



## MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : GENIE MECANIQUE

Option : THERMOFLUIDES

Thème :

**MODELISATION ET SIMULATION DES  
PERFORMANCES D'UNE INSTALLATION  
HYBRIDE DE CONVERSION D'ENERGIES  
RENOUVELABLES**

Présenté par :

**BAGHDADI Fazia**

Devant le jury composé de :

<b>M. DJENNOUNE Saïd</b>	<b>Professeur</b>	<b>UMMTO</b>	<b>Président</b>
<b>M. MOHAMMEDI Kamal</b>	<b>Professeur</b>	<b>UMBB</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>M. BILEK Ali</b>	<b>Maître de conférences A</b>	<b>UMMTO</b>	<b>Examineur</b>
<b>M. BOUTOUDJ Mohand Saïd</b>	<b>Maître de conférences A</b>	<b>UMMTO</b>	<b>Examineur</b>
<b>M. SADAOUI Djamel</b>	<b>Maître de conférences A</b>	<b>UAMB</b>	<b>Examineur</b>

Soutenu le : 26 /09 /2011

# Remerciements

*Je tiens tout d'abord à exprimer mes remerciements et ma profonde reconnaissance à M. Kamel MOHAMMEDI, Professeur, à l'Université, Um' Hamed Bougara Boumerdès qui est à l'origine de ce sujet. Ses idées et ses conseils ont été essentiels et enrichissantes pour l'aboutissement de ce mémoire.*

*Je remercie également tous les membres du jury pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon profond respect.*

*Je n'oublie pas de remercier le personnel du Centre De Développement Des Energies Renouvelables CDER de BOUZAREAH, pour mes nombreuses visites au centre et leur disponibilité à me remettre toutes les données dont j'ai besoin. En particulier M. Saïd DIAF, Maitre de recherche B, qui ma aidé et initié à la programmation sous Matlab et pour sa grande patience. Qu'il trouve ici l'expression de ma très vive reconnaissance.*

*J'adresse mes remerciements aux enseignants, bibliothécaires et administrateurs de l'institut de génie mécanique, au responsable et au personnel du laboratoire LMSE du département, à tous ceux qui ont contribué à ma formation de près ou de loin ces dernières années, et à tous ceux qui m'ont accompagnés amis et proches sans oublier tous mes collègues du département d'agronomie.*

*Mes sincères remerciements vont aussi à Nora, Sid Ali et Moh.*

*Enfin, je suis reconnaissante envers ma petite famille : ma mère, ma Sœur, mon frère, mon beau frère, ma belle sœur et mes adorables nièces Dounia, Marina, Sandra, Melissa et Anaïs qui ont été une source constante d'encouragement, de soutien et de joie.*

# SOMMAIRE

	PAGE
<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I :Etat de l'art sur le système d'énergie hybride</b>	
I.1 Introduction .....	3
I.2 l'origine de la notion du système.....	3
I.3 Définition et mission des systèmes hybrides.....	3
I.4 Principaux Composants des systèmes hybrides.....	4
I.4.1 Générateurs photovoltaïques.....	4
I.4.2 Les éoliennes.....	6
I.4.3 Les piles à combustibles.....	7
I.4.4 Générateur diesel .....	8
I.4.5 Systèmes de stockage :.....	8
I.4.6 Système de supervision.....	9
I.4.7 Convertisseurs.....	9
I.4.8 Charges.....	10
I.5 Structure des systèmes de génération.....	10
I.6 Alimentation en énergie des régions éloignées de tout réseau.....	11
I.7 Configuration de bus dans les systèmes hybrides.....	13
I.7.1 Architecture à bus à CC.....	14
I.7.2 Architecture mixte à bus à CC/CA.....	15
I.7.3 Configuration de bus CA.....	16
I.8 Dimensionnement des SEH.....	17
I.8.1 Commande des SEH.....	20
I.8.2 Stratégie de fonctionnement.....	20
I.9 Méthodes de modélisation et simulation des SEH.....	21
Conclusion .....	22
<b>Chapitre II :Présentation de la configuration choisie</b>	
II.1 Introduction.....	23
II.2 Présentation du site et caractéristiques de la charge.....	23
II.2.1 L'emplacement du Système hybride .....	23
II.2.2 Caractérisation de la charge et Prédétermination du profil énergétique de la demande.....	24
II.2.2.1 Chargement primaire .....	24
II.2.2.2 L'Unité De Dessalement.....	26
II.3 Estimation des ressources énergétiques solaire et éolienne.....	27
II.3.1 Potentiel éolien.....	27
II.3.2 Potentiel solaire .....	29
II.4 La configuration du système d'alimentation en énergie.....	30
II.4.1 Présentation de l'installation hybride étudiée.....	31
II.4.1.1 La turbine éolienne.....	32
II.4.1.2 Les panneaux photovoltaïques.....	35
II.4.1.3 Le générateur Diesel .....	36
II.4.1.4 Le système de stockage : Batteries.....	37
II.4.1.5 Les convertisseurs .....	37
II.5 Le fonctionnement de l'installation.....	40
II.5.1 Système modulaire couplé du côté AC.....	41
Conclusion.....	43
<b>Chapitre III : Étude de Préfaisabilité</b>	
III.1 Introduction.....	44
III.2 Application du logiciel HOMER pour l'optimisation: Bordj Cedria.....	44
III.2.1 Présentation de l'outil de simulation.....	44
III.2.2 Construire le schéma de conception du système hybride.....	45
III.2.3 Simulation.....	46
III.2.4 Résultats de la simulation des performances du système hybride.....	46
III.2.4.1 Configurations du SEH en fonction du coût net actuel.....	46
III.2.4.2 Production et la consommation d'énergie électrique.....	47
III.2.4.3 Le Générateur Photovoltaïque.....	49
III.2.4.4 Eolienne PROVEN 15.....	53
III.2.4.5 Le Générateur Diesel.....	55
III.2.4.6 Les Batteries.....	59
III.2.4.7 Le Convertisseur (Sunny Island 5048).....	62
III.2.4.8 Les Emissions Des Gaz.....	65
III.2.4.9 Répartition des coûts de l'installation.....	65
III.2.5 Cas d'une installation classique.....	67
III.2.5.1 Paramètres de Fonctionnement du Diesel.....	67
III.2.5.2 Les Emissions des Gaz.....	68
III.2.5.3 Répartition des coûts de l'installation.....	69
III.2.6 Comparaison entre les deux systèmes.....	69
III.2.7 Analyse de sensibilité.....	70
III.2.7.1 Les Configurations du SEH en fonction du prix du carburant.....	71
III.2.7.2 L'énergie produite par les différents générateurs en fonction du prix.....	72
1. Le générateur photovoltaïque .....	72
2. Le Générateur Eolien .....	73
3. Le Générateur Diesel .....	74
4. La fraction de l'énergie renouvelable produite.....	75
Conclusion.....	76
<b>Chapitre IV : Modélisation et simulation</b>	
IV.1 L'environnement MATLAB/SIMULINK.....	77
IV.1.1 Processus de simulation sous Simulink.....	78
IV.1.2 SimPowerSystems.....	78
IV.2 Modèles de simulation.....	78
IV.2.1 Caractéristiques du générateur Photovoltaïque.....	79
IV.2.2 Modèle éolien.....	92
IV.2.3 Modélisation de la batterie .....	97
IV.2.4 Modélisation du groupe électrogène.....	98
IV.3 Architecture de l'installation étudiée.....	99
Algorithme de gestion d'énergie.....	101
Conclusion.....	104
<b>Chapitre V : Résultats de Simulation et discussion</b>	
V.1 Résultats de simulation et discussion.....	105
V.1.1 Variation climatiques sur le site d'Adrar.....	105
V.1.2 Caractéristique de la charge choisie.....	108
V.2 Indices de performance du système étudié.....	109
V.2.1 Courbe de la puissance de l'éolienne.....	111
V.2.2 Évolution de l'état de charge des batteries.....	112
V.2.3 Évolution des énergies échangées au niveau du bus AC .....	114
V.2.4 Bilan énergétique mensuel pour la configuration du système étudié.....	116
Conclusion.....	119
<b>Conclusion générale</b> .....	120
<b>Références bibliographiques</b>	
<b>Annexes</b>	

## NOMENCLATURE

### Désignation latine

Symbole	Désignation	unité
$C_p$	Coefficient de puissance de l'éolienne	-
$\Omega$	Vitesse de rotation de la turbine	[tr/mn]
$V_v$	Vitesse du vent	[m/s]
$q$	Charge de l'électron	[C]
$I_{sc}$	Courant de court-circuit	[A]
$V_{oc}$	Tension en circuit ouvert	[V]
$I_S$	Courant de saturation	[A]
$I$	Courant fournie par la cellule	[A]
$I_{AC,nom}$	Courant nominal	[A]
$K$	Constante de Boltzmann	[J. K <sup>-1</sup> ]
$m$	Facteur de non idéalité de la jonction de la diode	-
$I_{ph}$	Courant créé par conversion de la lumière Photo-courant	[A]
$I_D$	Courant traversant la diode	[A]
$I_{mp}$	Courant maximal sous conditions standards	[A]
$V_{mp}$	Tension maximale du module sous conditions standards	[V]
$\beta_0$	Coefficient de la tension en fonction de température	[V/°C]
$\alpha$	Coefficient de courant en fonction de température	[A/°C]
$R$	Longueur de pales	[m]
$R_p$	Résistance shunt	[Ω]
$R_S$	Résistance Série	[Ω]
$U_{AC,nom}$	Tension nominale AC	[V]
$U_{Bat}$	Tension de la batterie	[V]
$V_{CELL}$	Tension aux bornes de la cellule	[V]
$A_c$	Surface de générateur	[m <sup>2</sup> ]
$P_m$	Puissance mécanique	[W]
$A$	Surface de balayage des pales de l'éolienne	[m <sup>2</sup> ]
$T_j$	Température de jonction de la cellule photovoltaïque	[K]

$E_s$	Irradiation solaire globale dans le plan des panneaux	[W/m <sup>2</sup> ]
$T_{amb}$	température ambiante	[°C]
$V_d$	Vitesse de démarrage de l'éolienne	[m/s]
$V_n$	Vitesse nominale de l'éolienne	[m/s]
$V_c$	Vitesse d'arrêt spécifique de l'éolienne	[m/s]
H	Hauteur du moyeu de l'éolienne	[m]
$C_{bat}$	Capacité de stockage de la batterie	[Ah]

### Désignation grecque

Symbole	Désignation	unité
$\lambda$	Coefficient de vitesse spécifique	-
$\lambda_{opt}$	Coefficient de vitesse spécifique optimal	-
$\beta$	Angle d'inclinaison des pâles du vent	[degré]
$\rho$	Densité de l'air	[kg/m <sup>3</sup> ]

### ABREVIATIONS UTILISEES

GD	: Générateur Diesel
PV	: Photovoltaïque
GPV	: Générateur Photovoltaïque
HOMER	: Hybrid Optimisation Model for Electric Renewable
NOCT	: Nominal Operating Cell Temperature
NPC	: Net Present Cost ou Valeur Actuelle Nette (VAN)
PPM	: Point de Puissance Maximale
RO	: Osmose Inverse
SEH	: Système D'énergie Hybride
STC	: Conditions standards de test des panneaux
$V_T$	: Potentiel thermodynamique
WT	: Turbine Éolienne
SMC	: Sunny Mini Central
WB	: Windy Boy
AM	: Masse d'air optique
MPPT	: Maximum Power Point Tracking
PAC	: Piles à combustible
AFC	: Alkaline Fuel Cell Pile Alcaline

PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell, Pile à Membrane Echangeuse de Protons  
 PAFC : Phosphoric Acid Fuel Cell, Pile à Acide Phosphorique  
 MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell, Pile à Carbonates Fondus  
 SOFC : Solid Oxide Fuel Cell , Pile à oxydes solides  
 DOD : Depth Of Discharge, Profondeur de décharge  
 CA : Courant Alternatif  
 CC : Courant Continu  
 Pc : Puissance crête  
 Wc : Watt crête  
 Bat : Indice pour "Batterie"  
 $\Delta T$  : Pas de temps de la simulation  
 ch : Indice pour "Charge"  
 $C_{bat\ min}$  : Capacité minimale de stockage de la batterie  
 $C_{bat\ max}$  : Capacité maximale de stockage de la batterie  
 SOC : Etat de charge de batterie  
 $\eta_{bat}$  : Rendement de la batterie  
 $\eta_{cha}$  : Rendement pendant le processus de la charge de la batterie  
 $\eta_{decha}$  : Rendement pendant le processus de la décharge de la charge  
 $\eta_{dc/ac}$  : Rendement du convertisseur CC/CA  
 $\eta_{ref}$  : Rendement de référence du générateur photovoltaïque  
 LPS : Loss of Power Supply  
 SURP : Indice pour " Surplus " de la production d'énergie  
 $W_p$  : Watt crête  
 $T_f$  : Temps du fonctionnement du générateur diesel  
 $P_{ge}$  : Puissance de sortie du générateur diesel  
 $P_{gen}$  : Puissance de sortie du générateur photovoltaïque  
 $N_{mod}$  : Nombre de modules dans le panneau PV  
 $P_{éol}$  : Puissance de sortie de l'aérogénérateur  
 $P_n$  : Puissance électrique nominale de l'éolienne  
 $V(H_m)$  : Vitesse du vent à la hauteur des mesures  
 $V(H)$  : Vitesse du vent à la hauteur H

# **Introduction générale**

### **Introduction générale**

Face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causés par l'émission des gaz à effet de serre, lors de l'exploitation de ces ressources, des ressources énergétiques alternatives ont été développées et doivent continuer à l'être.

Le développement et l'exploitation des ressources énergétiques renouvelables et des systèmes de production décentralisés d'électricité d'origine renouvelable ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici une vingtaine d'années, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Il est intéressant de les exploiter sur le lieu de consommation, en les transformant directement soit en chaleur, soit en électricité selon les besoins. Cette production 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.

Les techniques d'extraction de la puissance de ces ressources demandent des recherches et des développements plus approfondis visant à fiabiliser, baisser les coûts (de fabrication, d'usage et de recyclage) et augmenter l'efficacité énergétique.

La production d'électricité au moyen d'un **système hybride** combinant plusieurs sources d'énergies renouvelables est d'un grand intérêt pour les pays en développement, comme les pays de Maghreb. Ces pays possèdent de nombreuses régions, isolées et éloignées des réseaux classiques de distribution d'électricité. Ainsi, l'extension de ces réseaux serait d'un coût financier exorbitant. Pour résoudre ce problème, l'exploitation du potentiel en énergies renouvelables dont dispose ces pays doit être une priorité.

Le travail qui a été défini pour cette étude concerne une application stationnaire de petite taille, isolée du réseau, alimentée par un système hybride autonome. L'objectif assigné est d'étudier les performances d'un système hybride et d'évaluer les potentialités d'une installation de conversion d'énergies utilisant des sources renouvelables, un groupe électrogène comme générateur de secours et leurs hybridations avec des batteries et autres composant système. Par ailleurs, il fait état des récents développements concernant les systèmes de conversion de l'énergie renouvelables et les composants qui y sont associés. Ce travail présente aussi une modélisation et simulation d'un système de conversion hybride, appliquées pour deux sites isolés: Bordj Cedria en Tunisie et Adrar en Algérie.

Dans ce contexte, cette étude constitue une contribution pour une meilleure intégration des sources d'énergie renouvelable dans un **système d'énergie hybride SEH**.

Afin d'accomplir au mieux cette étude, le présent mémoire est structuré en cinq principaux chapitres en plus de l'introduction générale et de la conclusion générale.

Dans le premier chapitre, une recherche bibliographique sur les systèmes hybrides de génération d'énergie renouvelable pour des sites isolés a été faite. Nous nous intéressons à l'état de l'art, en particulier relatif aux sources d'énergie qui composent ces systèmes habituellement. Nous décrivons les différentes solutions technologiques permettant d'exploiter les différentes sources d'énergies renouvelables existantes en site isolé.

Le deuxième chapitre concerne une présentation de la configuration choisie. Nous présentons les principaux composants intégrés dans l'installation, les profils de charge et d'irradiation solaire et de vitesse du vent. Nous décrivons aussi les paramètres du système et les caractéristiques du site.

Le troisième chapitre est consacré à une étude de pré faisabilité. Nous abordons plus spécifiquement la question des configurations et les différentes simulations effectuées sous HOMER pour évaluer les performances de l'installation choisie, dans des conditions de fonctionnement autonome.

Dans Le quatrième chapitre, les composants principaux du SEH seront modélisés sous le code de calcul MATLAB/Simulink. Nous adoptons des modèles existants. Nous nous focalisons principalement sur la modélisation de source de production renouvelable ainsi que sur l'algorithme de gestion de l'énergie au sein d'un système hybride et autonome.

Dans le cinquième chapitre, nous exposons l'ensemble des résultats obtenus numériquement que nous interprétons.

Enfin, les principaux résultats de ce travail de recherche et les perspectives qui en résultent sont donnés ainsi qu'une conclusion générale.

# **Chapitre I**

## **Etat de l'art sur le système d'énergie hybride**

**I.1 Introduction**

Le terme « Système d'Énergie Hybride » fait allusion aux systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types de sources. La combinaison des sources d'énergie renouvelable comme l'éolienne, le photovoltaïque ou les petites centrales hydroélectriques peut constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes diesels. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées mais la présence du générateur diesel dans ce type de système hybride autonome suscite certaines discussions quant aux notions de « propreté » et de durabilité [1] et [2].

**I.2 l'origine de la notion du système.**

Un système est un ensemble d'objets organisés en fonction d'un but et immergé dans un environnement.

- Le système est un outil conceptuel,
- L'ensemble doit former une identité ou une unité cohérente et autonome,
- Les objets ou éléments peuvent être réels ou conceptuels,
- La notion d'organisation implique des relations, interrelations, interactions dynamiques entre les objets. (Définition de J. L. Le Moigne dans [3]).

**I.3 Définition et missions des systèmes hybrides**

Un système d'énergie hybride (SEH) est défini comme une installation qui utilise deux ou plus des technologies de la génération d'énergies : une ou plusieurs sources de production d'énergie classique (groupe diesel en général) et au moins une source de production d'énergies renouvelables. L'objectif d'utiliser des technologies multiples est de réunir les avantages et les meilleures caractéristiques opérationnelles de chaque système [4] et [5].

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

Dans l'un de ses travaux, Museli et al.[6] a suggéré que la configuration optimale pour les systèmes hybrides devrait être déterminée en minimisant le coût du kilowatt heure. Ashok [7] a développé pour sa part un modèle de système fiable basé sur un modèle d'optimisation hybride pour la production d'électricité renouvelable (HOMER). Ainsi, pour

trouver un système hybride optimal parmi des combinaisons de l'énergie renouvelable différentes nous procédons en minimisant le coût du cycle de la vie totale. La durée de vie des composants d'un SEH peut être beaucoup plus courte que la durée de vie normale des composants individuels (fonctionnement en réseaux interconnectés) [4]. Les points les plus critiques sont en général la dégradation des batteries, l'endommagement des démarreurs diesel et du système mécanique de freinage des éoliennes, ainsi que la carbonisation excessive des cylindres du moteur diesel.

Le champ d'application des SEH est très large et par conséquent, il est difficile de classer ces systèmes. On peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance (tableau I-1).

**Tableau I-1** : Classification des SEH par gamme de puissance.

Puissance du SEH [KW]	Application
Faible : < 5	Systèmes autonome : stations de télécommunications, pompage de l'eau, autre application isolés
Moyenne : 10-250	Micro réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, des zones rurales...
Grande : > 500	Grands réseaux isolés (ex : réseaux insulaires)

Les grandes installations de SEH en site isolé peuvent être classifiées en fonction du degré de pénétration de l'énergie renouvelable [5] défini par la proportion de la puissance (énergie) produite par les sources d'énergie renouvelable et la puissance demandée par la charge demandée.

#### **I.4 Principaux Composants des systèmes hybrides**

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

##### **I.4.1 Générateurs photovoltaïques**

Une cellule élémentaire composée de matériaux semi-conducteurs est capable de convertir l'énergie de photons reçus à sa surface en une différence de potentiel, créée par une délocalisation d'électrons dans le matériau. La circulation des électrons dans le circuit extérieur permet à la cellule PV de fonctionner comme un générateur.

Les cellules PV sont combinées ensemble pour former un module PV qui peut produire une certaine quantité d'énergie sous des conditions d'éclairement et de température

variables. Par la suite les modules PV peuvent être regroupés à leur tour afin de former un générateur PV. Il est dimensionné selon la puissance nécessaire pour une installation donnée [8].

La plupart des cellules PV mesurent autour de  $100 \text{ cm}^2$  et ne produisent qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt [9], [10] et [11].

Le rendement énergétique d'un module dépend de la nature des matériaux utilisés. Les valeurs communément rencontrées sont de l'ordre (13 à 16 % pour les cellules composées de silicium monocristallin, 11 à 13 % avec du silicium polycristallin et 7 à 8 % avec du silicium amorphe).

Les modules PV sont protégés par des diodes by-pass (diode by-pass, diode anti-retour) afin d'éviter le fonctionnement inverse des cellules occultées, pouvant entraîner une surchauffe voire une destruction de celles-ci.

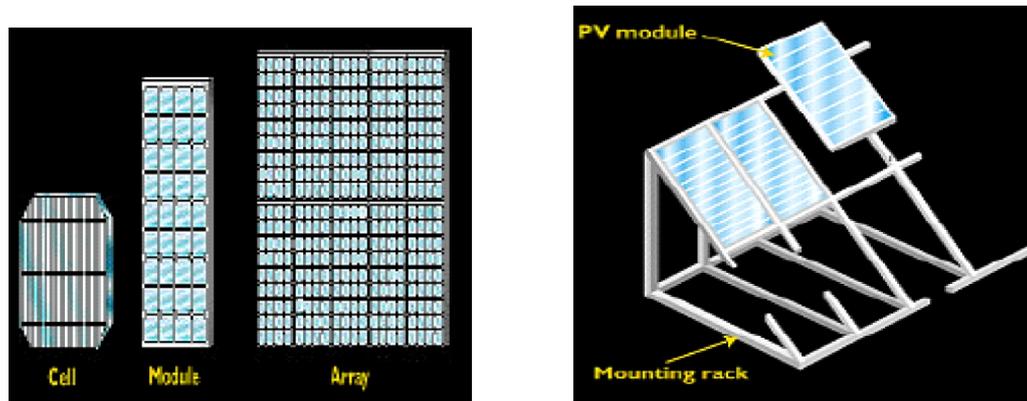


Figure I-4: Modules photovoltaïques sur support (Source: Web EREN, US Department of Energy)

### Caractéristiques d'un module

Voici la description des paramètres d'un module [12] :

- **La puissance crête  $P_c$**  : la puissance maximale produite par un module photovoltaïque dans les conditions standards : ensoleillement de  $1000 \text{ W/m}^2$  à l'horizontale, température ambiante de  $25^\circ\text{C}$ , masse d'air optique (AM) égale à 1,5.
- **La caractéristique I (V)**: Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- **Tension à vide  $V_{co}$**  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairage " plein soleil ".
- **Courant de court-circuit  $I_{cc}$**  : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairage " plein soleil ".

- **Point de fonctionnement optimum ( $U_m, I_m$ )** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $P_m = U_m \cdot I_m$
- **Rendement maximal** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule :  $V_{co} \cdot I_{cc}$ .

#### I.4.2 Eoliennes

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Un aérogénérateur (couramment appelé « éolienne ») est une machine qui utilise l'énergie éolienne pour produire de l'énergie électrique. La technologie des aérogénérateurs a énormément évolué ces 20 dernières années entraînant une spécialisation des différents types d'éolienne.

Le petit éolien, désigne les éoliennes de petites et moyennes puissances, de 100 watts à 20 kilowatts, montées sur des mâts de 10 à 35 mètres, raccordées au réseau ou bien autonomes en site isolé. Le petit éolien est utilisé pour produire de l'électricité et alimenter des appareils électriques (pompes, éclairage, ...) de manière économique et durable, principalement en milieu rural. Par exemple, une petite éolienne accompagnée d'un module solaire photovoltaïque et d'un parc de batteries peut garantir l'autonomie énergétique d'un voilier (éclairage, instruments de bord...).

L'élément essentiel pour qu'une petite éolienne soit économiquement rentable est le vent, qui doit être à la fois puissant et fréquent. Les petites éoliennes classiques sont généralement à axe horizontal. Elles comprennent le plus souvent deux à trois pales [13].

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

- Basculement (relèvement) de l'axe, normalement horizontal [14];
- Pas variable par pression du vent. Les pales en fibre se déforment et provoquent un décrochage;
- Déviation par rapport à l'axe du vent. Le rotor se trouve légèrement décalé par rapport à l'axe de rotation et crée une force de déviation qui régule la puissance aérodynamique.

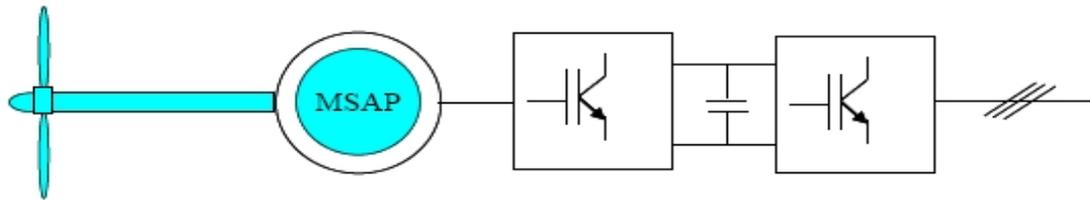
La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Cette configuration basée sur la caractéristique de la vitesse. Le fait

qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration.

Les deux types de machine électrique les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et les machines asynchrones. Celle utilisée dans cette étude est la génératrice synchrone.

### Génératrices synchrones

Dans le cas des entraînements directs (sans multiplicateur mécanique), on utilise des machines synchrones (voire figure I- 6). Leurs performances, notamment en terme de couple massique, sont très intéressantes lorsqu'elles ont un très grand nombre de pôles. Leur fréquence étant alors incompatible avec celle du réseau, le convertisseur de fréquence s'impose naturellement. C'est pourquoi les machines à entraînement direct sont toutes à vitesse variable.



**Figure I- 6** : Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents [15]

Les performances des machines synchrones multipolaires, notamment en termes de couple massique, sont très intéressantes. Leur vitesse de rotation étant différente de celle liée à la fréquence du réseau, le convertisseur de fréquence s'impose. Ce type de générateur à inducteur bobiné nécessite un système de bagues et balais pour transmettre le courant continu (Figure I-9). Le courant d'excitation constitue un paramètre de réglage qui peut être utile pour l'optimisation énergétique, en plus du courant d'induit réglé par l'onduleur.

### **I.4.3 Piles à combustibles**

Parmi les technologies envisagées pour l'avenir en termes de production d'énergie électrique décentralisée, la pile à combustible est considérée comme une solution très prometteuse [16].

Ce convertisseur d'énergie, à la fois propre et efficace, permet de convertir l'énergie chimique de l'hydrogène, vecteur énergétique fortement pressenti pour le futur par de grands spécialistes mondiaux au vu de son énergie massique 3 fois plus importante que l'essence, en une énergie électrique, utilisable directement, et une énergie thermique qu'il

est possible de valoriser. L'utilisation de cette cogénération permet d'atteindre des rendements très intéressants, jusqu'à 80% dans certains cas.

Les piles à combustibles (PAC), générateurs statiques d'électricité et de chaleur. Deux technologies sont actuellement prometteuses et connaissent d'intenses efforts de R&D. D'une part les PAC à membrane polymère PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) fonctionnant à des températures basses comprises entre 50 et 90 °C qui sont les plus développées. Le rendement en électricité, supérieur à 80% en théorie, est supérieur à 50% en pratique. D'autre part les PAC à oxydes solides SOFC (Solid Oxyde Fuel Cell) fonctionnant à des températures supérieures à 600 °C ce qui implique un moins haut rendement mais permet de valoriser la chaleur produite en cogénération.

#### I.4.4 Générateur diesel

Dans le cas des installations à sources d'énergie renouvelables autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage ou d'ajouter un ou plusieurs groupes électrogènes diesels. Dans un SEH, le générateur classique est généralement le moteur diesel directement couplé au générateur synchrone (figure I-11). La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un gouverneur de vitesse (régulateur de vitesse) sur le moteur diesel [17]. Le gouverneur fonctionne en ajustant le flux de carburant au diesel, pour garder la vitesse du moteur et la vitesse du générateur constante. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré.

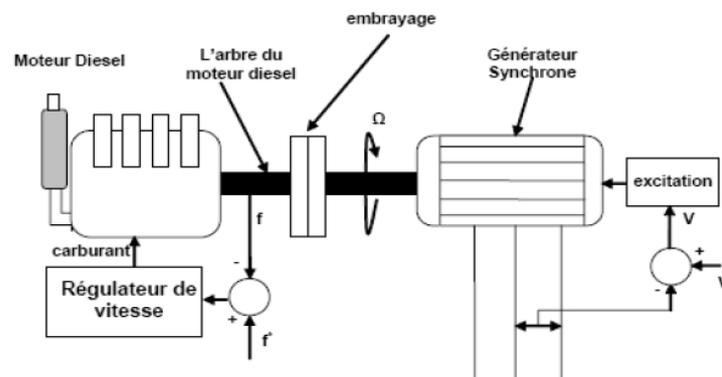


Figure I-11 : Configuration du générateur diesel [18]

Les réseaux de courant alternatif avec diesel, tout comme ceux interconnectés fournissent pour leurs charges, deux formes d'énergie : active et réactive.

Quand plusieurs générateurs diesels fournissent de l'énergie au réseau, ceux-ci sont connectés généralement à un bus à CA. Dans ce cas, un système de commande doit être utilisé pour une distribution correcte de la puissance fournie par les générateurs diesels.

**I.4.5 Systèmes de stockage**

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

Le stockage d'énergie est souvent utilisé dans les petits systèmes hybrides à fin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours). Il est parfois aussi utilisé avec les SEH connectés à des grands réseaux de courant alternatif isolés. Dans ce cas, il est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme [19].

L'emploi des batteries plomb-acide est sujet à des contraintes qu'il est nécessaire de respecter pour garantir son bon fonctionnement et sa longévité. Elles ne peuvent rester longtemps inutilisées sans conséquences néfastes sur leur durée de vie. Les cycles répétés de charge/décharge aléatoires doivent être évités. Leur état de charge ne doit pas atteindre de valeurs extrêmes pour éviter toute dégradation prématurée [8].

**I.4.6 Système de supervision**

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

**I.4.7 Convertisseurs**

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

- Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Dans le SEH, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement ils sont généralement monophasés ou triphasés.

- Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge.
- Les hacheurs, le troisième type de convertisseurs, permettent de réaliser la conversion CC/CC pour adapter la tension entre deux sources.

#### **I.4.8 Charges**

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

#### **I.5 Structure des systèmes de génération**

En plus d'un ou plusieurs générateurs diesels (GD) et d'au moins une source d'énergie renouvelable, un SEH peut aussi incorporer un système de distribution à courant alternatif (CA), un système de distribution à courant continu (CC), un système de stockage, des convertisseurs, des charges, des charges de délestage et une option de gestion des charges ou un système de supervision. Toutes ces composantes peuvent être connectées en différentes architectures. Celles-ci sont résumées dans la Figure I-13. Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides classiques contiennent deux bus [20] : 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.

Les sources d'énergie renouvelable peuvent être connectées au bus à CA ou à CC en fonction de la dimension et la configuration du système. L'interconnexion entre les deux bus peut être réalisée par l'intermédiaire de l'électronique de puissance : onduleurs/redresseurs ou convertisseurs bidirectionnels. A part la charge principale, un système hybride peut contenir aussi des charges auxiliaires (charge différée, charge optionnelle, charge de délestage) pour réaliser l'équilibre énergétique. Si la charge principale est alimentée sans interruption, les charges auxiliaires sont alimentées en énergie par ordre de priorité, seulement quand il existe un surplus d'énergie. Ainsi, dans un SEH avec des batteries de stockage et charges auxiliaires, s'il existe un excès d'énergie (venant des sources d'énergie renouvelable et des diesels), celui-ci passera d'abord dans les batteries et ensuite, il sera utilisé pour alimenter les autres charges auxiliaires en fonction

de leur priorité. Dans un tel système, les batteries de stockage jouent un double rôle : charge et source.

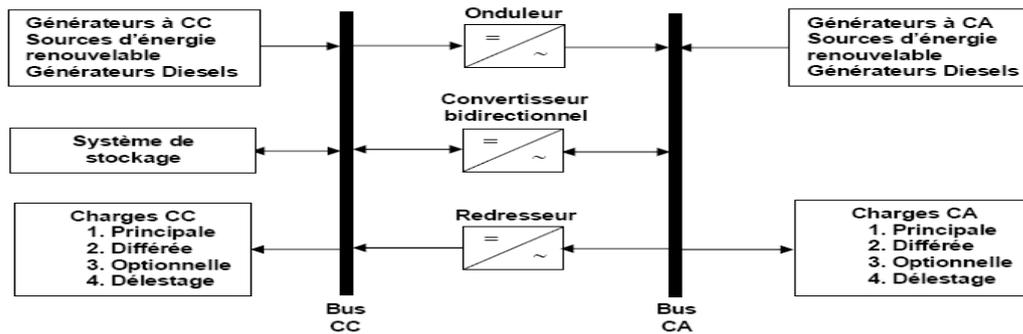


Figure I-13 : Architecture des SEH

## I.6 Alimentation en énergie des régions éloignées de tout réseau

### Les systèmes autonomes et isolés

On peut potentiellement envisager l'utilisation d'un système d'énergie hybride via des alternatives énergétiques possédant les mêmes propriétés que les hydrocarbures tel que : Les énergies renouvelables pour tout système nécessitant de l'énergie. Néanmoins, aujourd'hui, la mise en application de ce type de systèmes reste encore limitée aux sites isolés. Il reste à fournir d'importants efforts de recherche et de développement afin de démontrer leur viabilité et d'identifier des applications bien adaptées à leur utilisation. Des recherches sont en cours pour améliorer le coût et le rendement des composants du système (rendement des panneaux solaires, des aérogénérateurs, convertisseurs, etc.). On recense à l'heure actuelle de nombreux projets de réalisation de systèmes électriques, intégrant entre autres, des sources renouvelables et un stockage d'énergie via batteries de stockage et hydrogène, installation isolée.

### Exemples de topologies de systèmes hybrides

Nous présentons ici une rapide synthèse des études de quelques topologies possibles pour un système hybride, qui ont été réalisées et qui nous ont conduits à l'étude de ces systèmes.

Quelques exemples, habituellement utilisés à l'échelle industrielle, d'architectures de chaînes de conversion d'énergie sont donnés en association avec différents types de génératrices. Dans les limites de nos travaux, nous nous sommes intéressés à des systèmes hybrides de petite puissance dédiés à un site isolé et autonome.

### Solaire-éolien, batteries de stockage, installation isolée

Fréquemment rencontrée dans les pays développés : alternative au réseau et dans les pays en voie de développement : électrification rurale

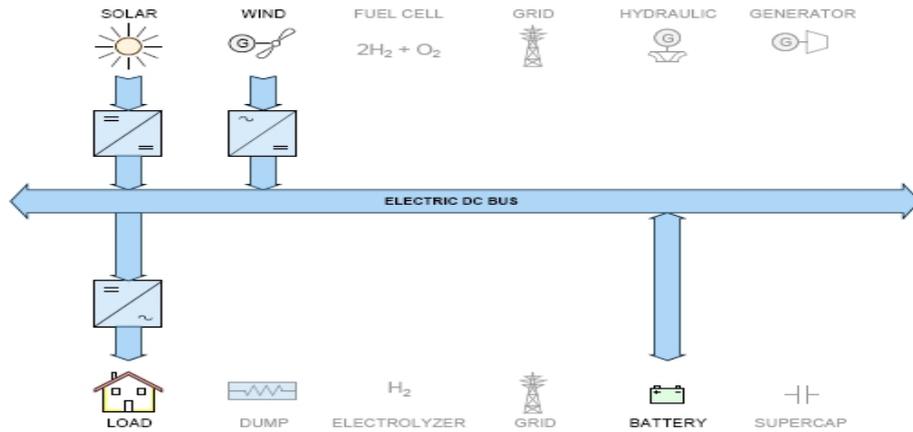


Figure I.15: Solaire-éolien, stockage à batteries, installation isolée [21]

**Solaire-éolien, batteries de stockage et hydrogène, installation isolée**

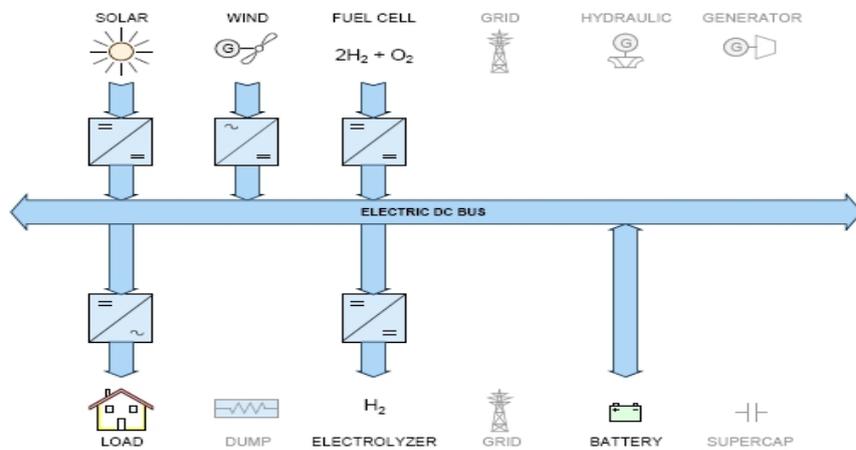


Figure I.16: Solaire-éolien, batteries de stockage et hydrogène, installation isolée [22]

**Solaire-éolien, stockage à hydrogène, installation isolée**

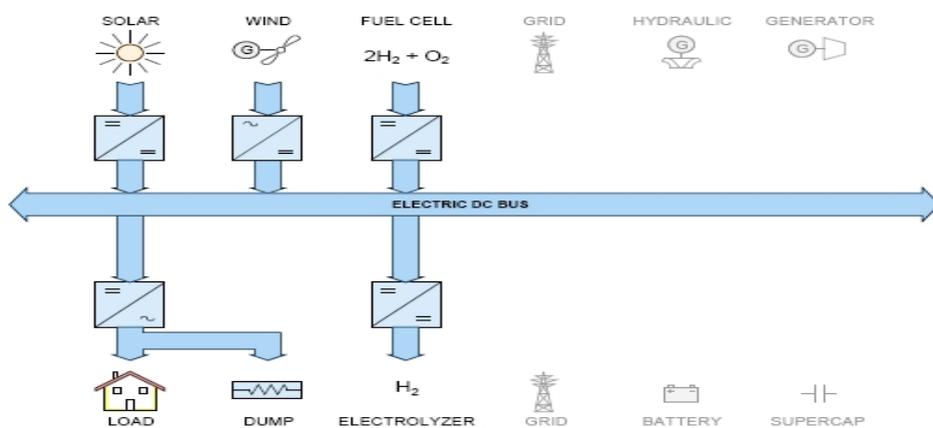


Figure I.17 : Solaire-éolien, stockage à hydrogène, installation isolée [23]

### Éolien, stockage à hydrogène et par supercondensateurs, installation isolée

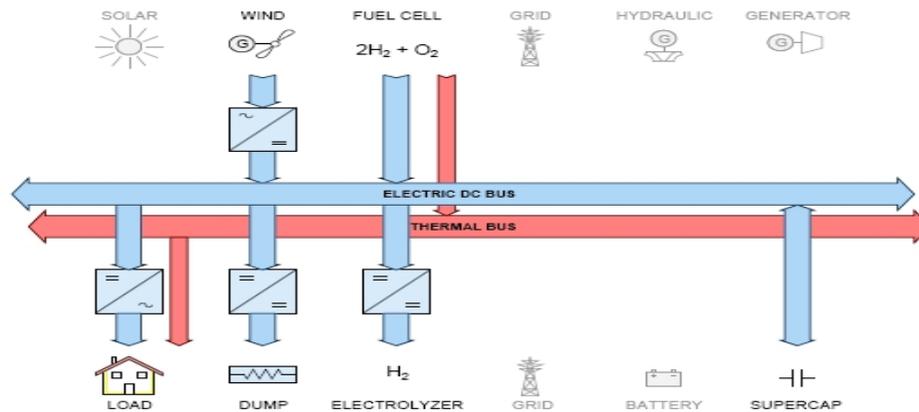


Figure I.18: Éolien, stockage à hydrogène et par super condensateurs, installation isolée [24]

### Éolien-diesel, stockage à hydrogène, installation isolée

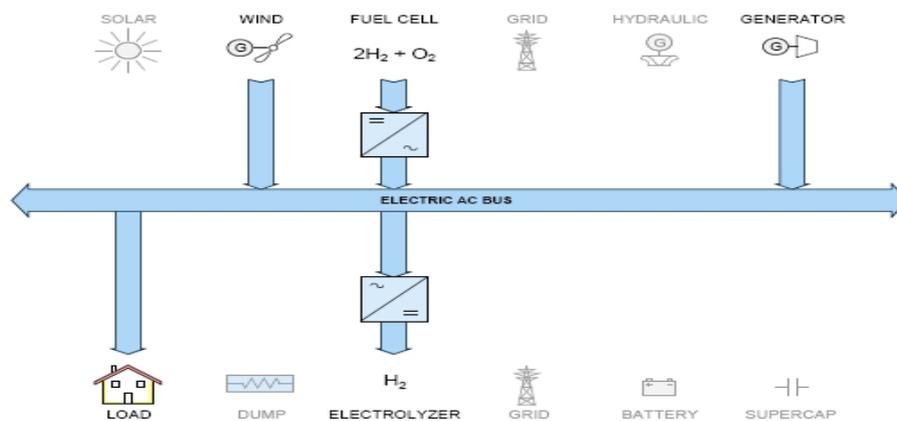


Figure I.19: Éolien-diesel, stockage à hydrogène, installation isolée [25]

On a présenté un aperçu des topologies des systèmes hybrides les plus répandues. Les figures (I.15 - I.16- I.17 -I.18- I.19) montrent les diagrammes schématiques de quelques exemples des types de systèmes hybrides.

L'analyse des divers systèmes présents en littérature montre un schéma (modèle) général de système hybride, avec des types différents de convertisseurs nécessaires CA/CC – CC/CC, unidirectionnel – bidirectionnel, différents niveaux de tensions et courants ainsi que des systèmes de contrôle différents.

### I.7 Configuration de bus dans les systèmes hybrides

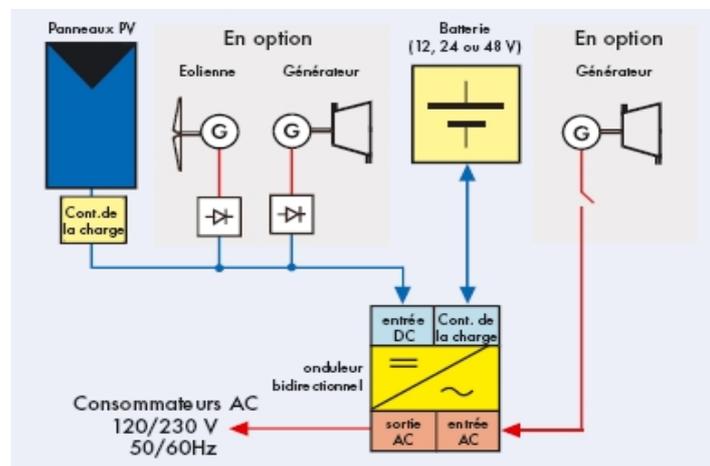
Les générateurs électriques d'un SEH peuvent être connectés en différentes configurations. Ces configurations constituées par des sources d'énergies renouvelables, des batteries et des générateurs diesels se résument en trois types :

Architecture à Bus CC (bus à courant continu) et architecture à Bus CC-CA (la connexion mixte, bus à CA et bus à CC) [26], architecture à Bus CA (bus à courant alternatif) [27]. Nous présenterons ci-après, une description ainsi que les avantages et les inconvénients de chaque configuration.

### I.7.1 Architecture à bus à CC

Cette technologie est née du besoin de coupler des consommateurs CA (plage de puissance moyenne) avec des générateurs CC et, de plus, de charger la batterie du côté CC par le biais d'un groupe électrogène (à ce propos, voir la figure I.19).

Ces configurations d'installation servent à l'alimentation de consommateurs éloignés (par ex. petites entreprises ou fermes). La plage de puissance globale est située entre 1 et 5 kW, la tension CC allant de 12 à 48 V.



**Figure I.20:** Petits systèmes de puissance CA avec composants couplés du côté CC [28]

Un couplage CC (toute l'énergie converge vers un bus CC)[29][30]. Dans le système hybride présenté dans la figure I-20, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus à CC. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à CA fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie en CC. Le ou les générateur(s) diesel(s) sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges à CA. Les générateurs diesels ne peuvent donc pas alimenter les charges à CA directement. L'onduleur doit alimenter les charges à CA à partir du bus à CC et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence [31]. Les batteries et l'onduleur sont dimensionnés pour alimenter des pics de charge, alors que le générateur diesel est dimensionné pour alimenter les pics de charge et les batteries en même temps. La puissance délivrée peut être contrôlée par la commande du courant d'excitation de la partie électrique du générateur diesel ou en incorporant un régulateur de charge dans les sources d'énergie renouvelable. Les avantages et les désavantages d'un tel système sont présentés ci-après.

### Avantages

- La connexion de toutes les sources sur un bus à CC simplifie le système de commande.
- Le générateur diesel peut être dimensionné de façon optimale, c'est-à-dire de sorte à fonctionner à puissance nominale pendant le processus de chargement des batteries jusqu'à un état de charge de 75-85 %.

### Inconvénients

- Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.
- Les générateurs diesels ne peuvent pas alimenter directement la charge, l'onduleur doit donc être dimensionné pour assurer le pic de charge.

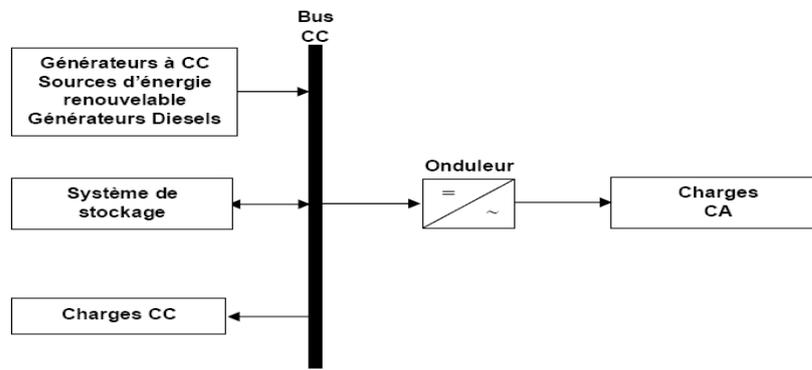


Figure I-21 : Configuration du SEH à bus CC

### I.7.2 Architecture mixte à bus à CC/CA

La configuration à deux bus, à CC et à CA, est présentée dans la figure I-21. Celle-ci a des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure (un couplage CC). Dans cette configuration, les sources d'énergie renouvelable et les générateurs diesels peuvent alimenter une partie de la charge à CA directement, ce qui permet d'augmenter le rendement du système et de réduire la puissance nominale du GD et de l'onduleur. Le ou les générateur(s) diesel(s) et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle en synchronisant leurs tensions en sortie. Les convertisseurs situés entre les deux bus (le redresseur et l'onduleur) peuvent être remplacés par un convertisseur bidirectionnel, qui, en fonctionnement normal, réalise la conversion CC/CA (fonctionnement onduleur) [32], [33]. Quand il y a un surplus d'énergie de la part du générateur diesel, il peut aussi charger les batteries (fonctionner en redresseur).

