

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Abderrahmane Mira de Béjaïa

Faculté de technologie

Département de génie électrique

Mémoire de fin de cycle

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

Option énergies renouvelables en électrotechnique

Thème

**Etude et dimensionnement d'un système de pompage et
multi-sources**

Présenté par :

M. Karim AMROUCHE

M. Nasr-Eddine BENHACINE

Encadré par :

Mme. Radia ABDELLI

Année universitaire 2017/2018

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience durant toutes les années d'études, et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Nous tenons à représenter nos vifs remerciements à notre promotrice Madame R. ABDELLI pour avoir accepté de nous encadrer, pour sa permanente gentillesse et pour ces précieux conseils tout au long de notre travail.

Nous remercierons profondément monsieur N. ZIDANE, doctorant à l'université de Bejaia pour son aide constante et bénéfique tout au long de notre travail, sans oublier madame CH.SERIR pour tout le temps qui nous a consacré.

Nous tenons aussi à remercier les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail.

Merci

Dédicace

C'est avec toute l'ardeur de mes sentiments que je dédie ce modeste travail qui est

le fruit de ma profonde reconnaissance à :

Mes chers parents, ma mère et mon père

À mes chères sœurs et mes chers frères

À mes chers amis

À toutes les personnes qui m'ont aidé le long de mes études

Karim AMROUCHE

Dédicaces

A ma famille,

A tous ceux qui m'aiment...

Benhacine Nasr-Eddine

Liste des figures

Figure (I.1): Schéma général de système énergétique multi-sources, charges et stockage	3
Figure (I.2): Exemple d'une configuration multi-sources générale dédiée à un site isolé Couplage éolien photovoltaïque	4
Figure (I.3): Système de pompage multi-sources avec stockage (éolien photovoltaïque)	5
Figure (I.4): Les deux types d'énergie solaire	6
Figure (I.5): Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM	7
Figure (I.6): Spectres solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM Source NREL Solar Spectrum	7
Figure (I.7): Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	8
Figure (I.8): Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	9
Figure (I.9): Influence des résistances shunt et série sur la caractéristique courante tension d'une cellule photovoltaïque	9
Figure (I.10): Association de cellules identiques en série	10
Figure (I.11) : Association de cellules identiques en parallèle	10
Figure (I.12) : Mise en série-parallèle des cellules photovoltaïques	11
Figure (I.13): Présentation d'une cellule, d'un panneau et d'un champ photovoltaïque	11
Figure (I.14) : Caractéristiques électriques et courbes de puissance d'un module photovoltaïque	12
Figure (I.15): Conversion de l'énergie cinétique du vent	13
Figure (I.16): Configuration à axe horizontal	14
Figure (I.17): Eolienne de type Darrieus et Savonius	15

Liste des figures

Figure (I.18) : Les Composante De L'aérogénérateur	16
Figure (1.19) : Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.	17
Figure (I.20) : Moteur à courant continu	18
Figure (I.21): Machine synchrone	20
Figure (I.22): Machine asynchrone	20
Figure (I.23): Convertisseur DC/DC (Elévateur de tension)	21
Figure (I.24): Convertisseur DC/DC (Abaisseur de tension)	21
Figure (I.2) : Schéma de l'onduleur	22
Figure (I.26): Pompe centrifuge	23
Figure (I.27): Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge	23
Figure (I.28): Pompe volumétrique	24
Figure (I.29): Caractéristiques d'une pompe volumétrique	24
Figure (II.1) : Schéma simplifié du système de pompage multi-sources (photovoltaïque, éolienne)	26
Figure (II.2) : Structure de la chaine de conversion photovoltaïque	27
Figure (II. 3) : Circuit équivalent du GPV	27
Figure (II.4): Bloc de la simulation de panneau photovoltaïque	30
Figure (II.5) : Caractéristique I-V d'une Cellule PV	31
Figure (II.6) : Caractéristique P-V d'une Cellule PV	31
Figure (II.7) : Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement V-I	32

Liste des figures

Figure (II.8) : Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement V-P.	32
Figure (II.9): Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de la température V-I.	33
Figure (II.10): Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de la température V-P.	33
Figure (II.11) : Circuit électrique du convertisseur DC-DC.	34
Figure (II.12): Schéma d'un Hacheur survolteur à $t \in [0, \alpha.T]$.	34
Figure (II.13): Schéma d'un Hacheur survolteur à $t \in [\alpha T, T]$.	35
Figure (II.14): Convertisseur dévolteur-survolteur	35
Figure (II.15): Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur(a): K ouvert ; (b):K fermé	36
Figure (II.16): Circuit de l'onduleur relié à la machine asynchrone.	37
Figure (II.17) : Représentation schématique d'un MAS	41
Figure (II.18) : Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique	42
Figure (II.19) : Phénomène d'autoamorçage	46
Figure (II.20) : Structure de la conversion de l'énergie éolienne	51
Figure (II.21) : circuit électrique du convertisseur AC/DC (Redresseur à diodes)	53
Figure (II.22) : courant circulant dans le bus continue	54
Figure (II.23) : schéma équivalent du modèle CIEMAT	56
Figure (III.1) : Chaine de conversion photovoltaïque avec le contrôleur MPPT	58
Figure (III.2) : Caractéristique puissance-tension d'un panneau photovoltaïque	59

Liste des figures

Figure (III.3) : Schéma de contrôle de MPPT et de régulation de la tension V_{pv} .	59
Figure (III.4) : Caractéristiques d'un panneau solaire (principe de fonctionnement de (P&O)	60
Figure (III.5) : Diagramme fonctionnel algorithme (P&O)	61
Figure (III.6) : Caractéristiques ($I_{pv}(V_{pv})$) et ($P_{pv}(V_{pv})$) dans les conditions STC convention	62
Figure (III.7): L'allure du courant photovoltaïque	62
Figure (III.8): L'allure de la tension photovoltaïque	63
Figure (III.9): L'allure de la puissance photovoltaïque	63
Figure (III.10) : Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation	65
Figure (III.11) : Schéma bloc de la turbine éolienne avec MPPT	65
Figure (III.12) : Profil du vent en [m/s]	66
Figure (III.13) : Coefficient de puissance maximal C_p de la turbine [m/s]	66
Figure (III.14) : Vitesse spécifique λ optimale [m/s]	66
Figure (III.15) : La puissance de la turbine [W]	67
Figure (III.16) : La vitesse de la turbine [rad/s]	67
Figure(IV.1) : Données de base d'une pompe	69
Figure (IV.2) : Irradiation solaire et vitesse du vent moyenne mensuelle journalière du site de Bejaïa de 1998 à 2007	70
La figure (IV.3) : Le schéma de générateur photovoltaïque	75
Figure (IV.4) : Organigramme de gestion d'énergie dans le système global	76

Liste des figures

Figure (IV.5) : Schéma bloc du système de pompage multi-sources sous Matlab/Simulink	80
Figure (IV.6) : Profile de l'irradiation solaire	80
Figure (IV.7) : Profile du vent	80
Figure (IV.8) : Les puissances (photovoltaïque et éolienne) avant la gestion	81
Figure (IV.9) : La puissance hybride (photovoltaïque + éolienne) avant la gestion	81
Figure (IV.10) : L'état de charge de la batterie	81
Figure (IV.11) : Tension des batteries	82
Figure (IV.12) : Allure de puissance (charge et décharge) de la batterie	82
Figure (IV.13) : Allure des puissances (hybride, batteries et charge) après la gestion	83
Figure (IV.14) : L'évolution de débit	83
Figure (IV.15) : Vitesse de référence et estimée	84
Figure (IV.16) : Flux de référence et estimée	84
Figure (IV.17) : L'évolution de courant quadrature (isq-ref, isq)	84
Figure (IV.18) : L'évolution de courant directe (isd-ref, isd)	85
Figure (IV.19) : Zoom pour L'évolution de courant directe (isd-ref, isd)	85
Figure (IV.20) : Le couple résistant et électromagnétique	85
Figure (IV.21) : L'évolution des courants statoriques	86
Figure (IV.22) : Zoom pour l'évolution des courants statoriques	86

Liste des tableaux

Tableau (II. 1) : Paramètres obtenus du modèle à une diode du panneau PV SM110	29
Tableau (II.2) : Valeurs des paramètres de simulation du panneau photovoltaïque SIEMENS SM 110-24	31
Tableau (IV.1) : Dimensionnement du système de pompage	74
Tableau (IV.2) : Caractéristique de l'onduleur choisis	75

Nomenclature

Liste des symboles

E_s : L'insolation.

h : Constante de Planck.

C : Vitesse de la lumière [m/s].

λ_0 : Longueur d'onde [m].

I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque [A].

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule.

R_s : Résistance série [Ω].

R_{sh} : Résistance shunt [Ω].

I_D : Le courant circulant dans la diode.

E_{Sref} , T_{jref} : l'éclairement et la température sous conditions STC.

T_j : Température de Junction.

P_1 , P_2 , P_3 : paramètres constants.

N_{oc} : la température nominale de fonctionnement de la cellule ou du module solaire

T_a : la température ambiante [$^{\circ}K$].

I_{0a} : courant de saturation de la tension [A].

q : charge élémentaire ($1.6 \cdot 10^{-19}C$).

K : constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ (SI)).

A : coefficient d'idéalité de cellule.

N_s : nombre total de cellules connectées en séries et/ou en parallèles.

E_g : Énergie de gap ($1.76 \cdot 10^{-19}$).

P_4 : paramètres constants.

V_{pv} : La tension de sortie d'une cellule photovoltaïque [V].

ΔT_j : Représente la variation de la température.

ΔI_{pv} : Représente la variation du courant par rapport à l'insolation et à la température.

ΔV_{pv} : Représente la variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température.

η_m : Rendement du module.

Nomenclature

η_0 : Rendement du générateur PV.

α_{cc} : Représente un coefficient de la température, d'incrémentation du courant I_{cc} .

β_{oc} : Représente un coefficient de la température, d'incrémentation de tension V_{oc} .

α : Rapport cyclique.

V_a, V_b, V_c : Tension simple.

V_{dc} : Tension redressée.

S_a, S_b, S_c : Fonction logique correspondants à l'état de l'interrupteur.

M_0 : représente la valeur maximale des inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques.

θ : L'angle de rotation du rotor par rapport au stator.

L_{ss}, L_{rr} : Matrice d'inductances statorique, rotorique.

M_{rs} : Matrice des inductances mutuelle stator-rotor.

f_r : Coefficient de frottement.

θ_a : Angle de rotation du repère (u, v) .

L_s, L_r : Inductances cyclique statorique, rotorique.

I_s : Respectivement inductance de fuite statorique et rotorique.

M : Mutuelle inductance

ω_s : Pulsation des grandeurs statoriques.

ω_r : Pulsation des grandeurs rotoriques.

P_v : La puissance du vent [W].

ρ : La densité d'air [$\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$].

S : La surface circulaire balayée par la turbine [m^2].

R : Rayon de la turbine [m].

V : la vitesse du vent [m^3/s].

C_{aero} : Le couple aérodynamique.

C_p : Coefficient de puissance.

Ω_t : La vitesse de rotation de la turbine.

Nomenclature

λ : Vitesse spécifique.

P_{aero} : Puissance aérodynamique.

β : Angle de calage.

λ_{opt} : Vitesse spécifique optimale de la turbine éolienne.

C_{pmax} : Coefficient de puissance maximale de la turbine éolienne.

C_g : Le couple de la génératrice.

Ω_{mec} : La vitesse de rotation de la génératrice.

C_t : le couple de la turbine.

J : L'inertie totale de l'arbre de transmission de la turbine.

f : Le coefficient de frottement visqueux.

H_g : Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée et le plan d'utilisation [m].

P_c : Perte de charge produite par le frottement de l'eau sur les parois des conduites.

λ : Coefficient des pertes de charge linéaires.

D : Diamètre de la tuyauterie [m]

L : Longueur de la tuyauterie [m]

g : Accélération de la pesanteur locale [m/s²].

ε : Coefficient des pertes de charge locales.

K_p : Constante la canalisation.

Q : Le débit de la pompe [m³/h].

C_r : Le couple résistant [N.m].

Ω : vitesse de moteur asynchrone [rad/s].

K_r : Un coefficient de proportionnalité [(Nm /ras .S⁻¹)²].

P_n : Puissance nominale du moteur asynchrone [W].

Ω_n : Vitesse nominale du moteur asynchrone [rad/s].

V_{bat} : Tension de la batterie [V].

I_{bat} : Courant de la batterie [A].

E_b : La force électromotrice fonction de l'état de charge de la batterie.

Nomenclature

R_b : La résistance interne, variable en fonction de l'état de charge.

C_{bat} : La capacité de la batterie.

η_p : Rendement de la pompe.

P_h : La puissance hydraulique.

η_p : Rendement de la pompe

η_m : Rendement du moteur

η_{ond} : Rendement de l'onduleur

Les Abréviations

EDC Etat de charge de la batterie.

HMT Hauteur manométrique totale.

MPPT Maximum power point tracking.

MPP Le point de puissance maximal.

MLI Modulation de la longueur d'impulsion.

P&O Perturbation et observation.

PV Photovoltaïque.

GPV Générateur photovoltaïque.

MAS Moteur asynchrone.

DC Courant continu.

AC Courant alternatif.

Table des matières

Table des matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur le système de pompage multi-source.

I.1 Introduction.....	3
I.2 Les systèmes multi-source autonomes (éolien-photovoltaïque) avec stockage.....	3
I.3 Description d'un système de pompage	4
I.4 L'énergie solaire	5
I.4.1 Principe de conversion photovoltaïque.	8
I.4.2 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	8
I.4.3 caractéristique d'une cellule photovoltaïque.	9
I.4.4 Association série et parallèle des cellules photovoltaïques	10
I.4.5 Modèle de générateur photovoltaïque.	11
I.4.6 Nécessité de fonctionnement optimal du générateur.	11
I.4.7 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire.....	12
I.5 Energie éolienne.....	13
I.5.1 Définition de l'énergie éolienne	13
I.5.2 Les différents types d'éoliennes	13
I.5.3 Principe De Fonctionnement	15
I.5.4 Eléments Constitutifs D'un Aérogénérateur (A Axe HORIZONTAL).....	15
I.5.5 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne.....	16
I.5.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	17
I.6 Les différents types de machines et moteurs électriques utilisées	18
I.6.1 Moteur à courant continu	18

Table des matières

I.6.2 Moteur à courant alternatif	18
I.7 Différents types de convertisseurs	21
I.7.1 Convertisseurs DC /DC (hacheurs)	21
I.7.2 Le convertisseur continu- alternatif (onduleur)	22
I.8 Sous-système de pompage (Groupe motopompe)	22
I.8.1 Types de pompes utilisées	22
I.8.1.1 Les pompes centrifuges	22
I.8.1.2 Les pompes volumétriques	23
I.9 Le stockage	24
I.9.1 Stockage de l'eau	25
I.9.2 Stockage électrochimique	25
I.10 Conclusion	25

Chapitre II : Modélisation du système de pompage multi-source

II.1 Introduction	26
II.2 Modélisation d'un système pompage multi-source	26
II.3. Modélisation de la chaine photovoltaïque	26
II.3.1 Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV)	27
II.3.2 Caractéristique d'un module solaire (I-V), (P-V)	31
II.3.2.1 Influence de l'éclairement	31
II.3.1.2 Influence de la température	32
II.4 Modélisation de convertisseur DC/DC	33
II.5 Modélisation du convertisseur DC/AC (Onduleur)	37
II.6 Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil	39

Table des matières

II.6.1 Modélisation généralisée	39
II.6.1.1 Équations électriques	39
II.6.1.2 Équations magnétiques	40
II.6.1.3 Équation mécanique.....	41
II.6.2 Transformation de Park	42
II.6.2.1 Équations électriques au régime no saturé.....	43
II.6.2.2 Equations magnétiques au régime no saturé	43
II.6.2.3 Équations mécanique au régime no saturé	45
II.6.3 Régime saturé	45
II.7 Modélisation de la chaine de conversion éolienne	50
II.7.1 Modélisation de la vitesse du vent.....	51
II.7.2 Modélisation de la turbine	51
II.7.3 Caractéristique $C_p(\lambda)$ de la voilure.....	52
II.7.4 Modélisation du multiplicateur.....	52
II.7.5 Modélisation de l'arbre de transmission.....	53
II.8 Modélisation du redresseur.....	53
II.9 Modélisation du bus continu.....	54
II-10 Modélisation de la pompe centrifuge	54
II.11 Modélisation de la batterie	56
II.11.1 Le modèle de CIEMAT	56
II.11.2 modèle de la capacité.....	56
II.12 Conclusion	57

Chapitre III : Optimisation du système multi-source

Table des matières

III.1 Introduction	58
III .2 Optimisation de système photovoltaïque	58
III.2.1 La commande de recherche du point de puissance maximale.....	58
III.2.1.1 Méthode de perturbation et d'observation (P&O).....	60
III.2.2 Simulation du panneau photovoltaïque avec MPPT	61
III.2.3 Résultats de simulation du panneau photovoltaïque	62
III.3 Optimisation de la puissance de la turbine.....	63
III.3. 1 La méthode classique	64
III.4 Conclusion.....	67

Chapitre IV : Dimensionnement et simulation du système de pompage Multi-source

IV.1 Introduction	68
IV.2 Dimensionnement d'un système de pompage.....	68
IV.2.1 Donnée de bases.....	68
IV.2.2 Etapes de dimensionnement d'un système de pompage multi-sources	69
IV.2.2.1 Evaluation des besoins en eau.....	69
IV.2.2.2 Calcule de l'énergie hydraulique nécessaire	70
IV.2.2.3 Détermination de l'énergie solaire et du vent disponible	70
IV.2.2.4 Choix des composantes	71
IV.3 Application.....	73
IV.4. Contrôle du système multi-source de production d'énergie	76
IV.5. Gestion du système multi-sources.....	76
VI.5.1 Organigramme de gestion d'énergie	76
VI.5.2 Les modes de la gestion	77
VI.6 Calcule de la vitesse de référence	77

Table des matières

VI.7 Commande vectorielle de moteur asynchrone	78
IV.8 Commande MLI.....	79
IV.9 Simulation du système global	79
IV.10 Conclusion	86
Conclusion Générale.....	87
Bibliographie	88
Annexes.....	92

Introduction générale

Aujourd'hui, il est évident que les besoins mondiaux en énergie sont comblés en grande partie par des énergies fossiles. Or, il a été prouvé que la consommation massive de ces types d'énergies a un effet néfaste sur la planète tel que le réchauffement climatique dû à la pollution de l'air et l'augmentation de l'effet de serre, ces sources sont aussi vouées à se tarir au cours des prochaines années. [1]

L'une des solutions envisagées pour faire face au tarissement des énergies fossiles et pour lutter contre le réchauffement climatique est l'utilisation des énergies renouvelables. En particulier, les énergies renouvelables sont une alternative intéressante pour l'électrification, l'éclairage et le pompage d'eau dans les sites isolés et rurales.

D'après Global Energy Assessment, en 2013, les sources d'énergies renouvelables couvrent environ 20% de la consommation mondiale d'énergie. [1]

Beaucoup de populations dans les zones rurales et isolées des pays en voie de développement affrontent de grands problèmes dus au manque d'eau. Le déficit en eau dans les zones isolées est une question vitale pour les populations. L'amélioration des conditions de vie dans ces zones est liée à la recherche des solutions adéquates à ce problème. Le pompage multi-sources représente une solution idéale pour l'approvisionnement en eau dans les sites isolés et rurales. [2]

Dans ce travail, nous présentons une étude et un dimensionnement pour un système de pompage d'eau, en utilisant deux sources de production (photovoltaïque et éolien) et une source réversible (batteries).

Notre étude est structurée en quatre chapitres, le premier chapitre présentera l'état de l'art des systèmes de pompage multi-sources.

Le seconde sera consacré à la modélisation des différents éléments de notre système de pompage, en commençant par la chaîne de conversion photovoltaïque (panneaux photovoltaïque, convertisseur DC/DC), puis la chaîne de conversion éolienne (turbine, convertisseur AC/DC), le convertisseur DC/AC, le groupe motopompe (moteur asynchrone et pompe centrifuge) et les batteries.

Le troisième chapitre abordera l'optimisation de la puissance produite par les deux générateurs (photovoltaïque et éolien) par des algorithmes MPPT afin d'extraire le point de puissance maximale, les résultats de simulation seront présentés.

Enfin, le quatrième chapitre portera sur le dimensionnement, le contrôle et la supervision du système multi-sources. Dans le dimensionnement, nous déterminerons le nombre de panneaux photovoltaïques, éoliennes et batteries que nous avons besoin pour alimenter notre charge, avec une méthode basée sur l'estimation des besoins en eau, le rendement du groupe motopompe. Un algorithme va assurer la gestion d'énergie produite par les deux générateurs. Cet algorithme détermine la puissance de réglage à partir de la puissance de la charge et la puissance fournie par les deux générateurs pour satisfaire la puissance totale

INTRODUCTION GENERALE

demandée avec une bonne surveillance de fonctionnement des générateurs photovoltaïques, éoliens et les batteries selon les modes de fonctionnement.

Une simulation du système global est effectuée pour dix-sept jours du mois de décembre (le mois le plus défavorable), les résultats seront présentés.

Nous terminons par une conclusion générale dans laquelle nous ferons une synthèse récapitulative.

I.1 Introduction

Les « systèmes d'énergie multi-sources » sont des systèmes complexes qui associent différentes sources renouvelables ; ou qui combinent des sources conventionnelles (générateur diesel...) avec différents éléments de stockage et différentes charges.

Ils permettent la compensation du caractère intermittent des sources renouvelables et offrent un rendement énergétique global plus élevé.

L'intérêt essentiel est la possibilité d'autonomie énergétique qu'ils permettent vu qu'ils ne dépendent pas d'une seule source. Ils peuvent alors résoudre en très grande partie le problème de la disponibilité énergétique. [3]

La figure (I.1) représente le schéma général des systèmes hybrides. Un bus électrique est commun à tous les éléments qui sont connectés. Ces derniers sont regroupés selon leur fonction électrique : les éléments de génération (ou sources), les éléments de charge (Load en anglais) et les éléments de stockage (Storage en anglais, en pointillé sur la figure). [3]

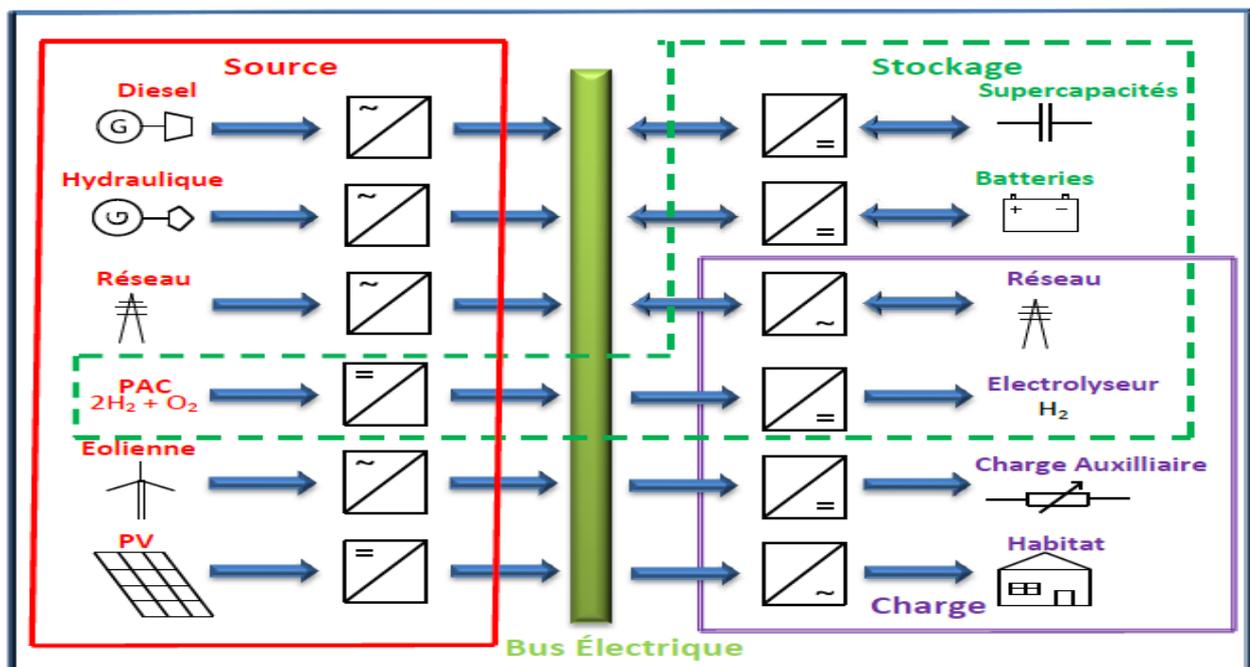


Figure (I.1) : Schéma général de système énergétique multi-sources, charges et stockage

I.2 Les systèmes multi-sources autonomes (éolien-photovoltaïque) avec stockage

La figure (1.2) donne un exemple typique d'une unité de production hybride non raccordée au réseau couplant deux sources d'énergie éolienne et solaire avec un stockage de l'énergie. Le « nœud électrique » permet de connecter et de distribuer l'énergie entre les différents composants du système. Cette association permet d'obtenir un réseau électrique

complètement autonome à courant continu DC et/ou à courant alternatif AC. On parle ainsi d'un mini-réseau local « ilote », à faible puissance de court-circuit. [3]

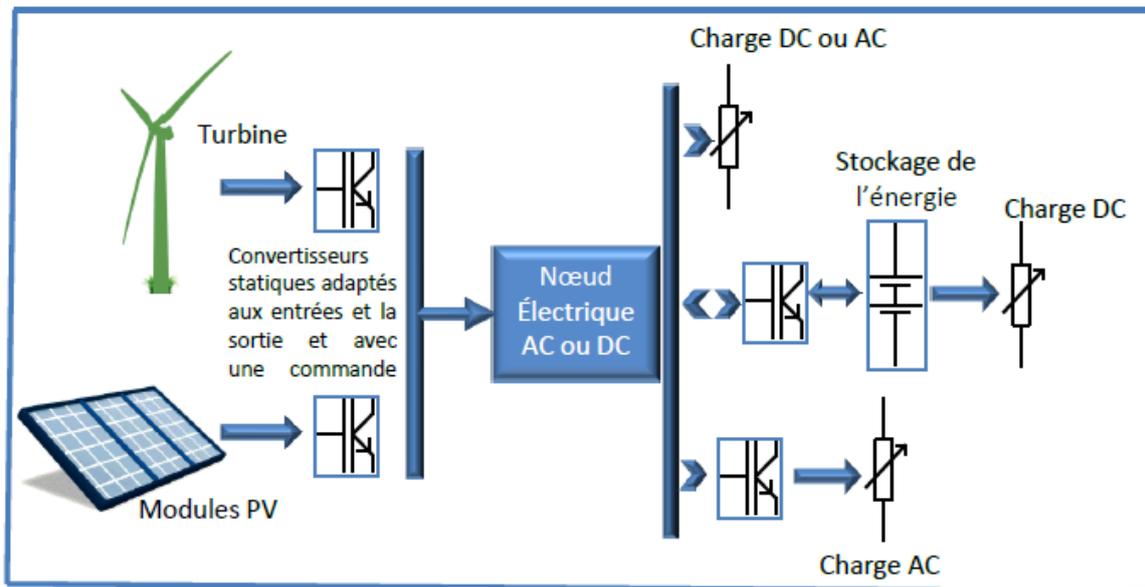


Figure (I.2): Exemple d'une configuration multi-sources générale dédiée à un site isolé :
Couplage éolien photovoltaïque

Dans ce chapitre, nous allons aborder des généralités sur le système de pompage et la chaîne de conversion éolienne et photovoltaïque ainsi que la description des différents éléments les constituants. Par la suite nous donnerons un petit aperçu sur l'optimisation qui consiste à extraire le maximum de puissance dans notre système.

I.3 Description d'un système de pompage

Il existe encore différentes combinaisons de systèmes multi-sources, dans notre travail, le système multi-sources à énergie renouvelable qui nous intéresse regroupe deux sources d'énergies pour la production de l'énergie électrique (éolienne-photovoltaïque) avec un stockage chimique (batterie) et un réservoir de stockage d'eau placé à une hauteur suffisante, pour fournir de l'eau pendant les périodes de manque d'énergie électrique.

Le système que nous allons étudier est résumé dans la figure I.3:

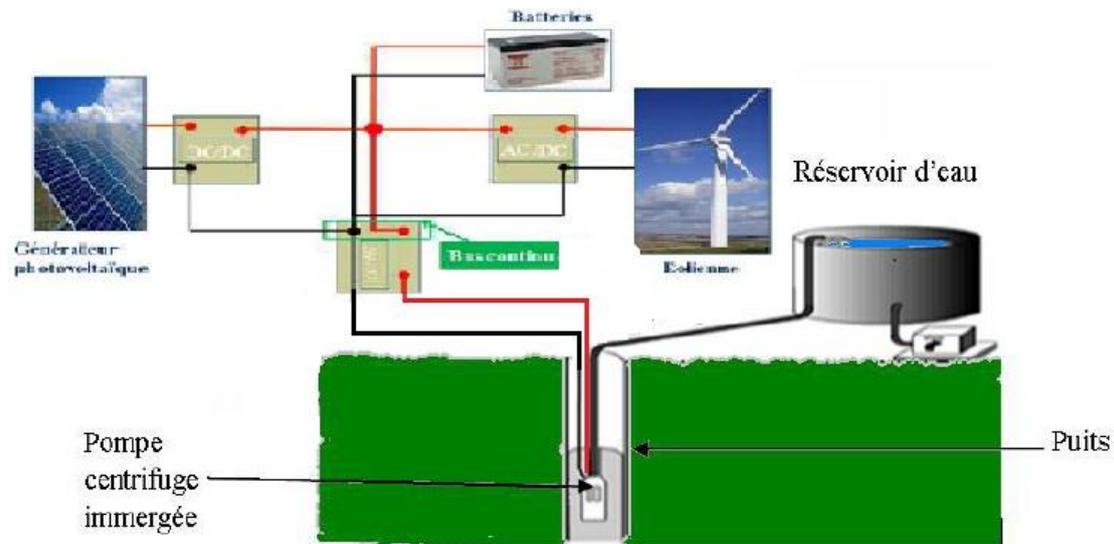


Figure (I.3): Système de pompage multi-sources avec stockage (éolien photovoltaïque)

Il est constitué principalement :

- ✓ D'un générateur photovoltaïque et un générateur éolien ;
- ✓ De trois convertisseurs statiques ; un hacheur, un redresseur et un onduleur ;
- ✓ D'un groupe motopompe qui comprend un moteur et une pompe ;
- ✓ Batteries ;
- ✓ D'un réservoir de stockage.

Les avantages de choix de système sont :

- ✓ Production 100% ;
- ✓ Dans un souci d'environnement, pas d'émission de gaz à effet de serre.

I.4 L'énergie solaire

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables, mais elle est très atténuée.

Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteur photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique. [4](Voir Figure I.4).

