



**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE  
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem**

**Faculté des Sciences et de la Technologie  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



**N° d'ordre : M...../GE/2019**

## **MEMOIRE**

Présenté pour obtenir le diplôme de

### **MASTER EN ELECTROTECHNIQUE**

Option: Electrotechnique industrielle

Par :

**Bouhenni Imane**

**Mehdi Fadhila**

**Dimensionnement d'un système d'une centrale solaire - Hydroélectrique  
pour alimenter le rectorat de l'université de Mostaganem site Kharouba**

Soutenu le

2019 devant le jury composé de :

Président :	Mr BOUKKORT. A	PROFESSEUR	Université de Mostaganem
Examineur1 :	Mr OMARI. H	M.A.A	Université de Mostaganem
Examineur2 :	Mme GHOMRI. H	M.C.B	Université de Mostaganem
Rapporteur :	Mr. BEKKOUCHE. B	PROFESSEUR	Université de Mostaganem
Co-Encadreur :	Mr GUEZGOUZ. M	DOCTORANT	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2018/2019

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ




# Remerciement

*Nous tenons à remercier en premier lieu et avant tout **ALLAH** le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir notre travail dans les meilleures conditions.*

*En second lieu, Nous adressons nos vifs et chaleureux remerciements à notre encadreur **Mr : BEKKOUCHE .B** et notre Co-encadreur **Mr : GUEZGOUZ .M** pour ses précieux conseils et orientations.*

*Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail, et qui nous feront le plaisir d'apprécier.*



*Nous remercions tous nos enseignants durant toute notre formation et tout le personnel administratif de l'université, sans oublier les responsables de la bibliothèque qui nous ont beaucoup facilité notre recherche bibliographique.*

*Enfin nous remercions toutes les personnes qui de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce travail.*



# Dédicace

Tous d'abord je remercie **Allah** qui m'a donné le courage pour arriver en fin de ce projet.

Je dédie ce travail à :

A **mon père** Allah yerhmou. Ceci est mon profonde gratitude pour ta motivation et ton grand soutien dans mes études, que ce travail soit le meilleur cadeau que je puisse t'offrir.

A **mon père** que je n'oublierai jamais tant que je respire et tant que mon cœur bat pour continuer à l'aimer

A **ma mère** qui a été à mes côtés et m'a soutenue durant toute ma vie.

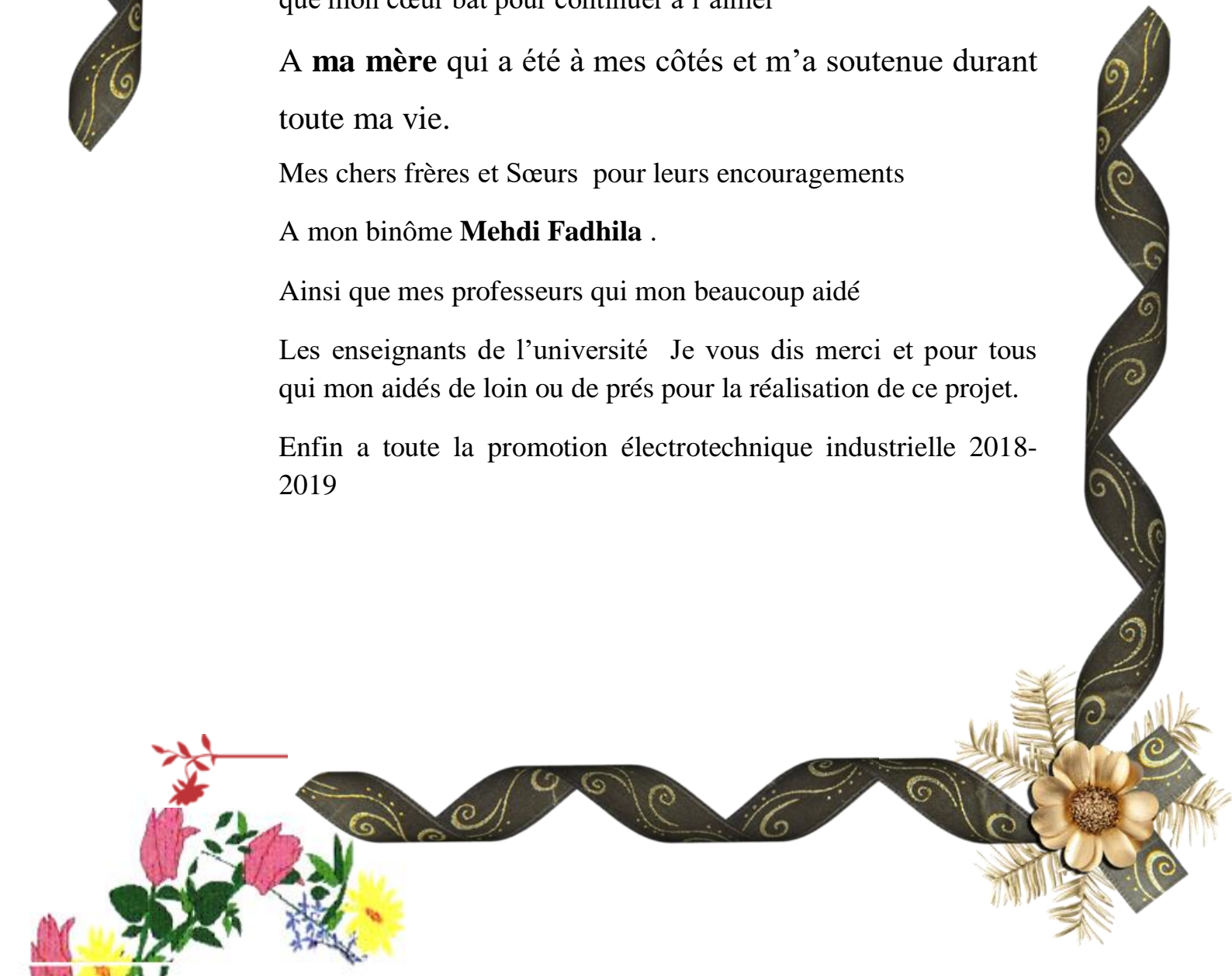
Mes chers frères et Sœurs pour leurs encouragements

A mon binôme **Mehdi Fadhila** .

Ainsi que mes professeurs qui mon beaucoup aidé

Les enseignants de l'université Je vous dis merci et pour tous qui mon aidés de loin ou de prés pour la réalisation de ce projet.

Enfin a toute la promotion électrotechnique industrielle 2018-2019



## DÉDICACES

*Grace Allah....*

*Je dédie ce modeste travail :*

*Je dédie : A ma très chère mère, A  
mon très cher père, pour ses encouragements.*

*A mes frères et mes sœurs  
qui je dois tous l'amour avec tous mes vœux de les voir  
réussir dans leurs vies.*

*A mes amies, à qui je souhaite le succès, pour l'amitié qui nous  
a toujours unis.*

*Surtout à ma cousine Khacha Nadia, et à mon binôme bouhenni  
Imene.*

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation  
de ce travail.*

*Enfin à toute la promotion électrotechnique industrielle.*

*« 2018 - 2019 »*



## **Résumé :**

La combinaison de l'énergie solaire photovoltaïque avec stations de transfert d'énergie (STEP) constitue une solution pratique et économique au problème du manque d'électricité, le dimensionnement est une étape indispensable dans l'optimisation des systèmes à énergies renouvelables

L'étude présentée dans ce mémoire, porte sur l'optimisation du dimensionnement d'un système d'énergie solaire hydroélectrique, dans ce travail nous présentons une méthodologie d'optimisation du dimensionnement d'un système solaire autonome avec stockage pompé, cette méthodologie est décrite en utilisant la méthode méta heuristique: l'optimisation par essaim de particules. Ainsi, notre problème d'optimisation est caractérisé par une fonction objective représentée par le coût et une contrainte principale qui est en relation avec la fiabilité du système. Cette contrainte est représentée par le concept de la probabilité de perte d'énergie (Loss of Power Supply Probability\_LPSP). Cette étude est effectuée en utilisant des données météorologiques sur une période d'une année, le rectorat à l'aide du logiciel matlab, Une étude de cas est établie pour satisfaire le besoin de la charge université de Mostaganem de façon continue

## ملخص:

يعد الجمع بين الطاقة الشمسية ومحطات تخزين الطاقة (STEP) حلاً عملياً واقتصادياً لمشكلة نقص الكهرباء، وتعد عملية التصميم خطوة أساسية في تحسين أنظمة الطاقة المتجددة.

تركز الدراسة المقدمة في هذه العمل على تحسين منهجية تصميم نظام الطاقة الشمسية مع تخزين الطاقة اللازمة باستخدام محطة نقل وتخزين الطاقة (STEP) على أساس معيارين: الأول يتعلق بموثوقية النظام. بمفهوم احتمال فقدان الطاقة ( Loss of power supply probability )، والمعيار الثاني تكلفة النظام ويتم تطبيق التصميم باستخدام برنامج (matlab). وقد تم إنشاء دراسة التصميم المثالي بهدف تلبية حاجة جامعة مستغانم (Rectorat) بشكل مستمر.

# SOMMAIRE



# Sommaire

---

## Sommaire

Liste des tableaux	
Liste de figures	
Liste des symboles	
Introduction général .....	

### CHAPITRE I :

#### « Généralités sur les centrales solaire hydroélectrique »

I.1. Introduction .....	3
I.2. Généralité Sur L'énergie Solaire .....	3
I.2.1. Aperçu sur le soleil .....	3
I.2.2. Rayonnement solaire .....	4
I.2.2.1. Rayonnement solaire au sol .....	5
I.2.2.2. Rayonnement solaire sur un plan quelconque .....	7
I.2.3. Gisement en Algérie .....	8
I.2.4. cellule photovoltaïque .....	9
I.2.4.1. Les technologies des cellules photovoltaïques .....	11
I.2.5. Influence de l'ensoleillement et de la température .....	11
I.2.5.1. Influence de l'ensoleillement : .....	11
I.2.5.2. Influence de la température : .....	12
I.2.6. Le générateur photovoltaïque (GPV) principe de fonctionnement .....	13
I.2.6.1. Le générateur photovoltaïque .....	13
I.2.7. Les types des installations photovoltaïques .....	13
I.2.7.1. Système autonome : .....	14
I.2.7.2. Systèmes hybrides : .....	14
I.2.7.3. Systèmes connectés au réseau : .....	15
I.2.8. Les avantage et les inconvénients des photovoltaïque .....	15
I.3. Généralité sur le système hydroélectrique .....	16
I.3.1. L'énergie hydraulique .....	16
I.3.2. Centrales hydroélectriques .....	17
I.3.2.1. Les centrales gravitaires .....	18
I.3.3. Complexes hydroélectriques .....	18
I.3.4. Les types des installations hydrauliques .....	19
I.3.5. Centrale hydroélectrique STEP .....	19
I.3.6. Les avantages et les inconvénients des centrales hydroélectriques	21
I.3.8. Principe de fonctionnement du système proposé	21
I.3.9. Les composants du système	22
Conclusion	24

# Sommaire

---

## CHAPITRE II :

### « Modélisation et simulation du système solaire - hydroélectrique »

II.1. Introduction .....	25
II.2. Première étape situation du site .....	25
II.2.1 coordonnées géographiques .....	25
II.2.2. Données météorologiques .....	26
a- Les variations de la température mensuelle .....	26
b- Les variations des irradiances journalières : .....	27
II.3. Deuxième étape : Le Profil de la charge université de Mostaganem .....	28
II.4. Troisième étape le calcul de corrélation entre la charge et les irradiances solaire .....	29
II.5. Quatrième étape : Architecture du système solaire photovoltaïque hydroélectrique .....	29
II.6. Cinquième étape : Modélisation du système photovoltaïque-hydroélectrique .....	30
II.6.1. Modèle du module photovoltaïque .....	30
II.6.1.1. Analyse des modèles des panneaux solaire .....	31
II.7. Sixième étape : Modèle du module hydroélectrique .....	32
II.7.1. Opération de stockage hydroélectrique par station de Pompage (STEP) .....	32
II.8. Septième étape : La gestion d'énergie .....	33
II.8.1. La gestion d'énergie entre la centrale PV, le stockage et la charge .....	34
II.9. Huitième étape : la configuration optimale du système solaire hydroélectrique .....	35
Conclusion :	35

## CHAPITRE III :

### « Optimisation du dimensionnement des systèmes solaires et hydroélectrique »

III.1. Introduction .....	36
III.2. Méthodes d'optimisation utilisée .....	36
III.3. Procédure d'optimisation du dimensionnement d'un système solaire hydroélectrique .....	36
III.3.1. Critères d'optimisation .....	36
III.3.1.1. Fonction coût économique : (détermination de la configuration optimale selon l'analyse économique .....	36
III.3.1.2. Fonction probabilité d'insatisfaction de la demande .....	37
III.4. Formulation du problème d'optimisation .....	38
III.5. Qu'est-ce qu'un problème d'optimisation .....	38
III.6. Fonction Objectif .....	38
III.7. Méthodes méta heuristiques .....	39
III.8. Méthodologie .....	39
III.8.1. Optimisation par essaim de particules (PSO) .....	39
III.8.2. Principe fonctionnement de PSO .....	39
III.8.3. Formulation Mathématique du PSO .....	40
III.9. Description de la procédure d'optimisation .....	42
III.10. Les résultats de dimensionnement .....	42

# Sommaire

---

III.10.1. Le dimensionnement de convertisseur .....	43
III.10.2 Dimensionnement du réservoir .....	44
III.10.3. La puissance de la sortie du générateur photovoltaïque .....	46
III.10.4. Solution optimal pour fiabilité LPSP= (97%) pour nombre itération=100 .....	47
III.10.5. Comparaison entre le cout optimal pour LPSP =95% et LSPP=97% .....	48
III.10.6. La comparaison entre les variables décision pour fiabilité 95% et pour fiabilité97% ..	48
III.10.7. La puissance moyenne annuelle entre les composants des systèmes solaire hydroélectrique et la charge pour 95 .....	50
Conclusion .....	51
Conclusion générale .....	52



**LISTE DES TABLEAUX**

## Liste des tableaux :

### **CHAPITRE I : Généralités sur les centrales solaires-hydroélectrique**

**Tableau I.1** : Les notations utilisées pour les composantes du rayonnement solaire sur une surface horizontale sont données.....05

### **CHAPITRE II : modélisation et simulation du système solaire -hydroélectrique**

**Tableau II.1** : les variations de la température moyenne mensuelle suivant les données de l'année 2017. .... 26

**Tableau II.2** : L'évolution des irradiations journalière suivant les données de l'année 2017.....27

**Tableau II.3** : la caractéristique du panneau SPR315E..... 31

**Tableau II.4** : les variations de la puissance PV en fonction d'irradiations.....32

**Tableau II.5** : les variations de la puissance PV en fonction de la température .....32

### **CHAPITRE III : optimisation du dimensionnement solaire et hydroélectrique**

**Tableau III.1** : les données économiques.....40

**Tableau III.2** : les valeurs optimal des variables décisions. ....46

**Tableau III.3** : les valeurs optimal des variables décisions.....47

# LISTE DES FIGURES



## Liste des figures :

### CHAPITRE I : Généralités sur les centrales solaires-hydroélectrique

<b>Figure I.1</b>	schéma d'un système PV+ STEP.....	3
<b>Figure I.2 :</b>	Exemples de spectre solaire.....	4
<b>Figure I.3 :</b>	Les composantes du rayonnement incident sur une surface inclinée.....	7
<b>Figure I.4:</b>	Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude de la moyenne annuelle.....	8
<b>Figure I.5:</b>	Schéma équivalent de cellule PV.....	9
<b>Figure I.6 :</b>	Caractéristique puissance-tension .....	10
<b>Figure I.7 :</b>	caractéristique courant –tension .....	10
<b>Figure I.8 (a)</b>	Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement....	12
	(b) Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement	
<b>Figure I.9: (a)</b>	Caractéristique I (V) d'un module pour différentes valeurs de température...	12
	(b) Caractéristique P(V) d'un module pour différentes valeurs de température.	
<b>Figure I.10:</b>	schéma équivalent d'un générateur GPV.....	13
<b>Figure I.11</b>	Schéma descriptif du système autonome. ....	14
<b>Figure I.12 :</b>	Schéma descriptif du système hybride.....	14
<b>Figure I.13</b>	Schéma descriptif du système.....	15
<b>Figure I.14:</b>	chaîne énergétique de la centrale hydraulique.....	16
<b>Figure I.15</b>	Système de transfert d'énergie par pompage STEP.....	20
<b>Figure I.16 :</b>	Principe de fonctionnement des phases de pompage pour stocker l'énergie....	20
<b>Figure I.17:</b>	Principe de fonctionnement des phases de turbinage pour produire de l'électricité.....	20
<b>Figure I.18 :</b>	schéma d'un système PV+STEP .....	22
<b>Figure I.19 :</b>	schéma équivalent d'une machine synchrone.....	22

### CHAPITRE II : modélisation et simulation du système solaire -hydroélectrique

<b>Figure II.1 :</b>	Région de Mostaganem.....	25
<b>Figure II.2 :</b>	les variations de la température mensuelle.....	26
<b>Figure II.3 :</b>	l'évolution de la somme journalière d'irradiation.....	27

## Liste des figures

---

<b>Figure II.4 :</b> Consommation électrique de l'université Mostaganem Rectorat [kW].....	28
<b>Figure II.5:</b> la puissance de charge en fonction irradiation solaire.....	29
<b>Figure II.6:</b> Schéma d'une station solaire autonome. ....	30
<b>Figure II.7 :</b> L'algorithme de la gestion d'énergie entre la centrale PV, le stockage et la charge. ....	34
<b>Figure II.8 :</b> la variation du rendement en fonction de débit volumique. ....	34
 <b>CHAPITRE III : optimisation du dimensionnement du système solaire hydroélectrique</b>	
<b>Figure III.1:</b> Déplacement d'une particule.....	40
<b>Figure III.2:</b> la variation du coût en fonction du nombre d'itération (pour LPSP 0 ,05).....	43
<b>Figure III.3 :</b> L'état de charge du réservoir supérieur%.....	45
<b>Figure III.4 :</b> La puissance générer par le système PV.....	46
<b>Figure III.5 :</b> la variation du coût en fonction du nombre d'itération (pour LPSP=0.03).....	47
<b>Figure III.6 :</b> simulation du système PV-STEP durant la première semaine d'utilisatio.....	49
<b>Figure III.7 :</b> Le pourcentage d'énergie fournie par PV et STEP pour alimenter la charge..	49
<b>Figure III.8 :</b> La puissance moyenne annuelle générer par le système PV-STEP pour une fiabilité de 95%. ....	50



# LISTE DES SYMBOLES

## Liste des symboles

---

$E_{ph}$ : l'énergie transportée par un photon .

$h$ : la constante de Planck.

$c$  : la vitesse de la lumière.

$\lambda$  : représente la longueur d'onde.

**GPV** : Le générateur photovoltaïque.

**PV** : Photovoltaïque.

**fTL** : le facteur de trouble de Linke.

**B** : le coefficient de trouble atmosphérique.

**Pv** : la pression partielle de vapeur d'eau

$\rho$  : est le facteur de réflexion du sol vis-à-vis du rayonnement solaire

**R** : est appelé l'*albédo* (réfléchi)

$\alpha$  : Azimut du soleil

$i$  : L'angle d'incidence

$h$  : La hauteur du soleil.

$\gamma$ : La déclinaison du soleil.

$I_{pv}$  : Courant de la charge

$I_{ph}$  : Courant photo généré dépendant de l'éclairement

$I_D$ : Le courant traversant la diode.

$I_P$ : Le courant traversant la résistance parallèle.

$V_{th}$  : La tension thermique à la température T.

$I_{sa}$  : Courant de saturation de la diode

$n$  = coefficient d'idéalité de la diode

$q$  : charge élémentaire  $1,602 \cdot 10^{-19}$  C ;

**K** : constante de Boltzmann ( $1,381 \cdot 10^{-23}$  joule/Kelvin).

**T** : la température de la cellule (en °C ou °K).

**R<sub>s</sub>** : résistance en série (interne).

**R<sub>p</sub>** : résistance shunt.

## Liste des symboles

---

**Ec** : L'énergie cinétique

**Ep** : L'énergie potentiel

**Em** : l'énergie mécanique

**E** : L'énergie électrique.

**PCH** : des petites centrales hydroélectriques.

**PHE** : La petite hydroélectricité.

**Pc** : La puissance de crête.

**Poly c-Si** : Polycristalline.

**Vco** : Tension à vide.

**Icc** : Courant de court-circuit.

**STEP** : le station de transfert d'énergie par pompage.

**PSO** : Particle Swarm Optimisation.

**LPSP** : Probabilité de perte de charge.

**Matlab** : Logiciel de calcul mathématique.

**MPP** : Point de Maximum de Puissance.

**MPPT** : Maximum Power Point Tracking (suivi du point de maximum de puissance).

**SOC** : Etat de charge de l'accumulateur (State Of Charge).

**$P_{PV}(t)$**  : la puissance générée par un module PV

**$P_{rate,pv}$** : la puissance nominale.

**G** : le rayonnement solaire horaire.

**$G_{ref}$** : L'éclairement dans les conditions de référence .

**K** : le coefficient de température .

**$\eta_{pv}$** : est le facteur de perte global.

**$P_{SS}$**  : la puissance plus.

**$P_{dif}$**  : la puissance déficit.

## Liste des symboles

---

$T_{ref}$  : la température ambiante dans les conditions de référence (25°C) .

$T_{cell}$  : la température de la cellule PV .

$T_{amb}$  : est la température ambiante .

$NOCT$  : (Normal Operating Cell Température) est la température de fonctionnement nominal des cellules PV (en °C).

$E_h$  : Énergie hydraulique.

$V_a$  : volume d'eau.

$\rho$  : densité de l'eau

$h$  : hauteur totale

$g$  : accélération de la pesanteur

$P_{step}$ : la capacité nominale de la turbine.

$Q$  : Débit d'eau.

$g$  : Accélération

$h$  : hauteur d'hydroélectricité

$\eta_{step}$  : L'efficacité de STEP .

