

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

MEMOIRE DE FIN DE CYCLE

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Option : Energies Renouvelables.

Thème

*Etude d'un système de pompage hybride
(Eolien, Photovoltaïque)*

Présentée par :

✚ M. Lyazid BOUDJENAH

Soutenu le 20 Juin 2013 devant le Jury composé de :

M ^{me} D. REKIOUA	Professeur	Univ. A. Mira de Bejaïa	Président
M. M. ADLI	Docteur	Univ. A. Mira de Bejaïa	Examineur
M ^{me} S. BELAID	Docteur	Univ. A. Mira de Bejaïa	Promoteur

Année Universitaire : 2012/2013

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je remercie en premier lieu, le bon **DIEU** le créateur qui m'a facilité le chemin, et donné la persévérance pour réaliser ce modeste travail.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à ma promotrice M^{me} **S. BELAID** pour avoir accepté de m'encadrer, pour sa gentillesse et pour le temps qu'elle m'a consacré ;

Je remercie profondément M^r **K. IDJDARENE** pour son aide, ces conseils et pour le temps qu'il m'a consacré

Je tiens aussi à remercier le président et les membres de jury qui ont bien voulu me faire l'honneur de juger mon travail.

Je remercie profondément tous les enseignants du département de génie électriques qui m'ont donné de leurs savoir et m'ont soutenu tout au long de mon cursus.

A toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce modeste travail

DEDICACES

CE TRAVAIL EST DÉDIÉ

À MES CHERS PARENTS

En témoignage de ma reconnaissance envers le soutien, les sacrifices et tous les efforts qu'ils ont fait pour mon éducation ainsi que ma formation

A mon cher père pour qui je dois mon éducation et mon instruction, sa présence en toute circonstance m'a maintes fois rappelé le sens de la responsabilité

A ma chère mère pour sa sollicitude à mon égard, et qui m'a entouré avec sa tendresse, toujours prête à se sacrifier pour le bonheur de ses enfants

A MES FRÈRE MOULOUD ET TAHAR

Je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

À LA MÉMOIRE DE MA GRAND-MÈRE

J'aurais tant aimé que tu sois présente ;

Que Dieu ait ton âme dans sa sainte miséricorde.

À TOUS LES AUTRES MEMBRES DE MA FAMILLE

Que je n'ai pas cité, mais qui n'en demeurent pas moins chers.

À TOUS CEUX QUI ME SONT CHERS ET PROCHES

À MES AMIS DE TOUJOURS

En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.

Veillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

Liste des figures

Liste des figures

Figure (I.1) : Système de pompage hybride (éolien photovoltaïque).....	4
Figure (I.2) : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	6
Figure (I.3) : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	6
Figure (I.4) : Influence des résistances shunt et série sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque	7
Figure (I.5) : Association de cellules identiques en série.....	7
Figure (I.6) : Association de cellules identiques en parallèle	8
Figure (I.7) : Mise en série-parallèle des cellules photovoltaïques.....	8
Figure (I.8) : Présentation d'une cellule, d'un panneau et d'un champ photovoltaïque	9
Figure (I.9) : Caractéristiques électriques et courbes de puissance d'un module photovoltaïque	10
Figure (I.10) : Exemple de constituants d'un système éolien à axe horizontal.....	12
Figure (I.11) : Eoliennes à axe vertical	14
Figure (I.12) : Eolienne sous le vent	15
Figure (I.13) : Eolienne face au vent.....	16
Figure (I.14) : Convertisseur DC/DC (Elévateur de tension).....	17
Figure (I.15) : Convertisseur DC/DC (Abaisseur de tension).....	17
Figure (I.16) : Schéma de l'onduleur	18
Figure (I.17) : Groupe motopompe	18
Figure (I.18) : Moteur à courant continu.....	19
Figure (I.19) : Moteur synchrone	20
Figure (I.20) : Moteur asynchrone	21
Figure (I.21) : Pompe centrifuge	22
Figure (I.22) : Caractéristique Couple-Vitesse d'une pompe centrifuge	23
Figure (I.23) : Caractéristique Débit-Vitesse d'une pompe centrifuge.....	23
Figure (I.24) : Pompe volumétrique.....	23

Figure (I.25) : Caractéristique Couple-Vitesse d'une pompe volumétrique	24
Figure (I.26) : Caractéristique Débit-Vitesse d'une pompe volumétrique.....	24
Figure (II.1) : Structure du système de pompage hybride (photovoltaïque – éolien)	25
Figure (II.2) : Structure de la chaîne de conversion éolienne	26
Figure(II.3) : Courbe caractéristique de la turbine éolienne. $C_p(\lambda)$	27
Figure(II.4) : Dimensionnement géométrique de la voilure Savonius	29
Figure (II.5) : Schéma du modèle dynamique de la turbine Savonius	30
Figure (II.6) : Structure du redresseur	32
Figure (II.7) : Courant circulant dans le bus continue.....	33
Figure(II.8) : Structure de la chaine de conversion photovoltaïque	34
Figure (II.9) : Schéma électrique équivalent du hacheur survolteur	36
Figure (II.10) : Circuit de l'onduleur relié à la machine	37
Figure (II.11) : Représentation des enroulements statoriques et rotoriques.....	39
Figure (II.12) : Vecteurs des tensions dans le repère (dq)	42
Figure (III.1) : Le couple de référence en fonction de la vitesse de rotation	48
Figure (III.2) : Schéma bloqué de la partie mécanique de la turbine éolienne avec MPPT.....	49
Figure (III.3) : Vitesse du vent.....	49
Figure (III.4) : Allure de la vitesse de la turbine	50
Figure (III.5) : Allure de la puissance de la turbineveolienne.....	50
Figure (III.6) : Allure du couple de la turbine éolienne	50
Figure (III.7) : Caractéristique de la vitesse réduite λ	51
Figure (III.8) : Caractéristique de coefficient de puissance C_p	51
Figure (III.9) : Schémas bloc de commande du générateur éolien.....	53
Figure(III.10.a) : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $(P_{pv}(V_{pv}))$	54
Figure(III.10.b) : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $(I_{pv}((V_{pv}))$	54

Figure(III.11.a) : Influence de la température sur la caractéristique ($P_{pv}(V_{pv})$)	55
Figure(III.11.b) : Influence de la température sur la caractéristique ($I_{pv}(V_{pv})$).....	55
Figure(III.12) : Caractéristique puissance tension d'une cellule photovoltaïque(GPV) et principe de recherche de point de puissance	56
Figure (III.13) : Organigramme de l'algorithme P&O.....	57
Figure (III.14) : Caractéristiques ($I_{pv}(V_{pv})$) et ($P_{pv}(V_{pv})$) dans les conditions STC.....	58
Figure (III.15) : Variation de E_s et T_c	59
Figure (III.16) : Allure du courant I_{pv}	59
Figure (III.17) : Allure de la tension V_{pv}	59
Figure (III.18) : Caractéristique de la puissance P_{pv}	60
Figure (III.19) : Schéma de principe de la commande vectorielle à flux orienté.....	63
Figure (IV.1) : Irradiation solaire et vitesse du vent moyenne mensuelle journalière du site de Bejaïa de 1998 à 2007	67
Figure (IV.2) : Vitesse du vent.....	71
Figure (IV.3) : Vitesse de la turbine Ω	71
Figure (IV.4) : Couple éolien	71
Figure (IV.5) : Puissance éolienne	71
Figure (IV.6) : Allure du coefficient de puissance C_p	71
Figure (IV.7) : Allure de λ	71
Figure (IV.8) : Courant I_{sd} et I_{sq}	72
Figure (IV.9) : Zoom sur les courant statorique I_{sabc}	72
Figure (IV.10) : Variation d'ensoleillement.....	73
Figure (IV.11) : Allure de la puissance photovoltaïque	73
Figure (IV.12) : Allure de la tension photovoltaïque	73
Figure (IV.13) : Allure du courant photovoltaïque	73
Figure (IV.14) : Puissance (Hybride, éolienne et photovoltaïque)	74

Figure (IV.15) : Tension du bus continu Vdc	74
Figure (IV.15.a) : Zoom sur le régime transitoire de la tension Vdc	74
Figure (IV.15.b) : Zoom sur le régime permanent de la tension Vdc.	74
Figure (IV.16) : Allure de la vitesse de la MAS	75
Figure (IV.17) : Allure du Cem et du Cr.....	75
Figure (IV.18) : Allure du flux.....	75
Figure (IV.19) : Courant Isd et Isq.....	75
Figure (IV.20) : Zoom sur les courants statoriques.....	76
Figure (IV.21) : Allure du débit	76
Figure (IV.22) : Profile de vent.....	77
Figure (IV.23) : Vitesse de la turbine éolienne	77
Figure (IV.24) : Couple éolien	77
Figure (IV.25) : Puissance de la turbine éolienne	77
Figure (IV.26) : Allure du coefficient de puissance C_p	77
Figure (IV.27) : Allure de λ	77
Figure (IV.28) : Courant Isd' et Isq'	78
Figure (IV.29) : Courants statoriques Isabc	78
Figure (IV.30) : Profile d'ensoleillement.....	78
Figure (IV.31) : Profile de température.....	78
Figure (IV.32) : Allure de la tension photovoltaïque	79
Figure (IV.33) : Allure du courant photovoltaïque	79
Figure (IV.34) : Allure de la puissance photovoltaïque	79
Figure (IV.35) : Puissance (hybride, éolienne et photovoltaïque)	80
Figure (IV.36) : Allure de la tension Vdc	80
Figure (IV.36.a) : Zoom sur le régime transitoire de la tension Vdc	80
Figure (IV.36.b) : Zoom sur le régime permanent de la tension Vdc	80
Figure (IV.37) : Allure de la vitesse de la MAS Allure des courants Isd et Isq.....	80

Figure (IV.38) : Allure du Cem et Cr.....	80
Figure (IV.39) : Allure du flux.....	81
Figure (IV.40) : Courants Isd et Isq	81
Figure (IV.41) : Zoom sur les courants statoriques de la MAS	81
Figure (IV.42) : Allure du débit	81

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau (IV.1) : Energie mensuelle produites par les générateurs éoliens et photovoltaïques et leur surface	68
Tableau (IV.2) : Coûts des générateurs (2005)	69
Tableau (IV.3) : Dimensionnement selon la moyenne mensuelle et le coût du système hybride pour chaque fraction de charge.....	69

Liste des symboles et Abréviations

Liste des symboles et Abréviations

I_{ph}	Courant produit par la photopile. (A)
I_d	Courant de la diode. (A)
R_s	Résistance série est due aux pertes joule (Ω)
R_{sh}	Résistance shunt
V_{co}	La tension en circuit ouvert
I_{sc}, I_{cc}	Le courant de court-circuit
E_s	Ensoleillement en W/m^2
T_a	Température ambiante ($^{\circ}C$)
T_c	Température de jonction (K).
T_{stc}	Température de référence des panneaux ($T_{stc} = 25^{\circ}C$)
I_{pv}	Courant photovoltaïque. (A)
V_{pv}	Tension photovoltaïque. (V)
α_{sc}	Représente un coefficient d'incrémentatation du courant I_{sc}
β_{oc}	Représente un coefficient d'incrémentatation de la tension V_{oc}
ΔI	Représente la variation du courant. (A)
ΔT	Représente la variation de la température. ($^{\circ}C$)
ΔV	Représente la variation de la tension. (V)
$I_{PV,nouv}$	Représente la nouvelle valeur du coutant après la correction. (A)
$V_{PV,nouv}$	Représente la nouvelle valeur de la tension après la correction. (A)
I_{sabc}, I_{rabc}	Respectivement les vecteurs des courants statorique et rotorique.
V_{sabc}, V_{rabc}	Respectivement les vecteurs des tensions statorique et rotorique.

I_{hyb}	Courant hybride
I_c	Courant circulant dans la capacité
I_{ch}	Courant de charge
V_{dc}	Tension du bus continu
C_{dc}	Capacité du bus continu
$I_{\text{sd}}, I_{\text{sq}}$	Courant statorique direct et quadratique.
L_r, M_r	Les inductances propres et mutuelles rotorique
L_s, L_r	Inductance cyclique statorique et rotorique
l_s, l_r	Inductance de fuite statorique et rotorique.
L_s, M_s	Les inductances propres et mutuelles statorique
M_{sr}, M_{rs}	L'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor.
R_s, R_r	Respectivement les matrices des résistances statorique et rotorique.
$V_{\text{sd}}, V_{\text{sq}}$	Tension statorique direct et quadratique.
$V_{\text{rd}}, V_{\text{rq}}$	Tension rotorique direct et quadratique.
$\Phi_{\text{sabc}}, \Phi_{\text{rabc}}$	Respectivement les vecteurs des flux statorique et rotorique.
$I_{\text{rd}}, I_{\text{rq}}$	Courant statorique direct et quadratique.
$\Phi_{\text{sd}}, \Phi_{\text{sq}}$	Flux rotorique direct et quadratique.
$\Phi_{\text{rd}}, \Phi_{\text{rq}}$	Flux rotorique direct et quadratique.
Q	Débit de la pompe (m^3/s).
g	Accélération de la pesanteur ($9.81\text{m}/\text{s}^2$).
P_{hyd}	Puissance hydraulique (W).

h	Hauteur manométrique totale que doit convaincre la pompe(m).
P_{ele}	La puissance électrique du groupe moteur pompe (W).
P_d	La puissance électrique demandée par la charge
V_v	Vitesse du vent (m/s).
P_v	Puissance de vent (W).
P_t, P_{eol}	Puissance éolienne ou puissance de la turbine (W).
$P_{pv,t}$	Puissance photovoltaïque total (W).
$P_{eol,t}$	Puissance éolienne total (W).
$I_{pv,t}$	Courant photovoltaïque total (A).
$N_{pv,p}$	Nombre de panneaux en parallèle.
ρ	Masse volumique de l'air (kg/ m ³).
A_t	La surface circulaire balayée par la turbine (m ²).
C_p	Coefficient de puissance.
C_p^{max}	Coefficient de puissance maximum.
λ	Vitesse spécifique.
λ_{opt}	Vitesse spécifique optimale.
R	Rayon de la turbine (m).
E_{ref}	Ensoleillement de référence. ($E_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$)
I_{Rsh}	Courant passant par la résistance shunt. (A)
I_{mpp}	Courant optimum (au point de puissance maximale) (A)
I_s	Courant de polarisation de la diode ou courant de saturation. (A)
P_n	Puissance nominale du moteur asynchrone(W).

R_{sh}	Résistance shunt due à courant de fuite (Ω)
V_{mpp}	Tension optimale (au point de puissance maximale) (V)
ω_n	Vitesse nominale du moteur asynchrone (rad /s)
C_{em}	Couple électromagnétique
AC	Alternatif courant
DC	Direct courant
g	Accélération de la pesanteur (m/s ²)
HMT	Hauteur manométrique totale
K	Constante de Boltzmann. $K = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/k}$
M	Inductance mutuelle
MPP	Point de puissance maximum
MPPT	Maximum power point tracking
P&O	Perturbation et observation
PV	Panneau photovoltaïque
MAS	Moteur asynchrone
MSAP	Moteur synchrone a aiment permanent
GSAP	Générateur synchrone a aiment permanent

sommaire

Sommaire :

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

Chapitre I : Généralité sur les systèmes de pompage hybride

Introduction	3
I.1. Les différentes combinaisons des systèmes hybrides	3
I.1.1. Système hybride (photovoltaïque – groupe électrogène).....	3
I.1.2. Système hybride (éolien – groupe électrogène).....	3
I.1.3. Système hybride (photovoltaïque – éolien – groupe électrogène).....	4
I.2. Energie solaire	5
I.2.1 Principe de conversion photovoltaïque	5
I.2.2 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	6
I.2.3 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque	7
I.2.4 Association série et parallèle des cellules photovoltaïques	7
I.2.5. Modèle de générateur photovoltaïque.....	9
I.2.6. Nécessité de fonctionnement optimal du générateur	9
I.2.7. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire.....	10
I.3. Energie éolienne	11
I.3.1. Constitution d'un aérogénérateur	11
I.3.2. Classification des éoliennes	13
I.3.2.1. Eolienne à axe Vertical	13
I.3.2.2. Eolienne à Axe Horizontal.....	14
I.3.3. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	16
I.4. Convertisseurs statiques.....	16
I.4.1. Différents types de convertisseurs	17
I.4.1.1. Convertisseurs DC /DC (hacheurs).....	17
I.4.1.2. Le convertisseur continu- alternatif (onduleur)	18
I.5. Groupe moteur-pompe	18
I.5.1. Moteur	19
I.5.1.1. Moteur à courant continu	19

I.5.1.2. Moteur à courant alternatif	19
I.5.2. Pompes	22
I.5.2.1 Les pompes centrifuges.....	22
I.5.2.2. Les pompes volumétriques	23
Conclusion.....	24

Chapitre II : Modélisation du système de pompage hybride

Introduction	25
II. Modélisation du système de pompage hybride	25
II.1. Modélisation de la chaîne de conversion éolienne	26
II.1.1. Modélisation de la vitesse du vent.....	26
II.1.2. Modélisation de la turbine éolienne.....	27
II.1.3. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents	30
II.1.3.1. Equations électriques et magnétiques de la machine dans le repère (abc)	30
II.1.3.2. Application de la transformation de Park aux équations de la MSAP	31
II.1.4. Modélisation du redresseur.....	32
II.1.5. Modélisation de bus continu.....	33
II.2. Modélisation de la chaîne de conversion photovoltaïque.....	34
II.2.1. Modélisation du générateur photovoltaïque	34
II.2.2. Modélisation du convertisseur DC/DC (Hacheur survolteur)	36
II.2.3. Modélisation du convertisseur DC/AC.....	37
II.3. Modélisation du groupe moteur-pompe	39
II.3.1. Modélisation de la machine asynchrone	39
II.3.1.1. Hypothèses.....	39
II.3.1.2. Equations électriques et magnétiques de la machine dans le repère (abc)	40
II.3.1.3. Application de la transformation de Park aux équations de la MAS	42
II.3.2. Modélisation de la pompe.....	45
Conclusion.....	46

Chapitre III : Simulation et commande du système éolien, photovoltaïque

Introduction	47
--------------------	----

III.1. Commande du système éolien.....	47
III.1.1. Commande au point de puissance maximale (MPPT)	47
III.1.2. Simulation de la turbine éolienne avec l’algorithme MPPT	48
III.1.3. Commande de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP).....	51
III.2. Commande du système photovoltaïque	53
III.2.1. Simulation du panneau photovoltaïque	53
III.2.1.1. Influence de l’ensoleillement E_s	53
III.2.1.2. Influence de la température T_c	54
III.2.2. Commande du système photovoltaïque au point de puissance maximale	55
III.2.3. Principe de la méthode de perturbation et d’observation (P&O).....	56
III.2.4. Simulation du système photovoltaïque avec l’algorithme MPPT	58
III.2.4.1. Variation de l’ensoleillement E_s et de la température T_c	58
III.3. Commande de la chaîne motopompe	60
Conclusion.....	63

Chapitre IV : Dimensionnement et simulation du système de pompage hybride

Introduction	64
IV.1. Dimensionnement du système hybride pour le pompage	64
IV.1.1. Détermination de la puissance de charge	64
IV.1.2. Donnée météorologique disponible dans la région de Bejaïa	65
IV.1.3. Calcul de l’énergie photovoltaïque	66
IV.1.4. Calcul de l’énergie éolienne	66
IV.1.5. Dimensionnement des systèmes éolien et photovoltaïque	67
IV.1.6. Analyse des résultats de dimensionnement	68
IV.2. Résultats de simulation	70
IV.2.1. Fonctionnement avec des conditions constantes.....	70
IV.2.2. Fonctionnement sous des conditions variables	76
Conclusion.....	82
Conclusion générale	83
Bibliographie	85
Annexes.....	89

Introduction générale

Introduction générale

L'utilisation des énergies renouvelables connaît une croissance significative dans le monde, devant la demande croissante de l'énergie électrique essentiellement pour les besoins des régions éloignées dépourvus d'électricité fiable. Une grande partie de l'énergie consommée provient des combustibles fossiles, dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement, cette menace c'est manifestée principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre. **[ZID11]**

Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement, et s'inscrivent parfaitement dans l'effort global de réduction des émissions de CO₂. Ce sont des énergies propres, abondantes et inépuisables qui peuvent produire de l'électricité sans l'émission des gaz polluants. Elles constituent une solution économique pour fournir de l'électricité aux populations isolées. **[DEB09]**

Dans la recherche de solutions à la maîtrise de l'énergie applicable au pompage d'eau, il nous paraît intéressant de connaître les bénéfices d'une nouvelle technique de pompage, basée sur la complémentarité de deux sources d'énergies renouvelables, à savoir l'énergie solaire et l'énergie éolienne. Ces deux énergies ne se concurrencent pas mais au contraire peuvent se valoriser mutuellement. C'est pourquoi on propose ici un système hybride composé de ces deux sources d'énergie, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles. Le cadre principalement étudié est celui du pompage d'eau ; ce qui permettra l'élimination du stockage électrique très coûteux au profit d'un stockage hydraulique moins dispendieux.

Ce travail est subdivisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation du système de pompage hybride, on commence par donner quelque différentes combinaisons des systèmes hybrides, ensuite on donne une bref description des deux systèmes (éolien et photovoltaïque), puis une bref définition sur les convertisseurs (AC-DC, DC-DC et DC-AC), et enfin le groupe motopompe.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation des différents éléments de la chaîne de pompage. On commence par la modélisation de la chaîne de conversion éolienne composée d'une éolienne à axe vertical, d'une machine synchrone à aimants permanents et d'un redresseur. La deuxième chaîne photovoltaïque est composée de plusieurs panneaux photovoltaïques et d'un hacheur parallèle. La modélisation du groupe moteur pompe, composé d'un moteur asynchrone à cage et d'une pompe centrifuge, sera présentée.