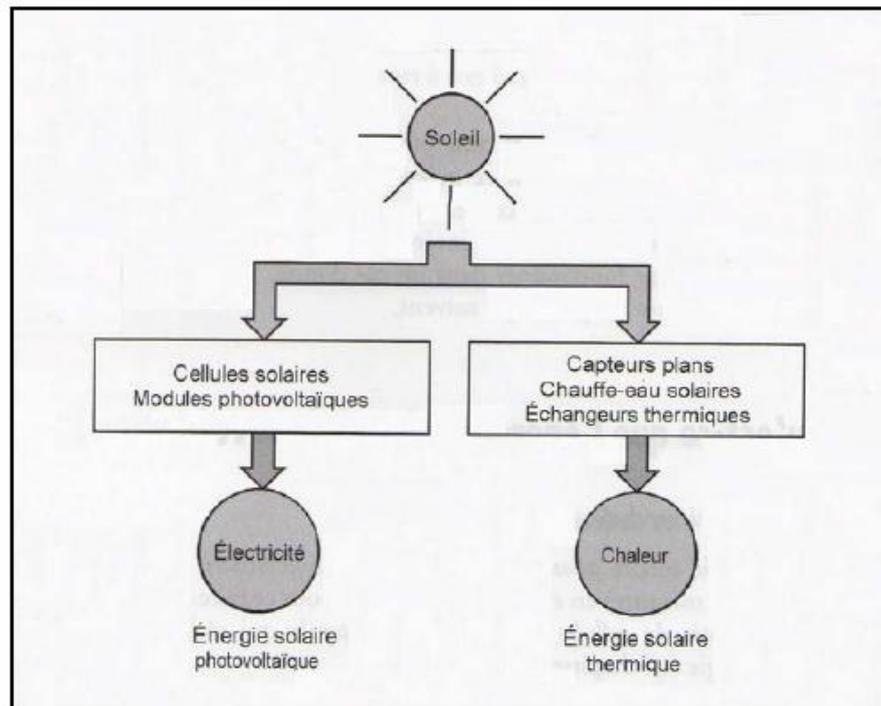


Figure (I.4) : Les deux types d'énergie solaire. [5]

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($2,5\mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2,5\mu\text{m}$), et transportant chacun une énergie E_{ph} , qui répond elle-même à la relation suivante :

$$E_{\text{ph}} = h \frac{c}{\lambda_0} \quad (\text{I.1})$$

Avec :

- h : Constante de Planck.
- c : Vitesse de la lumière (m/s).
- λ_0 : Longueur d'onde (m).

D'après l'équation (I.1), l'énergie transportée par un photon est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde, c'est-à-dire plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande.

Nous utilisons la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise [6]. L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de $1350\text{W}/\text{m}^2$ (AM0) dans l'espace hors atmosphère terrestre (Voir Figure. I.5).

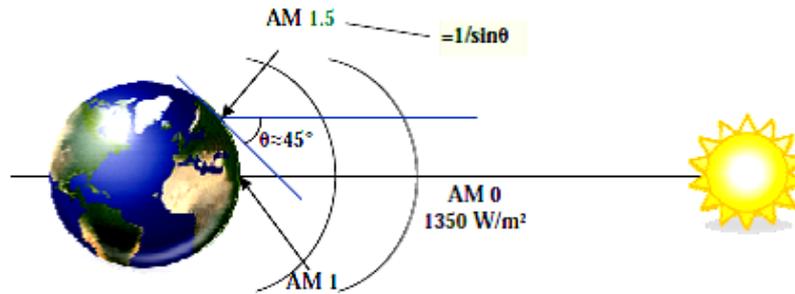


Figure (I.5) : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM. [6]

Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux provenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé. Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90° d'inclinaison) atteint 1000 W/m^2 du fait de l'absorption dans l'atmosphère (AM1). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration θ est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser sera grande, d'où une perte d'énergie conséquente.

Par exemple, l'énergie directe transportée par le rayonnement solaire atteignant le sol avec un angle de 48° avoisine les 833 W/m^2 (AM1.5). Pour connaître le rayonnement global reçu au sol, il faut ajouter à ce dernier le rayonnement diffus. Le rayonnement diffus concerne tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global notée AM1.5 avec une puissance de 1000 W/m^2 , la Figure (I.6) correspondant à nos latitudes.

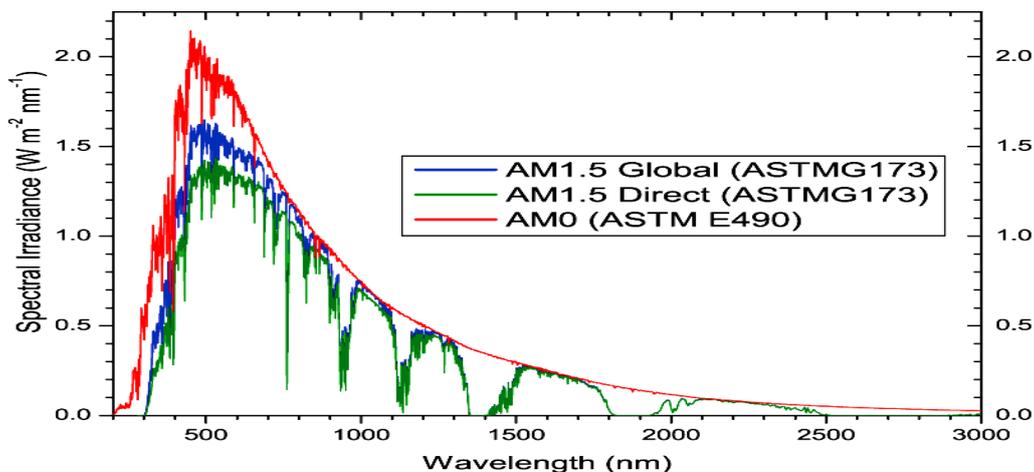


Figure (I.6): Spectres solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM
Source NREL Solar Spectrum

I.4.1 Principe de conversion photovoltaïque [7]

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p.

Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction PN a été formée.

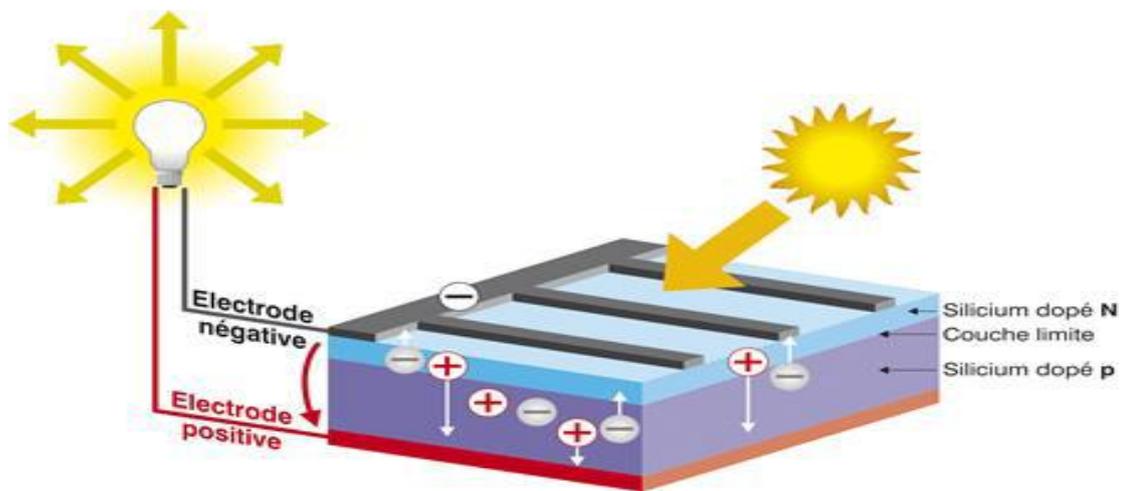


Figure (I.7) : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [8]

I.4.2 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [9]

La cellule photovoltaïque est représentée comme un générateur de courant qui a une résistance montée en série et une résistance shunte montée en parallèle par rapport à une diode. Elle peut être modélisée sous la forme d'un schéma électrique équivalent suivant :

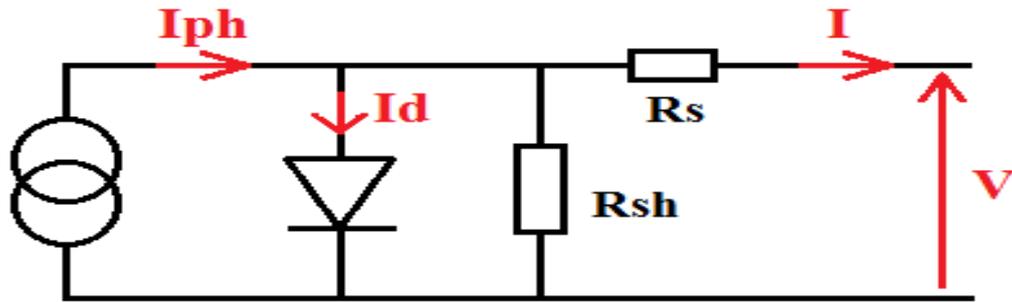


Figure (I.8): Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

La diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité. Le générateur de courant modélise le courant I_{ph} généré par l'éclairement, les deux résistances modélisent les pertes internes :

- Résistance série R_s : modélise les pertes ohmiques du matériau (chutes de tension).
- Résistance shunt R_{sh} : modélise les courants parasites qui traversent la cellule (courant de fuite).

I.4.3 caractéristique d'une cellule photovoltaïque [10]

La cellule étant chargée par une résistance, lorsque l'on éclaire la jonction PN, on observe l'apparition d'un courant inverse I sous une tension en sens direct V . La jonction fonctionne en photopile, c'est l'effet photovoltaïque.

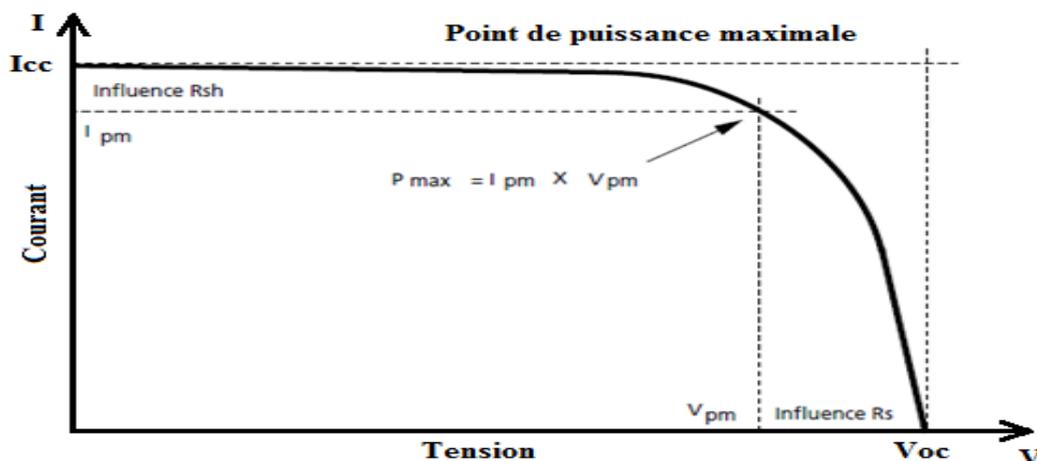


Figure (I.9): Influence des résistances shunt et série sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque

I.4.4 Association série et parallèle des cellules photovoltaïques

✓ Mise en série

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

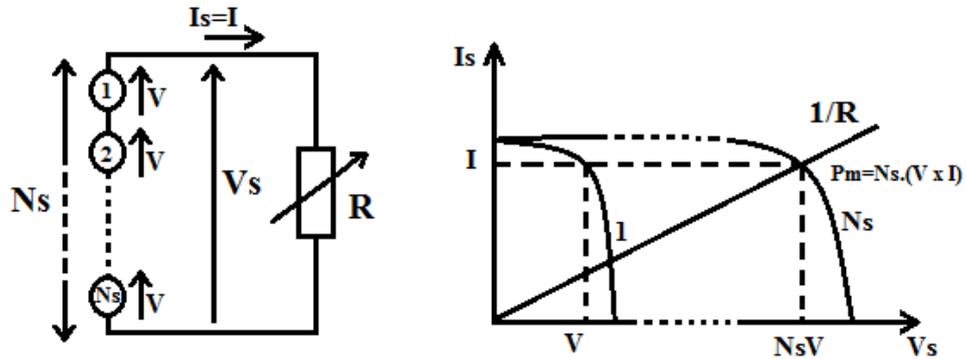


Figure (I.10): Association de cellules identiques en série

✓ Mise en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition des Courants à tension donnée.

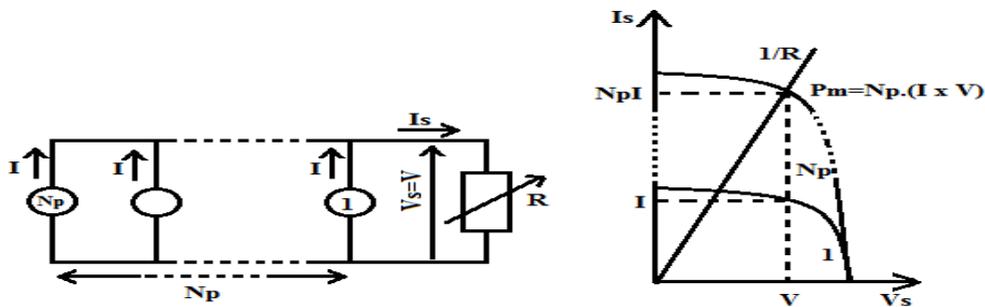


Figure (I.11) : Association de cellules identiques en parallèle

✓ Mise en série et parallèle (mixte)

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est-à-dire Série-Parallèle.

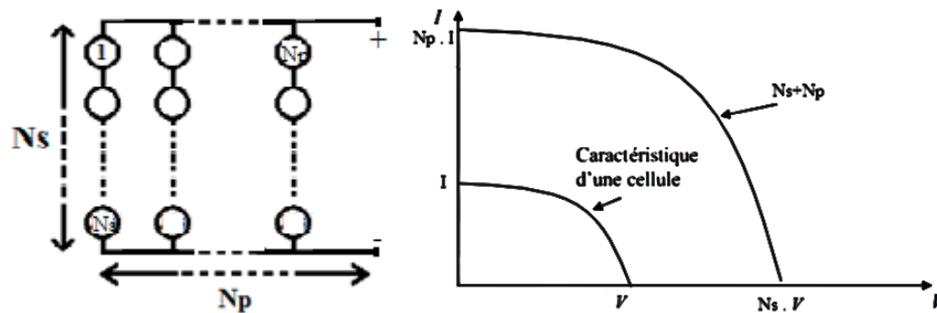


Figure (I.12) : Mise en série-parallel des cellules photovoltaïques

I.4.5 Modèle de générateur photovoltaïque [11]

Une association série-parallel de plusieurs cellules donne un module et une association série-parallel de plusieurs modules permet de réaliser un champ photovoltaïque.

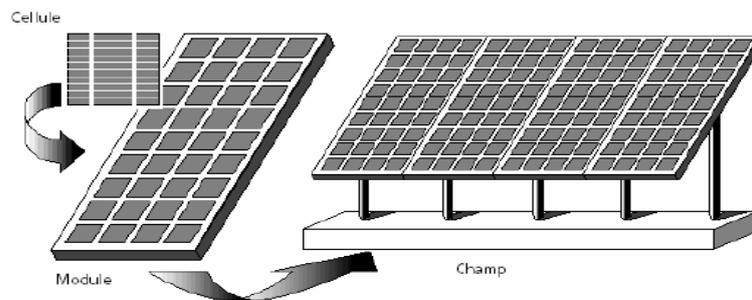


Figure (I.13) : Présentation d'une cellule, d'un panneau et d'un champ photovoltaïque

I.4.6 Nécessité de fonctionnement optimal du générateur [12]

La génération d'énergie photovoltaïque prend l'importance accrue comme source renouvelable due aux avantages tels que l'absence du coût du carburant, minimum d'entretien et l'absence des pièces mobiles. Cependant deux facteurs importants limitent l'implantation des systèmes photovoltaïques (le coût et le faible rendement de conversion d'énergie). En raison du coût élevé des cellules solaires, il est nécessaire de faire fonctionner le générateur photovoltaïque au point de puissance maximum (MPP).

Etant donné que le générateur photovoltaïque est une source d'énergie non linéaire, la puissance de sortie dépend de la tension de charge et des conditions atmosphériques, qui sont imprévisibles. Afin d'optimiser le rapport entre la puissance de sortie et le coût d'installation, les systèmes photovoltaïques sont censés d'utiliser le maximum de puissance du générateur photovoltaïque et d'une manière continue, indépendamment des conditions atmosphériques ou de la tension de charge. Les suiveurs de point de puissance maximale des systèmes font fonctionner le générateur photovoltaïque de sorte que la puissance maximale puisse être obtenue.

La recherche du point de puissance maximale est le travail essentiel dans l'optimisation des systèmes photovoltaïques car il y a un problème d'adaptation entre les caractéristiques de charge et le point de puissance maximale du générateur photovoltaïque. L'optimisation traite les paramètres électriques de fonctionnement du générateur solaire.

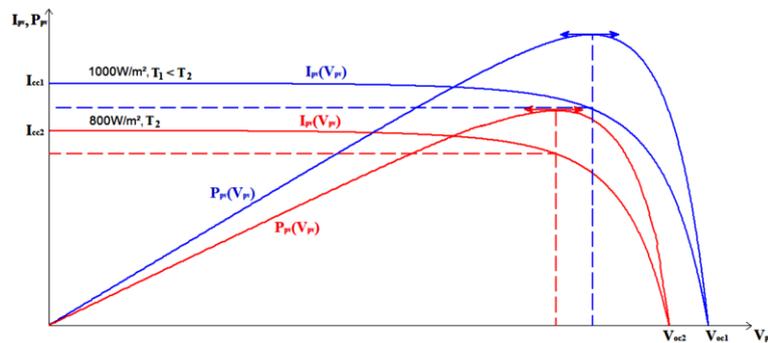


Figure (I.14) : Caractéristiques électriques et courbes de puissance d'un module photovoltaïque

I.4.7 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire [13], [14]

Tout système de production d'énergie à ses avantages et ses inconvénients :

a) Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

- ✓ Une haute fiabilité, elle ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées ;
- ✓ Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers ;
- ✓ Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé ;
- ✓ Sur le plan écologique, la technologie photovoltaïque présente des qualités car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions ;
- ✓ Aucun bruit ;
- ✓ Flexible à l'extension du système et facile.

b) Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients.

- ✓ La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé ;
- ✓ Le rendement de conversion d'un module photovoltaïque est faible ;
- ✓ Tributaire des conditions météorologiques ;
- ✓ Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru, la fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulation associés soient judicieusement choisis.

I.5 Energie éolienne

I.5.1 Définition de l'énergie éolienne

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elles sont généralement utilisées pour produire l'électricité.

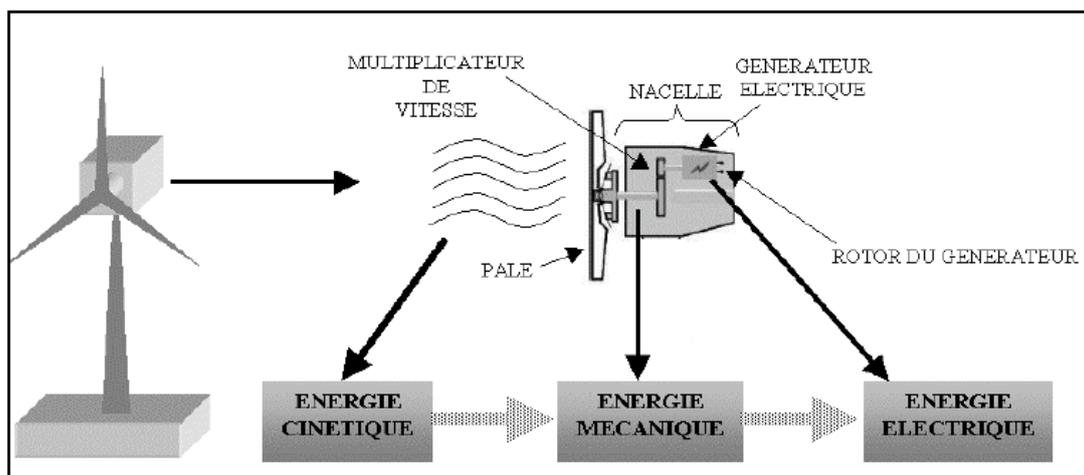


Figure (I.15): Conversion de l'énergie cinétique du vent [15]

I.5.2 Les différents types d'éoliennes [16]

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal :

a) Les éoliennes à axe horizontal

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait de :

- ✓ Leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent ;

- ✓ Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multiples pour le pompage de l'eau ;
- ✓ Elles ont un rendement élevé ;
- ✓ Les éoliennes à axe horizontal (ou à hélice) sont de conception simple.

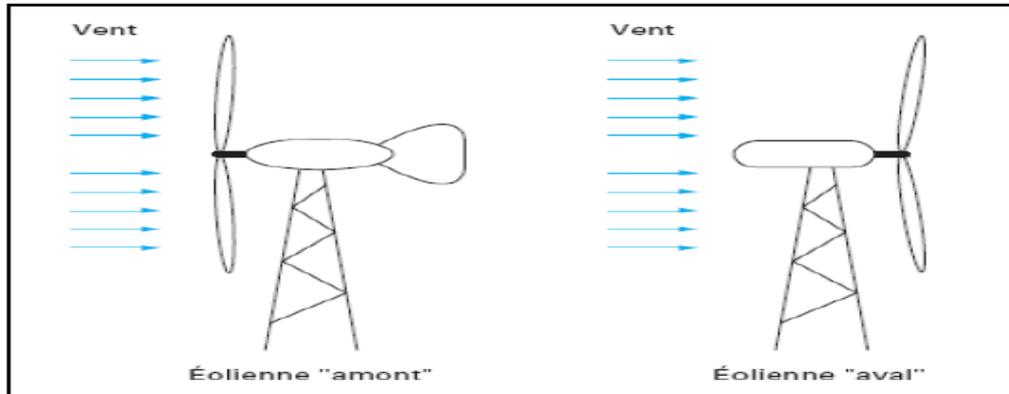


Figure (I.16): Configuration à axe horizontal [16]

b) Les éoliennes à axe vertical

Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, et sont les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc elles sont facilement accessibles.

Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation.

Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables : Savonius et Darrieus.

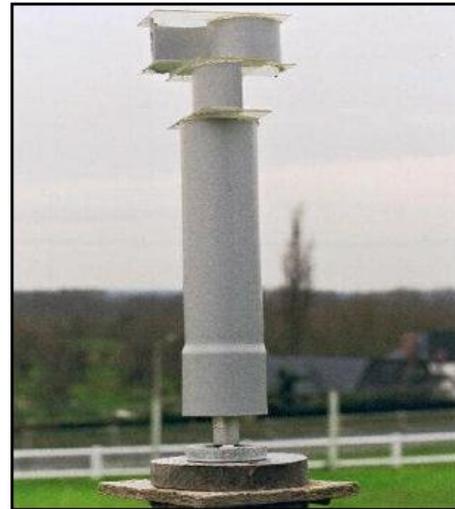
- ❖ L'éolienne Savonius comporte principalement deux demi cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Comme les machines à aubes, elle utilise essentiellement la traînée pour tourner. Cette machine présente deux avantages :
 - Elle est simple à fabriquer ;
 - Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s.
- ❖ L'éolienne inventée par le Français Darrieus est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs.

Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée.

Toutefois, cela devrait pouvoir être résolu si des efforts supplémentaires étaient faits dans la recherche sur ce sujet.



Éolienne de type Darrieus.



Éolienne de type Savonius.

Figure (I.17): Eolienne de type Darrieus et Savonius [16]

I.5.3 Principe de fonctionnement [17]

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- ❖ Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.
- ❖ Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

I.5.4 Eléments constitutifs d'un aérogénérateur (à axe horizontal)

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou utilisée par des charges isolées.

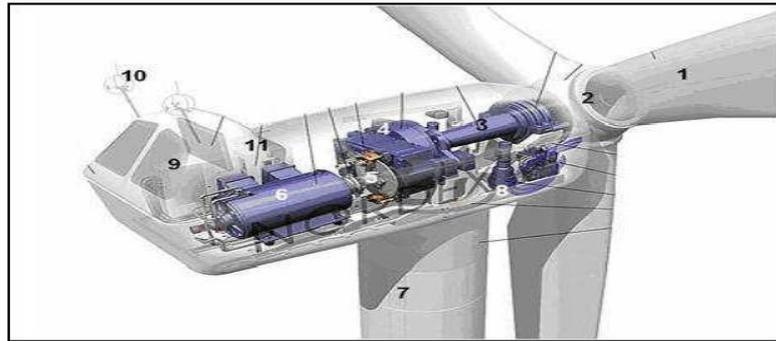


Figure (I.18) : Les Composante De L'aérogénérateur [18]

1. **Les pales** : sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor
2. **Le moyeu** : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
3. **L'arbre primaire** : (ou arbre lent) : relie les pales au multiplicateur.
4. **Le multiplicateur** : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
5. **L'arbre secondaire** : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
6. **Le générateur électrique** : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
7. **Le mât** : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mat a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales.
8. **Le système d'orientation de la nacelle** : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
9. **Le système de refroidissement** : il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.
10. **Les outils de mesure du vent** : girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.
11. **Le système de contrôle électronique** : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.
12. Au pied du mât se trouve un transformateur.

I.5.5 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne : [19]

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale P_n à partir d'une vitesse de vent nominale V_n . Pour des vitesses de vents supérieures à V_n , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs

dimensionnantes : V_d la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et V_M la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement

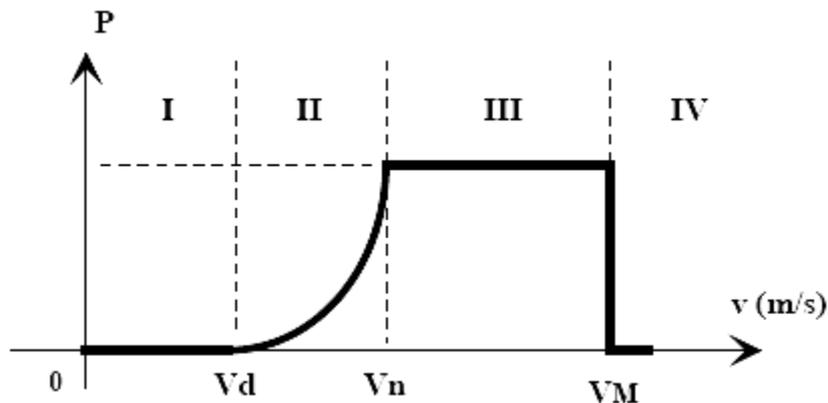


Figure (1.19) : Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.

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

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

I.5.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne [20]

❖ Avantages

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- ✓ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées.
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie propre.
- ✓ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace. L'énergie éolienne possède d'autre part des atouts économiques certains.
- ✓ C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont minimales.

❖ Inconvénients

- ✓ La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour le raccordement au réseau.
- ✓ Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classiques surtout sur les sites moins ventés.
- ✓ Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe.

I.6 Les différents types de machines et moteurs électriques utilisés

Dans le pompage, on peut retrouver les moteurs à courant continu, les moteurs asynchrones et les moteurs synchrones.

I.6.1 Moteur à courant continu [21]

Ces moteurs sont alimentés par des tensions continues. Ils présentent l'avantage d'être très facilement commandés en régime de vitesse variable et se rencontrent dans la plupart des servomoteurs utilisés pour des fonctionnements de faible puissance (inférieure à 5 kW).

Les moteurs à courant continu comportent un induit et un inducteur. Si l'induit est généralement constitué de bobinages en cuivre, l'inducteur peut être réalisé soit avec des bobinages en cuivre, soit avec des aimants permanents.

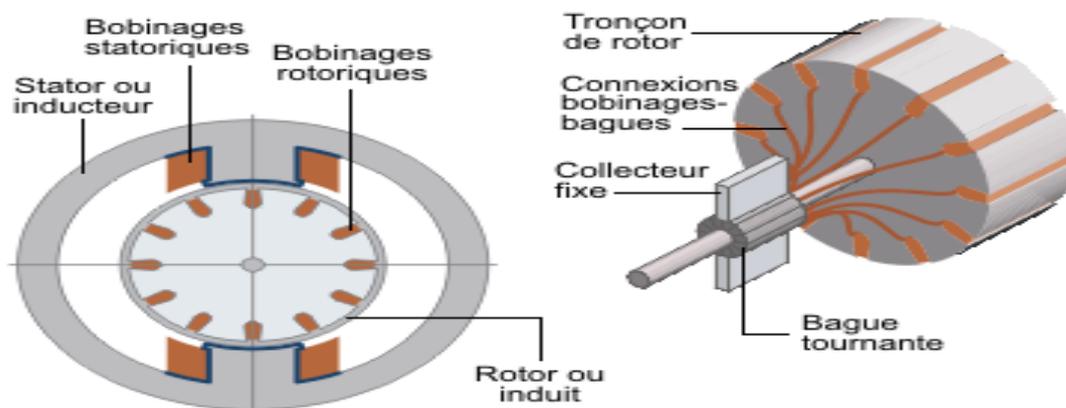


Figure (I.20) : Moteur à courant continu. [22]

I.6.2 Moteur à courant alternatif [23]

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 trois types :

- ✓ Les moteurs universels
- ✓ Les moteurs asynchrones
- ✓ Les moteurs synchrones

Ces deux dernières machines ne diffèrent que par leur rotor.

❖ **Les moteurs universels [23]**

Un moteur universel est un moteur électrique fonctionnant sur le même principe qu'une machine à courant continu à excitation série : le rotor est connecté en série avec l'enroulement inducteur. Le couple de cette machine indépendant du sens de circulation du courant est proportionnel au carré de son intensité. Il peut donc être alimenté indifféremment en courant continu ou en courant alternatif, d'où son nom. Pour limiter les courants de Foucault qui apparaissent systématiquement dans toutes les zones métalliques massives soumises à des champs magnétiques alternatifs, son stator et son rotor sont feuilletés.

Dans la pratique, ces moteurs ont un mauvais rendement, mais un coût de fabrication très réduit. Leur couple est faible, mais leur vitesse de rotation est importante. Quand ils sont utilisés dans des dispositifs exigeant un couple important, ils sont associés à un réducteur mécanique.

❖ **Les machines synchrones [23]**

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. Ce type de machine peut être utilisé pour relever le facteur de puissance d'une installation.



Figure (I.21): Machine synchrone [24]

❖ Les machines asynchrones [23]

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.

La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. On la retrouve aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires), de l'industrie (machines-outils), dans l'électroménager. Elles étaient à l'origine uniquement utilisées en moteur mais, toujours grâce à l'électronique de puissance, elles sont de plus en plus souvent utilisées en génératrice. C'est par exemple le cas dans les éoliennes.



Figure (I.22): Machine asynchrone. [23]

Toutefois les machines asynchrones sont les plus utilisées devant les machines synchrones pour une application pompage, grâce aux avantages suivants [23] :

- ✓ Sa disponibilité dans le marché avec un coût bas.
- ✓ Son entretien qui est nul de fait de l'absence complète de pièces en frottement.
- ✓ Son utilisation augmente l'autonomie et la fiabilité de l'installation.
- ✓ Disponible pour une large plage de charge.
- ✓ Le rapport puissance / poids est élevé.

I.7 Différents types de convertisseurs [25]

I.7.1 Convertisseurs DC /DC (hacheurs)

Un hacheur permet d'obtenir une tension unidirectionnelle de valeur moyenne réglable à partir d'une source de tension continue. Avec un interrupteur peut être un thyristor ou un transistor. C'est un convertisseur continu-continu.