$E_{step}$ : l'énergie stockée

$v(t)$ : le volume d'eau stocké

$s$  : la surface du réservoir.

$P_{max}$ : la demande de charge maximale.

$\eta_{conv}$ : efficacité de convertisseur / onduleur.

$W$  : Coefficient d'inertie

$W_{min}$ : Coefficient minimum d'inertie.

$W_{max}$ : Coefficient maximum d'inertie.

$C_1, C_2$  : Coefficients d'accélération

$G_{BEST}$  : Meilleure position atteinte par toutes les particules

## Liste des symboles

---

$P_{ibest}$ : Vecteur de meilleure position des particules.

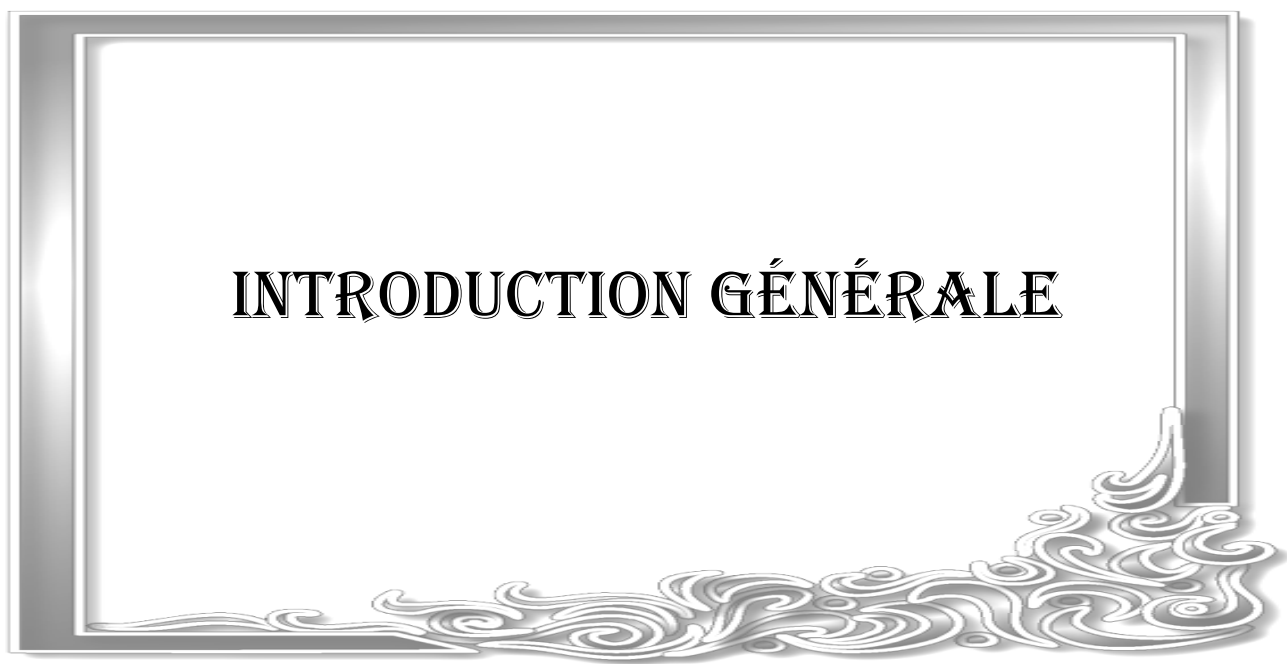
$G_{BEST}$  : Vecteur de vitesse des particules.

$P_{ibest}$  : Vecteur de position des particules.

$r_1$   $r_2$  : Nombres aléatoires tirés uniformément.,

$T$  : Temps.

# INTRODUCTION GÉNÉRALE



# Introduction générale

---

## **Introduction générale :**

Les sources d'énergie renouvelables sont omniprésentes, librement disponibles, et respectueuses envers l'environnement et offrent la possibilité de produire de l'électricité propre et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires.

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire. En effet vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu ainsi la durée de l'ensoleillement qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois, notre pays couvre certains de ses besoins en énergie solaire.

La production de l'électricité est donc forcément, malgré une apparence forte fluctuations naturelles. Elles ne peuvent pas toujours fournir de l'électricité dans les quantités requises ou dans les délais voulus. Les surplus d'énergie doivent donc être stockés de sorte qu'ils soient disponibles en tout de temps.

L'utilisation de source d'énergie renouvelable induit le concept de stockage d'électricité en raison de la disponibilité intermittente de telles ressources, la question de l'équilibre du système solaire est de plus en plus prégnant. Pour rendre le système électrique plus flexible, le stockage de d'électricité apparaît comme une solution intéressante. Nous avons utilisé une station hydroélectrique comme un stockage d'énergie pour surmonter l'intermittence, l'incertitude et la faible disponibilité de chaque source d'énergie renouvelable, ce qui rend ces systèmes plus fiables et conviennent parfaitement pour aider à équilibrer ces fluctuations et couvrant la demande de charge sans interruption. C'est dans ce contexte que se situe la problématique de ce mémoire: concevoir et optimiser un système solaire hydroélectrique pour maintenir un niveau de fiabilité acceptable et un coût minimal grâce à dimensionnement optimal de notre système pour satisfaire aux besoins de la charge de l'université de Mostaganem en électricité de façon continu

Pour résoudre cette problématique, nous avons divisé ce mémoire en 3 chapitres.

Dans le premier chapitre on présente une étude générale d'un système hybride constitué d'un générateur photovoltaïque, d'un générateur hydroélectrique et une charge, nous allons acquies dans les systèmes de production de l'énergie électriques par les sources renouvelable et particulièrement l'énergie photovoltaïque et l'énergie hydraulique. Toutefois, nous avons obtenus beaucoup de connaissances sur le soleil qui présente la source principale d'énergie reçu par la terre..

En fin à travers la recherche documentaire utilisée dans ce chapitre nous avons initié le principe de fonctionnement de notre système PV STEP proposé pour le stockage d'énergie et avoir un éclaircissement sur l'art de sa conception. De ce fait l'avancement de notre travail sera consacré au dimensionnement optimal de ce système

Le deuxième chapitre présentera les caractéristiques géographiques et météorologiques du site de Mostaganem, dans lequel on a proposé l'installation du système qu'il faut subvenir aux

## Introduction générale

---

besoins électriques de l'université de Mostaganem et présentons les différents modèles mathématiques de chacun de ces éléments composants ce système solaire hydroélectrique.

Dans le troisième chapitre on va montrer la méthode utilisée pour résoudre le problème d'optimisation de dimensionnement du système hybride PV-STEP, afin d'assurer la continuité d'approvisionnement en électricité avec un coût d'investissement acceptable. Aussi on va présenter les résultats de simulation et optimisation du système.

Pour dimensionner de manière optimale notre système, on a choisi la méthode méta-heuristique Particle Swarm Optimization (PSO) selon deux critères d'optimisation, à savoir : le critère technique qui est la fiabilité, développée selon le concept de la probabilité de perte d'énergie (LPSP) et le critère économique qui est représenté par le coût initial du système. Ce système est simulé en utilisant des données géographiques et météorologiques de notre site la montagne de Disse Kharouba de Mostaganem. La simulation du système « photovoltaïque-hydroélectrique » a été effectuée par une programmation sous Matlab.

Finalement, nous terminons ce mémoire par des conclusions générales et quelques perspectives pour des travaux futurs dans ce domaine.

# CHAPITRE I

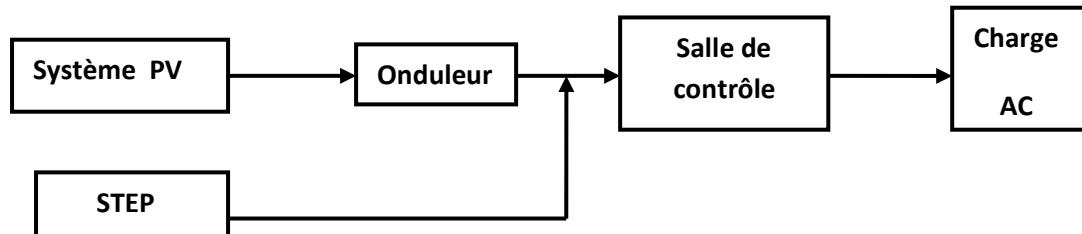
**Généralités sur les centrales solaires -hydroélectriques**

### I.1. Introduction :

Dans ce chapitre on présente une étude générale d'un système hybride constitué d'un générateur photovoltaïque, d'un générateur hydroélectrique et une charge. Généralement, les principales caractéristiques de l'énergie solaire étaient sa gratuité, sa disponibilité sur une grande partie du globe terrestre et l'absence de risque d'épuisement connu par rapport aux sources d'énergie fossile. Cependant, cette énergie se caractérise par des fortes fluctuations naturelles, causés par les variations météorologiques. Elles ne peuvent pas toujours fournir de l'électricité dans les quantités et la qualité requises ou dans les délais voulus. Donc, un dispositif de stockage est nécessaire pour prémunir contre les perturbations provoqué par les conditions climatologiques. Bien que les systèmes de stockage sont actuellement très développer et le système le plus utilisé est le stockage par batterie mais il reste toujours très chère avec une durée de vie très réduite. Alors, ces contraintes poussent plusieurs chercheurs de travailler sur d'autres mutations. Toutefois dans ce travail, une station de transfert d'énergie par pompage (STEP) sera utilisée comme un moyen de stocker indirectement de l'énergie électrique pour compenser le caractère intermittent avec d'autres énergies renouvelables. De la sorte que cette station sera alimentée par le surplus d'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque conçue.

Le schéma global du système à étudier :

Les éléments principaux du système à étudier sont présentés sur la figure I.1



**Figure I.1** schéma d'un système PV+ STEP

### I.2. Généralité Sur L'énergie Solaire :

#### I.2.1. Aperçu sur le soleil :

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1 391 000 km (100 fois celui de la Terre), sa masse est de l'ordre de  $2.10^{27}$  tonnes.

Toute l'énergie du Soleil provient de réactions thermo-nucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde 564.106 tonnes d'hydrogène en 560.10<sup>6</sup> tonnes d'Hélium, la différence de 4 millions de tonnes est dissipée sous forme d'énergie ( $E = mc^2$ ), ce qui représente une énergie totale de 36.10<sup>22</sup> kW. La Terre étant à une distance de 150.10<sup>6</sup> km du Soleil, elle reçoit une énergie de 1,8.10<sup>17</sup> W.

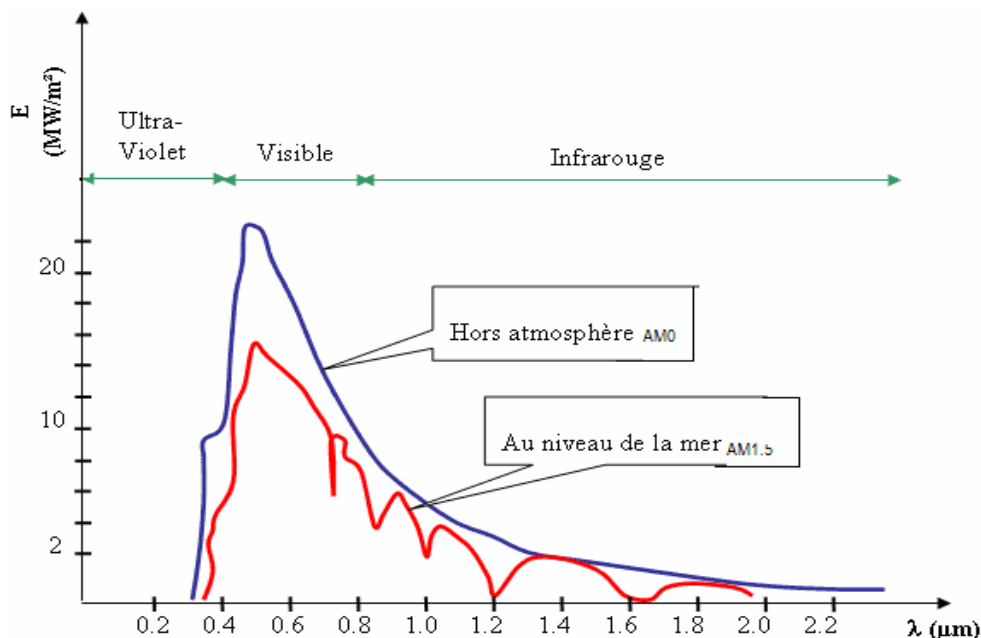
La valeur du flux de rayonnement solaire  $E$  reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne  $E_0$  est appelée la constante solaire, elle vaut  $E_0 = 1353 \text{ W.m}^{-2}$ . En première approximation, on peut calculer la valeur de  $E$  en fonction du numéro du jour de l'année  $j$  par :

$$E = E_0 [1 + 0,033 \cos (0,984 j)] \quad (\text{I.1}) \quad [1]$$

L'atmosphère terrestre reçoit un rayonnement solaire d'une puissance moyenne de 1367  $\text{W/m}^2$ . Mais, l'atmosphère absorbe une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement 1200  $\text{W/m}^2$ . Ainsi, la rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie  $E_{ph}$ , qui répond elle même à la relation suivante : [2] [1]

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda} \quad (\text{I.2})$$

Dans laquelle  $\lambda$  représente la longueur d'onde, ' $h$ ' la constante de Planck et ' $c$ ' la vitesse de la lumière. D'après (I.1), l'énergie transportée par un photon est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde.[2]



**Figure I.2 :** Exemples de spectre solaire.[2]

**AM0 :** Conditions d'éclairement hors atmosphère ou en haute altitude.

**AM1.5 :** Conditions d'atmosphère terrestre, le soleil étant à 30° sur l'horizon.[2]

### I.2.2. Rayonnement solaire:

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0,2 et 4.10<sup>-6</sup>m .sans la nécessité d'un support physique

pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent. [2]

### I.2.2.1. Rayonnement solaire au sol :

- **Notations sur l'irradiation solaire incidente :**

L'angle que font les rayons du Soleil avec une surface détermine la densité énergétique que reçoit cette surface. Puisque le rayonnement solaire arrive sur la Terre sous forme d'un faisceau parallèle, une surface perpendiculaire à ces rayons intercepte la densité maximale d'énergie. Et si l'on incline la surface à partir de cette position perpendiculaire, son éclairage diminue. [1] En réalité, le rayonnement total reçu sur une surface, appelé irradiation solaire incidente (ou encore éclairage énergétique global), est défini par la somme trois composantes :

L'irradiation directe, provenant directement du Soleil en traversant l'atmosphère sans subir de modifications. Cet éclairage provenant L'irradiation directe provenant directement du Soleil en traversant l'atmosphère sans subir de modifications. Cette composante s'annule si le Soleil est caché par des nuages ou par un obstacle.

L'irradiation diffuse, correspondant au rayonnement reçu hors rayonnement direct. Cette énergie diffusée par l'atmosphère et dirigée vers la surface de la Terre, peut atteindre 50 % du rayonnement global reçu, lorsque le Soleil est bas sur l'horizon, et 100 % pour un ciel entièrement couvert.

L'irradiation réfléchi, correspondant au rayonnement réfléchi par l'environnement extérieur, en particulier le sol, dont le coefficient de réflexion est appelé "albédo".

Le rayonnement global est la somme du rayonnement.

Irradiation solaire Energie reçue pendant une certaine durée $W.m^{-2}.durée^{-1}$ ou $kWh.m^{-2}.durée^{-1}$	Directe	S	G = S + D
	Diffuse	D	
	Globale	G	
Eclairage solaire Flux instantané $W.m^{-2}$	Direct	S*	G* = S* + D*
	Diffus	D*	
	Global	G*	

**Tableau I.1 :** Les notations utilisées pour les composantes du rayonnement solaire sur une surface horizontale sont données

Le rayonnement direct reçu par une surface orientée en permanence vers le Soleil et qui reçoit donc le rayonnement solaire sous une incidence normale est désigné par I. Nous désignerons par :

- **I** l'énergie reçue (irradiation) en  $W.m^{-2}.durée^{-1}$  ou  $kWh.m^{-2}.durée^{-1}$
- **I\*** le flux reçu (éclairage) en  $W.m^{-2}$

Nous avons la relation :  $S^* = I^* \sin(h)$  (I.3)

**a) Rayonnement direct :****1 - Eclairement  $S^*$  :**

L'éclairement solaire direct  $S^*$  sur un plan horizontal peut être déterminé de plusieurs manières en fonction des données disponibles :

1. Par mesure de  $G^*$  et  $D^*$ , on en déduit  $S^* = G^* - D^*$ .

SI on ne dispose d'aucune mesure : on peut évaluer le rayonnement direct sur un plan perpendiculaire au rayonnement solaire par la relation :

$$I^* = 1370 \exp\left[-\frac{FTL}{0.9 + 9.4 \sin(h)}\right] \quad (\text{I.4})$$

Où  $fTL$  est le facteur de trouble de Linke calculable par

$$fTL = 2,4 + 14,6 \beta + 0,4 (1 + 2 \beta) \ln(p_v)$$

On en déduit :  $S^* = I^* \sin(h)$

$\beta$  est le coefficient de trouble atmosphérique que l'on peut prendre égal à :

$\beta = 0,05$  en zone rurale

$\beta = 01$  en zone urbaine

$\beta = 0,2$  en zone industrielle ou polluée

$p_v$  : est la pression partielle de vapeur d'eau exprimée en mmHg.

**2 - Irradiation directe journalière  $S$  :**

L'irradiation directe journalière  $S$  sur un plan horizontal peut être déterminée de plusieurs manières en fonction des données disponibles :

- Par mesure directe de  $G$  et  $D$  on en déduit  $S = G - D$ .
- Par intégration sur la journée des valeurs de  $S^* = I^* \sin(h)$ ,  $I^*$  étant calculé par la formule précédente. [1]

**b) Rayonnement diffus :****1- Eclairement  $D^*$  :**

L'éclairement solaire diffus  $D^*$  sur un plan horizontal peut être déterminé de plusieurs manières en fonction des données disponibles :

- Par mesure directe.
- A partir de la mesure de l'irradiation journalière diffuse  $D$  sur un plan horizontal. [1]

**2- Irradiation  $D$  :**

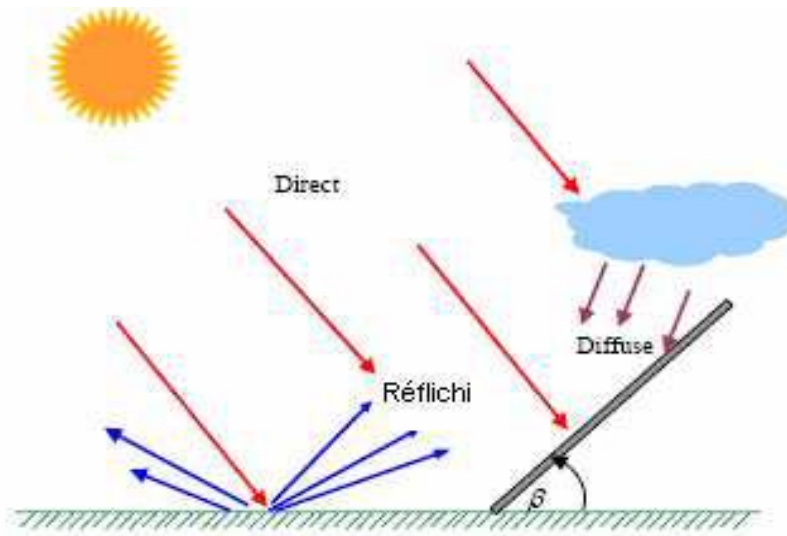
L'irradiation diffuse journalière  $D$  sur un plan horizontal peut être déterminé de plusieurs manières en fonction des données disponibles :

- Par mesure directe
- A partir de la mesure de l'irradiation globale  $G$  sur un plan horizontal
- A partir de la mesure du taux d'ensoleillement [1]

### I.2.2.2. Rayonnement solaire sur un plan quelconque :

Soit une surface plane inclinée d'un angle  $i$  par rapport à l'horizontale et orientée vers une direction faisant un angle  $\gamma$  avec la direction Sud ( $\gamma$  compté positivement vers l'Ouest). Le rayonnement global  $G^*(i, \gamma)$  reçu par cette surface est la somme de 3 termes :

$$G^*(i, \gamma) = S^*(i, \gamma) + D^*(i, \gamma) + R^*(i, \gamma) \quad [1]$$



**Figure I.3 :** Les composantes du rayonnement incident sur une surface inclinée [2]

- **Eclairement direct :** [1]

$$s^*(i, \gamma) = \frac{s^*}{\sin(h)} [\cos(h) \sin(i) \cos(a - \gamma) + \sin(h) \cos(i)] \quad (\text{I.5})$$

- **Eclairement diffus :** [1]

$$D^* = (i, \gamma) = \frac{D^*}{2} [1 + \cos(i)] \quad (\text{I.6})$$

- **Eclairement réfléchi :** [1]

$$R^*(i, \gamma) = \frac{G^*}{2} \rho [1 - \cos(i)] \quad (\text{I.7})$$

Où :

$\rho$  : est le facteur de réflexion du sol vis-à-vis du rayonnement solaire

$R$  : est appelé l'*albédo* (réfléchi)

$a$  : Azimut du soleil

$i$  : L'angle d'incidence

$h$  : La hauteur du soleil

$\gamma$  : La déclinaison du soleil

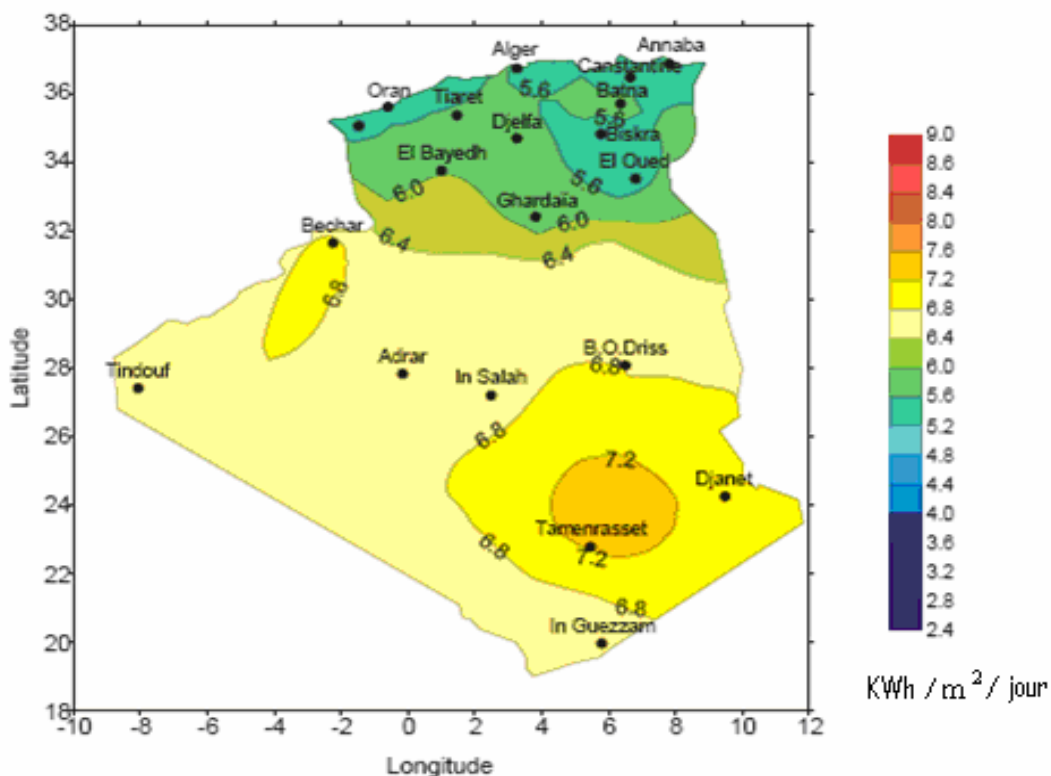
### I.2.3. Gisement en Algérie :

L'étude du gisement solaire est le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'énergie solaire. Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans un lieu donné et au cours d'une période donnée. Son évaluation peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. Elle est utilisée pour simuler le fonctionnement probable d'un système énergétique solaire et donc d'effectuer son dimensionnement le plus exacte possible compte tenu des demandes en énergie à satisfaire. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde.