L'onduleur bidirectionnel peut alimenter les pics de charge quand le générateur diesel est surchargé.

Pour les systèmes hybrides ayant une puissance en-dessous de 100 kW, la connexion mixte, bus à CA et bus à CC, avec des batteries de stockage, est très répandue [34] [35].

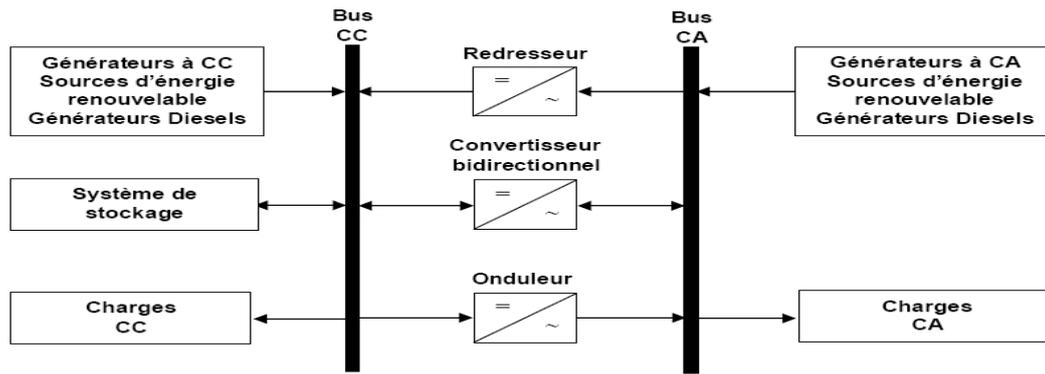


Figure I-22 : Configuration du SEH à deux bus à CC et à CA

### Avantages

- Le GD et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle. Quand le niveau de la charge est bas, l'un ou l'autre peut générer le nécessaire d'énergie. Cependant, les deux sources peuvent fonctionner en parallèle pendant les pics de charge.
- La possibilité de réduire la puissance nominale du GD et de l'onduleur sans affecter la capacité du système d'alimenter les pics de charge.

### Inconvénients

- La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle (l'onduleur doit être capable de fonctionner en autonome et non-autonome en synchronisant les tensions en sortie avec les tensions en sortie du GD).

### I.8.3 Configuration de bus CA

De nouvelles approches sont proposées pour améliorer la modularité par un couplage CA (toute l'énergie converge vers un même bus CA) [36][37]. Toutes les sources de productions sont reliées au bus AC via des convertisseurs sauf le générateur diesel qui peut fixer la fréquence de bus.

#### L'aspect pratique de la configuration de bus exclusivement CA.

Un couplage de tous les consommateurs et de tous les générateurs du côté CA (voir fig. 22) permet désormais de réaliser des systèmes flexibles constitués de composants modulaires. En fonction de l'application et des sources d'énergie disponibles, il est possible d'intégrer différentes sources énergétiques, aussi bien renouvelables que conventionnelles.

Le système peut en outre être élargi en toute simplicité par ajout de composants ou de générateurs électriques pour répondre à des besoins en énergie croissants.

Ces structures peuvent être utilisées pour l'alimentation de tous les consommateurs électriques, y compris dans les régions rurales des pays en voie de développement et des

pays nouvellement industrialisés dans lesquels l'électricité, l'approvisionnement en eau et la purification de l'eau potable sont des besoins vitaux.

L'ingénierie des systèmes modulaires avec couplage du côté CA a été développée pour la première fois par l'Institut national de l'énergie solaire (ISET, Université de Kassel) et par l'entreprise SMA Technologie AG.

L'utilisation du courant alternatif présente plusieurs avantages et inconvénients :

### Avantages

- Un découplage des différentes sources de production, ce qui permet d'agir de façon assez indépendante les unes sur les autres ;
- Le générateur diesel peut fixer la tension et la fréquence de bus (AC).
- Capacité d'augmenter et de réduire la tension à l'aide d'un simple dispositif passif (transformateur);
- Appareillage de connexion bon marché et disponible facilement;
- Les circuits triphasés produisent un champ magnétique rotatif permettant des moteurs compacts et efficaces;
- La fréquence peut être utilisée comme moyen de contrôle (dérive de fréquence) [38].

### Inconvénients

- Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs ;
- La connexion de toutes les sources sur un bus à CA complique le système de commande

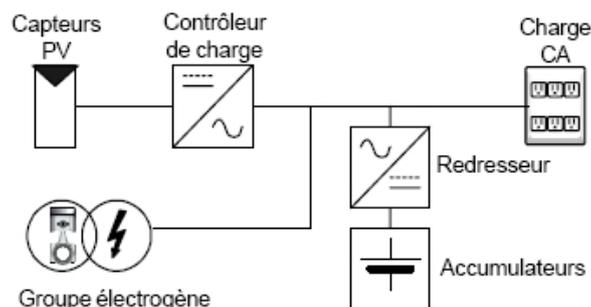


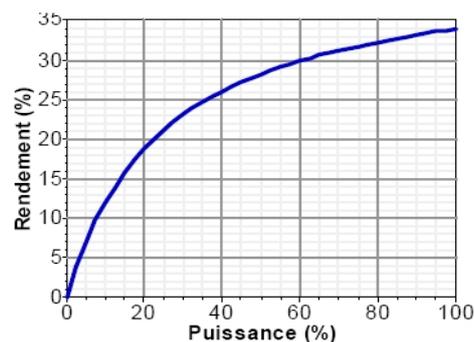
Figure I- 23: Configuration de bus CA

### I.9 Problèmes rencontrés dans le fonctionnement des SEH

Compte tenu de la nature stochastique des sources d'énergie renouvelable, la difficulté principale des SEH comportant ce type de sources est de pouvoir produire à chaque instant l'énergie demandée par la charge. Le moyen le plus simple d'éviter une augmentation du risque de ne pas satisfaire complètement la charge est de faire fonctionner les sources d'énergie renouvelable et les générateurs diesels en parallèle, de façon continue

(le générateur diesel fonctionne sans arrêt). Dans ce type de fonctionnement, les sources d'énergie renouvelable agissent comme une charge négative, en réduisant la charge moyenne des générateurs diesels [39].

Ceux derniers peuvent fonctionner à une puissance très basse (figure I- 23), mais l'économie de carburant est modeste à cause du rendement très faible (en fonctionnement à vide, la consommation de carburant s'estime à 25-30 % de la consommation à pleine charge). Ainsi, garder un moteur diesel au régime de ralenti pour une demande de puissance nulle suppose une consommation de carburant non négligeable.



**Figure I-24** : Courbe du rendement d'un moteur diesel ayant une puissance nominale de 75 KW

Si l'énergie renouvelable est suffisante pour alimenter la plupart de la charge, la quantité de carburant économisé peut alors être augmentée en faisant fonctionner les générateurs diesels par intermittence. En fonctionnement intermittent, les générateurs diesels démarrent et s'arrêtent en fonction de la variation de l'énergie renouvelable et de la charge. Le nombre de cycles démarrage/arrêt des générateurs diesels peut, par conséquent, être très élevé. Le problème dans ce cas est l'usure prématurée des GD et de leurs démarreurs. Un autre problème devant être pris en compte quand le générateur diesel fonctionne par intermittence est le temps nécessaire pour le démarrage et l'arrêt. Le système peut, par exemple, s'effondrer subitement pendant le démarrage du générateur diesel, si l'énergie renouvelable diminue plus vite que le temps nécessaire pour la phase de démarrage.

Il arrive parfois que la production d'énergie renouvelable soit plus importante que la consommation de la charge. Si l'excès d'énergie dans le réseau ne peut pas être éliminé, la production d'énergie renouvelable doit alors être limitée ou même arrêtée. En général, les systèmes sans stockage utilisent une charge de délestage pour maintenir l'équilibre énergétique et la stabilité de la fréquence. D'autres applications nécessitent des systèmes de commande supplémentaires pour maintenir la qualité de la tension. Tous ces dispositifs, tels que les charges de délestage et les systèmes de commande, augmentent le coût d'investissement qui peut ne pas être justifié par les avantages du système hybride. Seule

une stratégie de commande adéquate peut permettre d'intégrer de manière optimale différents composants et donc de rendre le système rentable.

La dynamique des générateurs d'énergie renouvelable peut aussi causer des problèmes dans le fonctionnement des SEH. Par exemple, le démarrage d'une éolienne quand la vitesse du vent est élevée. Dans ce cas, la puissance produite par l'éolienne atteint presque instantanément la puissance nominale du générateur. Ces changements rapides dans la production d'énergie peuvent générer des problèmes de qualité d'énergie (variation de tension et de fréquence) et même l'arrêt complet du système.

Les générateurs asynchrones, largement utilisés dans les éoliennes, ont besoin d'une quantité importante de puissance réactive, surtout pendant la phase d'excitation (démarrage).

S'il n'y a pas assez de sources de puissance réactive dans les SEH et une ou plusieurs éoliennes démarrent, l'augmentation soudaine de la consommation de puissance réactive provoque des creux de tension et le système décroche. D'autres sources de perturbations pouvant générer des creux de tension sont les courts circuits. Ceux-ci peuvent provoquer l'effondrement des SEH, mais aussi une phase de ré-excitation des générateurs asynchrones connectés au système.

Une autre perturbation qui peut poser des problèmes est la surtension. Une surtension peut être causée par un court circuit, l'arrêt d'une charge importante ou la connexion d'un banc de condensateurs.

Un inconvénient majeur dans un SEH connecté en réseau triphasé isolé est le déséquilibre de tension entre les phases. Un récepteur électrique triphasé déséquilibré ou de récepteurs monophasés déséquilibrés alimentés par un réseau isolé triphasé peuvent conduire à des déséquilibres de tension. Ces déséquilibres provoquent des couples de freinage parasites et des échauffements supplémentaires dans les machines tournantes à CA.

Du point de vue de la continuité de la production et de la qualité de l'énergie, les facteurs pouvant affecter le fonctionnement d'un SEH sont résumés ci-après :

- Les variations de la charge à long terme : les régions isolées avec des petits réseaux électriques peuvent subir des changements rapides dans leurs besoins en électricité (généralement, la demande augmente).
- Les variations de la charge à court terme : en général, la demande en électricité varie beaucoup sur des intervalles de temps assez courts, de l'ordre de quelques minutes.
- Des valeurs minimales sont suivies par des pics.
- Les ressources d'énergie renouvelable : les ressources, comme le vent et le soleil, sont stochastiques par leur nature, ont des caractéristiques locales et sont très difficiles à prédire.

- Les perturbations du réseau : les défauts, tels que les courts circuits, peuvent non seulement arrêter les systèmes, mais aussi, au pire des cas, détruire certains composants.

### **I.9.1 Commande des SEH**

Le problème principal dans la commande de SEH est de pouvoir fournir l'énergie demandée par la charge, malgré les grandes variations de l'énergie produite, tout en maintenant la fréquence et la tension du bus à CA dans des limites acceptables. Les variations de la production sont causées par la nature stochastique des ressources renouvelables.

Deux aspects principaux doivent être pris en compte dans la commande du SEH :

1. La stratégie de fonctionnement, qui implique des décisions liées au flux d'énergie à l'échelle de plusieurs heures ou jours et des actions pour améliorer le fonctionnement du système,
2. La qualité de l'énergie, à l'échelle des secondes ou millisecondes. Cela concerne la stabilité de la fréquence et de la tension, les protections, etc.

### **I.9.2 Stratégie de fonctionnement**

La stratégie de fonctionnement est un algorithme qui permet au système de supervision d'un SEH de décider combien et quels générateurs il faut mettre en marche, quelles charges sont connectées et comment utiliser le stockage, si disponible [13] [17].

Le fonctionnement d'un SEH dépend des paramètres suivants :

- Le profil de charge : les variations diurnes, les variations saisonnières, les pics et les creux, etc.
- Les caractéristiques des ressources renouvelables : les valeurs moyennes, l'écart type, la fréquence des événements, les valeurs extrêmes, les variations diurnes et saisonnières, etc,
- Les caractéristiques des générateurs classiques : le type de carburant, les limites de fonctionnement, etc.
- La configuration du système : le nombre et les types de composants (les sources d'énergie renouvelable, les sources classiques, les charges contrôlables, les types de stockage, les convertisseurs de puissance, etc.)
- Les normes de qualité de l'énergie : les exigences en ce qui concerne les variations de la fréquence et de la tension.

Par conséquent, certaines stratégies de fonctionnement peuvent être plus efficaces dans des applications particulières, en fonction des objectifs du système et les caractéristiques présentées ci-dessus. Une brève description de quelques stratégies de fonctionnement est donnée ci-après.

**I.10 Méthodes de modélisation et simulation des SEH**

Nous présentons un état de l'art sur la modélisation et la simulation des systèmes hybride complexes, pour la conception d'un système, il convient de considérer celui-ci à différents niveaux d'abstraction afin de réaliser différentes analyses. On trouve Différents niveaux de modélisation pour les domaines mécanique, électronique analogique et électronique numérique : le niveau système, le niveau comportemental, le niveau circuit (composant) et le niveau physique. Tous ces niveaux ne sont pas développés dans ce mémoire. En effet, nous nous sommes intéressés qu'au niveau comportemental en se basant sur les techniques qui existent déjà. Cette synthèse nous permettra de limiter le travail numérique nécessaire pour déterminer les paramètres de notre modèle; une étude par bloc des différentes chaînes de conversion (système PV et aérogénérateur).

**1- Modélisation comportementale**

Une fois la méthodologie de la modélisation comportementale choisie, les interactions entre les composants des différents domaines sont prises en compte, ainsi que l'environnement de conception. Cette performance dépend de la méthode de simulation et des signaux de caractérisation choisis. Deux approches de modélisation et de simulation, au niveau comportemental, ont été définies: La modélisation fonctionnelle et la méthode par circuit équivalent. Nous les présentons dans ce qui suit :

**1.1 Modélisation fonctionnelle**

Cette approche de modélisation fonctionnelle est une alternative prometteuse pour la modélisation des systèmes hybrides. Elle tire profit des niveaux d'abstraction possibles et des langages offerts dans le cadre de la simulation à signaux mixtes. Il est cependant nécessaire de mettre le point sur les limitations que présente cette méthode. Durant la description d'un système, le concepteur doit spécifier, en suivant cette méthode, les relations définissant l'interaction entre les différents signaux dans le système. La définition de ces relations est non triviale dans le cas des systèmes multi domaines, ce qui implique aussi la caractérisation de l'interface existant entre les composants du modèle d'un système hybride qui sont dans des domaines d'énergie différents.

**➤ Modélisation basée sur le graphe**

Les graphes ont été utilisés pour représenter les systèmes interconnectés dans plusieurs domaines. Pour la modélisation des systèmes, il existe en effet trois types de modèles basés sur les graphes : les graphes de liaisons (bond-graph), les graphes linéaires, et les diagrammes blocs. La figure IV-1 montre les modèles en diagramme bloc et en graphe de liaison d'un circuit électrique simple.

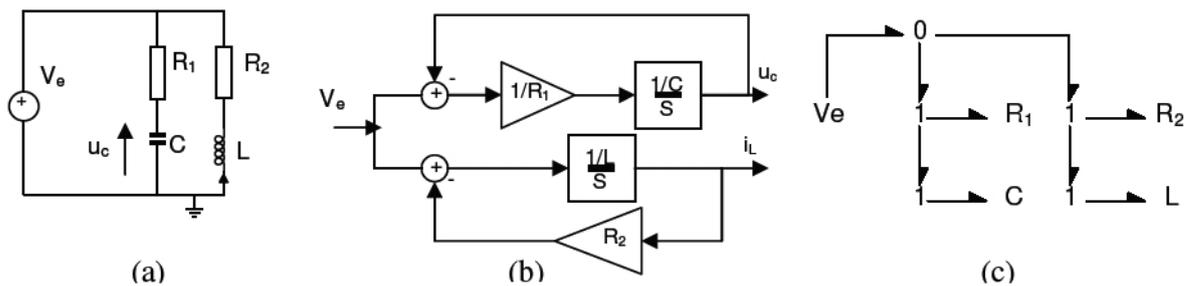


Figure IV-1:(a) Circuit électrique, (b) Diagramme bloc, (c) Graphe de liaison

### ➤ Modélisation par graphe de liaison

La modélisation par le graphe de liaison (bond-graph) se situe entre le système physique et les modèles mathématiques classiques. La technique de modélisation par graphe de liaison est basée sur la caractérisation des phénomènes d'échange de puissance (par un lien) au sein du système.

### ➤ Modélisation par diagramme bloc

Les diagrammes blocs sont utilisés pour la modélisation des flots de signaux échangés en entrées/sorties d'un système. Les modèles créés contiennent des fonctions primitives décrivant les relations entre les entrées et les sorties (ex : Simulink,...). Les systèmes complexes sont partitionnés en sous-systèmes selon une configuration hiérarchique.

## 1.2 Modélisation comportementale basée sur le circuit électrique équivalent

Cette méthode de modélisation comportementale est basée sur des modèles définis sous la forme de circuits électriques équivalents. Ces circuits équivalents représentent les sous-systèmes dans d'autres domaines d'énergie.

## Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une description générale des systèmes hybrides.

Tous les composants ont été introduits afin de permettre une bonne compréhension du fonctionnement des systèmes. Afin de faciliter la conception, nous avons aussi mis en valeur les avantages, les inconvénients et les limites d'utilisation de ces systèmes.

# **Chapitre II**

## **Présentation de la configuration choisie**

**II.1 Introduction**

En fonction de l'application et des sources d'énergie disponibles, il est possible d'intégrer différentes sources énergétiques, aussi bien renouvelables que conventionnelles. Le système peut en outre être élargi en toute simplicité par ajout de composants ou de générateurs électriques pour répondre à des besoins en énergie croissants.

Cette structure décentralisée de l'alimentation en énergie correspond au caractère décentralisé des énergies renouvelables.

En associant plusieurs sources d'énergie, les avantages de chacune d'elles sont ainsi ajoutés:

- Le système photovoltaïque réduit la consommation, le temps de fonctionnement et donc de la maintenance du groupe,
- La présence du stockage par batteries réduit la puissance nominale du groupe,
- La présence du groupe réduit la taille du champ photovoltaïque et la capacité de stockage des batteries diminuant ainsi le coût du système,
- La fiabilité du système global est augmentée,
- Les puissances et les énergies mises en jeu sont plus importantes et la charge à alimenter plus élevée [40]

Se posent alors les problèmes suivants:

- Choisir correctement la taille de chaque composant du système énergétique,
- Optimiser la gestion de l'énergie au sein de ce système,
- Enfin, rechercher la configuration optimale, c'est-à-dire le coût de production minimal.

La configuration du SEH dépend évidemment des ressources énergétiques disponibles ainsi que des contraintes de l'utilisation. Ceci requiert une campagne de mesure et une analyse préalable des spécificités du site. Pour créer une base de référence pour notre étude nous avons choisi d'adopter des données disponibles et accessibles (NASA) Données-satellite mondiales de la NASA. Disponible sur le site Web « NASA Surface meteorology and Solar Energy Data Set ».

**II.2 Présentation du site et caractéristiques de la charge****II.2.1 L'emplacement du système hybride**

Pour cette étude, une localisation géographique est considérée : Bordj Cedria, située au bord de la mer en TUNISIE.

Coordonnées du site :

- Latitude : 38 degrés 42 minutes Nord,
- Longitude : 10 degrés 25 minutes Est,
- Temps : GMT + 0:00.

Ce système autonome doit permettre d'alimenter une communauté de 480 personnes, et une unité de dessalement par osmose inverse pour la production de l'eau douce.

### **II.2.2 Caractérisation de la charge et Prédétermination du profil énergétique de la demande**

Le dimensionnement d'un tel système de production de l'énergie dépend essentiellement du profil de la consommation à satisfaire. La puissance demandée par un foyer de nature donnée n'est pas figée le long de l'année. L'heure de sollicitation maximale du système énergétique par la charge varie en fonction des saisons conséquence à la variation de la durée du jour.

Les besoins énergétiques du site à alimenter se décomposent en deux types de charges :

- Une charge électrique : c'est l'énergie électrique consommée directement par les utilisateurs - Unité de dessalement : représente l'énergie électrique destinée pour la production de l'eau douce.

La caractéristique de la charge permet de spécifier le type d'application (raccordé au réseau, hors réseau ou pompage de l'eau) et de caractériser les besoins en énergie (la charge électrique).

Dans notre cas d'étude l'application est hors réseau, le but de SEH est d'alimenter en énergie une charge triphasée, la charge électrique est en courant alternatif (CA).

#### **II.2.2.1 Chargement primaire**

C'est une description de la demande d'électricité du site. Elle inclut l'éclairage, le chauffage et le fonctionnement des appareils électriques (réfrigération, ordinateurs, téléviseurs...). Le site compte 480 personnes, avec une consommation estimée à 0.26 kWh/jour et par personne, ce qui donne une consommation journalière de 124.8 kWh/j, ce qui donne une puissance moyenne journalière de 5.2 kW, qui n'est pas constante durant toute la journée.

La distribution journalière de cette charge est représentée par les diagrammes ci-dessous :

Tableau II-1 : Distribution journalière de la charge électrique.

Heures	Charge [kW]	Heures	Charge [kW]
00 :00 – 01 :00	4,4	12 :00 – 13 :00	5,1
01 :00 – 02 :00	4,1	13 :00 – 14 :00	5,2
02 :00 – 03 :00	3,8	14 :00 – 15 :00	5,1
03 :00 – 04 :00	3,5	15 :00 – 16 :00	4,8
04 :00 – 05 :00	3,4	16 :00 – 17 :00	5,2
05 :00 – 06 :00	3,6	17 :00 – 18 :00	5,4
06 :00 – 07 :00	4,3	18 :00 – 19 :00	6,3
07 :00 – 08 :00	5,1	19 :00 – 20 :00	7,5
08 :00 – 09 :00	5	20 :00 – 21 :00	8
09 :00 – 10 :00	4,9	21 :00 – 22 :00	7,6
10 :00 – 11 :00	5,1	22 :00 – 23 :00	6,1
11 :00 – 12 :00	5,4	23 :00 – 00 :00	5,4

Le profil de charge à alimenter en électricité est illustré dans la Figure II-1. Il s’agit d’une charge avec une valeur moyenne journalière de 124.8 kWh/j et un pic de puissance instantanée de 8 kW.

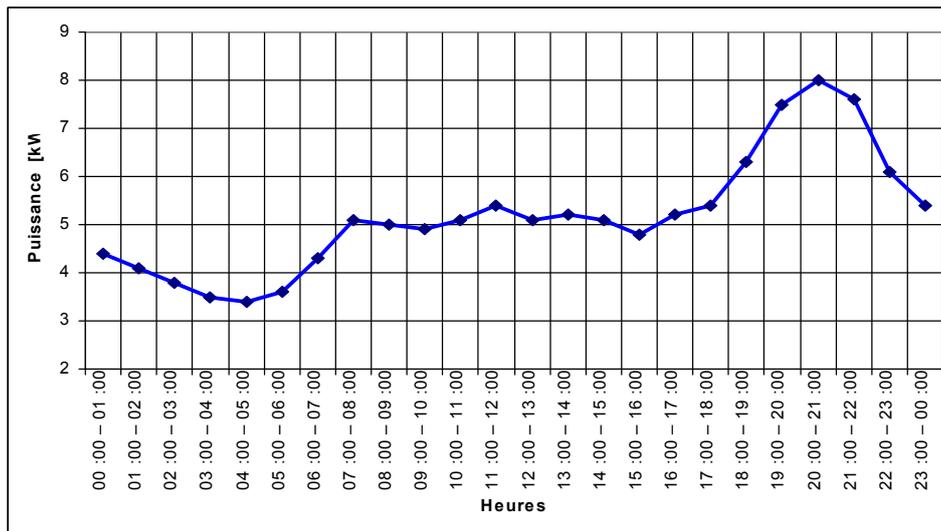


Figure II- 1 : Répartition journalière de la charge électrique.

On remarque que le profil de consommation a généralement la même tendance d’évolution journalière. Il y a un creux de consommation la nuit entre 0h et 7h et un pic de consommation, le soir entre 20h et 21h.

Ces informations restent très difficiles à exploiter car le profil de consommation est aussi variable selon les saisons.

### II.2.2.2 L’Unité de Dessalement

Cette charge est l’énergie nécessaire pour l’entraînement d’une unité de dessalement fonctionnant par la technique d’osmose inverse (RO), elle est installée pour assurer les

besoins en eau potable du site à partir d'une source d'eau saumâtre, qui est disponible dans un puits existant sur le périmètre du site. La demande en eau est estimée à 50 litres/jour/personne. L'énergie spécifique de dessalement de cette unité est de 5 kWh/m<sup>3</sup>, soit 120 kWh/jour pour tout le site, avec une puissance journalière moyenne de 5 kW, qui est constante durant toute la journée.

La demande totale en énergie est la somme de la charge électrique et celle de l'unité RO, ce qui donne un besoin total en énergie de 244,8 kWh/jour, avec une puissance moyenne journalière de 10,2 kW, dont la distribution horaire journalière est donnée par la courbe de la figure II-2.

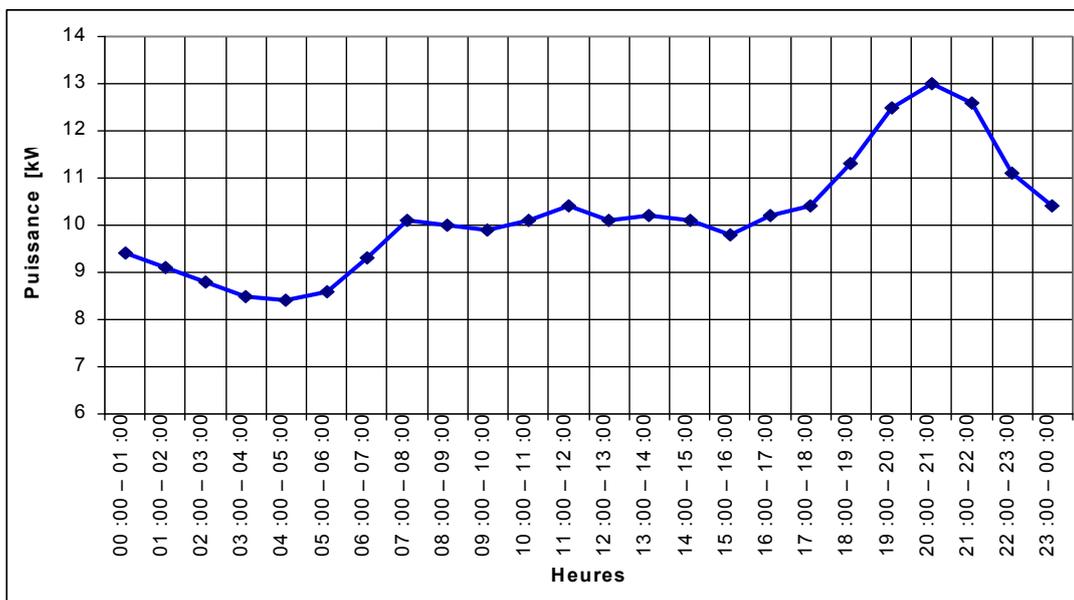


Figure II-2 : Répartition journalière de la charge totale.

La courbe représentative de la charge totale illustrée dans la Figure-2 peut être décomposée en trois zones :

- 1<sup>er</sup> zone : Entre minuit et 7h du matin, cette période est caractérisée par un minimum de consommation journalière (période de nuit),
- 2<sup>ème</sup> zone : Entre 7h et 18h du soir, pendant cette durée la consommation est moyenne et est relativement constante.
- 3<sup>ème</sup> zone : Entre 18h et minuit, c'est la période de consommation maximale, elle inclue l'heure de pointe (le pic). Tous les éléments de l'installation doivent être dimensionnés par rapport à la valeur de ce pic, qui est de 12,98 kW entre 20 h et 21h.

**II. 3 Estimation des ressources énergétiques solaire et éolienne**

L'étape essentielle dans la conception d'un système couplé est la détermination de sa taille optimale qui dépend essentiellement des données climatiques du site. Généralement, on utilise les moyennes mensuelles des données climatiques et / ou une estimation du nombre de jours consécutifs de faible ressource climatique (vent, irradiation solaire) pour déterminer la surface de l'aérogénérateur, la taille des panneaux photovoltaïques et la capacité des batteries. Or, le comportement dynamique du système couplé vis-à-vis de la nature stochastique de l'irradiation solaire influe d'une manière remarquable sur la taille du système nécessaire pour une application déterminée [41, 42]. L'analyse des ressources locales (vitesse du vent et éclairement), requiert une campagne de mesure et une analyse préalable des spécificités du site. Pour créer une base de référence pour notre étude nous avons choisi d'adopter des données pertinentes des mesures techniques faites pendant une année.

**II.3.1 Potentiel éolien**

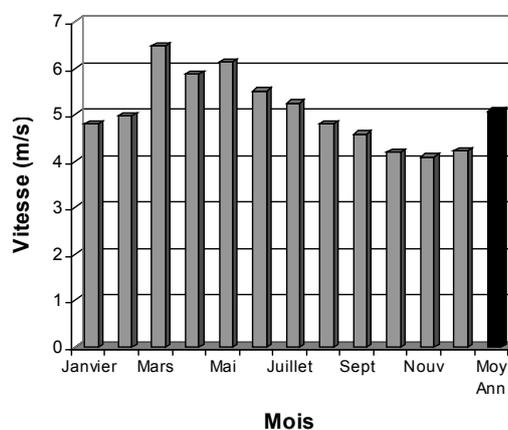
Pour évaluer le potentiel éolien du site, des mesures de vitesses du vent ont été prises sur site durant l'année 2008, avec un intervalle de 1 heure (24 mesures par jour).

Etant donné que le potentiel de puissance éolienne est à peu près proportionnel au cube de la vitesse du vent. Il faudrait donc raffiner l'information sur la vitesse du vent en fonction du degré de précision requis.

Les vitesses mensuelles moyennes calculées à base des données de mesures, sont illustrées sur le tableau et le diagramme ci-dessous :

**Tableau II-2** : Vitesses moyennes mensuelles du vent

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Moy .Ann
Vitesse [m/s]	4,794	4,975	6,488	5,880	6,131	5,515	5,252	4,794	4,583	4,201	4,099	4,223	5,08



**Figure II-3** : Représentation des vitesses moyennes mensuelles

Les figures II-3 présente le profil de vent avec une valeur moyenne de la vitesse du vent de 5,08 m/s.

Les représentations horaires de la vitesse moyenne pour chaque mois sont données par les courbes (tableau II-2)

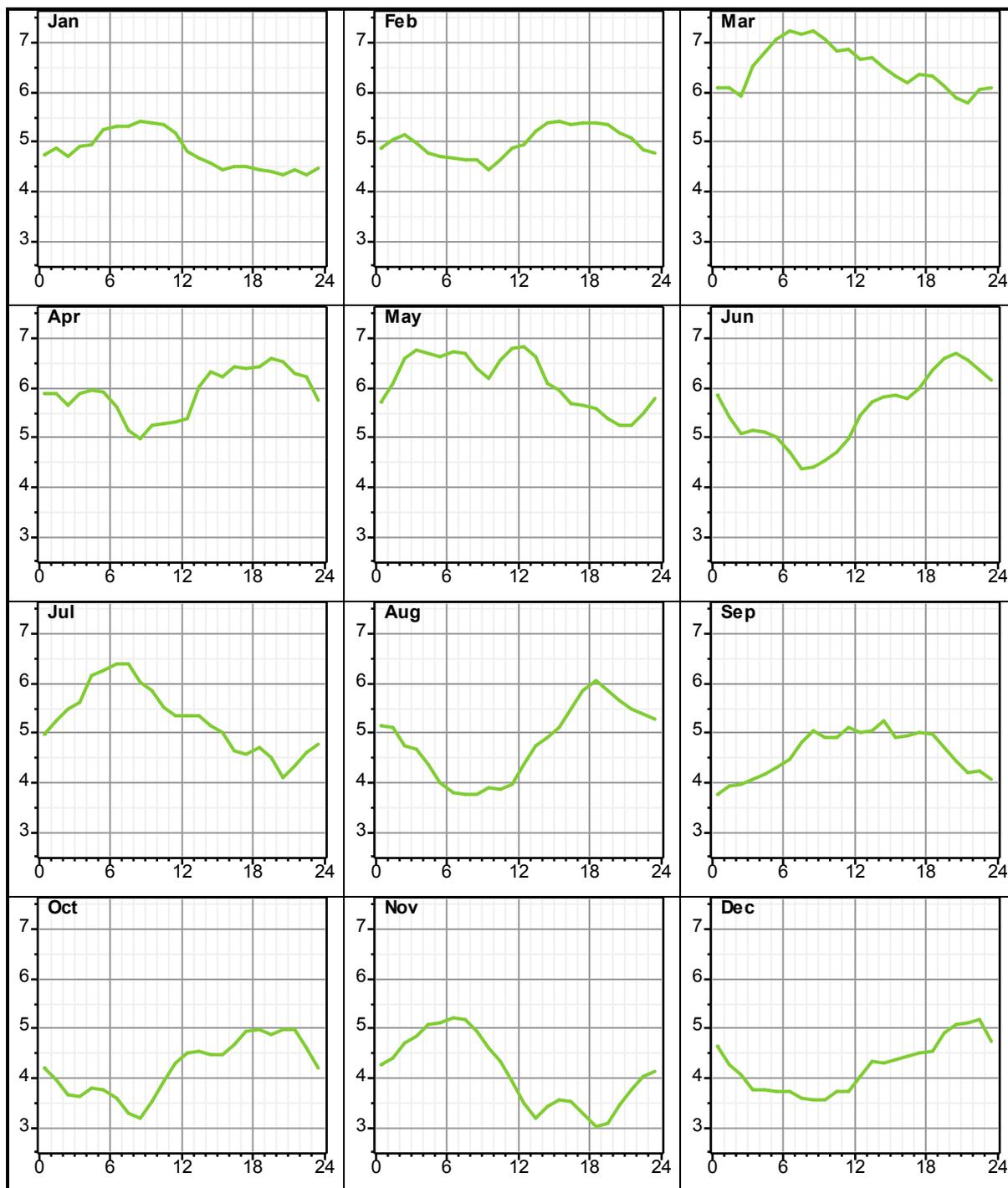


Figure II-4 : Les représentations horaires de la vitesse moyenne pour chaque mois.

Quand on veut utiliser l'énergie éolienne, il faut savoir quelles sont les places appropriées. Pour obtenir une bonne performance d'une turbine éolienne, il faut une vitesse de vent minimum dans la plage de 5.5 à 7.0 m/s. Dans notre cas, la valeur de la vitesse moyenne annuelle (5.08 m/s) est légèrement supérieure à la limite inférieure de la vitesse du vent réellement exploitable, qui est de l'ordre de 4.5 m/s. Mais elle varie sensiblement d'un mois à un autre (de 4.1 m/s au mois de novembre à 6.49 au mois de mars).

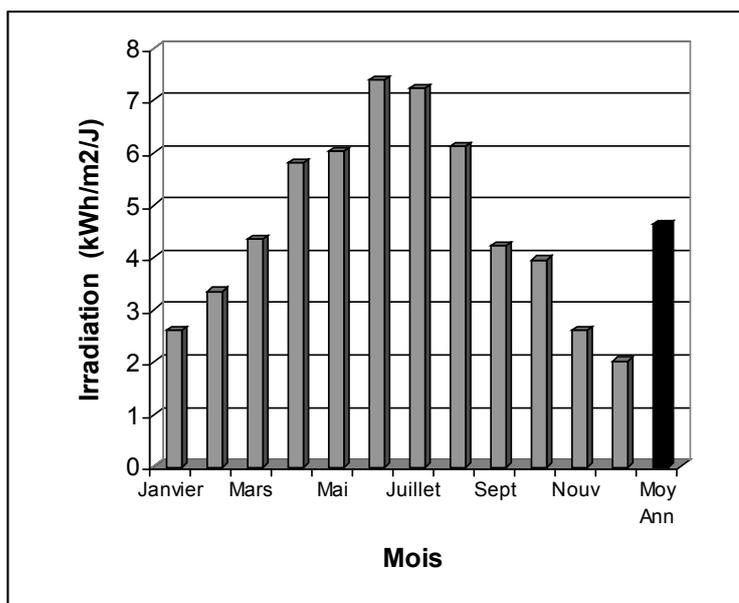
**II.3.2 Potentiel Solaire**

De même que les vitesses, des mesures de l'irradiation solaire ont été prises sur le site (24 mesures par jour). En utilisant l'orientation et l'inclinaison des modules PV, la latitude du lieu et les valeurs du rayonnement global.

On indique, en (kWh/m<sup>2</sup>/j), pour chaque mois, la quantité moyenne d'énergie solaire que reçoit chaque jour 1 m<sup>2</sup> de surface horizontale. La moyenne mensuelle du rayonnement quotidien sur l'horizontale pour chacun des douze mois de l'année est donnée par le tableau (II-3) et le diagramme (II-5) ci-dessous :

**Tableau II-3** : Irradiation solaire moyenne mensuelle.

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avr .	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Irrad. moy
Irradiation Moy. [kWh/m <sup>2</sup> /j]	2,603	3,352	4,356	5,808	6,023	7,383	7,227	6,126	4,221	3,95	2,6	2,018	<b>4,65</b>



**Figure II-5** : Représentation de l'irradiation moyenne

On observe sur Le profil annuel d'irradiation solaire pour le lieu envisagé qu'il existe une variation saisonnière marquée au niveau de l'irradiation solaire (plus importante en été).

### **Analyse des potentiels**

La radiation solaire moyenne journalière de la région de Bordj Cedria tourne autour de 4,65 kWh/m<sup>2</sup>/jour. Ce potentiel est assez important et il est pratiquement exploitable durant toute l'année.

La région de Bordj Cedria dispose d'un potentiel éolien acceptable. Cette caractéristique a conduit la région a favorisé les initiatives en matière de production d'énergie par éoliennes, notamment dans le domaine de l'éolien de petite puissance.

### **Les données climatiques et l'énergie demandée**

Les performances des panneaux photovoltaïques et des aérogénérateurs sont directement corrélées aux données climatiques qui sont en principe l'irradiation solaire et la vitesse du vent. Pour un profil de charge donné, la taille du système augmente quand les ressources climatiques sont faibles.

Généralement, la grandeur de la demande en énergie est une fonction variable du temps. Dans notre cas, on a adopté une valeur de la consommation journalière constante durant la saison. Par ailleurs, nous nous sommes limités au cas des systèmes de puissance moyenne qui correspond au cas des applications domestiques, où la demande totale en énergie est la somme de la charge électrique et celle de l'unité RO, ce qui donne un besoin total en énergie de 244.8 kWh/jour, avec une puissance moyenne de l'ordre de 10.2 kW par jour. On note que : Les calculs sont effectués à partir de données mesurées et issues de prévisions pendant l'année 2008.

L'échelle de temps : Variation horaire.

## **II.4 La configuration du système d'alimentation en énergie**

Le projet Open- Gain concerne la mise en œuvre d'un système hybride de production d'énergie opérationnel basé sur deux sources d'énergies renouvelables (solaire et éolienne) et d'une source fossile (diesel).

Le système de production d'énergie est conçu et dimensionné sur la base d'une étude d'investigation du marché. Des technologies de l'état de l'art des éléments de systèmes ont été sélectionnées.

Le choix est basé sur les besoins des charges énergétiques, représentées par la charge d'une unité d'osmose inverse de dessalement d'eau saumâtre produisant 25 m<sup>3</sup>/ jour d'eau douce, et d'autres charges électriques au sein du campus du CRTE à Bordj-Cedria(Tunisie).

**La configuration du système**

La configuration du SEH est le résultat d'une procédure de dimensionnement réalisée en fonction des ressources énergétiques disponibles, ainsi que des contraintes d'utilisation.

Pour déterminer la configuration technologique la plus adaptée pour électrifier un site isolé, il faut prendre en considération les différents points suivants :

- le besoin énergétique de la population concernée (la puissance de la charge à alimenter.
- la configuration géographique du site, et en particulier : l'accessibilité au site, la répartition géographique de la demande et la topographie du site.
- le ou les gisements locaux disponibles et exploitables : le potentiel en énergies renouvelables et la disponibilité en combustibles et en sources conventionnelles d'énergie.

**II.4.1 Présentation de l'installation hybride étudiée**

Le choix de la taille (puissance) et le type des éléments est une étape très importante dans le but de garantir l'énergie nécessaire au site, tout en assurant une autonomie énergétique, et selon les énergies renouvelables disponibles (voir le sous- chapitre II .3). L'électricité provenant de ces sources est intermittente, dépendante des conditions climatiques.

**Aspects techniques des technologies**

- ✓ Le niveau de Commercialisation
- ✓ La Précision
- ✓ Flexibilité et disponibilité
- ✓ La durée de Vie
- ✓ L'Efficacité
- ✓ Exigences pour opération d'entretien et remise en place
- ✓ Disponibilité des ressources correspondantes

Notre système de production appelé système hybride, Il présente en somme le double avantage de minimiser les perturbations de l'environnement grâce à une consommation sur le lieu de production de ressources naturelles renouvelables et d'une sécurité d'approvisionnement maximale. Le fonctionnement autonome peut éventuellement être à capacité réduite pour réduire le coût du stockage par rapport à un système totalement autonome.

Les éléments sélectionnés pour notre installation (PV-éolien-batteries-groupe électrogène) sont:

- Un aérogénérateur (WT),
- Un générateur photovoltaïque (PV),
- Un générateur Diesel (DG),
- Un banc de batteries,
- Des convertisseurs de courant.

En vue de la nature des deux charges, l'installation sera à bus AC

Pour obtenir les données d'entrée pour HOMER, des informations sur les composants de l'installation sont obtenues par la littérature et par les fabricants pour obtenir des évaluations de coûts et efficacités présentes et futures du système complet. En outre on rassemble les données et l'information de série chronologique de charge et de ressource nécessaire pour modeler les systèmes.

#### II.4.1.1 La Turbine Eolienne

La turbine éolienne ayant une caractéristique qui lui est propre et qui dépend de paramètres de construction qui définissent son potentiel à prélever l'énergie de la masse d'air en mouvement. La turbine choisie est de marque **PROVEN ENERGY 15**, c'est une turbine à axe horizontal de moyenne puissance (15 kW à une vitesse de 12 m/s), à trois pâles, le rotor fonctionne dans la direction du vent (downwind), elle dispose de caractéristiques très avancées en matière de sécurité (système de freinage en cas d'urgence ou pour entretien), de flexibilité et de disponibilité. Selon sa courbe de puissance (donnée ci-dessous), PROVEN ENERGY15 peut développer de l'énergie même à très bas régime du vent (3 m/s), comme elle peut opérer à des vitesses élevées (70 m/s) sans risque de passer en survitesse et ce à l'aide d'un dispositif de guidage des pales [43].

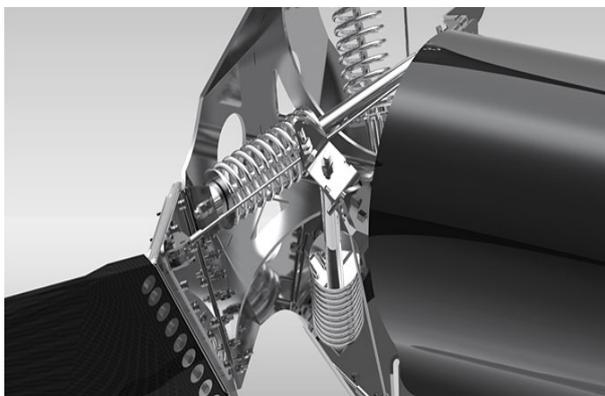


Figure II-6 : PROVEN ENERGY 15, système de guidage des pales.

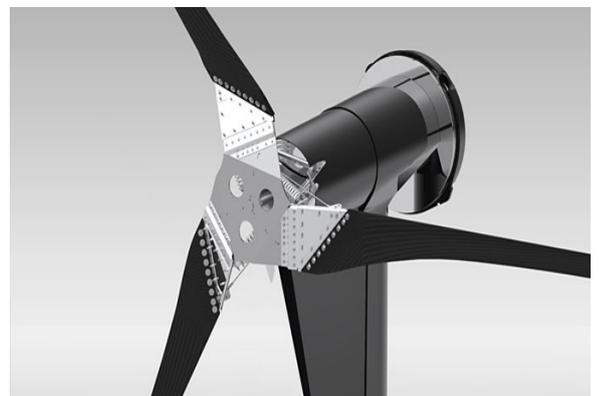


Figure II-7 : PROVEN15, Vue de face.

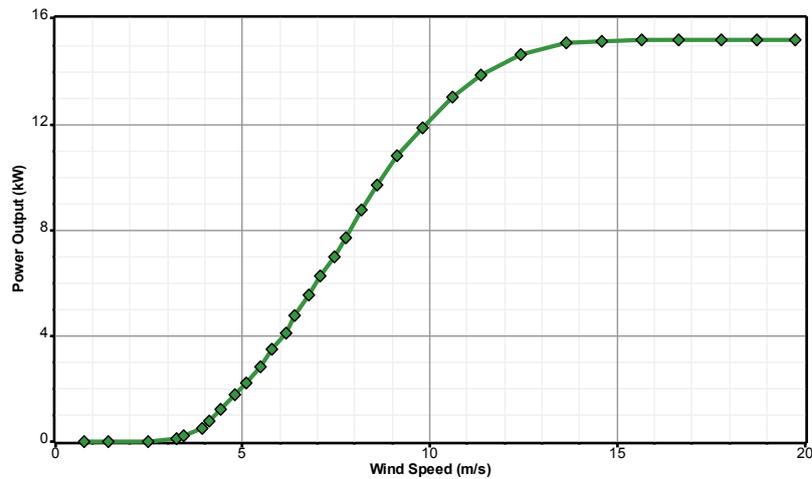
Aux grandes vitesses du vent, les pâles se déplacent dans la direction du vent formant un angle supérieur à  $90^\circ$  avec l'axe de rotation (figure II-6), ce qui donne au rotor une forme conique et diminue ainsi la vitesse de rotation. La turbine fonctionne sans réducteur de vitesse, ce qui réduit énormément le niveau de bruit et les pertes par frottement mécanique, ainsi que les périodes d'arrêt et le coût d'entretien. L'éolienne PROVEN15 considérée est caractérisée par les données présentées dans le tableau II-4. Selon le constructeur, la caractéristique de la puissance d'éolienne est illustrée sur la figure II-8.

**Tableau II-4** : Caractéristiques techniques de PROVEN 15 [44].

Spécifications	Proven Energy 15	Unité
Puissance nominale	15	kW
Vitesse nominale du vent	12	m/s
Vitesse min. du vent (pour démarrage)	2,5	m/s
Vitesse max. dont la turbine peut supporter	70	m/s
Masse du rotor	1200	kg
Diamètre du rotor	9	m
Surface balayée par le rotor	64	m <sup>2</sup>
Hauteur de la tour	25	m
Masse de la tour	1478	kg
Vitesse de rotation maximale	140	tr/min
Système de freinage	mécanique	
Nombre de pôle	3	
Matériau des pâles	Polypropylène	
Tension nominale à la sortie génératrice après rectification (courant DC)	300	V (DC)
Durée de vie	25	ans

Une éolienne est caractérisée par sa courbe de puissance qui donne la variation de puissance disponible en fonction de la vitesse du vent.

