", Mémoire de Magister de l'Université de ABOU BAKR BELKAID-TLEMCEN, 2011.
- [23] [st06\\_lessons\\_ge-energie\\_solaire.pdf \(ency-education.com\)](st06_lessons_ge-energie_solaire.pdf (ency-education.com))
- [24] [25] O.Amrani " Etude, simulation et réalisation d'une centrale hybride " Mémoire de magister, Université de Béjaia, 2006.
- [26] . Poitiers, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de Doctorat de L'Université de Nantes, France 2003.
- [27].A .Mirecki, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, France 2005
- [28] [https://www.researchgate.net/publication/281156276\\_La\\_recuperation\\_de\\_l'energie\\_de\\_la\\_houle\\_partie\\_1\\_caracterisation\\_de\\_la\\_ressource\\_et\\_bases\\_de\\_l'hydrodynamique](https://www.researchgate.net/publication/281156276_La_recuperation_de_l'energie_de_la_houle_partie_1_caracterisation_de_la_ressource_et_bases_de_l'hydrodynamique)
- [29] <https://geowatt.ch/index.php?p=geothermics>
- [31] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-maremotrice>
- [32] Cours de professeur DRISS .ROAUTI énergie renouvelable 2020 2021

## Références bibliographiques

---

- [33] <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-differentes-categories-d-energies-marines>
- [34] [Avantages et inconvénients de l'énergie marémotrice \(projeteколо.com\).](#)
- [35] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-reseaux-et-applications-tiadc/archive-2/production-d-energie-electrique-par-sources-renouvelables-d4005/generation-et-cogeneration-a-partir-de-la-biomasse-ou-de-dechets-d4005niv10008.html>
- [36] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-reseaux-et-applications-tiadc/archive-2/production-d-energie-electrique-par-sources-renouvelables-d4005/generation-et-cogeneration-a-partir-de-la-biomasse-ou-de-dechets-d4005niv10008.html>
- [38] <https://www.choisir.com/energie/articles/104498/qu-est-ce-que-la-cogeneration>
- [39] L. Stoyanov, "Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelable," Faculté de sciences et Techniques, Université Technique de Sofia, Sofia, 20 II
- [40] Vaughn C. Nelson, Ken L. Starcher, Robert E. Foster, R. Nolon Clark, DeonRabenheimer, "Wind hybridsystemstechnologycharacterization", West Texas AM University – AEI, New Mexico State University – SWTDI, USDA – ARS Bushland, Vista University, May 2002
- [41] E. Ian Baring-Gould, L. Flowers, P. Lundsager, "Worldwidestatus of wind-diesel applications", Pre-Workshop Wind-Diesel 101, 2004, Anchorage, Alaska
- [42] A. Davigny, "Participation aux services systèmes de fermes d'éoliennes à vitesse variables intégrant du Stockage Inertiel d'énergie," Formation doctorale en génie électrique, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, 2007
- [43] "Photovoltaic'ssystems; abuyer's guide. Naturalsresources Canada", Renewable and electricalenergy Division, 580 Booth Street, 17th floor Ottawa, Ont. K1A OE4. ISBN-662-31120-5 .  
[2]: Mann [2] Mk, "Economics of renewablehydrogenit's about more than production".  
Renewablehydrogenenergy forum, Washington.
- [44] J .Labbé, "L'hydrogèneelectrolytique comme Moyen de Stockage d'electricite Pour Systemes Photovoltaïques Isoles", Thèse de Doctorat, l'Ecole des Mines de Paris, pp. 5-17-18-21-50-68-69 , 21 décembre 2006
- [45] M. Huart, "Guide des énergies renouvelables", Association pour la Promotion des Energies Renouvelables, Ministère de la Région Wallonne éditeur, 1994.
- [46] J. Muller, R. Desserrières, "Conversion photovoltaïque", Publié par: Club CRIN, 2002.
- [47] C. Alonso, J. Alzeu, C. Andrieu, S. Astier, J. Bonal, A. H. Ben, C. Combes, F. Costa, B. Dakyo, R. Desserrières, J. Fonio, O. Gergaud, C. Glazie, J-C. Muller, B. Multon, C.Nichita, X. Roboam, P. Rossetti, "L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables", ECRIN, ISBN : 2-912154-08-1, Paris, 2002.
- [48] A. ABDELLI, " Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive", Thèse de Doctorat, L'institut National Polytechnique De Toulouse, p 9-13,15 octobre 2007.

## *Références bibliographiques*

---

[49]: P. Lundsager, H. Bindner, N. Clausen, S. Frandsen, L. H. Hansen, J. C. Hansen,  
“Isolatedsystems with wind power”, Risø-R-1256(EN), 2001.

[50] « La première pile à combustible installée en France », Isabelle Duffaure-Gallais, CSTB Magasine, 1999.