

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA-1  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES



Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme :  
**MASTER en Énergies Renouvelables**

**Option** : Conversion Photovoltaïque

Par : **BENALLAL ABDELLAH**

Thème :  
**DIMENSIONNEMENT D'UN SYSTEME HYBRIDE  
PHOTOVOLTAIQUE-EOLIEN AVEC BATTERIES**

Soutenu devant le jury composé par :  
Président : Pr S.Nacer.  
Promotrice : Dr N.Cheggaga.  
Examineur 1 : Dr H.Mazouz.  
Examineur 2 : Mr T.Domaz.

Juin 2017

# *Remerciement :*

*En premier lieu je remercie le bon Dieu de me  
permet vivre ce jour-là et me donner la volonté,  
le courage, la patience et la santé durant toutes  
ces années d'étude.*

*Je dois remercier mes chers parents d'être les  
premiers et les meilleurs éducateurs dans ma vie  
et pour leurs précieux conseils et directives  
rationnelles.*

*Je remercie mes deux frères pour leur  
encouragement.*

*Je remercie tous les enseignants honnêtes qu'ils  
n'ont ménagé aucun effort de m'enseigner et de  
m'aider à développer mes connaissances  
scientifiques et je cite spécialement ma  
promotrice pour son aide sur ce projet de fin  
d'études.*

*À tous ces intervenants, je présente mes  
remerciements, mon respect et ma gratitude.*

**RESUME**

**ABSTRACT**

**ملخص**

**Résumé :**

Ce mémoire présente une étude de dimensionnement et analyse du coût d'un système hybride de production d'électricité à base des énergies renouvelables dans un village isolé « Ilamane » au sud d'Algérie, composé d'un générateur éolienne, un autre photovoltaïque et des batteries de stockage. L'objectif principal de cette étude est de déterminer la taille optimale et calculer le coût actualisée nette (\$), le coût d'énergie (\$/kWh), d'un système hybride, avec une capacité électrique suffisante pour répondre à la demande en énergie électrique du village. HOMER est le logiciel d'optimisation des systèmes électriques à énergies renouvelables utilisé comme un outil de simulation dans notre travail. Le coût et les performances électriques sont comparés les uns avec les autres entre le système simulé pour des différentes altitudes pour le mât de l'éolienne, car la production d'une éolienne dépend de la vitesse du vent au cube et la vitesse du vent varie considérablement avec l'altitude.

**Mots Clés :** Système hybride, Dimensionnement, Vitesse du vent, Système photovoltaïque, Système éolien.

**Abstract:**

This thesis presents a study of the design and costing of a hybrid system for the production of electricity based on renewable energies in an isolated village "Ilamane" in the south of Algeria, composed of a wind generator, photovoltaic generator and storage batteries. The main objective of this study is to determine the optimum size and calculate the net discounted cost (\$), the energy cost (\$/kWh) of a hybrid system, with sufficient electrical capacity to satisfy the demand in electrical energy of the village. HOMER is the optimization software for renewable energy systems used as a simulation tool of our work. The cost and the electrical performances are compared with each other in the simulated system for different heights for the wind turbine mast, because the production of a wind turbine depends on the wind speed at the cube and the wind speed varies considerably with the altitude.

**Key Words:** Hybrid system, Sizing, Wind speed, Photovoltaic system, Wind turbine system.

## ملخص:

تقدم هذه المذكرة دراسة لتصميم وتكلفة نظام هجين لإنتاج الكهرباء باستعمال الطاقات المتجددة في قرية معزولة "إلامان" جنوب الجزائر، يتألف من مولد الرياح، مولد كهروضوئي وبطاريات التخزين. والهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تحديد الحجم الأمثل وحساب التكلفة الصافية (دولار)، وتكلفة الطاقة (دولار/كيلوواط ساعي) لنظام هجين، مع القدرة الكافية لتلبية الطلب في الطاقة الكهربائية للقرية. "هومر" هو برنامج التحسين لأنظمة الطاقة المتجددة المستخدم كأداة محاكاة لعمليتنا. تتم مقارنة التكلفة والأداء الكهربائي مع بعضها البعض في نظام محاكاة لارتفاعات مختلفة للسارية، لأن إنتاج توربينات الرياح يعتمد على مكعب سرعة الرياح وسرعة الرياح تختلف اختلافا كبيرا مع الارتفاع.

**الكلمات الرئيسية:** نظام هجين، تحجيم، سرعة الرياح، النظام الكهروضوئي، نظام الرياح.

# **LISTE DES FIGURES**

**Figure 1.1.** Schéma synoptique du système hybride étudié.

**Figure 1.2.** Schéma d'une cellule élémentaire.

**Figure 1.3.** A : caractéristique d'une photodiode. B : caractéristique d'une cellule Photovoltaïque.

**Figure 1.4.** Cellules, module et panneau photovoltaïques.

**Figure 1.5.** Schéma d'un quadripôle électrique.

**Figure 1.6.** Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.

**Figure 1.7.** Capacité mondiale d'énergie éolienne installée.

**Figure 1.8** Technologies d'éoliennes.

**Figure 1.9.** Composants d'une éolienne.

**Figure 1.10.** Composition de la nacelle d'une éolienne Nordex N60 (1 300 kW).

**Figure 1.11.** Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.

**Figure 1.12.** Aérogénérateur à aimants débitant directement à travers un pont de diodes sur le bus continu.

**Figure 1.13.** Redresseur à diodes.

**Figure 1.14.** Représentation interne de l'accumulateur.

**Figure 1.15.** Evolution de la tension d'une cellule de batterie au plomb.

**Figure 1.16.** Architecture du bus à CC avec batteries de stockage.

**Figure 1.17.** Hacheur réversible en courant.

**Figure 1.18.** Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé.

**Figure 1.19.** Structure d'un onduleur triphasée.

**Figure 2.1.** Chaîne de conversion photovoltaïque.

**Figure 2.2.** Schéma électrique équivalent d'une cellule PV, modèle à une diode.

**Figure 2.3.** Caractéristiques de cellules photovoltaïques en série.

**Figure 2.4.** Caractéristiques de cellules photovoltaïques en parallèle.

**Figure 2.5.** Schéma électrique équivalent d'un générateur PV, modèle à une diode.

**Figure 2.6.** Caractéristique courant- tension d'un générateur photovoltaïque.

**Figure 2.7.** Caractéristique puissance- tension d'un générateur photovoltaïque.

**Figure 2.8.** Caractéristique idéale d'une cellule P-V.

**Figure 2.9.** Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque pour différents rayonnements.

**Figure 2.10.** Caractéristique P-V d'un générateur photovoltaïque pour différents rayonnements.

**Figure 2.11.** Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque pour différentes températures.

**Figure 2.12.** Caractéristique P-V d'un générateur photovoltaïque pour différentes températures.

**Figure 2.13.** Chaîne de conversion éolienne.

**Figure 2.14.** Colonne d'air animée d'une vitesse  $V$ .

**Figure 2.15.** Vitesse de vent ( $V$ ) et vitesse tangentielle de l'aubage  $\Omega t$ .

**Figure 2.16.** Puissance de l'aérogénérateur en fonction de la vitesse de vent.

**Figure 2.17.** Représentation des composants bidirectionnels.

**Figure 2.18.** Température ambiante exprimée en degré Celsius ( $C^\circ$ ).

**Figure 2.19** Eclairement solaire incident exprimée en Watt par mètre carré ( $W/m^2$ ).

**Figure 2.20.** Vitesse du vent à 10 mètres d'altitude exprimée en (m/s).

**Figure 2.21.** Vitesse du vent à 40 mètres d'altitude exprimée en (m/s).

**Figure 2.22.** Profil de charge horaire sur un jour pour un village au sud Algérien.

**Figure 2.23.** Profil de charge réel sur HOMER.

**Figure 2.24.** Profil de charge escalé ajusté suivant un village du sud Algérien.

**Figure 3.1 :** Configuration de l'installation PV/éolien à dimensionner.

**Figure 3.2 :** L'ensoleillement du site d'installation.

**Figure 3.3 :** Vitesse du vent du site mesurée à 10 mètres d'altitude.

**Figure 3.4 :** Vitesse du vent du site mesurée à 40 mètres d'altitude.

**Figure 3.5 :** Caractéristiques de l'éolienne choisie.

**Figure 3.6** : Résultats de dimensionnement donnés par HOMER (10m).

**Figure 3.7** : Résultat optimal pour l'installation (10m).

**Figure 3.8** : Résultats du coût (10m).

**Figure 3.9** : Résultats électriques (10m).

**Figure 3.10** : Périodes de délestage (10m).

**Figure 3.11** : Résultats de dimensionnement donnés par HOMER (40m).

**Figure 3.12** : Résultat optimal pour l'installation (40m).

**Figure 3.13** : Résultats du coût (40m).

**Figure 3.14** : Résultats électriques (40m).

**Figure 3.15** : Périodes de délestage (40m).

**Figure 3.16** : Résultats de dimensionnement donnés par HOMER (loi de puissance).

**Figure 3.17** : Résultat optimal pour l'installation (loi de puissance).

**Figure 3.18** : Résultats du coût (loi de puissance).

**Figure 3.19** : Résultats électriques (loi de puissance).

**Figure 3.20** : Périodes de délestage (loi de puissance).

**Figure 3.21** : Résultats de dimensionnement donnés par HOMER (loi logarithmique).

**Figure 3.22** : Résultat optimal pour l'installation (loi logarithmique).

**Figure 3.23** : Résultats du coût (loi logarithmique).

**Figure 3.24** : Résultats électriques (loi logarithmique).

**Figure 3.25** : Périodes de délestage (loi logarithmique).

# **LISTE DES TABLEAUX**

## LISTE DES TABLEAUX

**Tableau 1.1.** Le profil de charge réel et le profil escalé et leurs caractéristiques.

**Tableau 2.1.** Résultats des différentes simulations.

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1-2
<b>CHAPITRE 1 : DESCRIPTION ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN SYSTEME HYBRIDE EOLIEN-PHOTOVOLTAÏQUE</b> .....	3
1.1. Introduction .....	4
1.2. Etat de l'art du système hybride éolien-photovoltaïque .....	4
1.3. La chaîne de production photovoltaïque .....	5
1.3.1. Effet photovoltaïque .....	5
1.3.2. Principe de la génération photovoltaïque .....	5
1.3.3. Convertisseurs DC/DC .....	7
1.4. La chaîne de production éolienne .....	8
1.4.1. Le Génie Electrique dans le vent .....	8
1.4.2. Les type d'aérogénérateurs .....	9
1.4.3. Choix de technologie de l'éolienne .....	10
1.4.4. Architecture d'une éolienne à axe horizontale .....	10
1.4.4.1. Rotor .....	10
1.4.4.2. Nacelle .....	10
1.4.4.3. Tour .....	12
1.4.5. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne .....	12
1.4.6. Conversion électrique d'énergie éolienne .....	13
1.4.6.1. Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne .....	13
1.4.6.2. Machines synchrones à aimants permanents .....	13
1.4.7. Redresseur .....	14
1.5. Le dispositif de stockage .....	15
1.5.1. Caractéristiques déterminant le choix d'une technologie de stockage ...	15
1.5.2. Moyens de stockage .....	15
1.5.3. Fonctionnement d'un accumulateur au plomb .....	16
1.6. Bus à courant continu .....	18

1.7. Hacheur réversible en courant .....	18
1.8. Onduleur .....	19
1.8.1. Structure d'onduleur .....	19
1.8.2. Classification des onduleurs .....	20
1.9. Présentation chronologique des principaux travaux ou réalisation .....	20
1.10. Présentation de la contribution de l'étudiant .....	21
1.11. Conclusion .....	22
<b>CHAPITRE 2 : MODELISATION ET OPTIMISATION DES COMPOSANTS DU SYSTEME EOLIEN-PHOTOVOLTAÏQUE</b> .....	<b>23</b>
2.1. Introduction .....	24
2.2. Modélisation de la chaîne photovoltaïque .....	24
2.2.1. Modélisation du rayonnement solaire .....	25
2.2.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque .....	25
2.2.2.1. Paramètres d'une cellule PV .....	26
2.2.2.1.1. Le courant de court-circuit .....	26
2.2.2.1.2. La tension de circuit ouvert .....	26
2.2.2.2. Association de Cellules Photovoltaïques .....	26
2.2.2.3. Modélisation du générateur PV .....	28
2.2.2.3.1. Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque .....	28
2.2.2.3.2. Caractéristique P-V d'un générateur photovoltaïque .....	29
2.2.2.3.3. Rendement d'un générateur photovoltaïque .....	29
2.2.2.3.4. Facteur de forme .....	29
2.2.2.3.5. Influence de l'intensité du rayonnement .....	30
2.2.2.3.6. Influence de la température .....	31
2.3. Modélisation de la chaîne éolienne .....	32
2.3.1. Extrapolation verticale de la vitesse du vent .....	33
2.3.1.1. Loi logarithmique .....	33
2.3.1.2. Loi de puissance 1/7 .....	33

2.3.2. Modèle de la turbine .....	34
2.3.2.1. Puissance récupérable par une turbine .....	34
2.3.2.2. Vitesse normalisée .....	34
2.3.2.3. Coefficient de puissance .....	35
2.3.4. Puissance éolienne produite .....	36
2.4. Modélisation du dispositif de stockage .....	37
2.5. Modélisation du hacheur réversible en courant .....	37
2.6. Modélisation de l'onduleur .....	37
2.7 Les ressources météorologiques .....	38
2.7.1. Le site choisi .....	38
2.7.2. Les données météorologiques .....	38
2.8. Le profil de charge .....	40
2.9. Conclusion .....	42
<b>CHAPITRE 3 : OPTIMISATION DU SYSTEME HYBRIDE EOLIEN- PHOTOVOLTAIQUE</b> .....	<b>43</b>
3.1. Introduction .....	44
3.2. Présentation de HOMER .....	44
3.3. Dimensionnement du système .....	44
3.4. Simulation pour les données vitesse du vent mesurées à 10 mètres .....	48
3.5. Simulation pour des données de vitesse du vent à 40 mètres .....	51
3.5.1. Données mesurées .....	51
3.5.2. Données extrapolées par la loi de puissance 1/7 .....	54
3.5.3. Données extrapolées par la loi logarithmique .....	57
3.6. Conclusion .....	60-61
<b>CONCLUSION GENERALE</b> .....	<b>62-63</b>
<b>LISTE DES REFERENCES</b> .....	<b>64-67</b>
<b>ANNEXE</b> .....	<b>68-100</b>

**INTRODUCTION**

**GENERALE**

Face à l'épuisement des ressources d'énergie fossiles à l'échelle mondiale et aux problèmes environnementaux, des ressources alternatives ont été développées basées essentiellement sur le soleil et le vent, le photovoltaïque et l'énergie éolienne ont été considérés comme prometteuses pour répondre à la demande croissante pour l'énergie. Les sources d'énergie éoliennes et photovoltaïques sont inépuisables, les processus de conversion sont sans pollution, et leur disponibilité est gratuite.

Pour les systèmes à distance tels que les relais de télécommunication en plein désert, les Stations terrestres de satellites, ou aux sites isolés qui sont loin d'un système d'énergie conventionnelle, les systèmes hybrides ont été considérés comme des sources alternatives attrayantes et privilégiées.

Pour les applications autonomes, le coût de stockage représente encore la principale contrainte économique. Combinant à la fois l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque conduirait à réduire au minimum l'exigence de stockage, et donc le coût global du système.

La variabilité dans la forme d'énergie disponible dans le système éolien - PV, exige de choisir une meilleure estimation de la taille de générateur éolien et la hauteur au quelle on doit fixer notre éolienne, du banc de batteries et du générateur PV pour que le système satisfaire la demande de la charge à toute heure de l'année.

C'est dans cette problématique que se situe cette thèse : étudier et optimiser un système hybride éolien-photovoltaïque totalement autonome et voir l'effet de la hauteur du mât de l'éolienne sur le dimensionnement de notre système.

Le travail présenté est rédigée en trois chapitres qui se résument dans ce qui suit:

Dans le premier chapitre, nous présenterons une structure du système hybride. Ensuite, nous rappellerons le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque et celui du convertisseur DC/DC à pilotage MPPT. Une étude sera aussi consacrée au fonctionnement de la turbine, de la génératrice synchrone à aimants permanent et du redresseur. Le dispositif de stockage sera également étudié et le choix de batterie au plomb sera justifié. Le contrôleur de charge /décharge des batteries et le bus à CC seront aussi présentés. Enfin, nous donnerons le principe de fonctionnement de convertisseur DC-AC.

Dans le deuxième chapitre, des modèles mathématiques des différents composants du système seront présentés en détail.

Dans le troisième chapitre, nous présentons le logiciel à utiliser (HOMER) et on décrit les étapes de la simulation des chaines de production d'énergie et on présente les résultats obtenus lors du dimensionnement de système pour des différentes altitudes du mât du générateur éolien pour des données mesurées et pour des données extrapolées de la vitesse du vent.

Finalement, une conclusion générale de ce travail et quelques perspectives clôtureront le mémoire.

**CHAPITRE 1 :**

**DESCRIPTION ET**

**PRINCIPE DE**

**FONCTIONNEMENT**

**D'UN SYSTEME**

**HYBRIDE EOLIEN-**

**PHOTOVOLTAIQUE**

## 1.1. Introduction :

La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables, offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant le caractère aléatoire de ces sources nous impose d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux.

Considérant leurs caractéristiques saisonnières respectives, les énergies (solaire et éolienne) ne se concurrencent pas mais au contraire peuvent se valoriser mutuellement. C'est pourquoi on propose ici un système hybride composé de ces deux sources d'énergie, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles. Certes, du point de vue économique les résultats apparaissent assez convaincants quant à la rentabilité du système hybride ci-dessus désigné, mais cela n'exclut pas le fait que la combinaison des deux sources constitue un système assez complexe du point de vue technologique

Dans ce chapitre, il sera exposé la description et le principe de fonctionnement de différents composants du système hybride éolien-photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque, l'aérogénérateur et les convertisseurs de puissance seront présentés. Le système de stockage sera présenté aussi dans chapitre.

On va présenter les principaux travaux dans ce domaine, les thèmes de recherche et aussi ma contribution comme étudiant à ce sujet.

## 1.2. Etat de l'art du système hybride éolien-photovoltaïque :

Le système hybride de production d'énergie est celui qui combine et exploite plusieurs sources d'énergies. Les sources d'énergie renouvelable, comme l'éolien et le photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance constante, ce qui exige l'utilisation d'un système de stockage.

En plus des sources d'énergie renouvelable, un système hybride peut aussi incorporer un système de distribution à courant alternatif (CA), un système à courant continu (CC), un système de stockage, des convertisseurs de puissance, des charges, des charges de délestage et une option de gestion des charges ou un système de supervision. Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides classiques contiennent deux bus : un bus à CC pour les sources, les charges à CC et les batteries et un bus à CA pour les générateurs à CA et le système de distribution [1].

Dans notre système, présenté dans la figure 1.1, les chaînes de production se composent de:

- Des panneaux photovoltaïques connectés au bus continu à travers des convertisseurs DC/DC à pilotage MPPT.
- Une éolienne reliée au bus continu à travers un redresseur à diodes.

Le dispositif de stockage de l'énergie, composé des batteries électrochimiques, est relié au bus continu à l'intermédiaire d'un contrôleur de charge / décharge. Le bus continu est relié de son côté aux charges alternatives via un onduleur.

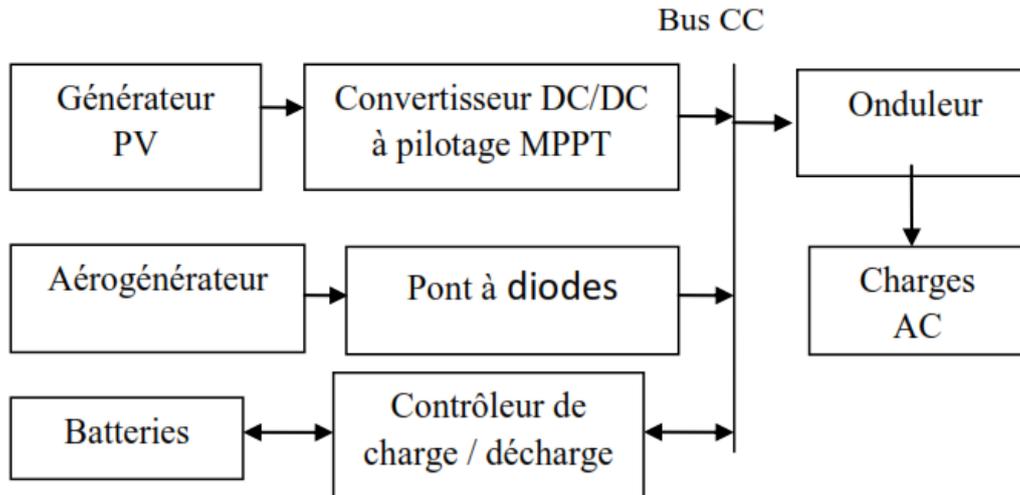


Figure 1.1. Schéma synoptique du système hybride étudié.

### 1.3. La chaîne de production photovoltaïque :

#### 1.3.1. Effet photovoltaïque :

Le scientifique français, Edmond Becquerel, fut le premier à découvrir en 1839 l'effet photoélectrique. Il a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière. Par la suite, Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation (1.1) [2] :

$$E_{ph} = \frac{h.c}{\lambda_0} \quad (1.1)$$

Où  $E_{ph}$  représente la quantité d'énergie,  $\lambda_0$  la longueur d'onde,  $h$  la constante de Planck,  $c$  la vitesse de la lumière. Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande.

#### 1.3.2. Principe de la génération photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs. La cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque [3]. Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur. Ces deux couches sont dopées différemment. Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons. Les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N), leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur (figure 1.2). L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des

rayons lumineux. Une couche antireflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée [4]

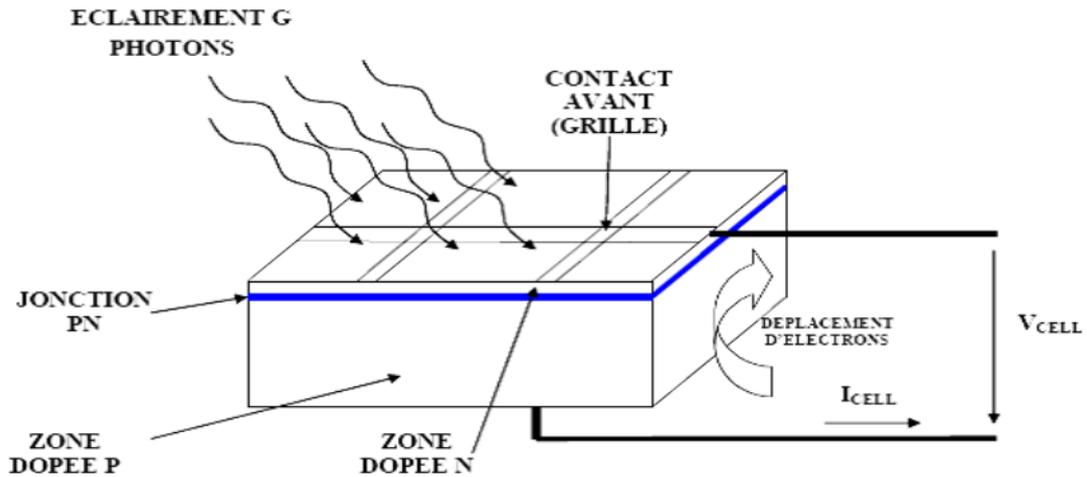


Figure 1.2. Schéma d'une cellule élémentaire.

Industriellement les matériaux les plus utilisés sont à base de silicium. Le rendement énergétique atteint industriellement est de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12 % avec du silicium poly-cristallin et enfin 7 à 8% pour le silicium amorphe en films minces.

Les caractéristiques ainsi obtenues sont celles d'une photodiode mais en convention générateur (figure 1.3).

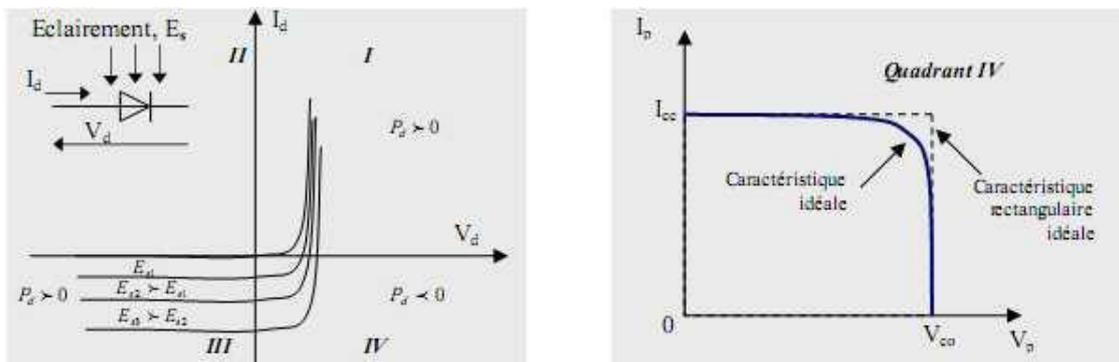
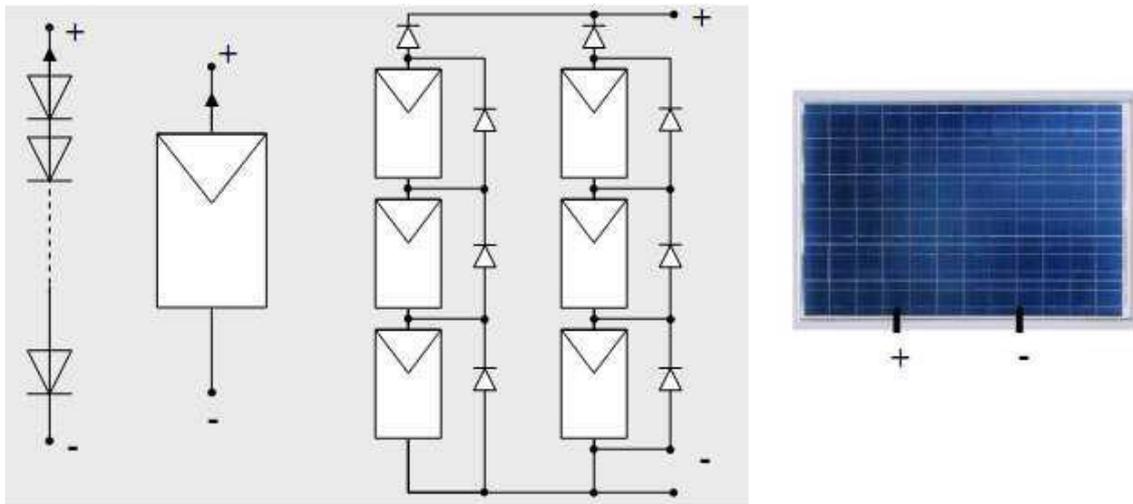


Figure 1.3. A : caractéristique d'une photodiode. B : caractéristique d'une cellule photovoltaïque [5].

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement 0,5 Volt. Alors Pour produire plus de puissance les cellules sont assemblées pour former un module. Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque (Voir Figure 1.4) [6].



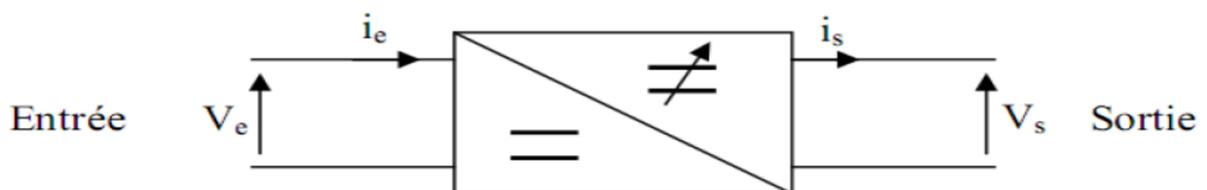
**Figure 1.4.** Cellules, module et panneau photovoltaïques.

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée.

### 1.3.3. Convertisseurs DC/DC :

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs. Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance [7].

D'un point de vue circuit, le hacheur apparaît comme un quadripôle (figure 1.5), jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues [5].



**Figure 1.5.** Schéma d'un quadripôle électrique.

$V_e$  et  $i_e$  : tension et courant d'entrée.

$V_s$  et  $i_s$  : tension et courant de sortie.

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs.

Le commutateur est un dispositif semi-conducteur en mode (bloqué - saturé), si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite [5].

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante  $f$  avec un temps de fermeture =  $d \cdot T_s$ , et un temps d'ouverture =  $(1 - d) \cdot T_s$ . Où :

- $T_s$  est la période de commutation qui est égale à  $1/f$ .
- $d$  le rapport cyclique du commutateur ( $d \in [0,1]$ ) (figure 1.6).

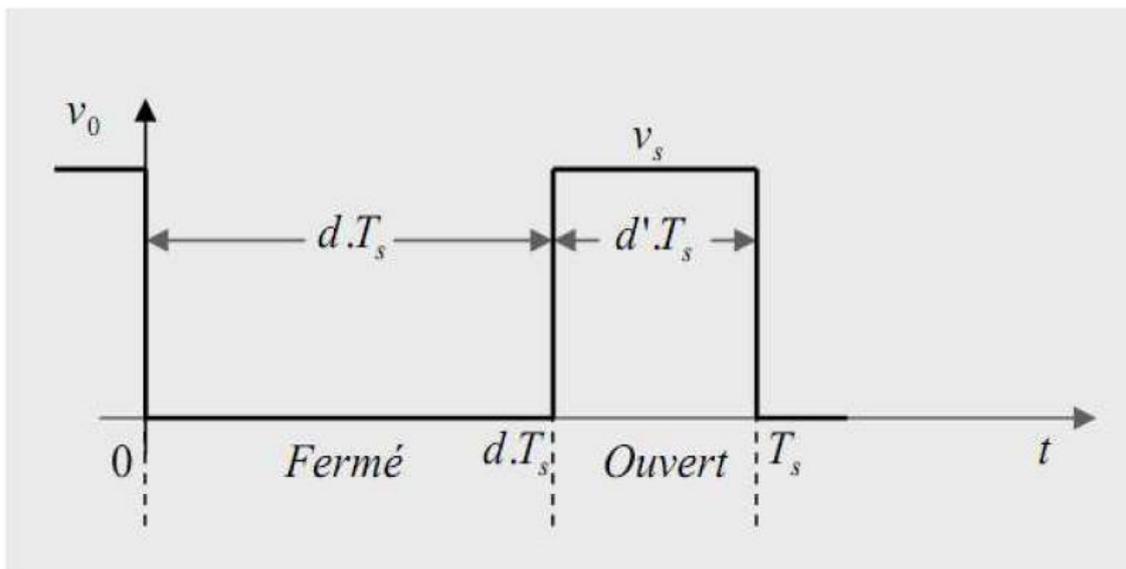


Figure 1.6. Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.

#### 1.4. La chaîne de production éolienne :

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en électricité. Les pales du rotor éolien captent une partie de l'énergie contenue dans le vent et la transfèrent au moyeu qui est fixé sur l'arbre de l'éolienne. Celui-ci transmet ensuite l'énergie mécanique au générateur électrique qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

##### 1.4.1. Le Génie Electrique dans le vent :

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 [8, 9]. Cette énergie est tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent.

Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 40 ans un essor sans précédent qui est dû notamment aux premiers chocs pétroliers. A l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une vingtaine d'années maintient une croissance de 30% par an (Voir Figure 1.7) [9, 10].

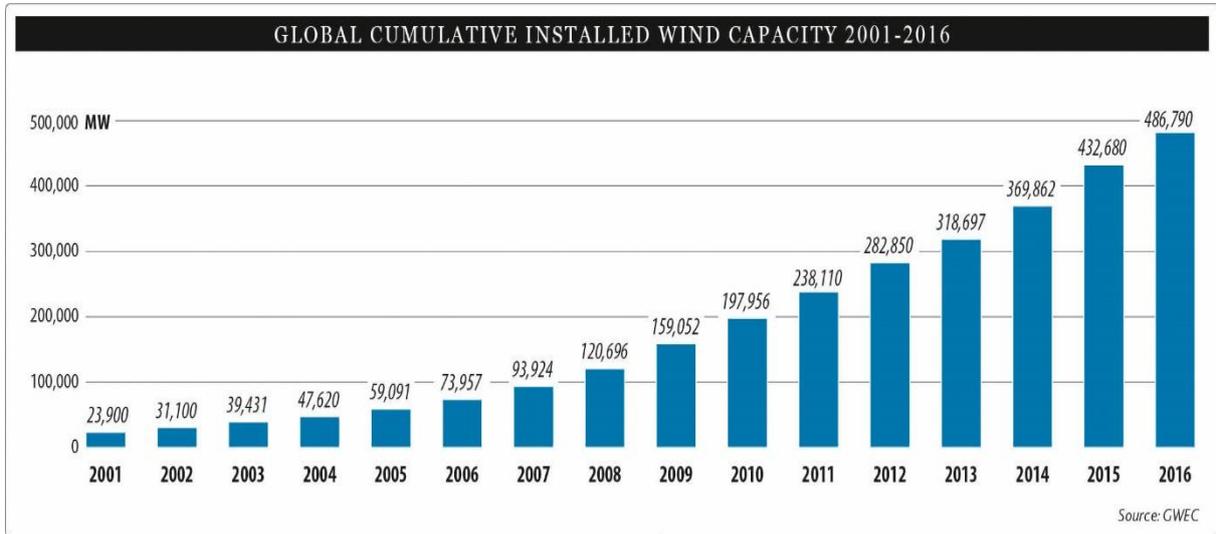


Figure 1.7. Capacité mondiale d'énergie éolienne installée [11].

### 1.4.2. Les type d'aérogénérateurs :

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice (figure1.8) [12] :

- les turbines éoliennes à axe horizontal.
- les turbines éoliennes à axe vertical.



A. Eoliennes à axe horizontal

B. Eoliennes à axe vertical

Figure 1.8 Technologies d'éoliennes [13].

### 1.4.3. Choix de technologie de l'éolienne :

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important [15].

