

Mémoire de Fin d'Etude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en énergies renouvelables

Option : Energies renouvelables en électrotechnique.

Thème :

*Etude d'un système de pompage
photovoltaïque avec stockage*

Réaliser par :

LOUAILECHE Chahla

IMLOUL Laria

Encadreur :

M^{me} C. SERIR

Jury :

Mr M. LARBAA

M^{me} K. RAHRAH

Année Universitaire : 2017/2018

Remerciements

*Avant tout, nous tenons à remercier le dieu tout puissant
qui nous a accordé santé et
courage pour mener ce travail jusqu'à son bout.*

*Nous tenons à remercier notre promotrice **M^{me} SERIR
CHAFIA** pour avoir accepté de
nous encadrer, avoir apporté son aide et ses conseils
précieux et pour sa gentillesse durant
toute la période de la préparation de ce projet.*

*Nous remercions les membres du jury d'avoir examiner
notre travail.*

*Toute notre gratitude à tous nos enseignants qui nous
ont formés.*

*Nous tenons également à remercier infiniment tous ceux
qui nous ont
Aidé de près ou de loin
Pour la réalisation de ce modeste travail.*

Dédicace

Au nom de Dieu le clément et le miséricordieux louange à ALLAH le tout puissant.

On dédie ce modeste travail en signe de respect, reconnaissance et de remerciement à nos très chers parents que Dieu les gardent et les Protègent pour leurs soutien moral et financier, pour Leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

*A nos très chers frères et sœurs.
deux familles LOUILECHE et IMLOUL.*

*A tout nos amies, nos proches et
A tout ceux qui ont participé à l'élaboration de Ce modeste travail et tous ceux qui nous sont chers. (Chouaib, Khaled, Lynda , Meriem , Zina)*

Mlle LOUAILECHE Chahla & Mlle IMLOUL Laría.



Liste des symboles

Liste des symboles

symbole	Signification
PPM	Point de puissance maximale.
ED	Rayonnement direct.
λ	Longueur d'onde.
AM ₀	Air mass, spectre solaire.
UV	Ultraviolet.
IR	Infrarouge.
V _{cc}	Tension de court circuit (V).
P	Puissance de charge(W).
α	Rapport cyclique (Angle d'amorçage) du convertisseur.
DC/DC	Convertisseur statique (hacheur).
DC/AC	Convertisseur statique (onduleur).
I _{sc}	courant de court circuit.
I _{ph}	Photo courant.
V _{oc}	tension à vide.
η	Rendement.
I _d	Courant de la diode.
V _{max}	Tension maximale.
I _{max}	Courant maximal.
P _{max}	Puissance maximale.
P _{inc}	Puissance incidente.
G,E	Eclairement.
A	La surface de la charge.
FF	Facteur de forme.
Noct	Température maximale de fonctionnement de la cellule solaire.
T _a	Température ambiante.
R _s	Resistance série(A).
R _{sh}	Resistance shunt (A).
N _s ,N _p	Nombre de modules en série et parallèle.
I _{mpp}	Courant au point de puissance maximal(A).
V _{mpp}	Tension au point de puissance maximale(V).
T _{cref}	Température de référence.
T _c	Température absolue de la cellule.
E _{ref}	Ensoleillement de référence.
E _g	Energie de gap.
P ₁ , P ₂ , P ₃ , P ₄	Paramètres constantes.
α_{cc}	Coefficient d'incrémentation du courant I _{cc} .
β_{0C}	Coefficient d'incrémentation de la tension.
D	La diode.
V _{ch}	Tension de la charge.
C _p	Coefficient de puissance.
V _{ao} ,V _{bo} ,V _{co}	Tensions d'entrées de l'onduleur.
V _{an} ,V _{bn} ,V _{cn}	Tensions de phases de la charge.
V _{no}	Tension de sortie de l'onduleur.
F _c	Fréquence de coupure.
S1,S2,S3	Fonctions logiques.
Φ	Flux.
M	Inductance mutuelle.

Liste des symboles

M_r	Mutuelle rotorique.
M_{sr}	Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor.
ω	Vitesse mécanique.
L_s	Inductance cyclique statorique.
L_s, L_r	Inductance de fuite statorique et rotorique.
C_{em}	Couple électromagnétique.
T_r	Constante e temps rotorique.
S	Opérateur de dérivation.
f.e.m	Force électromotrice.
R_i	Résistance interne(A).
E_{ele}	Energie électrique.
f	Coefficient de frottement visqueux.
Ω	Vitesse de rotation de la machine (rad/s).
J	Inertie de la machine (Kg.m ²).
K_p, K_i	Coefficients de proportionnalité et d'intégration
φ_{ref}	Flux de référence (Wb).
η_p	Rendement de pompe.
Q_n	Débit nominal (m ³ / h).
η_{ond}	Rendement de l'onduleur.
N_s	La vitesse de rotation synchronisme (tr/min)
P_H	Puissance communiquée au fluide par la pompe (W).
g	Accélération de la pesanteur (9.81 m/s ²).
V	Quantité d'eau requise (m ³).
h	Hauteur manométrique totale atteinte par la pompe (m).
τ_p	Temps de pompage nécessaire pour satisfaire le besoin en eau (s).
A	Coefficient d'idéalité de la cellule.
I_s	Courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité(A).
K	Constante de Boltzman(k = 1,38.10 ⁻²³ J/K).
q	Charge de l'électron (q = 1,602.10 ⁻¹⁹ C).
MPPT	Point de puissance maximale.
EDC	Etat de charge de la batterie.



Liste des figures

Liste des figures

CHAPITRE I		
Fig. (I.1)	Types de rayonnement solaire reçus au sol.	4
Fig. (I.2)	Intensité de l'ensoleillement sur un plan horizontal et incliné.	5
Fig. (I.3)	Rayonnement solaire capté par reçu un plan horizontal et incliné.	5
Fig. (I.4)	Analyse spectrale du rayonnement solaire.	6
Fig. (I.5)	Diagramme d'une installation photovoltaïque autonome avec stockage.	6
Fig. (I.6)	Système PV couplés aux réseaux.	7
Fig. (I.7)	schéma général d'un système de pompage photovoltaïque.	8
Fig. (I.8)	Enchaînement des étapes de fabrication d'un module photovoltaïque au silicium cristallin.	9
Fig. (I.9)	Les cellules monocristallines.	8
Fig. (I.10)	Les cellules poly cristallines	10
Fig. (I.11)	Les cellules amorphes.	11
Fig. (I.12)	Association de cellules identiques en série.	12
Fig. (I.13)	Association de cellules identiques en parallèle.	13
Fig. (I.14)	Association de cellules identiques en série parallèle.	13
Fig. (I.15)	Classification des pompes.	15
Fig. (I.16)	Schéma d'une pompe centrifuge.	15
Fig. (I.17)	Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge.	16
Fig. (I.18)	Schéma d'une pompe volumétrique.	16
Fig. (I.19)	Caractéristiques d'une pompe volumétrique.	17
Fig. (I.20)	Moteur à courant continu.	18
Fig. (I.21)	Moteur synchrone.	19
Fig. (I.22)	Moteur synchrone.	22
Fig. (I.23)	Hacheur série.	20
Fig. (I.24)	Hacheur parallèle.	23
Fig. (I.25)	Convertisseur Buck-Boost.	21
Fig. (I.26)	Conversion DC / AC.	22
Chapitre II		
Fig. (II.1)	schéma descriptif de système de pompage photovoltaïque.	26
Fig. (II.2)	Schéma électrique équivalent du modèle a deux diodes.	29
Fig. (II.3)	schéma électrique équivalent du modèle à une diode.	30
Fig. (II.4)	Exemple de caractéristique courant-tension d'un module PV.	34
Fig. (II.5)	Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$.	35
Fig. (II.6)	Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$.	35
Fig. (II.7)	Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$.	35

Liste des figures

Fig. (II.8)	Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$.	36
Fig. (II.9)	Circuit électrique du convertisseur DC-DC (boost).	37
Fig. (II.10)	Circuit électrique du convertisseur DC-DC (buck-boost).	38
Fig. (II.11)	Circuit électrique de l'onduleur.	39
Fig. (II.12)	Circuit électrique du filtre.	41
Fig. (II.13)	Modèle du bus continue.	42
Fig. (II.14)	Représentation schématique de la machine.	43
Fig. (II.15)	Modèle R-C de la batterie	47
Fig. (II.16)	Schéma équivalent de la batterie dans le modèle CIEMAT.	47
Fig. (II.17)	Influence de la température sur la capacité	48
Fig. (II.18)	Influence de la température sur la tension de décharge et de charge.	49
Fig. (II.19)	Résistance interne de la batterie	
Chapitre III		
Fig. (III.1)	Variation de l'ensoleillement pour différentes périodes (été, hiver et printemps).	52
Fig. (III.2)	Allure de $1-\alpha$	57
Fig. (III.3)	Le schéma de générateur photovoltaïque proposé	57
Fig. (III.4)	caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau solaire	59
Fig. (III.5)	L'algorithme de la méthode de perturbation et d'observation.	60
Fig. (III.6)	Description du système photovoltaïque	61
Fig. (III.7)	Allure de la tension sous conditions standards.	61
Fig. (III.8)	Zoom en régime permanent sur l'allure de la tension.	62
Fig. (III.9)	profil d'ensoleillement.	64
Fig. (III.10)	Puissance photovoltaïque et de la charge.	64
Fig. (III.11)	L'évolution de débit.	65
Fig. (III.12)	la vitesse de référence et estimée.	65
Fig. (III.13)	le couple résistant et électromagnétique	65
Fig. (III.14)	Flux de référence et estimé.	66
Fig. (III.16)	L'évolution des courants statoriques	66
Fig. (III.17)	Tension de bus continu.	67
Chapitre IV		
Fig. (IV.1)	Organigramme de gestion d'énergie du système de pompage photovoltaïque avec stockage.	68
Fig. (IV.2)	profil d'ensoleillement avec une température $T=25^{\circ}\text{C}$.	69

Liste des figures

Fig. (IV.3)	Puissance photovoltaïque, batteries et de la charge.	70
Fig. (IV.4)	Modes de fonctionnement.	71
Fig. (IV.5)	Tension des batteries.	71
Fig. (IV.6)	L'état de charge de la batterie.	71
Fig. (IV.7)	L'évolution de débit.	72



Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau (I.1) : Avantages et inconvénients de l'électricité solaire photovoltaïque.....	14
Tableau (I.2) : Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique.....	18
Tableau (II. 1) : Paramètres électriques des panneaux SIEMENS... ..	33
Tableau (II.2) : Paramètres obtenus du modèle à une diode du panneau PV SM110.....	33



SOMMAIRE

Introduction générale	1
 Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes de pompes photovoltaïques	
I.1. Introduction	3
I.2. Energie solaire photovoltaïque.....	3
I.2.1. Rayonnement solaire	3
I.2.2. Spectre du rayonnement	4
I.3. Les différents systèmes photovoltaïques	5
I.3.1. Les systèmes photovoltaïques autonomes	5
I.3.1.1. Les systèmes autonomes avec stockage.....	6
I.3.1.2. Système autonome sans stockage.....	6
I.3.2. Systèmes photovoltaïque couplés au réseau	7
I.4. Les systèmes de pompe photovoltaïque.....	7
I.4.1. Le générateur photovoltaïque	8
I.4.1.1. Fabrication des cellules solaires	8
I.4.1.2. Les types des cellules photovoltaïques	11
I.4.1.3 Association des modules photovoltaïques.....	12
I.4.1.4. Avantages et inconvénients du système photovoltaïque.....	13
I.4.2. Le groupe de motopompe.....	14
I.4.2.1. Classification selon la conception de la pompe.....	16
I.4.2.2. Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique.....	17
I.4.3. Classification selon les types de moteur.....	18
I.4.3.1. Moteur a courant continu.....	18
I.4.3.2. Moteur à courant alternatifs.....	19
I.4.3.2.1. Les moteurs synchrones.....	19
I.4.3.2.2. Les moteurs asynchrone.....	19
I.4.4. Les convertisseurs statiques	20
I.4.4.1. Convertisseur Buck (hacheur série)	20
I.4.4.2. Convertisseur Boost (Hacheur parallèle)	21
I.4.4.3. Convertisseur Buck-Boost.....	21
I.4.4.4. Les onduleurs.....	21
I.5. Généralités sur les batteries.....	22

Sommaire

I.5.1. L'avantage d'utilisation.....	22
I.5.2. Principales caractéristiques de accumulateurs.....	22
I.5.3. Présentation de quelques technologies d'accumulation	23
I.6.Conclusion	24

Chapitre II : Modélisation des éléments du système de pompage PV

II.1 Introduction	25
II.2. Description du système à étudier	27
II.3. Modélisation du générateur photovoltaïque	26
II.3.1. Modèle de la cellule solaire.....	26
II.3.2. Groupement des cellules solaires	28
II.3.2.1. Module photovoltaïque.....	28
II.3.2.2. Panneau photovoltaïque.....	28
II.3.3. Choix de modèle mathématique.....	28
II.3.3.1. Modèle explicite.....	29
II.3.3.2. Modèle à deux diodes	30
II.3.3.3.Modèle à une diode.....	33
II.3.4. Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ dans des conditions STC.....	34
II.3.4.1.Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module photovoltaïque ...	35
II.3.4.2. Influence de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque	36
II.4. Modélisation des convertisseurs statiques.....	37
II.4.1. Modélisation du hacheur élévateur de tension (Boost)	38
II.4.2. Modèle mathématique du convertisseur Buck-Boost	39
II.4.3. Modélisation de l'onduleur de tension à MLI.....	41
II.5. Modélisation du filtre.....	41
II.6. Modélisation du bus continue.....	42
II.7. Modélisation du moteur asynchrone à cage d'écureuil.....	42
II.7.1. Hypothèses simplificatrices.....	42
II.7.2. Modèle dynamique du moteur asynchrone.....	45
II.8. Modélisation de la pompe.....	46
II.9. Modélisation de la batterie.....	47
II.9.1. Modèle électrique simple de la batterie.....	47

Sommaire

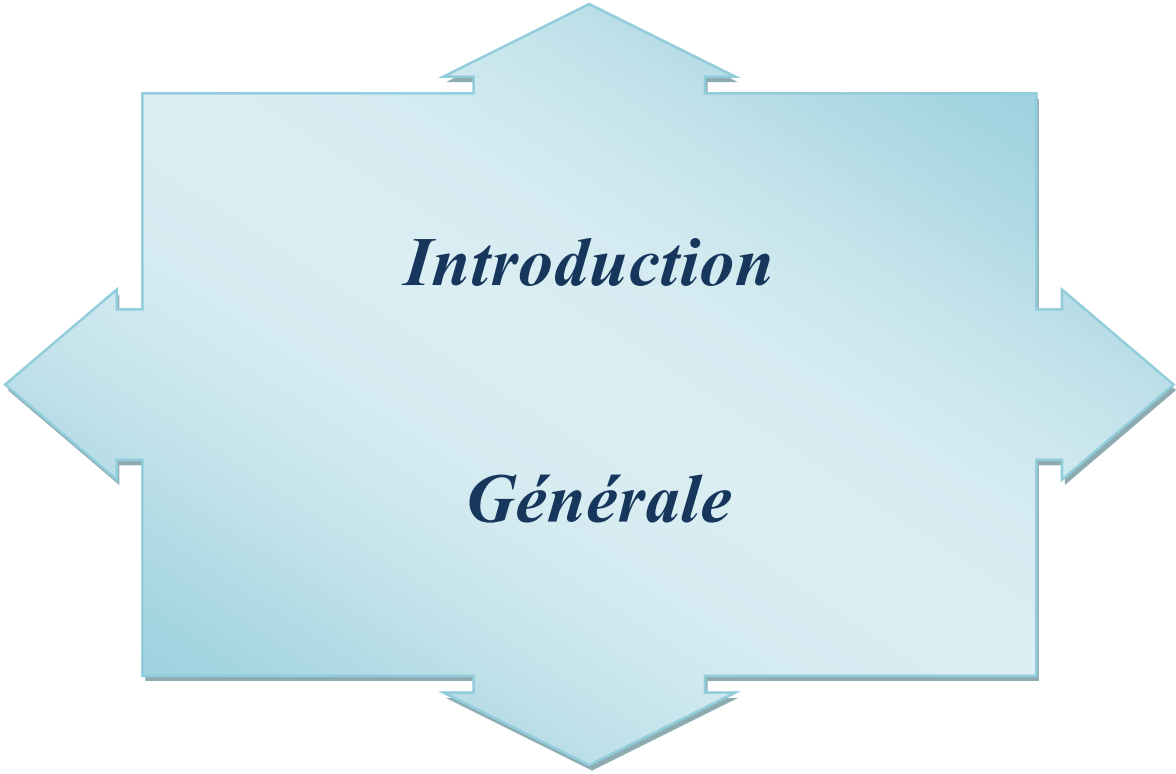
II.9.2. Modèle CIEMAT.....	48
II.10. Conclusion.....	50

Chapitre III : dimensionnement et optimisation du système de pompage

III.1. Introduction.....	51
III.2. Les étapes de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque.....	51
III.2.1. Evaluation des besoins en eau.....	51
III.2.2. Calcul de l'énergie électrique quotidienne requise.....	52
III.2.3. Détermination de l'énergie solaire disponible.....	52
III.2.4. Choix des composantes.....	52
III.2.4.1. Dimensionnement des panneaux.....	53
III.2.4.2. Dimensionnement du moteur asynchrone.....	54
III.2.4.3. Dimensionnement de la pompe.....	54
III.2.4.4. Dimensionnement du réservoir d'eau.....	58
III.2.4.5. Dimensionnement de la batterie.....	59
III.3. La commande du point de puissance maximum (MPPT).....	59
III.3.1. Méthode de perturbation et d'observation (P&O).....	61
III.3.2. Application et simulation de la méthode perturbation et observation (P&O) sur un panneau photovoltaïque.....	63
III.4. Commande vectorielle par orientation du flux rotorique.....	64
III.4. Résultats de simulation du système de pompage photovoltaïque.....	68
III. Conclusion.....	68

Chapitre IV : gestion d'énergie du système photovoltaïque avec stockage

IV .1. Introduction.....	69
IV.2. Gestion du système de pompage PV avec stockage.....	70
IV.3. Simulation du système photovoltaïque avec stockage.....	72
IV.4. Interprétation des résultats.....	73
IV.5. Conclusion.....	73
Conclusion générale.....	75



Introduction générale :

L'augmentation du coût des énergies classique d'une part et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre.

Actuellement, on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire, surtout dans les régions ayant des conditions climatiques favorables ou encore pour les applications sur des sites isolés. Parmi ces applications considérables nous citons le pompage d'eau pour la consommation et l'irrigation en agriculture dans les sites isolés où les conditions climatiques sont favorables surtout dans les pays en voie de développement. En effet, pour un grand nombre de ces pays ; il est difficile de connecter ces sites au réseau électrique national.

L'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour le pompage de l'eau est une technologie naissante caractérisée par des coûts graduellement en baisse. Depuis les premières installations à la fin des années 70, les systèmes de pompage photovoltaïque ont eu une grande part dans les projets d'application de l'énergie photovoltaïque et ils appartiennent de nos jours aux applications les plus significatives de l'énergie photovoltaïque. Ceci peut être principalement attribué au fait qu'il n'est pas économiquement faisable de relier de tels sites éloignés au réseau électrique.

Le grand avantage est que cette source est inépuisable, elle offre une grande sécurité d'utilisation et elle est propre. Dans le but d'améliorer le rendement (faible) du générateur photovoltaïque autrement dit maximiser la puissance délivrée à la charge reliée aux bornes du générateur (ce maximum est généralement obtenu en assurant une bonne adaptation entre le générateur photovoltaïque et sa charge), De nombreuses méthodes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) sont proposées dans la littérature. Elles diffèrent par leur efficacité, complexité, coût, nombre de capteurs utilisés, vitesse de convergence et autre. [1]

Outre l'introduction et la conclusion générales, ce projet sera divisé en quatre chapitres selon le plan suivant :

Le premier chapitre, donne une idée générale sur système photovoltaïque, on y explique brièvement les différents composants et le principe de fonctionnement d'un système pompage photovoltaïque.

Le deuxième chapitre, sera consacré à la modélisation de chaque élément qui constituent le système à savoir le générateur photovoltaïque, les convertisseurs statiques, le moteurs asynchrone à cage d'écureuil, la pompe centrifuge et les batteries de stockage.

Dans **le troisième chapitre**, nous allons nous intéresser à l'optimisation de la puissance produite par le générateur photovoltaïque, le dimensionnement et à la conception d'un algorithme de gestion pour l'ensemble de l'installation, On plus, on va présenter les résultats des performances des composants de la chaine de conversion photovoltaïque (panneaux solaires, hacheur, MPPT, pompe, moteur et batterie) obtenues sous l'environnement de simulation (MATLAB/SIMULINK).

Enfin, nous donnerons une conclusion pour établir un bilan des résultats de simulation obtenus, et par la suite la gestion qu'on va citer au **quatrième chapitre**, ainsi que des perspectives à envisager concernant des éventuelles applications.



Chapitre I

**Etat de l'art sur les
systèmes de pompage
photovoltaïque**

I.1. Introduction : [1]

La conversion de la lumière en électricité, où effet photovoltaïque, a été découverte par E. Becquerel en 1839. Cette conversion d'énergie peut s'effectuer par le biais d'un capteur constitué de matériaux sensibles à l'énergie contenue dans les photons. Ce capteur se présente à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule nommée cellule photovoltaïque (PV) dont le principe est rappelé au début de ce chapitre. La quantité d'énergie électrique ainsi générée peut varier en fonction du matériau utilisé, des paramètres géométriques du capteur et de sa capacité à collecter les électrons avant qu'ils ne se recombinent dans le matériau. L'association possible de plusieurs cellules PV en série/parallèle permet d'adapter théoriquement la production d'énergie photovoltaïque à la demande. Ces associations constituent un générateur photovoltaïque (PV) avec des caractéristiques courant-tension $I(V)$ spécifiques, non linéaires et présentant des points de puissance maximale (PPM) dépendant du niveau d'éclairement, de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. Avec une connexion à une charge, Il en résulte un point de fonctionnement correspondant au point d'intersection des caractéristiques électriques du PV et de la charge. Selon les choix des charges envisagées, le régime de fonctionnement obtenu est optimisé ou non.

Nous illustrons dans ce chapitre les notions basiques du phénomène de la conversion photovoltaïque. Dans un premier lieu nous donnerons quelques notions théoriques sur le rayonnement solaire et nous enchainons par la suite par la description des différents éléments constituant un système de conversion photovoltaïque, plus particulièrement un système de pompage photovoltaïque.

I.2. Energie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire dans une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module photovoltaïque). Plusieurs modules regroupés forment un champ photovoltaïque.

I.2.1. Rayonnement solaire : [2]

Afin de quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol. En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature :

✓ **Le rayonnement direct :**

La conversion du rayonnement direct ED est une question trigonométrique .Le rayonnement direct, sur le plan horizontal, est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus.

✓ **Le rayonnement diffus :**

Il est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par L'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.

✓ **Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol :**

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....).

✓ **Le rayonnement global :**

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnement direct, diffus et reflété par le sol. Dans la figure (1), est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçu sur une surface terrestre.

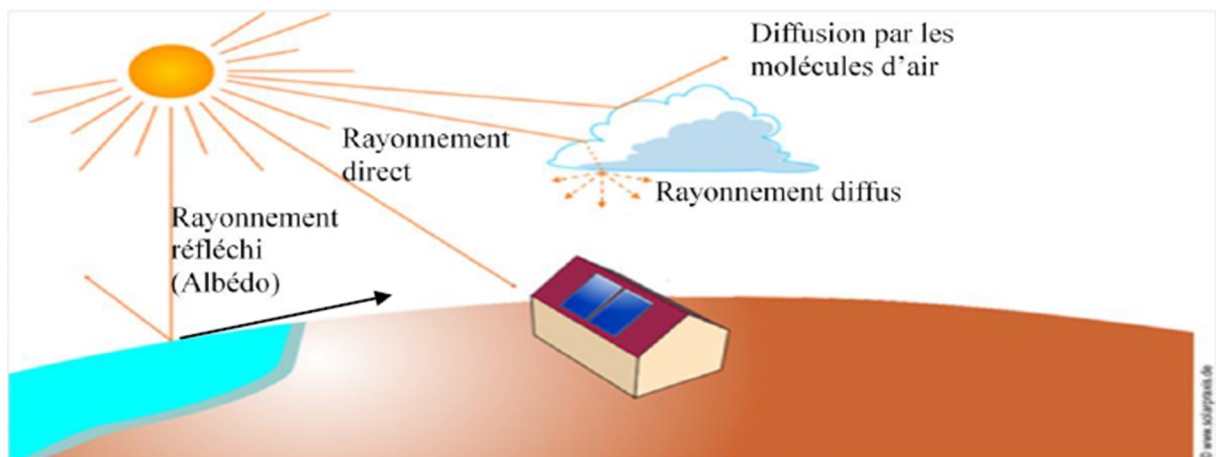


Fig. (I.1) : Types de rayonnement solaire reçus au sol. [2]

Dans la figure (2), ci-après, est illustré l'effet de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur l'intensité de l'éclairement reçu sur leurs surfaces du levé au couché du soleil.

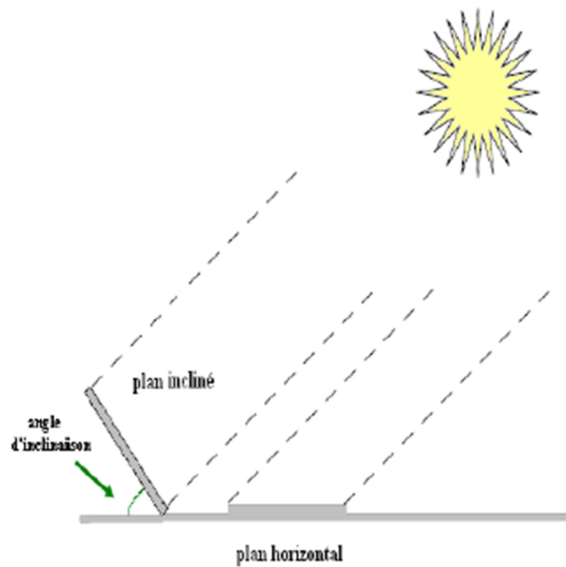


Fig. (I.3): Rayonnement solaire capté par reçu un plan horizontal et incliné.

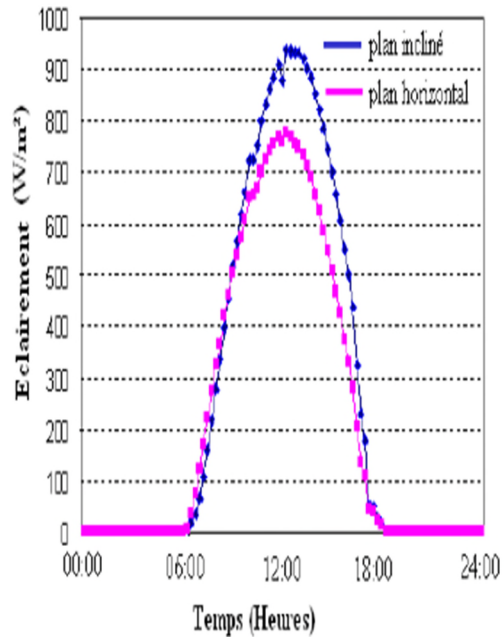


Fig. (I.2): Intensité de l'enseillement sur un plan horizontal et incliné. [2]

I.2.2. Spectre du rayonnement : [3]

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ :

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Sa distribution en énergie est répartie en:

- ✓ Ultraviolet UV $0.20 < \lambda < 0.38$ mm 6.4%.
- ✓ Visible $0.38 < \lambda < 0.78$ mm 48.0%.
- ✓ Infrarouge IR $0.78 < \lambda < 10$ mm 45.6%.

I.3. Les différents systèmes photovoltaïques :

I.3.1. Les systèmes photovoltaïques autonomes : [4]

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Selon l'utilisation ou non du stockage électrochimique, les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit :

- ✓ Des Systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage.
- ✓ Des Systèmes photovoltaïques sans stockage (au Fil du soleil).

I.3.1.1. Les systèmes autonomes avec stockage: [5]

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes, elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque au cours de la journée, figure (4). Donc, le stockage électrochimique dans les batteries est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques.