La durée d'insolation moyenne nationale dépasse les 2000 heures annuellement. Cette valeur peut atteindre facilement les 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara. Ainsi, L'énergie moyenne reçue quotidiennement sur une surface inclinée à la latitude est d'environ 7kWh/m<sup>2</sup>/jour. Elle est répartie comme suit :

- Au Nord : 5,6 kWh/m<sup>2</sup>/jour
- Au Sud : 7,2 kWh/m<sup>2</sup>/jour[2]

La figure (I.4) montre l'irradiation globale moyenne annuelle reçue sur plan incliné à la latitude du lieu



**Figure I.4:** Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude de la moyenne annuelle [2]

### I.2.4. cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé «effet photovoltaïque». Cette cellule photovoltaïque (ou photopile) est un composant électronique Semi-conducteur en silicium. L'absorption de lumière crée des charges positives et négatives qui sont séparées et collectées par une grille en face avant et un contact en face arrière. Cette transformation directe de la lumière en électricité s'effectue sans pièces Mobiles, sans bruit, sans pollution. Le module photovoltaïque est un groupement de cellules connectées entre elles. Il est protégé en face avant par une plaque de verre, et en face arrière par un autre matériau (ou autre plaque de verre). Le tout est installé sur un cadre aluminium anodisé. Le rendement d'une cellule dépend de l'intensité de la lumière, de sa température et de son orientation par rapport au soleil. [3]Le modèle de la cellule est présenté par le schémas de la figure I.5 .

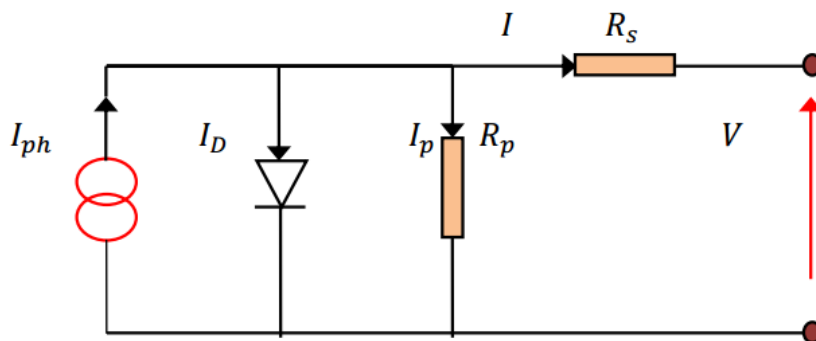


Figure I.5: Schéma équivalent de cellule PV [4]

Le courant délivré sur une charge par une cellule solaire éclairée s'écrit : [5]

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_p \quad (\text{I.8})$$

$I_{pv}$  : Courant de la charge

$I_{ph}$  : Courant photo généré dépendant de l'éclairement

$I_D$ : Le courant traversant la diode.

$I_p$ : Le courant traversant la résistance parallèle.

Pour simplifier ce modèle, on pose :

$$V_{th} = \frac{q}{nKT} \quad (\text{I.9})$$

$V_{th}$  : La tension thermique à la température T

Donc aura :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sa} \left[ \exp \left( \frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (\text{I.10})$$

$$I_p = \frac{(V_{pv} + R_s I_{pv})}{(R_p)} \quad (\text{I.11})$$

$$I_d = I_{sa} \left[ \exp\left(\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (\text{I.12})$$

$I_{sa}$  : Courant de saturation de la diode

$n$  = coefficient d'idéalité de la diode

$q$  : charge élémentaire  $1,602 \cdot 10^{-19}$  C ;

$K$  : constante de Boltzmann ( $1,381 \cdot 10^{-23}$  joule/Kelvin)

$T$  : la température de la cellule (en °C ou °K)

$R_s$  : résistance en série (interne)

$R_p$  : résistance shunt.

♦ **La puissance de crête,  $P_c$**  : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards ( $25^\circ\text{C}$  et un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$ ).[6]

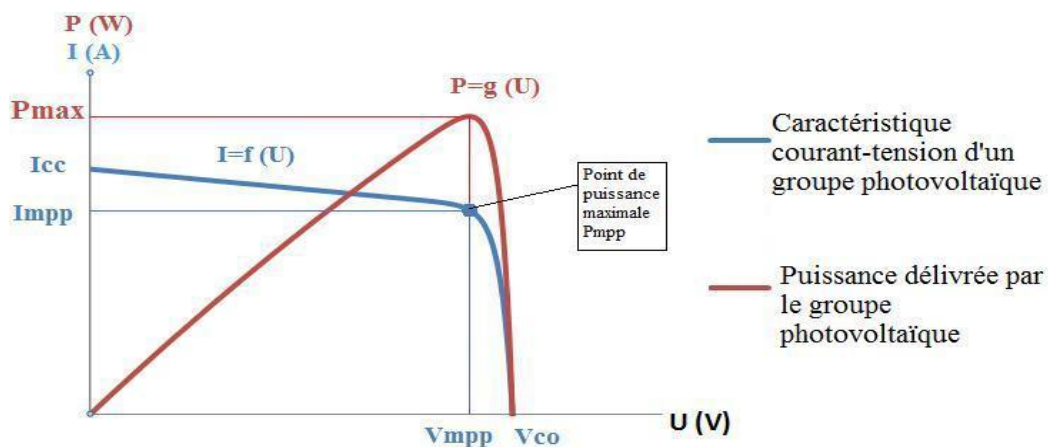


Figure 1.6 : Caractéristique puissance-tension [4]

♦ **La caractéristique  $I=f(V)$**  : Courbe représentant le courant  $I$  débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.[6]

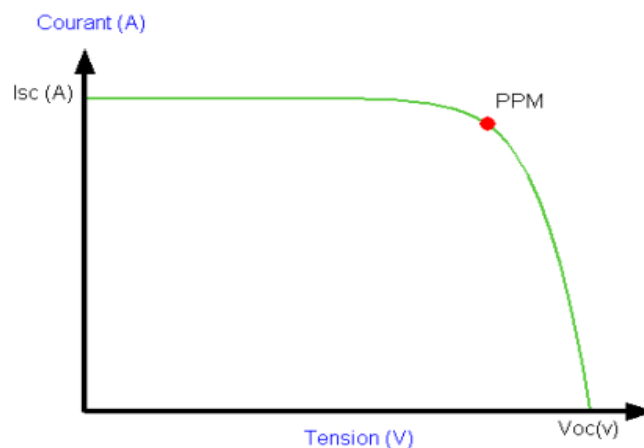


Figure I.7 : caractéristique courant-tension [4]

- ◆ **Tension à vide,  $V_{co}$**  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un Éclairement " plein soleil ".
- ◆ **Courant de court-circuit,  $I_{cc}$** : Courant débité par un module en court-circuit pour un Éclairement " plein soleil ".[6]
- ◆ **Point de fonctionnement optimum,  $P_m$  ( $V_m$ ,  $I_m$ )** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $P_m = V_m \cdot I_m$  .[6]
- ◆ **Rendement** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.[6]
- ◆ **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule :  $V_{co} \cdot I_{cc}$  . [6]

#### I.2.4.1. Les technologies des cellules photovoltaïques :

Il existe différents les technologies de cellules photovoltaïques, et chaque technologie possède un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur technologie, leur rendement reste assez faible par rapport à l'utilisation.

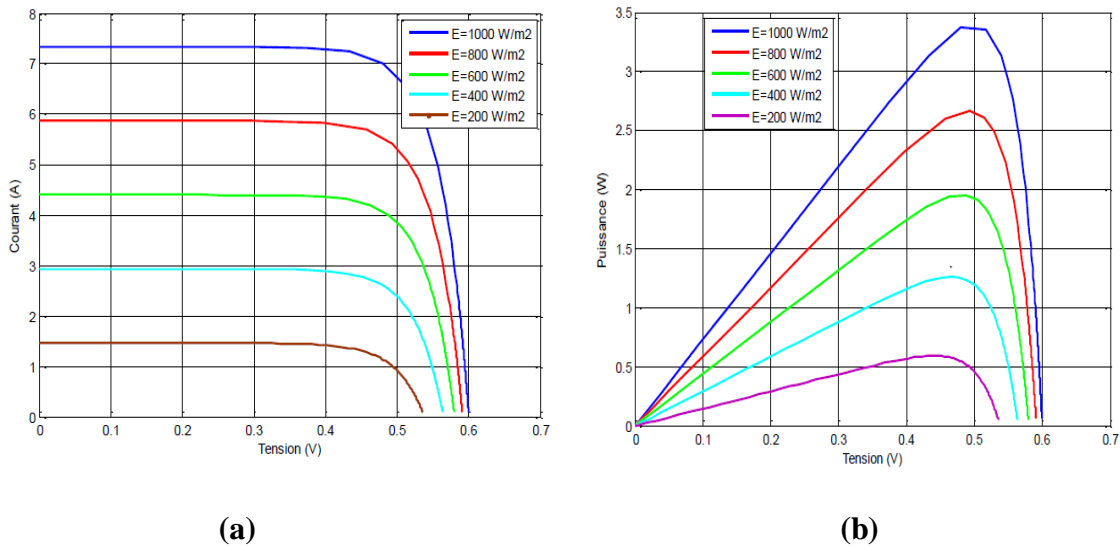
Les types de cellules les plus utilisés sont:

- **Cellules monocristallines** : Ce sont celles qui ont le meilleur rendement mais leur cout reste plus élevé.[4]
- Cellules poly-cristallines** : Leurs coût de fabrication est moins important, vu leur conception facile. Cependant leur rendement est faible. [4]
- Cellules amorphes** : Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres. [4]

#### I.2.5. Influence de l'ensoleillement et de la température :

##### I.2.5.1. Influence de l'ensoleillement :

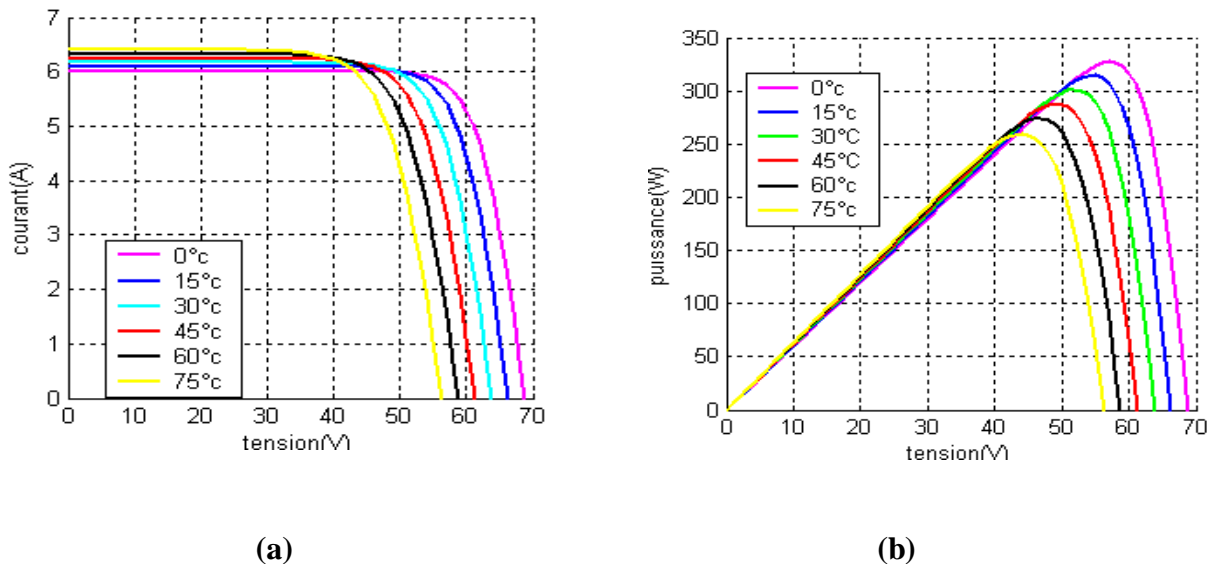
L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure (I.8) représente la caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes. Le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement. [6]



**Figure I.8** (a) Caractéristique courant-tension d’une cellule en fonction de l’éclairement [6]  
 (b) Caractéristique puissance-tension d’une cellule en fonction de l’éclairement.[6]

**I.2.5.2. Influence de la température :**

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules PV. La fig.(I.9) décrit le comportement du module sous un éclairement fixe de 100W/m<sup>2</sup>, et à des températures comprises entre 0°C et 75°C. Nous remarquons que le courant augmente avec la température; par contre la tension de circuit ouvert diminue. Ceci entraîne une diminution de la puissance maximale disponible [7].



**Figure I.9:** (a) Caractéristique I (V) d’un module pour différentes valeurs de température.  
 (b) Caractéristique P(V) d’un module pour différentes valeurs de température.[7]

## I.2.6. Le générateur photovoltaïque (GPV) principe de fonctionnement :

### I.2.6.1. Le générateur photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque (GPV) est constitué de plusieurs éléments qui fonctionnent en synchronisation. Les caractéristiques de base d'une centrale photovoltaïque sont généralement définies par le comportement de la cellule tel qu'il est expliqué dans le paragraphe précédent. Les cellules sont associées en parallèle et en série pour augmenter le courant et la tension. Ces cellules branchées constituent un module photovoltaïque. L'association de plusieurs modules donne un panneau photovoltaïque. Le regroupement de plusieurs panneaux avec des régulateurs et des contrôleurs constitue un générateur photovoltaïque comme le montre la figure : [ I.10] [3].

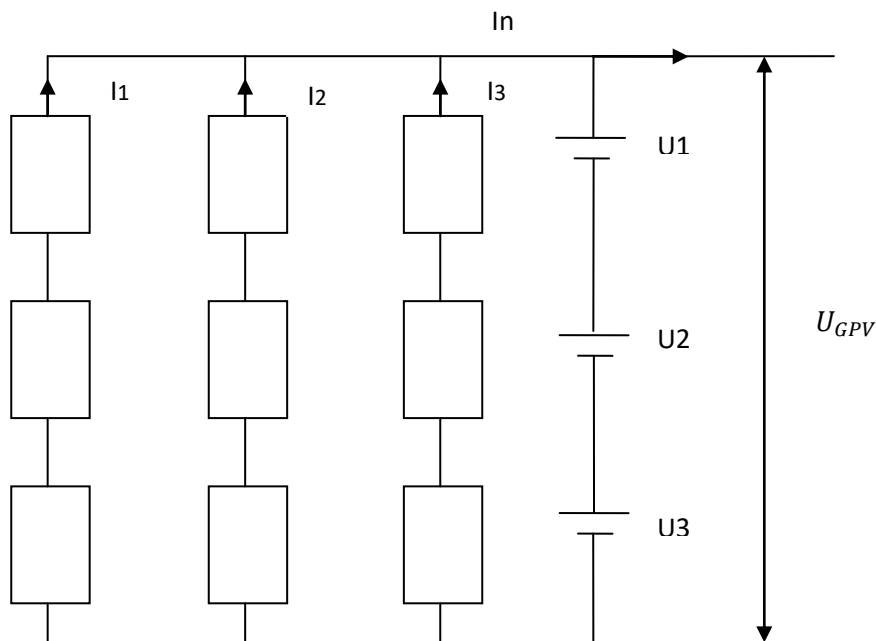


Figure I.10: schéma équivalent d'un générateur GPV

$$U_{GPV} = U_1 + U_2 + U_3 = U_{branche}$$

$$I_{GPV} = I_1 + I_2 + I_3$$

### I.2.7. Les types des installations photovoltaïques :

Les genres des systèmes photovoltaïques que l'on rencontre généralement sont les systèmes autonomes, hybrides et connectés à un réseau. Les deux premiers sont indépendants du service public de distribution d'électricité; on les retrouve souvent dans les régions (isolées) [3].

### I.2.7.1. Système autonome :

Une installation photovoltaïque autonome est une installation qui constitue d'un système PV et un onduleur qui fonctionne indépendamment du réseau électrique, ils comporter un système de stockage d'énergie électrique produite par les modules photovoltaïques au cours de la journée. Ces systèmes peuvent également répondre aux besoins des petites applications sans stockage. [3]

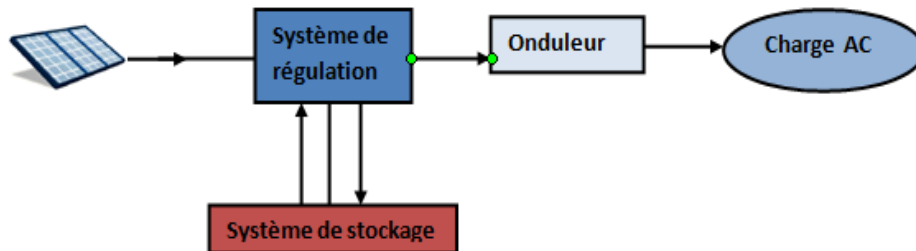


Figure I.11 Schéma descriptif du système autonome.[3]

### I.2.7.2. Systèmes hybrides :

Les systèmes hybrides, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité, sont composés d'un générateur photovoltaïque combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée, lorsqu'il n'y a pas assez de lumière solaire à certains moments de l'année, ou si on désire diminuer notre investissement dans les champs de modules photovoltaïques et les Batteries d'accumulateurs [3].

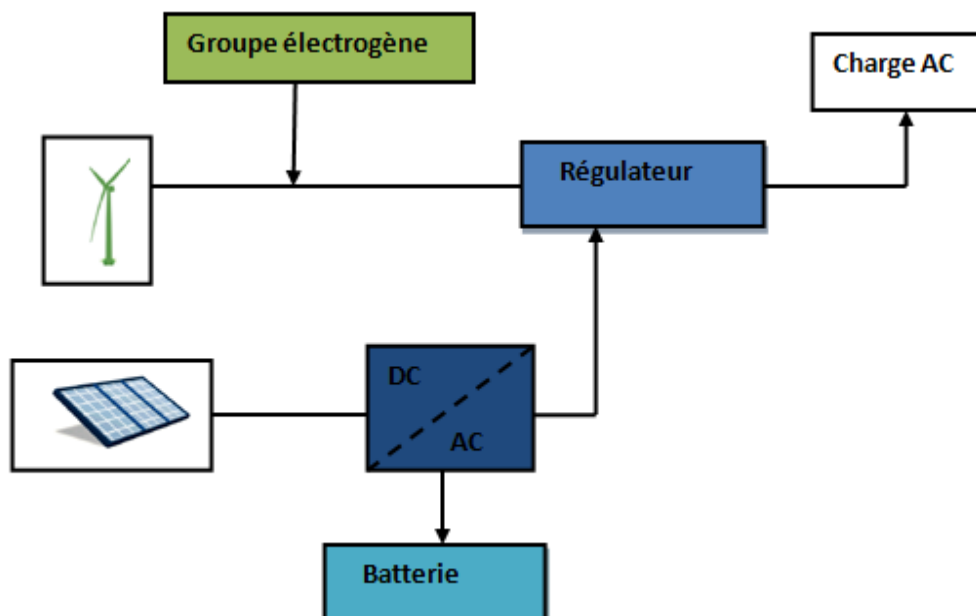


Figure I.12 : Schéma descriptif du système hybride.[3]

### I.2.7.3. Systèmes connectés au réseau :

Le courant généré peut être utilisé localement et les surproductions sont injectées au réseau. La centrale de distribution électrique se charge également d'équilibrer l'offre et la demande.

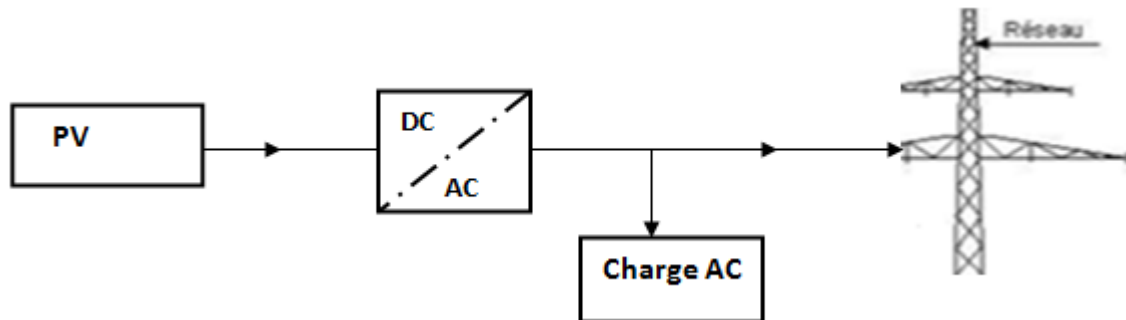


Figure I.13 Schéma descriptif du système [3]

### I.2.8. Les avantages et les inconvénients des photovoltaïque :

En tant que source d'énergie électrique, un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients.