La commande des deux chaînes de conversion d'énergie est présentée dans le troisième chapitre. Cependant l'éolienne lors de son fonctionnement n'engendre pas une puissance maximale, pour résoudre ce problème un algorithme est introduit dans la turbine afin d'extraire la point de puissance maximale (MPP). De même pour le générateur photovoltaïque, un algorithme d'optimisation est introduit à travers un convertisseur DC/DC pour fonctionner à sa puissance maximale (MPPT). Une simulation des deux chaînes de conversion sera présentée.

Le dernier chapitre sera consacré au dimensionnement du système global Une étude technico-économique sera faite pour déterminer la configuration du système hybride la plus économique pour alimenter notre charge qui est un groupe motopompe. Les résultats de simulation seront présentés avec interprétations.

On termine par une conclusion générale et perspectives.

Chapitre I

Généralité sur les systèmes de pompage hybride

Introduction :

Les énergies renouvelable sont des énergies dont la source est illimitée et non polluante et dont l'exploitation cause le moins de dégâts écologique, comme le vent, l'ensoleillement, le mouvement de l'eau dans les cours d'eau ou les mers...etc.

Dans ce présent chapitre, on va présenter la définition et les différentes combinaisons des systèmes hybrides, nous nous intéressons en particulier aux sources solaires qui est une énergie produite à partir du rayonnement solaire et aux sources éoliennes qui produite de l'énergie à partir de la vitesse du vent, qui sont considérer comme une meilleur alternative pour une production d'électricités en site isolé.

I.1. Les différentes combinaisons des systèmes hybrides :

Le système hybride de production d'énergie, de façon générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables. Dans ce qui suit nous allons présenter quelque différente combinaison de système hybride.

I.1.1. Système hybride (photovoltaïque – groupe électrogène) :

Les panneaux photovoltaïques et les groupes électrogènes se comportent très bien les un aux autres. Les systèmes photovoltaïques n'entraînent aucune consommation de combustible et leur frais d'entretien sont généralement bas, mais les frais d'immobilisation sont un peu plus élevés et la production d'énergie est de façon intermittente. Par contre les groupes électrogènes entraînent des couts d'entretien et d'exploitation élevée, mais peuvent produire de l'énergie à la demande. La combinaison de ces deux sources permet la production continue de l'énergie, cependant elle n'est pas entièrement renouvelable [Mou 05].

I.1.2. Système hybride (éolien – groupe électrogène) :

Ces types de systèmes produisent de l'énergie afin de réduire la consommation en carburant du groupe électrogène, tout en gardant une qualité d'énergie acceptable. Pour être économiquement justifié, l'investissement en équipement nécessaire pour profiter de l'énergie du vent, doit se récupérer à travers les économies réalisées sur le carburant. A cause de la grande quantité de mini réseaux isolés dont l'énergie primaire et le pétrole, dans les pays développés ou dans les pays en voie de développement, le marché pour réadapter ces système en sous-système hybrides avec des sources renouvelable de faible cout, comme l'éolien, est substantiel. [Lop 06]

I.1.3. Système hybride (photovoltaïque – éolien – groupe électrogène) :

Ce type de système est bien adapté à une production décentralisée d'électricité, peut contribuer à résoudre le problème de raccordement aux réseaux d'électricité. La donnée initiale dans la mise en œuvre d'un tel système de production à partir de sources d'énergies renouvelables comme pour tous autres systèmes énergétiques est la demande, qui va être déterminée par rapport à la charge à alimenter. Cette demande doit être estimée aussi précisément que possible tant d'un point de vue des puissances appelées que de sa répartition temporelle, même si son caractère souvent aléatoire rend cette tâche bien difficile. L'ajout d'un groupe électrogène à un système de production d'énergie renouvelable, peut d'une part augmenter la fiabilité du système à alimenter des charge et d'autre part diminuer de manière importante de la taille du système de stockage [Mou 99], [Kou 02], [Sah 07].

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

Le système qu'on va étudier est résumé dans la figure (I.1).

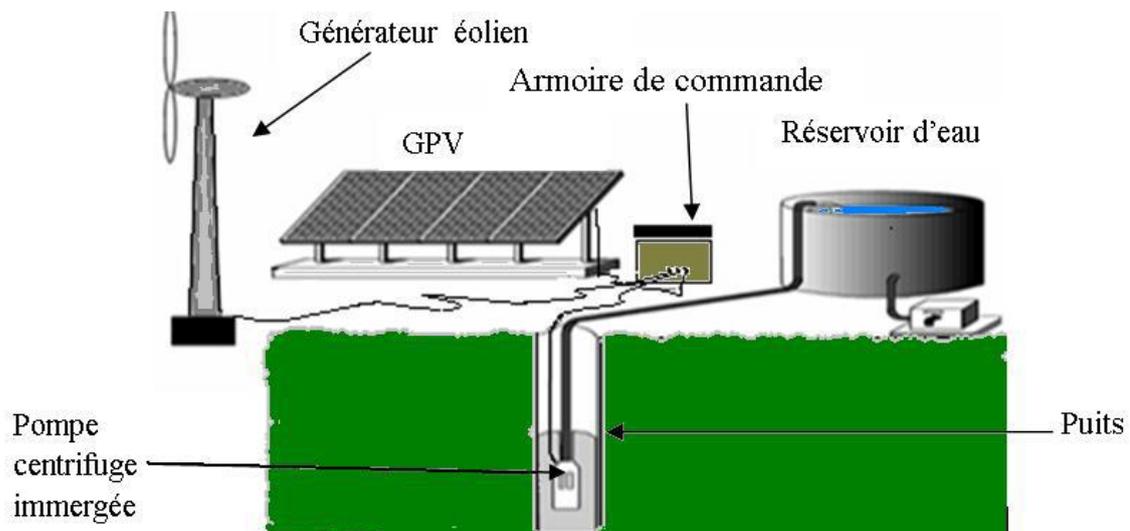


Figure (I.1) : Système de pompage hybride (éolien photovoltaïque). [Mez 11]

Il est constitué principalement de :

- Un générateur éolien et un générateur photovoltaïque ;
- Trois convertisseurs statiques ; un hacheur, un redresseur et un onduleur ;
- Un groupe motopompe qui comprend un moteur et une pompe ;
- Un réservoir de stockage.

Les avantages de choix de ce système sont :

- ✓ Production 100% renouvelable.
- ✓ Par souci d'environnement, n'émet pas des gaz à effet de serre.

En va définir brièvement ces deux sources d'énergie (photovoltaïque et éolien), et on va présenter les différents convertisseurs, moteurs et les pompes utilisée.

I.2. Energie solaire :

L'effet photovoltaïque est la conversion de la lumière en électricité par l'intermédiaire de cellules solaires qui sont à base de matériaux semi-conducteurs, ce mode de conversion qui ne provoque aucune pollution, devient l'un des domaines de recherche les plus récents.

Dans plusieurs applications la source photovoltaïque remplace les générateurs classiques, parmi lesquelles on trouve le pompage de l'eau à base des panneaux solaires ce qui est devenu l'une des solutions pour les régions éloignées.

I.2.1 Principe de conversion photovoltaïque : [Fle 07]

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

Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre

elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction PN a été formée.

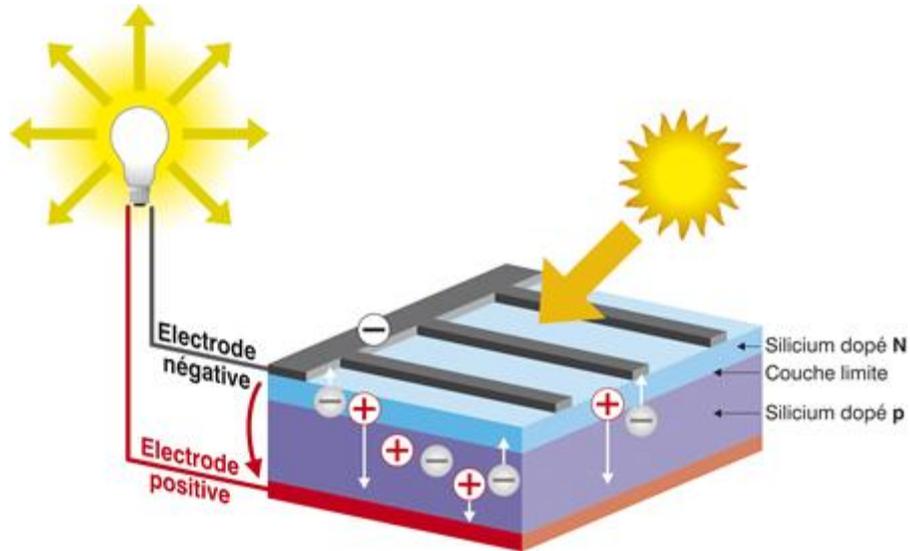


Figure (I.2) : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [Phot].

I.2.2 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque : [Bel 12]

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

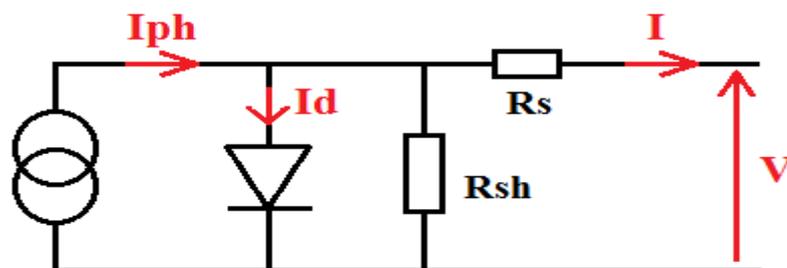


Figure (I.3) : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

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

Résistance série R_s : modélise les pertes ohmiques du matériau (chutes de tension).

Résistance shunt R_{sh} : modélise les courants parasites qui traversent la cellule (courant de fuite).

I.2.3 caractéristique d'une cellule photovoltaïque : [Ber 09]

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

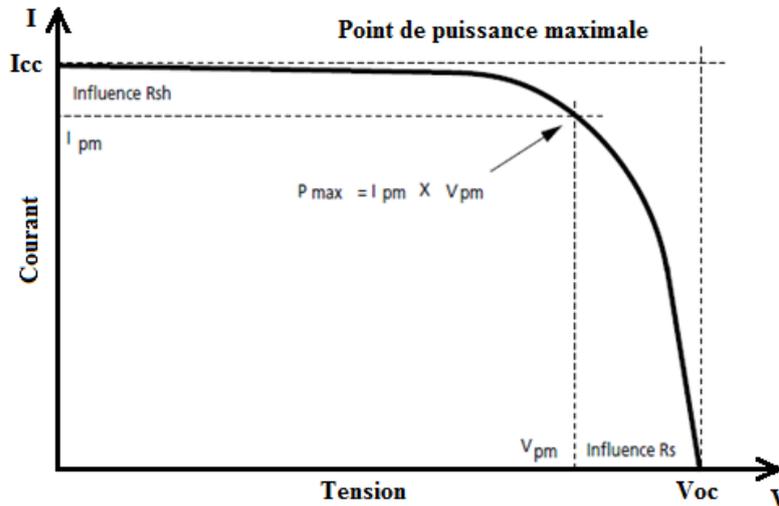


Figure (I.4) : Influence des résistances shunt et série sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

I.2.4 Association série et parallèle des cellules photovoltaïques :

➤ **Mise en série :**

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

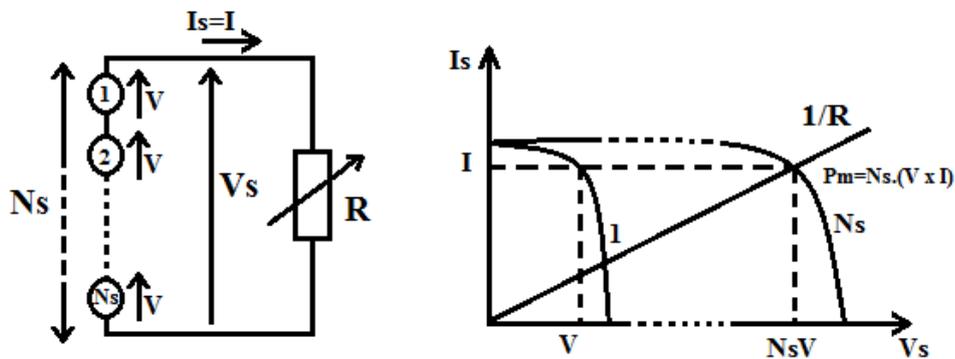


Figure (I.5) : Association de cellules identiques en série.

➤ **Mise en parallèle :**

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

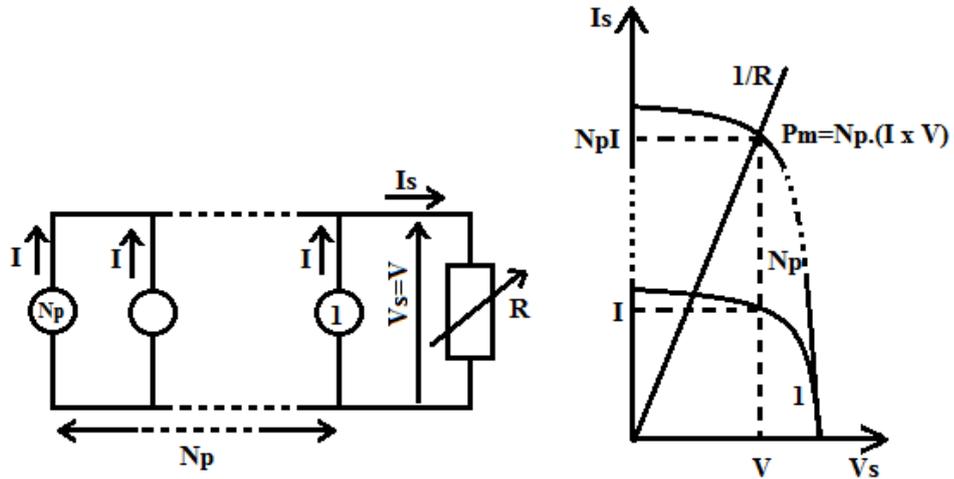


Figure (I.6) : Association de cellules identiques en parallèle.

➤ **Mise en série et parallèle (mixte) :**

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

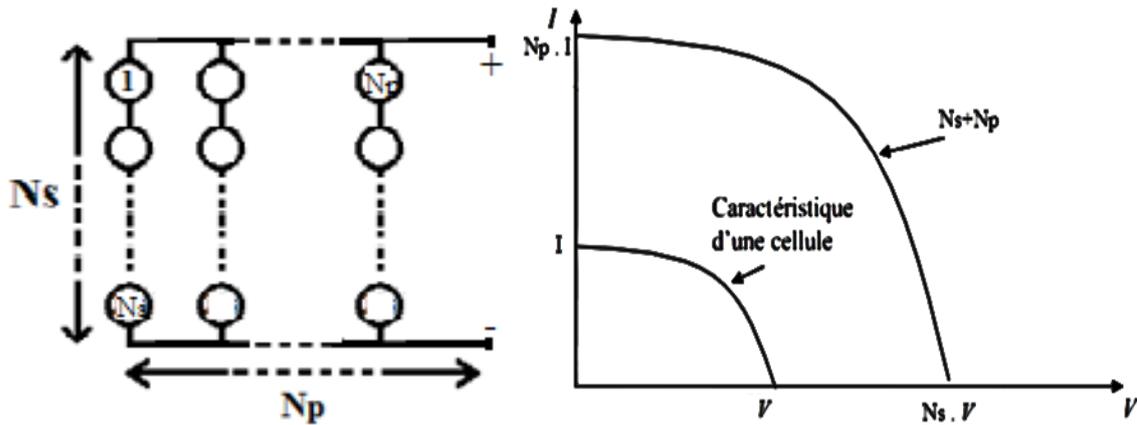


Figure (I.7) : Mise en série-parallèle des cellules photovoltaïques.

I.2.5. Modèle de générateur photovoltaïque :

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

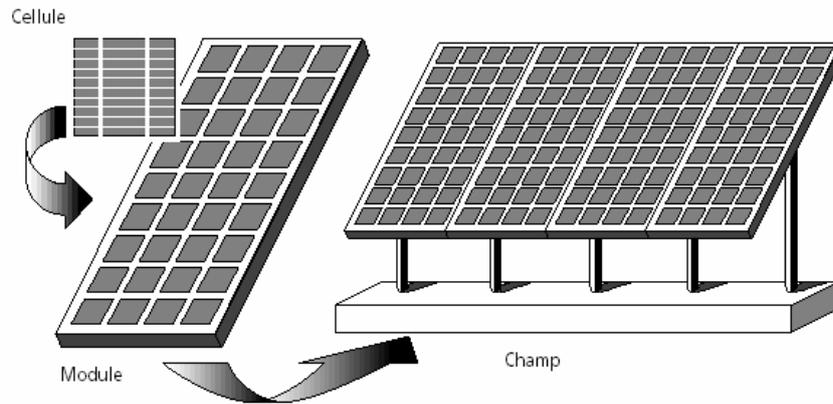


Figure (I.8) : Présentation d'une cellule, d'un panneau et d'un champ photovoltaïque. [Mao 05]

I.2.6. Nécessité de fonctionnement optimal du générateur [Bou 08]

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

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

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

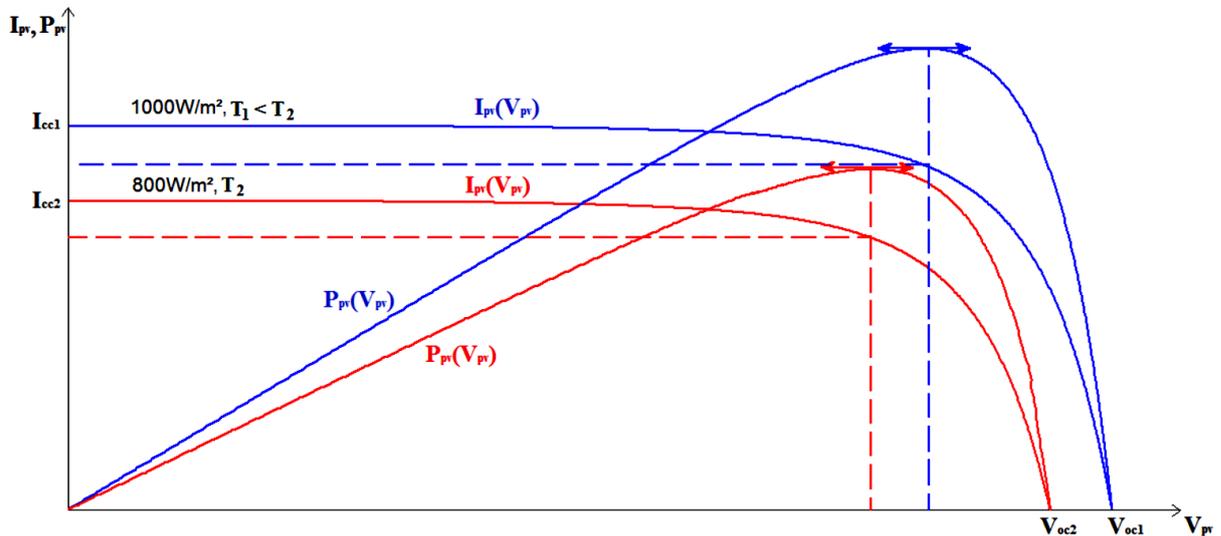


Figure (I.9) Caractéristiques électriques et courbes de puissance d'un module photovoltaïque

I.2.7. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire : [Deo 04], [Mez 11]

Tous systèmes de production d'énergie à ses avantages et ses inconvénients :

a) Avantages :

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

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

milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

- ✓ Aucun bruit.
- ✓ Flexible à l'extension du système et facile.

b) Inconvénients :

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients.

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

I.3 Energie éolienne :

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. Le développement de la technologie des aérogénérateurs a permis à celle-ci de devenir une alternative aux sources traditionnelles. [Mer 07]

Aujourd'hui, on peut recenser deux types d'éoliennes : les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone à double alimentation ou d'une machine synchrone à aimants permanents. Ces dernières sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leur capacités de réglage. [Dav 07]

I.3.1 constitution d'un aérogénérateur : [Eht 13]

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor, cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même

transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou utilisée par des charges isolées.

La figure (I.10) montre la constitution d'une éolienne :

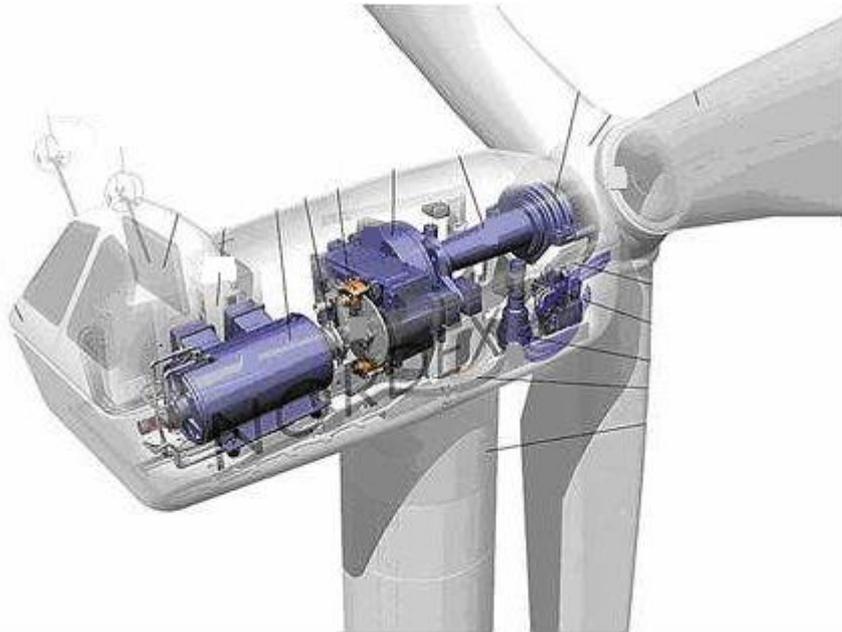


Figure (I.10) : Exemple de constituants d'un système éolien à axe horizontal. [Eht 13]

- ◆ **Les pâles** : sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor.
- ◆ **Le moyeu** : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
- ◆ **L'arbre primaire (ou arbre lent)** : relie les pales au multiplicateur.
- ◆ **Le multiplicateur** : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
- ◆ **L'arbre secondaire (ou arbre rapide)** : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
- ◆ **Le générateur électrique** : il assure la production de l'énergie électrique. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur

(produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.