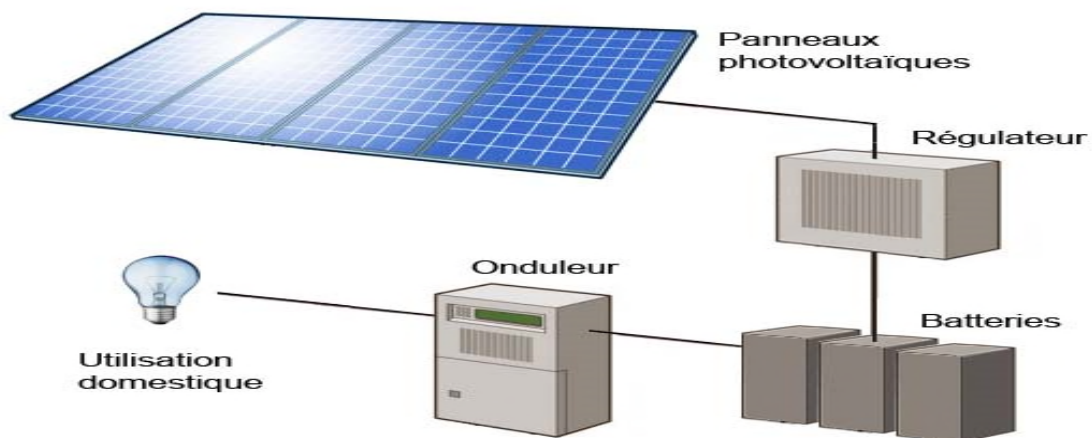


Fig. (I.4) : Diagramme d'une installation photovoltaïque autonome avec stockage. [6]

I.3.1.2. Système autonome sans stockage : [7]

Les systèmes photovoltaïques autonomes sans batterie sont représentés par la figure (5). La charge de type continu est alimentée directement par le GPV, car la production d'énergie est suffisante pour le fonctionnement de la charge.

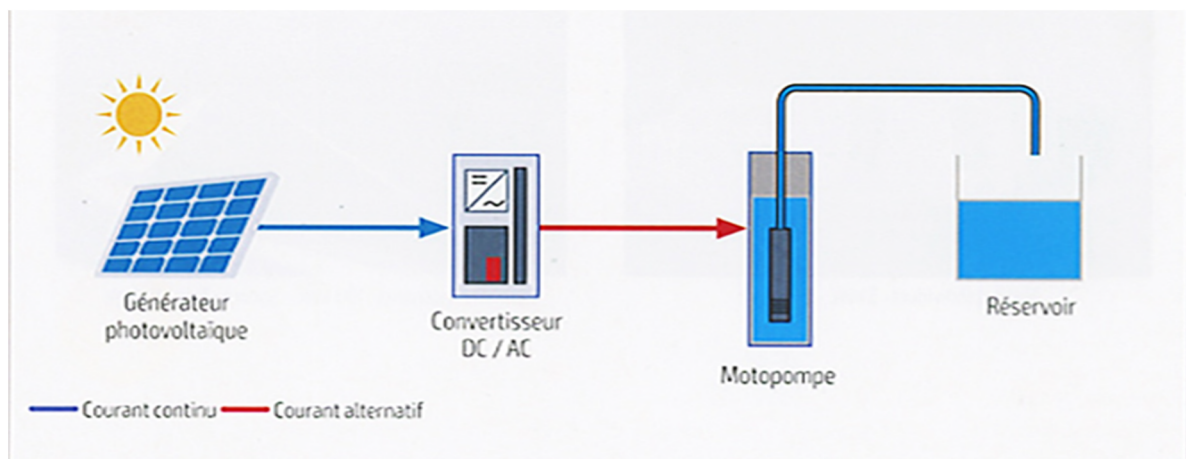


Fig. (I.5) : Diagramme d'une installation photovoltaïque autonome sans stockage. [8]

I.3.2. Systèmes photovoltaïque couplés au réseau : [9]

Les installations raccordées au réseau électrique (ou reliées à une centrale de distribution) constituent généralement une solution optimale pour la production de l'électricité solaire, tant en termes d'énergie que de coûts. Ces installations se composent de modules photovoltaïques interconnectés, d'un (ou plusieurs) onduleur(s) raccordée au réseau électrique. L'onduleur convertit le courant continu généré par les modules photovoltaïques et produit un courant alternatif conforme au réseau électrique. La figure (6) illustre le principe d'un système photovoltaïque connecté au réseau.

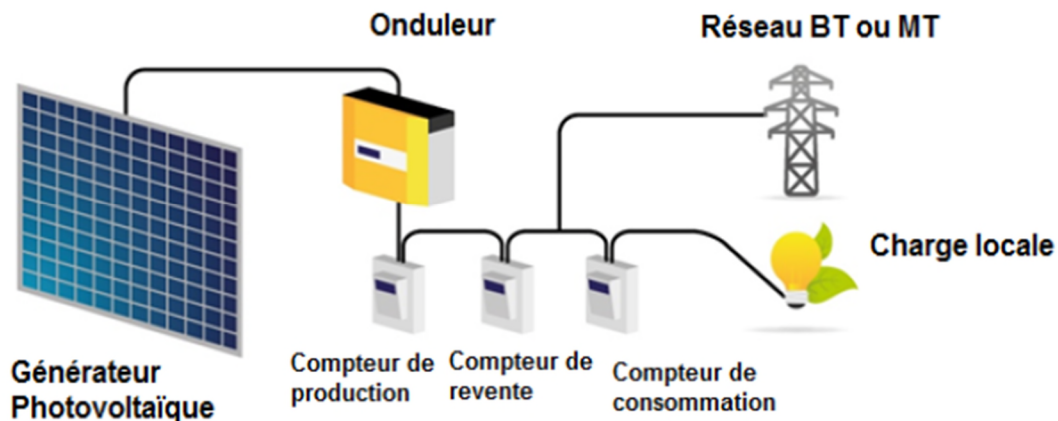


Fig. (I.6) : Système PV couplés aux réseaux. [9]

I.4. Les systèmes de pompage photovoltaïque : [10]

Généralement, le pompage photovoltaïque fonctionne au fil du soleil c'est-à-dire sans stockage électrochimique. Ainsi, le pompage est sans doute l'une des plus pertinentes utilisations de l'énergie solaire photovoltaïque. Il offre une très grande simplicité d'exploitation et de fiabilité à moindre coût, qui l'ont avantage par rapport à l'utilisation de batteries d'accumulateurs.

L'évolution progressive, matériaux et des gammes de performances permet aujourd'hui de considérer le pompage solaire comme une technologie mature.

Généralement, un système de pompage photovoltaïque est constitué d'un générateur photovoltaïque, un sous-système de pompage et un réservoir d'eau figure(7). Le stockage de l'eau dans les réservoirs est la solution adoptée par rapport au stockage électrochimique dans les batteries. Le pompage de l'eau à l'aide de l'énergie photovoltaïque est utilisé pour l'alimentation en eau potable et pour la petite irrigation.

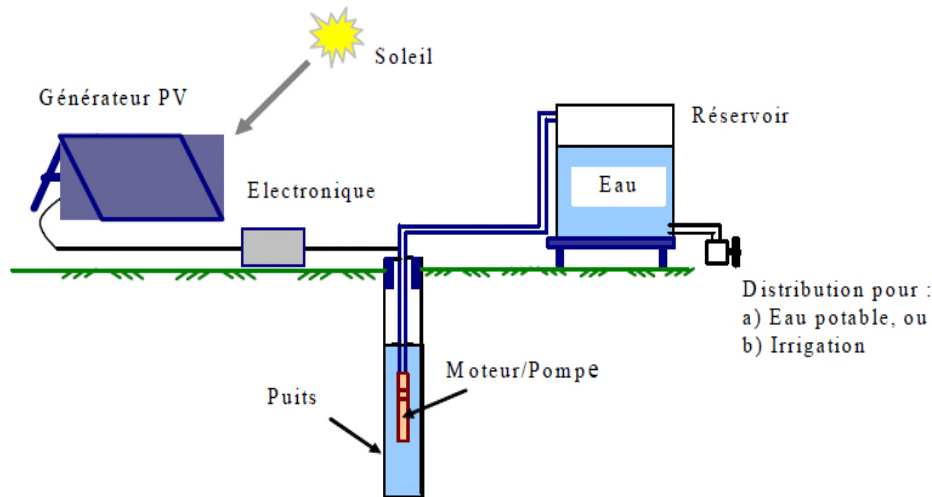


Fig. (I.7) : schéma général d'un système de pompage photovoltaïque. [10]

Le domaine d'application du pompage photovoltaïque est très large. Nous citons ci dessous les applications d'alimentation en eau pour les besoins suivants :

- ✓ Habitations individuelles isolées,
- ✓ Habitations collectives isolées,
- ✓ Petite irrigation et irrigation moderne (Système goutte à goutte),
- ✓ Point d'eau pour abreuvement du bétail

Un système de pompage photovoltaïque est généralement constitué d'un:

- ✓ Générateur photovoltaïque.
- ✓ Groupe de motopompe.
- ✓ Système électronique et de commande.
- ✓ Système du stockage.

I.4.1. Le générateur photovoltaïque :

I.4.1.1. Fabrication des cellules solaires : [4]

Etant donné que le fonctionnement d'un capteur photovoltaïque ne génère pas de nuisance particulière, les impacts environnementaux se situent nécessairement en amont de la chaîne, au moment de la fabrication, et en fin de vie lors du démontage.

Il est donc utile de connaître les techniques de fabrication afin de bien identifier d'où proviennent et comment sont utilisés les différents flux de matières et d'énergie mis en jeux.

Cette partie déroule les étapes de fabrication d'un processus standard, c'est-à-dire le plus établi, chaque industriel développant bien entendu ses propres variantes.

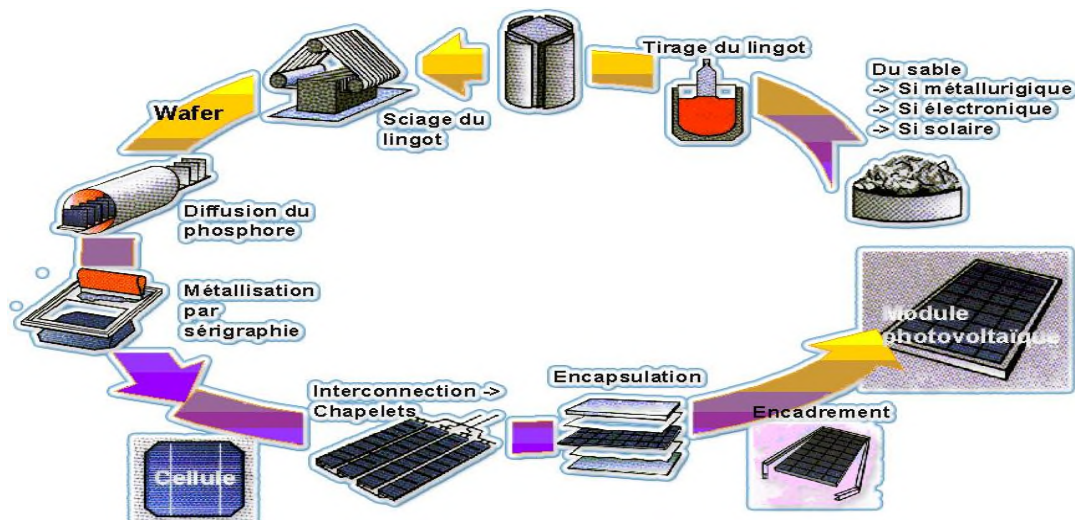


Fig. (I.8) : Enchaînement des étapes de fabrication d'un module photovoltaïque au silicium cristallin. [4]

Comme on le voit sur la figure(8), un certain nombre d'étapes est nécessaire pour passer du quartz au module photovoltaïque fini. Le raffinage du silicium se fait en deux phases : tout d'abord l'extraction du silicium du minerai de quartz, puis la purification de ce silicium par diverses techniques.

Une fois purifié, il sera mis sous forme de plaques et rendu actif par une succession de traitements spécifiques. Les cellules photovoltaïques seront alors assemblées et montées dans des modules.

I.4.1.2. Les types des cellules photovoltaïques : [11]

La cellule solaire ou photopile est un semi-conducteur sensible à la lumière, pour l'obtenir il faut réaliser une structure de diode, c'est-à-dire réaliser une jonction du type p-n, dans un matériau de silicium.

✓ Les cellules monocristallines :

Ces cellules sont constituées de cristaux très purs obtenus par un contrôle strict et progressif du refroidissement du silicium.

Rendement :

- 12-19 % (On obtient ainsi une puissance de 120 à 190 W_C par m^2).

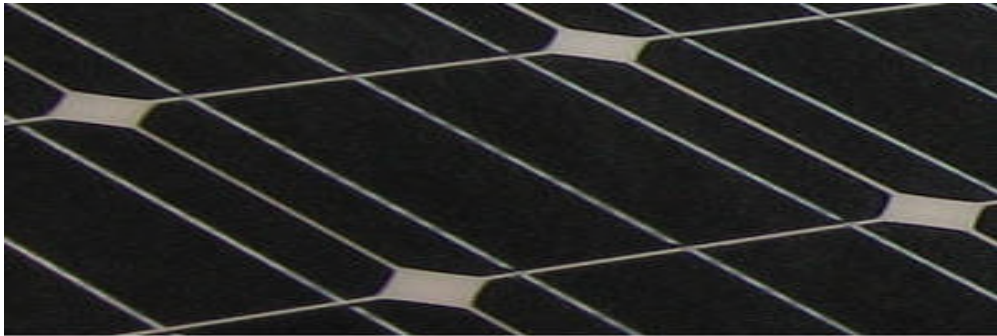


Fig. (I.9) : Les cellules monocristallines. [12]

Avantage :

- Très bon rendement.

Inconvénients :

- Coût élevé.
- Rendement faible sous éclairage réduit.

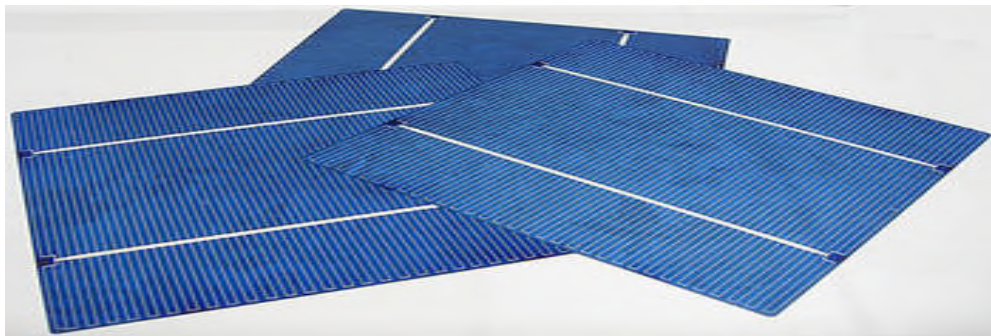
✓ Les cellules poly cristallines :

Fig. (I.10) : Les cellules poly cristallines. [12]

Le refroidissement du silicium en fusion est effectué dans des creusets parallélépipédiques à fond plat. Par cette technique, des cristaux orientés de manière irrégulière se forment. Cela donne l'aspect caractéristique de ces cellules bleutées présentant des motifs générés par les cristaux.

Rendement :

- 11-15 % (On obtient ainsi une puissance de 110 à 150 W_C par m^2) Ces cellules restent les plus utilisées du fait du rapport performance/prix plus intéressant que celui de leurs homologues monocristallins.

Avantage :

- Rapport performance/prix.

Inconvénient :

- Rendement faible sous éclairage réduit.

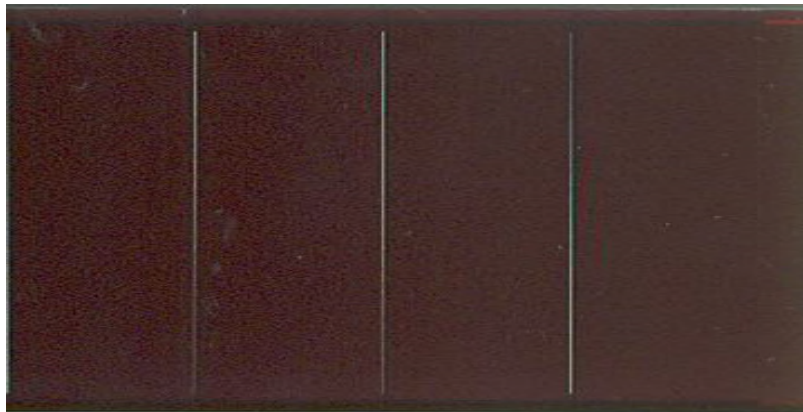
✓ Le silicium amorphe :

Fig. (I.11) : Les cellules amorphe. [12]

Rendement :

- 60-70 W_C/m^2

Avantage :

- Moins coûteux que la première génération puisqu'elle consomme moins de matériau semi-conducteur.
- Moins polluant à la fabrication (Ne nécessite pas de passer par l'étape de transformation du silicium en "wafers" (moins énergivores).
- Fonctionnent avec éclairage faible.
- Moins sensible à l'ombrage et aux élévations de température.

- Possibilité de créer des panneaux souples.

Inconvénients :

- Rendement global plus faible.
- Rendement moindre sous éclairage direct.
- Diminution de performance avec le temps plus importante.

I.4.1.3 Association des modules photovoltaïques : [13]

Il est possible de relier des cellules en série pour augmenter la tension, en parallèle pour augmenter le courant et en série parallèle pour augmenter les deux paramètres simultanément. Dans tous les cas, la puissance électrique augmente avec le nombre de cellules qui sont généralement identiques pour faciliter les processus industriels et optimiser le rendement des capteurs.

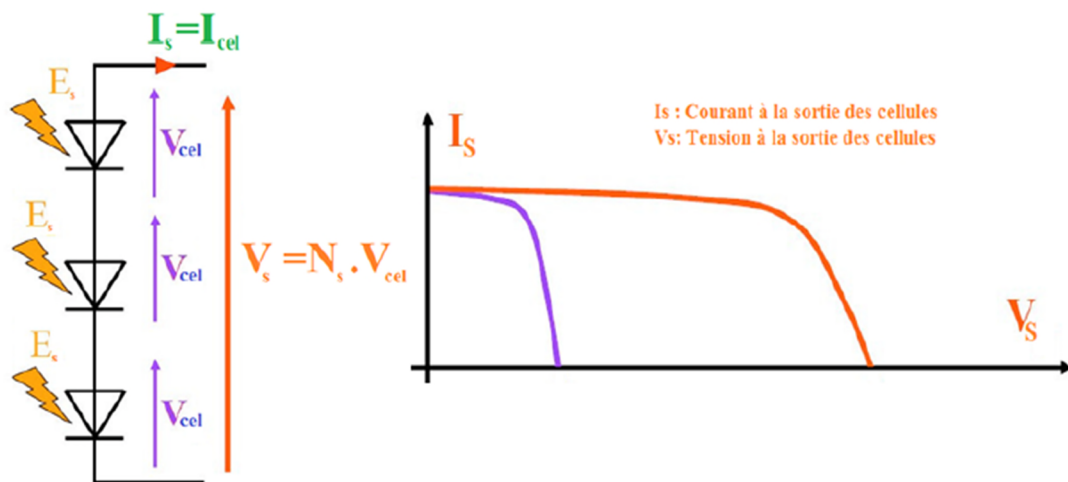


Fig. (I.12) : Association de cellules identiques en série. [13]

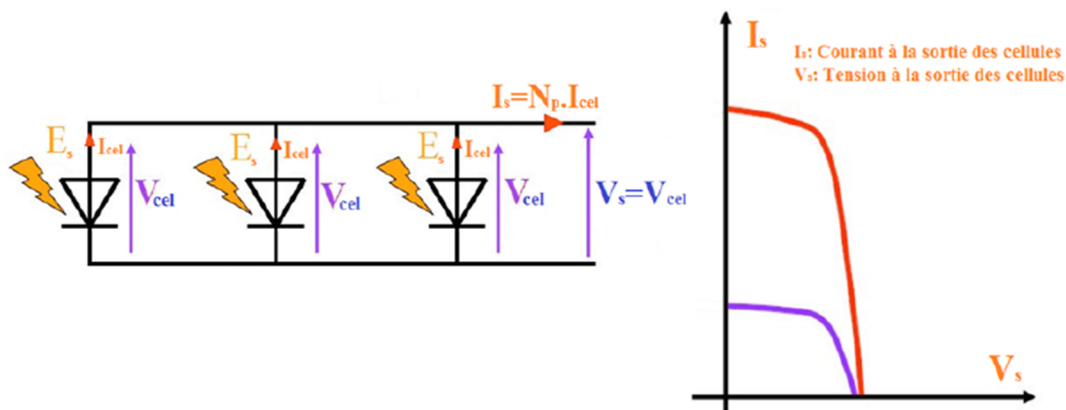


Fig. (I.13) : Association de cellules identiques en parallèle. [13]

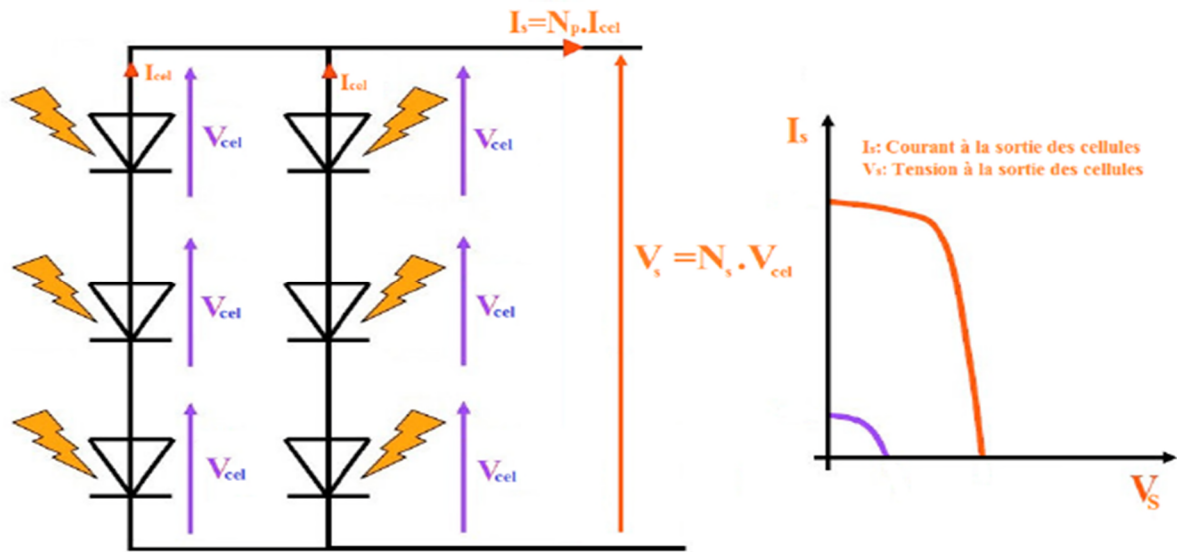


Fig. (I.14) : Association de cellules identiques en série parallèle. [13]

I.4.1.4. Avantages et inconvénients du système photovoltaïque : [14]

Au moment de choisir le système, il faut peser les avantages et les inconvénients à la lumière des contraintes, besoins et spécifications du projet.

Avantages	Inconvénients
-Conversion directe de l'énergie solaire gratuite et inépuisable en électricité. -Absence de bruit, de pollution et d'émissions. -Maintenance réduite (pas de pièces en mouvement ; durée de vie des modules = 20 ans). -Rentabilité assurée pour les applications de faible puissance (moins de 3–5 kWh/jour). -Possibilité d'adaptation de la taille de l'installation aux besoins existants, avec	-Le coût initial des systèmes photovoltaïques est élevé, même si la rentabilité à long terme est assurée. Ils sont donc parfois hors de portée des personnes à faibles revenus. -Dans la plupart des installations, l'électricité doit être stockée dans des batteries. Or, les batteries : (i) requièrent une maintenance régulière, (ii) doivent être remplacées périodiquement et (iii) peuvent avoir un impact sur la performance du système (lorsque les produits locaux sont de mauvaise qualité ou ne peuvent pas être remplacés).

<p>possibilité d'extension à la demande, au fur et à mesure que le besoin énergétique augmente.</p> <p>-Le risque de choc électrique est réduit en 12 ou 24 Vcc et le risque d'incendie est moindre qu'avec les groupes électrogènes alimentés au kérosène ou au fuel.</p>	<p>-Les systèmes photovoltaïques de faible puissance requièrent souvent des équipements à courant continu dont l'efficacité énergétique est supérieure à celle des équipements à courant alternatif, mais dont le coût est souvent plus élevé.</p> <p>-Les systèmes photovoltaïques doivent être conçus et installés par des techniciens car toute erreur de conception ou de réalisation conduirait à créer une installation d'un rendement inférieur à celui des solutions alternatives.</p> <p>-Les systèmes photovoltaïques de forte puissance nécessitent souvent un système de secours (éolien ou au fuel) pour les périodes de forte demande ou de fort ennuagement.</p> <p>- L'électricité solaire photovoltaïque n'est pas économiquement viable pour les charges thermiques de type cuisson, chauffage, ou repassage.</p>
--	---

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients de l'électricité solaire photovoltaïque. [14]

I.4.2. Le groupe de motopompe : [15]

La classification des pompes peut se faire selon différents critères : conception de la pompe, sa position dans le système et le type du moteur utilisé.

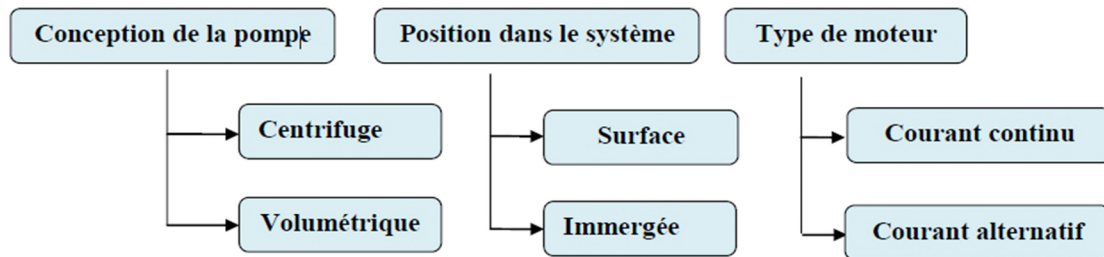


Fig. (I.16) : Classification des pompes. [15]

I.4.2.1. Classification selon la conception de la pompe :

Une pompe est un dispositif permettant d'aspirer et de refouler un fluide. Il existe deux types de pompes : les pompes centrifuges et les pompes volumétrique.

a) Pompe centrifuge : [16]

Elles utilisent les variations de vitesse du fluide pompé combinées avec l'effet de la force centrifuge pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie cinétique transmise au fluide est fournie par la rotation d'une roue munie d'aubes ou d'ailettes, c'est une partie de cette énergie qui est transformée en pression par réduction de vitesse. Les caractéristiques des pompes centrifuges sont particulièrement intéressantes dans le cadre de l'utilisation des modules photovoltaïques :

- Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage, la pompe tourne

même par très faibles ensoleillement, mais il faut une certaine vitesse du moteur pour que la pression de l'eau soit suffisante pour sortir à l'extrémité du tuyau d'amenée d'eau.

- la puissance absorbée est bien adaptée aux modules photovoltaïques, fournissant un bon rendement global.

