

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Projet de Fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master en
Électromécanique.

Options : Électromécanique.

Thème

**Etude et dimensionnement d'un système pompage
multi-source**

Préparé par :

Smaoun Abdenacer, Option : ELM

Allouti Syphax, Option : ELM

Encadré par :

Mr MEBAEKI Nasser-Eddine

Année Universitaire : 2024/2025

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 (*)
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : Smaoum
Prénom : Abdenacer
Matricule : 202033 00 7082
Spécialité et/ou Option : Electromécanique
Département : Genie Electrique
Faculté : Sciences et Technologie
Année universitaire : 2024 / 2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) : Master

Intitulé : Etude et dimensionnement d'un système de
Pompage multi source

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
22 / 09 / 2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes réglementaires)

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 (*)
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : ... Alhouti
Prénom : ... Syphax
Matricule : ... 191933.00.6439
Spécialité et/ou Option : ... Electronique
Département : ... Genie Electrique
Faculté : ... Sciences et Technologie
Année universitaire : ... 2024-2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) : ... Master

Intitulé : ... Etude et dimensionnement d'un système
... de pompage multi-source
.....

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques,
et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans
l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
22/09/2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

.....
AS
F

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes réglementaires)

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 exprimer nos vifs remerciements et nos sincères reconnaissances à Mr N. **MEBARKI**, pour sa disponibilité, ses conseils judicieux, ses directives et ses orientations concernant le travail proposé tout en nous accordant sa confiance et en nous faisant profiter de son large expérience tout au long de la réalisation de ce projet de fin d'étude.*

*Nos remercions les **membres du jury** qui ont fait l'honneur de participer au jugement de ce travail.*

Merci pour ce qui va lire ce travail.

Dédicace

Je dédié ce travaille à mes chers parents qui représente pour **moi**
la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas
cessé de m'encourager et de prier pour moi.

Aussi a **mes frères** et à toute ma famille,

À mes amis et collègues

À tous **mes enseignants** et **enseignantes** depuis le primaire À toute
âme modeste ayant soif de science et de savoir

Syphax ALLOUTI

Dédicace

*Je dédié ce travaille à mes **chers parents** qui représente pour moi*

la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas

Cessé de m'encourager et de prier pour moi.

*Aussi à mes **frères** et mes **sœurs** à toute ma famille,*

*À mes **amis** et collègues*

Wassim Massi Ayoub Oussama

*À tous mes **enseignants** et **enseignantes** depuis le primaire À toute*

âme modeste ayant soif de science et de savoir

Abdenacer SMAOUN

NOMENCLATURE

NOMENCLATURE

- Liste des symboles

E_s : L'ensoleillement.

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

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

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_{oct} : la température nominale de fonctionnement de la cellule ou du module solaire

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

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.

R_s : Résistance série [Ω].

I_{sat} : courant de saturation de la tension (A)

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].

R_p : Résistance shunt [Ω].

η_m : Rendement du module photovoltaïque.

η_0 : Rendement du générateur PV.

α : Coefficient de température.

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.

$[R_s]$: matrice des flux statoriques.

$[R_r]$: matrice des flux rotoriques.

M_0 : 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.

NOMENCLATURE

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

T_{em} : Le couple électromagnétique.

I_s et I_r : Respectivement inductance de fuite statorique et rotorique.

f_r : Coefficient de frottement.

Ω : vitesse mécanique du moteur.

J : Moment d'inertie ramené sur l'arbre de la machine.

C_{em} : Couple électromagnétique développé par la machine.

C_r : Couple résistant de la charge.

X : Grandeur physique (représente le vecteur tension, courant ou flux).

X_o : Composante homopolaire.

$[A]$: La matrice de transformation.

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

M : Inductances mutuelle.

L_r, L_s : Inductances respectivement cyclique rotorique, cyclique statorique.

ω : La pulsation mécanique.

ω_s : Pulsation des grandeurs statoriques.

ω_r : Pulsation des grandeurs rotoriques.

ρ : la densité d'air ($\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$).

S : La surface.

R : Le rayon.

v : La vitesse du vent.

P_{aero} : La puissance aérodynamique.

C_p : Coefficient de puissance de l'éolienne.

β : Angle de calage

Ω_t : La vitesse de la turbine

λ : Vitesse spécifique.

C_g : le couple de la génératrice.

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

C_t : le couple de la turbine.

C_{vis} : Le couple visqueux.

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

f : le coefficient de frottement visqueux.

V_{red} : La tension à la sortie du redresseur.

NOMENCLATURE

V_i, V_k : La tension appliquée à l'anode, cathode de la diode.

I_{hyb} : Courant hybride (éolien, photovoltaïque).

I_C : Courant circulant dans la capacité.

I_{ch} : Courant de charge.

C_{dc} : Capacité du bus continu.

I_C : Le courant qui traverse le condensateur.

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.

ε : Coefficient des pertes de charge locales.

K_p : Constante la canalisation.

Q : le débit de la pompe.

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

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).

E_{pv} : L'énergie électrique produite par un panneau photovoltaïque.

S_{pv} : la surface totale du panneau PV en (m²).

η_{pv} : le rendement du panneau PV.

E_{irr} : l'irradiation solaire sur un plan incliné en (kWh/m²).

P_m : Puissance crête du module (Wc).

V_L : La tension nominale de la charge.

V_m : La tension nominale du module.

P_L : la puissance demandée par la charge.

PPV : représente la puissance du module photovoltaïque choisi dans les conditions Standards.

$I_{rég}$: le courant maximal du régulateur que peut être géré à partir du système GPV.

- **Les Abréviations**

EDC : Etat de charge de la batterie.

P&O : Perturbation et observation.

HMT : Hauteur manométrique totale.

PV : Photovoltaïque.

MPPT: Maximum power point tracking.

NOMENCLATURE

GPV : Générateur photovoltaïque.

MPP : Le point de puissance maximal.

MAS : Moteur asynchrone.

MLI : Modulation de la longueur d'impulsion.

DC : Courant continu.

AC : Courant alternatif.

Sommaire

Table de matières

INTRODUCTION GENERAL	1
Chapitre I : Généralités sur les systèmes de pompage éolien photovoltaïque	3
I.1 Introduction.....	4
I.2 L'énergie solaire photovoltaïque	4
I.2.1 Historique	4
I.2.2 Conversion photovoltaïque	5
I.2.3 Les Avantages Et Inconvénients	6
I.3 L'énergie éolienne	7
I.3.1 Les principales composantes d'une éolienne	7
I.3.2 Principe de fonctionnement d'une éolienne	8
I.3.3 Les avantages et inconvénients	8
I.4 Les Systèmes hybrides	9
I.4.1 Système hybride éolien photovoltaïque	9
I.4.2 Présentation du système hybride photovoltaïque-éolien	10
I.4.3 Principaux composants du système d'énergie hybride photovoltaïque- éolien	11
I.5 Groupe moteur-pompe	11
I.5.1 Pompe	12
I.5.2 Moteurs	16
I.5.2.1 Moteur à courant continu.....	16
I.5.2.2 Moteur a courant alternatif.....	17
I.6 Différents types de convertisseurs	17
I.7 Conclusion	19
Chapitre II : Modélisation du système pompage multi-sources	20
II.1 Introduction.....	21
II.2 Présentation d'un système pompage multi-sources	21
II.3 Modélisation de la chaine photovoltaïque	21
II.3.1 Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV)	22
II.3.2 Recherche du point de puissance maximale de générateur photovoltaïque	26
II.3.3 La méthode de perturbation et d'observation (P&O)	26
II.4 Modélisation de convertisseur DC/DC	28
II.5 Modélisation du convertisseur DC/AC (Onduleur).....	29
II.6 Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil	31
II.6.1 Modélisation généralisée	32

II.6.1.1 Équations électriques.....	32
II.6.1.2 Équations magnétiques.....	32
II.6.1.3 Équation mécanique.....	33
II.6.2 Transformation de Park	34
II.6.2.1 Équations électriques au régime no saturé.....	35
II.6.2.2 Equations magnétiques au régime no saturé.....	36
II.6.2.3 Équations mécaniques au régime no saturé.....	37
II.7 Modélisation de la chaine de conversion éolienne	37
II.7.1 Modélisation de la vitesse du vent	37
II.7.2 Modélisation de la turbine	38
II.7.3 Caractéristique $C_p(\lambda)$ de la voilure	39
II.7.4 Modélisation du multiplicateur.....	39
II.7.5 Modélisation de l'arbre de transmission	39
II.8 Modélisation du redresseur.....	40
II.9 Modélisation du bus continu.....	41
II.10 Modélisation de la pompe centrifuge.....	41
II.11 Conclusion.....	43
Chapitre III : Dimensionnement du système pompage multi-sources	44
III.1 Introduction.....	45
III.2 Définition du dimensionnement	45
III.3 Le système hybride contient deux sources ‘ Photovoltaïque et éolienne’	46
III.3.1 L'énergie produite par le générateur photovoltaïque	46
III.3.2 L'énergie produite par le générateur éolien	46
III.4 Méthodes de dimensionnement du système hybride	47
III.5 Dimensionnement du convertisseur DC/AC (onduleur).....	48
III.6 Dimensionnement du régulateur	49
III.7 Conclusion :	49
Chapitre IV : Résultats de simulation	50
IV.1 Introduction.....	51
IV.2 Schéma du système global de simulation	51
IV.3 Résultats de simulation	51
IV.4 Conclusion	59
CONCLUSION GENERAL	60

Introduction générale

Introduction générale

De nos jours, il est clair que la majorité des besoins énergétiques mondiaux sont satisfaits par des énergies fossiles. Cependant, il a été démontré que leur utilisation intensive a des conséquences néfastes sur l'environnement, notamment le réchauffement climatique provoqué par la pollution atmosphérique et l'amplification de l'effet de serre. De plus, ces ressources sont destinées à s'épuiser dans les années à venir. [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.

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 cette optique, notre travail s'inscrit dans la conception d'un système de pompage multi-sources, intégrant des générateurs photovoltaïques, éoliens et un groupe motopompe. L'objectif principal est d'assurer un approvisionnement fiable en eau pour une ferme isolée dans la région de Bejaïa, en tirant parti de la complémentarité des différentes sources d'énergie renouvelable et en développant un algorithme de gestion efficace.

Notre étude est structurée en quatre chapitres, le premier chapitre présentera Généralités sur les systèmes de pompage éolien photovoltaïque des systèmes de pompage multi-sources.

Le deuxième chapitre sera consacré à sur la modélisation des divers composants de notre système de pompage, en débutant par la chaîne de conversion photovoltaïque (panneaux solaires, convertisseur DC/DC), puis la chaîne de conversion éolienne (turbine, convertisseur AC/DC), le convertisseur DC/AC, ainsi que le motopompe (qui comprend un moteur asynchrone et une pompe centrifuge).

Le troisième chapitre portera sur le dimensionnement, le contrôle et la supervision

INTRODUCTION GENERALE

du système multi-sources. Dans le dimensionnement, nous déterminerons le nombre de panneaux photovoltaïques, éoliennes que nous avons besoin pour alimenter notre pompe, avec une méthode basée sur l'estimation des besoins en eau, et 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.

Enfin, le quatrième chapitre est consacré à la simulation du système de pompage multi- sources. L'objectif de cette simulation est de valider le comportement dynamique du système dans différentes conditions d'ensoleillement et de vitesse du vent. À l'aide du logiciel MATLAB/Simulink, l'ensemble des sous-systèmes (photovoltaïque, éolien, convertisseurs, moteur-pompe) a été intégré dans un modèle global.

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

Chapitre I :

Généralités sur les systèmes de pompage éolien photovoltaïque

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. [2]

Dans ce chapitre, nous présentons les sources d'énergies renouvelables éolien et photovoltaïque, et une description générale d'un système de pompage.

I.2 L'énergie solaire photovoltaïque

Ce type d'énergie renouvelable est issu directement de la captation du rayonnement solaire. On utilise des capteurs spécifiques afin d'absorber l'énergie des rayons du soleil et de la rediffuser selon le mode de fonctionnement solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques). Donc cette énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein des matériaux semi-conducteurs comme le silicium. Ces matériaux émettent des électrons lorsqu'ils sont soumis à l'action de la lumière ceux-ci sont éjectés du matériau et ils circulent dans un circuit fermé, produisant ainsi de l'électricité [4].

I.2.1 Historique

Nous allons maintenant aborder le cœur du phénomène photovoltaïque : la conversion de la lumière en électricité.

Le mot « *Photovoltaïque* » vient du grec « *Photo* » qui signifie lumière et de « *Volta* » du nom du physicien italien qui a découvert la pile électrique en 1800. Mais c'est le savant français *Becquerel* qui le premier, en 1839, mit en évidence cette conversion particulière de l'énergie : la variation de la conductivité d'un matériau sous l'effet de la lumière.

C'est dans les appareils photos que les premières « *cellules* » furent utilisées pour mesurer le taux de lumière, avant l'arrivée du silicium ; elles étaient à base de sélénium [5].

- **1839** : le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- **1875** : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- **1954** : trois chercheurs américains, Chaplin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- **1958** : une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- **1973** : la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- **1983** : la première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires.

I.2.2 Conversion photovoltaïque

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée (l'énergie des photons doit être au moins égale à celle du gap énergétique du matériau), l'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur, générant ainsi des paires électron-trou qui peuvent contribuer au transport du courant (photoconductivité) par le matériau lorsqu'on le polarise. [6]

Si on illumine maintenant une jonction PN, les paires électron-trou qui sont créées dans la zone de charge d'espace de la jonction sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région, et entraîné dans les zones neutres de chaque côté de la jonction. Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction (photo tension) ; s'il est connecté à une charge électrique extérieure, on observe le passage d'un courant alors qu'on n'applique aucune tension au dispositif. C'est le principe de base d'une cellule photovoltaïque.

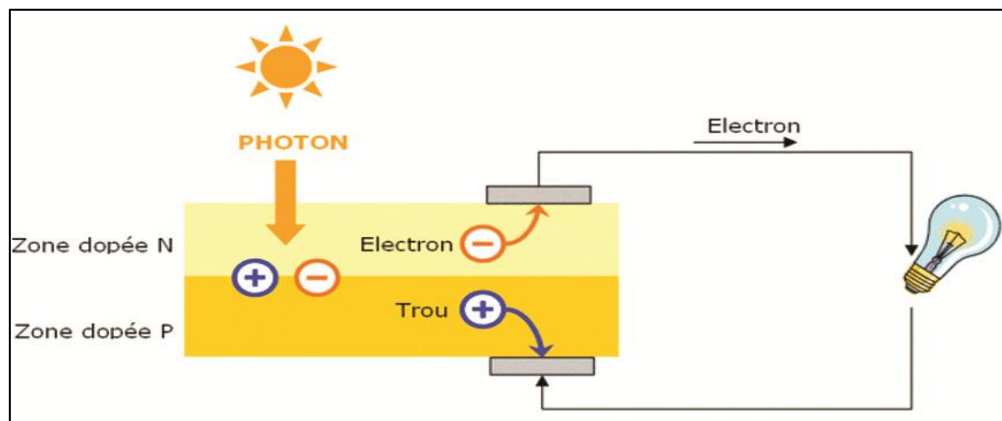


Figure I.1 : Jonction P-N dans une cellule photovoltaïque

I.2.3 Les Avantages Et Inconvénients

Tableau I.1 : Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire

Les avantages	Les inconvénients
L'énergie solaire est gratuite et non polluante et fiable.	L'énergie solaire est une énergie intermittente.
Modulaires, ses composants se prêtent à une utilisation innovante en matière d'intégration architecturale (implantés sur ou en éléments de toiture ou de façade, sous forme de brise-soleil, en verrière...)	La production d'énergie solaire photovoltaïque n'est possible que lorsqu'il y a du soleil.
Adapté aux pays chauds et aux sites isolés.	Le rendement des cellules photovoltaïque diminue avec le temps.
Le rendement énergétique est positif	Il faut pouvoir stocker la chaleur dans des dalles chauffantes.