- ◆ **Le mât** : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mât a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales.
- ◆ **Le système d'orientation de la nacelle** : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
- ◆ **Le système de refroidissement** : il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.
- ◆ **Les outils de mesure du vent** : girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.
- ◆ **Le système de contrôle électronique** : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.
- ◆ Au pied du mât se trouve un **transformateur**.

I.3.2. Classification des éoliennes :

Il existe différentes façons de classer les turbines éoliennes mais celles-ci appartiennent principalement à deux groupes selon l'orientation de leur axe de rotation : celles à axe horizontal et celles à axe vertical.

I.3.2.1 Eolienne à axe Vertical : [Abd 10]

L'axe de rotation de ce type d'éolienne est vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent. Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation.

Le générateur et la boîte d'engrenages sont disposés au niveau du sol donc facilement accessibles. Mais Un inconvénient, pour certaines de ces éoliennes, est de nécessiter un dispositif auxiliaire de démarrage. D'autres utilisent la poussée (drag) plutôt que la portance aérodynamique (lift, effet qui permet à un avion de voler), ce qui se traduit par une réduction du coefficient de puissance et un moindre rendement. La majorité des de ces éoliennes tourne à faible vitesse, ce qui est très pénalisant dans les applications de génération d'électricité avec connexion au réseau public car la boîte de vitesses doit

permettre une importante démultiplication. Le faible rendement aérodynamique et la quantité de vent réduite qu'elles reçoivent au niveau du sol constituent les principaux handicaps de ces éoliennes à axe vertical.

Rotor Savonius

Rotor Darrieus

Rotor H



Figure (I.11) : Eoliennes à axe vertical. [Abd 10]

I.3.2.2 Eolienne à Axe Horizontal : [Abd 10]

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement de manière à capter une quantité plus importante d'énergie éolienne. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.

Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité.

On générale en rencontre deux types «sous le vent» et «face au vent».

a) Eolienne sous le vent :

Ce sont les plus simples car ici le positionnement du rotor est naturel et automatique en fonction de la direction du vent. Le rotor se situe derrière le pylône. Un grand avantage réside dans le fait que les pales du rotor peuvent être flexibles, ce qui allège donc leur

construction. Par vent fort, la flexion des pales enlève une partie de l'effort de poussée sur le rotor. Une éolienne sous le vent a donc une construction plus légère qu'un modèle face au vent.

Par contre, le pylône fait obstacle au vent et lorsque la pale passe dans l'ombre de celui-ci, elle subit une forte variation d'efforts de flexion et de rotation. Ceci augmente le risque de rupture de la pale par fatigue de matériau et génère une production fluctuante d'électricité. [Deb 09]

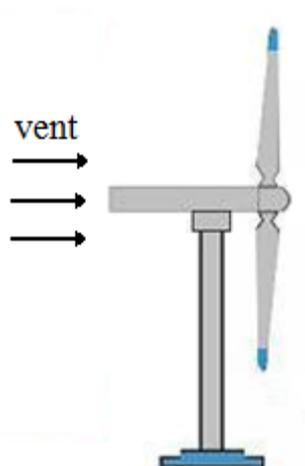


Figure (I.12) : Eolienne sous le vent [Eol 13]

b) Eolienne face au vent :

Ce sont les plus répandus. Le rotor est orienté dans la direction du vent en amont ne soit pas perturbé par le pylône. A l'arrière du pylône, il y a effet de forte perturbation, son écoulement étant ralenti par l'obstacle que forme le pylône.

Il en est de même devant le pylône mais dans de moindre proportion. C'est pour cette raison que le rotor se trouve à une distance de pylône. Cependant, chaque fois qu'une des pales passe devant le pylône, la puissance instantanée de l'éolienne diminue brièvement. Ce phénomène est cependant compensé par la forte inertie de l'hélice.

Les pales d'éoliennes face au vent doivent être rigides pour ne pas risquer de heurter le pylône par vent fort. Ceci est l'inconvénient majeur de cette structure. En plus, il est obligatoire de munir l'éolienne d'un mécanisme d'orientation afin que le rotor soit toujours face au vent. Si elle pivote librement, elle aura tendance à se mettre naturellement sous le vent, comme un drapeau. Le rotor face au vent est une position instable contrairement à la position rotor sous le vent qui stable. [Deb 09]

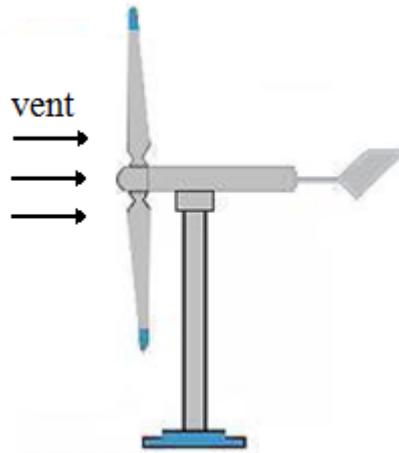


Figure (I.13) : Eolienne face au vent [Eol 13]

I.3.3 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne : [Bel 10], [Deb 09]

Tous systèmes de production d'énergie à ses avantages et ses inconvénients :

a) Avantages :

- ✓ Non polluante.
- ✓ Inépuisable (énergie du vent).
- ✓ Peut être rentable dans les régions éloignées et ventée (sites isolés).
- ✓ Peut être complémentaire des filières traditionnelles.
- ✓ L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas d'émission de CO₂.
- ✓ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laisse pas de trace.
- ✓ C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelable.

b) Inconvénients :

- Aspect aléatoire (sujette aux variations des vitesses de vent).
- Bruit des pales.
- Impact visuel.
- Interférences électromagnétiques.

I.4. Convertisseurs statiques : [Bou 10]

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative.

I.4.1. Différents types de convertisseurs :

I.4.1.1. Convertisseurs DC /DC (hacheurs) :

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

Il existe deux types à savoir :

➤ Hacheur survolteur :

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

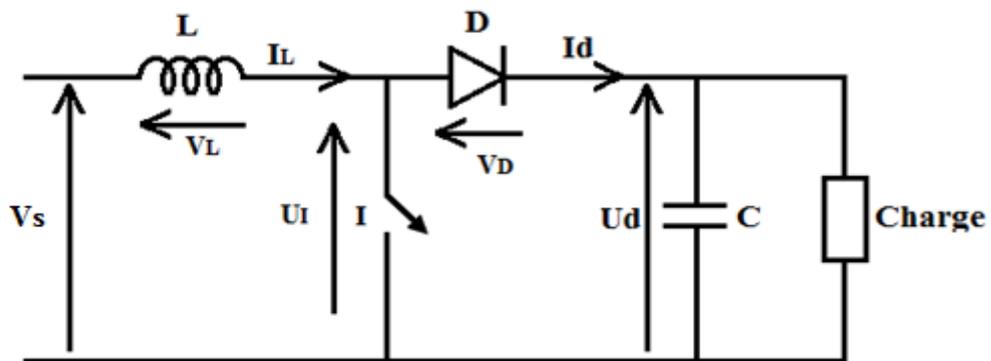


Figure (I.14) : Convertisseur DC/DC (Elévateur de tension).

➤ Hacheur dévolteur :

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

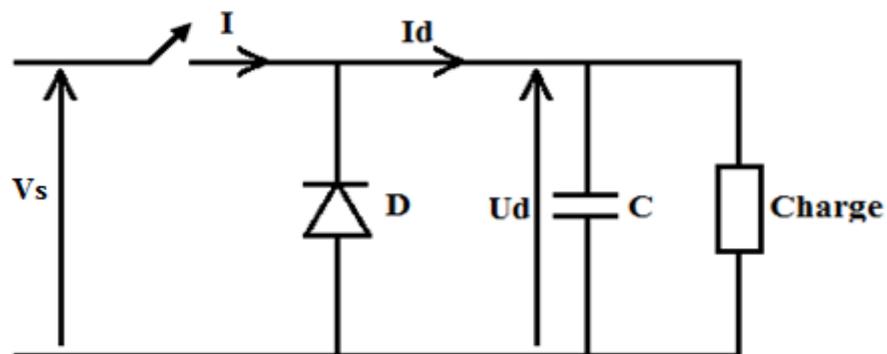


Figure (I.15) : Convertisseur DC/DC (Abaisseur de tension).

I.4.1.2 Le convertisseur continu- alternatif (onduleur)

Un ONDULEUR est un dispositif d'électronique de puissance permettant de délivrer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique continue. C'est la fonction inverse d'un redresseur. L'onduleur est un convertisseur de type continu/alternatif.

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

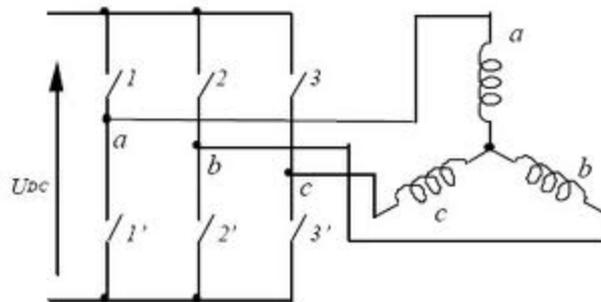


Figure (I.16) Schéma de l'onduleur.

I.5. Groupe moteur-pompe :

Dans notre système on utilise un groupe moteur-pompe qui est constitué d'un moteur asynchrone et d'une pompe centrifuge avec un débit et une hauteur bien déterminés qu'on va détailler dans les paragraphes suivants.

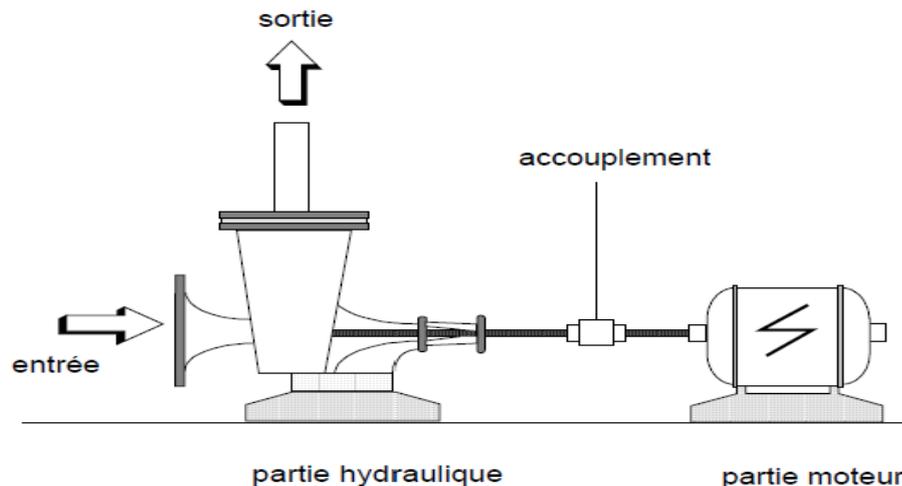


Figure (I.17) : Groupe motopompe. [Mez 11]

I.5.1 Moteur :

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

I.5.1.1 Moteur à courant continu : [Wmc 13]

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

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

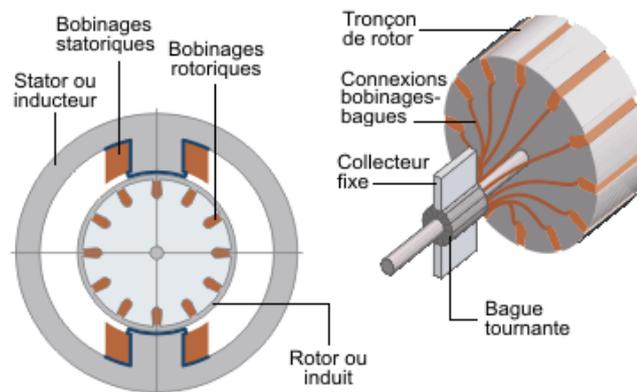


Figure (I.18) Moteur à courant continu. [Ep1 13]

I.5.1.2 Moteur à courant alternatif : [Wca 13]

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

Ces moteurs alternatifs se déclinent en trois types :

- Les moteurs universels ;
- Les moteurs asynchrones ;
- Les moteurs synchrones.

Ces deux dernières machines ne diffèrent que par leur rotor.

✓ **Les moteurs universels : [Wca 13]**

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

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

✓ **Les machines synchrones : [Wca 13]**

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

Comme le nom l'indique, la vitesse de rotation de ces machines est toujours proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent. Ce type de machine peut être utilisé pour relever le facteur de puissance d'une installation.



Figure (I.19) : Machine synchrone [ImS 13]

✓ **Les machines asynchrones : [Wca 13]**

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

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



Figure (I.20): Machine asynchrone. [Wca 13]

Toutefois les machines asynchrone sont les plus utilisée devant les machines synchrones pour une application pompage, grâce aux avantages suivants [Mou 05] :

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

I.5.2 Pompes :

I.5.2.1 Les pompes centrifuges : [Thi 07]

Les pompes centrifuges utilisent les variations de vitesse du fluide pompé pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie mécanique du moteur est transmise au fluide. La vitesse donnée au fluide va fournir une énergie cinétique à celui-ci. L'énergie cinétique est ensuite transformée en énergie de pression.

Les caractéristiques des pompes centrifuges sont :

- Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage. (Particulièrement intéressant dans le cadre de l'utilisation des modules photovoltaïques car la pompe tourne même par très faible ensoleillement)

- Il n'y a pas ou presque pas d'aspiration. Elles doivent être amorcées pour fonctionner de manière à éviter tout risque de destruction si fonctionnement à sec. Certaines sont auto – amorçant.

- Peuvent être immergées ou de surface.

- Plusieurs étages (cage + roue à ailettes) peuvent être superposés pour obtenir de grandes pressions.

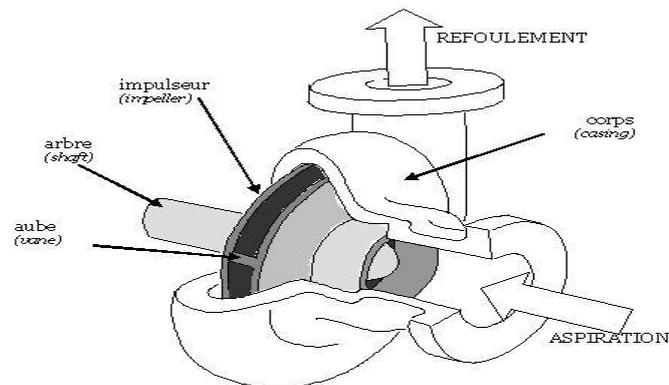


Figure (I.21) : Pompe Centrifuge [Wpc 13]

✓ La caractéristique couple et débit en fonction de la vitesse

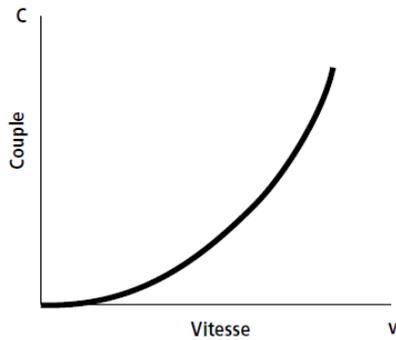


Figure (I.22) : Caractéristique Couple-Vitesse d'une pompe centrifuge.

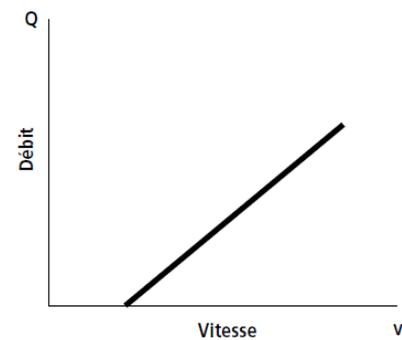


Figure (I.23) : Caractéristique Débit-Vitesse d'une pompe centrifuge.

I.5.2.2 Les pompes volumétriques : [Thi 07]

Les pompes volumétriques encore appelées pompes à cavité progressive utilisent les variations de volume du fluide pompé pour obtenir un accroissement de pression. Le fluide est d'abord aspiré par l'accroissement d'un volume puis refoulé par diminution de ce même volume. Les pompes volumétriques utilisées le plus couramment sont les pompes à pistons, à palettes et à engrenages.

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-amorçantes ;
- Le couple de démarrage d'une pompe volumétrique (de 3 à 5 fois le couple nominal)



Figure (I.24) : Pompe Volumétrique. [Ipv 13]

✓ La caractéristique couple et débit en fonction de la vitesse.

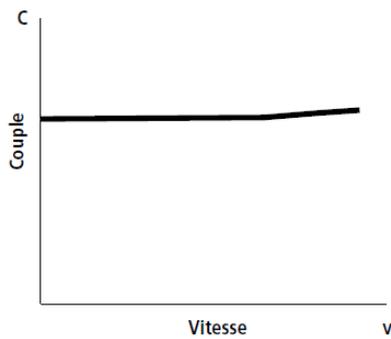


Figure (I.25) : Caractéristique Couple-Vitesse d'une pompe volumétrique

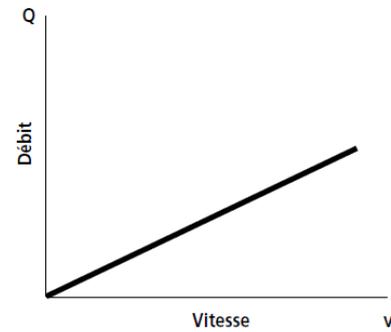


Figure (I.26) : Caractéristique Débit-Vitesse d'une pompe volumétrique

Conclusion :

Précédemment, nous avons donné une brève description du système de pompage hybride. Notre système est composé de deux chaînes de conversion d'énergie, éolienne et photovoltaïque.

Nous avons présenté les avantages, les limites d'utilisation de ces deux sources d'énergie, et les différents éléments utilisés pour le système de pompage hybride, parmi ces éléments notre choix se porte sur une éolienne, des panneaux photovoltaïques, un moteur asynchrone car il est très robuste et moins cher sur le marché, une pompe centrifuge car elle est conçue pour une petite valeur de HMT. Le débit de cette pompe varie proportionnellement par rapport à la vitesse de rotation du moteur, un étage d'adaptation continu/continu pour assurer un fonctionnement au point de puissance maximale, un onduleur pour faire la conversion de courant continu vers le courant alternatif et un redresseur pour faire la conversion de courant alternatif vers le courant continu.

Dans le chapitre suivant, on va présenter la modélisation des différentes parties du système de pompage hybride.

Chapitre II

Modélisation du système de pompage hybride

Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons modéliser les différentes parties du système de pompage hybride et cela en présentant les différentes équations caractérisant le fonctionnement ainsi que les modèles mathématiques, afin de prévoir son comportement. En commencera par la modélisation de la chaîne de conversion éolienne (qui est constitué d'une turbine éolienne, une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) et un redresseur), de la chaîne de conversion photovoltaïque (qui est constitué d'un générateur photovoltaïque et d'un convertisseur DC/DC), de l'onduleur et du groupe moteur-pompe (un moteur asynchrone (MAS) et une pompe centrifuge).

II. Modélisation du système de pompage hybride :

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

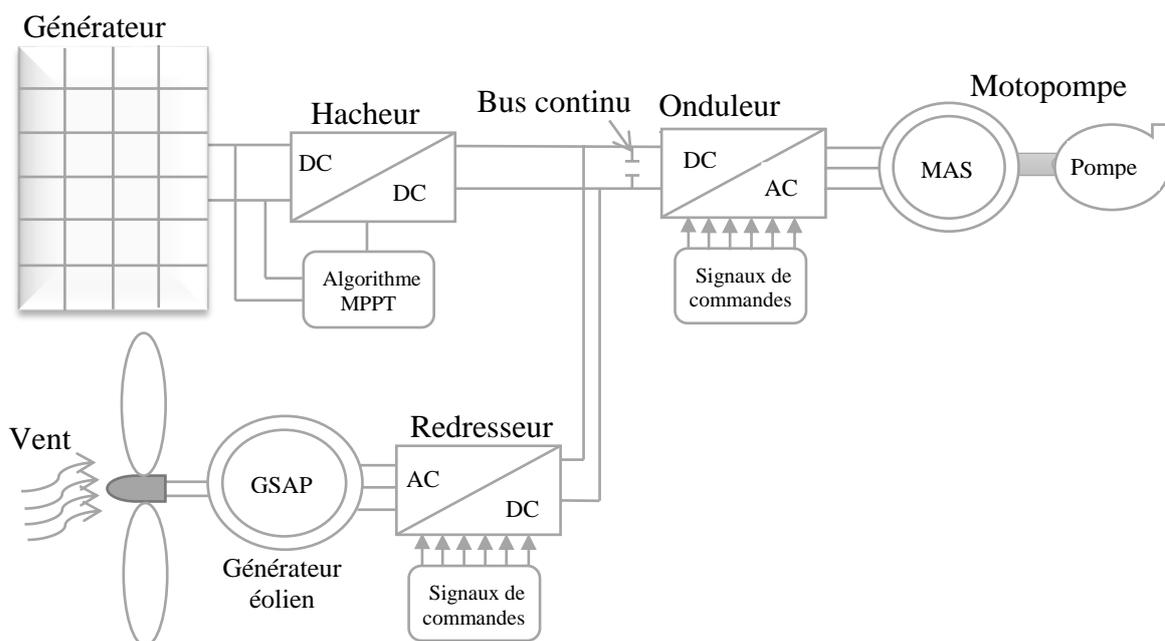


Figure (II.1) : Structure du système de pompage hybride (photovoltaïque – éolien).