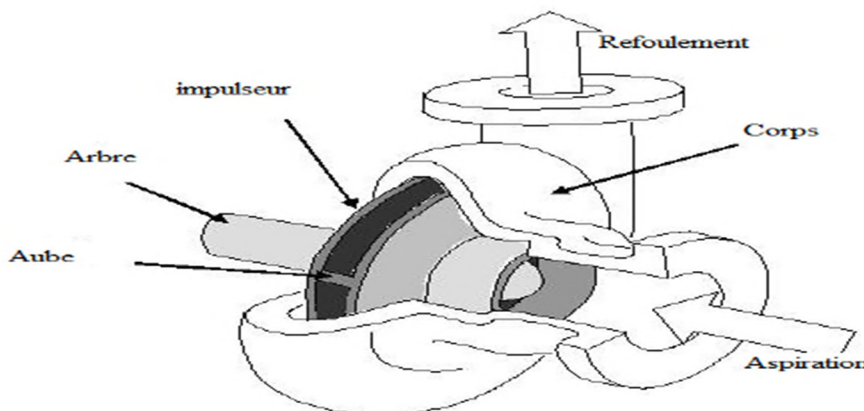


Fig. (I.17) : Schéma d'une pompe centrifuge. [16]

✓ Caractéristique couple et débit en fonction de la vitesse :

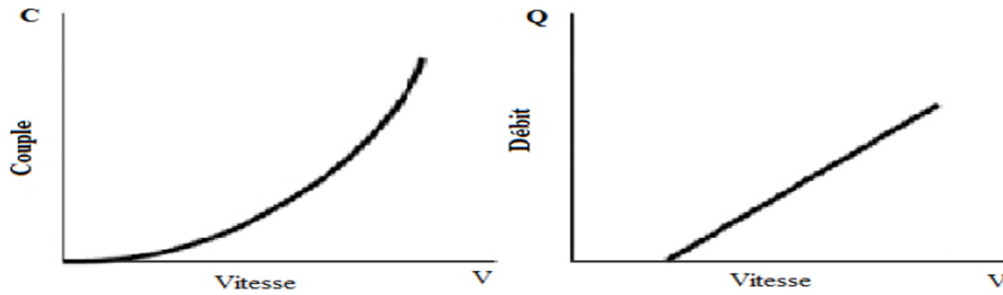


Fig. (I.18) : Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge. [16]

b) Pompe volumétrique : [16]

Dans ces pompes, le fluide est mis en mouvement par une variation du volume qui le contient. Les pompes volumétriques sont de deux sortes, les pompes volumétriques alternatives (exemple : pompe à piston, à membranes, etc.) et les pompes volumétriques rotatives (pompe à vis, etc.) Leurs principaux atouts sont les suivants :

- Elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à 5 m³/h) et aux grandes hauteurs.
- Elles ont de bons rendements, et les pompes de surface sont à auto-amorçages.

Le couple de démarrage d'une pompe volumétrique (de 3 à 5 fois le couple nominal) et la caractéristique $I=f(V)$ de ce type de pompe font que son fonctionnement en direct sur un panneau photovoltaïque n'est pas économiquement viable. Pour palier au problème de surdimensionnement du générateur résultant de cette inadaptation, un adaptateur d'impédance est utilisé pour permettre un rendement aussi élevé que possible de l'ensemble du système.

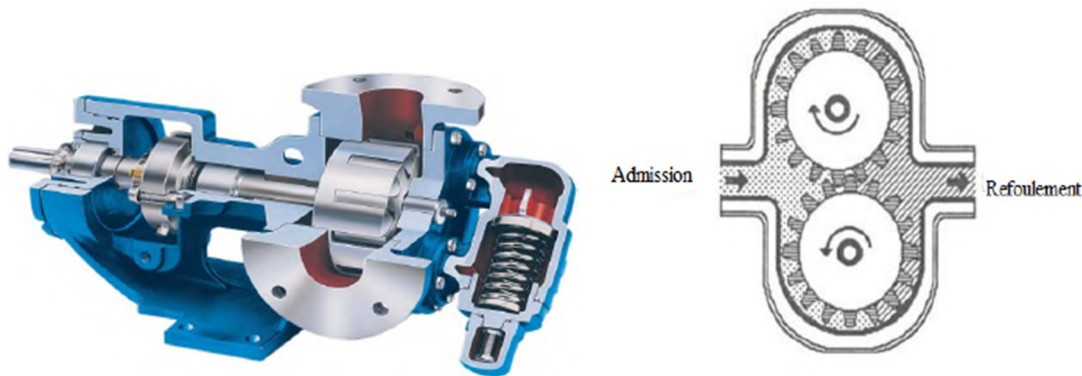


Fig. (I.19) : Schéma d'une pompe volumétrique. [16]

✓ Caractéristique couple et débit en fonction de la vitesse :

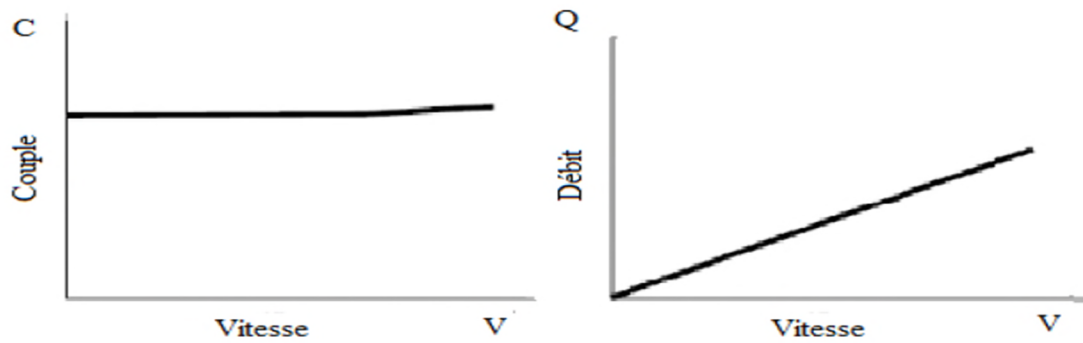


Fig. (I.20): Caractéristiques d'une pompe volumétrique. [16]

I.4.2.2. Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique : [17]

	Pompes centrifuges	Pompes volumétriques
Mécanique	Met le liquide en mouvement, ce qui crée une pression à la sortie (une pression apparaît, entraînant un débit).	Isole une certaine quantité de liquide et la transfère de l'orifice d'aspiration à celui de refoulement (un débit est créé, entraînant une pression).
Performance	Le débit dépend de la pression variable	Le débit est constant quelle que soit la pression.
Viscosité	Le rendement diminue avec l'augmentation de la viscosité du fait des pertes par frottement dans la pompe.	Le rendement augmente avec la viscosité.
	Rendement optimal en un point. À des pressions différentes, le rendement	Le rendement augmente avec la pression.

Rendement	diminue.	
Conditions d'entrée	Le liquide doit être dans la pompe pour créer un différentiel de pression. Auto-amorçage d'une pompe à sec impossible.	Une pression négative est créée à l'orifice d'entrée. Auto-amorçage d'une pompe à sec possible.

Tableau (I.2) : Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique. [17]

I.4.3. Classification selon les types de moteur :

I.4.3.1. Moteur à courant continu : [18]

Ces moteurs sont alimentés par des tensions continues. L'avantage principal des machines à courant continu réside dans leur adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation. Son principal défaut réside dans l'ensemble balais/ collecteur rotatif qui s'use, est complexe à réaliser et consomme de l'énergie.

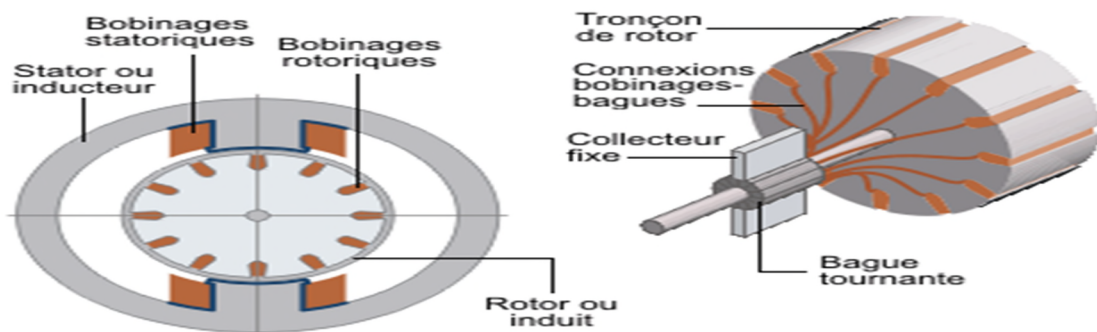


Fig. (I.21) : Moteur à courant continu. [19]

I.4.3.2. Moteur à courant alternatifs : [18]

Pour les applications de faible et moyenne puissance (jusqu'à quelques kilowatts), le réseau monophasé standard suffit. Pour des applications de forte puissance, les moteurs à courant alternatif sont généralement alimentés par une source de courants polyphasés. Le système le plus fréquemment utilisé est alors le triphasé (phases décalées de 120°) utilisé par les distributeurs d'électricité. Ces moteurs alternatifs se déclinent en deux types :

- ✓ Les moteurs synchrones ;
- ✓ Les moteurs asynchrones ;

I.4.3.2.1. Les moteurs synchrones : [18]

La machine synchrone est souvent utilisée comme génératrice. On l'appelle alors « alternateur ». Mis à part pour la réalisation de groupe électrogène de faible puissance, cette machine est généralement triphasée. Pour la production d'électricité, les centrales électriques utilisent des alternateurs dont les puissances peuvent avoisiner les 1 500 MW.

Comme le nom l'indique, la vitesse de rotation de ces machines est toujours proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent.

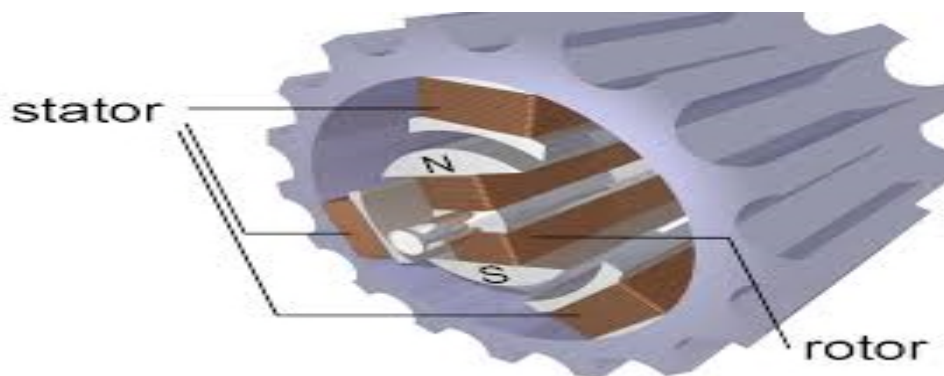


Fig. (I.22) : Moteur synchrone. [19]

I.4.3.2.2. Les moteurs asynchrone : [20]

La machine asynchrone, connue également sous le terme d'origine anglo-saxonne de « machine à induction », est une machine à courant alternatif sans alimentation électrique du rotor. Le terme anglais provient des courants induits dans le rotor par induction magnétique. Le terme « asynchrone » provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent.

L'utilisation d'un moteur asynchrone (à courant alternatif triphasé), plus robuste moins cher et sans entretien, devient une solution plus économique et plus pratique même au prix d'un circuit électronique de commande plus complexe pour les systèmes de pompage photovoltaïques.

L'utilisation d'un moteur asynchrone augmente ainsi l'autonomie et la fiabilité de l'installation. Le moteur est alimenté par un onduleur (convertisseur DC/AC) qui assure l'optimisation du générateur.

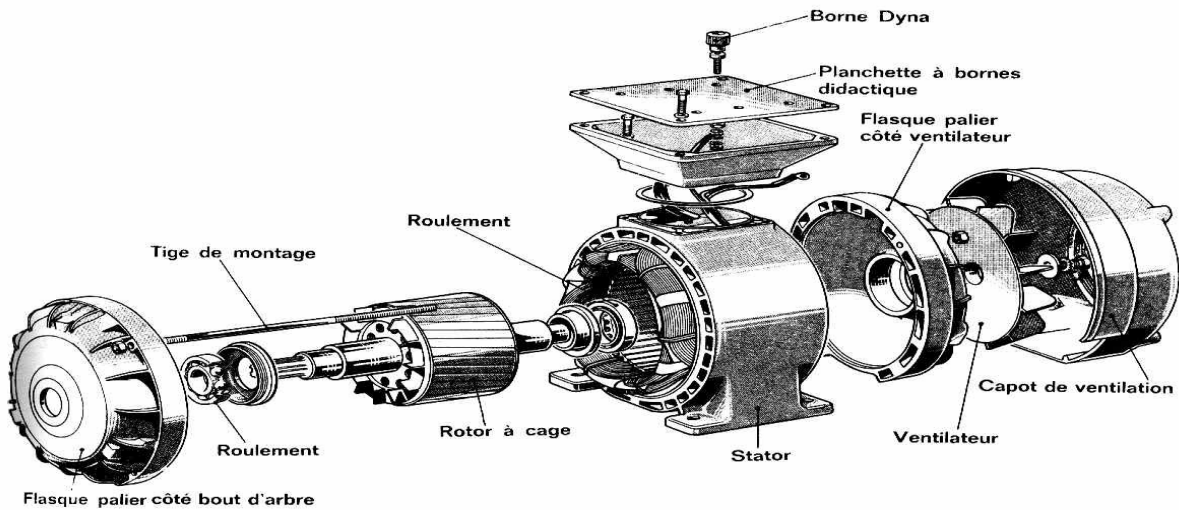


Fig. (I.23) : Moteur asynchrone. [20]

Dans ce travail, on utilise la machine asynchrone, parce qu'elle est la machine la plus fiable des machines électriques, la plus robuste de sa génération et la moins coûteuse à la fabrication.

I.4.4. Les convertisseurs statiques :

I.4.4.1. Convertisseur Buck (hacheur série) : [21]

Un convertisseur Buck, ou hacheur série convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur.

Le schéma de principe du hacheur série est donné sur la figure (24).

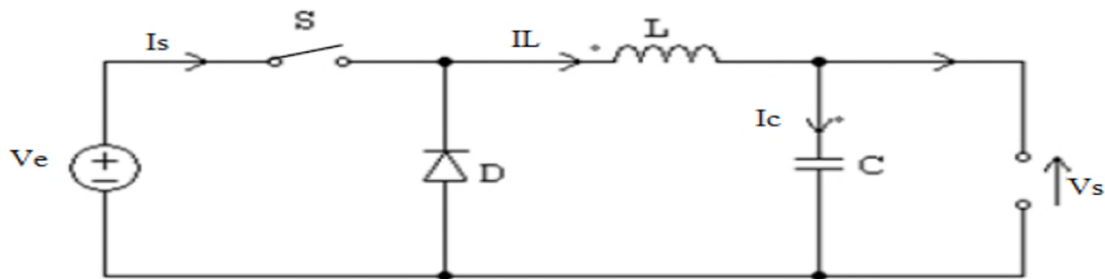


Fig. (I.24) : Hacheur série. [21]

I.4.4.2. Convertisseur Boost (Hacheur parallèle) : [22]

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. Son schéma est donné sur la figure (24).

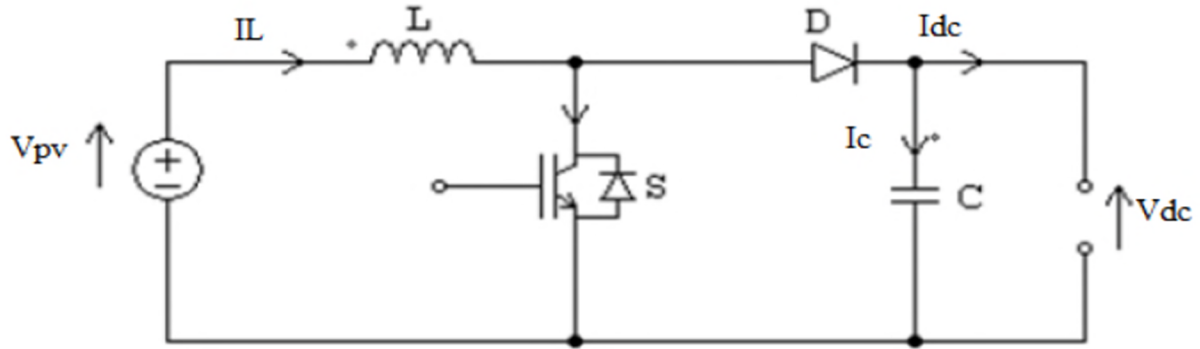


Fig. (I.25) : Hacheur parallèle. [22]

I.4.4.3. Convertisseur Buck-Boost : [23]

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse.

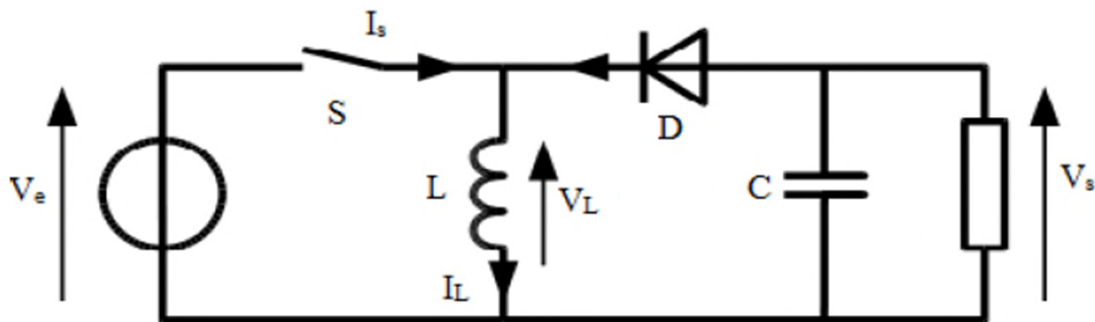


Figure (I.26) : Convertisseur Buck-Boost. [23]

I.4.4.4. Les onduleurs : [24]

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande.

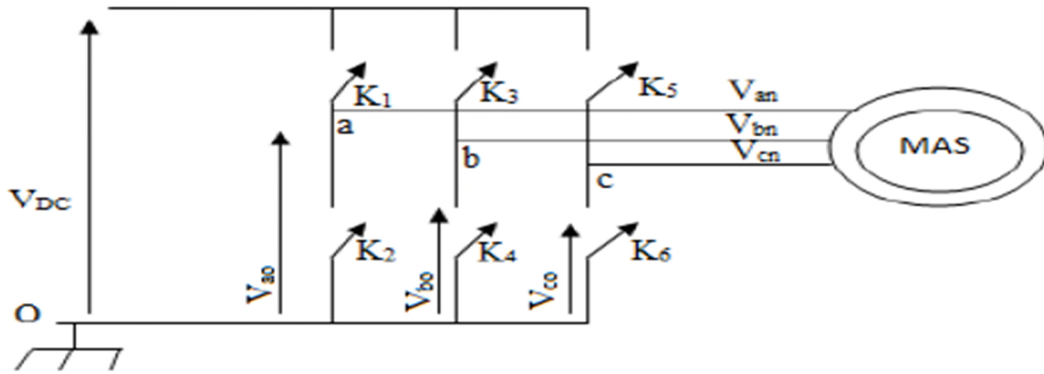


Fig. (I.27) : Conversion DC / AC. [24]

I.5. Généralités sur les batteries :

La batterie est souvent intégrée aux générateur photovoltaïque, elle permet le stockage de l'électricité pour les systèmes isolés, et elle restitue la nuit où les journées nuageuses cette électricité accumulée durant la journée.

I .5.1. L'avantage d'utilisation : [25]

Le seul inconvénient des panneaux solaires photovoltaïques, c'est qu'ils ne produisent de l'énergie que le jour. Or on a souvent besoin d'électricité la nuit (notamment pour s'éclairer) ! Pour bénéficier d'électricité la nuit ou durant les jours pluvieux, il faut donc installer des accumulateurs (batteries) qui vont permettre de stocker l'énergie sous forme chimique.

Donc le stockage d'énergie dans les systèmes de photovoltaïques autonomes est en général assuré par des batteries, composants utilisés dans la majorité des cas ; Seuls quelques applications utilisant l'énergie au fil du soleil par exemple du pompage ou de la ventilation peuvent se passer d'accumuler l'énergie ; aussi, la maîtrise des batteries est un élément essentiel aux succès des systèmes autonomes.

I.5.2. Principales caractéristiques des accumulateurs :

a) Capacité en Ampère heure : [26]

Les Ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant. Théoriquement, par exemple, une batterie de **200 Ah** peut fournir **200 A** pendant une heure, ou **50 A** pendant **4** heures, ou **4 A** pendant **50** heures. Il existe des facteurs qui peuvent faire varier la capacité d'une batterie tels que :

b) Rapports de chargement et déchargement : [26]

Si la batterie est chargée ou est déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer.

Généralement, si la batterie est déchargée à un rythme plus lent, sa capacité augmentera légèrement. Si le rythme est plus rapide, la capacité sera réduite.

c) Température : [26]

Un autre facteur qui influence la capacité est la température de la batterie et celle de son atmosphère. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement.

Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie.

d) La durée de vie : [27]

Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent. Par ailleurs, quelque soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles).

e) Profondeur de décharge : [27]

La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge.

f) La tension d'utilisation : [27]

C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.

g) Le rendement : [27]

C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.

h) Le taux d'autodécharge : [27]

L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.

I.5.3. Présentation de quelques technologies d'accumulation : [28]**✓ Les accumulateurs Nickel Cadmium (Ni-Cd):**

Les batteries cadmium-nickel (Ni-Cd) ne sont plus que rarement utilisés car leur prix est beaucoup plus élevé et elles contiennent du cadmium (toxique).

✓ Les accumulateurs Nickel Métal Hydrures (Ni-MH) :

Sont intéressantes car, leur emploi étant plus fréquent dans les applications professionnelles

haut de gamme, ou de très petite taille (2Ah).Et elles remplacent les accumulateurs en (Ni-Cd).

✓ **Accumulateurs au lithium:**

Le lithium rechargeable est déjà présent sur nombre d'appareil portable sous le nom « Liion», de tension 3.6 volts très compacte est a rechargé rapide, cette technologie n'est pas très bien adaptée au soleil a ce jour particulier parce que les accumulateurs doivent subir un Protocol de charge, assez précis, plutôt incompatible avec les courants éminemment variables d'un photo générateur soumis à divers éclairagements.

✓ **Accumulateurs au plomb-acide (Pb):**

Sont des batteries performantes et même moins cher et les plus préférables dans le stockage d'énergie électrique dans les systèmes solaires.

Dans notre étude Nous avons utilisent la batterie au plomb-acide.

I.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présentés des généralités sur l'énergie solaire et ses caractéristiques, ainsi que les deux types de systèmes photovoltaïques existants ; ensuite on a terminé par les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire. Nous nous intéressons particulièrement au système de pompage photovoltaïque avec batterie.

Le superviseur détermine la puissance de réglage à partir de la puissance demandée pour un certain débit et de la puissance disponible fournie par le générateur photovoltaïque. La modélisation des différents constituants du système fera l'objet du prochain chapitre.



Chapitre II

**Modélisation des éléments
du système de pompage
photovoltaïque**

II.1 Introduction :

La modélisation d'un système physique donnée consiste à établir son modèle mathématique afin de le simuler sous un logiciel mathématique et mieux comprendre son fonctionnement et de faciliter son dimensionnement. L'objectif est de disposer de modèles suffisamment fiables afin de bien dimensionner le système global à étudier.

Généralement, un système de pompage photovoltaïque est composé d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur qui peut être un DC/DC(Hacheur) ou un DC/AC(Onduleur), un moteur et une pompe et enfin un réservoir d'eau pour le stockage. Nous définissons le sous-système de pompage l'ensemble des éléments qui sont : le convertisseur, le moteur et la pompe. Ce regroupement est dicté par le fait qu'en pratique ces éléments sont proposés ensemble par les fabricants des systèmes de pompage photovoltaïque. Ainsi donc, nous considérons dans notre modélisation que le système de pompage est constitué d'un générateur photovoltaïque et un sous-système de pompage. [29]

Dans ce chapitre, nous présenterons les équations caractérisant le fonctionnement et les modèles mathématiques qui seront utilisés pour modéliser les différentes parties du système de pompage photovoltaïque.

Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink.

II.2. Description du système à étudier : [30]

Le système de pompage photovoltaïque avec batterie peut être comparé à une charge alimentée par une batterie qui est chargée par un générateur photovoltaïque. Ses éléments de base sont :

- Les panneaux photovoltaïques: permettent l'alimentation de la charge (motopompe) et le stockage (batterie).
- La commande MPPT : permet d'extraire la puissance maximale produite par le champ de modules PV.
- La batterie : alimente la charge et assure un stockage de l'énergie électrique.
- Le système de gestion : assure la gestion du flux d'énergie entre les différents composants et protège la batterie contre la surcharge et les décharges profondes.
- Le convertisseur DC/DC : fournit une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe.

- Le convertisseur DC/AC : fournit une tension alternative à partir d'une tension continue.
- Groupe motopompe : convertit l'énergie électrique en énergie hydraulique.

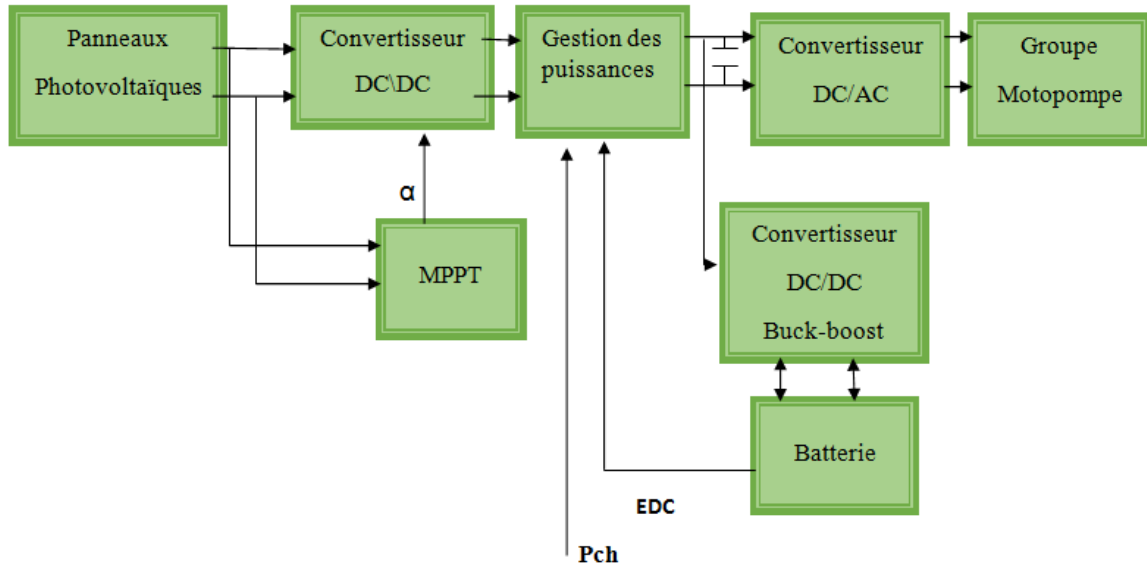


Fig. (II.1) : schéma descriptif de système de pompage photovoltaïque. [30]

II.3. Modélisation du générateur photovoltaïque :

Nous rencontrons dans la littérature plusieurs modèles du générateur photovoltaïque qui diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant final du générateur photovoltaïque.

II.3.1. Modèle de la cellule solaire : [31]

Une cellule peut être caractérisée par les paramètres principaux.

✓ **le courant de court circuit I_{sc} :**

$I_{sc} = I_{ph}$, est proportionnel à l'éclairement et représente le courant maximal généré par la cellule. Il est produit dans des conditions de court circuit ($V = 0$).

✓ **la tension à vide V_{oc} :**

Correspond à la chute de tension sur la diode, quand elle est traversée par le photo courant I_{ph} ($I_d = I_{ph}$), $I = 0$. Cette tension peut être exprimée mathématiquement par :

$$V_{oc} = \frac{nKT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_o}\right) = V_t \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_o}\right) \quad (II.1)$$

Où : $V_t = \frac{nKT}{q}$ est la tension thermique et T est la température absolue de la cellule.

I_0 : courant de saturation de la diode

V_t : tension thermique.

n : coefficient d'idéalité de la diode.

q : charge d'un électron $1,6 \cdot 10^{-19}$.

✓ le point de puissance maximale (P_{max}) :

Est le point de fonctionnement M (V_{max} , I_{max}) , pour lequel la puissance dissipée dans la charge résistive est maximale.

$$P_{max} = V_{max} \cdot I_{max} \quad (II.2)$$

✓ le rendement maximal η :

Est le rapport entre la puissance maximale et la puissance incidente:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{max}}{A} \frac{V_{max}}{G} \quad (II.3)$$

Où P_{in} est la puissance incidente, G ou E est l'éclairement et A est la surface de la charge.

✓ Facteur de forme (FF) : [32]

La puissance fournie au circuit extérieure par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale pour un point de fonctionnement P_p (I_p et V_p) de la courbe courant tension.

Le facteur de forme est le rapport de la puissance maximale et le produit de la tension de circuit ouvert et le courant de court circuit. Il détermine la qualité électrique de la cellule.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{V_{max}}{V_{oc}} \frac{I_{max}}{I_{oc}} \quad (II.4)$$

Où P_{max} est la puissance maximale, V_{max} est la tension où la puissance est maximale, I_{max} est le courant où la puissance est maximale, V_{oc} est la tension de circuit ouvert et I_{sc} est le courant de court circuit.

