

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Technologie

Département : Electronique

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et informatique industrielle

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master 2

Thème:

**Modélisation et dimensionnement optimal d'un système  
énergétique hybride**

Présenté par : *Khireddine Chaima*

*Benseghir Boutheina*

Encadrant : *Gherbi Sofiane*

*Professeur*

*UBMA*

**Jury de Soutenance :**

Boulebtateche Brahim	M.C.B	UBMA	Président
Gherbi Sofiane	Professeur	UBMA	Encadrant
Chaker Karima	M.C.B	UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2021/2022

# Remerciement

*Nous remercions en premier lieu ALLAH le  
Tout puissante de m'avoir donné la santé et  
Le pouvoir d'accomplir ce modeste travail.*

*Nous remercions mes parents pour leur patience,  
Leurs encouragements et leur soutien.*

*Mous remercions vont à Pr : **Gherbi Sofiane**  
D'avoir accepté de m'encadrons, de son  
Précieux conseils et de sa disponibilité.*

*Je tien aussi, à remercions les  
Membres du jury de me faire l'honneur de  
Lire et d'évaluer ce travail.*

*Et remerciement à notre collègue  
Chaib Rassou Mohamed Salah*

*Nous remercions vont aussi à tous les  
Enseignants du département électronique ainsi  
Qu'à tous les enseignants qui ont  
Participé à ma carrière.*

# Remerciement

*Nous remercions en premier lieu ALLAH le  
Tout puissante de m'avoir donné la santé et  
Le pouvoir d'accomplir ce modeste travail.*

*Nous remercions tous les Travailleurs  
du station météorologiques en  
Algérie à l'aéroport de Rabah Bitat - Annaba  
Pour les données météorologiques.*

# Remerciement

*Nous remercions en premier lieu ALLAH le  
Tout puissante de m'avoir donné la santé et  
Le pouvoir d'accomplir ce modeste travail.*

*Nous remercions Mr.Khireddine Hamdane  
pour le profil de consommation de  
l'énergie électrique d'usine d'aliments de bétail  
situé dans la wilaya EL-TAREF dans  
la région LAC DES OISEAUX.*

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail*

*À mes très chers parents à qui je dois toutes*

*Mes études, que Dieu me les garde.*

*A mes frères, mes sœurs à qui je souhaite*

*Tout le bonheur.*

*À tous mes proches, oncles et tantes,*

*Et leurs familles (**Khireddine** et **Benseghir**).*

*À tous mes amis. Précisément **Amira Abbaci**, **Nariemen Touati**.*

*Khireddine Chaima*

*Benseghir Boutheina*

## Sommaire

ملخص

Résumé

Abstract

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....1

### Chapitre I : Les systèmes énergétiques hybrides

I.	Introduction.....	2
II.	Généralités sur les systèmes hybrides.....	2
II.1.	Définition d'un système hybride.....	2
II.2.	Principaux éléments d'un système énergétique hybride.....	2
II.2.1	Les générateurs photovoltaïques.....	2
II.2.2	Différents types de cellules photovoltaïques.....	3
II.2.3	Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	3
II.2.4	Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....	5
II.2.5	Les modules photovoltaïques.....	6
II.2.6	Exemple d'un module photovoltaïque standard.....	6
II.2.7	Caractéristiques courant/tension.....	6
II.2.8	Caractéristiques puissance/tension.....	7
II.2.9	Association des convertisseurs de tension.....	7
II.2.10	Les générateurs éoliens.....	8
II.2.11	Principaux composants d'un système éolien.....	8
II.2.12	Batteries (accumulateurs).....	9
II.2.13	Les générateurs diesel.....	10
III.	Gestion de l'énergie produite.....	11
IV.	Conclusion.....	11

### Chapitre II : Dimensionnement des systèmes énergétiques hybrides

I.	Introduction.....	12
II.	Définition du dimensionnement.....	12

III.	Structure du système hybride étudié.....	12
IV.	Objectifs du dimensionnement.....	13
V.	Dimensionnement du système hybride.....	13
	V.1. Dimensionnement du système photovoltaïque.....	13
	V.2. Dimensionnement du générateur éolien.....	14
	V.3. Dimensionnement de la batterie.....	15
VI.	Application par Homer.....	16
VII.	Différentes étapes pour l'utilisation de HOMER.....	17
VIII.	Conclusion.....	23

### **Chapitre III : Méthode de dimensionnement optimal basée sur l'aspect technico-économique**

I.	Introduction.....	24
II.	Position du problème.....	24
III.	Mise en œuvre et Simulation.....	27
IV.	Expression mathématique du problème de dimensionnement optimal.....	28
v.	Résolution du problème d'optimisation.....	28
	V.1. Les différents algorithmes d'optimisation bio-inspirés.....	28
	V.1.1. L'Algorithme d'optimisation d'essaim de particules	
PSO "Particle	Swarm Optimization.....	29
	V.2. $G_{best}$ PSO.....	29
	V.3. $L_{best}$ PSO.....	30
VI.	Solution du problème d'optimisation en utilisant l'algorithme PSO.....	30
VII.	Application pour dimensionner un système hybride pour l'usine.....	31
VIII.	Résultats de la simulation.....	32
IX.	Comparaison des résultats entre HOMER et l'algorithme PSO.....	32
X.	Conclusion.....	33
	Conclusion générale.....	34
	Référence bibliographique.....	35

في السنوات الأخيرة، أصبح العالم أكثر اهتمامًا بمجال الطاقة المتجددة وأفضل طريقة لاستغلالها، بسبب ندرة الوقود الأحفوري. تركز هذه الأطروحة على أنظمة الطاقة الهجينة التي تستخدم بشكل أساسي الطاقات المتجددة (الكهروضوئية وتوربينات الرياح... إلخ)، وكمكمل للوقود الأحفوري (الديزل) ومجموعة من البطاريات. وبشكل أكثر تحديدًا، نحن مهتمون بتصميم مثل هذه الأنظمة من أجل تلبية الطلب على الطاقة بتكلفة أقل. طبقنا طريقتين للحجم، إحداهما باستخدام برنامج Homer، والأخرى طريقة مثالية بناءً على تقليل المعايير الفنية والاقتصادية باستخدام خوارزمية PSO.

مع محاكاة النتائج لتلبية الطلب على الطاقة الكهربائية لمحطة تغذية الماشية تقع في ولاية الطارف في منطقة بحيرة الطيور أظهرت النتائج أنه يمكن الحصول على الطاقة الكهربائية من نظام (الطاقة الشمسية/طاقة الرياح/البطارية/الديزل) بحجم جيد بتكلفة أقل.

### Résumé

Ces dernières années, le monde s'est d'avantage intéressé au domaine des énergies renouvelables et à la meilleure manière de les exploiter, en raison de la rareté des énergies fossiles. Ce mémoire s'intéresse aux systèmes énergétiques hybrides utilisant des énergies renouvelables principalement (photovoltaïque, éoliennes...etc.), et comme appoint des énergies fossiles (diesel) et un parc de batteries. Plus spécifiquement, nous nous intéressons au dimensionnement de tels systèmes pour pouvoir répondre à la demande en énergie à un coût moindre. Nous avons appliqué deux méthodes de dimensionnement, l'une utilisant le logiciel HOMER, et l'autre une méthode optimale basée sur la minimisation de critères technico-économiques en utilisant l'algorithme PSO, avec simulation des résultats pour satisfaire la demande en énergie électrique d'une usine d'alimentation du bétail située dans wilaya d'EL-TAREF dans la région lac des oiseaux. Les résultats ont montré qu'on peut obtenir de l'énergie électrique à partir d'un système PV/Eolien/Batterie/Diesel bien dimensionné, à un coût moindre.

### Abstract

In recent years, the world has become more interested in the field of renewable energy and the best way to exploit it, because of the scarcity of fossil fuels. This thesis focuses on hybrid energy systems using mainly renewable energies (photovoltaic, wind turbines...etc.), and as a supplement, fossil fuels (diesel) with a fleet of batteries. More specifically, we are interested in the design of such systems in order to meet energy demand at a lower cost. We applied two sizing methods, one using the HOMER software, and the other an optimal method based on the minimization of technical-economic criteria using the PSO algorithm, with simulation of the results to satisfy the demand for electrical energy of a livestock feeding plant located in wilaya of EL-TAREF in the Bird Lake region. The results showed that electrical energy can be obtained from a well-sized PV/Eolien/Battery/Diesel system at a lower cost.

### Chapitre I :

<b>Figure I.1</b>	Systèmes énergétiques hybride.....	2
<b>Figure I.2</b>	Modèle d'une cellule photovoltaïque à une diode.....	3
<b>Figure I.3</b>	Modèle d'une cellule photovoltaïque à deux diodes.....	5
<b>Figure I.4</b>	Caractéristique courant/tension d'un module photovoltaïque.....	6
<b>Figure I.5</b>	Caractéristique puissance/tension d'un module photovoltaïque standard.....	7
<b>Figure I.6</b>	Principaux composants d'une éolienne.....	9
<b>Figure I.7</b>	Schéma électrique équivalent d'une cellule d'une batterie plomb-acide.....	10

### Chapitre II :

<b>Figure II.1</b>	Structure du système hybride photovoltaïque-éolienne.....	12
<b>Figure II.2</b>	Interface d'Homer.....	16
<b>Figure II.3</b>	Cordonnées GPS.....	17
<b>Figure II.4</b>	Load.....	17
<b>Figure II.5</b>	Profil de charge (consommation) annuel de l'usine.....	18
<b>Figure II.6</b>	Propriété du photovoltaïque.....	19
<b>Figure II.7</b>	Caractéristique du convertisseur.....	19
<b>Figure II.8</b>	Introduction des caractéristiques du générateur éolien.....	19
<b>Figure II.9</b>	Profil annuel de la température.....	20
<b>Figure II.10</b>	Profil annuel de la vitesse du vent.....	20
<b>Figure II.11</b>	Profil annuel du rayonnement $KWh/m^2 / J$ .....	20
<b>Figure II.12</b>	Caractéristique du type de batteries choisie.....	21
<b>Figure II.13</b>	Caractéristique du générateur Diesel choisi.....	21
<b>Figure II.14</b>	Schéma du système hybride.....	22
<b>Figure II.15</b>	Résultat du dimensionnement par HOMER.....	22
<b>Figure II.16</b>	Coût de la configuration choisie.....	23

### Chapitre III :

<b>Figure III.1</b>	Organigramme du LPSP.....	26
---------------------	---------------------------	----

## Liste des tableaux

---

### Chapitre I :

**Tableau I.1** Caractéristiques d'un module photovoltaïque standard.....6

**Tableau I.2** Caractéristiques des différents types de convertisseurs DC-DC.....8

### Chapitre III :

**Tableau III.1** Données de la consommation d'électricité de l'usine d'aliments du bétail.....31

**Tableau III.2** Caractéristiques techniques des générateurs.....32

**Tableau III.3** Résultat du système hybride.....32

**Tableau III.4** Comparaison des résultats obtenus par HOMER et la méthode d'optimisation par PSO.....33

---

# **Introduction générale**

---

### Introduction générale

Les énergies renouvelables font l'objet d'un intérêt croissant ces dernières années, car les sources énergétiques conventionnelles sont de plus en plus rares, sans parler de la pollution qu'elles engendrent. L'inconvénient majeur des énergies renouvelables est leur inconstance et imprévisibilité, pour cela, les systèmes hybrides de conversion des énergies renouvelables s'avèrent comme une alternative très intéressante, car elles se basent sur l'exploitation d'énergies différentes, ainsi, si l'une d'elles est insuffisante (le cas des systèmes photovoltaïques la nuit), l'autre système pourrait la compenser et vice-versa. Seulement le coût d'une centrale hybride est assez élevée ce qui empêche leur développement, dans ce cadre, bien concevoir ce type de systèmes s'avère une étape très importante avant leur implémentation. Dans ce mémoire, nous présentons deux méthodes de dimensionnement d'un système énergétique multi-sources, l'une basée sur un logiciel commercial « HOMER », et l'autre conçue sous la forme d'un problème d'optimisation en utilisant des critères technico-économiques.

Notre travail est scindé en trois (03) chapitres :

- Dans le **1<sup>er</sup> chapitre** nous donnons une description générale des systèmes énergétiques hybrides, leurs différents composants, leur modélisation mathématique, ainsi que la stratégie de gestion de l'énergie produite.
- Le **2<sup>ème</sup> chapitre** est consacré à l'utilisation du logiciel HOMER pour le dimensionnement d'un système énergétique hybride isolé, pour alimenter en énergie électrique une usine d'aliment de bétail situé dans la wilaya d'El-Tarf.
- Dans le **3<sup>ème</sup> chapitre**, le système traité dans le précédent chapitre est mis sous la forme d'un problème d'optimisation, dont la fonction à minimiser est basée sur des critères technico-économiques, et résolu en utilisant un algorithme d'optimisation bio-inspiré « essaim à particules PSO ».