### 1.4.4. Architecture d'une éolienne à axe horizontale :

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, le rotor, la nacelle et la tour, (Voir Figure 1.9) [9] :

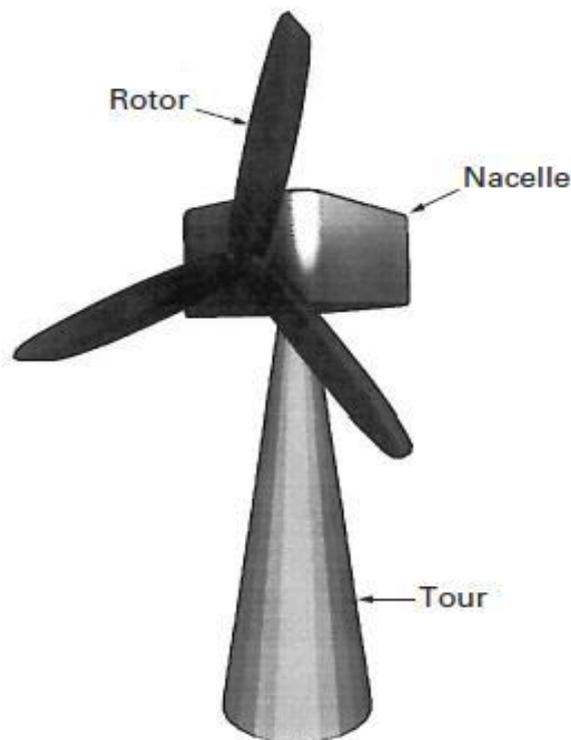


Figure 1.9. Composants d'une éolienne. [9]

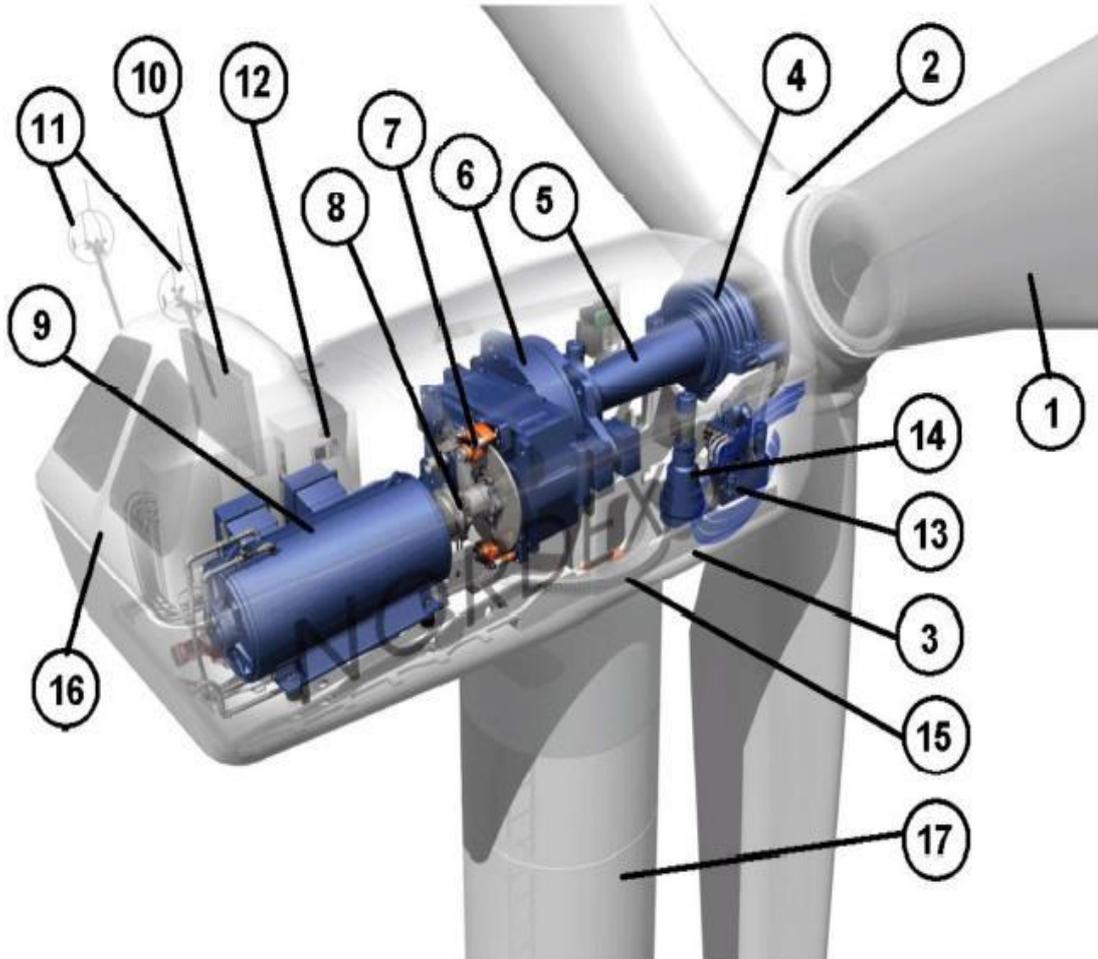
#### 1.4.4.1. Rotor :

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué de pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines, l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant). Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la régulation du fonctionnement de la machine (pas des pales variables, freinage du rotor...) [16, 17].

#### 1.4.4.2. Nacelle :

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine. La figure (1.10) présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants :

- Multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.
- L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine [9,17].
- Génératrice : Différents types de génératrices peuvent être rencontrés.
- Contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne [9].
- Divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau, ou d'huile.
- Dispositif d'orientation de la nacelle : Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical [9, 17].



**Figure 1.10.** Composition de la nacelle d'une éolienne Nordex N60 (1 300 kW) [18].

- |                             |   |
|-----------------------------|---|
| 1 : Pales                   | 10 : Radiateur de refroidissement                 |
| 2 : Moyeu                   | 11 : Systèmes de mesure (anémomètre et girouette) |
| 3 : Structure de la turbine | 12 : Système de contrôle                          |
| 4 : Paliers du rotor        | 13 : Système hydraulique                          |
| 5 : Arbre lent              | 14 : Entraînement d'orientation                   |
| 6 : Multiplicateur          | 15 : Paliers du système d'orientation             |
| 7 : Frein à disque          | 16 : Capot de la nacelle                          |
| 8 : Accouplement            | 17 : Tour   |
| 9 : Génératrice             |   |

### 1.4.4.3. Tour :

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor, nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi le captage de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble (rotor, nacelle), de manière à s'adapter au mieux aux différents sites d'implantation [9].

### 1.4.5. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne :

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale  $P_n$  à partir d'une vitesse de vent nominale  $V_n$ . Pour des vitesses de vents supérieures à  $V_n$ , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs dimensionnées :  $V_d$  la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et  $V_M$  la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement (figure 1.11) [19].

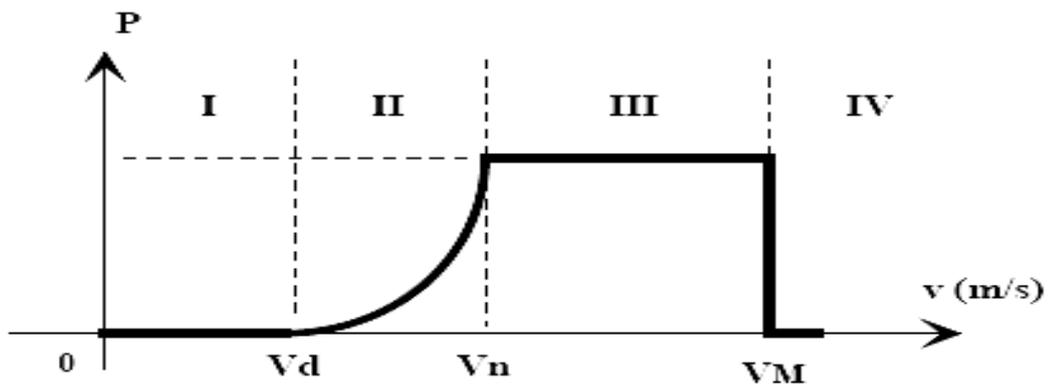


Figure 1.11. Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.

Ainsi la caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte quatre zones [20] :

- la zone I, où  $P_{\text{turbine}} = 0$  (la turbine ne fournit pas de puissance).
- la zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent  $V$ .
- la zone III, où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance  $P_{\text{turbine}}$  fournie reste sensiblement égale à  $P_n$ .
- la zone IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.

La plupart des grandes turbines éoliennes utilisent deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à la valeur de la puissance nominale de la génératrice :

- système « pitch » ou « à pas ou calage variable » qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent, principalement pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone III de vitesses [21].

- système « stall » ou à « décrochage aérodynamique », le plus robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance maximale n'est pas plate et chute plus vite. Il s'agit donc d'une solution passive et robuste (pas besoin de système d'orientation des pales). Chez certains fabricants de grandes machines, un système hybride se développe, le « stall actif », dans lequel le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à une orientation minime des pales nécessitant des moyens de réglage plus économiques et plus robustes que dans le système pitch.

#### **1.4.6. Conversion électrique d'énergie éolienne :**

##### **1.4.6.1. Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne :**

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques. Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure [22].

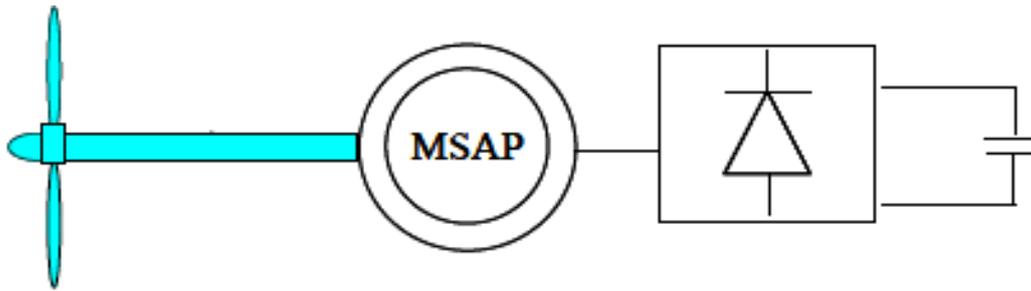
Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Mais elles présentent le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants aux dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes [22].

##### **1.4.6.2. Machines synchrones à aimants permanents :**

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) aux génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur [22].

Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bagues et balais pour les génératrices à aimants. Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles [22].

La (figure 1.12) montre une solution originale et de faible coût pour associer un aérogénérateur à un tel système. La génératrice est de type synchrone à aimants permanents (entraînement direct comme il s'agit de puissances modestes) débitant directement, à travers un pont de diodes triphasé, sur le bus continu et l'accumulateur électrochimique [23].



**Figure 1.12.** Aérogénérateur à aimants débitant directement à travers un pont de diodes sur le bus continu.

Le débit direct (à travers un simple redresseur en pont à diodes) de la machine synchrone sur une source de tension continue peut surprendre. En fait, c'est grâce à l'inductance d'induit de la machine synchrone de forte valeur que les courants restent proches des formes sinusoïdales et que les rendements de conversion sont corrects. En cas de surcharge de la batterie (trop de tension), un contacteur met en court-circuit l'induit de la génératrice. La turbine est alors arrêtée en rotation [23].

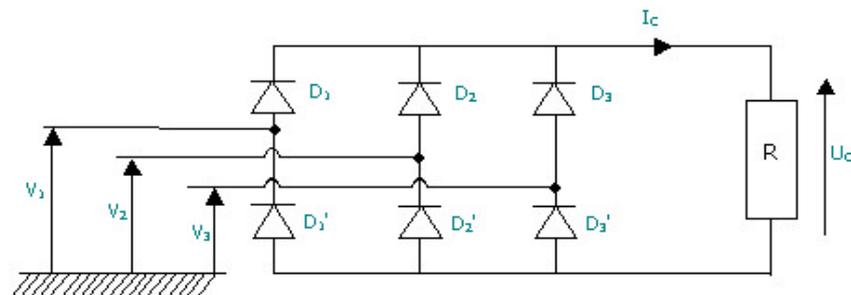
#### 1.4.7. Redresseur :

Des convertisseurs basés sur des modules entièrement commandés sont coûteux donc pénalisant dans un ensemble de petite puissance. Dans le souci de réduction des coûts, le pont de diodes, peu onéreux, semble attractif à condition que les performances énergétiques ne soient pas trop dégradées.

Dans le cadre de cette étude, on utilise un redresseur à diodes. Les diodes sont supposées idéales et, par conséquent, leur conduction correspond à un court-circuit et leur blocage correspond à un circuit ouvert. Dans ces conditions, les deux diodes qui conduisent à chaque séquence, correspondent à la phase ayant la tension la plus positive pour la diode du demi-pont supérieur et à la phase ayant la tension la plus négative pour la diode du demi-pont inférieur. La tension et le courant redressés sont reliés aux tensions et courants de phases. Nous présentons le pont triphasé à diodes alimenté par un système de tensions sinusoïdales triphasées (figure 1.13). Deux diodes d'un même bras ne peuvent pas conduire simultanément. Lorsque  $D_1$  conduit l'une des deux diodes  $D'_2$  et  $D'_3$  conduit également; il en vient que  $D_1$  conduit lorsque  $V_1$  est supérieur à  $V_2$  et  $V_3$  [24].

Pendant chaque séquence de conduction, la tension  $U_c$  à la sortie de redresseur est :

$$U_c = \max (V_j) - \min (V_j); j=1, 2, 3.$$



**Figure 1.13.** Redresseur à diodes.

## 1.5. Le dispositif de stockage :

### 1.5.1. Caractéristiques déterminant le choix d'une technologie de stockage :

L'un des principaux inconvénients de l'énergie solaire est son caractère intermittent. Pour une utilisation permanente, il est donc nécessaire de stocker une partie de l'énergie produite. Pour ce faire il existe plusieurs méthodes de stockage : sous forme d'eau, d'hydrogène, dans un volant d'inertie, dans une batterie électrochimique (plomb, lithium) ou un super condensateur. Leur choix se fait suivant des caractéristiques fondamentales qui sont [25]:

- $W_{stoc}$  : la capacité énergétique en Wh, qui est une caractéristique très importante lors du dimensionnement. L'énergie exploitable dépend néanmoins du rendement de charge ou décharge et varie donc avec le temps de transfert. En charge ou décharge très rapide, le rendement se dégrade et l'énergie extractible peut être très inférieure à la capacité énergétique de l'élément de stockage. A l'opposé, en régime lent, c'est l'autodécharge qui va pénaliser le bilan. Enfin, les accumulateurs ne peuvent pas toujours être déchargés complètement. L'énergie exploitable est donc inférieure à l'énergie totale stockée. Souvent, la capacité énergétique est définie sur la base d'une énergie totale stockée supérieure à celle réellement exploitable notée.
- $P_{max}$  : la puissance maximale de charge ou de décharge (parfois différentes).
- $\tau$  : la constante de temps, c'est le rapport de la capacité énergétique utile sur la puissance maximale.
- $\eta$  : le rendement est le rapport de l'énergie restituée sur l'énergie emmagasinée.
- $N_{cycl}$  : le nombre maximal de cycles de charge/décharge ou cyclabilité. Tout dispositif de stockage subit une fatigue ou usure lors des cycles. Cela constitue généralement la première cause de vieillissement devant la dégradation thermique classique.
- Les coûts d'investissement (c'est la part la plus marquante pour l'acheteur) et de fonctionnement (maintenance, énergie perdue lors des cycles, vieillissement) : les systèmes les moins coûteux à l'investissement sont généralement ceux qui se dégradent le plus vite en recyclage et dont le rendement est le plus mauvais.

### 1.5.2. Moyens de stockage :

Les dispositifs de stockage peuvent être classés en deux catégories : directe et indirecte.

Les systèmes directs utilisables sont les super condensateurs et les inductances supraconductrices (SMES : Superconductor Magnetic Energy Storage) [25].

Les autres moyens de stockage, considérés comme indirects, sont [25] :

- les accumulateurs électrochimiques.
- les accumulateurs à volants d'inertie (FES : Flywheel Energy Storage).
- les systèmes à air comprimé en bouteilles.
- les systèmes électrolyseur-hydrogène-pile à combustible (ou a PAC réversible).

Dans les systèmes photovoltaïques, le moyen de stockage utilisé couramment est le stockage électrochimique. De plus, pour un site isolé, il devra respecter certaines contraintes

notamment un bon rapport coût / performance, une grande fiabilité, une bonne sécurité... Dans ce domaine, les batteries au plomb-acide sont les plus répandues car elles offrent le meilleur compromis en termes de coût / performance / entretien. Nous présenterons une étude sur le fonctionnement de ces batteries et les précautions à prendre pour leur bon fonctionnement [26].

### 1.5.3. Fonctionnement d'un accumulateur au plomb :

Un accumulateur est un système électrochimique capable de restituer sous forme électrique l'énergie chimique stockée. En plus, les réactions internes sont réversibles. Ce système se compose de deux électrodes (positive et négative) et d'un électrolyte (voir figure 1.14). L'électrode positive est en dioxyde de plomb ( $PbO_2$ ) et la négative en plomb. L'électrolyte est une solution d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) qui permet le flux d'ions entre les deux électrodes et crée un courant [27]. La différence de potentiel entre les deux électrodes est de 2V.

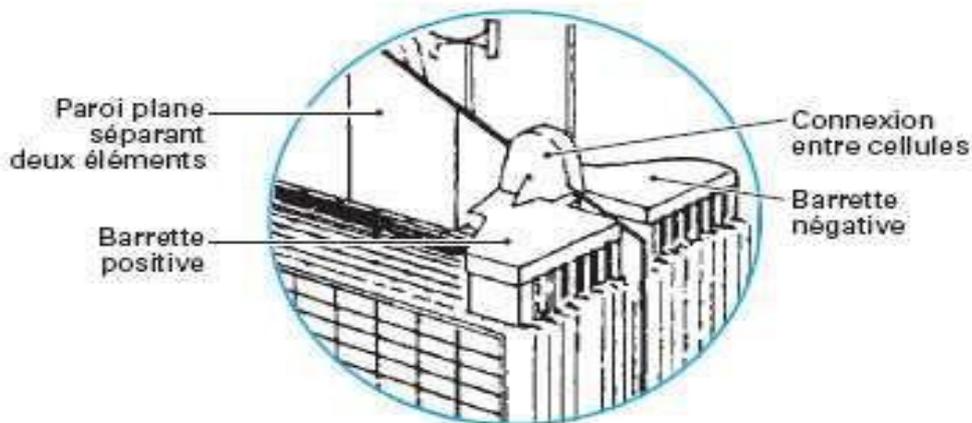
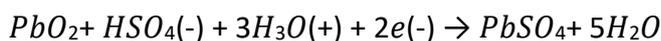


Figure 1.14. Représentation interne de l'accumulateur [26].

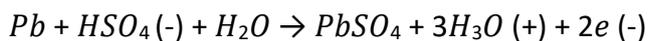
La paroi plane séparant les deux électrodes est fait d'un matériau poreux qui, tout en permettant le passage d'ions, empêche les deux électrodes de se toucher [26].

L'ensemble électrodes-électrolyte est le lieu d'une réaction d'oxydoréduction dont voici les équations [26] :

Electrode positive (anode) :



Electrode négative (cathode) :



Ce qui nous donne globalement :



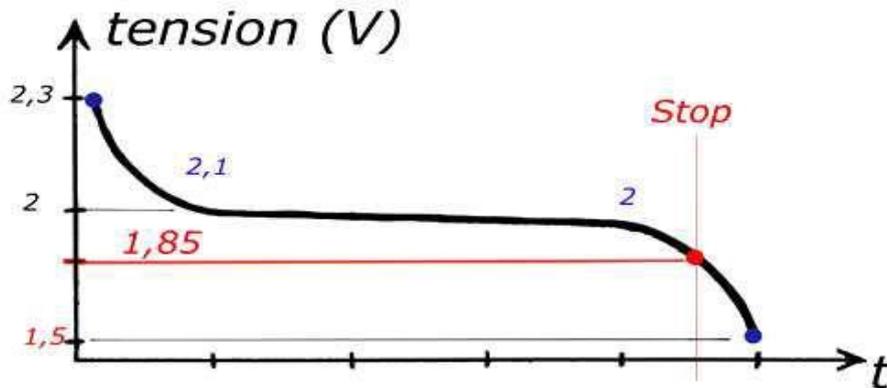
Que l'on peut condenser en :



Les décharges trop profondes peuvent conduire à une perte irréversible de capacité. Trois causes possibles sont à l'origine de ce phénomène [26] :

- transformation irréversible d'une partie de la matière active de l'électrode positive ( $PbO$ ) en cristaux de sulfate de plomb,
- gonflement progressif et perte de cohésion de la matière active de l'électrode positive,
- passivation électronique du collecteur de courant de l'électrode positive.

Typiquement, la tension de cellule évolue de la manière suivante (figure 1.15):

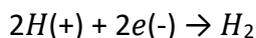


**Figure 1.15.** Evolution de la tension d'une cellule de batterie au plomb.

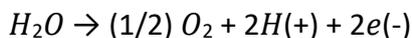
Si la charge se poursuit trop longtemps, la tension peut atteindre 2,4 V, valeur de seuil à partir de laquelle on assiste à la décomposition de l'eau (électrolyse) en dioxygène  $O_2$  gazeux à l'électrode positive et en dihydrogène  $H_2$  gazeux à l'électrode négative [26].

Ce phénomène dit de dégazage est caractérisé par les réactions suivantes aux électrodes [26] :

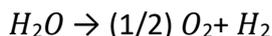
À l'anode :



À la cathode :



Réaction globale :



La densité théorique d'énergie de ce couple électrochimique est de 170 Wh/kg. Cependant, le sulfate de plomb produit par les réactions aux deux électrodes est insoluble et non conducteur. Son accumulation sur les électrodes, et dans une moindre mesure dans l'électrolyte, limite par conséquent l'énergie qui peut être extraite de la batterie. De plus, les concentrations et les quantités de masses actives sont inférieures à celles conduisant à cette valeur. La densité pratique d'énergie est proche de 40 Wh/kg, soit quatre fois moins que le maximum théorique [26].

### 1.6. Bus à courant continu :

L'éolienne et les panneaux PV sont connectés à un bus continu. Pour un fonctionnement optimal, ceux-ci ont besoin d'une tension constante sur ce bus [1].

La régulation de la tension continue  $V_{cc}$  sur le bus CC est mise en œuvre par un hacheur réversible en courant, connecté à un banc de batteries. Ainsi, le bus à CC est régulé à une valeur de tension constante en contrôlant le flux d'énergie entre les batteries et le bus. Quand l'énergie fournie par les sources d'énergie renouvelable est insuffisante pour faire face à une augmentation soudaine de la charge, la tension du bus à CC devient inférieure à la valeur de référence. Dans ce cas, l'énergie manquante est obtenue à partir des batteries. Quand il existe un excès d'énergie, il est utilisé pour recharger les batteries. L'architecture de ce système est présentée dans la (figure 1.16) [1].

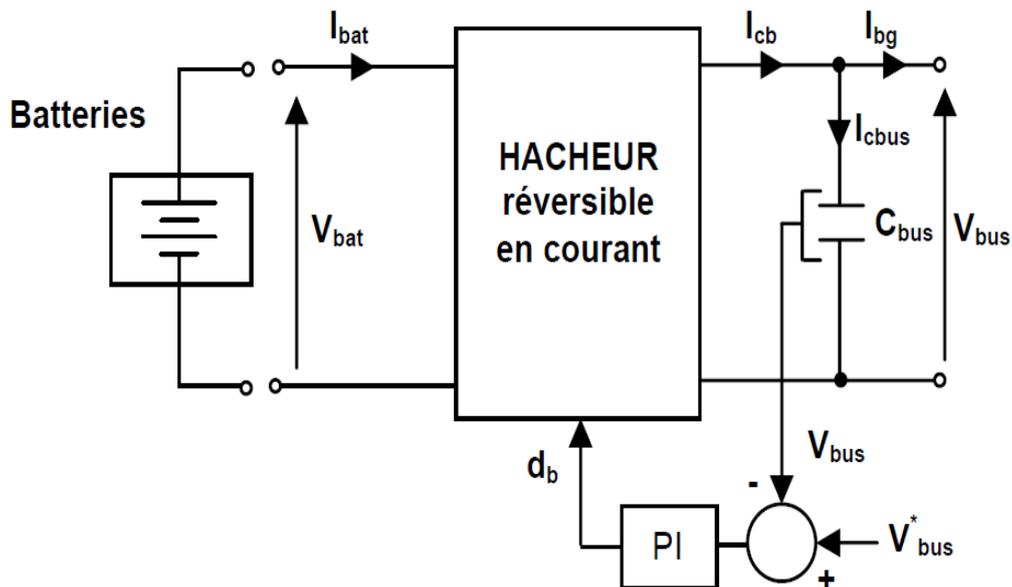


Figure 1.16. Architecture du bus à CC avec batteries de stockage.

Avec :

$I_{bat}$  et  $V_{bat}$  : Courant et tension liés aux batteries,

$V_{bus}$  et  $C_{bus}$  : Tension et capacité liés au bus à CC,

$I_{bg}$  : Courant entre bus et le générateur,

$I_{cbus}$  : Courant entre le convertisseur et le bus,

PI : Régulateur,

$d_b$  : Rapport cyclique.

### 1.7. Hacheur réversible en courant :

Dans le cas du hacheur utilisé pour adapter la tension aux bornes du générateur PV, le transfert d'énergie s'effectue dans un seul sens, de la source (générateur PV) vers le bus à CC.

Dans le cas du Hacheur utilisé par la charge / décharge des batteries, le courant électrique doit être réversible.

Ainsi, pour réaliser le transfert d'énergie dans les deux sens, un hacheur survolteur et un hacheur dévolteur ont été associés (comme l'indique la figure 1.17) [1].

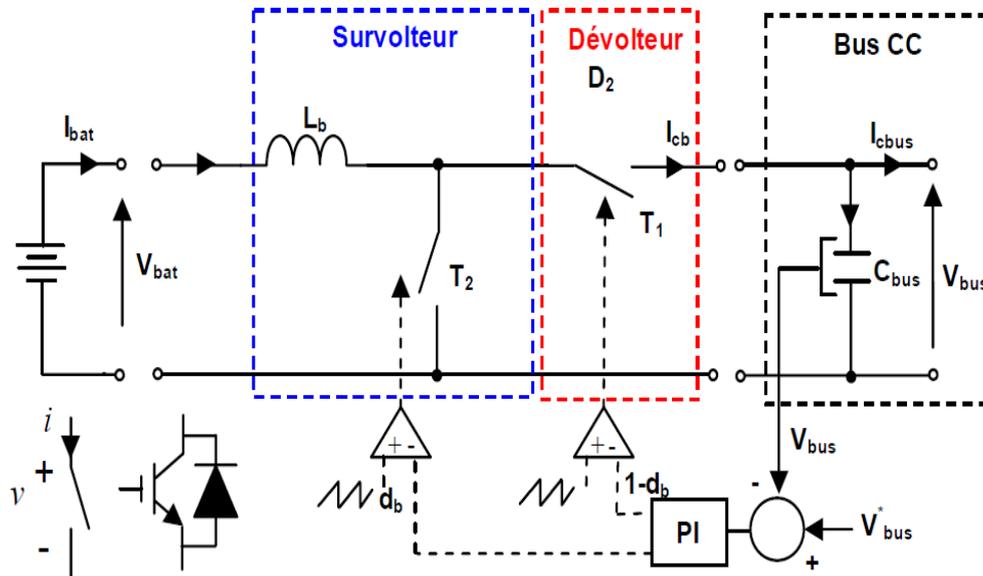


Figure 1.17. Hacheur réversible en courant.

## 1.8. Onduleur :

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet la transformation de l'énergie de type continue, en une énergie alternative. La forme de la tension de la sortie de l'onduleur doit être plus proche d'une sinusoïde (l'allure sinusoïdale), c'est que le taux d'harmonique soit très faible, et ça dépend essentiellement à la technique de commande utilisée [29].

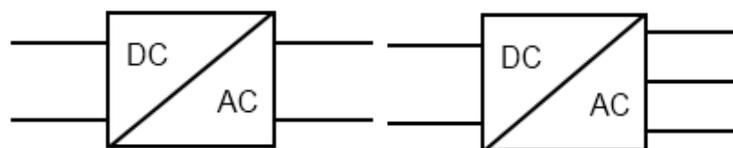


Figure 1.18. Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé.

### 1.8.1. Structure d'onduleur :

Les onduleurs triphasés constitués de trois bras chaque bras se compose de deux interrupteurs (figure 1.19). Les interrupteurs choisis, constituent bien une cellule de commutation. Leur fonctionnement doit être complémentaire afin de ne jamais court-circuiter la source continue. Donc les interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant, et se compose soit d'un MOSFET et une diode en antiparallèle ou bien un transistor avec une diode en antiparallèle [30].

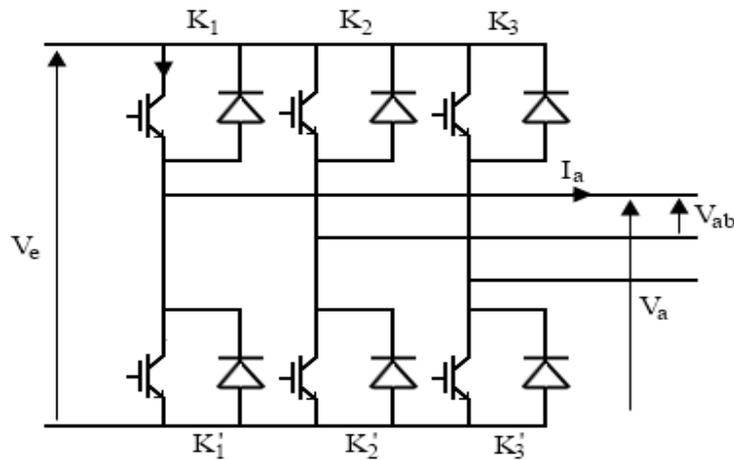


Figure 1.19. Structure d'un onduleur triphasé.

### 1.8.2. Classification des onduleurs :

Les onduleurs sont classés selon le mode de commutation :

- les onduleurs autonomes qui génèrent leur propre fréquence et leur propre tension alternative. Dans ces onduleurs la commutation est forcée [31].
- les onduleurs non autonomes dont la fréquence et la tension alternative sont imposées par le réseau qu'ils alimentent. Dans ces onduleurs la commutation est naturelle. Elle est naturelle en ce sens que ce sont les tensions alternatives du réseau qui effectuent le transfert du courant d'un thyristor à l'autre [31].

Ou selon la nature de la source continue :

- Onduleur de tension : la source DC impose la tension, la charge AC impose le courant sinusoïdal [30].
- Onduleur de courant : la source DC impose le courant, la charge AC impose la tension sinusoïdale [30].

### 1.9. Présentation chronologique des principaux travaux ou réalisations :

Au cours des dernières années, beaucoup de recherches ont été effectuées sur la conception, l'optimisation, le contrôle et l'opération des systèmes hybrides à énergies renouvelables. Les efforts de recherche et de développement dans les technologies d'énergie renouvelable comme le solaire, l'éolienne et d'autres sources d'énergie renouvelable doivent continuer afin d'améliorer leurs performances et fiabilité. Compte tenu des récents développements, il est clair que ce domaine prend de l'ampleur. A cause de la nature stochastique des sources d'énergies renouvelables, il est évident que les systèmes hybrides à énergies renouvelables doivent comprendre au moins un système de stockage d'énergie pour satisfaire la demande des charges à tout instant. Ce dernier peut être un banc de batteries, un ensemble électrolyseur et pile à combustible ou la combinaison de ces systèmes de stockage.

D'après José L. et collaborateurs [14], les systèmes autonomes hybrides à énergies renouvelables sont généralement plus adaptés que les systèmes qui ont une seule source

d'énergie pour l'approvisionnement en électricité des applications hors réseau, en particulier dans les zones reculées et difficiles d'accès. Ces types de systèmes démontrent une plus grande fiabilité que les systèmes simples photovoltaïque (PV) ou éolien. Les systèmes hybrides les plus utilisés sont les combinaisons PV -Éolien-Batterie et PV-Diesel- Batterie. Les batteries (normalement de type plomb-acide) sont habituellement utilisées comme système de stockage. Le stockage d'énergie sous forme d'hydrogène, bien que techniquement viable, a un inconvénient en terme de sa faible efficacité dans le processus de conversion électricité-hydrogène-électricité, outre le fait que, sur le plan économique, il ne peut pas rivaliser avec le stockage de la batterie à l'heure actuelle [14]. Une revue de littérature a été faite par Prabodh Bajpai et Vaishalee Dash en 2012 sur les systèmes hybrides à énergies renouvelables pour la production d'électricité dans les applications autonomes [18]. Dans cette étude, les auteurs se sont fixé comme objectifs l'examen minutieux de l'état de la recherche sur le dimensionnement, l'optimisation, la gestion énergétique et la modélisation des composants des systèmes hybrides à énergies renouvelables. Ils affinent que les systèmes hybrides à énergies renouvelables peuvent fournir une alimentation ininterrompue en énergie et une émission zéro de gaz à effet de serre qui est le principal avantage de ces systèmes.

En 2014, Madan A. et al. [28] ont fait une revue sur l'état de la recherche sur les systèmes hybrides d'énergie. Dans leur étude, plusieurs travaux publiés par l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), dans des magazines et des actes de conférences ont été analysés. 11 ressorts de cette étude que parmi les sources d'énergies renouvelables, l'énergie solaire et l'énergie éolienne sont les sources les plus utilisées dans la production d'électricité dans de nombreux pays en développement. Plusieurs systèmes hybrides d'énergie sont analysés et une étude détaillée a été effectuée pour différentes stratégies de commande et des algorithmes d'optimisation ont été incorporés dans différentes sources d'énergie non-conventionnelles. Il se trouve que beaucoup de chercheurs ont étudié par simulation et expérimentalement les systèmes hybrides d'énergie. Enfin, ils concluent que les systèmes hybrides d'énergie sont fiables, économiques et efficaces pour satisfaire les besoins en énergie.

À travers ces différentes études, nous constatons que les systèmes hybrides à énergies renouvelables constituent une solution viable, économique et efficace pour les régions éloignées, difficiles d'accès et dépourvues de réseau électrique.

### **1.10. Présentation de la contribution de l'étudiant :**

On s'intéresse dans notre travail à faire le dimensionnement et l'optimisation du système hybride éolien-photovoltaïque pour alimenter une charge équivalente à un village de 20 habitations au site **Ilamane** à Tamanrasset en utilisant le logiciel Homer pour l'optimisation.

Notre système hybride de production électrique doit utiliser l'énergie éolienne comme source première et le PV comme système d'appoint.

On va aussi étudier l'influence de l'altitude de l'éolienne sur sa production en utilisant des données réelles de la vitesse du vent mesurées à 10 et 40 mètres et même sur l'optimisation du système hybride donnée par le logiciel Homer.

A la fin on va comparer les résultats obtenus pour nos données réelles avec celle de l'extrapolation de la vitesse de vent que le logiciel peut la faire en utilisant les 2 lois d'extrapolation (la loi logarithmique et la loi de puissance).

### **1.11. Conclusion :**

Dans ce chapitre, une présentation de la structure du système hybride éolien-photovoltaïque est faite. On a décrit ses différents composants.

Nous avons présenté le fonctionnement du module photovoltaïque, qui a été relié à un convertisseur (DC-DC) contrôlé par une commande (PPM).

Nous avons mis en évidence les raisons liées au choix de l'éolienne, de la génératrice et du pont de diodes. Nous avons illustré aussi leur principe de fonctionnement.

Une partie du chapitre était consacrée au dispositif de stockage. Nous avons présenté aussi les deux convertisseurs : le hacheur réversible en courant contraints qui permet de réguler la charge /décharge des batteries, et l'onduleur qui relie le bus DC à la charge.

Enfin, on avait une présentation chronologique des principaux travaux liés au sujet et une autre présentation de ma contribution à ce thème.

# **CHAPITRE 2 :**

## **MODELISATION ET OPTIMISATION DES COMPOSANTS DU SYSTEME EOLIEN- PHOTOVOLTAIQUE**

## 2.1. Introduction :

Après avoir étudié les différents composants du système éolien-photovoltaïque, aussi que l'influence des paramètres de ses composants sur le système, nous procédons à la modélisation du système.

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié. A ce niveau, la condition qui s'impose c'est de connaître les critères d'entrées (données de base) c'est-à-dire les données météorologiques du site, et les données relatives aux équipements. De nombreux articles publiés dans la littérature scientifique portent sur le développement de modèles pour chacun des composants du système.

Dans ce chapitre, nous représenterons le modèle des données : rayonnement solaire, de température et vitesse de vent. Nous exposons des modèles de générateur photovoltaïque, de l'éolienne, d'éléments de conversion et du dispositif de stockage (batteries).

## 2.2. Modélisation de la chaine photovoltaïque :

La chaine de conversion photovoltaïque, constituée d'un générateur PV et l'ensemble : hacheur survolteur et son système de commande, permettant d'extraire la puissance maximale. Cette chaine est représentée en figure 2.1. La modélisation de ses différents organes va être examinée dans ce qui suit, en commençant par le rayonnement solaire.