II.1. Modélisation de la chaîne de conversion éolienne :

La chaîne de conversion éolienne est représentée sur la figure (II.2).

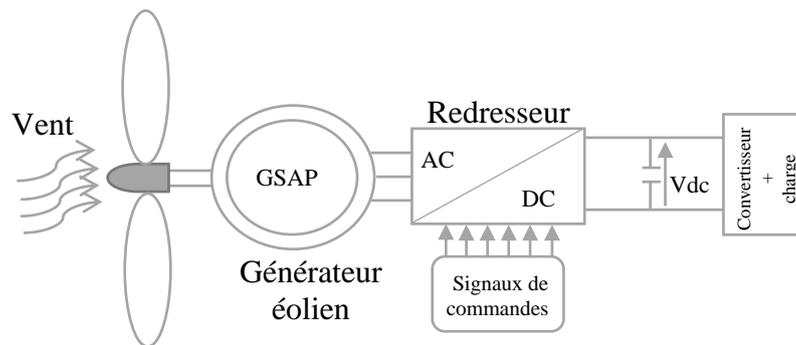


Figure (II.2) : Structure de la chaîne de conversion éolienne.

Le système est composé, d'une turbine éolienne ayant une caractéristique qui lui est propre ($C_p(\lambda)$) et qui dépend des paramètres du constructeur, qui est connectée à une génératrice synchrone à aimants permanents attaque directe (sans multiplicateur), associée à un convertisseur d'électronique de puissance (redresseur).

II.1.1. Modélisation de la vitesse du vent :

La vitesse du vent qui représente la grandeur d'entrée du système de conversion d'énergie éolienne, à une variation aléatoire et une caractéristique très fluctuante. Alors la modélisation de la turbine éolienne est indispensable et cela pour une meilleure exploitation de la vitesse du vent [Ame 09], car la puissance éolienne dans les conditions optimales, est en fonction de la vitesse du vent au cube. La vitesse du vent est tridimensionnelle.

Les voilures à axe verticale sont dépourvues de tous dispositifs d'orientation des pales (la surface active est toujours en face du vent), alors le modèle du vent est simplifié considérablement. [Abd 07]

La vitesse du vent (V_v) peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps :

$$V_v = f(t) \quad \text{(II.1)}$$

II.1.2 Modélisation de la turbine éolienne :

La turbine éolienne est l'élément déterminant pour toute la chaîne de conversion d'énergie. On choisit un modèle reflétant le comportement dynamique globale de la turbine éolienne à axe verticale. On utilisera une courbe du coefficient de puissance en fonction du rapport de la vitesse en bout des pales.

A. Caractéristique ($C_p(\lambda)$) de la voilure :

L'équation de la courbe caractéristique de la voilure est représentée par un polynôme de troisième degré sous la forme [Mir 05] :

$$C_p(\lambda) = -0.2121 \cdot \lambda^3 + 0.0856 \cdot \lambda^2 + 0.2539 \cdot \lambda \quad (\text{II.2})$$

Avec :

C_p : Coefficient de puissance ;

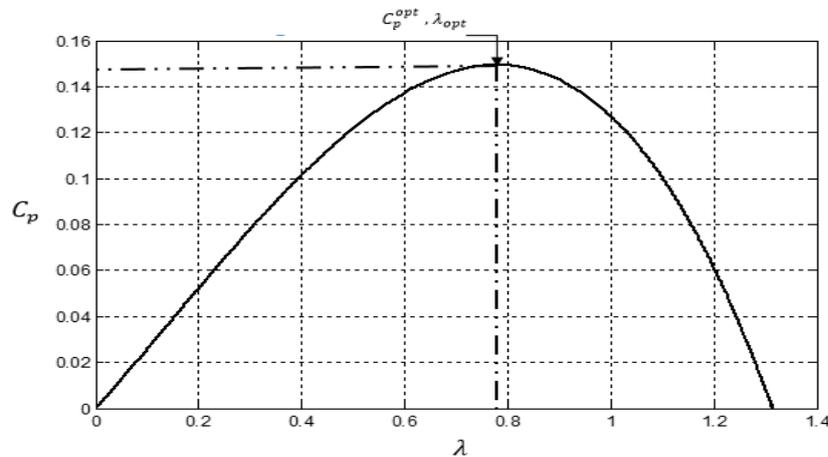
λ : vitesse réduite au bout des pales.

La courbe caractéristique de la voilure utilisée pour l'étude de ce système éolien est présentée sur la figure (II.3)

Les points remarquables de cette courbe sont (le rapport de la vitesse en bout de pales (λ_{opt}) optimale et le coefficient de puissance maximal (C_p^{max})) sont donnés respectivement par :

$$\lambda_{opt} = 0.78$$

$$C_p^{max} = 0.15$$



Figure(II.3) : courbe caractéristique de la turbine éolienne. $C_p(\lambda)$.

Pour la vitesse réduite optimale, le coefficient de puissance est maximal et la turbine éolienne délivre un maximum de puissance mécanique. Il est donc fortement souhaitable d'exploiter le système éolien de façon à obtenir son fonctionnement sur ce point.

A partir de l'équation (II.2), l'expression de la puissance récupérée par la turbine éolienne est donnée par :

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot A_t \cdot v_v^3 \quad (\text{II.3})$$

Avec:

A_t : La surface balayée par la turbine éolienne.

ρ : La masse volumique de l'air.

v_v : La vitesse du vent.

A partir de cette puissance, une équation de couple éolien est donc obtenue en remplaçant la valeur de la puissance par le produit couple-vitesse de la turbine éolienne (Ω_t), on obtient :

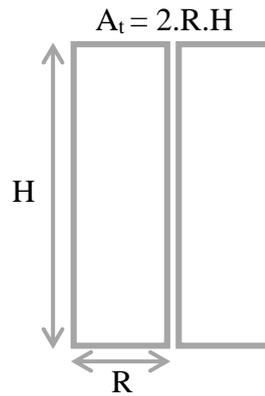
$$C_t \cdot \Omega_t = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot A_t \cdot v_v^3 \quad (\text{II.4})$$

La vitesse de la turbine éolienne est donnée par :

$$\Omega_t = \frac{v_v \cdot \lambda}{R} \quad (\text{II.5})$$

La valeur de la surface active (A_t) de notre éolienne à axe vertical de type Savonius [Mir 05], a été remplacée par les dimensions géométriques de la voilure selon la figure (II.4) ou H et R représentent respectivement la hauteur et le rayon de la turbine.

$$A_t = 2 \cdot R \cdot H \quad (\text{II.6})$$



Figure(II.4) : Dimensionnement géométrique de la voilure Savonius.

En remplaçant la vitesse de la turbine et la surface de la voilure, par leur expression dans l'équation (II.4), on aura l'expression finale du couple de la turbine :

$$C_t = \frac{C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot R^2 \cdot H \cdot v_v^2}{\lambda} \quad (\text{II.7})$$

L'équation (II.7) donne la valeur du couple éolien qui est créé sur les pales de la voilure par masse d'air ayant une vitesse (v_v), en réalité ce couple éolien n'est pas égale au couple mécanique présent sur l'arbre de la turbine ($C_t \neq C_{em}$), à cause de l'inertie de la turbine (J) et les frottements mécaniques (f).

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc à l'équation fondamentale de la dynamique pour un arbre rigide :

$$C_t - C_{em} = J \cdot \frac{d\Omega_t}{dt} + f \cdot \Omega_t \quad (\text{II.8})$$

Avec :

J : Inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine.

f : Coefficient de frottement dynamique.

Le schéma du modèle dynamique de la turbine éolienne de type Savonius basé sur les équations précédentes est donné par la figure (II.5).

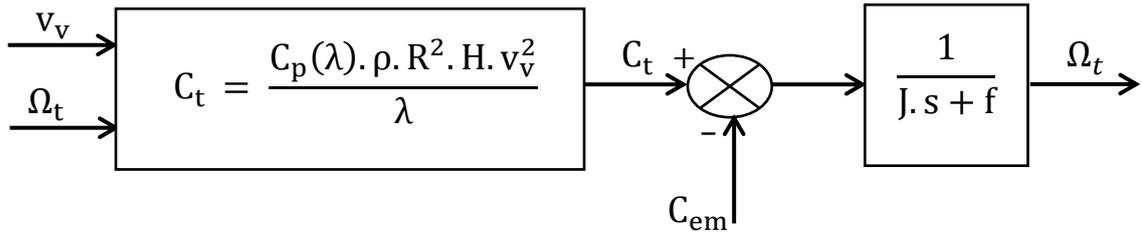


Figure (II.5) : Schéma du modèle dynamique de la turbine Savonius.

II.1.3. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents :

Dans le cadre de notre travail, nous disposons d'une machine synchrone à aimants permanents conçue pour être employée dans un ensemble éolien à axe vertical de type Savonius. Elle comporte un enroulement triphasé au niveau de l'induit et un inducteur à aimants permanents.

Afin de simplifier la modélisation de la machine, les hypothèses suivantes sont faites :

:

- Le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé.
- La répartition des forces magnétomotrices est sinusoïdale.
- Les pertes fers et l'effet d'amortisseur sont négligés.
- La perméabilité des aimants est considérée comme proche de celle de l'air. Le rotor est donc (lisse) du point de vue magnétique et les inductances sont indépendantes de la position.

II.1.3.1. Equations électriques et magnétiques de la machine dans le repère (abc) :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + L_c \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

$V_{a,b,c}$: Les tensions de phase de la machine ;

$I_{a,b,c}$: Les courants de phase de la machine ;

$E_{a,b,c}$: Les f.é.m. induites dans les enroulements de phase du stator ;

R_s : Résistance des phases statoriques ;

L_c : L'inductance cyclique.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = \frac{P}{\omega} (E_a \cdot I_a + E_b \cdot I_b + E_c \cdot I_c) \quad (\text{II.10})$$

Avec :

P : Le nombre de pair de pole ;

ω : La vitesse du rotor avec ($\omega = P \cdot \Omega_r$).

II.1.3.2. Application de la transformation de Park aux équations de la MSAP :

La résolution du système d'équation matricielle s'avère trop complexe, afin de réduire sa complexité on fait appel à des transformations, pour le passage d'un système triphasé (a,b,c) à un système biphasé (d,q,0) on fait la transformation de Park.

En appliquant la transformée de Park à l'équation (II.9), on obtient l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega L_c \\ \omega L_c & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + L_c \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

L'expression des f.é.m. est donnée par :

$$\begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Phi_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

L'expression du couple :

$$C_{em} = \frac{P}{\omega} (E_d \cdot I_d + E_q \cdot I_q) \quad (\text{II.13})$$

Le système d'équation (II.11) devient :

$$\begin{cases} V_d = R_s \cdot I_d + L_c \frac{dI_d}{dt} - L_c I_q \omega \\ V_q = R_s \cdot I_q + L_c \frac{dI_q}{dt} - (L_c I_d + \Phi_f) \omega \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$V_{d,q}$: Respectivement la tension directe et quadratique ;

$I_{d,q}$: Respectivement le courant suivant l'axe direct et quadratique ;

Φ_f : Le flux

L'expression du couple se réduit à :

$$C_{em} = \frac{P}{\omega} (E_q \cdot I_d) = P \Phi_f I_q \quad (\text{II.15})$$

II.1.4. Modélisation du redresseur :

Le rôle du redresseur est de transformer la tension alternative générée par la génératrice éolienne en tension continue aux bornes du bus continu en utilisant des IGBT avec des diodes en antiparallèle, ces interrupteurs sont bidirectionnels, ce qui permet le transit de puissance dans les deux sens du système.

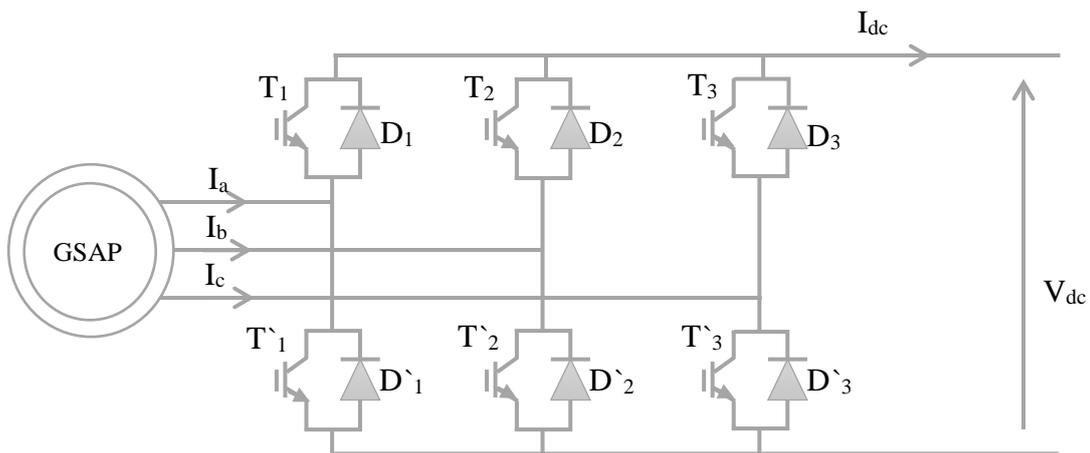


Figure (II.6) : structure du redresseur.

Les signaux de commande de l'ouverture et de la fermeture des interrupteurs sont générés par des comparateurs à hystérésis. Il est géré selon l'équation suivante :

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{si } T_i \text{ fermé} \\ 0 & \text{si } T_i \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$S'_i = \begin{cases} 1 & \text{si } T'_i \text{ fermé} \\ 0 & \text{si } T'_i \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

$$I_{dc} = S_a \cdot I_a + S_b \cdot I_b + S_c \cdot I_c \quad (\text{II.17})$$

Avec :

V_a, V_b, V_c : Tension simple ;

V_{dc} : Tension redressée ;

S_a, S_b, S_c : Fonctions logiques correspondants à l'état de l'interrupteur.

II.1.5. Modélisation de bus continu :

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

$$V_{dc} = \int \frac{1}{C_{dc}} \cdot I_c dt \quad (\text{II.18})$$

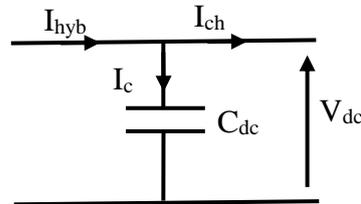


Figure (II.7) : courant circulant dans le bus continue

Avec :

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

I_c : Courant circulant dans la capacité ;

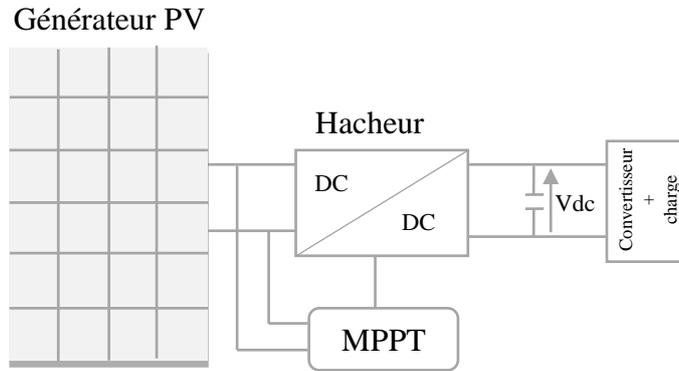
I_{ch} : Courant de charge ;

V_{dc} : Tension du bus continu ;

C_{dc} : Capacité du bus continu.

II.2. Modélisation de la chaîne de conversion photovoltaïque :

La chaîne de conversion photovoltaïque est constituée d'un générateur photovoltaïque qui est fonction de l'ensoleillement (E_s [W/m^2]) et de la température (T [$^{\circ}C$]) associé à des convertisseurs DC/DC (hacheur). Le système à étudier est représenté en figure(II.8) :



Figure(II.8) : Structure de la chaîne de conversion photovoltaïque.

II.2.1. Modélisation du générateur photovoltaïque [Lou 09]:

Le modèle le plus simple d'un générateur photovoltaïque est représenté comme un circuit équivalent qui se compose d'un générateur de courant modélisant l'éclairement en parallèle avec une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et de deux résistances (série et shunt) pour les pertes.

Le courant généré par le générateur photovoltaïque est donné par :

$$I_{PV} = I_{sc} \cdot [1 - k_1 \cdot (e^{k_2 \cdot V_{PV}^m} - 1)] \quad (\text{II.19})$$

Où les coefficients k_1 , k_2 et m sont donnés par :

$$k_1 = 0,01175$$

$$k_2 = \frac{k_4}{V_{oc}^m} \quad (\text{II.20})$$

$$k_3 = \ln \left[\frac{I_{sc} \cdot (1+k_1) - I_{opt}}{k_1 \cdot I_{sc}} \right] \quad (\text{II.21})$$

$$k_4 = \ln \left[\frac{1+k_1}{k_1} \right] \quad (\text{II.22})$$

$$m = \frac{\ln\left[\frac{k_3}{k_4}\right]}{\ln\left[\frac{V_{opt}}{V_{oc}}\right]} \quad (\text{II.23})$$

Avec :

I_{sc} , I_{opt} : Respectivement, courant de court-circuit et de Courant optimal. (A)

V_{oc} , V_{opt} : Respectivement, Tension en circuit ouvert et la Tension optimale. (V)

Il est à noter que l'équation (I_{pv}) est applicable que pour un niveau d'insolation ($E_s = 1000W/m^2$) et de la température particuliers ($T_{stc} = 25^\circ C$), relatif aux conditions standard de fonctionnement.

Quand la température et l'ensoleillement varie on aura les équations suivantes :

$$\Delta T_c = T_c - T_{stc} \quad (\text{II.24})$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{sc} \cdot \left(\frac{G}{G_{stc}}\right) \cdot \Delta T_c + \left(\frac{G}{G_{stc}} - 1\right) \cdot I_{sc,stc} \quad (\text{II.25})$$

$$\Delta V_{pv} = -\beta_{oc} \cdot \Delta T_c - R_s \cdot \Delta I_{pv} \quad (\text{II.26})$$

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

$$V_{pv,nouv} = V_{pv} + \Delta V_{pv} \quad (\text{II.27})$$

$$I_{pv,nouv} = I_{pv} + \Delta I_{pv} \quad (\text{II.28})$$

Avec :

G_{stc} et G : Respectivement, le niveau d'ensoleillement dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques.

T_{stc} et T_c : Respectivement, la température dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques.

ΔT_c : La variation de température.

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

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

α_{sc} : Le coefficient d'incrément du courant I_{sc} .

β_{oc} : Le coefficient d'incrément de la tension V_{oc} .

II.2.2. Modélisation du convertisseur DC/DC (Hacheur survolteur) :

Un hacheur survolteur, connu aussi sous le nom (Boost ou parallèle) permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue avec un rendement élevé, dans ce cas la tension de notre charge est supérieure à la tension fournie par le générateur photovoltaïque, le schéma électrique est représenté sur la figure (II.9).

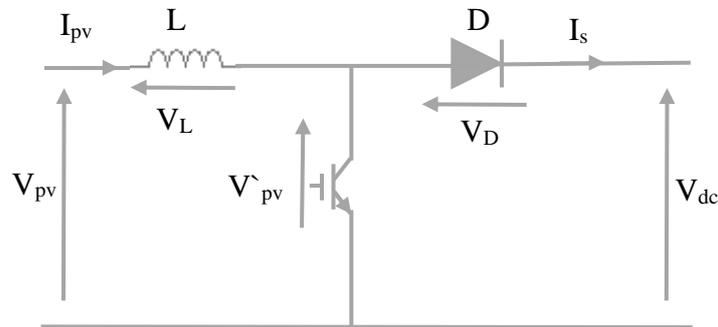


Figure (II.9) : Schéma électrique équivalent du hacheur survolteur.

Le cycle de fonctionnement comporte deux étapes, lors de la première partie du cycle de fonctionnement entre (0 et $\alpha \cdot T$) le transistor devient passant et le courant dans l'inductance croît progressivement, au fur et à mesure elle magasine de l'énergie, lors de la deuxième partie du cycle de fonctionnement entre ($\alpha \cdot T$ et T) le transistor s'ouvre, la diode devient passante et l'inductance (L) se suppose à la diminution du courant I_{pv} , ainsi elle génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge à travers la diode D. Les équations qui caractérisent ce hacheur sont :

$$V_{dc} = \frac{V'_{pv}}{(1-\alpha)}. \quad (\text{II.29})$$

$$V_L = V_{pv} - V'_{pv} \quad (\text{II.30})$$

$$I_{pv} = \frac{1}{1-\alpha} \cdot I_s \quad (\text{II.31})$$

$$V_L = L \frac{dI_{pv}}{dt} \quad (\text{II.32})$$

Avec :

I_S : Courant fourni par le générateur photovoltaïque ;

V_L : Tension aux bornes de l'inductance ;

L : Inductance de lissage du courant ;

T : Période de hachage ;

α : Rapport cyclique, $\alpha \in [0,1]$.

II.2.3. Modélisation du convertisseur DC/AC :

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant produit par le générateur solaire, 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 à commutation instantanée. L'onduleur considéré comme une source de tension parfaite présente une impédance interne négligeable.