- La puissance nominale (de projet) est la puissance donnée pour un vent déterminé, appelé vent nominal. Au-delà de cette vitesse du vent, la puissance est maintenue constante grâce au dispositif de régulation.



**Figure II-8 :** Courbe de puissance relative à l'éolienne PROVEN ENERGY 15.

### Composants électriques de PROVEN ENERGY 15 :

- **Générateur GW15000 :** la turbine éolienne entraîne une génératrice synchrone triphasée à vitesse variable de type **GW15000**, qui fournit un courant alternatif variable selon la vitesse du vent. L'objectif de la vitesse variable est d'adapter la vitesse de rotation de la turbine en fonction de la vitesse du vent pour travailler en permanence à la puissance maximum. Ce générateur est conçu spécialement pour être entraîné directement par l'arbre du rotor (sans réducteur de vitesse) et fonctionne sous différents régimes du vent, ce qui convient bien à l'usage éolien.
- **Redresseur contrôleur ECM15004ME/300 :** dont le rôle est de convertir le courant AC variable à la sortie du *GW15000* en courant DC variable avec une fréquence constante de 50 Hz.

Le courant délivré par le générateur et ce du redresseur en fonction du régime de vent est donné par le tableau suivant :

**Tableau II-5 :** Courant délivré par PROVEN 15.

Vitesse rotation [tr/min]	Sortie GW15000 [VAc]	Sortie ECM15004ME/300 [VDc]
0	0	0
70 - 140	200 – 225	240 – 300
140	225	300

### II.4.1.2 Les panneaux photovoltaïques

Selon la puissance totale demandée ainsi que le type de notre installation, nous avons opté pour l'installation de trois générateurs PV de puissance de 5 kWp (puissance PV totale de 15 kWp), chacun sera relié à une phase des bus d'alimentation. Nous avons choisis les panneaux photovoltaïques Du type **KD180GX-LP** de **SUD CONCEPT**, marque **KYOCERA**, dont les caractéristiques techniques sont résumés par le tableau II-6.



Figure II- 9 : le générateur photovoltaïque *KD180 GX-LP*

Le tableau (II-6) décrit un modèle du champ solaire et ses paramètres. Les paramètres du modèle sont les caractéristiques du champ photovoltaïque : les modules utilisés, le nombre de modules en série ou en parallèle dans chaque branche et la tension imposée.

Tableau II- 6: Caractéristiques du générateur PV.

<b>Performances électriques sous les conditions standard de test STC</b>	
Puissance maximale	180 W (+/- 5%)
Tension maximale	23,6 V
Courent maximal	7,63 A
Tension circuit ouvert (Voc)	29,5 V
Courent de court circuit (Isc)	8,35 A
Tension maximale du système	600 V
Coefficient de température de Voc	$-1,06 \times 10^{-1} \text{ V/}^\circ\text{C}$
Coefficient de température de Isc	$5,01 \times 10^{-3} \text{ A/}^\circ\text{C}$
<b>Performances électriques à 800 W/m<sup>2</sup>, NOCT, AM1.5</b>	
Puissance maximale	127 W
Tension maximale	20,8 V
Courant maximal	6,1 A
Tension circuit ouvert (Voc)	26,5 V
Courent de court circuit (Isc)	6,8 A
<b>Caractéristiques du module</b>	
Nombre de cellule par module	48 cellules
Dimensions (longueur×largeur×épaisseur)	1341×990×36 mm
Poids	16,5 kg

NOCT est le « Normal Operating Cell Temperature », un paramètre fourni par le constructeur des panneaux solaires.

NOCT est la température de fonctionnement des cellules photovoltaïques dans les conditions suivantes : un ensoleillement de 800 W/m<sup>2</sup>, une température ambiante de 20°C et une masse d'air optique AM égale à 1. Nous prenons : NOCT = 49 °C

La surface d'un module est de 1,3276 m<sup>2</sup>. Chacun des trois générateurs est constituée de 27 modules, avec une surface de 35. 845 m<sup>2</sup>. La surface totale des panneaux PV est donc de 107,535 m<sup>2</sup>.

### II.4.1.3 Le générateur Diesel

En vue du caractère non régulier des ressources renouvelables, un générateur Diesel est nécessaire comme un système d'appoint. Le générateur choisi est de type **404C-22G** du constructeur PERKINS, il développe une puissance maximale de 18 .5kW.

**Tableau II- 7:** Caractéristiques du moteur PERKINS 404C-22G

<b>Moteur Diesel</b>		
Constructeur	PERKINS	
Pays	UK	
Modèle	404C-22G	
Vitesse de rotation	1500 tr/min	
Puissance net	18.5 kW	
Nombre de cylindres	4 en ligne	
Diamètre cylindre / course	84 / 100 mm	
Cylindrée	2,21 litre	
Aspiration	Naturelle (sans suralimentation)	
Refroidissement	À eau	
Circuit électrique (DC)	12 V	
Consommation du carburant	100% de la charge	<b>5,4</b> Litre/ h
	75 % de la charge	<b>4,0</b> Litre/ h
	50% de la charge	<b>2,9</b> Litre/ h
	25% de la charge	<b>2,27</b> Litre/ h
Consommation spécifique du carburant	245 g / kWh	
Volume d'huile de lubrification	10,6 Litre	
Volume eau de refroidissement	6,98 Litre	

Comme l'installation est autonome, le DG est contraint de fonctionner à tout moment de la journée, et ce pour combler d'éventuel manque de production par les générateurs renouvelables, ou même pour fournir la totalité de la charge demandée (cas le plus défavorable). Entre autre, il est utilisé pour la recharge des batteries.

#### II.4.1.4 Le système de stockage : Batteries

Il est possible d'assurer la fourniture de toute l'énergie nécessaire au site directement par les trois générateurs, cependant, dans le but de minimiser le fonctionnement du générateur diesel et par suite les émissions des gaz, il est judicieux de rajouter un système de stockage d'énergie. Cela nous permet d'exploiter au maximum les ressources renouvelables disponibles en rechargeant les batteries par ces dernières (éolienne et solaire). Enfin, dans le cas d'une brusque demande d'électricité, le stockage remplit la fonction de source «tampon», en attendant que le groupe démarre et prenne le relais de la fourniture.

Le cas échéant, les batteries sont rechargées par le diesel. Les caractéristiques des batteries sont données par le tableau ci-dessous.

**Tableau II- 8** : Caractéristiques des batteries [45].

Spécifications	Valeurs	Unités
Type de courant délivré	DC	
DDP	48	V
Courant de décharge	192	A
Puissance	9.2	kW
Capacité nominale	1923	Ah
Etat de charge minimale permise	50	% de la charge max.
O&M	180	\$/kWh
Coût	3680	\$
Durée de vie minimale	10	ans

Les batteries sont réparties en trois rames de capacité de 641 Ah, chaque rame est reliée à une phase des bus AC (voir schéma électrique, figure-9).

#### II.4.1.5 Les convertisseurs

Afin d'adapter la forme de l'énergie électrique délivrée par un composant de l'installation en fonction de l'application visée, un convertisseur statique lui sera nécessairement connecté.

Les onduleurs jouent un rôle clé au regard de l'efficacité énergétique et de la fiabilité. Dans le cas d'un générateur photovoltaïque leur rôle ne se limite pas à transformer le courant continu (DC) généré par le panneau PV en courant alternatif (AC) de tension et de fréquence souhaitées (par ex. 230 V et 50 Hz), mais consiste également à exploiter le champ PV à son point de puissance maximal (Maximum Power Point MPP). De plus, les onduleurs doivent assurer une surveillance fiable du réseau pour le protéger contre les défaillances et interrompre l'alimentation en cas d'erreurs du réseau.

### a) Convertisseur bidirectionnel pour les batteries : Sunny Island 5048

Un convertisseur bidirectionnel (AC/DC redresseur, DC/AC onduleur) est nécessaire pour assurer la conversion du courant DC, délivré par la batterie, au courant AC pour alimenter les bus (fonction onduleur), et inversement pour la recharge des batteries à partir des bus AC (fonction redresseur). Ce convertisseur est de type **SMA Sunny Island 5048** dont les caractéristiques sont résumées sur le tableau-12. En plus de la conversion, il assure les tâches suivantes :

- Contrôle de la fréquence et du potentiel,
- Contrôle de l'état de charge et/ou décharges des batteries (augmente ainsi la durée de vie),
- Connexion et déconnexion des charges en cas de surcharge,
- Assure la connexion avec plusieurs sources,
- Contrôle du fonctionnement d'autres Sunny Island,
- Stockage des informations (carte MMC),
- Assure les fonctions de protection et de sécurité (courts-circuits, sur courant, température excessive...).

Trois convertisseurs de ce type seront installés, de telle sorte que chaque convertisseur est relié à une phase et à une rame des batteries (le circuit électrique de l'installation est triphasé).

**Tableau II- 10** : Caractéristiques techniques du convertisseur Sunny Island 5048

Désignation	Symbole	Valeur/unité
<b>Valeurs de sortie</b>		
Tension nominale AC (réglable)	$U_{AC, nom}$	230 V (202 – 253 V)
Fréquence nominale (réglable)	$f$	50 Hz (45 – 65 Hz)
Puissance continue AC à 25 °C	$P_{nom}$	5000 W
Puissance continue AC à 45 °C	$P_{nom}$	4000 W
Puissance AC pour 30 min à 25 °C	$P_{30}$	6500 W
Puissance AC pour 5 min à 25 °C	$P_5$	7200 W
Puissance AC pour 1 min à 25 °C	$P_1$	8400 W
Courant nominal AC	$I_{AC, nom}$	21,7 A
Courant max. (valeur crête / valeur effective)		120 A (env. 60 ms) / 52 A (3 s)
Facteur de déphasage	$\cos \varphi$	de -1 à +1
<b>Valeurs d'entrée</b>		
Tension nominale (plage)	$U_{AC, ext}$	230 V (172,5 – 250 V)
Fréquence	$f_{ext}$	50 Hz (40 – 70 Hz)
Courant AC max.	$I_{AC, ext}$	56 A (2 – 56 A)
Puissance continue max.	$P_{AC, ext}$	12,8 kW
<b>Caractéristiques de la batterie</b>		
Tension de la batterie (plage)	$U_{Bat, nom}$	48 V (41 – 63 V)
Int. de charge max. batterie	$I_{Bat, max}$	120 A
Courant de charge continu	$I_{Bat, nom}$	100 A

Capacité de la batterie	$C_{Bat}$	100 – 10000 Ah
Rendement max. (typique)	$\eta_{max}$	95 %
Largeur x hauteur x profondeur en mm / Poids en kg		467 x 612 x 235/ env. 63 kg
Température ambiante (service)		-25 °C ... +50 °C

**b) Onduleurs pour la turbine: WB6000 (SMA Windy Boy)**

Le rôle de cet onduleur est de convertir le courant DC variable à la sortie du redresseur intégré avec la turbine (**ECM15004ME/300**) en courant AC à 220 Vac et 50 Hz pour alimenter les bus. La puissance de chaque onduleur est de 6 kW (total 18 kW). Trois WB6000 seront installés, chacun développe une phase (voir schéma électrique annexe D).

**Tableau II- 11:** Caractéristiques techniques de l'onduleur WB-6000

Caractéristique		Valeurs
<b>Valeurs d'entrée</b>	Tension max. DC	600 V
	Plage de variation de tension	246 ... 600 V
	Tension DC nominal	270 V
	Puissance recommandée du générateur à 2500 heures/ans (en pleine charge)	5400 W
	Puissance recommandée du générateur à 5000 heures/ans (en pleine charge)	4800 W
	Courant max. ( $I_{max}$ )	26 A
	Autoconsommation	< 7 W
	Variation du courant DC délivré (précision)	< 10 %
<b>Valeurs de sortie</b>	Puissance max. AC à la sortie	6000 W
	Puissance nominale	6000 W
	Consommation en mode veille	0,25 W
	Détection automatique 50/60 Hz	Oui
<b>Rendement</b>	Rendement max. / Euro ETA	96,1%/95,2 %
<b>Conditions ambiantes</b>	Plage de températures	-25°C ... 60°C
	Humidité relative permise	0...100 %
Montage		Intérieur/Extérieur
Type de refroidissement		OptiCool
Dimensions (w x h x d) mm		468 x 613 x 242
Poids		63 kg
Compatible avec les convertisseurs Sunny Island		Oui

**c) Onduleur photovoltaïque : Sunny Mini Central 6000 A**

Conversion du courant continu en alternatif Les panneaux PV développent du courant continu, il faut donc installer des onduleurs dont le rôle est d'injecter l'énergie solaire transformée par conversion photovoltaïque dans le réseau basse tension de 220...240 V à une fréquence de 50 Hz. Les onduleurs utilisés sont de fabrication SMA technologie, de type Sunny Mini Central 6000A (SMC6000A). Comme le WB6000, trois SMC6000A seront installés de la même manière. Les caractéristiques techniques de cet onduleur sont données par le tableau II- 12.

**Tableau II- 12** : Caractéristiques techniques de l'onduleur SMC6000A

<b>Entrée (DC)</b>	Puissance DC max.	6300 W
	Tension DC max.	600 V
	Plage de tension PV, MPPT	246 V – 480 V
	Courant d'entrée max.	26 A
	Nombre de trackers MPP	1
	Nombre max. de strings (parallèle)	4
<b>Sortie (AC)</b>	Puissance AC nominale	6000 W
	Puissance AC max.	6000 W
	Courant de sortie max.	26 A
	Tension nominale AC / plage	220 V – 240 V / 180 V – 260 V
	Fréquence du réseau AC (autoréglable) / plage	50 Hz / 60 Hz / ± 4,5 Hz
	Facteur de puissance (cos φ)	1
	Raccordement AC	monophasé
<b>Rendement</b>	Rendement max. / Euro ETA	96,1% / 95,2 %
<b>Caractéristiques générales</b>	Dimensions (l / h / p) en mm	468 / 613 / 242
	Poids	63 kg
	Plage de température de fonctionnement	-25 °C ... +60 °C
	Autoconsommation : service (veille) / nuit	< 7 W / 0,25 W

**II.5 Le fonctionnement de l'installation**

L'analyse du fonctionnement du système et de ses composants permet de fixer préalablement une partie de ces paramètres. Le reste de ces paramètres est déterminé par des routines d'optimisation afin de compléter la définition du système en termes de dimensionnement.

Les hypothèses et critères utilisés sont détaillés dans ce chapitre.

L'installation pour application en site isolé est constitué principalement de trois générateurs photovoltaïques il s'agit d'un champ de panneaux (ou modules) solaires photovoltaïques, d'une turbine éolienne, d'un générateur diesel et d'un banc de batteries

d'accumulateurs et des organes de conversion de l'énergie produite en 220 V alternatif (onduleur) et d'un redresseur. L'onduleur (convertisseur DC/AC) sera utilisé dans les systèmes incluant un bus alternatif. Le choix des composants se fait de telle sorte que le système puisse continuellement fournir à l'utilisateur l'énergie dont il a besoin.

Installée sur le sol à proximité des habitations, les panneaux photovoltaïques exposés au soleil et la turbine éolienne exposée au vent produisent du courant continu. Après transformation par l'onduleur en courant alternatif 220 V, ce dernier pourra être utilisé soit directement, soit être stocké dans la batterie d'accumulateurs pour une utilisation ultérieure.

Dépendant du lieu géographique d'implantation du générateur et du profil de consommation d'électricité du client, un groupe électrogène pourra ponctuellement compléter la production d'énergie. L'ensemble des générateurs fournit du courant alternatif à 50 Hz et 220 V, permettant d'utiliser potentiellement les mêmes applications qu'avec un raccordement au réseau de distribution public.

### **II.5.1 Système modulaire couplé du côté AC**

De nombreux composants nouveaux ou renouvelés, sont aujourd'hui candidats à la production et/ou stockage d'électricité. Ils constituent une offre de plus en plus riche permettant de couvrir de nouveaux besoins en électricité, éventuellement indépendante du réseau de distribution pour des applications isolées, mobiles ou nomades : générateurs photovoltaïques et éoliens, groupes électrogènes à cogénération, composants électrochimiques accumulateurs et piles à combustibles de technologies très variées. Soulignons que la plupart de ces composants sont **modulaires** (cellulaires) et présentent une propriété « basse tension et fort courant » remarquable qui suscite des études spécifiques, d'une part sur des convertisseurs statiques adaptés à cette propriété, d'autre part relativement à l'exploitation judicieuse de leur modularité par la bonne maîtrise des déséquilibres dans les associations série et parallèle.

Un couplage de tous les consommateurs et de tous les générateurs du côté AC (voir fig.II- 11) permet de réaliser des systèmes flexibles constitués de composants modulaires. En fonction de l'application et des sources d'énergie disponibles, il est possible d'intégrer différentes sources énergétiques, aussi bien renouvelables que conventionnelles. Le système peut en outre être élargi en toute simplicité par ajout de composants ou de générateurs électriques pour répondre à des besoins en énergie croissants.

L'ingénierie des systèmes modulaires avec couplage du côté AC a été développée pour la première fois par l'Institut national de l'énergie solaire (ISET e.V., Université de Kassel) et

par l'entreprise SMA technologie AG et il a été décrit dans plusieurs articles tel que (Burger *et al.* 2000) [46].

Le système modulaire présente une série d'avantages au regard de la planification de l'installation et du montage (concept, installation, extensibilité et compatibilité) tout en réduisant les coûts spécifiques du système.

Le système choisi dans notre étude, est réalisé de telle sorte à obtenir un fonctionnement parallèle des deux sources (éolienne, photovoltaïque) avec un groupe électrogène de secours, conçu pour l'alimentation d'un site isolé [1].

Le système parallèle relie les deux sources (éolienne, photovoltaïque) en même temps à la batterie et le groupe électrogène intervient en secours (quand les batteries sont déchargées). Tous les composants y sont connectés selon la figure (fig. II-11) suivante :

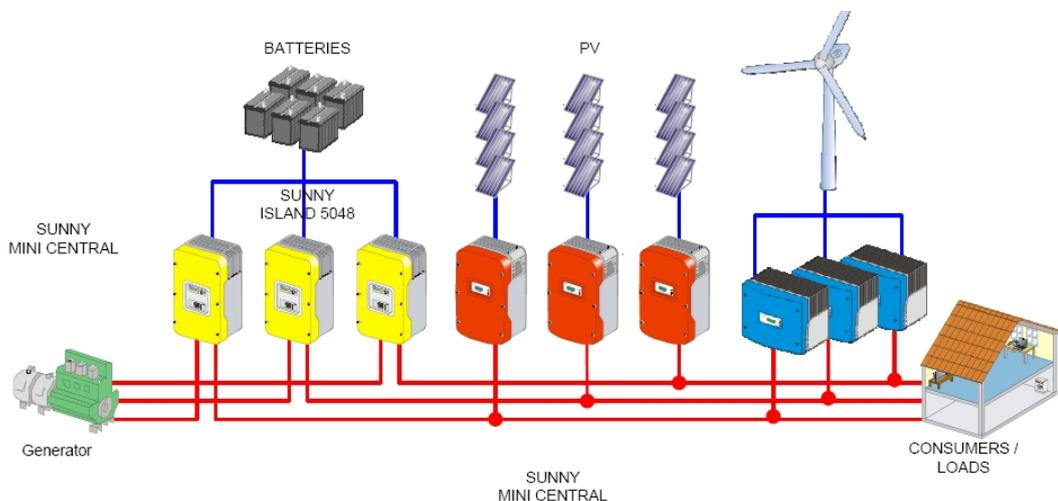


Figure II-11 : schéma de principe de l'installation étudiée.

Pour le couplage des composants

➤ Couplage AC/convertisseurs

PV : 03 convertisseurs DC/AC sont utilisés pour convertir l'énergie solaire incidente sur la surface du générateur PV en un Courant Alternatif (AC) triphasé qui est injecté dans le bus principal AC du système.

➤ Couplage AC/convertisseurs

Aérogénérateur : 03 convertisseurs DC/AC sont utilisés pour convertir l'énergie recueillie par la turbine éolienne en courant alternatif (AC) triphasé qui est injecté dans le bus principal AC du système

➤ Couplage AC/convertisseurs

Batteries : 03 convertisseurs DC/AC sont utilisés pour convertir le courant direct (DC) des batteries en 03 phases AC qui est injecté dans le bus principal AC du système.

Ces convertisseurs assurent la charge de l'ensemble batteries à partir du Bus AC quand l'énergie produite par le générateur PV et l'aérogénérateur dépasse les besoins des charges. Ceci est la procédure normale de fonctionnement de ces convertisseurs. ceux-ci possèdent également la possibilité de démarrer automatiquement le groupe diesel quand l'état de charge des batteries est au dessous d'un certain seuil et devient faible. Pendant le fonctionnement du groupe diesel, ces convertisseurs alimentent directement les besoins énergétiques des charges et charge l'ensemble batteries simultanément à partir du moteur diesel. Une fois l'état de charge des batteries dépasse une certaine limite et le stockage batteries devient important, les convertisseurs reprennent leur fonctionnement normal comme décrit précédemment.

Système d'acquisition de données : ce système est utilisé pour mesurer et collecter les données de tous les composants du système pour les besoins de contrôle et d'évaluation technique.

**Conclusion**

Les sous – paragraphes antérieurs ont servi à donner la structure de la représentation de l'installation étudiée dans ce mémoire.

# **Chapitre III**

## **Etude de pré faisabilité**

**III.1 Introduction**

La mise en place de systèmes réels est généralement précédée d'un ensemble d'études théoriques de faisabilité technique. La création d'outils de modélisation rend possible la simulation du fonctionnement de ces systèmes pour l'application envisagée.

Deux cas de configurations pour application potentiel de la génération d'énergie via une installation hybride ont été évalués afin de déterminer selon un certain nombre de critères techniques, quelles sont les applications réellement envisageables pour ce type de production. Nous analysons les deux configurations et choisissons le système assurant le meilleur compromis de faisabilité technique et rentabilité économique.

**III.2 Application du logiciel HOMER pour l'optimisation : Borj Cedria****III.2.1 Présentation de l'outil de simulation**

Étant donné que les performances d'un SEH, le rendement et la durée de vie, sont influencées en partie par sa conception, c'est-à-dire le dimensionnement des composants, le type de composants, l'architecture etc., et d'autre part, par le choix de la stratégie de fonctionnement. Quelques paramètres permettant d'évaluer ses performances sont : l'économie de carburant, le coût du kW, le nombre et la durée des pannes, le nombre d'arrêts pour l'entretien etc.

Le logiciel HOMER (hybrid optimization model for electric renewables) développé par NREL (national renewable energy laboratory) aux Etats-Unis [14], simplifie la tâche d'évaluer les conceptions des différents systèmes d'alimentation électrique, hors-réseau et reliés au réseau, pour une variété d'applications. Il permet d'analyser et de combiner divers sources d'énergie afin d'arriver à afficher une configuration optimal, différents cas de configurations ont été évalués afin de déterminer selon un certain nombre de critères techniques, quelles sont les applications réellement envisageables pour ce type de système dans ce cas diverse opérations de transformation d'énergie ont lieu du moment que diverse sources contribuent a la génération d'énergie et sa conversion en énergie électrique.

Pour simuler une installation donnée, il faut définir tous les éléments de cette dernière, en utilisant les composants définis dans la bibliothèque du logiciel (turbines éoliennes, hydrauliques, les batteries, électrolyseurs, combustibles, biomasse...) par la commande Add/Remove. Si un composant donné ne figure pas dans cette bibliothèque, il faut le rajouter en introduisant toutes ces caractéristiques techniques ainsi que son coût, il faut aussi spécifier le nombre de chaque composant dans l'installation à simuler. On peut aussi modifier les caractéristiques d'un composant déjà existant dans la bibliothèque. Les potentiels renouvelables (éolien, solaire, biomasse...) sont introduis soit manuellement, soit importés via internet ou d'un fichier texte. Les charges sont définies par leur nature (CA ou CC) et leur distribution horaire.

### III.2.2 Construire le schéma de conception du système hybride

Sur l'environnement HOMER, nous avons défini chaque élément de notre installation, en se basant sur toutes les données et les caractéristiques fournis dans le chapitre II. En amont de l'installation, on définit les potentiels renouvelables disponibles (solaire et éolien) et le combustible en utilisant les données fournies dans le chapitre II. A l'aval de l'installation, on a défini aussi les deux charges à satisfaire (électricité et RO), données dans le chapitre II. D'autres données sont notamment nécessaires tel que :

- Les coordonnées du site (longitude, latitude, le temps),
- L'élévation,
- Les durées de vie des composants, ainsi que leurs coûts,
- La durée de vie du projet,
- La rugosité du terrain environnant, variation de la vitesse avec la hauteur,
- Le maximum manque annuel admis sur la demande : 0 % (Il faut fournir les 100 % de la charge demandée durant toute l'année, car le site est autonome).

A noter aussi que nous avons fixé comme contrainte, avant de lancer la simulation, la fraction de l'énergie à produire par la partie renouvelable du système, qui est de 60 % au minimum de l'énergie totale produite.

La mise en œuvre de la simulation sous l'environnement HOMER .ceci à travers une étude d'un cas, Afin de répondre à des objectifs définis dans la proposition du sujet et de démontrer la faisabilité de la mise en œuvre de la configuration choisie.

Nous présentons sur la figure 1 le diagramme relatif au programme HOMER, du Système hybride.

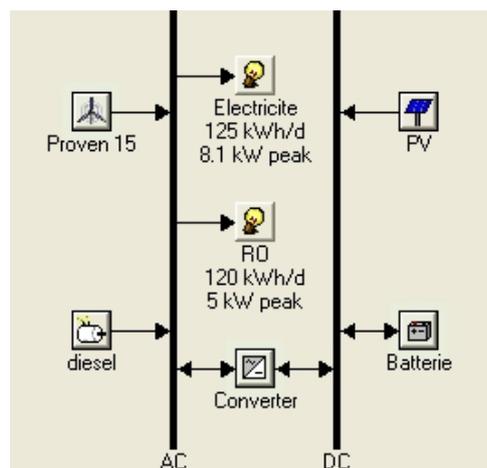


Figure III-1 : Architecture du SEH

**Cas d'étude**

Charge, valeur moyenne :	245 kWh/j
Eclairage, valeur moyenne :	4,7 kWh/m <sup>2</sup> /j
Vitesse du vent, valeur moyenne :	5,08 m/s
18,5kW Diesel Prix du carburant :	1,2 \$/L

**III.2.3 Simulation**

Le modèle du SEH est introduit dans le logiciel avec les options de disponibilité technologique, le coût des composants et la disponibilité des ressources, calculs d'équilibre énergétique sont exécutés pour chaque configuration du SEH considérée [48]. Les configurations obtenues sont sélectionnées en fonction de leur faisabilité, du coût d'installation. La rentabilité du fonctionnement est évaluée sur la vie du projet, estimée a priori à 25 ans. Les calculs du coût du SEH prennent en compte des coûts tels que le capital et l'intérêt, l'amortissement, les frais de fonctionnement, l'entretien et le carburant. Toutes ces estimations des coûts sont détaillées dans cette partie.

**III.2.4 Résultats de la simulation des performances du système hybride**

HOMER produit des résultats que nous pouvons afficher sous forme de liste de configurations possible triés par coût du cycle de vie (net present cost NPC). IL affiche également des résultats de simulation dans des tableaux et des graphiques. Les résultats des simulations concernent les différentes parties du système de génération.

**III.2.4.1 Configurations du SEH en fonction du coût net actuel**

Les résultats de simulation par HOMER sont donnés sous forme de combinaisons (configurations) réalisables (techniquement et économiquement) des éléments définis dans l'installation, ses configurations sont classées par ordre croissant de la (NPC) Valeur Actuelle Nette. Pour chacune de ces solutions possibles, HOMER fournit tous les paramètres de fonctionnement des composants et de l'ensemble de l'installation (la fraction de l'énergie renouvelable, les émissions de gaz, le coût spécifique de l'énergie, l'énergie totale produite, consommée et l'excès de l'énergie...).

L'espace de recherche est listé par HOMER suivant les tailles des composants de tout le système avec les différentes contraintes et HOMER propose plusieurs configurations. Dans notre cas, HOMER a considéré les variantes suivantes (figure III-2)



Les systèmes de production participent suivant les fractions décrites dans le tableau et qui montrent une participation importante des sources renouvelables qui atteignent 65%.

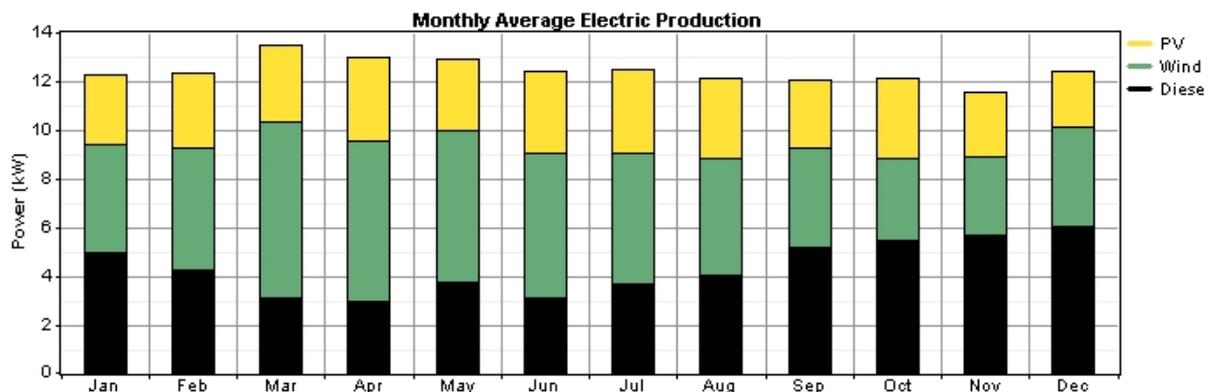
**Tableau III-2 : Energie annuelle consommée**

Charge	Consommation	Fraction
	(kWh /an)	
Charge CA	89059	100%
Total	89059	100%

Variable	Valeur
Fraction renouvelable :	0.572
Excès d'énergie :	11933 kWh /an
Charge non satisfaite	$2.67.10^{-5}$ kWh /an

Notons que 11,1% de la production totale d'électricité par le système est excédentaire, ou de l'énergie qui n'est pas utilisée par le système et va être rejetée.

La puissance moyenne mensuelle produite par les sources du SEH est illustrée dans la figure III-3.



**Figure III- 3 : Puissance moyenne mensuelle produite par chaque source**

Les énergies mises en jeu dans le système durant une année de fonctionnement, présente un caractère continu de la disponibilité de l'énergie produite tout au long de l'année, il ne peut-être que satisfaisant pour l'atténuation de la part allouée au stockage.

On remarque que presque deux tiers (65 %) des besoins énergétique du site sont fournis par les générateurs utilisant les ENR. Le reste (un tiers) est assuré par la source d'énergie conventionnelle (Fuel). Cette fraction (65 %) est satisfaisante, en vue des ressources renouvelables disponibles relativement faibles (voir chapitre II), avec les puissances considérées du PV, de l'éolienne et de la capacité de stockage dans la simulation. D'autre part, l'augmentation de ces puissances engendre des coûts prohibitifs du système. La

turbine éolienne seule développe une puissance supérieure à celle du diesel, ce qui traduit les fortes performances de la turbine PROVEN 15 utilisée. Le générateur PV est classé en dernière position avec une fraction de 25 % de la production totale.

A noter aussi que la fraction de 65 % est une moyenne annuelle, qui n'est pas constante sur toute l'année, elle est liée à la variabilité des ressources en Enr. Les mois les plus ventés et mieux ensoleillé correspondent à une production importante par les Enr avec une faible production par le DG et inversement.

### III.2.4.3 Le Générateur Photovoltaïque

La puissance délivrée par le PV est la plus faible parmi les autres générateurs, les paramètres de fonctionnement de ce dernier sont :

**Tableau- III-3** : Paramètres de Fonctionnement du PV

Variable	Valeur	Unité
Heures de fonctionnement :	4385	h/an
Facteur de capacité (l'état de charge moyenne du PV sur l'année)	20,3	%
Puissance minimale :	0,0	kW
Puissance moyenne :	73,1	kWh /j
Coût spécifique de l'énergie	0,167	\$/kWh
Pénétration PV:	30	%
Puissance maximale :	18.3	kW

Les puissances journalières moyennes ainsi que les puissances mensuelles moyennes, pour chaque mois de l'année, sont représentées respectivement par les courbes de la figure-III-4 et par la figure (III-5) et le tableau (III-4) ci-après.

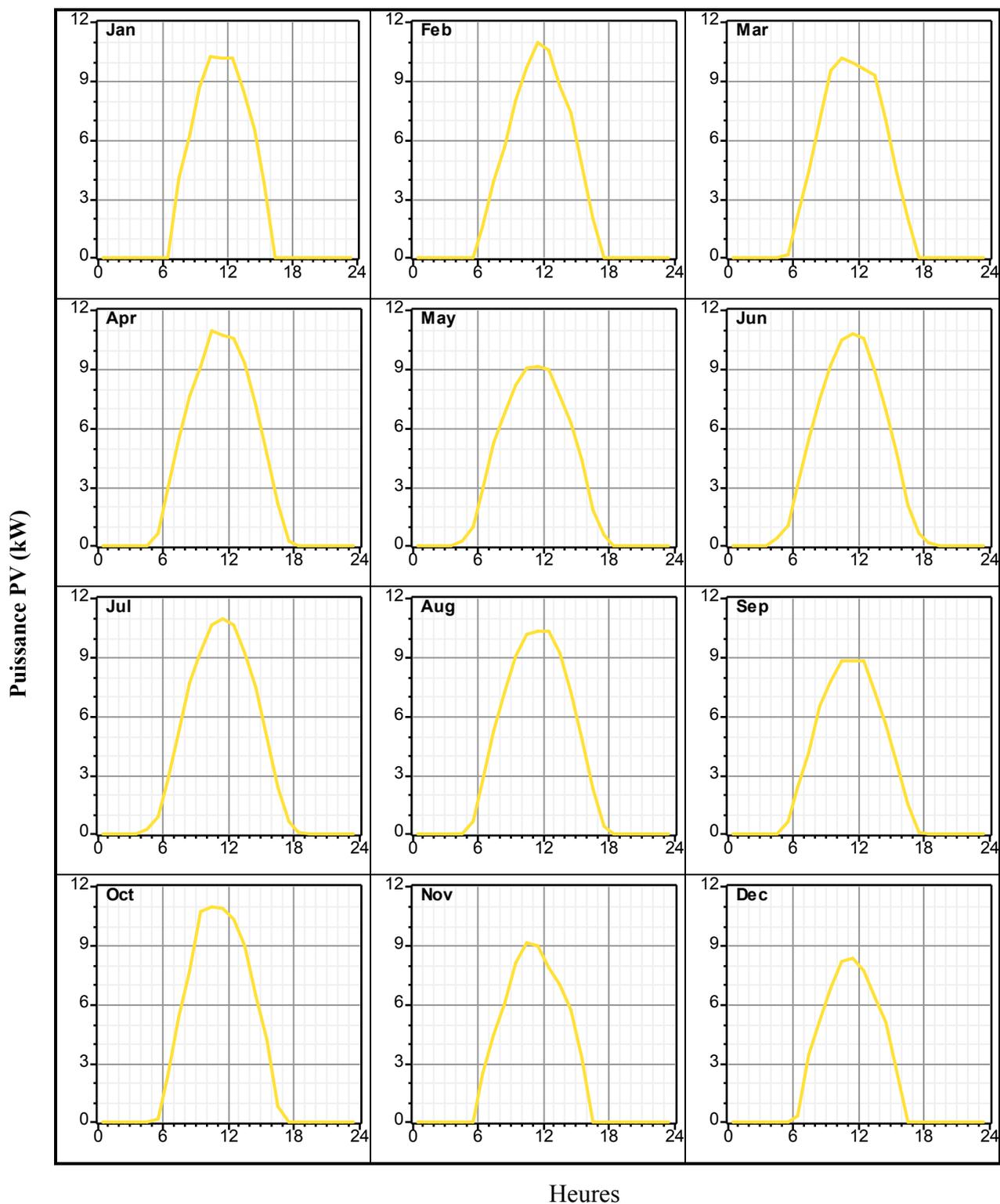
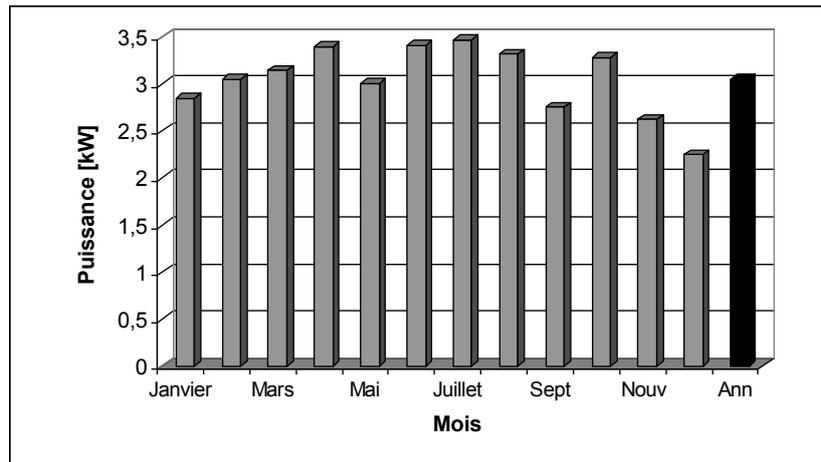


Figure -III-4 : Puissances journalières moyennes délivrées par le générateur photovoltaïque

Tableau- III-4 : Puissances moyennes mensuelles du PV

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Jui.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	An
$P_{moy}$ [kW]	2,85	3,05	3,14	3,40	3,01	3,41	3,47	3,32	2,75	3,28	2,63	2,25	3,05



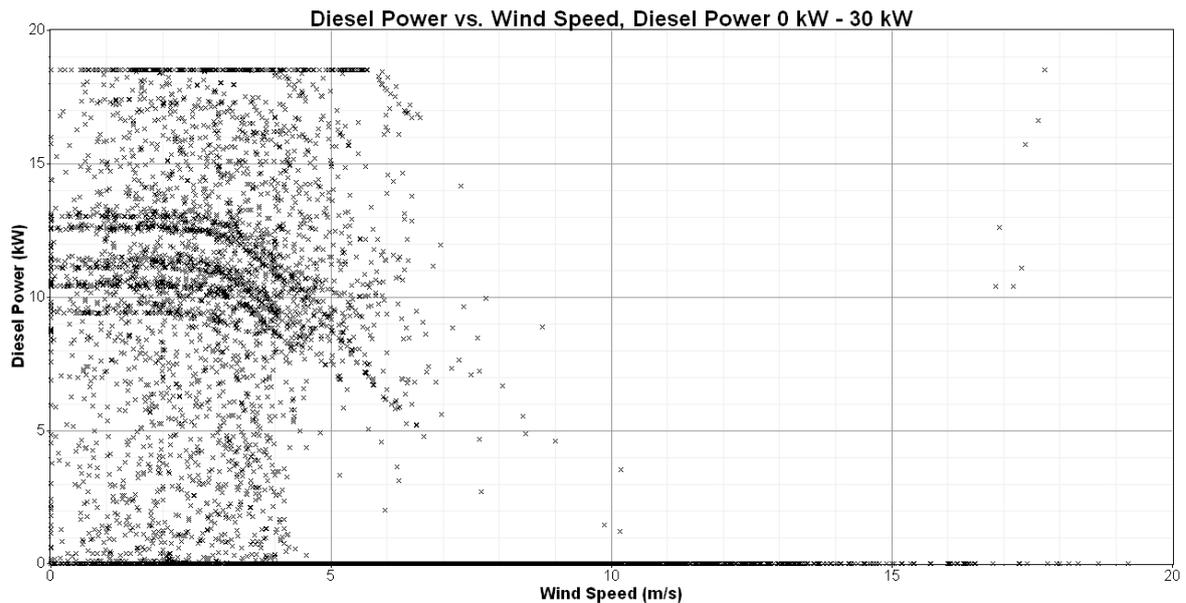
**Figure- III-5** : Représentation des puissances moyennes mensuelles du PV

Après l'analyse des résultats obtenus pour les des puissances moyennes journalières du PV, on remarque que la période de fonctionnement du PV est plus étroite durant les mois d'hiver, c'est environ entre 7h et 17h, soit 10 heures par jours (Novembre, Décembre et Janvier) et inversement pour la période d'été. La production par PV est nulle, ou très faible, aux périodes du pic de consommation électrique (entre 20 h et 22 h), ce qui nécessite soit le recours au autres générateurs, soit à l'énergie stockée, et ce selon la valeur du pic, ainsi que le classement de la journée dans l'année. Cela justifie les pics de production du diesel cités et expliqués dans la partie (III.1).

A partir des représentations mensuelles, on peut aussi dire que le fonctionnement du PV est plus régulier par rapport à ce de la turbine.

Pour mieux illustrer le lien entre le fonctionnement des générateurs renouvelables et le diesel, on considère les deux cas suivants :

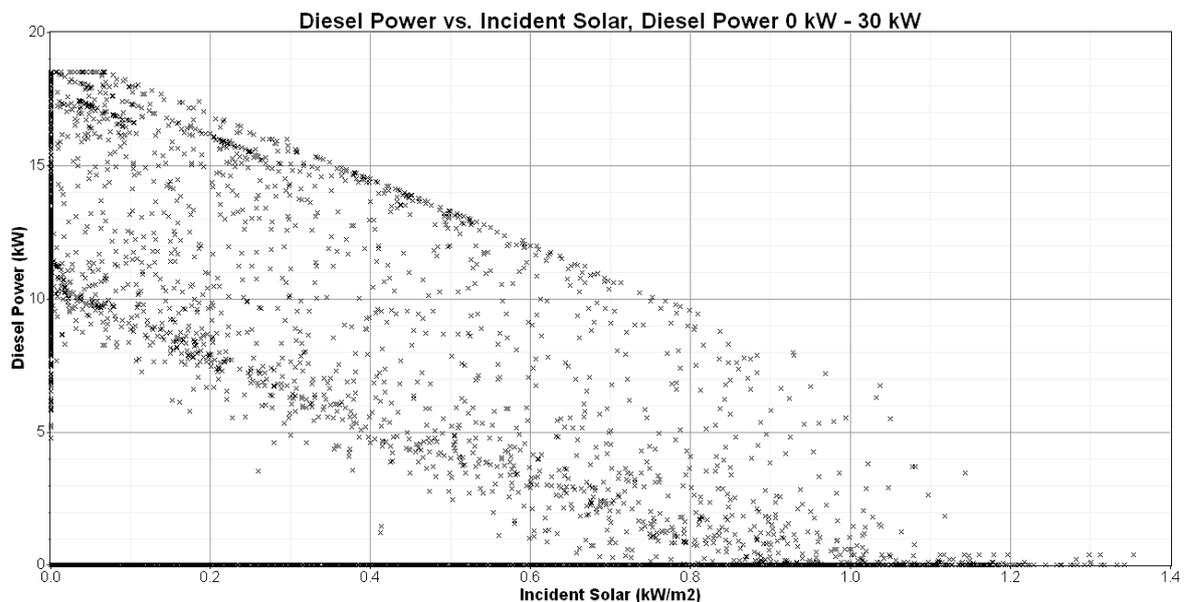
- i) Le fonctionnement du diesel (en termes de puissance développée) en fonction du régime du vent : il est illustré par le diagramme de la figure III-6.



**Figure III-6** : Production du diesel en fonction de la vitesse du vent

La puissance développée par le DG est inversement proportionnelle avec le régime du vent, et par suite avec la production du PROVEN15. Le fonctionnement du diesel est plus important pour des vitesses du vent inférieures à 5 m/s, mais à des différents niveaux de puissance (de 0 à 18,5 kW).

ii) Le fonctionnement du diesel (en terme de puissance développée) en fonction de flux solaire incident : il est représenté par le diagramme la figure III-7.



**Figure- III-7**: Production du diesel en fonction de flux solaire incident

On peut observer que puissance de diesel admet deux bornes : une borne inférieure valant 0 KW et une borne supérieure qui vaut 18,5 KW et que la puissance à la sortie du diesel est

inversement proportionnelle avec le flux solaire incident, et par suite avec la production du PV.

#### III.2.4.4 Eolienne PROVEN 15

L'éolienne développe la plus grande puissance, ses paramètres de fonctionnement sont résumés dans le tableau-III-5 ci-dessous.

**Tableau III-5** : Paramètres de fonctionnement de l'éolienne

Variable	Valeur	Unité
Puissance minimale	0.00	kW
Puissance maximale	18.3	kW
Pénétration éolienne	48.5	%
Heures de fonctionnement	7265	h/an
Puissance moyenne	4.93	kW
Capacité totale	15.0	kW
Facteur de capacité	32.9	%

PROVEN15 fonctionne pratiquement durant toute l'année, elle est à l'arrêt pour une période équivalente à 62 jours dans l'année (1495 heures/an), avec un état de charge moyenne de 32.9 %. Les périodes d'arrêt correspondent à des vitesses du vent très faibles (inférieure à 3 m/s).