Il existe deux types à savoir :

➤ **Hacheur survolteur**

Ce type sert à produire une tension plus élevée que celle fournie par les panneaux ou les batteries de stockage.

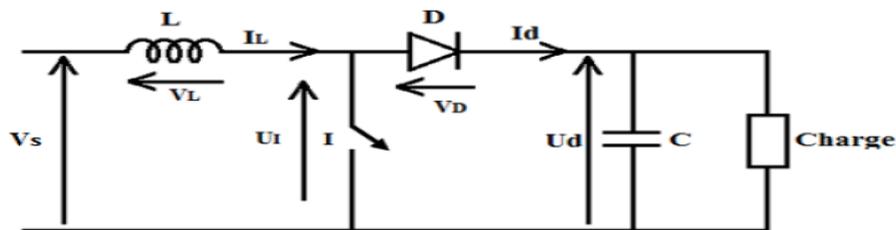


Figure (I.23): Convertisseur DC/DC (Elévateur de tension).

➤ **Hacheur dévolteur**

Ce type sert à produire une tension plus basse que celle fournie par les panneaux ou les batteries.

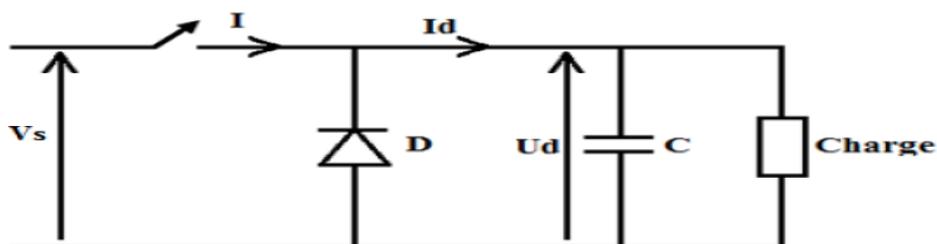


Figure (I.24): Convertisseur DC/DC (Abaisseur de tension).

I.7.2 Le convertisseur continu- alternatif (onduleur)

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de délivrer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique continue.

C'est la fonction inverse d'un redresseur. L'onduleur est un convertisseur de type continu/alternatif.

- Onduleur autonome délivre une tension avec une fréquence soit fixe, soit ajustable par l'utilisateur. Il n'a pas besoin de réseau électrique pour fonctionner.
- Onduleur non autonome est un montage redresseur tout thyristors (pont de GRAËTZ) qui, en commutation naturelle est assistée par le réseau auquel il est raccordé.

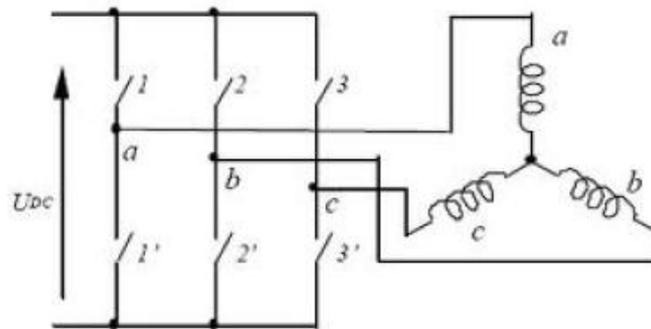


Figure (I.25) : Schéma de l'onduleur.

I.8 Sous-système de pompage (Groupe motopompe) [26]

Dans le système qu'on va étudier, on utilise un groupe motopompe qui est constitué d'un moteur asynchrone et d'une pompe centrifuge avec un débit et une hauteur bien déterminée.

I.8.1 Types de pompes utilisées

Une pompe est une machine capable de transformer une énergie mécanique en énergie Hydraulique. Il y'a plusieurs types disponibles pour les systèmes de pompage. On distingue principalement deux types de pompes : les pompes centrifuges et les pompes volumétriques.

I.8.1.1 Les pompes centrifuges

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 :

- ✓ Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage, la pompe tourne même par très faible 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.

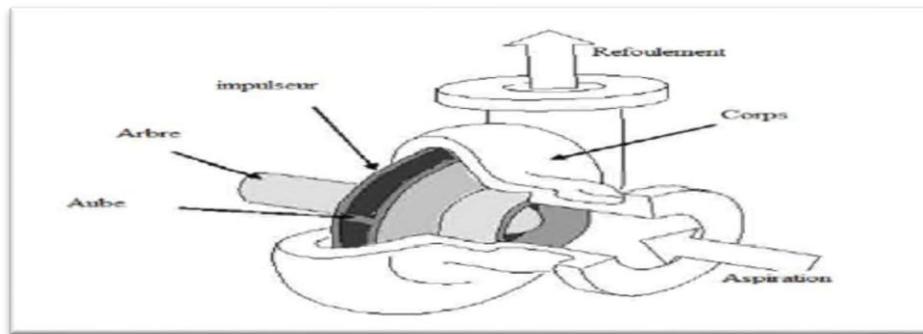


Figure (I.26): Pompe centrifuge.

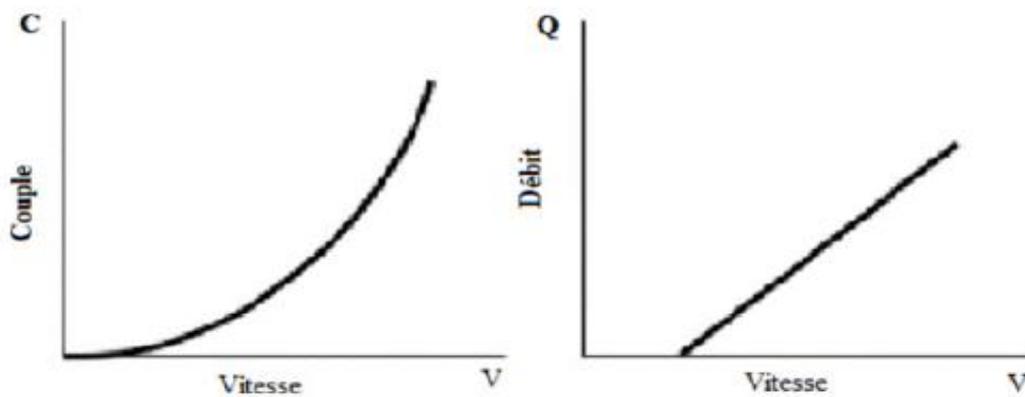


Figure (I.27) : Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge.

I.8.1.2 Les pompes volumétriques

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 $5 \text{ m}^3/\text{h}$) 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 pallier 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 [26].



Figure (I.28): Pompe volumétrique.

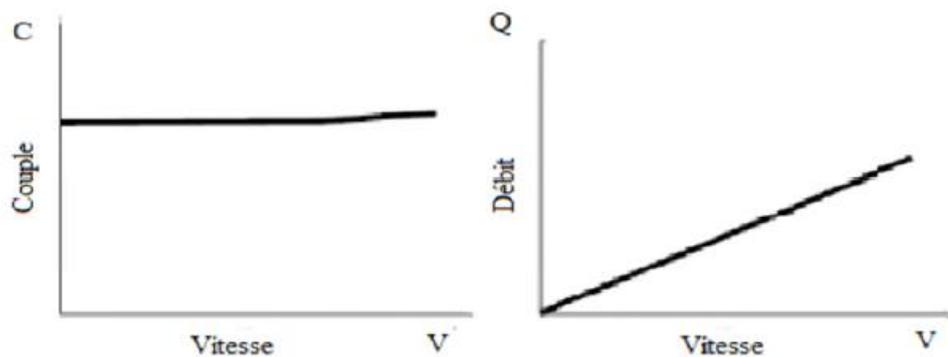


Figure (I.29): Caractéristiques d'une pompe volumétrique.

I.9 Le stockage [27]

L'énergie solaire est continuellement variable en fonction de l'ensoleillement au cours d'une journée. Ainsi, il faut un stockage tampon afin de pouvoir utiliser l'énergie délivrée par le générateur le moment souhaité.

Le stockage en pompage photovoltaïque et éolienne peut être réalisé de deux façons : stockage d'énergie électrique dans les accumulateurs ou stockage d'eau dans des réservoirs.

I.9.1 Stockage de l'eau

La tendance actuelle dans le monde est de stocker de l'eau dans des réservoirs. Cette méthode est pratique et peu coûteuse par rapport au stockage électrochimique dans les batteries. En effet, les batteries ont une durée de vie limitée et elles nécessitent des entretiens périodiques et ainsi, le réservoir d'eau peut être dimensionné en fonction de la durée d'autonomie souhaitée.

I.9.2 Stockage électrochimique

Dans certains systèmes de pompage photovoltaïque, l'utilisation des batteries de stockage électrochimique est indispensable pour leurs fonctionnements. Généralement, ces systèmes de pompage nécessitent des tensions de fonctionnement faibles (12VDC, 24VDC, etc.). Egalement, le stockage électrochimique est utilisé pour permettre au système de pompage de fournir de l'eau avec une certaine pression constante impossible de l'assurer avec la méthode gravitationnelle du réservoir d'eau.

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur le système multi-sources avec stockage destiné au pompage, qui se compose de deux chaînes de conversion d'énergie renouvelable, éolienne et photovoltaïque. Nous avons également présenté les caractéristiques du fonctionnement des éléments constitutifs de chaque chaîne.

Pour maximiser l'utilisation des sources renouvelables, plusieurs méthodes sont utilisées afin d'avoir un meilleur rendement, nous en avons cité quelques-unes avec leurs importances dans la chaîne de conversion d'énergie.

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons tout d'abord la modélisation de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque afin d'obtenir les différentes caractéristiques du courant de la puissance en fonction de la tension, ainsi que l'influence des paramètres sur le fonctionnement du système photovoltaïque. Puis s'en suivra la chaîne de conversion d'énergie éolienne en tenant compte du modèle de la machine qui convertie l'énergie cinétique du vent en énergie électrique ainsi que le convertisseur statique qui a pour rôle d'adapter l'énergie d'entrée à la charge en sortie. Cette modélisation est nécessaire afin de valider notre étude théorique de la chaîne de conversion d'énergie multi-sources (photovoltaïque-éolienne-batterie) à cause de nécessité de la simulation du processus (*Matlab Simulink*).

II.2 Modélisation d'un système pompage multi-sources

Le système à modéliser est représenté sur la figure (II.1)

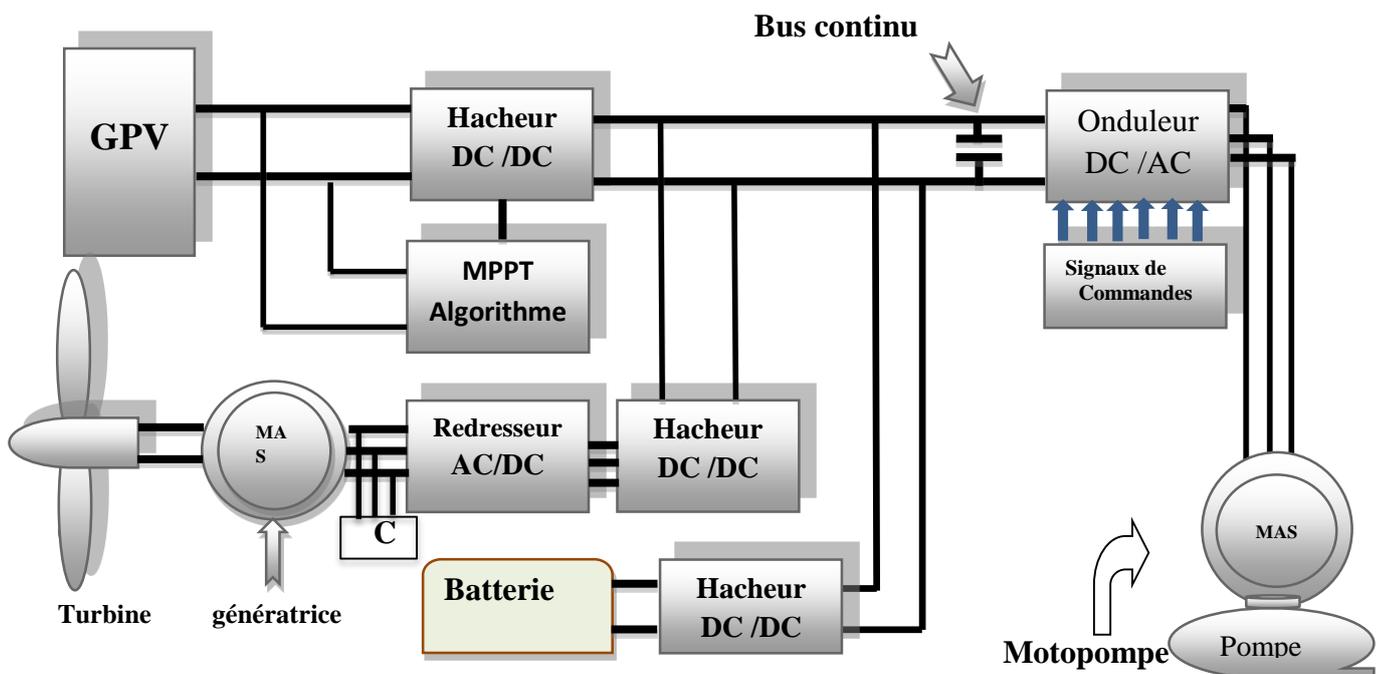
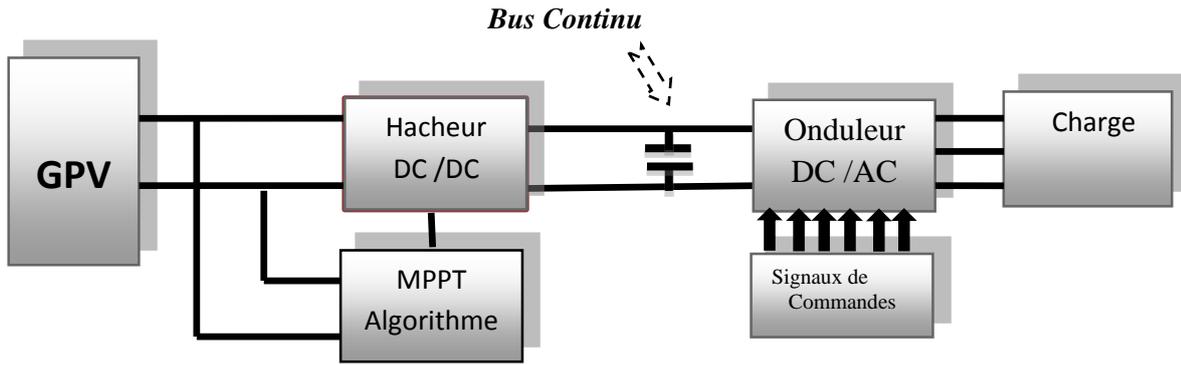


Figure (II.1) : Schéma simplifié du système de pompage multi-sources (photovoltaïque, éolienne)

II.3 Modélisation de la chaîne photovoltaïque

La chaîne de conversion photovoltaïque est constituée d'un générateur photovoltaïque qui est fonction de l'ensoleillement (E_s [W/m^2]) et de la température (T [$^{\circ}C$]) associé à des convertisseurs DC/DC (hacheur). Le système à étudier est représenté en figure(II.2) :



Figure(II.2) : Structure de la chaîne de conversion photovoltaïque

II.3.1 Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV) [28][29]

Une fois qu'on a estimé l'irradiation solaire journalière du site d'installation et déterminé la consommation journalière moyenne, il faudra dimensionner correctement le générateur photovoltaïque (GPV), qui nécessite l'identification du comportement d'un module photovoltaïque dans les conditions réelles du site d'installation.

Dans cette modélisation, nous avons utilisé le modèle à cinq paramètres, qui permet d'effectuer une analyse et une évaluation des performances d'un module, les plus proches de la réalité.

Ce modèle représente le module solaire comme source de courant en parallèle avec une diode, une résistance montée en série représente la résistance des contacts, une autre en parallèle dite la résistance shunt, représentant les courants de fuites.

Le schéma équivalent du modèle est le suivant :

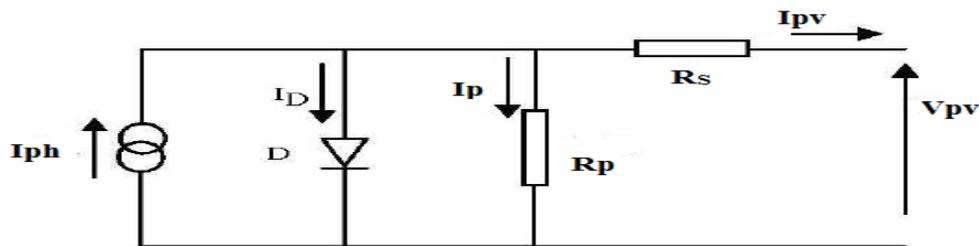


Figure (II. 3): Circuit équivalent du GPV

Dans notre travail, nous avons utilisé le modèle mathématique du module solaire à une diode.

Alors le courant généré par le générateur photovoltaïque est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{Rp} \tag{II-1}$$

Avec :

- I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque.
- I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident).
- I_D : Le courant circulant dans la diode.

Photo courant créé par la cellule est donné par :

$$I_{ph} = P_1 E_s (1 + (E_s + E_{sref})) + P_3 (T_j - T_{jref}) \quad (II-2)$$

Avec:

- E_{sref} , T_{jref} : l'éclairement et la température sous conditions STC.
- T_j : température de Junction.
- P_1 , P_2 , P_3 : paramètres constants.

La température de jonction T_j est donnée par la relation suivante :

$$T_j = T_a + E_s \left[\frac{N_{oct} - 20}{800} \right] \quad (II-3)$$

Avec:

- N_{Oct} : la température nominale de fonctionnement de la cellule ou du module solaire.
- T_a : la température ambiante.

Le courant circulant dans la diode est donné par la relation suivante :

$$I_D = I_{0d} \left[\exp * \left(\frac{q(V_{pv} + (R_s * I_{pv}))}{K.A.N_s.T_j} \right) - 1 \right] \quad (II-4)$$

Avec:

- I_{0d} : courant de saturation de la tension (A).
- q : charge élémentaire ($1.6.10^{-19}C$).
- K : constante de Boltzmann ($1.38.10^{-23}$ (SI)).
- A : coefficient d'idéalité de cellule.
- N_s : nombre total de cellules connectées en séries et/ou en parallèles.
- R_s : résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules

$$I_{0d} = P_4 T_j \exp \left[\frac{E_g}{kT_j} \right] \quad (II-5)$$

Avec:

- E_g : énergie de gap ($1.76.10^{-19}$).
- P_4 : paramètres constants.

$$I_{sh} = \frac{V_{pv}}{R_p} \quad (II-6)$$

Avec :

- V_{pv} : La tension de sortie du GPV.
- R_p : Résistance shunt représentant les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de cellule.

Ainsi l'équation globale modélisant le générateur photovoltaïque est la suivante :

$$I_{pv} = P_1 E_s \left(1 + (E_s - E_{sref}) + P_3 (T_j - T_{jref}) \right) - P_4 T_j^3 \exp \left[\frac{E_g}{kT_j} \right] * \left[\exp \left(\frac{qV_{pv} + (R_s I_{pv})}{K A N_s T_j} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_p} \quad (II-7)$$

L'identification des paramètres P_1, P_2, P_3, P_4 se fait à partir des mesures expérimentales et des paramètres standards (STC) $E_s=1000w/m^2, T_a=25^\circ C$.

P_1	P_2	P_3	P_4	R_s	R_p	A	N_s
0.005	$7.27 * 10^{-5}$	$-1.1369 * 10^{-5}$	38.0914	0.6 Ω	150 Ω	1	72

Tableau (II. 1): Paramètres obtenus du modèle à une diode du panneau PV SM110 [28]

Pour notre étude, nous pouvons déterminer les paramètres du modèle à partir des données du constructeur ($V_{co}, I_{cc}, V_{mpp}, I_{mpp}$). Une fois que les paramètres ($V_{co}, I_{cc}, V_{mpp}, I_{mpp}, R_s$), sont déterminés, la caractéristique I -V est calculée par des méthodes numériques.

Dans notre étude entretenue, le rendement de la conversion photovoltaïque est un paramètre sensible à la variation de la température et du rayonnement. Le rendement moyen est donné par la relation suivante [28]

$$\eta_m = \eta_0 [1 - \alpha (T_j - T_{jref})] \quad (II-8)$$

Avec :

- η_m : Rendement du module photovoltaïque.
- η_0 : Rendement du générateur PV.
- α : Coefficient de température.

Il est noté que l'équation (II.7) est applicable que pour un niveau d'insolation E et de température particuliers, relatif aux conditions standard de fonctionnement. Quand l'insolation et la température varient, le courant I_{pv} et la tension V_{pv} changent suivant les équations suivantes :

$$\Delta T_j = T_j - T_{jref} \quad (II-9)$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{cc} \left(\frac{E}{E_{sref}} \right) \Delta T_j + \left(\frac{E_s}{E_{sref}} - 1 \right) I_{cc,ref} \quad (II-10)$$

$$\Delta V_{pv} = -\beta_{oc}\Delta T_j - R_s\Delta I_{pv} \tag{II-11}$$

Avec :

- ΔT_j : représente la variation de la température.
- ΔI_{pv} : représente la variation du courant par rapport à l'insolation et à la température.
- ΔV_{pv} : représente la variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température.
- α_{cc} : représente un coefficient de la température, d'incrément de courant I_{cc} quand la température de la surface augmente de degré Celsius ($A/^\circ C$) (sous les conditions standards de fonctionnement).
- β_{oc} : représente un coefficient de la température, d'incrément de tension V_{oc} quand la température de la surface augmente de degré Celsius ($V/^\circ C$) (sous les conditions standards de fonctionnement).

α_{cc} et β_{oc} sont appelés coefficients de la température.

Les nouvelles valeurs de la tension et du courant photovoltaïque sont données par :

$$V_{pv,nouv} = V_{pv} + \Delta V_{pv} \tag{II-12}$$

$$I_{pv,nouv} = I_{pv} + \Delta I_{pv} \tag{II-13}$$

Pour résoudre l'équation (II.7) on utilise le block 'Algébriques Contraint' qui est intégré dans la bibliothèque 'Simulink/Math Opération'.

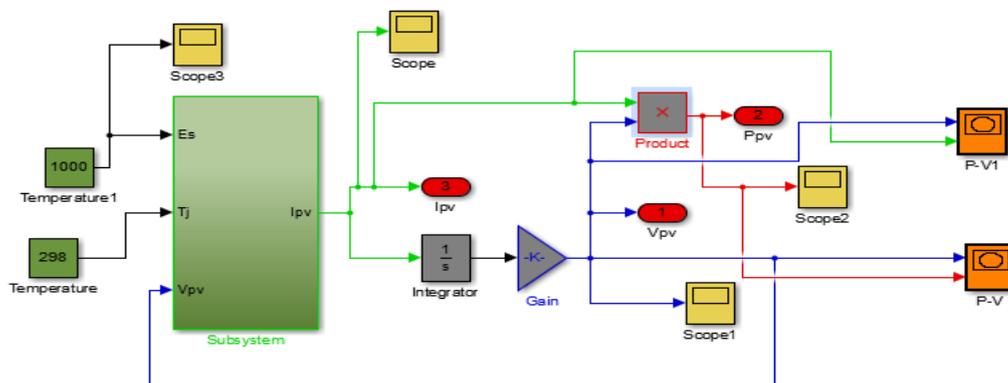


Figure (II.4): Bloc de la simulation du panneau photovoltaïque

Les paramètres de simulation sont donnés dans le tableau (II.1) et les autres paramètres sont reportés en détails:

Symboles	Paramètres	valeurs
P_{PV}	Puissance Photovoltaïque (W)	110W
I_{mpp}	Courant maximum au PPM (A)	3.15A
V_{mpp}	Tension maximale au PPM (V)	35V
I_{cc}	Courant de court-circuit (A)	3.45A
V_{co}	Tension de circuit ouvert (V)	43.5V
α_{sc}	Coefficient de température de court-circuit (A/°K)	1.4 mA/°C
β_{oc}	Coefficient de Tension (V/°K)	-152 mA/°C
P_{mpp}	Puissance maximale (W)	110W

Tableau (II.2): Valeurs des paramètres de simulation du panneau photovoltaïque SIEMENS SM 110-24 [28]

La figure (II.5) et la figure (II.6) représente les caractéristiques courant-tension I-V et puissance-tension P-V du module SIEMENS SM 110-24 (110Wc) pour un éclairement et une température donné ($E = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_c = 25^\circ\text{C}$).

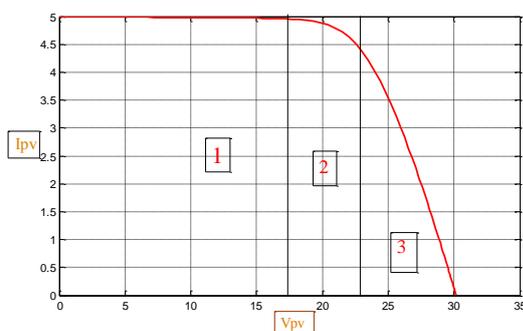


Figure (II.5):Caractéristique I-V d'une Cellule PV. Cellule PV.

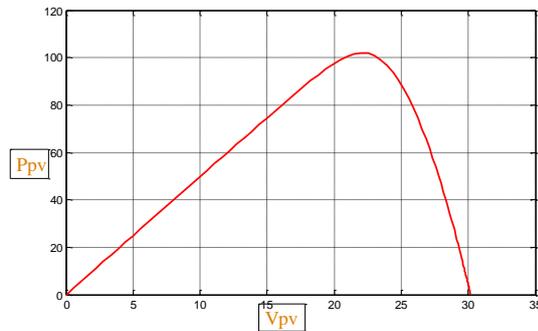


Figure (II.6):Caractéristique P-V d'une

On remarque d'après la caractéristique (I-V) que le module photovoltaïque possède trois zones de fonctionnement qui sont : [29]

- **La zone (1)** : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le module photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- **La zone (2)** : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur assimilable à un générateur de tension.
- **La zone (3)** : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, ou le point optimal (caractérisé par une puissance maximal) peut être déterminé.

II.3.2 Caractéristique d'un module solaire (I-V), (P-V) [30]

II.3.2.1 Influence de l'éclairement

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure (II.7) représente la caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes.

Le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement figure (I.12).

Après simulations pour divers ensoleillement a $T=25^{\circ}\text{C}$, les résultats obtenus sont représentés par les caractéristiques suivantes :

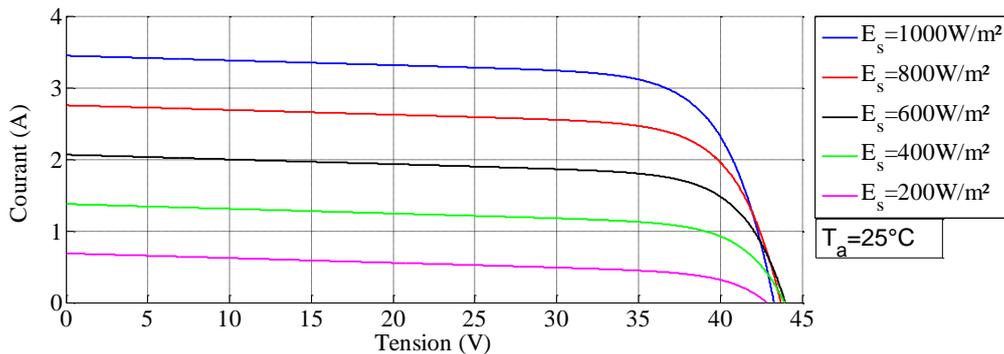


Figure (II.7): Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement V-I

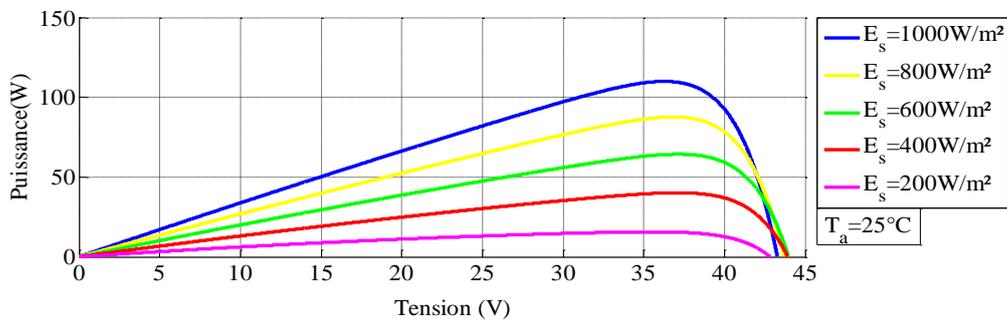


Figure (II.8):Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement V-P.

II.3.1.2 Influence de la température

L'influence de la température est importante et a des conséquences pour la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques.

La température est un paramètre essentiel puisque les cellules sont exposées aux rayonnements solaires, susceptibles de les échauffer. De plus, une partie du rayonnement absorbé n'est pas convertie en énergie électrique il se dissipe sous forme de chaleur ; c'est pourquoi la température de la cellule (T_j) est toujours plus élevée que la température ambiante (T_a).

$$T_j = T_a + E_s \left[\frac{NOct - 20}{800} \right] \tag{II-3}$$

La figure (II.9), montre que la tension d’une cellule baisse fortement avec la température. Plus la température augmente et moins la cellule est performante. En revanche, le courant augmente légèrement en intensité : cette augmentation reste néanmoins négligeable au point de puissance maximale. [20]

Après simulations pour divers températures à $G=1000W/m^2$, les résultats obtenus sont représentés par les caractéristiques suivantes : [30]

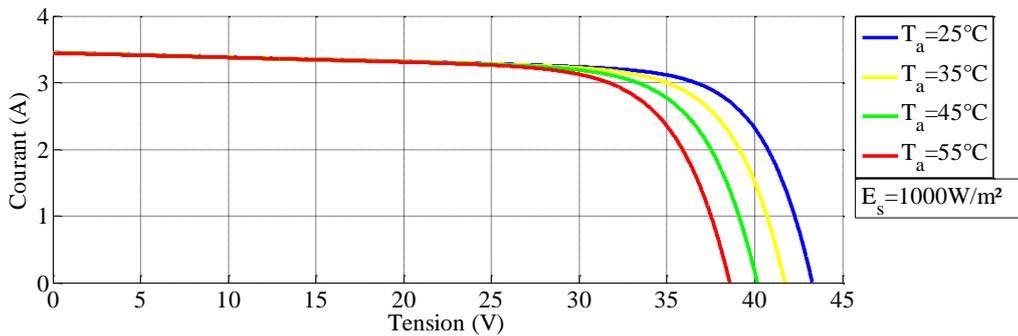


Figure (II.9): Caractéristique courant-tension d’une cellule en fonction de la température V-I.