A partir du schéma de l'onduleur triphasé présenté sur la figure (II.10), on développera les différentes équations qui modélisent le fonctionnement de ce dernier :

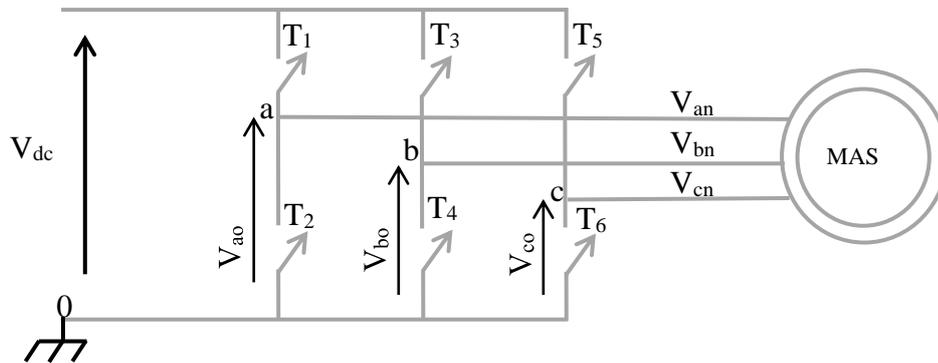


Figure (II.10) : Circuit de l'onduleur relié à la machine.

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

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

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

Avec :

V_{ao} , V_{bo} , V_{co} sont les tensions à l'entrée de l'onduleur (continues). On a 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 :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Avec :

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

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.35})$$

En remplaçant (II.34) dans (II.35) on aura :

$$V_{no} = \frac{1}{3} \cdot (V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{II.36})$$

En remplaçant (II.36) dans (II.33) on aura :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3} \cdot (2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3} \cdot (2V_{bo} - V_{ao} - V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3} \cdot (2V_{co} - V_{ao} - V_{bo}) \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

Si on suppose que :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{dc} \cdot S_1 \\ V_{bo} = V_{dc} \cdot S_2 \\ V_{co} = V_{dc} \cdot S_3 \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

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

A partir de l'équation (II.37) et (II.38), on tire la matrice qui assure le passage du continu vers l'alternatif et qui donne le modèle de l'onduleur par les équations matricielles suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

Le courant modulé par l'onduleur est donné par :

$$I_{dc} = S_1 \cdot i_{ach} + S_2 \cdot i_{bch} + S_3 \cdot i_{cch} \quad (\text{II.40})$$

II.3. Modélisation du groupe moteur-pompe :

II.3.1. Modélisation de la machine asynchrone :

II.3.1.1. Hypothèses :

La MAS triphasés est représenté schématiquement par la figure (II.11). Elle est munie de six enroulements.

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

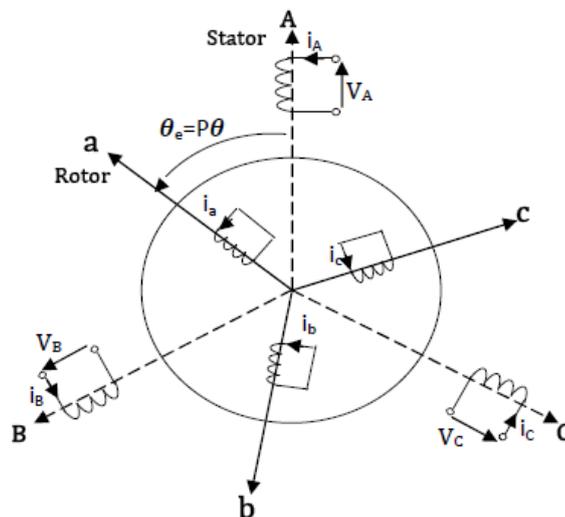


Figure (II.11) : représentation des enroulements statoriques et rotoriques. [Bou 10]

II.3.1.2. Equations électriques et magnétiques de la machine dans le repère (abc) :

➤ **Equations électriques et magnétique :**

En appliquant la loi de FARADAY à chaque bobinage de la machine asynchrone, on peut écrire, pour chacun des six enroulements statoriques et rotoriques, l'équation électrique suivante :

$$V = R \cdot i + \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{II.41})$$

Avec :

R , i , V et Φ représente respectivement la résistance du bobinage, le courant dans le bobinage, la tension à ces bornes et le flux le traversant.

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

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [I_{sabc}] + \frac{d[\Phi_{sabc}]}{dt} \quad (\text{II.42})$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d[\Phi_{rabc}]}{dt} \quad (\text{II.43})$$

Avec :

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad [V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des tensions statoriques et rotoriques.

$$[I_{sabc}] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad [I_{rabc}] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des courants statoriques et rotoriques.

$$[\Phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad [\Phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des flux statoriques et rotoriques.

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

Respectivement les matrices des résistances statoriques et rotoriques.

Le rotor de la machine étant en court-circuit, la relation (II.43) devient :

$$[V_{rabc}] = 0 = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d[\Phi_{rabc}]}{dt} \quad (\text{II.44})$$

A ces équations électriques, il faut rajouter celle du couple électromagnétique qui s'écrit :

$$T_{em} = \frac{1}{2} [I_{sabc}, I_{rabc}]^t \cdot \left(\frac{d}{d\theta} [\Phi_{sabc}, \Phi_{rabc}] \right) \quad (\text{II.45})$$

Sachant que les différents flux de la machine s'expriment en fonction des inductances de la manière suivante :

$$[\Phi_{sabc}] = [L_s] \cdot [I_{sabc}] + [M_{sr}(\theta)] \cdot [I_{rabc}] \quad (\text{II.46})$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_r] \cdot [I_{rabc}] + [M_{rs}(\theta)] \cdot [I_{sabc}] \quad (\text{II.47})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = M_0 \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad [M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

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 :

$$T_{em} = [I_{sabc}]^t \cdot \left(\frac{d}{d\theta} \cdot [M_{sr}] \right) \cdot [I_{rabc}] \quad (\text{II.48})$$

II.3.1.3. Application de la transformation de Park aux équations de la MAS :

La transformation de Park a pour but de découpler magnétiquement le stator et le rotor et cela en substituant les enroulements de phases a, b et c dont les conducteurs et les axes magnétiques sont immobiles par rapport au stator par deux enroulements en quadrature d'axes d et q. Pour des raisons de simplicité, nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Les composantes homopolaires sont nulles,
- Les effets des pertes ferromagnétiques et de la saturation sont négligés,
- La distribution de la force magnétomotrice dans l'entrefer est sinusoïdale.

En appliquant cette transformation, on obtient la représentation suivante :

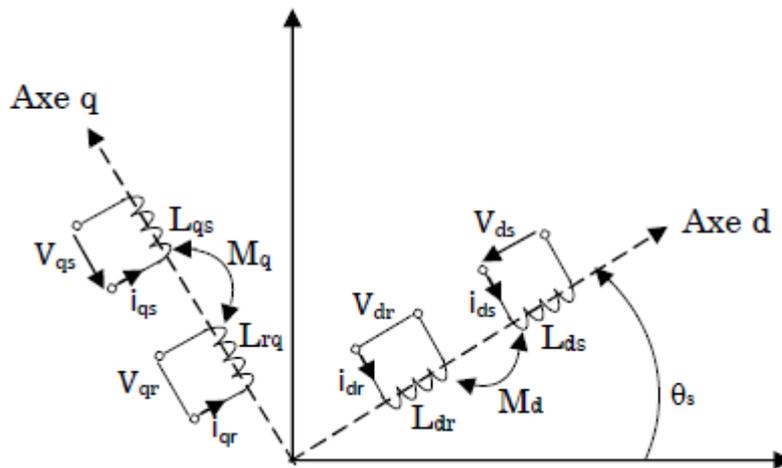


Figure (II.12) : Vecteurs des tensions dans le repère (dq). [Bou 10]

En appliquant alors la transformation de Park aux équations statoriques avec un angle de rotation θ_s , on aboutit aux expressions suivantes dans le repère dq :

A. Equations électriques :

$$V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} - \omega_s \cdot \Phi_{sq} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} \quad (\text{II.49})$$

$$V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \omega_s \cdot \Phi_{sd} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} \quad (\text{II.50})$$

$$V_{s0} = R_s \cdot I_{s0} + \frac{d\Phi_{s0}}{dt} \quad (\text{II.51})$$

De même, en l'appliquant aux équations rotoriques avec un angle de θ_r , on aboutit aux expressions suivantes dans le repère dq :

$$V_{rd} = 0 = R_r \cdot I_{rd} - (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{rq} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} \quad (\text{II.52})$$

$$V_{rq} = 0 = R_r \cdot I_{rq} + (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{rd} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} \quad (\text{II.53})$$

$$V_{r0} = R_r \cdot I_{r0} + \frac{d\Phi_{r0}}{dt} \quad (\text{II.54})$$

Avec :

V_{sd}, V_{sq} : Tension statorique direct et quadratique.

I_{sd}, I_{sq} : Courant statorique direct et quadratique.

Φ_{sd}, Φ_{sq} : Flux statorique direct et quadratique.

I_{rd}, I_{rq} : Courant rotorique direct et quadratique.

Φ_{rd}, Φ_{rq} : Flux rotorique direct et quadratique.

ω_s, ω_r : Vitesse statorique rotorique.

$\omega = p \cdot \Omega = \omega_s - \omega_r$: Vitesse mécanique.

En supposant le système parfaitement équilibré, les équations (II.51) et (II.54) qui correspondent aux composantes homopolaires, sont identiquement nulles.

B. Équations magnétiques :

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

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.55})$$

Avec :

$L_s = l_s + M$: Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r + M$: Inductance cyclique rotorique.

l_s, l_r : Respectivement Inductance de fuite statorique et rotorique.

M : Mutuelle inductance.

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

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

$$\omega_s - \omega_r = p \cdot \Omega = \omega \quad (\text{II.56})$$

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 repère (dq) lié au champ tournant :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} = 0 \\ V_{rq} = 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \cdot L_s & 0 & -\omega_s \cdot M \\ \omega_s \cdot L_s & R_s & \omega_s \cdot M & 0 \\ 0 & -\omega_r \cdot M & R_r & -\omega_r \cdot L_r \\ \omega_r \cdot M & 0 & \omega_r \cdot L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dI_{sd}}{dt} \\ \frac{dI_{sq}}{dt} \\ \frac{dI_{rd}}{dt} \\ \frac{dI_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II.57})$$

C. Équation mécanique :

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

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f \cdot \Omega \quad (\text{II.58})$$

L'expression du couple électromagnétique en fonction des flux statorique et courants rotorique est comme suit :

Le couple électromagnétique fourni par la machine s'exprime :

$$T_{em} = \frac{P.M}{L_r} \cdot (\Phi_{rd} \cdot I_{sq} - \Phi_{rq} \cdot I_{sd}) \quad (\text{II.59})$$

II.3.2. Modélisation de la pompe :

La puissance hydraulique de la pompe centrifuge est exprimée par équation :

$$P_{hyd} = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \quad (\text{II.60})$$

Avec :

P_{hyd} : Puissance hydraulique (W) ;

ρ : Masse volumique d'eau (1000kg/m^3) ;

g : Accélération de la pesanteur (9.81m/s^2) ;

H : Hauteur manométrique (m) ;

Q : Débit volumique (m^3/s).

D'où la puissance mécanique est :

$$P_{mec} = P_{hyd} \cdot \eta_{pm} \quad (\text{II.61})$$

Avec :

P_{mec} : Puissance mécanique (w) ;

η_{pm} : Rendement global du groupe moteur pompe (%).

La pompe oppose un couple résistant donné par :

$$C_r = K_r \cdot \omega^2 \quad (\text{II.62})$$

Avec :

$$K_r = \frac{P_n}{\omega_n^3} \quad (\text{II.63})$$

Où :

P_n : Puissance nominale du moteur asynchrone(W) ;

ω_n : Vitesse nominale du moteur asynchrone (rad /s).

Conclusion :

Dans ce présent chapitre, on a modélisé les deux chaînes de conversion d'énergie à savoir la chaîne éolienne composée de (voilure, génératrice synchrone à aimant permanent et redresseur) et la chaînes photovoltaïque (panneau photovoltaïque, hacheur survolteur et d'un onduleur), ainsi que le groupe moteur-pompe (moteur asynchrone et pompe centrifuge). Cette modélisation sera utilisée pour la simulation des deux chaînes de conversions d'énergie éolienne et photovoltaïque, sa fera l'objet d'étude du chapitre suivant.

Chapitre III

Simulation et commande du système éolien, photovoltaïque

Introduction :

Dans le chapitre précédent, nous avons modélisé les deux chaînes de conversion d'énergie (éolienne et photovoltaïque), dans ce présent chapitre nous allons commander et simuler les deux systèmes en appliquant des algorithmes d'optimisation afin d'extraire le maximum de leur puissance (MPPT) pour alimenter en permanence notre charge, et aussi le principe de la commande vectorielle de la MAS sera donnée.

III.1. Commande du système éolien :

Le système éolien est composé d'une turbine qu'on va optimiser grâce à une commande d'optimisation (MPPT), couplée mécaniquement à une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP), on appliquera à cette dernière une commande vectorielle en couple pour le fonctionnement en (MPPT).

III.1.1. Commande au point de puissance maximale (MPPT) :

La caractéristique $C_p(\lambda)$ qui est de forme parabolique admet un maximum de C_{pmax} pour un λ_{opt} . La vitesse de la génératrice est asservie à une référence issue d'un algorithme permettant l'extraction maximale de la puissance. Lui-même nécessitant la mesure ou l'estimation de la vitesse du vent. Ce principe est connu sous la terminologie MPPT (Maximum Power Point Tracking). Pour une vitesse de vent V_v donné correspond à une vitesse de rotation qui donne λ_{opt} . [Idj 10]

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

$$V_v = \frac{R.\Omega}{\lambda} \tag{III.1}$$

En insérant cette équation dans l'expression (II.3) on obtient la fonction de la puissance en fonction de la vitesse de rotation :

$$p_t(\Omega) = \frac{C_p(\lambda).\rho.R^4.H}{\lambda^3(\Omega)} . \Omega^3 \tag{III.2}$$

En utilisant la formule (III.2) du calcul de la puissance, il est facile de déterminer le couple turbine correspondant :

$$C_t = \frac{p_t(\Omega)}{\Omega} \quad (III.3)$$

D'où :

$$C_t(\Omega) = \frac{C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot R^4 \cdot H}{\lambda^3(\Omega)} \cdot \Omega^2 \quad (III.4)$$

En considérant que les conditions sont optimales (à puissance optimale), alors l'équation (III.4) permet le calcul de la valeur du couple optimal :

$$C_t^{opt} = K_{opt} \cdot C_{opt}^2 \quad (III.5)$$

Avec :

$$K_{opt} = \frac{C_{pmax} \cdot \rho \cdot R^4 \cdot H}{\lambda_{opt}^3} \quad (III.6)$$

L'algorithme MPPT contrôlé en couple à l'aide de la vitesse de rotation mesurée (Ω_t), détermine le couple pour chaque vitesse de rotation de la façon montrée par la figure (III.1) [Lal 09].

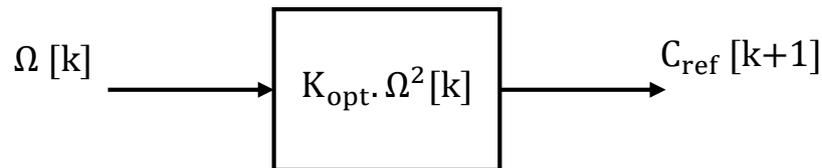


Figure (III.1) : Le couple de référence en fonction de la vitesse de rotation.

III.1.2. Simulation de la turbine éolienne avec l'algorithme MPPT :

Nous allons présenter ci-dessous les résultats de simulation de la turbine éolienne, non connecté à la génératrice, avec l'application de l'algorithme MPPT en vue de l'extraction du maximum de puissance pour toute la plage de variation de la vitesse du vent.

La figure (III.2) ci-dessous, montre le schéma bloc décrivant les équations développées précédemment est implanté sous MATLAB/Simulink.

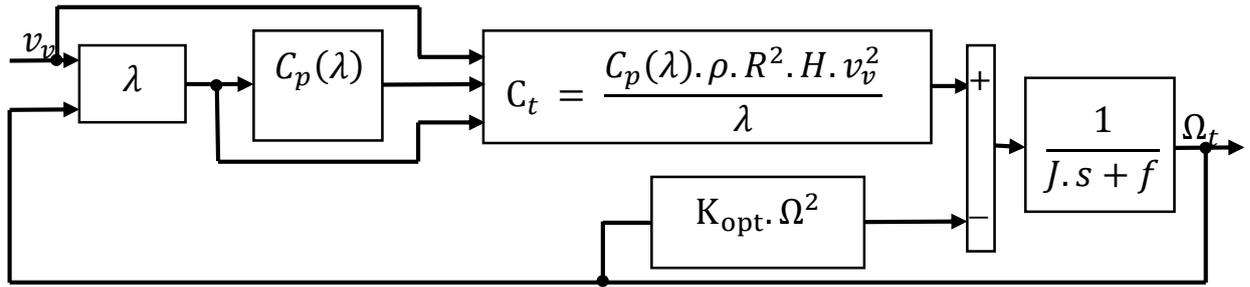


Figure (III.2) : Schéma bloqué de la partie mécanique de la turbine éolienne avec MPPT.

Pour vérifier le bon fonctionnement de la turbine éolienne, un échelon de vitesse de vent de 15m/s puis 13m/s après un temps de $t=5s$ sera appliqué (figure (III.3)).

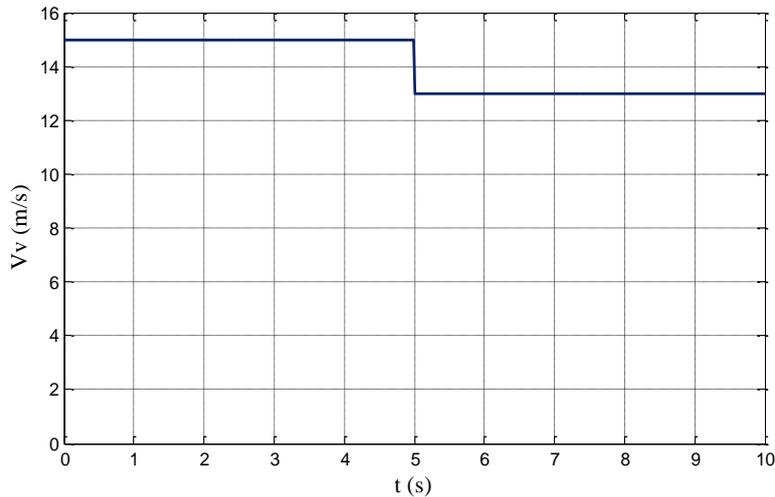


Figure (III.3) : Vitesse du vent.

On relève en fonction du temps les caractéristiques de : la vitesse de la turbine sur la figure (III.4), la puissance de la turbine sur la figure (III.5) ainsi que son couple sur la figure (III.6) et l'allure de λ et de C_p sur les figure (III.7 et III.8) respectivement.

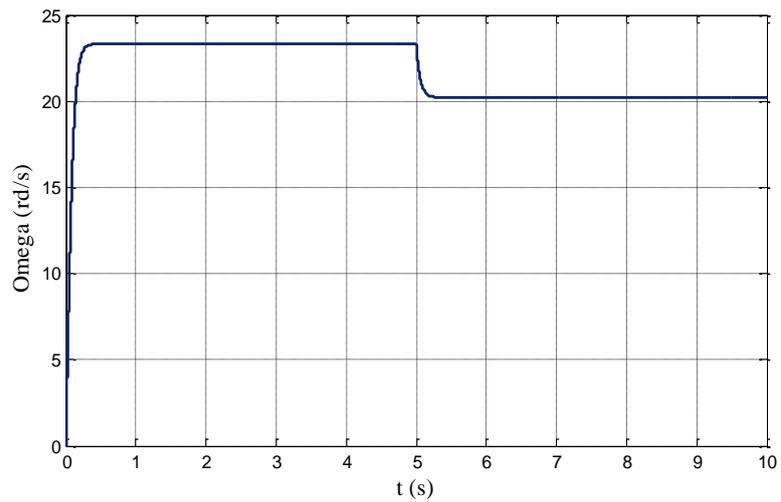


Figure (III.4) : Allure de la vitesse de la turbine.

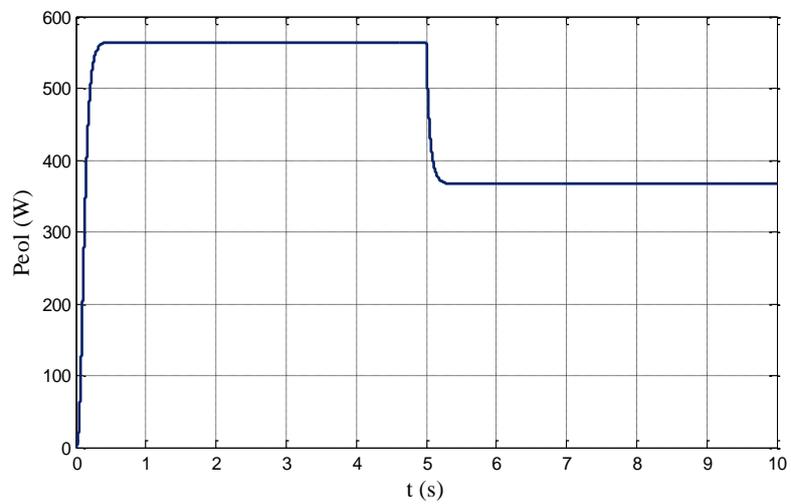


Figure (III.5) : Allure de la puissance de la turbine éolienne.