I.3 L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire, puisque ce sont les différences de températures et de pressions induites dans l'atmosphère par l'absorption du rayonnement solaire qui mettent les vents en mouvement, l'utilisation du vent par l'homme ne date pas d'aujourd'hui, elle est très ancienne. De nos jours l'énergie mécanique du vent produit l'électricité. Le principe des éoliennes s'inspire de celui des moulins à vent et à eau autrefois utilisé pour moulinier le grain ou pomper l'eau. L'éolien est l'une des énergies renouvelables les plus «prometteuses» à développer. Elle est intéressante d'un point de vue économique et environnemental. Pendant ces dernières années l'éolien c'est très fortement développé, dans le monde et plus particulièrement en Europe. [7]

I.3.1 Les principales composantes d'une éolienne

Existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différentes importantes. Néanmoins, une éolienne « classique » est généralement constituée de trois éléments principaux : [7]

- La tour : elle doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Etant donné Que la vitesse du vent augmente lorsque l'on s'éloigne du sol, une tour peut mesurer entre 50et 80m de haut. La tour à ferme d'un tronc en cône ou, à l'intérieur, sont disposés les câbles de Transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôles, les appareillages de connexion au Réseau de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle.
- La nacelle : regroupe tous les éléments mécaniques permettent le rotor éolien au générateur
- Electrique : arbres lent et rapide, multiplicateur et les systèmes hydrauliques une machine Synchrone (MS) et ou électriques d'orientation des pales. A cela viennent s'ajouter le système de Refroidissement par eau, un anémomètre et le système électrique de gestion de l'éolienne.
- Le rotor : formé par les pales assemblées dans leur noyau. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de varie classiquement de là 3, le rotor tripale étant de loin le plus rependu car il représente un bon compromis entre le cout, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

I.3.2 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est relativement simple :

Le vent fait tourner des pales qui font-elles même tourner le générateur de l'éolienne. A son tour le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique de type éolienne. L'électricité éolienne est dirigé vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage, le rotor des aérogénérateurs est composé en général de 3 pales tournant à une vitesse maximum de 30 tours par minute et fixés sur un moyeu. [7]

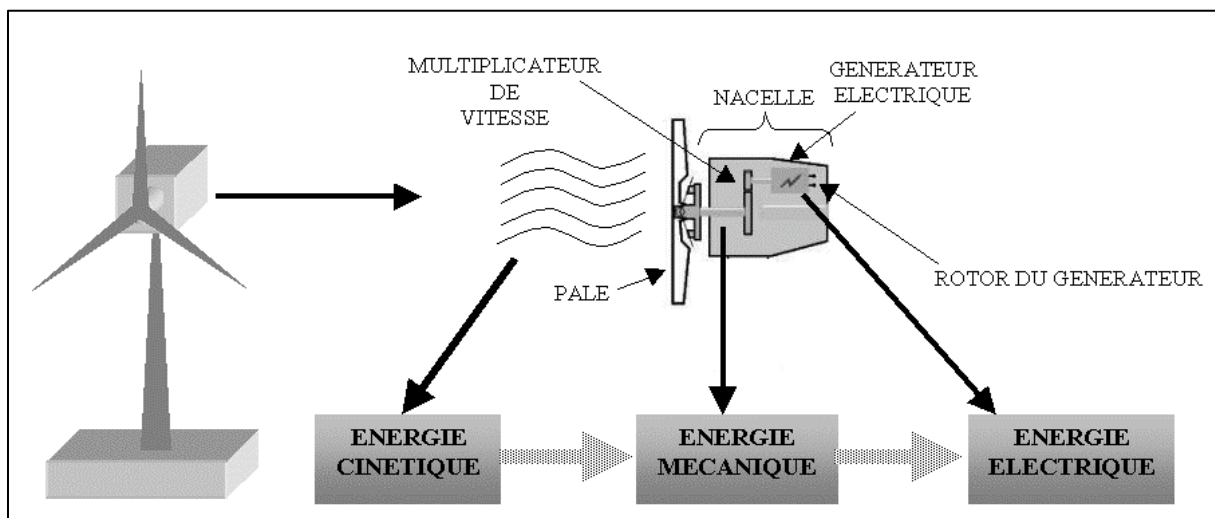


Figure I.2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

I.3.3 Les avantages et inconvénients

Tableau I.2 : Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolien

Les avantages	Les inconvénients
L'électricité éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement face à la variabilité des prix du baril de pétrole.	De même c'est une énergie intermittente.
L'énergie éolienne offre la possibilité de réduire les facteurs d'électricité.	Des effets sur le paysage (esthétique), et cause du bruit.
Elle produise de l'électricité sans dégrader la qualité de l'air ni polluer les eaux.	L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.

I.4 Les Systèmes hybrides

Le problème avec la puissance variable et non garantie produite par les sources d'énergie renouvelables, peut être résolu par un couplage des sources d'approvisionnement et la formation d'un système dit hybride.

Un Système d'Energie Hybride est une installation qui associe différentes technologies de la génération d'énergies électriques : sources renouvelables, sources conventionnelles, dans le but de réunir les avantages de chaque système et offrir un rendement énergétique global plus élevé.

Plusieurs sources peuvent être exploitées dans les Système énergie hybrides. Parmi ces sources on peut distinguer les systèmes : photovoltaïque (PV), éolien, diesel, hydraulique, l'énergie contenue dans l'hydrogène (Piles à combustible), les systèmes de stockage d'énergie. Ces systèmes peuvent aussi inclure d'autres composants comme les convertisseurs statiques, la charge principale et des charges auxiliaires. Toutes ces composantes peuvent être connectées en différentes architecture. [4]

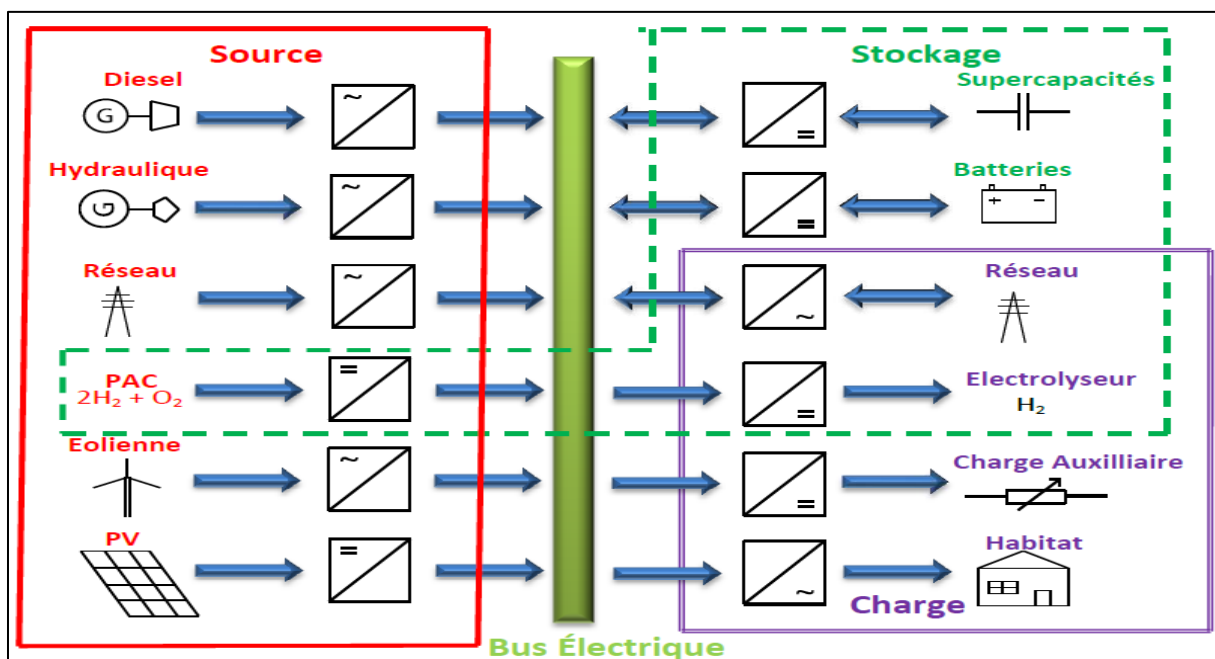


Figure I.3 : schéma général d'un système hybride

I.4.1 Système hybride éolien photovoltaïque

La figure (I.4) présente un exemple courant d'une installation de production hybride non connectée au réseau, associant deux types d'énergies renouvelables, éoliennes et solaires, avec un système de stockage de l'énergie. Le « nœud électrique » facilite la connexion et la distribution de l'énergie entre les divers éléments du système. Cette combinaison permet de

disposer d'un réseau électrique entièrement autonome en courant continu DC et/ou en courant alternatif AC. On fait donc référence à un « ilote », un réseau local de petite taille, avec une faible puissance de court-circuit.

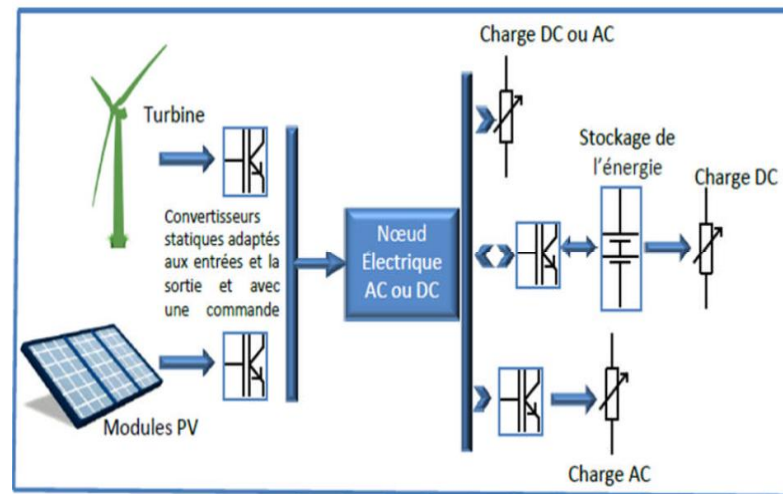


Figure I.4 : Exemple d'une configuration multi-sources générale dédiée à un site isolé :
Couplage éolien photovoltaïque

I.4.2. Présentation du système hybride photovoltaïque-éolien

Le champ d'application des S.E.H est très large et par conséquent, il est difficile de classer ces systèmes. On peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance (voir le tableau). Les seuils de puissance donnés ne sont que des ordres de grandeurs.

Tableau I.3 : Classification des S.E.H par gamme de puissance

Puissance de S.E.H [KW]	APPLICATION
Faible : < 5	Système autonome : stations de télécommunications, de pompage de l'eau, autres applications isolées.
Moyenne : 10-250	Micro réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, d'un hameau, des zones rurales...
Grande : > 500	Grands réseaux isolés (ex : réseaux insulaires)

On s'intéresse aux systèmes de petites puissances qui regroupent deux parties à savoir l'éolien et les panneaux solaires. Ces deux sources de production de l'énergie passent par un stockage électrochimique (généralement), et produisent du courant continu facilement convertible en courant alternatif, grâce à l'intégration d'un onduleur autonome dans le circuit. En couplant ces systèmes et en les associant à un dispositif de stockage de l'énergie, nous aurons alors les avantages suivants :

- ✓ Exploitation du système sans interruption
- ✓ Possibilité de préserver le surplus d'énergie produite par ce système
- ✓ Sécurité d'approvisionnement quelles que soient les conditions météorologiques

I.4.3. Principaux composants du système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien

Les systèmes hybrides photovoltaïque-éolien comprennent généralement :

- ❖ Un système générateur ;
- ❖ Un système de régulation ;
- ❖ Un système de stockage ;
- ❖ Des équipements de puissance ;
- ❖ Une charge.

Le système générateur est composé par les modules photovoltaïques et les aérogénérateurs. Il est indispensable que les deux fonctionnent à la même tension nominale 12 ou 24 V et en courant continu.

La régulation doit tenir compte du fait qu'il s'agit de deux courants de nature différents :

- Le photovoltaïque assez constant et d'un seuil bas
- L'éolien, très variable. [8]

Le système de régulation se chargera donc de faire fonctionner le système générateur en un point optimal pour la charge des batteries.

I.5 Groupe moteur-pompe

Un groupe motopompe immergé, constitué de l'association d'un moteur électrique et d'une pompe. Différents types sont utilisés :

I.5.1 Pompe

La technologie des pompes à eau se distingue par plusieurs critères :

- Pompe « eau pure » ou « eau sale ».
- Pompe centrifuge ou volumétrique.
- Pompe immergée ou de surface.
- Pompe à aspiration ou à refoulement.

A savoir :

La hauteur d'aspiration de n'importe quelle pompe est limitée à une valeur théorique de 9,8 mètres (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres. Les pompes à aspiration sont donc toujours installées à une hauteur inférieure à celle-ci. Ces pompes doivent également être amorcées, c'est-à-dire que la section en amont de la pompe doit être remplie d'eau pour amorcer l'aspiration d'eau. Les pompes à refoulement sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur immergé avec la pompe (pompe monobloc), soit le moteur en surface : la transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur. Dans les deux cas, une conduite de refoulement après la pompe permet des élévations de plusieurs dizaines de mètres, selon la puissance du moteur.

Afin de dimensionner la pompe, il faut déjà avoir un ordre d'idée de l'endroit où celle-ci va être installée [9].

➤ Pompes centrifuges

Dans ce genre de pompe le mouvement du liquide résulte de l'accroissement d'énergie qui lui est communiqué par la force centrifuge [10].

- **Principe de fonctionnement**

Une pompe centrifuge est constituée par :

- Une roue à aubes tournant autour de son axe.
- Un distributeur dans l'axe de la roue.
- Un collecteur de section croissante, en forme de spirale appelée volute.

Le liquide arrive dans l'axe de l'appareil par le distributeur et la force centrifuge le projette vers l'extérieur de la turbine. Il acquiert une grande énergie cinétique qui se transforme en énergie

de pression dans le collecteur où la section est croissante. L'utilisation d'un diffuseur (roue à aubes fixe) à la périphérie de la roue mobile permet une diminution de la perte d'énergie.

- **Amorçage**

Les pompes centrifuges ne peuvent s'amorcer seules. L'air contenu nécessite d'être préalablement chassé. On peut utiliser un réservoir annexe placé en charge sur la pompe pour réaliser cet amorçage par gravité.

Pour éviter de désamorcer la pompe à chaque redémarrage il peut être intéressant d'utiliser un clapet anti-retour au pied de la canalisation d'aspiration.

- **Caractéristiques**

Les hauteurs manométriques totales fournies ne peuvent dépasser quelques dizaines de mètres. Pour dépasser ces valeurs on utilise des pompes centrifuges multicellulaires où plusieurs roues sont montées en série sur le même arbre. Le refoulement d'une des pompes communique avec l'aspiration de la pompe suivante. Il est également possible de coupler en série plusieurs de ces pompes. Le rendement est de l'ordre de 60 à 70 %: il est inférieur à celui des pompes volumétriques.

Les pompes centrifuges vérifient des lois (lois de similitude) qui à partir d'une courbe caractéristique établie pour une vitesse de rotation N de la roue de la pompe permettent d'obtenir la caractéristique pour une vitesse de rotation N' quelconque.

Vu le type d'énergie utilisée (PV et éolien), les caractéristiques de la pompe centrifuge sont particulièrement intéressantes :

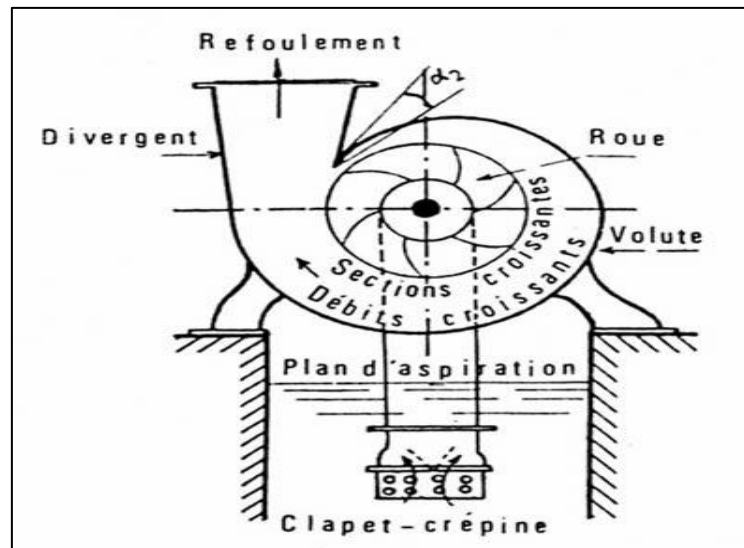


Figure I.5 : Classification des S.E.H par gamme de puissance

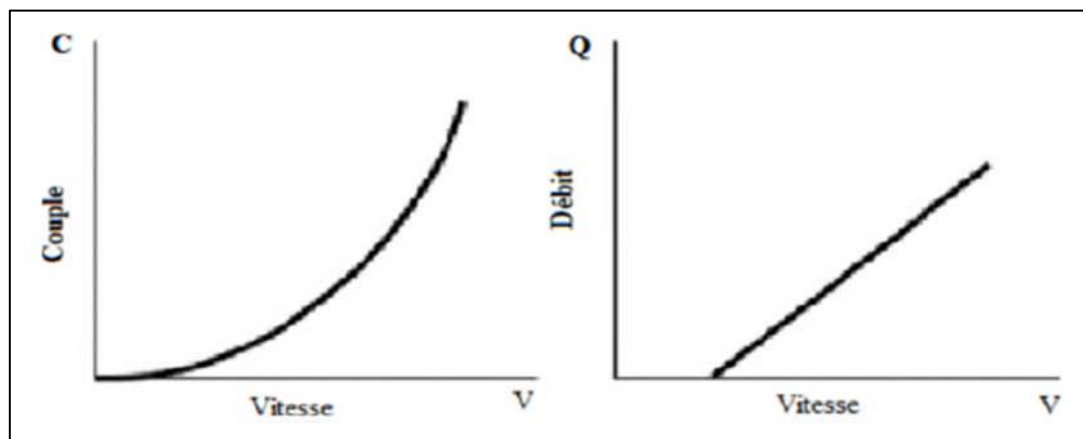


Figure I.6 : Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge

Le tableau I.4 résume les avantages et inconvénients des pompes centrifuges :

Tableau I.4 : Avantages et inconvénients des pompes centrifuges

Avantages	Inconvénients	Utilisations
<ul style="list-style-type: none"> -Débit stable. -Disponible et fiable prix. -Robuste et fiable. -Fiable encombrement. 	<ul style="list-style-type: none"> -Non autoamorçage (surface). -Débit et pression interdépendants. -Faible rendement. 	<ul style="list-style-type: none"> -Débit importants. -Liquide purs (eau).