✓ Température de jonction : [33]

La température de la jonction T_c de la cellule est donnée par la relation suivant :

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} E \quad (II.5)$$

NOCT: la température nominale de fonctionnement de la cellule solaire.

T_a : La température ambiante.

II.3.2. Groupement des cellules solaires :

II.3.2.1. Module photovoltaïque : [34]

Le modèle utilisé pour simuler les performances du module PV (groupement de cellules en série) est déduit du modèle de la caractéristique d'une cellule solaire par l'équation suivante :

$$I_{\text{module}} = I_{\text{ph}} - I_0 \exp\left[\frac{q}{nAKT}(V + R_s I) - 1\right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (II.6)$$

Avec , R_s et R_{sh} résistance série et parallèle du module défini par :

$$R_s = n.R_s \quad \text{et} \quad R_{sh} = n.R_{sh}$$

II.3.2.2. Panneau photovoltaïque :[34]

La modélisation d'un panneau composé de N_s modules en série et N_p modules en parallèle est :

$$I_{\text{panneau}} = N_p \cdot I_{\text{ph}} \cdot N_p \cdot I_0 \left[\exp\left(\frac{q}{nAKTN_s}(V + R_s I_{\text{mod}}) - 1\right) \right] - N_p \frac{I_{\text{mod}} R_s}{R_{sh}} \quad (II.7)$$

Avec R_s et R_{sh} résistance série et parallèle du module défini par :

$$R_s = n.(N_s / N_p) \cdot R_s \quad \text{et} \quad R_{sh} = n.(N_p / N_s) \cdot R_p$$

II.3.3. Choix de modèle mathématique :

II.3.3.1. Modèle explicite : [35]

C'est le modèle le plus simple, vu le nombre de paramètres qu'il nécessite. La résolution d'un tel modèle se fait comme suit :

$$I = I_{sc} n_p \left[1 - c_1 \left(\exp\left(\frac{n_s V}{c_2 V_{oc}}\right) - 1 \right) \right] \quad (II. 8)$$

Où C_1 et C_2 sont des paramètres qui peuvent être calculés respectivement.

$$C_2 = \frac{\frac{V_{mpp}-1}{V_{oc}}}{\ln\left(1 - \frac{I_{mpp}}{I_{sc}}\right)} \quad (\text{II. 9})$$

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{mpp}}{I_{sc}}\right) \exp\left(-\frac{V_{mpp}}{C_2 \cdot V_{oc}}\right) \quad (\text{II. 10})$$

II.3.3.2. Modèle à deux diodes : [36]

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit composé d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule, une résistance shunt et une résistance série.

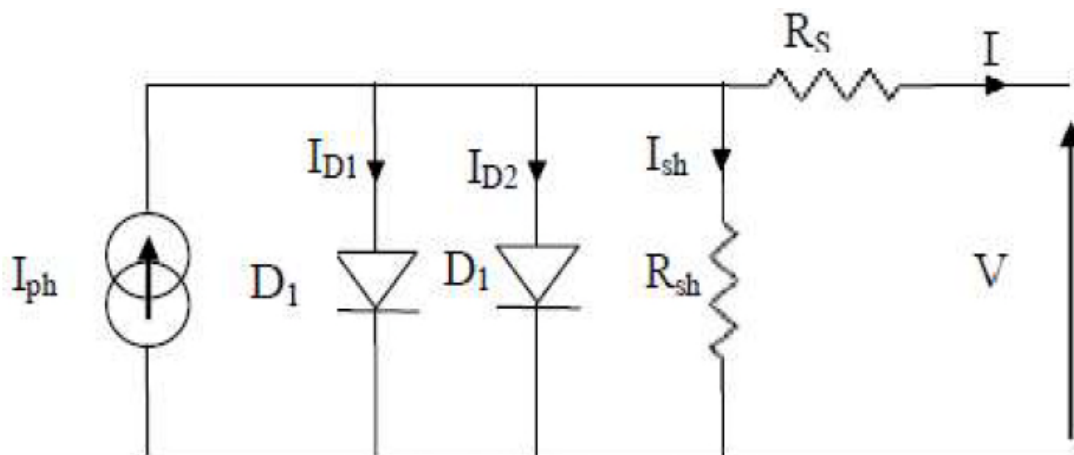


Fig. (II.2) : Schéma électrique équivalent du modèle a deux diodes. [36]

Le courant généré par la cellule photovoltaïque est donné par la loi des mailles :

$$I = I_{ph} - (I_{D1} + I_{D2}) - I_{sh} \quad (\text{II.11})$$

Le courant de la diode est donné par :

$$I_{D1} = I_{01} \left[e^{\frac{q(V + R_s I)}{AKT}} - 1 \right] \quad (\text{II.12})$$

$$I_{D2} = I_{02} \left[e^{\frac{q(V+R_S I)}{AKT}} - 1 \right] \quad (II.13)$$

Avec : I_{01} , I_{02} courant de saturation des diodes.

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[e^{\frac{q(V+R_S I)}{AKT}} - 1 \right] - I_{02} \left[e^{\frac{q(V+R_S I)}{AKT}} - 1 \right] - \left(\frac{V+R_S I}{R_{sh}} \right) \quad (II.14)$$

II.3.3.3. Modèle à une diode : [37]

Le modèle à une diode est le plus utilisé et il donne de très bonnes précisions. La conversion de l'énergie de la lumière en énergie électrique est modélisée par un générateur de courant.

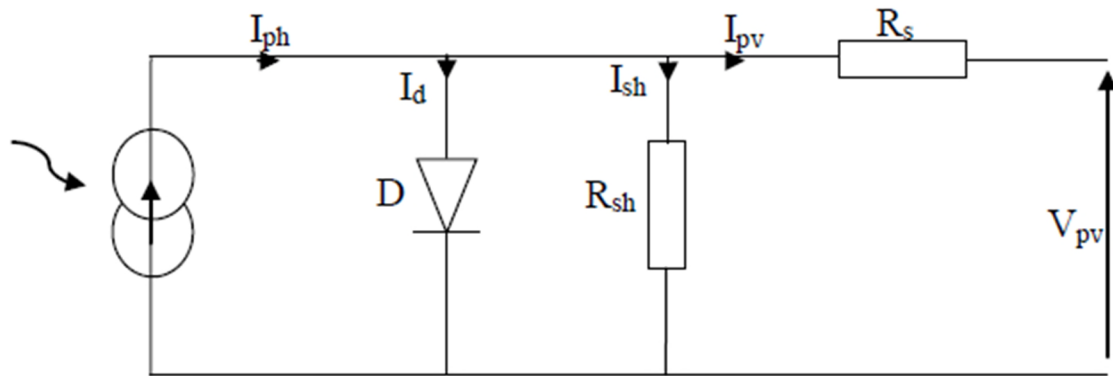


Fig. (II.3) : schéma électrique équivalent du modèle à une diode. [37]

➤ Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (II.15)$$

Tel que :

I_{pv} : Le courant délivré par le module.

I_{ph} : Photo courant.

I_d : Courant de diode.

I_{sh} : Le courant shunt.

➤ Le courant produit par la photopile est donné par :

$$I_{pv} = P_1 E [1 + P_2 (E - E_{ref}) + P_3 (T_c - T_{cref})] \quad (II.16)$$

Tel que :

E_{ref} : Ensoleillement de référence.

T_c : Température absolue de la cellule.

T_{cref} : Température de référence.

➤ Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_s e^{\frac{q (v + R_s I_{pv})}{A n_s k T_j}} - 1 \quad (\text{II.17})$$

Avec:

$$I_s = P_4 T_c e^{\left(\frac{-E_g}{K T_c}\right)} \quad (\text{II.18})$$

Avec:

$$E_g = 1.1 \text{eV}$$

E_g : L'énergie de gap (paramètre caractéristique du matériau, pour le Silicium).

I_s : Courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité.

➤ Le courant de la résistance shunt est donné par :

$$I_{sh} = \frac{(V + R_s I_{pv})}{R_{sh}} \quad (\text{II.19})$$

Tel que :

R_s : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contacte).

R_{sh} : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

D'ou l'expression de la caractéristique courant-tension figure (II.20) qui est donnée par l'équation suivante :

$$I_{pv} = P_1 E [1 + P_2 (E - E_{ref}) + P_3 (T_c - T_{cref})] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} - P_4 T_c e^{\left(\frac{-E_g}{K T_c}\right)} e^{\left(\frac{q (V + R_s I)}{A K T_c}\right)} - 1$$

(II.20)

✓ **Détermination des paramètres pour le modèle à une diode :**

Les sept paramètres constants P1, P2, P3, P4, le facteur d'idéalité A et les résistances R_s et R_{sh} du modèle du générateur PV sont déterminés part une résolution numérique (méthode Newton Raphson).

$$\left\{ \begin{array}{l} I(V_{oc}) = 0 \\ I(0) = I_{sc} \\ I(V_{max}) = I_{max} \\ \left. \frac{dP}{dV} \right|_{P=P_{max}} = I_{max} + \left. \frac{dP}{dV} \right|_{V=V_{max}}^{I=I_{max}} = 0 \end{array} \right. \quad \text{(II.21)}$$

Ou les coefficients P₁, P₂, P₃, P₄ et A sont donnés par :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = 0.00345 \\ P_2 = \frac{P_4}{V_{oc}} \\ P_3 = \ln \left[\frac{I_{sc}(1+P_1) - I_{max}}{P_1 * I_{sc}} \right] \\ P_4 = \ln \left(\frac{1+P_1}{P_1} \right) \\ A = \frac{\ln \left(\frac{P_3}{P_4} \right)}{\ln \left(\frac{V_{max}}{V_{oc}} \right)} \end{array} \right. \quad \text{(II.22)}$$

Dans ce travail, nous avons utilisé le panneau solaire de marque SIEMENS. Le tableau (II.1) donne les paramètres électriques de panneaux utilisé dans les conditions standards:

Chap II : Modélisation des éléments du système de pompage PV

Paramètres	Valeurs
Puissance max du panneau p_{\max}	110 W
Puissance nominale p_n	110 W
Courant au point de puissance max I_{\max}	3.15 A
Tension au point de puissance max V_{\max}	35 V
Courant de court-circuit I_{sc}	3.45A
Tension en circuit ouvert V_{oc}	43.5 V
Coefficient d'incrémentation du courant $I_{sc}(a_{sc})$	1,4 mA/°C
Coefficient d'incrémentation de la tension $V_{oc}(\beta_{oc})$	- 152 mV/°C

Tableau (II. 1) : Paramètres électriques des panneaux SIEMENS. [37]

Les valeurs des paramètres du modèle à une diode sont données dans le tableau (II.2):

P_1	P_2	P_3	P_4	A	R_{sh}	R_s
0.00345	$0.58 \cdot 10^{-5}$	$-0.336 \cdot 10^{-4}$	31.2367	1	0.614	151.16

Tableau (II.2) : Paramètres obtenus du modèle à une diode du panneau PV SM110. [37]

II.3.4. Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ dans des conditions STC :

Nous allons étudier le comportement de notre panneau photovoltaïque dans les conditions standard de fonctionnement a ensoleillement $G=1000W/m^2$ et a température $T=25C^\circ$.

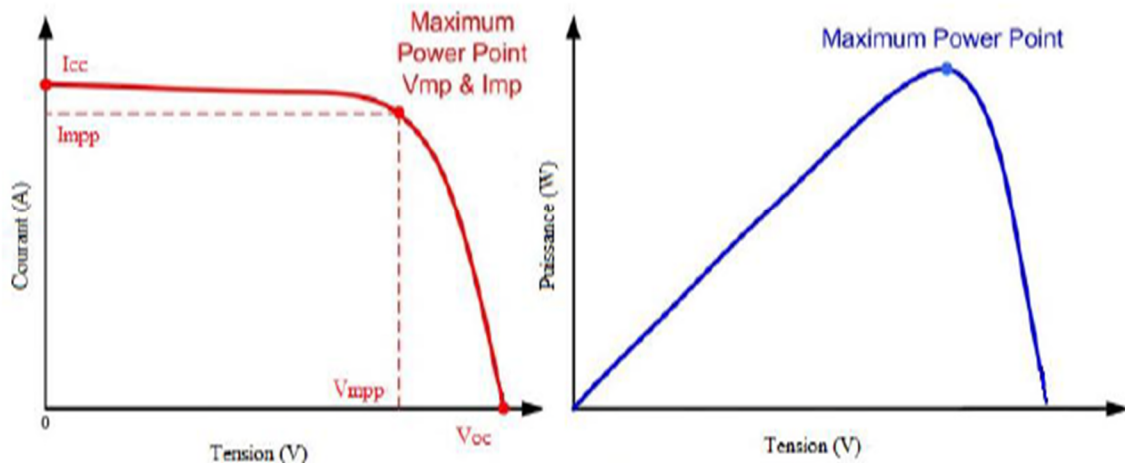


Fig. (II.4) : Exemple de caractéristique courant-tension d'un module PV. [38]

Avec les résultats de simulation retrouvés, nous avons pu valider le modèle à une diode. Les résultats des caractéristiques Puissance-Tension et courant-Tension correspondent parfaitement au comportement d'un panneau photovoltaïque. Les valeurs I_{sc} , I_{max} , V_{oc} , V_{max} ainsi que P_{max} sont les valeurs exactes du tableau donné précédemment. Nous allons passer dans ce qui suit à l'étude de l'influence des paramètres d'entrées : Température et Ensoleillement.

II.3.4.1. Influence de l'ensoleillement sur les caractéristiques du module photovoltaïque :

Dans ce qui suit, la simulation ont été faites pour différentes valeurs d'ensoleillement ($G = 200, 400, 600, 800, 1000 \text{ W/m}^2$) en maintenant la température constante $T_a = 25^\circ\text{C}$. Pour chaque ensoleillement nous déterminons la caractéristique courant / tension Figure (II.5) ainsi que pour la caractéristique puissance / tension Figure (II.6).

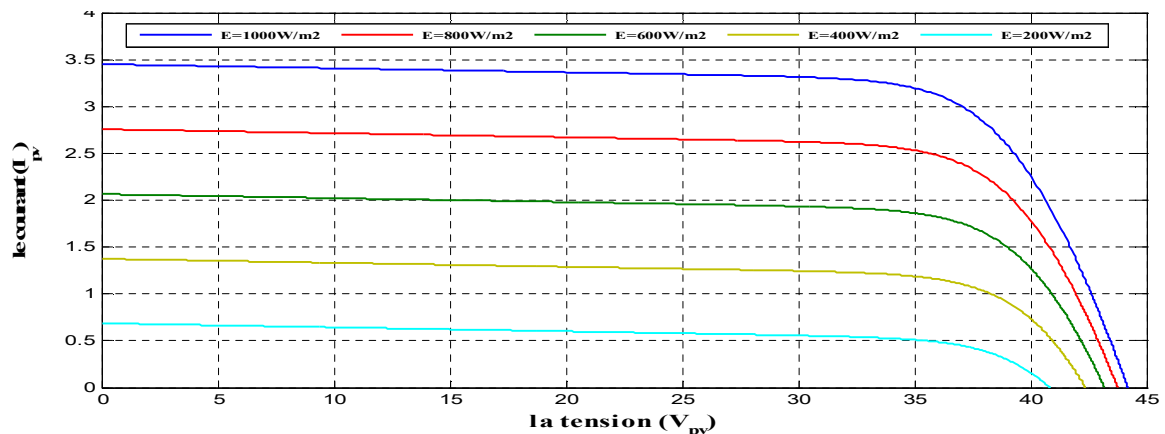


Fig. (II.5) : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$.

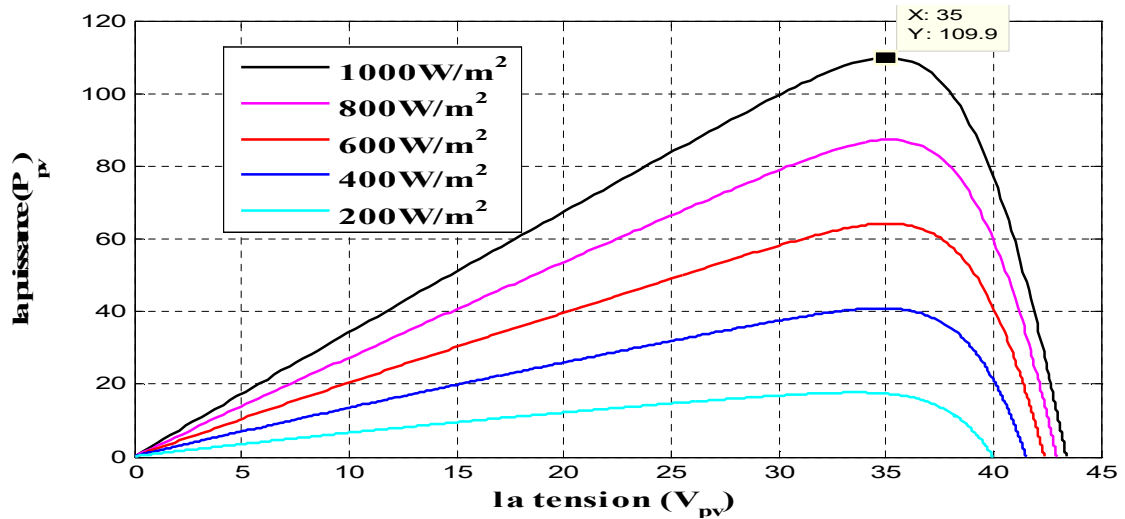


Fig. (II.6) : Influence de l’ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$.

Les conclusions tirées de cette variation sont les suivants :

- ✓ Le courant de circuit-ouvert I_{sc} et la puissance varie proportionnellement à l’ensoleillement G .
- ✓ La tension à vide V_{oc} varie peu avec l’ensoleillement pouvant être considérée comme une constante pour une installation donnée.

II.3.4.2. Influence de la température sur les caractéristiques du module photovoltaïque :

Nous allons effectuer d’autres test, mais cette fois ci en faisant varier la valeur de la température ambiante ($T_a = 10, 20, 25, 30, 40, 45 \text{ } ^\circ\text{C}$). Nous obtenons les courbes suivantes

Figure (II.7) et Figure (II.8)

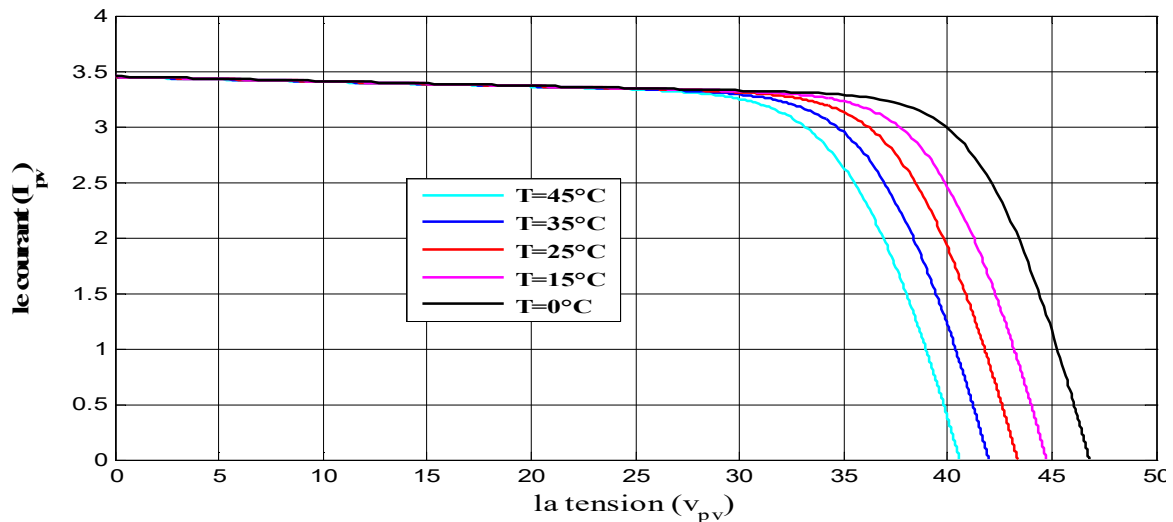


Fig. (II.7) : Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$.

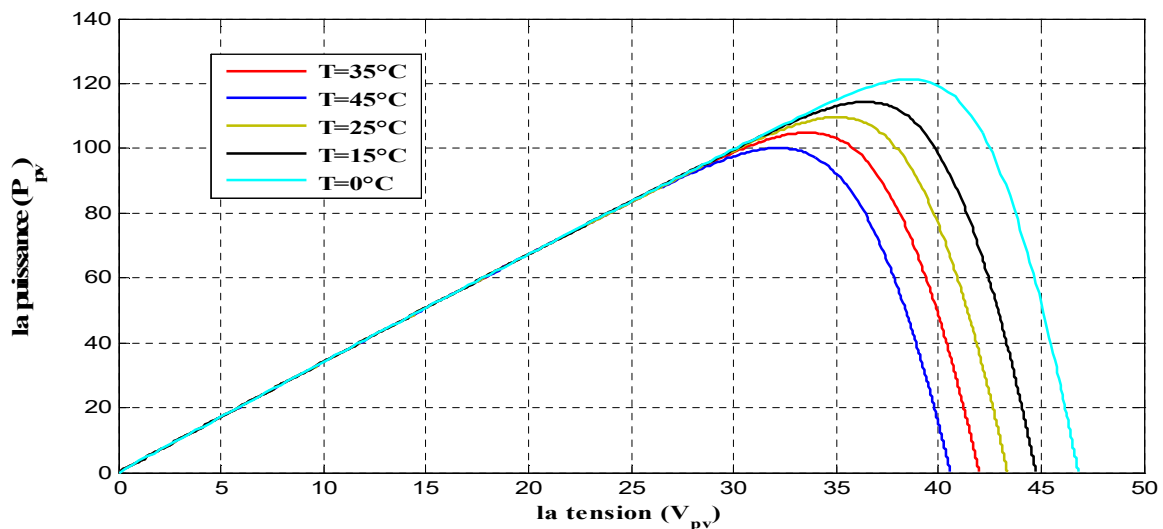


Fig. (II.8) : Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$.

Les conclusions tirées de cette variation sont les suivantes :

- ✓ En faisant varier la température de 0°C à 35°C, nous remarquons que le courant de court-circuit I_{sc} et la puissance P_{pv} est presque dépendant de la température.
- ✓ En revanche, la tension de circuit ouvert V_{oc} diminue lorsque la température augmente.

• **Discussion des résultats :**

➤ **Influence de l'ensoleillement :**

Une température de 25 °C est maintenue constante, l'ensoleillement (E) varie. Les courbes obtenues sont illustrées dans les figures (II.5) et (II.6).

On remarque :

- ✓ Que l'influence due à la baisse de l'éclairement fait diminuer fortement la valeur du courant de court-circuit I_{sc} . Par contre la tension de circuit ouvert V_{oc} diminue faiblement.
- ✓ Que le point de puissance optimale chute brusquement si l'ensoleillement diminue.
- ✓ Que le courant produit par la photopile I_{ph} est pratiquement proportionnel à l'éclairement solaire E. Par contre, la tension aux bornes de la jonction varie peu car elle est en fonction de la différence de potentiel de la jonction N-P du matériau lui-même.

➤ **Influence de la température :**

Pour un ensoleillement $1000W/m^2$ maintenu constant, nous varions la température. Les figures (II.7 et II.8) représentent les résultats de notre simulation obtenue.

On remarque :

- ✓ Que le courant de court-circuit I_{sc} est faiblement dépendant de la température, alors que la tension de circuit ouvert V_{oc} , est très sensible à la variation de la température.
- ✓ Que l'augmentation de la puissance optimale va dans le sens inverse de T.

II.4. Modélisation des convertisseurs statiques :

II.4.1. Modélisation du hacheur élévateur de tension (Boost) :

Les convertisseurs statiques DC/DC, appelés aussi hacheurs, sont souvent utilisés dans les systèmes photovoltaïques comme interface d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et sa charge. Ils permettent de commander le flux d'énergie générée par les GPV et d'assurer la poursuite du point de puissance maximale en suivant des stratégies de contrôle spécifiques. Le convertisseur boost est un élévateur de tension, la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée [39]. La figure (II.9) représente la structure d'un hacheur de type Boost utilisé pour adapter un système photovoltaïque.

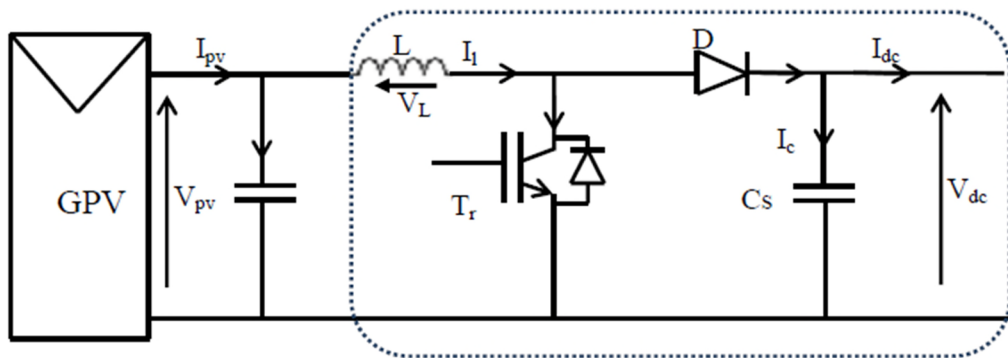


Fig. (II.9) : Circuit électrique du convertisseur DC-DC (boost) .

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T, comporte deux étapes. Lors de la première, on rend l'interrupteur passant (T_r est passant) et la diode polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de 0 à $\alpha.T$ (α rapport cyclique, et compris entre 0 et 1). la tension aux bornes de l'inductance vaut $V_L = V_{pv}$, le courant traversant l'inductance augmente linéairement. Lors de la seconde, on bloque l'interrupteur. La diode devient passante. Cette phase dure de $\alpha.T$ à T.

La tension aux bornes de l'inductance vaut $V_L = V_{pv} - V_{dc}$, dans cette phase le condensateur C_s se charge en même temps par le courant stocké dans l'inductance et par le générateur [40]. Les équations électriques du hacheur boost sont :

$$V_{pv} = L \frac{dI_l}{dt} + (1 - a)V_{dc} \tag{II.23}$$

$$(1 - a)I_1 = C_s \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (II.24)$$

En valeurs moyennes, la tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique moyen. Son expression est donnée par l'équation (II.25).

$$V_{dc} = \frac{1}{(1 - a)} V_{pv} \quad (II.25)$$

Et le courant par la relation :

$$I_{dc} = (1 - a)I_1 \quad (II.26)$$

La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique.

II.4.2. Modèle mathématique du convertisseur Buck-Boost :

Le convertisseur Buck-Boost est un inverseur de tension à stockage inductif, la tension en sortie est toujours de signe contraire à la tension en entrée [41]. Tandis que lorsque le transistor est fermée le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée, et quand le commutateur est ouvert la tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode.

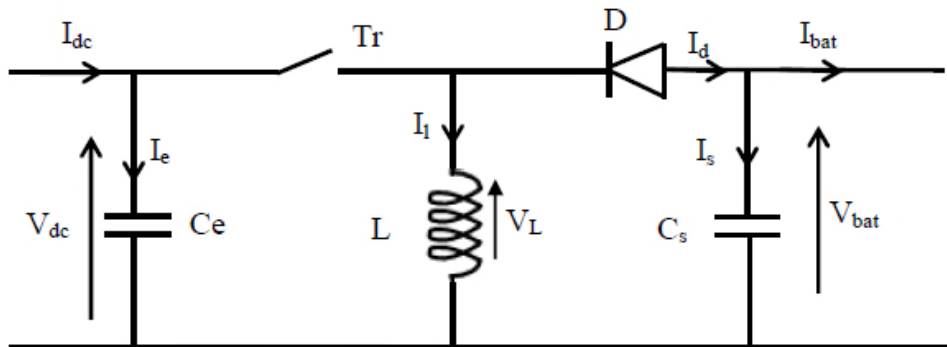


Fig. (II.10) : Circuit électrique du convertisseur DC-DC (buck-boost). [41]

La valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, par conséquent l'équation de la tension aux bornes de la batterie décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée par :

$$V_{batt} = -\frac{a}{(1 - a)} V_{dc} \quad (II.27)$$

Si nous admettons que la puissance échangée entre la batterie et le bus se conserve, alors nous pouvons écrire:

$$I_{batt} = -\frac{(1-a)}{a} I_{dc} \quad (II.28)$$

II.4.3. Modélisation de l'onduleur de tension à MLI : [42]

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Les onduleurs utilisés pour le pompage sont en général à fréquence variable, afin de permettre une variation de la vitesse de rotation de la pompe.