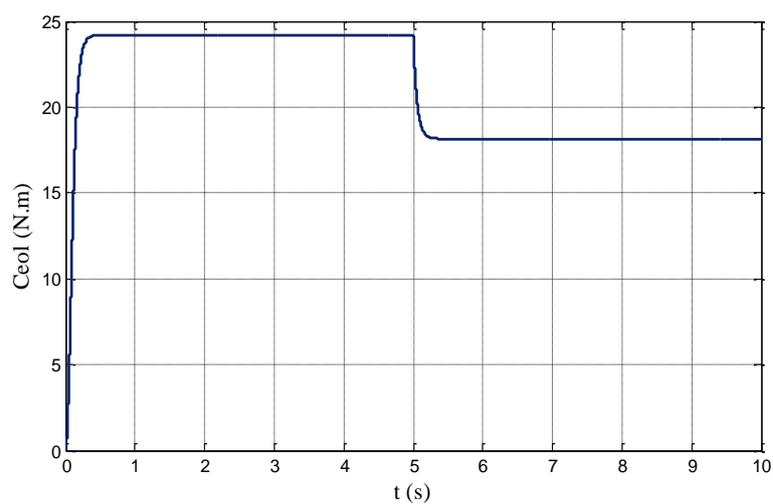
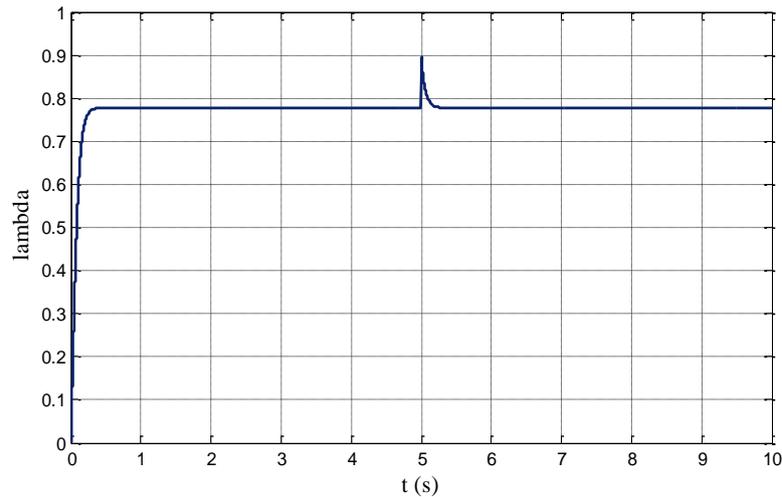
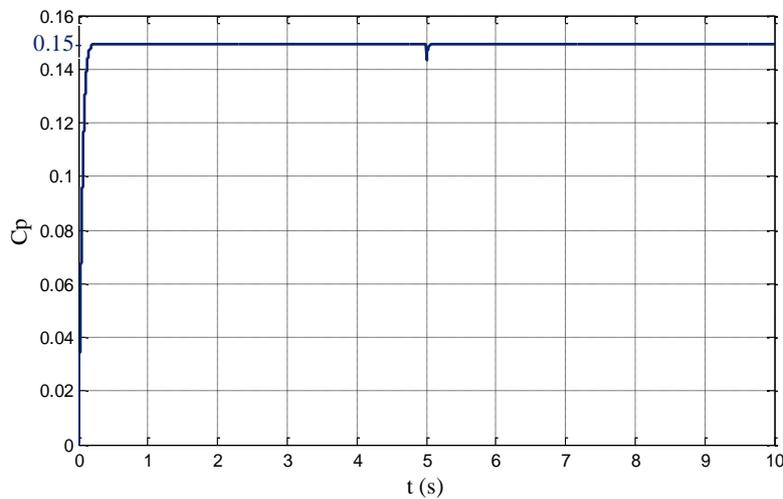


Figure (III.6) : Allure du couple de la turbine éolienne.

Figure (III.7) : Allure de la vitesse réduite λ Figure (III.8) : Allure de coefficient de puissance C_p

D'après la figure (III.4) on voit que la vitesse de la turbine éolienne suit la variation de la vitesse du vent (figure (III.3)) pour permettre de garder un rapport de vitesse à sa valeur optimale ($\lambda=0.78$) figure (III.7), cela permet d'avoir un coefficient de puissance maximale ($C_{pmax}=0.15$) figure (III.8) quel que soit la vitesse du vent et de travailler continuellement comme prévu, avec un rendement aérodynamique optimal et qui permet d'extraire une puissance maximum figure (III.6).

III.1.3. Commande de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) :

Il s'agit d'une commande vectorielle en couple. L'intérêt de la commande est la régulation de couple, de courant, de vitesse, il est nécessaire de contrôler instantanément le

couple, ceci peut se faire en agissant sur les courants statorique réels soit en agissant sur leurs composante directe et en quadratique. **[Idj 10]**

Le principe de la commande vectorielle vise à simplifier cela par un choix judicieux du repère d'axe (O_d, O_q) qui se traduit dans le cas d'une machine synchrone par le choix d'un repère lié au rotor dans le but de décrire le comportement de la machine synchrone d'une manière simple, analogue à celle de machine à courant continue à excitation séparée.

L'expression du couple est donnée par la relation (II.15). On remarque que ce couple ne dépend que de la composantes en quadratique du courant I_q et il est maximale pour un courant donné si l'on impose ($I_d = 0$), pour minimiser les pertes joules.

Le schéma bloc de la commande du générateur éolien est représenté sur la figure (III.9) ci-dessous, il s'agit d'une commande vectorielle en couple où le courant direct ($I_{d_ref} = 0$), le courant I_{q_ref} est déterminé à partir du couple de référence issue de l'algorithme MPPT (équation II.15). A partir de ces courants, on commande les interrupteurs du redresseur d'une manière à ce que les variations des courants dans chaque phase soient limitées dans une bande encadrant les références des courants. Cette commande ce fait par une comparaison permanente entre les courants réels et ceux de références, les sorties des comparateurs sont reliées à la logique de la commande de l'onduleur de la manière à imposer une commutation des intercepteurs lorsque le courant s'écarte à la valeur d'hystérésis près de sa référence. **[Idj 05]**

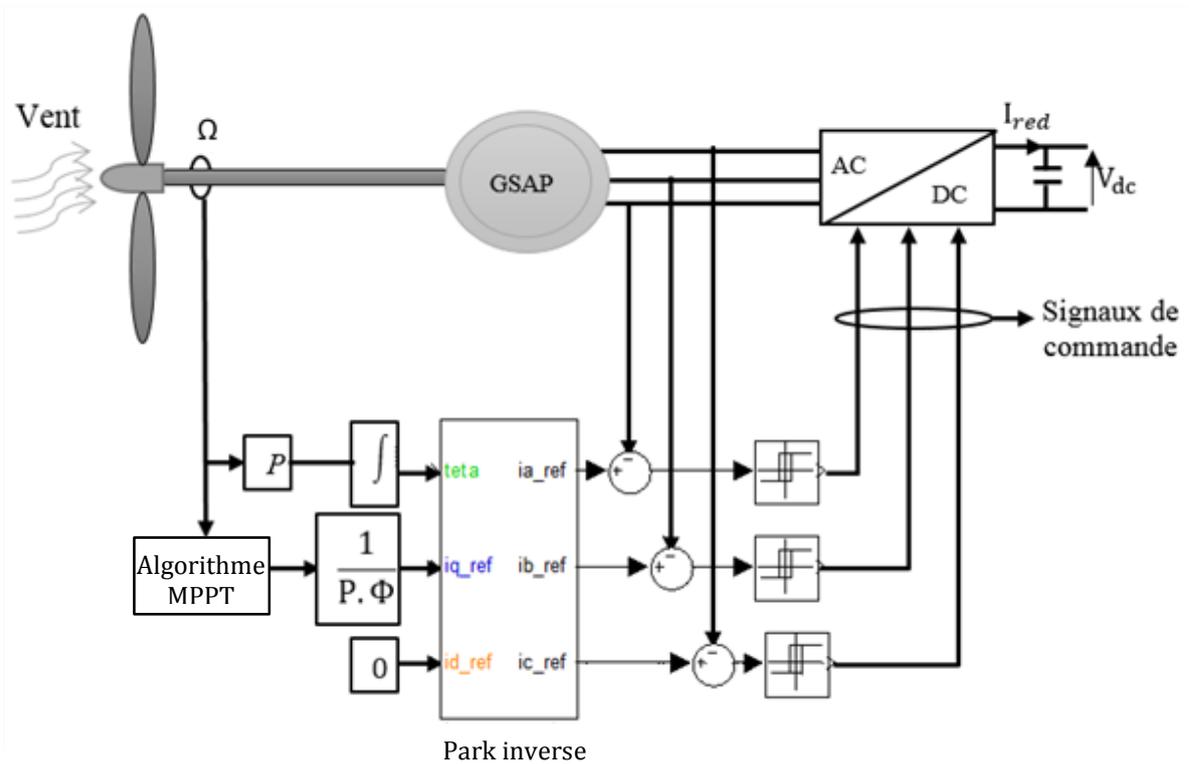


Figure (III.9) : Schémas bloc de commande du générateur éolien.

III.2. Commande du système photovoltaïque :

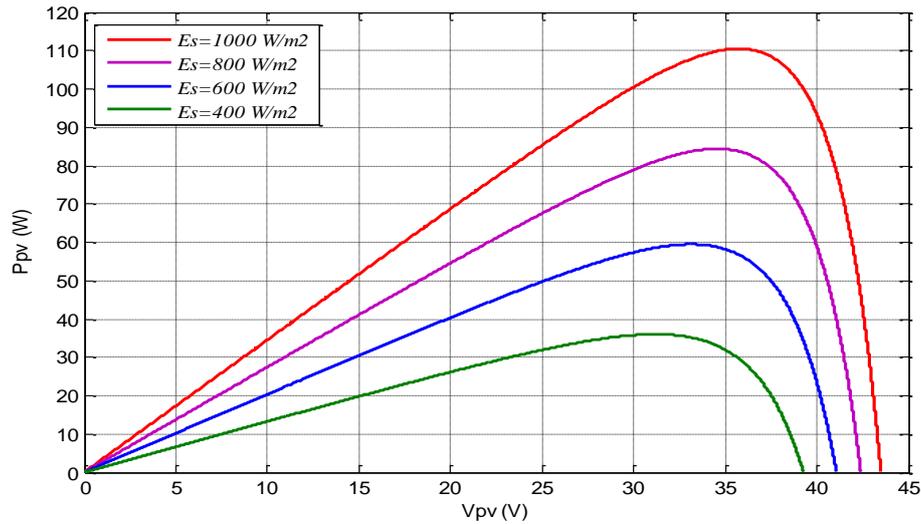
Le système photovoltaïque est composé d'un panneau photovoltaïque relié à un convertisseur (DC/DC) qui fonctionne avec un algorithme d'optimisation (MPPT) au point de puissance maximale (PPM).

III.2.1. Simulation du panneau photovoltaïque :

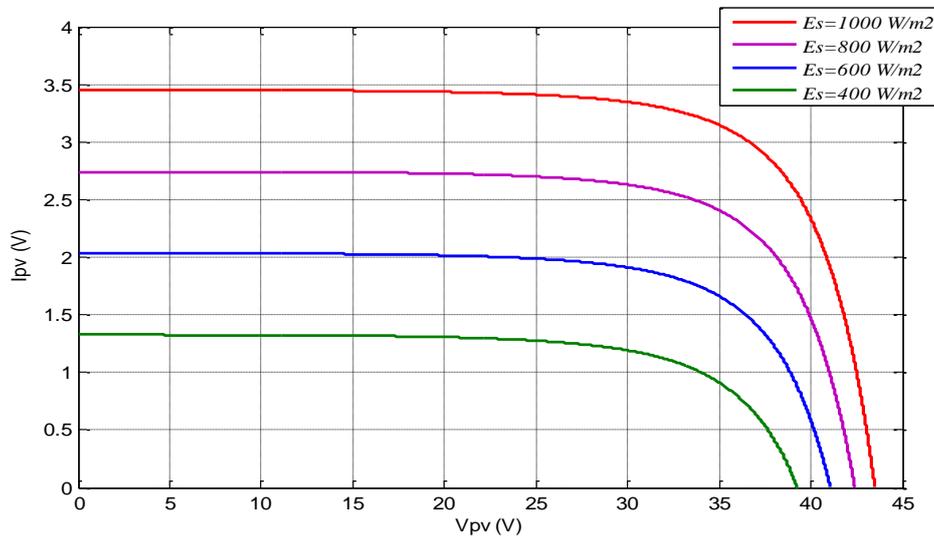
Le fonctionnement d'un module photovoltaïque dépend des conditions d'ensoleillement (E_s) et de la température (T_c). Nous présentons ci-dessous les résultats de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque, sans l'application d'un algorithme d'optimisation (MPPT), pour différente variation d'ensoleillement et de température.

III.2.1.1. Influence de l'ensoleillement E_s :

Les caractéristiques (puissance/tension) et (courant/tension) en fonction de la variation de l'ensoleillement est représenter sur la figure ci-dessous.



Figure(III.10.a) : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique ($P_{pv}(V_{pv})$).

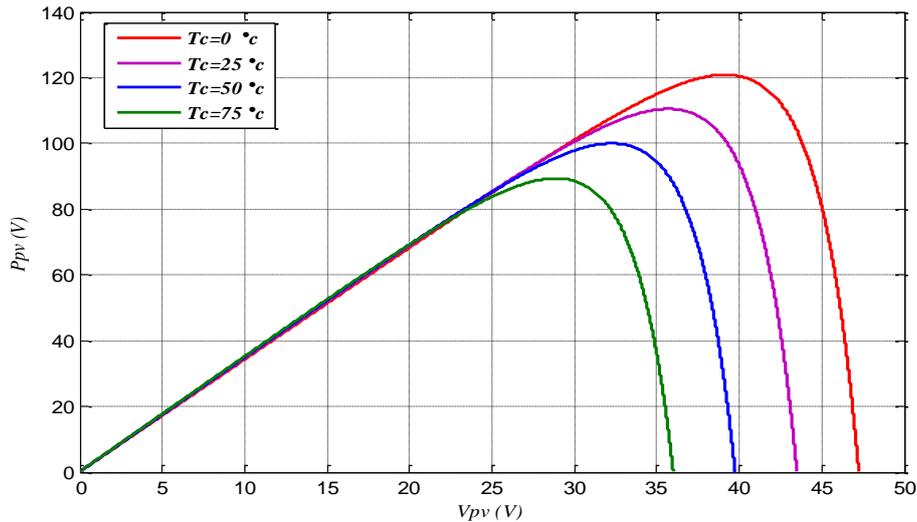


Figure(III.10.b) : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique ($I_{pv}((V_{pv}))$).

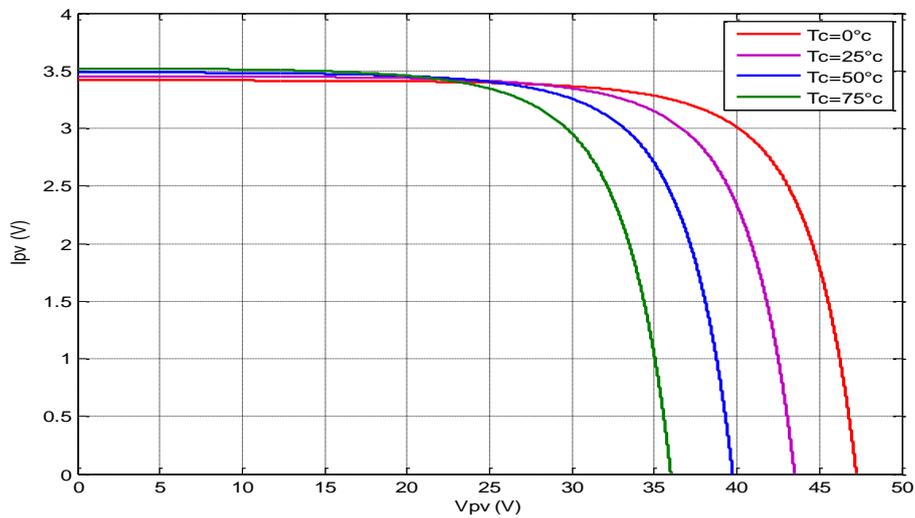
On voit clairement que la variation de l'ensoleillement influe considérablement sur les caractéristiques puissance/tension et courant/tension. Lorsque l'ensoleillement diminue le courant de court-circuit diminue, tandis que la tension à circuit ouvert est moins sensible à la variation, ce qui engendre une diminution de la puissance maximal.

III.2.1.2. Influence de la température T_c :

Les caractéristiques puissance/tension et courant/tension en fonction de la variation de température est représenter sur la figure ci-dessous.



Figure(III.11.a) : Influence de la température sur la caractéristique ($P_{pv}(V_{pv})$).



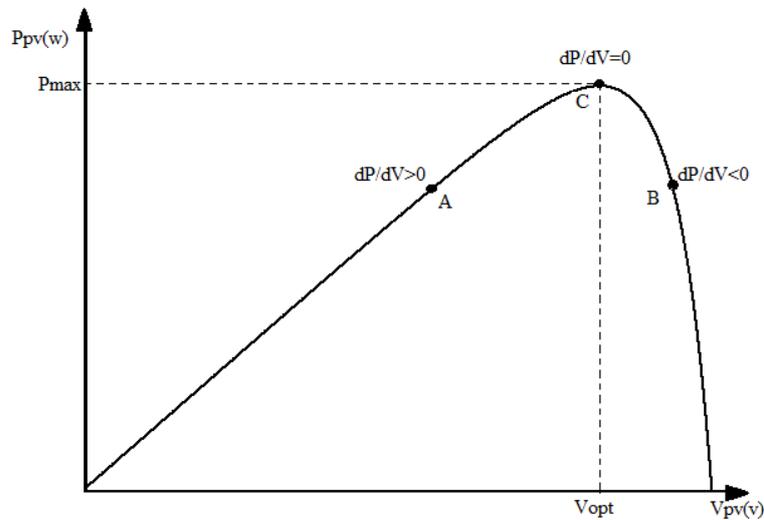
Figure(III.11.b) : Influence de la température sur la caractéristique ($I_{pv}(V_{pv})$).

Contrairement à la variation de l'ensoleillement, la variation de la température influe sur la tension de circuit ouvert qui diminue lorsque celle-ci augmente, tandis que le courant de court-circuit est faiblement dépendant.

III.2.2. Commande du système photovoltaïque au point de puissance maximale :

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire DC/DC d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance quel que soit les conditions météorologique (irradiation, température). La commande de convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{opt} , I_{opt}).

La figure suivante montre la caractéristique (puissance, tension) d'un panneau photovoltaïque :



Figure(III.12) : Caractéristique puissance tension d'un panneau photovoltaïque(GPV) et principe de recherche de point de puissance

Au point V_{opt} connu sous le nom de tension optimale qui donne le point de puissance maximale (MPPT), le panneau photovoltaïque fournit la puissance disponible maximale P_{max} . Les caractéristiques ($I_{pv}(V_{pv})$) et ($P_{pv}(V_{pv})$) sont importantes pour la conception du point de puissance maximale (MPP). Ce point est obtenu lorsque la pente est nulle ($dP_{pv}/dV_{pv} = 0$). Fondamentalement, afin de réaliser le point de puissance maximale de fonctionnement, la tension du générateur photovoltaïque V_{pv} est réglée de telle manière qu'elle augmente lorsque la pente est positive ($dP_{pv}/dV_{pv} > 0$) et qu'elle diminue lorsque la pente est négative ($dP_{pv}/dV_{pv} < 0$). Ils existent différentes méthodes permettant le fonctionnement en MPPT, telle que la Méthode de la table de consultation (LOOK-UP TABLE), Méthode de tension en circuit-ouvert (OPEN-CIRCUIT VOLTAGE), Méthode de perturbation et observation (P&O), Méthode d'incrément de conductance, Méthode de la logique floue, Méthode du neuro-floue..., dans notre travail on utilise la (P&O).

III.2.3. Principe de la méthode de perturbation et d'observation (P&O) :

La méthode Perturbation et observation "P&O" est souvent le plus utilisé dans la pratique en raison de sa facilité de mise en œuvre. Elle exige seulement des mesures sur la tension de sortie du panneau V_{pv} et son courant de sortie I_{pv} et elle peut donc tout de suite

dépister le point de puissance maximum en générant à sa sortie une tension de référence $V_{pv,ref}$. Comme son nom l'indique, la méthode de P&O fonctionne par la perturbation de V_{pv} et l'observation de son impact sur le changement de la puissance de sortie du panneau photovoltaïque.

Un algorithme est conçu de sorte qu'il fonctionne sur un ordinateur et donc à chaque cycle de l'algorithme, V_{pv} et I_{pv} sont mesurés pour calculer $P_{pv}(k)$. Cette valeur de $P_{pv}(k)$ est comparée avec celle de $P_{pv}(k-1)$ déjà calculée à l'itération précédente. Si maintenant la puissance de sortie a augmenté depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie continuera dans la même direction que celle qui a été prise au dernier cycle (avec C est la largeur du pas de perturbation).