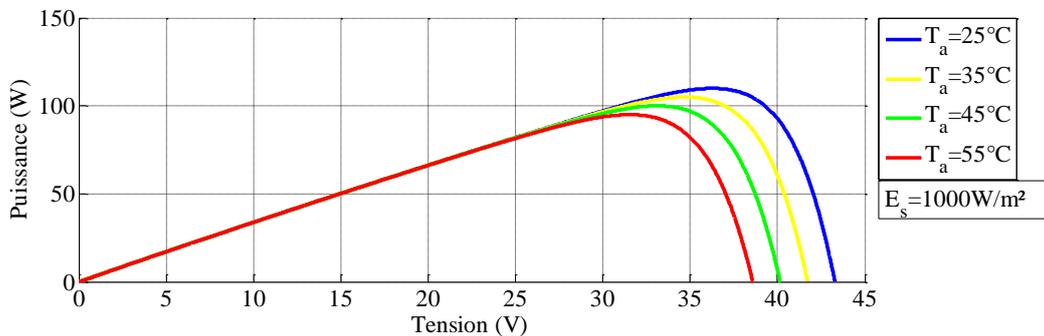


Figure (II.10):Caractéristique puissance-tension d’une cellule en fonction de la température V-P.

II.4 Modélisation de convertisseur DC/DC [28]

❖ *(hacheur survolteur (Boost) ou hacheur parallèle*

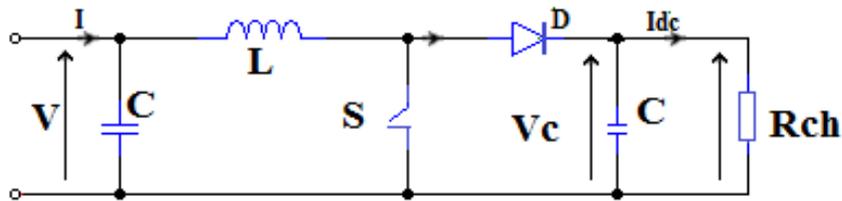


Figure (II.11):Circuit électrique du convertisseur DC-DC.

La modélisation de ce convertisseur basé sur l'analyse des différentes séquences de fonctionnement que nous supposons de durées fixées par la commande S . Nous avons comme résultats deux séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur T , que nous pouvons représenter chacune par une équation différentielle.

➤ **Phase 1 :** Phase d'accumulation d'énergie

Cette phase dure de 0 à $\alpha \cdot T$ (α rapport cyclique, est compris entre 0 et 1).

L'interrupteur est fermé (état passant) il y a donc augmentation du courant dans l'inductance d'où stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode est alors bloquée et la charge est donc déconnectée de l'alimentation.

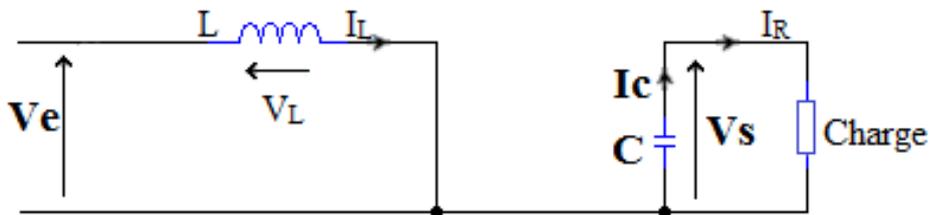


Figure (II.12):Schéma d'un Hacheur survolteur à $t \in [0, \alpha.T]$.

On a :

$$\checkmark \quad \alpha = \frac{T_{on}}{T} \tag{II -14}$$

$$\checkmark \quad I_R + I_C = 0 \tag{II -15}$$

$$\checkmark \quad \frac{dI_L}{dt} = \frac{V_e}{L} \tag{II -16}$$

Le condensateur C supposé initialement chargé, fournit de l'énergie à la charge et un courant I_R circule dans cette dernière.

$$\checkmark \quad V_L = -V_e = L \frac{dI_L}{dt}$$

$$\checkmark \quad V_s = R \cdot I_R$$

➤ **Phase 2** : Phase de roue libre.

Cette phase dure de αT à T lors de la seconde période, on bloque l'interrupteur. La diode devient passante.

L'inductance se trouve en série avec la source. Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D , le condensateur C et la charge R . il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité.

Avec : $I_c = I_R$

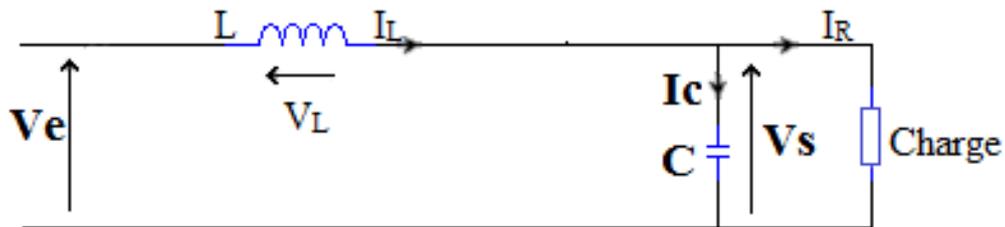


Figure (II.13): Schéma d'un Hacheur survolteur à $t \in [\alpha T, T]$.

$$\begin{cases} V_L = V_e - V_s \\ I_c = I_l - I_R \end{cases} \begin{cases} V_s = \frac{1}{1-\alpha} \cdot V_e \\ I_R = (1-\alpha) \cdot I_l \end{cases} \quad (II-17)$$

❖ **hacheur Buck-Boost**

La topologie de base de ce convertisseur est donnée par la figure (II.14). Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée.

Tandis que, lorsque le transistor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; quand le commutateur tourne sur la position (off) la tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfert vers la charge via la diode.

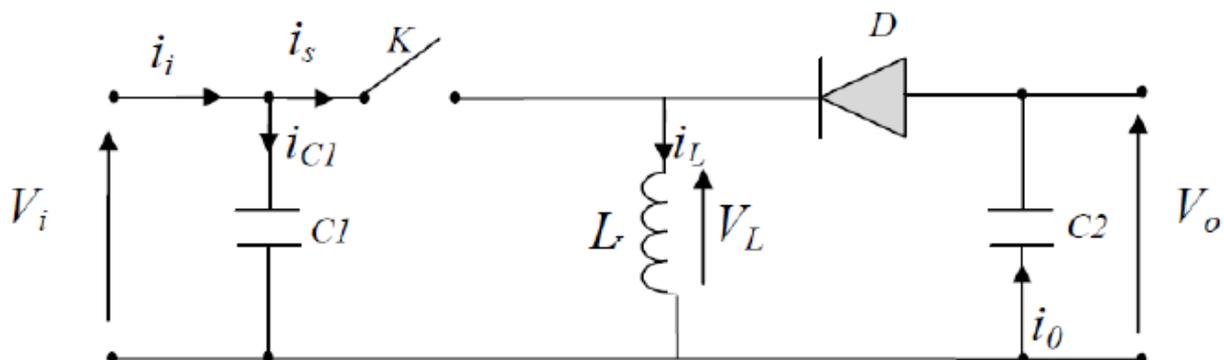


Figure (II.14): Convertisseur dévolteur-survolteur

La figure (II.15) montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur pour les deux cycles de fonctionnements [28]:

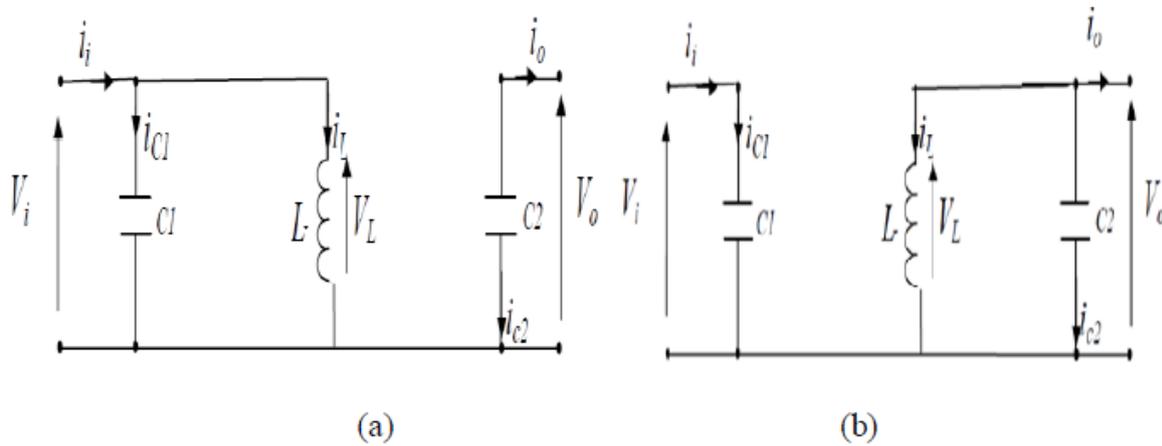


Figure (II.15): Schémas équivalents du hacheur dévolteur-survolteur
(a): K ouvert ; (b):K fermé

En appliquant la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur des deux phases de fonctionnement, on obtient :

Pour la première période dT_s :

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période T_s , on utilise généralement l'expression suivante [28]:

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dt_{DT_s}} + \frac{dx}{dt_{(1-D)T_s}} (1 - D)T_s \quad (\text{II -18})$$

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ v_l(t) = L \frac{di_l}{dx} = -v_i(t) \end{cases} \quad (\text{II -19})$$

Pour la deuxième période $(1-d) T_s$:

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_l(t) - i_o(t) \\ v_l(t) = L \frac{di_l}{dx} = v_o(t) \end{cases} \quad (\text{II -20})$$

En appliquant la relation (II.14) sur les systèmes d'équations (II.15) et (II.16), on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur-survolteur [28]

$$\begin{cases} i_l(t) = \frac{1}{d} \left(i_i(t) - c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \right) \\ i_o(t) = -(1-d)i_l - c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} \\ v_i(t) = \frac{1}{d} \left(-(1-d)v_o + L \frac{di_l(t)}{dt} \right) \end{cases} \quad (\text{II -21})$$

II.5 Modélisation du convertisseur DC/AC (Onduleur) : [31]

La fonction principale de l’onduleur est de transformer le courant produit par les deux sources, en courant alternatif monophasé ou triphasé.

Dans cette études on considère le cas idéal d’un onduleur triphasé à deux niveaux de tension qui est représenté par des interrupteurs parfaits a commutation instantanée. L’onduleur considéré comme une source de tension parfaite présente une impédance interne négligeable.

A partir du schéma de l’onduleur triphasé présenté sur la figure (II.16), nous développerons les différentes équations qui modélisent le fonctionnement de ce dernier :

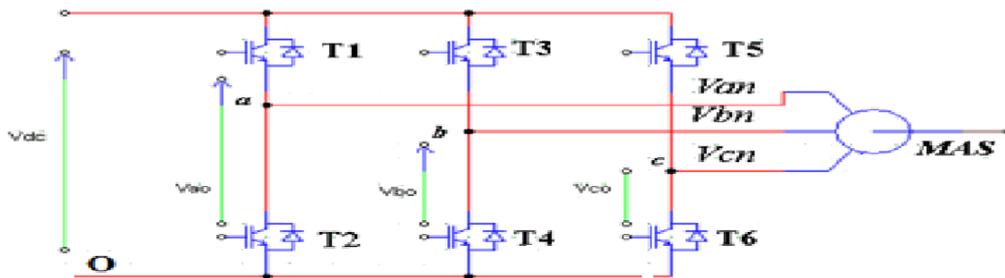


Figure (II.16): Circuit de l’onduleur relié à la machine asynchrone.

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

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

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} \end{cases} \leftrightarrow \begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{ob} \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{oc} \\ V_{ca} = V_{co} - V_{oa} \end{cases} \quad (\text{II -22})$$

V_{ao} , V_{bo} , V_{co} sont les tensions à l’entrée de l’onduleur (continue). Nous avons pris le point (O) comme référence pour ces dernières tensions. Les trois tensions à l’entrée continue sont données par la relation de CHALE comme suit :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (\text{II -23})$$

Avec:

V_{an}, V_{bn}, V_{cn} Sont les tensions de phase de la charge, ou de sortie de l'onduleur V_{no} est la tension du neutre de la charge par rapport au point (O). Dans les hypothèses de travail on a supposé que la charge est équilibrée c.à.d:

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II -24})$$

En remplaçant (b) dans (c) on aura :

$$V_{no} = \frac{1}{3} \cdot (V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{II -25})$$

En remplaçant (d) dans (a) on aura :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3} \cdot (2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3} \cdot (-V_{ao} + 2V_{bo} - V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3} \cdot (-V_{ao} - V_{bo} + 2V_{co}) \end{cases} \quad (\text{II -26})$$

Si on suppose que :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{dc} \cdot S_1 \\ V_{bo} = V_{dc} \cdot S_2 \\ V_{co} = V_{dc} \cdot S_3 \end{cases} \quad (\text{II -27})$$

S_i Est l'état de l'interrupteur T_i : $\begin{cases} T_i = 1 \text{ si } k_i \text{ fermé} \\ T_i = 0 \text{ si } k_i \text{ ouvert} \end{cases}$

A partir de l'équation (e) et (f), on tire la matrice qui assure le passage de la tension continue vers la tension et qui donne le modèle de l'onduleur par les équations matricielles suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II -28})$$

$$I_{dc} = S_a \cdot I_a + S_b \cdot I_b + S_c \cdot I_c \quad (\text{II -29})$$

Avec :

➤ V_a, V_b, V_c : Tension simple.

- V_{dc} : Tension redressée.
- S_a, S_b, S_c : Fonction logique correspondants à l'état de l'interrupteur.

II.6 Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil

Le moteur asynchrone est le moteur électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants. Ainsi, il a une structure simple, robuste et facile à construire.

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 les champs tournants. [31]

II.6.1 Modélisation généralisée

Le moteur est alimenté en tension, les composantes du vecteur de commande de l'équation d'état seront donc des tensions. Les trois phases statoriques sont alimentées par trois tensions alternatives triphasées de pulsation ω set de même amplitude:

II.6.1.1 Équations électriques

En appliquant la loi d'Ohm généralisée à chaque phase (Fig. III-1), les équations de tension des trois phases statoriques et rotoriques s'écrivent pour le stator avec l'indice "s" et le rotor avec l'indice "r" comme suit : [32]

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d[\varnothing_s]}{dx} \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d[\varnothing_r]}{dx} \end{cases} \quad (\text{II -30})$$

Avec :

- $[V_s] = [V_a V_b V_c]^T$: Vecteur tensions statoriques.
- $[I_s] = [I_a I_b I_c]^T$: Vecteur courants statoriques.
- $[V_r] = [V_A V_B V_C]^T$: Vecteur tensions rotorique.
- $[I_r] = [I_A I_B I_C]^T$: Vecteur courants rotorique.
- $[\varnothing_s] = [\varnothing_a \varnothing_b \varnothing_c]^T$: Vecteur flux statorique.
- $[\varnothing_r] = [\varnothing_A \varnothing_B \varnothing_C]^T$: Vecteur flux rotorique.

Avec :

$$[R_S] = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

- $[R_S], [R_r]$: matrice des flux statoriques et rotoriques.

II.6.1.2 Équations magnétiques

Les hypothèses que nous avons présentées précédemment, conduisant à une matrice des inductances, qui établit les relations linéaires entre les flux et les courants : [31], [33], [34]

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_{SS}] \cdot [I_s] + [M_{sr}\theta][I_r] \\ [\Phi_r] = [M_{rs}\theta] \cdot [I_s] + [L_{rr}][I_r] \end{cases} \quad (\text{II-31})$$

Tel que :

$$[M_{rs}] = [[M_{sr}]]^T$$

La symétrie de la machine fait que les inductances propres des phases statoriques sont égales et de même pour celles du rotor.

Avec :

$$[L_{SS}] = \begin{bmatrix} L_{as} & M_{as} & M_{as} \\ M_{as} & L_{as} & M_{as} \\ M_{as} & M_{as} & L_{as} \end{bmatrix}, \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{ar} & M_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & L_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & M_{ar} & L_{ar} \end{bmatrix}$$

$$[M_{rs}] = [M_0] \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

Avec :

- $[M_0]$: représente la valeur maximale des inductances mutuelles entre phases statoriques et rotoriques.
- θ : L'angle de rotation du rotor par rapport au stator.
- $[L_{SS}]$: Matrice d'inductances statorique.
- $[L_{rr}]$: Matrice d'inductances rotorique.
- $[M_{rs}]$: Matrice des inductances mutuelle stator-rotor.

Ou seules les inductances mutuelles entre stator et rotor son fonction de la position rotorique θ , l'expression du couple se réécrit sous la forme suivante :

$$T_{em} = [I_s]^t \cdot \left(\frac{d}{d\theta} \cdot [M_{sr}] \right) \cdot [I_r] \tag{II -32}$$

II.6.1.3 Équation mécanique

Pour étudier les caractéristiques dynamiques, on introduit l'équation du mouvement suivant :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \Omega \tag{II -33}$$

- f_r : Coefficient de frottement.
- Ω : vitesse mécanique du moteur.

Les équations (II-26), (II-27) ainsi obtenues sont à coefficients variables, par conséquent leur manipulation est souvent difficile, d'où la nécessité de trouver un modèle mathématique équivalent plus simple. Entre autres celui obtenu par la transformation dite de Park [32], [35]

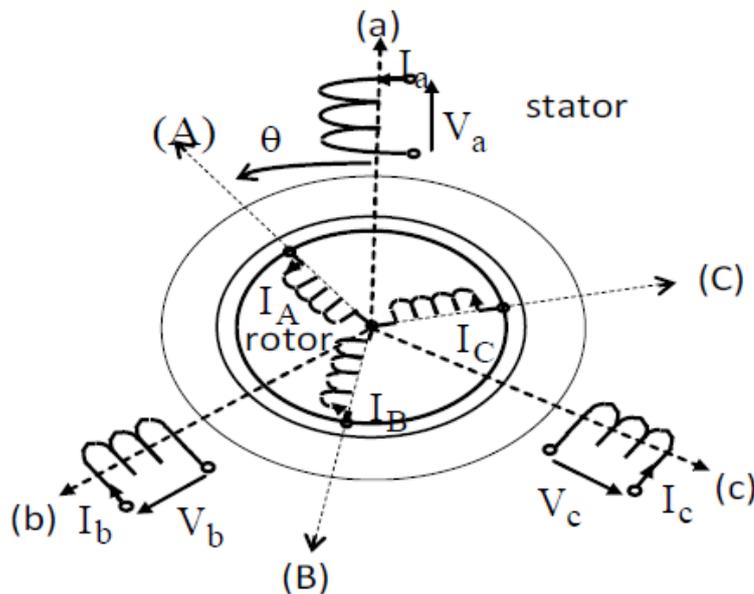


Figure (II.17):représentation schématique d'un MAS

II.6.2 Transformation de Park

La transformation de Park, repose sur l'utilisation de deux phases au lieu des trois phases d'axes fixes du stator (a,b,c) ou du rotor (A,B,C). En effet, on considère l'enroulement équivalent forme de deux bobinages d'axes perpendiculaires (u, v) tournant à la vitesse ω_s par rapport au stator et à la vitesse ω par rapport au rotor (Figure. II.15). La transformation de Park consiste à transformer la représentation du moteur triphasé équilibré en une représentation biphasée équivalente caractérisée par deux axes u, v .

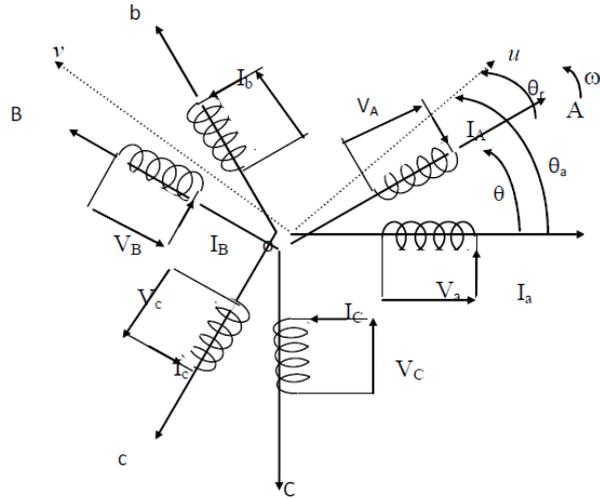


Figure (II.18): repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique

La transformation d'un enroulement triphasé en enroulement biphasé, en tenant compte de l'égalité des puissances en régime permanent, est définie par la matrice de Park suivante : [32], [33]

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \tag{II -34}$$

Avec :

- (X): Grandeur physique (représente le vecteur tension, courant ou flux).
- X_o : Composante homopolaire.
- La matrice de transformation $[A]$ est donnée par :

$$[A] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_a & \cos \left(\theta_a - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_a - \frac{4\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta_a & -\sin \left(\theta_a - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta_a - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{II -35}$$

La matrice inverse $[A]^t$ est donnée par :

$$[A]^t = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_a & -\sin \theta_a & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left(\theta_a - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta_a - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left(\theta_a - \frac{4\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta_a - \frac{4\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II -36})$$

θ_a : Angle de rotation du repère (u, v).

Suite à l'application de la transformation de Park, les équations électriques et magnétiques modélisant le moteur à induction sont les suivantes :

II.6.2.1 Équations électriques au régime no saturé

Les expressions des tensions statoriques et rotoriques dans le système d'axe (u, v) s'écrivent : [36]

➤ Pour le stator :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_a \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - \omega_a \phi_{ds} \\ V_{os} = R_s I_{os} + \frac{d\phi_{os}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II -37})$$

➤ Pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_a - \omega_r) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - (\omega_a - \omega_r) \phi_{dr} \\ V_{or} = R_r I_{or} + \frac{d\phi_{or}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II -38})$$

R_r, R_s : Les résistances statoriques et rotoriques.

II.6.2.2 Equations magnétiques au régime no saturé

➤ Pour le stator :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s I_{ds} + M_{sr} I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s I_{qr} + M_{sr} I_{qs} \\ \phi_{os} = L_s I_{os} \end{cases} \quad (\text{II -39})$$

➤ Pour le rotor :

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r I_{ds} + M_{sr} I_{dr} \\ \Phi_{qr} = L_r I_{qr} + M_{sr} I_{qs} \\ \Phi_{or} = L_r I_{or} \end{cases} \quad (\text{II -40})$$

Avec :

- M_{sr}, L_r, L_s : Inductances respectivement, mutuelle, propre rotorique, propre statorique.

Les flux statoriques et rotoriques s'expriment dans le repère de PARK, en fonction des courants, par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II -41})$$

Avec :

- $L_s = I_s + M$: inductances cyclique statorique.
- $L_r = I_r + M$: inductances cyclique rotorique.
- I_s : Respectivement inductance de fuite statorique et rotorique.
- M : Mutuelle inductance.

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s : \text{Pulsation des grandeurs statoriques.}$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r : \text{Pulsation des grandeurs rotoriques.}$$

$$\omega_s - \omega_r = p \cdot \Omega = \omega \quad (\text{II -42})$$

Avec:

- Ω : La vitesse mécanique.
- ω : La pulsation mécanique.

Ainsi, on obtient l'équation matricielle suivante qui englobe les différentes équations électriques de la machine exprimées dans le repaire (dq) lié au champ tournant :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} = 0 \\ v_{qr} = 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s \cdot M \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s \cdot M & 0 \\ 0 & -\omega_r \cdot M & R_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r \cdot M & 0 & \omega_r L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dI_{ds}}{dt} \\ \frac{dI_{qs}}{dt} \\ \frac{dI_{dr}}{dt} \\ \frac{dI_{qr}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II -43})$$

II.6.2.3 Équations mécanique au régime no saturé [36]

D'après la loi fondamentale de la dynamique nous pouvons écrire :

$$j \frac{d\Omega}{dt} = T_{em} - C_r - f \cdot \Omega \quad (\text{II -44})$$

La transformation de PARK, appliquée à l'expression du couple électromagnétique, permet alors de réécrire cette dernière sous forme suivante:

$$T_{em} = p \cdot M \cdot (I_{dr} \cdot I_{qs} - I_{qr} \cdot I_{ds}) \quad (\text{II -45})$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s, \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r, \quad \omega_s - \omega_r = p \cdot \Omega = \omega, \quad \Omega = \frac{\omega_r}{p}$$

II.6.3 Régime saturé

Il est bien connu que le modèle linéaire peut être utilisé pour étudier le comportement de la machine asynchrone dans un fonctionnement en mode moteur. Les résultats que donne ce modèle sont acceptables. Cependant, il n'en est pas de même si ce même modèle est utilisé pour examiner le fonctionnement en mode générateur autonome.

Le modèle de la machine asynchrone établi précédemment n'est plus suffisant pour obtenir de bons résultats dans l'analyse des régimes de la génératrice. Néanmoins, ce modèle utilise une inductance magnétisante M constante, ce qui sous-entend que le matériau magnétique utilisé pour la conception de la machine est linéaire.

La simulation du phénomène d'auto-excitation de la machine asynchrone par un banc de capacités ne peut se satisfaire de ce modèle puisque c'est la saturation elle-même qui fixe le point de fonctionnement en régime permanent. En effet lorsque la machine est entraînée par un dispositif externe, la présence d'un champ rémanent dans le circuit magnétique de la machine crée un couple électromagnétique engendrant une force électromotrice sur les enroulements statorique.

La connexion de capacités sur les phases du stator entraîne alors la création d'un courant réactif qui augmente le champ magnétique de la machine et par conséquent les forces électromotrices. C'est cette réaction cyclique qui permet à la machine d'arriver à un régime permanent situé dans la zone saturée.

La Figure (II.18) représente l'évolution de la force électromotrice statorique ainsi que la caractéristique externe du condensateur $V_C = \frac{I_C}{C\omega_c}$ (Où ω_c la pulsation des signaux statoriques) en fonction du courant I_m , pour un fonctionnement à vide de la machine. L'interaction des deux phénomènes entraîne l'amorçage de la machine jusqu'au point de fonctionnement en régime permanent.

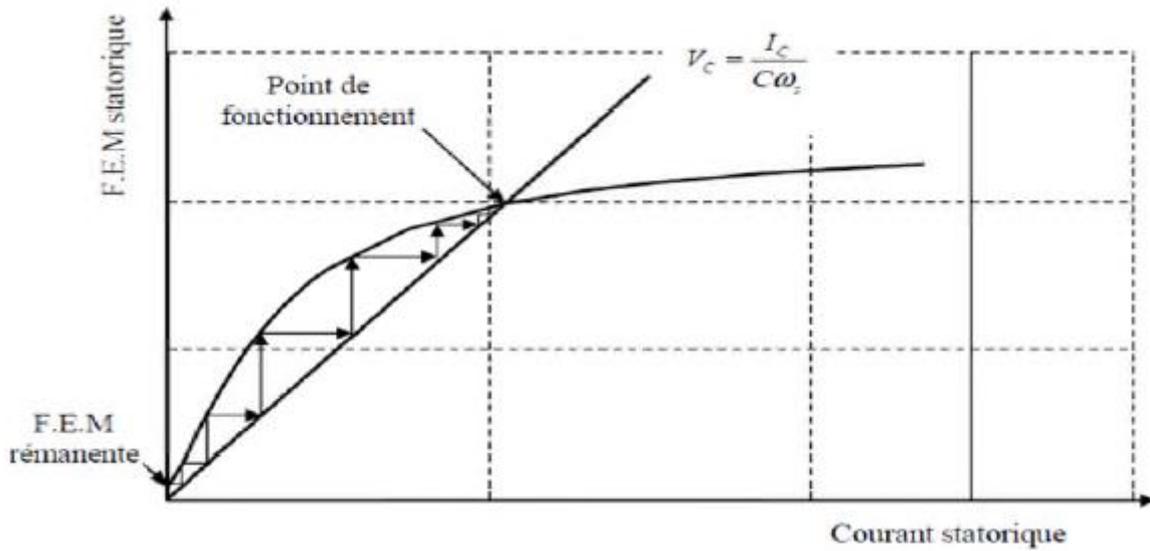


Figure (II.19): Phénomène d'autoamorçage

Dans le fonctionnement en génératrice. De plus, la saturation entraîne un phénomène secondaire « l'effet croisé ». Il s'agit d'un couplage magnétique entre les enroulements des axes d et q. En conséquence, ces deux phénomènes conjugués doivent être pris en compte par le modèle équivalent.

Il est donc nécessaire de prendre en compte l'effet de saturation pour étudier la machine asynchrone en génératrice autonome. En outre, cet effet entraîne également un phénomène secondaire dit « effet croisé » qui peut être considéré comme un couplage magnétique entre les enroulements des axes d et q. Ces deux phénomènes conjugués doivent donc être pris en compte par le modèle équivalent afin d'aboutir à des résultats précis dans le cas du fonctionnement générateur d'une machine asynchrone. [37], [38]

Pour aborder le modèle en régime saturé, reprenons les équations (II.39) et (II-40) Dans le repère de PARK, chacun des flux peut-être décomposé en un flux magnétisant et un flux de fuite. [39], [40]

$$\begin{cases} \varnothing_{sd} = l_s \cdot i_{sd} + \varnothing_{md} \\ \varnothing_{sq} = l_s \cdot i_{sq} + \varnothing_{mq} \\ \varnothing_{rd} = l_r \cdot i_{rd} + \varnothing_{md} \\ \varnothing_{rq} = l_r \cdot i_{rq} + \varnothing_{mq} \end{cases} \quad (II-46)$$

En définissant les courants magnétisants de la machine à partir des composantes des courants statorique et rotorique suivant les deux axes d et q comme suit :

$$\begin{cases} i_{md} = i_{sd} + i_{rd} \\ i_{mq} = i_{sq} + i_{rq} \end{cases} \quad (II-47)$$

Nous définissons donc le module du courant magnétisant global sous la forme suivante:

$$|i_m| = \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2} \quad (\text{II -48})$$

Dans ce cas, L_m qui caractérise la magnétisation de la machine, peut être exprimé comme étant le rapport de $|\phi_m|$, flux total magnétisant de la machine par $|i_m|$:

$$L_m = \frac{|\phi_m|}{|i_m|} \quad (\text{II -49})$$

Nous pouvons exprimer chacun des deux flux magnétisants par :

$$\begin{cases} \phi_{md} = L_m \cdot i_{md} \\ \phi_{mq} = L_m \cdot i_{mq} \end{cases} \quad (\text{II -50})$$

L_m est appelée « inductance magnétisante statique ». L'épaisseur de l'entrefer étant supposée constante, L_m , en fonction du courant, est identique suivant les deux axes d et q.

On obtient, pour les flux statoriques et rotoriques suivant les deux axes, les expressions suivantes [41]:

$$\begin{cases} \phi_{sd} = l_s \cdot i_{sd} + L_m \cdot i_{md} \\ \phi_{sq} = l_s \cdot i_{sq} + L_m \cdot i_{mq} \\ \phi_{rd} = -l_r \cdot i_{sd} + (l_r + l_m) \cdot i_{md} \\ \phi_{rq} = -l_r \cdot i_{sq} + (l_r + l_m) \cdot i_{mq} \end{cases} \quad (\text{II -51})$$

Les équations électriques de la machine asynchrone s'écrivent alors, sous forme matricielle comme suit [41] :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s l_s & 0 & -\omega_s \cdot L_m \\ \omega_s l_s & R_s & \omega_s \cdot L_m & 0 \\ -R_r & \omega_r \cdot l_s & R_r & -\omega_r (l_r + L_m) \\ -\omega_r \cdot l_r - R_r & -\omega_r (l_r + L_m) & R_r & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{md} \\ i_{mq} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} l_s & 0 & L_m + L'_m \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|} & L'_m \cdot \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} \\ 0 & l_s & L'_m \cdot \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} & L_m + L'_m \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \\ -l_r & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -l_r & L'_m \cdot \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} & l_r + L_m + L'_m \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_{ds}}{dt} \\ \frac{di_{qs}}{dt} \\ \frac{di_{md}}{dt} \\ \frac{di_{mq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II -52})$$

Avec : $L'_m = \frac{dL_m}{d|i_m|}$

Trois termes peuvent être distingués :

- Le premier $l_s \cdot \frac{di_{ds}}{dt}$ est issu du flux de fuites.