A partir du schéma de l'onduleur triphasé présenté sur la figure (II.11), on développera les différentes équations qui modélisent le fonctionnement de ce dernier. Pour simplifier l'étude on suppose que :

- ✓ La commutation des interrupteurs est instantanée.
- ✓ La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- ✓ La charge est équilibrée, couplée en étoile.

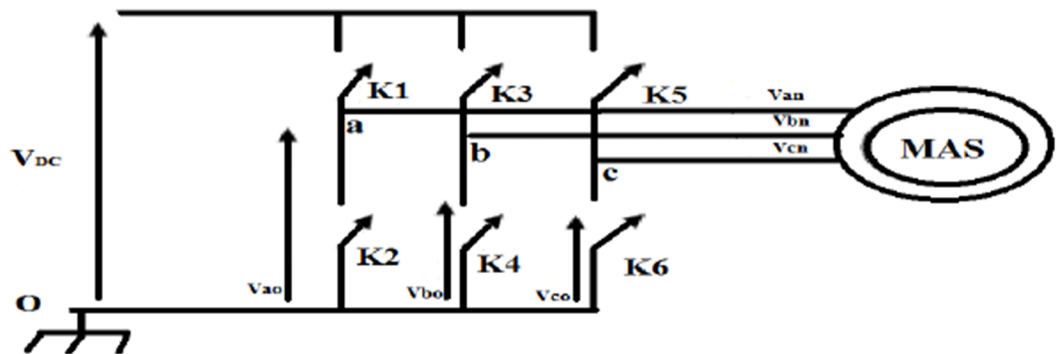


Fig. (II.11) : Circuit électrique de l'onduleur. [42]

Nous supposons que les interrupteurs sont idéaux et la charge triphasée est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé :

Les tensions composées V_{ab} , V_{bc} et V_{ca} sont obtenues à partir de ces relations :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (II.29)$$

Chap II : Modélisation des éléments du système de pompage PV

Avec : V_{ao} , V_{bo} , V_{co} , sont les tensions à l'entrée de l'onduleur (continues). On a pris le point milieu «O» d'un diviseur fictif à l'entrée comme référence pour ces dernières tensions. Les trois tensions à l'entrée continue sont données par la relation de Châle comme suit :

$$\begin{cases} V_{a0} = V_{an} + V_{n0} \\ V_{b0} = V_{bn} + V_{n0} \\ V_{c0} = V_{cn} + V_{n0} \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

Avec : V_{an} , V_{bn} , et V_{cn} sont les tensions de phase de la charge, ou de sortie de l'onduleur et V_{no} est la tension du neutre de la charge par rapport au point fictif «O».

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.31})$$

En remplaçant (II.32) dans (II. 33) on aura :

$$V_{no} = \frac{1}{3} (V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{II.32})$$

En introduisant (II. 34) dans (II.31) on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3} (2V_{a0} - V_{b0} - V_{c0}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3} (V_{a0} - 2V_{b0} - V_{c0}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3} (V_{a0} - V_{b0} - 2V_{c0}) \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

Si on suppose que :

$$\begin{cases} V_{a0} = V_{DC} \cdot S_1 \\ V_{b0} = V_{DC} \cdot S_2 \\ V_{c0} = V_{DC} \cdot S_3 \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Si est l'état de l'interrupteur K_i tel que : $\begin{cases} S_i = 1, \text{si } K_i \text{ fermer} \\ S_i = 0, \text{si } K_i \text{ ouvert} \end{cases}$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

Le courant modulé par l'onduleur est donné par :

$$I_{DC} = S_1 i_{ach} + S_2 i_{bch} + S_3 i_{cch} \quad (II.36)$$

Avec : S1, S2, S3 et des fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur pour un seul bras.

II.5. Modélisation du filtre : [43]

On utilise un filtre passe-bas (LC) pour éliminer les hautes fréquences, il est représenté sur la figure (II.12).

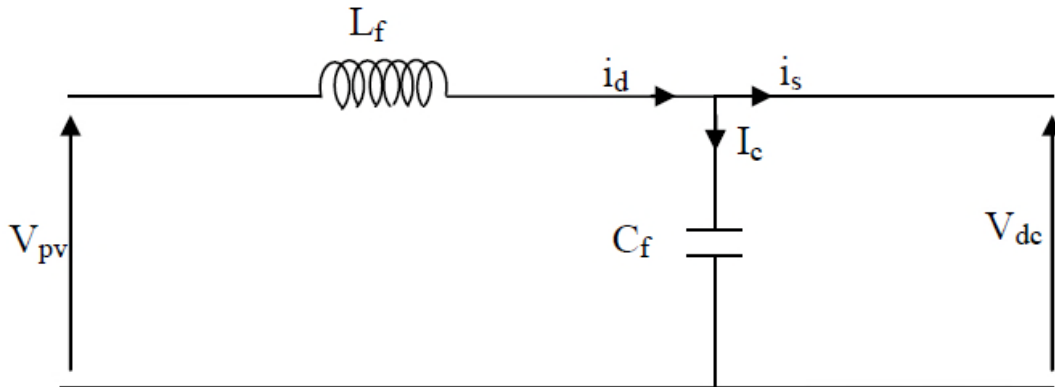


Fig. (II.12) : Circuit électrique du filtre. [43]

Les équations qui caractérisent ce filtre sont les suivantes :

$$V_{dc} = \frac{L_f di_d}{dt} + V_{PV} \quad (II.37)$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_f} (i_d - i_s) \quad (II.38)$$

La fonction de transfert du filtre est donnée par :

$$F(P) = \frac{V_{dc}(P)}{V_{PV}(P)} \quad (II.39)$$

La fréquence de coupure égale à :

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} \quad (II.40)$$

II.6. Modélisation du bus continue : [30]

Le couplage entre le générateur photovoltaïque, batterie et l'onduleur est fait par l'intermédiaire d'un bus continue. Il est donc nécessaire d'avoir le modèle mathématique de ce circuit.

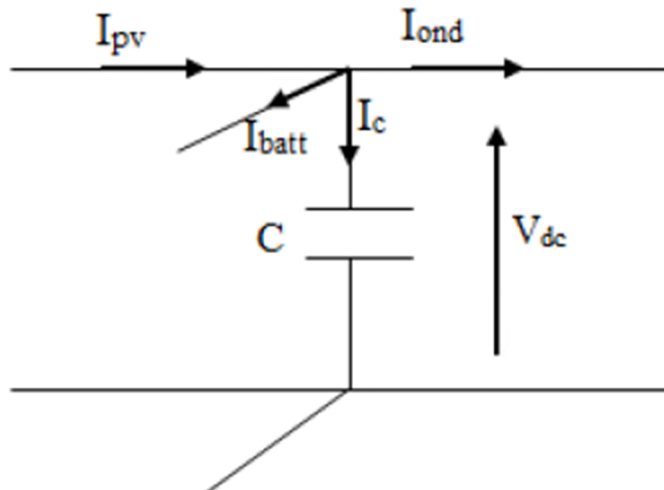


Fig. (II.13) : Modèle du bus continue. [30]

A partir de la figure(II.13), on peut écrire l'équation suivante :

$$I_c = I_{pv} - I_{ond} \pm (I_{batt}) \quad (II.41)$$

La tension V_{dc} est une fonction du courant I_c :

$$I_c = C \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (II.42)$$

Avec , C : La capacité du condensateur.

II.7. Modélisation du moteur asynchrone à cage d'écureuil : [44]

Le principe de fonctionnement d'une machine asynchrone est basé sur l'interaction électromagnétique du champ tournant, créée par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs du rotor sont coupés par le champ tournant. Cette interaction électromagnétique du stator et du rotor de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant diffère de celle du rotor.

II.7.1. Hypothèses simplificatrices : [44]

Comme nous l'avons déjà signalé, la modélisation de la machine nécessite certaines hypothèses simplificatrices qui sont :

- La machine est symétrique et à entrefer constant.
- La saturation n'est pas prise en considération.

II.7.2. Modèle dynamique du moteur asynchrone : [10]

La MAS triphasés est représentée schématiquement par la figure (II.14). Elle est munie de six enroulements.

- Le stator de machine est formé de trois enroulements fixes identiques décalés de 120° dans l'espace et traversés par trois courants variables.
- Le rotor peut être modélisé par trois enroulements identiques décalés dans l'espace de 120°. ces enroulements sont en court-circuit et la tension à leurs bornes est nulle.

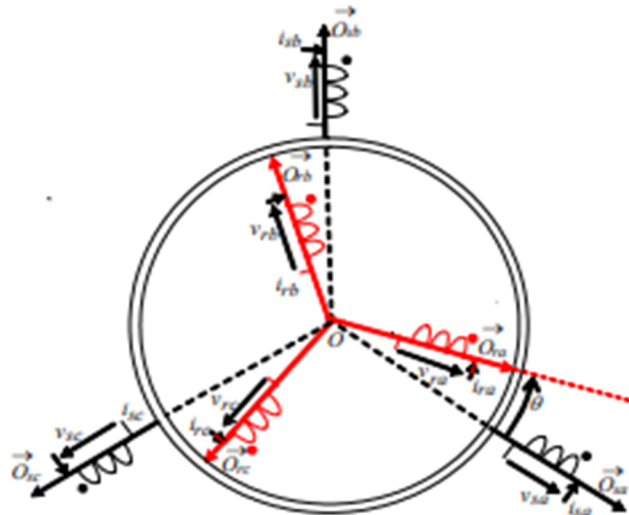


Fig. (II.14) : Représentation schématique de la machine. [10]

Les équations des tensions régissant le fonctionnement d'une machine asynchrone s'écrivent sous forme matricielle :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \end{cases} \quad \text{(II.43)}$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}, \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}, \quad [\phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix}, \quad R_s = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}, \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}, \quad [\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix}, \quad R_r = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

- $[V_s], [V_r]$: vecteurs des tensions statoriques et rotoriques.
- $[I_s], [I_r]$: vecteurs des courants statoriques et rotoriques.
- $[\phi_s], [\phi_r]$: vecteurs des flux statoriques et rotoriques.
- $[R_s], [R_r]$: matrices des résistances statoriques et rotoriques.

Les flux totalisés Φ_s et Φ_r des phases statoriques et rotoriques s'expriment sous forme :

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [l_s][I_s] + [m][I_r] \\ [\Phi_r] = [l_r][I_r] + [m][I_s] \end{cases} \quad (\text{II.44})$$

La symétrie de la machine fait que les inductances propres des phases statoriques sont égales et de même pour celles du rotor. Les matrices $[l_s]$ et $[l_r]$ deviennent :

$$[l_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \quad \text{Et} \quad [l_r] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix}$$

- l_s, l_r : inductances propres statorique et rotorique.
- m_s : inductance mutuelle entre phases statorique.
- m_r : inductance mutuelle entre phases rotorique.

Chaque flux comporte une interaction avec les courants de toutes les phases y compris la sienne (notion de flux/inductance propre).

Exemple de la phase a statorique :

$$\Phi_{as} = l_s i_{as} + m_s i_{bs} + m_s i_{cs} + m_1 i_{ar} + m_3 i_{br} + m_2 i_{cr} \quad (\text{II.45})$$

En matriciel :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \\ \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s & m_1 & m_3 & m_2 \\ m_s & l_s & m_s & m_2 & m_1 & m_3 \\ m_s & m_s & l_s & m_3 & m_2 & m_1 \\ m_1 & m_2 & m_3 & l_r & m_r & m_r \\ m_3 & m_1 & m_2 & m_r & l_r & m_r \\ m_2 & m_3 & m_1 & m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.46})$$

La matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor dépend de la position angulaire θ entre l'axe du stator et celui du rotor :

$$\begin{cases} m_1 = m_{sr} \cos \theta \\ m_2 = m_{sr} \cos \left(\theta - \frac{\pi}{2} \right) \\ m_3 = m_{sr} \cos \left(\theta + \frac{\pi}{2} \right) \end{cases} \quad (\text{II.47})$$

m_{sr} : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor.

On peut résumer les résultats obtenus après l'application de la transformation de Park pour les deux grandeurs flux et tension :

- Les tensions :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \\ V_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.48})$$

Avec :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \quad (\text{La pulsation statorique}).$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{La pulsation rotorique}).$$

➤ Les flux :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.49})$$

Avec :

$$L_s = l_s - m_s \quad (\text{II.50})$$

$$L_r = l_r - m_r \quad (\text{II.51})$$

$$M = \frac{3}{2} m_{sr} \quad (\text{II.52})$$

Le couple électromagnétique s'écrit :

$$\Gamma_e = \frac{3}{2} P (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \quad (\text{II.53})$$

L'équation mécanique est donnée par [39]:

$$C_{em} = P \frac{M}{L_r} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \quad (\text{II.54})$$

II.8. Modélisation de la pompe : [45]

La modélisation des systèmes de pompage a fait l'objet de plusieurs articles de recherche qui décrivent le fonctionnement de différents composants de ces systèmes, exemple la modélisation de l'onduleur, le moteur et la pompe. Seulement, ces modèles ne donnent pas une relation directe entre la puissance électrique utile du sous-système et le débit d'eau fourni.

Ainsi, nous présentons un modèle mathématique qui relie directement le débit d'eau, Q à la puissance, Pa consommé par le sous-système de pompage. Pour une hauteur manométrique donnée, (h) .

L'équation mathématique du modèle est donnée comme suit :

$$P(Q, h) = a(h)Q^3 + b(h)Q^2 + c(h)Q + d(h) \quad (\text{II.55})$$

Avec : $a(h)$, $b(h)$, $c(h)$ et $d(h)$ des paramètres qui dépendent de la hauteur manométrique et leurs relations mathématiques sont données ci-dessous :

$$a(h) = a_0 + a_1h + a_2h^2 + a_3h^3 \quad (\text{II.56})$$

$$b(h) = b_0 + b_1h + b_2h^2 + b_3h^3 \quad (\text{II.57})$$

$$c(h) = c_0 + c_1h + c_2h^2 + c_3h^3 \quad (\text{II.58})$$

$$d(h) = d_0 + d_1h + d_2h^2 + d_3h^3 \quad (\text{II.59})$$

Avec : a_i , b_i , c_i et d_i : des constantes et qui ne dépendent que du type du sous-système de pompage photovoltaïque.

Le calcul du débit instantané en fonction de la puissance est calculé à l'aide de la méthode de Newton-Raphson. Ainsi, à la $k^{\text{ème}}$ itération, le débit Q est donné par la relation suivante:

➤ Pour $d - Pa(Q) > 0$:

$$Q = Q_{k-1} - \frac{F(Q_{k-1})}{F'(Q_{k-1})} \quad (\text{II.60})$$

$F'(Q_{k-1})$ la dérivé de la fonction.

Avec :

$$F(Q_{k-1}) = aQ_{k-1}^3 + bQ_{k-1}^2 + cQ_{k-1} + d - P_a(Q_{k-1}) \quad (\text{II.61})$$

II.9. Modélisation de la batterie :

II.9.1. Modèle électrique simple de la batterie : [46]

Ce modèle est composé d'une f.e.m. E_0 représentant la tension à vide de la batterie, un condensateur modélisant la capacité interne de la batterie C_b et une résistance interne R_s .

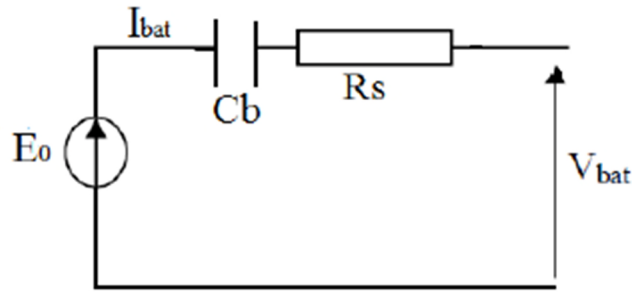


Fig. (II.15) : Modèle R-C de la batterie. [46]

L'expression de la tension V_{bat} est alors :

$$V_{batt} = E_0 - R_s \cdot I_{batt} - V_{cb} \quad (II.62)$$

L'état de charge de la batterie est définie par :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{batt}} \quad (II.63)$$

C_{batt} étant la capacité nominale de la batterie, et Q_d représente la quantité de charge manquante par rapport à C_{batt} .

II.9.2. Modèle CIEMAT : [47]

Ce modèle, étudié par Olivier GERGAUD, est basé sur le schéma la figure(II.16) qui représente le schéma équivalent de nb éléments en série. La batterie est représentée dans ce cas par une source de tension et une résistance interne.

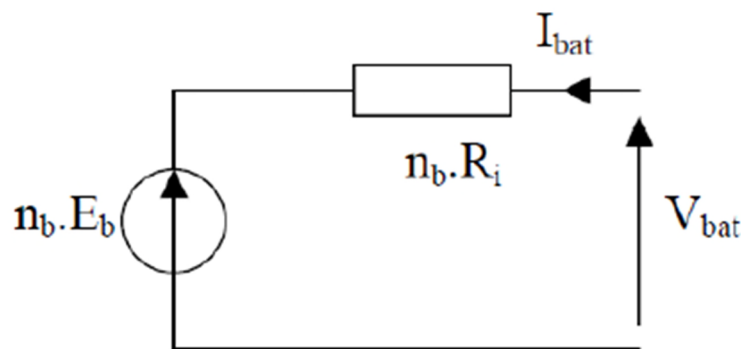


Fig. (II.16) : Schéma équivalent de la batterie dans le modèle CIEMAT. [47]

L'équation de la tension V_{bat} peut donc s'écrire :

$$V_{bat} = n_b E_b - n_b R_i \cdot I_{bat} \quad (II.64)$$

Où V_{bat} et I_{bat} sont respectivement les valeurs de la tension et du courant de la batterie en convention receptr, E_b représente la f.e.m. de la batterie qui dépend de l'état de charge et R_i est la resistance interne d'un élément.

L'expression de l'état de charge est égale à :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \tag{II.65}$$

La quantité de charge manquante Q_d dépend du mode de fonctionnement de la batterie, elle croit pendant la charge et décroît pendant la décharge. L'équation de la tension de décharge est donnée par (Gergaud O., 2002) :

$$V_{bat_d} = n_b \cdot [1,965 + 0,12 \cdot EDC] - n_b \cdot \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \cdot \left(\frac{4}{1 + |I_{bat}|^{1,3}} + \frac{0,27}{EDC^{1,5}} + 0,02 \right) \cdot (1 - 0,007 \cdot \Delta T) \tag{II.66}$$

Où C_{10} est la capacité de la batterie en A.h en régime de décharge à courant constant pendant 10 heures, et ΔT est l'écart de la température de l'accumulateur par rapport à une température de référence de 25°C.

L'expression de la charge est exprimée par :

$$V_{bat_c} = n_b \cdot [2 + 0,16 \cdot EDC] - n_b \cdot \frac{I_{bat}}{C_{10}} \cdot \left(\frac{6}{1 + I_{bat}^{0,86}} + \frac{0,48}{(1 - EDC)^{1,2}} + 0,36 \right) \cdot (1 - 0,025 \cdot \Delta T) \tag{II.67}$$

- **Discussion des résultats :**

- **Influence de la température sur la capacité : (10)**

Elle intervient directement sur les phénomènes électrochimiques en agissant sur la mobilité des ions

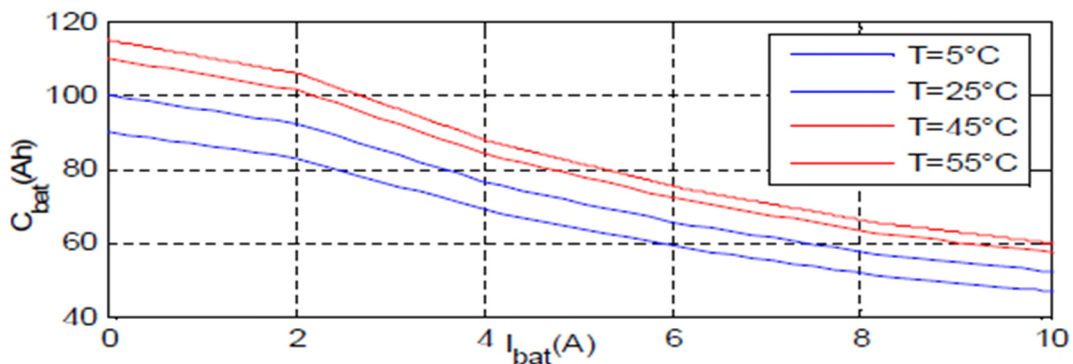


Fig. (II.17) : Influence de la température sur la capacité. (10)

On remarque que l'augmentation de la température est accompagnée d'une remontée modérée de la capacité de stockage, et nous pensons que ceci s'explique par l'augmentation du coefficient de diffusion des solutions d'acide sulfurique d'une part, et d'autre part, par la baisse de la résistivité de l'électrolyte.

➤ **Influence de la température sur la tension de la batterie : (10)**

L'influence de la température sur la tension de charge et de décharge est représentée sur la figure (II.17)

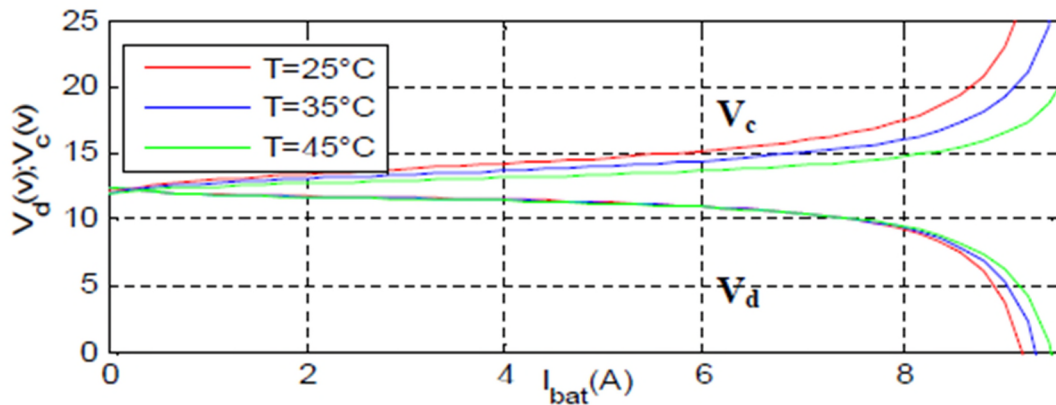


Fig. (II.18) : Influence de la température sur la tension de décharge et de charge. (10)

Les tensions de fin de charge et de décharge sont très variables avec la température, ce qui conduit à les surveiller afin d'éviter le phénomène de sulfatation.

➤ **Résistance interne :**

La résistance interne de la batterie est directement liée à l'état de charge de l'accumulateur. Lorsque la batterie est chargée, la résistance interne est faible et elle devient importante pour un état de décharge proche de zéro.

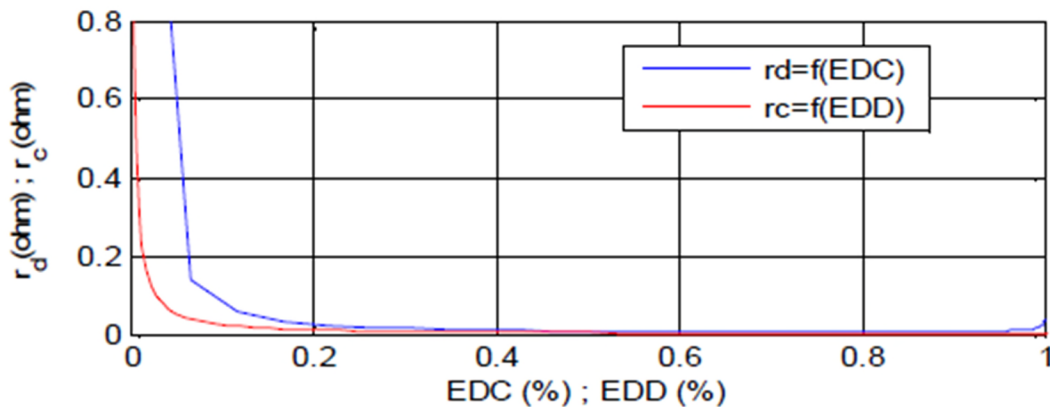


Fig. (II.19) : Résistance interne de la batterie

II.10. Conclusion :

Dans ce chapitre, la modélisation de l'ensemble composé de : générateur photovoltaïque, hacheur, système motopompe et commande MPPT est présentée. Les modèles SIMULINK sont construits sur la base des modèles mathématiques.

La simulation du système photovoltaïque nous a permis de vérifier le bon fondement des relations et des modèles mathématiques de chaque partie de ce système. Ainsi nous avons pu faire simuler les modules solaires, avoir leurs caractéristiques et voire la performance de la commande MPPT, qui force le système PV à travailler autour de sa puissance maximale.



Chapitre III

*Optimisation et
dimensionnement du
système de pompage PV*

III.1. Introduction :

Pour la conception d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil, une étude dimensionnelle, et l'application d'une technique d'MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour l'amélioration des performances statique et dynamique est nécessaire.

Dans ce chapitre, nous présenterons en premier lieu une méthode de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque, qui nous permettra de définir les éléments de notre système et de déterminer le nombre de panneaux nécessaires pour satisfaire les besoins quotidiens en eau. Puis en va optimiser et contrôler le système de pompage photovoltaïque.

III.2. Les étapes de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque : [48]

- Evaluation des besoins en eau.
- Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire.
- Détermination de l'énergie solaire disponible.
- Choix des composants.

III.2.1. Evaluation des besoins en eau : [49]

L'estimation des besoins en eau c'est la première étape à suivre lors d'un dimensionnement d'une installation du pompage photovoltaïque. Dans le cas de l'irrigation, les besoins d'eau dépendent du type de culture, de la méthode d'irrigation et des facteurs météorologiques (la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, et la saison de l'année en question).

III.2.2. Calcul de l'énergie électrique quotidienne requise : [50]

L'énergie nécessaire pour soulever une certaine quantité d'eau sur certaine hauteur donnée pendant une journée est calculée à partir de l'équation suivante :

$$E_{ele} = \frac{C_H \cdot Q \cdot HMT}{\eta_p} \quad (III.1)$$

E_{ele} : Habituellement exprimé en KWh.

Q : Débit journalier (m³/ jour).

HMT : Hauteur manométrique.

η_p : En général le rendement des groupes motopompes est de 30% et 45%, selon le type de pompe et de moteur. [49]

$$C_H = \frac{g \cdot \rho}{3600} = 2.725 \tag{III.2}$$

g : Constante de gravité (9.81 m/s-1).

ρ : La densité de l'eau (1000kg/m3).

III.2.3. Détermination de l'énergie solaire disponible : [10]

La détermination de l'énergie solaire disponible est basée sur les calculs des valeurs moyennes journalières mensuelles de l'irradiation solaire disponible et de l'énergie hydraulique nécessaire.

1kWh/m².jour = 1 heure de soleil maximum (1000W/m²)/jour = 3,6 MJ/m² ,jour = 86 cal/cm² · jour

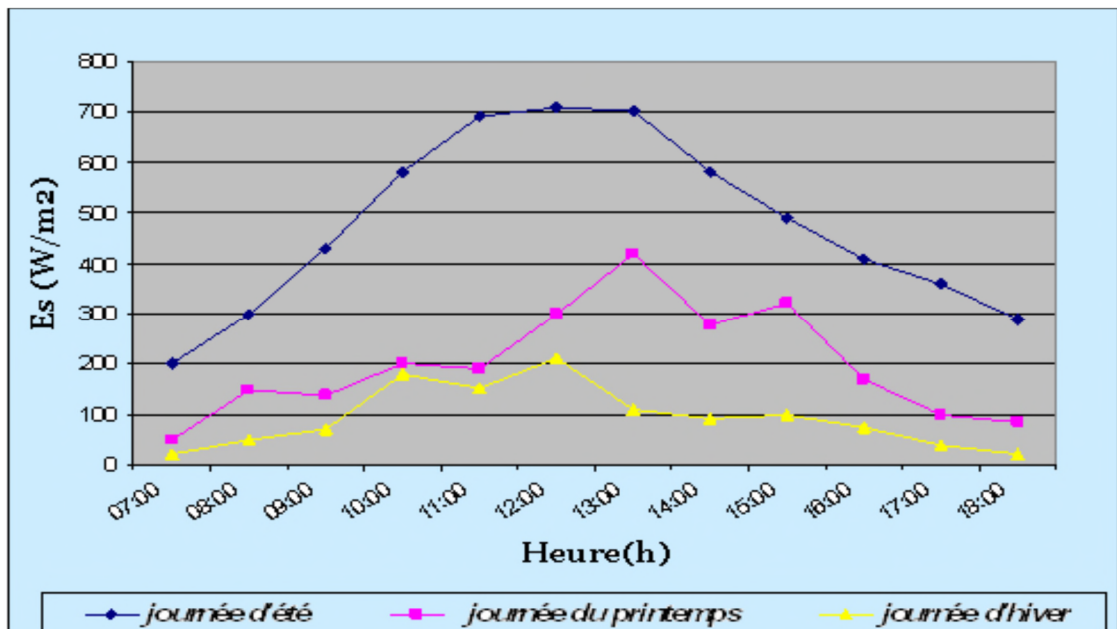


Fig. (III.1) : Variation de l'ensoleillement pour différentes périodes (été, hiver et printemps).