➤ 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 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 [8].

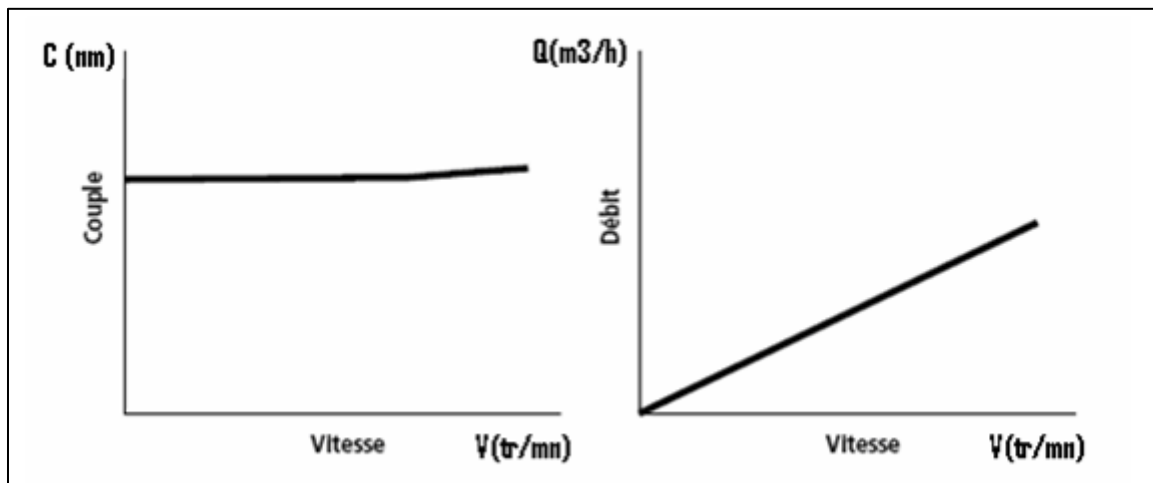


Figure I.7 : Caractéristiques d'une pompe volumétrique [11]

Le tableau (I.5) résume les avantages et inconvénients de deux types de pompes volumétriques.

Tableau I.5 : Avantages et inconvénients des pompes volumétriques alternatives et rotatives

Type	Avantages	Inconvénients	Utilisations
Pompe alternative à membrane	<ul style="list-style-type: none"> -Débit précis -Débit réglable -Rendement élevé -Peu sensible aux particules -Très bonne résistance chimique 	<ul style="list-style-type: none"> -Débit par à-coups -Prix élevé -Température de service limitée 	<ul style="list-style-type: none"> -Liquides chargés, corrosifs, dangereux -Pression à 2bar et débit à 30m³/h
Pompe rotative à vis et engrenage	<ul style="list-style-type: none"> -Débit précis -Débit réglable -Débit régulier -Rendement élevé -Encombrement réduit 	<ul style="list-style-type: none"> -Sensible aux particules -Sensible aux liquides corrosifs -Mécanique compliquée 	<ul style="list-style-type: none"> -Liquides purs, Visqueux -Pressions à 100 bars et débit à 200 m³/h

I.5.2 Moteurs

Le moteur d'un groupe motopompe convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou alternatif. Dans ce dernier cas, un convertisseur électronique ou un onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu provenant d'un générateur photovoltaïque ou une autre source en courant alternatif.

I.5.2.1 Moteur à courant continu

Les moteurs à courant continu utilisés pour des applications de pompage solaire sont les moteurs série, avoir un couple de démarrage suffisant pour vaincre la résistance de démarrage d'une pompe et bien répondre à un courant variable. Le couplage est direct ou avec optimisation du générateur par un hacheur adaptateur de puissance commandé par son rapport cyclique. L'installation ainsi définie nécessite une électronique relativement simple mais présente l'inconvénient du moteur à courant continu qui demande un entretien régulier. Les balais doivent être changés périodiquement. Ceci est particulièrement problématique dans le cas des pompes à moteur immergé où la pompe doit être retirée du forage pour changer les balais. , il est utilisé particulièrement pour le pompage dans les puits ouverts [12].

Des constructeurs ont développé récemment des moteurs à courant continu à aimant permanent (rotor en alliage de terre rare) à commutation électronique, c'est-à-dire sans balais (l'alimentation alternée des bobinages est réalisée électroniquement et non par un contact physique). Ces moteurs sans entretien reprennent l'architecture des moteurs immergés classiques (remplis d'eau) et ont donc leur fiabilité. Ils ont, en revanche, un couple et un rendement beaucoup plus important. La fixation entre moteur et hydraulique est identique à celle des moteurs à courant alternatif [13].

I.5.2.2 Moteur a courant alternatif

Les moteurs alternatifs asynchrones (rotor à cage) sont les plus couramment employés pour une gamme variée d'applications industrielles. Par exemple, les pompes sur réseau utilisent depuis longtemps ce type de moteur. Il est utilisé particulièrement pour le pompage immergé dans les forages et les puits ouverts. L'arrivée d'onduleurs efficaces a permis l'utilisation de ce type de moteurs dans les applications de pompage solaire. L'utilisation d'un moteur asynchrone (à courant alternatif triphasé) plus robuste et moins cher (aussi faible besoin de maintenance) devient une solution plus économique et plus pratique même au prix d'un circuit électronique de commande plus complexe. L'utilisation d'un moteur asynchrone augmente ainsi l'autonomie et la fiabilité de l'installation. Le moteur est alimenté par un onduleur (convertisseur DC/AC) qui assure l'optimisation du générateur PV [12].

I.6. Différents types de convertisseurs

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit en tension continue différentes, soit en tension alternative [12].

- **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 :

- a. Hacheur survolteur**

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

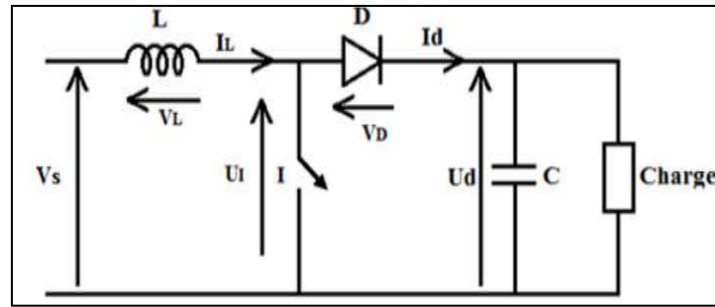


Figure I.8 : Convertisseur DC/DC (Elévateur de tension)

b. Hacheur dévolteur

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

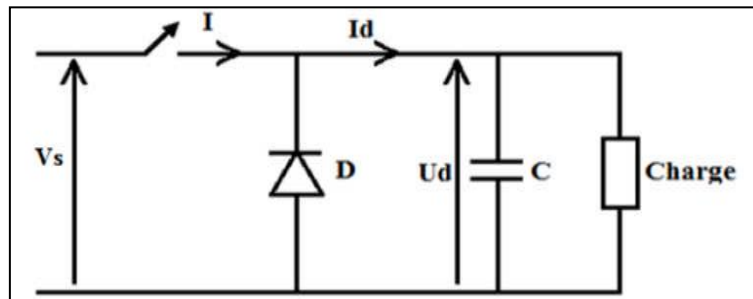


Figure I.9 : Convertisseur DC/DC (Elévateur de tension)

Le convertisseur continu- alternatif (onduleur)

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion de l'énergie électrique de continu vers l'alternatif.

On distingue deux grands types d'onduleurs :

- Les onduleurs de tensions, alimentés par une source de tension continue.
- Les onduleurs de courants, alimentés par une source de courant continue [14].

Un onduleur de tension triphasé, dont les composants semi-conducteurs contrôlables sont des transistors GTO, est le cœur de l'organe de commande du moteur asynchrone. Il peut être considéré comme un amplificateur de puissance, il est constitué de trois bras, de deux interrupteurs pour chacun. Chaque interrupteur est monté en antiparallèle avec une diode de récupération. Pour assurer la continuité des courants alternatifs, les interrupteurs K1 et K2, K3 et K4, K5 et K6 doivent être contrôlés de manière complémentaire. Le schéma structurel d'un tel convertisseur statique alimentant le stator du moteur est illustré par la figure (I.10) [14].

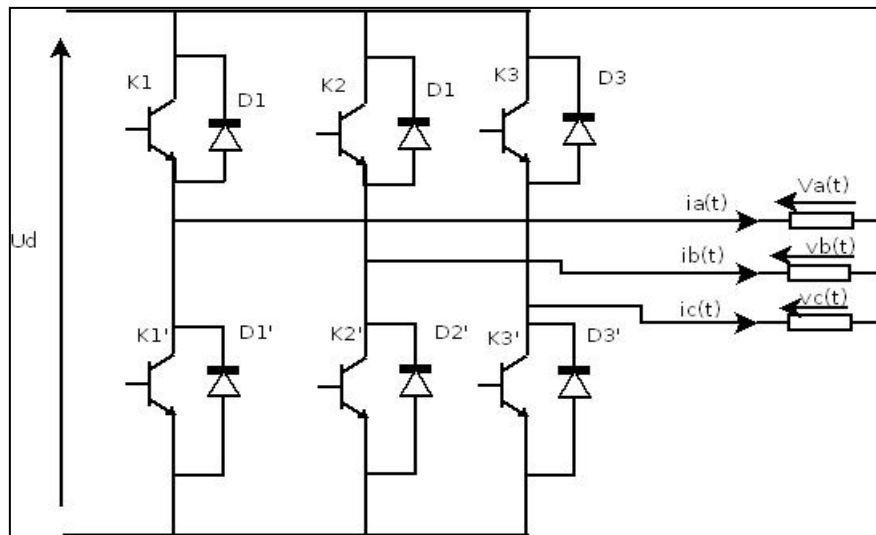


Figure I.10 : schéma d'un onduleur de tension alimentant le stator d'un moteur asynchrone

L'onduleur de courant présente un grand inconvénient en raison de l'inductance du moteur asynchrone, car ce dernier lui fournit des créneaux de courant lors de la montée et de la descente rapide dans une phase, ça crée une surtension [15].

I.7 Conclusion

Dans cette partie, nous avons présenté les deux sources d'énergies renouvelables de notre système hybride (l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne), qui assurent l'alimentation du système de pompage, ainsi les différentes pompes utilisées dans ces systèmes avec leurs avantages et inconvénients, et les différents types des moteurs avec les convertisseurs associés.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de notre système de pompage éolien photovoltaïque.

Chapitre II :

Modélisation du système pompage multi-sources

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) à cause de nécessité de la simulation du processus (*Matlab Simulink*).

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

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

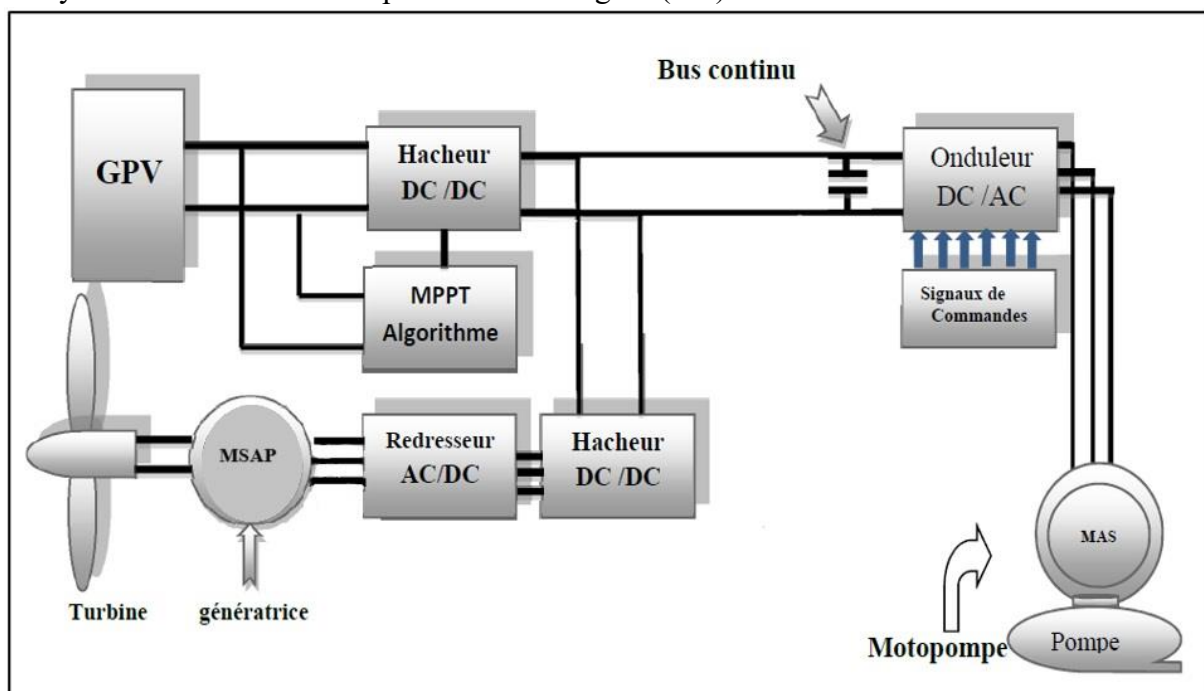


Figure II.1 : Schéma simplifié du système de pompage multi-sources (photovoltaïque, éolienne)

II.3 Modélisation de la chaîne photovoltaïque

La chaîne de conversion photovoltaïque est constituée d'un générateur photovoltaïque qui est en fonction de l'ensoleillement (E_s [W/m²]) et de la température (T [C°]) associé à des convertisseurs DC/DC (hacheur). Le système à étudier est représenté en figure (II.2) :

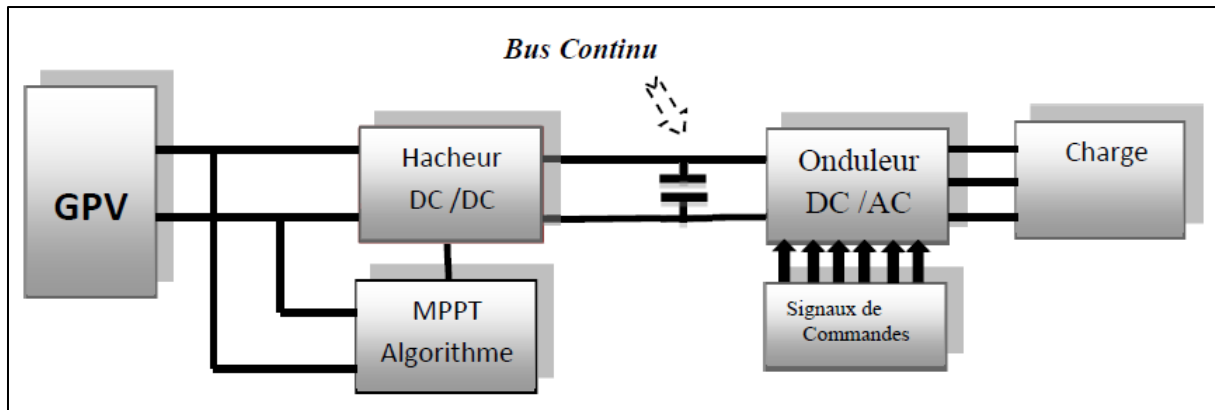


Figure II.2 : Structure de la chaîne de conversion photovoltaïque

II.3.1 Modélisation du générateur photovoltaïque (GPV) [16] [17]