---

# **Chapitre I : Les systèmes énergétique hybrides**

---

### I. Introduction

Actuellement, on assiste à un développement considérable des systèmes énergétiques basés sur les énergies renouvelables, notamment le photovoltaïque et l'éolien. L'inconvénient majeur de ces systèmes est leurs dépendances aux conditions météorologiques favorables, c'est pour cela qu'ils sont de plus en plus combinés dans un seul système (hybride), l'objectif est de toujours avoir de l'énergie électrique en cas d'insuffisance de l'une des sources (température ou vitesse du vent...etc.). Dans ce chapitre, on va présenter des généralités sur les systèmes énergétiques hybrides, ainsi que leurs différents composants.

### II. Généralités sur les systèmes hybrides

#### II.1. Définition d'un système hybride

Les systèmes énergétiques hybrides utilisent plusieurs sources d'énergies de diverses origines, afin de garantir un approvisionnement continu en énergie électrique. Ainsi, si l'une des sources s'amenuise à causes des conditions météorologiques, une autre source peut pallier à cette défection et ainsi de suite. Plusieurs topologies peuvent être envisagées selon l'endroit (paramètres climatiques du site), le profil de consommation...etc.

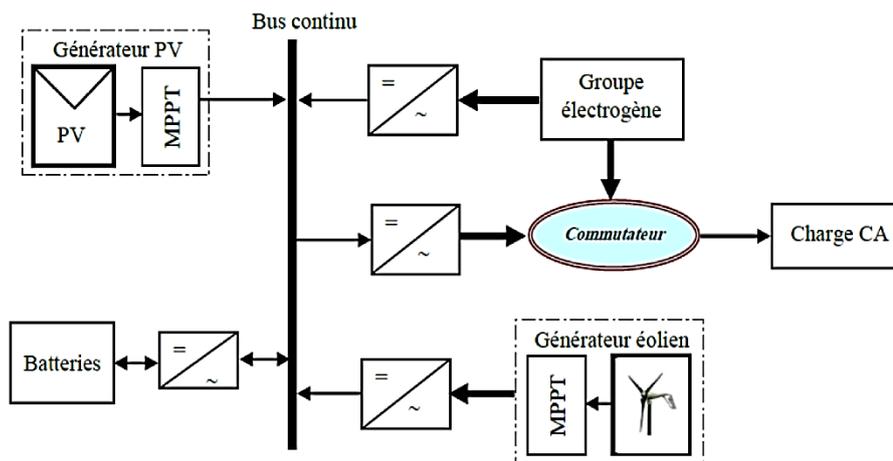


Figure I.1 Systèmes énergétiques hybride [1]

#### II.2. Principaux éléments d'un système énergétique hybride

##### II.2.1 Les générateurs photovoltaïques

Ils sont composés de plusieurs panneaux photovoltaïques, eux-mêmes composés de plusieurs modules, qui sont à leur tour composés de cellules dont le rôle est de convertir le rayonnement solaire en énergie électrique. Ils sont généralement associés à un système de stockage de l'énergie électrique produite (batteries), pour pouvoir l'utiliser la nuit, les jours de faible ensoleillement, ou comme système compensatoire en cas de forte demande de la part des consommateurs.

### II.2.2 Différents types de cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont classées selon le matériau utilisé pour leur conception, les principaux types sont [1] :

#### a) La Cellule Silicium Monocristallin

Souvent utilisée en extérieur pour des applications de forte et moyenne puissance (télécoms, relais, habitat). Elle est caractérisée par une puissance de 5 à 150 Watts avec un rendement électrique de 15 % dans les conditions de tests standards (Éclairement = 1000 W/M<sup>2</sup>, température (25°)). Cependant, leur processus de production est complexe ce qui rend leur coût assez chère.

#### b) La Cellule Silicium Poly-cristallin

Caractérisée par un rendement électrique est de 12 à 14 % dans les conditions de tests standards, une gamme du d'éclairement de 200 à 1000 W/m<sup>2</sup>, avec une puissance identique à celle du silicium cristallin.

#### c) La Cellule Silicium Amorphe

Caractérisée par une puissance des photopiles intérieures de 0 à 1 Watts, avec un rendement électrique entre 5 et 7 % dans les conditions de tests standards. Elle développe une puissance moindre par rapport aux deux autres types de cellules (entre 0,5 à 60 Watts).

### II.2.3 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Il existe deux principaux modèles de cellules photovoltaïques, sous la forme d'un circuit électrique avec une ou deux diodes [2] :

#### A) Circuit à une diode

Le modèle d'une cellule photovoltaïque à une diode est représenté par la figure suivante :

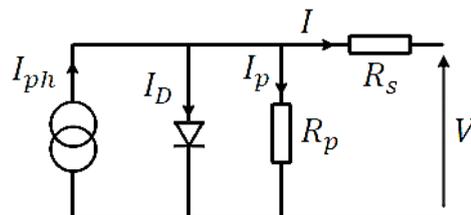


Figure I.2 modèle d'une cellule photovoltaïque à une diode [2]

Avec:  $I$  courant fourni par la cellule,

$V$  la tension aux bornes de la cellule,

$I_D$  le courant de diode,

$I_{ph}$  photo-courant dépendant de l'intensité de l'éclairement),

$I_p$  le courant dans la résistance parallèle,

$R_p$  la résistance en parallèle, représentant l'admittance parallèle du générateur de courant,

D'après la figure précédente, on peut écrire les équations suivantes :

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) \quad (\text{I.1})$$

$$I_{SC} - I_D - \frac{V_D}{R_p} - I_{PV} = 0 \quad (\text{I.2})$$

$$V_{PV \text{ cell}} = V_D - R_S I_{PV} \quad (\text{I.3})$$

$$I_P = \frac{V + I R_S}{R_p} \quad (\text{I.4})$$

$$I_0 = \left[ \frac{I_{SC}}{\exp\left(\frac{V_{OC}}{nV_T}\right) - 1} \right] \quad (\text{I.5})$$

$$I_{SC} = I_{SCR} \left( \frac{G}{1000} \right) \quad (\text{I.6})$$

$$V_T = \frac{KT}{q} \quad (\text{I.7})$$

Avec :  $I_{SC}$  le courant de court-circuit de référence,

$V_{OC}$  la tension de circuit ouvert,

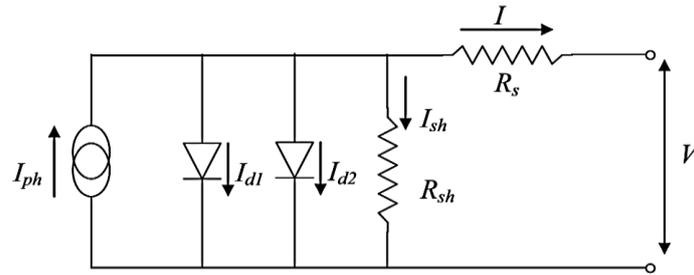
$V_T$  la tension thermique,

$I_{SCR}$  le courant du court-circuit de référence.

Et :  $G$  l'éclairement solaire en  $W/M^2$ ,  $Q$  la charge d'un électron  $1.602 \cdot 10^{-19}$  c,  $K$  la constante de Boltzmann =  $1,381 \cdot 10^{-23}$  J/K,  $n$  facteur de non idéalité de la jonction et  $T$  la température effective de la cellule en Kelvin.

### B) Le Circuit à deux diodes

Le modèle d'une cellule photovoltaïque à deux diodes est représenté par la figure suivante :



**Figure I.3** modèle d'une cellule photovoltaïque à deux diodes

Le courant fournit par la cellule est donnée par la relation suivant :

$$I = \frac{V - R_s I}{R_{SH}} + I_{S1} \left[ \exp \left\{ \frac{q(V - R_s I)}{AKT} \right\} - 1 \right] + I_{S2} \left[ \exp \left\{ \frac{q(V - R_s I)}{2AKT} \right\} - 1 \right] - I_{PH} \quad (I.8)$$

### II.2.4 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Les principaux caractéristiques d'une cellule photovoltaïque sont les suivants [2] :

#### A) Le courant de court-circuit

C'est le courant maximal fourni par la cellule (courant de court-circuit), il dépende de l'intensité de l'éclairement  $G$ , de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement et de la température. On a :

$$I_{cc} (V = 0) = I_{ph} \quad (I.9)$$

#### B) La tension à circuit ouvert

Obtenue quand la cellule est à vide (n'est connectée à aucune charge), elle dépend de la barrière d'énergie, de la résistance shunt, et de la température. On a:

$$V_{CO}(I = 0) = \frac{K.T}{Q} \log \left( \frac{I_{ph}}{I_o} + 1 \right) \quad (I.10)$$

#### C) Le rendement d'une cellule

C'est un indicateur traduit par le rapport entre la puissance maximum délivrée par la cellule ( $P_{max}$ ) et la puissance incidente ( $P_{in}$ ), il est donné par :

$$\mu = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} \quad (\text{I.11})$$

### II.2.5 Les modules photovoltaïques

Un module photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules associées selon deux schémas : en série résultant en une addition des tensions, ou en parallèle correspondant à une addition des courants.

### II.2.6 Exemple d'un module photovoltaïque standard

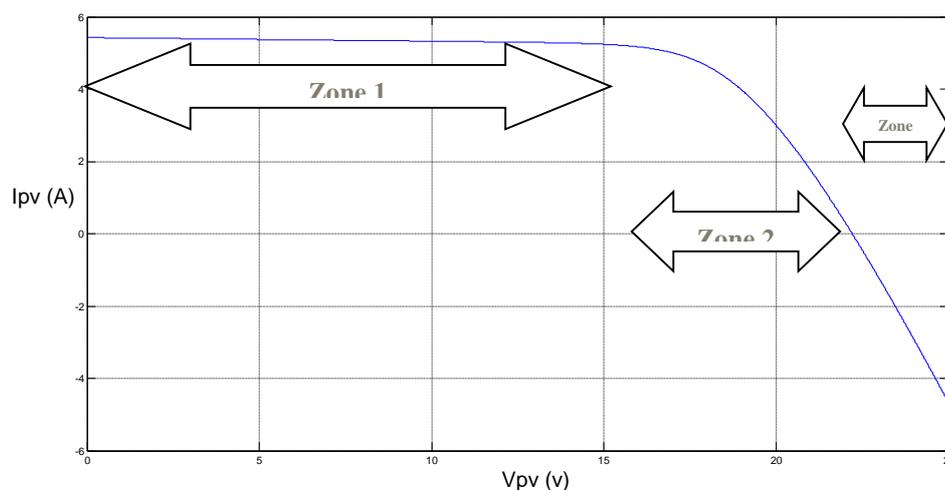
Un module photovoltaïque standard constitué de 36 cellules associées en série, dans des conditions météorologiques standard (Éclairement = 1000 W/M<sup>2</sup>, température 25°), est caractérisé par [2] :

**Tableau I.1** Caractéristiques d'un module photovoltaïque standard

Courant de court-circuit	5.45 (A)
La tension en circuit-ouvert	22.2 (V)
La Puissance Maximale	85 (W)
Le courant en puissance maximale	4.95 (A)
La tension en puissance maximale	17.2 (V)

### II.2.7 Caractéristiques courant/tension

La figure suivante présente la caractéristique courant/tension d'un module photovoltaïque standard [2].



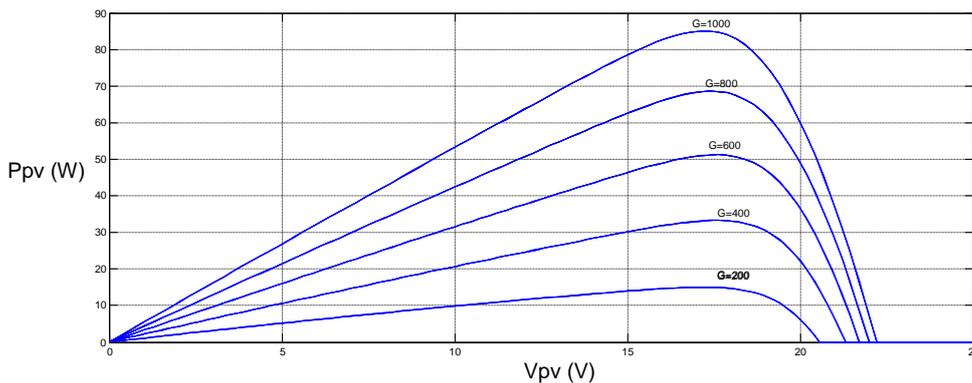
**Figure I.4** Caractéristique courant/tension d'un module photovoltaïque

On peut distinguer trois zones :

- **Zone 1** : Où le courant est constant quelle que soit la tension, le module photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- **Zone 2** : correspondant à un fonctionnement optimal (la puissance maximale peut être atteinte).
- **Zone 3** : Le contraire de la Zone 1, le module photovoltaïque fonctionne comme un générateur de tension.