- Le second $\left(L_m + L'_m \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|}\right) \cdot \frac{di_{md}}{dt}$ est dû à la saturation suivant l'axe direct.
- Le troisième $L'_m \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} \cdot \frac{di_{mq}}{dt}$ reflète l'effet du courant suivant l'axe q sur le flux d'axe direct. C'est l'effet croisé.

La connaissance de l'évolution permet de calculer toutes les inductances qui interviennent en régime de $L_m = f(|i_m|)$ et $L'_m = f(|i_m|)$ saturation. C'est ce principe de base qui est appliqué dans le modèle équivalent.

$$\text{On pose que : } \begin{cases} L_{md} = L_m + L'_m \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \\ L_{mq} = L_m + L'_m \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \\ L_{dq} = L'_m \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} \end{cases}$$

La relation matricielle devient :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s l_s & 0 & -\omega_s \cdot L_m \\ \omega_s l_s & R_s & \omega_s \cdot L_m & 0 \\ -R_r & \omega_r \cdot l_s & R_r & -\omega_r (l_r + L_m) \\ -\omega_r \cdot l_r - R_r & -\omega_r (l_r + L_m) & R_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{md} \\ i_{mq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_s & 0 & L_{md} & L_{dq} \\ 0 & l_s & L_{dq} & L_{mq} \\ -l_r & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -l_r & L_{dq} & l_r + L_{mq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_{ds}}{dt} \\ \frac{di_{qs}}{dt} \\ \frac{di_{md}}{dt} \\ \frac{di_{mq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II -53})$$

L'expression du couple électromagnétique devient :

$$C_{em} = P \cdot L_m \cdot (i_{md} \cdot i_{qs} - i_{mq} \cdot i_{ds}) \quad (\text{II -54})$$

Par ailleurs, la fréquence des grandeurs statorique étant inconnue, le système d'équations de la génératrice est mieux conditionné lorsqu'il est exprimé dans le référentiel (d,q) lié au rotor. En effet, dans ce repère, seule la valeur de la vitesse de rotation mécanique est nécessaire. Dans ce cas, le système d'équations du modèle linéaire dans ce repère est donné par l'expression matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -p \cdot \Omega l_s & 0 & -p \cdot \Omega \cdot M \\ p \cdot \Omega l_s & R_s & p \cdot \Omega \cdot M & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_s & 0 & M & 0 \\ 0 & l_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_{ds}}{dt} \\ \frac{di_{qs}}{dt} \\ \frac{di_{rd}}{dt} \\ \frac{di_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II -55})$$

Et le même système d'équations, en tenant compte de la saturation, s'écrira comme suit dans le référentiel (d, q) lié au rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -p \cdot \Omega l_s & 0 & -p \cdot \Omega \cdot L_m \\ p \cdot \Omega l_s & R_s & p \cdot \Omega \cdot L_m & 0 \\ -R_s & 0 & R_r & 0 \\ 0 & -R_r & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_s & 0 & L_m + L'_m \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|} & L'_m \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} \\ 0 & l_s & L'_m \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} & L_m + L'_m \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \\ -l_r & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -l_r & L'_m \frac{i_{md} \cdot i_{mq}}{|i_m|} & l_r + L_m + L'_m \cdot \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_{ds}}{dt} \\ \frac{di_{qs}}{dt} \\ \frac{di_{md}}{dt} \\ \frac{di_{mq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II -56})$$

A vide, les tensions statorique aux bornes des condensateurs constituent également des inconnues. Par conséquent, il faut tenir compte des équations du circuit électrique extérieur. Ces dernières peuvent s'écrire en fonction des capacités d'excitation sous la forme matricielle suivante : [42], [36]

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{c} & 0 \\ 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{sd} \\ -i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & p\Omega \\ -p\Omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sq} \\ V_{sd} \end{bmatrix} \quad (\text{II -57})$$

➤ **Cas d'un banc de capacités et une charge équilibrée [38]**

Dans le cas de la présence d'une charge équilibrée, cette relation matricielle est modifiée pour tenir compte des courants dans la charge et devient alors :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{c} & 0 \\ 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{sd} & -i_{chd} \\ -i_{sq} & -i_{chq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & p\Omega \\ -p\Omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sq} \\ V_{sd} \end{bmatrix} \quad (\text{II -58})$$

Enfin, suivant la nature de la charge, on ajoute les équations suivantes

$$\text{Charge R} : \begin{cases} V_{sd} = R \cdot i_{chd} \\ V_{sq} = R \cdot i_{chq} \end{cases} \quad (\text{II -59})$$

$$\text{Charge RL} : \begin{cases} V_{sd} = R \cdot i_{chd} + L \cdot \frac{di_{chd}}{dt} \\ V_{sq} = R \cdot i_{chq} + L \cdot \frac{di_{chq}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II -60})$$

$$\text{Charge RC : } \begin{cases} V_{sd} = R \cdot i_{chd} + \frac{1}{C_S} \int i_{chd} \cdot dt \\ V_{sq} = R \cdot i_{chq} + \frac{1}{C_S} \int i_{chq} \cdot dt \end{cases} \quad (\text{II -61})$$

$$\text{Charge RLC : } \begin{cases} V_{sd} = R \cdot i_{chd} + L \cdot \frac{di_{chd}}{dt} + \frac{1}{C_S} \int i_{chd} \cdot dt \\ V_{sq} = R \cdot i_{chq} + L \cdot \frac{di_{chq}}{dt} + \frac{1}{C_S} \int i_{chq} \cdot dt \end{cases} \quad (\text{II -62})$$

➤ **Cas d'une charge déséquilibrée [38]**

L'utilisation d'une génératrice asynchrone pour la génération de l'électricité dans un site isolé implique que la charge peut être déséquilibrée. Pour étudier ce cas de figure, on peut utiliser le même modèle de Park de la machine proposé dans le cas des charges équilibrées (équation (II.56)). Toutefois, concernant les équations du circuit électrique extérieur, on adoptera l'écriture triphasée de ces dernières. Ainsi, les tensions aux bornes des condensateurs sont données par l'équation matricielle suivante

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{c} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{c} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{sa} & -i_{cha} \\ -i_{sb} & -i_{chb} \\ -i_{sc} & -i_{chc} \end{bmatrix} \quad (\text{II -63})$$

$i_{cha}, i_{chb}, i_{chc}$ Étant les courants dans la charge triphasée et C la capacité d'auto-amorçage avec diode.

Les équations électriques de la machine asynchrone à cage sous forme suivante:

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{1}{L_s} \int V_{ds} + \omega_s(L_s I_{qs} + M I_{qr}) - R_s I_{ds} - M \frac{dI_{dr}}{dt} \\ I_{qs} = \frac{1}{L_s} \int V_{qs} + \omega_s(L_s I_{ds} + M I_{dr}) - R_s I_{qs} - M \frac{dI_{qr}}{dt} \\ I_{dr} = \frac{1}{L_r} \int V_{dr} + \omega(L_r I_{qr} + M I_{qs}) - R_r I_{dr} - M \frac{dI_{ds}}{dt} = 0 \\ I_{qr} = \frac{1}{L_r} \int V_{qr} - \omega(L_r I_{dr} + M I_{ds}) - R_r I_{qr} - M \frac{dI_{qs}}{dt} = 0 \end{cases} \quad (\text{II -64})$$

II.7 Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne exige la modélisation du vent, de la turbine éolienne, du générateur électrique et du convertisseur de puissance. [42]

Le schéma étudié dans ce travail est présenté sur la figure (II.20). Il s'agit d'une turbine éolienne, d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil, et un convertisseur de puissance.

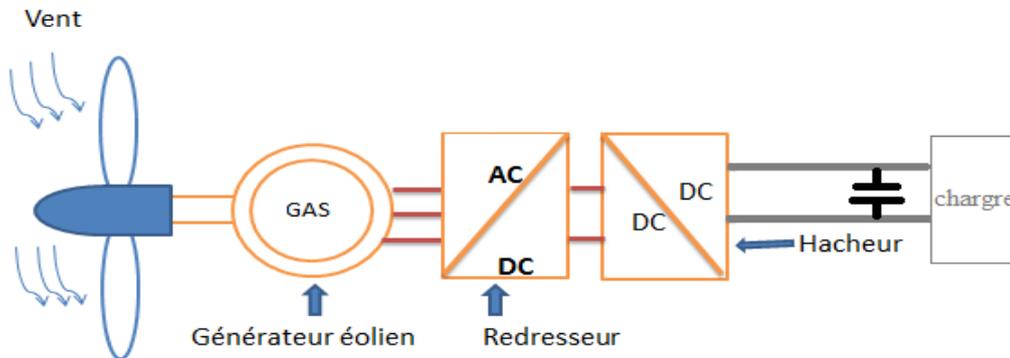


Figure (II.20): Structure de la conversion de l'énergie éolienne

II.7.1 Modélisation de la vitesse du vent

Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie, car la puissance éolienne dans les conditions optimales évolue au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. [43]

Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques. De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés. [44]

La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps. $V_v = f(t)$ [45]

II.7.2 Modélisation de la turbine

Nous savons que l'éolienne procure son énergie du vent, par conséquent, il existe une relation entre la vitesse du vent et la vitesse de rotation, le couple et la puissance sur le rotor d'une éolienne. [46]

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie de la manière suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (\text{II -65})$$

Où :

- ρ : la densité d'air ($\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$).
- S est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pôle R où $S = \pi R^2$.
- v : la vitesse du vent.

La puissance aérodynamique, qui est convertie par une turbine du vent, P_{aero} dépend du coefficient de puissance C_p . Elle est donnée par :

$$P_{aero} = C_p(\lambda) \cdot P_v \tag{II -66}$$

C_p Coefficient de puissance de l'éolienne (valeur maximale théorique 0,593). Le C_p dépend de la vitesse du vent, du nombre de pâles, de leur angle de calage β et de la vitesse de rotation.

Le couple aérodynamique est le rapport de la puissance aérodynamique à la vitesse de rotation de la turbine Ω_t :

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega_t} = \frac{\rho S v^3 C_p(\lambda)}{2 \cdot \Omega_t} \tag{II -67}$$

La relation de vitesse λ est définie comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales (la vitesse de rotation de la turbine) et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{v} \tag{II -68}$$

II.7.3 Caractéristique $C_p(\lambda)$ de la voilure

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure (II.21) représente la variation de ce coefficient en fonction de ration de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de la pale β . L'expression du coefficient de puissance pour ce type de turbine est donnée par l'équation suivante [47]:

$$C_p = 0.5 - 0.167(\beta - 2) \sin \left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \tag{II -69}$$

II.7.4 Modélisation du multiplicateur [47] [48]

La turbine est normalement couplée à l'axe du générateur par un multiplicateur dont le gain de vitesse G est choisi afin de placer la vitesse d'axe du générateur dans une marge de vitesse désirée. En négligeant les pertes de transmission, le couple et la vitesse de la turbine se sont rapportés au côté du générateur par :

$$C_g = \frac{C_t}{G} \tag{II -70}$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \tag{II -71}$$

Avec:

- C_g : le couple de la génératrice.
- Ω_{mec} : la vitesse de rotation de la génératrice.

- C_t : le couple de la turbine
- Ω_t : la vitesse de la turbine

II.7.4 Modélisation de l'arbre de transmission

Tous les éléments de la transmission, l'arbre lent côté rotor éolien, le multiplicateur et l'arbre rapide côté générateur, sont inclus dans le boc « transmission ».

La masse de la turbine éolienne est rapportée sur l'arbre de la turbine sous forme d'une inertie totale J , constitué de l'inertie de la turbine, reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice elle-même. [29]

L'équation mécanique s'écrit : $J \frac{d\omega}{dt} + C_{vis} = C_{em} - C_{aéo}$

Le couple visqueux dû aux frottements : $C_{vis} = f \cdot \Omega$

Avec :

- J : L'inertie totale de l'arbre de transmission.
- f : le coefficient de frottement visqueux.

II.8 Modélisation du redresseur [49]

La figure (II.22) représente le montage d'un pont redresseur triphasé double alternance, les diodes D_i et D_i' sont supposées parfaites.

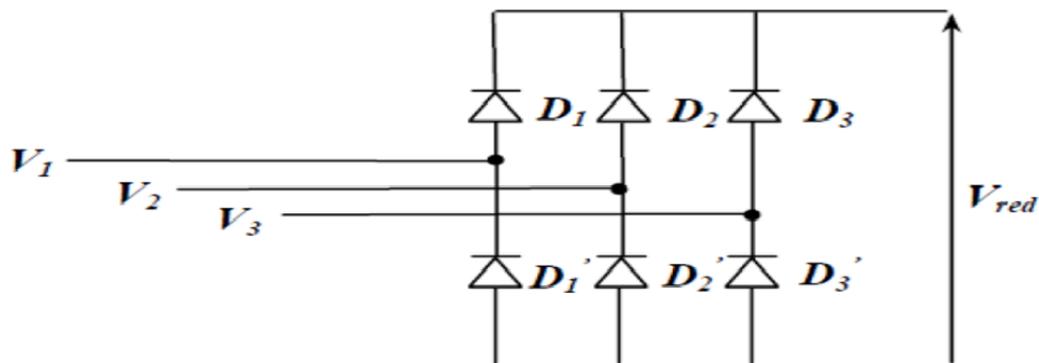


Figure (II.21): Circuit électrique du convertisseur AC/DC (Redresseur à diodes).

Les tensions issues de la génératrice sont représentées comme suit :

$$\begin{cases} V_a(t) & V_{dc} \sin \omega t \\ V_b(t) & V_{dc} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ V_c(t) & V_{dc} \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{cases} \quad \text{(II -72)}$$

$$i_{dc} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad \text{(II -73)}$$

Avec :

- $V_a(t), V_b(t), V_c(t)$: Tension de référence ;
- V_{dc} : Tension redressée ;
- I_{dc} : Courant moduler par le redresseur ;
- S_a, S_b, S_c : Fonction logique correspondant à l'état de l'interrupteur

La tension redressée répond aux conditions suivantes :

- D_i conduit si $V_i = \max (V_j)$ tel que : $j=a, b, c$; $i=1, 2, 3$.
- $D_{k'}$ conduit si $V_k = \min (V_j)$ tel que : $j=a, b, c$; $k=4, 5, 6$.

Pendant chaque séquence de conduction, la tension V_{red} à la sortie du redresseur est : $V_{dc} = V_i - V_k$

Où V_i (respectivement V_k) est la tension appliquée à l'anode (respectivement à la cathode) de la diode D_i (respectivement $D_{k'}$) conductrice pendant cette séquence, et par conséquent la tension de sortie du redresseur sera définie comme suit : $V_{red} = \max (V_j) - \min (V_j)$

II.9 Modélisation du bus continu [29]

Le bus continu est composé d'une capacité, qui a pour but le lissage de la tension. L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif.

$$V_{dc} = \int \frac{1}{C_{dc}} \cdot I_c dt \tag{II -74}$$

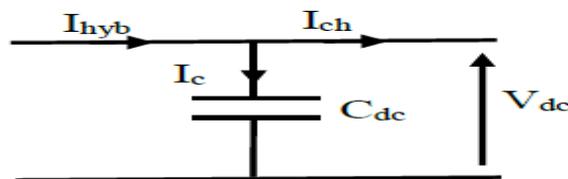


Figure (II.22):courant circulant dans le bus continue

Avec :

- I_{hyb} : Courant hybride (éolien, photovoltaïque).
- I_c : Courant circulant dans la capacité.
- I_{ch} : Courant de charge.
- V_{dc} : Tension du bus continu.
- C_{dc} : Capacité du bus continu.
- I_c : Le courant qui traverse le condensateur.

II.10 Modélisation de la pompe centrifuge [50]

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu trois Caractéristique, la hauteur, le débit et la vitesse :

$$F(H, Q, W) = 0$$

Pour résoudre ce système d'équation, on considère généralement la vitesse constante. On peut écrire l'équation de la hauteur manométrique totale (HMT) en fonction de la hauteur géométrique et les pertes de charges par l'équation :

$$HMT = H_g + P_c \quad (\text{II -75})$$

Avec :

- H_g : Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée et le plan d'utilisation.
- P_c : Perte de charge produite par le frottement de l'eau sur les parois des conduites. Elle s'exprime de cette façon :

$$P_c = \left(\lambda \frac{L}{D} + \varepsilon \right) \left(\frac{8Q^2}{\pi^2 D^5 g} \right) = K_p Q^2 \quad (\text{II -76})$$

- λ : Coefficient des pertes de charge linéaires.
- D : Diamètre de la tuyauterie(m)
- L : Longueur de la tuyauterie(m)
- g : Accélération de la pesanteur locale (m/S^2).
- ε : Coefficient des pertes de charge locales.
- K_p : Constante la canalisation.
- Q : le débit de la pompe.

Dans cette application, l'expression de la hauteur manométrique totale est donnée par un modèle PLEIDER-PETERMAN

$$HMT = \alpha_0 \omega_r^2 - \alpha_1 \omega_r Q - \alpha_2 Q^2 \quad (\text{II -77})$$

Avec:

- $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$: des constantes de la pompe.

La pompe oppose un couple résistant donné par :

$$C_r = K_r \Omega^2 \quad (\text{II -78})$$

Avec :

- Ω : vitesse de moteur asynchrone (rad/s).
- K_r : Un coefficient de proportionnalité [$(Nm / ras \cdot S^{-1})^2$] qui donné par l'équation suivante :

$$K_r = \frac{P_n}{\Omega_n^3} \quad (\text{II -79})$$

- P_n : Puissance nominale du moteur asynchrone(w).
- Ω_n : vitesse nominale du moteur asynchrone (rad/s)

II.11 Modélisation de la batterie

II.11.1 le modèle de CIEMAT [29]

C'est un modèle caractérisé par la mise en série d'une *f.é.m.* avec une résistance variable, comme le montre la figure (II.24). Les caractéristiques de la source de tension E_b et la résistance interne R_b dépendent de la température et l'état de la charge de la batterie.

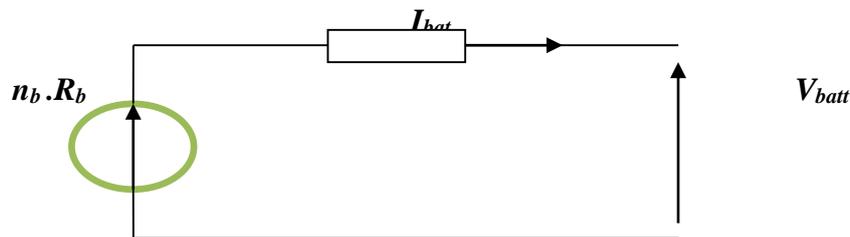


Figure (II.23): schéma équivalent du modèle CIEMAT.

Pour un nombre de cellule n_b l'équation de la tension est :

$$V_{bat} = n_b \cdot E_b \pm n_b \cdot R_b \cdot I_{bat} \quad (II -80)$$

Avec :

- V_{bat} : tension de la batterie.
- I_{bat} : courant de la batterie.
- E_b : la force électromotrice fonction de l'état de charge de la batterie.
- R_b : la résistance interne, variable en fonction de l'état de charge.

II.11.2 Modèle de la capacité

Le modèle de la capacité donne la quantité d'énergie C_{bat} que peut restituer la batterie, en fonction du courant de décharge I_{bat} . Son expression est établie à partir du courant I_{10} correspondant au régime de fonctionnement C_{10} .

$$C_{bat} = C_{10} \left[\frac{1.67}{1+0.67 \cdot \left(\frac{I_{bat}}{I_{10}}\right)^{0.9}} * (1 + 0.005 * \Delta T) \right] \quad (II -81)$$

Ou ΔT représente le réchauffement de l'accumulateur par rapport une température ambiante de référence (25°C).

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (II -82)$$

La batterie est composée de 6 accumulateurs électrochimique (n_b) relié en série. Selon la caractéristique du constructeur, la capacité pour un élément, a une capacité C_{10} de 150 Ah, en régime de décharge à courant constant durant 10h et est égale à $C_{10} = 10 \cdot I_{10}$ et une résistance interne de 0.46Ω .

La capacité C_{bat} sert de référence pour déterminer l'état de charge (*EDC* ou en anglais *SOC*) de la batterie. Ce dernier sera formulé en fonction de la quantité de la charge manquante à la batterie Q_d . [29]

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (\text{II -83})$$

Q_d Est calculé par la fonction suivante :

$$Q_d = I_{bat} * t \quad (\text{II -84})$$

Avec t : la durée de fonctionnement de la batterie avec un courant I_{bat} .

II.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé un système électrique multi-sources (photovoltaïque et éolienne) avec batterie de stockage, cette modélisation nous permettra de simuler les performances et optimisé du système global étudié.

III.1 Introduction

Après avoir modélisé les deux générateurs (photovoltaïque et éolien) dans le chapitre précédent, nous allons appliquer à chacun un algorithme de suivi du point de puissance maximale, surnommé MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Le principe est de définir une suite réursive en fonction de la puissance à optimiser, qui converge toujours vers le point maximum, malgré les variations climatiques. A chaque pas de calcul un élément de la suite est évalué, et doit être appliqué comme consigne de la commande. [51]

Pour cela, nous avons utilisé la méthode de perturbation et d'observation (P&O) pour le générateur photovoltaïque, et la méthode classique pour le générateur éolien.

III.2 Optimisation de système photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. La caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ du générateur dépend de l'éclairement solaire (l'irradiation) et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale.

A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un convertisseur DC/DC permettant de rattraper à chaque fois le point de puissance maximale. Ces convertisseurs connus sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking) assurant le couplage entre le générateur photovoltaïque et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale.

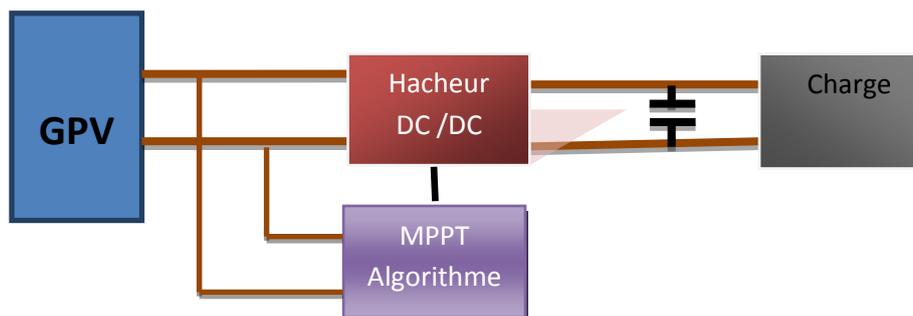


Figure (III.1) : Chaîne de conversion photovoltaïque avec le contrôleur MPPT

III.2.1 La commande de recherche du point de puissance maximale

Par définition, une commande MPPT (maximum power point Tracking), associée à un étage intermédiaire DC/DC d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque, de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance quels que soient les conditions météorologiques (irradiation, température).

La figure (III.2) montre la caractéristique de la puissance de tension (P_{PV} - V_{PV}) d'un panneau photovoltaïque.

Le point (C) représente le point maximum de puissance (PPM) et le panneau photovoltaïque fournit la puissance disponible maximale P_{max} .

Le point de puissance maximale (PPM) est obtenu lorsque la pente $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}}$ est nulle. [27]

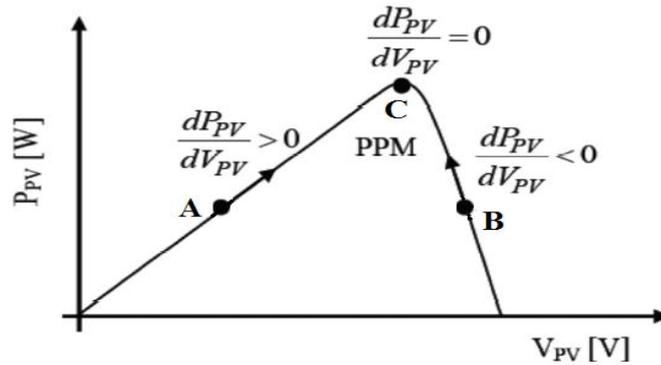


Figure (III.2) : Caractéristique puissance-tension d'un panneau photovoltaïque

Le contrôle qui fournit une extraction continue du point de puissance maximale est donné par l'équation suivante :

$$V_{opt} = K \cdot \int \frac{dP}{dV} dt = k \cdot \int \frac{\Delta P}{\Delta V} dt \tag{III.1}$$

Avec :

- V_{opt} : tension optimale qui donne une puissance maximale.
- K : Gain proportionnel.
- $\frac{dP}{dV}$: Variation de la puissance en fonction de la tension.
- ΔP : Variation de puissance entre les deux points de fonctionnement.
- ΔV : Variation de tension entre les deux points de fonctionnement.

Le schéma fonctionnel de commande est montré dans la figure (III.3).

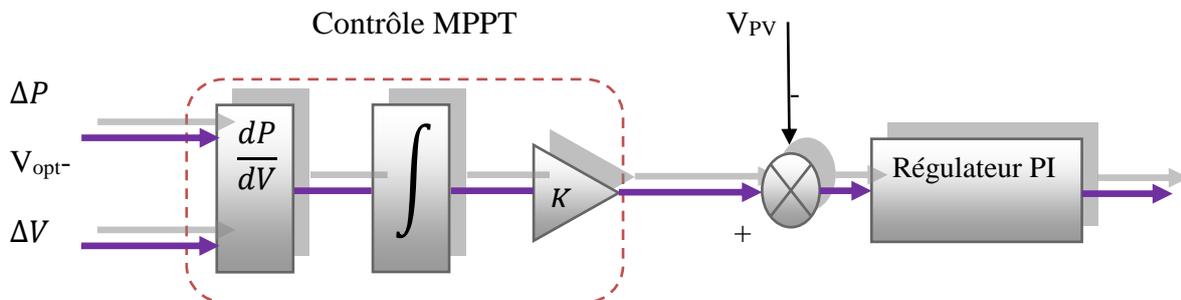


Figure (III.3) : Schéma de contrôle de MPPT et de régulation de la tension V_{PV} .

III.2.1.1 Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

C'est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité, une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires. La tension aux bornes des panneaux est volontairement perturbée (augmentée ou diminuée) avec une constante (C) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation.

Précisément, si la puissance aux bornes des panneaux est augmentée à cause 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. [27]

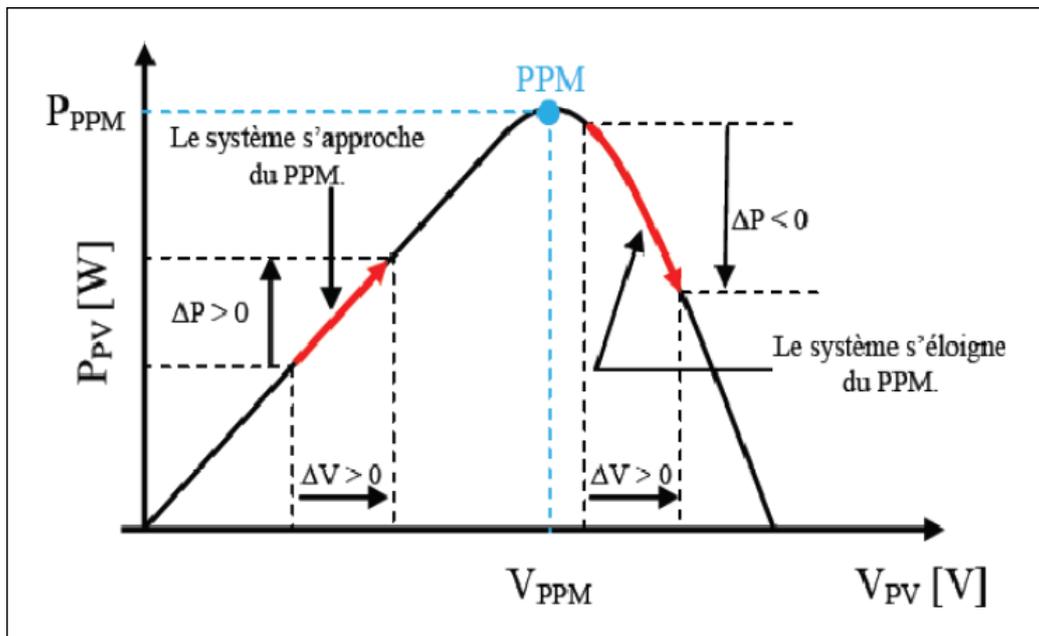


Figure (III.4): Caractéristiques d'un panneau solaire (principe de fonctionnement de (P&O)

La figure (III.5) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type (P&O), où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (mesurant le courant et la tension des panneaux PV) sont nécessaires pour déterminer la puissance de panneau à chaque instant. [27]

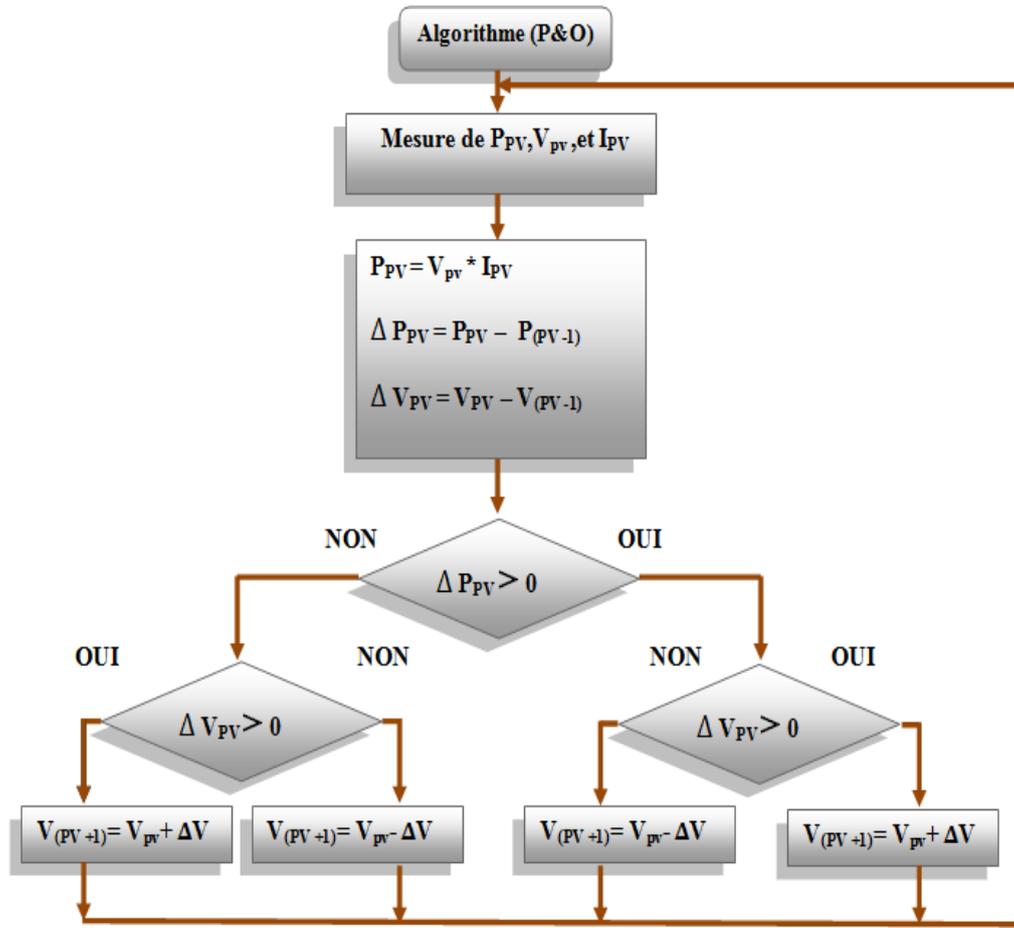


Figure (III.5) : Diagramme fonctionnel algorithme (P&O)

III.2.2 Simulation du panneau photovoltaïque avec MPPT

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque avec l'application de l'algorithme d'optimisation MPPT, pour une extraction maximale de la puissance pour toute variation de l'ensoleillement et de la température.