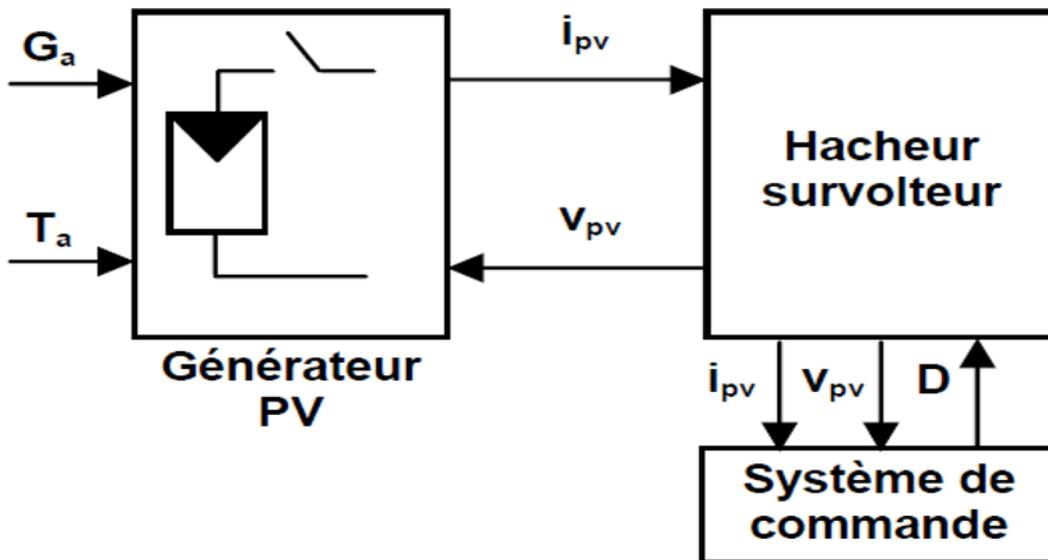


Figure 2.1. Chaîne de conversion photovoltaïque.

Avec :

$G_a$  : Eclairement global incident sur la cellule photovoltaïque ( $W/m^2$ ),

$T_a$  : Température ambiante,

$i_{pv}$  et  $v_{pv}$  : Courant et tension liés au générateur PV,

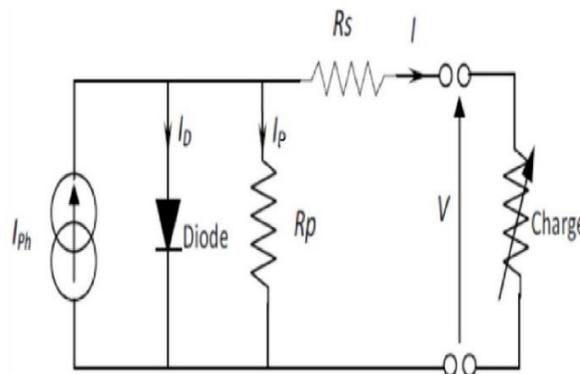
$D$  : Données de commande (DATA).

### 2.2.1. Modélisation du rayonnement solaire :

Les ondes électromagnétiques provenant du soleil portent l'énergie, la projection de cette énergie dépend de l'orientation de la surface réceptrice. Pour récupérer le maximum d'énergie en provenance du soleil, il est nécessaire d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux. La connaissance de la position du soleil en fonction du temps est primordiale.

### 2.2.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule PV (figure 2.2) fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour les pertes. Les résistances  $R_s$  et  $R_p$  permettent de tenir compte des pertes liées aux défauts de fabrication ;  $R_s$  représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que  $R_p$  caractérise les courants de fuite dus à la diode et aux effets de bord de la jonction [38].



**Figure 2.2.** Schéma électrique équivalent d'une cellule PV, modèle à une diode.

La loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante du photo-courant  $I_{ph}$ :

$$I_{ph} = I_D + I_p + I \quad (2.1)$$

A partir de ce circuit, on tire les équations qui nous permettent d'obtenir la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque.

Le courant de jonction  $I_D$  est donné par :

$$I_D = I_{sat} \left( \exp\left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T_c}\right) - 1 \right) \quad (2.2)$$

Le courant dans la résistance  $R_p$  est donné par :

$$I_p = \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (2.3)$$

A partir de l'équation (2.1), on obtient l'expression de la caractéristique I-V du modèle choisi [5] :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left( \exp \left( \frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T_c} \right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (2.4)$$

$I_{sat}$  : Courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité (A),

$n$  : Coefficient d'idéalité de la cellule photovoltaïque

$k$  : Constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K)

$q$  : Charge d'électron

$T_c$  : Température absolue de la cellule (K)

### 2.2.2.1. Paramètres d'une cellule PV :

#### 2.2.2.1.1. Le courant de court-circuit :

Le courant de court-circuit  $I_{cc} = I_{ph}$ , c'est la plus grande valeur du courant générée par la cellule sous les conditions du court-circuit où  $V=0$  [6].

La variation du courant de court-circuit en fonction de l'éclairement et de la température de jonction et par rapport aux conditions standards est la suivante [34]:

$$I_{cc} = \frac{G}{G_{ref}} I_{cc\_ref} [1 + \alpha_{icc} (T_c - T_{red})] \quad (2.5)$$

$G$  : Rayonnement solaire.

$G_{ref}$  : Rayonnement solaire de référence.

$I_{cc\_ref}$  : Courant du court-circuit de référence.

$T_{ref}$  : Température de référence.

$\alpha_{icc}$  : Coefficient de température du courant de court-circuit.

#### 2.2.2.1.2. La tension de circuit ouvert :

La tension de circuit ouvert est la tension à travers la jonction/diode PN où  $I = 0$ . Elle est donnée par [40] :

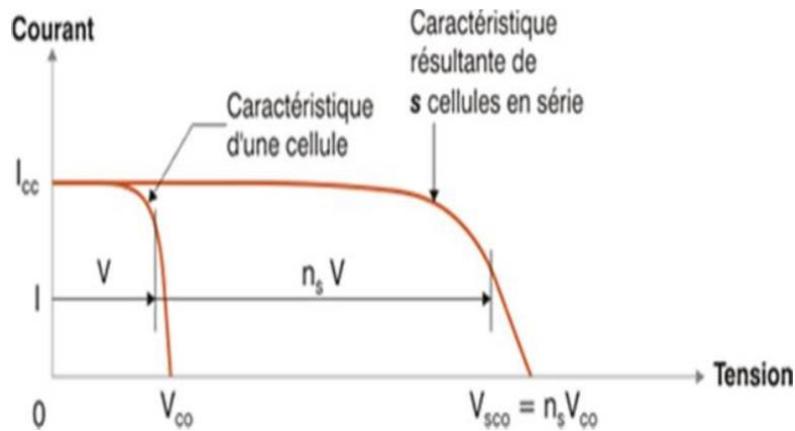
$$V = V_{co} = n \cdot V_T \cdot \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_{sat}} \right) \quad (2.6)$$

$V_T$  : Le potentiel thermodynamique tel que :  $V_T = \frac{K \cdot T_c}{q} = 25mV$  à  $20^\circ C$

### 2.2.2.2. Association de Cellules Photovoltaïques :

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné [4].

La figure 2.3 montre la caractéristique résultante courant-tension ( $I_{scc}$ ,  $V_{sco}$ ) obtenue en associant en série  $n_s$  cellules identiques dont la caractéristique courant-tension est ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ) [4]:

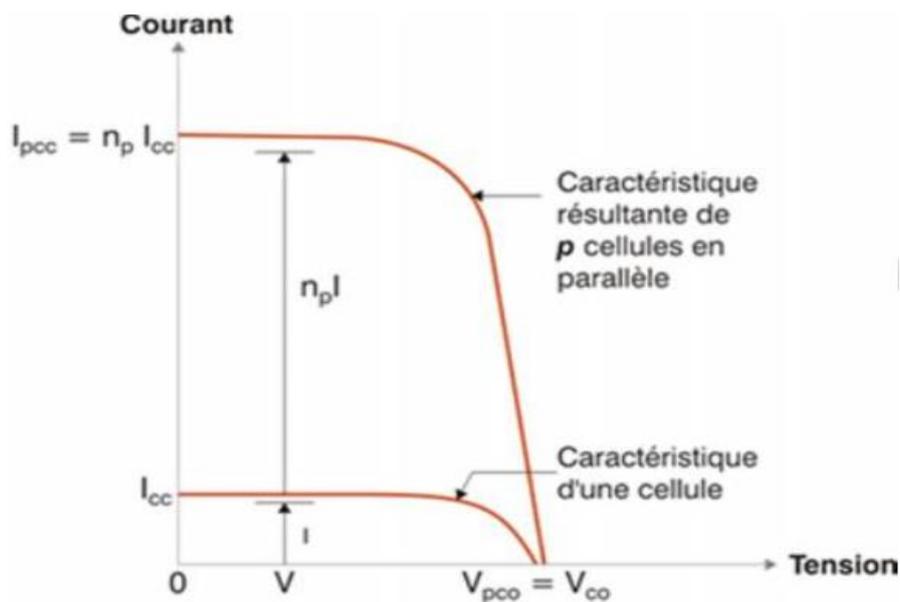


**Figure 2.3.** Caractéristiques de cellules photovoltaïques en série.

$$V_{sco} = n_s \cdot V_{co} \qquad I_{scc} = I_{cc}$$

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée [4].

La figure 2.4 montre la caractéristique résultante ( $I_{pcc}$ ,  $V_{pco}$ ) obtenue en associant en parallèle  $n_p$  cellules identiques ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ) [4]:



**Figure 2.4.** Caractéristiques de cellules photovoltaïques en parallèle.

$$V_{pco} = V_{co} \qquad I_{pcc} = n_p \cdot I_{cc}$$

### 2.2.2.3. Modélisation du générateur PV :

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou parallèle. Un groupe de panneaux PV de  $n_s$  cellules montées en série et  $n_p$  cellules en parallèle est modélisé par le schéma de la figure 2.5 [19].

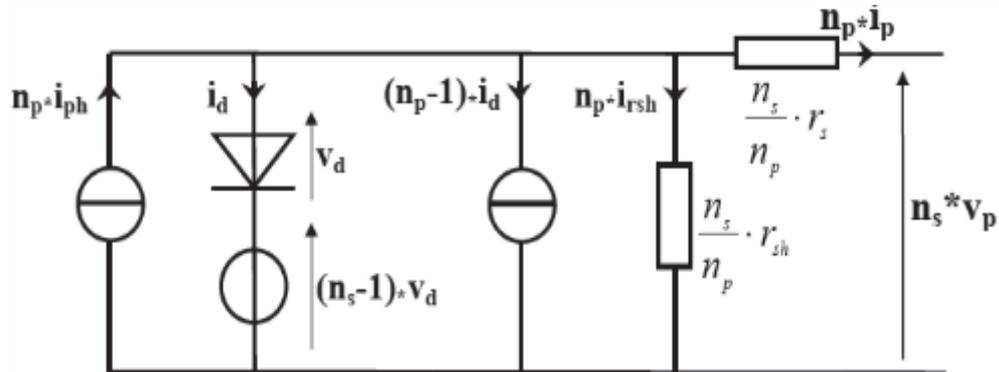


Figure 2.5. Schéma électrique équivalent d'un générateur PV, modèle à une diode.

$$\begin{aligned}
 I_{ph} &= n_p \cdot i_{ph} & I_G &= n_p \cdot i_{pph} \\
 I_d &= n_p \cdot i_d & I_{rsh} &= n_p \cdot i_{rsh} \\
 V_d &= n_s \cdot v_d & V_G &= n_s \cdot v_p \\
 R_s &= \frac{n_s}{n_p} \cdot r_s & R_{sh} &= \frac{n_s}{n_p} \cdot r_{sh}
 \end{aligned}$$

#### 2.2.2.3.1. Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque :

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série et en série parallèle donne ce qu'on appelle un générateur photovoltaïque dont la caractéristique générale est représentée sur la figure (figure 2.6) :

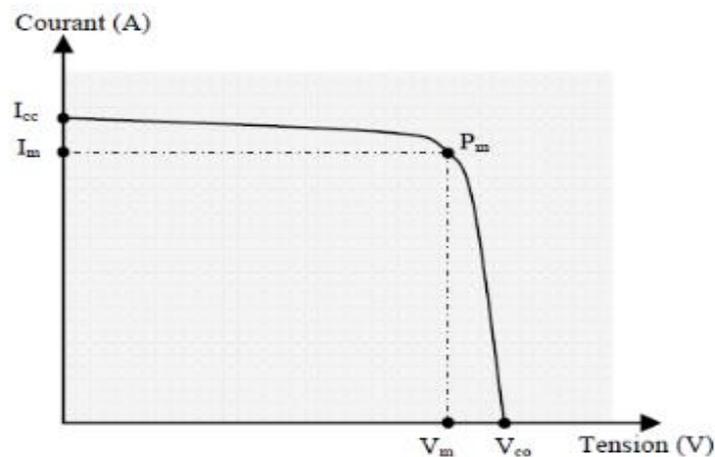


Figure 2.6. Caractéristique courant- tension d'un générateur photovoltaïque.

Avec :

$V_{co}$  : Tension de circuit ouvert,

$I_{cc}$  : Courant de court-circuit,

$V_m$  et  $I_m$  : Tension et courant au point de puissance maximale  $P_m$ .

### 2.2.2.3.2. Caractéristique P-V d'un générateur photovoltaïque :

La puissance générée par une cellule photovoltaïque est donnée par :  $P = V \cdot I$

La puissance maximale est obtenue lorsque :  $dP/dV = 0$

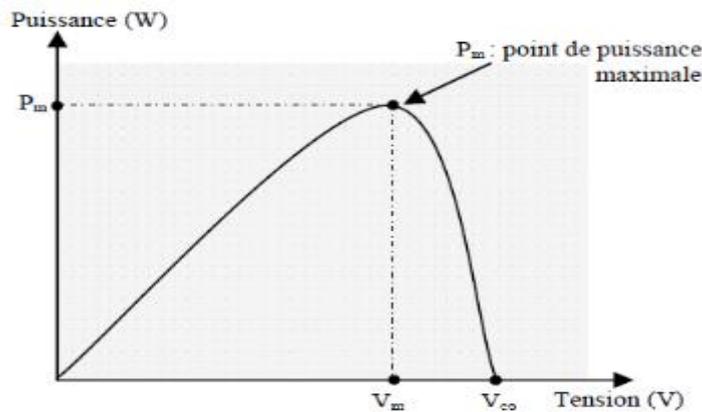


Figure 2.7. Caractéristique puissance- tension d'un générateur photovoltaïque.

### 2.2.2.3.3. Rendement d'un générateur photovoltaïque :

Le rendement d'une cellule est le rapport entre la puissance maximale disponible et la puissance du rayonnement incident, il est donné par :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m \cdot V_m}{A \cdot G_a} \quad (2.7)$$

$P_{in}$ : Puissance incidente sur la surface de la cellule photovoltaïque (W)

$A$ : Surface totale de la cellule photovoltaïque (m<sup>2</sup>).

### 2.2.2.3.4. Facteur de forme FF:

Il permet de juger de la qualité d'une cellule photovoltaïque. Il est défini comme le rapport entre le point de puissance maximum et la puissance à courant de court-circuit et tension en circuit ouvert.

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} = \frac{I_m \cdot V_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} = \frac{\eta \cdot A \cdot G_a}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (2.8)$$

A partir de cette définition, pour une cellule dont la caractéristique I-V est rectangulaire (source de courant), (figure 2.8), le facteur de forme sera donc unitaire.

Le facteur de forme d'une bonne cellule photovoltaïque devra être compris entre 0,75 et 0,85. Le facteur de forme FF diminue si la température augmente.

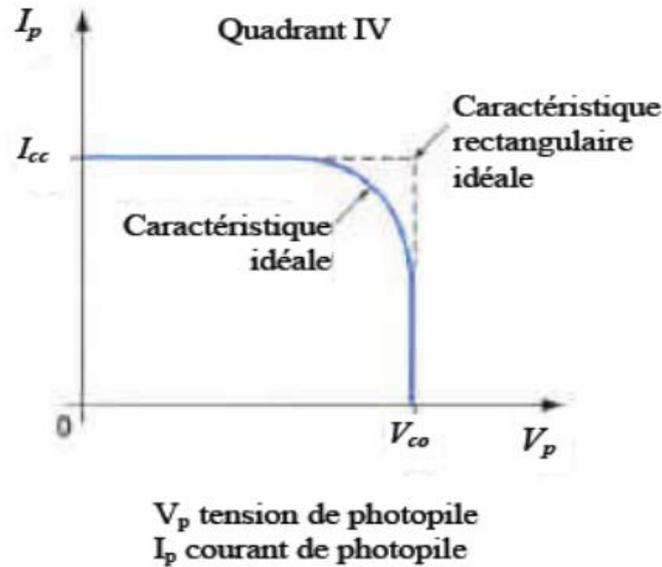


Figure 2.8. Caractéristique idéale d'une cellule P-V.

### 2.2.2.3.5. Influence de l'intensité du rayonnement :

L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m<sup>2</sup> et une température de 25°C. La figure (2.9) présente un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement :

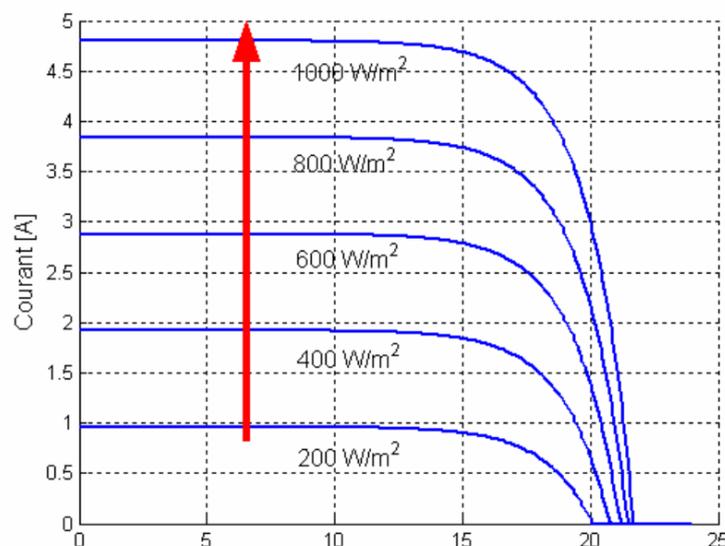
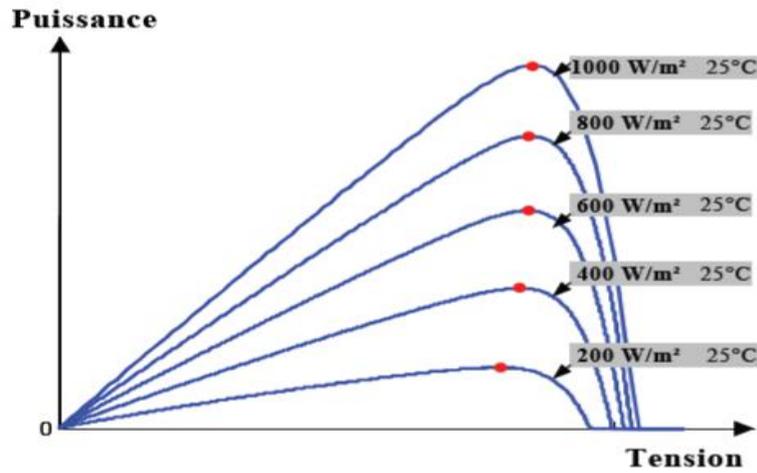


Figure 2.9. Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque pour différents rayonnements [1].

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairage [39].

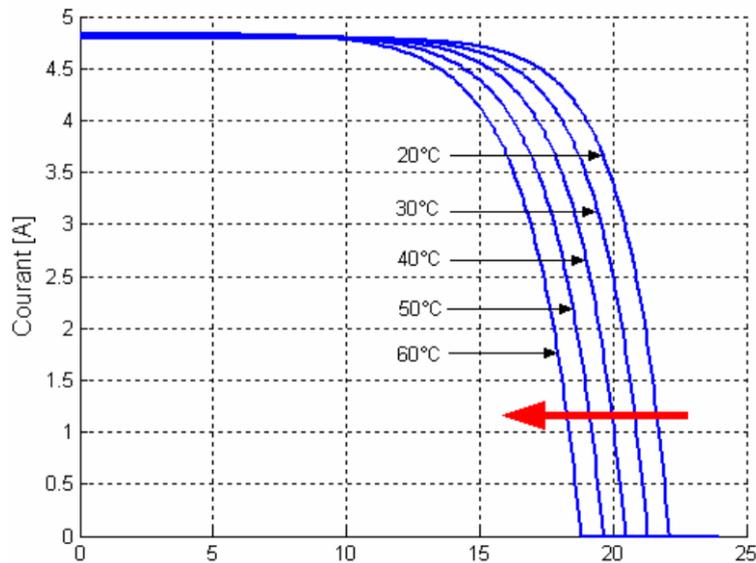
La figure (2.10) présente un exemple des courbes puissance-tension pour différents niveaux de rayonnement :



**Figure 2.10.** Caractéristique P-V d'un générateur photovoltaïque pour différents rayonnements.

### 2.2.2.3.6. Influence de la température :

La figure (2.11) présente des courbes courant-tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule PV :

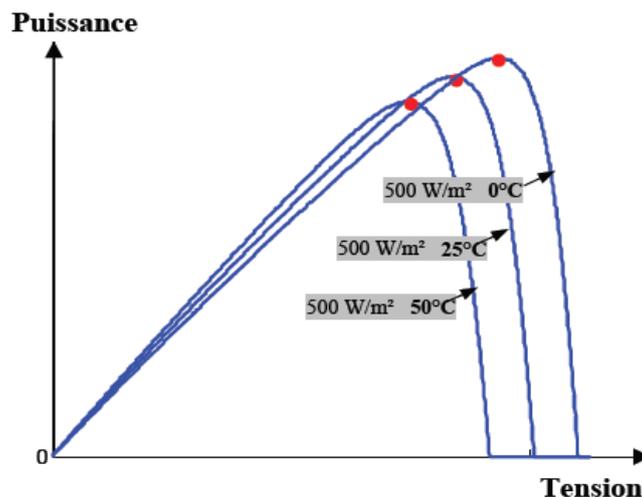


**Figure 2.11.** Caractéristique I-V d'un générateur photovoltaïque pour différentes températures [1].

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site devra être prise en compte.

Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue d'environ 0,5% par degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25 °C [39].

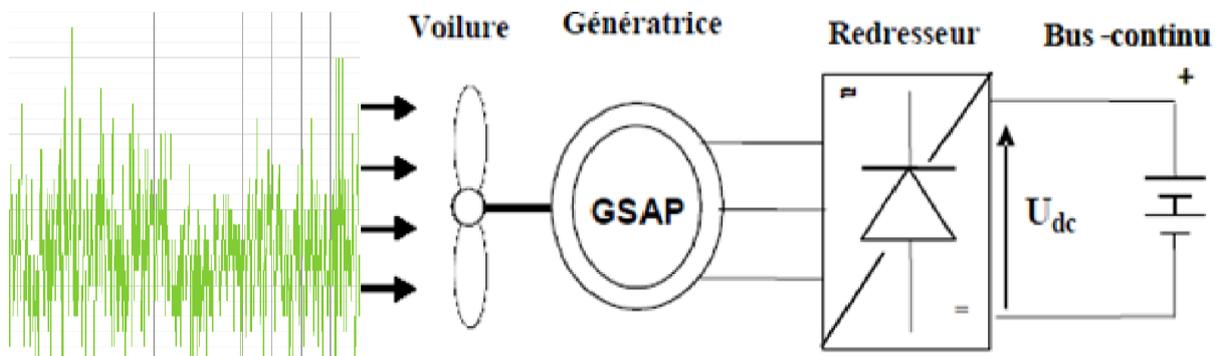
La figure (2.12) présente des courbes puissance-tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule PV :



**Figure 2.12.** Caractéristique P-V d'un générateur photovoltaïque pour différentes températures.

### 2.3. Modélisation de la chaîne éolienne :

Le générateur éolien, constitué d'une turbine à axe horizontal couplée directement à une génératrice synchrone à aimants permanents raccordée à un bus continu par l'intermédiaire d'un redresseur, est représenté en figure 2.13. La modélisation de ces différents organes va être examinée dans ce qui suit.



**Figure 2.13.** Chaîne de conversion éolienne.

### 2.3.1. Extrapolation verticale de la vitesse du vent:

Les premiers travaux portant sur la détermination des formules d'extrapolation de la vitesse du vent d'un niveau  $z_1$  à  $z_2$  ont été effectués par Justus C.G. et A.S. Mikhail qui étudient la variation de la vitesse du vent ainsi que les paramètres de Weibull en 1976, [37 et 38]. Nous allons citer dans les paragraphes suivants les différentes formules proposées par la littérature.

#### 2.3.1.1. Loi logarithmique :

Le profil logarithmique est déduit à partir du rapport du profil vertical du vent. [36] L'extrapolation de la vitesse mesurée  $V_1$  en un point  $z_1$  vers un niveau  $z_2$ , s'écrirait :

$$V_2 = V_1 \frac{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{z_1}{L}\right)}{\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{z_2}{L}\right)} \quad (2.9)$$

$\psi_m$ : fonction universelle.

$z_0$ : rugosité du sol.

Pour des conditions neutres, la fonction universelle étant nulle, l'équation précédente devient :

$$V_2 = V_1 \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)} \quad (2.10)$$

#### 2.3.1.2. Loi de puissance 1/7 :

La loi de puissance qui permet l'extrapolation verticale de la vitesse du vent d'un niveau  $z_1$  à un niveau  $z_2$ , se met sous la forme :

$$V(z_2) = V(z_1) \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^{\alpha_e} \quad (2.11)$$

Avec :

$$\alpha_e = \frac{\varphi_M\left(\frac{z_g}{L}\right)}{\ln\left(\frac{z_g}{z_0}\right) - \psi_m\left(\frac{z_g}{L}\right)} \quad (2.12)$$

$z_g$ : étant la moyenne géométrique de la hauteur donnée par :

$$z_g = (z_1 \cdot z_2)^{1/2} \quad (2.13)$$

Afin d'éliminer l'effet de l'instabilité atmosphérique liée à la variation de la radiation solaire entre la nuit et le jour, dans l'exposant de la loi de puissance, l'auteur, [37] fait tendre la longueur de Monin-Obukov vers l'infini en supposant l'atmosphère neutre.

Dans ce cas, l'exposant prend une forme logarithmique et s'écrit alors :

$$\alpha_e = \frac{1}{\ln\left(\frac{z_g}{z_0}\right)} \quad (2.14)$$

L'auteur montre graphiquement que pour des régimes de vent très élevés et pour des altitudes élevées, la loi de puissance 1/7 est la limite du modèle de similitude d'où l'expression, [39] :

$$V_2 = V_1 \left( \frac{z_1}{z_2} \right)^{1/7} \quad (2.15)$$

### 2.3.2. Modèle de la turbine :

#### 2.3.2.1. Puissance récupérable par une turbine :

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur  $dx$ , de section  $S$ , de masse volumique  $\rho$ , animée d'une vitesse  $v$ , (Voir figure 2.14) s'écrit [42]:

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot dx \cdot v^2 \quad (2.16)$$

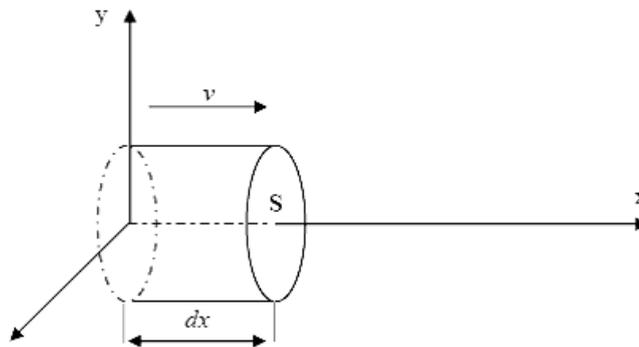


Figure 2.14. Colonne d'air animée d'une vitesse  $v$ .

La puissance  $P_v$  extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps.

$$P_v = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (2.17)$$

$\rho$  : Densité volumique de l'air (Kg/m).

$v$  : Vitesse instantanée du vent (m/s).

$E_c$  : Energie cinétique du vent (Joules).

#### 2.3.2.2. Vitesse normalisée :

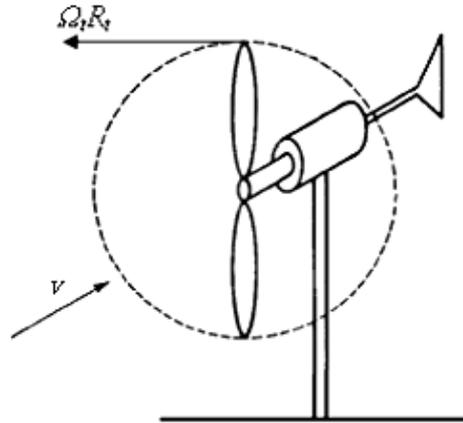
On définit la vitesse normalisée  $\lambda$  comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine  $\Omega_t \cdot R_t$  sur la vitesse instantanée de vent (Voir Figure 2.15) et donné par l'expression suivante [42]:

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{v} \quad (2.18)$$

$v$ : Vitesse de vent (m/s).

$\Omega_t$ : Vitesse de rotation avant multiplicatrice (rad/s)

$R_t$ : Rayon de la surface balayée(m).



**Figure 2.15.** Vitesse de vent ( $v$ ) et vitesse tangentielle de l'aubage  $\Omega_t$ .

### 2.3.2.3. Coefficient de puissance :

En réalité, jusqu'à présent, seulement 60 à 70% de la puissance maximale théorique  $P_{\text{éol max}}$  peut être exploitée par les engins les plus perfectionnés. Ce rendement, appelé coefficient de puissance  $C_p$  de l'éolienne, est propre à chaque voilure. Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent [22] :

$$P_{\text{éol}} = C_p \cdot P_v = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (2.19)$$

$P_{\text{éol}}$  : la puissance résultante d'une vitesse  $v$ .

$$C_p = \frac{2 \cdot P_{\text{éol}}}{\rho \cdot S \cdot v^3} \quad (2.20)$$

Le coefficient de puissance maximal théorique est défini :

$$C_p^{\text{opt}} = \frac{P_{\text{éol max}}}{P_v} = 0.59 \quad (2.21)$$

$C_p^{\text{opt}}$  : Étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance  $C_p$ . Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale  $\lambda^{\text{opt}}$  pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale  $V_n$  et une vitesse de rotation nominale  $\Omega_{tn}$ .

### 2.3.4. Puissance éolienne produite :

L'éolienne trouvée au marché est caractérisée par sa puissance nominale  $P_n$ , la puissance électrique à la sortie de la génératrice, cette puissance est fournie lorsque le vent souffle à la vitesse nominale  $v_n$ .

Une fois les fonctions de distribution de la vitesse du vent sont trouvées. La puissance moyenne produite par l'aérogénérateur peut facilement être calculée [44].

$$P_{\text{éol\_moy}} = \int_0^{\infty} P_{\text{éol}}(v) \cdot f(v) \cdot dv \quad (2.22)$$

$f(v)$  : la probabilité de la vitesse  $v$ .

La puissance produite par l'aérogénérateur est calculée en fonction de la vitesse de vent [44].

$$P_{\text{éol}} = \begin{cases} 0 & \text{pour } 0 \leq v < v_d \\ P_n \cdot \frac{v^k - v_d^k}{v_n^k - v_d^k} & \text{pour } v_d \leq v \leq v_n \\ P_n & \text{pour } v_n \leq v < v_c \\ 0 & \text{pour } v_c \leq v \end{cases} \quad (2.23)$$

$P_n$  : Puissance nominale de l'éolienne,

$v_d$  : Vitesse de démarrage de la turbine,

$v_n$  : Vitesse nominale de la turbine,

$v_c$  : Vitesse de coupure de la turbine,

$k$  : Le facteur de forme.

La variation de la puissance produite en fonction de la vitesse de vent d'un aérogénérateur ;

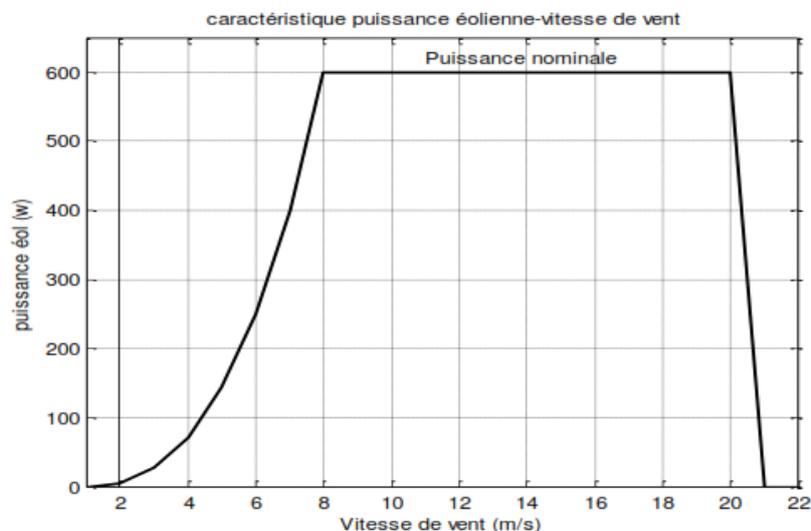


Figure 2.16. Puissance de l'aérogénérateur en fonction de la vitesse de vent.

Dont les caractéristiques principales sont :

- Vitesse de démarrage : 2m/s,
- Vitesse d'arrêt : 20m/s,
- Puissance nominale : 600W,
- Domaine de fonctionnement en puissance nominale : [08-20] m/s,

Ce qu'est montrée dans la figure précédente 2.16.

## 2.4. Modélisation du dispositif de stockage :

Le type de stockage modélisé est un stockage électrochimique et précisément les accumulateurs en plomb.

Les tensions en charge et en décharge sont modélisées par deux équations différentes [19]:

- tension en charge : (2.24)

$$V_{bat\_ch} = n_b \cdot [2 + 0.16 \cdot EDC] + n_b \cdot \frac{I_{bat}}{C_{10}} \cdot \left( \frac{6}{1 + I_{bat}^{0.86}} + \frac{0.48}{(1 - EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) \cdot (1 - 0.025 \cdot \Delta T)$$

- tension en décharge : (2.25)

$$V_{bat\_dé} = n_b \cdot [1.965 + 0.12 \cdot EDC] - n_b \cdot \frac{I_{bat}}{C_{10}} \cdot \left( \frac{4}{1 + I_{bat}^{1.3}} + \frac{0.27}{(EDC)^{1.5}} + 0.02 \right) \cdot (1 - 0.007 \cdot \Delta T)$$

## 2.5. Modélisation du hacheur réversible en courant :

Les équations différentielles définissant le fonctionnement des deux hacheurs réunis sur la structure présentés dans la Figure 1.17 ont été résolues en utilisant un modèle en valeurs moyennes. Sachant que la commande des interrupteurs  $T_2$  et  $T_1$  est simultanée avec des rapports cycliques  $d_b$  et  $1 - d_b$  complémentaires, le fonctionnement du hacheur réversible en courant est décrit par [1]:

$$\frac{di_{bat}}{dt} = \frac{1}{L} (d_b V_{bus} - V_{bat}) \quad (2.26)$$

En appliquant la loi de conservation de la puissance, le courant injecté ou absorbé du bus à CC s'exprime :

$$i_{cb} = d_b \cdot i_{bat} \quad (2.27)$$

Le rapport cyclique  $d_b$  est obtenu à partir d'un régulateur PI ayant comme entrée l'erreur de tension sur le bus à CC.

## 2.6. Modélisation de l'onduleur :

L'association d'un transistor  $T_i$  et d'une diode  $D_i$  donne un composant bidirectionnel  $K_i$ .

Comme les commandes des deux transistors du même bras sont complémentaires, nous pouvons remplacer chaque bras de l'onduleur par un interrupteur à deux positions comme l'indique la figure (2.17) [24].