### II.2.8 Caractéristiques puissance/tension

La caractéristique typique puissance/tension d'un module photovoltaïque standard présent un point de fonctionnement optimal correspondant à la puissance maximale que peut délivrer le panneau dans les conditions météorologique actuelles, en particulier la valeur de l'ensoleillement  $G$ . La figure suivante présente différentes caractéristiques puissance/tension d'un panneau photovoltaïque standard selon la valeur de l'ensoleillement.



**Figure I.5** Caractéristique puissance/tension d'un module photovoltaïque standard

### II.2.9 Association des convertisseurs de tension

Les panneaux photovoltaïques sont généralement associés à des convertisseurs de tension continu-continu DC-DC ou continu-alternatif DC-AC, leurs rôles est d'adapter à chaque instant l'impédance de la charge (consommateur) à l'impédance du panneau photovoltaïque qui correspond au point de puissance maximal [3], ainsi le panneau photovoltaïque fonctionnera le plus souvent possible dans son régime optimal selon les conditions d'éclairement et de température.

Il existe trois principaux types de convertisseurs DC-DC [5, 6] : Buck (abaisseur de tension), Boost (élevateur de tension) et Buck-Boost (adaptateur de tension selon la charge). Leurs caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau 1.2 Caractéristiques des différents types de convertisseurs DC-DC**

<b>Convertisseur</b>	<b>Caractéristiques</b>
<b>Boost</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Élevateur de tension</li><li>▪ Rendement Important</li><li>▪ Prix bas</li></ul>
<b>Buck</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Abaisseur de tension</li><li>▪ Utilisé quand la tension au borne de la charge est plus petite Que la tension du panneau photovoltaïque</li></ul>
<b>Buck-Boost</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Elévateur/Abaisseur de tension</li><li>▪ La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée</li></ul>

### **II.2.10 Les générateurs éoliens**

L'énergie éolienne a été l'une des premières énergies renouvelables à être exploitée par l'homme, en convertissant l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ce type de système s'est énormément développé ces dernières années et il existe aujourd'hui des parcs éoliens de très grande capacité [6]. Bien qu'il existe plusieurs types d'éoliennes, nous nous limiterons dans ce qui suit aux éoliennes à axe horizontal car c'est les plus répandues dans le monde.

### **II.2.11 Principaux composants d'un système éolien**

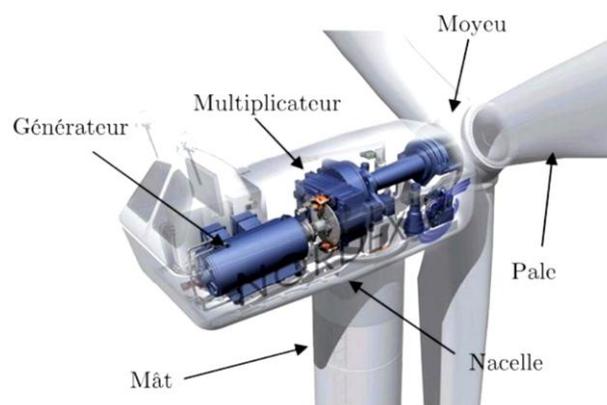
Un générateur éolien appelé "éolienne" est généralement composé des quatre éléments suivants [8] :

#### **A) La turbine**

Représente l'outil principal pour la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Elle est constituée de :

- Le mât : il s'agit d'un tube en acier qui mesure entre 50 et 130 m de haut, avec un diamètre à son pied compris entre 4 et 7 m. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur.

- La nacelle : abrite plusieurs éléments (générateur, arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, système de refroidissement, système de control.). La nacelle s'oriente de manière autonome en fonction de la direction du vent.
- La turbine : Généralement composée de trois pâles qui mesure chacune entre 25 à 60 m de long et peuvent tourner à une vitesse de 5 à 25 tours par minute. C'est la partie rotative de l'éolienne, elle est placée en hauteur afin de capter des vents forts.
- La base : souvent circulaire et en béton armé dans le cas des éoliennes terrestre, qui permet de maintenir la structure globale.
- Le générateur : il convertit l'énergie cinétique en énergie électrique. Les générateurs synchrones à aimants permanents sont généralement utilisés dans les éoliennes de petites puissances ( $< 20 \text{ kW}$ ) vu leur coût réduit ainsi que leur simplicité. Tandis que pour les éoliennes de puissance plus importantes ( $> 2 \text{ MW}$ ), le générateur asynchrone est le plus utilisé.



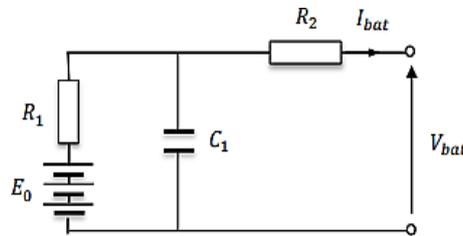
**Figure I.6** Principaux composants d'une éolienne [9]

### II.2.12 Batteries (accumulateurs)

Les batteries ont une double fonction dans un système hybride : emmagasiner le surplus de production et servir de générateurs complémentaires en cas de puissance insuffisante. Une batterie est un ensemble de cellules constitué d'électrodes positives et négatives reliées par un électrolyte. Ces cellules convertissent l'énergie chimique en énergie électrique. Les batteries les plus populaires sont les batteries dites plomb-acide, qui se répartissent en deux catégories : le plomb-calcium et le plomb-antimoine [1].

### ▪ Performances d'une batterie

La performance d'une batterie au Plomb-acide est mesurée par la tension entre ses bornes  $V_{bat}$ , sa capacité  $C_b$  et sa profondeur en décharge maximale (Depth Of Discharge DOD) [1]. La figure suivante présente le schéma électrique équivalent d'une cellule d'une batterie plomb-acide [11] :



**Figure I.7 :** Schéma électrique équivalent d'une cellule d'une batterie plomb-acide [11]

Le courant de cellule  $I_{bat}$  est positif pendant la charge et négatif pendant la décharge,  $R_1$ ,  $R_2$  et  $C_1$  représentent l'impédance interne équivalente d'une cellule « Z ». La tension de la batterie en circuit ouvert  $E_0$  est nulle lorsque la batterie est chargée (DOD = 0), et maximale lorsque la batterie est chargée pleinement (DOD = 1).

### II.2.13 Les générateurs diesel

Les générateurs éoliens et photovoltaïques sont conçus en fonction du profil de la demande en énergie électrique (charge). Si l'énergie fournie n'est pas suffisante (à cause de conditions météorologiques défavorables), des générateurs diesel doivent être utilisés en tant que dernier système d'alimentation de secours pour assurer la continuité du service afin de répondre à tous les besoins.

La puissance générée ( $E_{DG}$ ) par un générateur diesel (DG) est donnée comme suit [10] :

$$E_{DG} = \eta_{DG} t \int P_{DG} \cdot dt \quad (I.12)$$

Où  $P_{DG}$  est la puissance nominale de DG,  $\eta_{DG}$  est le rendement et  $t$  est le temps du travail. Afin de réduire la consommation de carburant, la capacité du générateur doit être sélectionnée en fonction de la charge maximale attendue.

Gestion de l'énergie produite

### III. Gestion de l'énergie produite

La production de l'énergie électrique par les systèmes hybrides est sujette à des fluctuations dues aux conditions climatiques en perpétuel changement. Une stratégie de gestion devient alors obligatoire afin de bien gérer les différents flux énergétiques de façon instantanée ou planifiée (à court et moyen terme) [1]. De plus, une telle stratégie doit prendre en considération les contraintes fonctionnelles et comportementales de la charge (profil temporel), elle doit notamment considérer les points suivants [1, 12] :

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

### IV. Conclusion

Les systèmes énergétiques à base d'énergie fossile sont de moins à moins utilisés à cause de la raréfaction des sources et de la pollution. Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes parties constituant un système hybride : photovoltaïque, éolien, batterie et diesel. Le chapitre suivant sera consacré au dimensionnement de ce type de système.

---

# **Chapitre II : Dimensionnement des systèmes énergétiques hybride**

---

# Chapitre II : Dimensionnement des systèmes énergétiques hybrides

## I. Introduction

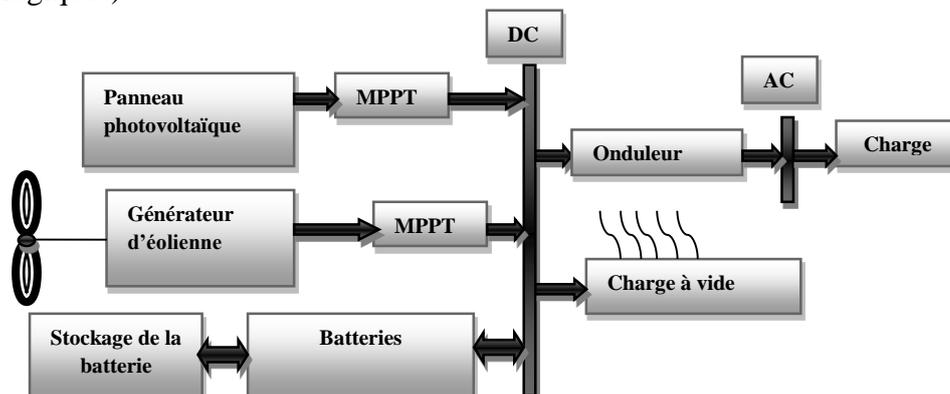
Le dimensionnement d'un système énergétique est une étape très importante avant son implémentation, il permet une exploitation maximale de l'énergie renouvelable avec un minimum de matériels (panneaux photovoltaïques, éoliennes, diesels, batteries), il s'agit donc de réaliser cette procédure convenablement. Il existe plusieurs logiciels commerciaux pour réaliser le dimensionnement des systèmes énergétiques parmi lesquels (Homer, HYBRIDS, SOMES, SOLSIM, RAPSIM...etc.), ces logiciels sont payants, ils nous donnent des informations générales. Pour avoir un dimensionnement spécifique d'un système énergétique pour une application donnée, il vaut mieux concevoir un programme propre qui inclut les données dont on a besoin, de chaque application comme par exemple des données sociales, économiques, coût spécifique, ...etc. Dans ce chapitre on va utiliser logiciel le HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Ressources), c'est un logiciel pour la simulation et l'optimisation des systèmes énergétiques électriques distribuées développé par le National Renewable Energy Laboratory (NREL).

## II. Définition du dimensionnement

Le dimensionnement est l'acte de calculer la taille normale ou optimale de quelque chose. Le dimensionnement logistique s'applique principalement aux sites industriels et aux plateformes logistiques. Il s'agit d'une étude quantitative de flux qui quantifie le besoin d'une opération qui n'existe pas, ou bien de modifier une existante.

## III. Structure du système hybride étudié

Dans ce chapitre, on va utiliser le logiciel HOMER pour dimensionner un système énergétique hybride photovoltaïque-éolienne-batterie. La structure de ce système se compose d'une éolien, d'un photovoltaïque, d'un générateur diesel, d'un ferme de batterie proposé est illustré à la **figure II.1**. Étant donné que la plupart des appareils électriques utilisent une alimentation en courant alternatif (CA), l'onduleur est utilisé avant la charge. Afin d'assurer le fonctionnement normal de l'onduleur, une décharge est utilisée pour consommer la puissance excédentaire générée par le système. On a utilisé l'algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracker) pour le générateur photovoltaïque, ainsi que le générateur éolien afin de les maintenir au point de fonctionnement maximale (extraction de la puissance maximale selon les conditions météorologiques).



**Figure II.1:** Structure du système hybride photovoltaïque-éolienne [13]

# Chapitre II : Dimensionnement des systèmes énergétiques hybrides

---

## IV. Objectifs du dimensionnement

Le dimensionnement d'un système énergétique hybride nous permet de :

- Aider à établir son organisation et à identifier au plus juste : les équipements, les surfaces et les opérateurs.
- Permettre la flexibilité pour le dimensionner en fonction des besoins préalablement définis.
- Déterminer le profil de la charge.
- Calculer le coût de l'énergie d'un système hybride, avec une capacité électrique suffisante pour répondre à la demande en énergie électrique.