[10]

III.2.4. Choix des composantes:

III.2.4.1. Dimensionnement des panneaux : [10]

La puissance du générateur photovoltaïque (P_{PV}) à installer doit tenir compte de l'énergie journalière demandée par la charge (E_C), de la durée de pompage nécessaire pour satisfaire les besoins journaliers en eau égale à (τ_p) et des pertes environ de la puissance attribuable à la température et à la poussière, la dimension théorique de celui-ci sera de :

$$P_g = \frac{E_c}{\tau_p \left(1 - \sum P_{pertes}\right)} \quad (\text{III.3})$$

Le nombre de panneaux nécessaires se calcule par :

$$N_p = ENT \left[\frac{P_{pv}}{P_m} \right] \quad (\text{III.4})$$

Avec :

P_m : Puissance normalisée du panneau (puissance maximale délivrée par le générateur photovoltaïque à un éclairement de 1000W/m² et une température de 25°C qui égale à 110Wc pour notre cas.

III.2.4.2. Dimensionnement du moteur asynchrone : [10]

Le dimensionnement du moteur réside dans le calcul de la puissance électrique qu'il lui faut pour entrainer la pompe, cette puissance est exprimée en (W) et se calcule par la puissance mécanique requise par la pompe et le rendement du moteur, par la suite nous aurons :

$$P_{ele} = \frac{P_{mec}}{\eta_m} \quad (\text{III.5})$$

Avec :

η_m : Rendement du moteur.

P_{mec} : Puissance mécanique requise par la pompe.

P_{ele} : Puissance électrique nécessaire pour que le moteur fonctionne.

En tenant compte des pertes de puissance au niveau de l'onduleur, la puissance reçue par le moteur sera égale à la puissance délivrée par l'ensemble des modules PV soustraite des pertes au niveau de l'onduleur. Nous aurons par la suite :

$$P_d = \frac{P_{ele}}{\eta_{ond}} \quad (\text{III.6})$$

Avec :

P_d : Puissance délivrée par l'ensemble des modules

η_{ond} : Rendement de l'onduleur

Les besoins journaliers énergétiques en électricité (KWh/j) peuvent être évalués comme suit :

$$E_c = P_d \cdot \tau_p \quad (\text{III.7})$$

Avec :

E_c : Energie électrique journalière demandée par la charge.

τ_p : Temps de pompage nécessaire pour satisfaire le besoin en eau et qui se calcule comme suit :

$$\tau_p = \frac{V}{Q_n} \quad (\text{III.8})$$

Avec

V : Quantité d'eau requise (m^3).

Q_n : Débit nominal ($\text{m}^3 / \text{heures}$).

III.2.4.3. Dimensionnement de la pompe : [10]

Comme on l'a déjà dit lors du calcul de la puissance hydraulique nécessaire, la connaissance de cette puissance nous ramène à dimensionner la pompe avec un débit et une hauteur supposés connus. La puissance hydraulique nécessaire pour faire déplacer l'eau d'un point à un autre est donnée par l'équation (III. 9) :

$$P_{mec} = \frac{P_h}{\eta_p} \quad (\text{III.9})$$

P_h : Puissance délivrée par la pompe.

η_p : Rendement de pompe.

III.2.4.4. Dimensionnement du réservoir d'eau : [51]

Le concepteur devra déterminer la dimension optimale du réservoir d'eau non seulement selon la durée anticipée de stockage pour pallier les variations journalières, mais aussi et surtout selon les besoins des utilisateurs et, bien sûr, selon le coût du système de stockage. Le dimensionnement du réservoir repose donc sur un certain nombre de facteurs qu'il faudra avoir évalués au préalable :

- ✓ Lorsque la pompe est au fil du soleil, le réservoir doit pouvoir stocker l'eau nécessaire pour la journée, ou au moins pouvoir stocker l'eau fournie par la pompe.
- ✓ le réservoir peut permettre de tirer l'eau de façon constante afin de maximiser le débit du forage ou du puits, surtout en période sèche.
- ✓ le réservoir doit permettre une certaine autonomie durant les journées peu ensoleillées.

La taille du réservoir solaire dépend du nombre de personnes et de la consommation d'eau par personne et par jour. La consommation d'eau est estimée en fonction du type de bâtiment et du confort de l'aménagement.

Le volume du réservoir doit représenter 1 à 1,5 fois la consommation d'eau quotidienne du village .

$$L_{r \min} = N_{fa} (N_{per} C_{per} + C_{b\acute{e}ta} + C_{irr}) \quad \text{(III.10)}$$

Tel que :

$L_{r \min}$: Taille minimale du réservoir.

N_{fa} : Nombre de familles du village.

N_{per} : Nombre moyen des personnes pour chaque famille.

C_{per} : Consommation moyenne d'eau quotidienne pour une personne.

$C_{b\acute{e}ta}$: quantité moyenne d'eau destinée pour la consommation des bétails d'une famille quotidiennement.

C_{irr} : quantité moyenne d'eau destinée pour l'irrigation des plantes du jardin d'une famille.

Mais la taille maximale du réservoir est calculée comme suit :

$$L_{r \min} = 1.5 N_{fa} (N_{per} C_{per} + C_{b\acute{e}ta} + C_{irr}) \quad \text{(III.11)}$$

Pour ce qui est de notre cas, on a pris un exemple d'un réservoir d'eau qui alimente un petit village à la wilaya de Bejaia qui contient 200 familles de 6 personnes avec une consommation économisée d'eau (une famille Algérienne) Le volume moyen consommé par une personne est estimé à 25 Litres/jours.

Quantité moyenne d'eau destinée pour la consommation des bétails d'une famille quotidiennement est 100 Litres/jours.

Quantité moyenne d'eau destinée pour l'irrigation des plantes du jardin d'une famille est estimée par 100 Litres/jours.

Donc la consommation quotidienne du village est estimée par 70 m³ mais nous on va prendre un réservoir de 100 m³ à 110 m³.

➤ Application : [51]

Nous avons calculé des différents éléments du système de pompage photovoltaïque nous a permis de choisir la pompe centrifuge à utiliser, son moteur d'entraînement ainsi que le nombre de panneaux nécessaires pour satisfaire les besoins quotidiens demandés.

Pour :

- Réservoir d'eau V= 70 m³.
- Une hauteur h= 12 m.

- Débit volumique V_q (désiré) = 21 m³/h.
- Rendement de pompe $\eta_p = 55\%$.
- Rendement du moteur $\eta_m = 85\%$.
- Rendement de l'onduleur $\eta_{ond} = 95\%$.
- Pertes qu'on suppose égales à 20%.

Donc on aura :

$$P_h = 0.68 \text{ KW}$$

$$P_{mec} = 1.24 \text{ KW}$$

$$P_{\acute{e}le} = 1.47 \text{ KW}$$

$$P_d = 1.55 \text{ KW}$$

$$\tau_p = 3.33 \text{ h}$$

$$E_c = 5.16 \text{ KWh/jour}$$

$$P_{PV} = 1.94 \text{ KW}$$

$$N_P \geq \frac{P_{PV}}{P_{\max}} = 17.61 \rightarrow N_P = 18 \text{ Panneaux SIEMENS .}$$

➤ **groupement en série- parallèles :**

Afin d'obtenir la puissance désirée, sous une tension convenable, il est nécessaire de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque (GPV).

$$N_{p.series} \geq \frac{V_{dc}(1-\alpha)}{V_m} \quad \text{(III.12)}$$

$$N_{branches} \geq \frac{P_{pv}}{\frac{V_{dc}(1-\alpha)}{I_m}} \quad \text{(III.13)}$$

Tel que :

α : Le rapport cyclique de l'élevateur de tension,

V_{dc} : La tension continue à l'entrée de l'onduleur.

V_m : La tension au point de puissance maximal (panneau SIEMENS SM 110-24) dans les conditions standards.

I_m : Le courant au point de puissance maximal (panneau SIEMENS SM 110-24) dans les conditions standards.

La figure (III.2) représente la simulation de $1-\alpha=f(t)$, pour $E=1000W/m^2$ et $T_c=25^\circ C$

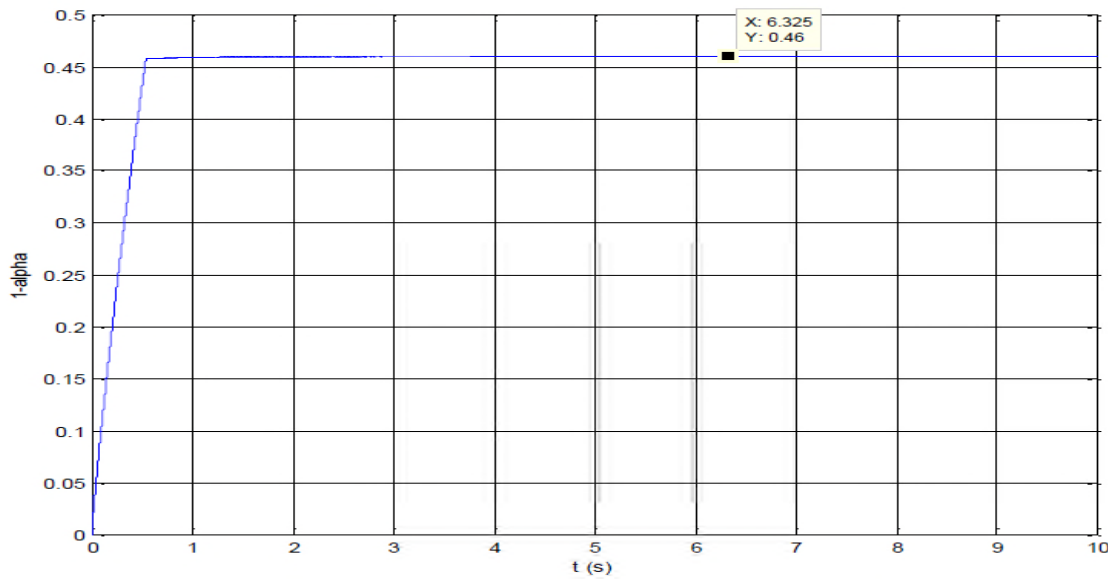


Fig. (III.2) : Allure de $1-\alpha$

D'après les formule (III.12) et la figure (III.13), et pour $V_{dc}=455V$, on aura :

Panneaux en séries $N_p=6$

Branches en parallèles $N_{branches}=3$

Le schéma de générateur photovoltaïque proposé est présenté sur la figure (III.3) :

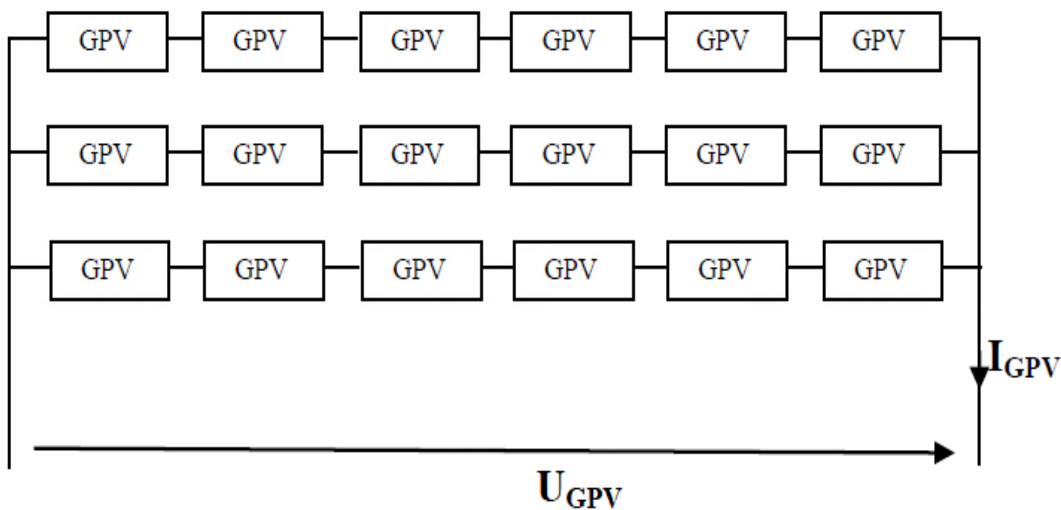


Fig. (III.3) : Le schéma de générateur photovoltaïque proposé

On travail avec le modèle à une diode simplifié donc :

$$U_{GPV} = N_{p.series} * V_{PV} = 6 * 35 = 210V$$

$$I_{GPV} = N_{branches} * I_{PV} = 3 * 3.14 = 9.42V$$

$$P_{PV} = U_{GPV} * I_{GPV} = 210 * 9.42 = 1.978KW$$

III.2.4.5. Dimensionnement de la batterie : [10]

Le calcul de la capacité (C_{bat}) des batteries dépend de plusieurs données, elle peut être calculée comme suit :

$$C_{bat} = \frac{E_{ele} * N_j}{U_{bat} * \eta_{bat} * PDD} \quad (III.14)$$

Le nombre de batteries utilisées peut se calculer à la manière suivante :

$$N_b \geq \frac{C_{bat}}{C_{bat,u}} \quad (III.15)$$

Avec :

E_{ele} : Energie électrique requise pour le pompage.

N_j : Nombre de jour d'autonomie.

PDD: Profondeur de décharge de la batterie.

η_{bat} : Rendement de la batterie.

U_{bat} : Tension de la batterie.

N_b : Nombre de batterie.

$C_{bat,u}$: Capacité unitaire.

Tel que :

η_{bat} : 90%

Nombre d'heure d'ensoleillement 2.2

PDD de la batterie : 80%

Pertes estimées : 20%

Nombre de jour d'autonomie : 3

Capacité de batterie unitaire : 260Ah

Tension de la batterie : 12 V

D'où :

$$C_{\text{bat}} = \frac{5,1615 \cdot 10^3 \cdot 3}{12 \cdot 0,9 \cdot 0,8} = 597,3958 \text{ Ah} .$$

$$N_b \geq \frac{597,3958}{260} = 2,2976 \approx 3 \text{ batteries} .$$

III.3. La commande du point de puissance maximum (MPPT):

Par définition, une commande MPPT (maximum power point tracking), associé à un convertisseur DC/DC d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, quels que soit les conditions météorologiques (irradiation, température), cette commande ainsi place le système au point de fonctionnement maximum (V_m , I_m). Le premier système de puissance MPPT à été introduit en 1968 pour un système spatial. Au cours des années, plusieurs algorithmes (MPPT) ont été développés et largement adaptés pour déterminer le point de puissance maximum . [51], [52]

III.3.1. Méthode de perturbation et d'observation (P&O) :

C'est la méthode la plus utilisée du fait de sa simplicité : une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires. La tension aux bornes des panneaux est volontairement perturbée (augmentée ou diminuée) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation. Précisément, si la puissance aux bornes du panneau est augmentée du fait de la perturbation, la perturbation suivante est faite dans la même direction. Réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé . [51], [52]

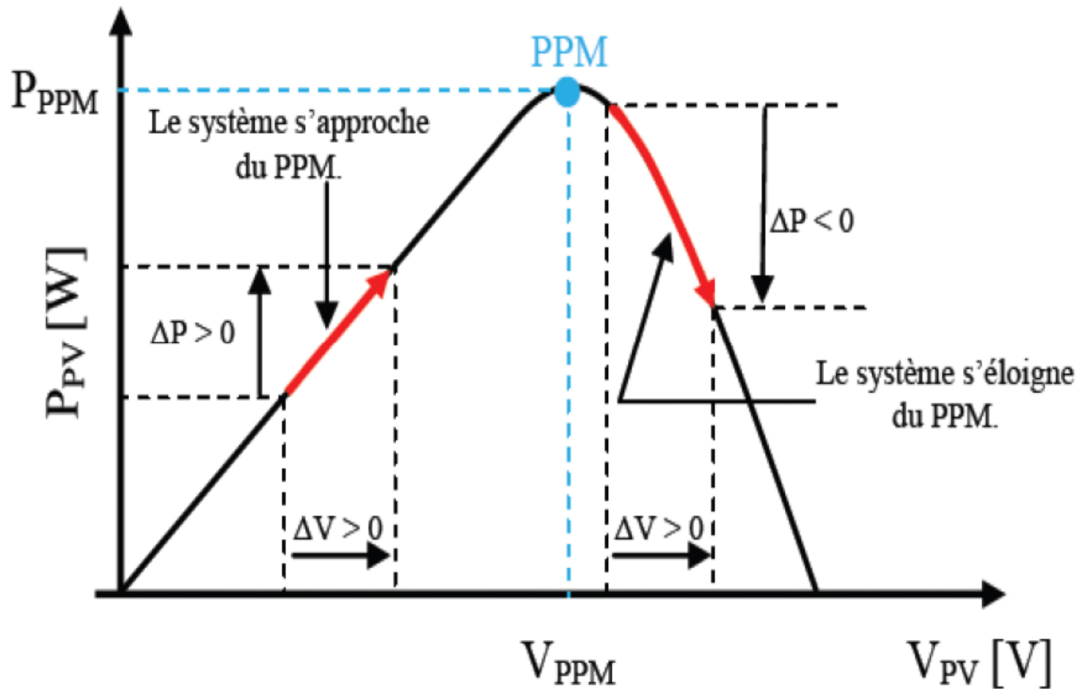


Fig. (III.4) : caractéristique P_{pv} (V_{pv}) d'un panneau solaire. [52] , [53]

Les avantages de cette méthode peuvent être récapitulés comme suit: la connaissance des caractéristiques du générateur photovoltaïque n'est pas exigée, c'est une méthode relativement simple. Néanmoins, en régime permanent, le point de fonctionnement oscille autour du MPP, provoquant ainsi une perte d'énergie.

L'organigramme de fonctionnement de cette méthode est montré dans la figure (III.5) :

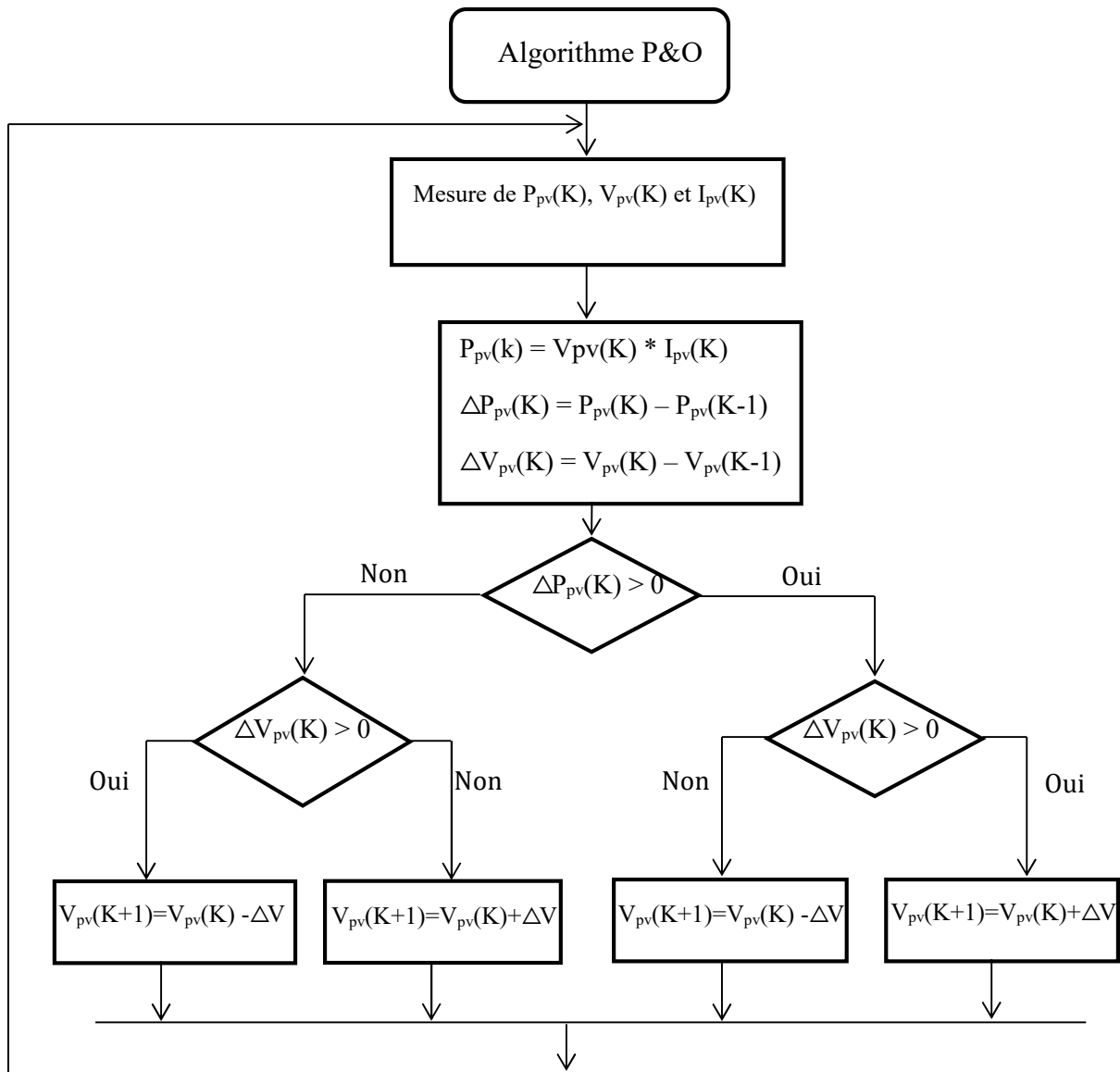


Fig. (III.5) : L’algorithme de la méthode de perturbation et d’observation.

III.3.2. Application et simulation de la méthode perturbation et observation (P&O) sur un panneau photovoltaïque :

La figure (III.6) décrit le système photovoltaïque, Il est constitué d’un panneau photovoltaïque de type PV SM110 de 110W, un hacheur BOOST, et d’une charge résistive de 70W.

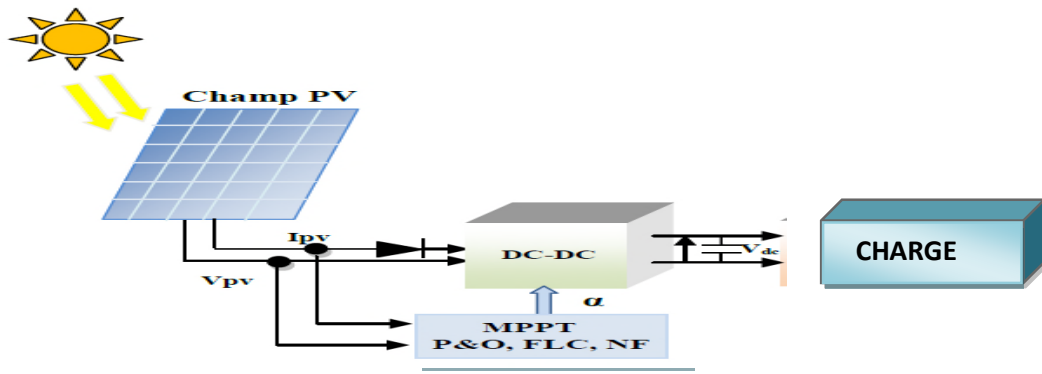


Fig. (III.6) : Description du système photovoltaïque. [10]

Nous présentons ci-dessous les résultats de simulation (sous Matlab/Simulink), du fonctionnement d'un panneau photovoltaïque avec l'application de la méthode de MPPT (P&O) sous les conditions standard ($G=1000W/m^2$, $T=25C^\circ$).

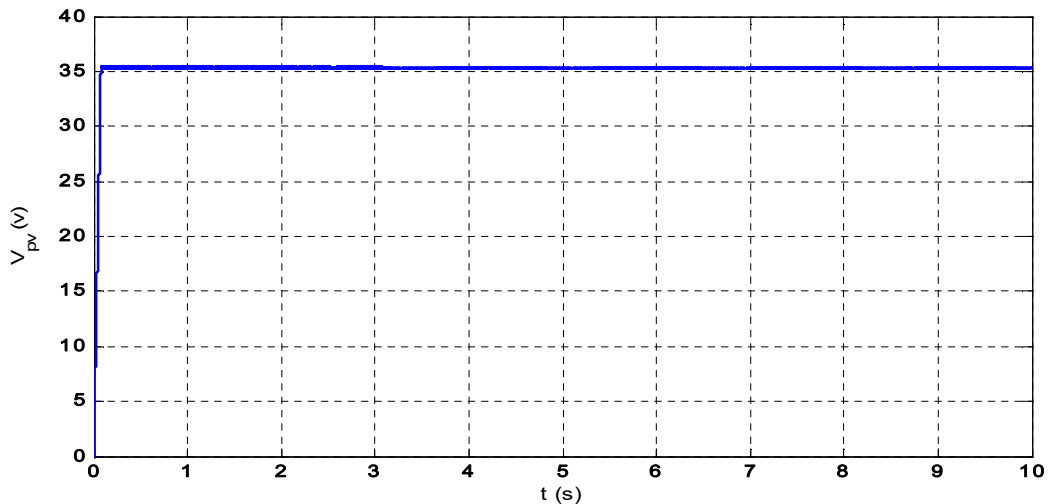


Fig. (III.7) : Allure de la tension sous conditions standards.

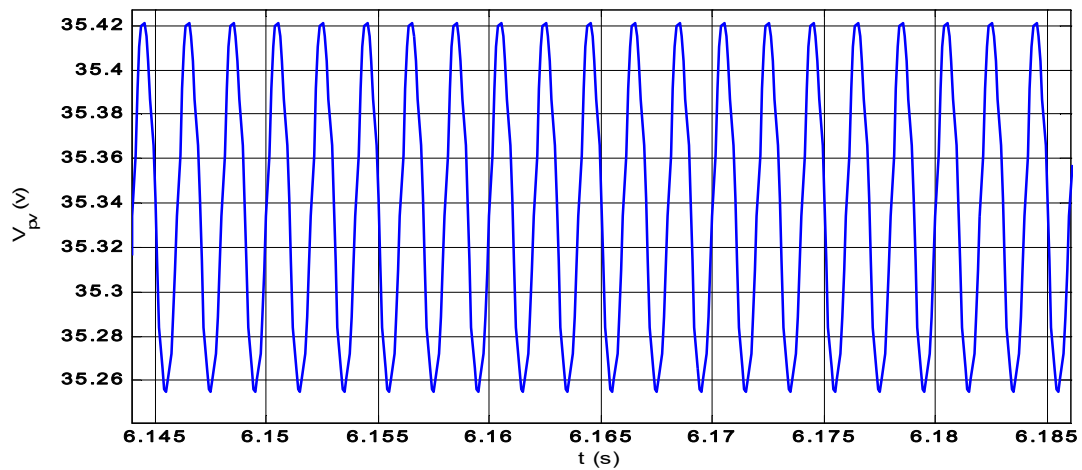


Fig. (III.8) : Zoom en régime permanent sur l'allure de la tension.

D'après les résultats de simulations de la figure (III.7), on remarque bien que la tension converge vers un point qui correspond à la valeur de la puissance maximale. Et d'après le zoom figure (III.8) on constate aussi que la méthode de perturbation et d'observation (P&O) présente des oscillations en régime permanent suite à la perturbation continue de la tension de fonctionnement et cela causera des pertes de puissance, mais cette méthode reste toujours efficace vu sa simplicité et aussi son coût par rapport aux autres techniques d'MPPT.