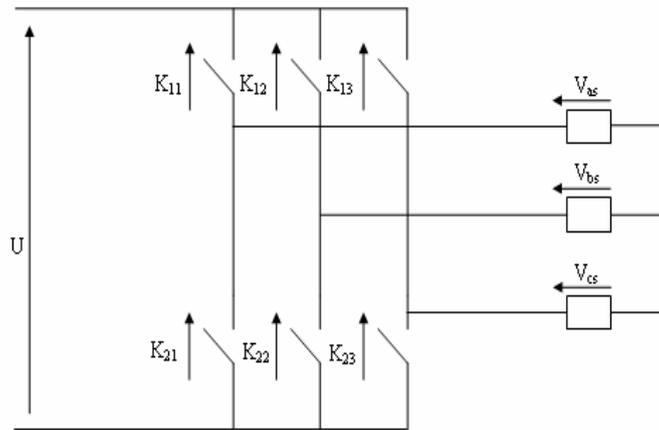


Figure 2.17. Représentation des composants bidirectionnels.

Soit  $F_i$  l'état de l'interrupteur  $K_i$ , il est donné par:

$$F_i = \begin{cases} 1 & \text{si } T_i \text{ est ouvert et } T'_i \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } T_i \text{ est fermé et } T'_i \text{ est ouvert} \end{cases}$$

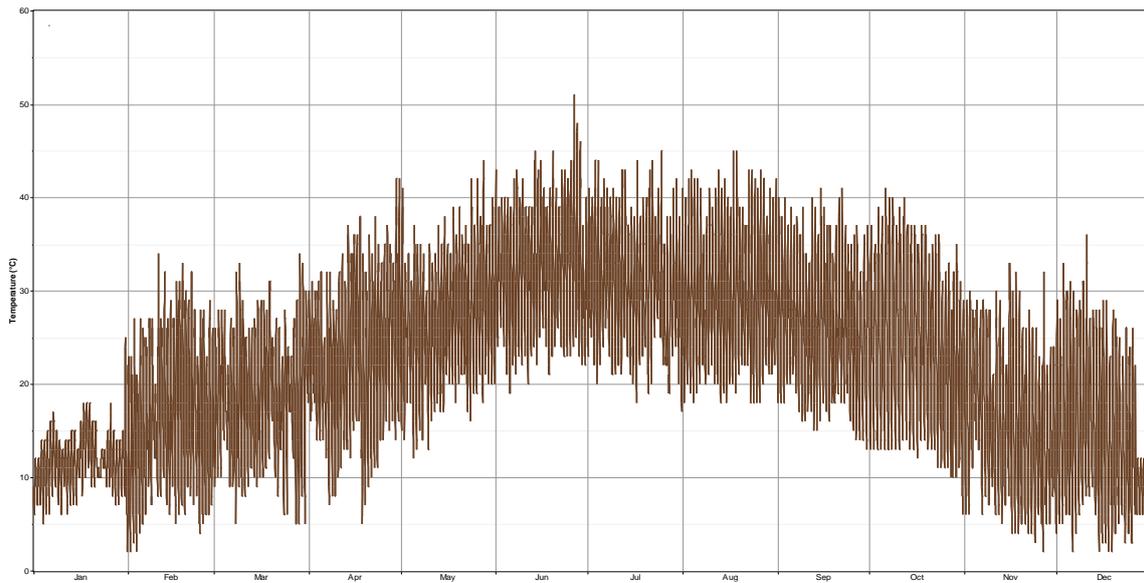
## 2.7. Les ressources météorologiques :

### 2.7.1. Le site choisi :

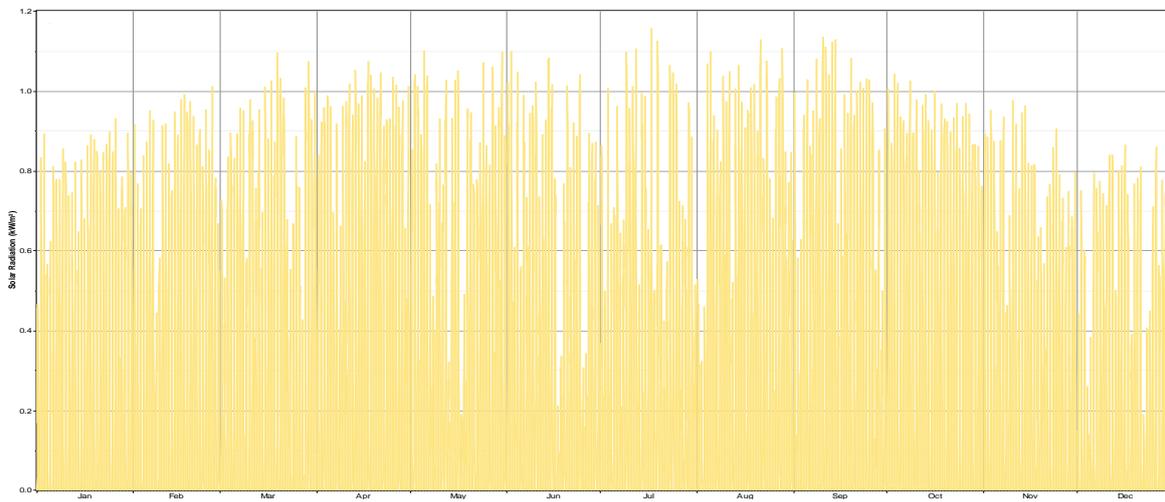
Le site choisi pour notre étude est un village rural saharien isolé nommé "**Ilamane**". Ces données géographiques sont comme suit : Latitude: 23.12° N, Longitude: 5.27° E. Ce village est situé dans la wilaya de Tamanrasset et il est constitué d'un nombre réduit de foyers. L'électrification du village par les filières classiques (diesel, réseau électrique), en plus des coûts de réalisation excessifs, auraient posé le problème de l'acheminement du combustible. Dans le cas du réseau; des difficultés certaines pour les travaux et la maintenance des lignes aériennes ne sont pas à écarter. L'éolien associé avec le photovoltaïque et les batteries comme appoint pourrait alors constituer une solution durable et plus appropriée pour une alimentation en énergie propre et non polluante.

### 2.7.2. Les données météorologiques :

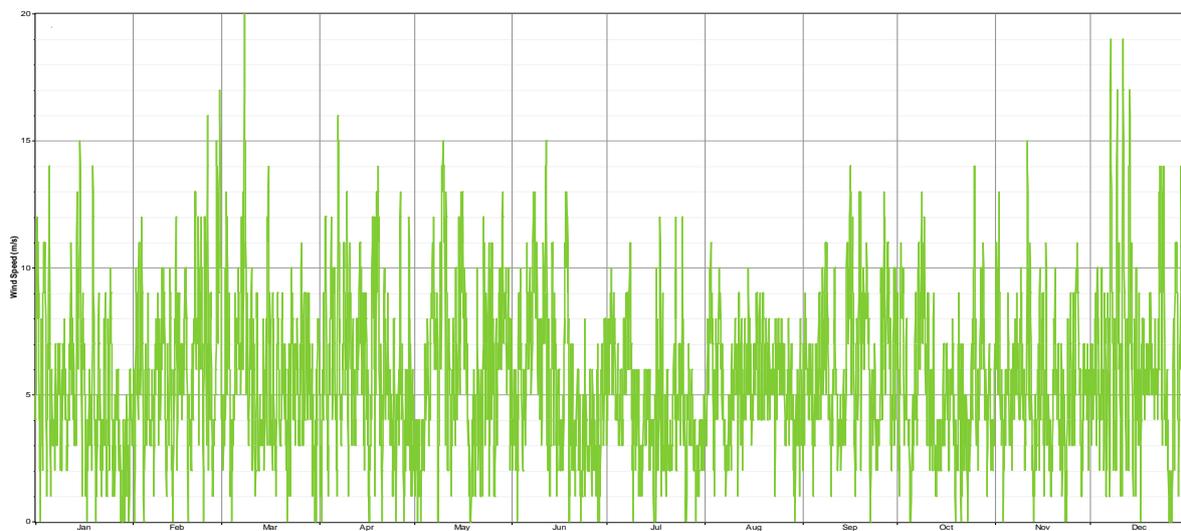
Les performances des modules photovoltaïques sont directement corrélées aux données climatiques qui sont en principe l'irradiation solaire et la température ambiante et la vitesse du vent. Ces données sont prises grâce au système d'acquisition.



**Figure 2.18.** Température ambiante exprimée en degré Celsius (°C).



**Figure 2.19** Eclairage solaire incident exprimée en Watt par mètre carré (W/m<sup>2</sup>).



**Figure 2.20.** Vitesse du vent à 10 mètres d'altitude exprimée en (m/s).

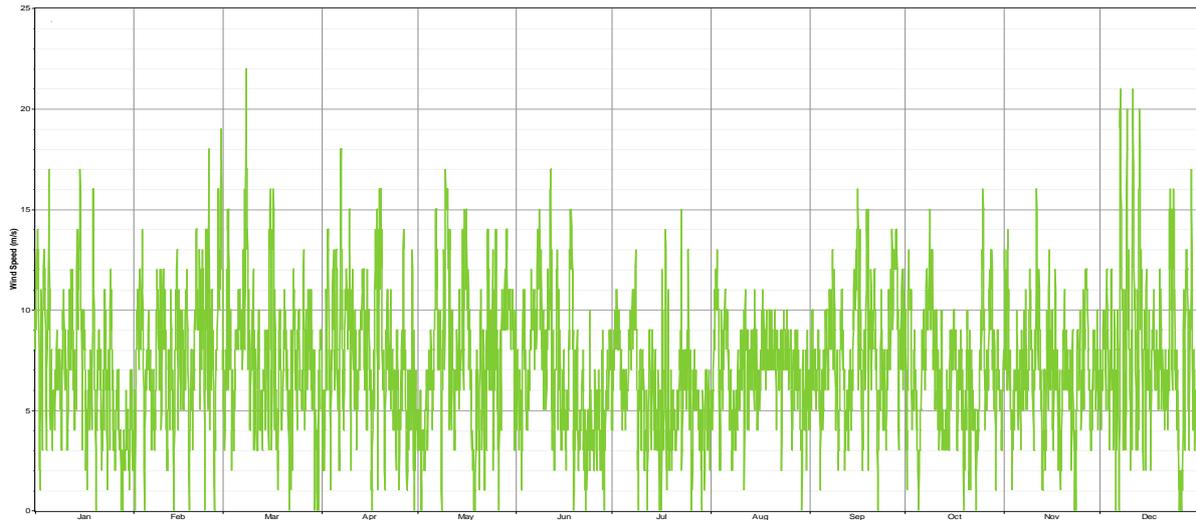


Figure 2.21. Vitesse du vent à 40 mètres d’altitude exprimée en (m/s).

### 2.8. Le profil de charge :

A ce jour, il n’existe pas des études statistiques officielles sur la consommation énergétiques des foyers en Algérie. Durant notre recherche bibliographique, nous avons trouvé seulement une étude réalisée par le Centre National des Recherches Intégrées aux Bâtiments (CNERIB) sur la consommation énergétique des appartements dans les villes du nord d’Algérie, la consommation énergétique journalière moyenne est environ 6027 Wh/j [68]. Cette situation, les a contraints de proposer un profil de charge pour ce village basé sur une enquête auprès des habitants des villes du grand sud. Cette étude tient en compte l’aspect niveau de vie, traditions, comportement et habitudes selon les deux saisons distinctes qui sont l’hiver et l’été. Ainsi, ils ont choisi un profil de consommation dont la demande consiste essentiellement à satisfaire les besoins énergétiques de base (éclairage, réfrigération, TV, radio, ventilation).

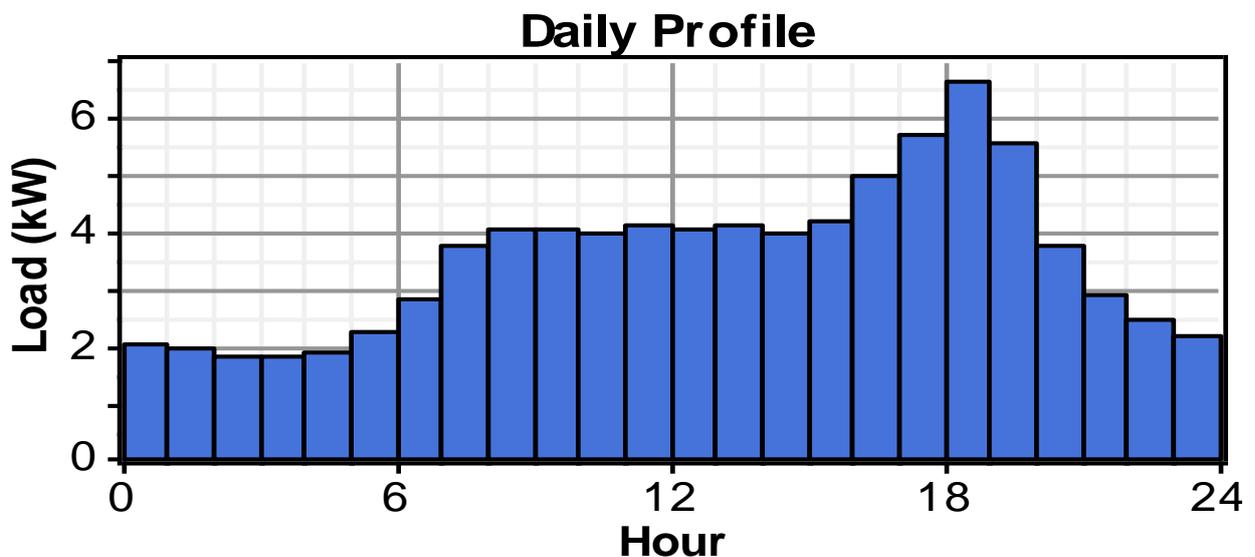


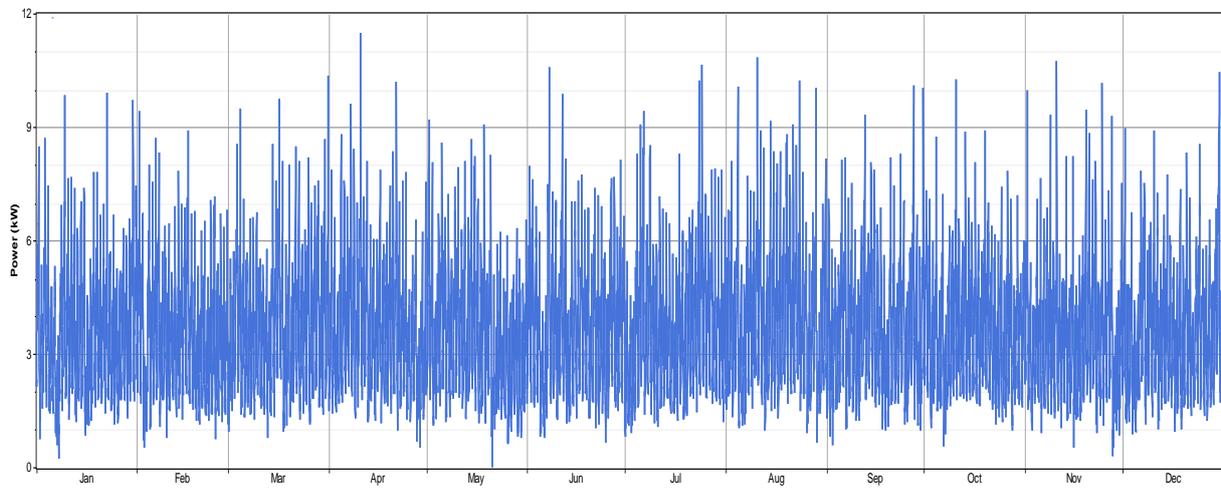
Figure 2.22. Profil de charge horaire sur un jour pour un village au sud Algérien.

On va utiliser un profil de charge d'un village au sud Algérien mesuré par Amimer Energie et présenté dans une conférence intitulée « Opportunité utilisation de systèmes de production hybrides dans les villes et villages sud algérien » ERA 2015 après le réajusté sur HOMER ce qu'est montré dans le tableau suivant :

	Baseline	scaled
Average (KWh/d)	85	50
Average(KW)	3.54	2.08
Peak(KW)	11.5	6.76
Load factor	0.308	0.308

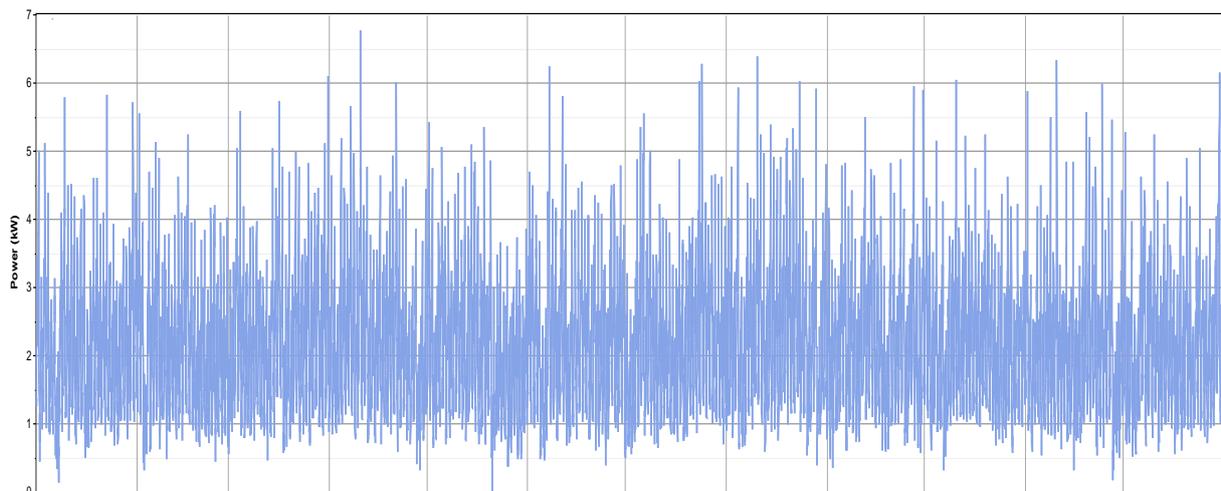
**Tableau 2.1.** Le profil de charge réel et le profil escalé et leurs caractéristiques.

La figure suivante montre le profil charge réel disponible sur HOMER :



**Figure 2.23.** Profil de charge réel sur HOMER.

Le profil de charge ajusté est affiché sur la figure 2.24 :



**Figure 2.24.** Profil de charge escalé ajusté suivant un village du sud Algérien.

## 2.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, les modèles mathématiques de système étudié étaient présentés. On commence par la chaîne photovoltaïque où on a modélisé le rayonnement solaire, la cellule et le générateur photovoltaïques et présenter leurs caractéristiques I-V et les différents effets de température et d'irradiation sur notre générateur PV et on a même donné les modèles du rendement et du facteur de forme.

Ensuite, on a étudié la chaîne éolienne commençant par le vent où on mentionne les deux lois d'extrapolation de la vitesse du vent à utilisées (loi logarithmique et loi de puissance 1/7), passant vers la turbine; où on donne un modèle qui peut calculer la puissance éolienne produite. On continue avec les modèles de la batterie, du hacheur réversible en courant et du bus continu. On finit par le modèle de l'onduleur.

Dans la deuxième partie de ce chapitre on a présenté les données météorologiques du notre site « Ilamane » on parle ici sur la température, l'irradiation et la vitesse du vent, et enfin le profil de charge à utiliser dans la simulation.

# **CHAPITRE 3 :**

## **OPTIMISATION DU**

### **SYSTEME HYBRIDE**

#### **EOLIEN-**

##### **PHOTOVOLTAIQUE**

### 3.1. Introduction :

Les chapitres précédents ont présenté une description théorique des différents constituants d'un système hybride éolien-PV. Dans ce chapitre, nous allons présenter le dimensionnement et la simulation d'un système hybride pour l'électrification rurale d'un site dans le sud Algérien. Nous allons utiliser le logiciel HOMER pour le dimensionnement et la simulation du fonctionnement du même système hybride. Les résultats vont être présentés et analysés. A l'aide de Homer, nous allons déterminer une évaluation technico-économique sur le système hybride pour le même site rural mais avec des différentes altitudes pour le mat de l'éolienne 10 et 40 mètres en utilisant des données mesurées et par extrapolation des vitesses du vent s'en basent sur 2 lois (loi de puissance et la loi logarithmique) et à la fin on va comparer et discuter les résultats obtenus dans chaque cas.

### 3.2. Présentation de HOMER :

HOMER est un logiciel développé pour des systèmes de production d'énergie de petites puissances. Il permet de faire des simulations de systèmes avec des énergies renouvelables et avec des énergies fossiles. Un de ses grands atouts est la possibilité de pouvoir simuler des systèmes hybrides combinant différentes sources d'énergie qu'elle soit renouvelable ou fossile. La première version a été développée en 1992 pour NREL (US National Renewable Energy Laboratory), il a ensuite subi de nombreuses améliorations dans plus de 40 nouvelles versions. La version utilisée pour le présent projet est HOMER 2.68 beta sortie en juillet 2009. Depuis, il y a eu 2 nouvelles versions disponibles pour 2.75 et 2.76 qui sont maintenant vendues pour un faible coût 99 \$ US pour les nouveaux utilisateurs et pour 49 \$ US pour les anciens utilisateurs. La 27 version 2.68 beta est toujours disponible gratuitement. Ce logiciel est largement utilisé dans plus de 190 pays et par plus de 40 000 utilisateurs.

### 3.3. Dimensionnement du système :

La configuration de l'installation à dimensionner est la suivante :

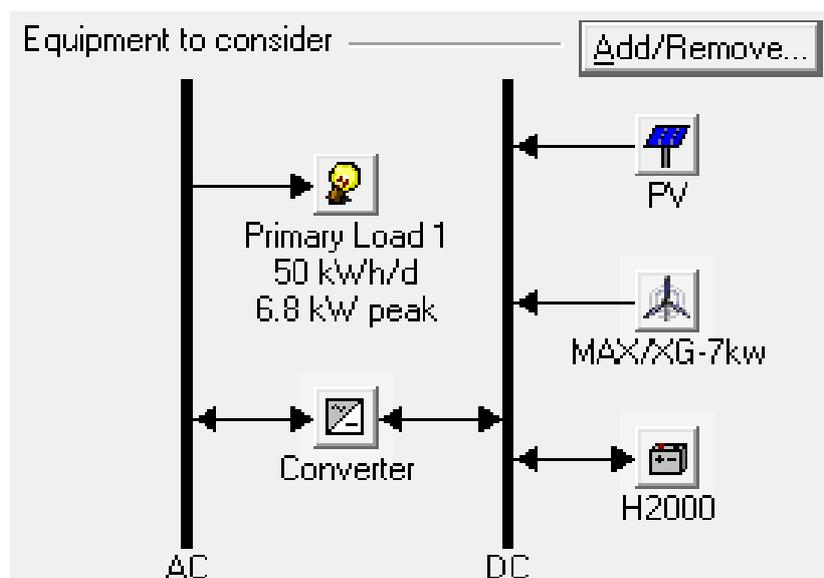


Figure 3.1 : Configuration de l'installation PV/éolien à dimensionner.

Les données d'ensoleillement peuvent être introduites de trois façons différentes :

Saisir à la main pour chaque mois, importer des données d'après un fichier texte, ou bien les chargées via l'internet, pour cette dernière possibilité il faut juste indiquer l'emplacement de l'endroit de l'installation en indiquant son Latitude et son Longitude.

Dans notre cas on a importé un fichier des données d'ensoleillement horaire réellement mesurées.

**Solar Resource Inputs**

File Edit Help

 HOMER uses the solar resource inputs to calculate the PV array power for each hour of the year. Enter the latitude, and either an average daily radiation value or an average clearness index for each month. HOMER uses the latitude value to calculate the average daily radiation from the clearness index and vice-versa.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

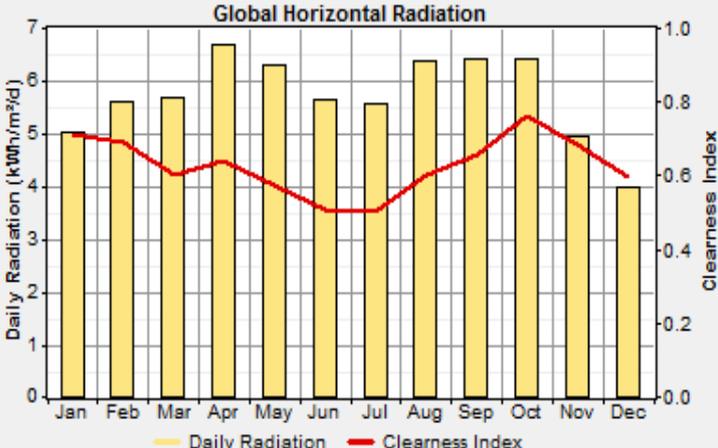
Location

Latitude  °  '  North  South Time zone  
 Longitude  °  '  East  West (GMT) Iceland, UK, Ireland, West Africa

Data source:  Enter monthly averages  Import time series data file

Baseline data

Month	Clearness Index	Daily Radiation (kWh/m <sup>2</sup> /d)
January	0.715	5.015
February	0.693	5.603
March	0.603	5.666
April	0.639	6.685
May	0.573	6.304
June	0.507	5.651
July	0.505	5.574
August	0.601	6.378
September	0.659	6.408
October	0.762	6.436
November	0.685	4.956
December	0.598	3.982
Average:	0.619	5.720



Scaled annual average (kWh/m<sup>2</sup>/d)

Figure 3.2 : L'ensoleillement du site d'installation.

On a introduit les données de la vitesse du vent mesurées à 10 et 40 mètres.

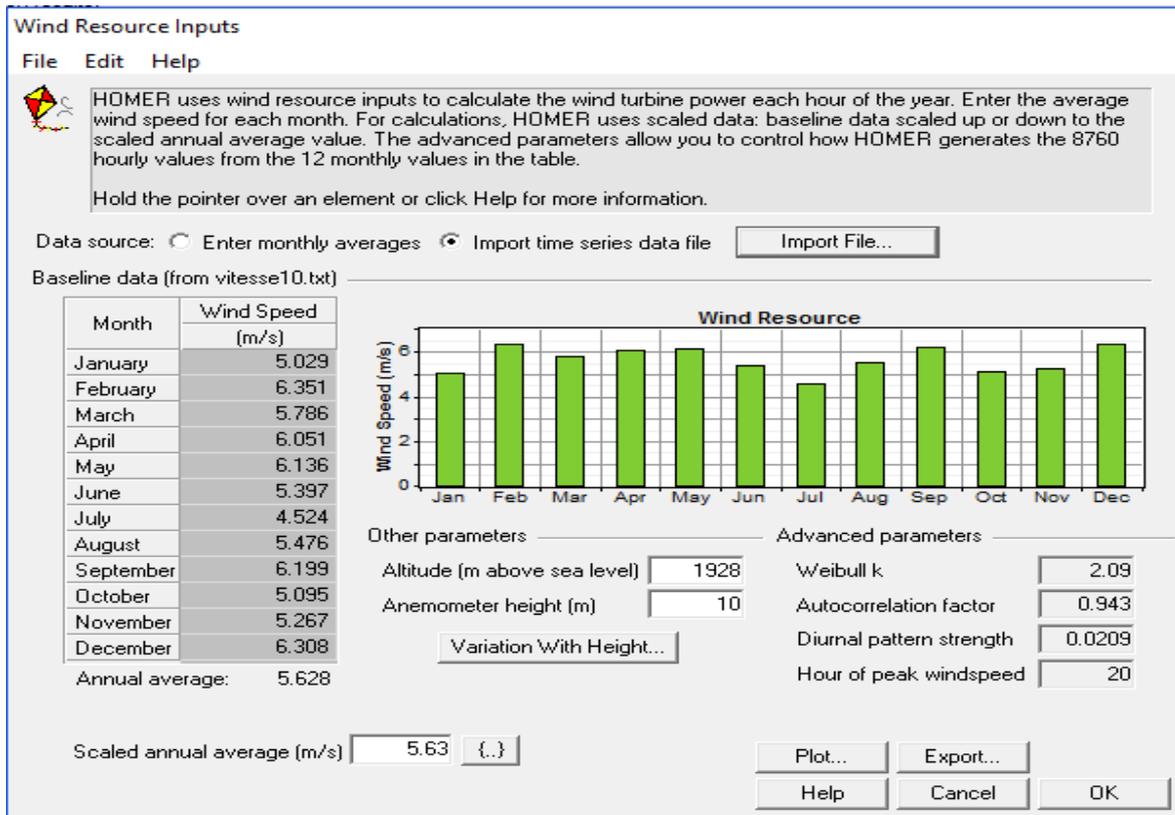


Figure 3.3 : Vitesse du vent du site mesurée à 10 mètres d'altitude.

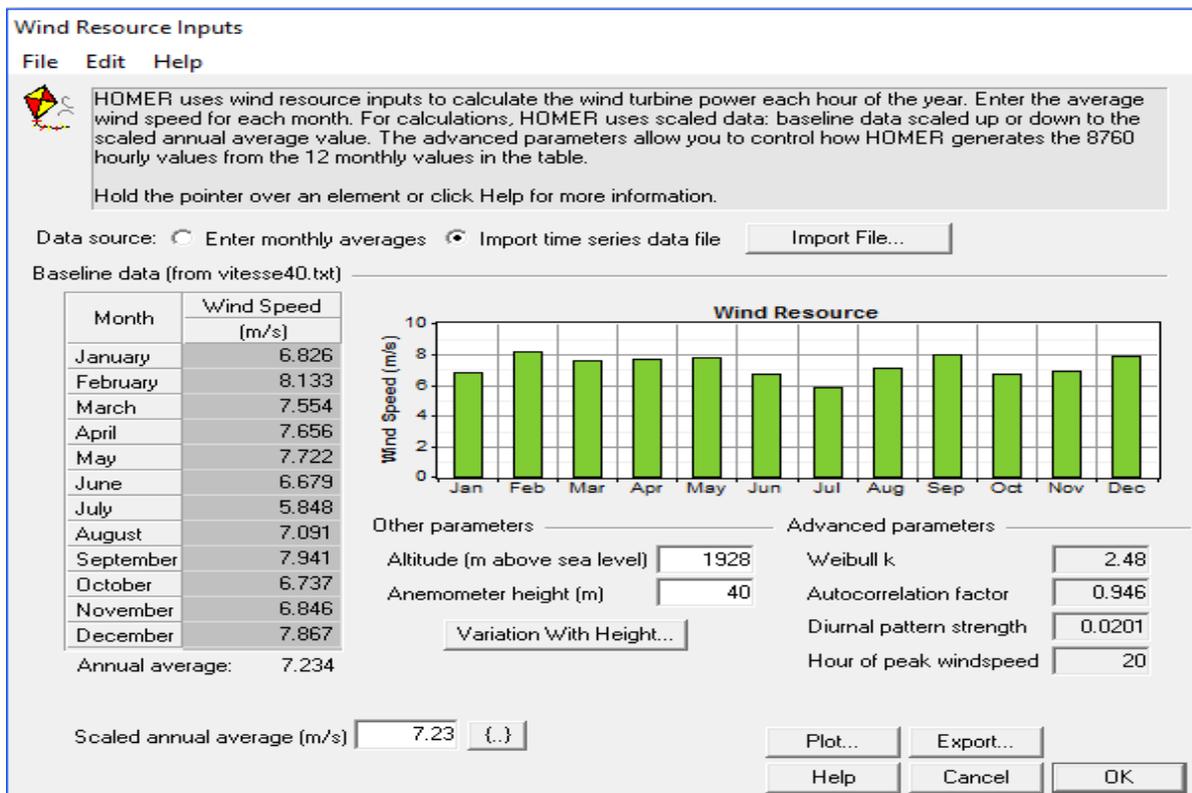


Figure 3.4 : Vitesse du vent du site mesurée à 40 mètres d'altitude.

Les caractéristiques de la turbine choisie : la courbe de puissance ( $P_n=7kW$ ) ainsi que son coût, la durée de vie et les nombres de turbine permis à introduire dans le calcul du dimensionnement « qu'on va fixer pour le système aura pas plus d'une seule générateur éolien pour éviter tomber dans la notion d'une ferme éolienne ce que va changer beaucoup de procédures » sont représentées à la figure suivante :

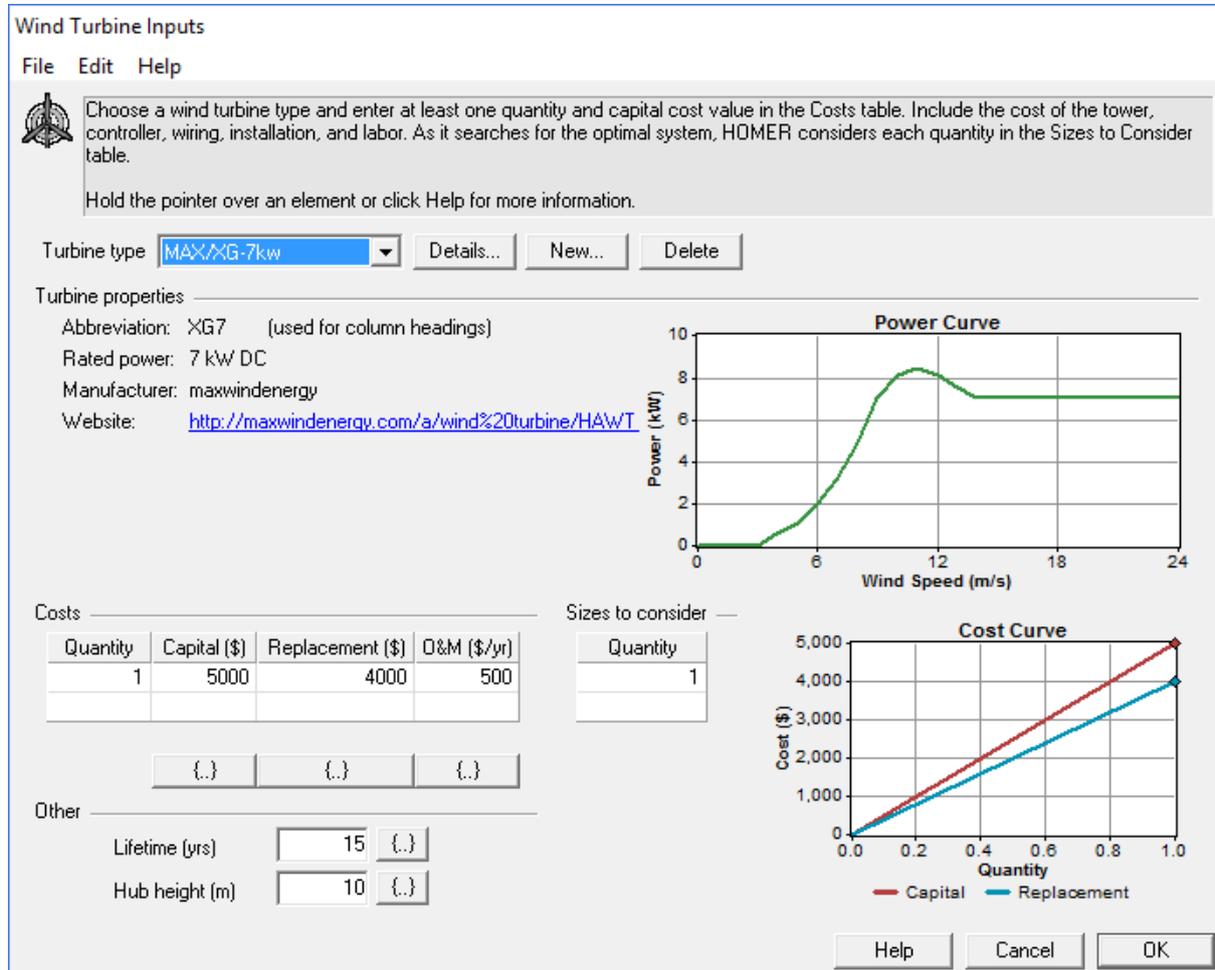


Figure 3.5 : Caractéristiques de l'éolienne choisie.

### 3.4. Simulation pour les données vitesse du vent mesurées à 10 mètres :

- Une fois que nous avons tout introduits, nous pouvons maintenant passer au dimensionnement en cliquant sur le bouton « Calculate », les résultats possibles trouvés d’après HOMER apparaissent :

Double click on a system below for simulation results.