## V. Dimensionnement du système hybrides

### V.1. Dimensionnement du système photovoltaïque

Afin de dimensionner le champ de panneaux photovoltaïques, deux équations sont nécessaires :

- Relation entre le gisement de l'énergie solaire et le nombre d'heures équivalent est présentée par l'équation suivante [13] :

$$N_e = \frac{E_{sol}}{G} \quad (II.1)$$

$N_e$  : nombre d'heures équivalent en h/j

$E_{sol}$  : gisement solaire en Wh/(m<sup>2</sup> j)

$G = 1000 \text{ W/m}^2$  : ensoleillement optimum de

- Relation entre la demande énergétique et la puissance crête [13]

$$P_c = \frac{E_{éle}}{N_e} \quad (II.2)$$

$E_{éle}$  : demande énergétique journalière en Wh/j.

$N_e$  : nombre d'heure en h/j.

$P_c$  : puissance crête en W<sub>c</sub>.

En combinant (II.1) et (II.2), on obtient la puissance totale des panneaux PV (puissance crête)

$$P_c = \frac{E_{éle}}{E_{sol}} \cdot 1000 \quad (II.3)$$

## Chapitre II : Dimensionnement des systèmes énergétiques hybrides

---

En ce qui concerne la demande d'énergie, le pire cas, c'est-à-dire la demande maximale, est utilisé. Ensuite, nous pouvons ajouter les pertes (pertes dans le système PV et pertes réflecteur s'il n'est pas déjà pris en compte).

- Puissance crête avec pertes

$$P_{c\ finale} = \frac{P_c}{C_p \cdot C_{cond}} \quad (\text{II.4})$$

$P_{c\ finale}$  : Puissance crête finale en tenant compte des pertes en  $W_c$ .

$P_c$  : Puissance crête avant pertes en  $W_c$ .

$C_p$  : Efficacité de l'onduleur en décimale, il est généralement compris entre 0,65 et 0,9

$C_{cond}$  : Coefficient associé aux pertes de courant de sources variées.

- **Les pertes signalées** : Ils peuvent être résumés par les points suivants [13] :
  - Aux bornes de diodes série (tension).
  - Aux bornes du régulateur série (tension).
  - Aux bornes des câbles (tension), pertes considérées nulles si câblage optimisé.
  - Température élevée, pays chaud seulement et selon le type de technologie (tension).
  - Utilisation d'un régulateur classique (avec MPPT, pas de pertes).
  - Perte de début et fin de journée (tension).
  - Différence entre puissance réelle du panneau et puissance annoncée (parfois nécessaire).

Si les dimensions du système sont correctement spécifiées en termes de tension (unités avec une tension suffisante pour compenser les pertes de tension), les pertes peuvent alors se résumer par l'efficacité de la batterie [13].

Le nombre de panneaux photovoltaïques à utilisés est donné par [15] :

$$N_{pv} = \frac{P_{c\ finale}}{P_{c\ module}} \quad (\text{II.5})$$

Dans le cas d'un nombre de PV non naturel, il peut être arrondi.

### V.2. Dimensionnement du générateur éolien

Un générateur éolien de hauteur  $h$  est caractérisé par une courbe de puissance  $P(v)$ , où  $v$  est la vitesse du vent  $m/s$ . La distribution annuelle de la vitesse du vent est généralement

## Chapitre II : Dimensionnement des systèmes énergétiques hybrides

---

représentée par la fonction de Weibull caractérisée par deux paramètres (valeur moyenne du vent et facteur de forme).

Par conséquent, la production annuelle d'électricité de référence est calculée en supposant que la distribution de la vitesse du vent [13].

$$E_{\acute{e}ol} = C_f \cdot P_{\acute{e}ol} \cdot 24 \quad (\text{II.6})$$

**C<sub>f</sub>**: facteur de charge prévisible.

Le facteur de charge prévu pour la vitesse du vent à 10 m est calculé de 1 à 15 m, c'est-à-dire une courbe écrite dans une équation du 5<sup>ème</sup> degré comme suit [13]:

$$C_f = \sum_{i=0}^n a_i \cdot \lambda^i \quad (\text{II.7})$$

Avec  $i=5$  pour une approche représentative.

Cependant, la production réelle sera plus faible car elle est associée à un ensemble de pertes liées à performances des éoliennes. Après cela, l'énergie renouvelable captée est égale à la quantité de l'énergie produite par le système éolien, corrigée en fonction de la perte d'équipement de répondre à la demande d'énergie  $E_r$ .

$$E_c = E \cdot C_L \quad (\text{II.8})$$

**E** : énergie brute produite.

**C<sub>L</sub>** : coefficient de pertes donné par la relation [13].

$$C_L = (1 - \lambda_a)(1 - \lambda_b)(1 - \lambda_m) \quad (\text{II.9})$$

**Avec :**

**$\lambda_a$** : coefficient de pertes par effet de sillage : **3%**.

**$\lambda_b$** : coefficient des pertes pour causes d'arrêts : **1%**.

**$\lambda_m$** : coefficient représentant les pertes divers : **5%**.

### V.3. Dimensionnement de la batterie

Pour déterminer la quantité de batteries nécessaire, il faut connaître le nombre de jours d'autonomie, et les températures requises pour le site choisi, e, effet, les basses températures sont très nocives pour les batteries. Il faut donc appliquer le facteur de réduction qui tient compte de ce fait. Il faut aussi connaître la profondeur du type de décharge sélectionnée (le minimum en dessous duquel la batterie ne peut pas être déchargée) [15].

## Chapitre II : Dimensionnement des systèmes énergétiques hybrides

La capacité  $C_{batt}$  des accumulateurs est déterminée à partir de la charge requise, elle s'exprime par :

$$C_{batt} = \frac{B_j \cdot J_{aut}}{V_{batt} \cdot DOD \cdot n_{batt}} \quad (II.10)$$

Avec :

$V_{batt}$  : Tension des batteries.

**DOD** : le taux de décharge maximum des batteries.

$J_{aut}$  : nombre de jours d'autonomie.

$C_{batt,u}$  : la capacité unitaire d'une batterie.

- **Le nombre de batteries** : il est donné par [13, 15] :

$$N_{batt} = \frac{C_{batt}}{C_{batt,u}} \quad (II.11)$$

### VI. Application par Homer

HOMER « Hybrid Optimization of Multiple Energy Ressources » est un logiciel d'application pour modéliser et optimiser la valeur des systèmes d'énergie fossile ou renouvelable, inventée en 1993 au National Renewable Energy Laboratory (NREL). Mis en place dans une plateforme online, proposant des simulations technico-économiques précises, il existe de nombreuses versions à l'achat, notamment Homer pro, Homer Grid, Homer Front...etc. De notre part, nous avons utilisé la version d'évaluation : **Homer Pro 3.14.5\_64** [14]. Dès que le téléchargement est terminé et que le programme est ouvert, la fenêtre présentée dans la figure II.2 s'affiche.

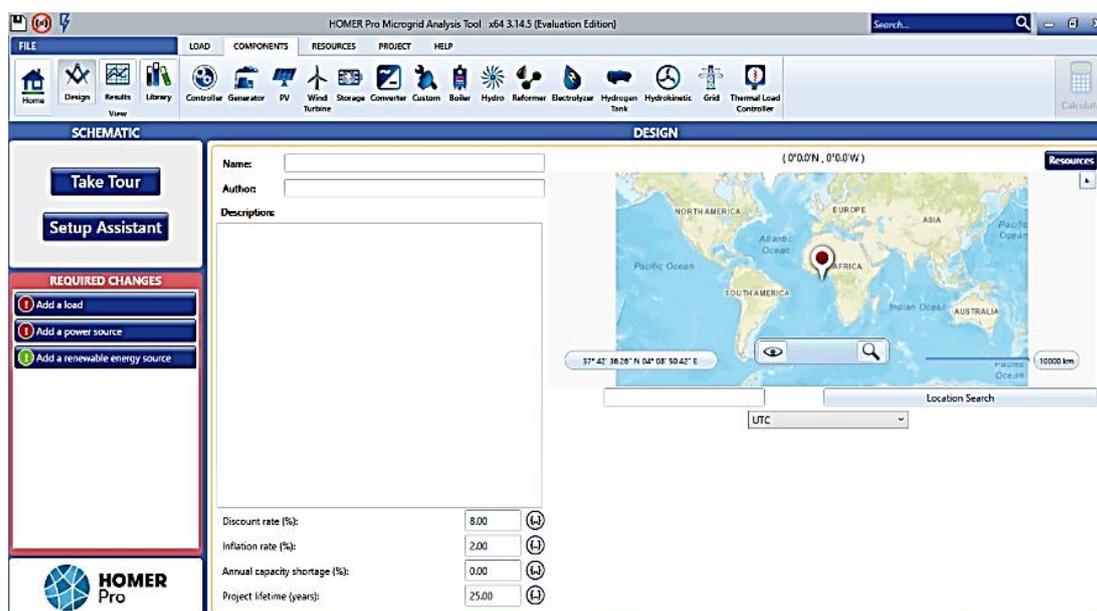


Figure II.2 : interface d'Homer

# Chapitre II : Dimensionnement des systèmes énergétiques hybrides

## VII. Différentes étapes pour l'utilisation de HOMER

- **Etape 1 :**

Elle consiste à déterminer l'endroit où le système doit être appliqué, soit par les coordonnées GPS, soit en spécifiant uniquement le nom de la ville. Le but de cette étape est de faciliter l'obtention des données météorologiques nécessaires au système. Après, nous spécifions le nom du projet, puis le nom du propriétaire du projet. L'objectif et la description du projet peuvent aussi être spécifiés. Nous avons donc introduit l'endroit choisi (LAC des oiseaux, Wilaya d'en-Tarf).

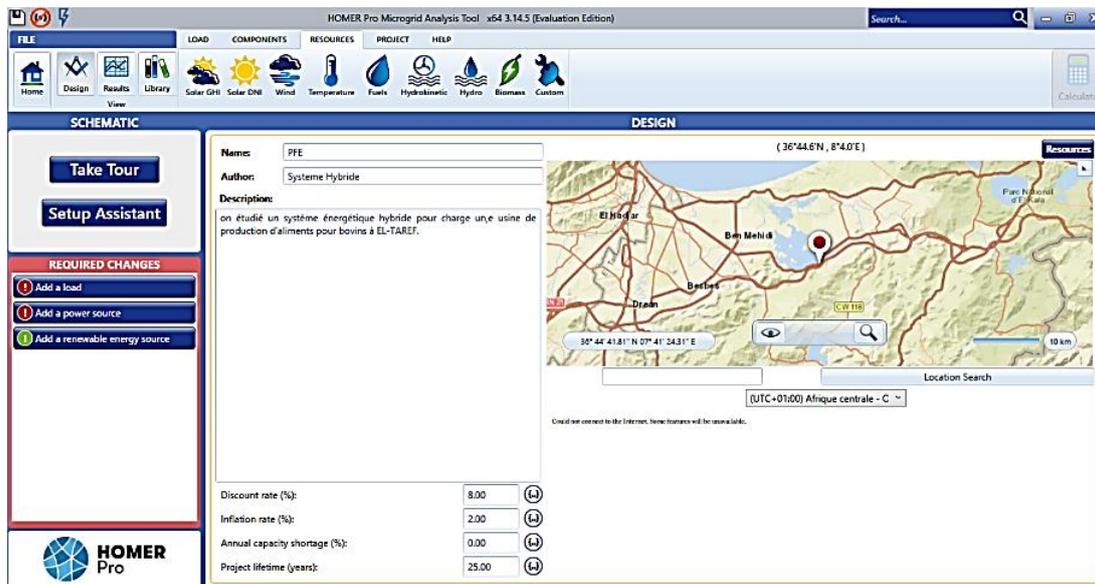


Figure II.3 : Cordonnées GPS

- **Etape 2 :**

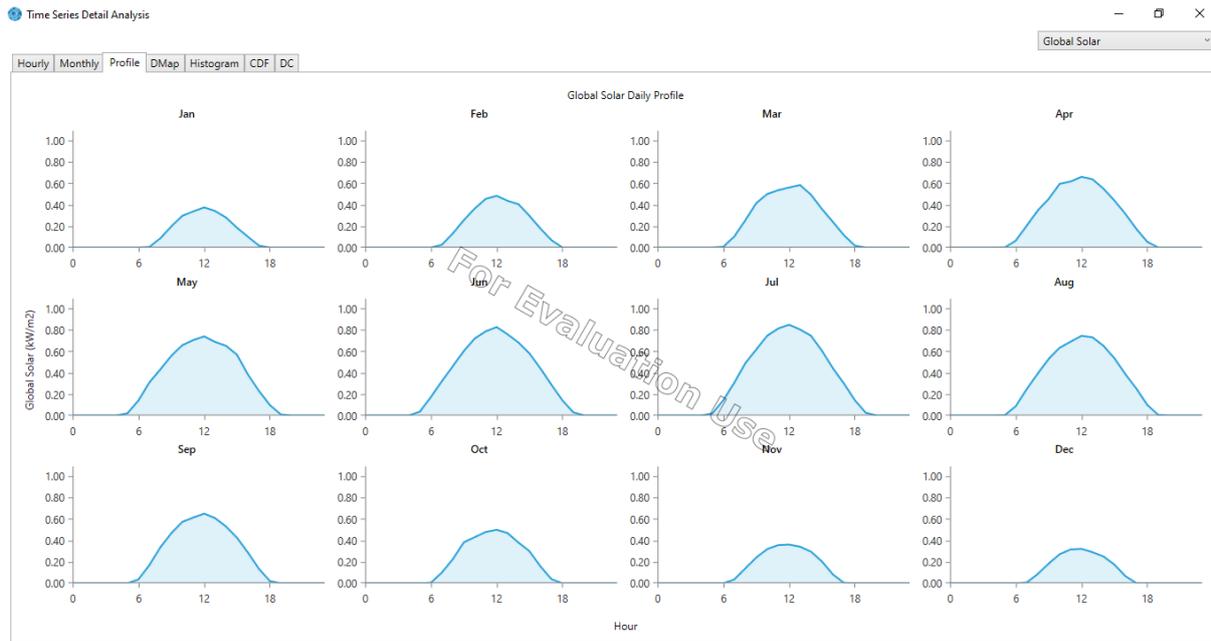
Nous commençons notre projet en introduisant les différentes données à travers l'onglet **load**, nous choisissons **Electric #1**, puis nous introduisons la charge appropriée (demande en énergie de l'usine).