La distribution des puissances journalières moyennes, pour chaque mois de l'année, est illustrée sur les courbes de la figure (III-8) ci-après :

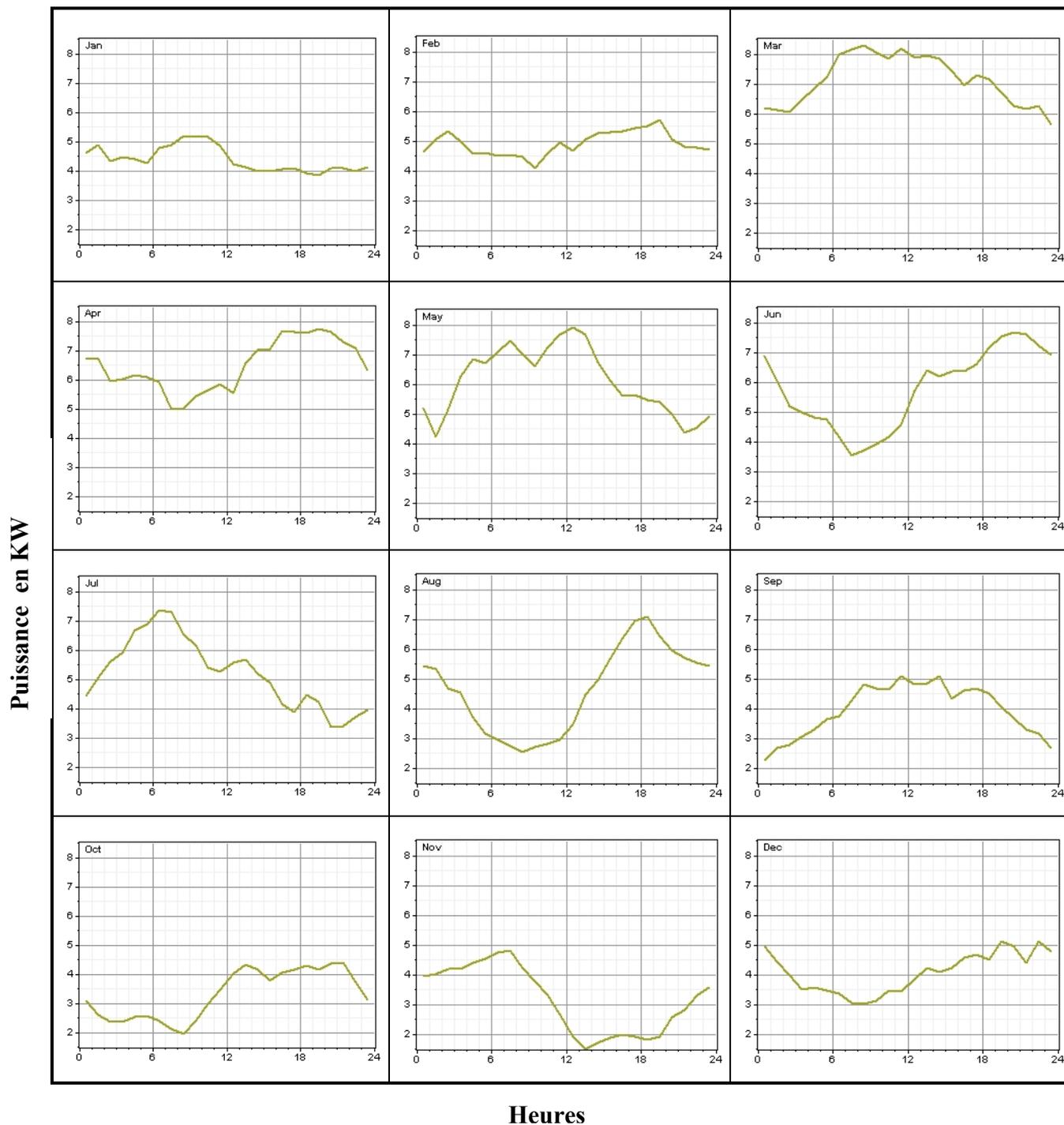
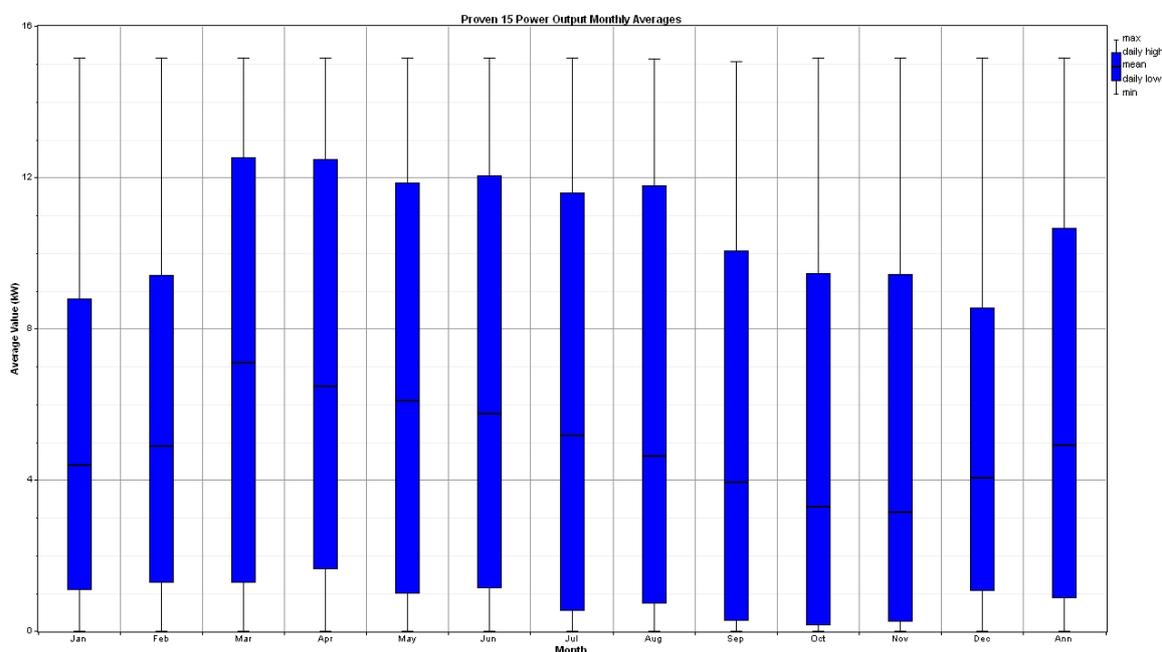


Figure- III-8 : Puissances journalières moyennes délivrées par PROVEN 15

On remarque que ces courbes sont très semblables avec celles qui représentent la distribution des vitesses moyennes journalières du vent données au chapitre II. Les mois les plus ventés (Mars, Avril, Mai et Juin) sont caractérisés par une production importante et inversement, comme le montre le tableau III-6 et la figure III-9.

**Tableau- III-6 :** La Puissance moyennes mensuelles de l'éolienne

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Jui.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Ann.
P <sub>Moy</sub> [kW]	4.39	4.91	7.11	6.48	6.11	5.76	5.20	4.64	3.94	3.30	3.15	4.07	4.93



**Figure- III-9:** Représentation des puissances moyennes mensuelles de l'éolienne

### III.2.4.5 Le Générateur Diesel

Le générateur diesel est appelé à fonctionner à n'importe qu'elle moment de la journée et d'une manière optimisée, c'est-à-dire une possibilité de fonctionnement à pleine charge comme à charge partielle et ce selon les besoins du site. La mise en marche (ou à l'arrêt) est donc fonction de la demande, de la production des autres générateurs et de l'état de charge des batteries. Le combustible à utiliser est le fuel (moteur diesel), ses propriétés sont résumées dans le tableau ci-contre :

**Tableau-III-7.** Propriétés du combustible

Propriété	Valeur	Unité
Prix	1.2	\$/L
PCI	42.89	MJ/kg
Masse volumique	930	kg/m <sup>3</sup>
Pourcentage carbon	88,0	%
Pourcentage soufre	0,330	%

Les paramètres de fonctionnement sont donnés par le tableau-III-8.

**Tableau-III-8** : Paramètres de fonctionnement du générateur diesel.

Variable	Valeur	Unité
Heures de fonctionnement :	3743	h/an
Facteur de capacité (l'état de charge moyenne du GD sur l'année)	23.5	%
Puissance minimale délivrée	0.00267	kW
Puissance moyenne délivrée	10.2	kW
Puissance maximale délivrée	18.5	kW
Durée de vie	5.34	an
Carburant utilisé annuellement	12463	L/an
Utilisation spécifique du carburant :	0.327	L/kWh
Rendement électrique moyen	27.6	%
Nombre de démarrages	540	démarrages/an

Le générateur diesel fonctionne pendant une période inférieure à un tiers de l'année, avec un état de charge moyen de 27.6 %. Les puissances journalières moyennes délivrées, pour chaque mois de l'année, sont représentées par les courbes de la figure III-10 :

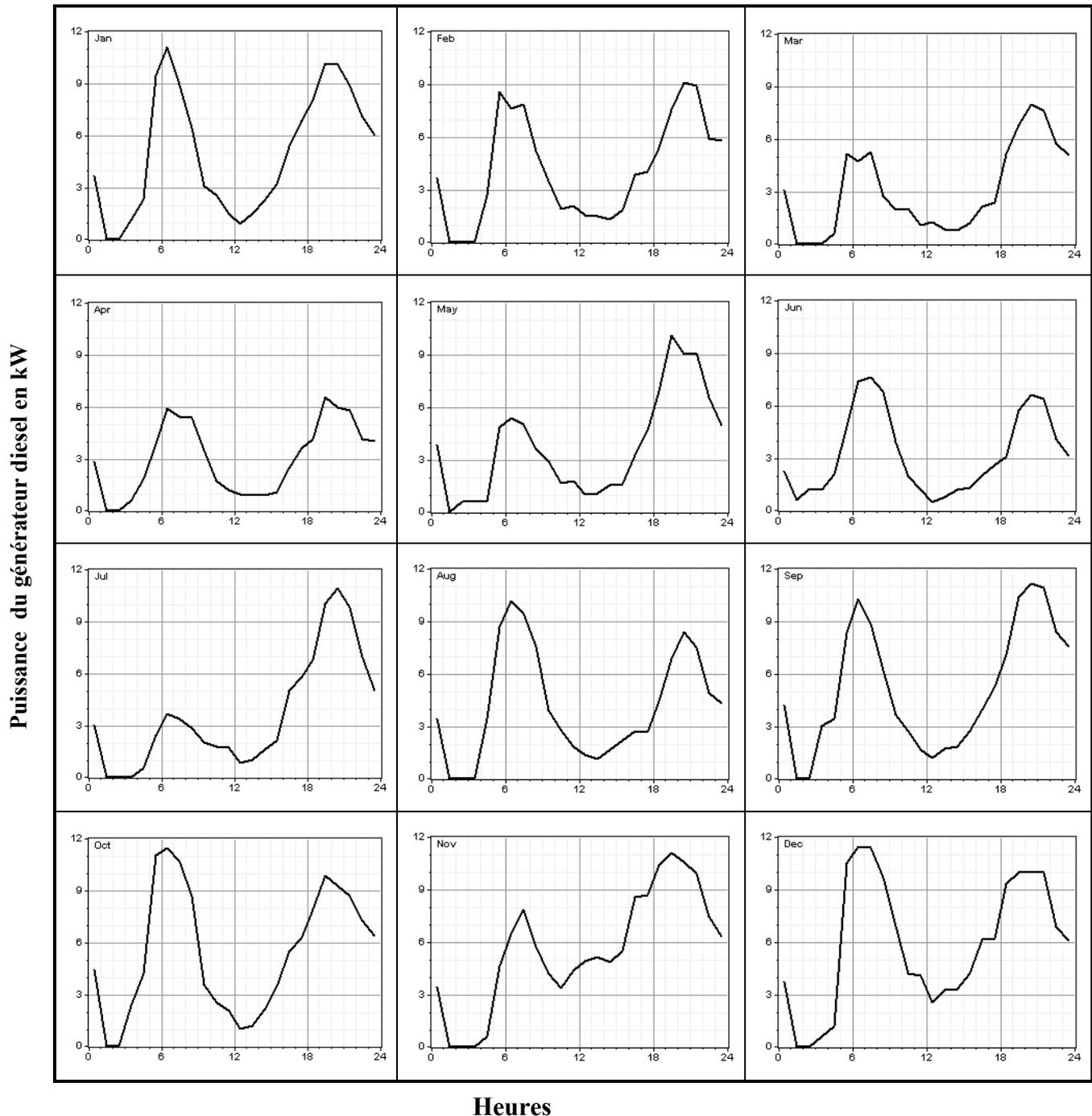


Figure III-10: Puissances journalières moyennes délivrées par le diesel

A partir de ces courbes, on remarque que le profile des puissances journalières moyennes du DG sont semblables pour tous les mois (ils ont la même allure), mais à des valeurs différentes. Ils sont caractérisés par deux minimums (production faible ou nulle) et deux pics.

Le premier minimum, qui correspond à la période entre 3h et 5h du matin, représente une très faible production pour les mois de Décembre, Janvier et Février et un arrêt pour le reste des mois. Il est justifié par la faible charge électrique dans cette période (la nuit). Les

batteries et l'éolienne peuvent satisfaire la demande. La production du générateur PV est nulle à cette période de la journée.

Le deuxième minimum, durant la journée, est traduit par une demande moyenne (hors du pic) et par une production maximale par PV.

Le premier pic de production à environ 8h du matin, est due à :

- Une augmentation de la charge électrique,
- Une très faible production (ou nulle) du PV à cette période de la journée,
- L'état de charge des batteries est minimal.
- Le diesel est donc utilisé pour combler le manque et pour recharger les batteries.
- Le second pic à lieu environ 21h, ce pic est justifié du fait que :
- Cette période de la journée correspond à la charge électrique maximale (heure de pointe),
- La production du PV est nulle.

A noter aussi que les valeurs de ses deux pics sont différentes d'un mois à un autre, ils sont importants pour les mois à faible potentiel renouvelable, particulièrement l'irradiation solaire (Janvier et Décembre). Le diagramme ci-dessous illustre la production journalière du Diesel durant toute l'année. La couleur noire représente, selon l'échelle à droite, les périodes de l'arrêt et/ou à très faible production, alors que la couleur rouge montre les deux pics. La production moyenne est représentée par la couleur verte. Les périodes d'arrêt, citées précédemment, sont bien illustrées dans ce diagramme (les zones en noire).

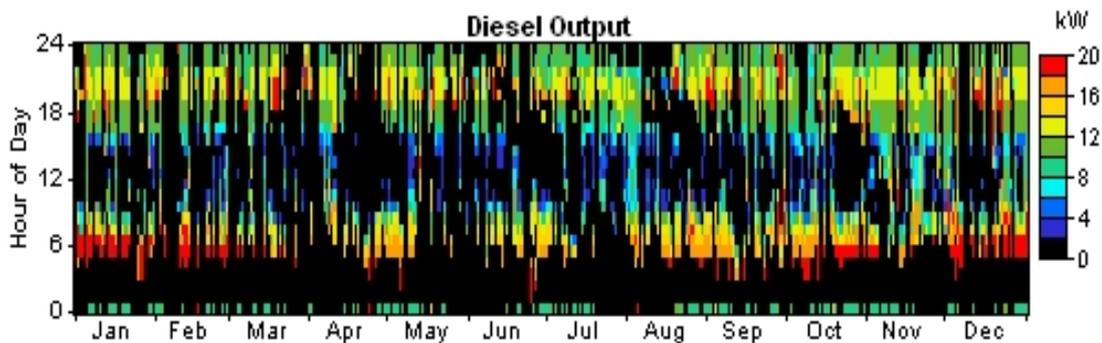


Figure III-11 : Production journalière moyenne du Diesel pour toute l'année

Pour mieux analyser la distribution de la production du diesel sur l'année, on utilise les puissances mensuelles moyennes développées par ce dernier, qui sont données par le tableau III-9 et représentées par la figure III-12 ci-après :

Tableau- III-9 : La Puissance moyennes mensuelles du diesel

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Jui	Août	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Ann .
P [kW]	5.02	4.16	3.06	3.03	3.77	3.26	3.64	4.14	5.19	5.41	5.59	5.90	4.35

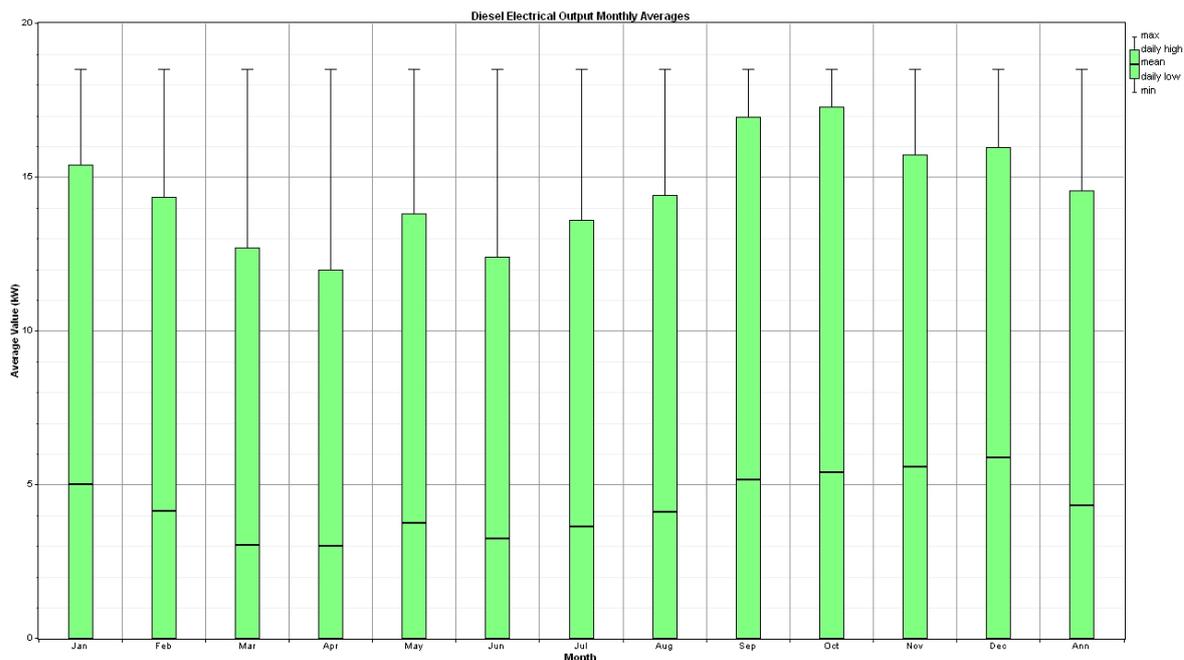


Figure- III-12 : Représentation des puissances moyennes mensuelles du diesel

La production du générateur diesel est fonction des potentiels renouvelables. En effet elle est forte entre le mois de Septembre et le mois de décembre, et faible entre le mois de Mars et le mois d’Août.

**III. 2.4.6 Les Batteries**

L’installation peut fonctionner sans système de stockage, cependant, le rôle des batteries est essentiellement pour mieux optimiser les paramètres de fonctionnement, dans le sens de minimiser la part de l’énergie produite par le générateur classique. L’excès de production par les générateurs renouvelables est donc stocké dans les batteries, on peut ainsi minimiser la consommation du combustible et les émissions des gaz. Les paramètres de fonctionnement des batteries sont :

Tableau- III-10 : Paramètres de fonctionnement des batteries

Variable	Valeur	Unité
Energie d’entrée	15748	kWh/an
Energie délivrée	12599	kWh/an
Perte d’énergie	3162	kWh/an
Autonomie des batteries	4.54	heure
Coût spécifique moyen	0.012	\$/kWh
Durée de vie des batteries	12	an
Capacité totale des batteries	92.3	kWh

Pour analyser le fonctionnement journalier des batteries on utilise les courbes de l'état de charge moyenne journalière données par la figure III-13 (en % de la capacité maximale).

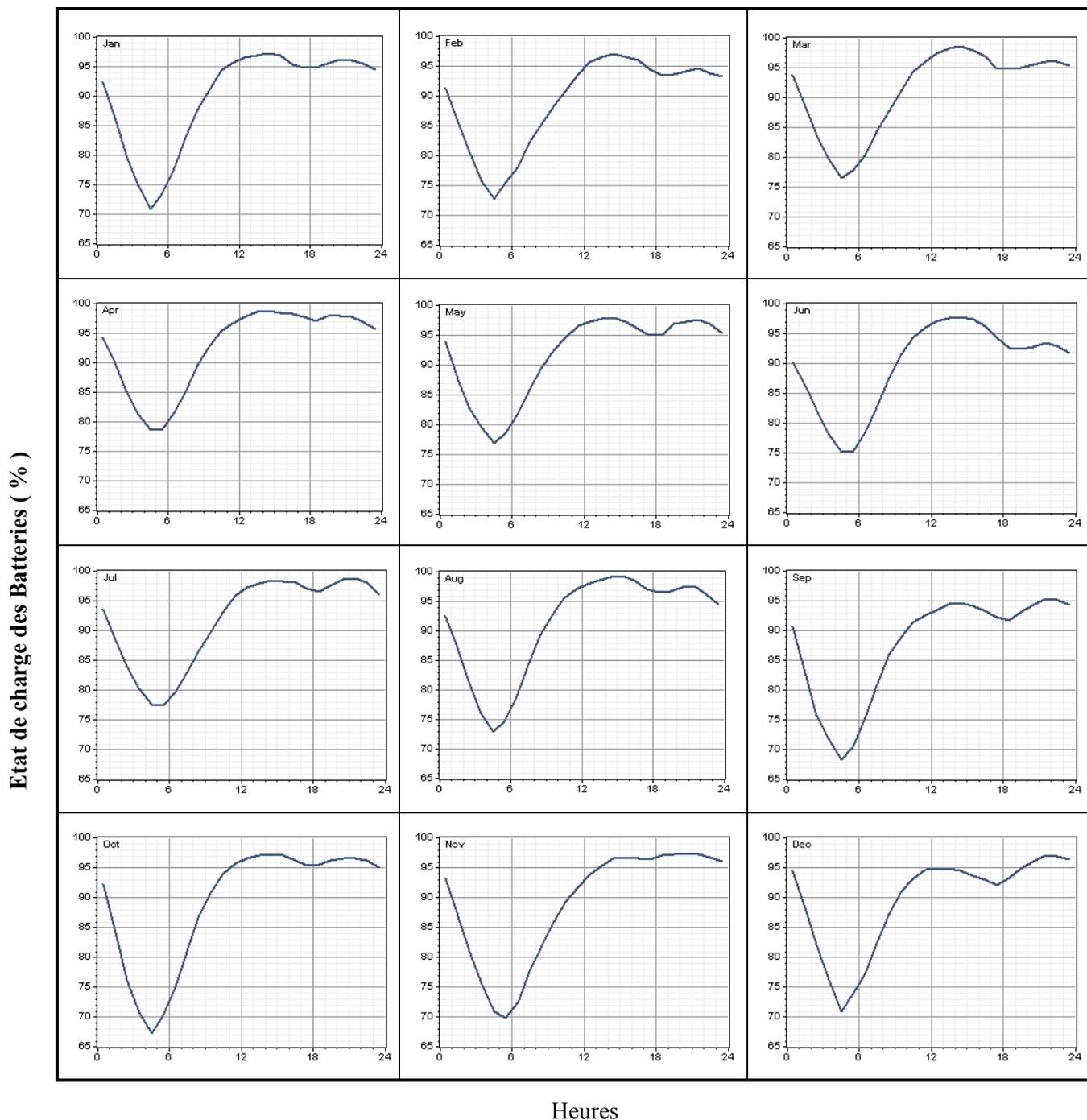


Figure III-13 : Etat de charge moyenne journalière des batteries

Le profil de la distribution journalière moyenne de l'état de charge est relativement semblable pour tous les mois, mais ce n'est pas avec les mêmes valeurs. L'état de charge journalière moyenne est caractérisé par un minimum à environ 7h du matin. Ce minimum

se situe juste avant le premier pic de production du diesel (voir figure III-10) et après le pic de l'onduleur. Un état de charge minimal signifie que le système de stockage a fourni de l'énergie au bus CA. Pour cette période de la journée (7h du matin), les batteries fournissent le maximum d'énergie, elles servent comme un système d'appoint. La courbe d'état de charge des batteries est croissante entre l'heure du minimum 7h et 3h du matin, c'est la période de recharge.

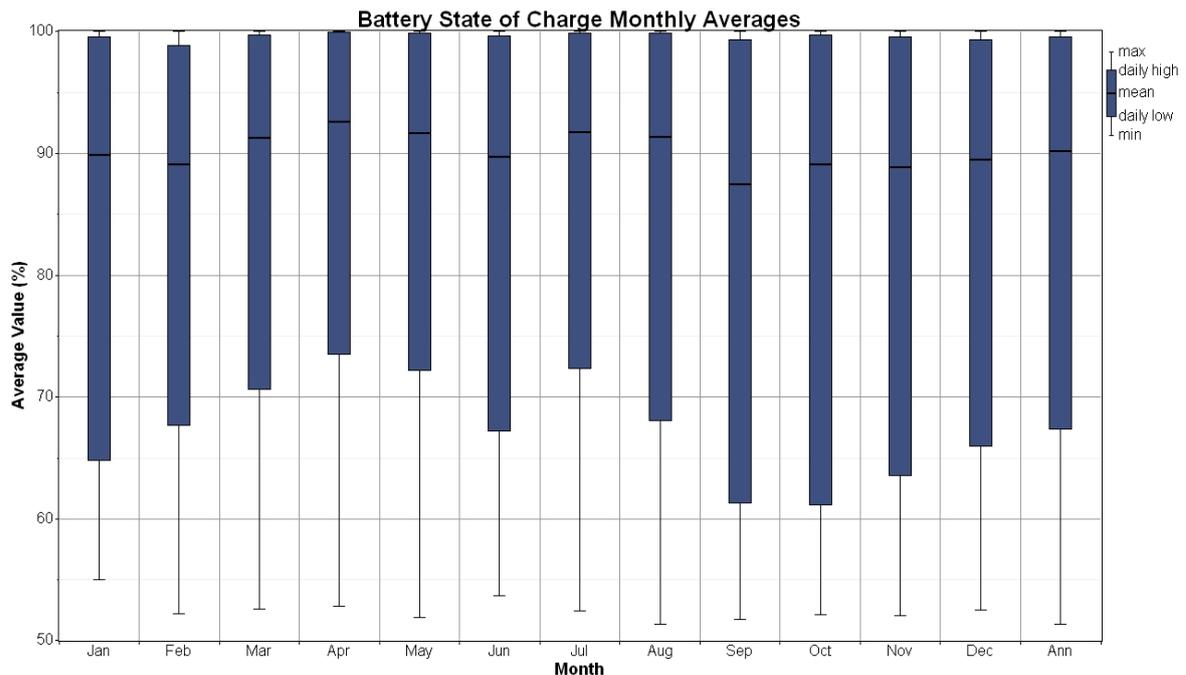


Figure- III-13 : Etat de charge mensuelle des batteries (en%)

On notera, l'importance de la réduction de la période d'intervention de la batterie qui est devenue restreinte seulement aux mois où le potentiel éolien est fort. L'énergie produite par la batterie serait très importante si le système était composé que d'une seule source.

Les batteries d'un système hybride subissent un cyclage important avec des décharges profondes plus ou moins importantes. Selon la durée de la décharge, on peut distinguer trois cas :

L'effet d'un cyclage journalier dont le profil et l'amplitude dépendent de l'énergie fournie par les générateur PV, éolien et celle consommée par l'utilisateur. Le cyclage journalier peut introduire des décharges très profondes d'une durée généralement courte.

L'état de charge moyen de la batterie peut atteindre un niveau critique suite à quelques jours consécutifs d'ensoleillement exceptionnellement faible.

La variation de l'ensoleillement moyen et de la vitesse du vent en fonction de la période de l'année résulte en un cyclage saisonnier. Ce dernier peut parfois conduire à des périodes

prolongées de charge basse de la batterie, quand les capteurs photovoltaïques et éoliens n'arrivent pas à recharger complètement la batterie.

### III. 2.4.7 Le Convertisseur (Sunny Island 5048)

Le convertisseur considéré est bidirectionnel, il est constitué de deux parties :

- Partie onduleur (entrée CC, sortie CA),
- Partie redresseur (entrée CA, sortie CC).

Le fonctionnement de l'onduleur est lié à la demande sur l'énergie stockée, l'étude de son fonctionnement nous permet de prévoir les périodes de décharge des batteries. Le fonctionnement du redresseur est lié à l'état de charge des batteries, l'analyse de son fonctionnement est très importante, car elle nous permet de prévoir les périodes de recharge des batteries et ainsi les générateurs utilisés pour cette opération (PV, WT, DG). On va donc analyser le fonctionnement de chaque partie séparément, qui est donné par le Tableau III-11.

**Tableau-III-11** : Paramètres de fonctionnement du convertisseur

Variable	Onduleur	Redresseur	Unité
Puissance moyenne fournie	2.5	0.9	kW
Puissance maximale fournie	10.0	10.0	kW
Facteur de capacité	24.7	9.3	%
Heures de fonctionnement	4328	3649	heures/an
Energie d'entrée	24016	9553	kWh/an
Energie de sortie	21615	8120	kWh/an
Pertes d'énergie	2402	1433	kWh/an

Tous les paramètres de fonctionnement du redresseur sont légèrement supérieurs à ceux de l'onduleur, car le redresseur fournit l'énergie nécessaire pour la recharge des batteries, plus les pertes au niveau de ces dernières et au niveau de l'onduleur.

La distribution journalière moyenne de la puissance délivrée par l'onduleur, pour chaque mois, est donnée par la figure-III-14.

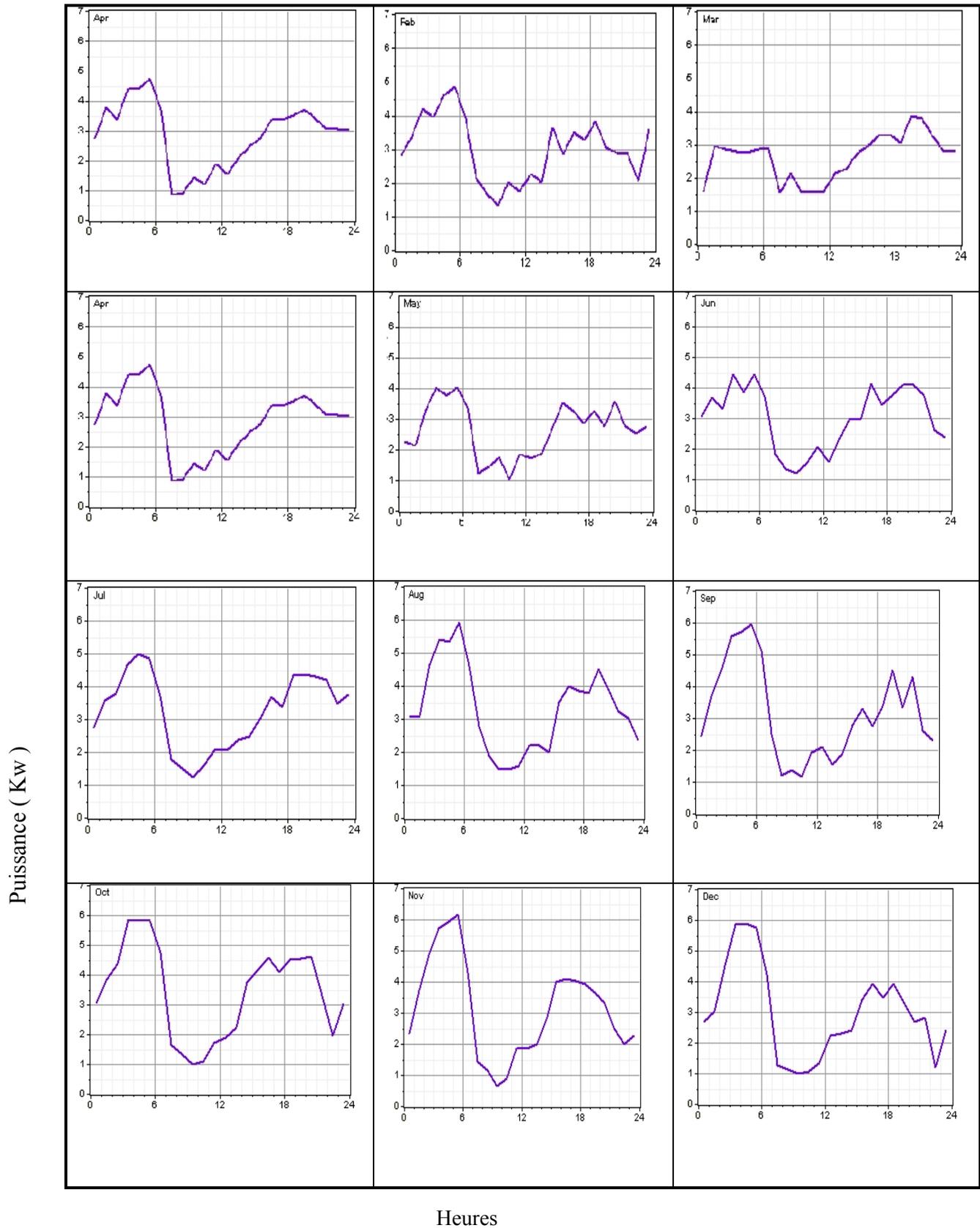
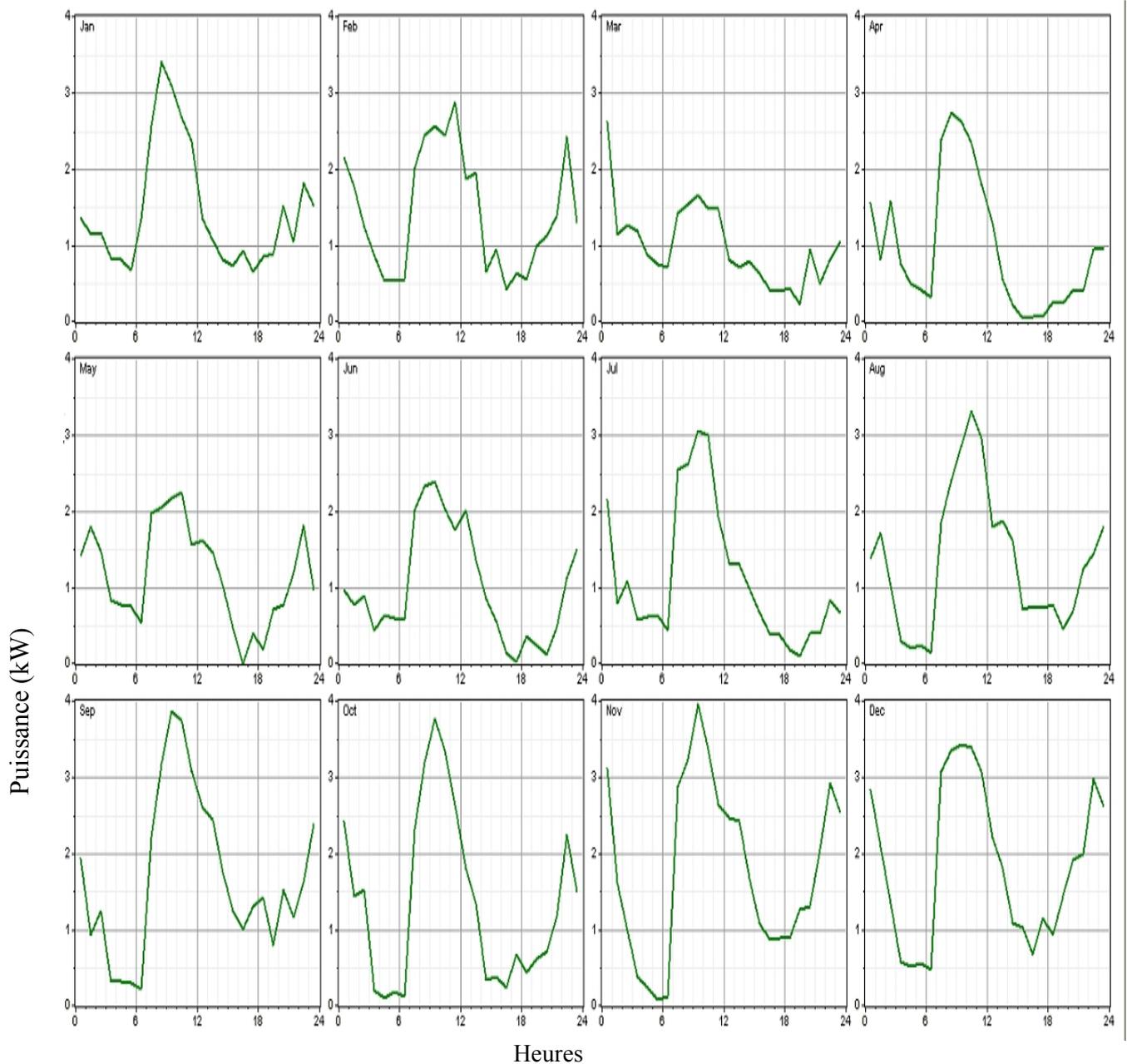


Figure- III-14 : Distribution de la puissance moyenne journalière délivrée par l'onduleur

Les performances moyennes journalières simulées pour l'onduleur montrent que ces courbes de distribution de la puissance sont semblables pour tous les mois. Elles sont caractérisées par un pic entre minuit et 5h du matin, qui correspond à la période de décharge des batteries. La demande sur l'énergie stockée est maximale, ce qui justifie l'état de charge minimal des batteries à cette période. Un minimum de fonctionnement est constaté entre 6h et midi.

De même, la distribution journalière moyenne de la puissance délivrée par le redresseur, pour chaque mois est donnée par la figure-III-15.



**Figure- III-15** : Distribution de la puissance moyenne journalière délivrée par le redresseur.

Ces courbes sont caractérisées par un maximum autour de 9h30 du matin, et deux minimums. Le pic représente la période de recharge des batteries, il correspond au pic du GD et il apparait après le minimum de l'état de charge des batteries et la valeur de ce pic varie sensiblement d'un mois à un autre. Le minimum à 16h correspond à un état de charge maximale des batteries. On remarque aussi que le redresseur fonctionne pour des périodes qui correspondent à une très faible production de GD (ou même nulle), cela signifie que ces périodes représentent l'opération de recharge des batteries par les Enr, c'est l'un des objectifs de cette installation (le stockage des Enr).

**III. 2.4.8 Les Emissions Des Gaz**

Les émissions des gaz polluants proviennent de la partie classique de l'installation. La réduction de ces émissions est l'objectif capital de cette étude, et ce dans le sens de remédier aux problèmes liés à la pollution atmosphérique. Le CO<sub>2</sub> et les NO<sub>x</sub> sont les principaux gaz dégagés par la combustion, les émissions annuelles jetées sont :

**Tableau- III-12** : Les émissions des gaz

Polluant	Emissions (kg/an)
Dioxyde de carbone :	35,332
Monoxyde de carbone :	87.2
Hydrocarbure non brûlé :	9.66
Particule :	6.57
Dioxyde soufre :	71
Oxydes de Nitrogène :	778

**III. 2.4.9 Répartition des coûts de l'installation :**

Pour estimer le coût total du projet on utilise, pour chaque élément, les données suivantes :

- Le capital initial,
- Les coûts de fonctionnement et de maintenance,
- Le coût de remplacement,
- La durée de vie.

Pour calculer les montants récupérés (S) à la fin du projet pour chaque composant on utilise les formules suivantes [24], [25] :

$$S = C_{rep} \times \frac{R_{rem}}{R_{comp}} \tag{III-1}$$

$$R_{rem} = R_{comp} - (R_{proj} - R_{rep}) \quad \text{III-2}$$

$$R_{rep} = R_{comp} \times INT \left( \frac{R_{proj}}{R_{comp}} \right) \quad \text{III-3}$$

S : Récupération [\$],

Crep : Coût de remplacement du composant [\$],

Rcomp : Durée de vie du composant [an],

Rrem : Durée de vie restante du composant après la fin du projet [an],

Rproj : Durée de vie du projet [an],

Rep: La durée du coût de remplacement.

Concernant le diesel, le prix du fuel est de (0,8 \$/L). La durée de projet est de 25 ans. On utilise un taux d'actualisation de 6 %, les résultats sont résumés par le tableau-13.

**Tableau- III-13** : Coûts de l'installation

Composant	Capital Initial	Capital Annualisé	Coût de remplacement annuel	Fonctionnement & maintenance annuelle	Consommation de carburant annuelle	Coût total annualisé
	(\$)	(\$/an)	(\$/an)	(\$/an)	(\$/an)	(\$/an)
PV	57000	4,459	0	0	0	4,459
PROVEN 15	41,500	3,246	1,012	0	0	3,691
Diesel	7,600	595	1,088	1,214	10,734	13,526
Batterie	3680	288	214	70	0	511
Convertisseur	10,000	782	326	1,000	0	2,048
Total	119,780	9,370	2,641	2,284	10,734	24,235

**Bilan de coût**

Coût net actuel : 309803 \$

Coût moyen unitaire annuel : 0,271 \$/kWh

**Tableau III-14** Coût net actuel

Composant	Capital	Remplacement	O&M	Fuel	Récupération	Total
	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)
PV	57,000	0	0	0	0	57,000
Proven 15	41,500	12,940	0	0	-7,252	47,188
diesel	7,600	13,905	15,524	137,212	-1,332	172,909
Batterie	3,680	2,738	895	0	-786	6,527
Converter	10,000	4,173	12,783	0	-777	26,179
Système	119,780	33,755	29,202	137,212	-10,146	309,803

Le coût total du projet est de 309803 \$. Les panneaux PV ne seront pas remplacés, le DG sera remplacé trois fois respectivement aux années N° 8, 16 et 23, avec une récupération en dernière année de 1332 \$. La turbine sera aussi remplacée pour l'année N°20, avec une récupération de 7252 \$. Pour les batteries deux remplacement (année N°12 et N°24), et pour le convertisseur un seul remplacement (année N°15).

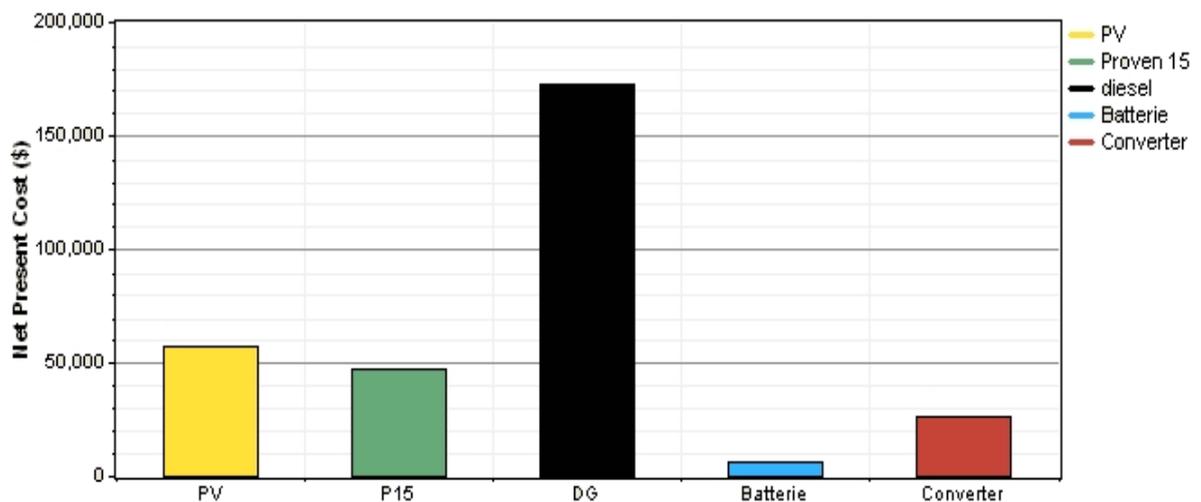


Figure- III-15 : Répartition des coûts de l'installation

Le DG présente le coût le plus élevé (plus de trois fois ce du PV et six fois ce de la turbine), cela est due au prix élevé du fuel et aux coûts d'entretien et de maintenance.

### III. 2.5 Cas d'une installation classique

Dans cette partie, on va étudier la configuration où l'installation est composée uniquement d'un DG et sans système de stockage, tous les besoins énergétiques du site seront fournis par ce dernier. L'étude de cette configuration est très importante, car cela nous permet de justifier l'intérêt des systèmes hybrides en comparant les deux systèmes : hybride et classique, sur le plan technique économique et environnemental.

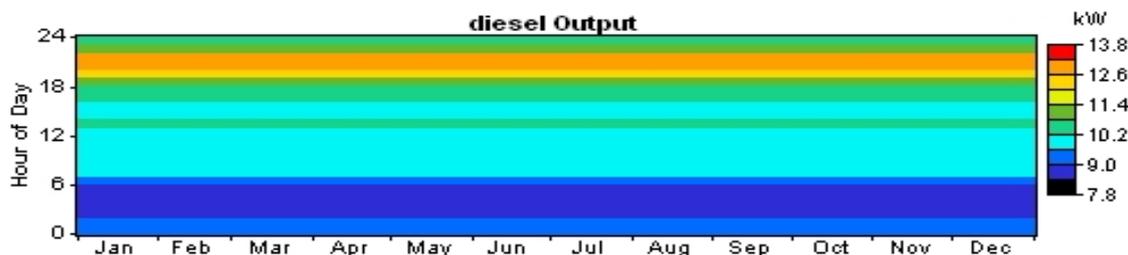
#### III. 2.5.1 Paramètres de Fonctionnement du Diesel

Utilisant le même logiciel (HOMER), on définit cette installation avec les mêmes charges et le même DG (*PERKINS 404C-22G*). Pour le combustible, on utilise celui défini au chapitre II avec le même prix. Les résultats de cette simulation sont donnés par le tableau-15.

**Tableau-III-15** : Paramètres de Fonctionnement du DG, système classique

Variable	Valeur	Unité
Heures de fonctionnement :	8760	h/an
Facteur de capacité (l'état de charge moyenne du GD sur l'année)	67.2	%
Puissance minimale délivrée	8,43	kW
Puissance moyenne délivré	10,2	kWh /j
Puissance maximale	13,1	kW
Durée de vie	2,28	an
Carburant utilisé annuellement	29490	L/an
Utilisation spécifique du carburant:	0,330	L/kWh
Rendement électrique moyen	30.8	%
Nombre de démarrages	1	démarrages/an

A partir de ces résultats, on remarque que la durée de fonctionnement du DG est de 8760 heures, il est en fonctionnement permanent durant toute l'année, ce qui n'est pas pratique, il faut prévoir des périodes d'arrêt pour entretien et maintenance ainsi qu'un dispositif de substitution en cas de panne. Le diagramme suivant montre la puissance journalière pour chaque mois de l'année



**Figure-III-16** : Puissance journalière moyenne du DG, système classique.

La représentation de la puissance moyenne journalière délivrée est identique avec ce de la distribution journalière de la charge pour tous les mois. Elle est maximale entre 20h et 22h (la couleur rouge), cela correspond au pic de consommation (voir chapitre II).

### III. 2.5.2 Les Emissions des Gaz

**Tableau-III-16** : Les émissions des gaz, système classique

Polluant	Emissions (kg/an)
Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> ):	77656
Monoxyde de carbone (CO) :	192
Hydrocarbure non brûlé :	21.2
Particule :	14.4
Dioxyde soufre ( SO <sub>2</sub> ):	156
Oxydes Nitrogène (NO <sub>x</sub> ):	1710

### III. 2.5.3 Répartition des coûts de l'installation

Nous nous sommes intéressés à la simulation des systèmes hybrides décentralisés dans le but d'améliorer leurs performances et d'évaluer le potentiel pour leur optimisation. Dans ce contexte, le premier objectif consistait à minimiser les coûts globaux, qui peuvent être divisés en :

- coûts d'investissement
- coûts de fonctionnement et maintenance (opération and maintenance, O&M)
- coûts liés aux pertes de charge (habilité/continuité de la fourniture)
- coûts de remplacement des composants.

Avec les mêmes paramètres (capital, durée de vie du projet, coût d'entretien...) on calcule les coûts de cette installation.

**Tableau III-17** Coût net actuel pour système classique

Composant	Capital	Remplacement	O&M	Fuel	Récupération	Total
	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)
diesel	7600	31433	3,595	301582	-71	374139
Système	7600	31433	33595	301582	-71	374139

### III. 2.6 Comparaison entre les deux systèmes

Après l'analyse des résultats des deux configurations, il est certain que le recours à un système hybride présente un choix stratégique justifié sur les deux plans : économique est environnemental.

**Sur le plan économique :** Le tableau-III-18 résume la comparaison des principaux paramètres économiques des deux configurations.

**Tableau-III-18** : Comparaison entre les deux systèmes sur le plan économique

Paramètre	Système hybride	Système classique	Différence
Cons. de fuel (L/an)	13417	29490	-16073
Cons. Spécifique (L/kWh) (1)	0.332	0.330	0,002
Coût spécifique (\$/kWh)	0.271	0.327	-0,056
Coût de l'installation (\$)	309803	374138	-64335

(1) c'est le volume de fuel rapporté à la production totale d'énergie (pour les deux systèmes).

Tous les paramètres du système hybride sont plus avantageux par rapport à ceux du système classique. Le coût spécifique de l'énergie pour le système classique est plus important par rapport au système hybride

Rappelons que le rapport coût- efficacité est basé sur son coût net actuel [10].

Nous avons déterminé le prix du kWh d'électricité fournit par le système hybride SEH et qui s'élève à 0.271 \$/kWh avec un NPC=309803 \$ ce prix est inférieur on le comparant au prix du kilowattheure du GD qui s'élève à 0. 327\$/kWh avec NPC= 374139\$.