- **Avantages de la conversion photovoltaïque :**

Les installations photovoltaïques sont en général de haute fiabilité, peu sujettes à l'usure, et Elles demandent peu d'entretien.

- Le montage des installations photovoltaïques est simple et les installations sont adaptables aux besoins de chaque projet.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- Il s'agit d'une source d'énergie théoriquement inépuisable.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.[8]

- **Inconvénients du photovoltaïque :**

- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé.
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit.
- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps. Cependant, la perte de rendement est de l'ordre de 1% par an [8]

### I.3. Généralité sur le système hydroélectrique :

#### I.3.1. L'énergie hydraulique :

L'énergie hydraulique est une énergie renouvelable qui utilise l'énergie des cours d'eau, des chutes, voire des marées, pour transformer la force motrice en électricité.

- L'énergie potentielle de pesanteur d'une chute d'eau est transformée en énergie mécanique grâce à une turbine,
- L'énergie mécanique est ensuite transformée en énergie électrique grâce à un générateur [9].

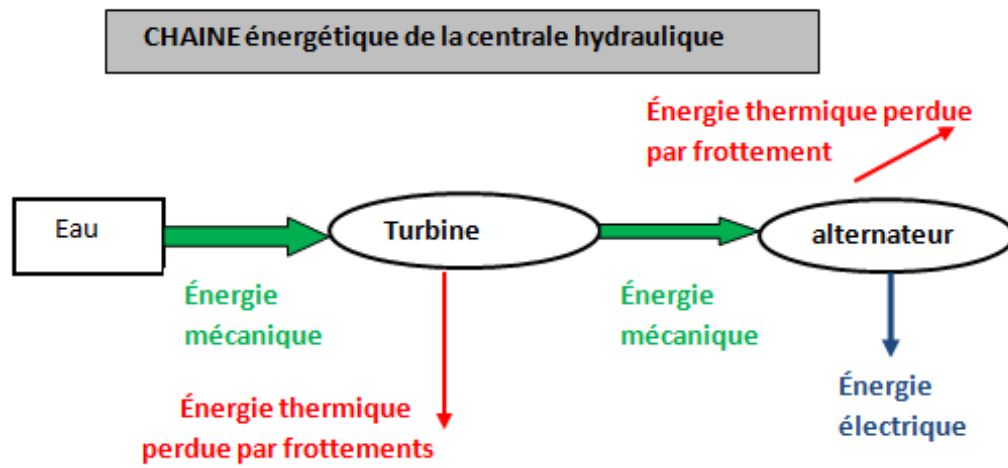


Figure I.14: chaîne énergétique de la centrale hydraulique [9]

#### L'énergie mécanique:

L'énergie mécanique est définie comme la somme de deux autres énergies: l'énergie cinétique et l'énergie potentielle de pesanteur.[10]

#### L'énergie cinétique :

L'énergie cinétique : c'est l'énergie que possède un solide du fait de sa vitesse. On appelle

L'énergie cinétique de translation d'un solide :[11]

$$E_c = \frac{1}{2}.m.v^2 \quad (\text{I.11})$$

L'énergie cinétique est une grandeur physique qui est toujours positive. Ainsi, quand la vitesse augmente, l'énergie cinétique augmente également. L'énergie cinétique est proportionnelle à la masse et varie en fonction du carré de la vitesse.

#### L'énergie potentielle de pesanteur est calculée ainsi :

$$E_p = m.g.h \quad (\text{I.12})$$

Avec m la masse en kg,

g en newton/kg

et h hauteur en m.

L'énergie potentielle est exprimée en joules (J).

Formule, expression : d'après sa définition il est possible d'exprimer l'énergie mécanique avec la formule suivante :

$$E_m = E_c + E_p \quad (\text{I.15})$$

Si les énergies cinétique et potentielle sont remplacées par leur expression alors on obtient :

$$E_m = \frac{1}{2}.m.v^2 + m.g.h \quad (\text{I.16})$$

### L'énergie électrique :

L'énergie électrique désigne toute énergie transférée ou stockée grâce à l'électricité. Cette énergie est transférée d'un système à un autre par un mouvement de charges.

Pour stocker de l'énergie fournie par transfert électrique il faut utiliser un convertisseur capable de stocker l'énergie reçue, par exemple la convertir en énergie mécanique ou en énergie potentielle (par exemple dans une STEP ou un Barrage hydro-électrique).

Relation entre énergie électrique et puissance :

L'énergie électrique E consommée par un appareil électrique fonctionnant avec une puissance P pendant une durée t peut s'exprimer par le relation :

$$E = P \times t \quad (\text{I.17})$$

Pour que cette relation soit vérifiée il est possible d'utiliser plusieurs combinaisons d'unités :

Si la puissance est en watt et le temps en seconde alors l'énergie s'exprime en joule.

Si la puissance est en watt et le temps en heure alors l'énergie s'exprime en watt heure.

Si la puissance est en kilowatt et le temps en heure alors l'énergie s'exprime en kilowatt heures [12]

### I.3.2. Centrales hydroélectriques :

Il existe plusieurs formes de production d'énergie hydroélectrique :

- **les centrales dites gravitaires** pour lesquelles les apports d'eau dans la réserve sont essentiellement issus de cours d'eau (par gravitation) [13]
- **les stations de transfert d'énergie par pompage (S-T-E-P)** aussi connues sous l'appellation centrales hydrauliques à réserve pompée ou centrale de pompage-turbinage. [12]

- **les usines marémotrices** au sens large qui utilisent l'énergie du mouvement des mers, qu'il s'agisse du flux alterné des marées (marémotrice au sens strict), des courants marins permanents (hydroliennes au sens strict) ou du mouvement des vagues.[13]

### **I.3.2.1. Les centrales gravitaires:**

Les centrales gravitaires utilisent le flot d'eau amené par la gravité et le cycle de l'eau. L'eau est utilisée directement dans le cas des centrales au fil de l'eau, ou après l'avoir stockée derrière un barrage dans le cas des centrales-écluses et des centrales-lacs.

Les centrales au fil de l'eau sont situées en plaine et exploitent des cours d'eau dont le débit est relativement constant. Sans barrage réserve d'eau, ces centrales impactent moins l'environnement mais sont plus dépendantes des précipitations. Elles produisent de l'électricité à bas coût pour la consommation de base. [13]

### **I.3.3. Complexes hydroélectriques :**

Un complexe hydroélectrique est un ensemble d'ouvrages de génie civil et d'installations Mécaniques et électriques dédiés à la production d'énergie électrique. Généralement, un Complexe hydroélectrique comprend les ouvrages suivants:

- Un barrage (bassin) pour stocker les surplus d'eau et augmenter la hauteur de chute.
- Des évacuateurs de crue pour écouler les surplus d'eau au besoin.
- Des conduites forcées pour amener l'eau à la centrale. Elles doivent supporter les Surpressions et les dépressions causées par les coups de bélier et les fermetures brusques. [9]
- Pompe :

Les pompes hydrauliques sont des générateurs de débit, elles transforment l'énergie Mécanique en énergie hydraulique, vers des récepteurs.

Le rendement des pompes se situe généralement entre 70%(pour les pompes centrifuges) et 90% (pour les pompes volumétrique) [13]

- . Turbine :

Une turbine hydraulique est une machine tournante, constituée principalement d'une roue à aubes, qui reçoit l'énergie d'un fluide, sous forme d'énergie de pression ou d'énergie cinétique et qui la transforme en énergie mécanique directement utilisable sur un arbre en rotation. Le rendement des turbines se situe généralement entre 60et80% ; il croit avec la taille des roues. [13]

- Des salles de machine abritant les groupes turboalternateurs, les appareillages électriques et les équipements de commande et d'exploitation.
- Un canal de fuite pour permettre la restitution de l'eau dans le lit de la rivière.[9]

### I.3.4. Les types des installations hydrauliques :

Il existe plusieurs types d'installations :

- ✓ Les installations qui fonctionnent par éclusées c'est-à-dire de grands barrages dotés de réservoirs permettant de répondre aux pointes de consommation, le cas de ZIAMA à Jijel.
- ✓ Les centrales installées au fil de l'eau, ce qui est le cas de la majorité des petites centrales hydroélectriques (PCH). Le cas d'ERRAGUENE à Jijel (les autres sont toutes à l'arrêt).

La petite hydroélectricité (PHE) se caractérise par des installations de production capables de développer une puissance électrique de quelques kilowatts à plusieurs mégawatts (10 MW au maximum), à partir de chutes d'eau de quelques mètres de haut à plusieurs centaines de mètres de haut.

Trois types de turbines sont utilisés :

- Kaplan pour les basses chutes (5-10m),
- Francis pour les chutes moyennes (10-100m)
- et Francis et Pelton pour les hautes chutes (50 à 400m). [9]
- Les centrales de basse chute consistent en un seuil qui dérive l'eau dans un canal d'amenée qui la conduit à la centrale. La restitution de l'eau se fait en aval dans le canal de fuite qui rejoint le cours d'eau dérivé.
- Les centrales de haute chute sont dotées d'une prise d'eau en montagne et d'une conduite forcée qui amène l'eau à la centrale puis la restitue.

Fondamentalement, une centrale hydroélectrique est constituée de trois éléments :

- un barrage (sauf pour les installations au fil de l'eau);
- un canal de dérivation;
- les dispositifs de conversion en électricité.[9]

### I.3.5. Centrale hydroélectrique STEP :

Une centrale hydroélectrique est utilisée pour transférer l'eau entre deux bassins situés à des altitudes différentes.

Lorsque le système photovoltaïque fournit un surplus d'électricité (heures creuses ou pic de production) l'eau du bassin inférieur est pompée dans le bassin supérieur.

Lorsque nous avons un déficit de production électrique, la circulation de l'eau est inversée. La pompe devient alors turbine et restitue l'énergie accumulée précédemment Ce système permet de stocker de l'énergie inutilisée par la charge.

Le rendement entre l'énergie produite et l'énergie consommée est de l'ordre de 70% à 80%.

Le fonctionnement de l'installation n'est donc nécessaire et rentable que dans des conditions bien déterminées. Une STEP peut être très utile si elle fonctionne avec des productions d'électricité irrégulières comme les photovoltaïque, en particulier Le stockage de l'énergie électrique par pompage - turbinage permet d'assurer d'avoir de l'électricité disponible, sans qu'il soit nécessaire d'avoir des capacités de production aussi élevées que les pics de consommation [13] ,[14] .



Figure I.15 Système de transfert d'énergie par pompage STEP[9]

1) Phase pompage stockage énergie :

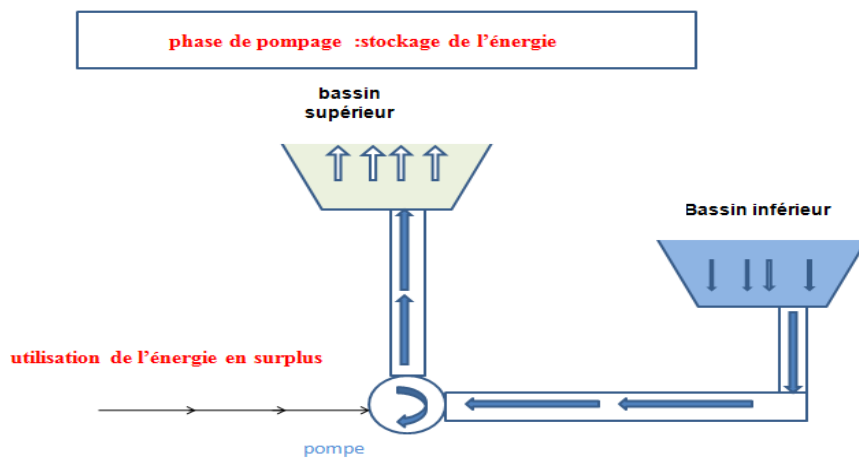


Figure I.16 : Principe de fonctionnement des phases de pompage pour stocker l'énergie [13]

2) Phase turbinage : restitution énergie

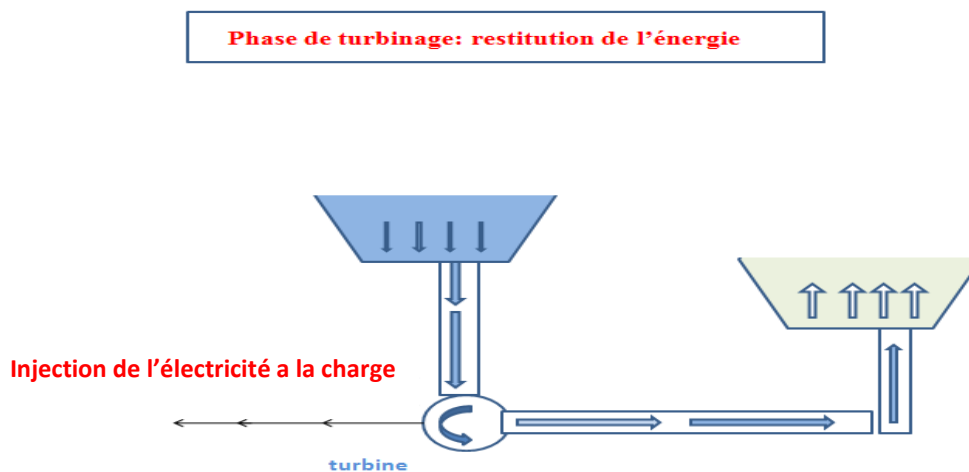


Figure I.17:Principe de fonctionnement des phases de turbinage pour produire de l'électricité [13]

### **I.3.6. Les avantages et les inconvénients des centrales hydroélectriques :**

- **Les avantages :**

- **Verte**

La production de l'électricité avec l'énergie hydraulique n'est pas en elle-même polluante. La seule pollution se produit au cours de la construction de ces énormes centrales.

- **Fiable**

L'hydroélectricité est effectivement une énergie très fiable. Il y a très peu de perturbations en termes de puissance électrique qui soient dues à ce type de centrales. Les pays qui disposent de grandes ressources hydrauliques utilisent cette énergie comme source fournissant la charge de base. [15]

- **Sûre**

Par comparaison à d'autres formes d'énergie, telles que les combustibles fossiles ou l'énergie nucléaire, l'hydroélectricité est beaucoup plus sûre. Il n'y a pas de carburant qui entre en jeu.[15]

- **Les inconvénients :**

- La construction de ces centrales hydrauliques est souvent très coûteuse
- En cas de sécheresse, toute la centrale hydraulique sera dysfonctionnelle et donc aucune électricité ne sera produite [16]

### **I.3.7. Centrale hydroélectrique et stockage d'énergie :**

Les systèmes de stockage hydroélectrique, permettront de stocker l'énergie électrique à des coûts acceptables. Ils interviennent pendant les pics de consommation pour compenser et équilibrer la demande du client sous les commandes simples venant du gestionnaire du système photovoltaïque. En générale la production et la consommation d'électricité propre ne vont pas toujours de pair parce il ya quotidiennement des fluctuations dans l'énergie solaire photovoltaïque. Par conséquent les centrales hydroélectriques conviennent parfaitement pour aider à équilibrer ces fluctuations. [9] En plus Alors de ces systèmes de stockage présentent un avantage caractérisé dans la conservation du caractère renouvelable de l'énergie produite.[9]

### **I.3.8. Principe de fonctionnement du système proposé :**

La production d'électricité des panneaux solaires sera optimisée grâce au stockage d'énergie que permettra une station de transfert d'énergie par pompage ou STEP. Le système se présente sous la forme d'une centrale hydroélectrique réversible (turbinage-pompage) qui adapte en fait la production d'électricité à la demande. Lorsque le système PV fournit un surplus énergie l'eau de bassin inférieur est pompé dans le bassin supérieur .et pendant la nuit

lorsque le système PV connaît un déficit électricité la circulation de l'eau est inversé, la pompe devient alors une turbine et la circulation de l'eau est inversé. Ce turbine provoque le mouvement d'un alternateur qui va produire de l'électricité.

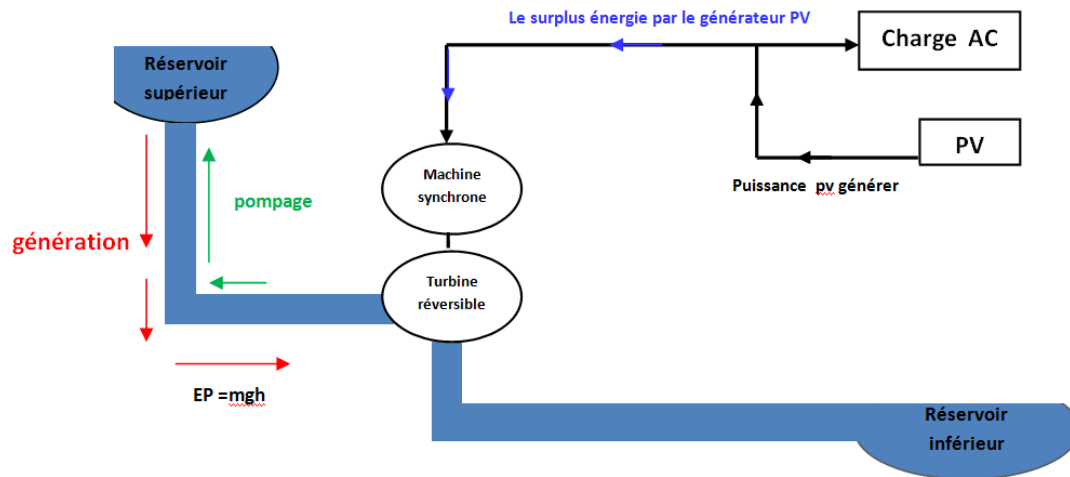


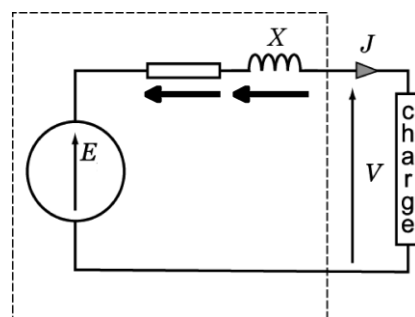
Figure I.18 : schéma d'un système PV+STEP

**I.3.9. Les composants du système :**

Un système PV-STEP est généralement constitué

- Générateur photovoltaïque
- Machine synchronisée
- Pompe/turbine
- convertisseur DC/AC

➤ La machine synchronisée est une machine réversible de conversion électromécanique. [17]

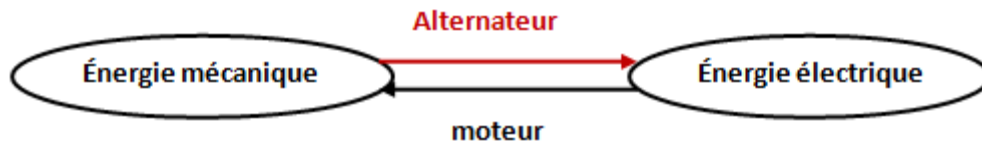


**Figure I.19 :** schéma équivalent d'une machine synchronisée

Les équations générales de fonctionnement de la machine synchronisée peuvent s'écrire sous la forme : [18]

En moteur :  $V = E + R \cdot I + J \cdot X \cdot I$

En alternateur :  $V = E - R \cdot I + J \cdot X \cdot I$

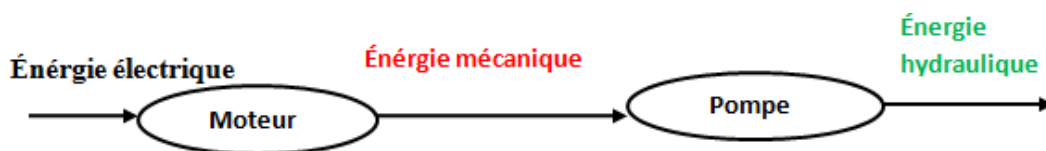


**Moteur** : transforme énergie électrique en énergie mécanique

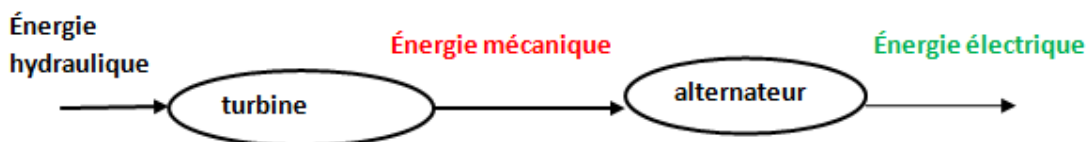
**Alternateur** : transforme énergie mécanique en énergie électrique

➤ Pompe-turbine :

Fonctionnement pompe : lorsque le système photovoltaïque fournit un surplus d'électricité (l'eau du bassin inférieur est pompée dans réservoir. La machine synchrone fonctionne comme un moteur



Fonctionnement turbine : lorsque le système photovoltaïque connaît un déficit de production, la machine synchrone fonctionne comme un alternateur. La circulation de l'eau est inversée.



➤ Convertisseur DC/AC (onduleur) :

Le convertisseur DC/AC ou onduleur est un appareil servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative. En général, Il assure la conversion du courant continu produit par les panneaux en courant alternatif du réseau. Il est donc indispensable pour l'alimentation des charges à courant alternatif. Le choix de l'onduleur dépend des caractéristiques électriques de la pompe alimentée (puissance et tension) [8]

**Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons acquis beaucoup de compétences dans les systèmes de production de l'énergie électrique par les sources renouvelable et particulièrement l'énergie photovoltaïque et l'énergie hydraulique. Toutefois, nous avons obtenus beaucoup de connaissances sur le soleil qui présente la source principale d'énergie reçu par la terre. En plus nous avons acquis des notions de physique complémentaires sur Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire et la décomposition de l'énergie de ce dernier avant d'atteindre le sol. Ce chapitre nous a permet de se familiarisé avec la cellule photovoltaïque et son comportement avec la variation de la température et de l'ensoleillement. En plus de bien connaître le fonctionnement des générateurs photovoltaïques et les types des systèmes photovoltaïques les plus utilisés. Une étude sur les systèmes hydroélectriques et les centrales hydroélectriques STEP a été faite.