Figure II.4 : Load

Le profil de charge annuelle (établi sur la base de factures SONALGAZ) de l'usine est représenté par les figures suivantes :

## Chapitre II : Dimensionnement des systèmes énergétiques hybrides



**Figure II.5** : Profil de charge (consommation) annuel de l'usine

Ensuite on passe à l'interface des composants « **components** », ont choisi **PV**, de nombreux types apparaîtront qui diffèrent selon le nom et la capacité, ...etc. Le dimensionnement affecte la qualité, le prix et la durabilité du système PV, il dépend de :

- Ensoleillement sur le site durant l'année.
- La puissance dont chaque récepteur a besoin pour fournir de l'énergie.
- Efficacité énergétique de tous les composants, y compris le stockage.

Pour un bon dimensionnement, on doit suivre les étapes :

- Évaluation des besoins énergétiques.
- Estimation de l'ensoleillement.
- Dimensionnement des panneaux photovoltaïques.

Après études, on a choisi le panneau solaire suivant : **CAT 115W**, avec ses spécifications économiques (coût...etc.).

## Chapitre II : Dimensionnement des systèmes énergétiques hybrides

**Add/Remove CAT 115W**

Name: CAT 115W Abbreviation: PVT115

**Properties**  
 Name: CAT 115W  
 Abbreviation: PVT115  
 Panel Type: Flat plate  
 Rated Capacity (kW): 0.115  
 Temperature Coefficient: -0.28  
 Operating Temperature (°C): 45  
 Efficiency (%): 16  
 Manufacturer: Caterpillar Inc.  
[www.cat.com](http://www.cat.com)  
 Notes: CAT Thin Film CdTe PV module. Lower temperature coefficient, superior shading and

**Cost**

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
0.115	28.56	4.76	5.00

Lifetime time (years): 25.00

**Site Specific Input**  
 Derating Factor (%): 85.00

**Sizing**  
 HOMER Optimizer™  
 Search Space  
 Advanced

**Electrical Bus**  
 AC  DC

Advanced...

Figure II.6 : Propriété du photovoltaïque

- **Etape 3 :**

Dans cette étape, on introduit un convertisseur DC/AC pour correspondre au type de courant consommé par l'usine, comme indiqué sur la figure II.7.

**CONVERTER**

System Converter

Name: System Converter Abbreviation: Convert

**Properties**  
 Name: System Converter  
 Abbreviation: Converter  
[www.homerenergy.com](http://www.homerenergy.com)  
 Notes: This is a generic system converter.

**Costs**

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
4	\$300.00	\$300.00	\$0.0

Click here to add new item

**Capacity Optimization**  
 HOMER Optimizer™  
 Search Space  
 Advanced

**Generic**  
[homerenergy.com](http://homerenergy.com)

**Inverter Input**  
 Lifetime (years): 15.00  
 Efficiency (%): 95.00  
 Parallel with AC generator?

**Rectifier Input**  
 Relative Capacity (%): 100.00  
 Efficiency (%): 95.00

Figure II.7 : Caractéristique du convertisseur

- **Etape 4 :**

On reste sur la même interface (**components**) pour choisir un système éolien. On fait les mêmes étapes précédentes, on a plusieurs des types qui diffèrent aussi selon le nom et la capacité, ...etc. On choisit le générateur éolien suivant : **Pika T701 [1.5KW]** qui est utilisé pour des applications de charge modérée (petite usine, maison...etc.).

**Add/Remove Pika T701 [1.5kW]**

WIND TURBINE

Name: Pika T701 [1.5kW] Abbreviation: T701

**Properties**  
 Name: Pika T701 [1.5kW]  
 Abbreviation: T701  
 Rated Capacity (kW): 1.5  
 Manufacturer: Pika Energy

**Costs**

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$3,000.00	\$2,600.00	\$10.00

Click here to add new item

**Site Specific Input**  
 Lifetime (years): 20.00 Hub Height (m): 15.00  
 Consider ambient temperature effects?

**Quantity Optimization**  
 HOMER Optimizer™  
 Search Space  
 Advanced

**Electrical Bus**  
 AC  DC

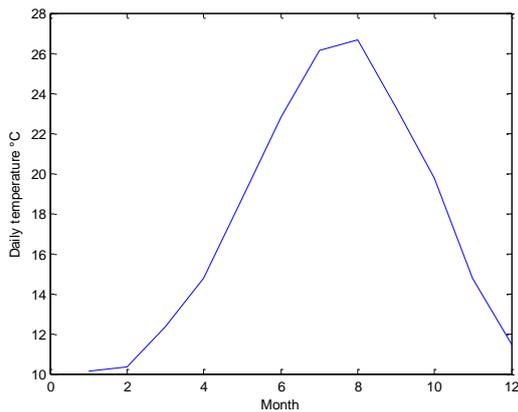
Advanced...

Figure II.8 : Introduction des caractéristiques du générateur éolien

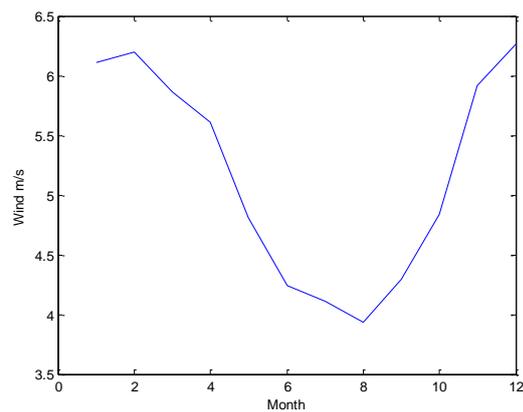
## Chapitre II : Dimensionnement des systèmes énergétiques hybrides

### Etape 5

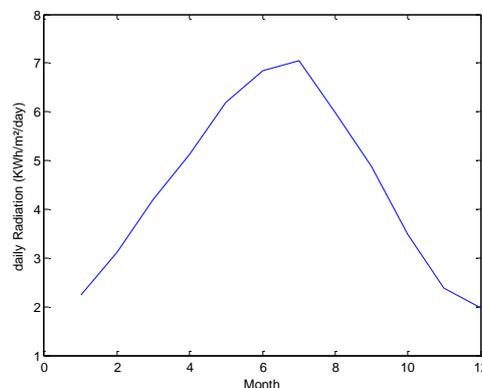
Introduction des données météorologiques nécessaires au fonctionnement du PV et de l'éolienne : température, rayonnement, vitesse du vent). Pour cela, on va dans l'interface des ressources et on clique sur la donnée qu'on veut introduire (par exemple la température), puis sur le téléchargement depuis Internet. Les profils annuels de température, du rayonnement et de la vitesse du vent de la région considérée (El-Tarf) sont représentés par les figures suivantes.



**Figure II.9 :** profil annuel de la température



**Figure II.10 :** profil annuel de la vitesse du vent



**Figure II.11:** profil annuel du rayonnement  $\text{KWh/m}^2/\text{J}$

A noter que les grandeurs météorologiques sont prises par l'Homer à partir du site la NASA

- **Etape 5 :**

La batterie est nécessaire pour stocker l'énergie excédentaire, on va donc revenir sur l'interface (composants), on clique sur stockage, on a plusieurs types de batteries, on choisit le type adapté : **PowerSate SBS XC 190F**.

## Chapitre II : Dimensionnement des systèmes énergétiques hybrides

Add/Remove **EnerSys PowerSafe SBS XC 190F**

**STORAGE**  Name: ys PowerSafe SBS XC 190F Abbreviation: PowerS Remove Copy To Library

**Properties**

**Kinetic Battery Model**

Nominal Voltage (V): 12  
Nominal Capacity (kWh): 2.51  
Maximum Capacity (Ah): 209  
Capacity Ratio: 0.478  
Rate Constant (1/hr): 1.17  
Roundtrip efficiency (%): 97  
Maximum Charge Current (A): 190  
Maximum Discharge Current (A): 713  
Maximum Charge Rate (A/Ah): 1

[www.enersys.com](http://www.enersys.com)

The EnerSys PowerSafe SBS XC range of valve regulated lead acid cells and monoblocs is designed to meet the challenging demands of unreliable grid and renewable energy applications, even in the hottest and harshest operating environments.

**Cost**

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
2	410.00	410.00	0.00

Lifetime

time (years): 12.00   More...

throughput (kWh): 2,589.00

**Site Specific Input**

String Size: 1 Voltage: 12 V

Initial State of Charge (%): 100.00

Minimum State of Charge (%): 30.00

**Sizing**

HOMER Optimizer™  
 Search Space  
 Advanced

Figure II.12 : Caractéristique du type de batteries choisie

- **Etape 6 :**

Enfin, on ajoute un générateur diesel d'appoint de type **Oorja 1.5KW Model T-3**.

Add/Remove **Oorja 1.5kW Model T-3**

**GENERATOR**  Name: Oorja 1.5kW Model T-3 Abbreviation: OorjaT3 Remove Copy To Library

**Properties**

Name: Oorja 1.5kW Model T-3  
Capacity: 1.5 kW  
Fuel: Methanol  
Fuel curve intercept: 0 L/hr  
Fuel curve slope: 0.800 L/hr/kW

**Emissions**

CO (g/L fuel): 0  
Unburned HC (g/L fuel): 0  
Particulates (g/L fuel): 0  
Fuel Sulfur to PM (%): 0  
NOx (g/L fuel): 0

**Generator Cost**

Initial Capital (\$): 1,000.00  
Replacement (\$): 400.00  
O&M (\$/op. hour): 20.000  
Fuel Price (\$/L): 1.00

**Optimization**

Simulate systems with and without this generator  
 Include in all systems

**Electrical Bus**

AC  DC

**Site Specific**

Minimum Load Ratio (%): 50.00   CHP Heat Recovery Ratio (%): 0.00   Lifetime (Hours): 10,000.00

Minimum Runtime (Minutes): 0.00    Initial Hours 0.00

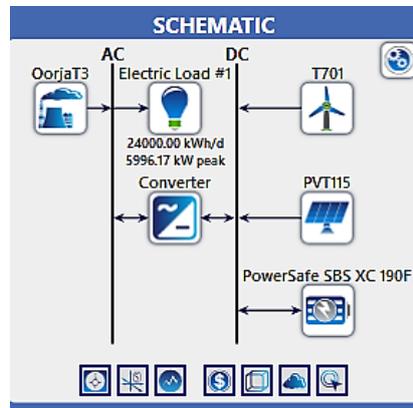
Advanced...

Figure II.13 : Caractéristique du générateur Diesel choisi

## Chapitre II : Dimensionnement des systèmes énergétiques hybrides

- **Etape 7 :**

La configuration du projet de notre système hybride apparaît alors comme dans la figure suivante :



**Figure II.14 :** schéma du système hybride

Maintenant, on clique sur calculatrice pour voir les résultats du dimensionnement.