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 :

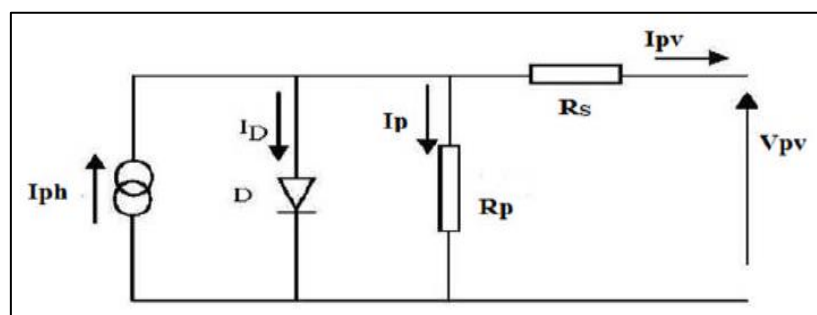


Figure II.3 : Circuit équivalent du GPV

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 :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{Rp} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- I_{pv} : Courant générer 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 :

$$I_{ph} = P_1 E_s \left(1 + P_2 (E_s - E_{sref}) + P_3 (T_j - T_{jref}) \right) \quad (\text{II.2})$$

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 :

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

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 :

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

Avec :

- 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.
- 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_{sat} : courant de saturation de la tension (A), il est donné par l'expression suivante :

$$I_{sat} = P_4 T_j^3 \exp \left[\frac{-E_g}{k.T_j} \right] \quad (\text{II.5})$$

Avec :

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

Le courant de la résistance shunt est calculé par :

$$I_{Rp} = \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (\text{II.6})$$

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 :

$$I_{pv} = P_1 E_s \left(1 + P_2 (E_s - E_{sref}) + P_3 (T_j - T_{jref}) \right) - P_4 T_j^3 \exp \left[\frac{-E_g}{k.T_j} \right] * \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{K.A.N_s.T_j} \right) - 1 \right] - \frac{(V_{pv} + R_s I_{pv})}{R_p} \quad (\text{II.7})$$

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

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 [16]

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

Avec :

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

❖ Simulation de générateur PV

Le schéma de générateur photovoltaïque en environnement Matlab/Simulink est représenté par :

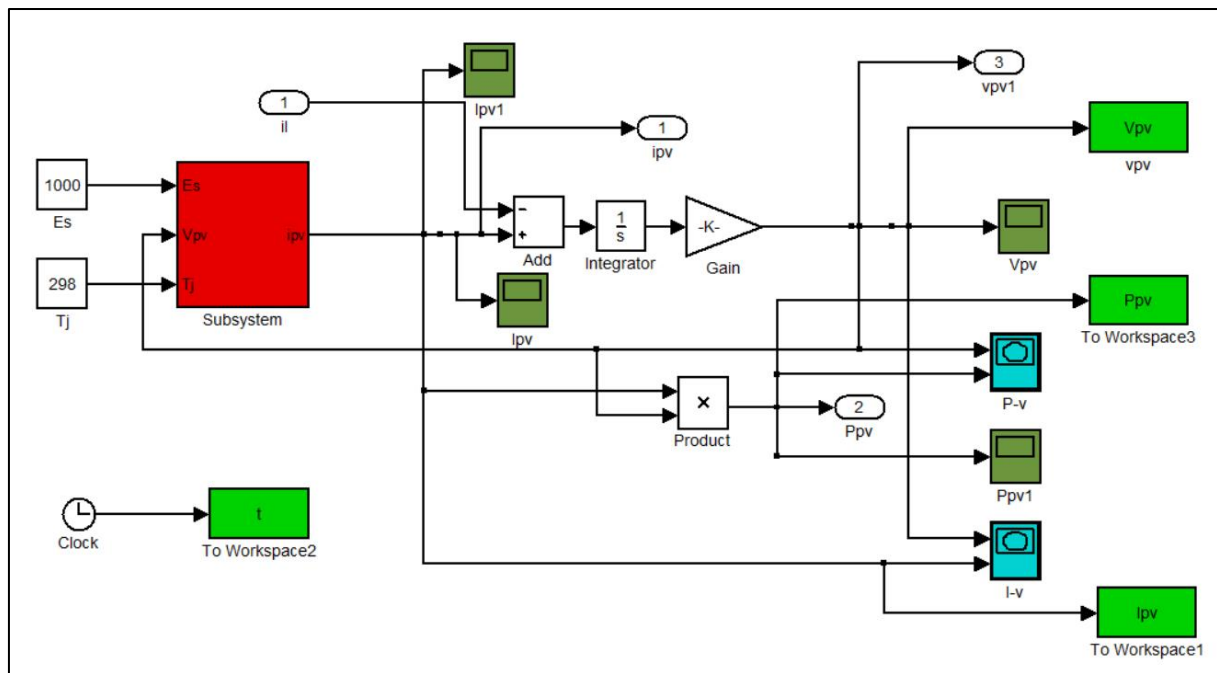


Figure II.4 : Bloc de la simulation du panneau photovoltaïque

La figure (II.5) 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 donnée ($E = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_c = 25^\circ\text{C}$).

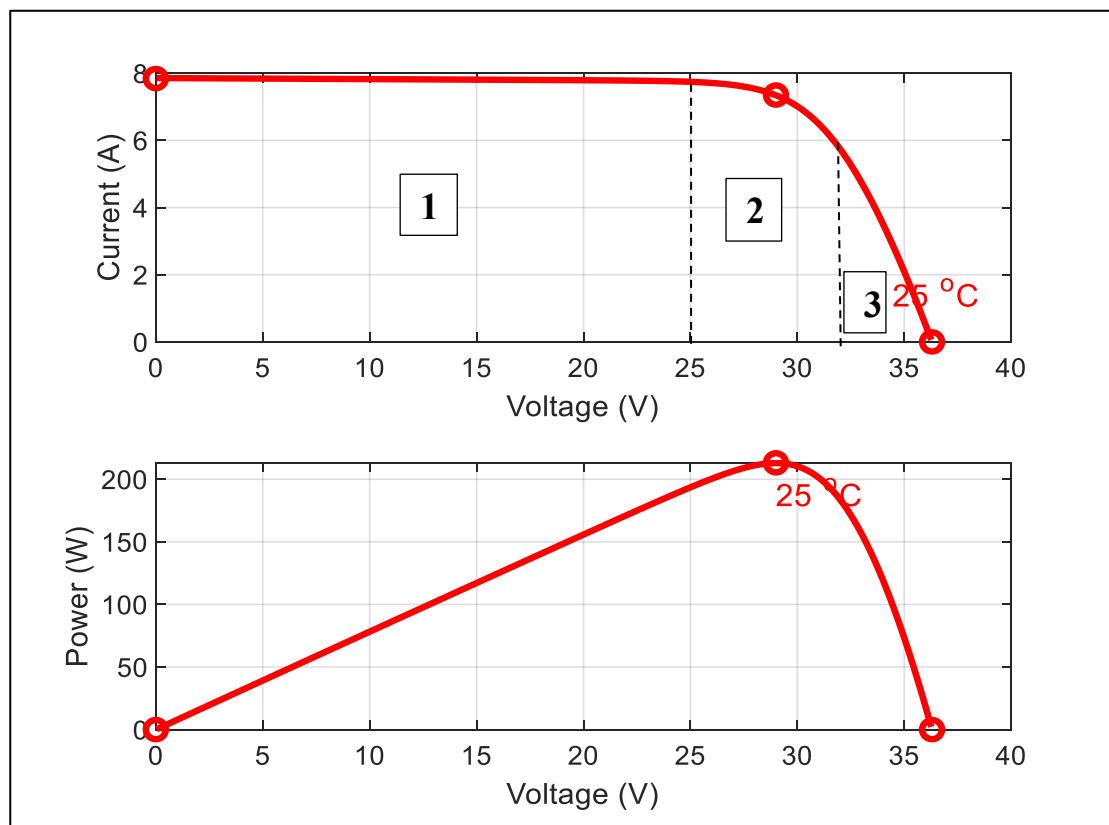


Figure II.5 : Caractéristique I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque

On remarque d'après la caractéristique I-V que le module photovoltaïque possède trois zones de fonctionnement qui sont : [17]

- **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 maximale) peut être déterminé.

II.3.2 Recherche du point de puissance maximale de générateur photovoltaïque

La recherche du point de fonctionnement optimal par des techniques d'optimisation dans un système électrique représente ce qui est plus important. La caractéristique dépend plus de l'ensoleillement et de la température

II.3.3 La méthode de perturbation et d'observation (P&O)

Cette méthode est l'une des méthodes les plus utilisées. C'est une méthode itérative permettant d'obtenir le MPP : on mesure les caractéristiques du panneau PV puis on induit une petite perturbation sur la tension (ou le courant) afin d'analyser la variation de puissance qui en résulte. 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.

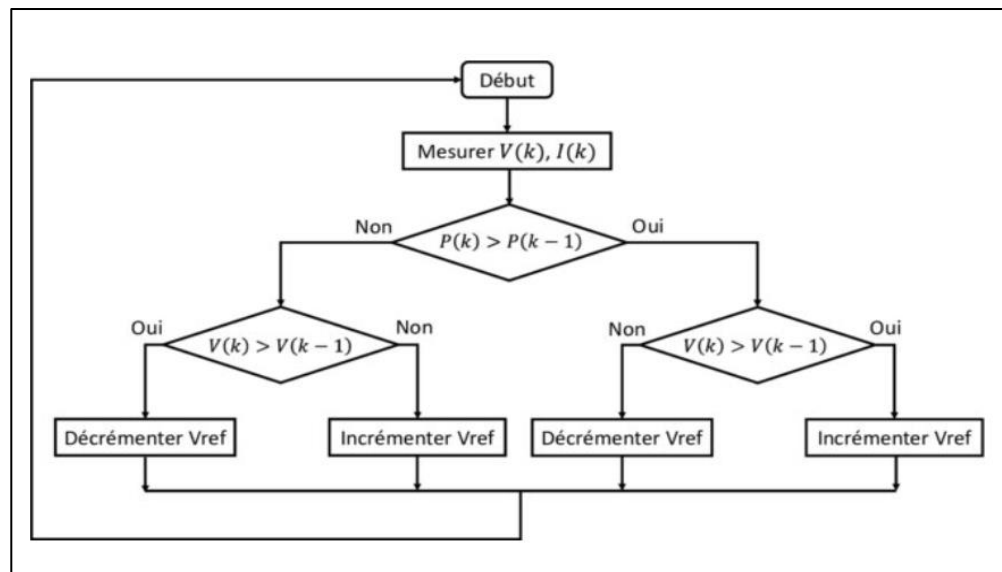


Figure II.6 : Organigramme de la méthode perturbation et observation (P&O)

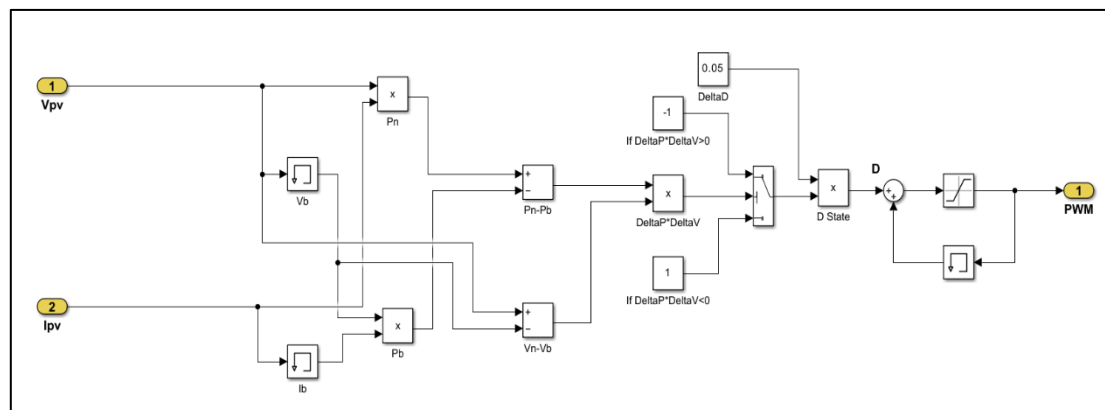
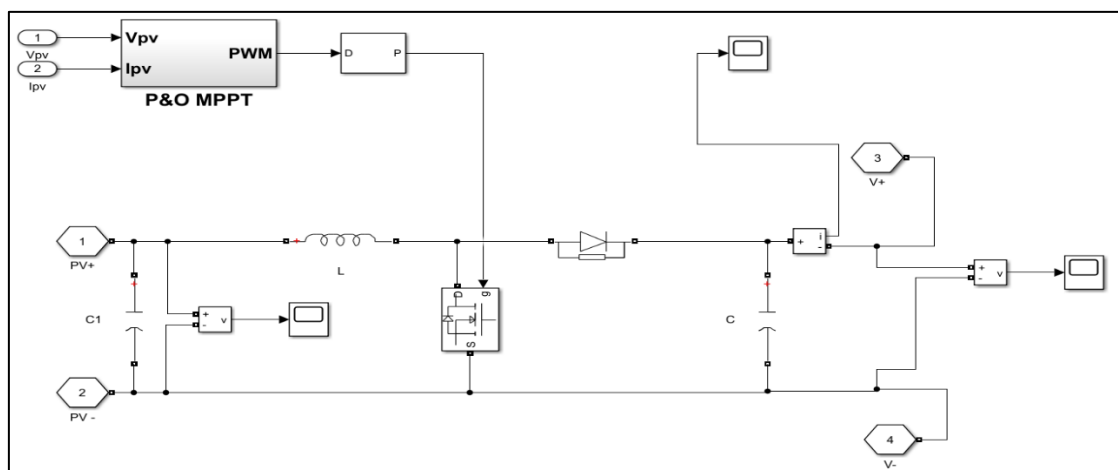


Figure II.7 : La méthode perturbation et observation (P&O) sous MATLAB Simulink



II.4 Modélisation de convertisseur DC/DC [16]

• Hacheur survolteur (Boost) ou hacheur parallèle

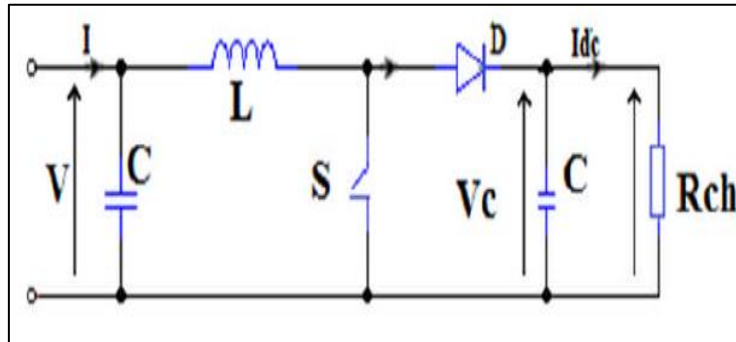


Figure II.8 : Circuit électrique du convertisseur DC-DC

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 :

➤ **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.

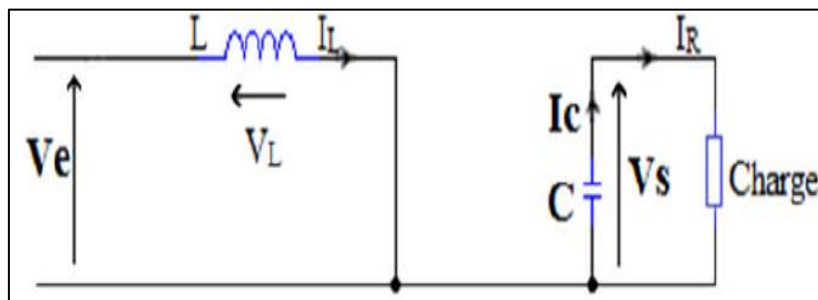


Figure II.9 : Schéma d'un Hacheur survolteur à $t \in [0, \alpha \cdot T]$

On a :

$$\checkmark \quad \alpha = \frac{T_{on}}{T} \quad (\text{II.09})$$

$$\checkmark \quad I_R + I_C = 0 \quad (\text{II.10})$$

$$\checkmark \quad \frac{dI_L}{dt} = \frac{V_e}{L} \quad (\text{II.11})$$

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

$$\checkmark \quad V_L = -V_e = L \frac{dI_L}{dt} \quad (\text{II.12})$$

$$\checkmark \quad V_S = R \cdot I_R \quad (\text{II.13})$$

➤ **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 : $I_C = I_R$

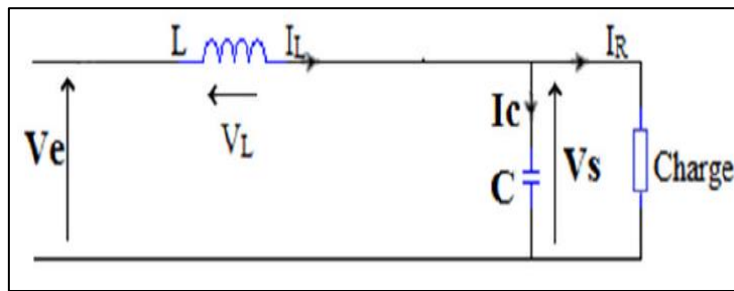


Figure II.10 : Schéma d'un Hacheur survolteur à $t \in [\alpha T, T]$

$$\begin{cases} V_L = V_e - V_S \\ I_C = I_l - I_R \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_S = \frac{1}{1-\alpha} V_e \\ I_R = (1-\alpha) I_l \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

II.5 Modélisation du convertisseur DC/AC (Onduleur) [18]

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

Dans cette étude 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.