**Sur le plan environnemental :** Les émissions des différents gaz en (kg/an) pour les deux systèmes sont illustrées dans le tableau suivant :

**Tableau III-19 :** Comparaison des polluants émet par un système hybride et un système classique

<b>Polluants</b>	<b>Emissions (kg/an) Système hybride</b>	<b>Emissions (kg/an) Système classique</b>
Dioxyde de carbone :	35332	77656
Monoxyde de carbone :	87.2	192
Hydrocarbure non brûlé :	9.66	21.2
Particule :	6.57	14.4
Dioxyde soufre :	71	156
Oxydes de Nitrogène	778	1710

Les émissions de tous les gaz pour un système hybride sont beaucoup plus faibles par rapport à la seconde alternative (classique), en particulier les résultats obtenues mettent en évidence le rôle de l'utilisation des énergies renouvelables dans la réduction des émissions de gaz a effet de serre (le taux de CO<sub>2</sub>=77656 kg/an pour un système utilisant seulement le groupe électrogène (système classique) et il est de 35332 kg/an pour le système hybride étudié (PV/éolien/diesel/batteries).

**III. 2.7 Analyse de sensibilité**

HOMER peut exécuter une " analyse de sensibilité " Lorsque nous définissons des variables comme la sensibilité des inputs (entrées), le logiciel répète le processus d'optimisation pour chaque variable que nous avons spécifié.

Cette étude nous permet aussi de prévoir l'installation du même système sur un autre site. Dans cette étude nous avons considéré le prix de fuel, le régime du vent et l'irradiation solaire moyenne annuelle, comme paramètres principaux influençant sur les résultats. Le prix du fuel a une influence capitale sur le fonctionnement de l'installation, pour illustrer

cette influence, on prend les valeurs suivantes : 0,2 et 1,2 \$/L (y compris le coût du transport).

Les résultats de simulation par HOMER sont donnés sous forme de combinaisons (configurations) réalisables (techniquement et économiquement) des éléments définis dans l'installation, ses configurations sont classées par ordre croissant de la (NPC) Valeur Actuel Nette. Pour chacune de ces solutions possibles, Homer fournit tous les paramètres de fonctionnement des composants et de l'ensemble de l'installation (la fraction de l'énergie renouvelable, les émissions de gaz, le coût spécifique de l'énergie, l'énergie totale produite, consommée et l'excès de l'énergie...).

### III. 2.7.1 Les Configurations du SEH en fonction du prix du carburant

Pour chaque valeur du prix cités précédemment, on fait varier simultanément la vitesse moyenne du vent (entre 5 et 7,5 m/s) et l'irradiation solaire moyenne (entre 4 et 6,5 kWh/m<sup>2</sup>/j). Les résultats sont illustrés dans le tableau- III-17.

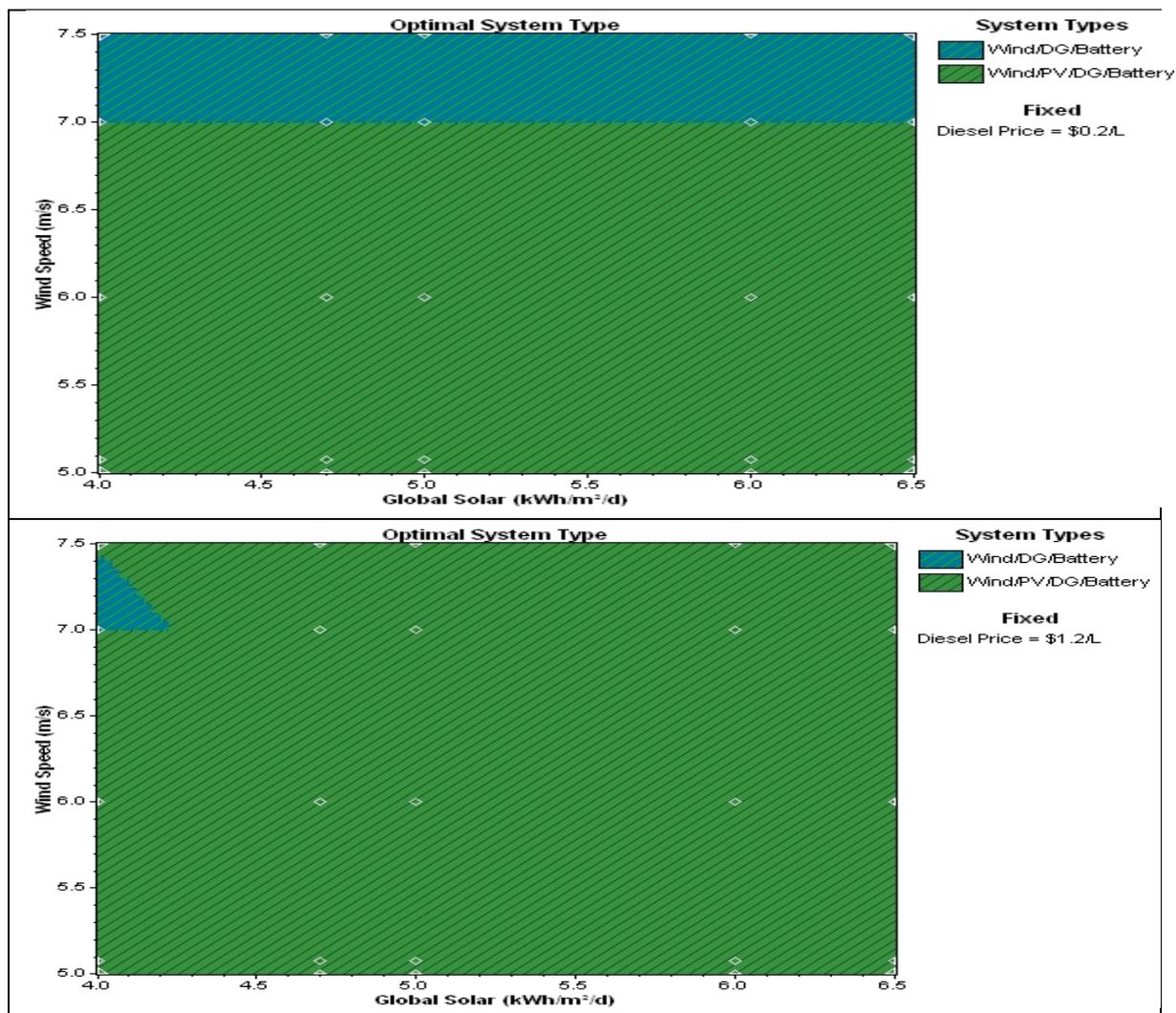


Figure-III-17 : Composition optimale du SEH en fonction du prix du carburant.

Dans la figure III-12, sont illustrés les résultats issus de l'étude de sensibilité. La figure montre que dans les conditions présentées antérieurement. Deux configurations possibles :

1. DG – WT – PV – Batterie,
2. DG – WT – Batterie.

Le DG est opté pour toutes les plages de variation des vitesses et de l'irradiation solaire (configuration 1 et 2) et ce indépendamment du prix de fuel. Le générateur PV est déclassé pour des vitesses du vent supérieures à 7 m/s (configuration 2), alors que la turbine est favorisée pour les valeurs croissantes de la vitesse du vent.

### III. 2.7.2 L'énergie produite par les différents générateurs en fonction du prix

Dans cette partie, on s'intéresse à la production de chaque générateur séparément en fonction du prix de combustible (0,2 et 1,2 \$/L). Cette étude nous permet de bien illustrer l'influence de ce dernier (le prix) sur la puissance développée par chaque générateur.

#### 1. Le générateur photovoltaïque :

Le tableau suivant montre la production par PV pour les prix de 0,2 et 1,4 \$/L.

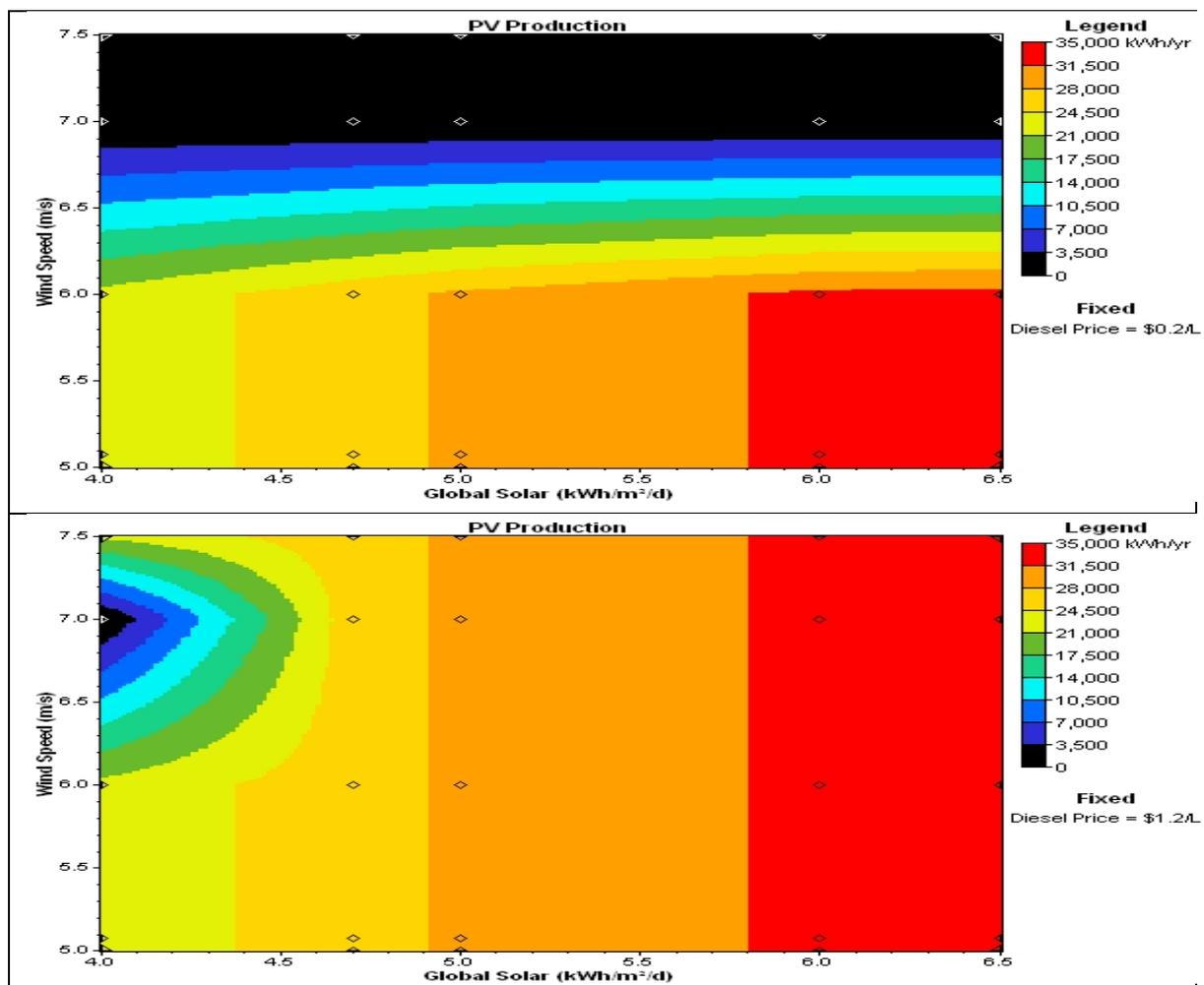
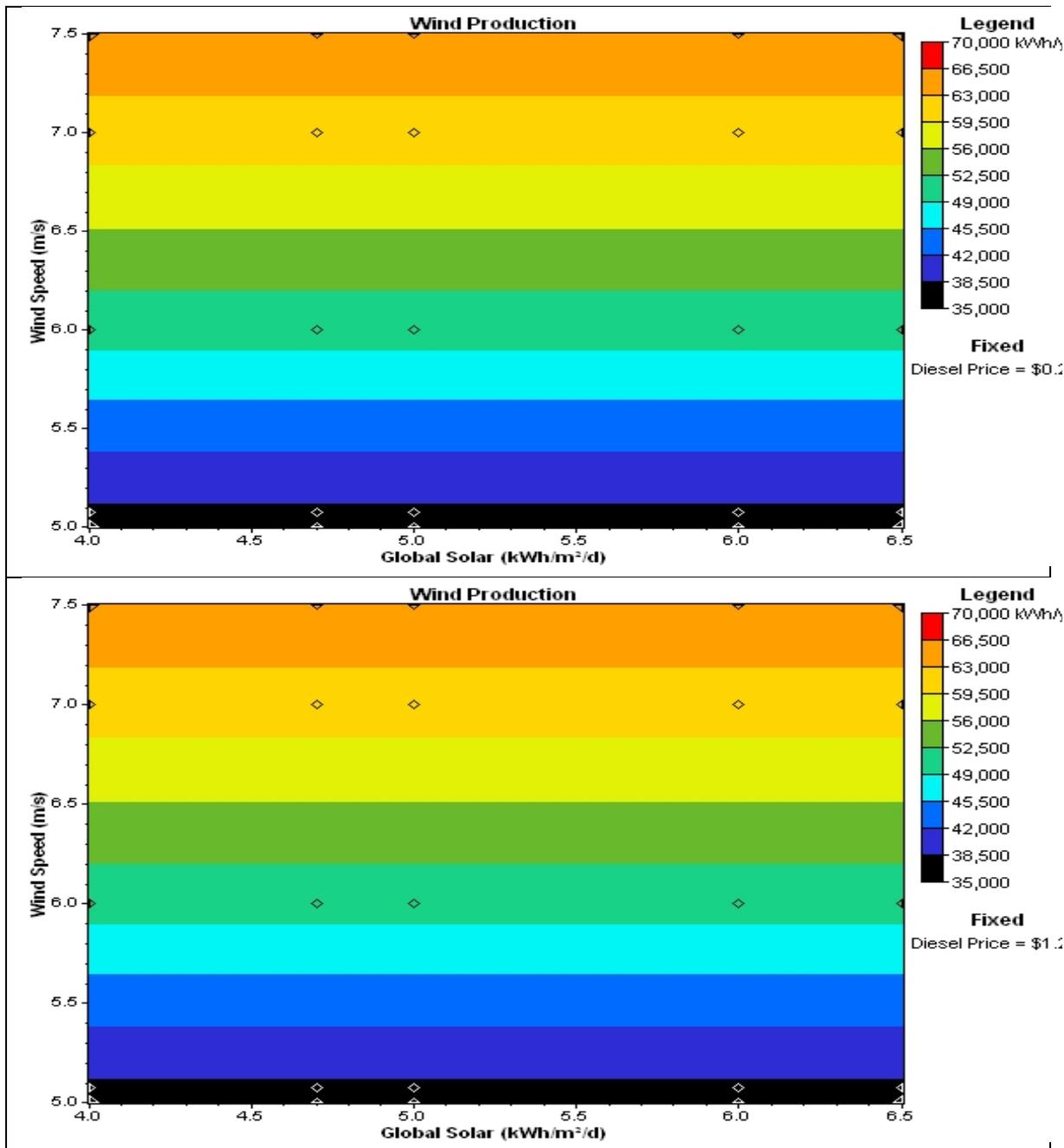


Figure - III-18 : Production du PV en fonction du prix et des potentiels renouvelables.

La production du générateur PV est proportionnelle avec l'irradiation solaire et est inversement proportionnelle avec la vitesse du vent.

**2. Le Générateur Eolien :**

La figure suivante montre la production de la turbine éolienne pour les mêmes prix:



**Figure III-19 :** Production de l'éolienne en fonction du prix et des potentiels renouvelables

La production de la turbine éolienne est proportionnelle avec la vitesse du vent. Elle est indépendante de l'irradiation solaire.

3. Le Générateur Diesel :

Le tableau ci-dessous montre la variation de la production du Diesel pour les prix de combustible de 0,2 et 1,2 \$/l.

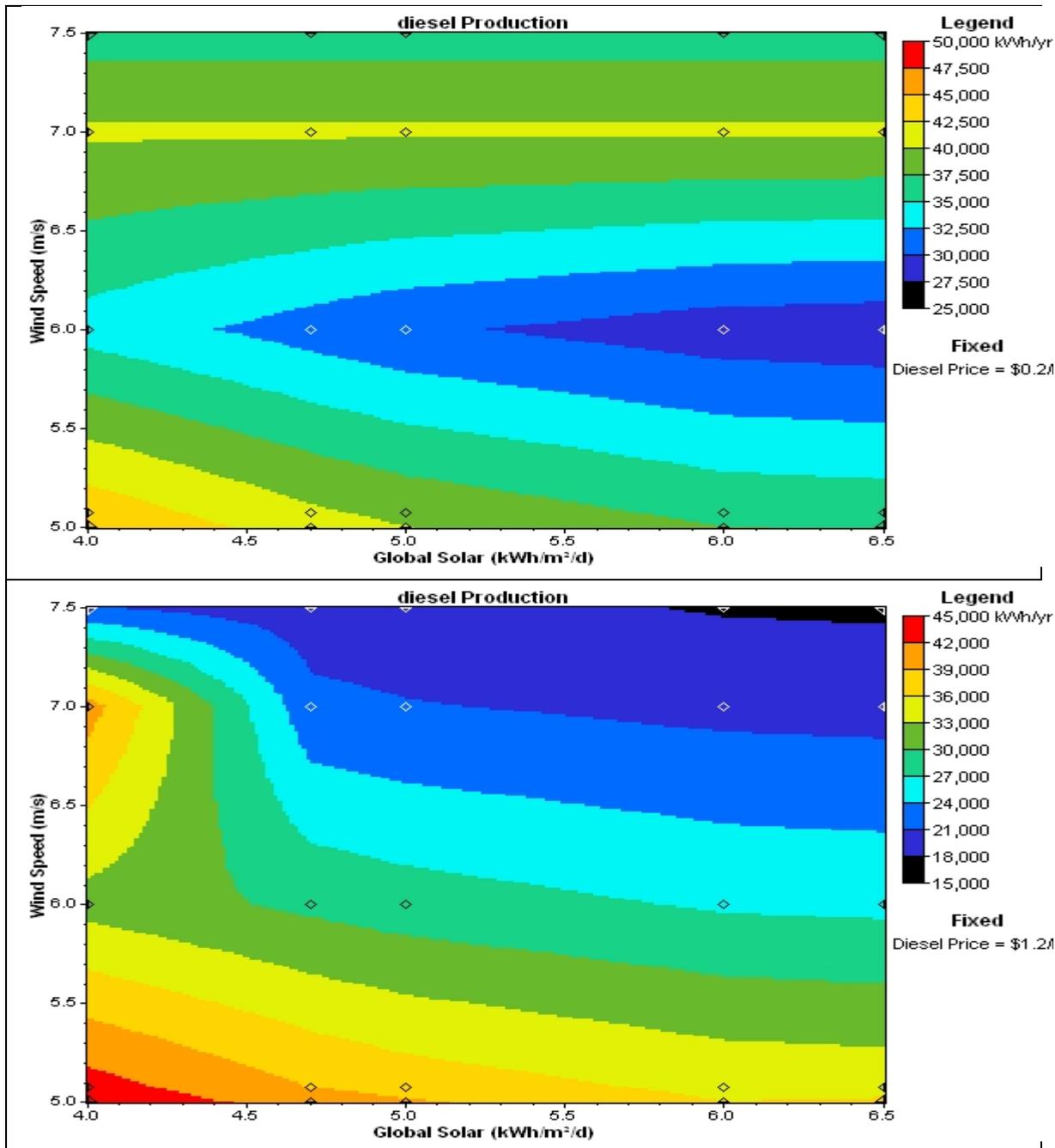


Figure III-20 : Production du diesel en fonction du prix et des potentiels renouvelables

Le diesel développe plus de puissance avec le prix de 0,2 \$/L, sa production est inversement proportionnelle avec les potentiels renouvelables (solaire et éolien).

4. La fraction de l'énergie renouvelable produite

Pour justifier le choix d'une installation hybride, il faut illustrer la quantité d'énergie produite par la partie renouvelable du système, il devient nécessaire donc d'évaluer la fraction de cette dernière dans la production totale. Les diagrammes ci-après montrent la fraction renouvelable en fonction des différents prix :

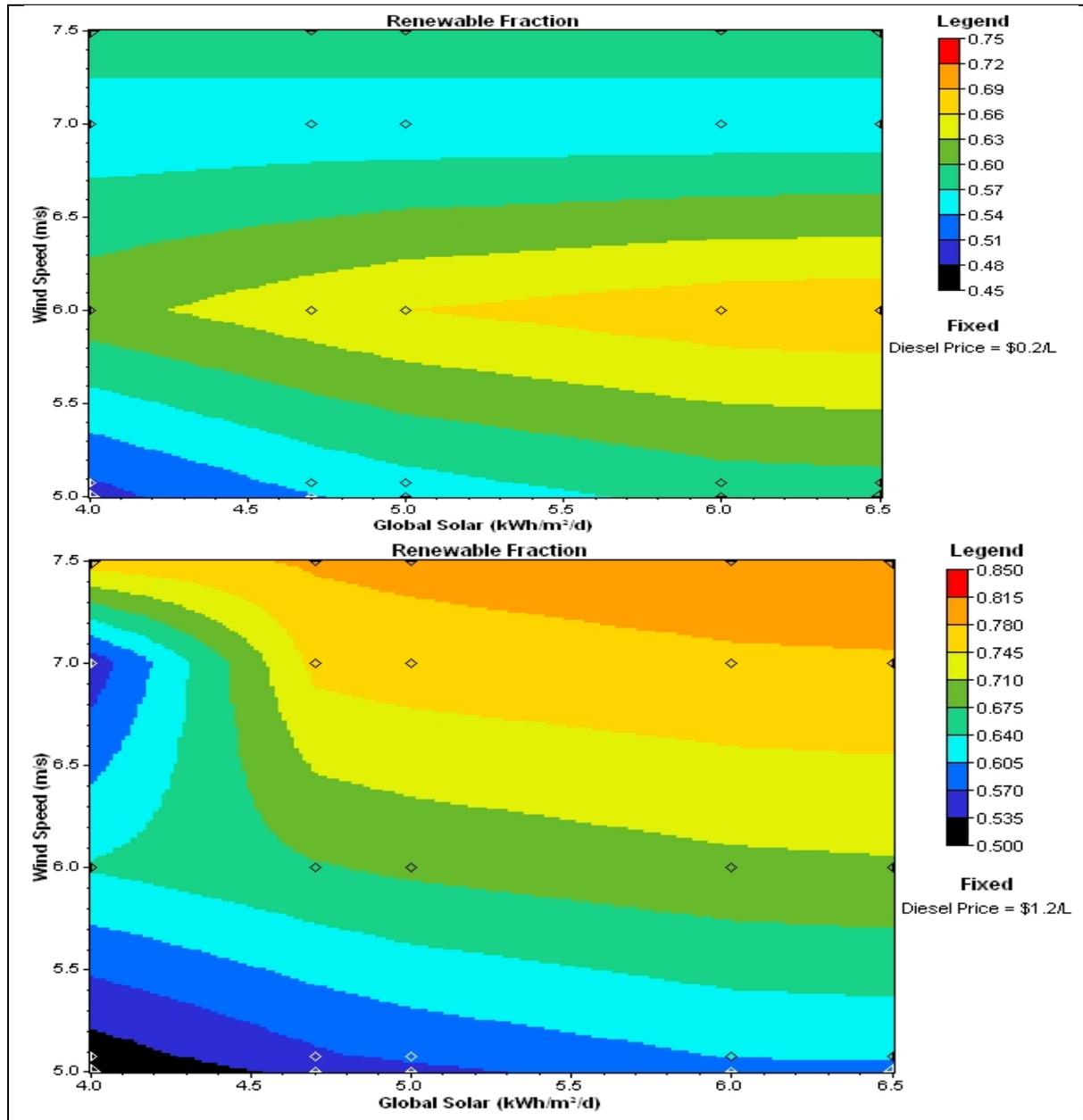


Figure III-21 : Fraction des Enr en fonction du prix et des potentiels renouvelables.

A partir de ces diagrammes on remarque que la fraction de l'énergie renouvelable produite par les deux générateurs (PV et éolien) est proportionnelle au prix du combustible, les générateurs renouvelables sont favorisés pour les prix élevés et inversement. Pour la même valeur du prix, elle augmente dans la direction croissante des potentiels renouvelables.

**Conclusion**

Les simulations numériques présentées dans cette partie ont permis de montrer que le système de génération étudié pouvait fonctionner sur les différentes configurations du SEH.

HOMER détermine que le système est faisable, or il peut en juste proportion servir charge électriques demandée. On peut alors envisager l'installation d'un système de production à base d'énergie solaire photovoltaïque et éolienne. En effet Les équipements ont une bonne efficacité énergétique, ce qui permet de tirer le meilleur bénéfice du système. Les solutions recherchées sont réalisables techniquement parlant, ayant une viabilité économique tout en satisfaisant aux exigences en matière de durabilité.

Ainsi on peut décliner l'utilisation de ce type de systèmes sans frein technique, avec comme seules contrainte, celles de l'environnement numérique préalablement choisi.

Noter qu'un dimensionnement optimisé des batteries est critique et permet de maximiser le rapport coût/performance du système sur sa durée de vie (c.-à-d. performance optimisée et durée de vie des batteries d'accumulateurs allongés). Le remplacement inutile des batteries d'accumulateurs est coûteux, particulièrement pour les applications dans les endroits isolés.

Bien que l'application et l'implémentation des systèmes d'énergie renouvelable pour l'application dans un site autonome et isolé dépend principalement de la disponibilité des ressources renouvelables et sur l'emplacement du système, il y'a un certain nombre de considérations économiques et de conception à prendre pour optimiser le coût et la performance. Une analyse complète des conditions d'emplacement et de l'identification de la limitation d'emplacement est exigée pour optimiser la conception et l'implémentation d'un système d'énergie hybride.

De façon générale, cette étude met en évidence l'existence d'un couplage fort entre les composants de système hybride : gisement – structure – dimensionnement – gestion d'énergie – mission de consommation, ce qui justifie également une approche systématique de la conception au sein de laquelle l'optimisation énergétique de l'ensemble est nécessaire.

Ainsi on peut décliner l'utilisation de ce type de systèmes sans frein technique, avec comme seules contrainte, celles de l'environnement numérique préalablement choisi.

# **Chapitre IV**

## **Modélisation et simulation**

La Modélisation est particulièrement importante pour la conception des systèmes hybride, ayant des composants dans différents domaines, et qui de plus sont couplés dans le but de réaliser des performances optimales. La simulation est caractérisée par la conception des systèmes basés sur les diagrammes blocs.

L'environnement MATLAB/Simulink a retenu notre intérêt de part la maturité et la richesse de ses outils de développement et de vérification. L'approche de modélisation et de simulation adoptée est réalisée sous cet environnement en exploitant les différents outils existants, notamment la SimPowerSystems toolbox.

#### IV.1 L'environnement MATLAB/SIMULINK

MATLAB/Simulink sont des produits de MathWorks Inc., et sont utilisés pour le développement des techniques de calcul et de la conception basée sur les modèles. MATLAB est destiné essentiellement à réaliser des calculs mathématiques, la visualisation, l'analyse des résultats et l'édition de nouveaux programmes utilisateurs. Simulink est l'extension graphique de MATLAB et sert à la modélisation et la simulation des systèmes dynamiques. Cet environnement graphique est une plate forme de simulation multi domaines basée sur les flots de signaux d'entrée de sortie. Il contient un ensemble de bibliothèques qui peuvent être adaptées et/ou enrichies aux besoins du concepteur.

Les modèles basés sur des diagrammes blocs se composent de blocs et de connexions (signaux). La relation entre les éléments du diagramme bloc et les signaux qui les connectent décrit le système dynamique. Cependant, dans la bibliothèque de Simulink on retrouve deux classes de blocs. La première classe représente les éléments constituant le système (blocs non virtuels) et la deuxième classe concerne les blocs qui n'ont pas de rôle dans le système (blocs virtuels : gain, multiplexeur...etc.). Les blocs de Simulink sont constitués de : des générateurs de signaux, des observations des signaux, des systèmes continus et des éléments de gestion des signaux.

On présente la fenêtre de navigateurs des bibliothèques Simulink dans la figure IV-1.

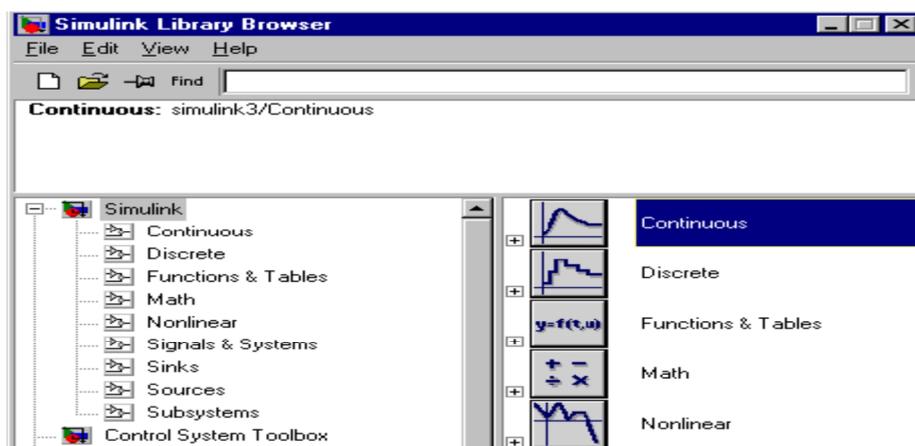


Figure IV-1 : Navigateurs des bibliothèques Simulink

### IV.1.1 Processus de simulation sous Simulink

Dans cette section, nous donnons une brève description sur le fonctionnement de la simulation sous Simulink Version 7.8 (R2009a) et aussi la toolbox SimPowerSystems. La simulation des systèmes dynamiques sous Simulink consiste à calculer les états du système et les sorties pour une plage de temps. Simulink fait appel au compilateur qui convertit le modèle dans une forme exécutable et procède comme suit:

- Evaluation des expressions des modèles des blocs pour déterminer leurs valeurs,
- Détermination des attributs des signaux (nom, type de données et dimension) qui ne sont pas explicitement spécifiés dans le modèle, et test si chaque bloc peut accepter les signaux qui lui sont connectés,
- Réalisation des optimisations spécifiées dans le panneau pour la configuration des paramètres,
- Mettre à plat le modèle hiérarchique en remplaçant les sous-systèmes virtuels qui les composent,
- Détermination de l'ordre d'exécution des méthodes des modèles des blocs (Outputs, Update, Dérivative),
- Détermination des temps d'échantillonnage qui ne sont spécifiés explicitement de tous les blocs dans le modèle,
- Après cette phase, Simulink alloue la mémoire nécessaire à l'exécution du modèle (signaux, les états et les paramètres d'exécution).

### IV.1.2 SimPowerSystems

SimPowerSystems est un ensemble de composants électriques et mécaniques qui vient s'ajouter à la librairie de Simulink. Les composants ajoutés sont à la base des éléments destinés à des simulations de l'électronique de puissance. SimPowerSystems repose sur l'utilisation des ports électriques au lieu des signaux. Les ports électriques traitent des courants et des tensions, et le schéma obtenu est celui d'un circuit électrique. Le compilateur de SimPowerSystems génère le modèle de l'espace d'état du circuit pendant la phase d'initialisation [47].

## IV.2 Modèles de simulation

Nous présentons dans cette section, les modèles sélectionnés pour notre outil de simulation. Pour réaliser la simulation, les composants principaux ont été étudiés pour connaître leurs caractéristiques. Aussi, nous abordons la modélisation énergétique du système complet.

Le générateur photovoltaïque (PV) et la turbine éolienne sont largement utilisés dans les applications des sources d'énergie renouvelables et il est important d'avoir la capacité à évaluer les performances des systèmes installés.

### IV.2.1 Caractéristiques du générateur Photovoltaïque

Les équations mathématiques développées pour la modélisation de la performance des générateurs PV sont basées sur la caractéristique courant – tension et puissance.

Dans la littérature on trouve de nombreux modèles mathématiques pour représenter le comportement fortement non linéaire d'une cellule photovoltaïque. Cette non-linéarité est due principalement aux jonctions semi-conductrices qui sont à la base de la réalisation des cellules. Ces différents modèles diffèrent par leur nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant de sortie d'une cellule. Ainsi, on trouvera des modèles à une diode ou à deux diodes suivant le nombre de jonction considérés.

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous une tension approximativement égale à 0,5 Volt. Une association en série de plusieurs cellules donne un module et une association en série et/ou en parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque.

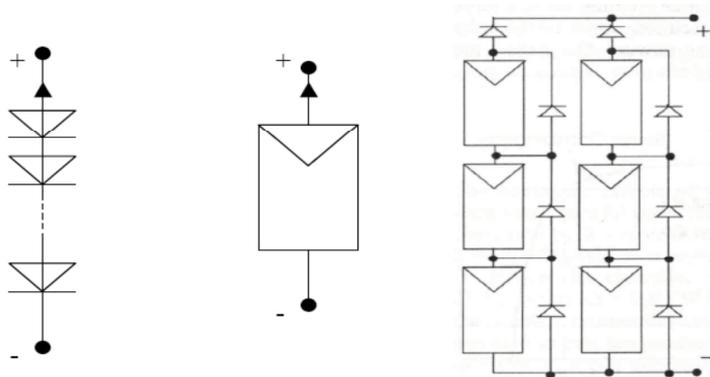


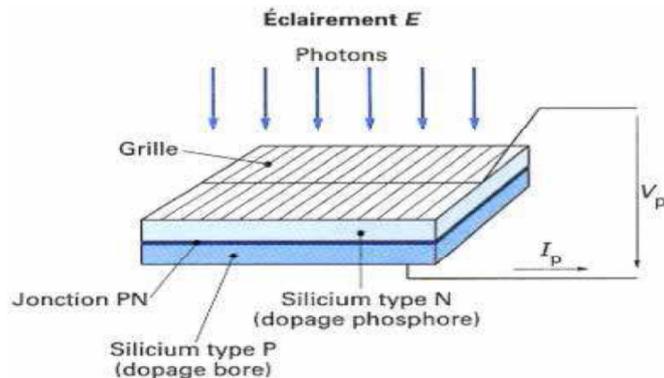
Figure IV-2: Cellules, module et panneau photovoltaïques [48]

L'objectif est d'établir le modèle à implanter dans le logiciel MATLAB/SIMULINK de cette source et puis de retrouver par simulation les caractéristiques (I-V et P-V) de ce générateur ainsi que leurs comportements en fonction des paramètres solaires à savoir l'éclairement dans le plan des panneaux ( $E_s$ ) et la température de jonction ( $T_j$ ).

#### ➤ Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une jonction P-N est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dopé N (donneurs d'électrons) et d'un semi-conducteur dopé P (composé de trous). L'interface entre ces deux régions s'appelle une jonction. La naissance d'une différence de potentiel lorsque les

porteurs de charges sont créés dans les environs de la jonction par excitation lumineuse, permet à la cellule de fonctionner comme un générateur électrique quand les deux faces de la cellule sont électriquement reliées à une charge, par exemple une résistance  $R$ .



**Figure IV-3** : Production d'électricité par la séparation électron-trou [49]

Les contacts de la face éclairée de la cellule ont la structure d'une grille afin de ne pas occulter qu'une faible partie de la surface (5 à 10%). La face arrière peut être entièrement métallisée. Afin de réduire les pertes par réflexion du rayonnement incident, une couche antireflet recouvre uniformément toute la face avant.

La puissance maximale pouvant être délivrée par le module photovoltaïque est définie sur sa caractéristique  $I-V$  par le point de puissance maximale (MPP en anglais, Maximum Power Point).

### ➤ Modélisation d'une cellule photovoltaïque

La transformation du rayonnement solaire en électricité par le processus photovoltaïque (PV) est un des moyens d'exploitation du gisement solaire. Elle est réalisée par des cellules (PV). Ce n'est pas une pile, mais un convertisseur instantané, qui ne pourra fournir une énergie sous forme électrique que s'il reçoit une énergie sous forme de rayonnement. Une cellule sous obscurité totale va se comporter comme un composant passif. La cellule solaire ne peut être assimilée à aucun autre générateur classique d'énergie électrique de type continu. Elle n'est ni une source de tension constante ni une source de courant constant. Elle possède des caractéristiques électriques non linéaires dépendant de l'éclairement. Ce générateur est modélisé et décrit par la relation entre le courant et la tension.

#### 1. Générateur photovoltaïque idéal

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition P-N de la cellule PV. Si l'on

connecte une charge résistive aux bornes du générateur PV, ce dernier y débite une part de courant  $I$  et le reste, le courant  $I_D$ , passe dans la diode. On a alors la relation:

$$I = I_{Ph} - I_D \quad (IV.1)$$

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :

$$V = V_D \quad (IV.2)$$

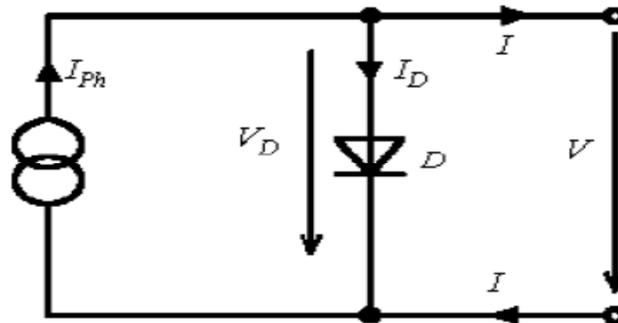


Figure IV-4 : Modèle simplifié d'une cellule PV

La diode étant un élément non linéaire. Sous obscurité sa caractéristique I-V est donnée par la relation [50]:

$$I_D = I_{Ph} = I_S \left( \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (IV.3)$$

Avec

$$V_T = \frac{kT_j}{q} \quad (IV.4)$$

Sous éclaircissement, le courant débité équivaut à:

$$I = I_{Ph} - I_D = I_{Ph} - I_S \left( \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (IV.5)$$

- $I_{ph}$  : courant créé par conversion de la lumière Photo-courant (A) ;
- $I_s$ : courant de saturation inverse de la diode (A);
- $V_T$ : potentiel thermodynamique;
- $K$ : constante de BOLTZMAN ( $1,38.10^{-23} J. K^{-1}$ ) ;
- $q$ : charge de l'électron ( $1,6.10^{-19} C$ );
- $I$ : courant fourni par la cellule (A);
- $T_j$ : température de jonction de la cellule photovoltaïque en Kelvin (K).

Le photo-courant  $I_{ph}$ , est pratiquement proportionnel à l'éclaircissement. Le courant  $I_D$ , étant par définition le courant direct de la jonction sous obscurité, est normalement non modifié.

Ce modèle reste théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellule PV dans des conditions réelles. Toutefois, il reste valable sous certaines hypothèses (non prise en compte de perte de tension, courant de fuite...).

2. Générateur photovoltaïque "réel"

Le modèle PV précédent ne tient pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. Les pertes de tension et les courants de fuite sont modélisés respectivement par une résistance en série  $R_s$ , une résistance en parallèle  $R_p$  [49]. La figure IV-5 montre le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

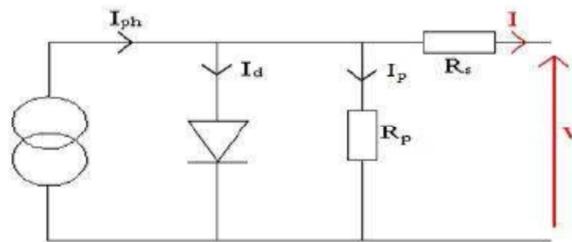


Figure IV-5 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle [7]

Par conséquent, le modèle de la cellule devient:

$$I = I_{ph} - I_D - I_P \tag{IV.6}$$

$I_P = \frac{V_D}{R_P} = \frac{V+IR_S}{R_P}$  est le courant dérivé par la résistance shunt.

$I_d = I_S \left( \exp\left(\frac{V+IR_S}{mV_T}\right) - 1 \right)$  est le courant traversant la diode

L'équation (IV.6) devient

$$I = I_{ph} - I_S \left( \exp\left(\frac{V+IR_S}{mV_T}\right) - 1 \right) - \frac{V+IR_S}{R_P} \tag{IV.7}$$

$m$  : facteur d'idéalité de la photopile, compris entre 1 et 5 dans la pratique.

Le modèle d'une cellule à une diode est caractérisé par son schéma électrique équivalent (figure IV.5). Une cellule PV idéale peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode. En addition au modèle idéal, le modèle réel tient compte des propriétés résistives de la cellule qui sont modélisées par une résistance série

$R_s$ . Selon [50] [51], la résistance shunt peut être négligée puisque, habituellement, elle est très grande comparée à la résistance série en particulier pour les cellules monocristallines de silicium. On aura alors le modèle de la figure (IV-6) [50].

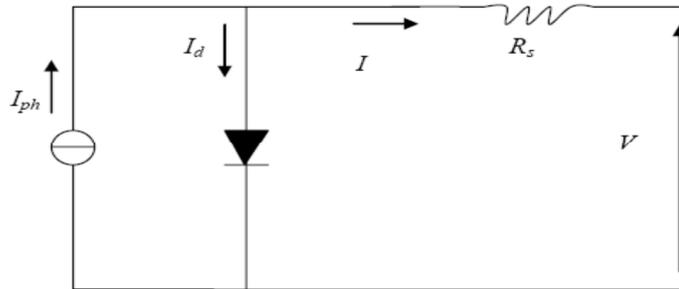


Figure IV-6 : Schéma équivalent simplifié d'une cellule solaire photovoltaïque avec  $R_p = \infty$

Ainsi l'équation (IV.7) devient :

$$I = I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{V+IR_s}{mV_T}\right) - 1 \right) \quad (IV.8)$$

Nous obtenons une équation implicite en I et V qui peut être résolue grâce à une méthode numérique (la méthode de Newton) décrite par:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (IV.9)$$

Où:  $f'(x)$  est la dérivée de la fonction,  $f(x)=0$ ,  $x_n$  est la valeur actuelle, et  $x_{n+1}$  est la valeur suivante. Maintenant l'équation (IV.8) peut être réécrite comme il suit:

$$f(I) = I_{ph} - I - I_s \left[ \exp\left(\frac{q(V+IR_s)}{mkT_j}\right) - 1 \right] = 0 \quad (IV.10)$$

En utilisant l'équation de Newton on trouve :

$$f(I) = I_{ph} - I - I_s \left[ \exp\left(\frac{q(V+IR_s)}{mkT_j}\right) - 1 \right] \quad (IV.11)$$

$$I_{r+1} = I_n - \left[ I_{ph} - I_n - I_s \left( \exp\left(\frac{q(V+IR_s)}{mkT_j}\right) - 1 \right) \right] / \left[ -1 - I_s \cdot q \cdot R_s \cdot \exp\left(\frac{q(V+IR_s)}{mkT_j}\right) / (m \cdot k \cdot T) \right] \quad (IV.12)$$

La fonction MATLAB écrite pour résoudre cette équation avec une performance de calcul qui permet de converger dans de bonnes conditions et résulte d'un réglage par cinq itérations basé sur le compromis temps de convergence-stabilité. La réalisation sous Simulink/SimPowerSystems du schéma électrique de la figure IV-6 peut être effectuée selon les étapes suivantes :

### Etape 1

L'assemblage des composants de la figure IV-7, permet de construire le modèle d'une cellule à une diode. La source de courant et la diode, représentées dans la figure IV-4,

seront remplacées par une source de courant équivalente pour communiquer avec les autres parties du modèle utilisées les blocks « Goto » et « From »

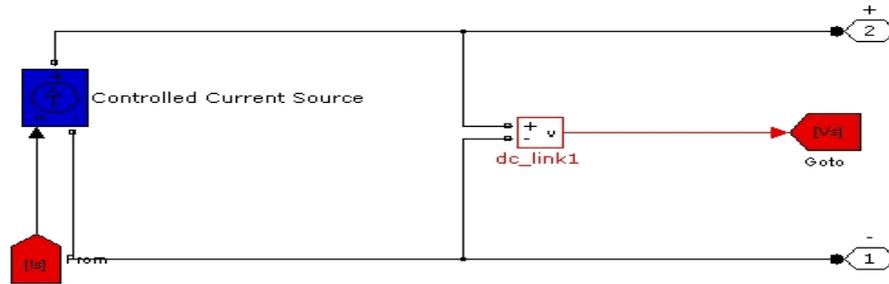


Figure IV-7 : Différents composants du schéma équivalent d’une cellule photovoltaïque

**Etape 2**

On réalise le schéma représenté par la figure (IV-9) afin de générer l’image du courant ( $I_{PV}$ ) qui traverse la source de courant représentée sur la figure (IV.8). Le courant de la diode est donné par la fonction simplifiée suivante :

$$I_D = 10^{-9} \left( \exp\left(\frac{V_D}{261(C-3)}\right) - 1 \right) \tag{IV.13}$$

Où :

$$V_T = \frac{kT}{q} = 26 \text{ mV à la température ambiante de } 300^\circ\text{K.}$$

Nous mettons le schéma électrique équivalent du GPV en un schéma bloc (fig. IV.8)

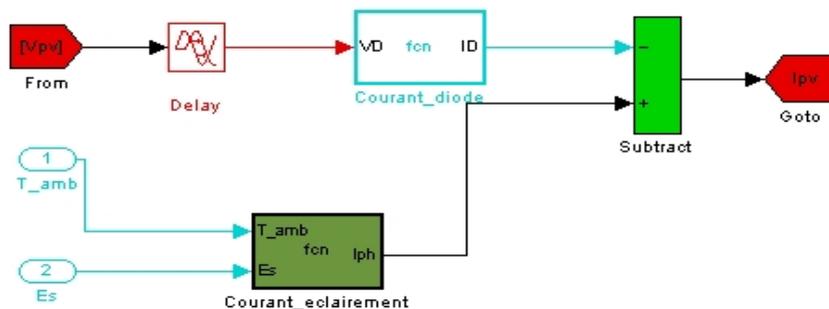


Figure IV-8 : Différents composants du schéma équivalent d’une cellule photovoltaïque

Le courant est directement dépendant des rayonnements solaires ( $E_s$ ) et de la température de la cellule.

La température de fonctionnement de la cellule ( $T_j$ ) peut être calculée à partir de :

$$T_j = T_{amb} + E_s \left( \frac{NOCT-20}{800} \right) \tag{IV.14}$$

$E_s$  : irradiation solaire globale du lieu considéré ( $W/m^2$ ) ;

$T_{amb}$  est la température ambiante ( $^\circ\text{C}$ )

Où NOCT est la température de fonctionnement des cellules photovoltaïques dans les conditions suivantes : un ensoleillement de  $800 \text{ W/m}^2$ , une température ambiante de  $20^\circ\text{C}$  et une masse d'air optique AM égale à 1.

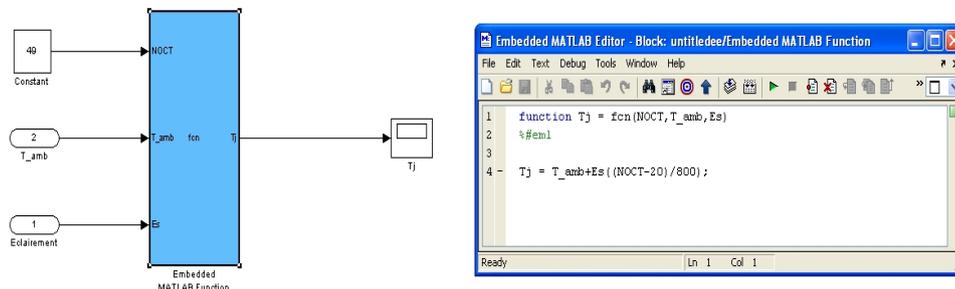


Figure IV-9 : Utilisation du block «Embedded MATLAB Function» pour l'estimation de la température de jonction

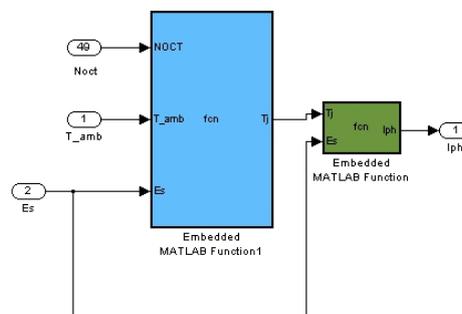


Figure IV-10 : Utilisation du block «Embedded MATLAB Function» pour l'estimation du courant dû au rayonnement

**Etape 3**

Regrouper dans des « Subsystem » les différentes parties du modèle ainsi que le modèle global de la cellule afin d'obtenir un seul block représentant la cellule avec ses entrées/sorties (figure IV-13).