	PV (kW)	XG7	H2000	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	Batt. Lf. (yr)
☑	9	1	24	6	\$ 46,466	3,536	\$ 91,670	0.395	1.00	0.01	20.0
☑	9	1	24	7	\$ 47,177	3,626	\$ 93,530	0.403	1.00	0.01	20.0
☑	9	1	24	8	\$ 47,888	3,716	\$ 95,390	0.411	1.00	0.01	20.0
☑	9	1	24	9	\$ 48,599	3,806	\$ 97,251	0.419	1.00	0.01	20.0
☑	8	1	36	5	\$ 53,355	3,453	\$ 97,498	0.420	1.00	0.01	20.0
☑	8	1	36	6	\$ 54,066	3,543	\$ 99,358	0.427	1.00	0.00	20.0
☑	8	1	36	7	\$ 54,777	3,633	\$ 101,218	0.435	1.00	0.00	20.0
☑	9	1	36	5	\$ 55,355	3,669	\$ 102,260	0.440	1.00	0.00	20.0
☑	8	1	36	8	\$ 55,488	3,723	\$ 103,078	0.443	1.00	0.00	20.0
☑	9	1	36	6	\$ 56,066	3,759	\$ 104,120	0.447	1.00	0.00	20.0
☑	8	1	36	9	\$ 56,199	3,813	\$ 104,938	0.451	1.00	0.00	20.0
☑	9	1	36	7	\$ 56,777	3,849	\$ 105,980	0.455	1.00	0.00	20.0
☑	7	1	48	6	\$ 61,666	3,550	\$ 107,045	0.461	1.00	0.00	20.0
☑	9	1	36	8	\$ 57,488	3,939	\$ 107,840	0.463	1.00	0.00	20.0
☑	7	1	48	7	\$ 62,377	3,640	\$ 108,905	0.469	1.00	0.00	20.0
☑	9	1	36	9	\$ 58,199	4,029	\$ 109,700	0.471	1.00	0.00	20.0
☑	8	1	48	5	\$ 62,955	3,676	\$ 109,947	0.473	1.00	0.00	20.0
☑	7	1	48	8	\$ 63,088	3,730	\$ 110,765	0.477	1.00	0.00	20.0
☑	8	1	48	6	\$ 63,666	3,766	\$ 111,808	0.480	1.00	0.00	20.0
☑	7	1	48	9	\$ 63,799	3,820	\$ 112,625	0.485	1.00	0.00	20.0
☑	8	1	48	7	\$ 64,377	3,856	\$ 113,668	0.488	1.00	0.00	20.0
☑	9	1	48	5	\$ 64,955	3,892	\$ 114,710	0.493	1.00	0.00	20.0
☑	8	1	48	8	\$ 65,088	3,946	\$ 115,528	0.495	1.00	0.00	20.0
☑	9	1	48	6	\$ 65,666	3,982	\$ 116,570	0.500	1.00	0.00	20.0
☑	8	1	48	9	\$ 65,799	4,036	\$ 117,388	0.503	1.00	0.00	20.0
☑	7	1	60	5	\$ 70,555	3,683	\$ 117,635	0.505	1.00	0.00	20.0
☑	9	1	48	7	\$ 66,377	4,072	\$ 118,430	0.508	1.00	0.00	20.0
☑	7	1	60	6	\$ 71,266	3,773	\$ 119,495	0.513	1.00	0.00	20.0
☑	9	1	48	8	\$ 67,088	4,162	\$ 120,290	0.516	1.00	0.00	20.0
☑	7	1	60	7	\$ 71,977	3,863	\$ 121,355	0.520	1.00	0.00	20.0
☑	9	1	48	9	\$ 67,799	4,252	\$ 122,150	0.524	1.00	0.00	20.0
☑	8	1	60	5	\$ 72,555	3,899	\$ 122,397	0.526	1.00	0.00	20.0
☑	7	1	60	8	\$ 72,688	3,953	\$ 123,215	0.528	1.00	0.00	20.0
☑	8	1	60	6	\$ 73,266	3,989	\$ 124,257	0.533	1.00	0.00	20.0
☑	7	1	60	9	\$ 73,399	4,042	\$ 125,075	0.536	1.00	0.00	20.0

Figure 3.6 : Résultats de dimensionnement donnés par HOMER (10m).

- Le résultat optimal de conception affiché sur la figure 3.7 est détaillé comme le suit:

Générateur PV de 9kW,

1 Générateur éolien de 7kW (imposé par le simulant),

24 Batteries,

Convertisseur de 6kW.

Simulations: 0 of 210 Progress:   
Sensitivities: 1 of 1 Status: Completed in 8 seconds.

Double click on a system below for simulation results.

	PV (kW)	XG7	H2000	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	Batt. Lf. (yr)
☑	9	1	24	6	\$ 46,466	3,536	\$ 91,670	0.395	1.00	0.01	20.0

Figure 3.7 : Résultat optimal pour l’installation (10m).

- Voici le tableau des résultats techno-économiques de l'installation, le système était estimé à 91 670\$ et un prix de kWh de 0.395\$/kWh :

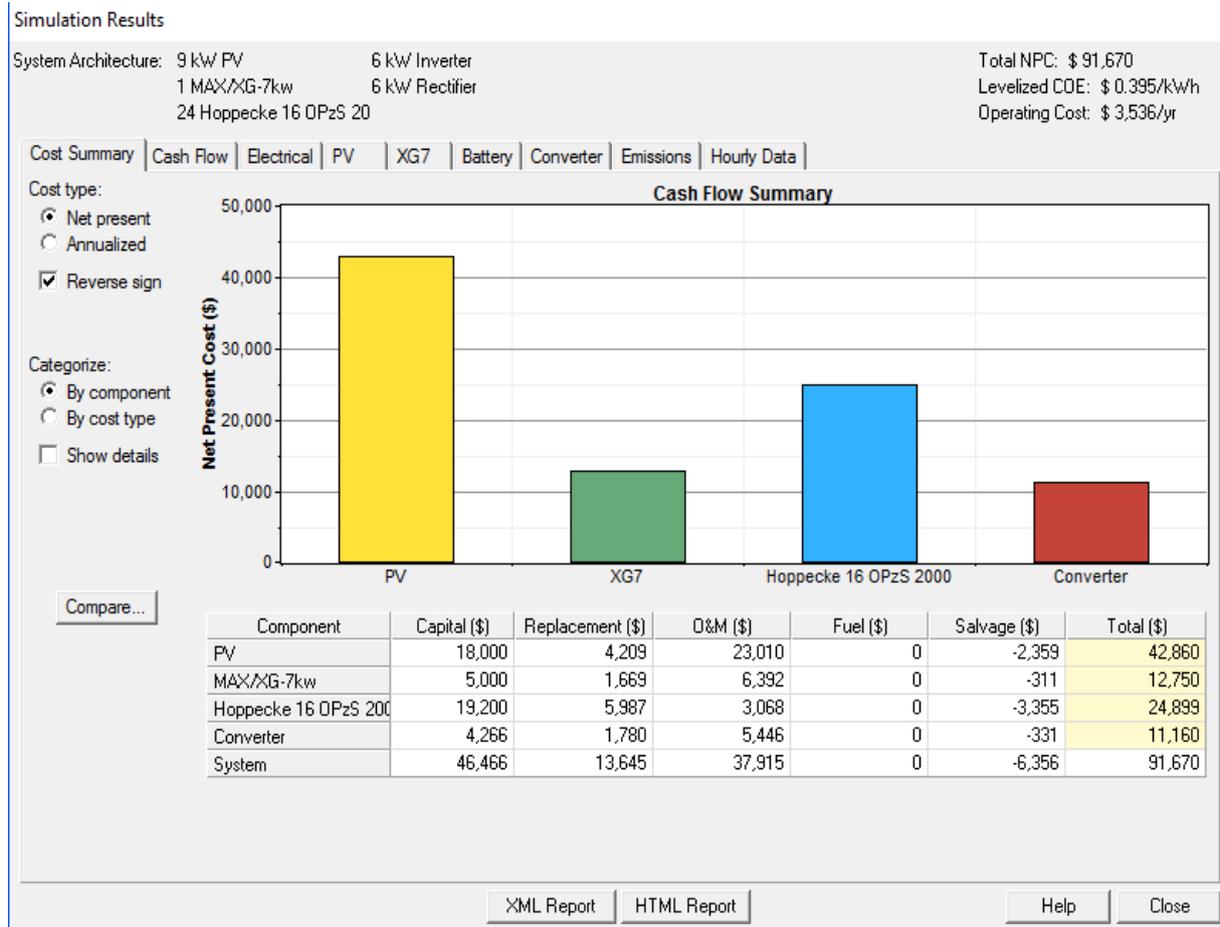


Figure 3.8 : Résultats du coût (10m).

On constate que plus de 46% du capital prise par le PV et 27% par les batteries de stockage, le reste est pour le générateur éolien et le convertisseur.

- La figure suivante représente les résultats électriques du système qu'on peut les détaillés comme suit :

Notre système produit 35980 kWh/an tel que : 58% de cette énergie produite par le générateur éolien et 42% produite par le générateur PV, avec 46.8% d'excès d'électricité et 0.5% comme un taux de délestage annuel.

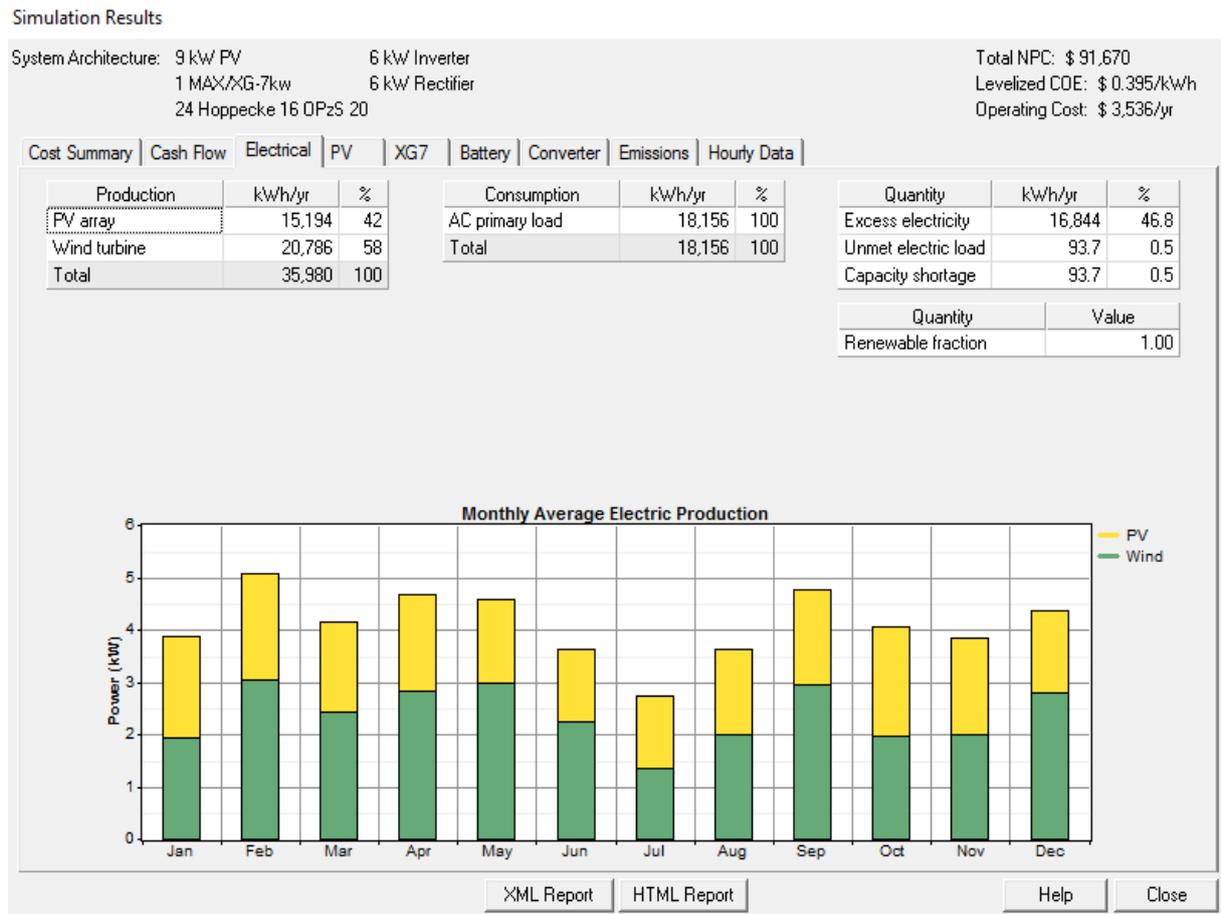


Figure 3.9 : Résultats électriques (10m).

- Le graphe suivant montre les périodes de délestage en rouge par rapport à la charge consommatrice en bleu ; le déficit est très grand la fin du mois de juin et juillet :

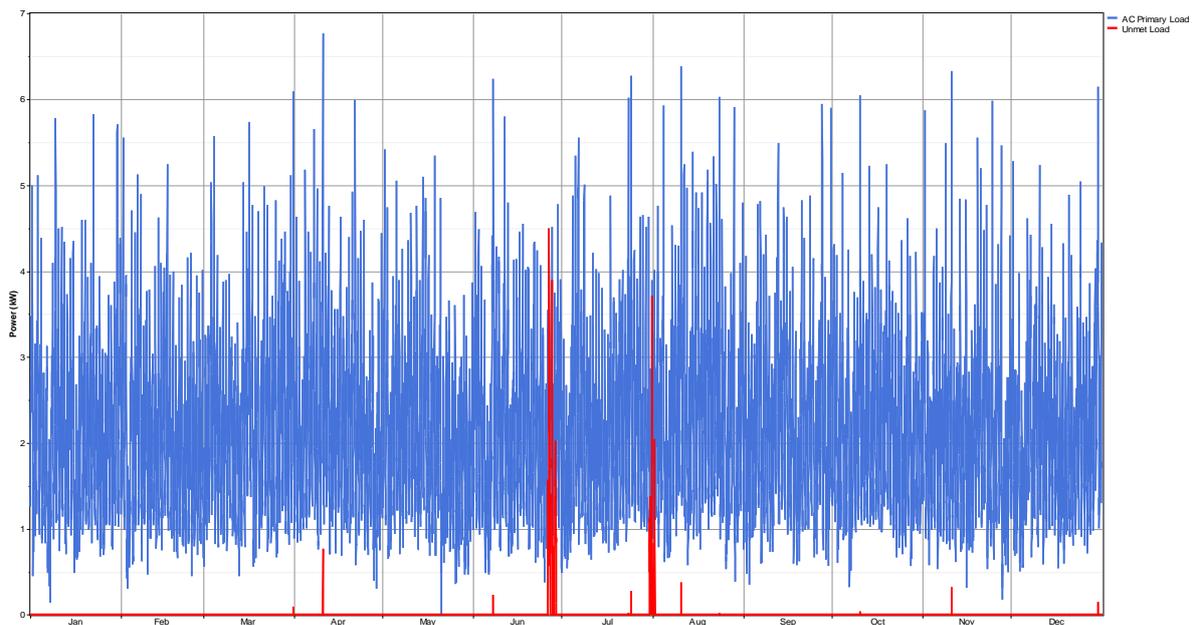


Figure 3.10 : Périodes de délestage (10m).

### 3.5. Simulation pour des données de vitesse du vent à 40 mètres :

#### 3.5.1. Données mesurées :

- Les résultats possibles donnés par HOMER :

Double click on a system below for simulation results.

	PV (kW)	XG7	H2000	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	Batt. Lf. (yr)
☑	5	1	24	6	\$ 38,466	2,672	\$ 72,621	0.313	1.00	0.01	20.0
☑	5	1	24	7	\$ 39,177	2,762	\$ 74,481	0.321	1.00	0.01	20.0
☑	6	1	24	5	\$ 39,755	2,798	\$ 75,523	0.325	1.00	0.00	20.0
☑	5	1	24	8	\$ 39,888	2,852	\$ 76,341	0.329	1.00	0.01	20.0
☑	6	1	24	6	\$ 40,466	2,888	\$ 77,384	0.332	1.00	0.00	20.0
☑	5	1	24	9	\$ 40,599	2,942	\$ 78,201	0.337	1.00	0.01	20.0
☑	6	1	24	7	\$ 41,177	2,978	\$ 79,244	0.340	1.00	0.00	20.0
☑	7	1	24	5	\$ 41,755	3,014	\$ 80,286	0.345	1.00	0.00	20.0
☑	6	1	24	8	\$ 41,888	3,068	\$ 81,104	0.348	1.00	0.00	20.0
☑	7	1	24	6	\$ 42,466	3,104	\$ 82,146	0.352	1.00	0.00	20.0
☑	6	1	24	9	\$ 42,599	3,158	\$ 82,964	0.356	1.00	0.00	20.0
☑	7	1	24	7	\$ 43,177	3,194	\$ 84,006	0.360	1.00	0.00	20.0
☑	8	1	24	5	\$ 43,755	3,230	\$ 85,048	0.365	1.00	0.00	20.0
☑	7	1	24	8	\$ 43,888	3,284	\$ 85,866	0.368	1.00	0.00	20.0
☑	3	1	48	5	\$ 52,955	2,596	\$ 86,136	0.371	1.00	0.00	20.0
☑	8	1	24	6	\$ 44,466	3,320	\$ 86,908	0.373	1.00	0.00	20.0
☑	7	1	24	9	\$ 44,599	3,374	\$ 87,726	0.376	1.00	0.00	20.0
☑	3	1	48	6	\$ 53,666	2,686	\$ 87,996	0.378	1.00	0.00	20.0
☑	8	1	24	7	\$ 45,177	3,410	\$ 88,768	0.380	1.00	0.00	20.0
☑	9	1	24	5	\$ 45,755	3,446	\$ 89,810	0.386	1.00	0.00	20.0
☑	3	1	48	7	\$ 54,377	2,775	\$ 89,856	0.386	1.00	0.00	20.0
☑	8	1	24	8	\$ 45,888	3,500	\$ 90,628	0.388	1.00	0.00	20.0
☑	4	1	48	5	\$ 54,955	2,812	\$ 90,898	0.391	1.00	0.00	20.0
☑	9	1	24	6	\$ 46,466	3,536	\$ 91,670	0.393	1.00	0.00	20.0
☑	3	1	48	8	\$ 55,088	2,865	\$ 91,716	0.394	1.00	0.00	20.0
☑	8	1	24	9	\$ 46,599	3,590	\$ 92,488	0.396	1.00	0.00	20.0
☑	4	1	48	6	\$ 55,666	2,902	\$ 92,758	0.398	1.00	0.00	20.0
☑	9	1	24	7	\$ 47,177	3,626	\$ 93,530	0.401	1.00	0.00	20.0
☑	3	1	48	9	\$ 55,799	2,955	\$ 93,576	0.402	1.00	0.00	20.0
☑	4	1	48	7	\$ 56,377	2,992	\$ 94,619	0.406	1.00	0.00	20.0
☑	9	1	24	8	\$ 47,888	3,716	\$ 95,390	0.409	1.00	0.00	20.0
☑	5	1	48	5	\$ 56,955	3,028	\$ 95,661	0.411	1.00	0.00	20.0
☑	4	1	48	8	\$ 57,088	3,081	\$ 96,479	0.414	1.00	0.00	20.0
☑	9	1	24	9	\$ 48,599	3,806	\$ 97,251	0.417	1.00	0.00	20.0
☑	5	1	48	6	\$ 57,666	3,118	\$ 97,521	0.418	1.00	0.00	20.0

Figure 3.11 : Résultats de dimensionnement donnés par HOMER (40m).

- Le résultat optimal du système est donné sur la figure 3.12 et voici ces détails :

Générateur PV de 5kW,

1 Générateur éolien de 7kW (imposé),

24 Batteries,

Convertisseur de 6kW.

Calculate Simulations: 210 of 210 Progress:  Status: Completed in 6 seconds.  
Sensitivities: 1 of 1

Sensitivity Results Optimization Results

Double click on a system below for simulation results.

	PV (kW)	XG7	H2000	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	Batt. Lf. (yr)
☑	5	1	24	6	\$ 38,466	2,672	\$ 72,621	0.313	1.00	0.01	20.0

Figure 3.12 : Résultat optimal pour l'installation (40m).

- Le tableau des résultats apparait et la figure 3.13 représente la fenêtre économique des coûts des composants du système.

Notre système coûte 72 621\$ et le coût d'énergie est à 0.313\$/kWh:

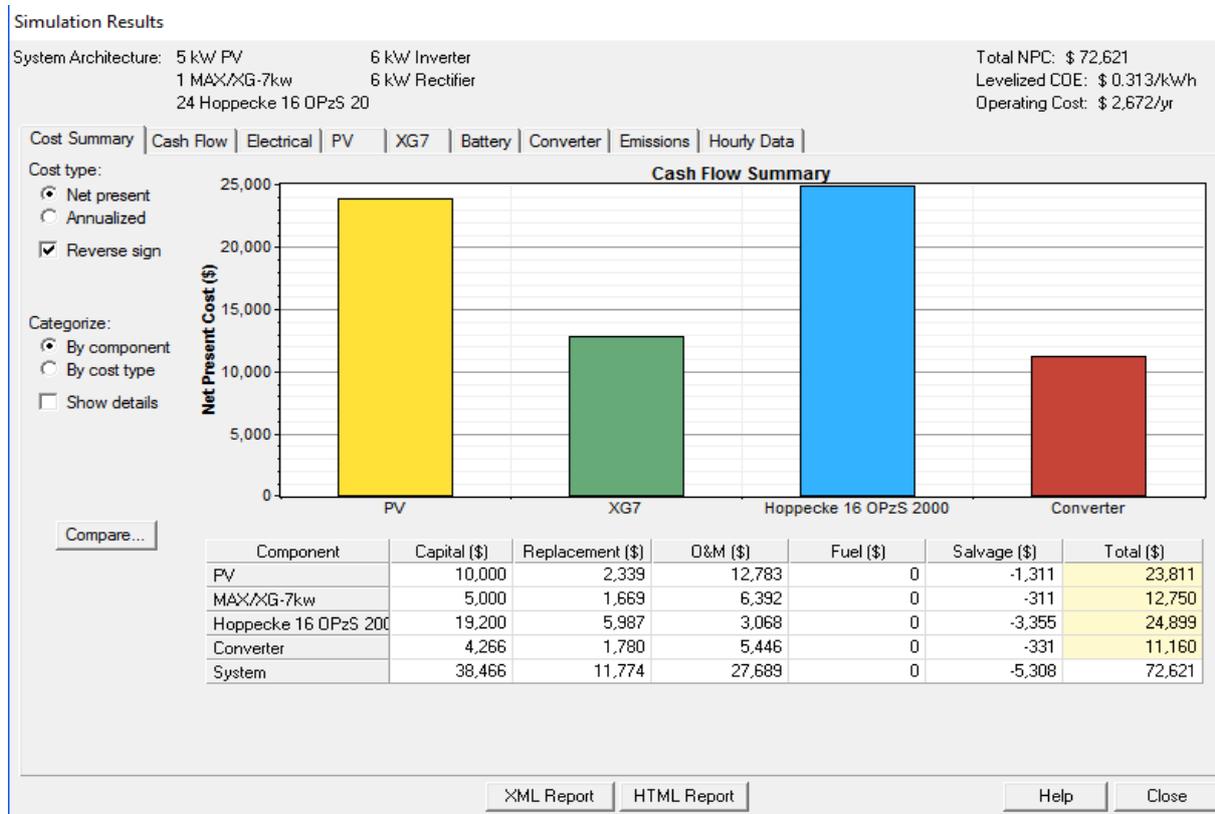


Figure 3.13 : Résultats du coût (40m).

Dans cette simulation plus de 34% du capital est prise par le système de stockage et presque 33% par le générateur photovoltaïque, le reste du capital que vaut 33% est divisé entre le générateur éolien et le convertisseur.

- La figure suivante représente les résultats électriques du système qu'on peut les détaillés comme suit :

Notre système produit plus d'énergie 42133 kWh/an tel que : 80% de cette énergie produite par le générateur éolien et 20% produite par le générateur PV, avec un excès important d'électricité 55.2% et le même taux annuel de délestage 0.5%.

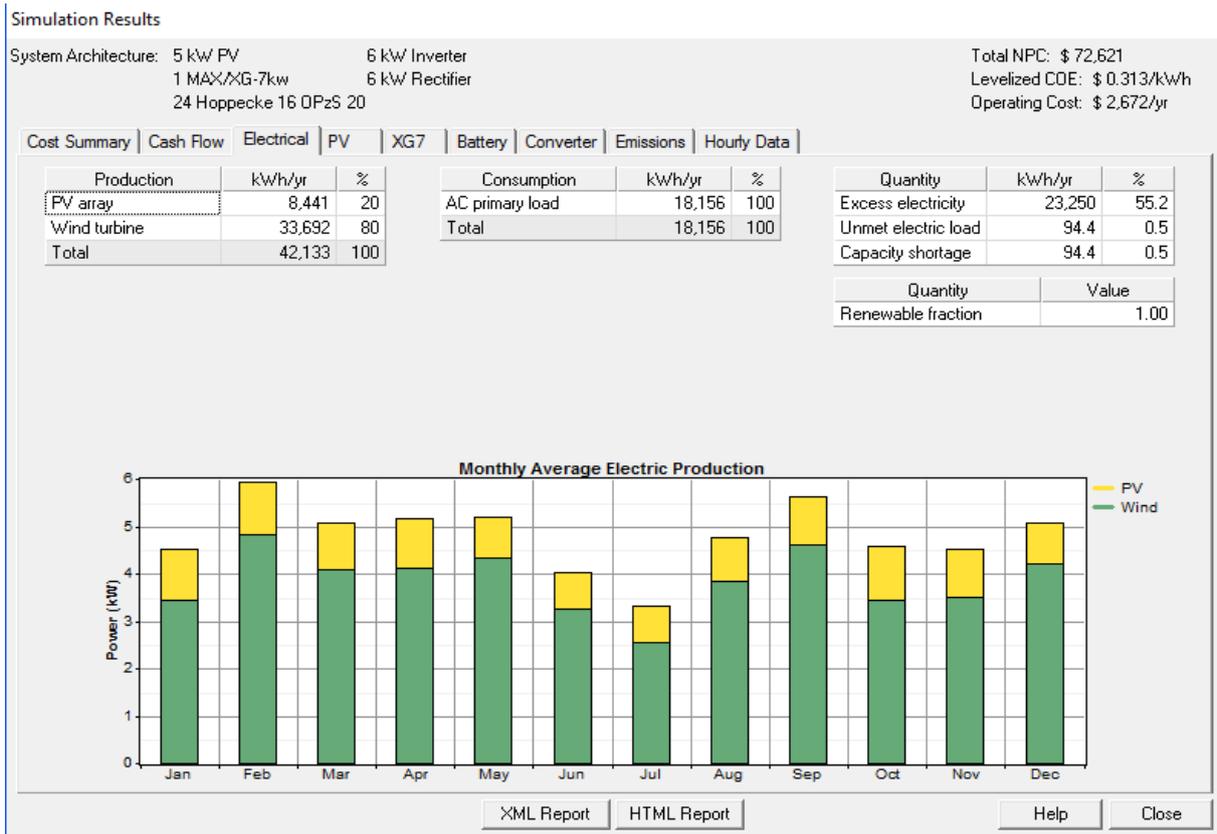


Figure 3.14 : Résultats électriques (40m).

- Le graphe suivant montre les périodes de délestage durant l'année :

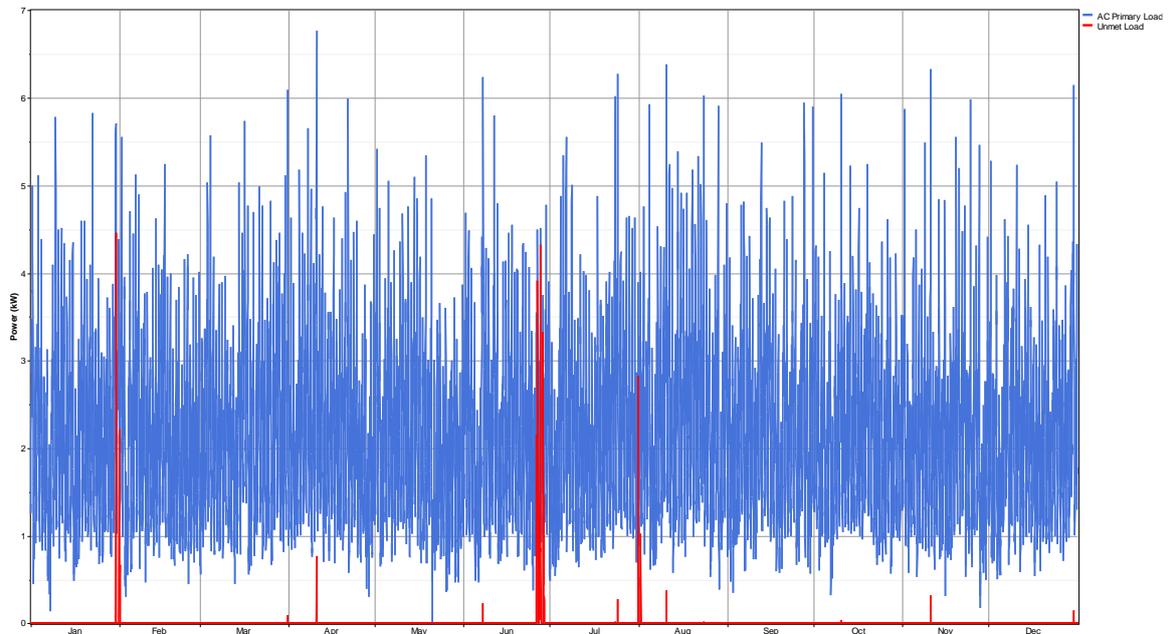


Figure 3.15 : Périodes de délestage (40m).

Le déficit d'énergie est marqué la fin de janvier, la fin du mois de juin et la première journée d'août.

### 3.5.2. Données extrapolées par la loi de puissance 1/7:

- HOMER fait l'extrapolation de la vitesse du vent par la loi de puissance pour 40 mètres d'altitude et nous donne les résultats possibles pour le système :

Double click on a system below for simulation results.

	PV (kW)	XG7	H2000	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	Batt. Li (yr)
	3	1	24	5	\$ 33,755	2,150	\$ 61,237	0.263	1.00	0.00	20.0
	3	1	24	6	\$ 34,466	2,240	\$ 63,097	0.271	1.00	0.00	20.0
	3	1	24	7	\$ 35,177	2,330	\$ 64,957	0.279	1.00	0.00	20.0
	4	1	24	5	\$ 35,755	2,366	\$ 65,999	0.283	1.00	0.00	20.0
	3	1	24	8	\$ 35,888	2,419	\$ 66,817	0.287	1.00	0.00	20.0
	4	1	24	6	\$ 36,466	2,456	\$ 67,859	0.291	1.00	0.00	20.0
	3	1	24	9	\$ 36,599	2,509	\$ 68,677	0.295	1.00	0.00	20.0
	4	1	24	7	\$ 37,177	2,546	\$ 69,719	0.299	1.00	0.00	20.0
	5	1	24	5	\$ 37,755	2,582	\$ 70,761	0.304	1.00	0.00	20.0
	4	1	24	8	\$ 37,888	2,636	\$ 71,579	0.307	1.00	0.00	20.0
	5	1	24	6	\$ 38,466	2,672	\$ 72,621	0.311	1.00	0.00	20.0
	4	1	24	9	\$ 38,599	2,725	\$ 73,439	0.315	1.00	0.00	20.0
	5	1	24	7	\$ 39,177	2,762	\$ 74,481	0.319	1.00	0.00	20.0
	6	1	24	5	\$ 39,755	2,798	\$ 75,523	0.324	1.00	0.00	20.0
	5	1	24	8	\$ 39,888	2,852	\$ 76,341	0.327	1.00	0.00	20.0
	6	1	24	6	\$ 40,466	2,888	\$ 77,384	0.332	1.00	0.00	20.0
	5	1	24	9	\$ 40,599	2,942	\$ 78,201	0.335	1.00	0.00	20.0
	6	1	24	7	\$ 41,177	2,978	\$ 79,244	0.340	1.00	0.00	20.0
	7	1	24	5	\$ 41,755	3,014	\$ 80,286	0.345	1.00	0.00	20.0
	6	1	24	8	\$ 41,888	3,068	\$ 81,104	0.348	1.00	0.00	20.0
	7	1	24	6	\$ 42,466	3,104	\$ 82,146	0.352	1.00	0.00	20.0
	6	1	24	9	\$ 42,599	3,158	\$ 82,964	0.356	1.00	0.00	20.0
	7	1	24	7	\$ 43,177	3,194	\$ 84,006	0.360	1.00	0.00	20.0
	8	1	24	5	\$ 43,755	3,230	\$ 85,048	0.365	1.00	0.00	20.0
	7	1	24	8	\$ 43,888	3,284	\$ 85,866	0.368	1.00	0.00	20.0
	3	1	48	5	\$ 52,955	2,596	\$ 86,136	0.370	1.00	0.00	20.0
	8	1	24	6	\$ 44,466	3,320	\$ 86,908	0.373	1.00	0.00	20.0
	7	1	24	9	\$ 44,599	3,374	\$ 87,726	0.376	1.00	0.00	20.0
	3	1	48	6	\$ 53,666	2,686	\$ 87,996	0.377	1.00	0.00	20.0
	8	1	24	7	\$ 45,177	3,410	\$ 88,768	0.380	1.00	0.00	20.0

Figure 3.16 : Résultats de dimensionnement donnés par HOMER (loi de puissance).

- Le résultat optimal de conception donné par HOMER est détaillé comme le suit:

Générateur PV de 3kW,

1 Générateur éolien de 7kW (imposé),

24 Batteries,

Convertisseur de 5kW.

Calculate Simulations: 210 of 210 Progress: Status: Completed in 13 seconds.  
Sensitivity Results Optimization Results  
Sensitivity variables  
XG7 Hub Height (m) 40

Double click on a system below for simulation results.

	PV (kW)	XG7	H2000	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	Batt. Li (yr)
	3	1	24	5	\$ 33,755	2,150	\$ 61,237	0.263	1.00	0.00	20.0

Figure 3.17 : Résultat optimal pour l'installation (loi de puissance).

- Les résultats économiques de la simulation montrent une baisse du coût de système estimé à 61 237\$ et une chute de coût d'énergie montrés au-dessous :

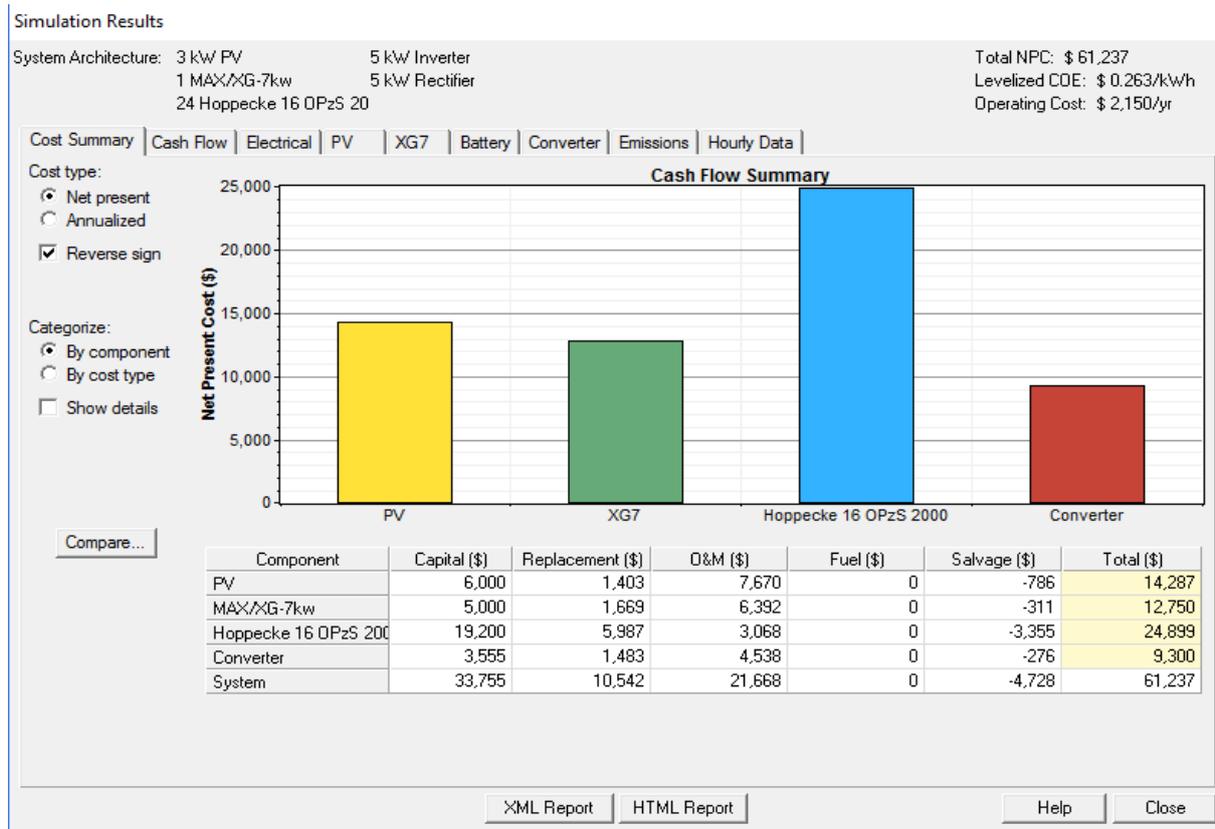


Figure 3.18 : Résultats du coût (loi de puissance).