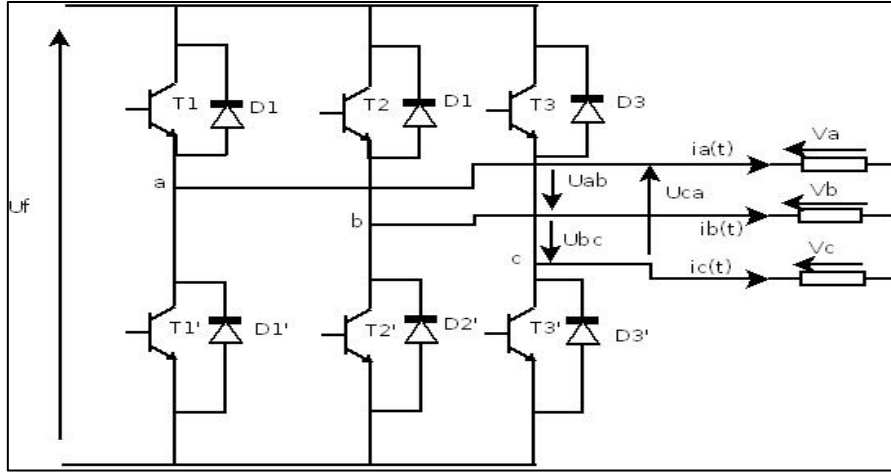


Figure II.11 : Schéma représentatif d'un onduleur de tension triphasé

A partir du schéma de l'onduleur triphasé présenté sur la figure (II.11), nous développerons les différentes équations qui modélisent le fonctionnement de ce dernier :

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 :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

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 :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

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 soit équilibrée c.à.d. :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.17})$$

En remplaçant (b) dans (c) on aura :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{II.18})$$

En remplaçant (d) dans (a) on aura :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(-V_{ao} + 2V_{bo} - V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(-V_{ao} - V_{bo} + 2V_{co}) \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Si on suppose que :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{dc} \cdot S_1 \\ V_{bo} = V_{dc} \cdot S_2 \\ V_{co} = V_{dc} \cdot S_3 \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

S_i : 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 :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

$$I_{dc} = S_a I_a + S_b I_b + S_c I_c \quad (\text{II.22})$$

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. [18]

II.5.1 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 et de même amplitude :

I.5.1.1 Équations électriques

En appliquant la loi d'Ohm généralisée à chaque phase, 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 [19] :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d[\phi_s]}{dx} \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d[\phi_r]}{dx} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Avec :

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

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

I.5.1.2 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 [18] [20] [21] :

$$\begin{cases} [\phi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}\theta] \cdot [I_r] \\ [\phi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}\theta] \cdot [I_s] \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

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 :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{as} & M_{as} & M_{as} \\ M_{as} & L_{as} & M_{as} \\ M_{as} & M_{as} & L_{as} \end{bmatrix} \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{ar} & M_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & L_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & M_{ar} & L_{ar} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

$$[M_{rs}] = [M_0] \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

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.

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

$$T_{em} = [I_s]^T \cdot \left(\frac{d}{d\theta} [M_{sr}] \right) \cdot [I_r] \quad (\text{II.27})$$

I.5.1.3 Équation mécanique

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

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \Omega \quad (\text{II.28})$$

Avec :

- f_r : Coefficient de frottement.
- Ω : vitesse mécanique du moteur.
- J : Moment d'inertie ramené sur l'arbre de la machine.
- C_{em} : Couple électromagnétique développé par la machine.
- C_r : Couple résistant de la charge.

Les équations (II.25), (II.26) 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 [19] [22]

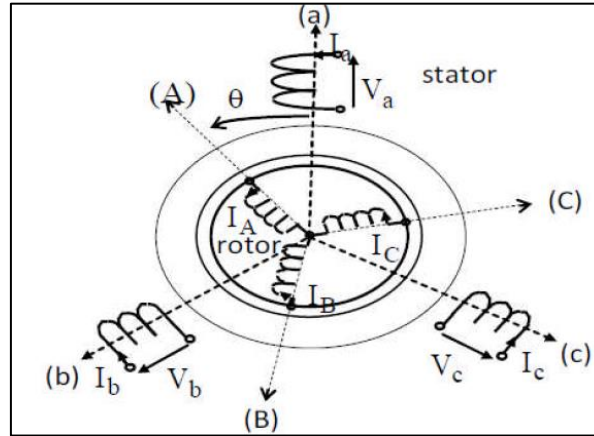


Figure II.12 : Représentation schématique d'un MAS

II.5.2 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. La transformation de Park consiste à transformer la représentation du moteur triphasé équilibré en une représentation biphasée équivalente caractérisée par deux axes (u , v).

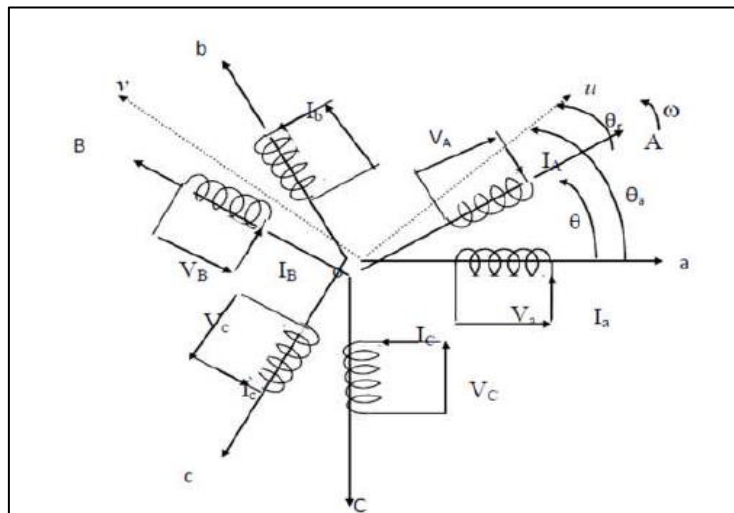


Figure II.13 : Repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique

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 [19] [21] :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Avec :

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

$$[A] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_a & \cos \left(\theta_a - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_a - \frac{4\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta_a & -\sin \left(\theta_a - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta_a - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

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

$$[A]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_a & -\sin \theta_a & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left(\theta_a - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta_a - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \left(\theta_a - \frac{4\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta_a - \frac{4\pi}{3} \right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Avec :

- 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 :

I.5.2.1 Équations électriques au régime no saturé

Les expressions des tensions statoriques et rotoriques dans le système d'axe (u, v) s'écrivant [23] :

➤ Pour le stator :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

➤ Pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega)\phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - (\omega_s - \omega)\phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

Avec :

R_s, R_r : Les résistances statoriques et rotoriques.

I.5.2.2 Equations magnétiques au régime no saturé

➤ Pour le stator :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s I_{qs} + M \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

➤ Pour le rotor :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = L_r I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

Avec :

M, L_r, L_s : Inductances respectivement, mutuelle, cyclique rotorique, cyclique statorique.

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

$$\begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \\ \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

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

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

$$\omega_s - \omega_r = p \cdot \Omega = \omega \quad (\text{II.37})$$

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 :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & -\omega_r M & R_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r M & 0 & \omega_r L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dI_{ds}}{dt} \\ \frac{dI_{qs}}{dt} \\ \frac{dI_{dr}}{dt} \\ \frac{dI_{qr}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

I.5.2.3 Équations mécaniques au régime no saturé [23]

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

$$J \frac{d\Omega}{dt} = T_{em} - C_r - f \cdot \Omega \quad (\text{II.39})$$

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

$$T_{em} = p \cdot M \cdot (I_{dr} \cdot I_{qs} - I_{qr} \cdot I_{ds}) \quad (\text{II.40})$$

II.6 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. [24]

Le schéma étudié dans ce travail est présenté sur la figure (II.14). Il s'agit d'une turbine éolienne, d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil, et un convertisseur de puissance.

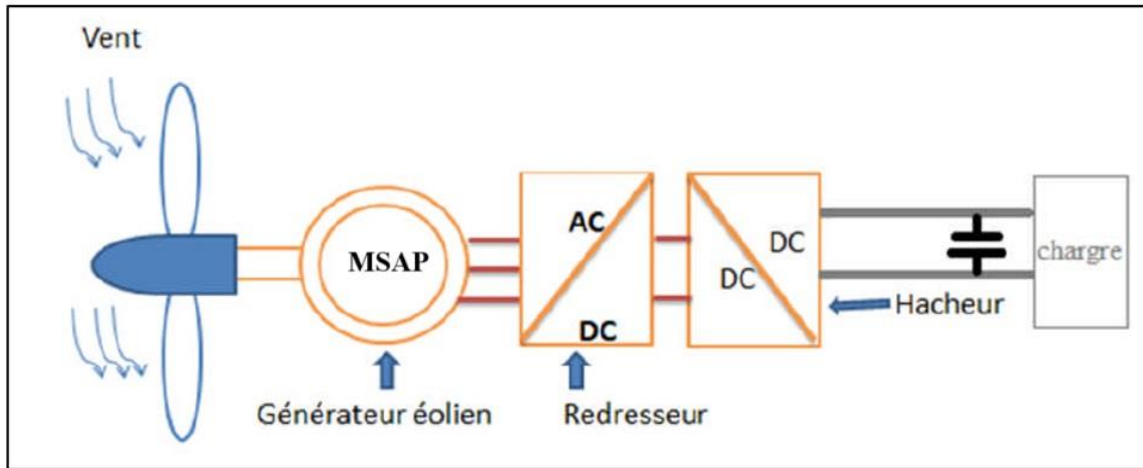


Figure II.14 : Structure de la conversion de l'énergie éolienne

II.6.1 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. [25]

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. [26]

La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps. $V_V = f(t)$ [27]

II.6.2 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. [28]

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

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (\text{II.41})$$

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 :

$$P_{aero} = C_p(\lambda) \cdot P_v \quad (\text{II.42})$$

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 :

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega_t} = \frac{\rho S v^3 C_p(\lambda)}{2 \cdot \Omega_t} \quad (\text{II.43})$$

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 :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v} \quad (\text{II.44})$$

II.6.3 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.

L'expression du coefficient de puissance pour ce type de turbine est donnée par l'équation suivante [29] :

$$C_p = 0.5 - 0.167(\beta - 2) \sin \left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (\text{II.45})$$

II.6.4 Modélisation du multiplicateur [29] [30]

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 :

$$C_g = \frac{C_t}{G} \quad (\text{II.46})$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II.47})$$

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.6.5 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. [17]

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.7 Modélisation du redresseur [31]

La figure (II.15) représente le montage d'un pont redresseur triphasé double alternance, les diodes D_i et D_i' sont supposées parfaites.

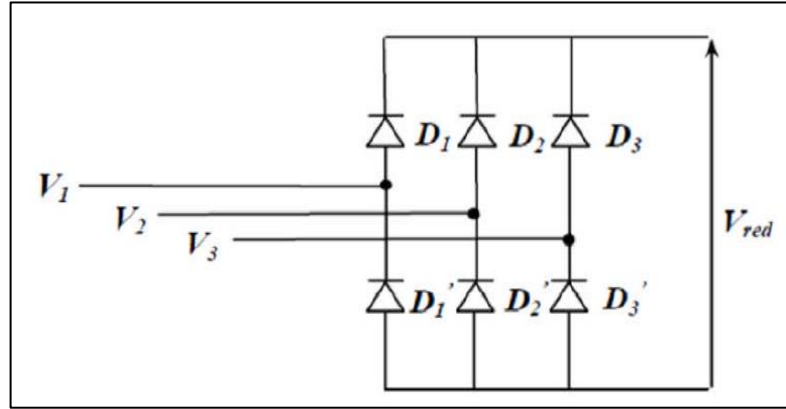


Figure II.15 : Circuit électrique du convertisseur AC/DC (Redresseur à diodes)

Les tensions issues de la génératrice sont représentées comme suit :

$$\begin{cases} V_a(t) = V_{dc} \sin \omega t \\ V_b(t) = V_{dc} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ V_c(t) = V_{dc} \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{cases} \quad (\text{II.48})$$

$$i_{dc} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad (\text{II.49})$$

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 $V_k = \min (V_k)$ 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 : $V_{red} = V_i - V_k$

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 : $V_{red} = \max(V_i) - \min(V_j)$

II.8 Modélisation du bus continu [17]

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.

$$V_{dc} = \int \frac{1}{C_{dc}} I_C dt \quad (II.50)$$

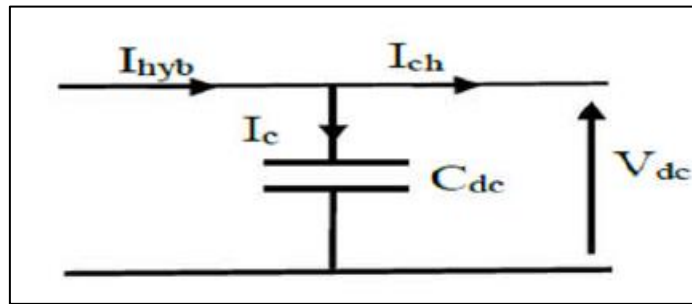


Figure II.16 : courant circulant dans le bus continue

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.9 Modélisation de la pompe centrifuge [32]

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 :

$$HMT = H_g + P_c \quad (II.51)$$

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 :

$$P_c = \left(\lambda \frac{L}{D} + \varepsilon \right) \left(\frac{8Q^2}{\pi^2 D^5 g} \right) = K_p Q^2 \quad (\text{II.52})$$

- 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

$$HMT = \alpha_0 \omega_r^2 - \alpha_1 \omega_r Q - \alpha_2 Q^2 \quad (\text{II.53})$$

Avec :

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

La pompe oppose un couple résistant donné par :

$$C_r = K_r \Omega^2 \quad (\text{II.54})$$

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 :

$$K_r = \frac{P_n}{\Omega_n^3} \quad (\text{II.55})$$

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

II.10 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons modélisé le système hybride multi-sources étudié (photovoltaïque et éolien) destiné à l'alimentation d'un système de pompage basé sur une machine asynchrone.

Les convertisseurs d'électroniques de puissance font la grande partie pour adapter et assurer les conversions de l'énergie entre les sources et la charge.

Chapitre III :

Dimensionnement du système pompage multi-sources

III.1. Introduction

L'énergie solaire et l'énergie éolienne dépendent fortement des conditions météorologiques (Ensoleillement, vitesse du vent) du site d'installation du système à énergie hybride.

Dans ce chapitre, on définit les différents besoins de notre installation qui est une habitation, dans le but de faire le dimensionnement et l'optimisation du système hybride (Photovoltaïque –éolien) par différentes méthodes. Et pour cela, compte tenu des demandes en énergie à satisfaire, l'étude du gisement est le point de départ de toute investigation, cette dernière passe par une incontestable assimilation de la terminologie.

III.2. Définition du dimensionnement

Dans une installation hybride, le concepteur du système doit associer les sources d'énergie et les moyens de stockage de manière à satisfaire deux objectifs :

- Assurer une production suffisante pour couvrir l'ensemble de la consommation électrique des utilisateurs.
- Garantir le coût minimum de l'énergie consommée par les utilisateurs.

Cette phase de conception s'appelle le dimensionnement. Il s'agit notamment de déterminer quelle sera la puissance et la capacité des différents éléments. Cependant, à cause de la nature intermittente des sources renouvelables, le dimensionnement de l'installation s'avère difficile et doit, en toute rigueur, dépendre à la fois des caractéristiques météorologiques du lieu d'installation tout en intégrant le profil de consommation.