III.4. Commande vectorielle par orientation du flux rotorique :

Le contrôle de la machine asynchrone requiert le contrôle du couple, de la vitesse ou même de la position. Le contrôle le plus fréquent est celui des courants et donc du couple. Cependant, la formule du couple électromagnétique est complexe, elle ne ressemble pas à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée où le découplage naturel entre le réglage du flux et celui du couple rend sa commande aisée.

La commande vectorielle vient donc régler ce problème de découplage des réglages du flux et du couple à l'intérieur de la machine.

La commande vectorielle à orientation du flux rotorique est la plus utilisée, elle donne de meilleurs résultats que les méthodes basées sur l'orientation du flux statorique ou d'entrefer [52]. On choisit l'orientation du repère telle que :

$$\varphi_{rd} = \varphi_r \text{ et } \varphi_{rq} = 0 \quad (\text{III.16})$$

Lorsque le champ rotorique est orienté, le comportement de la machine asynchrone est décrit par les équations suivantes :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \varphi_r \cdot i_{sq} \quad (\text{III.17})$$

$$0 = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\varphi_r}{dt} \quad (\text{III.18})$$

$$0 = R_r \cdot i_{rq} + \omega_r \varphi_r \quad (\text{III.19})$$

$$\varphi_r = M \cdot I_{sd} + L_r \cdot I_{rd} \quad (\text{III.20})$$

$$0 = M \cdot I_{sq} + L_r \cdot I_{rq} \quad (\text{III.21})$$

A partir de l'équation (III.18), on obtient :

$$\frac{d\varphi_r}{dt} = -R_r \cdot i_{rd} \quad (\text{III.22})$$

Le flux s'exprime en fonction du courant et de la pulsation rotorique à partir de l'équation (III.19) sous la forme suivante :

$$\varphi_r = -\frac{R_r}{\omega_r} \cdot i_{rq} \quad (\text{III.23})$$

Pour mettre en œuvre la stratégie de commande, il faut pouvoir estimer φ_r et ω_r .

On peut, à partir de la relation (III.20), exprimer le courant i_{rd} comme suit :

$$i_{rd} = \frac{\varphi_r - M \cdot i_{sd}}{L_r} \quad (\text{III.24})$$

Par ailleurs, la relation (III.21) peut s'écrire de la manière suivante :

$$i_{rq} = -\frac{M}{L_r} \cdot i_{sq} \quad (\text{III.25})$$

Dans la relation (III.23), on remplace i_{rq} par sa valeur exprimé en (III.25), il vient

$$\varphi_r = \frac{M \cdot i_{sd}}{1 + T_r \cdot s} \quad (\text{III.26})$$

Avec :

T_r : Constante de temps rotorique

s : Opérateur de dérivation

La connaissance de ω_s permet d'assurer la validité des équations car le référentiel «d q» doit suivre constamment le champ tournant. Pour cela, on se sert de la relation angulaire interne $\omega_s = \omega_r + p \cdot \Omega$. La vitesse de la machine est mesurée. Par contre, il faut estimer la vitesse du champ rotorique.

$$\omega_r = \frac{M \cdot i_{sq}}{T_r \cdot \varphi_r} \quad (\text{III.27})$$

On obtient finalement

$$\omega_s = \frac{M \cdot i_{sq}}{T_r \cdot \varphi_r} + p \cdot \Omega \quad (\text{III.28})$$

Cette dernière relation correspond à un autopilotage de la machine asynchrone. C'est cette relation qui force à zéro une grandeur de sortie, et permet ainsi le découplage entre les deux grandeurs restantes dans l'expression du couple.

III.5. Résultats de simulation du système de pompage photovoltaïque :

Dans cette partie on a appliqué une la méthode de perturbation et d'observation (P&O) pour optimiser le générateur PV et pour contrôler le moteur asynchrone on a appliqué la commande vectorielle une régulation classique (PI).

La figure (III.9) présente le profil d'ensoleillement variable ($T_c=25^\circ\text{C}$).

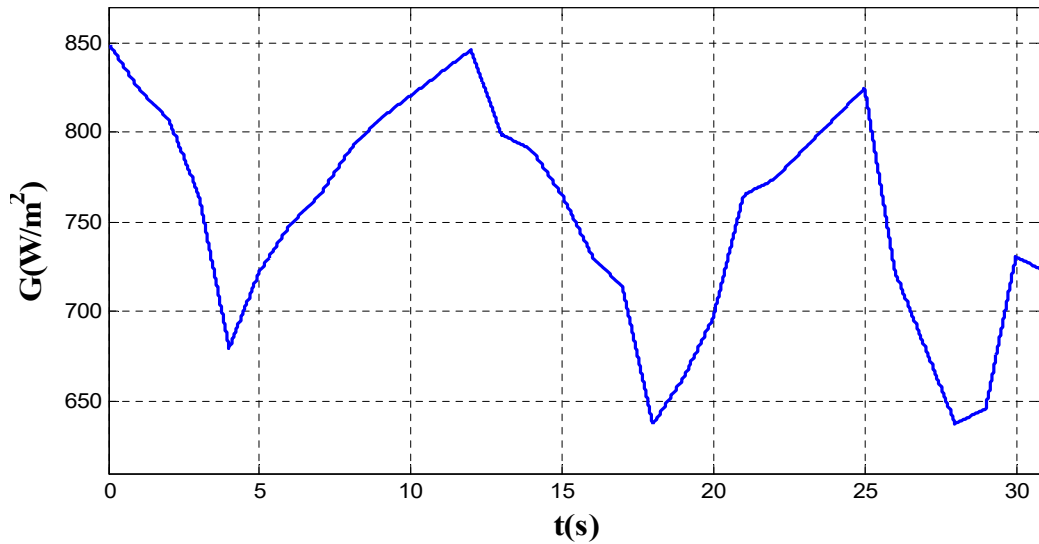


Fig. (III.9) : profil d'ensoleillement.

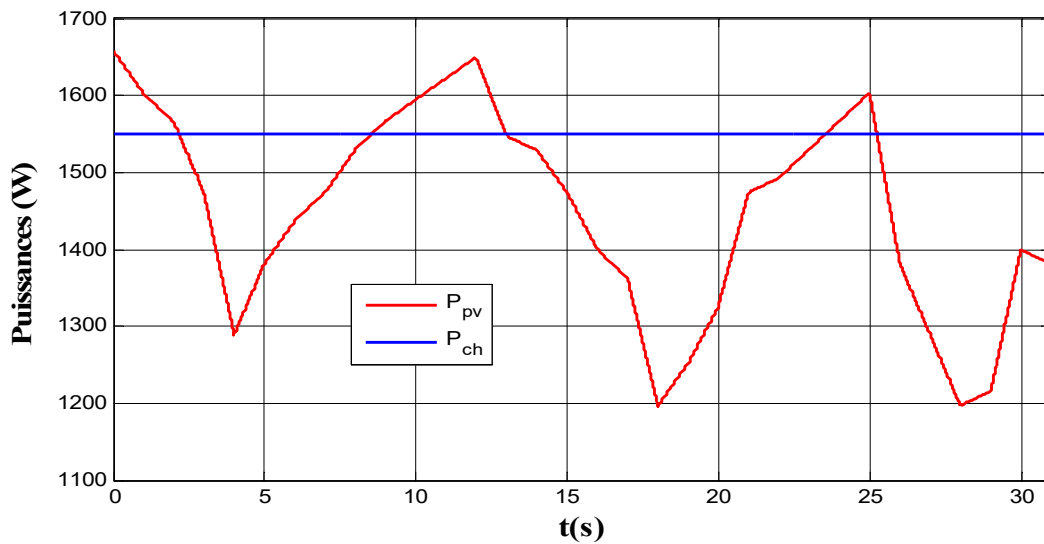


Fig. (III.10) : Puissance photovoltaïque et de la charge.

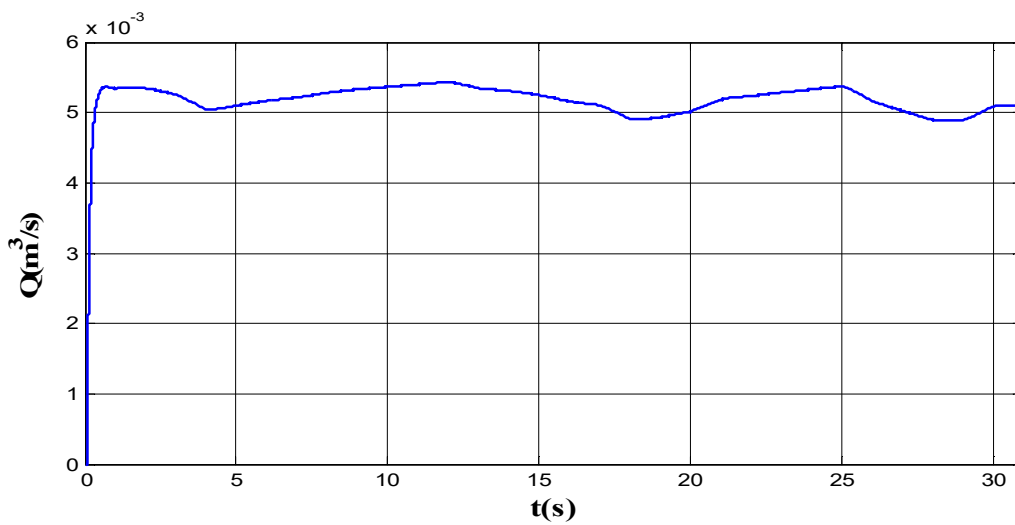


Fig. (III.11) : L'évolution de débit.

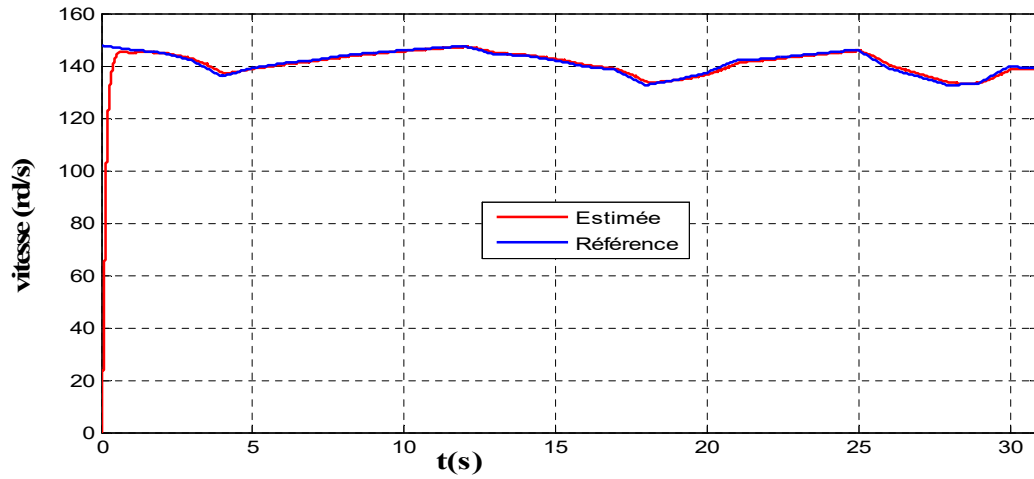


Fig. (III.12) : la vitesse de référence et estimée.

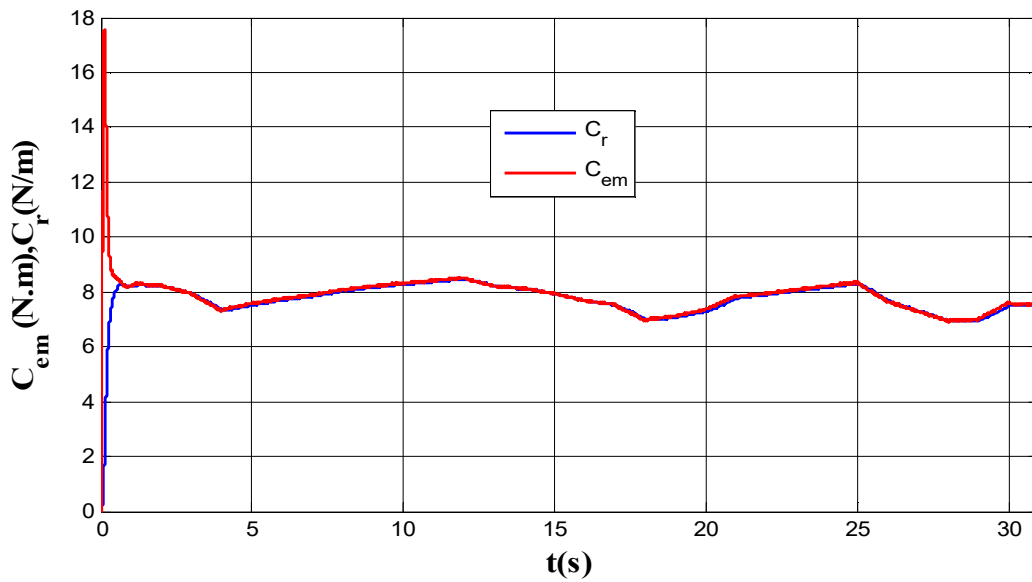


Fig. (III.13) : le couple résistant et électromagnétique

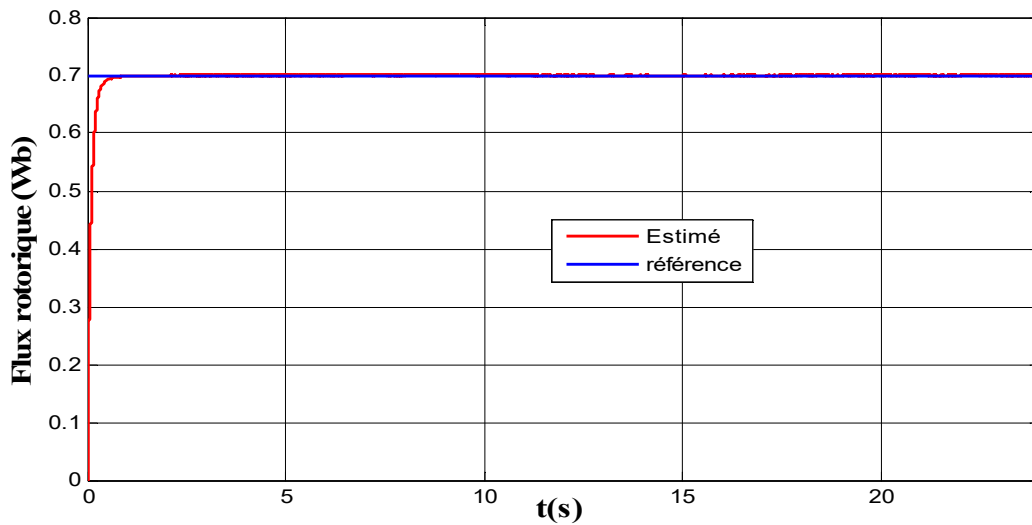


Fig. (III.14) : Flux de référence et estimé.

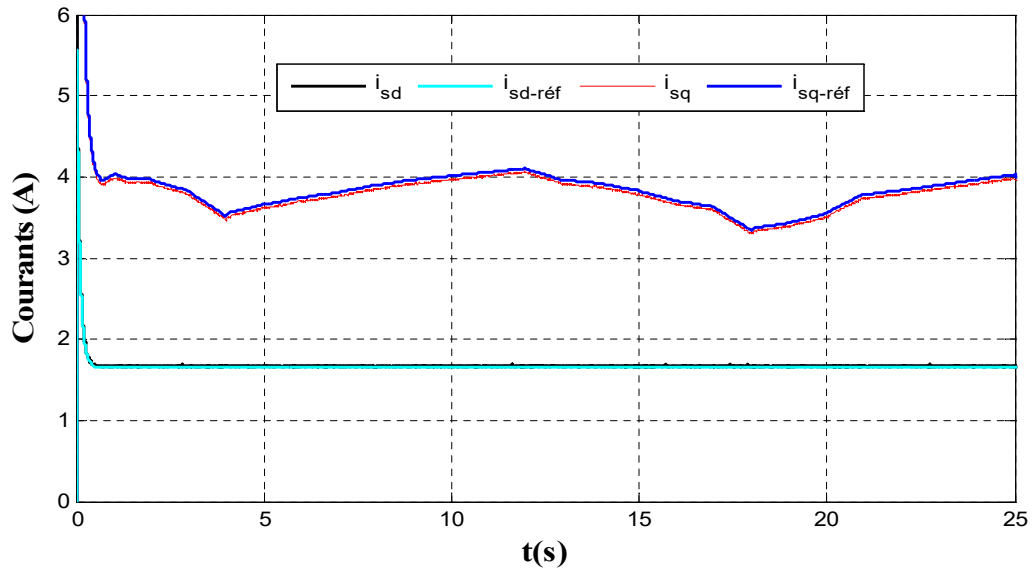


Fig. (III.15) : L'évolution les deux courants direct et quadrature.

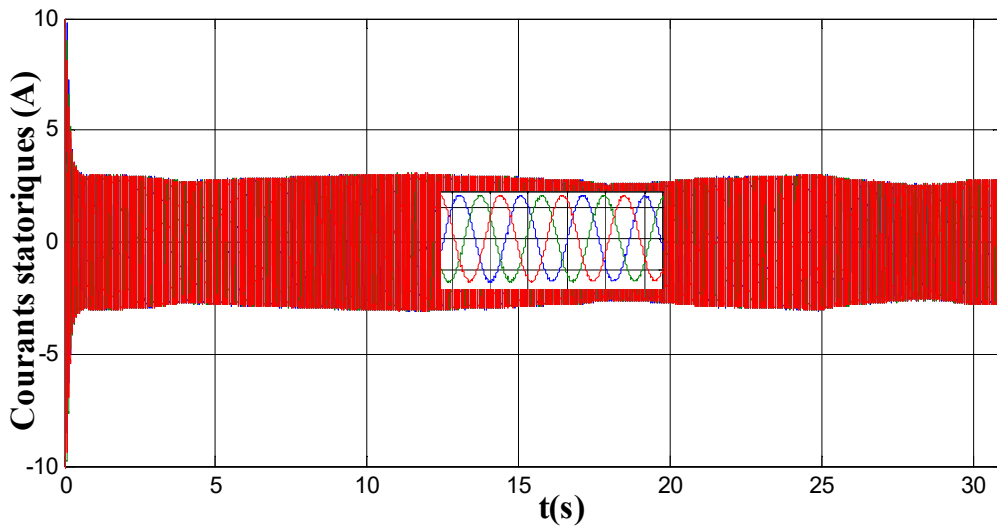


Fig. (III.16) : L'évolution des courants statoriques

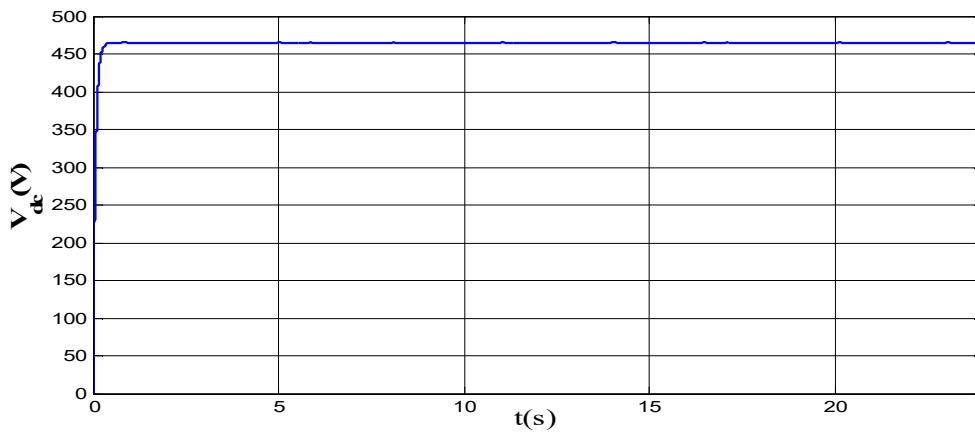


Fig. (III.17) : Tension de bus continu.

- D'après les résultats obtenus on constate que le débit du système de pompage varie avec la variation de l'ensoleillement figure (III.11).
- La vitesse estimée figure (III.12), le flux figure (III.14) et les courants de la figure (III.15), suivent leurs références.
- On constate qu'à l'instant de la perturbation, les caractéristiques $C_{em}(t)$ figure (III.13), $I_{sq}(t)$ et $i_{abc}(t)$ subissent une variation instantanée, par contre les allures du flux figure (III.14) et du courant I_{sd} figure (III.15), ne varient pas, cela est dû au découplage entre le flux et le couple imposé par la commande vectorielle.
- On constat aussi également que la tension du bus continu est maintenue constante et suit sa référence figure (III.17), quelles que soient les variations de l'ensoleillement, de la température et de la vitesse du vent.

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre l'optimisation du système motopompe est effectué par l'intégration entre l'onduleur et le générateur photovoltaïque un hacheur qui garantit l'extraction de la puissance optimale et cela grâce à l'algorithme de la méthode de perturbation et d'observation.

Ce chapitre aussi était consacré pour le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque, pour cela le dimensionnement de sous système était fait a partir des données de débit, la capacité de réservoir et la hauteur manométrique et on a appliqué le contrôle vectoriel pour le moteur asynchrone avec une régulation classique (PI) cette commande nous a permis de simplifier et d'offrir un découplage et rende sa commande semblable à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée.



Chapitre IV

*Gestion d'énergie d'un
système de pompage PV
Avec Stockage*

IV .1. Introduction

Dans ce chapitre on va associer le système de pompage photovoltaïque à un système de stockage par batterie pour cela un algorithme de gestion doit être placé pour gérer le fonctionnement du système global.

Le superviseur détermine la puissance de réglage à partir de la puissance totale demandée (puissance de charge et puissance nécessaire pour charger les batteries) et de la puissance disponible fournie par le générateur photovoltaïque.

IV.2. Gestion du système de pompage PV avec stockage : [10]

L'algorithme de gestion a pour rôle de contrôler les échanges d'énergie entre les différents composants d'une part mais aussi de réguler le processus de charge/décharge du stockage, pour préserver les propriétés physico-chimiques des batteries et de prolonger leur durée de vie.

La figure (III.16) présente le diagramme de l'algorithme de gestion.

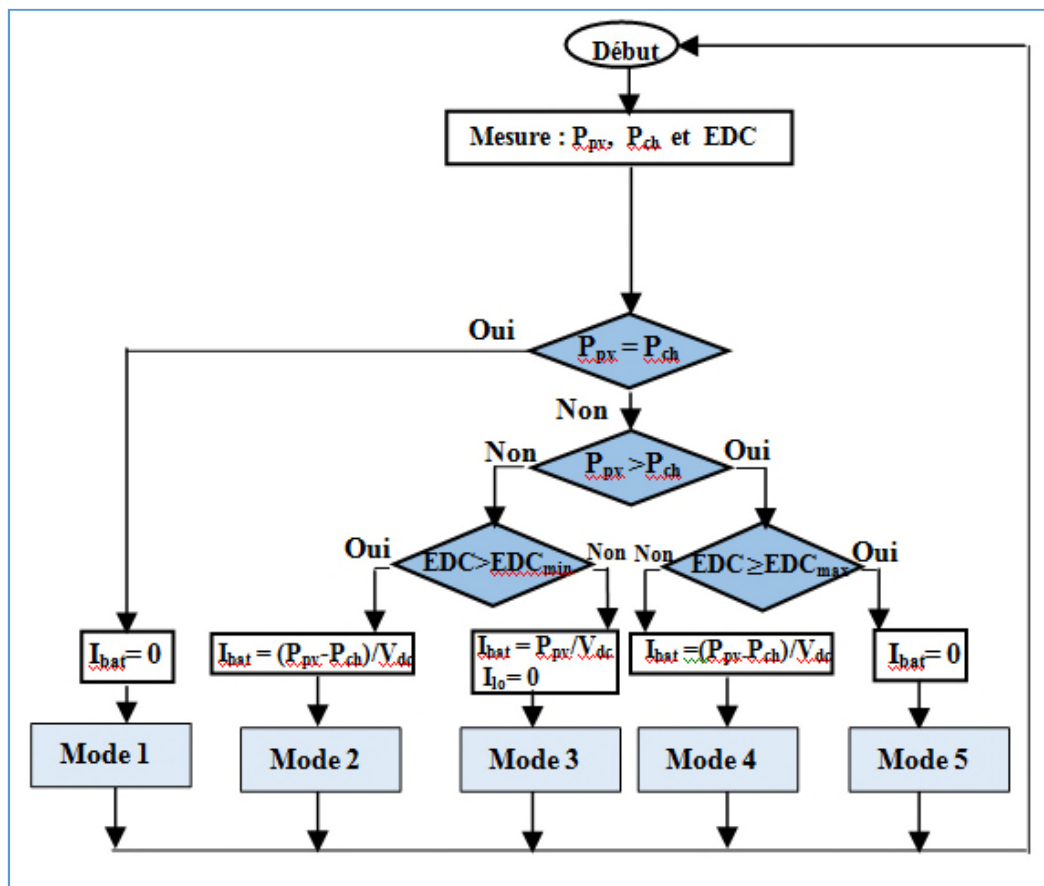


Fig. (IV.1) : Organigramme de gestion d'énergie du système de pompage photovoltaïque avec stockage. [10]

A partir de cet algorithme, on peut établir les modes de fonctionnement suivants :

Mode 1 : Quand la puissance fournie par le générateur photovoltaïque est égale à la puissance demandée par la charge, ce qui va conduire à l'alimentation directe de la charge.

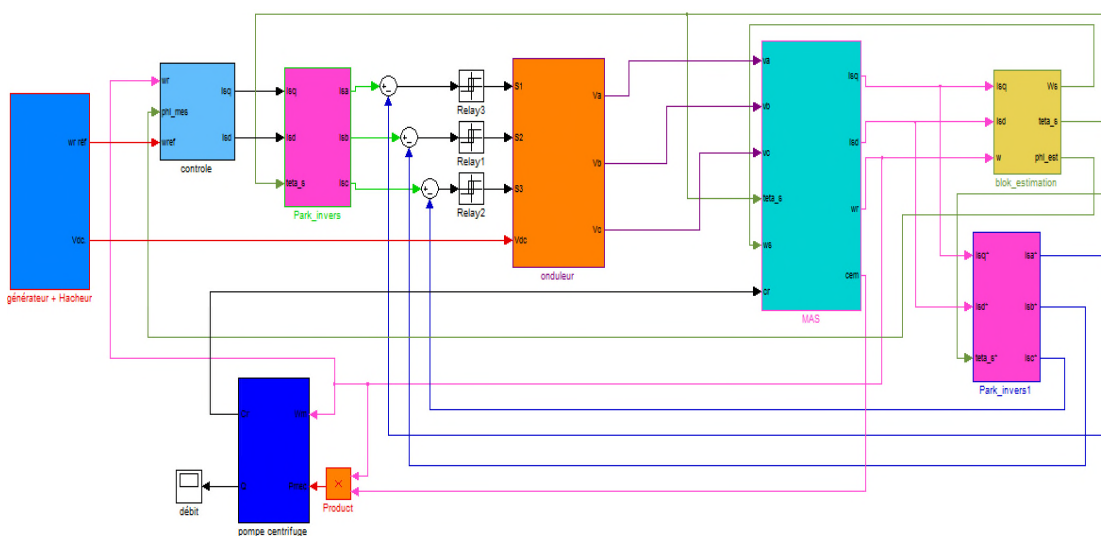
Mode 2 : Dans ce cas, la puissance photovoltaïque est inférieure à la puissance demandée par la charge, donc le manque de puissance sera compensé par la batterie étant donné que l'état de charge de la batterie est supérieur à EDC_{min} .

Mode 3 : Ce cas représente la situation où la puissance photovoltaïque est insuffisante pour alimenter la charge, et l'état de charge de la batterie est inférieur à EDC_{min} , donc on déconnecte la batterie, et vu que la demande de la charge n'est pas satisfaite, cette dernière va aussi se déconnecter, dès que cela arrive la batterie se reconnecte à nouveau pour emmagasiner le peu d'énergie disponible.

Mode 4 : Quand la puissance photovoltaïque est supérieure à la puissance demandée par la charge, et que l'état de charge de la batterie est inférieur à EDC_{max} , on alimente la charge et on charge la batterie.

Mode 5 : Quand la puissance photovoltaïque est supérieure à la puissance demandée par la charge et que l'état de charge de la batterie est supérieur à EDC_{max} , on déconnecte la batterie et la charge sera alimentée par le générateur photovoltaïque, et le surplus d'énergie sera dirigé vers une résistance de délestage.