Dans cette simulation le système de stockage consomme la majorité du capital plus 40% et 23% par le générateur photovoltaïque, presque 21% par le générateur éolien le reste du capital par le convertisseur.

- La figure 3.19 représente les résultats électriques du notre système qui produit plus d'énergie : 48904 kWh/an.

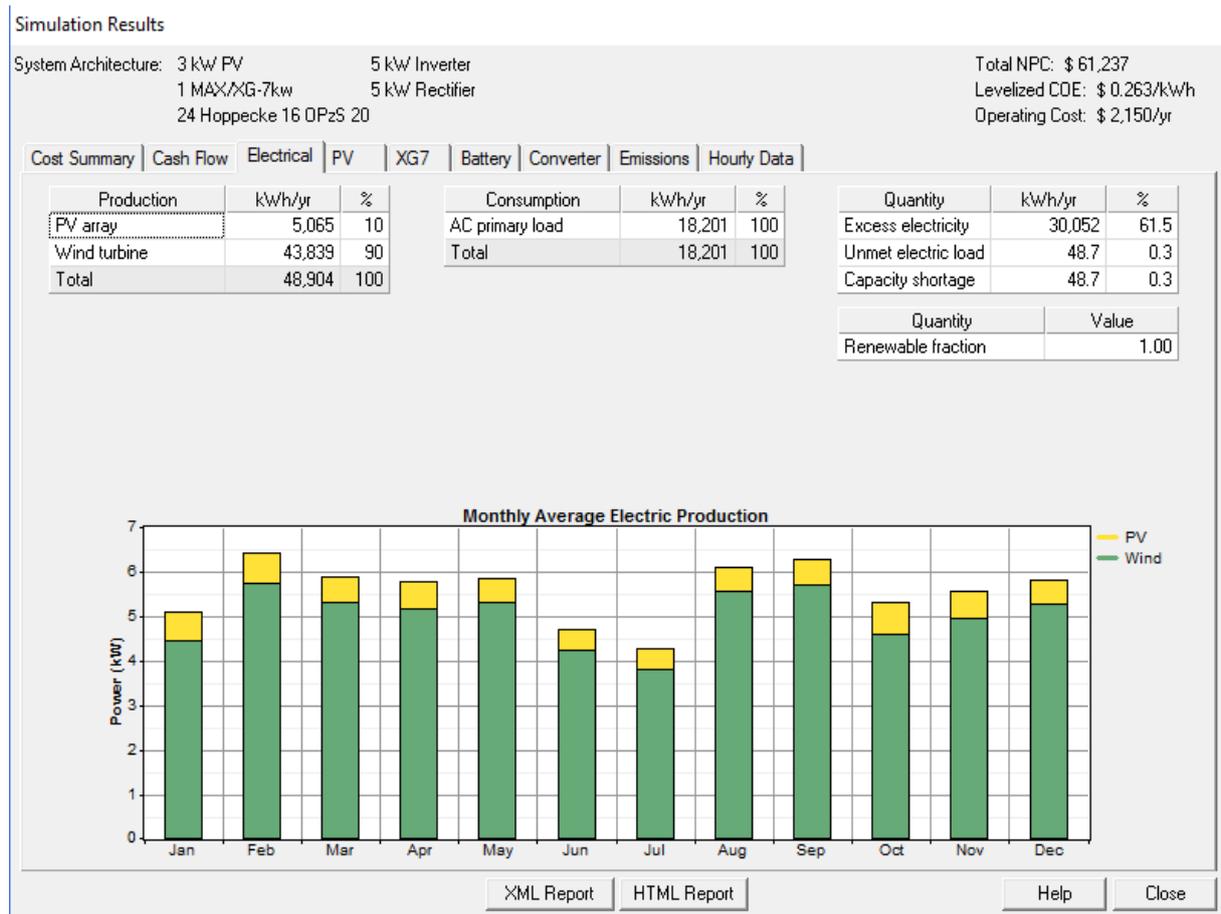


Figure 3.19 : Résultats électriques (loi de puissance).

- Dans ce cas l'énergie à base éolienne domine la production avec 90% de la production générale et avec un excès plus important de 61.5% et un taux de délestage de 0.3% ,ce dernier est plus court mais régulièrement répétable ce que est montré sur le graphe suivant :

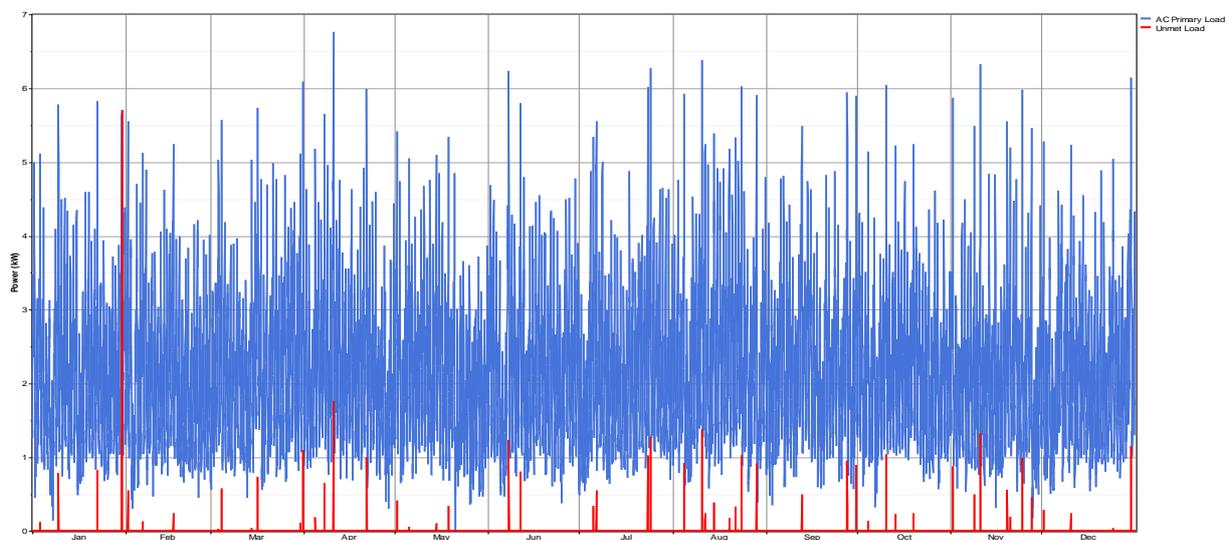


Figure 3.20 : Périodes de délestage (loi de puissance).

### 3.5.3. Données extrapolées par la loi logarithmique :

- Après faire l'extrapolation de la vitesse du vent par la loi de puissance pour 40 mètres d'altitude HOMER nous donne les résultats possibles pour le système :

Double click on a system below for simulation results.

	PV (kW)	XG7	H2000	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	Batt. Lif. (yr)
3	1	24	5	\$ 33,755	2,150	\$ 61,237	0.263	1.00	0.00	20.0	
3	1	24	6	\$ 34,466	2,240	\$ 63,097	0.271	1.00	0.00	20.0	
3	1	24	7	\$ 35,177	2,330	\$ 64,957	0.279	1.00	0.00	20.0	
4	1	24	5	\$ 35,755	2,366	\$ 65,999	0.283	1.00	0.00	20.0	
3	1	24	8	\$ 35,888	2,419	\$ 66,817	0.287	1.00	0.00	20.0	
4	1	24	6	\$ 36,466	2,456	\$ 67,859	0.291	1.00	0.00	20.0	
3	1	24	9	\$ 36,599	2,509	\$ 68,677	0.295	1.00	0.00	20.0	
4	1	24	7	\$ 37,177	2,546	\$ 69,719	0.299	1.00	0.00	20.0	
5	1	24	5	\$ 37,755	2,582	\$ 70,761	0.304	1.00	0.00	20.0	
4	1	24	8	\$ 37,888	2,636	\$ 71,579	0.307	1.00	0.00	20.0	
5	1	24	6	\$ 38,466	2,672	\$ 72,621	0.311	1.00	0.00	20.0	
4	1	24	9	\$ 38,599	2,725	\$ 73,439	0.315	1.00	0.00	20.0	
5	1	24	7	\$ 39,177	2,762	\$ 74,481	0.319	1.00	0.00	20.0	
6	1	24	5	\$ 39,755	2,798	\$ 75,523	0.324	1.00	0.00	20.0	
5	1	24	8	\$ 39,888	2,852	\$ 76,341	0.327	1.00	0.00	20.0	
6	1	24	6	\$ 40,466	2,888	\$ 77,384	0.332	1.00	0.00	20.0	
5	1	24	9	\$ 40,599	2,942	\$ 78,201	0.335	1.00	0.00	20.0	
6	1	24	7	\$ 41,177	2,978	\$ 79,244	0.340	1.00	0.00	20.0	
7	1	24	5	\$ 41,755	3,014	\$ 80,286	0.345	1.00	0.00	20.0	
6	1	24	8	\$ 41,888	3,068	\$ 81,104	0.348	1.00	0.00	20.0	
7	1	24	6	\$ 42,466	3,104	\$ 82,146	0.352	1.00	0.00	20.0	
6	1	24	9	\$ 42,599	3,158	\$ 82,964	0.356	1.00	0.00	20.0	
7	1	24	7	\$ 43,177	3,194	\$ 84,006	0.360	1.00	0.00	20.0	
8	1	24	5	\$ 43,755	3,230	\$ 85,048	0.365	1.00	0.00	20.0	
7	1	24	8	\$ 43,888	3,284	\$ 85,866	0.368	1.00	0.00	20.0	
3	1	48	5	\$ 52,955	2,596	\$ 86,136	0.370	1.00	0.00	20.0	
8	1	24	6	\$ 44,466	3,320	\$ 86,908	0.373	1.00	0.00	20.0	
7	1	24	9	\$ 44,599	3,374	\$ 87,726	0.376	1.00	0.00	20.0	
3	1	48	6	\$ 53,666	2,686	\$ 87,996	0.377	1.00	0.00	20.0	
8	1	24	7	\$ 45,177	3,410	\$ 88,768	0.380	1.00	0.00	20.0	

Figure 3.21 : Résultats de dimensionnement donnés par HOMER (loi logarithmique).

- Le résultat optimal de conception donné par HOMER est le même que la dernière simulation et notre résultat est détaillé comme le suit:

Générateur PV de 3kW,

1 Générateur éolien de 7kW (imposé),

24 Batteries,

Convertisseur de 5kW.

Calculate Simulations: 210 of 210 Progress: Sensitivity Results Optimization Results  
Sensitivities: 2 of 2 Status: Completed in 12 seconds.

Sensitivity variables  
XG7 Hub Height (m) 40

Double click on a system below for simulation results.

	PV (kW)	XG7	H2000	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	Batt. Lif. (yr)
3	1	24	5	\$ 33,755	2,150	\$ 61,237	0.263	1.00	0.00	20.0	

Figure 3.22 : Résultat optimal pour l'installation (loi logarithmique).

- Les résultats économiques de la simulation montre que le cout de système estimé à 61 237\$ et un coût d'énergie a 2.63\$/kWh les même que le dernier cas ce que est montrés au-dessous :

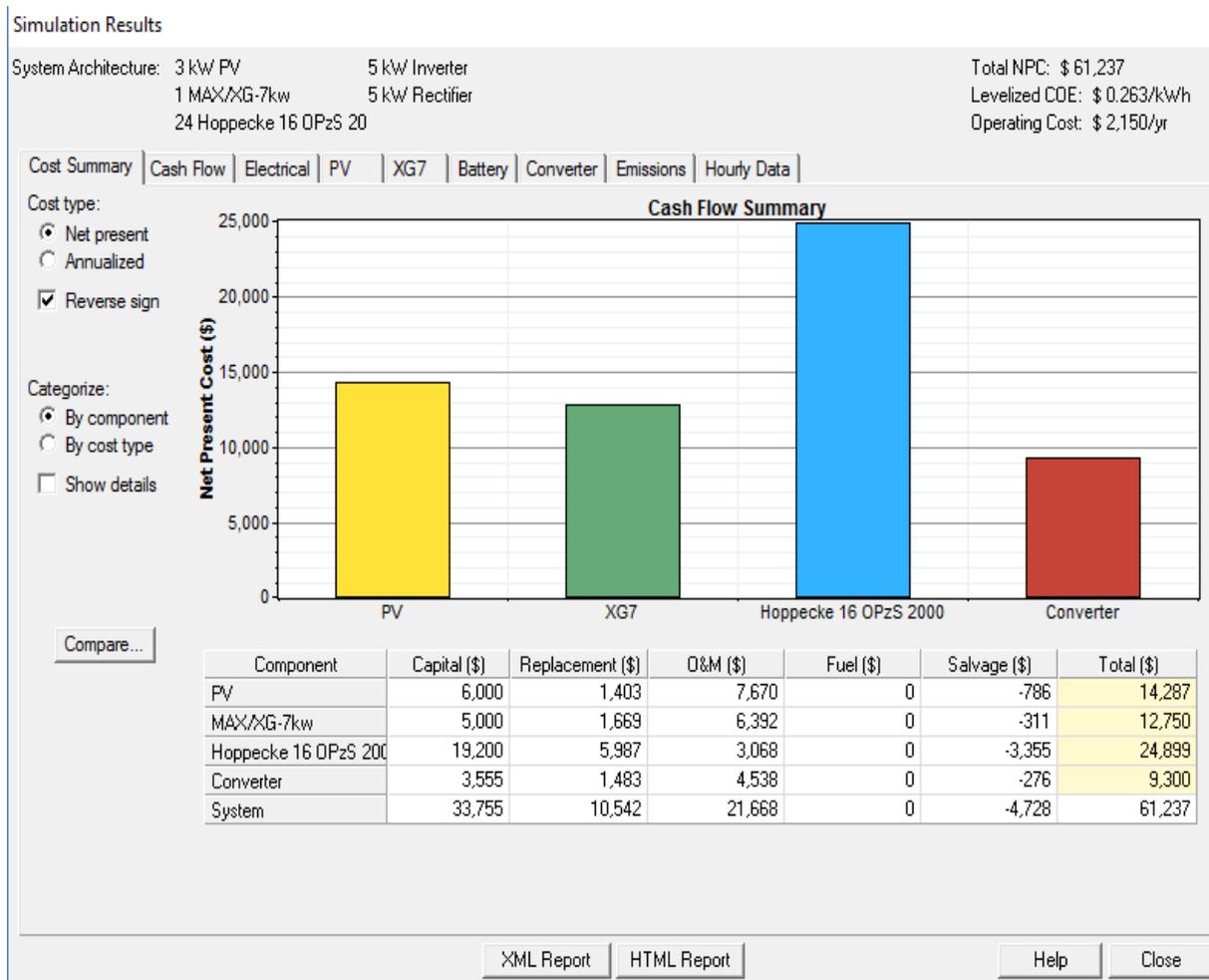


Figure 3.23 : Résultats du coût (loi logarithmique).

- La figure 3.24 présente les résultats électriques du notre système qui produit un peu moins d'énergie que notre dernière simulation: 48381 kWh/an, plus des détails électrique dans le point suivant :

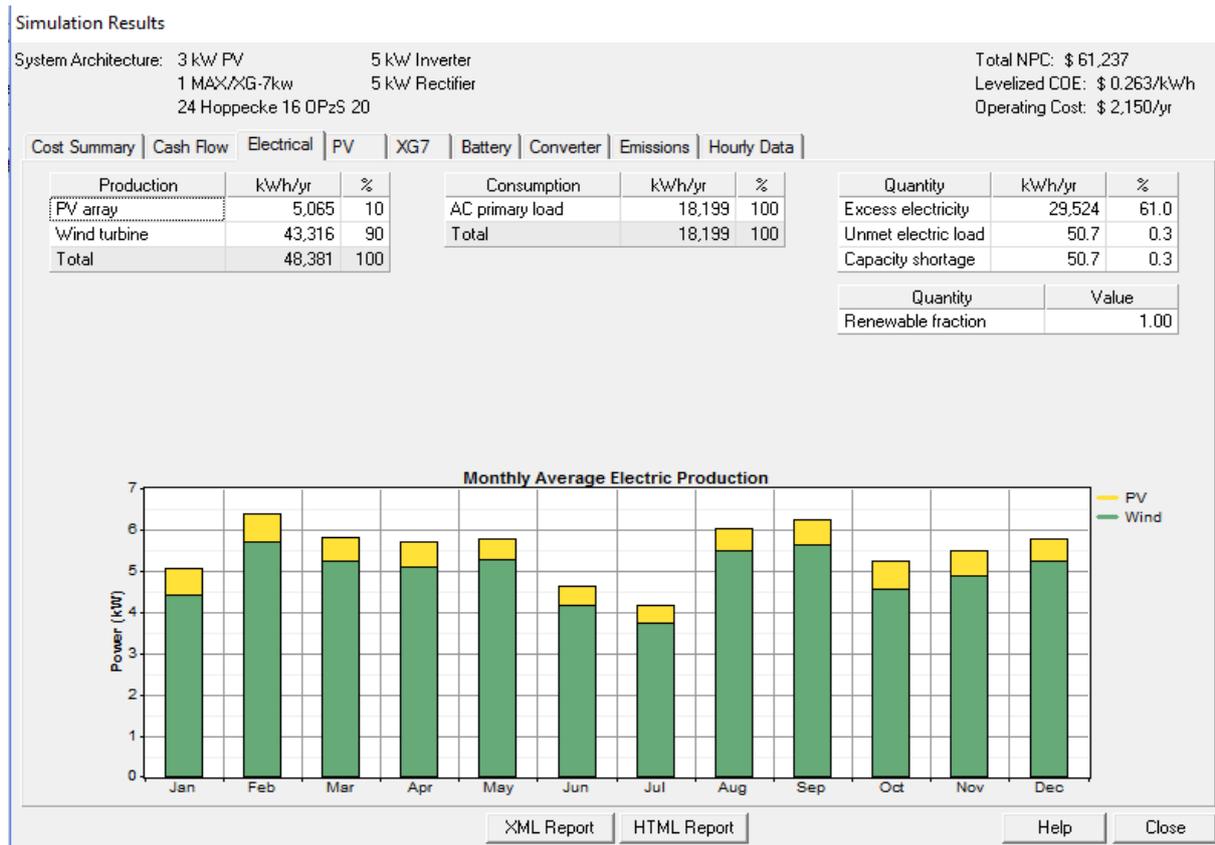


Figure 3.24 : Résultats électriques (loi logarithmique).

- Dans ce cas l'énergie à base éolien domine la production avec 90% de la production générale et avec un excès très important de 61% préceque le même qu'au dernière simulation et un même taux de delestage de 0.3% ,ce dernier est plus court mais plus répétable ce que est montré sur le graphe suivant :

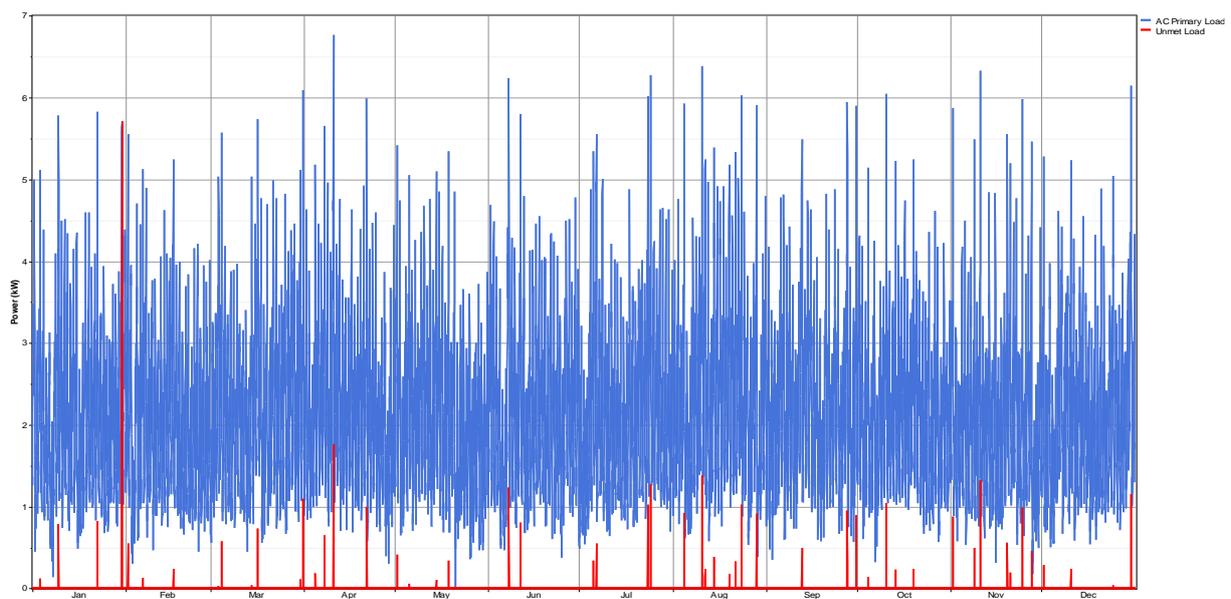


Figure 3.25 : Périodes de délestage (loi logarithmique).

### 3.6 Conclusion :

Dans ce dernier chapitre on présente les résultats de la simulation de notre système hybride éolien-PV avec batteries pour des données de vitesse du vent mesurées à 10 et 40 mètres, et pour l'extrapolation de la vitesse du vent à 40 mètres en utilisant les données mesurées à 10 mètres faite par HOMER suivant la loi logarithmique et la loi de puissance  $n=1/7$ .

Et après notre simulation du système hybride on peut conclure les résultats obtenus dans le tableau suivant :

Données Résultats	Mesurées à 10 mètres d'altitude	Mesurées à 40 mètres d'altitude	Extrapolées pour 40 mètres d'altitude
Système optimisé	*Générateur éolien 7kW *Générateur PV 9kW *24 batteries 2V 4kWh *Convertisseur 6kW	*Générateur éolien 7kW *Générateur PV 5kW *24 batteries 2V 4kWh *Convertisseur 6kW	*Générateur éolien 7kW *Générateur PV 3kW *24 batteries 2V 4kWh *Convertisseur 5kW
Energie produite totale (kWh/an)	35980	42133	48904 ; (48381)
Sources d'énergie produite	*Eolienne 58% *PV 42%	*Eolienne 80% *PV 20%	*Eolienne 90% *PV 10%
Excès d'énergie (kWh/an)	16844 *Taux 46.8%	23250 *Taux 55.2%	30052 ; (29524) *Taux 61.5% (61%)
Délestage (kWh/an)	93.7 *Taux 0.5%	94.4 *Taux 0.5%	48.7 ; (50.7) *Taux 0.3%
Coût total d'installation durant 25 ans (\$)	91670	72621	61237
Coût kWh (\$/kWh)	0.395	0.313	0.263

**Tableau 3.1 :** Résultats des différentes simulations.

Après notre simulation du système hybride éolien-PV avec batteries on a constaté que :

- Dans la première simulation du système pour une altitude de 10 mètres, le logiciel a dimensionné le système pour presque les mêmes puissances du générateur éolien et le générateur photovoltaïque avec un peu d'avantage pour l'éolien (58%) et le système avait un taux de délestage de 0.5% dans les mois de juillet et août où l'éclaircissement et la vitesse du vent étaient moins importants ce qui a causé une décharge profonde des batteries et alors un manque d'alimentation en électricité.
- Pour la deuxième simulation concernant les données de vitesse du vent mesurées à une altitude de 40 mètres le système a largement favorisé l'éolien avec un taux de

80% et juste 20% pour le PV, ce que fait baissé le prix de kWh et alors le coût d'énergie, le taux de délestage était le même mais un peu répartie durant l'année.

- Pour la troisième et la quatrième simulation concernant l'extrapolation de la vitesse du vent pour 40 mètres d'altitude en utilisant les données mesurées à 10 mètres soit par la loi de puissance ou par la loi logarithmique les résultats étaient presque les mêmes ou l'éolien était beaucoup favorisé et le taux de délestage moins que les 2 premiers cas à l'ordre de 0.3% et plus répartie durant l'année, le coût d'énergie était estimer le moins cher 0.263(\$/kWh).
- On constate que la configuration du système pour des différentes altitudes est différente et le logiciel HOMER favorise l'énergie éolienne quand le générateur éolien est installé plus haut.
- On remarque que les résultats obtenus par HOMER pour l'altitude de 40 mètres utilisant des données mesurées de la vitesse du vent et faire l'extrapolées pour cette altitude sont considérablement différents.

**CONCLUSION**

**GENERALE**

Les recherches menées sur les systèmes hybrides d'énergie renouvelable ont montré l'avantage de combiner différents types de générateurs. En plus de l'éolien et du photovoltaïque, l'utilisation d'une source d'énergie classique (comme le stockage électrochimique), est très intéressante pour rendre le système plus efficace dans les pires périodes de l'année.

Ce mémoire présente une étude d'un système hybride éolien-photovoltaïque totalement autonome. L'objectif de ce système est de produire l'électricité pour satisfaire la demande d'une charge consommatrice (50 kWh/jour et un pic de 6.76 kW) dans un site isolé « Ilamane » à Tamanrasset au sud Algérien. Alors on a fait un dimensionnement sur le logiciel HOMER de notre système hybride et simuler les 4 cas qu'on avait et présenter nos résultats, les comparer et les discuter afin de choisir notre système et le valoriser.

Nous avons présenté les composants de notre système : le générateur photovoltaïque, le générateur éolien, les batteries de stockage, et l'onduleur; leurs caractéristiques et même leurs principes de fonctionnement. Ensuite, nous avons donné leurs modèles mathématiques.

Toute installation des éoliennes doit prendre en considération l'effet de l'altitude du mât de la turbine éolienne car ce facteur peut changer tout le dimensionnement de l'installation et peut favoriser un autre système par rapport à l'éolien. Ce facteur, et le bon choix de l'éolienne basant sur le potentiel éolien du site surtout les vitesses moyennes horaires (plus favorablement) du vent et le comportement de notre générateur éolien pour ces vitesses, sans oublier de prendre en compte l'effet de température et d'irradiation sur le fonctionnement de notre générateur PV; tout ça peuvent rendre notre optimisation plus précise.

L'extrapolation de la vitesse du vent utilisant la loi de puissance  $n=1/7$  ou la loi logarithmique pour des autres altitudes peut nous aider à faire un dimensionnement plus juste qu'un dimensionnement où l'effet d'altitude d'aérogénérateur est totalement éliminé, mais elle reste moins précise que la mesure instantanée des vitesses du vent à cette altitude.

Ce travail pourrait être avancé en incluant des composants supplémentaires dans le système hybride. En générale, la batterie à plomb, inclus dans ce travail, est le choix le plus courant pour le stockage d'énergie. Mais le progrès dans les autres technologies de batteries comme Li-ion ainsi que les cellules de stockage de l'hydrogène fait l'utilisation de ces technologies très attrayante.

La transition vers les sources d'énergies renouvelables et surtout vers l'éolien et le photovoltaïque en Algérie est prometteuse malgré que le prix de kWh produit par source renouvelable reste un peu cher en Algérie, et les systèmes hybrides restent la solution optimale pour une installation électrique de sources renouvelables au sud du pays.

# **LISTE DES REFERENCES**

- [1] I. Vechiu, "Modélisation et Analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome," Thèse, Université du Havre, France, Décembre, 2005.
- [2] S. Petibon, "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques," Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France, Janvier, 2009.
- [3] L. Leslie, "Design and analysis of a grid connected photovoltaic generation system with active filtering function," Blacksburg, Virginia, Etats-unis, Mars, 2003.
- [4] L. Protin and S. Astier, "Convertisseurs photovoltaïques", Techniques de l'ingénieur, D 3360, 1996.
- [5] S. A. Tadjer, "Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque (GPV)," Mémoire de magistère, Université M'Hamed Bougara – Boumerdes, 2008.
- [6] A. Sahli, "Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïque interconnectés au réseau," Mémoire de magistère, Université de Sétif, 2012.
- [7] T. Markvart et L. Castaber, "Photovoltaics Fundamentals and applications," Preface Guide to Usage the Handbook by Professional Groups.
- [8] B. Sorensen, "Renewable Energy Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects," Elsevier Academic Press, 2004.
- [9] P. Leconte, M. Rapin et E. Szechenyi, "Éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, BM 4640, 2005.
- [10] J. M. Martin-Amouroux, "Perspectives énergétiques mondiales", Techniques de l'Ingénieur, BE 8 515 2004.
- [11] <http://www.wwindea.org/WWEAE.V>.
- [12] J.F. Walker, N. Jenkins, "Wind energy technology", John Wiley & Sons, Inc.1997.
- [13] B. Multon, "Etat de l'art des aérogénérateurs électriques", Rapport ECRIN, Mai, 2002.
- [14] L. Bernal-Agustin and R. Dufo-Lopez, "Simulation and optimization of stand- alone hybrid renewable energy systems," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 13, pp. 2111 2118, 2009. doi: 10.1016/j.rser.2009.01.010.
- [15] <http://e-lee.hei.fr/>
- [16] G. Cunty, "Eoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne," Edissud, Aix-en-Provence, 2001.
- [17] <http://www.windpower.org/fr/tour/wtrb/comp/index.htm>: Danish Wind Industry Association, 2010.

- [18] P. Bajpai and V. Dash, "Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, pp. 2926-2939, 2012. doi: 10.1016/j.rser.2012.02.009.
- [19] O. Gergaud, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couple au réseau et associé à un accumulateur," Thèse de Doctorat, Ecole normale supérieure de Cachan, France, Déc, 2002.
- [20] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo, C. Nikita, "Etat de l'art dans les aérogénérateurs," *L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables*, Ed. NOVELECT – ECRIN, mai 2002, pp.97-154.
- [21] Site Internet de l'institut allemand DEWI, <http://www.dewi.de>
- [22] A. Mirecki, "Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance," Thèse de doctorat, INP Toulouse, France, 2005.
- [23] A. Abdelli, "Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive," Thèse de doctorat, L'Institut National Polytechnique de Toulouse, Octobre, 2007.
- [24] L. Zarour, "Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau," Thèse doctorat, Université Mentouri Constantine, Juin, 2010.
- [25] B. Multon, H. Ben Ahmed, "Le stockage stationnaire d'énergie électrique : pourquoi et comment ?," *Revue 3E.I.*, n°48, pp. 18-29, mars, 2007.
- [26] A. T. Singo, "Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome," Thèse doctorat, l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, Fév, 2010.
- [27] T. E. Ruhlmann, "Lead Acid Batteries For Stationary Float Service and Cycling Service Part 2: Selection Criteria," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 153, July 2003.
- [28] M. A. Sendhil, S. Balasubramanian, and G. Arunkumar, "Current Status of Research on Hybrid Power Generation Systems," *Res. 1. Appl. Sei. Eng. Technol.* vol. 8, no. 14, pp. 1684-1690, 2014.
- [29] M. N. Mechalik et C. Hamada, "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau", *Mémoire, Université Kasdi Merbah – Ouargla*, 2013.
- [30] P. Barrade, "électronique de puissance méthodologie et convertisseurs élémentaire," *press polytechnique et universitaires*, 1ère édition, 2006.
- [31] W.Théodore, S. Gilbert, "électrotechnique," de boeck, 4e édition, 2005
- [32] B. Mehimmedetsi, "Application du formalisme Bond Graph à une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque," Thèse, Université Mentouri Constantine, 2007.
- [33] <https://www.wattneed.com/fr/content/30-dimensionnement-d-une-installation-photovoltaïque>.

- [34] M. Glavin, "Optimisation of a Hybrid Energy Storage System for Autonomous Photovoltaic Applications," W.G. Hurley, thesis, B.E., National University of Ireland, Galway, Ireland, Sept. 2012.
- [35] M. Merad et A. Cheknane, "Introduction au gisement solaire algérien Théorie et applications," 2013.
- [36] Tennekes A., « The logarithmic wind profile » J. of Atmospheric sciences, vol. 30, pp : 234:238, 1973.
- [37] Justus C.G. et A. Mikhail, « Height Variation of Wind speed and Wind Distributions Statistics ». Geophysical Research Letters, vol. 3, N° 5, 1976.
- [38] Peterson E., « On the Use of Power Laws Estimates of Wind Power Potential » J. of Applied Meteorology, vol. 17, pp 390:394, 1978.
- [39] C. Nichita " Cours Eolien photovoltaïque "
- [40] Alain Ricaud, " Modules et systèmes photovoltaïques," Edition Presses polytechniques et universitaires romandes, Sept, 2008
- [41] F. B. Cherfa, " Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT," Mémoire de magister, Ecole National Polytechnique Elharach, 2004.
- [42] B. Fellah, " Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah," Thèse Magister, Université de Tlemcen, déc 2012.
- [43] S. Ameziane, " Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien," Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2009.
- [44] B.S. Borowy, Z.M. Salameh, "Optimum Photovoltaic Array Size for a Hybrid Wind/PV System," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 9, No. 3, pp. 482-488, Sept. 1994.
- [45] B. S. Borowy and Z. M. Salameh, " Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system," IEEE Trans. Energy Conv., vol. 11, no. 2, pp. 367-375, Jun. 1996.
- [46] E. Ofry and A. Brauntein, "The Loss of Power Supply Probability as a Technique for Designing Standalone Solar Electrical (Photovoltaic) Systems," IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-102, N°5, pp. 1171 - 1175, May 1983.
- [47] (2013) The NASA website. [Online]. Available: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen>.

# **ANNEXE**

## **A.1 Survol des différents logiciels :**

Étant donné les différents efforts des dernières années à travers le monde pour diminuer la dépendance au pétrole, beaucoup de ressources ont été mises de l'avant pour développer les énergies renouvelables et principalement, l'énergie éolienne et l'énergie solaire photovoltaïque. Ces énergies sont en forte croissance partout à travers le monde. Les outils comme les logiciels font partie des grandes réalisations concernant ces énergies à promouvoir. De nombreux logiciels existent maintenant pour modéliser, optimiser ou dimensionner les différents systèmes conçus à partir d'énergie renouvelable. Beaucoup de ces logiciels sont spécialisés pour un type d'énergie particulier. Il en existe un bon nombre pour le solaire photovoltaïque ainsi que pour l'énergie éolienne. Les logiciels qui font référence à plusieurs sources d'énergie sont, quant à eux, plus rares.