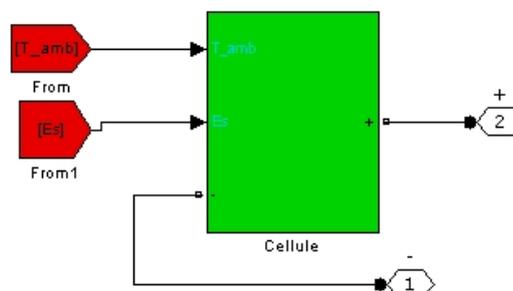


Figure IV-11 : Schéma block global d'une cellule photovoltaïque

On peut noter les trois entrées du modèle : l'éclairement, la température ambiante (et la tension aux bornes de la cellule). La seule sortie est le courant débité par la cellule.

Le modèle mathématique décrit par l'équation (IV.5) auparavant peut être représenté à l'aide du diagramme bloc comme dans la figure suivante (figure IV-12) :

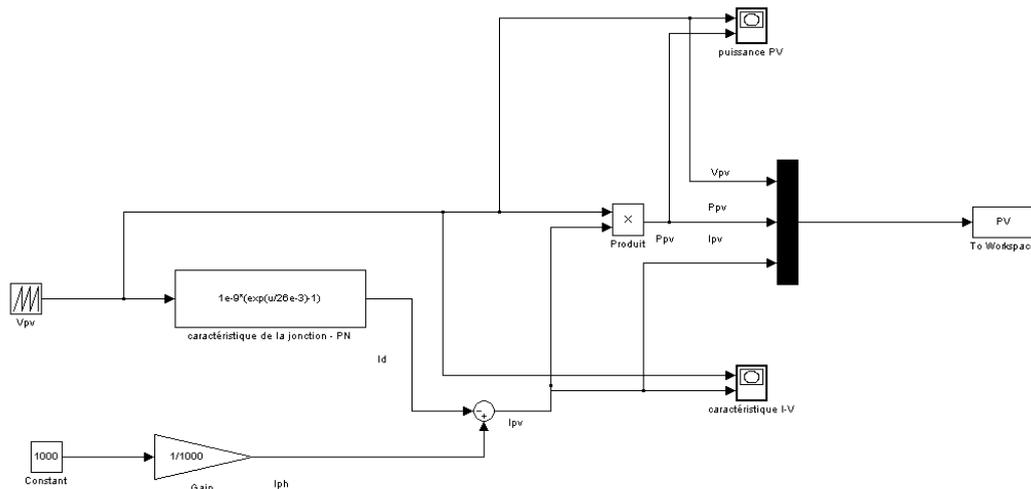


Figure IV-12 : Le schéma du modèle simplifié de cellule photovoltaïque sous Simulink.

Les courbes de simulation obtenues à l'aide du modèle de la figure (IV-14) sont présentées ci-dessous :

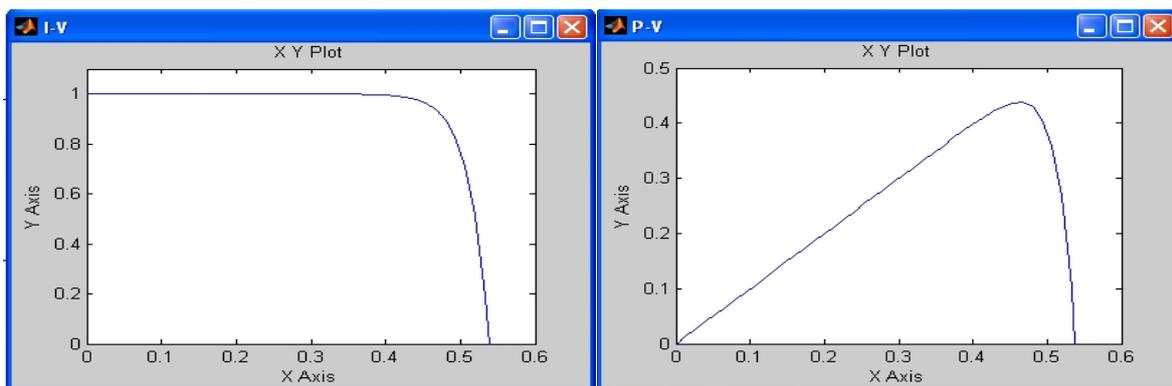


Figure IV-13 : Caractéristiques : courant-tension I(V) et puissance-tension P(V) d'une cellule

On peut ainsi retrouver l'allure des caractéristiques courant-tension I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque simplifié.

➤ **Modèle photovoltaïque sous Simulink**

Des routines (fichier .m) écrites en langage Matlab font appel au simulateur (fichier .mdl) qui a été développé sous Simulink. Cet environnement de simulation de Matlab contient une bibliothèque pourvue d'objets mathématiques courants, que l'on utilise en les connectant les uns aux autres pour construire le modèle (cf. figure IV-1). Les objets 'S-Function' appellent des sous-programmes préalablement compilés et écrits en langage C. L'utilisation de ces 'S-Function' permet de réduire considérablement le temps de calcul du

simulateur. Cet environnement permet en outre de résoudre des équations implicites ou boucles algébriques, présentes dans notre modélisation au niveau des équations électriques. Le schéma du modèle, sur lequel sont exécutées les liaisons entre les blocs, est représenté sur la fig. IV-14.

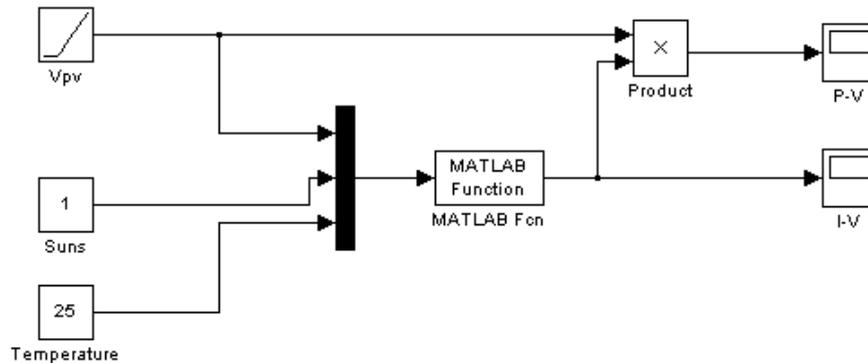


Figure IV-14: Modèle photovoltaïque sous Simulink

En exploitant le modèle basé sur un circuit électrique équivalent avec le logiciel Matlab-Simulink, nous obtenons les caractéristiques tension-courant  $I(V)$  et puissance-tension  $P(V)$  (figure IV- 15) du module photovoltaïque constitué de 48 cellules connectées en série.

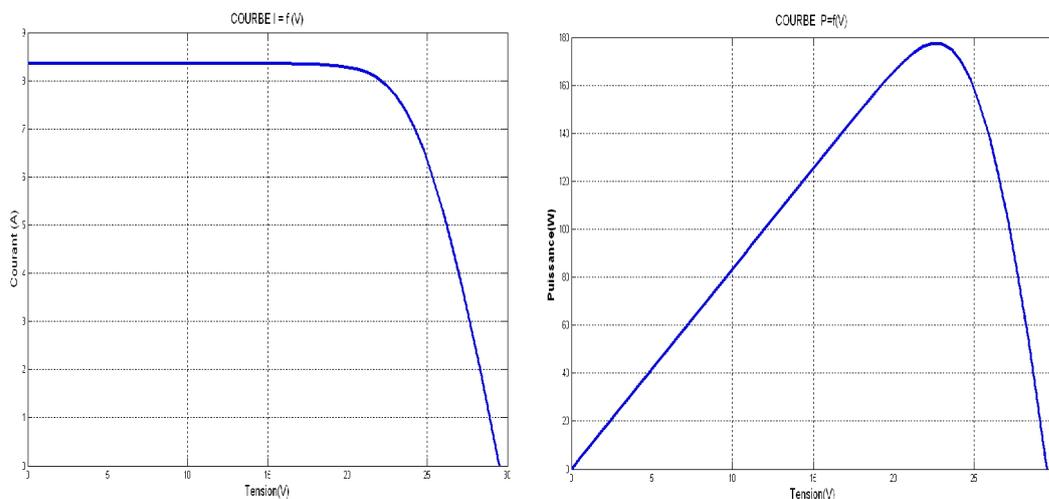


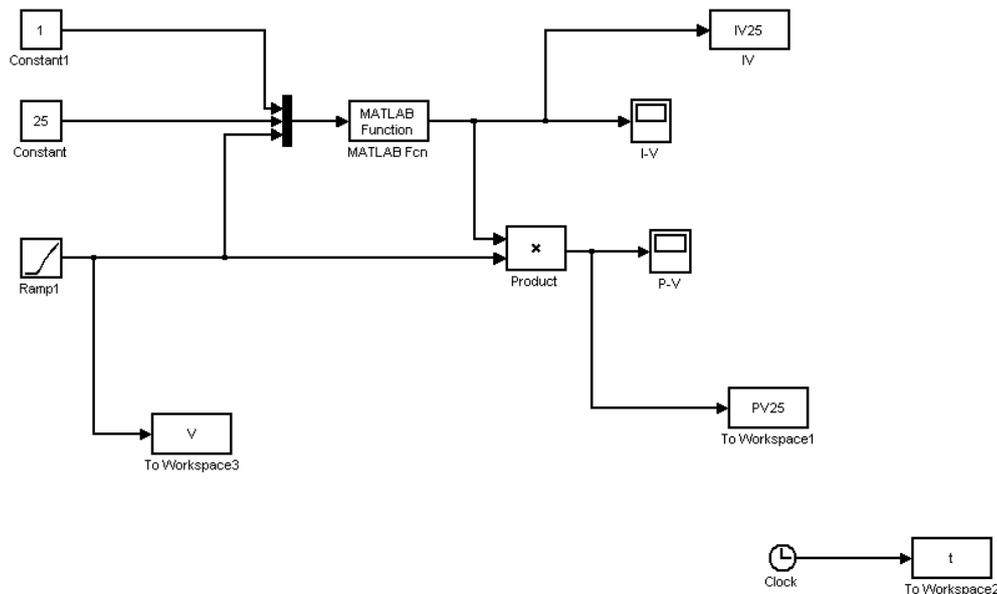
Figure IV-15 : Caractéristiques : courant-tension  $I(V)$  et puissance-tension  $P(V)$  du module KD180GX-LP de KYOCERA

La puissance est nulle en court-circuit et en circuit-ouvert. Elle passe par un maximum quand on parcourt la caractéristique  $I-V$ . La courbe caractéristique d'un panneau PV : représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes du panneau PV depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum ne produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes du

panneau PV). Cette courbe est établie dans des conditions ambiantes de fonctionnement données (température=25°C, insolation =1000W/m<sup>2</sup>).

La caractérisation de la cellule photovoltaïque ayant été présentée, nous définirons, par la suite, quelques facteurs pouvant influencer son fonctionnement.

Le modèle qui permet de tenir en compte l'influence de la température et de l'ensoleillement a été implémenté sous Matlab Simulink (fig. IV-16.).



**Figure IV-16 :** Le modèle sur lequel sont exécutées les liaisons entre les blocs

## ➤ Facteurs influençant le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

### 1. Influence de l'éclairement

L'apport d'énergie permettant la séparation électron-trou étant assuré par l'énergie lumineuse, il est donc normal que l'augmentation de l'ensoleillement entraîne automatiquement l'augmentation des paires électron-trou séparées. Le courant débité  $I_{ph}$  est donc proportionnel à l'ensoleillement.

Les résultats de simulation de la caractéristique (I-V) du générateur PV sont représentés dans la figure IV-17 pour différentes valeurs d'éclairement (200, 400, 600, 800, 1000 W/m<sup>2</sup>) et une température constante de 25 °C.

Ces résultats, obtenus pour le modèle présenté ci-dessus, montrent que la caractéristique (I-V) dépend de l'éclairement. Le courant délivré par le générateur PV et la tension augmentent avec l'éclairement, et par conséquent la puissance produite par le générateur PV est augmentée. Il est à noter que la tension de circuit ouvert est peu influencée par la variation de l'éclairement, contrairement au courant du court-circuit qui augmente d'une manière consistante.

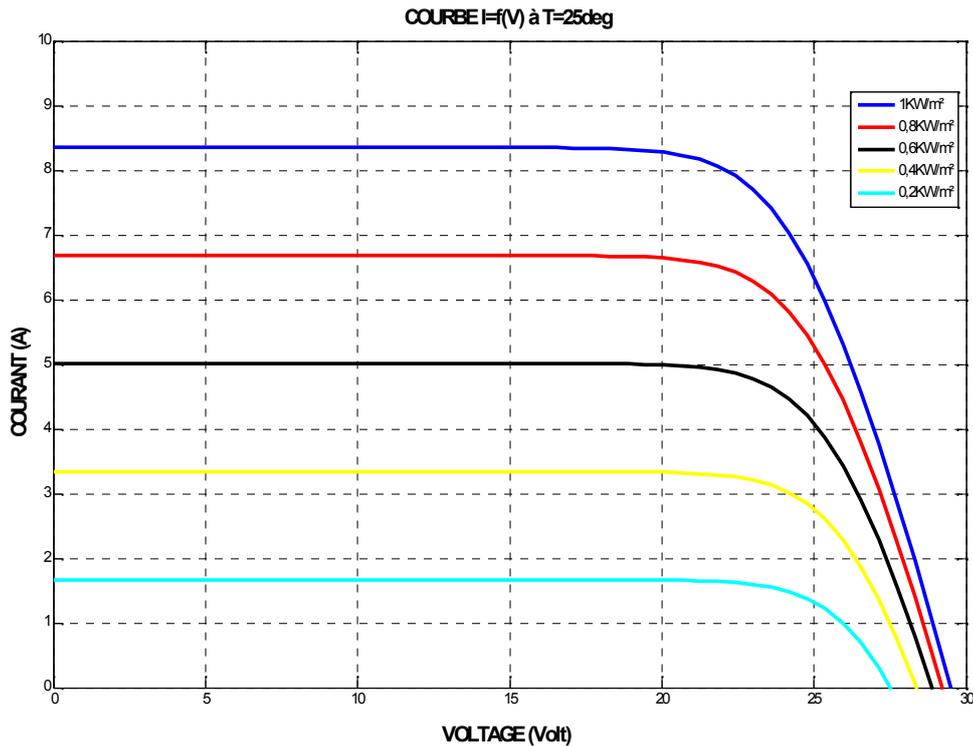


Figure IV- 17 : caractéristiques I-V du module KD180GX-LP de KYOCERA pour différentes irradiations solaires, à 25 °C.

La figure IV-18 représente l’influence de l’éclairement sur la caractéristique puissance-tension qui montre que la puissance maximale que peut produire un générateur PV correspond généralement à une tension plus au moins constante qui représente la tension au point de la puissance maximale.

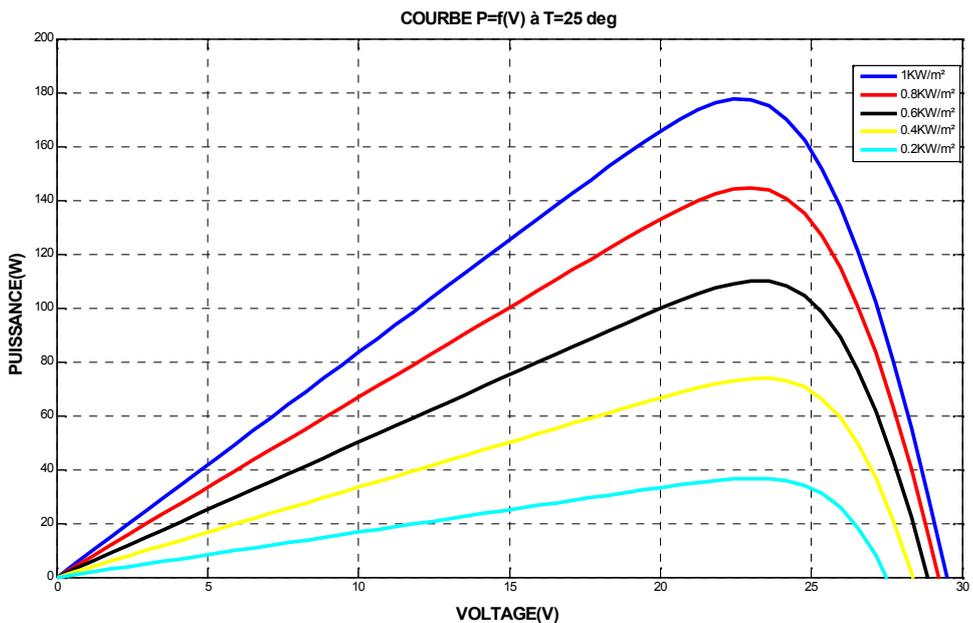
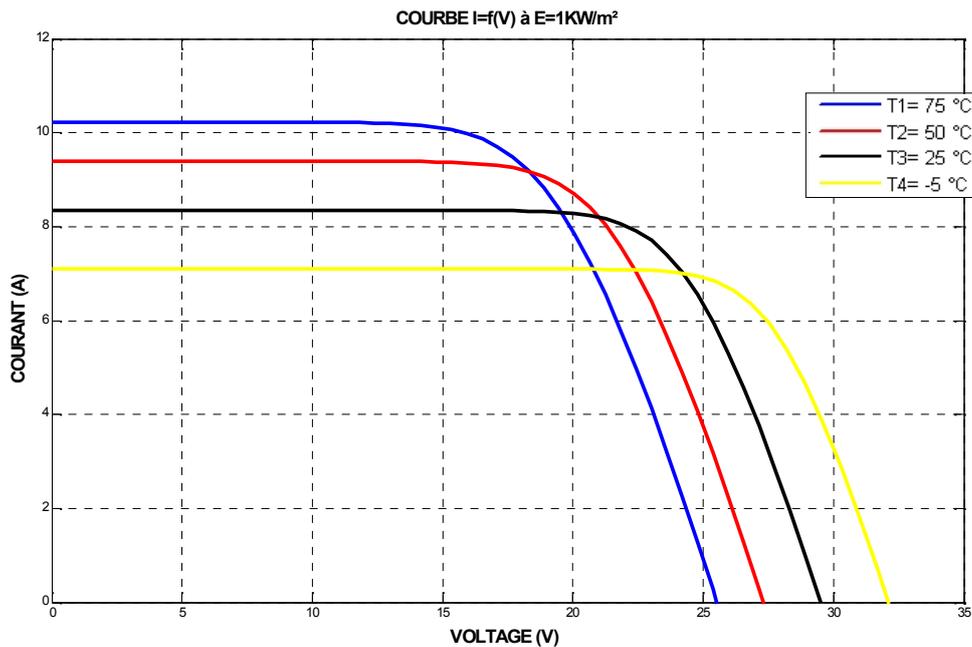


Figure IV- 18 : Caractéristiques puissance-tension pour différentes irradiations solaires, à 25 °C.

## 2. Influence de la température

Le deuxième paramètre qui a une influence directe sur la caractéristique (I-V) du générateur PV est la température. Les résultats de simulation sont présentés sur la figure IV-19. Ces résultats montrent que cette caractéristique est influencée par la température; l'augmentation de la température fait augmenter le courant et diminuer la tension.

Il est à noter que le courant de court circuit varie peu avec la température tandis que la tension à vide est beaucoup plus influencée.



**Figure IV-19 :** Caractéristiques I-V du module KD180GX-LP de KYOCERA pour différentes températures

La température a donc une influence non négligeable sur la puissance du générateur PV. Une diminution de la puissance peut être remarquée quand la température augmente. La figure IV-20 montre la caractéristique puissance-tension pour différentes températures.

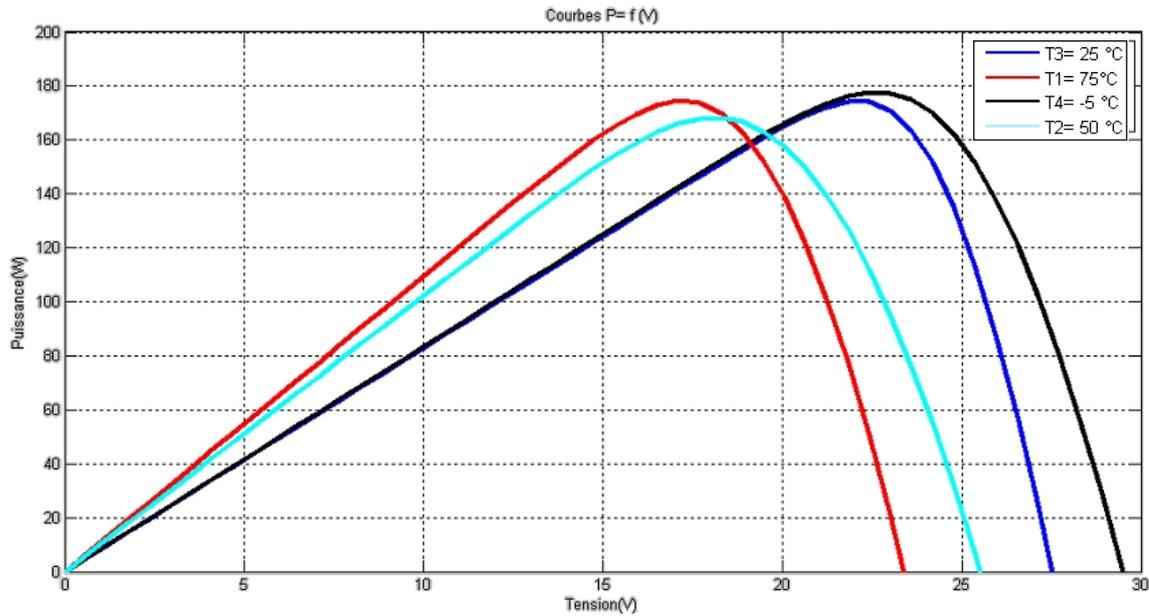


Figure IV-20 : Caractéristiques puissance -tension pour différentes Valeur de température

➤ **Modélisation du générateur PV**

La puissance produite par un générateur photovoltaïque est estimée à partir des données de l'irradiation globale sur plan incliné, de la température ambiante et des données du constructeur pour le module photovoltaïque utilisé, elle est exprimée par la relation donnée par [6]:

$$P_{gen} = \eta_{gen} \times A_c \times E_s \tag{IV.15}$$

Tel que :

$A_c$  : la surface totale de captation du générateur photovoltaïque ( $m^2$ ),

$\eta_{gen}$  : le rendement du générateur photovoltaïque,

$E_s$  : irradiation solaire globale du lieu considéré ( $W/m^2$ )

Le rendement d'un générateur photovoltaïque  $\eta_{gen}$  est calculé par l'équation suivante:

$$\eta_{gen} = \eta_{mod} \times \eta_{dc/ac} \times P_f \times N_{mod} \tag{IV.16}$$

$$\eta_{mod} = \eta_{ref} \left\{ 1 - \beta(T_c - T_{ref}) \right\} \tag{IV.17}$$

Avec :

$\beta$  : coefficient tenant compte de la variation du rendement du module photovoltaïque en fonction de la température, qui est pris à  $0.0045 / ^\circ C$ ,

$\eta_{ref}$  : rendement de référence du générateur photovoltaïque,

$T_c$ : température de la cellule ( $^\circ C$ ),

NOCT : température nominale de fonctionnement de la cellule,

$\eta_{CC/CA}$  : rendement du convertisseur CC/CA (ce rendement est égal à 0.95),

$P_f$  : facteur de remplissage du module, égal à 0.9.

### 1.1. Modèle éolien

#### ➤ Puissance de sortie de la turbine éolienne

L'énergie cinétique du vent est captée par les pales afin de la transformer en énergie mécanique. La turbine éolienne étudiée ici, est constituée de pales de longueur  $R$  entraînant une génératrice électrique avec l'intermédiaire de l'arbre de la turbine (figure IV-21).

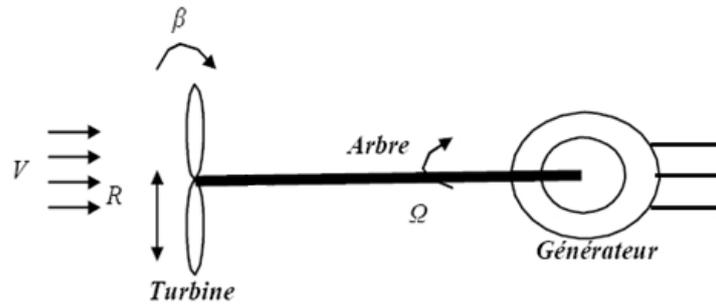


Figure IV-21 : Schéma de la turbine éolienne

Le niveau de modélisation recherché pour la turbine doit nous permettre d'appréhender les phénomènes électriques et proposer des modèles numérisés du comportement aérodynamique de la turbine. Le comportement de la turbine est donné par la courbe

$C_p(\lambda, \beta)$ . Les équations (IV.18) et (IV.19), permettent de modéliser les caractéristiques d'une turbine d'éolienne.

La puissance mécanique  $P_m$  qu'une turbine éolienne peut extraire d'une masse d'air traversant la surface balayée par son rotor est :

$$P_m = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho A}{2} V_v^3 \quad (IV.18)$$

$\rho$  est la densité de l'air ( $\text{Kg/m}^3$ ),  $A$  est la surface balayée par le rotor de l'éolienne ( $\text{m}^2$ ),  $V_v$  est la vitesse du vent et  $C_p$  est le coefficient de puissance de la turbine. Ce dernier dépend du rapport de vitesses  $\lambda$  (ou TSR, Tip Speed Ratio). La valeur du coefficient de puissance  $C_p$  va dépendre de la vitesse de rotation de la turbine (qui peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$ ) et de l'angle d'inclinaison des pales ( $\beta$ ) [52]

Dans la littérature, des expressions approchées du coefficient de puissance pour les turbines des éoliennes sont proposées

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda_i^2} - C_3 - C_4 \right) \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 \quad (IV.19)$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.005\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (IV.20)$$

Et les coefficients  $C_1$  à  $C_6$

$$C_1 = 0.5176 ; C_2 = 116 ; C_3 = 0.4 ; C_4 = 5 ; C_5 = 21 ; C_6 = 0.0068 .$$

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V}$$

$R\Omega$  : est la vitesse linéaire périphérique en bout de pales de l'hélice

$\Omega$  : vitesse de rotation du rotor (rad/s).

La figure IV-22 représente le modèle sous Simulink pour la détermination de l'allure de la courbe  $C_p(\lambda)$ .

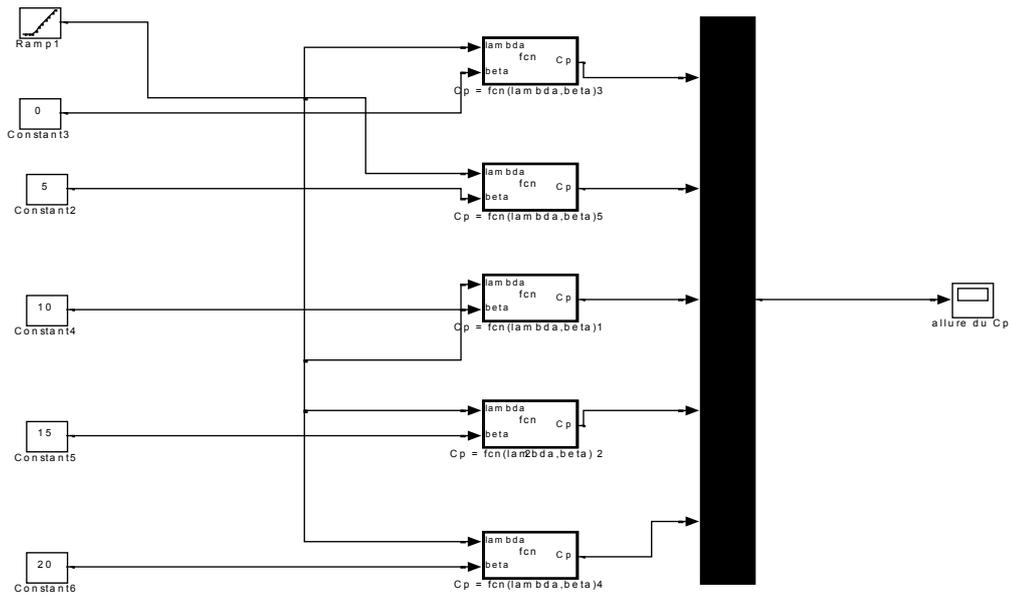
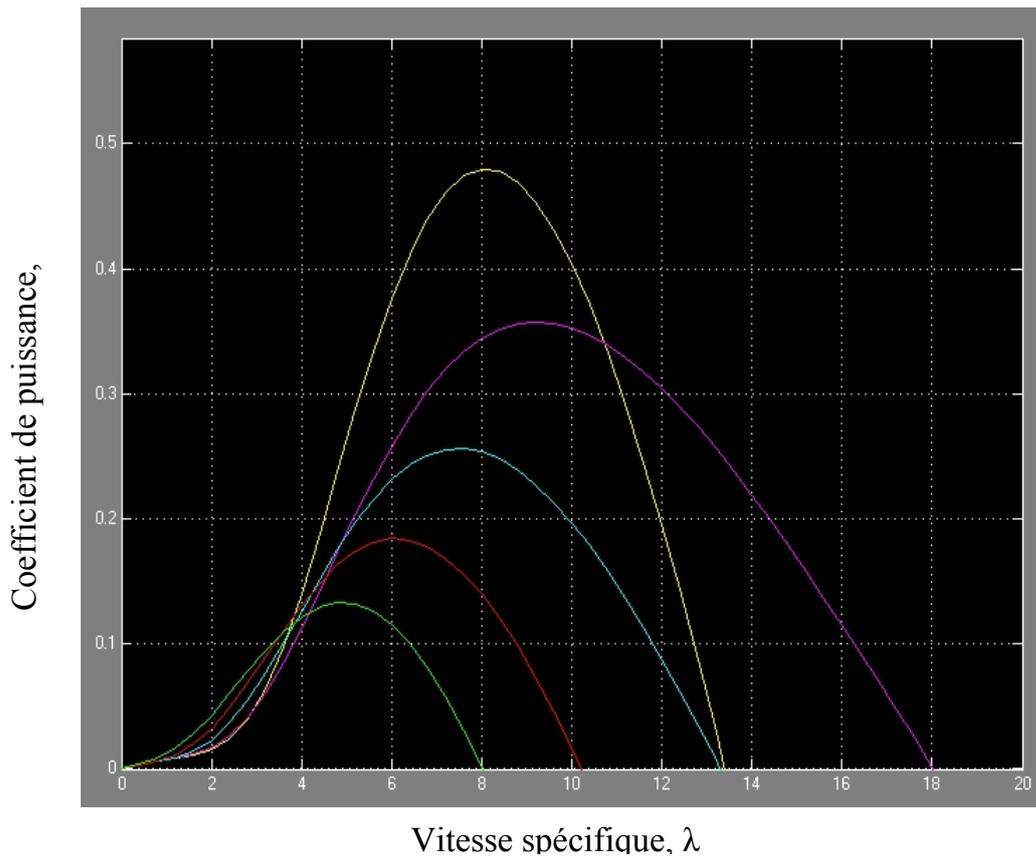


Figure IV-22 : modèle sous Simulink pour la détermination de  $C_p$

La figure IV-23 représente les allures de la courbe  $C_p(\lambda)$  de l'éolienne.



**Figure IV-23 :** Caractéristique coefficient de puissance/vitesse spécifique de vitesse pour différents angles d'inclinaison des pales

La courbe spécifique possède une forme en cloche. Plus la caractéristique  $C_p(\lambda)$  sera en cloche, plus l'adaptation de la vitesse de rotation de l'éolienne par rapport à celle du vent sera nécessaire pour rester dans la zone optimale. Le sommet de cette courbe est équivalent à la puissance maximale « extractible » donc au point optimal. Il est caractérisé par la vitesse réduite optimale  $\lambda_{opt}$  et le coefficient de puissance maximal  $C_{p_{opt}}$  pour avoir un taux de production d'énergie non négligeable.

La valeur maximale de  $C_p$  ( $C_p = 0.48$ ) est obtenue pour  $\beta = 0$  et  $\lambda = 8.1$ .

La caractéristique du coefficient de puissance varie avec l'angle d'orientation des pales ( $\beta$ ) et le ratio de vitesse ( $\lambda$ ). La relation (IV.18) montre qu'une petite variation de la vitesse du vent ( $V$ ) induit une grande variation de la puissance générée.

Le modèle réalisé sous Simulink pour simuler le fonctionnement d'une turbine éolienne est illustré par la figure(IV.24).

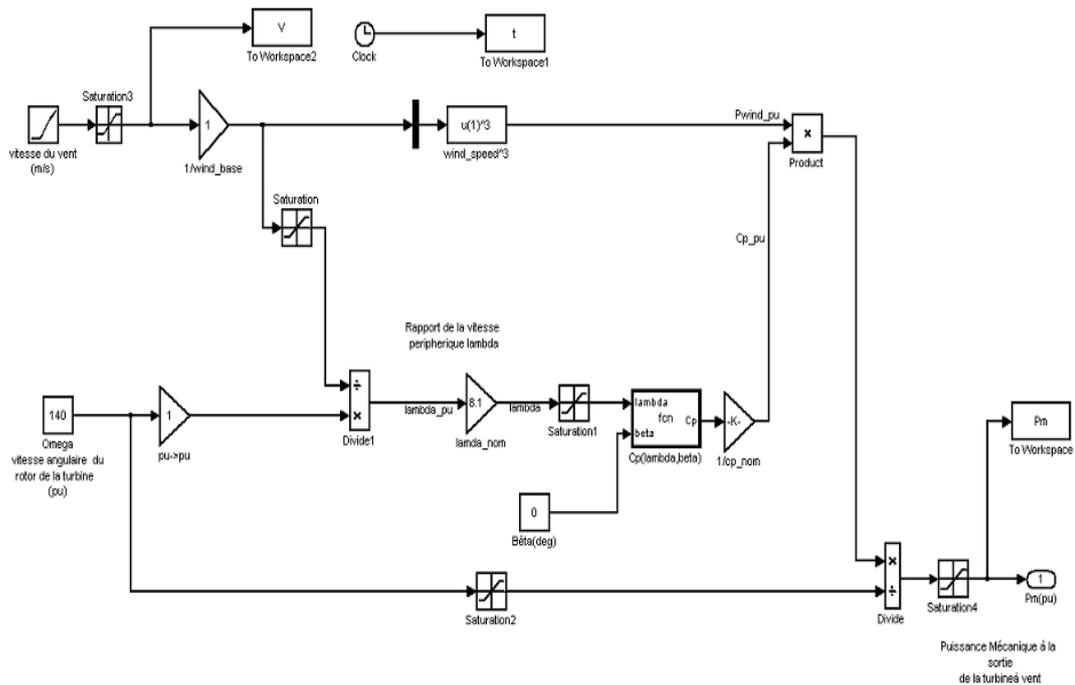


Figure IV-24 : Le modèle d’une turbine éolienne, sur lequel sont exécutées les liaisons entre les blocs.

➤ La Courbe de puissance

Le rapport entre la vitesse du vent et la production de puissance électrique pour la turbine éolienne est représenté par la courbe de la puissance. Une courbe de la puissance idéalisée typique est montrée dans la figure IV.25

La caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent est alors évaluée.

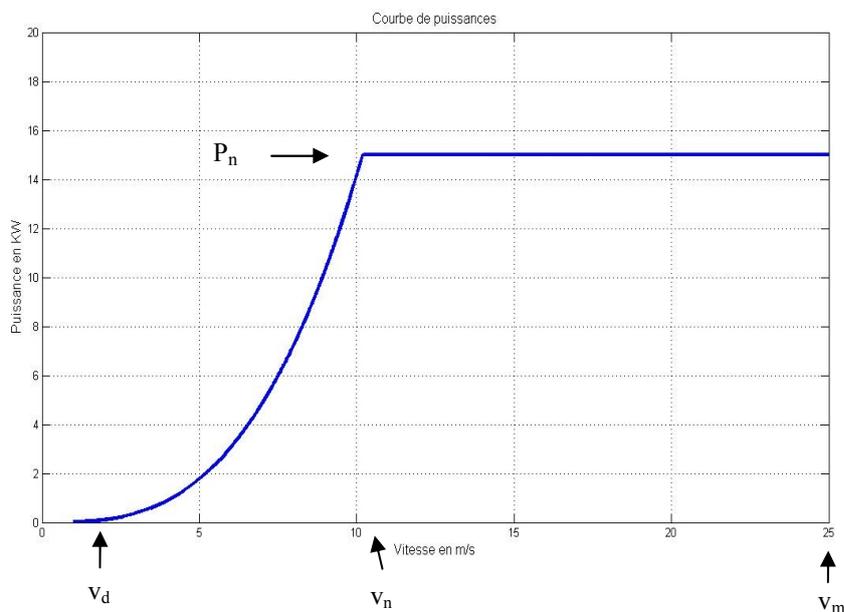


Figure IV- 25 : Courbe typique de puissance en fonction de la vitesse du vent

### Performances de la turbine éolienne

La turbine éolienne développe sur son arbre une puissance dénommée puissance nominale  $P_n$ . La puissance  $P_n$  est obtenue à partir d'une vitesse du vent  $v_n$ , dénommée vitesse nominale. Lorsque la vitesse du vent est supérieure à  $v_n$  la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante.

A côté de la vitesse nominale  $v_n$ , on spécifie aussi :

- la vitesse de démarrage,  $v_d$ , à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie,
- la vitesse maximale du vent,  $v_m$ , pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

### ➤ Modélisation de l'aérogénérateur

La puissance extraite par un aérogénérateur éolien de puissance nominale  $P_n$  dépend de la vitesse du vent.

Dans la littérature, plusieurs modèles sont présentés pour simuler la caractéristique puissance-vitesse de l'aérogénérateur. Parmi ces modèles on trouve le modèle quadratique décrit par l'équation suivante:

$$P_{\text{éol}}(V_v) = \begin{cases} P_n \cdot \frac{V_v^2 - V_d^2}{V_n^2 - V_d^2} & V_d < V_v < V_n \\ P_n & V_n \leq V_v < V_c \\ 0 & V_v \leq V_d \text{ et } V_v \geq V_c \end{cases} \quad (\text{IV.21})$$

où  $P_n$  est la puissance électrique nominale,  $V_v$  est la vitesse du vent à la hauteur du moyeu  $V_d$  : vitesse de démarrage,  $V_n$  vitesse nominale définie comme la vitesse pour laquelle la puissance produite par l'aérogénérateur est maximale,  $V_c$  vitesse d'arrêt spécifiques.

### Extrapolation de la vitesse

En effectuant la caractérisation d'un site éolien, il est impératif de connaître la hauteur sur laquelle les mesures sont prises et ensuite adapter les résultats à la hauteur de mat de l'éolienne. En effet, la vitesse du vent augmente selon la hauteur. La méthode la plus utilisée pour l'extrapolation de ces vitesses à une hauteur différente de celle de mesure est celle utilisant la loi de puissance qui est définie par l'expression (IV-22)

$$V(H) = V(H_m) \left( \frac{H}{H_m} \right)^\alpha \quad (\text{IV.22})$$

Où :  $H$  est la hauteur à laquelle le vent est estimé (hauteur du moyen de l'éolienne),  $H_m$  est la hauteur des appareils de mesure (généralement 10 m).

$V(H_m)$  et  $V(H)$  sont respectivement la vitesse du vent à la hauteur des mesures et la vitesse du vent à la hauteur  $H$ .  $\alpha$  : est un facteur empirique exprimant les influences de la rugosité de la surface et de la stabilité atmosphérique. On prend  $\alpha = 0,14$ .

**Remarque :**

La puissance totale est la puissance produite par les deux générateurs PV et éolien

$$P_{tot}(t) = P_{pvs}(t) + P_{éols}(t)$$

où :  $P_{pvs}(t)$  et  $P_{éols}(t)$  sont respectivement la puissance produite par le générateur photovoltaïque et l'aérogénérateur, après le passage dans l'onduleur.

**IV.4. Modélisation de la batterie**

Les paramètres électriques suivants sont employés pour caractériser une batterie :

- La capacité nominale  $C_{batmax}$  est le nombre maximal d'ampères-heures (Ah) qui peut être extraite de la batterie, dans des conditions de décharge prédéterminées.
- L'état de charge SOC (State of charge) à l'instant  $t$  est le rapport entre la capacité présente et la capacité nominale à l'instant  $t$  :  $SOC(t) = C_{bat}(t)/C_{batmax}(t)$  ( $0 \leq SOC \leq 1$ ). Si  $SOC = 1$ , la batterie est totalement chargée. Si  $SOC = 0$ , la batterie est totalement déchargée.
- Le régime de charge (ou décharge) est le paramètre qui reflète le rapport entre la capacité nominale d'une batterie et le courant auquel celle-ci est chargée (ou déchargée).

Dans le but de prévenir les décharges profondes la charge de l'accumulateur est maintenue dans une certaine plage. Cette plage est définie par :

$$C_{batmin}(t) \leq C_{bat}(t) \leq C_{batmax}(t) \tag{IV.23}$$

Avec  $C_{batmin} = DOD.C_{batn}$ .

DOD est la profondeur de décharge de la batterie, pris égal à 0.5.

Les processus de charge et de décharge de la batterie sont donnés respectivement par :

$$C_{bat}(t) = C_{bat}(t-1) + ((P_{tot}(t) - P_{cha}(t)) + P_{ge}(t)) \eta_{ac/dc} \eta_{cha} \Delta t \tag{IV.24}$$

$$C_{bat}(t) = C_{bat}(t-1) + (P_{tot}(t) - P_{cha}(t)) \Delta t / \eta_{dc/ac} \eta_{decha} \tag{IV.25}$$

Où :

$\eta_{cha}$  : est le rendement pendant le processus de la charge de la batterie

$\eta_{dech}$  : est le rendement pendant le processus de la décharge de la charge

$C_{bat}(t)$  est la capacité  $C_{bat}$  de la batterie à l'instant  $t$

$C_{bat}(t-1)$  est la capacité  $C_{bat}$  de la batterie à l'instant  $t-1$  (le pas de temps est considéré égal à 1 heure).

Lorsque  $t=0$ ,  $C_{bat}(t-1)$  est la capacité initiale de la batterie.

#### IV.5. Modélisation du groupe électrogène

Un groupe électrogène résulte de l'association d'un moteur thermique et d'une génératrice électrique, le plus souvent de type synchrone. Bien que le type de carburant diffère selon les groupes, nous nous limiterons ici aux groupes diesel.

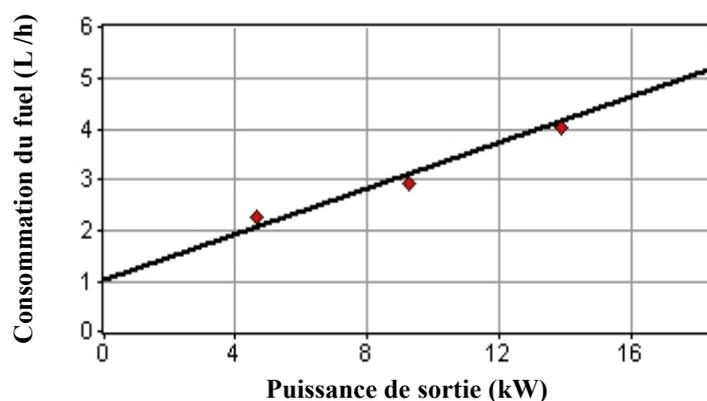
Le modèle utilisé est un modèle linéaire : la consommation en carburant (en litres/h) est supposée croître linéairement avec la puissance utile demandée par la charge.

De façon à modéliser la consommation du groupe électrogène en fonction de la puissance électrique qui lui est demandée, nous nous sommes basés sur les données du constructeur, elles sont fournies par la société PERKINS. Les données de consommation sont exprimées en fonction du pourcentage de la puissance nominale du groupe électrogène (25% ,50%, 75%,100%). Ces données sont représentées sur le tableau IV-1.

**Tableau IV-1** : la consommation de groupe électrogène Diesel

Puissance de sortie (KW)	Consommation du fuel (L/h)
18.500	5.400
13.875	4.000
9.250	2.900
4.625	2.270

Les courbes de consommation et de rendement du groupe électrogène diesel sont représentées sur les figures IV-26 et IV-27.



**Figure IV- 26** : Courbe de consommation du générateur diesel

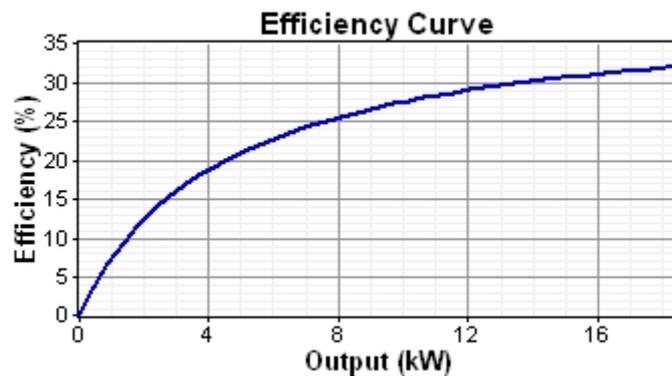


Figure IV- 27 : Courbe du rendement du générateur diesel

#### IV.6 Architecture de l'installation étudiée

La finalité de ce travail est d'évaluer les performances du système hybride .Nous avons donc étudié un système complet composé :

- d'un générateur photovoltaïque comme source d'énergie renouvelable ;
- d'un générateur éolien comme source d'énergie renouvelable ;
- d'une charge simulant la consommation de l'utilisateur final ;
- d'un bus alternatif ;
- de convertisseurs permettant d'ajuster les tensions à celles du bus alternatif ;
- d'une unité de stockage d'énergie constituée de pack batteries ;
- d'un générateur diesel.

Tous les composants du système exceptée la charge sont connectés à un bus alternatif via des convertisseurs (CC/CA pour le champ PV et l'éolienne et bidirectionnel pour le pack batterie).

Pour la gestion du système on considère l'algorithme réalisé sur le bus AC. On calcule les puissances de chaque composant sur ce bus illustré sur le schéma de l'installation étudié (figure IV- 28).