En fin à travers la recherche documentaire utilisée dans ce chapitre nous avons initié le principe de fonctionnement de notre système PV STEP proposé pour le stockage d'énergie et avoir un éclaircissement sur l'art de sa conception. De ce fait l'avancement de notre travail sera consacré au dimensionnement optimal de ce système.

# CHAPITRE II

Modélisation et simulation du système solaire - hydroélectrique

### II.1.Introduction :

Le dimensionnement c'est de déterminer les caractéristiques d'une installation pour satisfaire les besoins de l'utilisateur. Pour réaliser des installations PV STEP, on a besoin d'une méthode de calcul et de dimensionnement de haute précision. La modélisation est une étape essentielle qui doit précéder toute phase de dimensionnement, de simulation du système ou d'optimisation.

Dans ce chapitre nous allons présenter les caractéristiques géographiques et météorologiques du site de Mostaganem, dans lequel on a proposé l'installation du système qu'il faut subvenir aux besoins électriques de l'université Mostaganem. Comme nous présenterons aussi les différents modèles mathématiques de chacun de ces éléments composants ce system solaire hydroélectrique. L'algorithme de notre méthodologie contient Les étapes suivantes :

- Connaître la situation géographique et la situation métrologie (la température et irradiations)
- Détermination de la consommation de la charge pendant une année de notre système.
- Évaluation et estimation de la puissance installée de générateur photovoltaïque par méthode PSO (variable de décision) .
- Évaluation le volume d'eau par méthode PSO
- Évaluation de la puissance nominale de la pompe et de l'alternateur par la méthode PSO
- Utilisation du LPSP comme un indice de fiabilité de système

### II.2.Première étape situation du site :

#### II.2.1. Coordonnées géographie :

Une application est faite dans la région de Mostaganem (Latitude :  $35^{\circ}55'52''$  Nord, Longitude :  $0^{\circ}05'21''$  Est, L'altitude par rapport au niveau de la mer : 102 m) [19]



Figure II.1 : Région de Mostaganem

**II.2.2. Données météorologiques :**

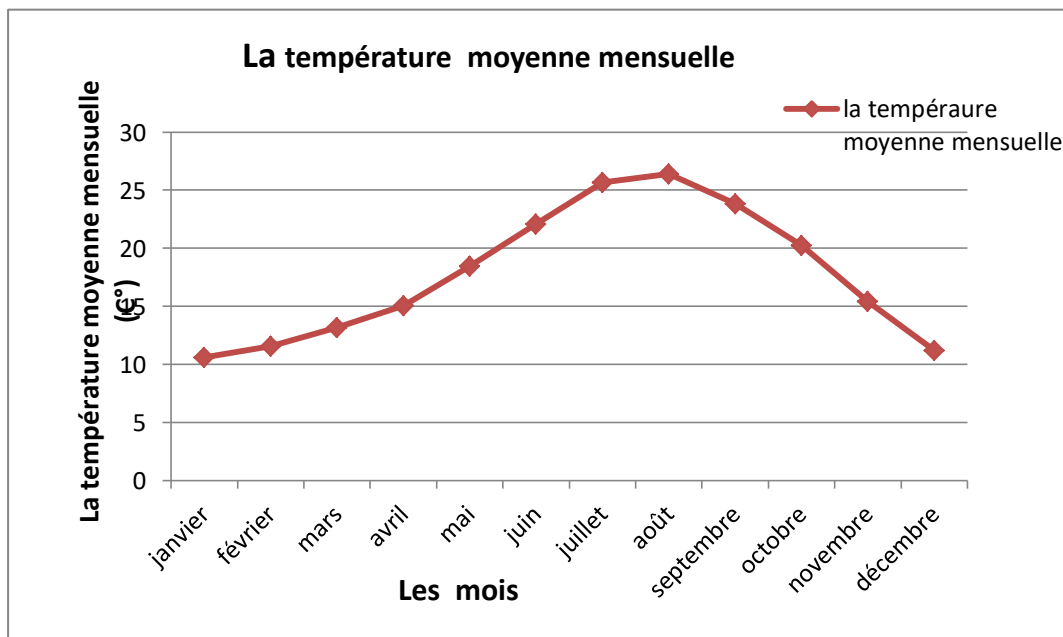
Des mesures ont été enregistrés du mois de Janvier à décembre et sont présentés ci-dessous :

**a- Les variations de la température mensuelle :**

Les mois	la température moyenne mensuelle (C°)
Janvier	10,6
Février	11,55
Mars	13,17
Avril	15,049
Mai	18,47
Juin	22,096
Juillet	25,64
Août	26,38
Septembre	23,83
Octobre	20,25
Novembre	15,4
Décembre	11,21

**Tableau II.1** les variations de la température moyenne mensuelle suivant les donnés de l'année 2017 [20]

Nous avons le graphe des variations de la valeur moyenne de la température mensuelle, ce dernier reflète exactement la variation saisonnière de la région comme le montre la figure (II.2).



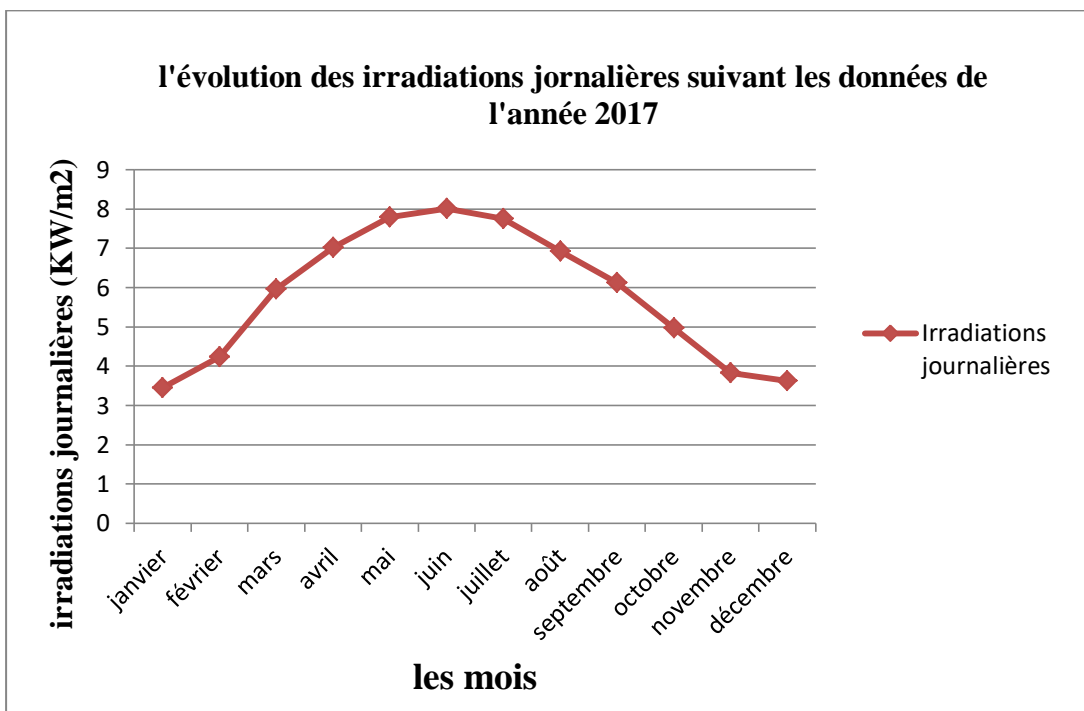
**Figure II.2 :** les variations de la température mensuelle.

**b- Les variations des irradiations journalières :**

Les mois	Irradiations journalière
Janvier	3,45
Février	4,24
Mars	5,96
Avril	7,024
Mai	7,79
Juin	8,01
Juillet	7,75
Août	6,93
Septembre	6,12
Octobre	4,97
Novembre	3,83
Décembre	3,63

**Tableau II .2 :** L'évolution des irradiations journalière suivant les données de l'année 2017 [20]

La figure (II.3) montre l'évolution d'irradiation journalière annuelle.



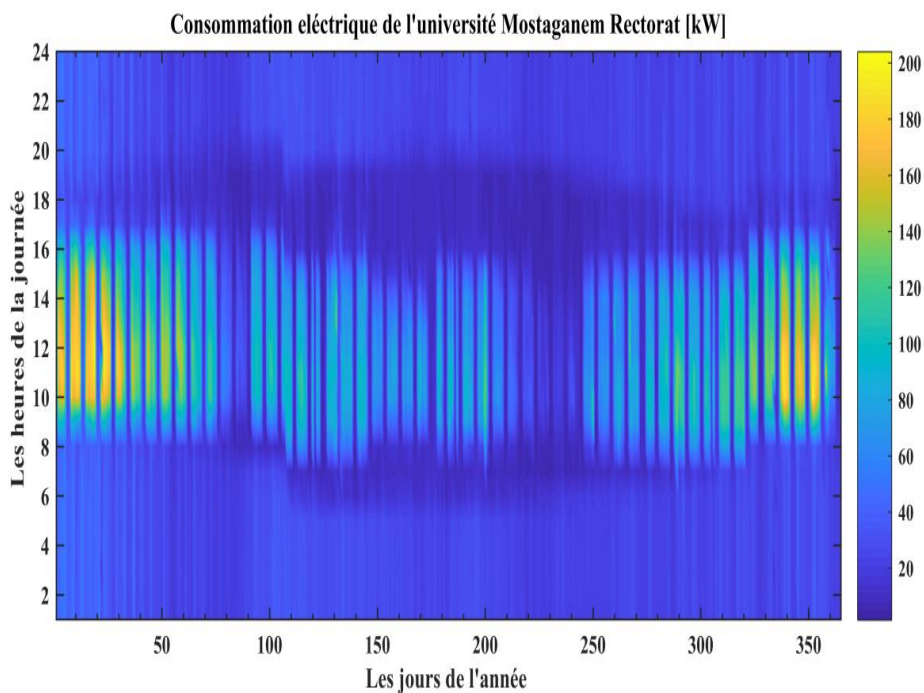
**Figure II.3 :** l'évolution de la somme journalière d'irradiation

Nous avons tracé les deux graphes sur le logiciel Excel à partir des bases de données métrologique, On remarque d'après les graphes que la température journalière et les

irradiations différent d'un mois à un autre. La variation d'irradiation est très faible pendant les premiers mois de l'année puis augmente considérablement pendant la saison d'été. Donc la puissance générée par le générateur PV varie de la même manière. Elle sera très importante pendant les mois d'été et moins importante pendant l'hiver.

### II.3. Deuxième étape : Le Profil de la charge université de Mostaganem :

Nous avons réalisé la simulation de la puissance de charge consommée par le logiciel Matlab. La base de données de consommation électrique de l'université de Mostaganem que nous avons utilisées dans notre travail a été procurée à partir des services de la Sonalgaz [21] la fin de l'année 2017.

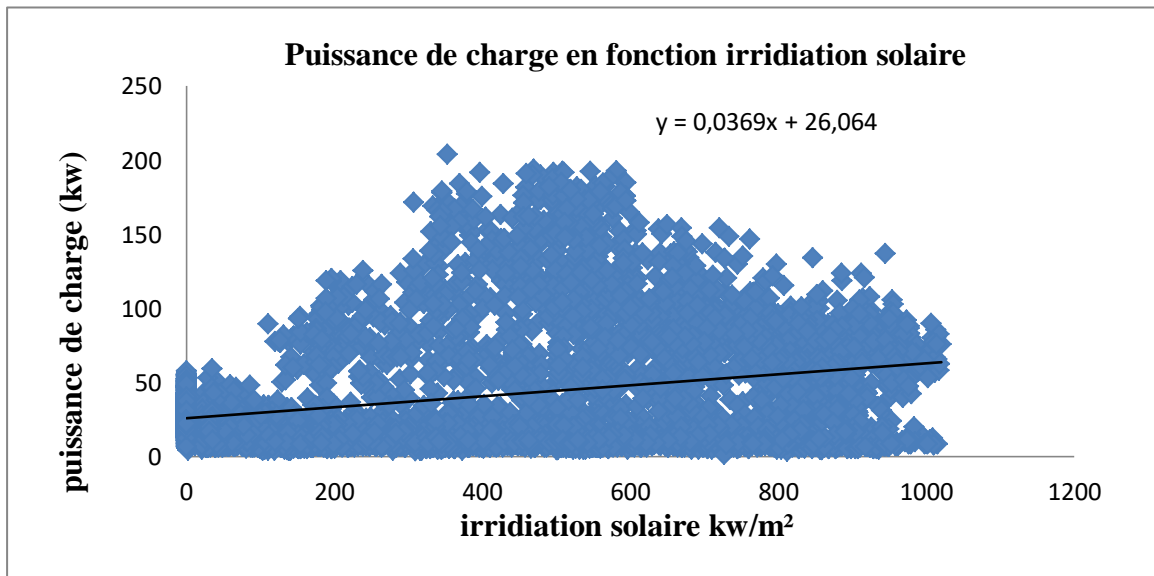


**Figure II.4 :** Consommation électrique de l'université Mostaganem Rectorat [kW].

L'analyse du graphique (Figure II.4) que nous avons obtenus montre que cette consommation électrique de l'université de Mostaganem diffère, d'un jour à un autre pendant toute l'année. Nous avons aussi remarqué que la majorité de l'énergie est utilisée à partir du matin jusqu'à 16h et moins de consommation pendant la nuit. Cependant nous avons illustré que la puissance peut atteindre 200 kW dans le matin et diminue pendant la nuit jusqu'à atteindre 20 kW. Quoique la diminution de la consommation pendant l'été et principalement le mois d'août est très faible à cause des congés annuels des travailleurs et qu'aux vacances des étudiants.

### II.4. Troisième étape le calcul de corrélation entre la charge et les irradiances solaire :

Valeur comprise entre  $-1$  et  $+1$  permettant de mesurer la liaison pouvant exister entre deux variables. Il est égal à la covariance mathématique des variables divisée par le produit des écarts-types. Dans notre cas on cherche s'il y a une relation entre la charge et l'irradiation solaire comme une première évaluation du site.[22]



**Figure II.5:** la puissance de charge en fonction irradiation solaire

Nous avons transféré les bases de données de irradiances et la puissance de la charge sur le logiciel Excel et à partir de ce logiciel nous avons tracé le graphique et calculé le coefficient de corrélation. Nous avons trouvé que le coefficient de corrélation est égal  $0.35$  valeur faible ce qui indique qu'il n'existe pas une relation linéaire entre les deux variables ( $y$  qui représente la charge et  $x$  qui représente irradiances). Lorsqu'on trouve le coefficient de corrélation positive ce qui indique que la charge et les irradiances varient dans le même sens. Dans notre cas lorsque il n'y a pas une relation entre la puissance de la charge et l'irradiation, ce qui nous permet de réfléchir de aux solutions pour résoudre ce problème. Alors parmi ces solutions, l'utilisation d'un système d'énergie de stockage. Pour cette raison, nous avons choisi de combiner deux sources énergie renouvelable, le solaire photovoltaïque et le stockage par hydroélectrique pour assurer le besoin de la charge de façon permanente. Cela rend le système plus fiable.

### II.5. Quatrième étape : Architecture du système solaire photovoltaïque hydroélectrique :

Un système hybride est un système qui utilise au moins deux sources d'énergie différentes. En particulier le système hydroélectrique solaire devient une solution très intéressante pour les applications autonomes. Combiner les deux sources de l'énergie solaire et hydroélectrique

peut fournir une meilleure fiabilité, le système STEP étudié regroupe deux parties pour la production de l'énergie passant par une station de transfert d'énergie pompage turbinage. [23], [24]

Elle est constituée d'une combinaison des générateurs photovoltaïques et stations par pompage pour alimenter une charge donnée (AC).

Les différents composants de l'installation sont reliés au bus alternatif à travers des onduleurs pour la charge AC comme le montre la figure (II.6) [23],[24]

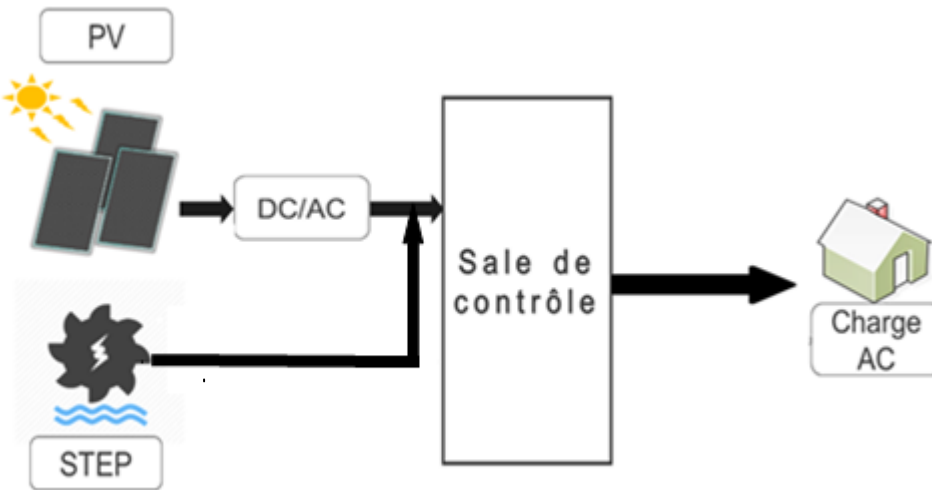


Figure II.6: Schéma d'une station solaire autonome.

### II.6.Cinquième étape : Modélisation du système photovoltaïque-hydroélectrique :

L'objectif est de disposer de modèles suffisamment fiables afin d'effectuer une étude d'optimisation du dimensionnement et de la gestion d'énergie du système complet.

La prédiction des performances d'une cellule/module/générateur photovoltaïque nécessite l'élaboration d'un modèle mathématique permettant l'étude de son fonctionnement pour les différentes conditions météorologiques (éclairage, température, etc....). Les modèles utilisés pour simuler le fonctionnement des modules photovoltaïques tiennent en considération, la variabilité de l'éclairage et de la température du module. [25] ,[26]

#### II.6.1. Modèle du module photovoltaïque :

Le module photovoltaïque converti l'éclairage solaire directement en électricité, son courant et sa tension de sortie dépendent essentiellement de l'éclairage et de température du module [26] .

Pour calculer la puissance de sortie d'un module PV, on a utilisé l'équation suivante : [27]

$$P_{PV}(t) = P_{rate\_pv} \times \frac{G}{G_{ref}} \times [1 + K_t(T_{cell} - T_{ref})] \times \eta_{pv} \quad (II.1)$$

$P_{PV}(t)$  : Puissance générée par un module PV.

$P_{rate\_pv}$ : Puissance nominale dans des conditions de test standard.

$G$  : Rayonnement solaire horaire.

$G_{ref}$ : Éclairement dans les conditions de référence ( $1000W/m^2$  et  $25^\circ C$ ).

$K$  : Coefficient de température de la puissance nominal et sa valeur égale  $- 3.7 \times 10^{-3}$ .

Pour les cellules mono et polycristallines.

$\eta_{pv}$ : Facteur de perte global. Suite à notre résultat dans la littérature nous avons que ce rendement  $\eta_{pv}$  varie de entre [0.8 0.87] pour cette raison nous avons choisi le rendement 0.8.

$T_{ref}$  : Température ambiante dans les conditions de référence ( $25^\circ C$ ).

$T_{cell}$  : Température de la cellule PV exprimée ( $^\circ C$ ). Peut être calculée à partir de l'équation suivante : [9]

$$T_{cell} = T_{amb} + \left( \frac{NOCT - 20}{800} \right) \times G \quad (II.2)$$

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

$NOCT$  : (Normal Operating Cell Température) est la température de fonctionnement nominal des cellules PV (en  $^\circ C$ ) dans les conditions suivantes: un éclairage de  $800 W/m^2$ , une température ambiante de  $20^\circ C$  et une masse d'air optique AM égale à 1.5. La valeur de  $NOCT$  : est généralement donnée par le constructeur (autour de  $45^\circ C$ ).

### II.6.1.1. Analyse des modèles des panneaux solaire :

Nous analyserons les caractéristiques électriques du panneau SPR315E pour produire une Puissance de 315 W.

A partir des notices techniques fournies par le constructeur disponibles dans la référence, nous avons déterminé les paramètres du panneau dans le tableau.[28]

Puissance nominal	$P_{nom}$	315	<b>W</b>
Tension a puissance maximal	$V_{pm}$	54,7	<b>V</b>
Courant à puissance maximal	$I_{pm}$	5,76	<b>A</b>
Tension en circuit ouvert	$V_{co}$	64,6	<b>V</b>
Courant de court-circuit	$I_{cc}$	6,16	<b>A</b>
Coefficient de température( $T_{cc}$ )	$\alpha$	3,15	<b>mA/K</b>

**Tableau II.3** la caractéristique du panneau SPR315E [28]

### a) Les variations de la puissance de sortie de générateur photovoltaïque en fonction d'irradiations :

A partir de ces données nous avons travaillé sous les conditions suivantes: une température  $T_a=25^\circ\text{C}$ ,  $G=1000\text{W/m}^2$ . **STC**

Pour différentes valeurs de irradiations nous avons étudié l'influence de irradiations sur la puissance de sortie de générateur. et a température ambiante fixe =30

**Tableau II.4** les variations de la puissance PV en fonction d'irradiations

<b>G ( w/m<sup>2</sup>)</b>	400	600	800	1000
<b>P<sub>pv</sub>(t) (kw)</b>	0.1127	0.1652	0.2151	0.2624

Irradiation est un paramètre très important dans le comportement des cellules PV le tableau II.4 décrit le comportement du module sous une température fixe et à irradiations comprises entre et 400 et 1000 .Nous remarquons que la puissance maximale disponible. Augmente avec irradiations

### b)-Variations de la puissance de générateur photovoltaïque en fonctions de la température :

Pour différentes valeurs de la température nous avons étudié l'influence de la température sur la puissance de sortie de générateur. et pour des éclaircissements fixe de  $800(\text{W/m}^2)$ ,

**Tableau II.5** les variations de la puissance PV en fonction de la température

<b>T °c</b>	0	30	45	70
<b>P<sub>pv</sub>(t) (kw)</b>	0.2367	0.2151	0.2044	0.1828

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules PV. Le tableau II.4 décrit le comportement du module sous un éclaircissement fixe de  $800 (\text{W/m}^2)$ , et à des températures comprises entre  $0^\circ\text{C}$  et  $75^\circ\text{C}$ . Nous remarquons que la puissance de la sortie de générateur photovoltaïque diminue avec l'augmentation de la température.