### **A.1.1 Logiciels pour le photovoltaïque :**

Les technologies des panneaux solaires photovoltaïques ont beaucoup évolué et ces outils aussi. Il existe des logiciels pour la simulation (TRNSYS, INSEL, HOMER, PV-DesignPro) d'autres pour l'évaluation des coûts et des différentes données économiques (SOLinvest, RETScreen) ou pour l'analyse et la planification des systèmes (PV F-Chart, Laplace System, PV\*SOL, PVcad, PVSYST, PV Professionnal, Kerychip, Tetti FV) certains sont destinés à l'industrie (APOS Photovoltaic Statlab, PV Cost Simulation Tool) certains sont développés pour la surveillance et le contrôle des systèmes installés (eteocontrol, SPYCE) ou encore pour l'évaluation de site (ECOTECT, Shadow Analyzer, Shadows, GOSOL, METEONORM, Horizon, Sombrero) et finalement, il existe des outils disponibles en ligne, facilement accessibles à tous (SolarDesignTool, PV Potential Estimation Utility, Logiciel CalSol, Panel Shading), (Energy 2011).

Certains de ces logiciels ne font appel qu'à un sous-domaine du solaire photovoltaïque comme les panneaux intégrés aux immeubles ou d'autres sont utiles seulement pour les systèmes connectés au réseau par exemple. Il existe maintenant tout un monde de logiciels. Il est donc important de définir ses besoins pour identifier facilement les logiciels utiles.

De plus, plusieurs des logiciels faisant référence à l'énergie solaire photovoltaïque sont dans une seule langue (français, anglais, italien) et beaucoup sont d'origine allemande et en allemand uniquement, ce qui les rend plutôt inaccessibles.

### **A.1.2 Logiciels pour l'éolien :**

Comme pour le solaire photovoltaïque, il existe maintenant un bon nombre de logiciels pour les éoliennes. Certains logiciels sont pour l'analyse de fermes éoliennes (WindFarm, OpenWind, GH WindFarmer, WindSim), d'autres pour l'analyse des données de gisement éolien (Windographer) ou simplement pour le design d'éolienne (Focus 6, GH Bladed) ou encore pour l'évaluation de sites (windNavigator). Il en existe aussi pour l'optimisation des systèmes HOMER, le calcul des coûts et autres données économiques RETScreen ou pour la surveillance des systèmes installés (Suite de logiciels par ETAP) ou encore pour le design et la planification de projets éoliens dans leur ensemble (WindPro).

### **A.1.3 Logiciels pour les énergies renouvelables :**

Il est intéressant de pouvoir comparer différents systèmes simples et des systèmes hybrides à l'aide d'un seul et même logiciel. De nombreux logiciels concernent les énergies renouvelables utilisées spécifiquement pour les bâtiments et les maisons et même plus précisément sur l'efficacité énergétique de ces bâtiments. Peu de logiciels traitent de la production d'énergie en intégrant plusieurs types d'énergie. En intégrant à la fois les outils de simulation et les outils de calculs des coûts, voici les quelques logiciels disponibles : In my backyard, EnergyPeriscope, Hybrid2, HOMER et RETScreen. Ces logiciels seront discutés dans une section ultérieure.

### **A.2 Paramètres pour le choix des logiciels :**

Afin de choisir les logiciels, il est indispensable de définir les besoins, donc de déterminer les attentes minimales auxquelles le logiciel doit répondre. Les logiciels devront avoir ces paramètres afin d'être sélectionnés :

- 1- Langue : anglais ou français,
- 2- Accessibilité à tous :
  - Prix : gratuit ou moins de 100 \$ par licence,
  - Facilement disponible : par Internet,
  - Simplicité d'utilisation,
  - Documentation en ligne,
- 3- Plusieurs technologies disponibles : photovoltaïque, diesel et éolien,
- 4- Systèmes hors réseau,
- 5- Simulation de systèmes dans plusieurs pays,
- 6- Évaluation des coûts,
- 7- Optimisation des systèmes.

### **A.3 Logiciels choisis :**

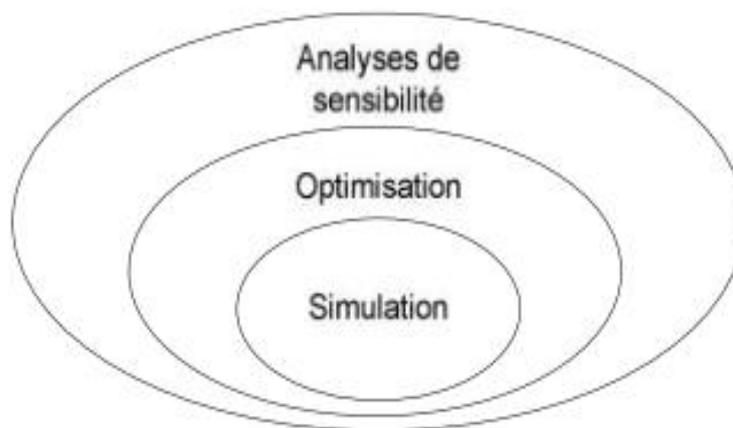
#### **A.4 Présentation de HOMER :**

HOMER est un logiciel développé pour des systèmes de production d'énergie de petites puissances. Il permet de faire des simulations de systèmes avec des énergies renouvelables et avec des énergies fossiles. Un de ses grands atouts est la possibilité de pouvoir simuler des systèmes hybrides combinant différentes sources d'énergie qu'elle soit renouvelable ou fossile. La première version a été développée en 1992 pour NREL (US National Renewable Energy Laboratory), il a ensuite subi de nombreuses améliorations dans plus de 40 nouvelles versions. La version utilisée pour le présent projet est HOMER 2.68 beta sortie en juillet 2009.

Depuis, il y a eu 2 nouvelles versions disponibles pour 2.75 et 2.76 qui sont maintenant vendues pour un faible coût 99 \$US pour les nouveaux utilisateurs et pour 49 \$US pour les anciens utilisateurs. La 27 version 2.68 beta est toujours disponible gratuitement. Ce logiciel est largement utilisé dans plus de 190 pays et par plus de 40 000 utilisateurs.

#### **A.4.1 Principales caractéristiques :**

Tout d'abord, ce logiciel permet de faire des simulations pour ensuite optimiser les systèmes et pour finalement terminer avec des analyses de sensibilité sur ces systèmes optimisés. La solution obtenue par HOMER est la solution la moins coûteuse parmi différentes combinaisons de systèmes d'énergies renouvelables, d'énergies fossiles ou de systèmes hybrides comprenant deux sources d'énergie ou plus. Voici, Figure A.1, le modèle conceptuel de HOMER.



**Figure A.1.** Modèle conceptuel de HOMER.

Le logiciel permet de faire la simulation d'un système selon des données de gisement (solaire, éolien, diesel, etc.) en fonction d'une demande énergétique (besoins en énergie). Par la suite, il est possible d'analyser plusieurs configurations différentes pour ce même système afin d'en obtenir un système optimisé au niveau du coût. Le logiciel simule toutes les configurations demandées et donne la meilleure solution, la solution la moins chère, parmi celles-ci. Ensuite, il est finalement possible de faire des analyses de sensibilité afin de savoir si la solution trouvée reste la meilleure même s'il y a certains changements dans les différents paramètres entrés (variation du coût de la technologie, variation dans les données de gisement, etc.). Il est donc possible de faire bon nombre d'analyses avec de nombreuses configurations différentes en moins de quelques minutes de simulation.

#### **A.4.2 Interfaces :**

Le logiciel HOMER est facile à utiliser et son interface est similaire aux logiciels usuels, il est donc muni d'un menu dans le haut ainsi que des icônes que l'on peut utiliser sans aller dans les menus. On peut considérer que l'interface d'HOMER a trois zones importantes comme indiqué sur la Figure A.2 : la zone de définition du système, celle des ressources et celle des résultats.

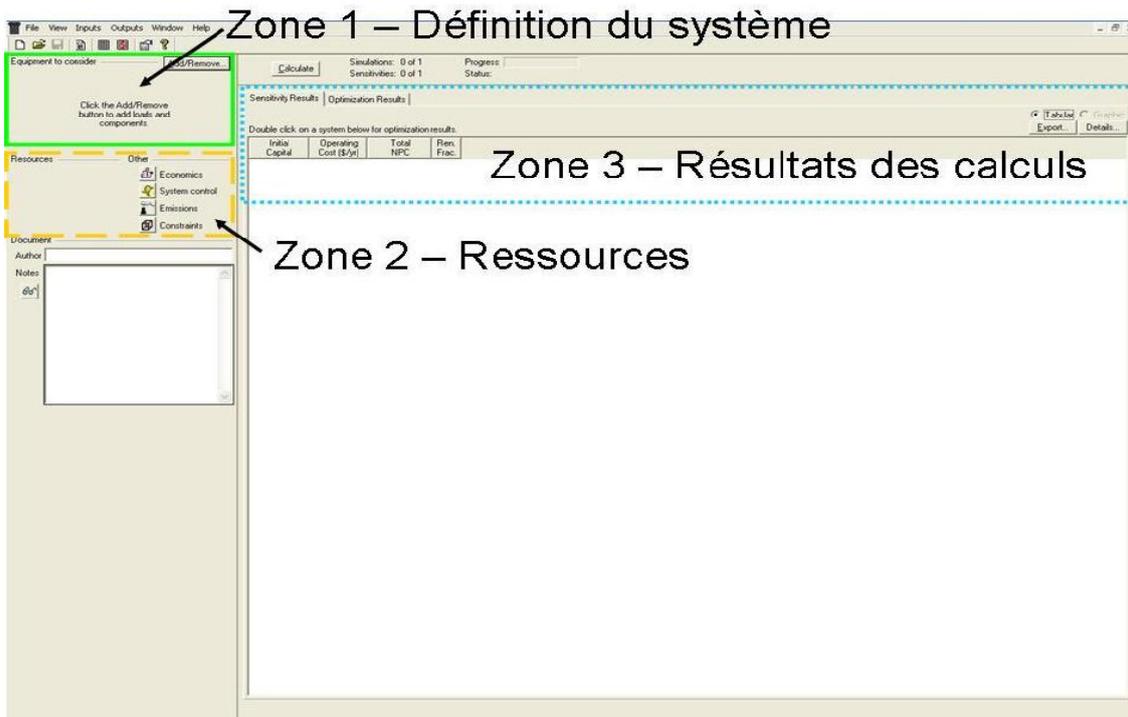


Figure A.2. Interface HOMER – Fichier vierge.

La zone de définition du système permet de choisir les équipements qui seront inclus dans le système à modéliser. Il suffit de cocher les éléments à utiliser selon les choix illustrés à la Figure A.3. De plus, dans cette même fenêtre, il est possible de choisir : de modéliser le réseau électrique, d'en faire la comparaison avec un système hors réseau ou simplement de ne pas modéliser le réseau.

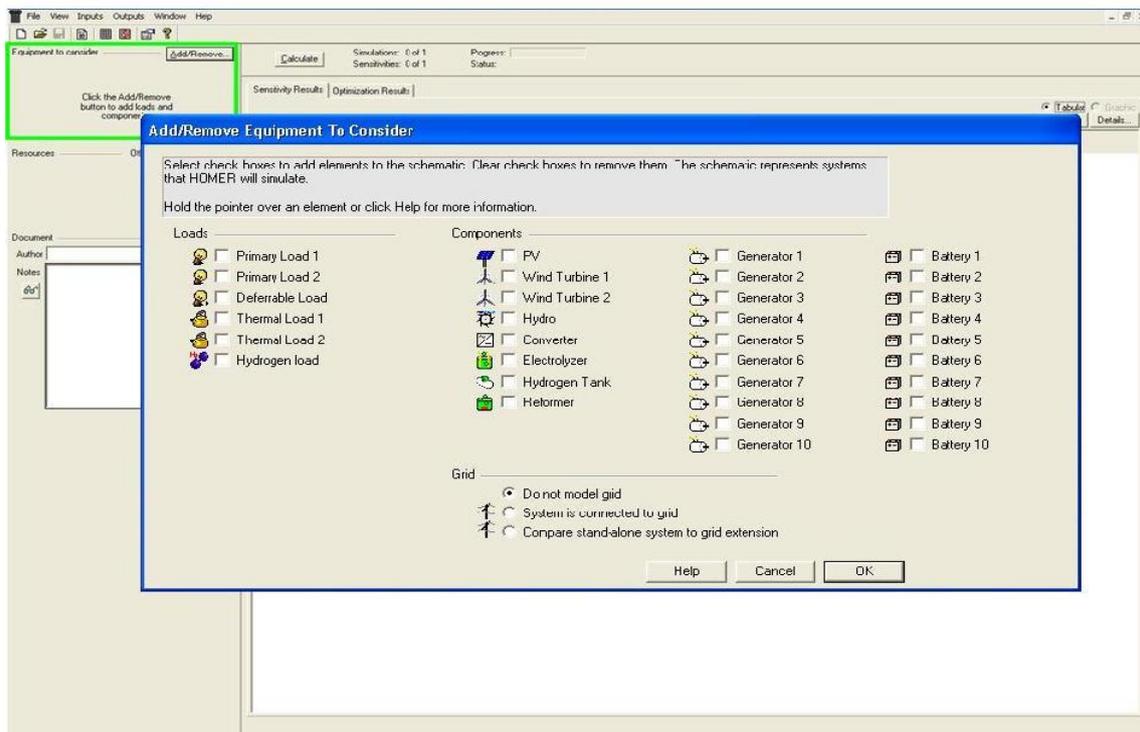


Figure A.3. Interface HOMER – Équipements à ajouter.

Une fois sélectionnés, les divers équipements apparaissent dans la zone 1 de définition du système comme à la Figure A.4 et les ressources nécessaires aux équipements sélectionnés apparaissent, elles, dans la zone 2 de définition des ressources comme à la Figure A.5

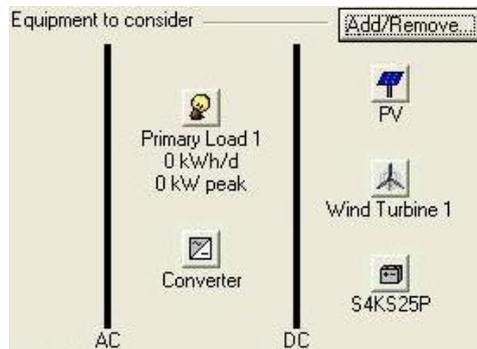


Figure A.4. Interface HOMER – Équipements sélectionnés.



Figure A.5. Interface HOMER – Ressources.

Dans ces deux zones, pour chaque icône, il y a une fenêtre à remplir ; ce sont les données à fournir pour faire une simulation. Les données entrées pour le présent projet seront définies dans la 4. Une fois les données entrées, on peut faire calculer HOMER, en cliquant sur l'icône comme illustré dans la Figure A.6.

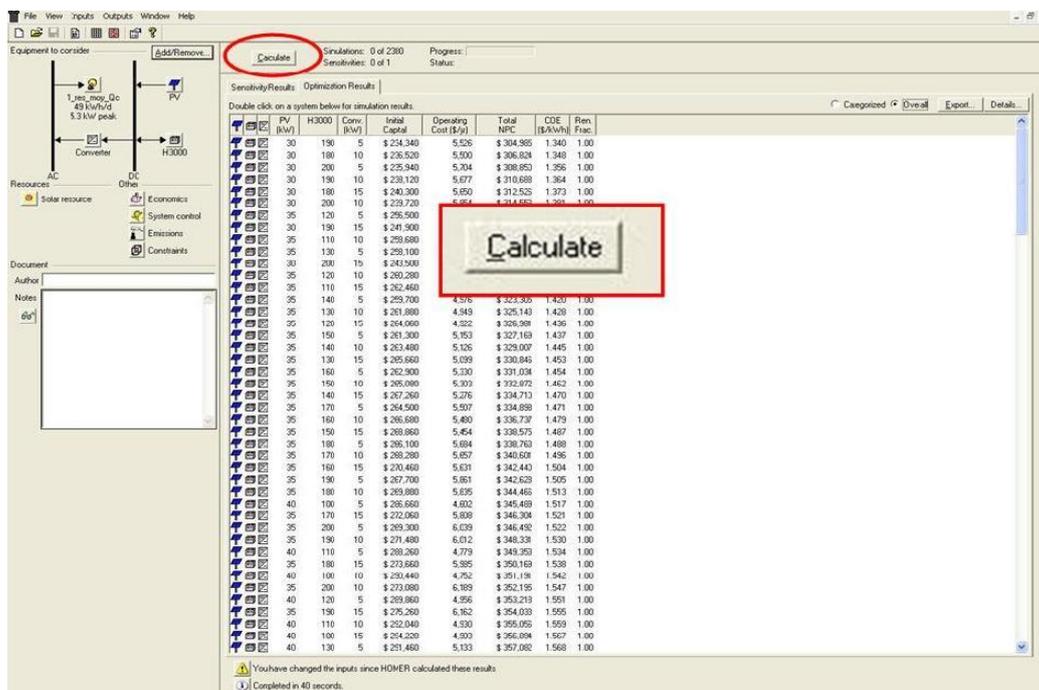


Figure A.6. Interface HOMER – Fichier complété.

Lorsque le calcul est complété, les résultats apparaissent et la solution la plus économique est la première comme illustré à la Figure A.7. Un résumé du système et des coûts reliés sont affichés dans la zone des résultats.

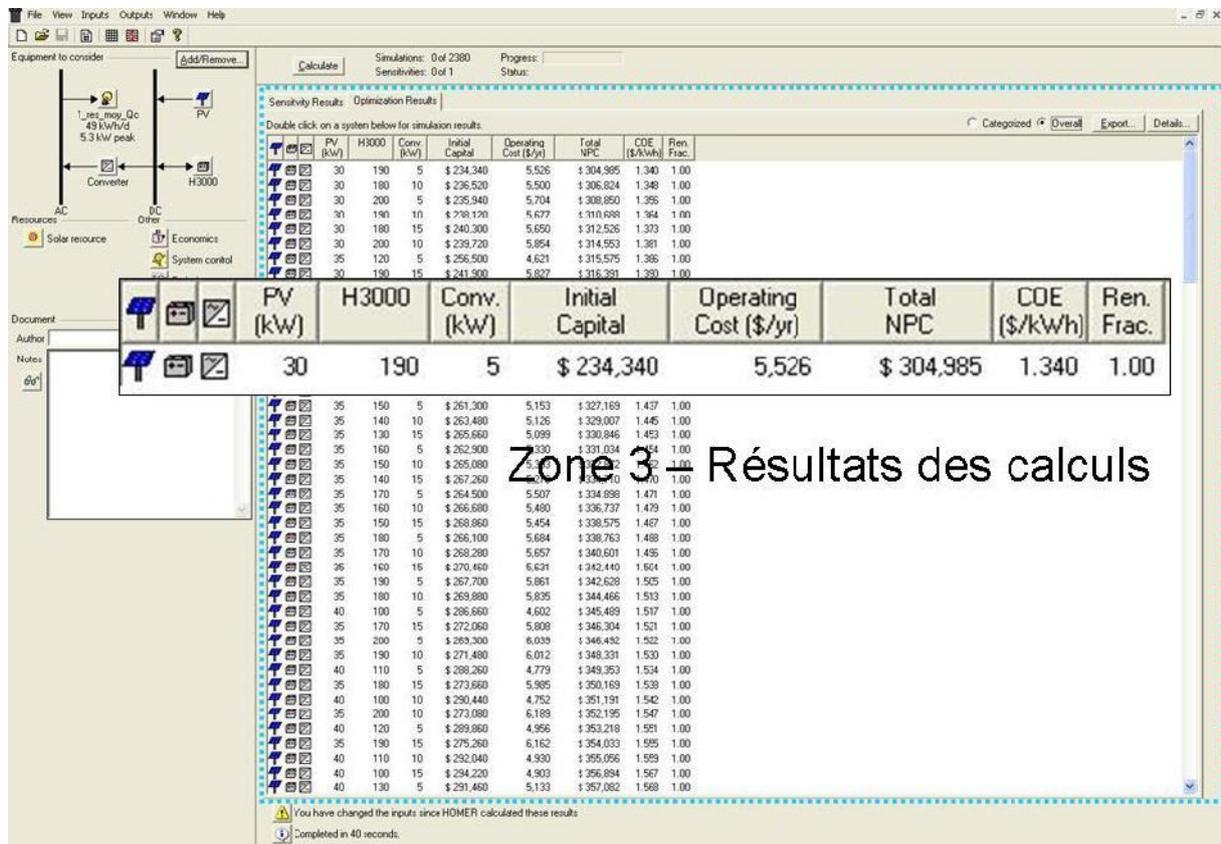


Figure A.7. Interface HOMER – Résultats des calculs.

#### A.4.3 Données à entrer :

En bref, les données à entrer sont celles reliées aux zones1 et 2 de HOMER. Il s’agit de données reliées à la consommation énergétique, aux équipements (panneaux solaires photovoltaïques, éoliennes, génératrices, onduleur, batteries ou autres équipements) et aux ressources nécessaires comme les données de gisement solaire ou éolien, aussi bien que les données reliées au combustible utilisé par la génératrice. Dans la zone 2 des ressources, il y a aussi certains paramètres économiques que l’on peut modifier. D’autres paramètres permettent un différent contrôle du système (surtout au niveau de la simulation des banques de batteries et des génératrices). Dans la zone des ressources, on peut aussi mettre des pénalités monétaires pour les émissions émises ou bien un seuil limite d’émissions à ne pas dépasser lorsque la simulation sera effectuée. Finalement, certaines contraintes peuvent être exigées comme une fraction minimale d’énergie renouvelable à avoir dans le système ou encore accepter un certain pourcentage de déficit en énergie. Une fois toutes les sections remplies, Figure A.8, on peut lancer la simulation en cliquant sur l’icône « calculer ».

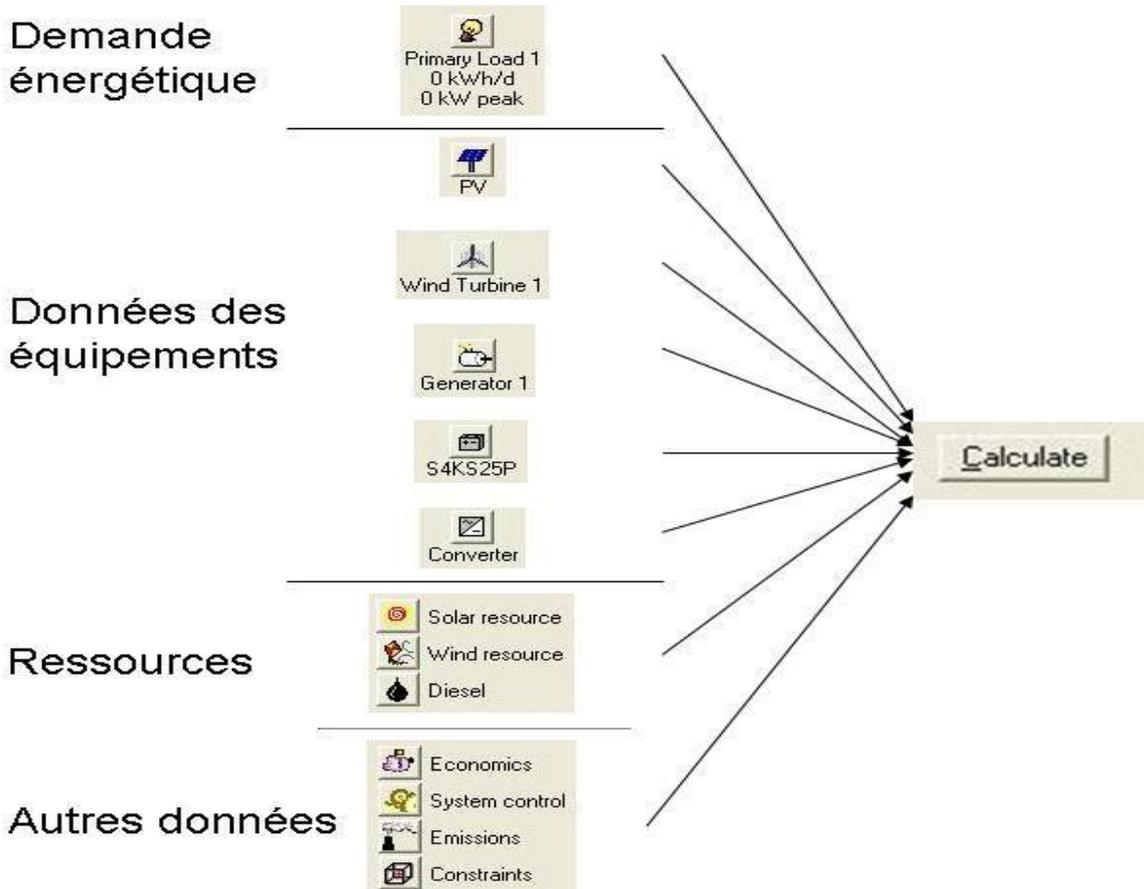


Figure A.8. Données à fournir.

**A.4.4 Résultats pouvant être obtenus :**

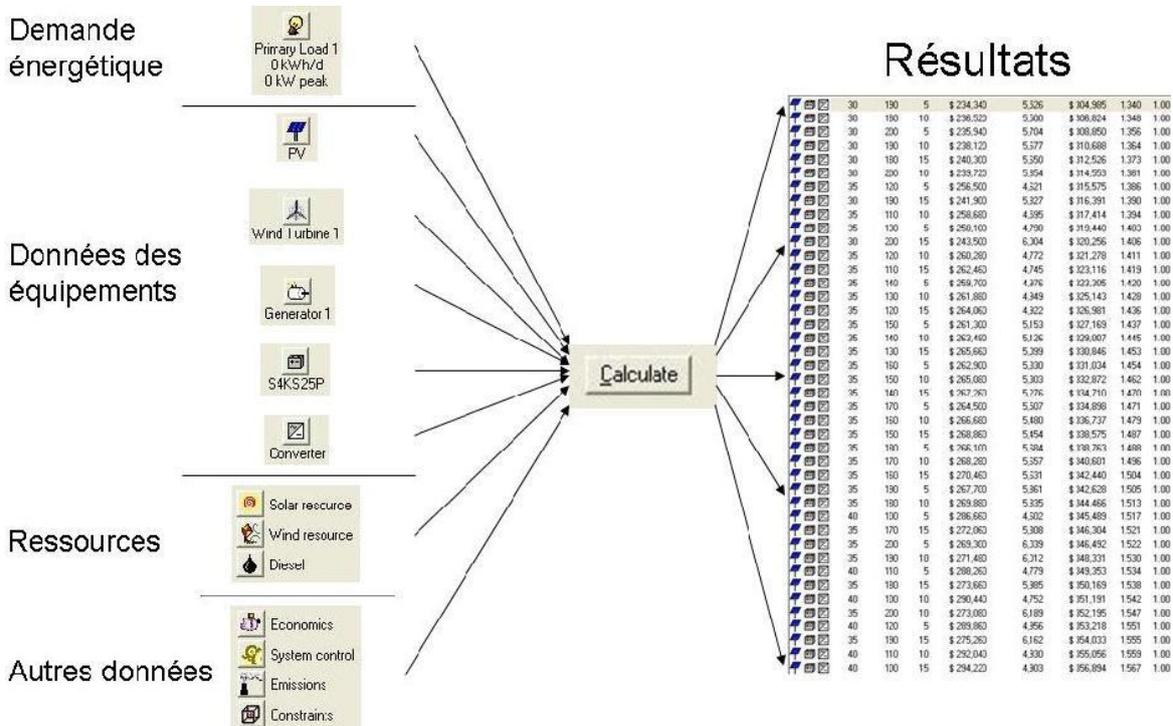


Figure A.9. Résultats obtenus après simulation.

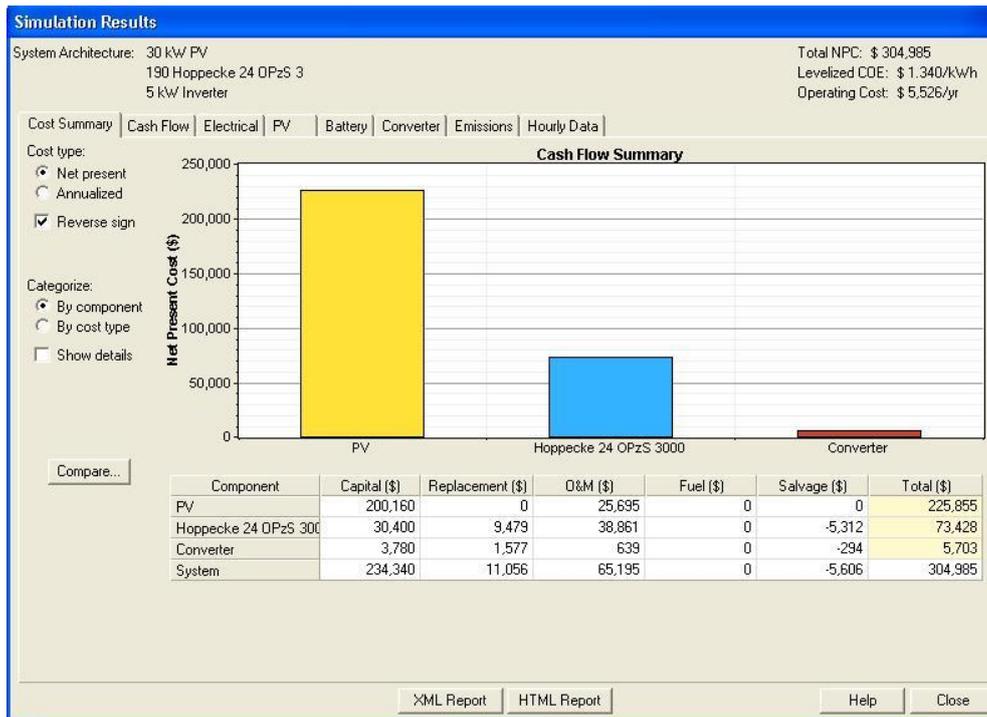
Une fois toutes les données entrées et la simulation lancée, on obtient de nombreux résultats comme illustré à la Figure A.9 étant donné qu'il est possible d'entrer de nombreuses configurations différentes pour un même type de système. Il est possible de visualiser la liste des résultats de deux façons : « *categorized* » et « *overall* ». Si on choisit l'option « *categorized* », la liste présente l'option la plus économique pour chaque catégorie de système, donc par type de système. Par exemple, HOMER affichera seulement la meilleure option pour un système de type photovoltaïque avec batteries même si la simulation a été faite selon plusieurs configurations différentes (différents nombres de panneaux, différents nombres de batteries). Pour l'option « *overall* », HOMER affiche tous les systèmes sur la même la liste. Le premier résultat affiché est le plus économique parmi tous les types de systèmes simulés. Il est donc important d'optimiser chaque type de système afin d'éliminer les systèmes qui ne sont pas viables. Pour ce faire, on effectue plusieurs simulations dans le but de converger vers un système optimal pour chaque type de système.

Il est très important de se rappeler que le premier résultat donné par HOMER dans la liste des résultats est toujours le système le plus économique trouvé selon « *Net Present Cost* » (coût à valeur actuelle) parmi tous les systèmes et toutes les configurations simulés. Comme mentionné précédemment, les résumés des systèmes et des coûts reliés sont affichés dans la zone des résultats. Un exemple de résumé est montré à la Figure A.10. On y retrouve les informations suivantes : icônes des équipements du système (partie 1) et leur capacité ou le nombre de batteries (partie 2), l'investissement initial devant être fait (partie 3), les coûts d'opération par an (partie 4), le coût total du système à la valeur actuelle (partie 5), le coût de l'énergie en \$/kWh (partie 6) et finalement, la proportion d'énergie renouvelable utilisée dans le système (partie 7).

1			2			3	4	5	6	7
			Pv (kW)	H3000	Conv. (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.
			30	190	5	\$ 234,340	5,526	\$ 304,985	1.340	1.00

**Figure A.10.** Résumé des résultats.

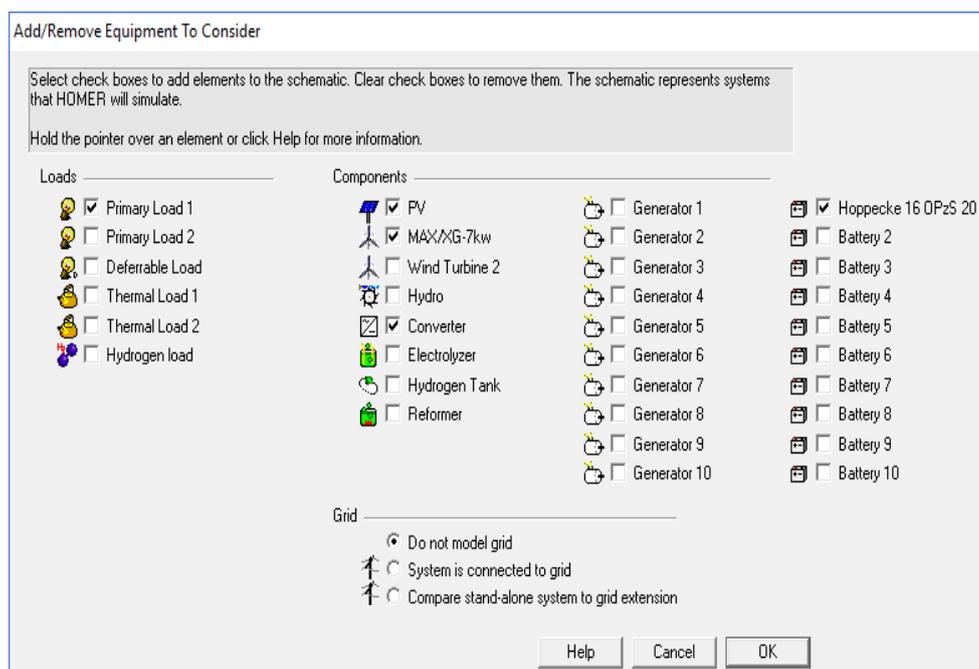
Pour plus de détails sur les différents résultats obtenus dans HOMER, il faut cliquer sur le résultat désiré et une fenêtre, Figure A.11, s'ouvre avec plus d'information.



**Figure A.11.** Fenêtre des résultats détaillés.

Dans cette fenêtre, on retrouve des onglets comme le résumé des coûts, le flux monétaire, des informations sur l'électricité (production, consommation, excès d'énergie, etc.), des détails sur l'énergie et la puissance offertes des équipements (panneaux, batteries, convertisseur), le détail des émissions et finalement, on peut visualiser les données simulées d'heure en heure.

## A.5 Simulation de notre système :



**Figure A.12.** Fenêtre des composants à ajouter.

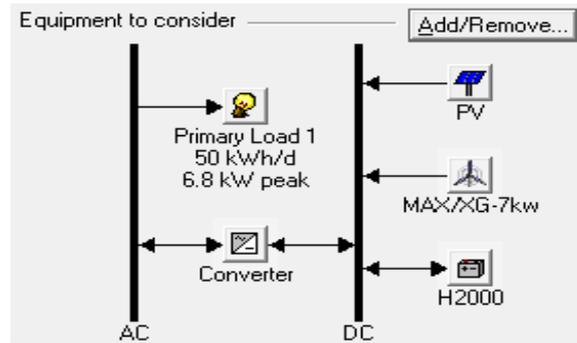


Figure A.13. Configuration de notre système.