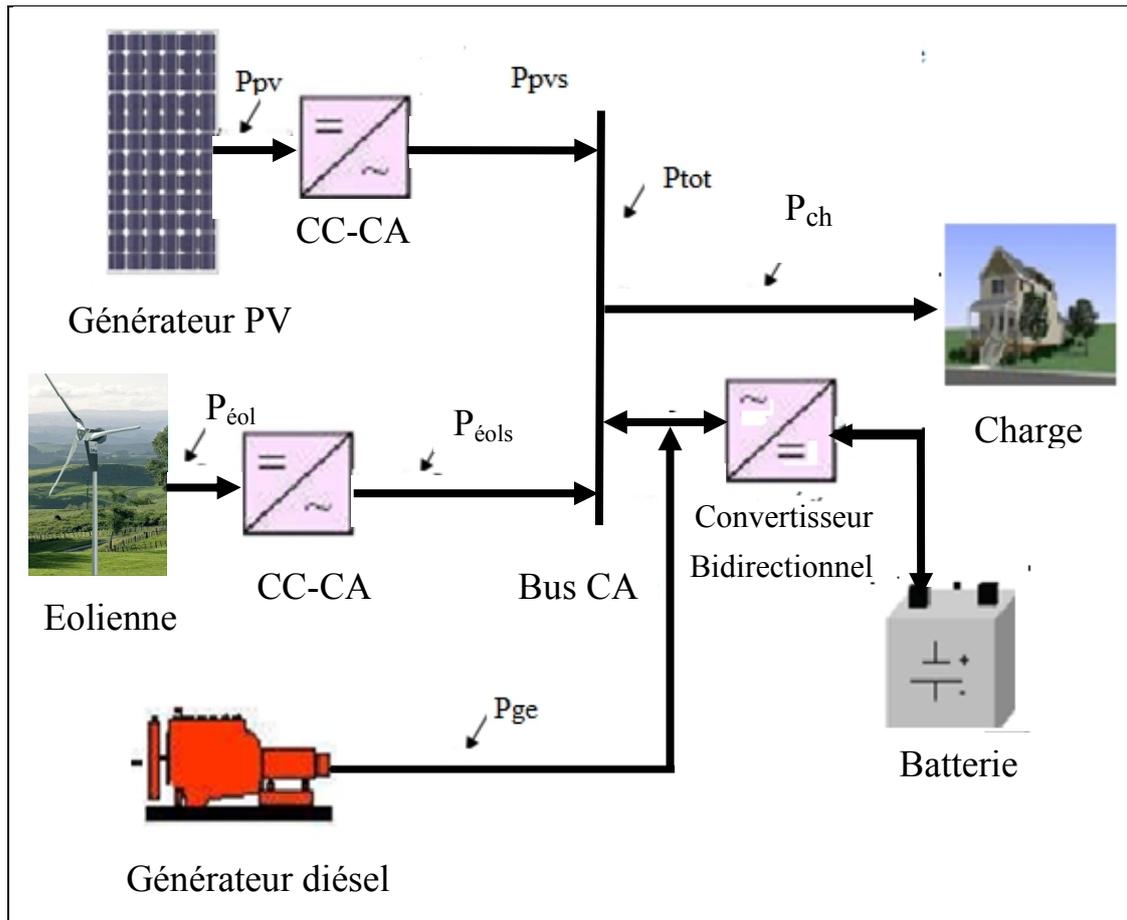


Figure IV- 28 : Architecture du système étudié

### ➤ Principe de fonctionnement

Les performances d'un SEH, sont influencées par le choix de la stratégie de fonctionnement. La priorité est la fourniture de l'énergie demandée par l'utilisateur à partir de l'énergie produite par le champ photovoltaïque et l'éolienne. Ces générateurs peuvent être suppléés par des groupes électrogènes afin d'assurer la fourniture électrique du consommateur lorsque l'état de charge des accumulateurs est insuffisant

Lorsque la charge de consommation est faible, le générateur diesel est éteint. La puissance des batteries, l'énergie solaire et l'énergie éolienne sont transférées à la charge à travers l'onduleur. Dans le cas de charges de consommation moyennes, le groupe électrogène diesel alimente la charge directement. Le surplus d'énergie générée à partir de la génératrice diesel est utilisé pour charger la batterie à travers le convertisseur bidirectionnel dans le mode de charge des batteries. C'est pourquoi le groupe électrogène diesel fonctionne dans des conditions optimales.

Le PV et l'éolien alimentent la charge du consommateur. S'il ya un déficit, la charge fait appel au système de batterie pour combler ce déficit d'énergie. Si l'énergie totale produite par le PV et l'éolienne avec celle stockée dans la batterie ne satisfait pas la

charge, à ce moment-là le groupe électrogène intervient pour combler le déficit. Son arrêt et son démarrage sont conditionnés respectivement par le seuil maximal et le seuil minimal de la batterie.

**Remarque :**

L'excédent est calculé au Bus AC et le déficit à l'entrée de la charge.

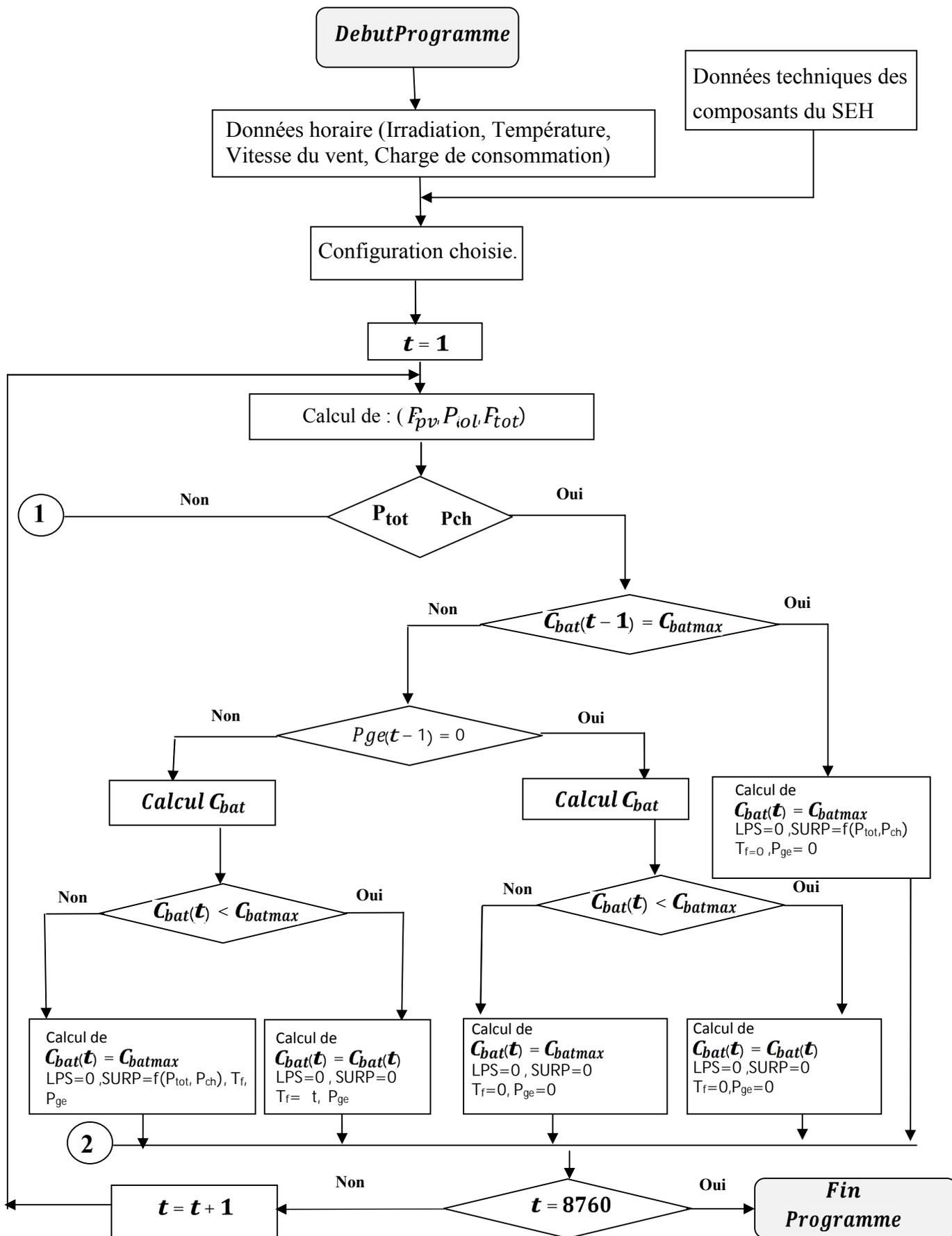
Dans cette étude, l'auto décharge de la batterie est supposé égale à zéro.

$\eta_{\text{bat}} = \eta_{\text{cha}}$  pendant le processus de la charge

$\eta_{\text{bat}} = \eta_{\text{dech}}$  pendant le processus de la décharge

**Algorithme de gestion d'énergie**

Nous présentons sur la figure IV-29 l'organigramme relatif au programme MATLAB, du Système hybride.



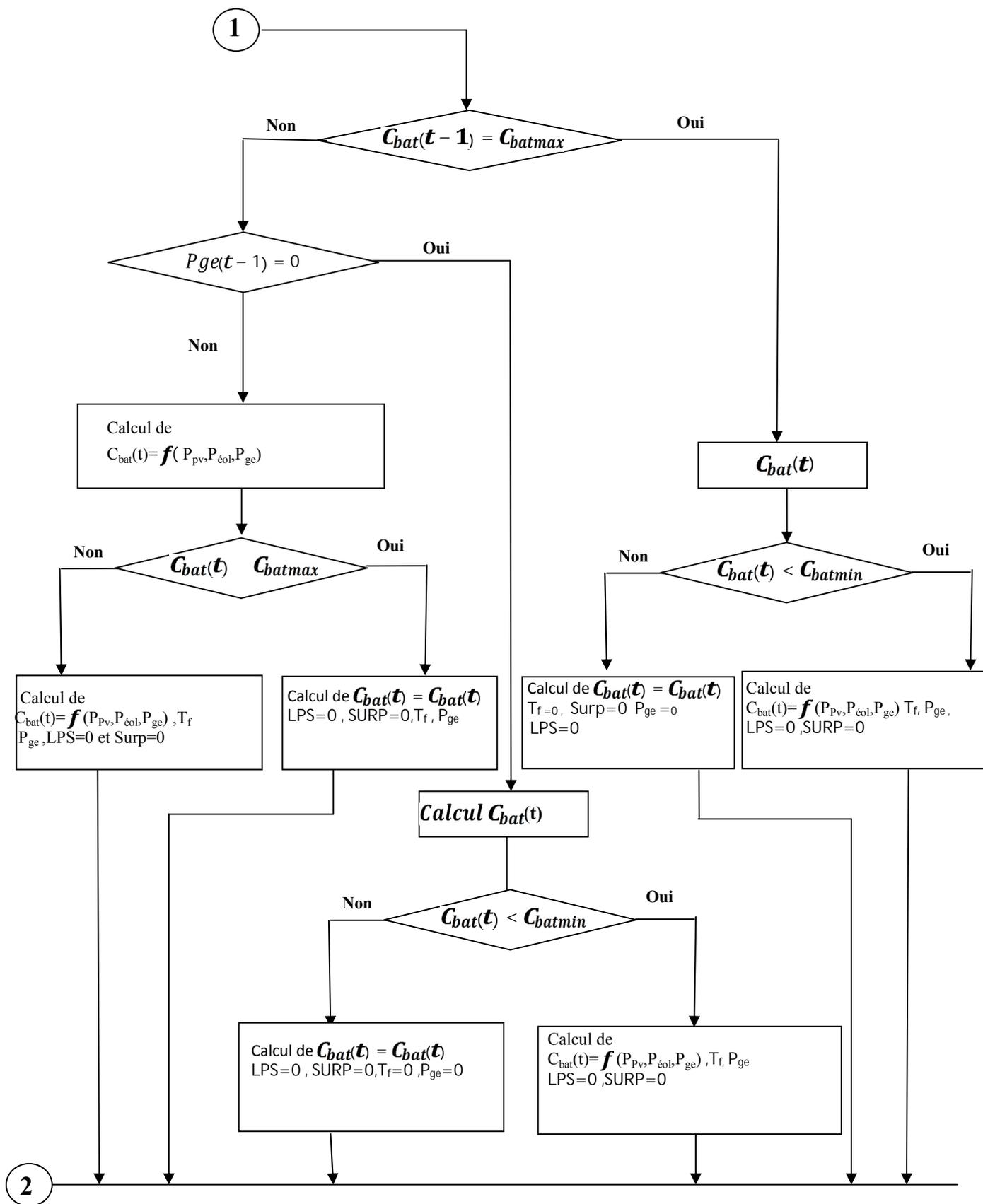


Figure IV-29 : Organigramme de calcul

**Conclusion**

La première approche préconisée dans le cadre de nos simulations est de suivre l'évolution des caractéristiques électriques des deux générateurs renouvelables PV et éolien composant le système. Les propriétés physiques de ces composants sont le plus souvent exprimées sous forme de courbes caractéristiques. Ainsi, on connaît les courbes  $I = f(V)$  des capteurs solaires photovoltaïques et la courbe de puissance de l'éolienne. Les données visualisées par de telles courbes servent alors à préciser les performances énergétiques du composant en question et permettent leur comparaison avec d'autres composants ou références.

# **Chapitre V**

## **Résultats de Simulation et discussions**

Un programme de simulation a été mis au point pour prédire le comportement du système entier. Dans le cadre d'une étude préliminaire visant à évaluer l'intérêt de l'implantation d'un tel système en un lieu donné. L'exemple de simulation a été appliqué à un site Algérien où un an de fonctionnement a été simulé avec les données d'entrées nécessaires qui sont les paramètres des composants et les quatre profils annuels :

- de charge ;
- d'irradiation ;
- de température ambiante ;
- de vitesse de vent.

Nous avons pris la configuration obtenue par le logiciel HOMER et nous réalisons une analyse du fonctionnement de l'installation à l'aide du programme du calcul établi, qui repose sur plusieurs tests et en imposant un profil de charge constant et sur les modèles énergétiques établis précédemment.

Ainsi donc le site considéré dans cette étude de cas représente le site d'Adrar situé au sud ouest Algérien. Le choix de ce site a été fait sur la base d'un potentiel solaire et d'un potentiel éolien importants et sur la disponibilité des données météorologiques fournies par Météo Norme.

Notons qu'il s'agit d'une simulation temporelle du système hybride sur une durée (une année) avec un pas de temps ( $\Delta t = 1h$ ).

## **V.1 Résultats de simulation et discussion**

Pour l'installation étudiée, l'environnement Matlab permet la représentation graphique des résultats, il fournit tous les paramètres de fonctionnement des composants et de l'ensemble de l'installation étudiée (la fraction de l'énergie renouvelable, l'énergie totale produite et la consommation, l'excès ...).

Les résultats ainsi générés sont traités à travers la mise en place de critères de comparaison et d'indices de performances bien définis. Le traitement de ces résultats nous permet de déterminer dans quelles conditions le système est rentable lors de son fonctionnement. Ainsi, ils peuvent rapidement nous livrer les conclusions relatives à l'utilisation du SEH. C'est précisément l'objet de ce travail.

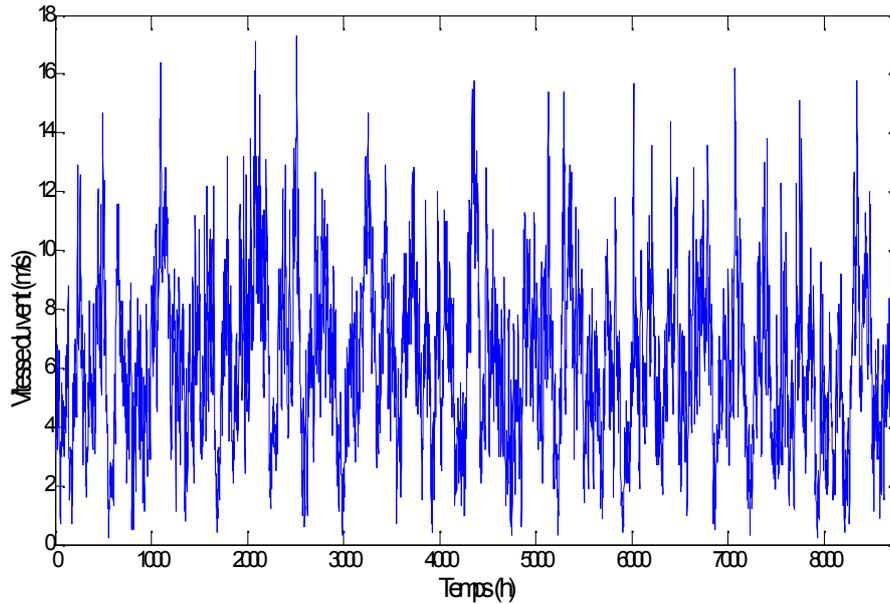
### **V.1.1 Variation climatiques sur le site d'Adrar**

Nous donnons sur les diagrammes ci-dessous l'évolution annuelle et sur une semaine des principales caractéristiques climatiques du site d'Adrar choisi :

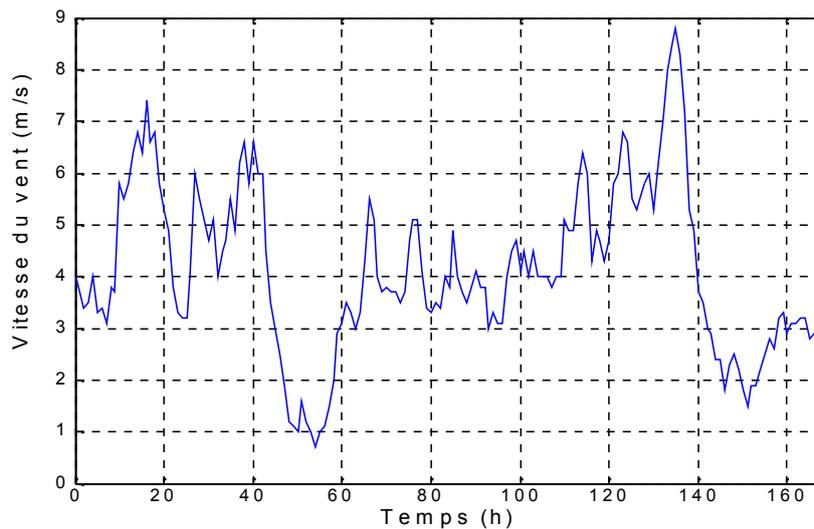
**Variation du vent**

Une simulation est réalisée pour tester l’efficacité de la stratégie de fonctionnement de l’éolienne et de poursuivre sa puissance de sortie.

Le profil de vent utilisé pour cette simulation est présenté dans la figure IV-1. La figure illustre le profil annuel et un profil pour une semaine.



**Figure V-1-a :** Évolution de la vitesse du vent sur un an.



**Figure V-1-b:** Évolution de la vitesse du vent sur une semaine de simulation

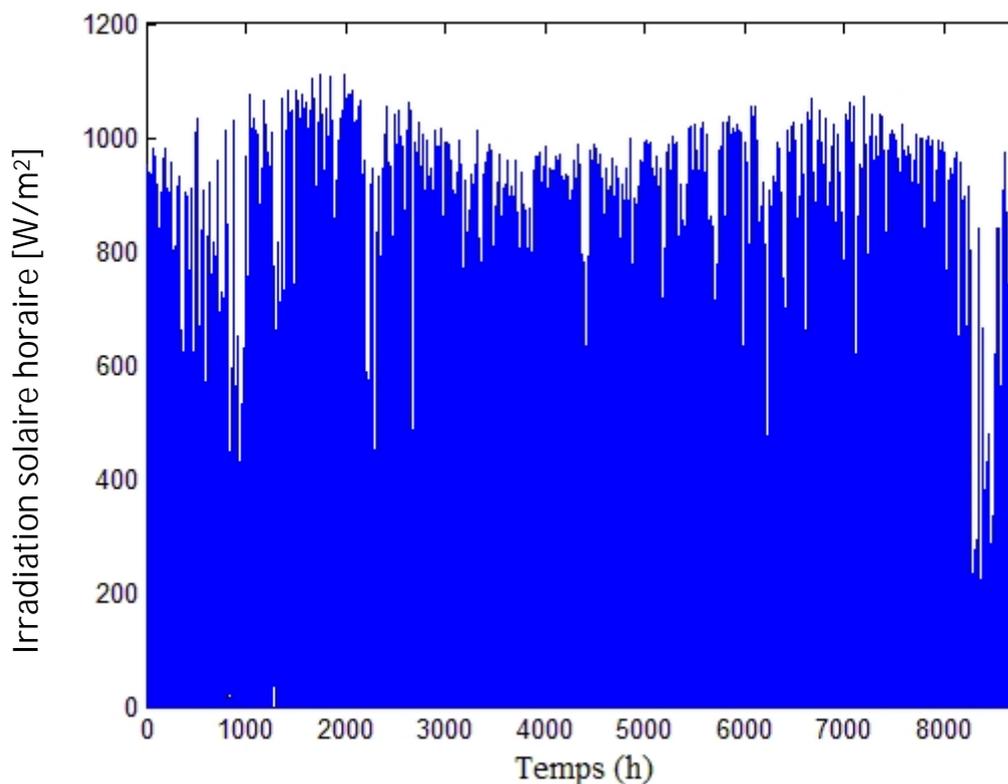
### Variation d'irradiation

Pour tester l'efficacité de l'algorithme utilisé dans le système de conversion photovoltaïque nous avons utilisé un profil annuel d'irradiation solaire globale (en  $W/m^2$ ), par pas de temps d'une heure. La figure V-3 présente les variations de l'irradiation solaire en fonction de temps pour une année, à Adrar.

Le tableau suivant présente les informations relatives au lieu choisi.

**Tableau V-1** : Coordonnées géographiques de site choisi

Site /caractéristique	Latitude	Longitude	Altitude
Adrar	27.82°N	0.18°W	263.8m



**Figure V-2** : Évolution annuelle des irradiances solaires horaires pour le site d'Adrar

Remarquons qu'au niveau de l'irradiation solaire le site d'Adrar présente un profil régulier sur l'année.

### Profil de température

L'évolution horaire de la température au cours de l'année est présentée dans la figure V-3

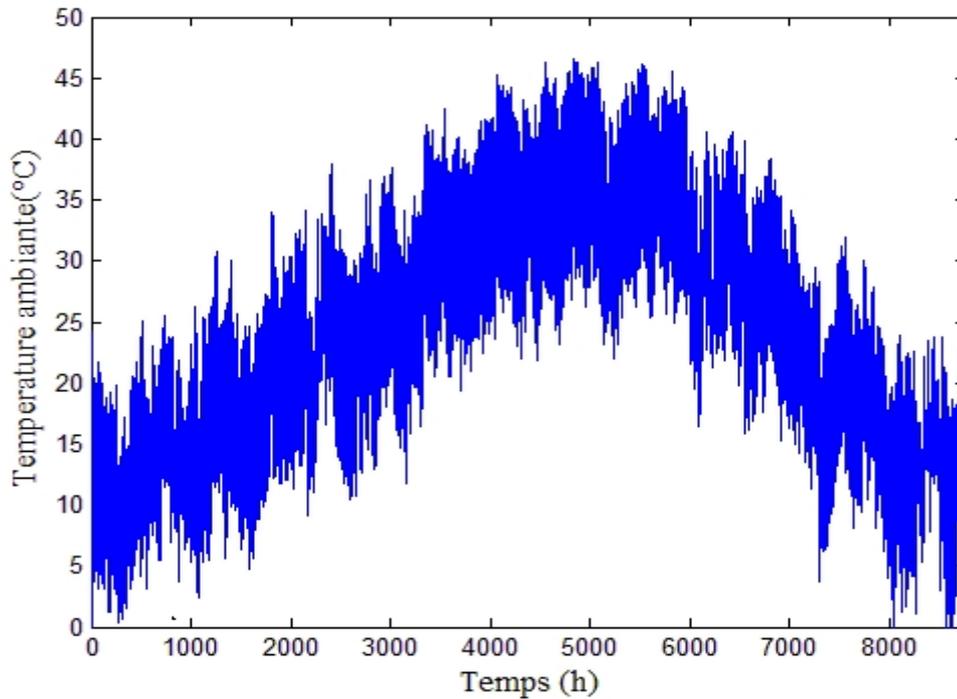


Figure V-3 : Évolution horaire de la température au cours de l'année

#### V.1.2 Caractéristique de la charge choisie

Dans notre étude nous avons choisi une charge de type AC fonctionnant en permanence durant toute l'année. Le profil sur une semaine de la charge ainsi que l'évolution annuelle de celle-ci au cours de toute l'année sont données respectivement sur les figures V-4 et V-5.

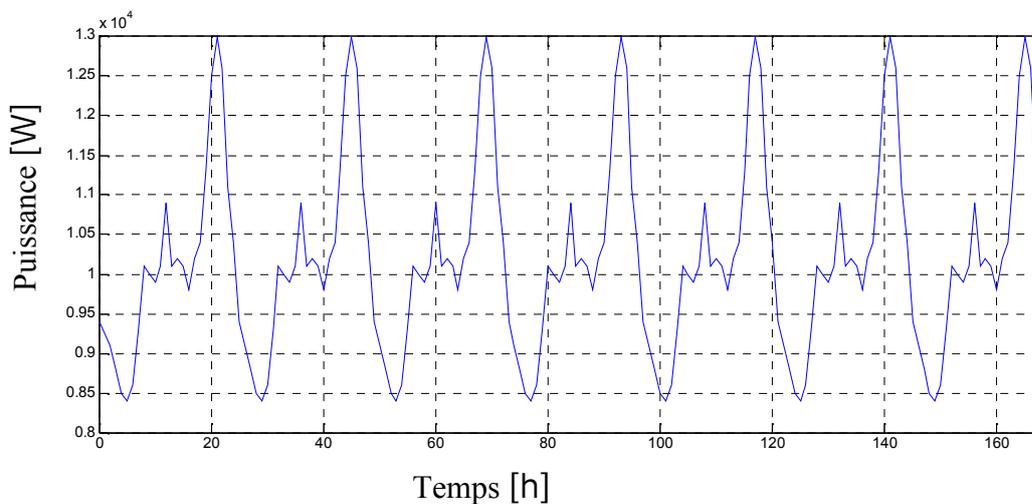
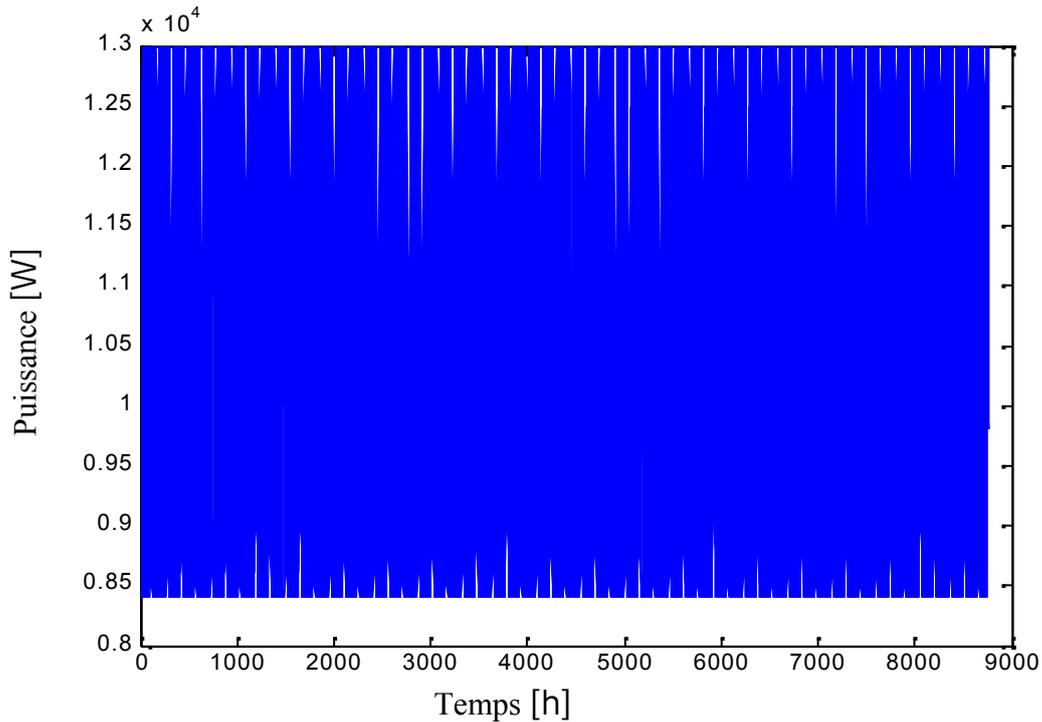


Figure V-4: Illustration du profil de charge pour une semaine



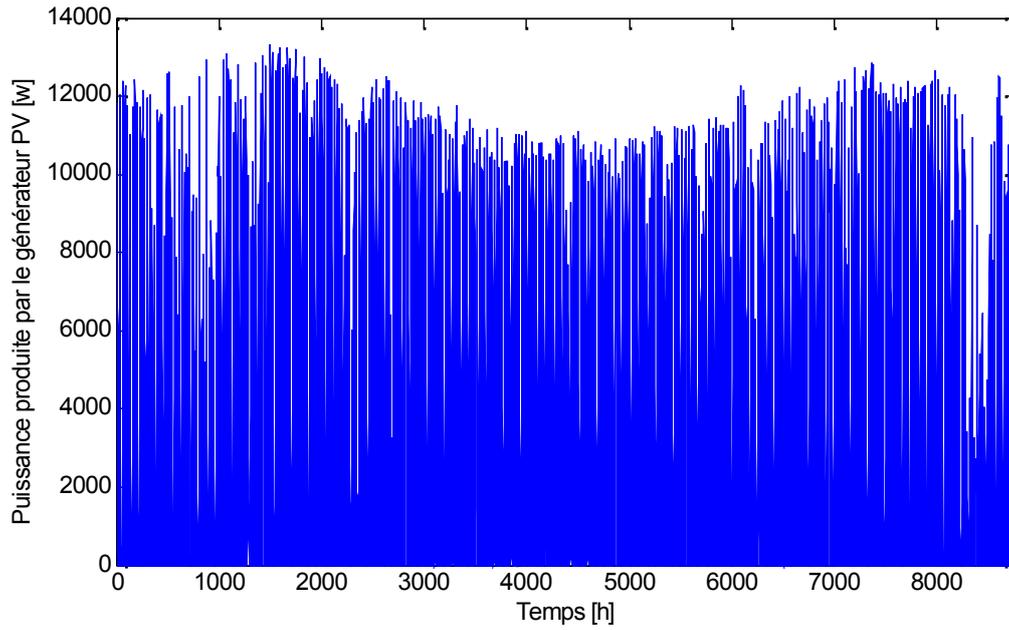
**Figure V-5 :** Distribution annuelle de la puissance de charge.

On constate que le Profil de consommation est "constant". En effet, la puissance demandée par la charge est constante. Le profil de charge annuel est à un pas de temps d'une heure et démarre au 1<sup>er</sup> Janvier de l'année.

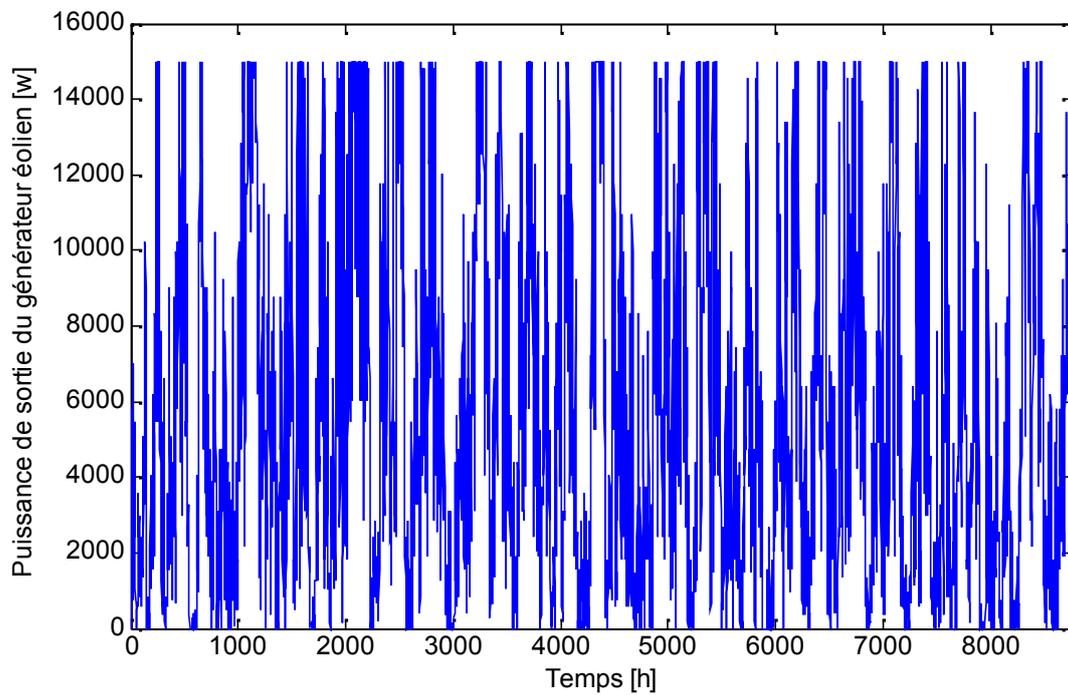
## V.2 Indices de performance du système étudié

Les résultats de simulation obtenus pour le système testé permettent une évaluation complète des paramètres du SEH. Les paramètres de performance, le fonctionnement du système et l'influence de ses paramètres décrits ci-dessous, proviennent de l'analyse de l'ensemble des simulations réalisées.

La distribution de la puissance produite par les générateurs PV et éolien relatif au système étudié et au site d'Adrar est illustré dans les figures V-6 et V-7.



**Figure V-6 :** Distribution de la puissance produite par les trois générateurs PV relatif au SEH et au site choisi



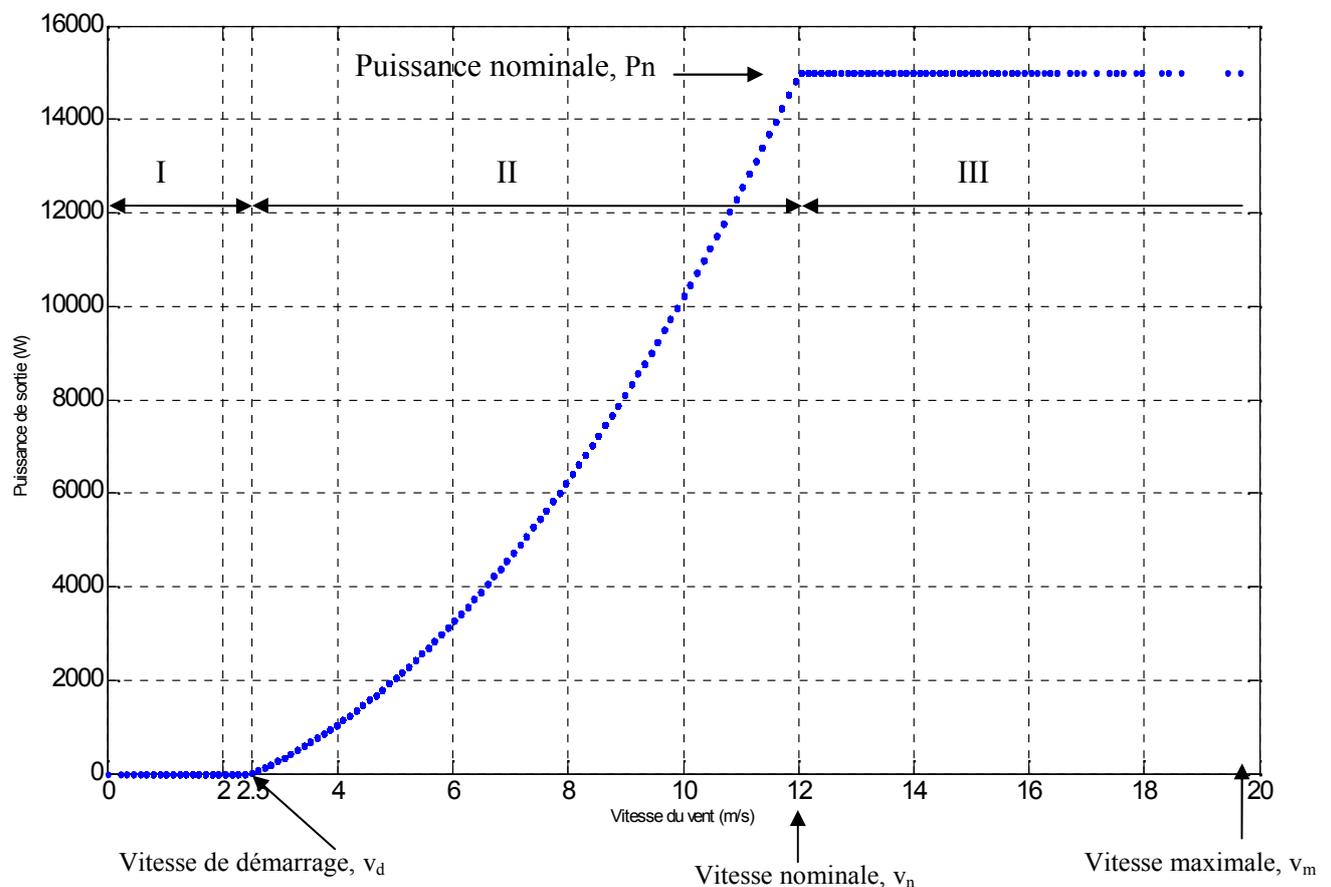
**Figure V-7 :** Distribution de la puissance produite par le générateur éolien dans le SEH relatif au site d'Adrar

Les performances des systèmes évalués sont fortement dépendantes du profil de consommation et des profils de production des sources renouvelables (profil d'irradiation solaire, et vitesse du vent).

### V.2.1 Courbe de la puissance de l'éolienne

La turbine éolienne est caractérisée par une courbe de puissance qui représente la puissance électrique générée par l'éolienne en fonction de la vitesse du vent.

Un programme sous MATLAB a été établi. Nous permettons de déterminer après avoir lancé la simulation la courbe de puissance produite par l'aérogénérateur (voir figure V-8).



**Figure V-8:** Courbe de puissance de l'éolienne Proven 15 en fonction de la vitesse du vent

La courbe obtenue représente la puissance mécanique en Watts de la turbine éolienne en fonction de la vitesse du vent en m/s. En analysant cette courbe nous constatons tout d'abord qu'elle correspond à celle donnée par le constructeur (voir figure V-9). On remarque que la puissance est proportionnel à la vitesse, l'éolienne commence à produire à partir de 2.5 m/s et s'accroît jusqu'à ce que la turbine atteigne sa puissance nominale qui est

de 15 kW pour une valeur nominale de la vitesse qui vaut 12 m/s, au delà de cette valeur la puissance reste constante.

Ainsi, trois zones distinctes de fonctionnement apparaissent sur la figure ci-dessus :

- la zone I, où  $P = 0$  (la turbine ne fonctionne pas),
- la zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent  $v$ ,
- la zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance  $P$  fournie reste égale à la puissance nominale  $P_n$ .

**Tableau V-2** : Performance de l'éolienne

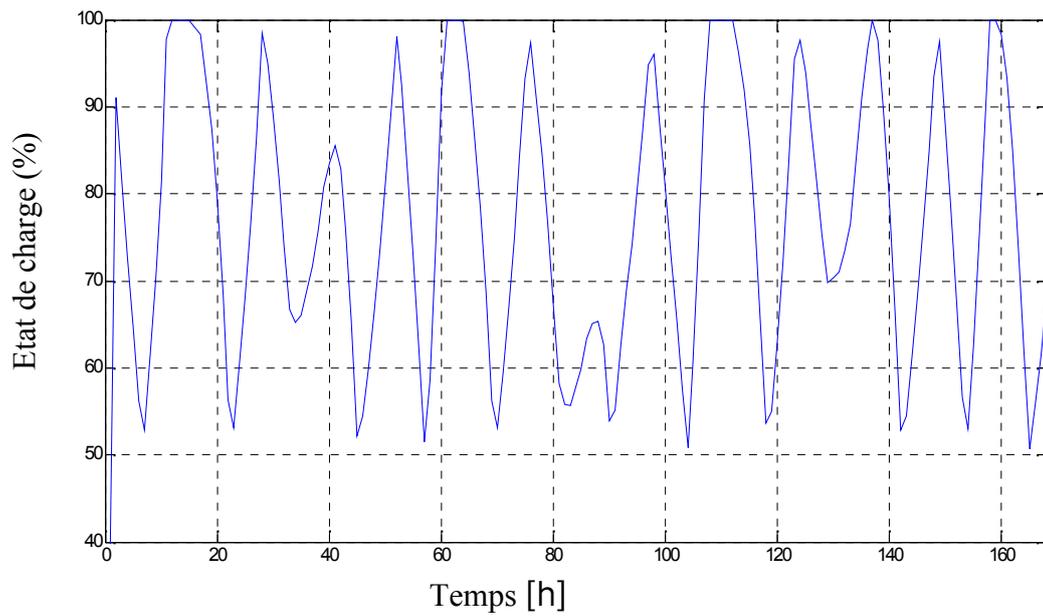
Performance de la PROVEN 15	
vitesse de démarrage, $v_d$	2,5 m/s
vitesse maximale du vent, $v_m$	19,66 m/s
vitesse nominale, $v_n$	12 m/s
Puissance nominale, $P_n$	15kW

### V.2.2 Évolution de l'état de charge des batteries

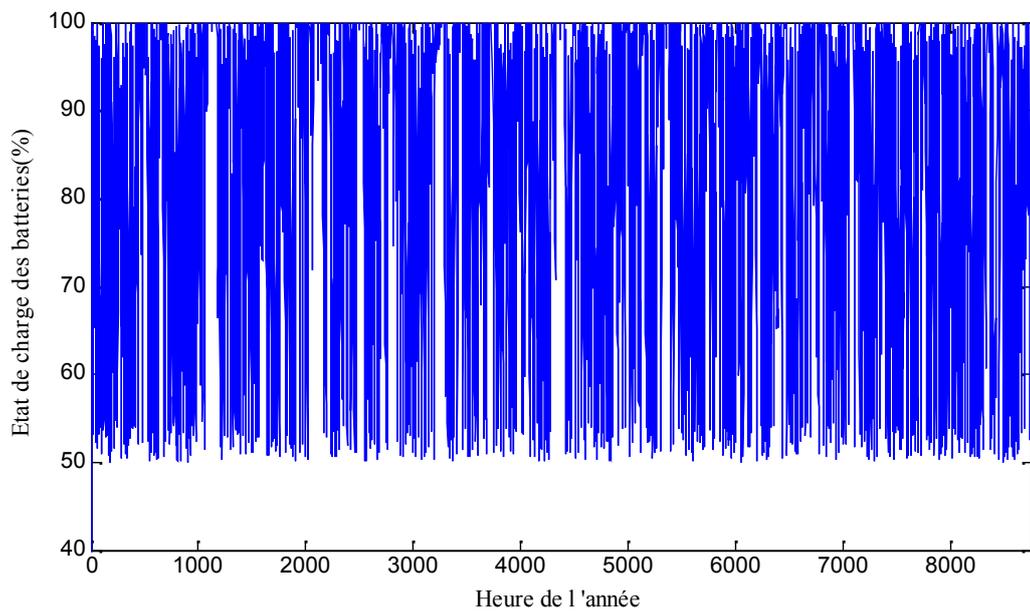
Le profil sur une semaine de l'état de charge des batteries ainsi que l'évolution annuelle de celle-ci au cours de toute l'année sont données respectivement sur les figures V-9 et V-10.

Cette courbe est issue de la simulation pour des cycles bien définis : départ à  $SOC=100\%$ , puis décharge jusqu'à 50% puis de nouveau recharge jusqu'à  $SOC=100\%$ .

On voit bien que l'état de charge du système batteries  $SOC$  ne dépasse pas la borne minimale autorisée  $SOC_{min}$ . Ici, c'est l'algorithme de gestion de l'énergie qui veille à respecter la condition d'utilisation du stockage batteries  $SOC < SOC_{max}$ .



**Figure V-9 :** évolution de l'état de charge du stockage batteries en % sur une semaine de fonctionnement



**Figure V-10 :** évolution de l'état de charge du stockage batteries en % sur une année de fonctionnement.

Comme la batterie présente l'élément le plus sensible dans le système hybride PV/éolien, l'évolution de son état de charge est analysée pour la configuration du système étudié et les résultats de simulation sont présentés dans les figures V-9 et V-10.

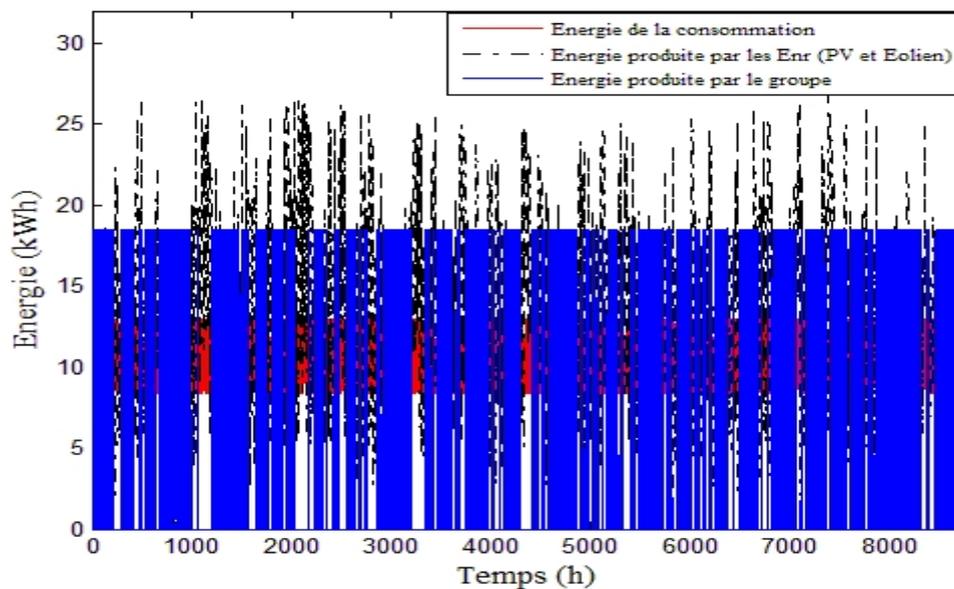
Ces résultats montrent que d'une part l'état de charge des batteries varie entre le seuil minimal (50% de la charge maximale) et le seuil maximal 100% de la charge nominale, et d'autre part, la capacité des batteries avoisine la valeur maximale durant quelques jours des mois février, Avril et Août et Fin juin et début juillet. En ces périodes, la production d'énergie par les deux sources d'énergie renouvelables est suffisante pour satisfaire la demande et par conséquent les batteries n'interviennent pas et leur capacité reste proche de la valeur maximale souvent pour combler ce déficit d'énergie.

Cela est dû au fait que pendant ces périodes les batteries ne sont pas sollicitées pour alimenter la charge puisque l'énergie produite par les deux sources d'énergie renouvelables satisfait, toute seule, les besoins en énergie de la charge.

Ces résultats montrent que l'état de charge des batteries atteint son minimum en période de janvier et de février. En cette période, la production d'énergie par le système est insuffisante pour satisfaire la demande et par conséquent les batteries interviennent souvent pour combler ce déficit d'énergie. Durant la période du printemps et d'été, l'état de charge des batteries varie généralement entre 60% et 100% de sa charge nominale, du fait que le potentiel énergétique est important durant cette période.

### **V.2.3 Évolution des énergies échangées au niveau du bus AC**

Les trois courbes sur les figures V-11 et V-12 représentent respectivement les profils en énergie annuels et pour une semaine. Il s'agit d'énergie de la consommation et de l'énergie produite par les Enr (PV et éolien) ainsi que de l'énergie produite par le groupe diesel pour une année de fonctionnement du système.