## II.7.Sixième étape : Modèle du module hydroélectrique :

### II.7.1. Opération de stockage hydroélectrique par station de Pompage (STEP) :

Le système de transfert d'énergie (STEP) exploite simplement l'excès d'énergie renouvelable solaire pour pomper de l'eau d'un réservoir inférieur (mer) à un réservoir supérieur. Le fonctionnement de STEP est modélisé par les équations suivantes : [27]

$$P_{STEP} = \rho Q g h \eta_{STEP} \quad (\text{II.3})$$

$P_{STEP}$ : Capacité nominale de la turbine à eau (KW).

$Q$  : Débit d'eau ( $m^3/s$ ).

$g$  : Accélération ( $9,81m/s^2$ ).

$h$  : Hauteur d'hydroélectricité 380 (m).

$\eta_{STEP}$ : Efficacité de STEP et peut être estimé à 80% en charge et en décharge.

$$E_{step} = \left( \frac{v(t)}{3600[s]} \right) \times \rho \times g \times \eta_{STEP} \quad (\text{II.4})$$

$E_{step}$ :Energie stockée dans le réservoir supérieur (kWh).

Ce dernier peut être évalué en utilisant l'équation suivant : [27]

$$V(t) = V_{(t-1)} - V_t^{DIS} + V_t^{pump} \quad (\text{II.5})$$

Le volume d'eau ( $v_t^{DIS}$ ) Utilisé pour produire de l'électricité ( $E_{step}^G$ )  
Peut être calculé à l'aide des équations : [27]

$$v_t^{DIS} = \frac{E_{step}^G}{g\eta_{step}*h} \quad (\text{II.6})$$

$$E_{step}^G = \min \left[ \min \left( \frac{v_{t-1}}{3600[s]}; Q \right) \rho g \eta_{step} * h; p_{dif} \right] \quad (\text{II.7})$$

Le volume d'eau  $v_t^{pump}$  pompé dans le réservoir supérieur est calculé sur la base équations suivantes: [27]

$$E_{STEP}^p = \min \left[ \min \left( \frac{v_{max} - v_{t-1}}{3600[s]}; Q \right) \rho g \eta_{step} * h; p_{ss} \right] \quad (\text{II.8})$$

$$v_t^{pompe} = \frac{E_{step}^p}{g\eta_{step}*h} \quad (\text{II.9})$$

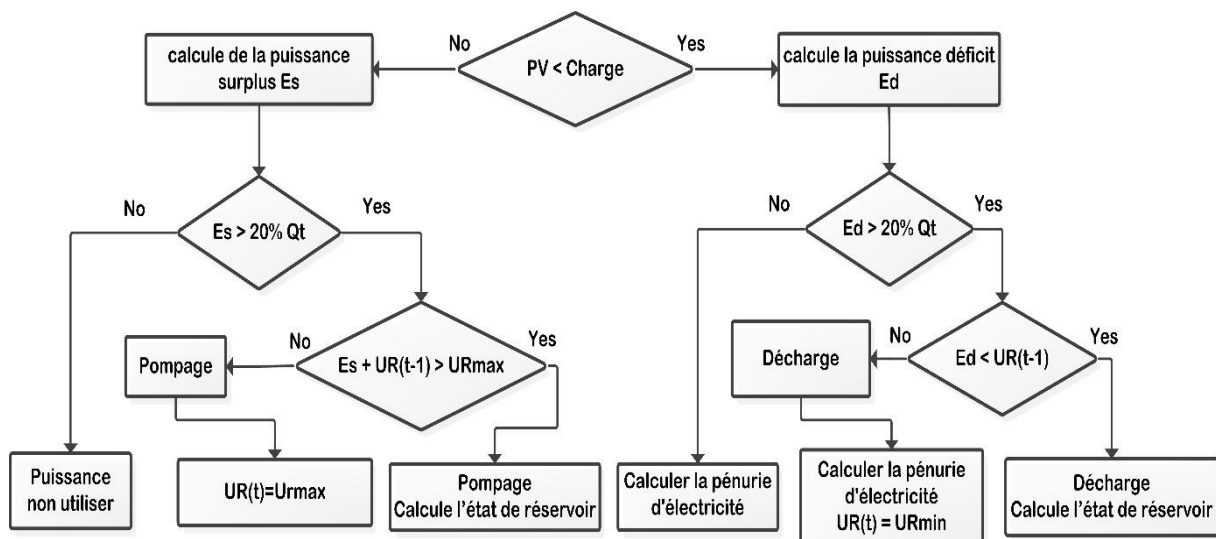
### II.8.Septième étape : La gestion d'énergie :

La stratégie de gestion est primordiale dans un système solaire autonome d'énergie, car c'est elle qui décide quelles charges sont connectées et comment utiliser le stockage si disponible. La stratégie de gestion d'énergie qui sera développée dans le cadre de ce projet de recherche doit permettre au système solaire autonome de s'adapter aux variations météorologiques. Une gestion d'énergie des composants d'un système doit garantir la stabilité du système en tout temps. [29]

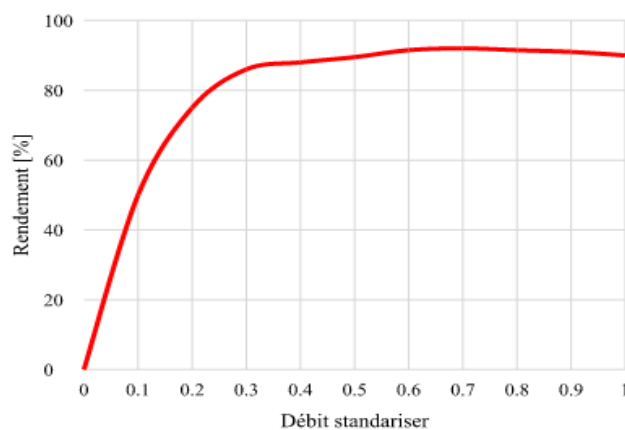
**II.8.1. La gestion d'énergie entre la centrale PV, le stockage et la charge :**

L'organigramme donné (Figure II.6) décrit les situations pouvant survenir lors du fonctionnement du système solaire tout d'abord, lorsqu'il y a un excès d'énergie solaire renouvelable et un besoin de stockage, où la contrainte de capacité maximale devrait être prise en compte. Deuxièmement, l'électricité produite à partir de PV correspond à la charge demande, ce qui est rarement le cas. Enfin, énergie solaire ne parvient pas à fournir la charge et l'algorithme développé prend en compte la contrainte de profondeur minimale de décharge et calcule avec précision la quantité d'énergie non assuré (énergie déficit).

Nous avons limité la plage de fonctionnement du STEP au minimum 20% de sa puissance nominal. Cela peut être expliqué par la variation non-linéaire entre le rendement de STEP et le débit volumique qui travers la turbine [30] . La figure II.8 présente la relation entre le rendement d'une turbine Pelton et le débit (valeur standardiser % ). Donc ce contraint de 20% assure le fonctionnement de STEP à un rendement de plus de 80%.



**Figure II.7 :** L'algorithme de la gestion d'énergie entre la centrale PV, le stockage et la charge.



**figure II.8 :** la variation du rendement en fonction de débit volumique [31] .

Les paramètres  $P_{plus}$ , et  $P_{moins}$  représentent respectivement, les limites inférieures et supérieures de la puissance des générateurs PV.

- **Les données d'entrées de cet algorithme sont:**
  - l'éclairement solaire sur un plan incliné pour chaque heure d'un jour de l'année.
  - la température ambiante, pour chaque heure d'un jour de l'année.
  - La puissance de la charge pour chaque heure d'un jour de l'année.

### **II.9. Huitième étape : la configuration optimale du système solaire hydroélectrique :**

L'objectif principal de ce dimensionnement est de déterminer la configuration optimale de la centrale PV-STEP pour satisfaire la puissance demandée par la charge.

Plusieurs méthodes du dimensionnement des systèmes PV-STEP ont été réalisées par des chercheurs. La méthode que nous allons utiliser, se base sur une analyse technico-économique. Nous allons en premier lieu appliquer la méthode de la probabilité de non satisfaction de la charge LPSP (Loss of Power Supply Probability). Par la suite, à partir des configurations qui satisfont la demande obtenue nous utilisons l'approche économique pour déterminer la configuration optimale. [23]

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté les caractéristiques géographiques et météorologiques du site de Mostaganem, dans lequel on a proposé l'installation du système qu'il faut subvenir aux besoins électriques de l'université de Mostaganem rectorat. Les différents modèles mathématiques de chacun de ces éléments composants ce system solaire hydroélectrique ont été présenté. Nous avons appliqué la méthode intelligente PSO comme un indice de fiabilité dans le prochain chapitre.



## CHAPITRE III

**Optimisation du dimensionnement des systèmes solaires et  
hydroélectrique**

### III.1. Introduction :

Dans les chapitres précédents, nous avons analysé et traité les données du site afin d'évaluer le gisement de production d'énergie d'origine renouvelable ainsi que le profil de consommation. Puis nous avons établi les modèles de chaque composant du système (PV-STEP) et développé un outil de simulation du système complet à l'aide du logiciel MATLAB. On va montrer dans ce chapitre la méthode utilisée pour résoudre le problème d'optimisation de dimensionnement du système hybride PV-STEP, afin d'assurer la continuité d'approvisionnement en électricité avec un coût d'investissement acceptable. Aussi on va présenter les résultats de simulation et optimisation du système

Pour dimensionner de manière optimale notre système, on a choisi la méthode méta-heuristique Particle Swarm Optimization (PSO) selon deux critères d'optimisation, à savoir : le critère technique qui est la fiabilité, développée selon le concept de la probabilité de perte d'énergie (LPSP) et le critère économique qui est représenté par le coût initial du système.

### III.2. Méthodes d'optimisation utilisées :

La méthode de dimensionnement présentée dans notre travail consiste à déterminer la configuration optimale du système qui permet de satisfaire les besoins de la charge en électricité selon deux critères d'optimisation qui sont la fiabilité et le coût [32].

### III.3. Procédure d'optimisation du dimensionnement d'un système solaire hydroélectrique :

#### III.3.1. Critères d'optimisation

La fiabilité du système d'alimentation est considérée comme un critère primordial au processus de conception des systèmes PV-STEP. Dans notre mémoire, comme indiqué ci-dessus, la fiabilité du système est exprimée en termes de probabilité d'insatisfaction de la demande LPSP.

Notre objectif est de trouver la meilleure configuration possible entre la puissance nominale du générateur photovoltaïque (PS), la puissance nominale de la pompe/turbine (pnp) et le volume d'eau ( $v$ ) afin de minimiser le coût initial de système et réduire le taux de coupure d'électricité (LPSP) pour satisfaire les besoins en énergie de la charge [33].

#### III.3.1.1. Fonction coût économique : (détermination de la configuration optimale selon l'analyse économique)

L'optimisation du système PV-STEP consiste à choisir parmi l'ensemble de configurations satisfaisant le critère technique (LPSP désirée), Après la détermination des différents triplets (PS, pnp,  $V$ ), qui satisfont la probabilité 'LPSP' désirée. Par ailleurs, nous avons

principalement pour chaque composant du système trois types de coût: un coût initial, un coût de maintenance et un coût de renouvellement des composants [34]

Nous avons s'intéressons par le calcul de cout initial.

### ➤ **Cout initial :**

Le coût d'investissement initial  $C_t$  : est la somme du prix de tous les composants du système et d'autres coûts initiaux, y compris ceux du génie civil, des infrastructures et de l'installation :

$$C_t = C_{pv} + C_p + C_r + C_{in} \quad [35]$$

$C_t$  est le cout d'investissement total,  $C_{pv}$  est le cout des panneaux photovoltaïques,  $C_p$  cout de la pompe/turbine et  $C_r$  le cout de la construction du réservoir supérieur,  $C_{in}$  est le cout du convertisseur DC/AC.

Les composants	Le prix (Euro/KW)
Panneaux photovoltaïque	800
La pompe/ turbine réversible	1500
Réservoir supérieur	10
Convertisseur DC/AC	300

**Tableau III.1** : les données économiques [36]

### III.3.1.2. Fonction probabilité d'insatisfaction de la demande

Le dimensionnement du système PV –STEP joue un rôle primordial dans l'étude de ses performances.

La LPSP (Loss of Power Supply Probability) est un indicateur, permettant de mesurer la fiabilité du système. Elle est déterminée par le rapport entre la somme de toutes les valeurs de l'énergie déficit pour la même période sur 'énergie totale demandée par la charge autrement dit elle exprime le taux de non-satisfaction de la charge [37].

La probabilité de perte d'énergie 'LPSP' est définie par la relation suivante : [38]

$$LPSP[\%] = \frac{\sum_1^{8760} E_{loss}}{\sum_1^{8760} pch}$$

Où :

**LPSP:** indicateur pour mesurer la fiabilité du système

**Pch :** puissance demandé par la charge a l'heure T

**E<sub>LOSS</sub>:** Énergie déficit à l'heure t.

$T = 8760$  heures

La valeur de LPSP est comprise dans l'intervalle [0-1].

Si : LPSP = 0 (La charge est totalement satisfaite).

Si : LPSP = 1 (La charge ne sera jamais satisfaite).

L'un des objectifs de la procédure d'optimisation est de trouver la combinaison entre les différents éléments du système PV-STEP qui minimum un LPSP inférieur autorisé par l'utilisateur.

### III.4. Formulation du problème d'optimisation

Formulation d'optimisation du PV-STEP peut être traitée comme un problème qui vise à minimiser le coût du système (qu'il soit énergétique ou économique). Dans ce cas, le problème peut être décrit selon la formulation mathématique suivante :[33]

- **formulation:**

Fonction objectif optimum

Le cout  $\longrightarrow$  minimum

**Sous réserve de la restriction imposée par le critère de satisfaction énergétique :**

LPSP [%] < LPSP désiré

**LPSP désiré** est la probabilité maximale d'insatisfaction de la demande autorisée par le consommateur pour la période considérée un ans). Nous avons utilisé la méthode PSO pour trouver les valeurs optimaux des variables décision ( $P_n$  du PV,  $P_n$  turbine/pompé, volume d'eau) qui satisfaire la fiabilité 95%.

**Les variables décision** sont la puissance nominal de la turbine/pompe ,le volume d'eau et la puissance nominale du PV.

### III.5. Qu'est-ce qu'un problème d'optimisation :

Un problème d'optimisation se définit comme la recherche du minimum ou maximum (optimum) d'une fonction donnée. On peut aussi trouver des problèmes d'optimisation pour lesquels les variables de la fonction à optimiser sont soumis à des contraintes qui évoluer dans une certaine partie de l'espace de recherche .dans ce cas, on a une forme particulière de ce que l'on appelle un problème d'optimisation sous contraintes [39]

### III.6. Fonction Objectif :

Équation mathématique qui représente ce qu'on désire améliorer dans un dispositif. Elle est aussi appelée critère d'optimisation, fonction coût, fonction d'adaptation, ou encore performance (fonction fitness).[39]

### III.7. Méthodes méta heuristiques

Le mot méta heuristique est composé de deux mots ; le mot méta qui est un préfixe signifiant "au-delà" ou bien "dans un niveau supérieur"; et le mot heuristique qui vient du verbe «heuriskein » et qui signifie 'trouver'.

Les méthodes méta heuristiques apparues à partir des années 1980, permettent de trouver une solution de bonne qualité en un temps de calcul en général raisonnable, sans garantir l'optimalité de la solution obtenue.

Les méta heuristiques sont un ensemble d'algorithmes d'optimisation visant à résoudre les problèmes d'optimisation difficiles. [32]

### III.8. Méthodologie :

Il existe plusieurs méthodes d'optimisation méta heuristiques .

Dans notre travail on a utilisée la méthode Particule Swarm Optimization (PSO) est définies ci-dessous.

#### III.8.1. Optimisation par essaim de particules (PSO)

L'optimisation par essaim particulaire (OEP), ou Particle Swarm Optimization (PSO) en Anglais, est un algorithme évolutionnaire qui utilise une population de solutions candidates pour développer une solution optimale au problème. Cet algorithme a été proposé par Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy (socio-psychologue) en 1995. Il s'inspire à l'origine du monde du vivant, plus précisément du comportement social des animaux évoluant en essaim, tels que les bancs de poissons et les vols groupés d'oiseaux. L'essaim de particules correspond à une population d'agents simples, appelés particules. Chaque particule est considérée comme une solution du problème, où elle possède une position solution) et une vitesse. De plus, chaque particule possède une mémoire lui permettant de se souvenir de sa meilleure performance (en position et en valeur) et de la meilleure performance atteinte par les particules «voisines» (informatrices) : chaque particule dispose en effet d'un groupe d'informatrices, historiquement appelé son voisinage.[40]

#### III.8.2. Principe fonctionnement de PSO:

Dans cet algorithme, les solutions candidates d'une population, appelées des particules, Coexistent et évoluent simultanément en se basant sur le partage des connaissances avec les particules voisines. Alors qu'il volait à travers l'espace de recherche, chaque particule génère

une solution utilisant son vecteur vitesse. Chaque particule modifie sa vitesse pour trouver une meilleure solution (position) en appliquant sa propre expérience de vol (c-à-d. mémoire ayant la meilleure position trouvée dans les vols précédents) et l'expérience de particules voisines (c-à-d meilleure solution trouvée de la population).

Le déplacement d'une particule est influencé par trois composantes:

- **une composante d'inertie** : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement.
- **une composante cognitive** : la particule tend à se fier à sa propre expérience et, ainsi, à se Diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée.
- **une composante sociale** : la particule tend à se fier à l'expérience de ses congénères et, ainsi, à se diriger vers le meilleur site déjà atteint collectivement par l'essaim.

Dans un espace de recherche de dimension  $\square D$  la particule  $i$  de l'essaim est modélisée par son vecteur position et par son vecteur vitesse  $\vec{v}_{ij} = (v_{i1}v_{i2}\dots v_{iD})^T$ .

La qualité de sa position est déterminée par la valeur de la fonction objective en ce point. Cette particule garde en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, que l'on note  $\vec{p}_{ij} = (p_{i1}p_{i2}\dots p_{iD})^T$ . La meilleure position atteinte par ses particules voisines est noté  $\vec{g}_l = (g_1g_2\dots g_D)^T$ . [40]

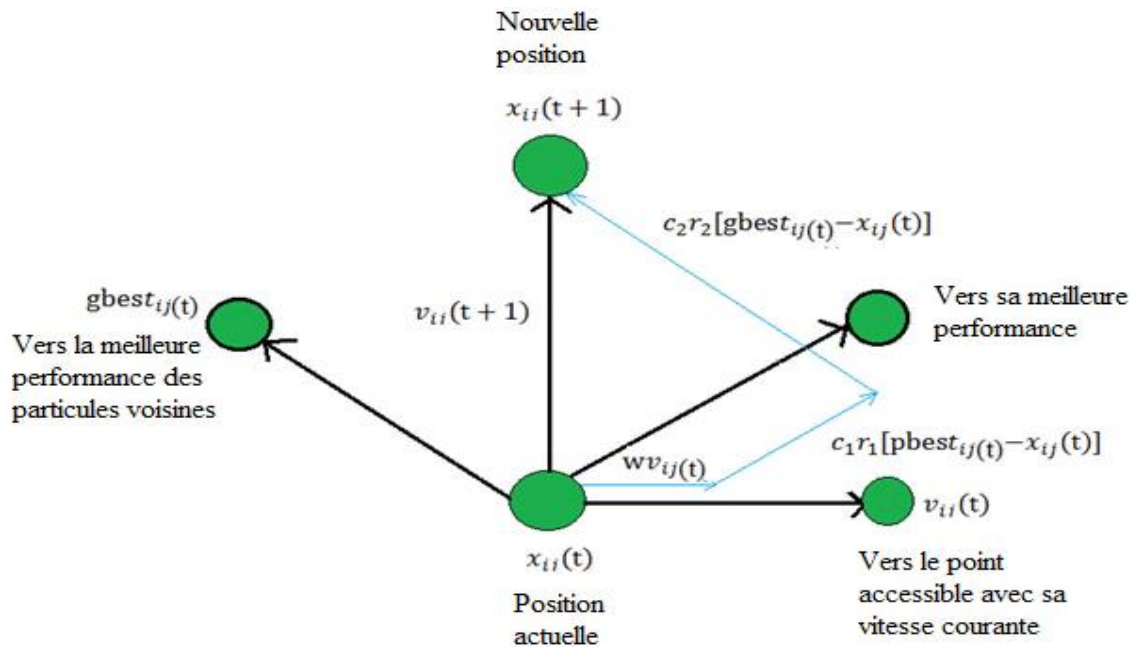


Figure III.1: - Déplacement d'une particule [40]

### III.8.3. Formulation Mathématique du PSO :

Dans un espace de recherche de dimension D, la particule i de l'essaim est modélisée par son vecteur position  $\bar{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{iD})$  et par son vecteur vitesse .