IV.3. Simulation du système photovoltaïque avec stockage :



On simule le système global avec l'algorithme de gestion, le générateur photovoltaïque (18 panneaux de 110W) optimisé par MPPT (P&O) avec l'application de la commande vectorielle avec des régulateurs classique (PI) pour contrôler le moteur asynchrone (MAS) de 1.5 KW et un banc de batteries.

Pour simuler le système global, nous avons réalisé le schéma de simulation de la figure (IV.4) sous le logiciel Matlab- Simulink .

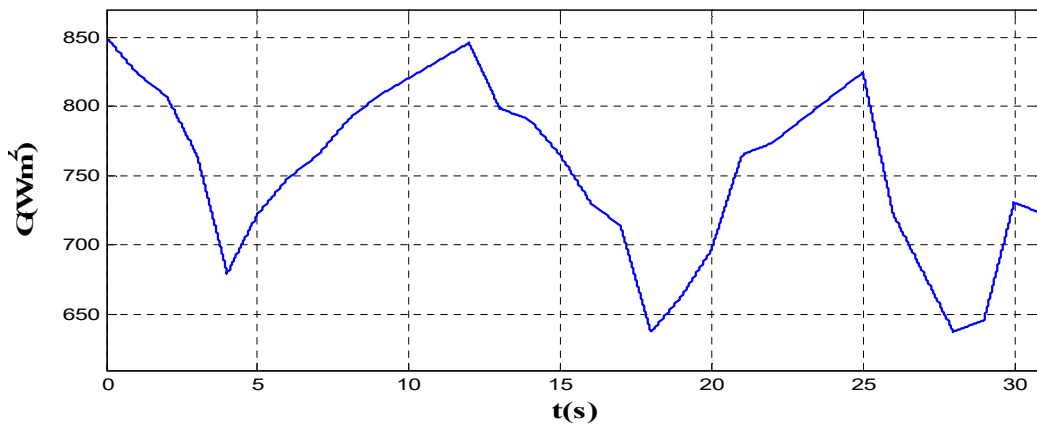


Fig. (IV.2) : profil d'ensoleillement avec une température $T=25^{\circ}\text{C}$.

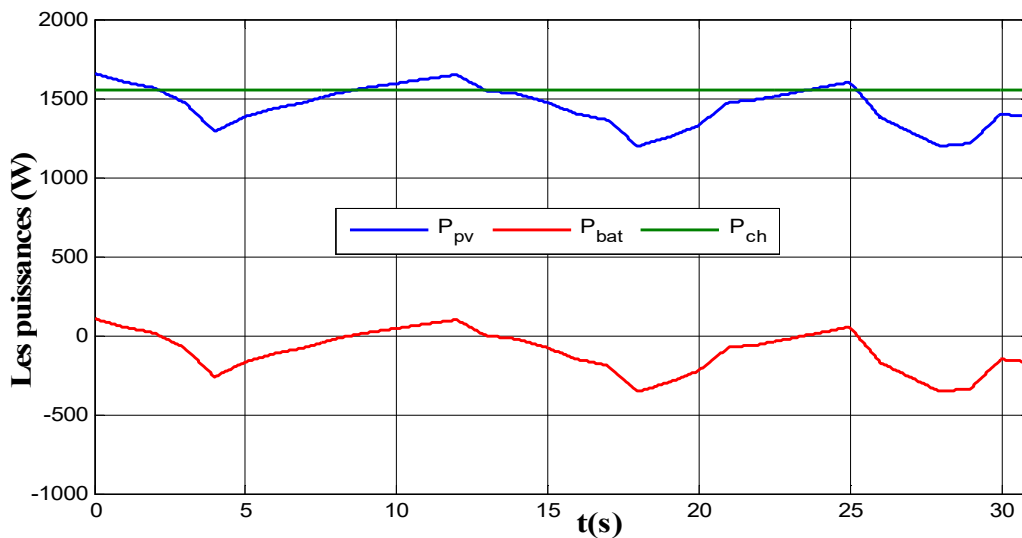
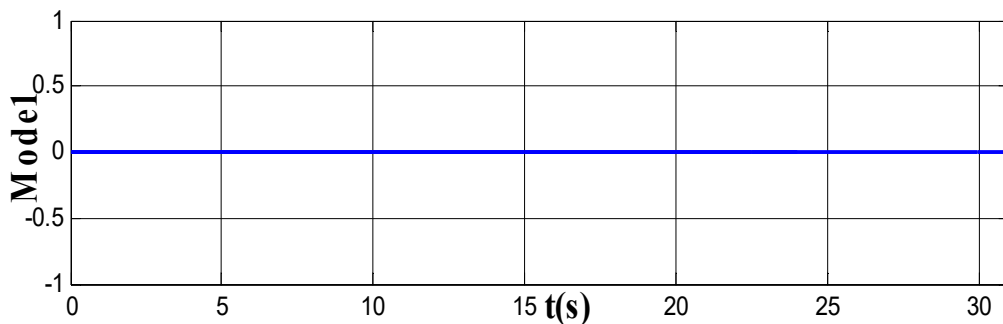


Fig. (IV.3) : Puissance photovoltaïque, batteries et de la charge.



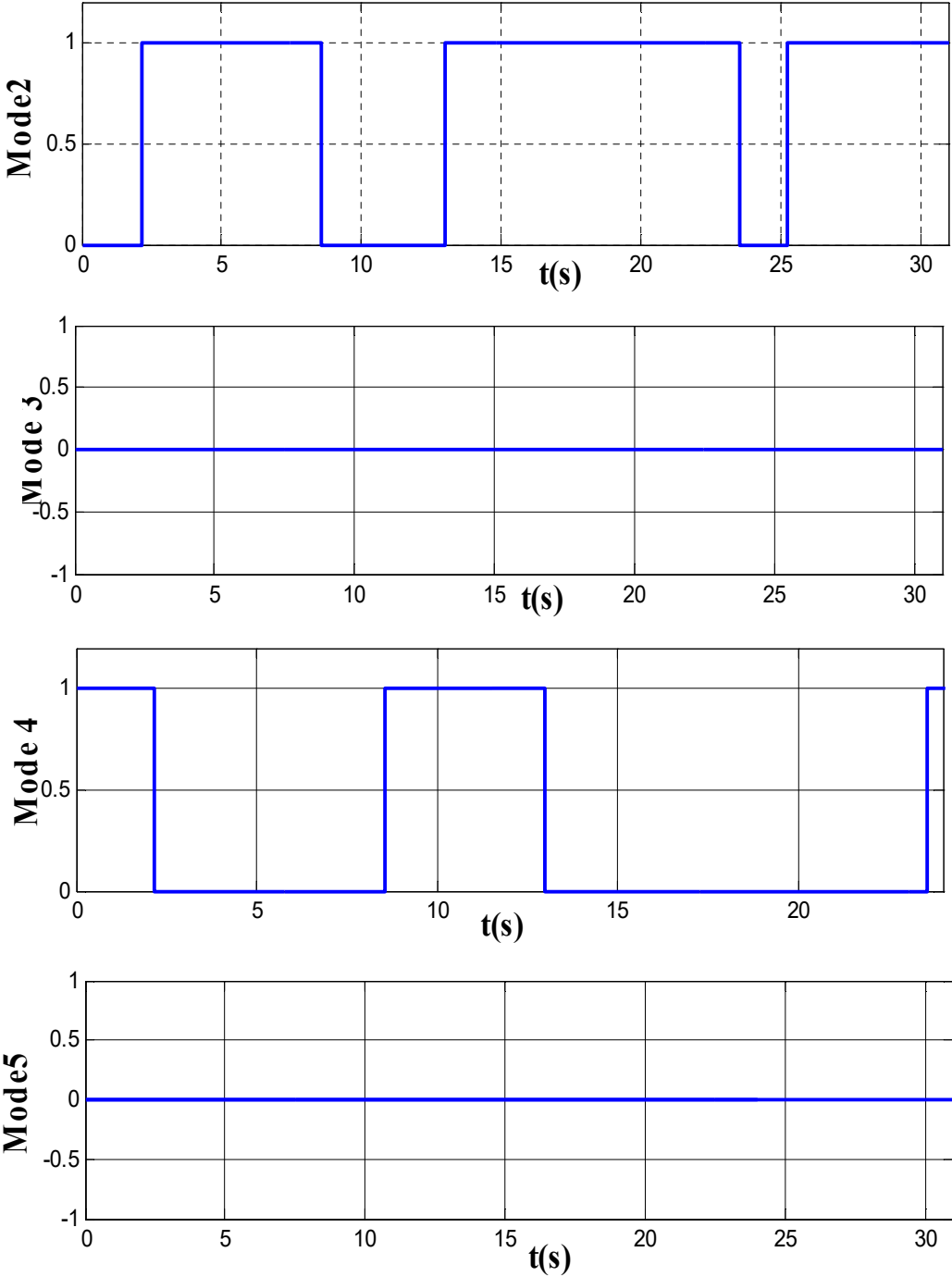


Fig. (IV.4): Modes de fonctionnement.

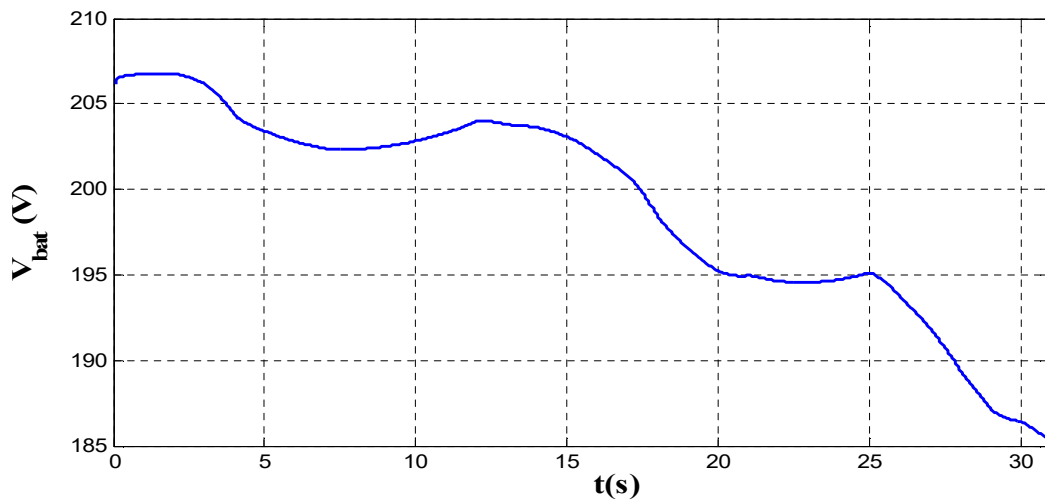


Fig. (IV.5): Tension des batteries.

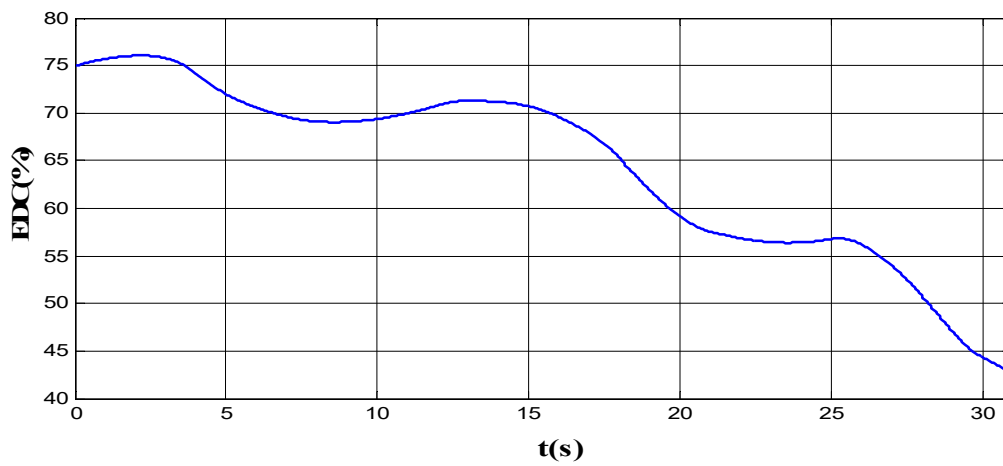


Fig. (IV.6) : L'état de charge de la batterie.

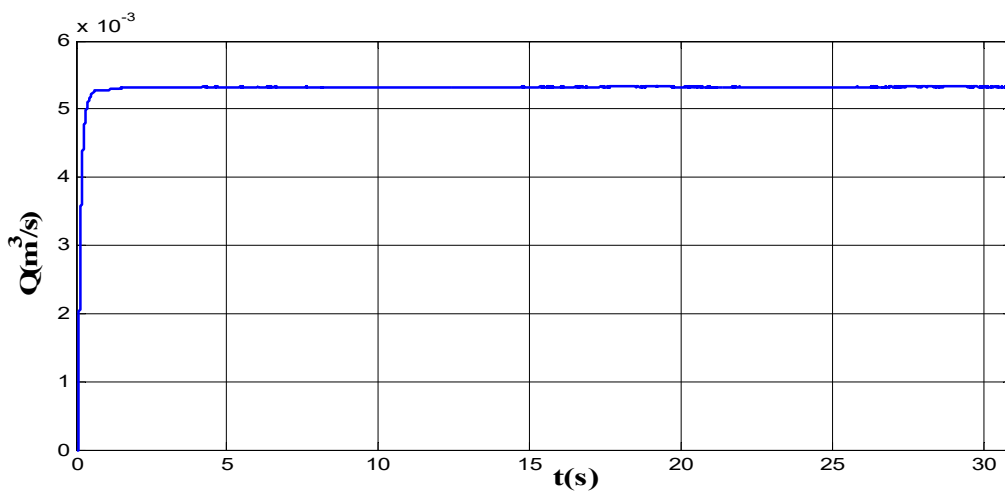


Fig. (IV.11) : L'évolution de débit.

IV.4. Interprétation des résultats :

- On remarque que l'allure de la tension aux bornes de la batterie figure (IV.5), ainsi que celle de l'état de charge figure (IV.6) évoluent de la même manière. Donc l'EDC est l'image de la tension.
- Le débit d'eau est quasiment constant figure (IV.11), donc atteint la valeur désiré.
- Nous pouvons conclure que ces résultats sont d'une grande importance pour la gestion de ce type d'installation.

IV.5. Conclusion :

Nous avons vu dans ce chapitre un algorithme de gestion d'énergie pour un système photovoltaïque avec stockage. Nous pouvons conclure que ces résultats de simulation sont d'une grande importance pour la gestion de ce type d'installation. Ainsi, une maîtrise des flux énergétiques dans un tel système s'avère intéressante pour le rentabiliser dans un contexte isolé.



Conclusion générale :

La contribution à l'étude des systèmes de pompage photovoltaïque a fait l'objet de notre travail.

L'évaluation de n'importe quel travail dans le domaine d'ingénierie, nécessite de donner au premier lieu des généralités de ces systèmes.

Ensuite, Nous avons fait la modélisation des différents composants du système de pompage photovoltaïque avec batteries. On a présenté le modèle du générateur photovoltaïque à une diode qui présenté un bon compromis entre simplicité et précision. La modélisation de la batterie a aussi été réalisée.

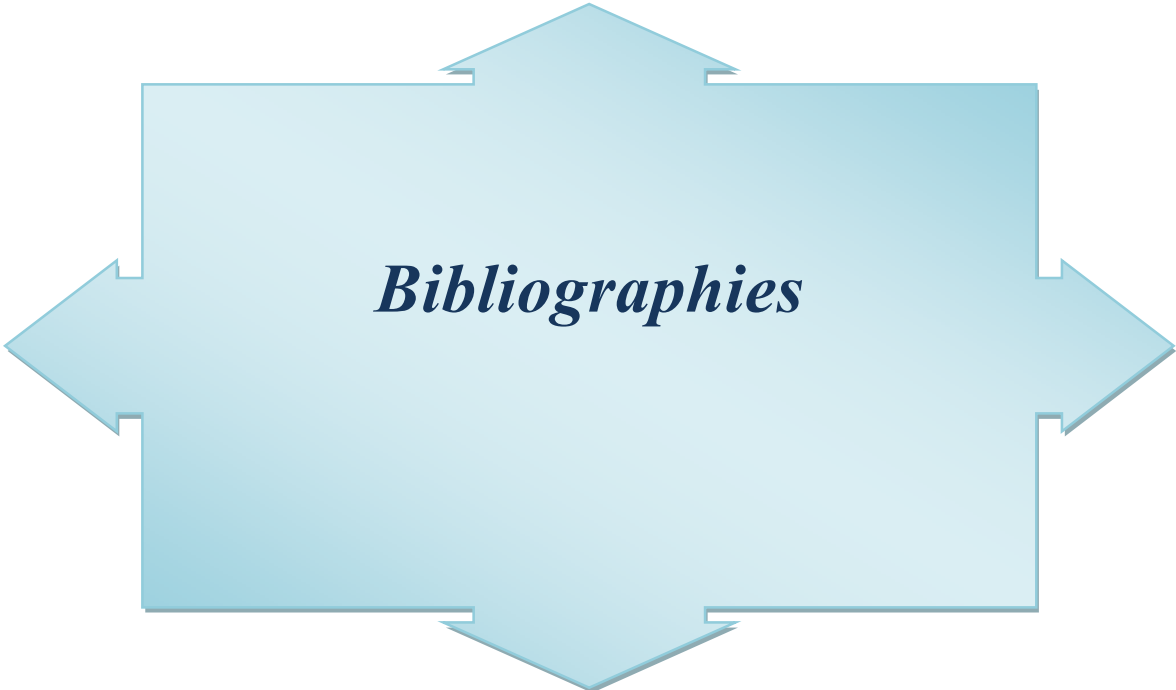
L'algorithme utilisé pour la recherche du point de puissance maximale consiste la commande P&O «Méthode de perturbation et d'observation». Le principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α à la valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du panneau photovoltaïque.

Dans le suivant chapitre nous avons fait le dimensionnement du système et des batteries. Cette méthode permet de calculer le nombre de panneaux et le nombre de batterie, ainsi que l'optimisation puis nous avons déterminer les résultats de simulation pour tous le système.

Pour le dernier chapitre, on a procédé à la simulation du système de pompage photovoltaïque avec batteries, nous avons appliqué la commande vectorielle ayant pour principe, le découplage entre le couple et flux. Cette commande nous a permis de simplifier et d'offrir un certain découplage de la régulation du couple (vitesse), rendant sa commande semblable à celle d'une machine à courant continu à excitation séparée

Enfin, les résultats de simulation montrent l'importance d'un système global. et on a montré l'importance d'un système de stockage et l'efficacité d'un algorithme de gestion dans ce type d'installation. Comme on a pu voir a partir des résultats de simulation, la diversité des modes de fonctionnement.

Nous pouvons conclure que les résultats de simulation concordent avec la gestion proposée. En perspective, nous souhaitons étudier d'autres méthodes MPPT tel que la méthode logique floue avec d'autres modèles mathématique du panneau photovoltaïque concrétisation pratique de ce travail sur un banc d'essai expérimental.



- [1] C.Cidric, «optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié a la conversion photovoltaïque, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse 2008.
- [2] Z.Benjellouli, « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire » mémoire de magistère université de Bechar .Algérie 2009.
- [3] M.Belhadj, «Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome», Mémoire de Magistère, Centre Universitaire de Bechar, 2007/2008.
- [4] J.Royer T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Sy « Le Pompage Photovoltaïque » Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA.
- [5] A.C. Postor, «Evaluation comparative de chargeurs de batteries pour systèmes photovoltaïque », Projet de fin d'études, université Toulouse, septembre 2002.
- [6] http://www.aquaa.fr/images/stories/AQUAA/images/Solutions_tech/photovoltaique/sanstitre-2.jpg, 14 avril 2018.
- [7] F.Bendjoudi et F. Lakhdari, « Etude et simulation d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries ». Mémoire de Master université Bejaia 2014.
- [8] http://encyclopedieenergie.org/sites/default/files/images/articles/art167_fig7_systeme_pv_autonome_sans_stock.jpg, 14 avril 2018.
- [9] D. Y. Goswani, « Principles of Solar Engineering »; Taylor and Francis, second ed., 2000.
- [10] C.SERIR, «optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque», Ingénieur d'Etat en Electromécanique ; Université Bejaia, 2011/2012.
- [11] F.Mattra, « le stockage de l'électricité d'Origène photovoltaïque», année 2004/2005.
- [12] https://www.ecosources.info/images/energie_industrie/silicium,14 avril 2018.

- [13] I.Vechiu, «Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome», Thèse de Doctorat, Université de Havre, France 15 Décembre 2005.
- [14] B.Equer, « Le Pompage Photovoltaïque Manuel de cours », énergie solaire photovoltaïque ellipses 1993.
- [15] B. Multon, H. B. Ahmed, N.Bernard, « les moteurs électriques pour applications de grande série », Pierre-Emmanuel CAVAREC Antenne de Bretagne de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, Revue 3EI juin 2000.
- [16] A. BELHOCINE et S.ZAIDI,« Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome » Mémoire de Master2. Université de Bejaïa, 2012.
- [17] <http://www.blackmersmartenergy.com/fr/comparativedata/centrifugal-pumpsvs-positive-displacement-pumps.html>, 14 avril 2018.
- [18] http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_électrique, 14 avril 2018.
- [19] https://fi26.bulot-fr.com/wiki/index.php?title=Machine_Synchrone, 14 avril 2018.
- [20] M. T. BOUKADOUM, A. HAMIDAT et N. OURABIA, «Le Pompage Photovoltaïque» Revue des Energies Renouvelables. : Zones Arides pp (69- 73) ,2002.
- [21] <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11529>, 14 avril 2018.
- [22] K. EL-Melouani, «dimensionnement d'un hacheur survolteur». Application note de polytech Clermont-Ferrand, FRANCE, 2010.
- [23] http://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_Buck-Boost, 14 avril 2018.
- [24] O.BENSEDDIK et F.DJALOU, «Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque» Mémoire de Master Université Kasdi Merbah-Ouargla 27/06/2012.

[25] A.LABOURET, P.CUMUNEL, J-P.BRAUN, B.FARAGGI« (Cellules solaires), Les bases de l'énergie photovoltaïque» 3^{ème}édition, octobre 2003.

[26] C.J.François, «modélisation de l'art de charge des batteries de véhicules électrique», université de liège faculté de sciènes applique, grade légal ingénieur civile électricien 1997_1998.

[27] N. Achaïbou, A Malek , N Bacha, « Modèle de vieillissement des batteries plomb acide dans l'installation PV », N. spécial (CHEMSS), pp 61-66,2000.

[28] I. Tsuda, K . Kurokawa ,K.Nozaki , «Annual simulation results of photovoltaic system with redox flow battery », solar Energy Materials and solar cells 35,pp 503 –508,1994.

[29] S.Lalouni. «Optimisation de la qualité d'énergie électrique dans le cas d'un chargeur de batterie » Mémoire de magister, Université A.Mira de Bejaïa.

[30] BENDJOURI Faouzi , LAKHDARI Farid, Etude et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque avec batterie ; Université A.Mira de Bèjaia, Promotion juin 2014.

[31] F.SLAMA, «Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique», Mémoire de magister, Université Faraht Abbas Sétif, soutenu le 1/04/2011

[32] D. Bellala, "Contribution à l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie. Application aux systèmes photovoltaïques", Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Batna.

[33]: Chedid, R., Saliba, Y., 1996. «Optimization and control of autonomous renewableenergy systems » . International Journal of Energy Research 20, 609–624.

[34] Maouedj Rachid : Application de l'énergie photovoltaïque au ompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah. Mémoire de Magister Université Abou Bekr Belkaïd . TLEMEN , Décembre 2005 .

- [35] M. Buresh, Photovoltaic energy systems, New York: McGraw-Hill Book Company; 1983.
- [36] M. Karamirad, M. Omid, R. Alimardani, H. Mousazadeh, S.N. Heidari, ANN based simulation and experimental verification of analytical four- and five-parameters models of PV modules, Simulation Modelling Practice and Theory 34 (2013) 86–98.
- [37] I. Hadj Mohammed, « Modélisation du générateur photovoltaïque ». Mémoire de magister, Département d'électronique. Ecole Nationale Polytechnique, 2003.
- [38] F. Haninou et A. Rouabah « Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque » Mémoire Master 2, université Ouargla, 2014.
- [39] R.Saisset, «Contribution à l'étude systématique de dispositifs énergétique à composants électrochimique. Formalise bond graph applique aux piles à combustible, accumulateurs lithium-ion », Thèse de Doctorat, Institut Nationale polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [40] Y.Ammar, « Conception de systèmes de gestion d'énergie pour microsystèmes autonomes », Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier, 2006.
- [41] L.Zarour, « Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque –éolien hors réseau », Thèse de Doctorat de l'Université de Constantine, Algérie, 2010.
- [42] Lalouni Sofia, « Etude commande et simulation d'une chaine hybride (photovoltaïque-éolienne). » de production d'énergie électrique, thèse de Doctorat en Science, université de Bejaia, 2009.
- [43] C .Chabert, A.Rufer « Optimisation des Convertisseurs de Puissance Embarques : Adaptation des Cellules à Lien Alternatif mf et à Commutation Douce », 2002.
- [44] ANKI Massinissa et BOUALLAG Arezki Contribution à l'Etude et à l'Optimisation d'un Système de Pompage Photovoltaïque Université A.Mira de Bèjaia, Promotion Juin 2012.
- [45] V. Salas, E. Olias, A. Barrado, A. Lazaro, «Review of the Maximum Power Point Tracking Algorithms for Stand-Alone Photovoltaic Systems», Solar Energy Materials & Solar Cells, vol: 90, N°: 11, pp: 1555 –1578, 2006.

[46] SINGO A. T, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.

[47] Gergaud O. « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur » Thèse de doctorat, 2002.

[48] A.Hadj Arab , M. benganem et A.Ghabi « Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque », Revue des énergies renouvelables vol.8,2005 .

[49] R .Amrouche et S.Bedjou « Contrôle d'un système de pompage photovoltaïque ».Mémoire de Master Université de Bejaia 2016.

[50] L.Boudrahem et L.Djouadi «Contrôle non linéaire d'un système de pompage photovoltaïque » . Mémoire de Master , Université de Bejaia 2012 .

[51] K.djermouni, «Etude d'algorithmes MPPT Appliqués aux Systèmes de pompage photovoltaïque ». Mémoire d'ingénieur, université A .MIRA Béjaïa ,2011.

[52] V .Salas, E. Olias , A. Barrado, A.Lazaro, « Review of the maximum power point tracking algorithms for stand –alone photovoltaic systems », solar Energy Materials & solar Cells , Vol :90, N°: 11,pp: 1555-1578,2006.

[53] S. Lalouni , D.Rekioua , T,Rekioua , E.Matagne « Fuzzy logic control of stand –alone photovoltaic system with battery storage », Journal of Power Source, vol.193,N°:2, pp:899-907,2009 .



Paramètres de la machine asynchrone. [10]

La machine utilisé pour entrainer la pompe est machine asynchrone à cage d'écureuil standard. Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- Puissance nominale $P_n=1.5kW$.
- Tension 220/380V.
- Courant 5.2/3A.
- La vitesse de rotation nominale $N=1460tr/mn$.
- Nombre de paire de pôle $p = 2$
- Inductance cyclique statorique $L_s = 0.4662 H$
- Inductance cyclique rotorique $L_r = 0.4662 H$
- Inductance cyclique mutuelle $M = 0.44 H$
- Résistance statorique $R_s = 5.75 \Omega$
- Résistance rotorique $R_r = 4.2 \Omega$
- Coefficient de frottement : $f=0.0009 N.m.s/rad$
- Inertie : $J = 0.0003 N.m$

Paramètres de la pompe centrifuge

Vitesse nominale	150 rad/sec
Constante C1	$4.923410^{-3} m/(rad/sec)^2$
Constante C2	$1.5826.10^{-5} m/(rad/sec)(m^2/sec)$
Constante C3	$-18144 m/(m^3/sec)^2$
hauteur géométrique H_g	10m
longueur de la canalisation l	7.4m
diamètre de la canalisation d	0.06m
coefficient de pertes de charge locales ou singulière ζ	6.3m

coefficient des pertes de charge dans la canalisation λ	0.036m
La gravitation g	9.81m2/s

Les caractéristiques techniques de la batterie SUNLIGHT (plomb acide)

Capacité de la batterie (Ah)	597,3958 Ah
Tension de la batterie V_{bat} R(V)	12 V
Profondeur de décharge PDD (%)	80%
Coefficient de pertes R_t	20%