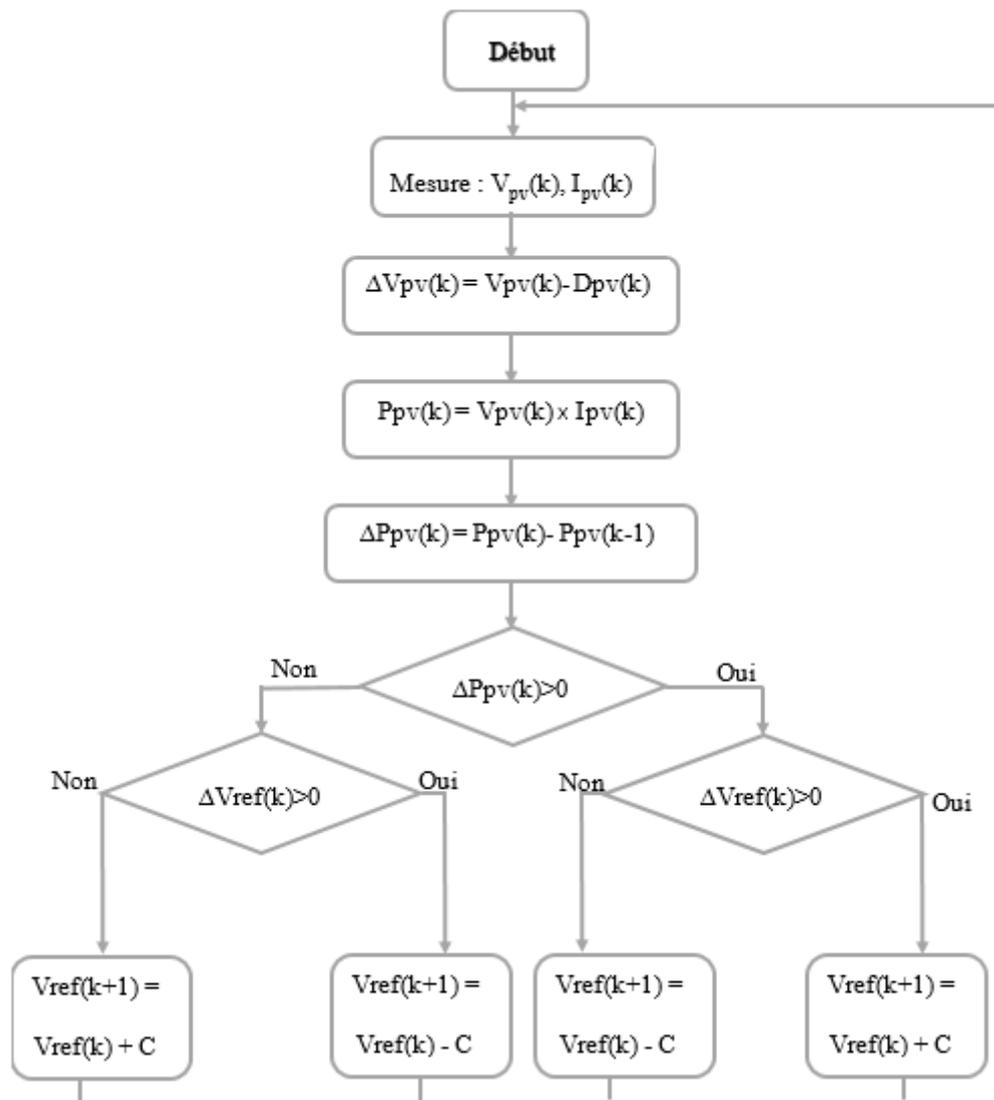


Figure (III.13) : Organigramme de l'algorithme P&O.

III.2.4. Simulation du système photovoltaïque avec l'algorithme MPPT :

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

La figure (III.14) représente les caractéristiques ($I_{pv}(V_{pv})$) et ($P_{pv}(V_{pv})$) dans les conditions STC ($E_{stc}=1000W/m^2$ et $T_{stc}=25^{\circ}C$).

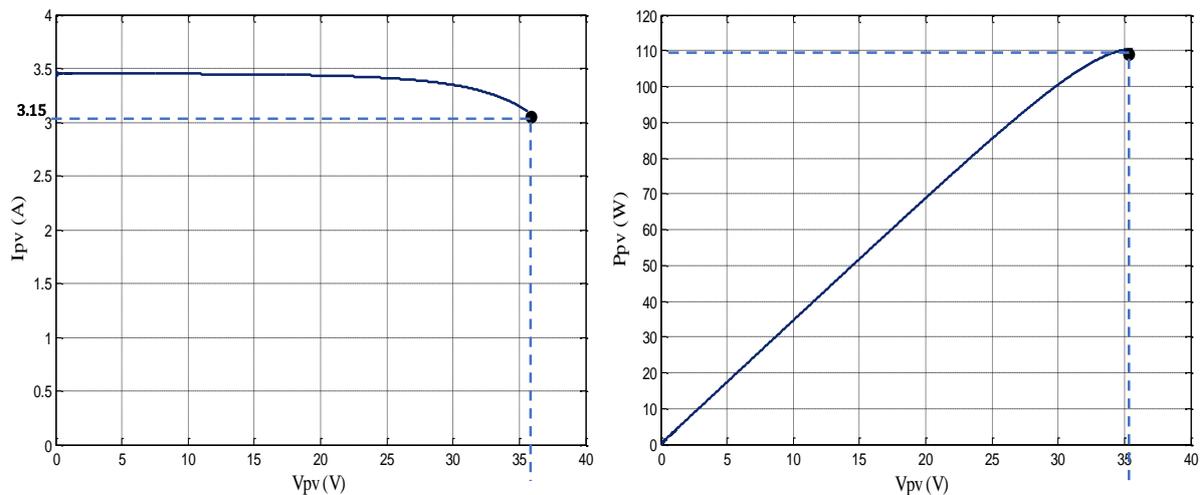


Figure (III.14) : Caractéristiques ($I_{pv}(V_{pv})$) et ($P_{pv}(V_{pv})$) dans les conditions STC.

III.2.4.1. Variation de l'ensoleillement E_s et de la température T_c :

On appliquant un échelon d'ensoleillement E_s de $1000w/m^2$ puis $800w/m^2$ et un échelon de température de $25^{\circ}C$ puis $50^{\circ}C$ qui sera représenter sur la figure (III.15.a.b) respectivement après un temps de ($t=5s$), et nous présentons ci-dessous les caractéristique (courant, tension, puissance) en fonction du temps.

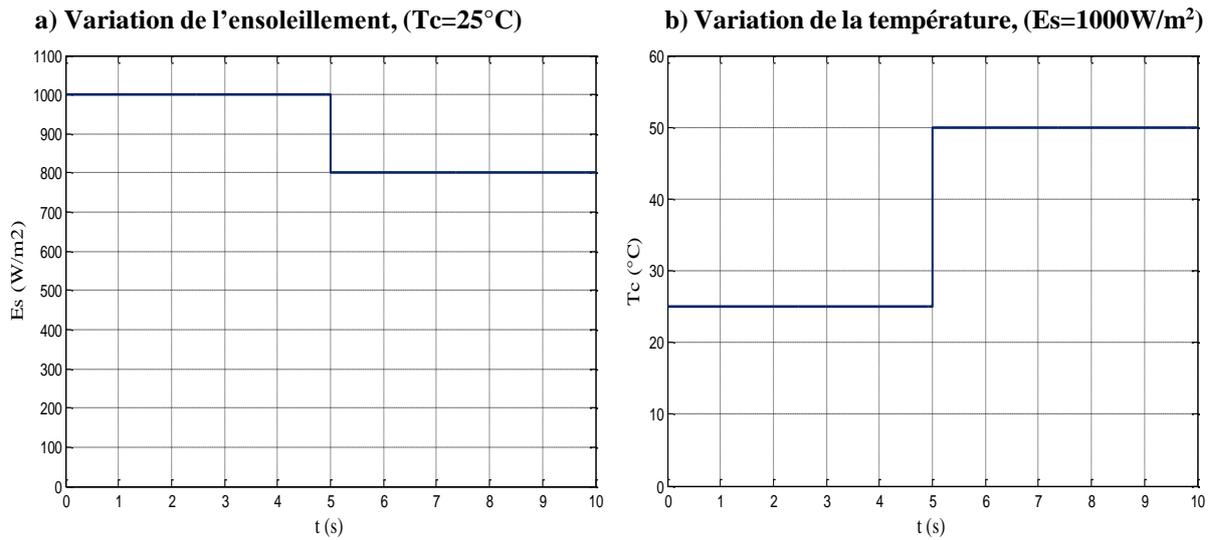


Figure (III.15) : Variation de E_s et T_c .

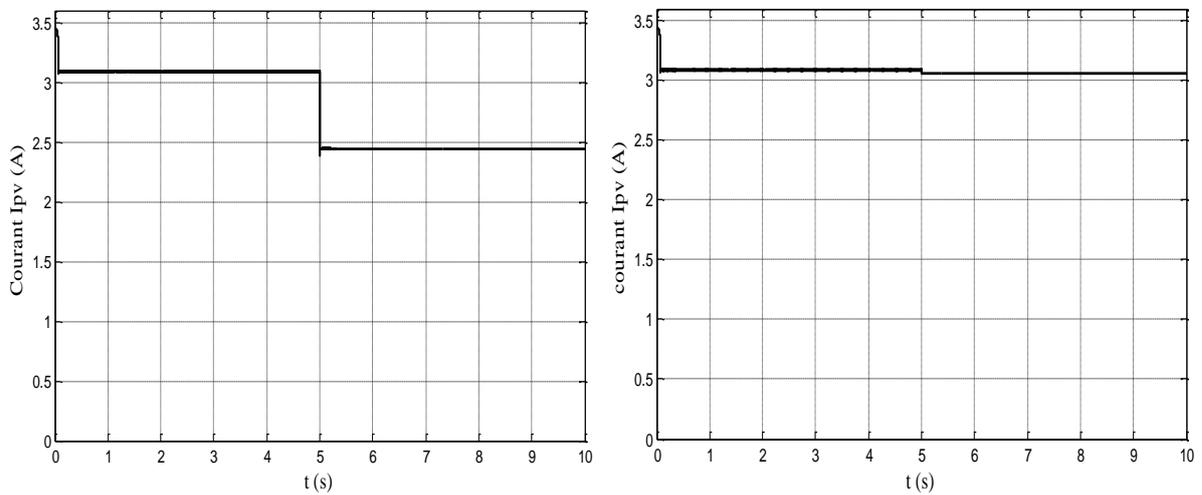


Figure (III.16) : Allure du courant I_{pv} .

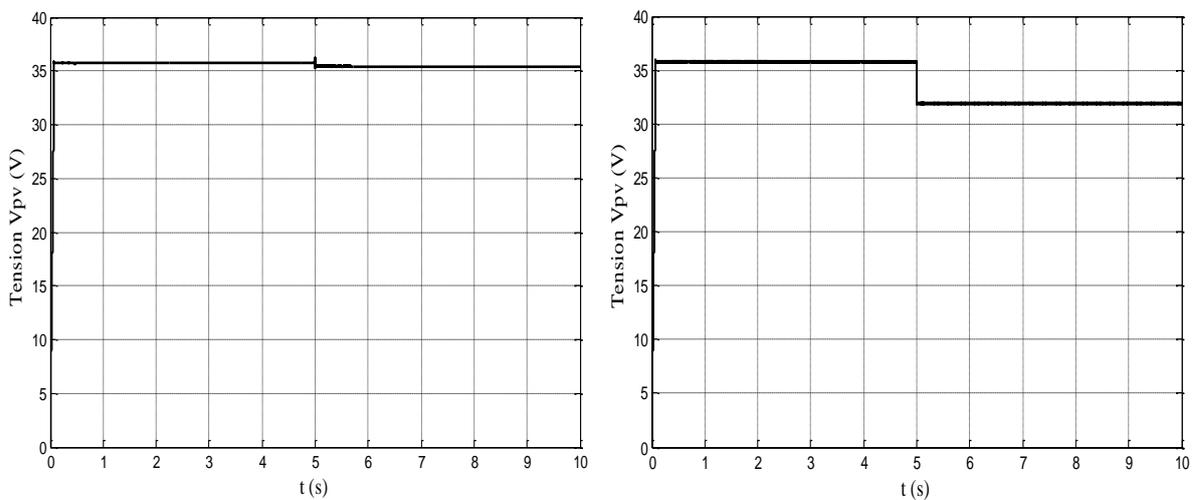


Figure (III.17) : Allure de la tension V_{pv} .

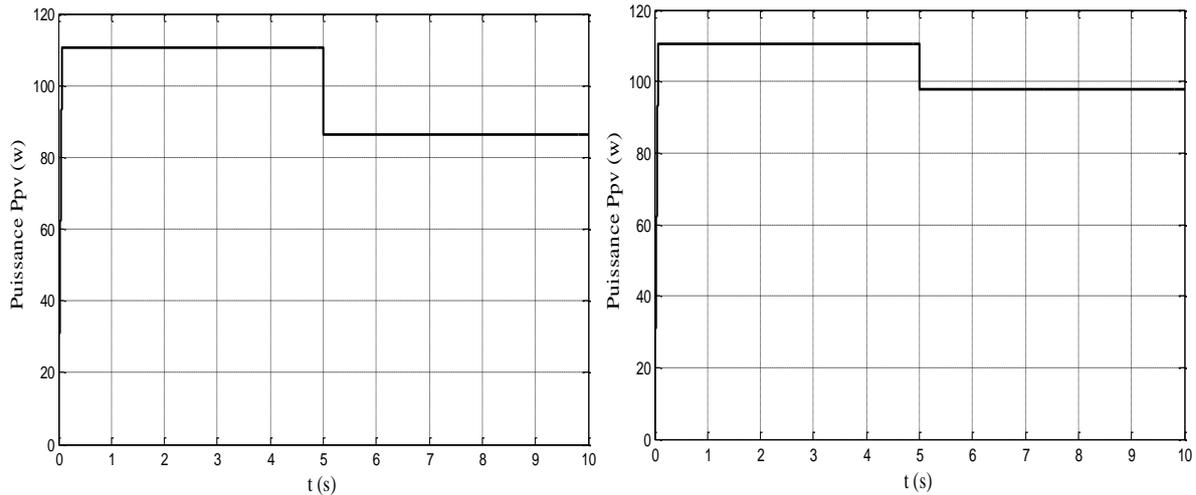


Figure (III.18) : Allure de la puissance Ppv.

Lors de la variation de l'ensoleillement, on remarque que le courant I_{pv} et la puissance P_{pv} varie proportionnellement avec la variation de l'ensoleillement et que la tension V_{pv} , tandis que lors de la variation de la température, la tension diminue avec l'augmentation de la température ce qui engendre une diminution de la puissance, alors que le courant reste inchangé.

III.3. Commande de la chaîne motopompe :

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

La commande par orientation du flux consiste à régler le flux par une composante du courant et le couple électromagnétique par l'autre composante du courant, pour cela il faut choisir un système d'axe (d, q) et une loi de commande assurant le découplage du couple et du flux. Dans le cas de la machine asynchrone, il est possible de réguler soit : **[Idj 10]**

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

La commande vectorielle à orientation du flux rotorique est la plus utilisée, elle donne de meilleurs résultats que les méthodes basées sur l'orientation du flux statorique ou

d'entrefer. Dans ce cas, on choisit l'orientation du repère telle que : $\Phi_{rd} = \Phi_r$ et $\Phi_{rq} = 0$.

Les tensions sont données par les relations suivantes :

$$V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{sq} \quad (\text{III.8})$$

$$V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \omega_s \cdot \Phi_{sd} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} \quad (\text{III.9})$$

$$0 = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\Phi_r}{dt} \quad (\text{III.10})$$

$$0 = R_r \cdot I_{rq} + \omega_r \cdot \Phi_r \quad (\text{III.11})$$

Les flux sont donnés par les relations suivantes :

$$\Phi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \quad (\text{III.12})$$

$$\Phi_{sq} = L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rq} \quad (\text{III.13})$$

$$\Phi_r = M \cdot I_{sd} + L_r \cdot I_{rd} \quad (\text{III.14})$$

$$0 = M \cdot I_{sq} + L_r \cdot I_{rq} \quad (\text{III.15})$$

En supposant que la commande maintienne : $\Phi_{rd} = \Phi_r = \text{constante}$ et à partir de l'équation (III.10), on obtient :

$$\frac{d\Phi_r}{dt} = -R_r \cdot I_{rd} \quad (\text{III.16})$$

Par ailleurs, l'équation (III.11) permet d'exprimer le flux en fonction du courant et de la pulsation rotorique sous la forme suivante :

$$\Phi_r = -\frac{R_r}{\omega_r} \cdot I_{rq} \quad (\text{III.17})$$

La relation (III.17) correspond en fait à la condition de calage du référentiel d'axes d et q dans le repère rotorique. Elle donne la valeur que doit avoir Φ_r en fonction de I_{rq} (avec $\frac{d\Phi_{rq}}{dt} = 0$ et $I_{rd} = 0$) pour que le flux rotorique reste orienté.

On peut, à partir de la relation (III.14) et (III.15), exprimer le courant I_{rd} et I_{rq} comme suit :

$$I_{rd} = \frac{\Phi_r - M \cdot I_{sd}}{L_r} \quad (\text{III.18})$$

$$I_{rq} = -\frac{M}{L_r} \cdot I_{sq} \quad (\text{III.19})$$

Le repère orienté impose $\Phi_{rq} = 0$. Connaissant le courant I_{sq} , l'expression du couple électromagnétique donnée par la relation (II.59) devient :

$$T_{em} = \frac{P \cdot M}{L_r} \Phi_r \cdot I_{sd} \quad (\text{III.20})$$

Dans la relation (II.16), on remplace I_{rd} par sa valeur exprimée en (III.18), il vient :

$$\Phi_r = \frac{M \cdot I_{sd}}{1 + T_r \cdot S} \quad (\text{III.21})$$

Avec :

T_r : Constante de temps rotorique.

S : Opérateur de dérivation.

On se sert de la relation angulaire interne $\omega_s = \omega_r + p \cdot \Omega$. Dans l'équation (II.17), on remplace I_{rq} par sa valeur donnée en (III.19). Ce qui donne :

$$\omega_r = \frac{M \cdot I_{sq}}{T_r \cdot \Phi_r} \quad (\text{III.22})$$

On obtient finalement :

$$\omega_s = \frac{M \cdot I_{sq}}{T_r \cdot \Phi_r} + p \cdot \Omega \quad (\text{III.23})$$

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

Le schéma de principe de la commande vectorielle à flux orienté est représenté sur la figure (III.19) ci-dessous.

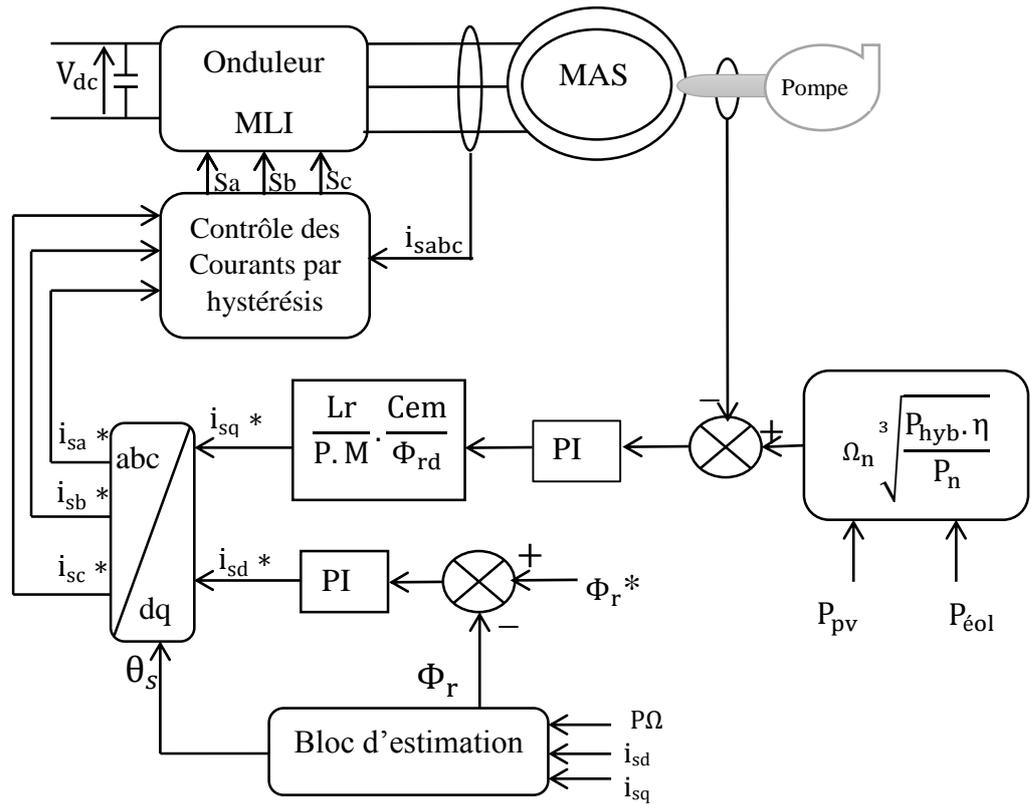


Figure (III.19) : Schéma de principe de la commande vectorielle à flux orienté.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la commande des deux chaînes de conversion d'énergie (éolien et photovoltaïque) de la MSAP et de la MAS ainsi que les résultats de simulation des deux chaînes de conversion (éolien et photovoltaïque) qui fonctionnent avec un algorithme d'optimisation (MPPT) à leur point de puissance maximale (PPM) même pour des variations des conditions (vitesse du vent, ensoleillement, température).

Chapitre IV

Dimensionnement et simulation du système de pompage hybride

Introduction :

Après à voir modéliser et simuler indépendamment les deux chaînes de conversions d'énergies (éolien et photovoltaïque), on les a couplés ensemble pour avoir un système hybride, pour assurer une alimentation continue de notre charge quel que soit les conditions météorologiques.

Un bon dimensionnement s'avère important pour un bon fonctionnement et une bonne exploitation du système de pompage, car l'efficacité de toute installation électrique dépend essentiellement de la rigueur de son dimensionnement et influe directement sur le coût et les performances de l'installation.

IV.1. Dimensionnement du système hybride pour le pompage :

Le dimensionnement de notre installation sera organisé de la façon suivante :

- Détermination de la puissance de charge (énergie consommée).
- Dimensionnement des systèmes éolien et photovoltaïque.

IV.1.1. Détermination de la puissance de charge :

Notre système de pompage hybride est prévu pour satisfaire les besoin en eau d'une région rurale à Bejaïa. Pour dimensionné les générateur, on doit calculer l'énergie consommée par la pompe en fonction du débit désiré c'est l'énergie que doit fournir les générateurs.

Dans notre cas on utilise un moteur asynchrone, le rendement globale du groupe moteur-pompe est égale au produit de rendement du moteur et celui de la pompe $\eta_{mp} = \eta_m \cdot \eta_p$. Dans notre cas on prend le $\eta_m=0.88$ et le $\eta_p=0.54$, ce qui nous donne un $\eta_{mp}=0.48$.