La figure (III.6) représente les caractéristiques $(I_{pv}(V_{pv}))$ et $(P_{pv}(V_{pv}))$ dans les conditions STC ($E_{stc}=1000W/m^2$ et $T_{stc}=25^\circ$).

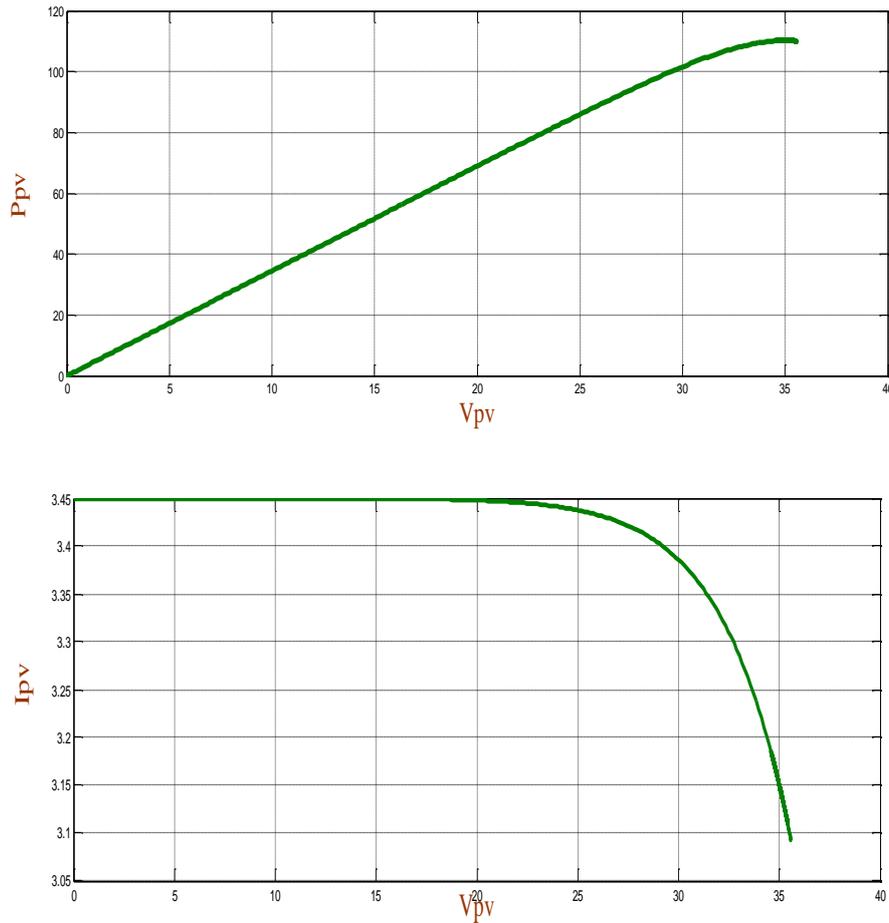


Figure (III.6): Caractéristiques ($P_{pv}(V_{pv})$) et ($I_{pv}(V_{pv})$) dans les conditions STC convention

III.2.3 Résultats de simulation du panneau photovoltaïque

Les résultats de simulation sont obtenus pour ensoleillement $E_s = 800W/m^2$ et une température de $T_c = 25^\circ C$.

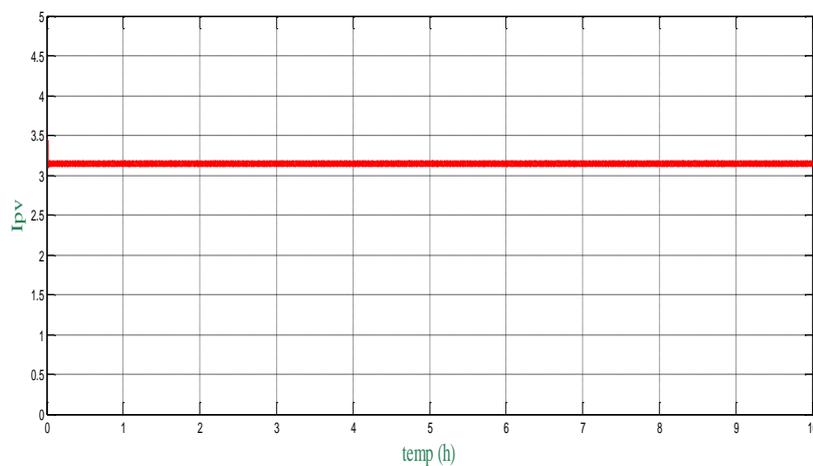


Figure (III.7): L'allure du courant photovoltaïque

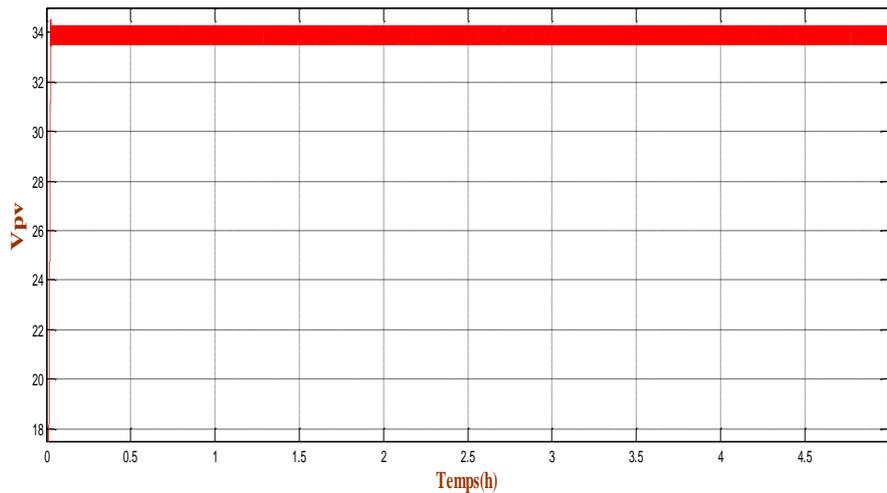


Figure (III.8): L'allure de la tension photovoltaïque

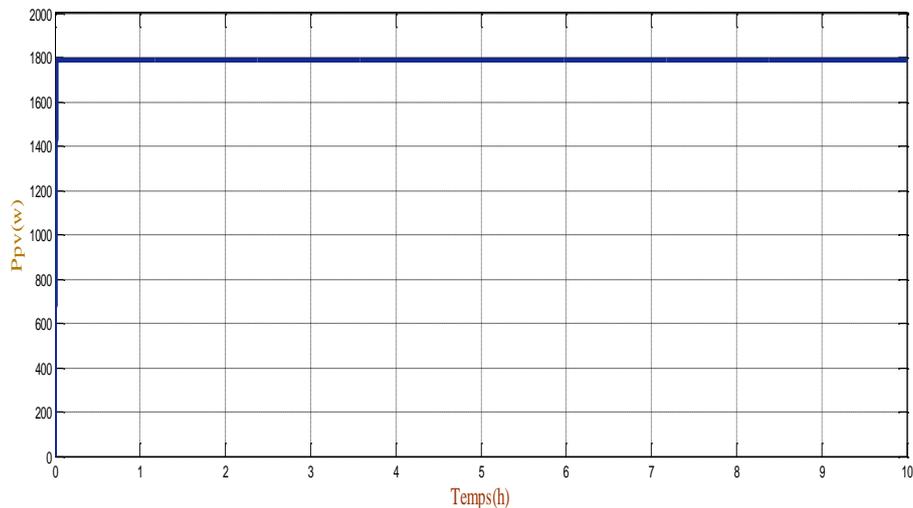


Figure (III.9): L'allure de la puissance photovoltaïque

Les figures (III.7), (III.8) et (III.9) illustrent la variation en fonction du temps respectivement du courant, de la tension et de la puissance photovoltaïque. On remarque que le courant photovoltaïque, la tension photovoltaïque et leur produit qui donne la puissance photovoltaïque sont constants au fil du temps.

III.3 Optimisation de la puissance de la turbine

Pour l'éolienne, nous sommes partis de l'hypothèse que la caractéristique $C_p(\lambda)$ de la turbine est connue. Pour cela dans l'optimisation de l'éolienne, nous avons choisi la méthode classique pour la recherche du point maximum de puissance.

Nous avons trouvé que la courbe de puissance, typique des éoliennes, nécessite une adaptation de la charge mécanique afin d'assurer un bon prélèvement énergétique. Alors, nous parlons ainsi de maximisation de la puissance de l'aérogénérateur (MPPT). C'est la même procédure que nous avons étudié pour le générateur photovoltaïque. [52]

Donc nous avons opté pour la méthode classique pour l'optimisation de la puissance récupérée par la turbine.

III.3.1 La méthode classique

La caractéristique $C_p(\lambda)$ qui est de forme parabolique admet un maximum de C_{pmax} pour un λ_{opt} . La vitesse de la génératrice est asservie à une référence issue d'un algorithme permettant l'extraction maximale de la puissance. Lui-même nécessitant la mesure ou l'estimation de la vitesse du vent. Ce principe est connu sous la terminologie MPPT (Maximum Power Point Tracking). Pour une vitesse de vent V_v donnée correspond à une vitesse de rotation qui donne λ_{opt} . [38]

La valeur de la vitesse du vent est donnée par l'équation :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V_v} \quad (III-2)$$

En insérant cette équation dans l'expression (II-44), on obtient la fonction de la puissance en fonction de la vitesse de rotation :

$$P_t = \frac{1}{2\lambda^3} \rho C_p(\lambda) S R^3 \Omega_t^3 \quad (III-3)$$

A partir de la formule (III-3) on obtient l'expression du couple correspondant à :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} \quad (III-4)$$

D'où :

$$C_t = \frac{1}{2\lambda^3} C_p(\lambda) \rho S R^3 \Omega_t^2 \quad (III-5)$$

Avec :

$$S = \pi R^2 \quad (III-6)$$

On obtient :

$$C_t = \frac{1}{2\lambda^3} C_p(\lambda) \rho \pi R^5 \Omega_t^2 \quad (III-7)$$

En considérant que les conditions sont optimales (à puissance optimale), alors l'équation (III-6) permet le calcul de la valeur optimale du couple :

$$C_{t_{opt}} = K_{opt} \Omega_t^2 \quad (III-8)$$

Avec :

$$K_{opt} = \frac{1}{2\lambda_{opt}^3} C_{pmax} \rho \pi R^5 \tag{III-9}$$

L'algorithme MPPT contrôlé en couple à l'aide de la vitesse de rotation mesurée (Ω_t), détermine le couple pour chaque vitesse de rotation de la façon montrée par la figure (III.10). [53]

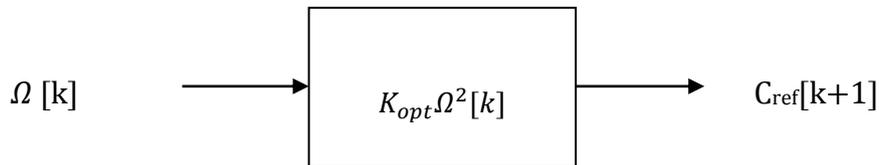


Figure (III.10) : Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation

Cette opération à chaque pas de calcul permet de converger vers le point optimal. La figure (III.11) représente le schéma bloc de la turbine éolienne sous Matlab/Simulink avec l'algorithme MPPT en vue de l'extraction du maximum de puissance pour toute la plage de variation de la vitesse du vent.

- ✓ La mesure de la vitesse de rotation Ω_t engendre le calcul du couple $C_{mec-ref}$. Ce couple est appliqué à l'arbre mécanique par la régulation du couple électromagnétique de la génératrice :

$$C_t - C_{mec} = J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \Omega_{mec} \tag{III-10}$$

- ✓ Par l'action de ce couple, la vitesse de rotation change selon l'équation mécanique (III-7) pour atteindre, au pas de calcul suivant la vitesse Ω_t ; où de nouveau la nouvelle consigne du couple sera calculée.
- ✓ Après quelques itérations, on atteint l'optimum à (C_{opt}, Ω_{opt}) correspondant à la puissance optimale $P_{opt}(\lambda_{opt}, C_{popt})$. [31]

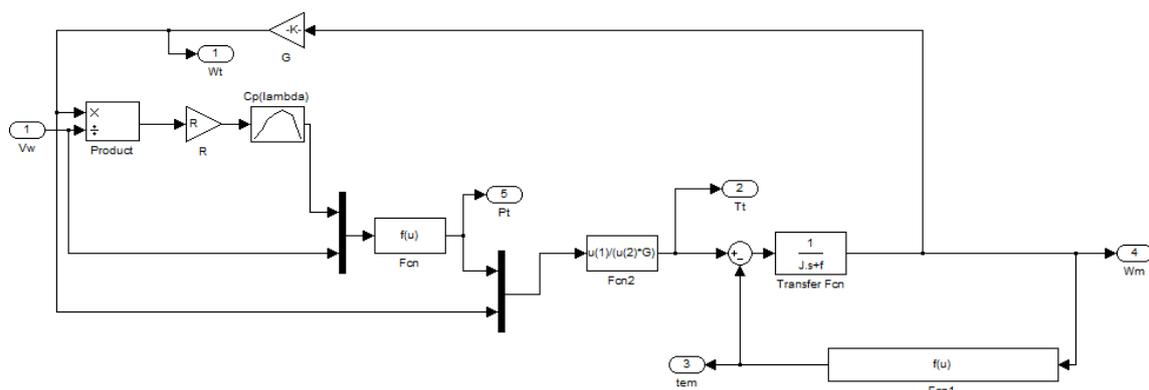


Figure (III.11) : Schéma bloc de la turbine éolienne avec MPPT

On applique un échelon de vitesse du vent de 7m/s puis 9m/s après un temps de 10s, les résultats de simulation obtenue sont présentés sur les courbes suivantes :

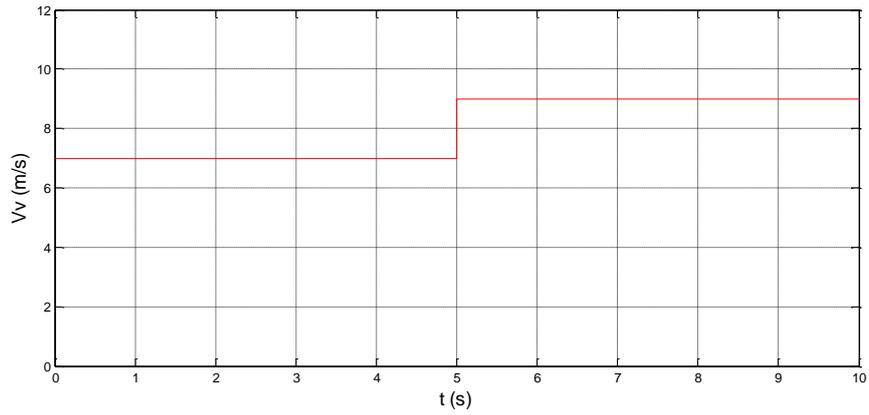


Figure (III.12) : Profil du vent en [m/s]

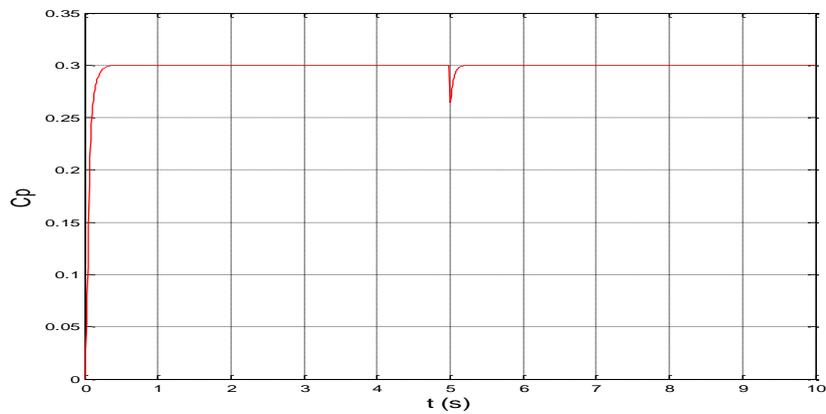


Figure (III.13) : Coefficient de puissance maximal C_p de la turbine [m/s]

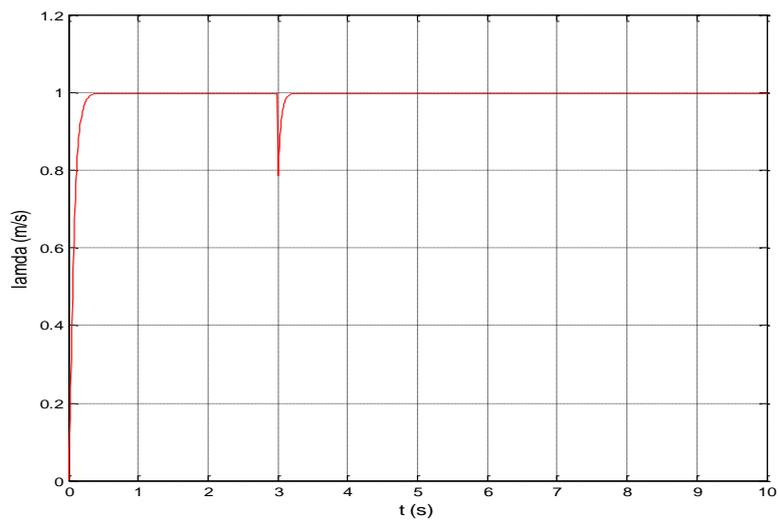


Figure (III.14) : Vitesse spécifique λ optimale [m/s]

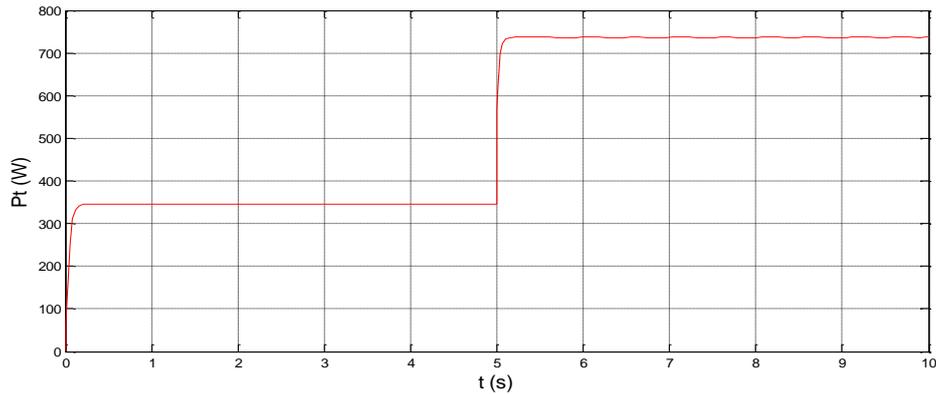


Figure (III.15) : La puissance de la turbine [W]

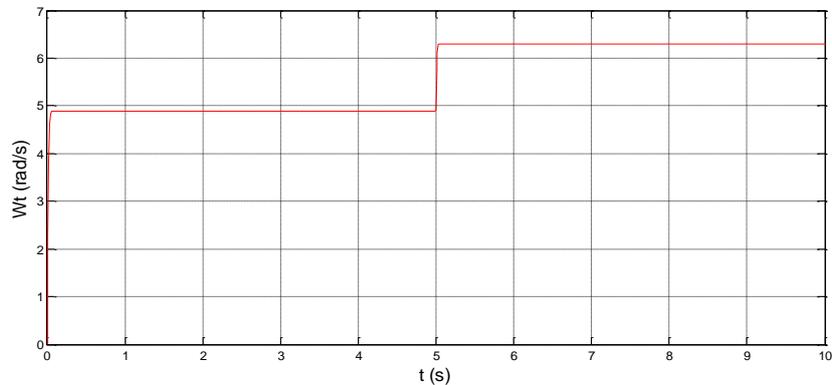


Figure (III.16) : La vitesse de la turbine [rad/s]

D'après la figure (III.16) on voit que la vitesse de la turbine éolienne suit la variation de la vitesse du vent (figure (III.12) pour permettre de garder un rapport de vitesse à sa valeur optimale ($\lambda_{opt} = 0.1$) figure (III.14), cela permet d'avoir un coefficient de puissance maximale ($C_{pmax} = 0.3$) figure (III.13), quel que soit la vitesse du vent et de travailler continuellement comme prévu, avec un rendement aérodynamique optimal et qui permet d'extraire une puissance maximum figure (III.15).

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation des deux chaînes de conversion éolienne et photovoltaïque avec les algorithmes MPPT.

Nous constatons que pour produire le maximum de puissance, l'utilisation des méthodes de suivi du point de puissance maximale MPP s'avère nécessaire.

Nous présenterons dans le prochain chapitre la phase de dimensionnement et de gestion du système de pompage multi-sources.

IV.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté et établi les modèles de chaque composant du système de pompage multi-sources (éolien photovoltaïque avec batteries) et développé un outil de simulation du système complet.

Nous allons passer maintenant à la phase de dimensionnement du système de pompage multi-sources comprenant un générateur photovoltaïque comme source principale, un système éolien comme source complémentaire, des batteries pour la compensation et un réservoir d'eau en tenant compte de la satisfaction des besoins en eau pour une ferme située à la région de Bejaia. Ce dimensionnement des composants de notre système joue un rôle primordial pour un bon fonctionnement du système.

Nous allons aussi présenter une stratégie de contrôle et de supervision du système multi-sources par un algorithme de gestion d'énergie qui va contrôler les échanges d'énergie entre les différents composants du système.

IV.2 Dimensionnement d'un système de pompage

IV.2.1 Données de base [54]

✓ Débit (Q) :

Le débit (Q) est la quantité d'eau que la pompe peut fournir durant un intervalle de temps donné. Le débit est habituellement donné en litre par heure (l/h) ou gallon par heure (gal/h). En pompage, le débit (le besoin en eau) est souvent exprimé en mètre cube par jour (m^3/j).

✓ Hauteur Manométrique totale (HMT)

Est la différence de pression en mètres de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement. Cette hauteur peut être calculée comme suit :

$$HMT = H_g + P_c \quad (IV-1)$$

Avec :

- H_g : est la hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée (niveau dynamique) et le plan d'utilisation ($H_r + H_d$). Pour une pompe de surface sur un plan d'eau, H_g sera choisi en fonction de la hauteur de la pompe à son niveau le plus bas.
- P_c : Pertes de charges produites par le frottement de l'eau sur les parois des conduites.

✓ Niveau statique (N_s) :

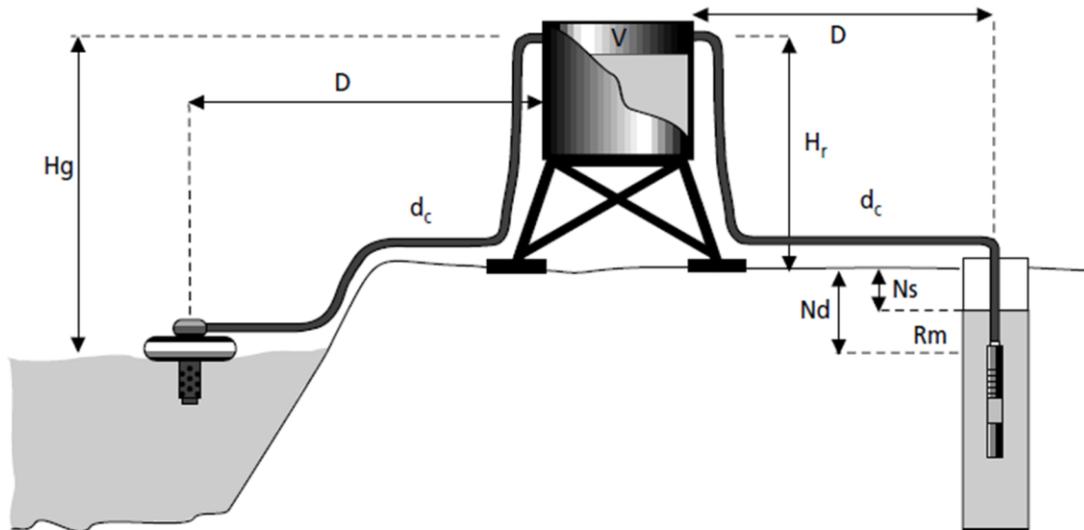
Le niveau statique d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau avant pompage.

✓ Niveau dynamique (N_d) :

Le niveau dynamique d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau pour un pompage à un débit moyen.

✓ Rabattement (R_m) :

Est le rabattement maximal acceptable avant de stopper la pompe. Il représente la différence entre le niveau statique et le niveau dynamique.



Figure(IV.1) : Données de base d'une pompe

IV.2.2 Etapes de dimensionnement d'un système de pompage multi-sources

Les différentes étapes pour le dimensionnement d'un système de pompage sont [55] :

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

IV.2.2.1 Evaluation des besoins en eau

La détermination des besoins en eau pour la consommation d'une population donnée dépend essentiellement de son mode de vie.

Les besoins en eau estimés pour les zones rurales des pays pauvres sont de l'ordre de 25 litres par personne et 30 litres par tête de bétail.

Les besoins d'eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, des facteurs météorologiques comme la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, la saison de l'année considérée et de la méthode d'irrigation. Cependant, il est important de

se baser sur la pratique et l'expérience locale. La capacité du réservoir sera déterminée selon les besoins en eau journaliers et l'autonomie requise du système. [2]

IV.2.2.2 Calcule de l'énergie hydraulique nécessaire [27]

Le calcul de l'énergie hydraulique nécessaire nous mène à dimensionner la pompe, et pour la dimensionner nous devons tenir compte de deux facteurs suivants :

- ✓ La quantité d'eau requise.
- ✓ La hauteur que doit convaincre la pompe.

La puissance hydraulique P_h nécessaire pour faire déplacer l'eau d'un point à un autre est donnée par :

$$P_h = \rho \cdot g \cdot h \cdot q_v \quad (IV-2)$$

Avec :

- g : Accélération de la pesanteur (9.81m/s^2).
- h : Hauteur manométrique totale que doit convaincre la pompe (m).
- q_v : Débit volumique (m^3/s).
- ρ : Masse volumique d'eau (1000kg/m^3).

IV.2.2.3 Détermination de l'énergie solaire et du vent disponible [55]

Le site que nous avons choisi est celui de la région Bejaïa, (Latitude 36.45N , Longitude : 05.04E , Altitude : 2m), qui est une ville côtière de nord-est de l'Algérie. La région de Bejaïa est dotée d'un grand potentiel solaire, qui est caractérisée par une saison d'été chaude (Juin-Septembre) importante par rapport aux autres mois de l'année ; de même pour le gisement éolien en se basant sur la vitesse du vent, on constate que notre site est doté aussi d'un gisement éolien considérable avec une vitesse moyenne annuelle du vent de l'ordre 3.975m/s . Vu leur complémentarité, on peut dire que le couplage d'un système photovoltaïque et éolien s'avère très intéressant pour assurer la production d'énergie électrique durant toute l'année. Le site de Bejaïa est donc favorable pour l'installation d'un système de pompage hybride.

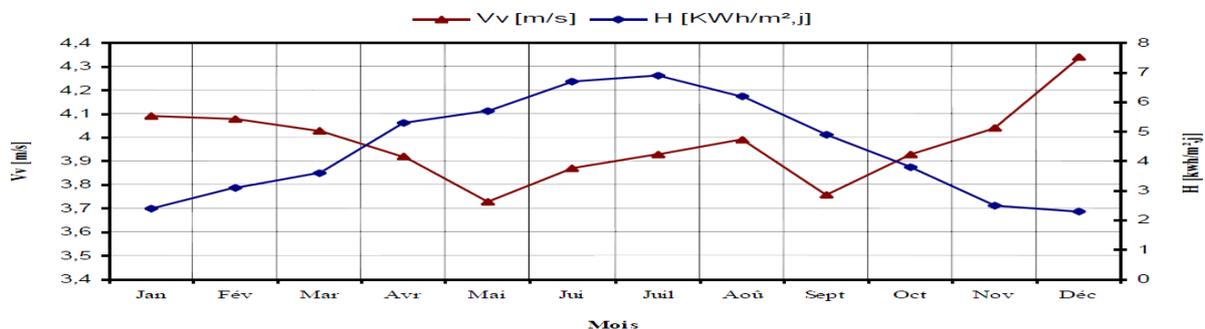


Figure (IV.2) : Irradiation solaire et vitesse du vent moyenne mensuelle journalière du site de Bejaïa de 1998 à 2007

IV.2.2.4 Choix des composantes

Nous allons dimensionner les différents éléments de notre système pour un réservoir d'eau, un débit nominal et une hauteur géométrique.

✓ Dimensionnement des panneaux

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 (τ_p), ainsi que des pertes environ de la puissance attribuable à la température et à la poussière. La dimension théorique de celui-ci sera de :

$$P_{pv} = \frac{E_c}{\tau_p(1 - \sum P_{pertes})} \quad (IV-3)$$

Le nombre de panneaux nécessaires se calcule par :

$$N_p = \frac{P_{pv}}{P_m} \quad (IV-4)$$

✓ Détermination de la taille des batteries

La capacité des batteries de stockage est déterminée à de la charge demandée maximale, elle est exprimée par :

$$C_{batt} = \frac{E_c \cdot N_{jaut}}{V_{batt} \cdot DOD \cdot \eta_{batt}} \quad (IV-5)$$

Avec :

- N_{jaut} : le nombre de jours d'autonomie des batteries.
- V_{batt} : la tension nominale de la batterie.
- DOD : le taux de décharge maximum des batteries.
- η_{batt} : le rendement des batteries.

✓ Dimensionnement du moteur asynchrone

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 :

$$P_{ele} = \frac{P_{mec}}{\eta_m} \quad (IV-6)$$

Avec :

- P_{mec} : puissance mécanique requise par la pompe.
- η_m : le rendement du moteur.

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 soustraites des pertes au niveau de l'onduleur. Nous aurons par la suite :

$$P_d = \frac{P_{ele}}{\eta_{ond}} \quad (IV-7)$$

Avec :

- η_{ond} : le rendement de l'onduleur.

Les besoins journaliers énergétiques en électricité peuvent être évalués comme suit :

$$E_c = P_d \tau_p \quad (IV-8)$$

Avec :

- E_c : Energie électrique journalière demandée par la charge en (kWh/j).
- τ_p : Temps de pompage nécessaire pour satisfaire le besoin en eau et qui se calcule comme suite :

$$\tau_p = \frac{V}{Q_n} \quad (IV-9)$$

Avec :

- V : Quantité d'eau requise (m^3)
- Q_n : Débit nominal (m^3/h)

✓ Dimensionnement de la pompe :

Comme nous l'avons déjà mentionné 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 suivante :

$$P_{mec} = \frac{P_h}{\eta_p} \quad (IV-10)$$

Avec :

- η_p : le rendement de la pompe.