$\bar{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, \dots, v_{iD})$  Cette particule garde en mémoire la meilleure position par la quelle elle est déjà passée, que l'on note)  $\bar{p}_{ibest} = (p_{i1best}, p_{i2best}, p_{i3best}, \dots, p_{iDbest})$ . La meilleure position atteinte par toutes les particules de l'essaim est notée

$$\bar{G}_{ibest} = (G_{i1best}, G_{i2best}, G_{i3best}, G_{iDbest}).$$

Au temps t , le vecteur vitesse est calculé à partir de l'équation

$$V_{ij} = w.V_{ij}(t-1) + c1.r1.(P_{ijbest}(t-1) - X_{ij}(t-1)) + c2.r2.(G_{jbest} - X_{ij}(t-1)),$$

$$j \ni \{1, \dots, D\} \quad (III-1)$$

La position au temps t de la particule i est alors définie par l'équation

$$X_{ij}(t) = X_{ij}(t-1) + V_{ij}(t) \quad j \ni \{1, \dots, D\} \quad (III-2)$$

Où

- W est en général une constante appelée, coefficient d'inertie, c1 et c2 sont deux constantes appelées coefficients d'accélération, r1 et r2 sont deux nombres aléatoires tirés uniformément dans [0,1] à chaque itération et pour chaque dimension.
- $w.V_{ij}(t-1)$  Correspond à la composante physique du déplacement. Le paramètre w contrôle l'influence de la direction de déplacement sur le déplacement futur. Il est à noter que, dans certaines applications, le paramètre w Peut être variable.
- $c1.r1.(P_{ijbest} - X_{ij}(t-1))$  correspond à la composante cognitive du déplacement où  $c_1$  contrôle le comportement cognitif de la particule.
- $c2.r2(G_{jbest} - X_{ij}(t-1))$  correspond à la composante sociale du déplacement, où c2 contrôle l'aptitude sociale de la particule. [41]

Les gammes appropriées de valeur pour c1 et C2 sont de 1 à 2, mais 2 est le plus approprié dans beaucoup de cas.

**Le coefficient d'inertie est donné par :**

$$w = w_{\max} - \left( \frac{w_{\max} - w_{\min}}{k_{\max}} \right) * k$$

Où:

$k_{\max}$  , k sont respectivement le nombre maximum des itérations et le nombre d'itération courante.  $w_{\min}$  et  $w_{\max}$  sont respectivement les coefficients minimum et maximum d'inertie.

Le coefficient d'inertie W joue un rôle important dans la procédure de recherche. Elle garantit un équilibre entre la recherche locale et la recherche globale, un bon choix de cette fonction augmente l'efficacité de la méthode pour avoir une solution Globale. L'expérience a montré que la diminution linéaire de la valeur de W de 0.9 à 0.4 au cours de la procédure de recherche donne des meilleurs résultats. [40]

Dans cette technique intelligente on utilise :

- Indice économique (le cout)
- Indice de fiabilité (LPSP pour arriver à notre objectif et déterminer la puissance à installer pour chaque source.
- Les nombres itérations est égal 100
- Les variables décision (la puissance nominale de la pompe/turbine et la puissance nominale du générateur PV.

### III.9. Description de la procédure d'optimisation

Le principe de la procédure qui a été mise en place pour réaliser l'optimisation en reliant la simulation du système (PV-STEP) à la méthode d'optimisation PSO sous l'environnement MATLAB.

Les données nécessaires à la simulation du système PV -STEP:

- Les paramètres des modèles PV et la pompe et la turbine
- Les données de la température et de l'irradiation et du profil de consommation de la charge par un an,
- Les paramètres des coûts (économique)

Les données nécessaires à la méthode d'optimisation :

- Les paramètres à optimiser
- Les contraintes (restriction imposée par le critère de satisfaction énergétique LPSP désiré). Afin de trouver les valeurs optimales des variables décision

L'ensemble des simulations est réalisé sous MATLAB

### III.10. Les résultats de dimensionnement :

D'après la méthode de dimensionnement que nous avons appliqué sur le logiciel Matlab on obtient :

Les variables décision pour LPSP=95% et nombre itérations =100

Les variables décision	La valeur optimale
La puissance nominale du générateur PV (KW)	491.43
Puissance nominal de la turbine (KW)	53,02kw
Le volume d'eau ( $m^3$ )	944,84

**Tableau III.2** les valeurs optimal des variables décision

Nous avons calculé la valeur de cout initial de notre système sur le logiciel Matlab on obtient :

**Le cout initial=5,437\*10<sup>5</sup>€**

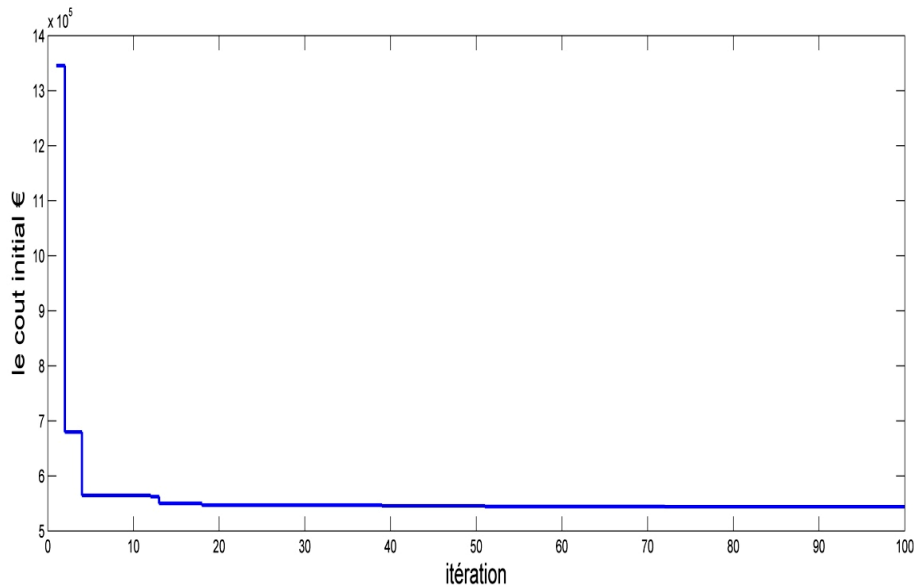


Figure III.2: la variation du coût en fonction du nombre d'itération (pour LPSP 0 ,05).

### III.10.1. Le dimensionnement de convertisseur :

Pour équilibrer les flux d'énergie dans énergie solaire hydroélectrique entre le AC et DC les composants (convertisseurs / inverseurs) sont nécessaires. Les convertisseurs sont utilisés pour transférer l'alimentation d'AC à DC et les inverseurs transfèrent DC à AC. Différent méthodes de dimensionnement sont utilisées dans la littérature pour le dimensionnement des convertisseurs de puissance, l'étude de charge maximal est utilisé pour le dimensionnement du convertisseur qui peut être. Exprimé comme suit.

Où :

$P_{max}$  est la demande de charge maximale

$\eta_{conv}$  est efficacité de convertisseur / onduleur [42]

$$P_{conv} = \frac{P_{max}}{\eta_{conv}}$$

A partir des données de la puissance de la charge nous avons trouvé que la puissance maximal de la charge est égal 200 KW

$$P_{max} = 200KW = 0.5$$

$$\eta_{conv} = 0.95$$

$$P_{conv} = \frac{200 * 1000}{0,95} = 210,52KW$$

Pour note système on choisi le convertisseur qui a une puissance nominal  $\geq 210,52$  KW

### III.10.2. Dimensionnement du réservoir :

Souvent, la disponibilité de l'énergie ne coïncide pas avec la demande de consommation des usagers. De ce fait, il est nécessaire de stocker l'eau dans un réservoir, de telle sorte qu'elle peut y être extraire au besoin pour produire de l'électricité le dimensionnement du réservoir devra prendre en compte.

La production et la charge doivent toujours être parfaitement équilibrées pour assurer une qualité de puissance et une fiabilité élevées. [43]

#### L'état de réservoir :

- **Etat de décharge : (génération)**

Dans le cas où la quantité PV est inférieure à la demande charge et la puissance moins supérieur à  $20\% * Q * h * g * \eta$  .le déficit d'énergie sera couvert par le réservoir de stockage

- **Etat de charge: (pompage)**

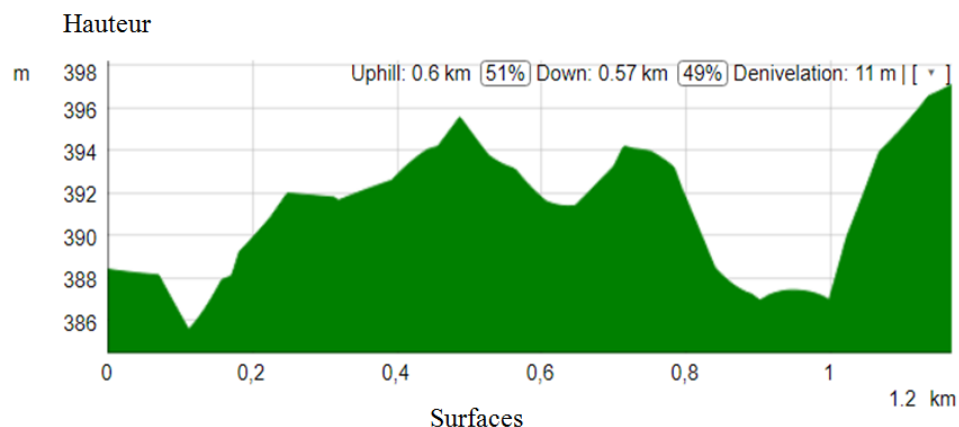
Dans le cas où la quantité PV est supérieur à la demande charge et la puissance plus supérieur à  $20\% * Q * h * g * \eta$  , le surplus d'énergie sera couvert par le réservoir de stockage.

- **Le déficit énergie**

Un déficit énergie se produit lorsque la quantité PV par photovoltaïque est insuffisante pour satisfaire les besoin en électricité, il peut être dû à un moindre ensoleillement d'un jour ou à une surconsommation de la part des utilisateurs.

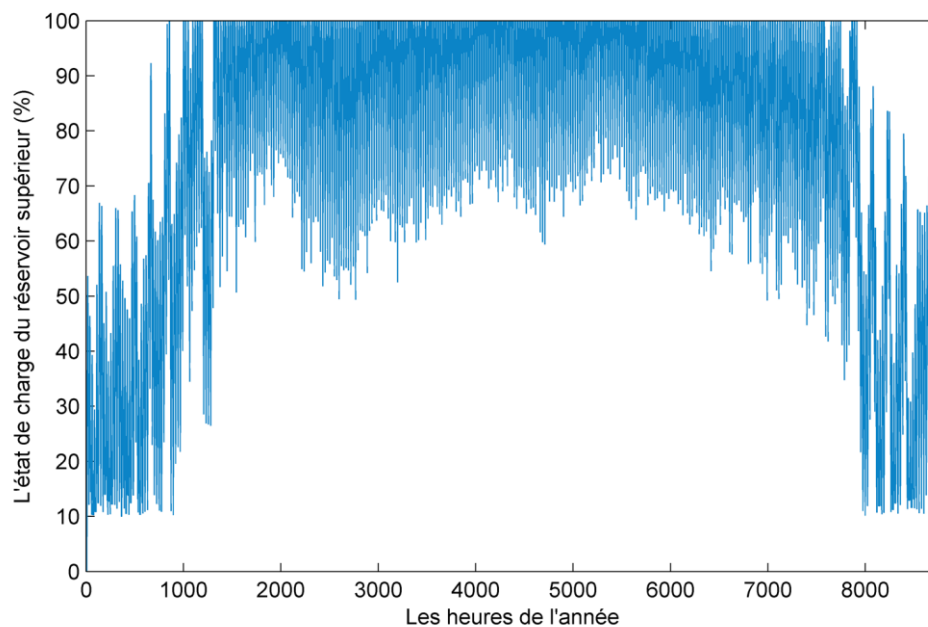
Les deux figures justifié la faisabilité de construction d'un réservoir a hauteur de 380 m , avec une surface plus de 1.2m<sup>2</sup>). [44]

À partir des donnés topographie nous avons déterminé la hauteur entre la source de pompage (la mer) et le point d'installations de notre réservoir.





L'état de charge du réservoir supérieur% est représenté sur la figure III.3



**Figure III.3** L'état de charge du réservoir supérieur%

Nous avons réalisé la simulation de l'état de charge du réservoir supérieur à partir de logiciel Matlab, Cette figure exprime l'état de réservoir on quatre saison on remarque que l'état de réservoir est n'est pas stable, les unités de l'état de charge sont des points de pourcentage (0%=vide, 100% complet).

Pour les jours type d'hiver sur la figure du début de simulation jusqu'à d'environ 8h de fonctionnement de système on constate que le l'état de charge du réservoir est nulle cela est du au fait que pendant cette plage de fonctionnement le système solaire hydroélectrique fournit presque pas d'énergie, puis varie un très peu atteint 10% dans le matin ,Puis augmente

considérablement elle atteint 100% durant les vacances et à partir de fin avril jusqu'à fin juin diminue lorsque la demande de l'électricité augmente.

Dans la saison d'été les résultats montrent que l'état de charge du réservoir atteint 100% durant le matin lorsque les étudiants sont en vacances et l'ensoleillement est plus fort puis diminue de 50% de l'intervalle [18h-8h].

Dans la saison d'automne les résultats montrent que l'état de charge du réservoir diminue de 50% de l'intervalle [10h-16h] lorsque la demande de consommation augmente et l'ensoleillement est plus faible puis diminue de 10%

### L'état de décharge de réservoir pour LPSP 95%

Nous avons trouvé  $Q=0,0179m^3/s$

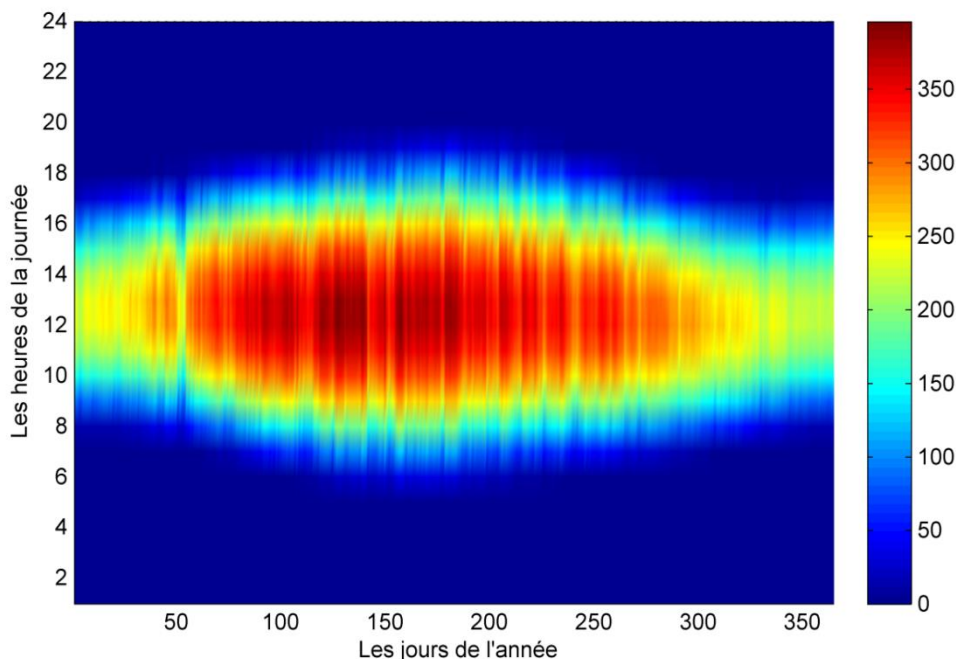
$$0.0179 \times 3600 = 64,44 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\frac{944,84}{64,44} = 14 \text{ heures}$$

**Remarque :** Ce stockage peut assurer plus de 14 heures d'autonomie

### III.10.3. La puissance de la sortie du générateur photovoltaïque :

Nous avons réalisé la simulation de la puissance générée par le générateur PV à partir des bases de données météorologiques sur le logiciel Matlab. La Figure ci-dessous présente l'évolution de la puissance de la sortie du générateur photovoltaïque pendant une année pour une puissance nominale = 491.13 kW



**Figure III.4** La puissance générée par le système PV

Pour les quatre saisons la puissance PV est faible dans l'intervalle [1-9] et l'intervalle [17-24h] ainsi et plus important dans l'intervalle [8h-16 h] on remarque que la puissance de la sortie du générateur photovoltaïque est diffère d'une heure à un autre et d'un jour à un autre et une saison à un autre. Dans les jours type d'hiver la puissance de la sortie du générateur photovoltaïque est forte pendant le matin dans l'intervalle de [10-16h] et augmente progressivement peut atteindre la puissance 350kw. Et très important à la fin de mars jusqu'à mai peut atteindre la puissance 400KW

Dans les jours de [fin de juin à début de septembre] la puissance est plus fort principalement en aout peut atteindre 350KW puis diminue habituellement à la valeur 200kw pendant la saison d'automne.

Pour les quatre saisons dans (intervalle [16h-24h] et [1h-9h]) la puissance générer est très faible presque nulle.

D'après cette figure, on remarque que les puissances PV ne sont pas régulières et réglables à volontés suivant les besoins .Il faut donc un système de stockage.

### III.10.4. Solution optimal pour fiabilité LPSP= (97%) pour nombre itération=100 :

Les variables décision :

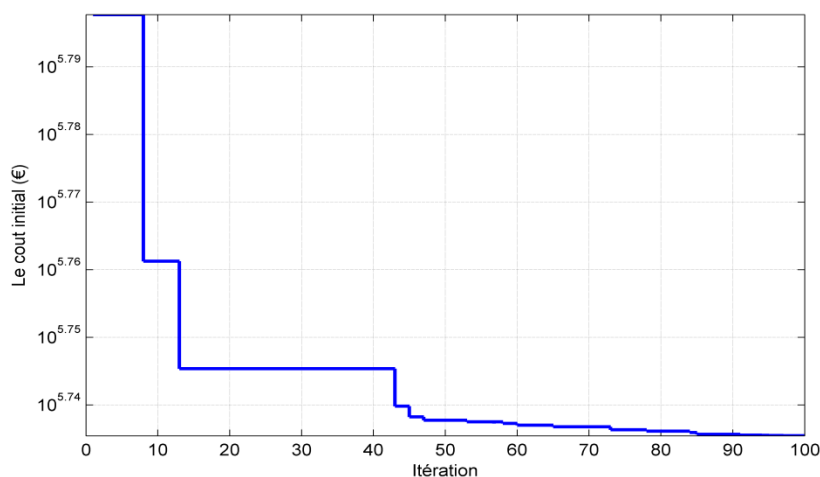
D'après la méthode de dimensionnement que nous avons appliqué sur le Matlab on obtient :

Les variables décision	les valeurs optimal
PS (KW)	563,64
Pnp (kw)	65.54 KW
V ( $m^3$ )	$1,44 \cdot 10^3$

**Tableau III.3** les valeurs optimal des variables décision

- Nous avons calculé d'après matlab le cout initial de notre système on obtient :

Le cout initial =  $6,26 \cdot 10^5 \text{€}$



**Figure III.5** : la variation du coût en fonction du nombre d'itération(pour LPSP=0.03)

L'état de décharge de réservoir pour LPSP 95%

Nous avons trouvé d'après notre résultats que le débit est égal  $Q=0.022*3600=79,2 \text{ m}^3/h$   
 $\frac{1,44*10^3}{79,2} = 18 \text{ heures}$

**Remarque :** stockage peut assure plus de 18 heures d'autonomie

### III.10.5. Comparaison entre le cout optimal pour LPSP =95% et LSPP=97% :

Les deux figure (II.1et II.5) montre bien l'évolution des en fonction du nombre d'itérations. On voit bien que durant l'évolution des itérations, le cout diminue considérablement. Cela signifie que la technique d'optimisation tend vers un minimum global correspondant au coût le plus faible.

Les variations LPSP Influe sur le nombre de solution optimale. La configuration avec le plus bas donne la solution optimale pour fiabilité 95% égal  $5,437*10^5\text{€}$  et pour fiabilité 97% égal  $6,26*10^5\text{€}$ .

Une comparaison est faite ici entre le cout initial pour fiabilité 95% et le cout initial pour 97% sont optimisé par PSO on remarque bien également que l'amélioration de la fiabilité LPSP permet d'augmenter le coût du système, c'est-à-dire plus le niveau de fiabilité est élevé (plus le coût est élevé car la fiabilité coûte chère.

Il faut savoir que le consommateur d'énergie le plus intéressant n'est pas forcément qui a un cout moins cher mais celui qui nous permettre d'obtenir la meilleure fiabilité (parfois il est préférable de choisir le système qui contient le cout moins cher et fiabilité acceptable) donc il faut mieux tout chose de choisir le système pour fiabilité 95% afin atteindre le niveau consommation voulu. Pour satisfaire le besoin de la charge

### III.10.6. La comparaison entre les variables décision pour fiabilité 95% et pour fiabilité97% :

La méthode stochastique de PSO utilisée pour éviter le recours au calcul habituel pour déterminer rapidement les valeurs optimal du système pour minimiser LPSP et rende le système plus fiable pour satisfaire le besoin de la charge,

Les variations LPSP influe sur le nombre de solution optimale. La configuration avec le plus bas donne la solution.

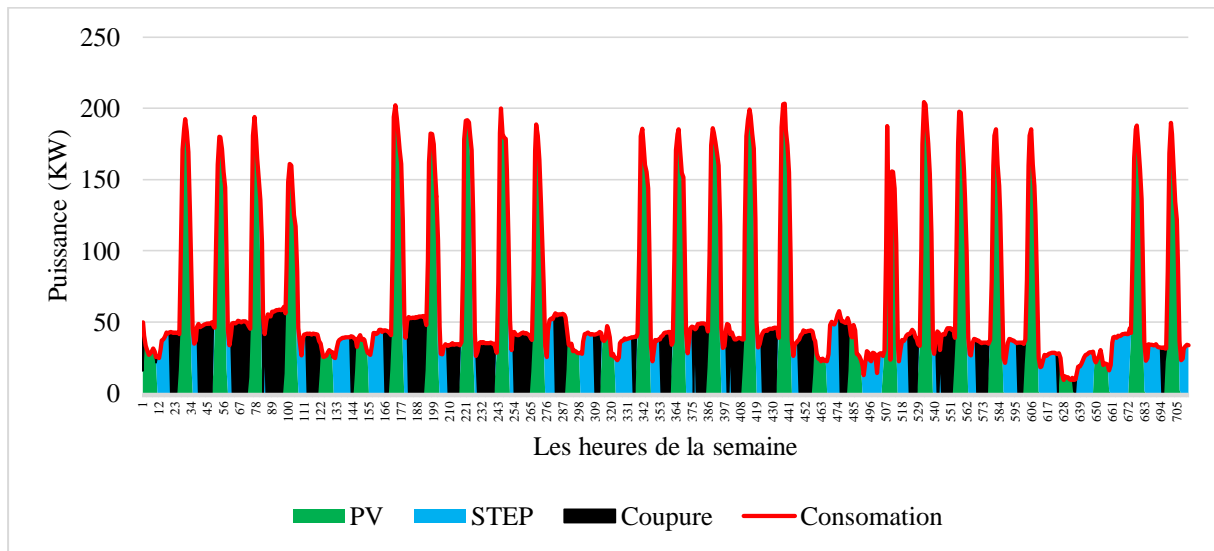
Le résultat pour une fiabilité 95% et 97% montre bien l'évolution des en fonction du nombre d'itérations. On voit bien que durant l'évolution des itérations, les variables décision diminue considérablement. Cela signifie que la technique d'optimisation tend vers un minimum global correspondant les variables optimaux le plus faible .plus la fiabilité augmente plus les variables décision augmente.