- **Etape 8 :**

Les résultats du dimensionnement apparaissent sous forme d'un tableau comme suit :

Architecture								Cost				System	
	PVT115 (kW)	T701	OorjaT3 (kW)	PowerSafe SBS XC 190F	Converter (kW)	Dispatch		NPC (\$)	COE (\$)	Operating cost (\$/yr)	Initial capital (\$)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)
	10,130	2,557		22,328	7,141	CC		\$24.9M	\$0.220	\$742,195	\$15.3M	100	0
	10,130	2,557	1.50	22,328	7,141	LF		\$24.9M	\$0.220	\$742,502	\$15.3M	100	14.4
				18,727	6,619	CC		\$32.7M	\$0.288	\$1.57M	\$12.3M	100	0
			1.50	18,727	6,619	LF		\$32.7M	\$0.288	\$1.57M	\$12.3M	100	4.20
		9,205		36,376	6,956	CC		\$44.3M	\$0.392	\$673,701	\$35.6M	100	0
		9,205	1.50	36,376	6,956	LF		\$44.3M	\$0.392	\$673,778	\$35.6M	100	4.20

**Figure II.15 :** Résultat du dimensionnement par HOMER

Dans ce tableau on a 3 colonnes : dans la première on a six (6) types proposés d'architecture du système hybride, avec des configurations utilisant plus au moins un composant parmi : (photovoltaïque/éolienne/diesel/batterie/convertisseur), avec la puissance délivrée par chacune.

## Chapitre II : Dimensionnement des systèmes énergétiques hybrides

Nous avons choisi la configuration qui apparait sur la deuxième ligne qui correspond à : 06 PV, 02 éoliennes, 08 Batteries, 01 générateur diesel, pour les raisons suivantes :

- ✓ Un système hybride avec toutes les sources (PV, éolien, Batterie, Diesel), cela permet une alimentations continus comme nous l'avons mentionné auparavant.
- ✓ Le coût est moindre.

Les prix de chaque composant, ainsi que leurs coûts totaux sont affichés dans la figure suivante.

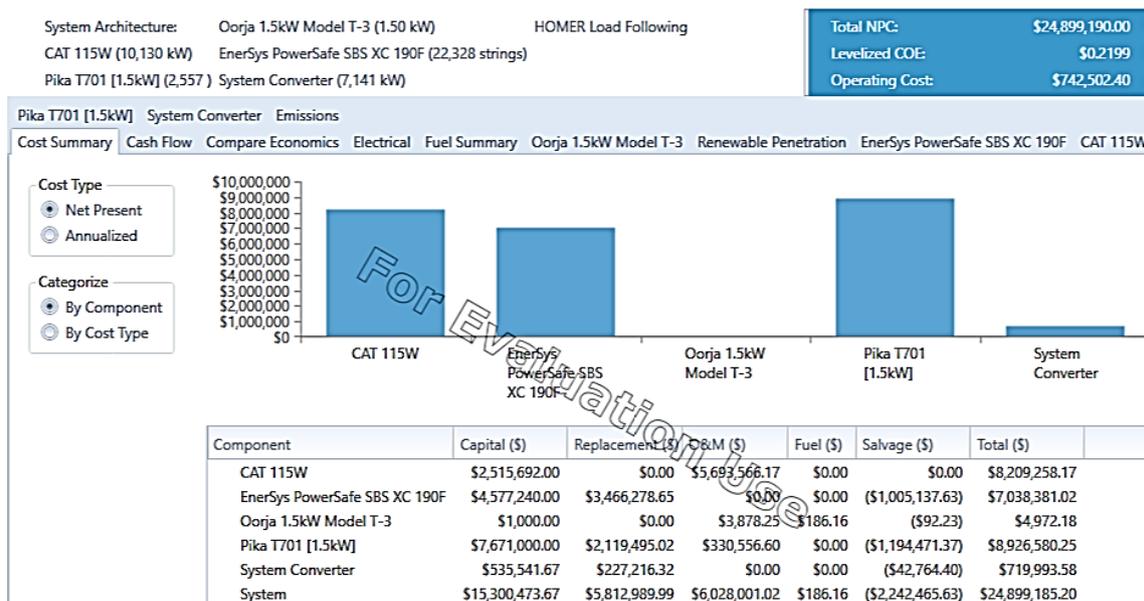


Figure II.16 : Coût de la configuration choisie

En effet :

- ✓ Le prix de l'investissement initial est de : 15.300.473,67 Millions de Dollars.
- ✓ Le prix total (incluant l'investissement initial + les coûts d'entretien et de remplacement sur 25 ans) : 24.899.185,20 Millions de Dollars.

### VIII. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la manière de dimensionner un système hybride isolé avec le logiciel « HOMER », avec application pour concevoir un système hybride qui satisfasse la demande en énergie d'une usine de production d'aliment de bétail situé à EL-TAREF. Les résultats obtenus montrent un coût de l'énergie électrique très abordable.

---

# **Chapitre III : Méthode de dimensionnement basée sûr l'aspect technico-économique**

---

## I. Introduction

Dans le premier chapitre, nous avons présenté un système énergétique multi-source « hybride » photovoltaïque/éolien, accompagné d'un système de stockage (batteries), ainsi qu'un générateur diesel comme source de secours. Dans le second chapitre, ce système a été dimensionné en utilisant un logiciel commercial (HOMER), pour subvenir au besoin d'une usine de production d'aliment de bétail situé dans la wilaya d'El-TAREF.

Dans ce chapitre, nous allons aborder les aspects techniques comme : le type de matériel utilisé, le phénomène de la perte de l'énergie électrique. De plus, nous évoquerons les aspects économiques, tels que le coût du matériel, son amortissement, le coût de l'énergie produite...etc. Pour cela, nous allons exprimer tous ces aspects mathématiquement sous la forme d'un problème d'optimisation, qu'on va résoudre en utilisant un algorithme méta heuristique.

## II. Position du problème

Il s'agit de déterminer le nombre optimal de modules PV, éolienne et batteries, selon deux critères d'optimisation, à savoir :

- La fiabilité : basée sur le concept de probabilité de perte d'énergie « LPSP »
- Le coût du système.

Où « LPSP » exprime le taux du déficit énergétique par rapport à la demande (consommation). Ou en termes d'état de charge des batteries : c'est la probabilité que l'état de charge, à tout moment, soit inférieur ou égal à seuil de puissance minimum disponible dans une batterie  $E_{bmin}$ .

Mathématiquement, le « LPSP » est défini par [13] :

$$LPSP = P_r\{C_b(t) \leq C_{bmin} \text{ pour } t \leq T\} \quad (III.1)$$

Où  $P_r$  c'est la probabilité,  $C_b$  est le cout de la batterie,  $C_{bmin}$  est le cout minimal de la batterie

L'énergie produite conjointement par le générateur éolien, et le générateur photovoltaïque, noté  $E_G(t)$ , peut être exprimé par la relation suivante [13] :

$$E_G(t) = N_{pv}E_{pv} + E_w(t) \quad (III.2)$$

Avec :  $E_w(t)$  qui est l'énergie produite par l'éolienne,  $E_v(t)$  l'énergie produite par le générateur photovoltaïque et  $N_{pv}$  Nombre de modules PV.

Lorsque la puissance demandée par la charge est supérieure à la puissance produite, la batterie se décharge pour combler le vide, dans ce cas précis, l'énergie stockée dans la batterie peut être s'exprimée par la relation suivante [13] :

$$C_b(t) = C_b(t-1) + \left( \frac{E_L(t)}{\eta_{ond}} - E_G(t) \right) \quad (III.3)$$

### Chapitre III : Méthode de dimensionnement optimal basée sur l'aspect technico-économique

---

Avec :  $\eta_{ond}$  rendement le plus élevé de l'onduleur. Efficacité de charge de la batterie,  $C_b(t)$  Énergie stockée dans la batterie à l'instant  $t$ ,  $C_b(t-1)$  Énergie stockée dans la batterie au cours de l'heure précédente,  $E_L(t)$  Énergie requise par la charge à chaque instant  $t$ .

Lorsque l'énergie est stockée dans la batterie qui est produite conjointement par les deux sources sont insuffisantes pour répondre à la demande pendant une heure de temps «  $t$  », et ce déficit est appelé perte de puissance (perte de courant électrique "LPS"), elle s'exprime par [13] :

$$LPS = E_L - (E_G(t) + C_b(t-1) - C_{bmin})\eta_{ond} \quad (III.4)$$

La probabilité de perte de puissance "LPSP" pour la période d'analyse  $T$ , est une somme de toutes les pertes de puissance  $LPS(t)$  pour la même période sous tension totale requise. Le potentiel de perte de puissance "LPSP" est déterminé par la relation prochaine [13] :

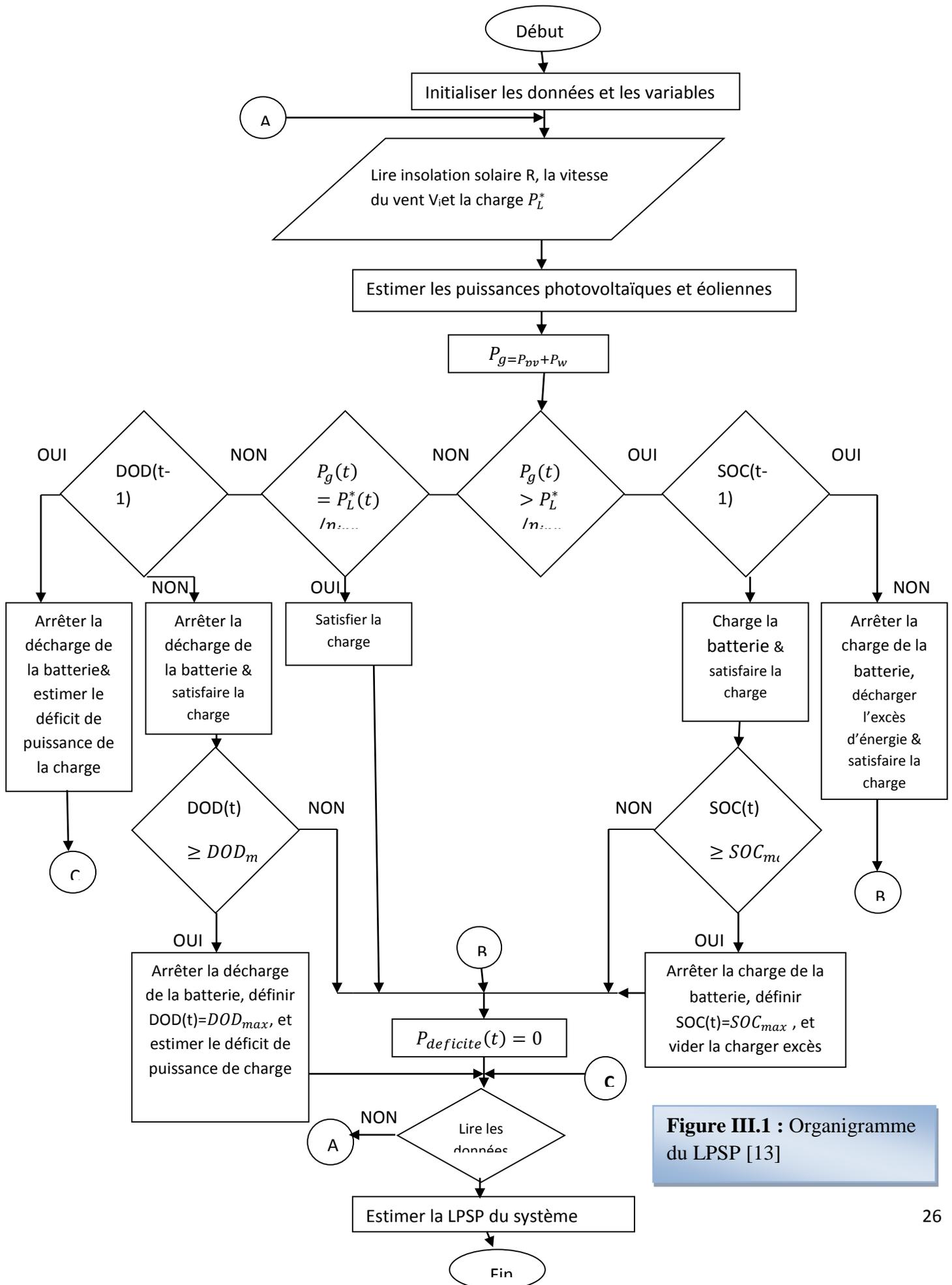
$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T LPS(t)}{\sum_{t=1}^T E_L(t)} \quad (III.5)$$