En effet, comment dimensionner chacun des éléments en termes de puissance et de capacité afin d'assurer une alimentation permanente de la charge, tout en obtenant une énergie au moindre coût ? Par exemple, sur un simple système équipé de batteries et de panneaux Photovoltaïques, que faut-il privilégier : une grande surface de panneaux photovoltaïques tout en minimisant la capacité des batteries ou l'inverse, au risque de faire subir des décharges très profondes qui endommageraient les batteries ? Répondre à ce problème d'optimisation, plusieurs solutions ont été proposées. Il s'agit de fournir au concepteur une solution permettant de dimensionner de manière optimale un système autonome de production d'électricité.

III.3. Le système hybride contient deux sources ‘ Photovoltaïque et éolienne’

III.3.1. L’énergie produite par le générateur photovoltaïque

Elle est estimée à partir des données de l’irradiation globale sur un plan incliné, de la température ambiante et des caractéristiques du panneau PV utilisé.

L’énergie électrique produite par un panneau photovoltaïque est donnée par :

$$E_{pv} = \eta_{pv} \cdot S_{pv} \cdot E_{irr} \quad (\text{III.1})$$

Où :

S_{pv} : la surface totale du panneau PV en (m²)

η_{pv} : le rendement du panneau PV

E_{irr} : l’irradiation solaire sur un plan incliné en (kWh/m²)

1. Détermination du nombre de modules :

$$Nm = \frac{P_{ch}}{P_m} \quad (\text{III.2})$$

P_{ch} : Puissance crête de champs photovoltaïques en Watt crête (Wc).

P_m : Puissance crête unitaire de panneau.

2. Détermination du nombre de modules en série/parallèle

Pour trouver la tension convenable à l’alimentation d’une charge donnée par la mise en série de plusieurs modules PV, le nombre de ces modules est calculé par l’expression suivante

$$N_{ms} = \frac{V_{ch}}{V_n} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

V_{ch} : La tension total du champ.

V_n : la tension délivrée par un seul panneau photovoltaïque.

La mise en parallèle de modules donne l’intensité nécessaire à la charge. Le nombre branches est calculé par l’équation suivante :

$$N_p = \frac{Nm}{V_n} \quad (\text{III.4})$$

III.3.2. L’énergie produite par le générateur éolien

L’énergie produite par le générateur éolien est exprimée par :

$$E_{éol} = P_{éol}.$$

$$\Delta t = P_{éol}. (24. N_{jours})$$

Le générateur éolien récupère qu'une partie de cette puissance du vent et qui représente la puissance produite par le générateur éolien, elle est calculée par l'équation suivante :

$$P_{éol} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot Vv \cdot 3 \cdot Cp(\lambda) \quad (\text{III.5})$$

III.4. Méthodes de dimensionnement du système hybride

L'étape de dimensionnement d'un système est très importante, car elle permet de déterminer sa taille d'une manière optimale. Il existe plusieurs méthodes de dimensionnement :

- La méthode de la probabilité d'erreur dans la consommation
- La méthode du mois le plus défavorable
- La méthode de la moyenne mensuelle

Nous allons utiliser la méthode basée sur la moyenne mensuelle annuelle de l'énergie totale incidente.

L'énergie mensuelle produite par le système par unité de surface est notée par E_{pv} , m pour le panneau PV et $E_{éol}$, pour l'éolienne (m=1...12 représente le mois de l'année).

On estime la quantité d'énergie mensuelle produite durant une période critique, nommée le mois le plus défavorable, ce dernier est en fonction de la charge mensuelle, des ressources climatiques et des performances des composants du système.

La surface du générateur nécessaire pour assurer la couverture totale de la charge durant le mois le plus défavorable est donnée par :

$$S_{pv} = \max \left(\frac{E_{ch,m}}{E_{pv,m}} \right) \quad (\text{III.6})$$

$$S_{éol} = \max \left(\frac{E_{ch,m}}{E_{éol,m}} \right) \quad (\text{III.7})$$

L'énergie totale produite par le GPV et le générateur éolien pour alimenter la charge est donnée par :

$$E_{ch} = S_{pv} \cdot E_{pv} + S_{éol} \cdot E_{éol} \quad (\text{III.8})$$

Avec :

$$S_{pv} = f \left(\frac{E_{ch}}{E_{pv}} \right) \quad (\text{III.9})$$

$$S_{éol} = (1 - f) \left(\frac{E_{ch}}{E_{éol}} \right) \quad (\text{III.10})$$

Où :

Où (f) représente la fraction de la charge alimentée par la source PV et (1-f) par la source éolienne. La valeur limite f=1 indique que la charge est alimentée que par le GPV, quant à f=0 correspond à une alimentation 100% éolienne.

Dans cette méthode, la taille des générateurs PV et éoliens est tirée des valeurs moyennes annuelles et chaque contribution nommée, E_{pvmoy} et $E_{éolmoy}$ (pour un mois). De la même façon, la charge est représentée par la valeur moyenne mensuelle annuelle E_{chmoy} . Par conséquent, les surfaces des deux générateurs PV et éolien sont données respectivement par :

$$Spv = f \left(\frac{E_{chmoy}}{E_{pvmoy}} \right) \quad (III.11)$$

$$Séol = (1 - f) \left(\frac{E_{chmoy}}{E_{éolmoy}} \right) \quad (III.12)$$

Le nombre de panneaux PV et éolien sont déterminés par les relations suivantes :

$$Npv = ENT \left(\frac{Spv}{Spvu} \right) \quad (III.13)$$

$$Néol = ENT \left(\frac{Séol}{Séolu} \right) \quad (III.14)$$

Après avoir calculé le nombre et la surface des panneaux et des éoliennes, nous allons recalculer la surface retenue de ces derniers, données par :

$$Spvret = Npv.Spvu \quad (III.15)$$

$$Séolret = Néol.Séolu \quad (III.16)$$

Ainsi, recalculer l'énergie moyenne de la charge, appelée l'énergie retenue, donnée par :

$$E_{chmoyret} = E_{pvmoy}.Spvret + E_{éolmoy}.Séolret \quad (III.17)$$

III.5. Dimensionnement du convertisseur DC/AC (onduleur)

Le dimensionnement de l'onduleur consiste à calculer le nombre d'onduleurs nécessaires pour le GPV et les éoliennes. 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. Pour les besoins de notre ferme, l'onduleur choisi est présenté dans le tableau.

L'équation suivante représente le calcul du nombre d'onduleurs nécessaires pour un système hybride autonome.

$$\text{Nombre d'onduleur nécessaire} = PL / P_{ond}$$

Avec :

PL : la puissance demandée par la charge.

III.6. Dimensionnement du régulateur

Le dimensionnement du régulateur consiste à calculer le nombre de régulateurs nécessaires pour le système PV. La tension de sortie du régulateur doit être égale à la tension nominale de la batterie. Aussi la tension maximale du GPV devrait être inférieure à la tension nominale du régulateur.

$$\text{Nombre de régulateur} = \frac{\text{Puissance Maximale du GPV}}{\text{Puissance Maximale du régulateur } s}$$

Avec :

$$\text{Puissance Maximale du GPV} = PPV \cdot NPV$$

$$\text{Puissance Maximale du régulateur } s = V_{vdc} \cdot I_{reg}$$

Où

PPV : représente la puissance du module photovoltaïque choisi dans les conditions Standards.

I_{reg} : le courant maximal du régulateur que peut être géré à partir du système GPV.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une méthode de dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque/éolien, avec les éléments de ce dernier, le dimensionnement d'un système à énergies renouvelables se base sur les connaissances métrologiques de l'endroit.

Le chapitre suivant est consacré à la présentation des résultats de simulation du système hybride sous Matlab Simulink.

Chapitre IV :

Résultats de simulation

IV.1. Introduction

La modélisation et la simulation jouent un rôle très important dans l'analyse et la conception des systèmes, et depuis quelques années le développement des calculateurs a rendu la simulation du fonctionnement et le comportement d'un système quelconque possible. Ceci a permis un gain du temps énorme dans la vérification et la mise en épreuve d'une conception d'une part, l'évaluation des performances et les limites d'une réalisation d'autre part.

Le logiciel utilisé est MATLAB/SIMULINK parce qu'il permet la représentation facile, par des blocs accomplissant chacun une fonction prédéterminée, des systèmes dynamiques. MATLAB est un logiciel de calcul numérique, de visualisation et de programmation très raffinée et conviviale, développé par la société (Mathworks). Mais aussi, un environnement des applications à part entière, il permet à l'utilisateur d'élaborer ses propres fonctions de véritables programmes, ainsi que, des interfaces graphiques très performantes.

IV.2. Schéma du système global de simulation

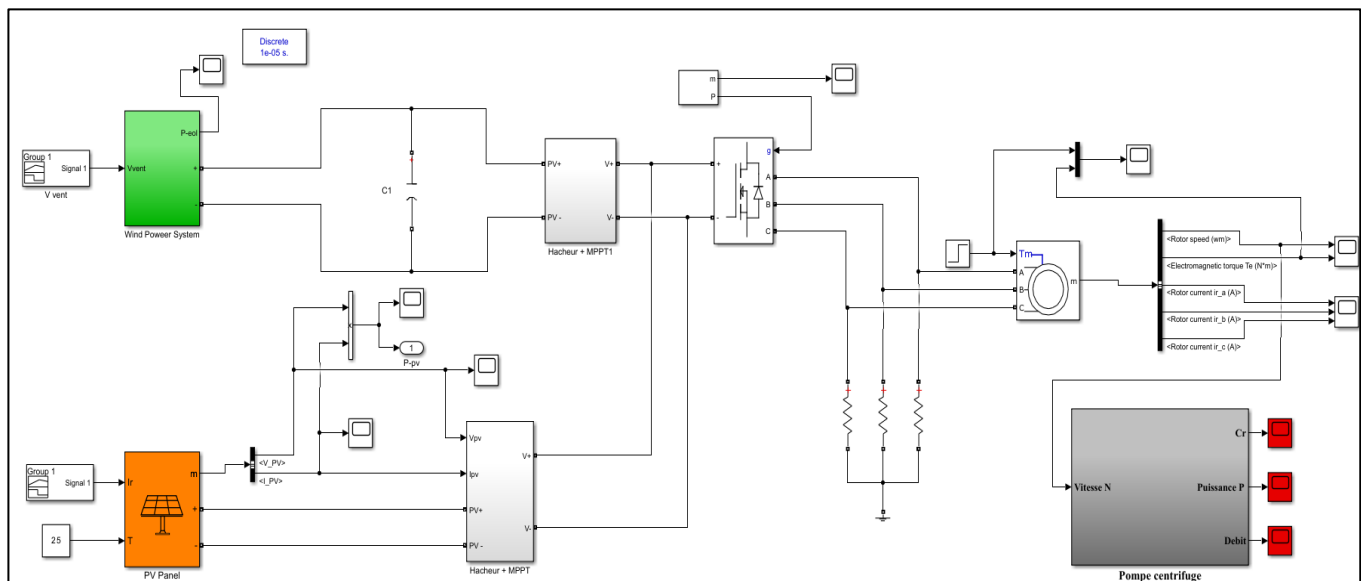
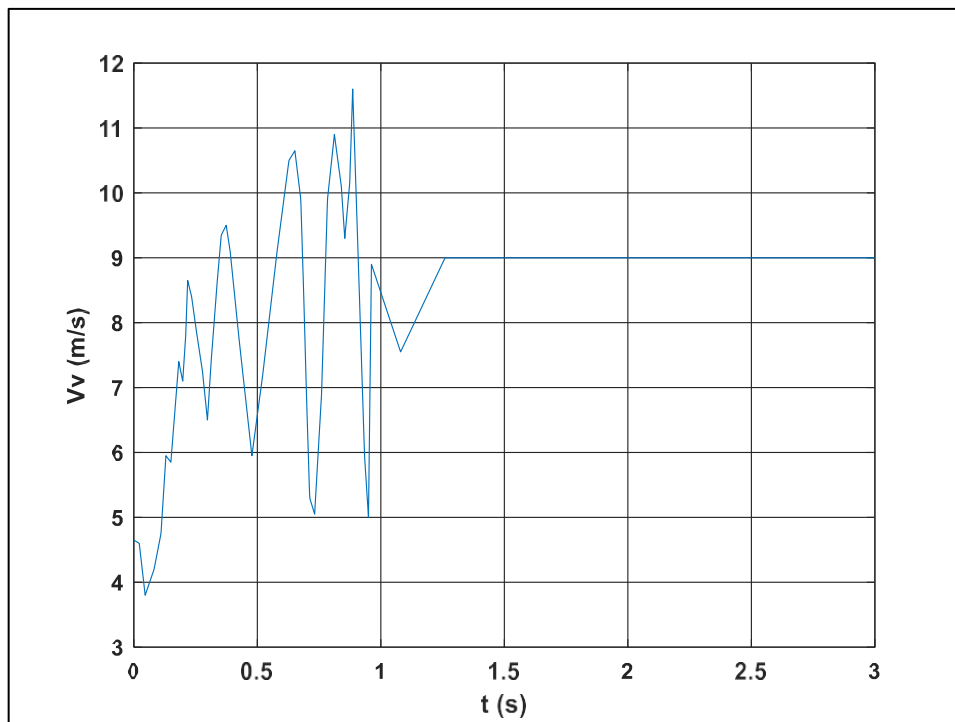


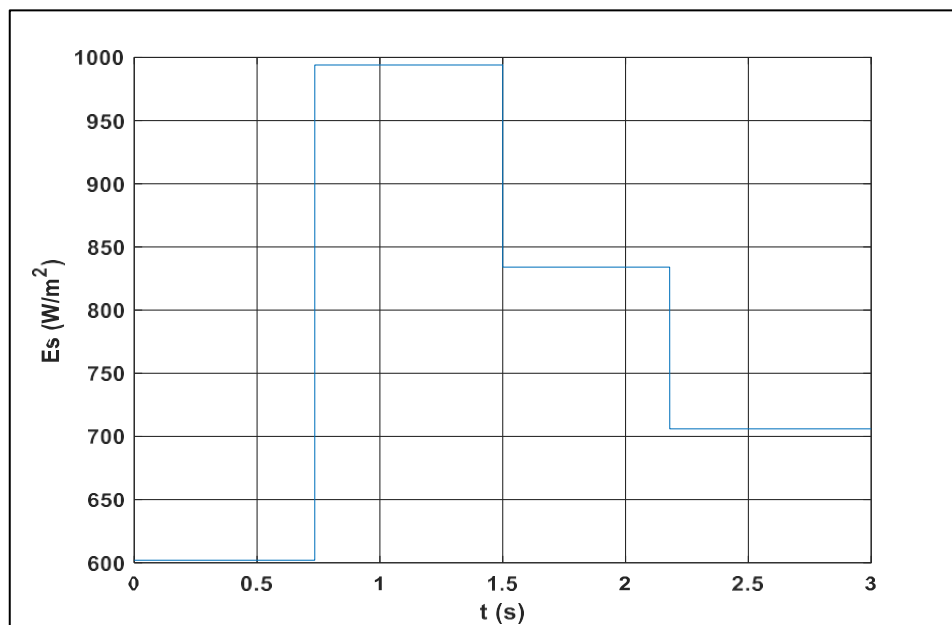
Figure IV.1 : Bloc de simulation du système complet

IV.3. Résultats de simulation

La figure (IV.2) présente le profil de la vitesse du vent en fonction du temps qu'on a proposé. La vitesse du vent varie de manière instable, ces variations traduisent le caractère turbulent et non constant du vent, ce qui est typique dans un environnement naturel. Ce type de profil est important à considérer pour l'analyse des performances d'un système éolien, car il influence directement la production d'énergie

**Figure IV.2 :** Profile de la vitesse du vent

La figure IV.3 représente le profil temporel de l'irradiation solaire E_s (W/m^2) en fonction du temps t (s) qu'on a proposé. Ce type de profil est souvent utilisé pour analyser le comportement dynamique des systèmes photovoltaïques face aux fluctuations rapides de l'ensoleillement, telles que celles causées par le passage de nuages.