✓ Dimensionnement du réservoir d'eau [27], [56]

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 :

$$L_{rmin} = N_{fa}(N_{per}C_{per} + C_{b\beta}C_{irr}) \quad (IV-11)$$

Avec :

- L_{rmin} : 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.
- $C_{b\beta}$: Quantité moyenne d'eau destinée pour la consommation des bétails d'une famille quotidienne.
- 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 :

$$L_{rmax} = 1.5N_{fa}(N_{per}C_{per} + C_{b\beta}C_{irr}) \quad (IV-12)$$

IV.3 Application

Pour ce qui est de notre cas, nous avons pris un exemple d'un réservoir d'eau qui alimente un petit village à la wilaya de Bejaia qui contient 170 familles de 7 personnes avec une consommation économisée d'eau (une famille Algérienne) Le volume moyen consommé par une personne est estimé à 25 litres/jours.

La quantité moyenne d'eau destinée pour la consommation des bétails d'une famille quotidiennement est 100 litres/jours.

La quantité moyenne d'eau destinée pour l'irrigation des plantes du jardin d'une famille est estimée par 150 litres/jours.

La consommation quotidienne du village est donc estimée par 72.25 m³ (selon l'équation IV-11) cependant nous allons prendre un réservoir de 105 m³ à 110 m³ (selon l'équation IV-12).

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

Afin de satisfaire les besoins quotidiens en eau, on a calculé les différents éléments de notre système pour :

- Réservoir d'eau : $V = 110 \text{ m}^3$,
- Une hauteur : $h = 12 \text{ m}$,
- Débit volumique : $q_v(\text{désiré}) = 25 \text{ m}^3/\text{h}$,
- Rendement de la pompe : $\eta_p = 55\%$,
- Rendement du moteur : $\eta_m = 85\%$,
- Rendement de l'onduleur : $\eta_{\text{ond}} = 95\%$,
- Pertes qu'on suppose égale à 20%.

Donc on aura :

<i>Symboles</i>	<i>Expressions</i>	<i>Résultats</i>
Puissance hydraulique (P_{hyd})	$P_{\text{hyd}} = \rho g q_v h$	817.5 W
Puissance mécanique (P_{mec})	$P_{\text{mec}} = \frac{P_{\text{hyd}}}{\eta_p}$	1486.36 W
Puissance électrique ($P_{\text{élec}}$)	$P_{\text{élec}} = \frac{P_{\text{mec}}}{\eta_m}$	1748.66
Puissance demandée par les modules (P_{dem})	$P_{\text{dem}} = \frac{P_{\text{élec}}}{\eta_{\text{ond}}}$	1840.69
Temps de pompage nécessaires pour satisfaire les besoins en eau (τ_p)	$\tau_p = \frac{V}{q_v}$	4.4 h
Energie électrique journalière demandée ($E_{\text{élec}}$)	$E_{\text{élec}} = P_{\text{dem}} \tau_p$	8099.036 Wh/j
Puissance du générateur PV (P_{PV})	$P_{\text{PV}} = \frac{E_{\text{élec}}}{\tau_p(1 - \text{pertes})}$	2300.8625 W
Nombre de panneaux (N_{pv})	$N_{\text{PV}} = \frac{P_{\text{PV}}}{P_{\text{Wc}}}$	21 panneaux
Nombre de panneaux série (N_{PVs})	$N_{\text{PVs}} = \frac{V_{\text{dc}}(1 - \alpha)}{V_m}$	7 panneaux
Nombre de panneaux parallèle (N_{PVp})	$N_{\text{PVp}} = \frac{P_{\text{PV}}}{\frac{V_{\text{dc}}(1 - \alpha)}{I_m}}$	3 branches

Tableau (IV.1): Dimensionnement du système de pompage

On a $N_{\text{pv}} = 21$ panneaux, pour un panneau de 110Wc de marque SIEMENS SM 110-24.

✓ Le choix de l'onduleur

Le dimensionnement de l'onduleur consiste à calculer le nombre d'onduleurs nécessaires pour le générateur photovoltaïque et éolien. Dans les petits systèmes hybrides un onduleur sera suffisant, mais pour un plus grand système hybride plusieurs onduleurs peuvent être nécessaires. La tension continue de l'onduleur doit être égale à la tension du générateur et de

fréquence égale à celle de la maison [57]. Pour les besoins de notre ferme, l'onduleur choisit est présenté dans le tableau (IV.2).

Type d'onduleur	Puissance max (W)	Tension de sortie (V)	Fréquence (Hz)
EFFEKTA KS-2000ST	2000	220	50

Tableau (IV.2) : Caractéristique de l'onduleur choisit

✓ **Groupement en série-parallel :**

Afin d'obtenir la puissance désirée, sous une tension convenable, il est nécessaire de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallel pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque (GPV). [29]

$$N_{PVs} \geq \frac{V_{dc}(1-\alpha)}{V_m} \tag{IV-13}$$

$$N_{PVp} = \frac{\frac{P_{PV}}{V_{dc}(1-\alpha)}}{I_m} \tag{IV-14}$$

Avec :

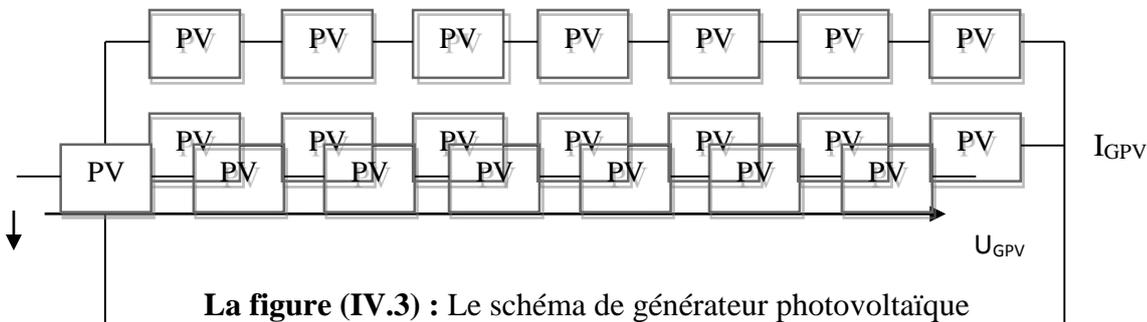
- α : Le rapport cyclique de l'élevateur de tension $(1-\alpha) = 0.46$;
- V_{dc} : La tension de bus continu à l'entrée de l'onduleur.

D'après les équations (IV-13), (IV-14), et pour $V_{dc} = 465V$. On aura :

$N_{PVs} = 7$ panneaux en séries.

$N_{PVp} = 3$ branches en parallèles.

La figure (IV.3) représente le schéma de générateur photovoltaïque :



La figure (IV.3) : Le schéma de générateur photovoltaïque

Avec :

$$U_{GPV} = N_{PVs}V_m = 7 \times 35 = 245V$$

$$I_{GPV} = N_{PVp}I_m = 2 \times 4.95 = 6.3 A$$

$$P_{PV} = U_{GPV}I_{GPV} = 245 \times 6.3 = 1543.5 W$$

$N_{batt} = 6$ batteries (la capacité $C_{batt} = 150$ Ah) avec : $N_{batt} = C_{batt,tot} / C_{batt,u}$

IV.4. Contrôle du système multi-sources de production d'énergie

Dans notre système nous prenons le système photovoltaïque de 21 panneaux comme générateur principal, tandis que le système éolien de 1KW sera un générateur complémentaire et les batteries seront pour utilisées pour la compensation. Un algorithme assure la gestion d'énergie des différentes sources.

IV.5 Gestion du système multi-sources

IV.5.1 Organigramme de gestion d'énergie [29]

Afin de faire fonctionner le système global d'une manière parfaitement autonome, il est primordial de gérer de façon optimale le flux d'énergie entre les différents composants.

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 (protection contre les surcharges et les décharges profondes), pour préserver les propriétés physico-chimiques des batteries et de prolonger leur durée de vie.

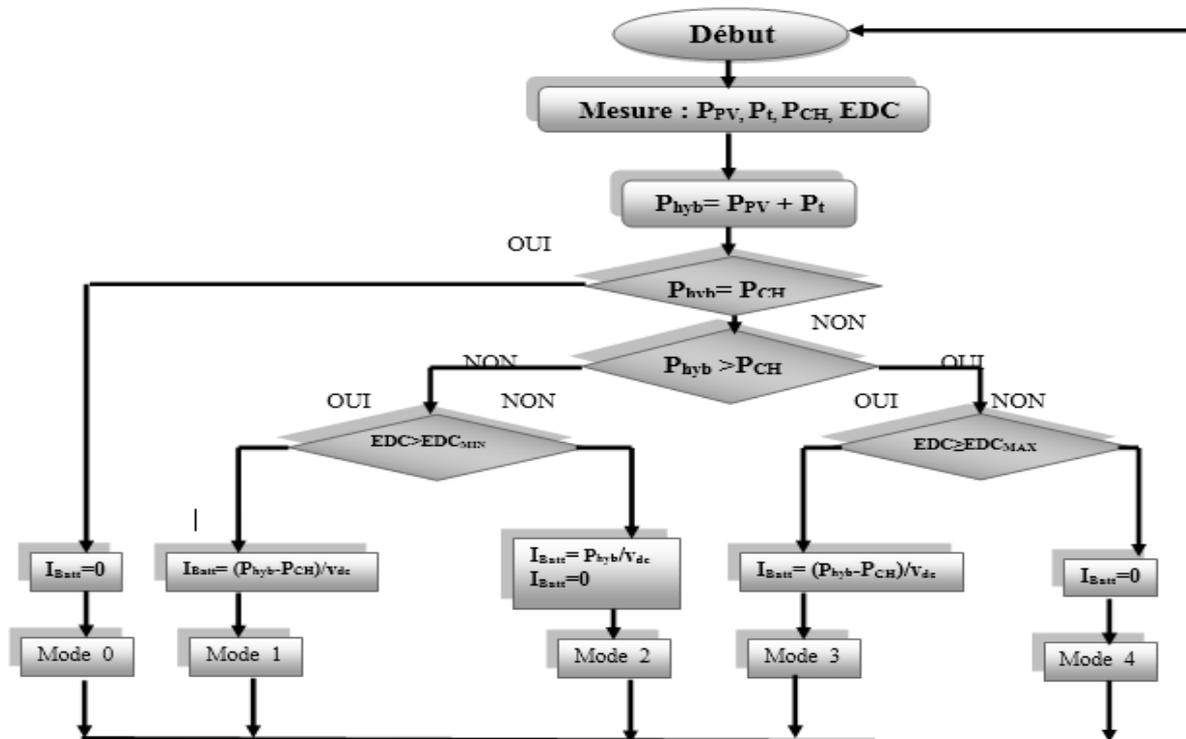


Figure (IV.4) : Organigramme de gestion d'énergie dans le système global

A partir de cet algorithme, nous pouvons donc établir les modes de fonctionnement de ce système de gestion. On prend P_{hyb} la puissance fournie par les deux générateurs (photovoltaïque et éolien) et P_{ch} la puissance demandée par la charge.

IV.5.2 Les modes de la gestion [29]

Mode 0 : quand la puissance fournie par les deux générateurs photovoltaïque et éolien (P_{hyb}) est égale à la puissance demandée par la charge (P_{ch}), cela va conduire à l'alimentation directe de la charge.

Mode 1 : la puissance hybride (P_{hyb}) est inférieure à la puissance demandée par la charge (P_{ch}), ce manque de puissance sera compensé par la batterie étant donné que l'état de charge de la batterie est supérieur à EDC_{min} .

Mode 2 : est la situation où la puissance hybride (P_{hyb}) est insuffisante pour alimenter la charge, et l'état de charge de la batterie est inférieure à EDC_{min} . On déconnecte donc 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 3 : la puissance hybride (P_{hyb}) est supérieure à la puissance demandée par la charge (P_{ch}) et l'état de charge de la batterie est inférieur à EDC_{max} , on alimente la charge et on charge la batterie.

Mode 4 : la puissance hybride (P_{hyb}) est supérieure à la puissance demandée par la charge (P_{ch}) et l'état de charge de la batterie est supérieur à EDC_{max} , on déconnecte la batterie et la charge sera alimentée par les deux générateurs (photovoltaïque et éolien). Et le surplus d'énergie sera dirigé vers une résistance de délestage.

IV.6 Calcule de la vitesse de référence

La vitesse de référence (Ω_{ref}) est calculée en fonction de la puissance totale (photovoltaïque, éolienne et batteries), elle est donnée par la relation suivante :

$$\Omega_{ref} = \Omega_n \times \sqrt[3]{\frac{P_{tot} \times \eta}{P_n}} \quad (IV.14)$$

Avec :

- Ω_n : Vitesse nominale de la machine asynchrone [rad/s].
- P_{tot} : Puissance totale (photovoltaïque, éolienne et batteries) [W].
- η : Rendement du groupe motopompe.
- P_n : Puissance nominale du moteur [W].

IV.7 Commande vectorielle de moteur asynchrone [38]

Pour commander une machine alternative, on rencontre des difficultés dans le fait qu'il existe un couplage fort entre les variables d'entrées, sortie et internes.

Afin d'obtenir les performances souhaitées, la stratégie de commande des machines à courant alternatif consiste souvent à rendre le comportement électromécanique similaire à celui d'une machine à courant continu. Dans le cas de la machine asynchrone, il est possible de réguler soit :

- ✓ Le flux statorique ;
- ✓ Le flux rotorique ;
- ✓ Le flux d'entre fer ;

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.

➤ Structure de la commande vectorielle par orientation du flux rotorique [29]

✓ Contrôle directe de flux

Dans ce chapitre nous appliquons la commande vectorielle directe à la machine asynchrone.

Les équations munies de la contrainte $\phi_{qs} = 0$ et $\phi_{dr} = \phi_r$ se simplifient :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{dr} = \sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} + \left(R_s + \frac{M^2}{L_r^2} R_r \right) i_{ds} - \sigma L_s \omega_s i_{qs} - \frac{M R_r}{L_r^2} \phi_r \\ V_{dq} = \sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} + \left(R_s + \frac{M^2}{L_r^2} R_r \right) i_{qs} + \sigma L_s \omega_s i_{ds} + \frac{M_r}{L_r^2} \omega \phi_r \\ \frac{d\phi_r}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{ds} - \frac{1}{T_r} \phi_r \\ \omega_r = \frac{M i_{qs}}{T_r \phi_r} \\ P_{em} = \frac{C_{em} \omega_s}{p} \\ C_{em} = \frac{PM}{L_r} \phi_r i_{qs} \end{array} \right. \quad (IV.15)$$

➤ Découplage entrée-sortie

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\sigma T_s \frac{di_{ds}}{dt} + R_s i_{ds} \right) = V_{ds} + \sigma L_s \omega_s i_{qs} - \frac{M}{L_r} \frac{d}{dt} \frac{d\phi_r}{dt} \\ \left(\sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} + R_s i_{qs} \right) = V_{qs} - \omega_s \left[\sigma L_s i_{ds} + \frac{M}{L_r} \phi_r \right] \end{array} \right. \quad (IV.16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\left(\sigma T_s + \frac{M}{L_r L_s} \right) \frac{di_{ds}}{dt} + R_s i_{ds} \right) = V_{ds} + \sigma L_s \omega_s i_{qs} \\ \left(\sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} + R_s i_{qs} \right) = V_{qs} - \omega_s \left[\sigma L_s i_{ds} + \frac{M}{L_r} \phi_r \right] \end{array} \right. \quad (IV.17)$$

Les tensions $\ll V_{ds}, V_{qs} \gg$ sont définies par le système :

$$\begin{cases} V_{ds} = \left(\sigma T_s + \frac{M^2}{L_r L_s} \right) \frac{di_{ds}}{dt} + R_s i_{ds} \\ V_{qs} = \sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} + R_s i_{qs} \end{cases}$$

Ce qui nous donne à partir du système :

Avec :

$$\begin{cases} e_d = -\sigma L_s \omega_s i_{qs} \\ e_q = \omega_s \left[\sigma L_s i_{ds} + \frac{M}{L_r} \Phi_r \right] \end{cases}$$

IV.8 Commande MLI

La MLI est une stratégie de commande analogique, elle est utilisée pour générer les signaux de commande qui permettent l'ouverture et la fermeture des interrupteurs utilisés dans les deux convertisseurs de la chaîne étudiée. Le principe de MLI se base sur la comparaison entre un signal sinusoïdal appelé référence et un signal triangulaire ou en dents de scie appelé porteuse, tel que $f_{\text{porteuse}} > 20 f_{\text{référence}}$, on obtient à la sortie des convertisseurs des tensions ou des courants en forme de plusieurs créneaux rectangulaires de largeurs convenables.

IV.9 Simulation du système global

La figure (IV.4) montre le schéma global du système de pompage multi-sources (photovoltaïque, éolien, avec stockage). La simulation de ce système global se fait sous Matlab/Simulink.

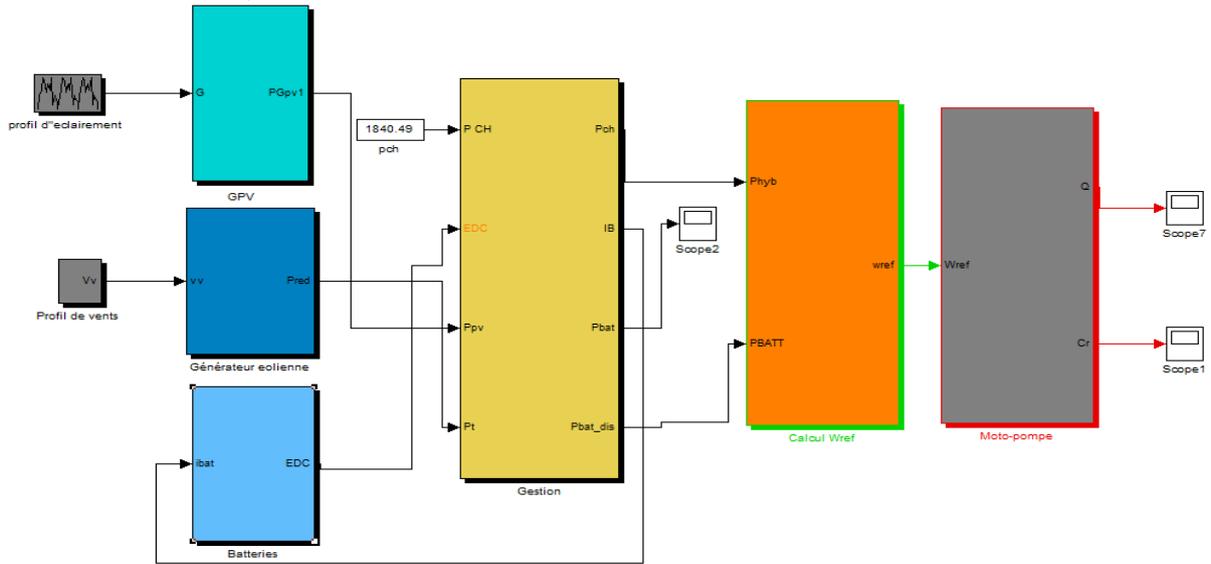


Figure (IV.5) : Schéma bloc du système de pompage multi-sources sous Matlab/Simulink

Les figures (6) et (7) représentent les variations de l'irradiation solaire et les vitesses de vents respectivement :

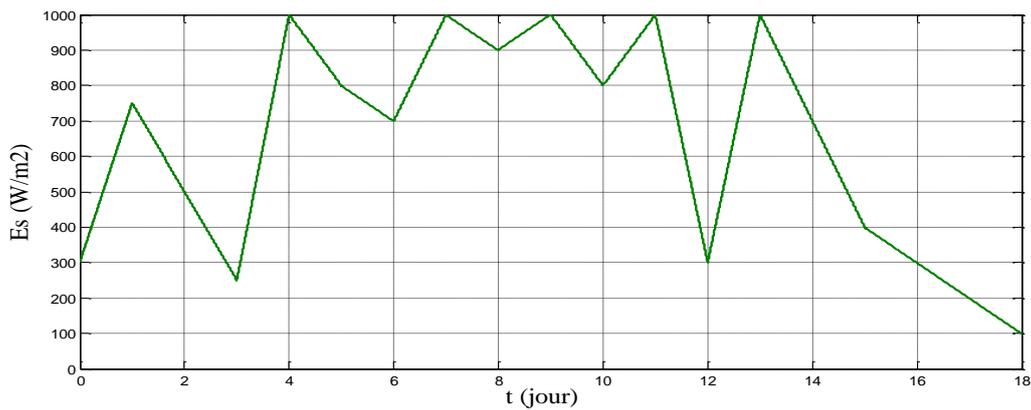


Figure (IV.6) : Profil de l'irradiation solaire

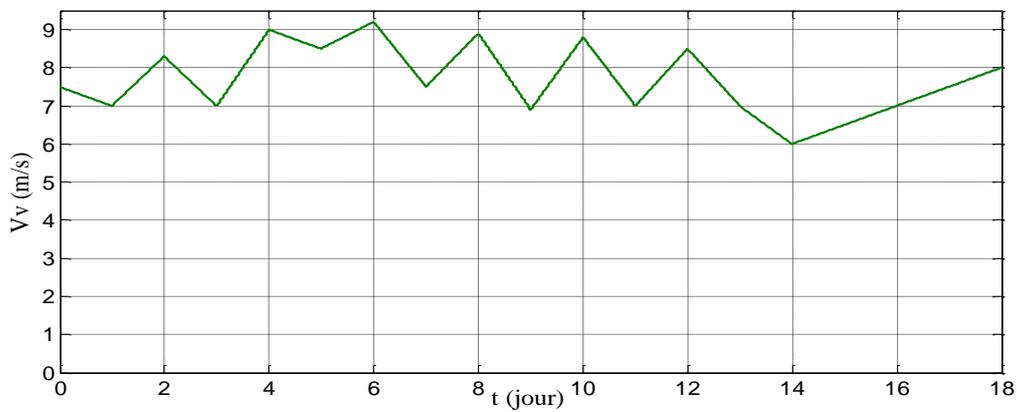


Figure (IV.7) : Profil du vent.

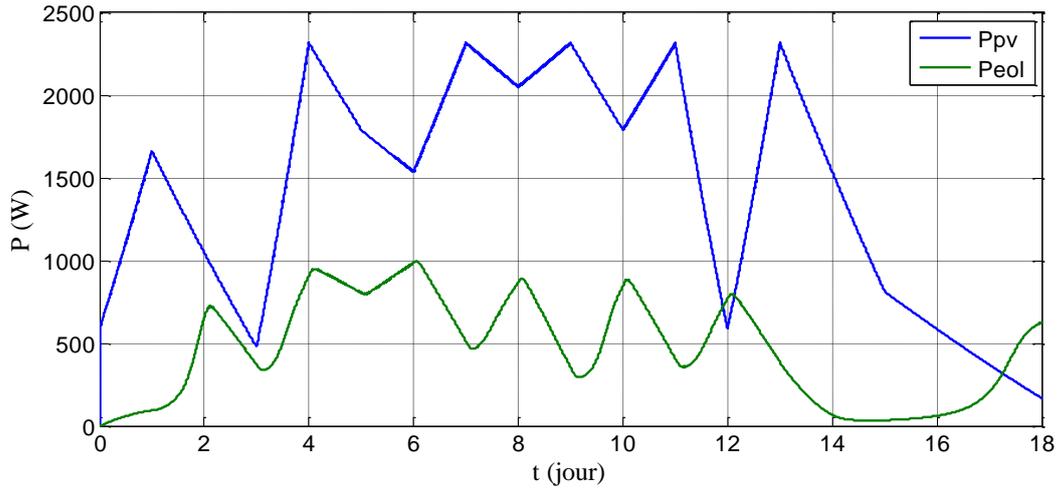


Figure (IV.8) : Les puissances (photovoltaïque et éolienne) avant la gestion.

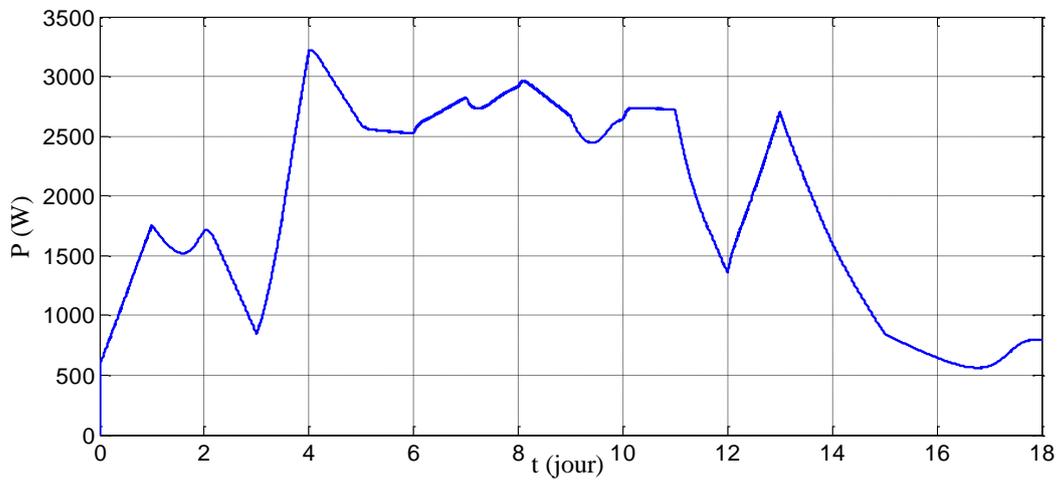


Figure (IV.9) : La puissance hybride (photovoltaïque + éolienne) avant la gestion.

Les figures (IV.8) (IV.9) représentent respectivement les allures de la puissance photovoltaïque et éolienne et hybride à la sortie des deux générateurs (avant la gestion).

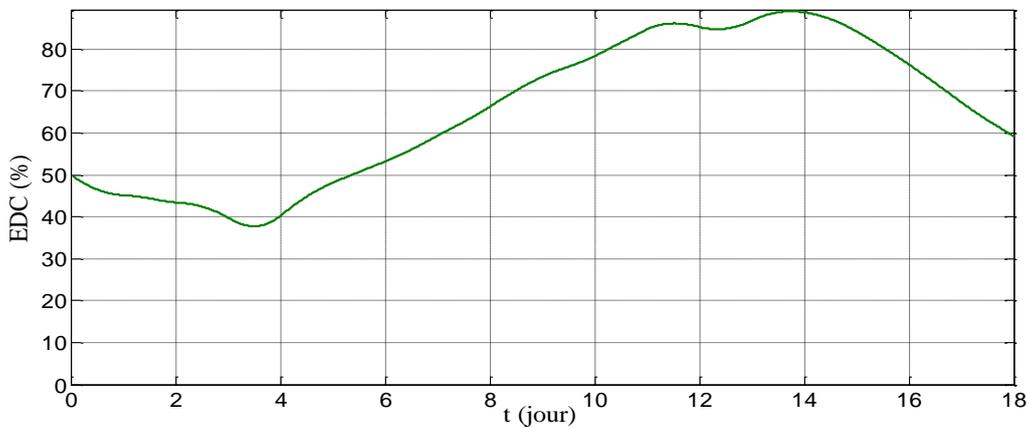


Figure (IV.10) : L'état de charge de la batterie

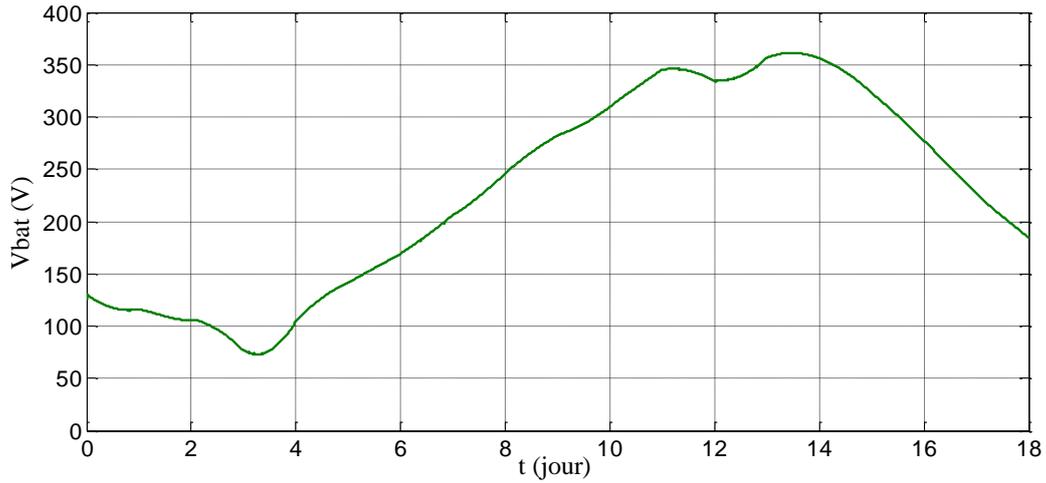


Figure (IV.11) : Tension des batteries

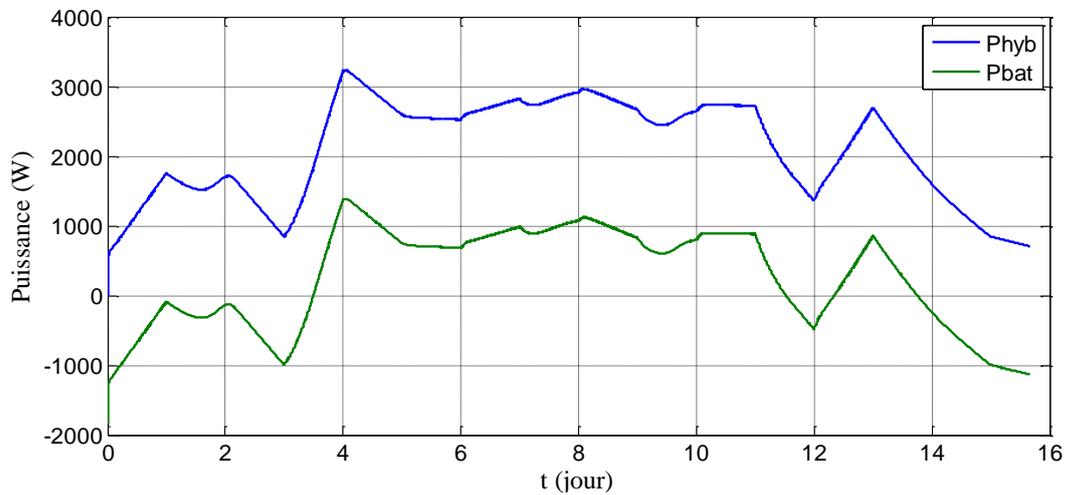


Figure (IV.12) : Allure de puissance (charge et décharge) de la batterie

On remarque que l'allure de la tension de la batterie dans la figure (IV.11) ainsi que celle de l'état de charge dans la figure (IV.10) évoluent de la même manière. Donc l'EDC est l'image de la tension. Et la figure (IV.12) représente les puissances (P_{hyb} , P_{bat}), alors on remarque que la puissance hybride et celle de la batterie (charge et décharge) sont complémentaires.