La méthode de mise à l'échelle consiste à déterminer le nombre optimal d'accessoires correspond au bon fonctionnement du système au moindre coût. Le coût total nécessaire pour réaliser un système hybride est le suivant [13] :

$$C = aN_{pv} + bN_b + C_0 \quad (III.6)$$

Où  $C$  est le coût total du système hybride ; un coût unitaire  $N_{pv}$ ;  $C_b$  Coût de la batterie ;  $C_0$  le coût fixe total y compris les frais de scolarité, l'installation et liquide de refroidissement. La solution optimale de la relation (03.11) est obtenue par la relation suivante [13] :

$$\frac{\partial N_b}{\partial N_{pv}} = -\frac{b}{a} \quad (III.7)$$



**Figure III.1 : Organigramme du LPSP [13]**

### III. Mise en œuvre et Simulation

La puissance totale générée par le générateur photovoltaïque et le générateur éolien pour l'heure  $t$ , notée  $P_g(t)$ , peut être exprimée comme suit [13] :

$$P_g(t) = P_{PV}(t) + P_w(t) \quad (III.8)$$

Sachant que la puissance totale générée  $P_g(t)$  et le SOC( $t$ ) de la batterie par heure «  $t$  », peuvent être suffisantes ou non en fonction de la demande de charge, nous avons donc réparti les possibilités possibles pour le système hybride PV/E comme suit [13] :

- Si  $\left[ P_g(t) > \frac{P_L^*(t)}{\eta_{inv}} \right]$  et  $[SOC(t-1) < SOC_{max}]$  donc satisfaire alors la charge et charger la batterie avec le surplus de puissance  $[P_B(t) = (P_g(t) - \frac{P_L^*(t)}{\eta_{inv}}) \eta_b]$ , .]. Ensuite, vérifiez si  $[SOC(t) \geq SOC_{max}]$ , puis arrêter la charge de la batterie, régler  $[SOC(t) = SOC_{max}]$  et décharger le surplus de puissance  $P_{Dump}(t) = P_g(t) - \left[ \frac{P_L^*(t)}{\eta_{inv}} + \frac{1000 \times C_b}{\Delta t \times \eta_b} \times (SOC_{max} - SOC(t-1)) \right]$ .
- Si  $\left[ P_g(t) > \frac{P_L^*(t)}{\eta_{inv}} \right]$  et  $[SOC(t-1) \geq SOC_{max}]$  donc arrêter de charger la batterie, satisfaire la charge et décharger le surplus de puissance  $P_{Dump}(t) = P_g(t) - \frac{P_L^*(t)}{\eta_{inv}}$ .
- Si  $\left[ P_g(t) = \frac{P_L^*(t)}{\eta_{inv}} \right]$  donc satisfaire alors uniquement la charge.
- Si  $\left[ P_g(t) < \frac{P_L^*(t)}{\eta_{inv}} \right]$  et  $[DOD(t-1) < DOD_{max}]$  donc satisfaire alors la charge en déchargeant la batterie pour couvrir le déficit de puissance de la charge  $[P_B(t) = \left( \frac{P_L^*(t)}{\eta_{inv}} \right) - P_g(t)]$ . Ensuite, vérifier si  $[DOD(t) \geq DOD_{max}]$  alors arrêter la décharge de la batterie, puis régler  $[DOD(t) = DOD_{max}]$  et calculer le déficit de puissance de charge  $\left[ P_{deficit}(t) = P_L^*(t) - \left[ P_g(t) + \frac{1000 \times C_b}{\Delta t} \times (SOC(t-1) - (1 - DOD_{max})) \right] \eta_{inv} \right]$ .
- Si  $\left[ P_g(t) < \frac{P_L^*(t)}{\eta_{inv}} \right]$  et  $[DOD(t-1) \geq DOD_{max}]$  donc arrêter alors la décharge de la batterie et calculer le déficit de puissance de charge  $[P_{deficit}(t) = P_L^*(t) - P_g(t) \times \eta_{inv}]$ .

Pour connaître la valeur de la force produite, et en supposant que notre temps de simulation  $\Delta t = 1$ , et que la PV et l'énergie éolienne soient constantes, la force est égale à la valeur de l'énergie dans  $\Delta t$ .

Ainsi, la contrainte LPSP dans l'équation (III.5) est une équation non linéaire pour les constantes  $A_{PV}$ ,  $A_w$ ,  $C_b$ , donc elle peut s'écrire comme suit [13] :

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T P_{deficit}(t) \times \Delta t}{\sum_{t=1}^T P_L^*(t) \times \Delta t} \quad (III.9)$$

En supposant que notre temps de fonctionnement  $T=8639$ , nous avons programmé un système qui calcule la valeur LPSP pour le système hybride PV et éolien dans le code Matlab. L'organigramme du programme est présenté à la **figure (III.1)**.

Pour cette procédure de vitesse, nous incluons l'insolation globale moyenne horaire  $R$ , l'horaire moyenne du vent  $V_i^*$  et la puissance de charge requise  $P_L^*$  sur l'année. Notons que pour chaque configuration du système hybride PV-éolien proposé, le programme simule le système et calcule le LPSP correspondant.

Trois contraintes supplémentaires doivent être imposées sur la taille des composants du système, à savoir [13] :

$$0 \leq A_{PV} \leq A_{PV \max} \quad (III.10)$$

$$0 \leq A_w \leq A_w \max \quad (III.11)$$

$$0 \leq C_b \leq C_b \max \quad (III.12)$$

#### IV. Expression mathématique du problème de dimensionnement optimal

Enfin, on peut écrire la forme finale du problème d'optimisation comme suit [13] :

- Minimisation de la fonction de coût  $C_T$  :

$$(c_1 + c_2 - c_3).A_{PV} + (c_4 + c_5 - c_6).A_w + (c_7 + c_8).C_b \quad (III.13)$$

Sujet à :

$$\begin{cases} LPSP \leq LPSP^* \\ 0 \leq A_{PV} \leq A_{PV \max} \\ 0 \leq A_w \leq A_w \max \\ 0 \leq C_b \leq C_b \max \end{cases}$$

#### V. Résolution du problème d'optimisation

##### V.1. Les différents algorithmes d'optimisation bio-inspirés

Ces dernières années apparaissent de nombreux algorithmes d'optimisation inspirés de la nature comme les algorithmes génétiques GA [16], l'algorithme d'optimisation des colonies de fourmis (ACO) [17]...etc. De notre part nous allons utiliser l'algorithme d'optimisation inspiré du vol d'un essaim d'oiseaux « Particle Swarm Optimisation » PSO [18].

### V.1.1. L'Algorithme d'optimisation d'essaim de particules PSO "Particle Swarm Optimization"

L'algorithme d'optimisation par essaims particulierités "Particle Swarm Optimization" (PSO), « proposée par Russel Eberhart et James Kennedy en 1995 aux Etats-Unis ». Il s'inspire du comportement social des animaux, notamment ceux qui travaillent en groupe. Il s'agit d'une technique multi-agent qui se caractérise par sa flexibilité et sa facilité de mise en œuvre, et elle est également considérée comme la plus largement utilisée. Le principe est le suivant : toutes les particules traversent un espace de recherche multidimensionnelle, ils ajustent leur position en fonction de leur propre expérience, ses voisins. Hypothèse signifie que la particule est espacée de recherche multidimensionnel (c'est-à-dire  $\mathbb{R}^n$ ) au pas de temps  $t$ , chaque position les particules sont mises à jour dans l'espace de recherche comme [18, 19] :

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad \text{avec} \quad x_i^0 \sim U(x_{\min}, x_{\max}) \quad (\text{III.14})$$

$v_i^t$  : est le vecteur de vitesse des particules qui entraîne le processus d'optimisation, il reflète à la fois la connaissance de l'expérience propre et la connaissance de l'expérience sociale des toutes les particules.

$U(x_{\min}, x_{\max})$ : est la distribution uniforme où  $x_{\min}$  et  $x_{\max}$  sont les valeurs minimales et maximales respectivement.

PSO contient deux principaux types d'algorithmes :  $G_{\text{best}}$  et  $L_{\text{best}}$ , le meilleur global (Global best) et meilleur Local (local best). La différence entre eux réside dans la taille de leurs voisinages [18, 19].

### V.2. $G_{\text{best}}$ PSO

Le meilleur global PSO (ou  $G_{\text{best}}$  PSO) est une méthode où la position de chaque particule influencée par les particules les plus capables de toute la population, il utilise une topologie de réseau en étoile où les informations sociales sont obtenues de tous particules dans l'ensemble de la population. Dans cette méthode, chaque particule individuelle,  $i \in [1, \dots, n]$  ou  $n > 1$ , à la position actuelle  $X_i$ , vitesse actuelle  $V_i$ , et meilleur emplacement positions dans l'espace de recherche  $P_{\text{best},i}$ . La meilleur position personnel  $P_{\text{best},i}$  correspond à la position où la particule  $i$  a une valeur minimale déterminée par la fonction objectif  $f$ . De plus, la position qui donne la valeur minimale parmi toutes les particules  $P_{\text{best},i}$  est appelée la meilleure position globale, notée  $G_{\text{best}}$  [18]. Les équations ((III.15) et (III.16)) suivantes définissent, étant donné un problème de minimisation, comment mettre à jour les optima personnels et globaux respectivement, la meilleur position personnel  $P_{\text{best},i}$  a l'instant  $t + 1$ , où  $t \in [0, \dots, N]$  est calculée par [18] :

$$P_{\text{best},i}^{t+1} = \begin{cases} P_{\text{best},i}^t & \text{Si } f(x_i^{t+1}) > P_{\text{best},i}^t \\ x_i^{t+1} & \text{Si } f(x_i^{t+1}) \leq P_{\text{best},i}^t \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

Où  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  est la fonction d'aptitude. La meilleure position globale (meilleure à l'instant  $t$ ) est calculée comme suit :

$$G_{best} = \min\{P_{best,i}^t\}, \quad \text{Où } i \in [1, \dots, n] \text{ et } n > 1 \quad (\text{III.16})$$

$P_{best,i}$  Ce serait donc le meilleur endroit qu'un individu n'ait jamais visité depuis le début. D'autre part, la meilleure position globale est la meilleure position  $G_{best}$  trouvée par l'une des particules toute la population. La vitesse de la particule est calculée par [18]:

$$V_{ij}^{t+1} = V_{ij}^t + c_1 r_{1j}^t (P_{best,i}^t - X_{ij}^t) + c_2 r_{2j}^t (G_{best} - X_{ij}^t) \quad (\text{III.17})$$

**Avec :**

$V_{ij}^t$ : Est le vecteur vitesse de la particule  $i$  dans la dimension  $j$  à l'instant  $t$ .

$X_{ij}^t$ : Est le vecteur position de la particule  $i$  dans la dimension  $j$  à l'instant  $t$ .

$P_{best,i}$ : Est la meilleure position personnelle de la particule  $i$  dans la dimension  $j$  à l'instant  $t$ .

$G_{best}$ : Est la meilleure position globale de la particule  $i$  dans la dimension  $j$  à l'instant  $t$ .

$c_1$  et  $c_2$  : sont des constantes d'accélération positives qui servent à niveler la contribution des composantes cognitives et sociales, respectivement.

$r_{1j}^t$  et  $r_{2j}^t$ : Sont des nombres aléatoires d'après la distribution uniforme  $U(0, 1)$  à l'instant  $t$ .

### V.3. $L_{best}$ PSO

La méthode de la meilleure local ( $L_{best}$  PSO), vise à ce que chaque particule dans son voisinage soit affectée par la particule qui a le meilleur degré d'efficacité. Connaître la topologie du réseau en anneau.

Dans ce cas, nous échangeons des informations sociales près de la particule, en représentant la connaissance locale de l'environnement. On peut calculer la vitesse de la particule par la loi [19] :

$$V_{ij}^{t+1} = V_{ij}^t + c_1 r_{1j}^t (P_{best,i}^t - X_{ij}^t) + c_2 r_{2j}^t (L_{best,i} - X_{ij}^t) \quad (\text{III.18})$$

Où  $L_{best,i}$  est la meilleure position que toutes les particules ont eu dans le voisinage de la particule  $i$  à l'instant  $t$ .

## VI. Solution du problème d'optimisation en utilisant l'algorithme PSO

Les étapes pour résoudre le problème d'optimisation par l'algorithme PSO sont les suivantes :

- **Étape 1** : Sélectionner le nombre de particules, les générations, les coefficients d'accélération de réglage et les nombres aléatoires pour démarrer la recherche.
- **Étape 2** : Initialiser la position et la vitesse de la particule.

- **Étape 3** : Sélectionner la meilleure valeur individuelle pour chaque génération.
- **Étape 4** : Choisir la particule ayant la meilleure valeur globale : la particule la plus proche de la cible parmi toutes les particules est obtenue en comparant toutes les meilleures valeurs individuelles.
- **Étape 5** : Mettre à jour la meilleure position individuelle  $P_{best}$  et la meilleure position globale  $G_{best}$  par l'équation (III.17) et obtenir la nouvelle vitesse optimale.
- **Étape 6** : Mettre à jour la nouvelle valeur de vitesse par l'équation (III.14) et obtenir la position de la particule.
- **Étape 7** : Déterminer si le nombre maximum d'itérations est atteint. Si oui, mettre fin à l'algorithme ; sinon, revenir à l'étape 2.