### Chapitre III : Optimisation du dimensionnement des systèmes solaires et hydroélectrique

une comparaison est faite pour un LPSP égal 95% et LPSP égal 97% donc il faut mieux de choisir le système qui contient des fiabilité acceptable et un cout raisonnable .

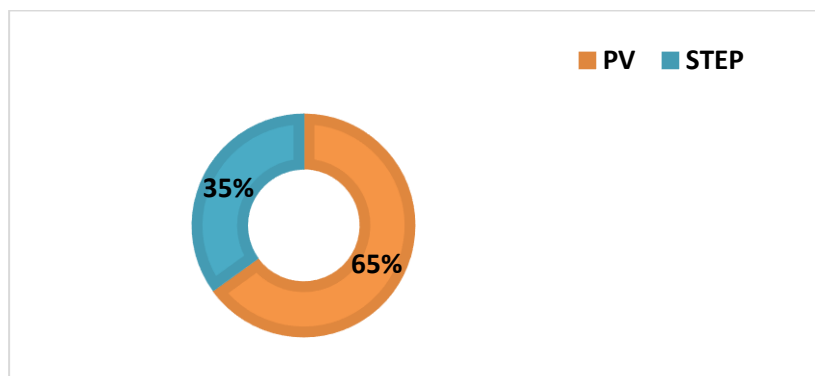
On remarque que on ne peut pas atteindre un système fiable à 100% car la machine a un contraint de fonctionnement à  $20\% * P_{np}$  pour cela pour un débit inférieur a ces conditions et pour un énergie moins inférieur à  $20\% * P_{np}$  la machine ne fonctionne pas et perdre d'énergie cela indique que on peut pas satisfaire le besoin d'une consommation à 100% .

**Remarque :** ces deux figures sont créées à base de la solution optimale obtenue par PSO pour une fiabilité de 95%



**Figure III.6** simulation du système PV-STEP durant la première semaine d'utilisation.

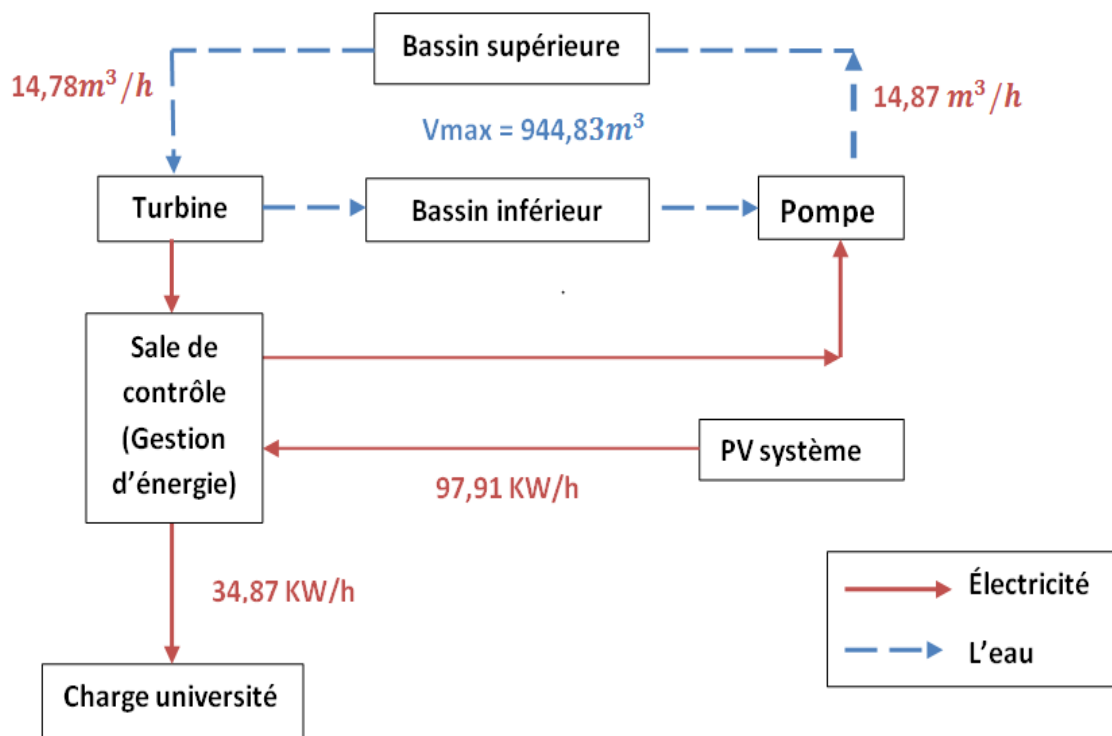
La figure III.6 présente la simulation du système PV-STEP durant la première semaine après le démarrage. Dans cette simulation, nous avons utilisé la configuration optimale, c'est-à-dire les puissances nominales à installer pour chaque source qu'on a trouvée à l'aide de PSO. On remarque aussi une synergie entre le générateur photovoltaïque et le stockage STEP pour approvisionner la charge en énergie nécessaire, cependant il y a des coupures généralement pendant la nuit ou dès le matin avant le lever du soleil.



**Figure III.7** Le pourcentage d'énergie fournie par PV et STEP pour alimenter la charge.

La figure III.7 présente le pourcentage d'énergie fournie par la centrale photovoltaïque et la STEP pour alimenter l'université. En remarque que 65% de la charge est assuré par l'énergie solaire, le stockage utiliser dans ce système couvre une partie très important de la charge qui égale à 35% en raison de l'absence d'énergie solaire pendant la nuit. Cependant, ce résultat montre la faisabilité d'utiliser une centrale solaire-STEP dans cette localisation avec une fiabilité acceptable. Par conséquent, l'optimisation de dimensionnement pout aider à surmonté certain barrières technique et économique qui limite l'utilisation des systèmes à base d'énergie renouvelable.

**III.10.7. La puissance moyenne annuelle entre les composants des systèmes solaire hydroélectrique et la charge pour 95% :**



**Figure III.7** La puissance moyenne annuelle générer par le système PV-STEP pour une fiabilité de 95%

Cette figure exprime les valeurs des puissances moyenne générer par le centrales d'énergie renouvelable PV-STEP pour une fiabilité de 95%. Elle est constituée d'une combinaison d'un générateur PV et une station de transfert d'énergie par pompage (STEP) pour alimenter une charge d'université de Mostaganem (Rectorat).

### Chapitre III : Optimisation du dimensionnement des systèmes solaires et hydroélectrique

---

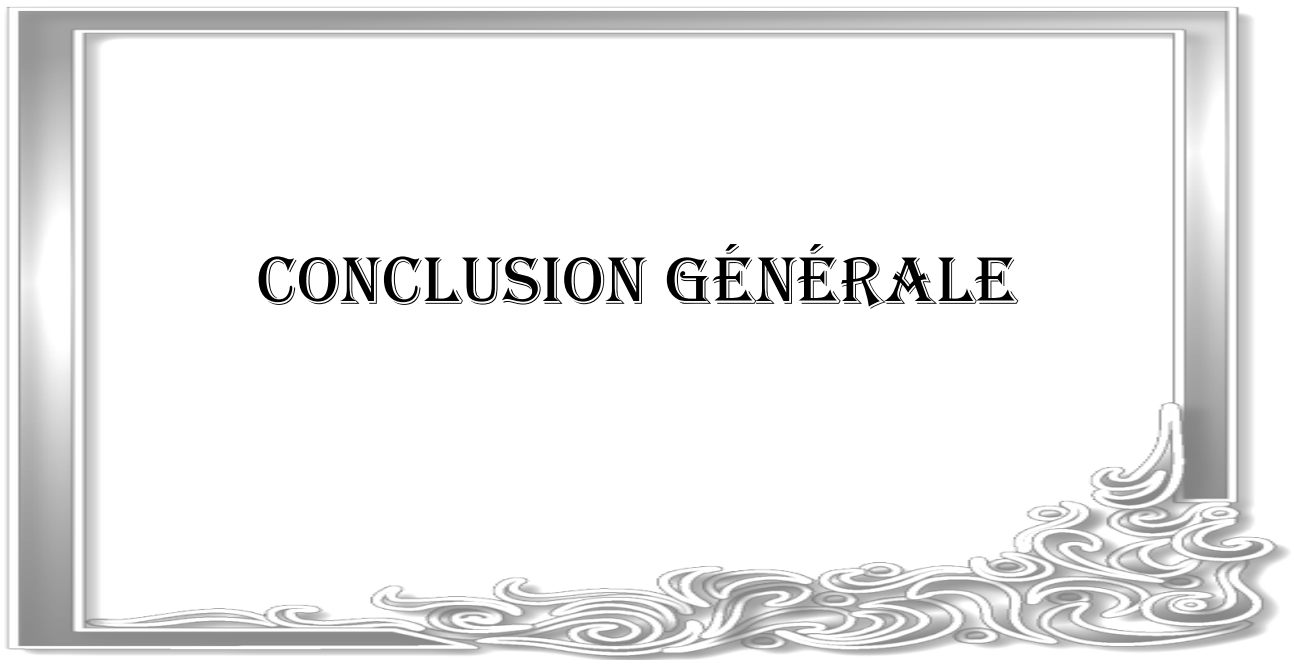
Nous avons calculé à l'aide du simulateur de notre système développé sous le logiciel MATLAB, la puissance moyenne générée par la centrale photovoltaïque qui est égale à 97,97 kW/h. La quantité d'eau moyennement pompée vers le réservoir supérieur est égale à 14,87 m<sup>3</sup> et la puissance moyenne de la charge assurée par le système PV-STEP est égale à 34,87 Kw/h.

On remarque que la puissance PV est très importante, cela signifie que le système PV peut assurer la demande de la charge pendant la journée, ainsi une puissance supplémentaire afin de pomper vers le bassin supérieur, l'eau pompée peut atteindre 356,88 m<sup>3</sup> par jour. Lorsqu'il y a une absence d'énergie solaire, l'eau du bassin supérieur est utilisée pour générer l'électricité, qui peut être utilisée pour l'éclairage durant la nuit.

#### Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de connaître comment résoudre le problème d'optimisation des systèmes PV STEP avec un coût minimal et des pertes minimales en utilisant l'optimisation classique. Afin d'obtenir une meilleure fiabilité. Pour ce but nous avons appliqué la méthodologie de dimensionnement d'un système PV STEP destinée à l'université de Mostaganem. Cette méthodologie est basée sur deux critères : la probabilité de perte d'énergie pour le critère de fiabilité et pour le critère économique le coût initial. En appliquant la méthode méta-heuristique PSO : pour trouver des configurations optimales de la puissance nominale du générateur et le volume d'eau et la puissance installée pour un LPSP désiré. À partir du résultat trouvé, on peut conclure que les variations de LPSP influent sur le nombre de solutions optimales. La configuration avec le plus bas LPSP donne la solution optimale, plus le niveau de fiabilité est élevé (plus faible des pertes), plus le coût est élevé car la fiabilité est coûteuse. Donc la fiabilité 95% est le meilleur choix qui contient des pertes acceptables et un coût moins cher pour satisfaire le besoin de la charge. Et on ne peut pas atteindre un système à fiabilité 100%.

# CONCLUSION GÉNÉRALE



## Conclusion général

---

### Conclusion :

A travers ce mémoire nous avons conclu que l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m<sup>2</sup>.an au Nord et 2263 kWh/m<sup>2</sup>.an au sud du pays. Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale [cours]. Donc la production d'électricité grâce à un système photovoltaïque qui fait l'objet de ce projet est d'un grand intérêt pour les pays en voie de développement notamment l'Algérie qui de par sa situation géographique bénéficie des conditions favorables à l'utilisation de l'énergie solaire d'origine photovoltaïque. En produisant de l'électricité à partir du rayonnement solaire, l'énergie photovoltaïque contribue amplement à cette nouvelle politique énergétique privilégiant la lutte contre le changement climatique et la préservation des ressources fossiles. Alors nous retenons qu'il est donc très important que la conception et le dimensionnement des projets PV soient précis et pertinent pour résoudre en partie ce problème. Or une installation photovoltaïque ou système réussie passe par une conception et une installation rigoureuse avec des composants (panneaux solaires, convertisseurs, batteries, régulateurs et autres) qui répondent aux besoins et tiennent leurs promesses.

Ces installations peuvent être autonomes, reliés au réseau ou hybrides avec stockage ou sans. Or le stockage le plus utilisé actuellement dans ces installations est le stockage par batterie, mais son coût de réalisation est très élevé à cause du prix de fabrication de la batterie. En conséquence dans ce projet on s'est intéressé particulièrement à l'optimisation du dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome avec un stockage de l'énergie par une centrale hydroélectrique pour assurer l'approvisionnement en électricité du site de Kharouba de l'université de Mostaganem avec un coût d'investissement acceptable pour satisfaire le besoin de la charge de façon continu. Afin de faire un dimensionnement précis et optimal de notre système, nous avons utilisé la méthode méta-heuristique Particle Swarm Optimization (PSO) selon deux critères d'optimisation, à savoir : le critère technique qui est la fiabilité, développée selon le concept de la probabilité de perte d'énergie (LPSP) et le critère économique qui est représenté par le coût initial du système. Notre travail a été élaboré comme suite :

- Le premier chapitre été consacré à des généralités sur les systèmes de production de l'énergie électriques par les sources renouvelable et particulièrement l'énergie photovoltaïque et l'énergie hydraulique. Toutefois, nous avons obtenus beaucoup de connaissances sur le soleil qui présente la source principale d'énergie reçu par la terre. En

## Conclusion général

---

plus nous avons acquis des notions de physique complémentaires sur l'influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire et la décomposition de l'énergie de ce dernier avant d'atteindre le sol.

En fin à travers la recherche documentaire utilisée nous avons initié le principe de fonctionnement de notre système PV STEP proposé pour le stockage d'énergie et avoir un éclaircissement sur l'art de sa conception. De ce fait l'avancement de notre travail sera consacré au dimensionnement optimal de ce système.

- Dans le deuxième chapitre nous avons présenté les caractéristiques géographiques et météorologiques du site de Mostaganem, dans lequel on a proposé l'installation du système qu'il faut subvenir aux besoins électriques de l'université de Mostaganem rectorat. Les différents modèles mathématiques de chacun de ces éléments composants ce système solaire hydroélectrique ont été présentés. Nous avons appliqué la méthode intelligente PSO comme un indice de fiabilité dans le prochain chapitre.

- Le troisième chapitre a présenté les valeurs optimales des variables de décision qui sont la puissance nominale de la turbine et la puissance nominale du générateur et le volume d'eau pour atteindre un niveau de fiabilité acceptable de 95%. Alors nous avons conclu d'après les résultats obtenus que l'on ne peut pas satisfaire le besoin de la charge à 100%. Bien que ce genre de systèmes soit bénéfique pour un pays comme l'Algérie, disposant d'un bon ensoleillement et par sa politique de diversifier ses moyens de production d'énergie. En plus, d'après nos études le coût d'exploitation et de maintenance de ces systèmes est minimal comparativement à celui des centrales fossiles pour une même quantité d'énergie produite. De même le site se trouve à côté de la mer. Nous espérons donc que ce système solaire hydroélectrique de KHARROUBA se concrétisera dans un avenir proche et que notre travail pourra être un bon appui pour sa réalisation.

Enfin, notre travail est un prolongement des études réalisées sur le développement des énergies renouvelables et a besoin d'une continuation en s'appuyant notamment sur les méthodes d'optimisation intégrées dans les organigrammes de dimensionnement des centrales des énergies propres.



# BIBLIOGRAPHIE

## Bibliographie

---

- [1] « Modeling of hybrid renewable energy system » M. K Deshmukha, S.S Deshmukhb 31 July 2006.
- [2] Karima, Amokrane « Etude des Performances des systèmes de pompage, Magister en Electrotechnique », Université de Béjaia, 2018.
- [3] BEN TRIA Mohamed Rafik, « Etude d'un système de pompage photovoltaïque pour des puits de parcours (cas de la région de Taïbet - Ouargla) », MEMOIRE DE MASTER ACADEMIQUE, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017
- [4] Degla Mohammed, Larbi Ben Ahmed Bachir, « Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque » MASTER PROFESSIONNEL, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2017
- [5] cours énergie master 1 énergie renouvelable
- [6] Touil Nacer Eddine, Ghenbazi Slimane « Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque » , MASTER ACADEMIQUE, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued 2015
- [7] Assia ZERDOUDI , Rachid CHENNI, « ETUDE DE L'INFLUENCE DES DIFFERENTS PARAMETRES SUR UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE »
- [8] B. Iméne, S. Asma, « Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque pour l'irrigation d'un hectare de palmier dattier en utilisant les méthodes Métaheuristiques », mémoire master, université Boumerdes, 2017.
- [9] rapport de stage
- [10] [https://physique-chimie-college.fr/definitions-fiches-science/energie-electrique/\(l'energie électrique\)](https://physique-chimie-college.fr/definitions-fiches-science/energie-electrique/(l'energie_electrique))
- [11] <https://www.superprof.fr/ressources/scolaire/physiquechimie/seconde/mecanique/energiehm>
- [12] : <http://webphysique.fr/energie-mecanique/>

## Bibliographie

---

- [19] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Mostaganem>
- [20] CAMS, «CAMS,» [En ligne]. Available: <http://atmosphere.copernicus.eu/>. [Accès le 26 July 2018].
- [21] service de sonelgaz
- [22] <http://bienvenudansladata.com/coefficient-correlation-lineaire>
- [23]S. khenfous, A. Kaabeche et S. Diaf, « Conception et réalisation d'un logiciel de dimensionnement d'un système d'énergie hybride éolien-photovoltaïque», 2014.
- [24] khenfous, A. Kaabeche et S. Diaf, « Optimisation du dimensionnement d'un système hybridephotovoltaïque/éolien par des méthodes méta heuristiques », Université M'Hamed Bougara, Boumerdès, 2017).
- [25]S. khenfous, A. Kaabeche et S. Diaf, «Optimisation du dimensionnement d'un système hybridephotovoltaïque/éolien par des méthodes méta heuristiques», Université M'Hamed Bougara, Boumerdès, 2017)
- [26]BACHSAIS Iméne, SEBBAGH Asma, «Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque pour l'irrigation d'un hectare de palmier dattier en utilisant les méthodes Métaheuristiques», 2017.
- [27]Guezgouz, Mohammed, «Techno-Economic and Environmental Analysis of a Hybrid PV-WT-PSH/BB Standalone System »,université mostaganem, 2019.
- [28] ZERDOUDI, Rachid CHENN, «I ETUDE DE L'INFLUENCE DES DIFFERENTS PARAMETRES SUR UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE », Université des frères Mentouri de Constantine, 2015.
- [29] «TRAORÉ, ABDOUL KARIM ,«GESTION D'UN SYSTÈME AUTONOME HYBRIDE PHOTOVOLTAÏQUE», 2016.
- [30] I. D. & A. J. S. Spyrou, "Design study of a stand-alone desalination system powered by renewable energy sources and a pumped storage unit," Desalination, Vols. 257(1-3), pp. 137-149, 2010.
- [31] Q. Volker, Understanding Renewable Energy Systems, London: Earthscan, 2005.

## Bibliographie

---

- [32] B.Iméne, S .Asma ; « Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque pour l'irrigation d'un hectare de palmier dattier en utilisant les méthodes Métaheuristiques; UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, Master Domaine: Energétique, 2017.
- [33] Abbas, Dhaker« Contribution au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques»; Thèse Génie électrique. Poitiers: Université de Poitiers, 2012.
- [34] A. Bouharchouche, A. Bouabdallah «Conception et réalisation d'un logiciel de dimensionnement d'un système d'énergie hybride éolien-photovoltaïque», 2014.
- [35] CAMS, «CAMS,» [En ligne]. Available: <http://atmosphere.copernicus.eu/>. [Accès le 26 July 2018].
- [36] J. Carlsson, M. Fortes, G. de Marco, J. Giuntoli, M. Jakubcionis, A. Jäger-Waldau et B. Sigfusson, «ETRI 2014-Energy Technology Reference Indicator Projections for 2010–2050,» Publications Office of European union, 2014.
- [37] HASSINI .BELGHITRI « modelisation simulation et optimisation d'un système hybride-photovoltaïque» ;UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAID DE TLEMCEN, MEMOIRE De Magister, 2010.
- [38] Mohammed Guezgouz , «Techno-Economic and Environmental Analysis of a Hybrid PV-WT-PSH/BB Standalone System Supplying Various Loads , université de MOstganem», 2019.
- [39] MANCER, Nabil «Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS)»; Université Mohamed Khider – Biskra, Magister en Electrotechnique, 2012.
- [40] CHALANE .Idir, Tarek. OUARI «Optimisation des paramètres d'un PID par essais par essais particuliers(PSO) »; Master en Automatique, Université A. MIRA de Bejaia, 2017.
- [41] Rehouma Ridha, Maamra Ali «Commande Optimisée du GADA Par La Méthode Essaim de PSO», MASTER ACADEMIQUE , Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 2015.
- [42] Tao Ma, Muhammad Shahzad Javed ,« Energy Conversion and Management». School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, 2019.
- [43] TRAORÉ, ABDOUL KARIM «gestion d'un système autonome hybride photovoltaïque», 2016.
- [44] <http://www.geocontext.org/publ/2010/04/profiler/en>.