**Figure IV.3 :** Profile de l'irradiation solaire

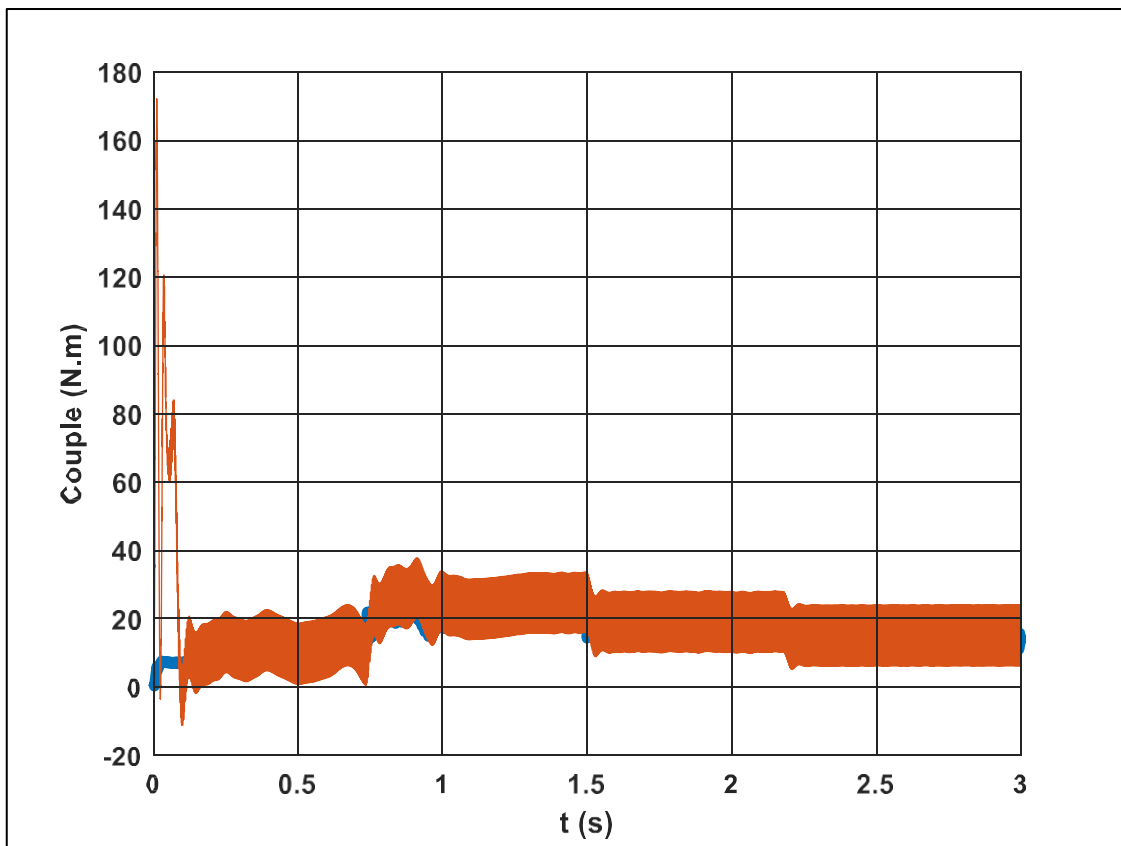


Figure IV.4 : L'évolution du couple résistant et électromagnétique en fonction du temps

La figure IV.4 présente l'évolution du couple résistant et du couple électromagnétique en fonction du temps. Après une forte variation initiale, les deux couples convergent rapidement vers des valeurs proches, avec des fluctuations modérées autour de 20 à 40 N.m. À partir de 1,5 s, on observe une régulation par paliers décroissants, indiquant une adaptation du système à la charge. Cela reflète un bon suivi du couple de charge par le couple électromagnétique, essentiel pour la stabilité du système.

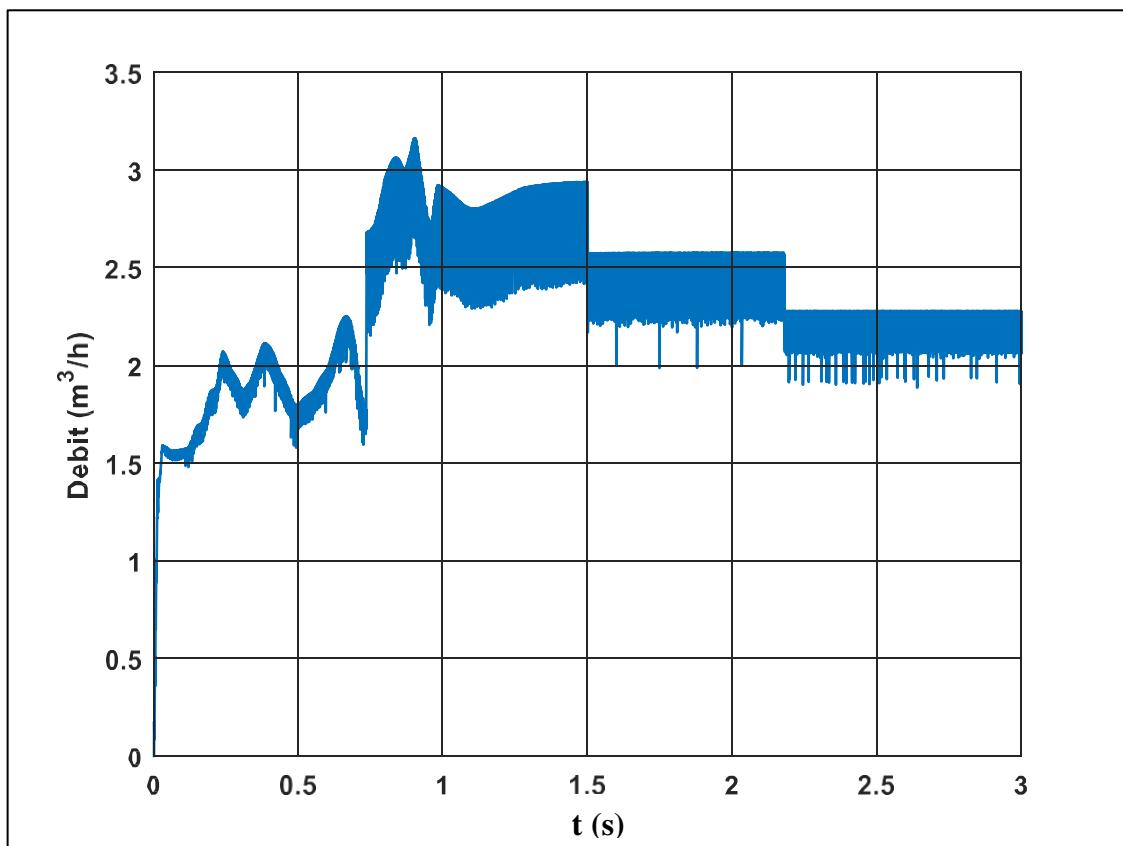


Figure IV.5 : L'évolution de débit en fonction du temps

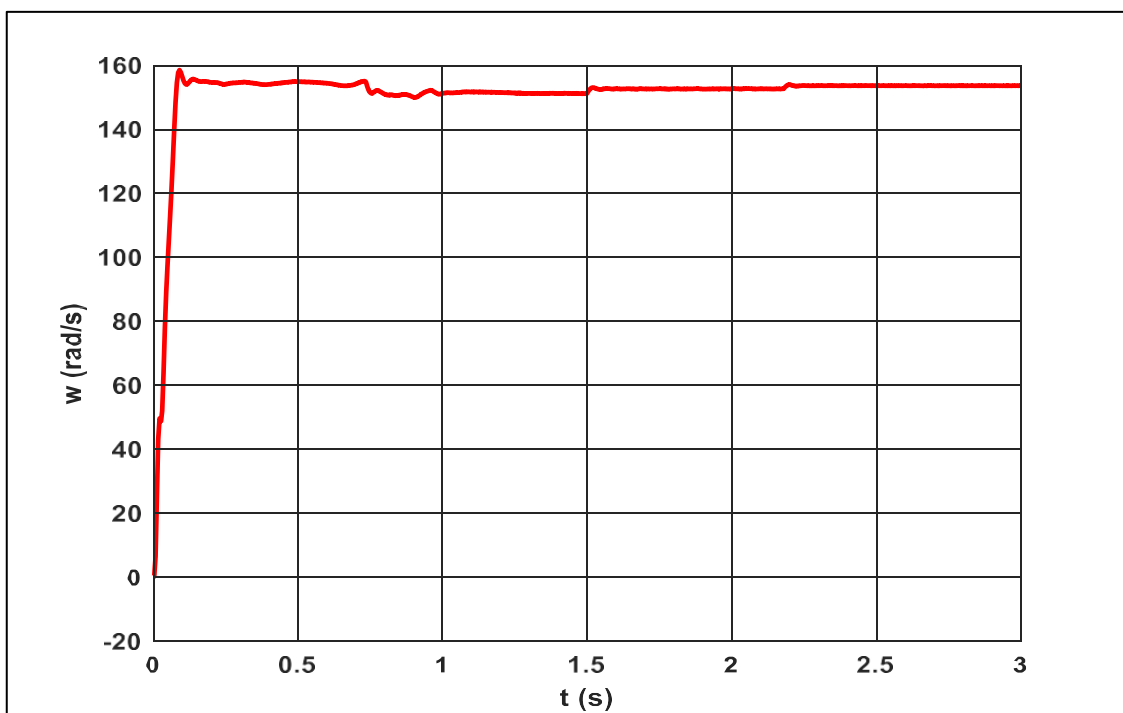


Figure IV.6 : L'évolution de la vitesse de rotation en fonction du temps

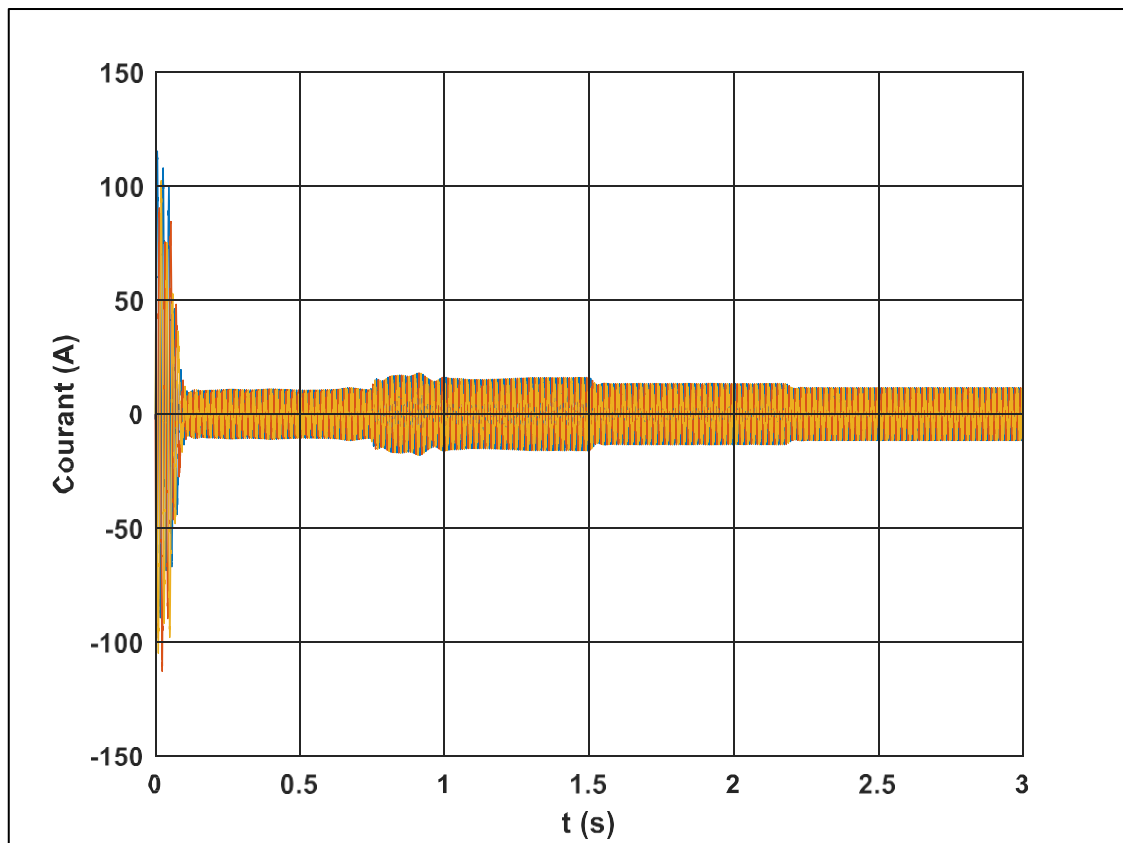


Figure IV.7 : L'évolution des courants en fonction du temps

On remarque que la vitesse (figure (IV.6)) et le débit d'eau (figure (IV.5)) suivent leur référence. La figure (IV.7) montre les courants statoriques, dont on remarque l'aspect sinusoïdal de ces courants.

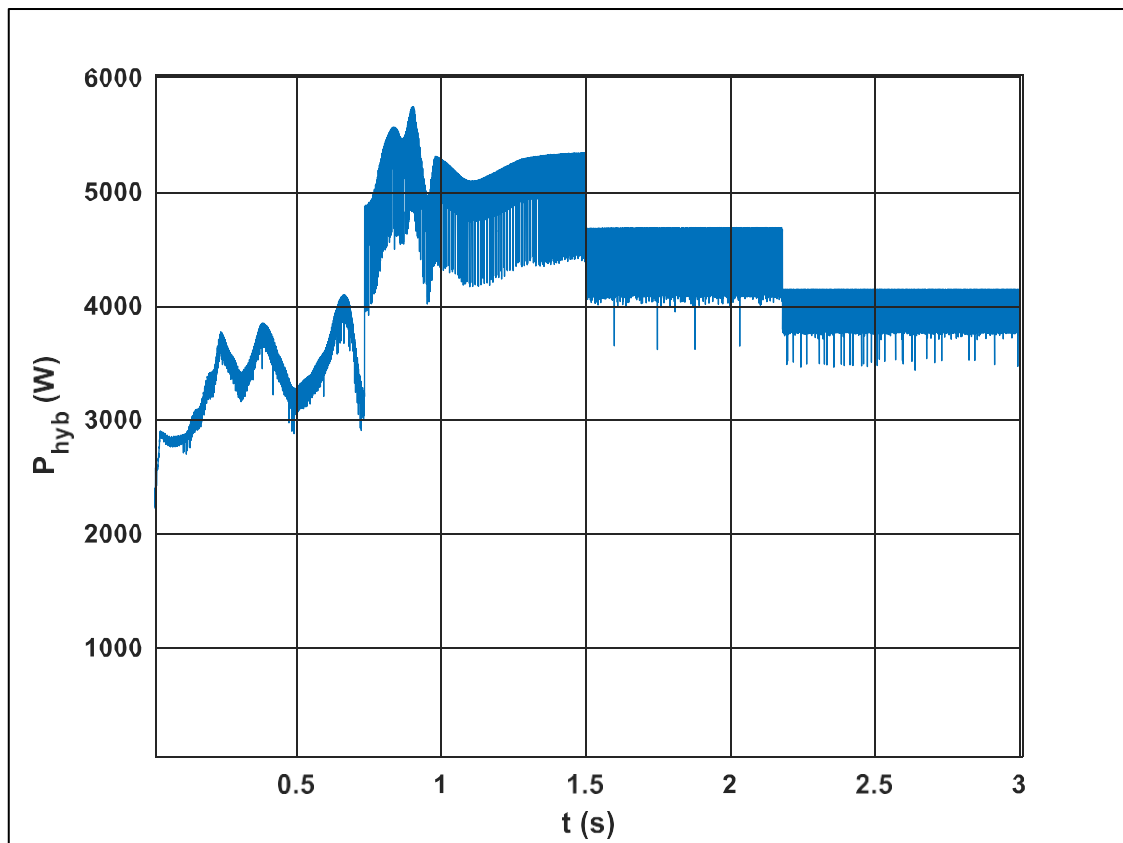


Figure IV.8 : L'évolution de la puissance hybride (éolienne et solaire) en fonction du temps

La figure IV.8 montre l'évolution de la puissance hybride (éolienne et solaire) en fonction du temps. On observe une montée progressive avec des fluctuations initiales, suivie de paliers successifs. La puissance se stabilise ensuite autour de 4000 W.