Avant de commencer la mise en œuvre de PSO, il faut initialiser la valeur de certains paramètres car ils déterminent en grande partie la capacité de minimisation globale : « **La vitesse maximale** influe sur la capacité à échapper à l'optimisation locale et à affiner l'optimisation globale. **La taille de l'essaim** équilibre l'exigence d'optimisation globale et le coût de calcul ».

Pour résoudre le problème d'optimisation, nous avons créé deux fichiers MATLAB : l'un pour définir la fonction cout à minimiser ainsi que les contraintes à respecter, l'autre pour résoudre le problème d'optimisation (trouver les paramètres optimaux : Nombre de PV, Nombre d'éoliennes, Nombre de batteries, Nombre de générateurs diesel).

## VII. Application pour dimensionner un système hybride pour l'usine

Pour démontrer l'efficacité de la méthode proposée, nous simulons une solution globale d'approvisionnement en énergie d'une usine d'aliment de bétail situé dans la wilaya d'El-TAREF (Nord-est algérien, coordonnées géographiques :  $36^{\circ}44'14.08''$  N  $08^{\circ}04'08.81''$  E), basée sur un système énergétique hybride autonome photovoltaïque-éolienne-batterie-diesel.

Le profil annuel (année 2021) de la consommation de l'énergie électrique (tiré à partir des factures) de cette usine est présenté dans le tableau III.1.

**Tableau III.1** : Données de la consommation d'électricité de l'usine d'aliments du bétail

Période	Consommation d'électricité	Demande de charge moyenne
1 <sup>st</sup> Janvier – 31 <sup>th</sup> Mars	1990 kWh	22.1111 kW/Jour
1 <sup>st</sup> Avril – 30 <sup>th</sup> Juin	2756 kWh	30.6222 kW/Jour
1 <sup>st</sup> Juillet – 30 <sup>th</sup> Septembre	1747 kWh	19.4111 kW/Jour
1 <sup>st</sup> Octobre – 31 <sup>th</sup> Décembre	2398 kWh	26.6444 kW/Jour

Les caractéristiques techniques des générateurs utilisés sont résumées par le tableau suivant

**Tableau III.2 :** Caractéristiques techniques des générateurs

La source	Type et spécifications	Nombre d'unités
Photovoltaïque	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Name</b> : CAT 115W</li> <li>• <b>Puissance</b> : 0.115KW</li> <li>• <b>Efficacité</b> : 16%</li> <li>• <b>Durée du composant (année)</b> : 25 ans</li> <li>• <b>Le prix</b> : 28.56 \$ = 5712 DZ</li> <li>• <b>Remplacement</b> : 4.76 \$ = 952 DZ</li> </ul>	5
Éolienne	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Name</b> : Pika T701 [1.5KW]</li> <li>• <b>Puissance</b> : 1.5KW</li> <li>• <b>Durée du composant (année)</b> : 20 ans</li> <li>• <b>Le prix</b> : 3000 \$ = 600000 DZ</li> <li>• <b>Remplacement</b> : 2600 \$ = 520000 DZ</li> </ul>	4
Batterie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Name</b> : EnerSys PowerSafe SBS XC 190F</li> <li>• <b>Puissance</b> : 2.51KWh</li> <li>• <b>Tension</b> : 12V</li> <li>• <b>Durée du composant (année)</b> : 12 ans</li> <li>• <b>Le prix</b> : 205 \$ = 41000 DZ</li> <li>• <b>Remplacement</b> : 205 \$ = 41000 DZ</li> </ul>	4
Diesel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Name</b> : Oorja 1.5KW Model T-3</li> <li>• <b>Puissance</b> : 1.5KW</li> <li>• <b>Durée du composant (Heure)</b> : 10000 h</li> <li>• <b>Le prix</b> : 1000 \$ = 200000 DZ</li> <li>• <b>Remplacement</b> : 400 \$ = 80000 DZ</li> </ul>	1

### VIII. Résultats de la simulation

La résolution du problème d'optimisation d'usine, en utilisant l'algorithme PSO a donné les résultats suivants :

**Tableau III.3 :** Résultat du système hybride

Système	Coût	LPS
Eolienne-PV-batterie	0.0775 \$ = 15.5 DZ	1.4773e-04

### IX. Comparaison des résultats entre HOMER et l'algorithme PSO

Le tableau suivant présente une comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes de dimensionnement (HOMER et la méthode optimale), en termes de nombres de générateurs utilisés et le coût correspondant. A noter que d'après l'étude du profil de consommation de l'usine (notamment leurs factures d'électricité), il en ressort un coût équivalent à 0.685 DA/heures.

**Tableau III.4** : Comparaison des résultats obtenus par HOMER et la méthode d'optimisation par PSO

	HOMER	Algorithme PSO
Nombre du PV	6	5
Nombre d'éoliennes	2	4
Nombre de batteries	8	4
Nombre de générateurs diesel	1	1
Coût de l'énergie produite (par heure)	0.220 \$ = 32.234 DZ	0.0775 \$ = 15.5 DZ
Coût initial	15300000.00 \$ = 2241725400.00 DZ	16819200.00 \$ = 2465217600.00 DZ
Total	24900000.00 \$ = 3648298200.00 DZ	25600000.00 \$ = 3756800000.00 DZ

Concernant le nombre de PV, éoliennes et batteries, il y a de légères différences : Pour HOMER, on trouve un panneau PV de plus, deux éoliennes de moins et quatre batteries de plus que la méthode optimale, avec le même nombre de générateurs diesel (01).

Pour les coûts de l'énergie produite, la méthode optimale est de moindre coût (15.5 DZ/heure contre 32.234/heure pour HOMER). Et de toute façon, les deux méthodes donne un coût moindre par rapport au réseau SONALGAZ (0.685 DA/heures).

Concernant les coûts d'investissement initial et total (comprenant les coûts de remplacement et d'entretien), HOMER est moins cher, mais le matériel sera amorti à peu près en même temps pour les deux méthodes vu le coût de production moindre de la méthode optimale.

## X. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode de dimensionnement d'un système hybride basée sur la minimisation d'un critère technico-économique, en utilisation l'algorithme PSO. Les résultats donnent un coût de l'énergie très abordable par rapport à celui du réseau commercial. Une comparaison avec les résultats obtenus par le dimensionnement effectué par logiciel HOMER montre un coût de l'énergie produite légèrement plus important pour HOMER, mais en utilisant moins de matériels. Ce dernier sera amorti à peu près en même temps pour les deux méthodes.

---

## **Conclusion générale**

---

### Conclusion générale

L'utilisation des énergies renouvelables est devenue incontournable dans notre pays, vu la raréfaction des sources d'énergies conventionnelles (fossiles), et leurs effet destructeur sur l'environnement. On dispose d'importants gisements d'énergies renouvelables (soleil, vent...etc.), théoriquement infinis. Cette énergie doit être utilisée de manière optimale afin de produire le plus possible d'énergie électrique avec un coût moindre. Dans ce mémoire, nous avons fait l'étude d'un système énergétique hybride photovoltaïque/éolien/diesel/batterie isolé, ainsi que son dimensionnement pour alimenter une usine de production d'aliment de bétail situé à la wilaya d'El-Tarf.

Nous avons consacré le premier chapitre à la modélisation des différents composants du système hybride. Ensuite, nous avons conçu un modèle de simulation sous environnement SIMULINK/MATLAB.

Le deuxième et le troisième chapitres sont consacrés au dimensionnement d'un système multi-sources photovoltaïque/éolien/diesel/batterie pour isolé pour alimenter en énergie électrique une usine de production d'aliment de bétail située dans la wilaya de EL-TAREF. Dans le deuxième chapitre, nous avons fait le dimensionnement de notre système hybride par un logiciel commercial très utilisé « HOMER : Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources » de la compagnie HOMER Energy. Tandis que dans le troisième chapitre, nous avons abordé l'aspect technico-économique du système hybride en mettant le problème de dimensionnement sous la forme d'un problème d'optimisation qu'on a résolu en utilisant un algorithme bio-inspiré « essaim à particules » PSO.

Les résultats de simulations obtenus à partir de données météorologiques fournies par la station Météo-Algérie de l'aéroport Rabah Bitat de Annaba, ont montré dans les deux cas (utilisation de HOMER ou résolution du problème d'optimisation) qu'on pourrait satisfaire largement à la demande en énergie électrique de l'usine sujette de notre étude, avec un coût moindre.

En conclusion, au vu des résultats obtenus, nous pensons raisonnablement que les systèmes énergétiques hybrides peuvent être une solution pratique pour l'électrification de zones rurales isolées.

---

# Référence Bibliographique

---

### Bibliographie

- [1] Rochdi Bouchebbat, “Algorithmes bio-inspirés appliqués pour la commande des systèmes”. Thèse de doctorat en Automatique, UNIVERSITE DU 20 AOUT 1955 SKIKDA, 2017.
- [2] Bendjamâa Ibrahim, “Modélisation et commande d’un système de stockage photovoltaïque”, Mémoire de Magister, Université Abou-bakr Belkaid, Tlemcen, 2012.
- [3] O. Gergaud, B. Multon, H. Ben Ahmed, “Analysis and Experimental Validation of Various Photovoltaic System Models”, 7th International ELECTRIMACS Congress, Montréal, august 2002.
- [4] Ludmil Stoyanov., “Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d’énergie renouvelables”. Energie électrique. Université Pascal Paoli, 2011. Français. (tel-00653412).
- [5] SLAMA Fateh, “Modélisation d’un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique”, Mémoire de Magister en électrotechnique, Université Ferhat Abbas - Setif-UFAS (Algérie), 2011.
- [6] Dariusz Czarkowski, "DC–DC Converters", Power Electronics Handbook (Third Edition), Butterworth-Heinemann, 2011, Pages 249-263, ISBN 9780123820365, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382036-5.00013-6>.
- [7] Blaabjerg, F. & Ma, Ke. (2017)., “Wind Energy Systems”. Proceedings of the IEEE. Vol. 105. pp. 2116 - 2131. 10.1109/JPROC.2017.2695485.
- [8] Bourzami, Arif & Bouktir, Tarek. (2019). « Contribution à l’étude de la stabilité des grands réseaux électriques dans un marché de l’électricité dérégulé en présence des sources d’énergie renouvelable par la logique floue ». Thèse de doctorat, UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF 1, 10.13140/RG.2.2.16449.92001.
- [9] K. Belmokhtar, “contribution à l'intégration d'un parc éolien à un réseau électrique autonome, avec stockage d'énergie sous forme d'hydrogène”. Thèse de doctorat en génie électrique, université du Québec, 2015.
- [10] Hu. Y et Solana. P, “Optimization of a hybrid diesel-wind generation plant with operational options”. Renewable Energy, 51, 364–372, 2013.
- [11] Larminie. J et Lowry. J, “Electric Vehicle Technology explained, technology and engineering”. Hoboken: Wiley, 2004.
- [12] Indradip. M, “Optimum Utilisation of Renewable Energy for Electrification of Small Islands in Developing Countries”, Thèse de doctorat, ISET, Institut für Solare Energie versorgungs technik Verein an der Universität Kassel. Novembre, 2008.
- [13] Nafeh, Abd El-Shafy A., "Optimal Economical Sizing Of A PV-Wind Hybrid Energy System Using Genetic Algorithm", International Journal of Green Energy, Taylor & Francis, ISSN - 1543-5075, doi: 10.1080/15435075.2010.529407
- [14] <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>
- [15] J. BÉLANGER-GRAVEL, “Analyse technico-économique d'un système hybride éolien-photovoltaïque en comparaison avec les systèmes photovoltaïque et éolien seuls”. Mémoire de maîtrise des sciences appliquées, Université de Montréal, 2011.

- [16] Sivanandam, S., Deepa, S. (2008). “Genetic Algorithms”. In: Introduction to Genetic Algorithms. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-73190-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-73190-0_2).
- [17] Dorigo, M., Stützle, T. (2019). “Ant Colony Optimization: Overview and Recent Advances”. In: Gendreau, M., Potvin, JY. (eds) Handbook of Metaheuristics. International Series in Operations Research & Management Science, vol 272. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-91086-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-91086-4_10).
- [18] Engelbrecht. AP, van den Bergh. F, "A New Locally Convergent Particle Swarm Optimiser", IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics, Tunisia, 2002
- [19] Li. X et Deb. K, "Comparing lbest PSO Niching algorithms Using Different Position Update Rules," Proceedings of the IEEE World Congress on Computational Intelligence, pp. 1564-1571, Spain, 2010.