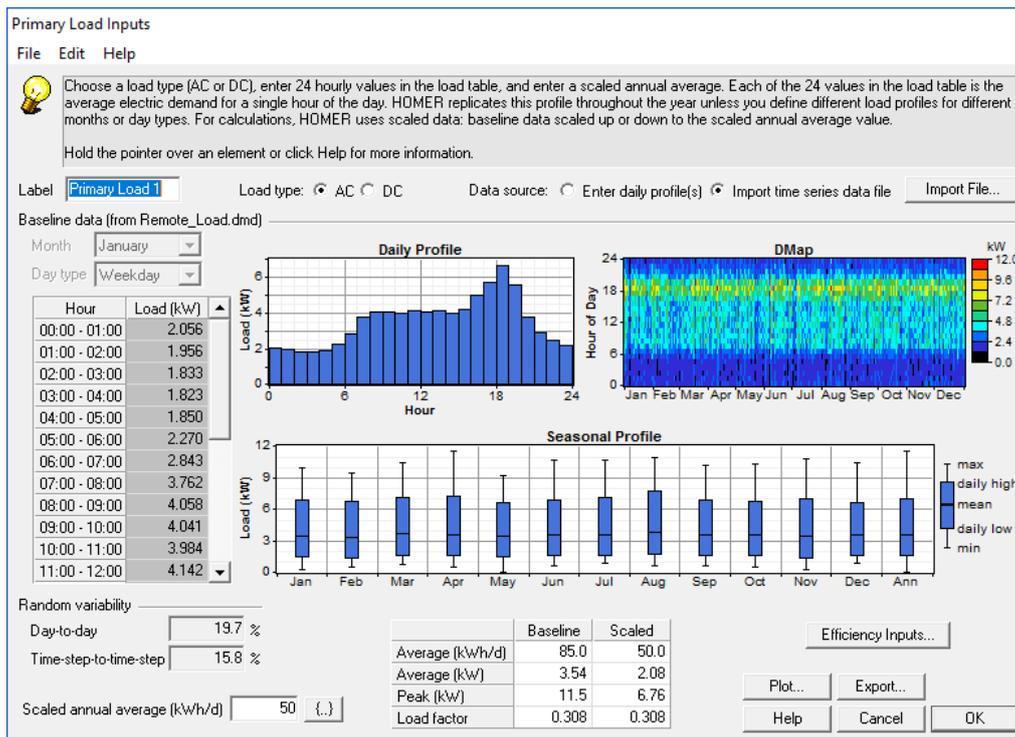


Figure A.14. Evolution horaire et mensuelle de la consommation.

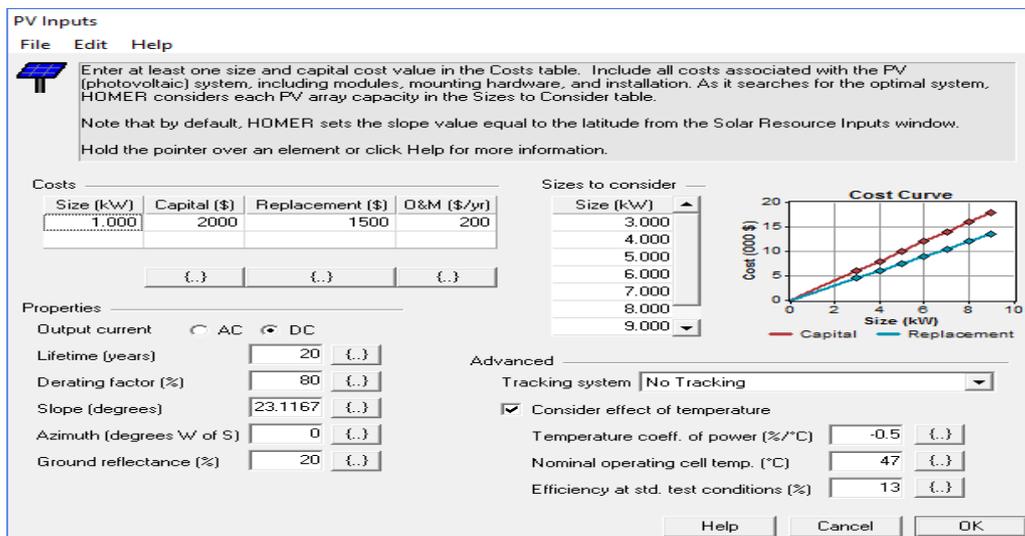


Figure A.15. Caractéristiques du générateur PV à utiliser.

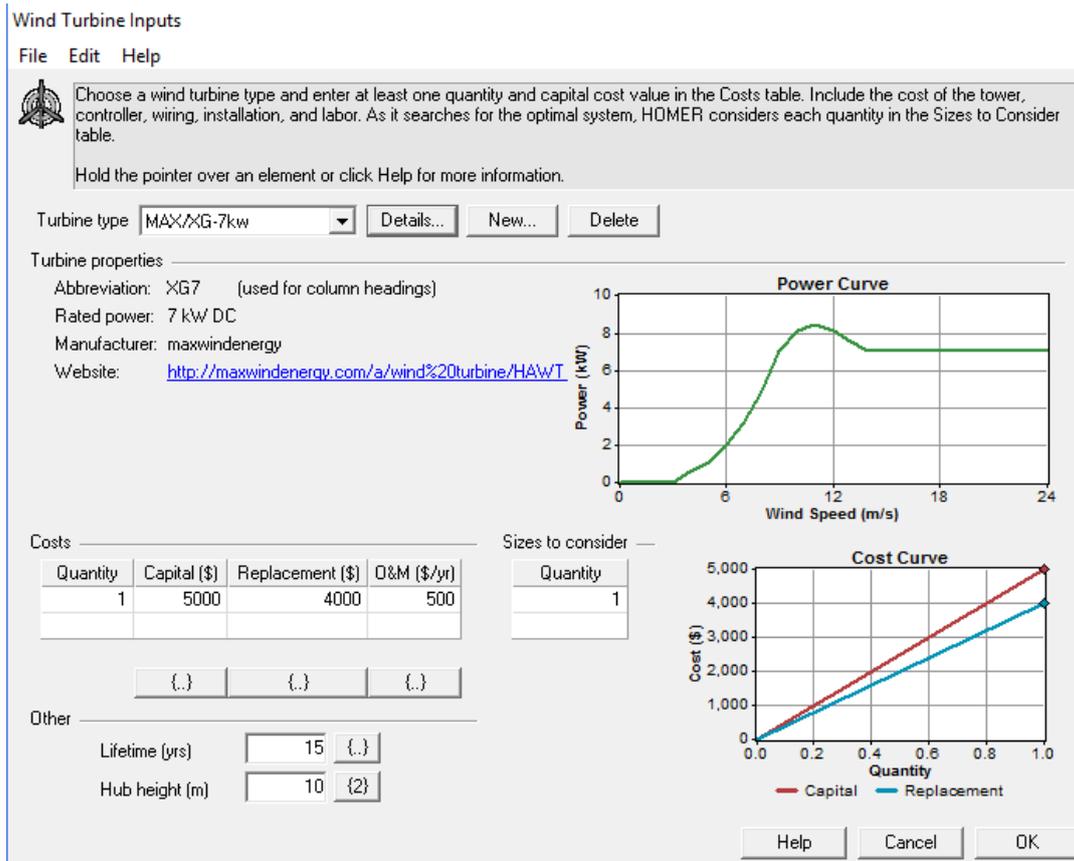


Figure A.16. Caractéristiques de générateur éolien à utiliser.

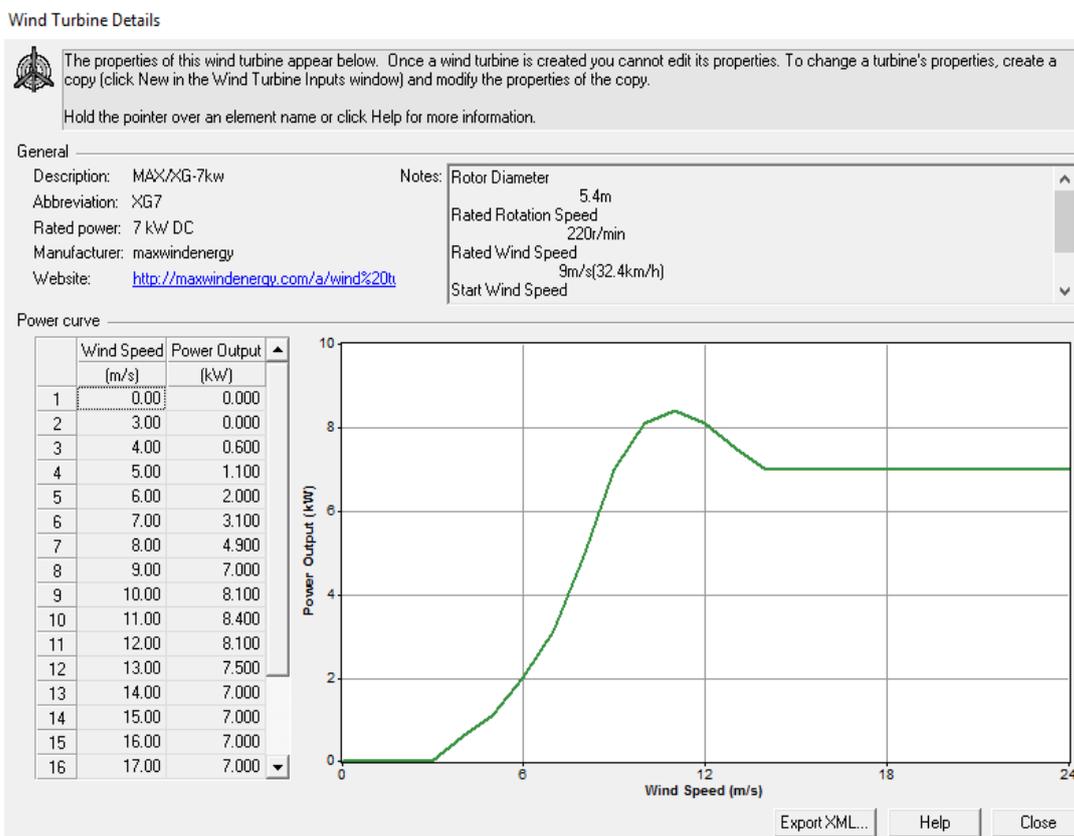


Figure A.17. Caractéristiques plus détaillées de générateur éolien.

Battery Inputs

File Edit Help

Choose a battery type and enter at least one quantity and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the battery bank, such as mounting hardware, installation, and labor. As it searches for the optimal system, HOMER considers each quantity in the Sizes to Consider table.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

Battery type: Hoppecke 16 OPzS 2000 Details... New... Delete

Battery properties

Manufacturer: Hoppecke  
 Website: [www.hoppecke.com](http://www.hoppecke.com)  
 Nominal voltage: 2 V  
 Nominal capacity: 2,000 Ah (4 kWh)  
 Lifetime throughput: 6,801 kWh

Costs

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
1	800	800	10.00
(.)	(.)	(.)	(.)

Sizes to consider

Strings
1
2
3
4
5

Advanced

Batteries per string:  (48 V bus)  
 Minimum battery life (yr):  (.)

Help Cancel OK

Figure A.18. Choix des batteries.

Battery Details

The properties of this battery appear below. Once a battery is created you cannot edit its properties. To change a battery's properties, create a copy (click New in the Battery Inputs window) and modify the properties of the copy. Hold the pointer over an element or click Help for more information.

General

Description: Hoppecke 16 OPzS 2000  
 Abbreviation: H2000  
 Manufacturer: Hoppecke  
 Website: [www.hoppecke.com](http://www.hoppecke.com)  
 Notes: vented lead-acid, tubular-plate, deep-cycle battery

Nominal capacity: 2000 Ah  
 Nominal voltage: 2 V  
 Round trip efficiency: 86 %  
 Min. state of charge: 30 %  
 Float life: 20 yrs  
 Max. charge rate: 1 A/Ah  
 Max. charge current: 406 A  
 Lifetime throughput: 6,801 kWh  
 Suggested value: 6,797 kWh

Calculated parameters

Maximum capacity: 2,373 Ah  
 Capacity ratio, c: 0.318  
 Rate constant, k: 1.24 1/hr

Capacity curve

Current (A)	Capacity (Ah)
203.00	2,030.00
349.80	1,749.00
509.00	1,527.00
1,061.00	1,061.00

Lifetime curve

Depth of Discharge (%)	Cycles to Failure
20	7,820
30	4,960
40	3,600
50	2,780
60	2,270
70	1,930
80	1,640

Export XML Help Close

Figure A.19. Caractéristiques de la batterie à utiliser.

**Converter Inputs**  
File Edit Help

A converter is required for systems in which DC components serve an AC load or vice-versa. A converter can be an inverter (DC to AC), rectifier (AC to DC), or both.

Enter at least one size and capital cost value in the Costs table. Include all costs associated with the converter, such as hardware and labor. As it searches for the optimal system, HOMER considers each converter capacity in the Sizes to Consider table. Note that all references to converter size or capacity refer to inverter capacity.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

**Costs**

Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
1.000	711	711	71
(.)	(.)	(.)	(.)

**Sizes to consider**

Size (kW)
5.000
6.000
7.000
8.000
9.000

**Cost Curve**

**Inverter inputs**

Lifetime (years)  (.)

Efficiency (%)  (.)

Inverter can operate simultaneously with an AC generator

**Rectifier inputs**

Capacity relative to inverter (%)  (.)

Efficiency (%)  (.)

Help Cancel OK

Figure A.20. Fenêtre des caractéristiques de convertisseur.

**Solar Resource Inputs**  
File Edit Help

HOMER uses the solar resource inputs to calculate the PV array power for each hour of the year. Enter the latitude, and either an average daily radiation value or an average clearness index for each month. HOMER uses the latitude value to calculate the average daily radiation from the clearness index and vice-versa.

Hold the pointer over an element or click Help for more information.

**Location**

Latitude  °  '  North  South Time zone: (GMT) Iceland, UK, Ireland, West Africa

Longitude  °  '  East  West

Data source:  Enter monthly averages  Import time series data file

**Baseline data**

Month	Clearness Index	Daily Radiation (kWh/m <sup>2</sup> /d)
January	0.715	5.015
February	0.693	5.603
March	0.603	5.666
April	0.639	6.685
May	0.573	6.304
June	0.507	5.651
July	0.505	5.574
August	0.601	6.378
September	0.659	6.408
October	0.762	6.436
November	0.685	4.956
December	0.598	3.982
Average:	0.619	5.720

**Global Horizontal Radiation**

Scaled annual average (kWh/m<sup>2</sup>/d)  (.)

Plot... Export... Help Cancel OK

Figure A.21. Données d'éclairage du site.

### A.5.1. Autres résultats de la simulation du système à 10 mètres :

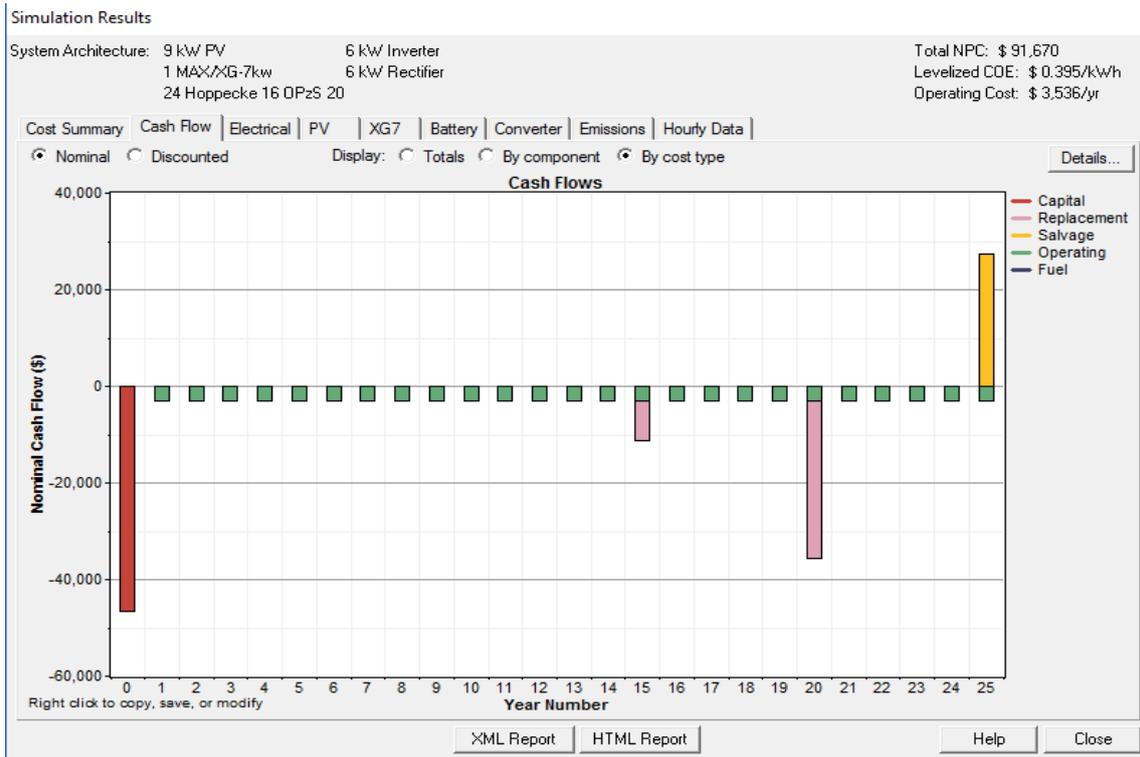


Figure A.22. Fenêtre des différents coûts du système durant sa durée de vie.

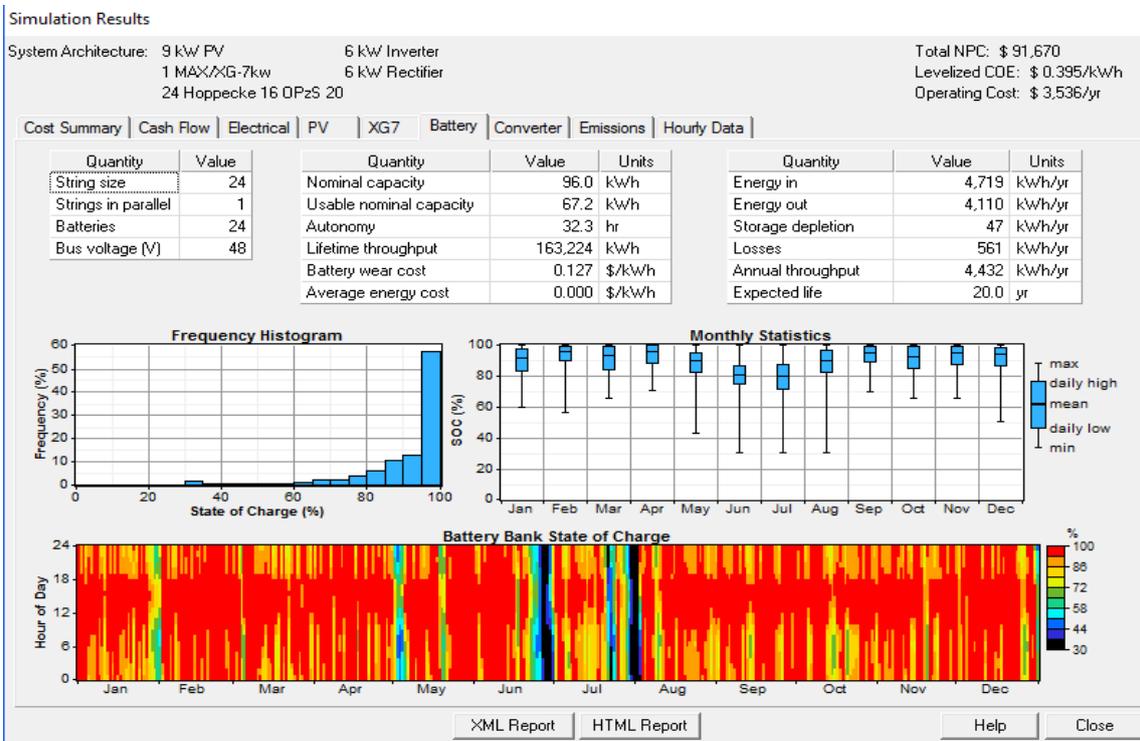


Figure A.23. Etat de charge/décharge des batteries.

## A.5.2. Autres résultats de la simulation du système à 40 mètres :

### A.5.2.1 Données mesurées :

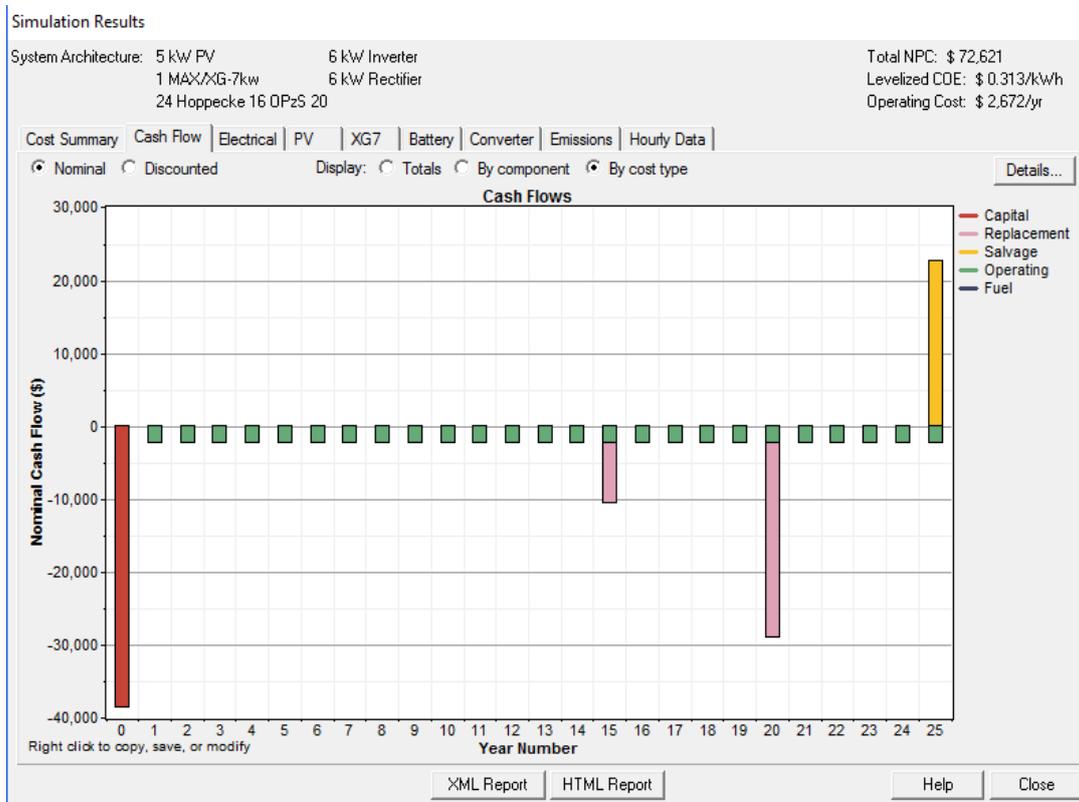


Figure A.24. Fenêtre des différents coûts du système durant sa durée de vie.



Figure A.25. Etat de charge/décharge des batteries.

### A.5.2.2. Extrapolation de la vitesse du vent par la loi de puissance 1/7 :

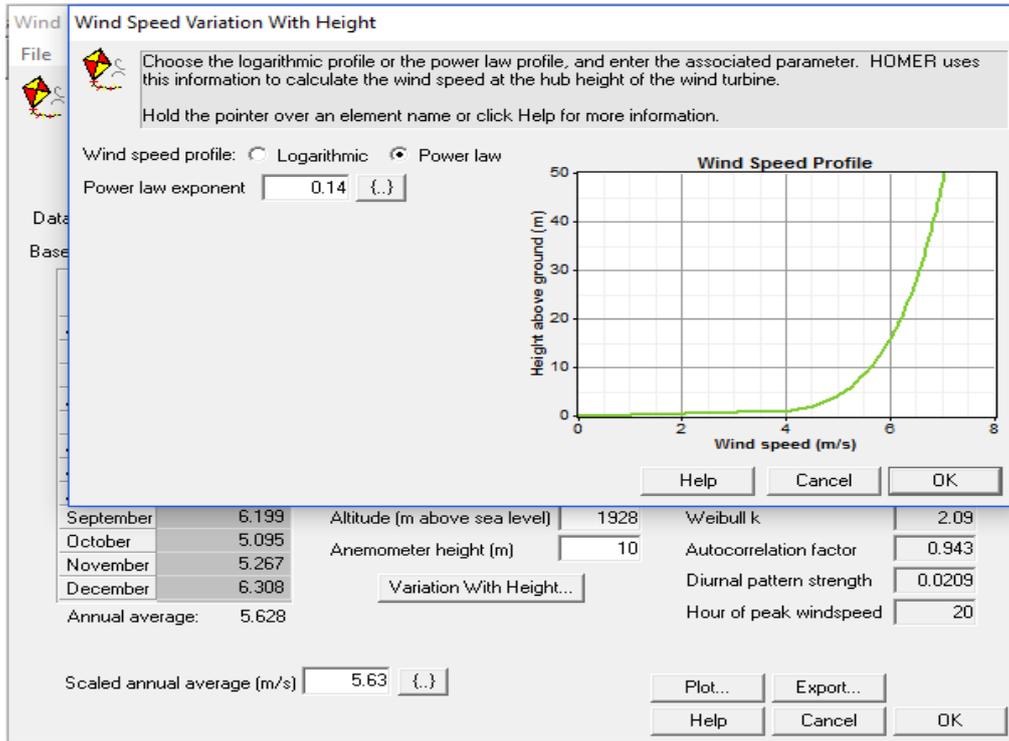


Figure A.26. Régulation de l'extrapolation sur la loi de puissance  $n=1/7$ .

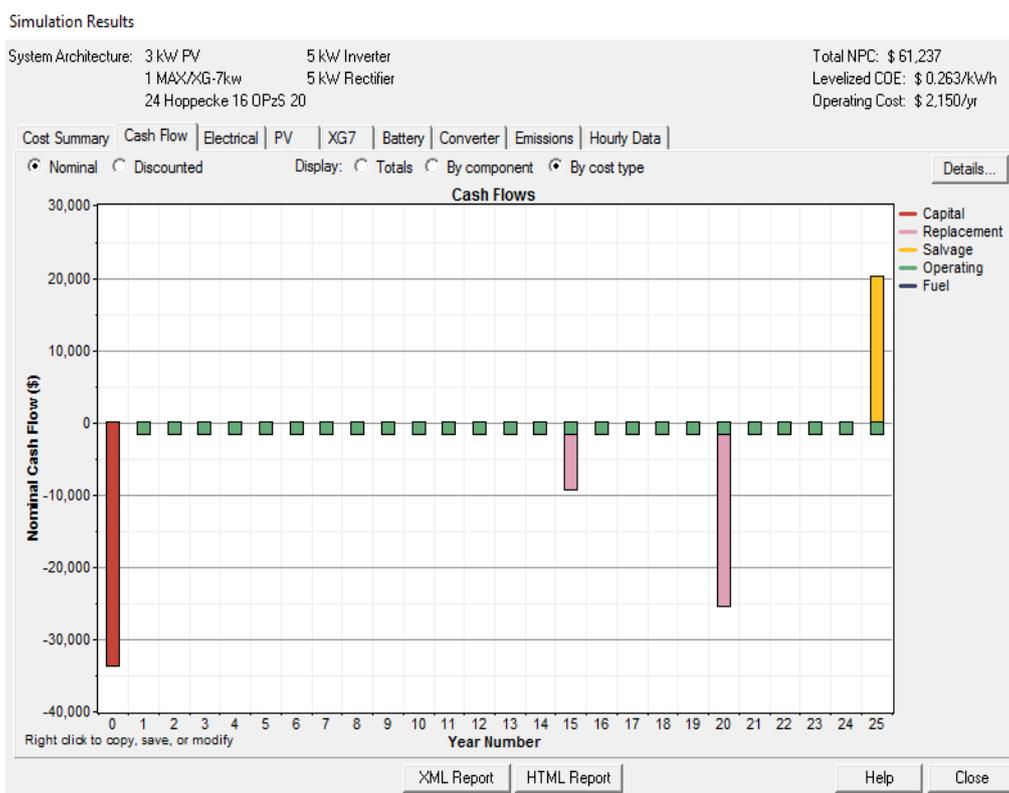


Figure A.27. Fenêtre des différents coûts du système durant sa durée de vie.

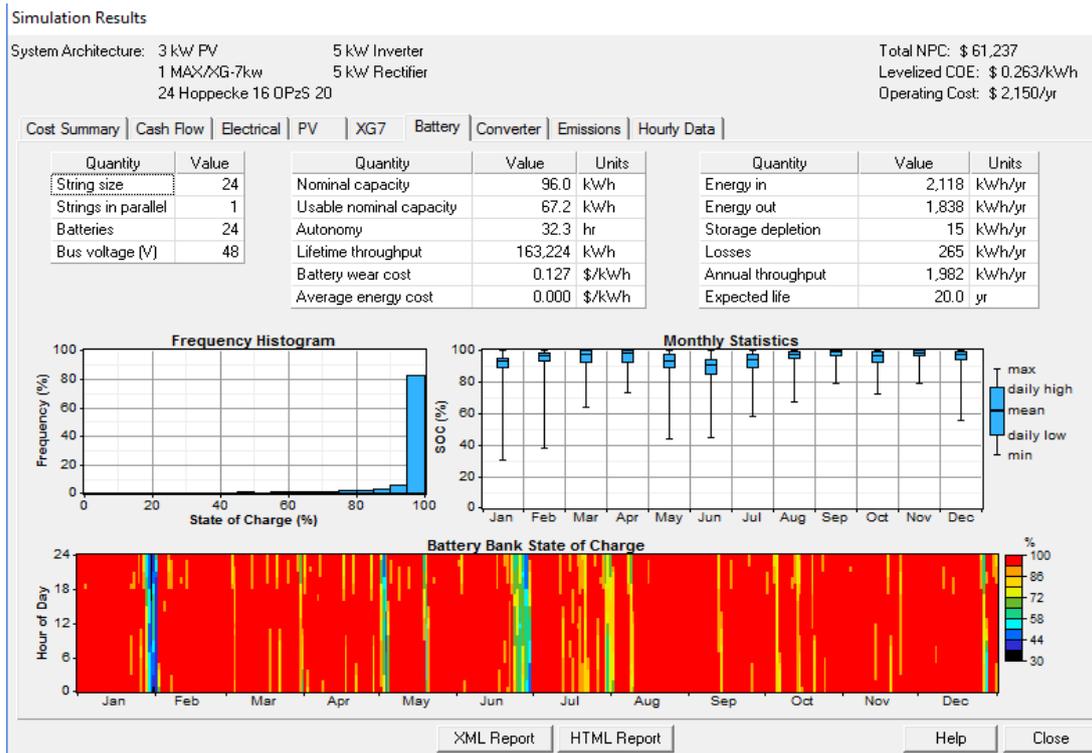


Figure A.28. Etat de charge/décharge des batteries.

### A.5.2.3. Extrapolation de la vitesse du vent par la loi logarithmique :

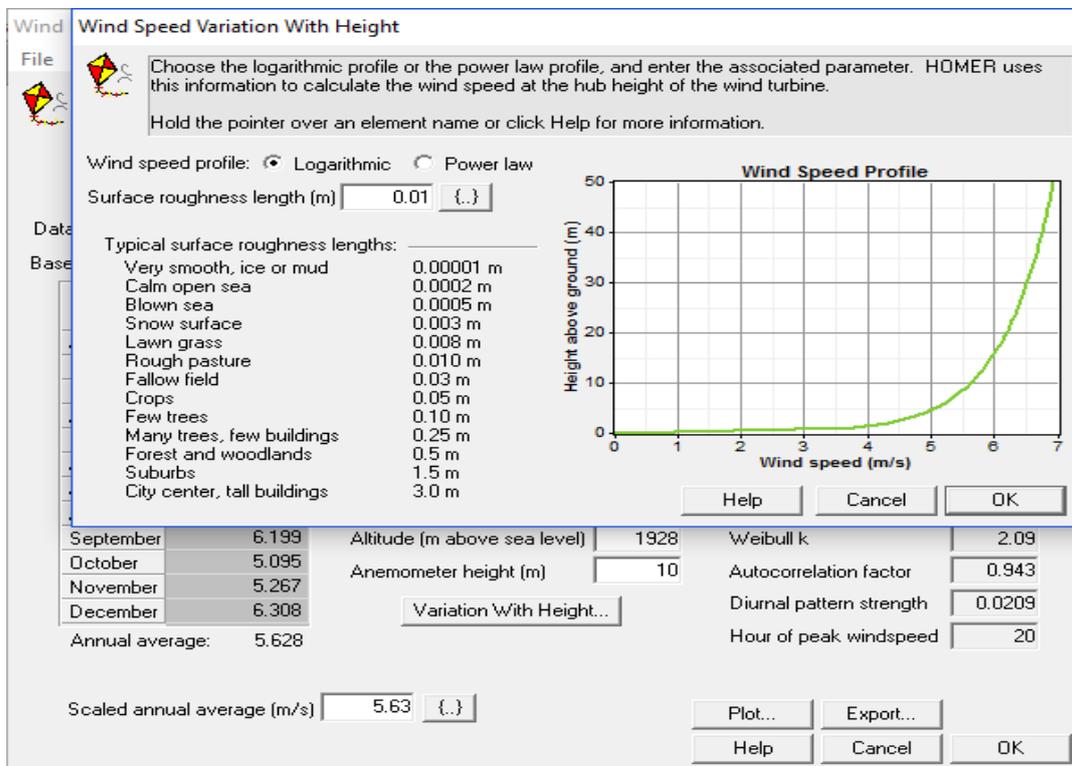


Figure A.29. Régulation de l'extrapolation sur la loi logarithmique.



Figure A.30. Fenêtre des différents coûts du système durant sa durée de vie.

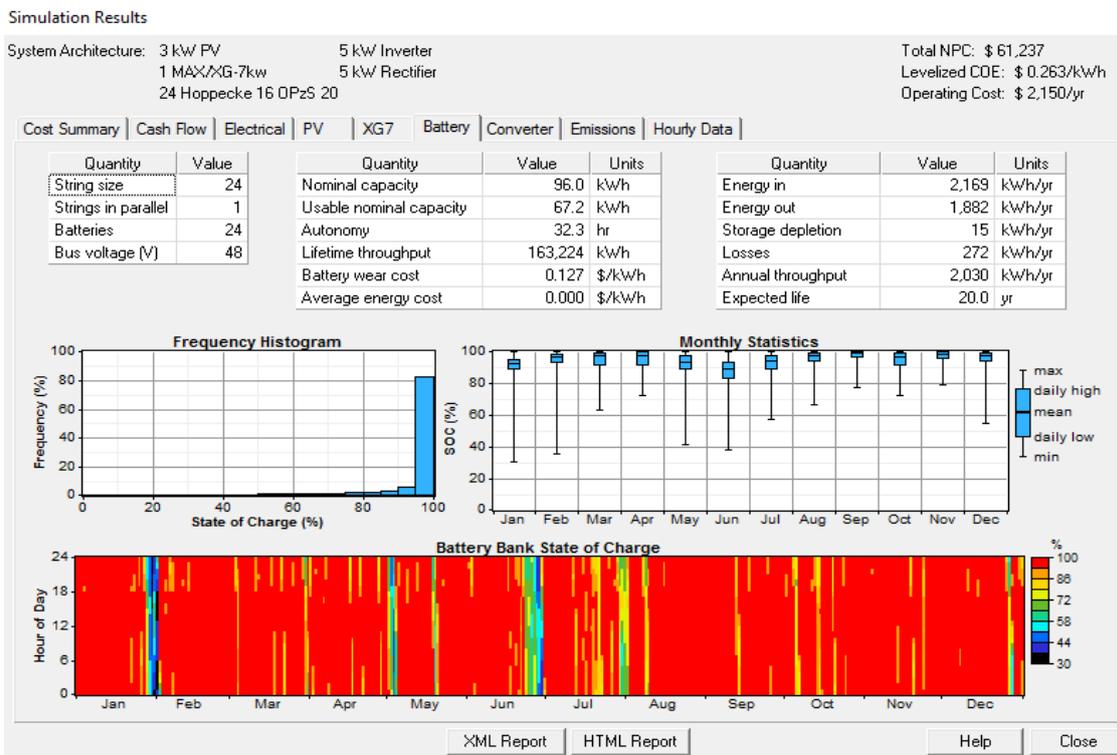


Figure A.31. Etat de charge/décharge des batteries.