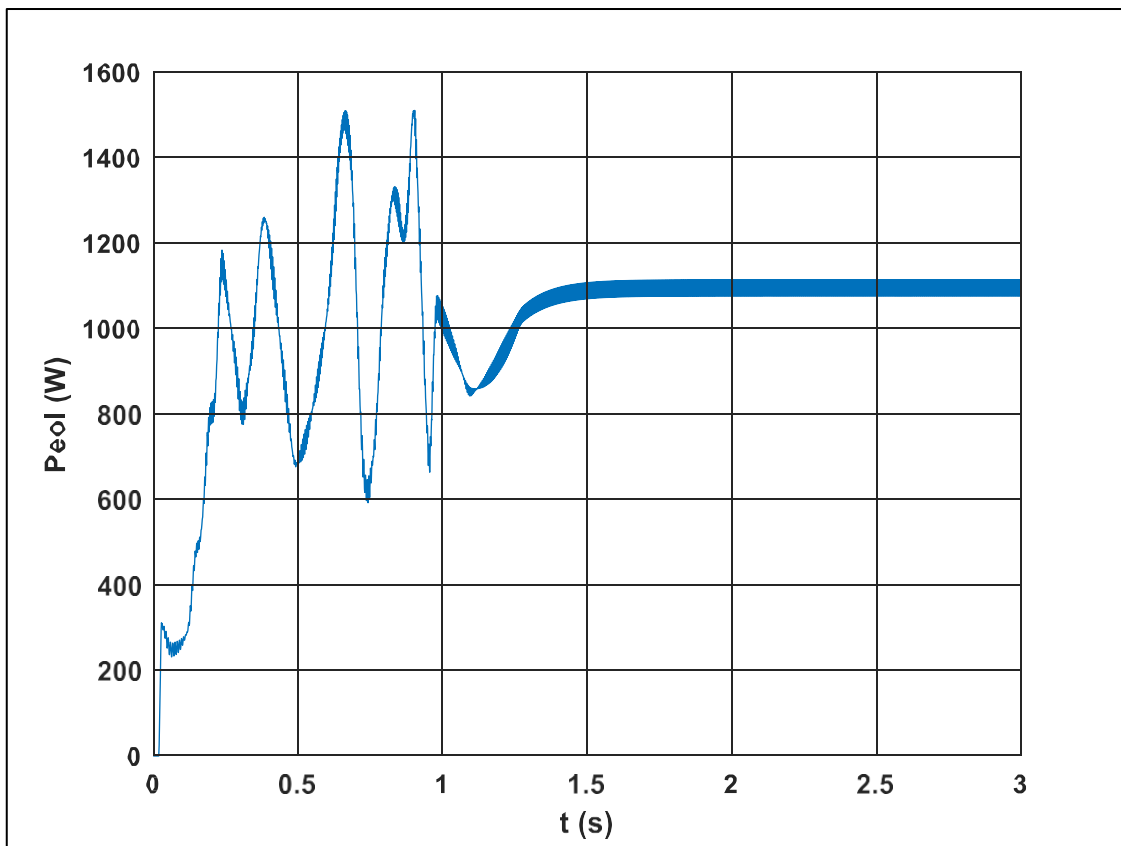


Figure IV.9 : L'évolution de la puissance éolienne en fonction du temps

La figure IV.9 représente l'évolution de la puissance éolienne en fonction du temps. Au début ($t < 1$ s), la puissance présente de fortes oscillations et des pics importants, atteignant jusqu'à environ 1500 W. Cette phase traduit un régime transitoire typique, souvent observé lors de la mise en route ou d'un changement brusque de consigne d'un système. À partir d'environ 1,2 s, les oscillations diminuent progressivement et la puissance se stabilise autour de 1100 W. Ce comportement indique que le système atteint un régime permanent, où la puissance devient constante.

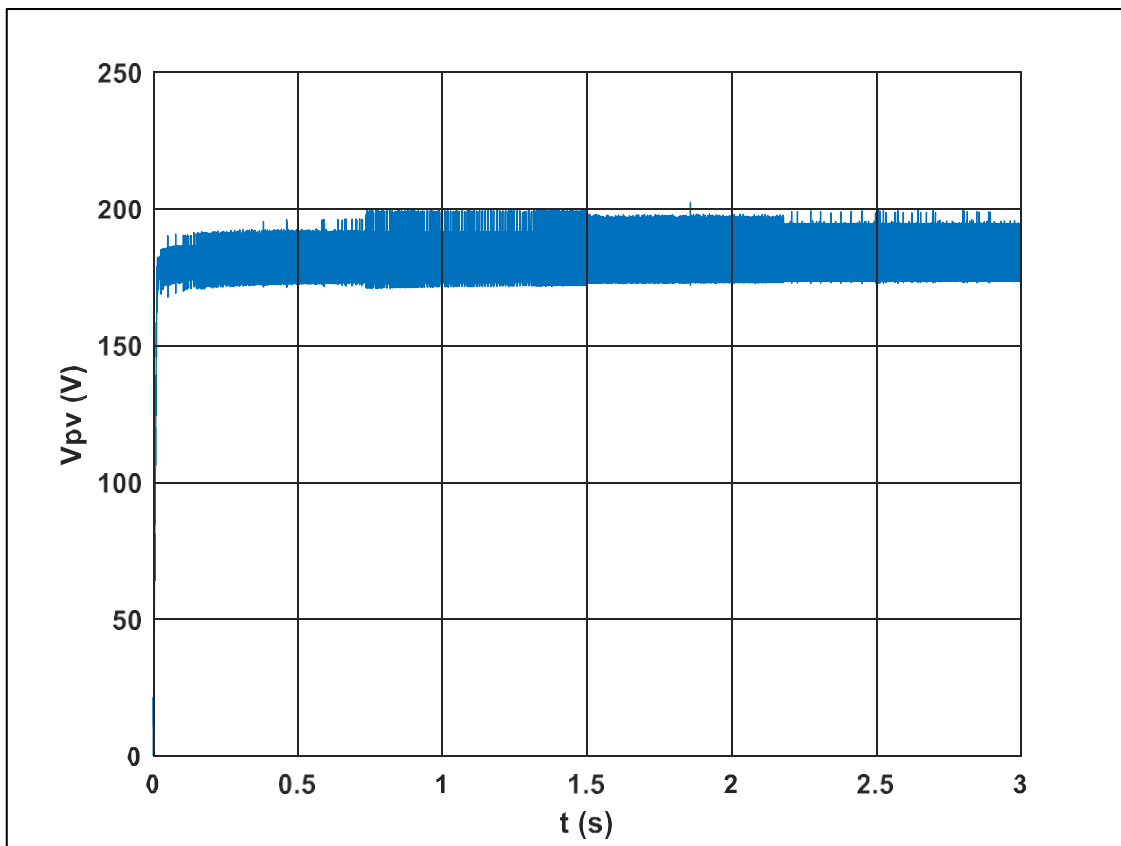


Figure IV.10 : L'évolution de la tension de GPV en fonction du temps

La figure IV.10 présente l'évolution de la tension d'un générateur photovoltaïque en fonction du temps. Au démarrage ($t = 0$), la tension augmente rapidement pour atteindre une valeur proche de 180 V. Entre 0,1 s et 3 s, la tension se stabilise autour de 190 V, avec de faibles fluctuations et quelques petits pics. Cette zone de stabilité indique que le système atteint rapidement un régime permanent après une courte phase transitoire.

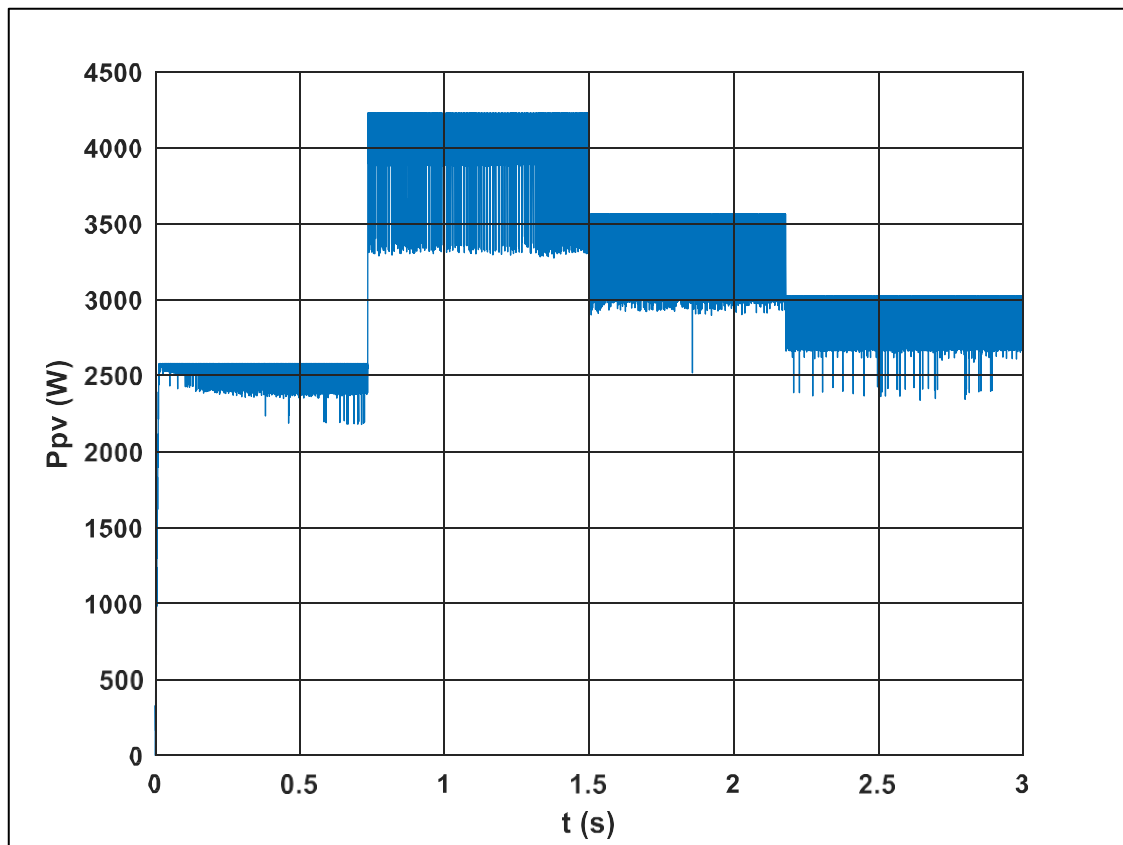


Figure IV.11 : L'évolution de la puissance de GPV en fonction du temps

La figure IV.11 représente l'évolution de la puissance d'un panneau photovoltaïque en fonction du temps. La puissance suit une forme en escalier avec quatre niveaux distincts : Entre 0 et 0.75 s : la puissance est autour de 2500 W, à $t \approx 0.75$ s : brusque augmentation vers 4200 W avec des fluctuations notables, à $t \approx 1.5$ s : chute à environ 3500 W et à $t \approx 2.2$ s : nouvelle chute vers 3000 W.

Le système semble répondre à des changements rapides de conditions d'ensoleillement simulées ou mesurées.

Les variations rapides pourraient aussi indiquer un algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT) en action, qui ajuste en continu la puissance extraite du panneau.

IV.4. Conclusion

Les résultats des simulations qui sont présentés précédemment montrent l'avantage de la commande d'un système de pompage multi-sources.

La puissance délivrée par le générateur photovoltaïque et de l'éolienne dépend de l'éclairement au niveau de la surface du panneau solaire et de la vitesse du vent. Ainsi, que la quantité d'eau pompée dépend de l'éclairement.

CONCLUSION GENERAL

Conclusion générale

Le but primordial de notre projet était de concevoir et d'élaborer un algorithme de gestion d'énergie pour un système de pompage multi-sources intégrant un générateur solaire, un générateur éolien, et un groupe motopompe, pour garantir l'approvisionnement en eau nécessaire à une ferme isolée dans 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 dimensionné un système multi-sources (photovoltaïque et éolien) 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.

Dans le troisième chapitre a permis de modéliser la chaîne de conversion hybride combinant l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne. Cette modélisation a été mise en œuvre sous l'environnement Matlab/Simulink, ce qui nous a permis de simuler l'ensemble du système de manière globale. À travers cette simulation, nous avons pu observer le comportement du système en conditions réelles et évaluer ses performances.

Les systèmes autonomes, qu'il s'agisse d'éolien ou de photovoltaïque, requièrent une multitude d'accumulateurs pour compenser l'irrégularité des ressources. Il est donc essentiel de bien dimensionner les systèmes hybrides autonomes (panneaux solaires photovoltaïques et éoliens). Une solution envisagée qui atténue l'instabilité des ressources, et améliore la qualité de vie des habitants dans les zones reculées en garantissant une distribution permanente en eau et en 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

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] A. Labouret, M. Villos, « Energie solaire photovoltaïque », Edition Dunod, Paris, 2006.
- [5] S. Astier, P. Chapouline, D. harrihey : « Modélisation et contrôle d'un système autonome au générateur photovoltaïque. Application à l'énergisassions d'un véhicule électrique solaire».
- [6] Techniques de l'ingénieur, traite génie électrique D33603.
- [7] B. Fleche, D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque », Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 2007.
- [8] 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.
- [9] http://www.energieplus-lesite.be/energieplus/page_11530.htm. Décembre 2017.
- [10] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_%C3%A9lectrique#Machines_.C3.A0_courant alternatif](http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_%C3%A9lectrique#Machines_.C3.A0_courant_alternatif). Décembre 2017
- [11] <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11531>. Décembre 2017
- [12] Anne Labouret, Michel Villos : « Energie solaire photovoltaïque ». 3eme Edi on DANOD, 2007.
- [13] L. Boudjenah, « Etude d'un système de pompage hybride (éolien, photovoltaïque) ». Mémoire de Master. Université de Bejaia, 2013.
- [14] Guy Seguer, Francis Labrique : « les convertisseurs de l'électronique de puissance ». Volume 4. La conversion continu-alternatif.1989.
- [15] MelleH.Alleg, MelleN.Chaouche : « Identification des paramètres et commande vectorielle d'une machine asynchrone ». Diplôme d'ingénieur électrotechnique, 2005.

BIBLIOGRAPHIE

- [16] D. Rekioua, cours, TP « module système de conversion d'énergie photovoltaïque ». Université de Bejaia, 2016/2017.
- [17] Ch. Serir, « Commande d'un système multi-sources photovoltaïque éolienne associé à un système de stockage ». Thèse de doctorat. Université de Bejaia, 2017.
- [18] M. Liwschitz, « Calcul des machines électriques », Tome II, Editions SPES, Lausanne, Mai 1970.
- [19] L. Mokrani, « Contribution à la CAO optimisée des machines électrique, application au moteur linéaire à induction ». Thèse de doctorat, Décembre 2005.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] J. Caron, J. Hautier, « Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone », Livre Edition TECHNIP, Paris, 1995.
- [23] S. Chekroun, A.Benoudjit et B.Abelhadi. « Approche géométrique pour la conception assistée par ordinateur des machines a induction ». Conference on electrical engineering Batna, Algérie 11 Décembre 2002.
- [24] 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.
- [25] O. Feddaoui, « Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération : Application aux Energies Renouvelables ». Mémoire de Magister. Université de Souk-Ahras, Algérie. 2014.
- [26] 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

- [27] A. Abdelli, « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive ». Thèse de Doctorat. Université de Toulouse, France 2007.
- [28] 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.
- [29] S.El Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau moyenne tension ». Thèse de doctorat d'école centrale de Lille, 2004.
- [30] D. Aouzellag, K. Ghedamsi, E.M. Berkouk, « Network power flux control of a wind generator », Renewable Energy, Vol. 34, pp. 615-622, 2009.
- [31] 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.
- [32] R. Chenni, L. Zarour, E. Matagne et T. Kerbach, « Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque ». Sciences et Technologie, Vol. N°26, page 49-54, décembre 2007.

RESUME

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

Résumé

Ce travail porte sur la conception et l'étude d'un système de pompage multi-sources destiné à des zones isolées. Il combine l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne pour garantir une alimentation fiable en eau. Le premier chapitre présente les généralités sur les énergies renouvelables, les systèmes hybrides, les composants (panneaux, éoliennes, pompes et moteurs) et leurs caractéristiques. Le deuxième chapitre détaille la modélisation des différentes chaînes de conversion d'énergie. Le troisième chapitre traite du dimensionnement du système selon les besoins en eau et les ressources disponibles. Le quatrième chapitre présente la simulation du système sous MATLAB/Simulink pour valider son fonctionnement. Les résultats montrent une efficacité notable dans différentes conditions climatiques. L'approche multi-sources améliore l'autonomie énergétique. Ce type de système est particulièrement adapté aux zones rurales dépourvues de réseau électrique. L'étude montre l'importance d'une gestion optimisée de l'énergie pour garantir la performance du pompage.

Study and sizing of a multi-source pumping system

Résuming :

This work focuses on the design and study of a multi-source pumping system intended for isolated areas. It combines photovoltaic solar energy and wind energy to ensure a reliable water supply. The first chapter presents an overview of renewable energy sources, hybrid systems, components (panels, wind turbines, pumps, and motors), and their characteristics. The second chapter details the modeling of the different energy conversion chains. The third chapter deals with the sizing of the system based on water needs and available resources. The fourth chapter presents the system simulation using MATLAB/Simulink to validate its operation. The results show notable efficiency under various climatic conditions. The multi-source approach enhances energy autonomy. This type of system is particularly suitable for rural areas without access to the electrical grid. The study highlights the importance of optimized energy management to ensure pumping performance.