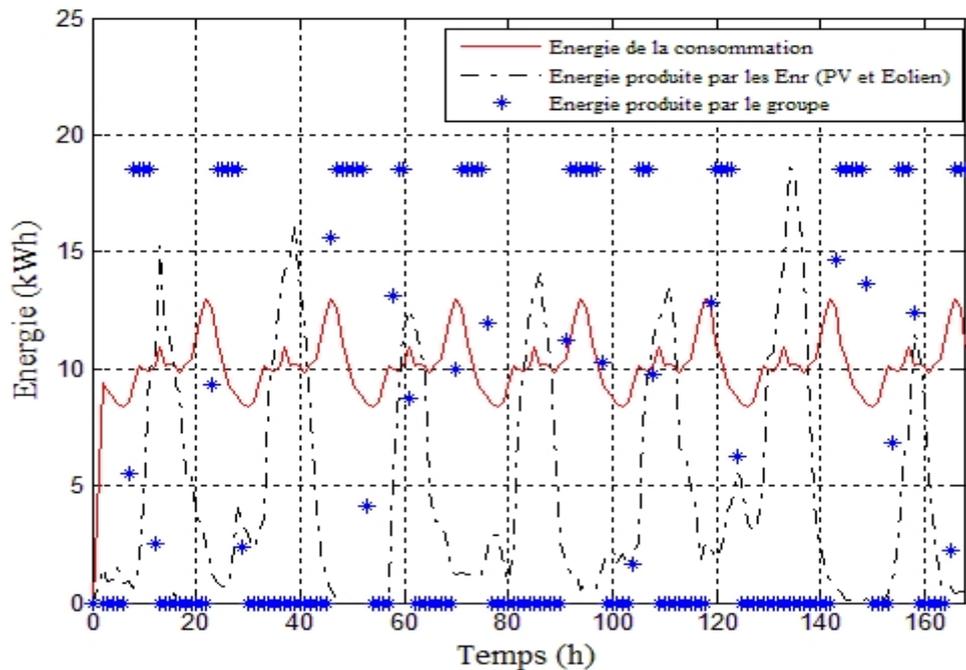
**Figure V-11** : Énergie produite par les trois générateurs (PV, Eolien et diesel) et consommée par la charge

On remarque que de 0 à environ 6 heures, la production d'électricité consommée par l'utilisateur est entièrement assurée par le système de stockage (batteries). Le générateur diesel est en arrêt.

Aux alentours de 6 heures, le champ PV et l'éolienne prennent le relais de la production pendant environ une heure. En ce moment, le groupe diesel alimente la charge puis, sa production étant excédentaire, il commence alors à stocker une partie sous forme chimique en alimentant les batteries. Cette alimentation s'arrête aux environs de 14 heures.

Vers 18 heures, la production du champ PV n'est plus excédentaire (l'ensoleillement n'étant plus suffisant ou la vitesse du vent faible ou les deux ne suffisent pas), le déficit en alimentation du système est par conséquent assuré par le système de stockage. Le générateur est en arrêt puisque les batteries contiennent la charge nécessaire au fonctionnement. Cet état dure jusqu'aux environs de 21 heures qui coïncide avec une consommation maximale journalière. A ce moment le générateur commence à réalimenter le système.

La figure en question fait apparaître que le même fonctionnement journalier se répète pendant toute la semaine. Ainsi, nous pouvons dire qu'aux premières heures de la journée ce sont les batteries qui assurent la sécurité d'approvisionnement des consommateurs sans interruption. Le groupe diesel quand à lui, il démarre quand l'état de charge des batteries est au dessous d'un certain seuil et devient faible. Pendant le fonctionnement du groupe diesel, il alimente directement les besoins énergétiques des charges et charge l'ensemble batteries simultanément. Une fois l'état de charge des batteries dépasse une certaine limite et le stockage des batteries devient important, le système reprend son fonctionnement normal.



**Figure V-12 :** Energie produite par les trois générateurs (PV, Eolien et diesel) et consommée par la charge sur une période d'une semaine

#### V.2.4 Bilan énergétique mensuel pour la configuration du système étudié

Un bilan d'énergies est établi dans le but de calculer des paramètres clés du système comme par exemple la fraction solaire ou l'énergie utile. Différents bilans d'énergie servent à déterminer les puissances moyennes des composants durant le fonctionnement du système entier.

La figure V-12 représente l'énergie moyenne mensuelle délivrée par chaque générateur, ainsi que l'énergie totale produite, l'énergie excédentaire et celle consommée pour le site d'Adrar. Le modèle présente les résultats en kilowatts-heures (kWh).

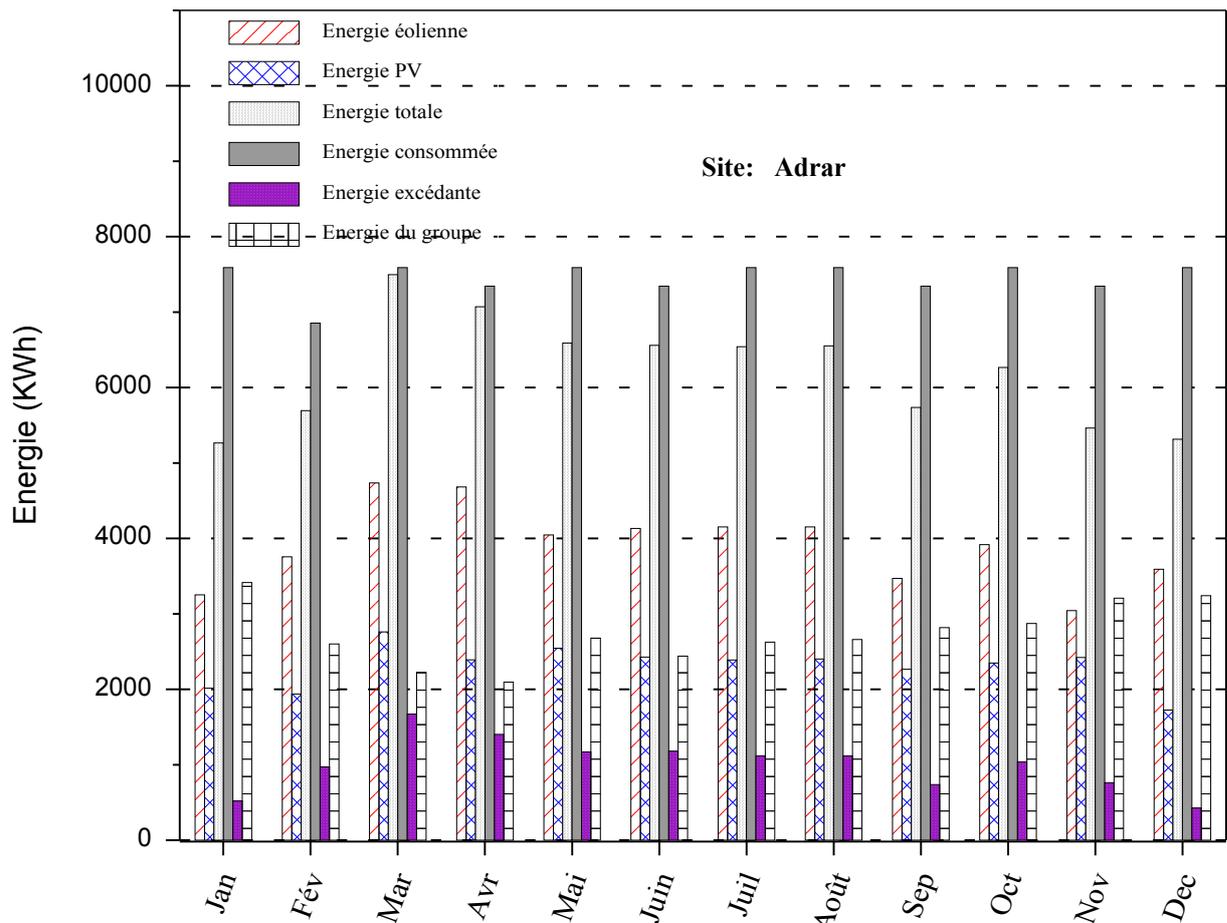


Figure V-13 : Bilan énergétique mensuel pour la configuration du système étudié

Les résultats de simulation représentant les énergies mises en jeu dans le système durant une année de fonctionnement. Ces résultats montrent que la configuration du système hybride permet de satisfaire la charge, et produit un excédent énergétique mensuel qui varie de 5% à 17% de la production totale du système (production énergies renouvelables et groupe diesel).

Ce pourcentage est déterminé par le rapport entre l'énergie excédentaire (surplus) et l'énergie totale du système (générateur éolien et photovoltaïque et groupe diesel). Cet excédent, qui provient des générateurs à sources renouvelables, peut être réduit par la réduction de leur taille et pour maintenir la satisfaction des besoins de la charge en énergie. Dans ce cas la durée de fonctionnement du groupe diesel doit être augmentée.

Nous constatons par ailleurs, que pour le site d'Adrar la charge est complètement couverte respectivement par 71 modules PV de puissance totale de 15 kW et un aérogénérateur de 15 kW. Pour les quelques mois exceptionnels où la couverture de cette charge représente un faible déficit, ceci sera couvert par le groupe électrogène au lieu d'un ensemble supplémentaire de modules ou d'aérogénérateurs, dont les prix de revient sont relativement importants.

Pour l'excès d'énergie on remarque que les mois les plus ventilés et/ou les plus ensoleillés correspondent au plus grand excès de la production électrique.

Ainsi, ces résultats montrent que pour cette configuration du système qui permet de satisfaire les besoins de la charge sur la période de fonctionnement (une année dans notre cas), plus de 70% de la production d'énergie provient des énergies renouvelables, le reste (moins de 30% de l'énergie totale produite) provient du groupe diesel. Cela confirme les résultats des différents travaux présentés dans la littérature dans lesquels, pour une configuration optimale du système hybride (PV/éolien et groupe diesel), le taux de la contribution des énergies renouvelables varie entre 70 % et 80% de l'énergie totale produite.

Le taux de pénétration des énergies renouvelables du projet d'étude se situe aux alentours de 70% laissant dire que ces résultats sont acceptables.

Les énergies mises en jeu dans le système durant une année de fonctionnement, présente un caractère continu de la disponibilité de l'énergie produite tout au long de l'année, il ne peut être que satisfaisant pour l'atténuation de la part allouée au stockage.

Les résultats globaux du système étudié sont représentés par : les fractions d'énergies moyennes des générateurs, la production d'énergie électrique annuelle, ces résultats obtenus en fin de simulation sont donnés dans le tableau suivant.

**Tableau V-3** : Les fractions d'énergies moyennes des générateurs du SEH

SOURCE	PRODUCTION	FRACTION
	(kWh /an)	
Eolienne	46922	43 ,69 %
PV	27618	25 ,71%
GD	32868	30 ,60%
Total	107408	100%

Les paramètres de fonctionnement de l'installation sont :

- Consommation du combustible : 9594 L /an
- Nombre de démarrages : 349 démarrages/an
- Nombre d'arrêt : 348 démarrages/an
- Energie maximale délivrée : 9719kWh
- Energie minimale délivrée : 8294 kWh

**Conclusion**

Le système de conversion de l'énergie éolienne et photovoltaïque pour le site en question est donc utilisé de façon optimale en considérant que son choix est effectué, correctement, en fonction des paramètres du site. La production d'énergie dans une installation hybride et autonome s'avère difficile et doit, en toute rigueur, dépendre à la fois, des caractéristiques météorologiques du lieu où le système est installé et, également du profil de consommation. En effet, la nature intermittente des sources renouvelables rend difficile la prédiction de cette production en termes de puissance ou d'énergie afin d'assurer une alimentation permanente de la charge.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale et perspectives

#### Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire, concerne les systèmes de génération d'énergie électrique pour un fonctionnement autonome. Ces dispositifs semblent être amenés à connaître des développements importants liés essentiellement à une volonté de plus en plus affichée de diversification des moyens de production, d'un meilleur respect de l'environnement.

Nous sommes arrivés à montrer l'intérêt que suscitent les énergies renouvelables dans les pays du Maghreb en Afrique du nord. Ces énergies sont au terme de ces études rentables, puisque la région en question possède un potentiel en Enr très important. La concrétisation de la configuration choisie à travers une étude de cas pour un site en Algérie (Adrar) permet l'implémentation et la validation d'applications spécifiques tenant compte des spécificités du site.

L'utilisation des énergies renouvelables comporte des avantages sur le plan financier et environnemental.

Elles innovent la conception des systèmes diminuant ainsi les coûts qui y sont reliés.

L'architecture modulaire permet :

- de contribuer à un programme de mesures d'action précoce en matière de technologie,
- de contribuer à la croissance du marché photovoltaïque et éolien,
- une installation hybride qui représente une solution alternative efficace et qui permet de diminuer les émissions de gaz à effet de serre en réduisant l'utilisation de combustible fossile.
- d'atteindre un rendement maximal,
- une efficacité sur le plan énergétique.

L'utilisation de plusieurs sources d'énergie dans un SEH a une incidence profitable sur la production d'énergie, en termes de coût et de disponibilité, étant entendu que le bilan « écologique » est supposé à priori favorable.

Les moyens de production tels que l'éolien, le photovoltaïque, etc. présentent des capacités de production incertaines et souvent fluctuantes, non corrélées à l'évolution de la charge. Le but premier d'un SEH est d'assurer l'énergie demandée par la charge et, si

## Conclusion générale et perspectives

---

possible, de rendre maximale dans le bilan, la part d'énergie provenant des sources d'énergie renouvelable.

Les performances de générateur PV et éolien fluctuent avec les conditions climatiques. Afin d'exploiter au maximum l'énergie solaire et éolienne, l'adaptation des générateurs est nécessaire pour les faire fonctionner dans les conditions optimale. Le modèle de simulation développé peut être utilisé, non seulement pour analyser la performance d'un système hybride, mais aussi pour dimensionner le système le plus adaptable pour l'alimentation des différentes charges électriques pour n'importe quelle localité spécifiée, pourvu que les données météorologiques locales soient disponibles.

L'approche de modélisation sous HOMER a pour but de réduire les coûts de conception et les temps de mise sur le marché et de choisir la configuration optimale.

Afin de mettre en œuvre cette approche, nous avons opté pour l'environnement MATLAB/Simulink pour modéliser et simuler les systèmes photovoltaïque et éolien. Ce choix a été motivé par l'évolution permanente de cet environnement, les possibilités de modélisation offertes et ses avantages en termes de diversité d'outils d'analyse et de convivialité graphique. Nous pouvons ainsi vérifier, en comparaison avec les modèles relativement simples, le résultat du comportement des composants du système par simulation.

En résumé, on peut dire qu'avec une installation hybride on peut atteindre :

- 1) Objectif principal: alimenter les charges électriques
  - Sans interruption
  - Avec une bonne qualité de tension
  - Au moindre coût
- 2) Objectif secondaire
  - Maximiser l'utilisation des énergies renouvelables
  - Minimiser la consommation en combustible fossile

Enfin, les résultats d'analyses peuvent être utilisés pour répondre à des questions générales sur les options technologiques pour informer les décisions politiques et décision de planification.

### Perspectives

Pour la continuité de ce travail, il nous vient à l'esprit de définir les axes de recherches qui sont, à notre avis, prometteurs pour le développement de notre travail :

- Il serait possible de réaliser l'optimisation de systèmes plus complexes en ajoutant par exemple une pile à combustible et un électrolyseur pour produire de l'hydrogène directement sur le site. L'intérêt d'un couplage entre différentes sources d'énergies, dans le but de lisser la courbe de production d'énergie et la rendre moins aléatoire.
- Etudier en détail le fonctionnement d'un système hybride avec stockage. En effet, lors du stockage de l'énergie, celle-ci doit passer du point de génération vers le bus AC et traverser le convertisseur bidirectionnel qui relie la batterie au système ; ceci signifie que, dans les systèmes fonctionnant avec une forte capacité de stockage, cette topologie présente des niveaux de pertes supérieurs.
- Entre la simulation numérique et l'implémentation sur une installation réelle, il est intéressant de réaliser une étape intermédiaire, en testant des algorithmes de commande conçus sur un banc d'essai du système.

Concernant la modélisation du système autonome, il serait intéressant à court terme d'introduire des modèles raffinés au niveau modulaire et de réaliser le prototype virtuel du système complet. De façon complémentaire, un autre objectif serait de développer une bibliothèque de modèles en se basant sur des travaux et projets qui traitent essentiellement du domaine de la génération et de la récupération d'énergie. Il est important de noter, l'efficacité d'une approche de modélisation automatique des composants d'un système d'énergie hybride SEH.

# **Références bibliographiques**

**Références Bibliographiques**

- [1] : “Photovoltaic’s systems; a buyer’s guide. Natural resources Canada”, Renewable and electrical energy Division, 580 Booth Street, 17th floor Ottawa, Ont. KIA OE4. ISBN0-662-31120-5 .
- [2]: Mann Mk, “Economics of renewable hydrogen it’s about more than production”. Renewable hydrogen energy forum, Washington.
- [3]: Le Gallou F., B. Bouchon-Meunier (Coordonnateurs) : “Systémique - Théorie et Applications”. Éditions Tec & Doc, Paris, 1994, 341pages.)
- [4]: Vaughn C. Nelson, Ken L. Starcher, Robert E. Foster, R. Nolon Clark, Deon Raubenheimer, “Wind hybrid systems technology characterization”, West Texas AM University – AEI, New Mexico State University – SWTDI, USDA – ARS Bushland, Vista University, May 2002.
- [5]: E. Ian Baring-Gould, L. Flowers, P. Lundsager, “Worldwide status of wind-diesel applications”, Pre-Workshop Wind-Diesel 101, 2004, Anchorage, Alaska.
- [6]: Musseli, M., Notton, G. & Louche, A., “Design of Hybrid-Photovoltaic power generator, with optimization of energy management”, Solar Energy, Vol.65, No.3, 1999, pp. 143-157.
- [7]: Ashok, S., “Optimised model for community-based hybrid energy system”, Renewable Energy Vol.32, No.7, 2007, pp. 1155-1164.
- [8]: J .Labbé, “L’hydrogene electrolytique comme Moyen de Stockage d’electricite Pour Systemes Photovoltaïques Isoles”, Thèse de Doctorat, l’Ecole des Mines de Paris, pp. 5-17-18-21-50-68-69 , 21 décembre 2006.
- [9]: M. Huart, “Guide des énergies renouvelables”, Association pour la Promotion des Energies Renouvelables, Ministère de la Région Wallonne éditeur, 1994.
- [10]: J. Muller, R. Desserrières, “Conversion photovoltaïque”, Publié par: Club CRIN, 2002.
- [11]: C. Alonso, J. Alzeu, C. Andrieu, S. Astier, J. Bonal, A. H. Ben, C. Combes, F. Costa, B. Dakyo, R. Desserrières, J. Fonio, O. Gergaud, C. Glazie, J-C. Muller, B. Multon, C.Nichita, X. Roboam, P. Rossetti, “L’électronique de puissance vecteur d’optimisation pour les énergies renouvelables”, ECRIN, ISBN : 2-912154-08-1, Paris, 2002.

- [12]: F. Benyarou “ Conception assistée par ordinateur des systèmes photovoltaïques modélisation, dimensionnement et simulation ”, Thèse de Doctorat d'état. Université de Tlemcen Juillet 2004.
- [13]: A. ABDELLI, “ Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive”, Thèse de Doctorat, L'institut National Polytechnique De Toulouse, p 9-13,15 octobre 2007.
- [14]: P. Lundsager, H. Bindner, N. Clausen, S. Frandsen, L. H. Hansen, J. C. Hansen, “Isolated systems with wind power”, Risø-R-1256(EN), 2001.
- [15]: P. Bauer, S.W.H. De Haan, C.R. Meyl, JTG. Pierik, "Evaluation of Electrical Systems for offshore Windfarms ", CDROM of the IEEE IAS Conf., oct. 2000.
- [16]: « La première pile à combustible installée en France », Isabelle Duffaure-Gallais, CSTB Magasine, 1999.
- [17]: I. Kamwa, B. Saulier, “Modélisation, simulation et régulation d'un réseau éolien/diesel autonome”, Rapport N°IREQ4340, Varennes, Canada, 1989.
- [18]: Michel Vandenberg, “Systèmes hybrides PV/Diesel pour l'électrification rurale” Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) e. V.Königstor 59 D-34119 Kassel (Germany).
- [19]: I. Cruz, F. Arias, F. Avia, L. M. Arribas, R. P. Fiffe, “Assessment of different energy storage systems for wind energy integration”, European Wind Energy Conference 2001.
- [20]: J. G. McGowan, J.F. Manwell, “Hybrid/PV/Diesel system experiences”, Renewable Energy, 16, 928-933, 1999.
- [21]: F. Valenciaga, P.F. Puleston “Supervisor Control for a Stand-Alone Hybrid Generation System Using Wind and Photovoltaic Energy ” IEEE Transactions on Energy Conversion ,June 2005.
- [22]: K. Agbossou, M. Kolhe, J. Hamelin, T.K. Bose “Performance of a Stand-Alone Renewable Energy System Based on Energy Storage as Hydrogen” IEEE Transactions on Energy Conversion, September 2004
- [23]: D.B. Nelson, M.H. Nehrir, C.Wang “Unit Sizing and Cost Analysis of Stand-Alone Hybrid Wind/PV/Fuel Cell Power Generation Systems” Renewable Energy,August 2005

- [24]: M.J. Khan, M.T. Iqbal “Dynamic Modeling and Simulation of a Small Wind-Fuel Cell Hybrid Energy System” *Renewable Energy*, 30, 2005.
- [25]: T. Senjyu, T. Nakaji, K. Uezato, T. Funabashi “A Hybrid Power System Using Alternative Energy Facilities in Isolated Island” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, June 2005.
- [26]: B. Wichert, “PV-diesel hybrid energy systems for remote area power generation – A review of current practice and future developments”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1997, vol. 1, No. 3, pp. 209–228, Elsevier Science 1997.
- [27]: K. Preiser, L. Anton, G. Bopp, K. V. Dohlen: “Photovoltaic’s, Hydropower and Gas generator” *The Hybrid Energy System in Kaysersberg (France)*, 14th EPVSEC, Barcelona, Spain, 1997, pp. 1106-1109.
- [28]: Werner .Kleinkauf , Günther .Cramer , Mohamed. Ibrahim, l'IEE-EVS ,Institut de technologie des énergies électriques, Université Kassel and SMA Technologie AG.
- [29]: K.Burges et al., “Modular Hybrid Energy Supply System for Industrial Processes and Rural Electrification ”, *Mediterranean Conference on Renewable Energy Sources for Water Production*, Santorini, juin 1996.
- [30]: O.Ulleberg, “ Stand-Alone power systems for the future: Optimal design, operation & control of solar-hydrogen energy systems”, NTNU, Trondheim, Norvège, p 210, 1998.
- [31]: M.Ashari, C. V. Nayar, “An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (PV)-diesel-battery hybrid power system”, *Renewable Energy*, vol. 66, No. 1, pp. 1–9, Elsevier Science 1999.
- [32]:B. Wichert, “PV-diesel hybrid energy systems for remote area power generation – A review of current practice and future developments”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1997, vol. 1, No. 3, pp. 209–228, Elsevier Science 1997.
- [33]: M.Ashari, C. V. Nayar, “An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (PV)-diesel-battery hybrid power system”, *Renewable Energy*, vol. 66, No. 1, pp. 1–9, Elsevier Science 1999.
- [34]: S. Ruin, O. Carlson, “Wind-hybrid systems with variable speed and DC-link” *Wind Power for the 21 Century*, Kassel, Germany, 25-27 September 2000.
- [35]: P. Lundsager, H. Bindner, N. Clausen, S. Frandsen, L. H. Hansen, J. C. Hansen, “Isolated systems with wind power”, *Risø-R-1256(EN)*, 2001.

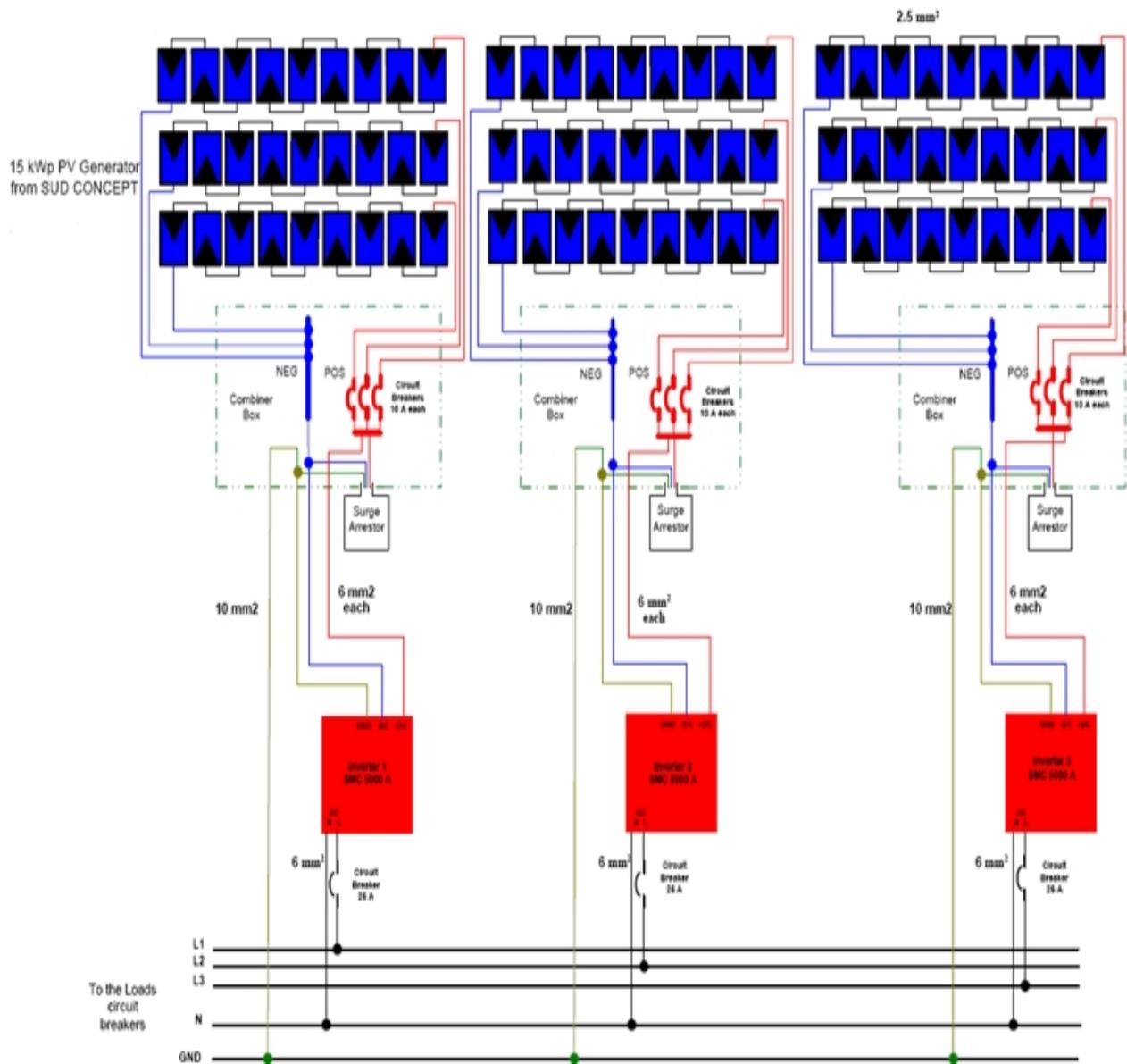
- [36]: A.Engler et al., “Control of Parallel Operating Battery Inverters”, PV Hybrid Power Systems 2000 Conference, Aix-en-Provence, France, septembre 2000.
- [37]: A.Engler et al., “Standard Interface for PV and Hybrid Systems ”, 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelone , Espagne , p.p. 1074- 1077, juillet 1997.
- [38]: S. Roussin, “Le journal semestriel des systèmes photovoltaïques hybrides au Canada” , Centre De La Technologie De L'énergie De Canmet—Varenes Programme Photovoltaïque Et Systèmes Hybrides, P 4 ,Numero 7, Ete 2004 .
- [39]: I. Vechiu, “Modelisation Et Analyse De L'integration Des Energies Renouvelables Dans Un Reseau Autonome ”, Thèse Doctorale à l'Université du Havre ,p 14-15-16-27, décembre 2005 .
- [40]: Jérémy LAGORSE, “ Systèmes électriques hybrides à énergie renouvelable Dimensionnement, modélisation et simulation ”, Journée Technique Energie Problématiques et méthodologies, Université de Technologie de Belfort Montbéliard, p4 ,28/05/2009.
- [41]: H.G. Beyer and C. Langer, “A Method for the Identification of Configurations of PV/Wind Hybrid Systems for the Reliable Supply of Small Loads”, Solar Energy, Vol. 57, pp. 381-391, 1996.
- [42]: B. Fortunato, G. Mummolo and G. Cavallera, "Economic Optimisation of a Wind Power Plant for Isolated Locations", Solar Energy, Vol. 60, N°6, pp. 347-358, 1997.
- [43]: Proven 15 Grid Connect Installation Manual, Proven Energy Ltd the Torus Building, Rankine Avenue Scottish Enterprise Technology Park East Kilbride G75 0QF, Scotland.
- [44]: OPEN-GAIN “Optimal Engineering Design for dependable Water and Power Generation in Remote Areas using Renewable Energies and Intelligent Automation», WP6- Power Supply Subsystem, Contract N° 032535, D6.3 (V 01)Jan 2009.
- [45]: Sami Karaki, AUB, Open Gain Project, 2008
- [46]: Burger B, Cramer G, Kleinkauf W, Zacharias P. Hybrid Systems – Easy in Configuration and Application, 16th EPVSEC, 1 - 5 May 2000, Glasgow, UK )
- [47]: SimPowerSystems 4.0 Reference, "Improving simulation performance: How SimPowerSystems works".

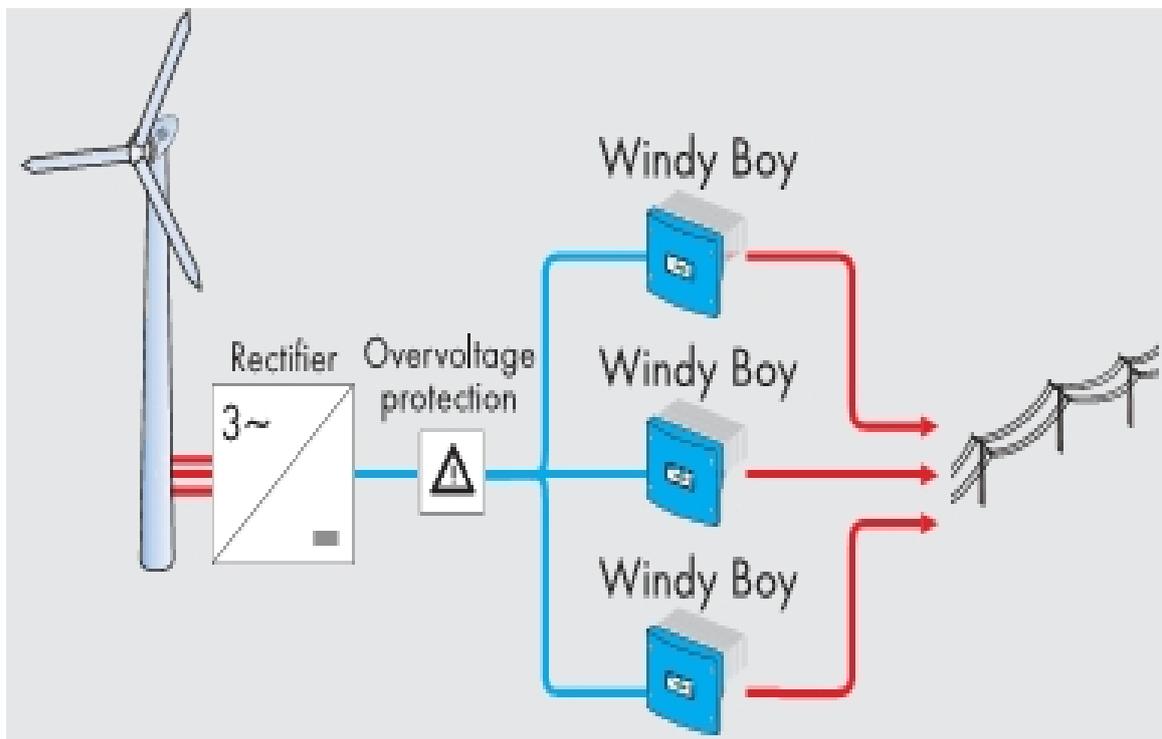
- [48]: O. GERGAUD, “Modélisation énergétique et optimisation économique d’un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », thèse de doctorat, l’ENS de Cachan France, p 6, 2002.
- [49]: Akassewa Tchapo SINGO “Système d’alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l’habitat énergétiquement autonome”, Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, février 2010.
- [50]: Bouna.Ould Zeidane, "Contribution to the study of the grid connected photovoltaic system", mémoire de magistère, université de Batna,2006.
- [51]: L. Zarour,"Optimisation de la performance d’un système de pompage photovoltaïque à l’aide d’un moteur à induction", Université Mentouri de Constantine, Algérie.
- [52]: J.G. Slootweg. Wind Power: “Modelling and Impact on Power System Dynamics”. PhD thesis, Technische Universiteit Delft, Delft, Netherlands, December 2003.

# **Annexes**

## Schémas de connexion des trois générateurs PV avec les trois convertisseurs Sunny Mini Central (SMC6000A)

Mode de raccordement de trois SMC6000A avec les trois générateurs photovoltaïques :



**Schéma de raccordement des trois onduleurs Windy Boy WB6000**

### Calcul de l'expression du coefficient de couple d'une éolienne

La modélisation du rotor éolien exige la connaissance de l'expression  $C_t(\lambda)$  dépendant des caractéristiques géométriques et du profil des pales. Cette expression peut être obtenue à partir de mesures en soufflerie ou par calcul numérique en utilisant la théorie de l'élément de pale [1]. Cette théorie permet de modéliser les forces qui entraînent le mouvement de rotation du rotor éolien. Deux forces sont généralement utilisées pour décrire le comportement aérodynamique d'un profil de pale compris entre les distances  $r$  et  $r+dr$  et situé dans un vent relatif de vitesse  $V_r$  (Figure C-1) : la force de portance  $dF_z$  perpendiculaire à la direction de  $V_r$  et la force de traînée  $dF_x$  parallèle à la direction de  $V_r$ .

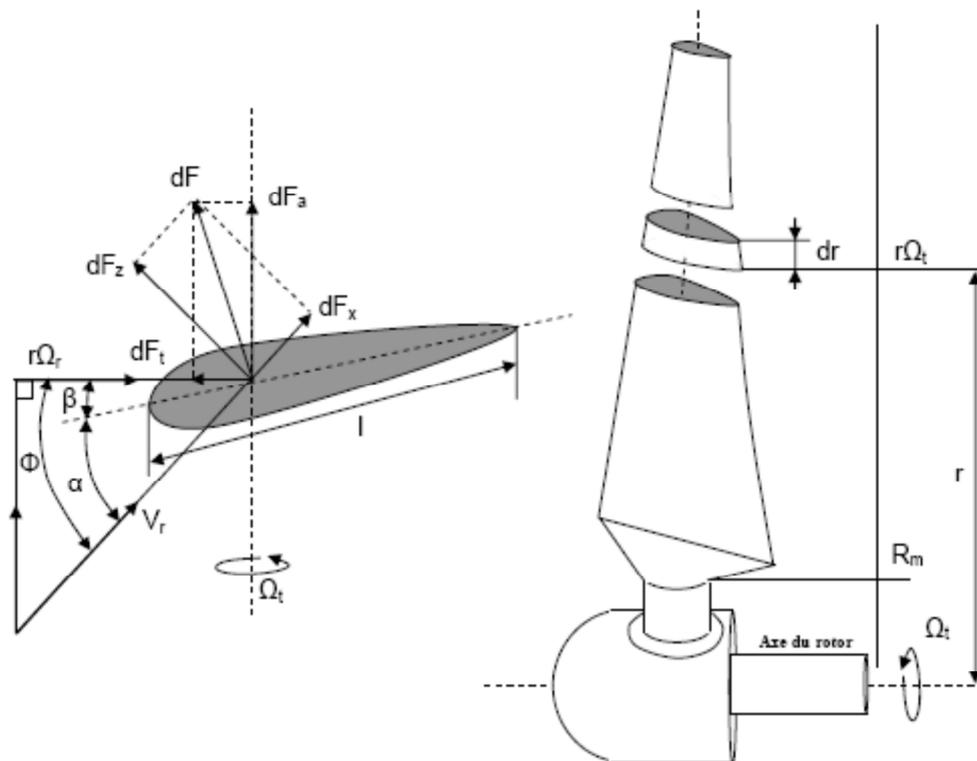


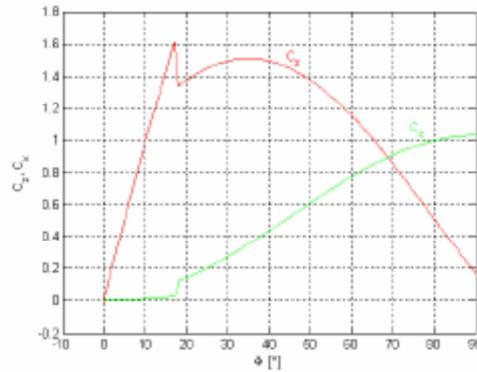
Figure C-1: Aérodynamique de la pale

Les forces de portance et de traînée ont les expressions suivantes :

$$dF_z = \frac{1}{2} \rho C_z V_r^2 l dr \quad \text{Eq. C-1}$$

$$dF_x = \frac{1}{2} \rho C_x V_r^2 l dr \quad \text{Eq. C-2}$$

où  $l$  est la longueur de corde du profil et  $C_z$ ,  $C_x$  sont les coefficients de portance et traînée respectivement. La variation de  $C_z$  et  $C_x$  en fonction de l'angle d'incidence  $\Phi$  pour un profil NACA 2315 est présentée dans la Figure C-2 [4]



**Figure C.2: Variation des coefficients de portance et de traînée pour un profil de pale donné**

La contribution des éléments des pales de l'éolienne situés entre les distances  $r$  et  $r+dr$  peut être évaluée par la poussée axiale et le couple moteur. Leurs expressions sont :

$$dF_a = dF_z \cos(\Phi) + dF_x \sin(\Phi) = \frac{1}{2} \rho V_r^2 l (C_z(\alpha) \cos(\Phi) + C_x(\alpha) \sin(\Phi)) dr \quad \text{Eq. C-3}$$

$$dF_t = dF_z \sin(\Phi) + dF_x \cos(\Phi) = \frac{1}{2} \rho V_r^2 l (C_z(\alpha) \sin(\Phi) + C_x(\alpha) \cos(\Phi)) dr \quad \text{Eq. C-4}$$

La somme des intégrales sur toutes les pales, des composantes horizontales et verticales des forces de portances et de traînée permet le calcul de la force de poussée axiale et du couple aérodynamique :

$$F_a = \sum_{k=1}^{N_p} \int_{R_m}^R dF_a(r) dr \quad \text{Eq. C-5}$$

$$T_t = \sum_{k=1}^{N_p} \int_{R_m}^R r dF_t(r) dr \quad \text{Eq. C-6}$$

où  $N_p$  est le nombre de pales,  $R$  est le rayon du rotor éolien et  $R_m$  est la distance du centre du moyeu au coin de la pale côté moyeu.

Ainsi, en égalant l'expression du couple obtenue à partir du théorème du disque actuateur (Eq.II-3) à l'expression du couple obtenue à partir du théorème de l'élément de pale (Eq. C-6), on retrouve l'expression du coefficient de couple :

$$C_t = \frac{1}{\pi R^3 V_v^2} \sum_{k=1}^{N_p} \int_{R_m}^R r l V_r^2 (C_z(\alpha) \sin(\Phi) + C_x(\alpha) \cos(\Phi)) dr \quad \text{Eq. C-7}$$

La vitesse relative  $V_r$  peut s'exprimer en fonction de la vitesse du vent  $V_v$  et de la vitesse spécifique  $\lambda$  :

$$V_r^2 = V_v^2 + r\Omega_t = V_v^2 \left( 1 + \left( \frac{Rr\Omega_t}{RV_v} \right)^2 \right) = V_v^2 \left( 1 + \left( \frac{r\lambda}{R} \right)^2 \right) \quad \text{Eq. C-8}$$

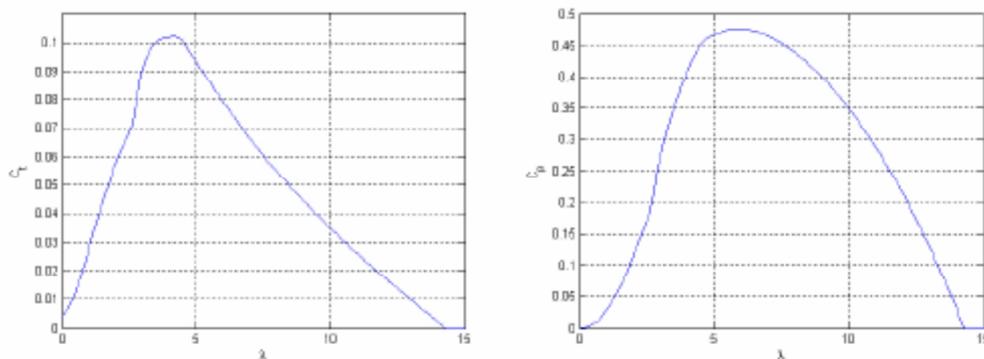
L'angle d'incidence peut également s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique :

$$\cos(\Phi) = \frac{r\Omega_t}{V_v} = \frac{Rr\Omega_t}{V_v R \sqrt{1 + \left( \frac{r\Omega_t}{R} \right)^2}} = \frac{r\lambda}{R \sqrt{1 + \left( \frac{r\Omega_t}{R} \right)^2}} \quad \text{Eq. C-9}$$

$$\sin(\Phi) = \frac{V_v}{V_r} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{r\Omega_t}{R} \right)^2}} \quad \text{Eq. C-10}$$

$$\Phi = \arctg\left(\frac{R}{r\lambda}\right) \quad \text{Eq. C-11}$$

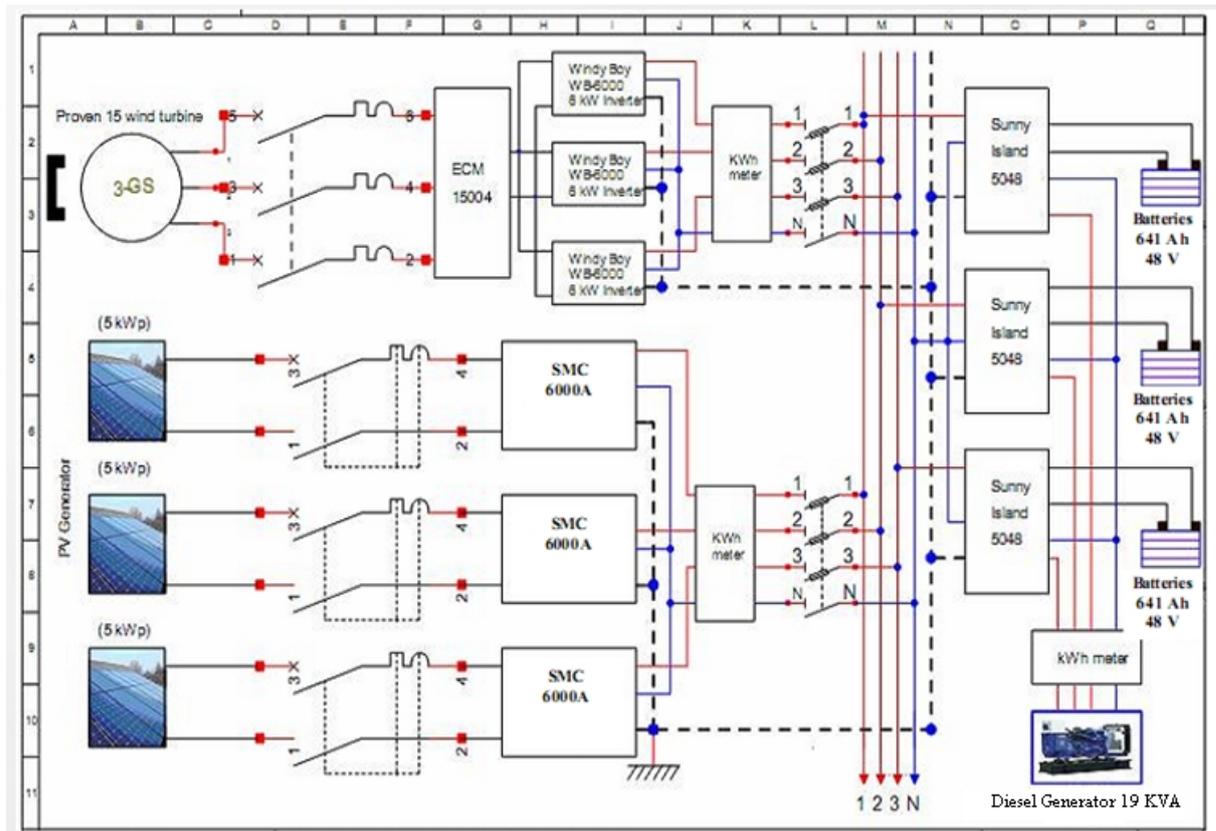
Ainsi, pour des valeurs de  $\lambda$  et  $\beta$  fixées, on peut retrouver les courbes des coefficients de couple et de puissance illustrant les caractéristiques géométriques d'un rotor éolien [4]. Dans la Figure C-3, sont montrées les courbes des coefficients de couple et de puissance pour un rotor à trois pales, à angle de calage fixe et avec un diamètre de 9 m. Le profil de pale a été approché en utilisant les coefficients de portance et de traînée présentés dans la Figure C-2.



**Figure C-3 : Courbes des coefficients de puissance et de couple**

### Schéma électrique général de l'installation

Le schéma électrique général de l'installation est représenté par la figure ci-dessous, il illustre toutes les connexions électriques entre les trois générateurs, le système de stockage et les différents types des convertisseurs.



Les lignes en rouge représentent les trois phases et ceux en bleu représentent le neutre commun (N), la ligne en discontinu est la mise à la terre.

Trois compteurs électriques sont installés à la sortie de chaque générateur pour quantifier l'énergie produite par chacun d'entre eux.

---

**TITRE : Modélisation et Simulation des Performances d'une Installation Hybride de Conversion d'Energies renouvelables****Résumé**

Notre avenir énergétique doit être basé sur des énergies non polluantes ayant des ressources importantes .Les énergies renouvelables sont les meilleurs candidats mais avec une production intermittente.

L'objectif de ce travail est d'évaluer les performances d'un système autonome de production d'énergie électrique, couplant un champ photovoltaïque et une éolienne, un générateur diesel et un système de stockage composé de batteries.

L'emploi de SEH peut conduire à optimiser l'exploitation de la ressource renouvelable. L'interconnexion de plusieurs sources d'énergie renouvelable (des éoliennes, des panneaux photovoltaïques, etc.) dans un Système d'Energie Hybride (SEH) peut avoir une incidence profitable sur la production d'énergie électrique, en termes de coût et de disponibilité.

**Mots clés** : Modélisation, simulation, systèmes hybrides, énergies renouvelables

---

**TITLE: Modeling and simulation of the performances of renewable energy conversion of the hybrid installation****Abstract**

Our energetic future has to be based on no polluting energies with long –term resources. Renewable energies are the best candidate but with intermittent production.

The goal of this work is to evaluate performance of stand –alone power system, producing electricity, coupling a photovoltaic field and a wind turbine, diesel generator and a storage system made of batteries.

Using Hybrid Power System (HPS) can improve the exploitation of the renewable resource. The combination of several energy sources (wind turbines, photovoltaic panels etc.) in a Hybrid Power System can be very attractive for most of the remote areas, in terms of cost and availability.

**Key words:** Modeling and simulation, hybrid systems, Renewable Energy