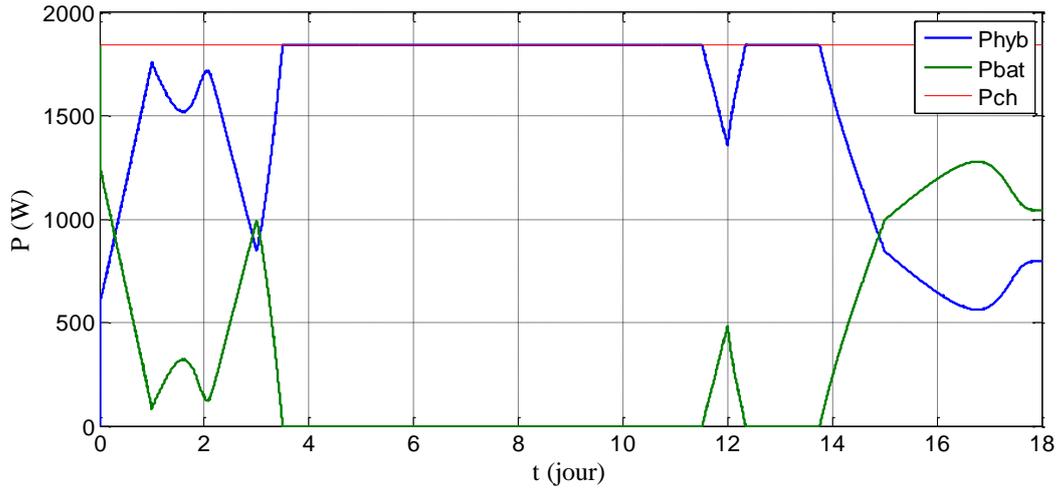


Figure (IV.13) : Allure des puissances (hybride, batteries et demandée) après la gestion.

Dans la figure (IV.13) on remarque que les puissances (hybride, batterie) sont complémentaires. À l’instant (0 à 3.5), (11.5 à 12,2) et (14 à 18), la batterie compense le manque de puissance pour alimenter la charge ($P_{hyb} < P_{ch}$). À l’ instant (3.5 à 11.5) la puissance hybride est supérieure à la puissance demandée ou bien égale ($P_{hyb} \geq P_{ch}$). Donc, la batterie ne contribue pas.

Alors dans ce cas la batterie comporte comme une source (compense le manque d’énergie pour alimenter la charge).

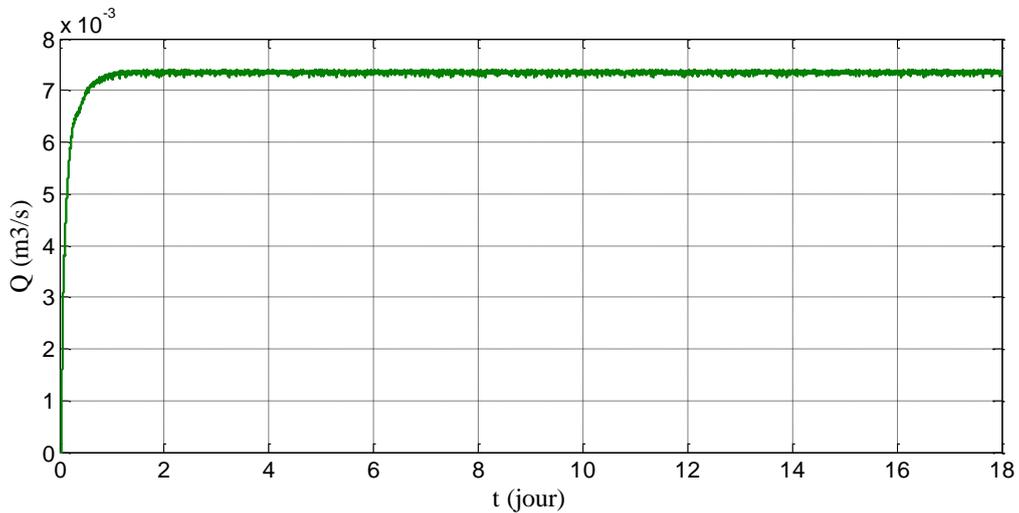


Figure (IV.14) : l’évolution de débit.

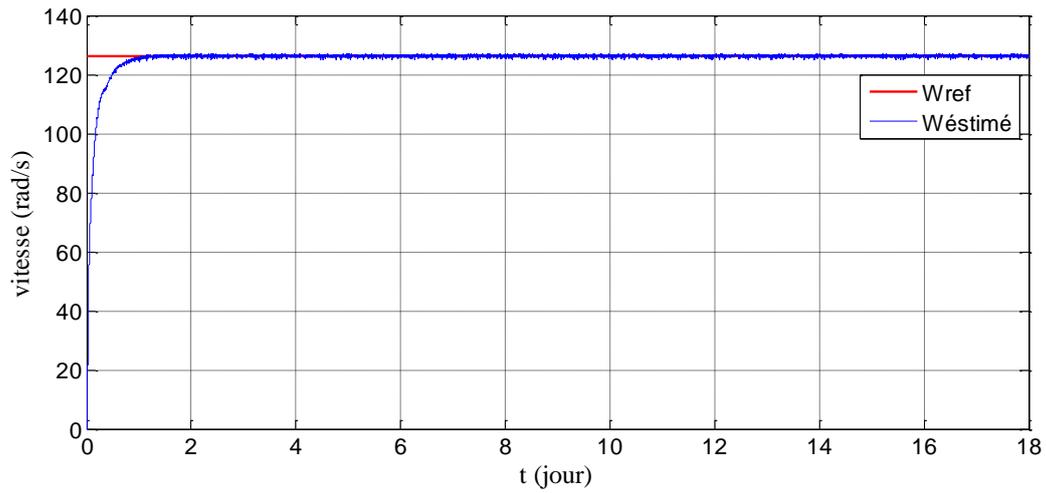


Figure (IV.15) : Vitesse de référence et estimée.

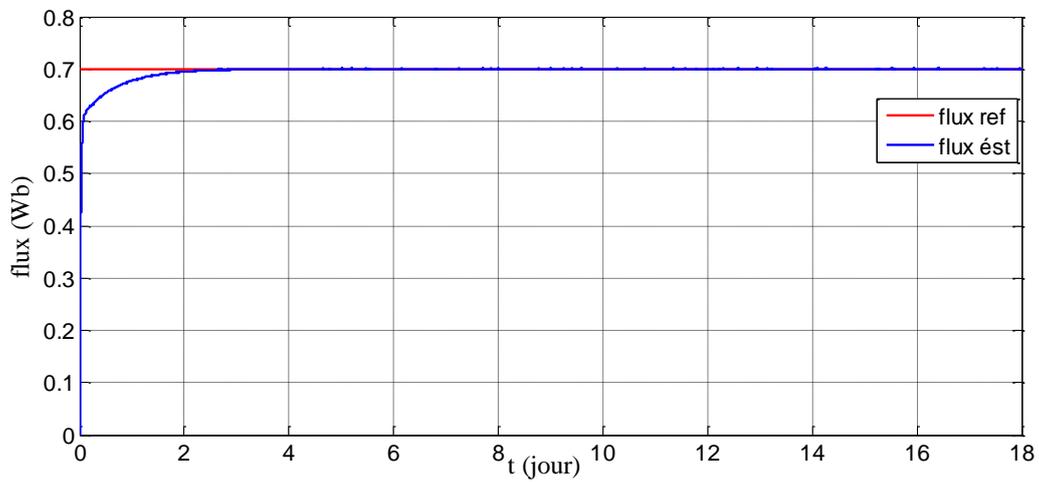


Figure (IV.16) : Flux de référence et estimée.

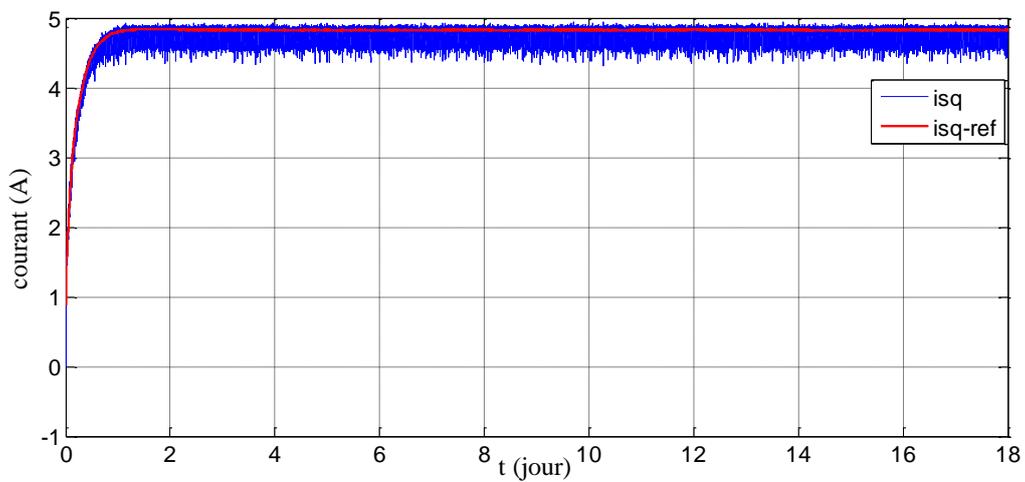


Figure (IV.17) : L'évolution de courant quadrature ($isq-ref$, isq).

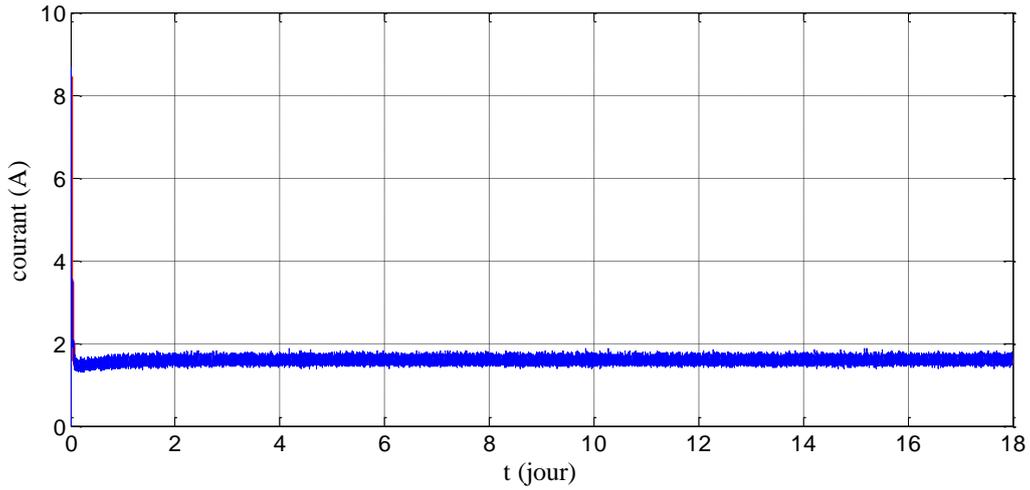


Figure (IV.18) : L'évolution de courant directe (isd-ref, isd).

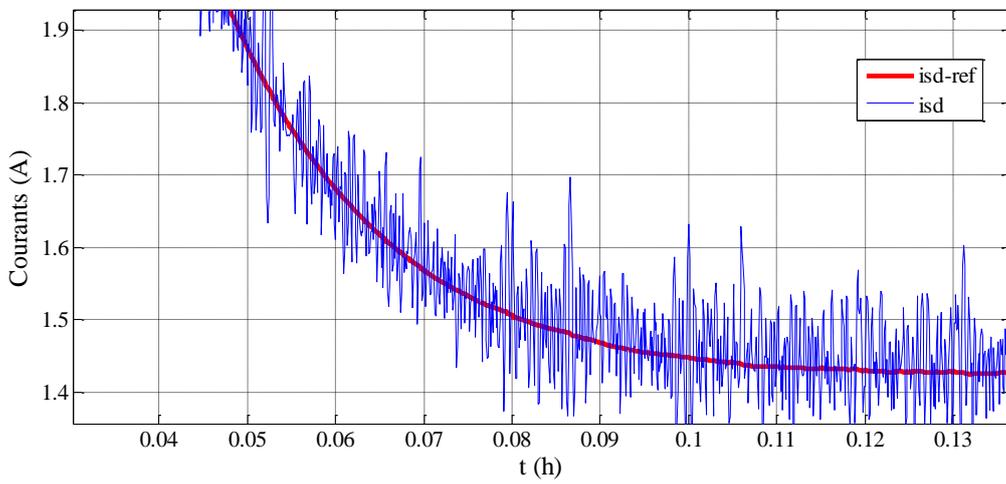


Figure (IV.19) : Zoom pour L'évolution de courant directe (isd-ref, isd).

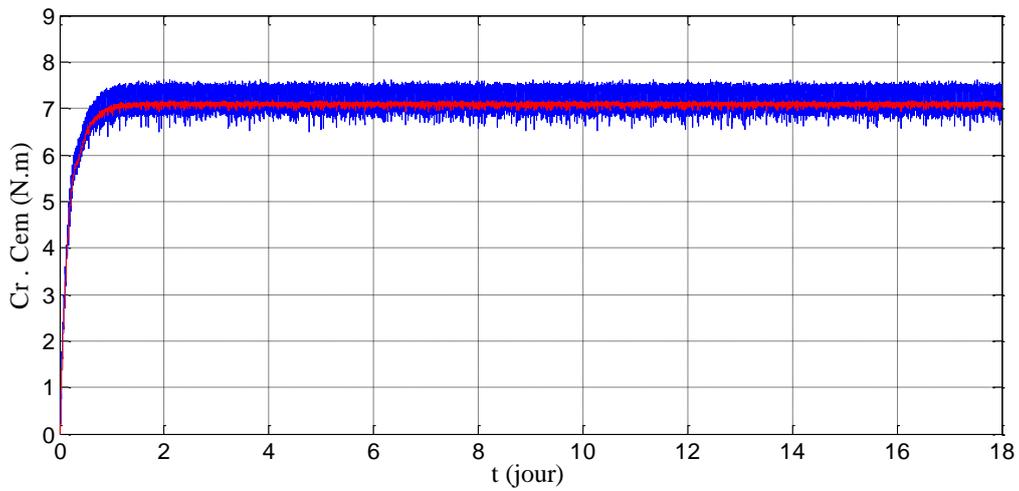


Figure (IV.20) : Le couple résistant et électromagnétique.

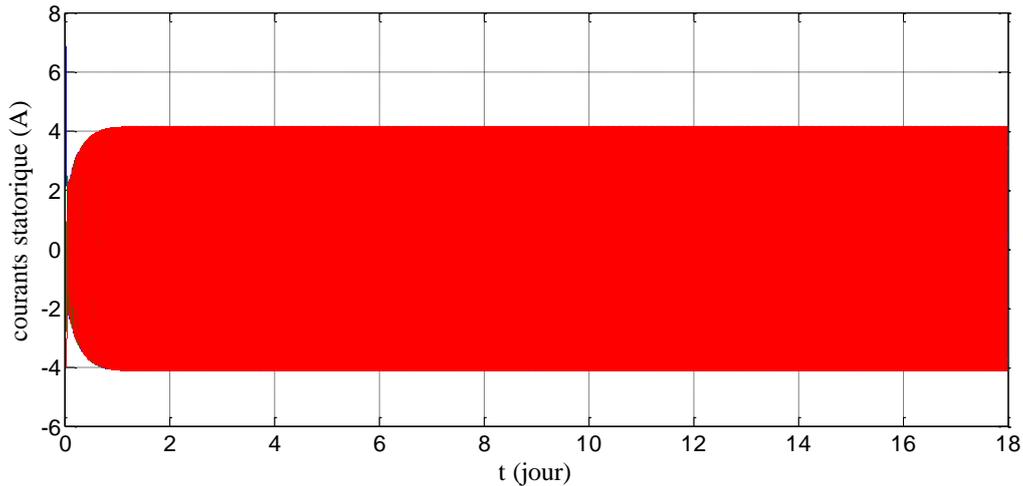


Figure (IV.21) : L'évolution des courants statoriques.

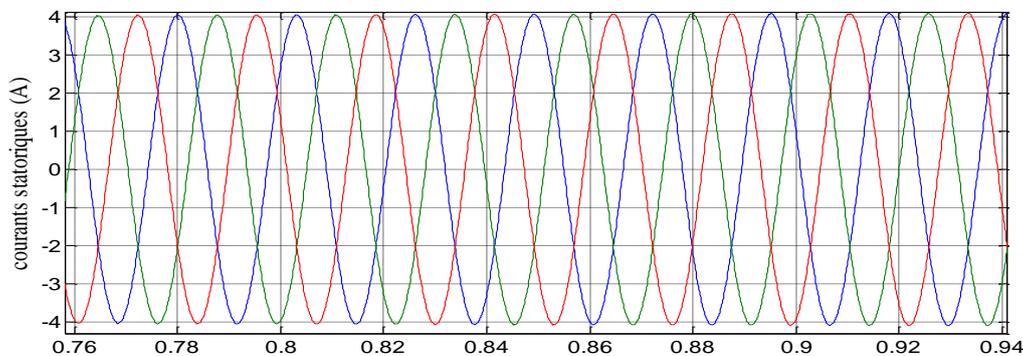


Figure (IV.22) : Zoom pour l'évolution des courants statoriques.

On remarque que la vitesse estimée (figure (IV.15)), le flux (figure (IV.16)), et les courants (directe et quadrature) sur les figures (IV.17), (IV.18) et (IV.19) suivent leur référence. Le débit d'eau est quasiment constant figure (IV.14).

Les figures (IV.21) (IV.22) montrent les courants statorique, dont on remarque l'aspect sinusoïdal de ces courants.

IV.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les étapes nécessaires pour le dimensionnement d'un système de pompage multi-sources pour un site situé dans la région de Bejaia, capable de fournir l'énergie nécessaire pour alimenter la charge, là on a mis un algorithme de gestion qui assure la disponibilité de l'énergie et le bon fonctionnement durant l'année ainsi que l'interprétation des résultats de simulation du système globale ont été présentées.

Nous pouvons constater que ces résultats ont une grandes importance pour le fonctionnement de ce type d'installation.

Conclusion générale

Vu la grande superficie du territoire algérien, de nombreuses habitations sont isolées ou à une distance importante du réseau électrique. L'état a affiché sa volonté pour le développement des énergies renouvelables permettant au pays d'avoir une industrie nationale.

L'objectif principal de notre travail était de dimensionner et de développer un algorithme de gestion d'énergie pour un système de pompage multi-sources composé d'un générateur photovoltaïque, un générateur éolien, d'un banc de batteries et d'un groupe motopompe doté d'un réservoir d'eau, pour assurer la satisfaction des besoins en eau pour une ferme isolée située à la région de Bejaia.

L'utilisation des énergies renouvelables dans les sites isolés pour différentes applications tel que le pompage d'eau présente un intérêt très important.

Dans le premier chapitre de notre travail, nous avons commencé par une présentation des généralités sur les composants de système de pompage multi-sources.

Dans le deuxième chapitre, nous avons modélisé les deux chaînes de conversion photovoltaïque-éolien, ce point nous a aidé à faire une simulation avec le logiciel Matlab Simulink de chaque sous système et de sélectionner un ensemble de modules photovoltaïques et éoliens de petite puissance adaptés pour générer de l'électricité à partir du vent et de la ressource solaire disponible. Pour le système d'appoint nous avons opté pour un système de stockage qui peut compenser les moments d'insuffisance d'énergie.

Dans le troisième chapitre, nous avons optimisé les deux chaînes de conversion (photovoltaïque et éolienne) en utilisant deux méthodes d'MPPT, pour assurer le fonctionnement au point de puissance maximale.

Dans le quatrième chapitre, nous avons dimensionné un système multi-sources (photovoltaïque, éolien, batteries) pour répondre au besoin en eau d'une ferme. Avec un algorithme de gestion qui assure la disponibilité de l'énergie, le bon fonctionnement malgré les changements climatiques et la protection des batteries contre les décharges et les surcharges ce qui va aider à augmenter leurs durées de vie.

Les systèmes seuls, éolien ou photovoltaïque, nécessitent beaucoup d'accumulateurs pour pallier à l'intermittence des gisements. Un bon dimensionnement des systèmes hybrides autonomes (panneaux solaires photovoltaïques et des éoliennes avec stockage) est donc une solution potentielle qui limite l'intermittence des ressources, l'amélioration des conditions de vie des populations dans les régions isolées en assurant la disponibilité permanente de l'eau et de l'énergie.

Au terme de cette étude, nous ne saurions avoir la prétention d'avoir exploré le sujet dans tous ses contours. Nous espérons toutefois que ce mémoire pourra être exploité et amélioré dans le cadre de nouvelles recherches.

Bibliographie

- [1] A.K. Traoré, « Gestion d'un système autonome hybride photovoltaïque éolien pour applications agricoles ». Mémoire comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique, Université de Québec A Trois-Rivières, Juillet 2016.
- [2] A. Hadj Arab, M. Benghanem, A. Gharbi, « Dimensionnement de systèmes de pompage photovoltaïque ». Rev. Energ. Ren. Vol. 8 (2005) 19 – 26, Alger.
- [3] A. Dhaker, « Contribution au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques avec batteries pour l'habitat résidentiel autonome »
- [4] O. Deruelle, « Mise au point d'un système de spectroscopie pour mesurer des sections efficaces neutroniques applicables à un possible développement du nucléaire comme source d'énergie », Thèse de Doctorat en sciences, Université de Paris XI ; pp.9-12, 2002.
- [5] A. Labouret, M. Viloz, « Energie solaire photovoltaïque », Edition Dunod, Paris, 2006.
- [6] S. Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [7] B. Fleche, D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque », Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 2007.
- [8] <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16679>. Décembre 2017
- [9] A.N. belhouvine, S.A. Zaidi, « Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome »; Mémoire de Master en Génie Electrique, Université de Bejaia, 2012.
- [10] C. Bernard, C.S. Oliveira, B. Laval, C. Vaudouer, « Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue », Rapport rédigé dans le cadre de l'Université BA04 Energie renouvelables 2009.
- [11] R. Maouedj, « application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah », Mémoire de Magister en Physique, Université de Tlemcen, 2005.
- [12] M.N. Mansouri, N. Ghanmi ET M.F. Mimouni, « Commande et analyse des performances d'une station de pompage photovoltaïque fonctionnant en régime optimal » Revue des Energies Renouvelables Vol. 11, N°1 (2008) 1 – 17.
- [13] B. Deoda, D. Lucien, D. Adrien, G. Simon, « Etudes des cellules photovoltaïques », Rapport d'une recherche, lycée Jean Mannel-Annemasen. France, 2004.
- [14] Mirecki, « Etude comparative de chaîne de conversion d'énergie dédié à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat de l'Institut national polytechnique de Toulouse, 2005.
- [15] H. Belghitri, « Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque », Université Abou-bakr belkaid de Tlemcen, 2010.

Bibliographie

- [16] « Energie éolienne, Théorie, conception et calcul pratique des installations », Désiré Le Gourières, Edition EYROLLES, 1980.
- [17] La verdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme, « Technologie des systèmes éoliens – Intégration dans les réseaux électriques », la Revue 3EL, no. 39, 2004.
- [18] <http://ooxygene.alwaysdata.net/eolienne.html>. Décembre 2017
- [19] O. Gergaud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur ». Décembre 2009.
- [20] H. Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable ». Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers centre de Bordeaux, Décembre 2003.
- [21] http://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_%C3%A0_courant_continu. Décembre 2017
- [22] http://www.energieplus-lesite.be/energieplus/page_11530.htm. Décembre 2017
- [23] http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_%C3%A9lectrique#Machines_.C3.A0_courant alternatif. Décembre 2017
- [24] <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11531>. Décembre 2017
- [25] L. Boudjenah, « Etude d'un système de pompage hybride (éolien, photovoltaïque) ». Mémoire de Master. Université de Bejaia, 2013.
- [26] KY. Thierry, S. Maurice, « Système photovoltaïque dimensionnement pour pompage d'eau, pour une irrigation goutte à goutte ». Mémoire de DEA en physique Appliquée, université d'Ouagadougou, 2010.
- [27] Ch. Serir, « Optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque ». Thèse de Magister, Université de Bejaia, 2012.
- [28] D. Rekioua, cours, TP « module système de conversion d'énergie photovoltaïque ». Université de Bejaia, 2016/2017.
- [29] Ch. Serir, « Commande d'un système multi-sources photovoltaïque éolienne associé à un système de stockage ». Thèse de doctorat. Université de Bejaia, 2017.
- [30] S. Brigand, « Principe du photovoltaïque », complément technique 2008, www.Editionsdumoniteur.com
- [31] M. Liwshitz, « Calcul des machines électriques », Tome II, Editions SPES, Lausanne, Mai 1970.
- [32] L. Mokrani, « Contribution à la CAO optimisée des machines électrique, application au moteur linéaire à induction ». Thèse de doctorat, Décembre 2005.

Bibliographie

- [33] M. E. H. Benbouzid, D. Dialloet, M. Zeraoulia, « Advanced fault-tolerant control of induction motor drives for ev/hev traction applications: from conventional to modern and intelligent control techniques », *IEEE TVT*, vol.56, no.2, Mar. 2007.
- [34] C. Aziz, « Etude pour la conception d'une machine synchrone a rotor externe : directement couplée aux roues d'un système de traction électrique ». Mémoire de magistère, Université Hadj Lakhdar, Batna. Novembre, 2011.
- [35] J. Caron, J. Hautier, « Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone », Livre Edition TECHNIP, Paris, 1995.
- [36] S. Chekroun, A. Benoudjit et B. Abdelhadi. « Approche géométrique pour la conception assisté par ordinateur des machines a induction ». Conference on electrical engineering Batna, Algérie 11 Décembre 2002.
- [37] E. Levi, M. Sokola, « A novel saturation adaptive rotor flux estimator for rotor flux oriented induction machines ». 7th European Conference on Power Electronics and Applications EPE'97, Trondheim, Norway, 8-10 September, 1997, pp. 1-8.
- [38] K. Idjdarene, « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes ». Thèse de doctorat. Université de Bejaia, Lille 1, 2009.
- [39] J. E. Brown, K. P. Kovacs et P. Vas, « A method of including the effects of main flux Saturation in the generalized equations of AC machines », *IEEE saturation in the Generalized equations of AC machines* », *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS.102, No. 1, 1983.
- [40] P. Vas, « Generalized analysis of saturated AC machines ». *Archiv für Electrotechnique*. No. 64, 28-29. Janvier, 1981, pp. 57-62.
- [41] D. Rekioua, K. Idjdarene, D. Aouzellag, T. Rekioua et A. M. Tounzi, « Modelling And study of an autonomous induction generator taking the saturation into account », 8th International Conference on modeling and Simulation of Electric Machines, Converters And Systems (ELECTIMACS 2005), Hammamet, Tunisia, April 17-20, 2005.
- [42] C. Nichita, D. Luca, B. Dakyo, and E. Ceanga, « Large band simulation of the wind speed for real time wind turbine simulators », *IEEE Trans. Energy Convers*, vol.17, no. 4, pp.523-529. Decembre, 2002.
- [43] O. Feddaoui, « Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération : Application aux Energies Renouvelables ». Mémoire de Magister. Université de Souk-Ahras, Algérie. 2014.
- [44] Florin Iov, Anca Daniela Hansen, Poul Sørensen, Frede Blaabjerg, « Wind Turbine Lockset in MATLAB/SIMULINK, General Overview and Description of the Models » Aalborg University March 2004.

Bibliographie

- [45] A. Abdelli, « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive ». Thèse de Doctorat. Université de Toulouse, France 2007.
- [46] M. Belatel, F. Benchikh, Z. Simohamed, F. Ferhat et F.Z. Aissous, « Technologie du couplage d'un système hybride de type photovoltaïque-éolien avec la pile à combustible pour la production de l'électricité verte ». *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 14 N°1 (2011) 145 – 162.
- [47] S.El Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau moyenne tension ». Thèse de doctorat d'école centrale de Lille, 2004.
- [48] D. Aouzellag, K. Ghedamsi, E.M. Berkouk, « Network power flux control of a wind generator », *Renewable Energy*, Vol. 34, pp. 615-622, 2009.
- [49] B. Nouri, « Fonctionnement à Fréquence de Commutation Constante des Convertisseurs de Puissance en Utilisant des Techniques de Commande Avancées ». Thèse de Doctorat. Université de Sétif, 2011.
- [50] R. Chenni, L. Zarour, E. Matagne et T. Kerbache, « Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque ». *Sciences et Technologie*, Vol. N°26, page 49-54, décembre 2007.
- [51] L. Croci. « Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/super condensateurs ». Thèse de doctorat. Université de Poitiers, 2013.
- [52] L. Zarour, « Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau ». Thèse de doctorat. Université de Constantine, 2010.
- [53] S. Lalouni, « Etude, commande et simulation d'une chaîne hybride (photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie électrique ». Thèse de Doctorat. Université de Bejaia, 2009.
- [54] A. Adjati, « Etude des machines asynchrones à double étoile en pompage ». Mémoire de Magister. Université de Bejaia, 2012.
- [55] M.L. Louazene, D. Korichi et B. Azoui, « Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque application sur le site de ouargla ». Mars 2013.
- [56] Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller, Bocar Sada Sy, « LE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens ». IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA.
- [57] Z. Benhachmi, « élaboration d'un modèle de dimensionnement d'un système hybride (solaire-éolien) alimentant une ferme dans la région des Aurès ». Mémoire de Magister. Université de Batna, 2012.

ANNEXES

Annexe 1 : paramètres de la machine asynchrone [29]

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

Puissance nominale	$P_n=1500W$
Tension	220/380V
courant	5.2/3A
La vitesse de rotation nominale	$N=1460tr/mn$
Nombre de paire de pôle	$P=2$
Inductance cyclique statoriques	$L_s= 0.4662 H$
Inductance cyclique rotoriques	$L_r= 0.4662 H$
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	$J = 0.0003 rad^{-1} .s^{-1}$

Annexe 2 : paramètres de la pompe centrifuge [29]

Vitesse nominale ω_n	150 rad /sec
Constante α_0	$4.9234*10^{-3} m / (rad/sec)^2$
Constante α_1	$1.5826*10^{-5} m/ (rad/s) (m^2/s)$
Constante α_2	$-18144m/ (m^3 /sec)^2$
Hauteur géométrique H_g	12m
Langueur de canalisation l	8.4m
Diamètre de canalisation d	0.06m
Coefficient de pertes de charge locales ou singulière ζ	6.3m
Coefficient de pertes de charge dans la canalisation	0.036m
La gravitation g	$9.81m^2/s$

Annexe 3 : paramètres de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil

Résistance statorique	5.75 Ω
Résistance rotorique	4.2 Ω
Inductance statoriques	0.4662H
Inductance rotoriques	0.4662H

Annexe 4 : paramètres de la batterie Victron Energy (deep cycle GEL) (bat 412151100)

Capacité de la batterie (Ah)	150
Tension de la batterie V_{bat} (V)	12
Profondeur de décharge PDD(%)	80
Coefficient de pertes R_T	0.75
Rendement (%)	90

Annexe 5 : paramètres de la turbine

Puissance nominale (W)	1000
Nombre de pales	3
Rayon de la turbine (m)	2.26
Vitesse nominale de la turbine (m/s)	3.4
Vitesse maximale de la turbine (m/s)	12.5