La hauteur manométrique : $h=20.5$ m. cette hauteur manométrique ou de refoulement correspond à un débit de $0.013\text{m}^3/\text{s}$ soit $46.8\text{m}^3/\text{h}$.

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

$$P_{\text{hyd}} = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \quad \text{(IV.1)}$$

Et :

$$P_{\text{mec}} = \frac{P_{\text{hyd}}}{\eta_p} \quad (\text{IV.2})$$

$$P_{\text{ele}} = \frac{P_{\text{mec}}}{\eta_m} \quad (\text{IV.3})$$

Avec :

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

P_{ele} : Puissance électrique du moteur.

P_{hyd} : Puissance hydraulique.

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

$$E_L = P_{\text{hyd}} \cdot t \quad (\text{IV.4})$$

Avec :

E_L : Energie électrique journalière demandée par la charge (kWh/j).

t : Temps de pompage.

Application numérique :

$$P_{\text{hyd}} = 1000 * 9.81 * 20.6 * 0.013 = 2627.2 \text{ W}$$

$$E_L = 2627.2 * 7 = 18.4 \text{ kWh/j}$$

$$P_{\text{mec}} = \frac{2627.2}{0.54} = 4776.72 \text{ W}$$

$$P_{\text{ele}} = \frac{4776.72}{0.88} = 5428 \text{ W}$$

Après dimensionnement notre choix se porte sur un moteur asynchrone de puissance 5.5kW

IV.1.2. Donnée météorologique disponible dans la région de Bejaïa :

Le site que nous avons choisis est celui de la région Bejaïa, (Latitude 36.45N, Longitude : 05.04E, Altitude : 2m), qui est une ville côtière de nord-est de l'Algérie.

La région de Bejaïa est dotée d'un grand potentiel solaire, qui est caractérisée par une saison d'été chaude (Juin- Septembre) qui sont importantes par rapport aux autres mois de

l'année ; de même pour le gisement éolien en se basant sur la vitesse du vent, on constate que notre site est doté aussi d'un gisement éolien considérable avec une vitesse moyenne annuelle du vent de l'ordre 3.975m/s. Vu leur complémentarité, on peut dire que le couplage d'un système photovoltaïque et éolien s'avère très intéressant pour assurer la production d'énergie électrique durant toute l'année. Donc le site de Bejaïa est favorable pour l'installation d'un système de pompage hybride.

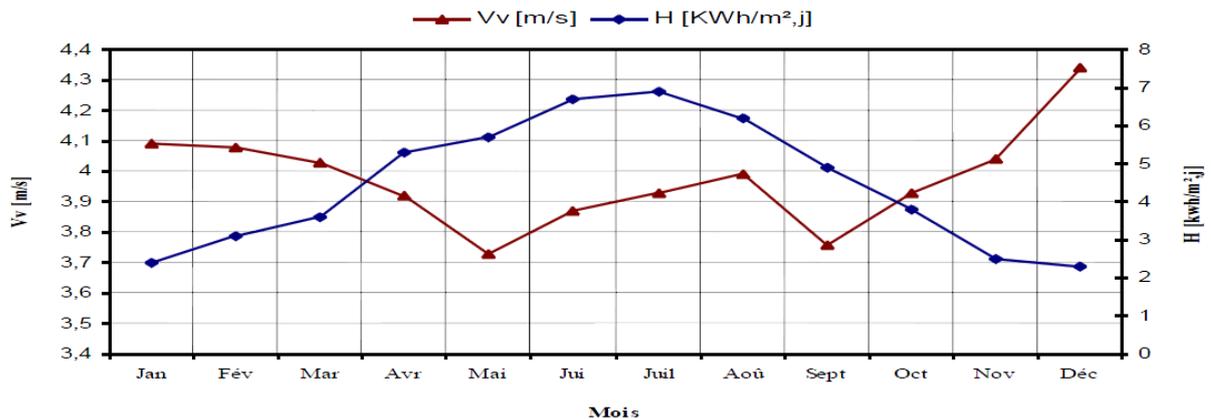


Figure (IV.1) : Irradiation solaire et vitesse du vent moyenne mensuelle journalière du site de Bejaïa de 1998 à 2007 [Lal 09]

IV.1.3. Calcul de l'énergie photovoltaïque : [Lal 09]

L'énergie produite par un générateur photovoltaïque est estimée à partir des données l'ensoleillement global sur un plan incliné, de la température ambiante et des données du constructeur pour le module photovoltaïque utilisé.

L'énergie électrique produite par un générateur photovoltaïque est donnée par :

$$E_{pv} = \eta_{pv} \cdot A_{pv} \cdot E_s \quad (IV.5)$$

Avec :

η_{pv} : Rendement du générateur photovoltaïque.

A_{pv} : Surface du générateur photovoltaïque.

E_s : L'ensoleillement.

IV.1.4. Calcul de l'énergie éolienne : [Lal 09]

La puissance contenue sous forme d'énergie cinétique P_v (W), dans le vent est donnée par :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_t \cdot v_v^3 \quad (\text{IV.6})$$

La puissance produite par le générateur P_t (W), qui représente une partie de la puissance du vent, est donnée par l'équation (II.3), l'énergie produite par le générateur éolien pendant une période est donnée par :

$$E_t = P_t \cdot \Delta t \quad (\text{IV.7})$$

IV.1.5. Dimensionnement des systèmes éolien et photovoltaïque : [Lal 09]

L'énergie mensuelle produite par les systèmes par unité de surface est noté :

- $E_{pv, m}$ (kWh/m²) pour le système photovoltaïque ;
- $E_{t, m}$ (kWh) pour le système éolien ;
- $E_{L, m}$ (kWh) pour l'énergie mensuelle demandée par la charge.

Avec : (m) représente le mois de l'année

La surface totale des générateurs par mois nécessaire pour assurer la couverture totale de la charge est donnée par :

- Pour le générateur photovoltaïque : $A_{pv, tot, m} = \frac{E_{L, m}}{E_{pv, m}} \quad (\text{IV.8})$

- Pour le générateur éolien : $A_{t, tot, m} = \frac{E_{L, m}}{E_{t, m}} \quad (\text{IV.9})$

L'énergie totale produite par les deux générateurs est exprimé en fonction de leurs surfaces pour former le système hybride.

$$E_{L, m} = E_{pv, m} \cdot A_{pv, tot, m} + E_{t, m} \cdot A_{t, tot, m} \quad (\text{IV.10})$$

Avec :

$$E_{pv, m} \cdot A_{pv, tot, m} = f \cdot E_{L, m} \quad (\text{IV.11})$$

$$E_{t, m} \cdot A_{t, tot, m} = (1 - f) \cdot E_{L, m} \quad (\text{IV.12})$$

Où : f représente la fraction de la charge alimentée par le générateur photovoltaïque et $(1 - f)$ celle du générateur éolien.

- $f = 0$: indique que la totalité de la charge est alimenté par le générateur éolien.
- $f = 1$: indique que la totalité de la charge est alimenté par le générateur photovoltaïque.

$$A_{pv,h} = f \cdot \frac{\overline{E_L}}{\overline{E_{pv}}} \quad (\text{IV.13})$$

$$A_{t,h} = (1 - f) \cdot \frac{\overline{E_L}}{\overline{E_t}} \quad (\text{IV.14})$$

Le nombre de générateur éolien et photovoltaïque se calcule selon leur surface unitaire ($A_{pv}=0.868\text{m}^2$ [She 03] et $A_t= 2\text{m}^2$ [Mir 05]) en prenant la valeur entière du rapport par excès.

$$N_{pv} = \text{ENT} \left[\frac{A_{pv,h}}{A_{pv}} \right] \quad (\text{IV.15})$$

$$N_t = \text{ENT} \left[\frac{A_{t,h}}{A_t} \right] \quad (\text{IV.16})$$

IV.1.6. Analyse des résultats de dimensionnement :

La production énergétique mensuelle des générateurs (éolien et photovoltaïque) ainsi que la taille nécessaire pour satisfaire notre charge qui est de consommation journalière de l'ordre de 18.4kWh/j sont représenté sur le tableau (IV.1) ci-dessous.

Mois	$E_{pv,m}$ mensuelle (kWh/m ²)	$E_{t,m}$ mensuelle (kWh/m ²)	$E_{L,m}$ (kWh)	$A_{pv,tot,m}$ (m ²)	$A_{t,tot,m}$ (m ²)
Janvier	7.298	12.571	570,4	78,15	45,37
Février	8.515	12.483	515.2	60,50	41,27
mars	10.908	12.03	570,4	52,29	47,41
Avril	15.598	11.071	552	35,38	49,85
Mai	17.531	9.538	570,4	32,53	59,80
Juin	19.7181	10.65	552	27,99	51,83
Juillet	20.984	11.156	570,4	27,18	51,12
Aout	18.246	11.675	570,4	31,26	48,8
Septembre	14.901	9.77	552	37,04	56,49
Octobre	11.497	11.157	570,4	49,61	51,12
Novembre	7.357	12.119	552	75,03	45,54
décembre	6.994	15.025	570,4	81,55	37,96
Moyenne mensuelle	$\overline{E_{pv}}=13.295$	$\overline{E_t}=11.603$	$\overline{E_L}=559.66$	$\overline{A_{pv,tot}}=42,09$	$\overline{A_{t,tot}}=48,23$

Tableau (IV.1) : Energie mensuelle produites par les générateurs éoliens et photovoltaïques et leur surface.

Nous allons faire une étude technico-économique pour évaluer le coût de chaque configuration des générateurs (éoliens et photovoltaïques) en fonction de la fraction (f).

Le coût totale de notre système hybride est la somme des coûts des deux générateurs (éolien et photovoltaïque), dans notre cas on n'a pas pris en considération les coûts des autres accessoires.

Le prix des paramètres que nous avons utilisés dans cette optimisation sont groupées dans le tableau ci-dessous :

Panneau photovoltaïque (110 W) (KDA/unité)	Générateur éolien (600W) (KDA/unité)
40	400

Tableau (IV.2) : Coûts des générateurs (2005)

f	A_{pv,h} (m²)	A_{t,h} (m²)	N_{pv}	N_t	C_{pv} (kDA)	C_t (kDA)	C_{tot} (kDA)
1	42,09	0	49	0	1960	0	1960
0.9	37,88	4,82	44	2	1760	800	2560
0.8	33,67	9,64	39	5	1560	2000	3560
0.7	29,46	14,47	34	8	1400	3200	4560
0.6	25,25	19,29	29	10	1200	4000	5160
0.5	21,04	24,11	25	12	1000	4800	5800
0.4	16,83	28,94	20	15	800	6000	6800
0.3	12,62	33,76	15	17	600	6800	7400
0.2	8,41	38,58	10	20	400	8000	8400
0.1	4,20	43,41	5	22	200	8800	9000
0	0	48,23	0	24	0	9600	9600

Tableau (IV.3) : Dimensionnement selon la moyenne mensuelle et le coût du système hybride pour chaque fraction de charge.

Les résultats obtenus sur le tableau (IV.2), montrent que la configuration du système hybride la moins chère est celle qui présente un $f=0.9$ (44 panneaux photovoltaïques de 110W et 2 éoliennes de 600W) avec un coût de 2 560 kDA.

Nous avons :

- Des panneaux photovoltaïques de puissance ($P_{pv,t} = 4840W$).
- Deux éoliennes de puissance ($P_{eol,t} = 1200W$).

Pour la mise en série et parallèle des panneaux photovoltaïques, on doit calculer le $I_{pv,t}$:

$$I_{pv,t} = \frac{P_{pv,t}}{V_{dc}} = \frac{4840}{465} = 10.41 \text{ A}$$

$$N_{pv,p} = \frac{I_{pv,t}}{I_{pv}} = \frac{10.41}{3.15} = 3.31.$$

Avec:

$I_{pv,t}$: Le courant photovoltaïque total.

$N_{pv,p}$: Le nombre de branche en parallèle.

Alors nous aurons 4 branches en parallèles de 11 panneaux en séries.

IV.2. Résultats de simulation :

IV.2.1. Fonctionnement avec des conditions constantes :

Dans ce qui suit on va simuler le système hybride en appliquant différents niveaux de vitesse de vent et différents niveaux d'ensoleillement et allons présenter les résultats de simulation correspondantes.

Pour simuler le système éolien, on applique une vitesse de vent variable aux instants (10s, 30s et 45s) comme c'est montré sur la figure (IV.2) ci-dessous.

Les résultats de simulation des différentes caractéristiques du système éolien sont illustrés ci-dessous.

Les figures (IV.3, IV.4, IV.5, IV.6 et IV.7) montrent respectivement l'allure de la vitesse de la turbine, le couple éolien, la puissance éolienne ainsi que les allures de la vitesse réduite au bout des pâles λ et du coefficient de puissance C_p .

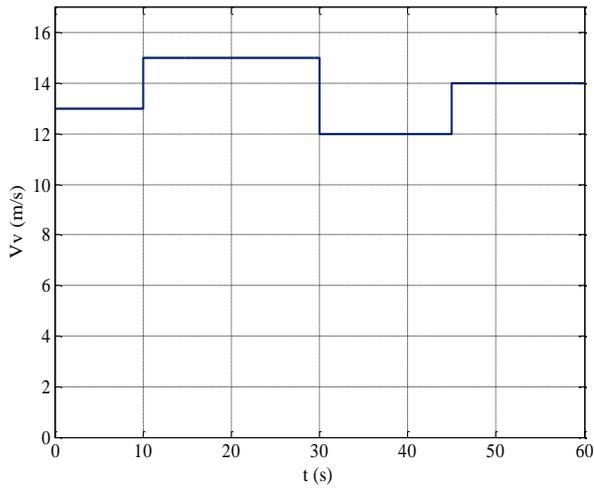


Figure (IV.2) : Vitesse du vent.

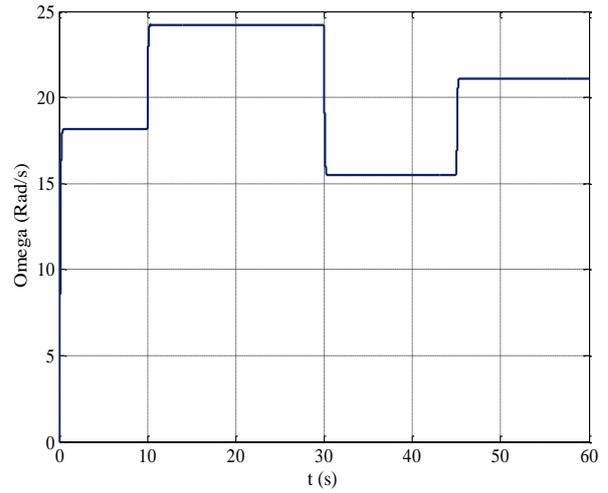


Figure (IV.3) : Vitesse de la turbine Ω .

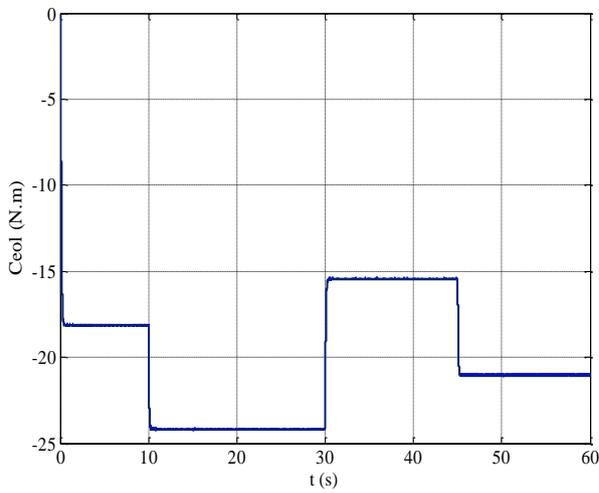


Figure (IV.4) : Couple éolien.

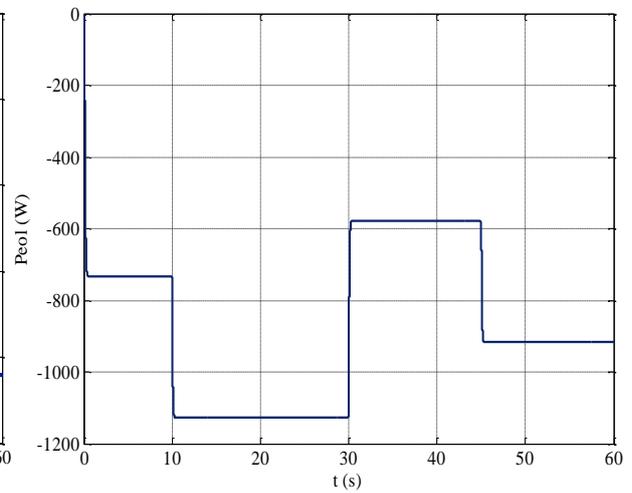


Figure (IV.5) : Puissance éolienne.

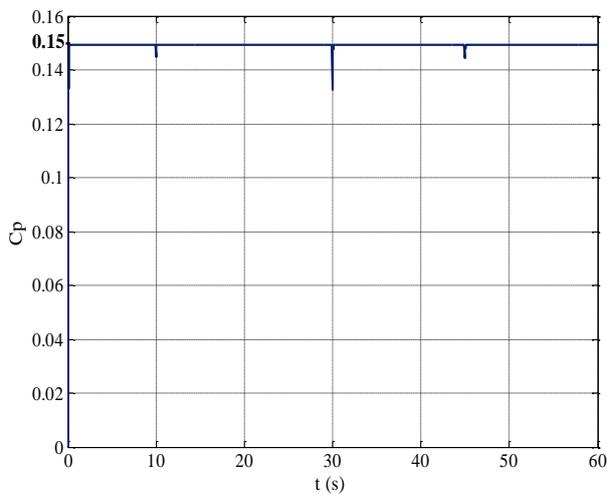


Figure (IV.6) : Allure du coefficient de puissance C_p .

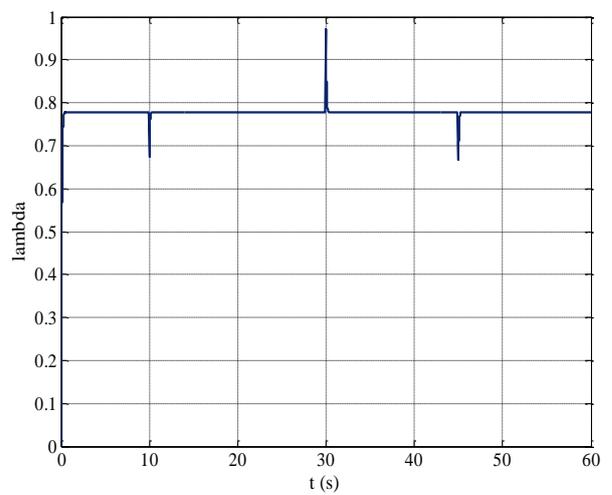


figure (IV.7) : Allure de λ .

D'après ces allures on voit que de la vitesse de la turbine, son couple ainsi que sa puissance varie proportionnellement à la vitesse du vent, tandis que les allures de λ et du coefficient de puissance C_p reste fixe ($\lambda_{opt}= 0.78$ et $C_{pmax}= 0.15$) correspond au fonctionnement au point de puissance maximale quel que soit la vitesse du vent.

Les courants de la MSAP dans le repère (d et q) et un zoom sur les courants statoriques à l' instant (t : 30s) sont représentés sur les figures (IV.8) et (IV.9)

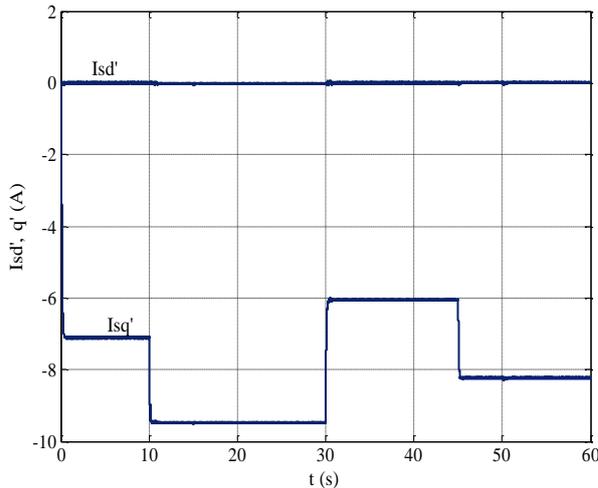


Figure (IV.8) : Courant I_{sd}' et I_{sq}' .

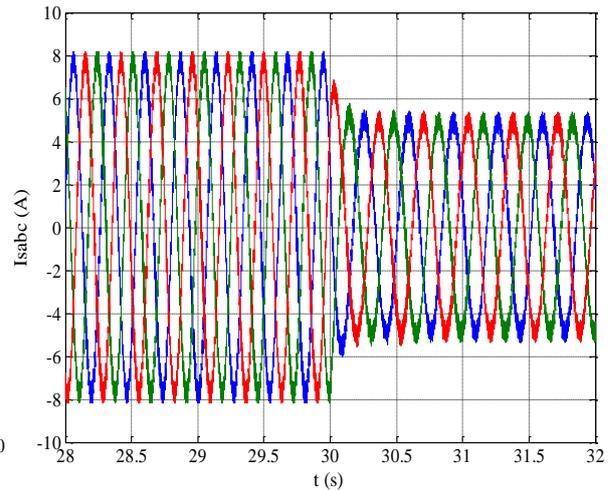


Figure (IV.9) : Zoom sur les courants statoriques I_{sabc} .

On voit bien que le courant I_{sd}' suit sa référence fixé ($I_d=0$), de même pour le courant I_{sq}' qui suit sa référence qui est l'image du couple et on voit que les courants statoriques de la MSAP sont sinusoïdaux et suivent la variation du vent.

On applique des échelons d'ensoleillements aux instants (15s, 30s et 50s) comme c'est montré sur la figure (IV.10) et on relèvera les caractéristiques courant, tension et puissance photovoltaïque.

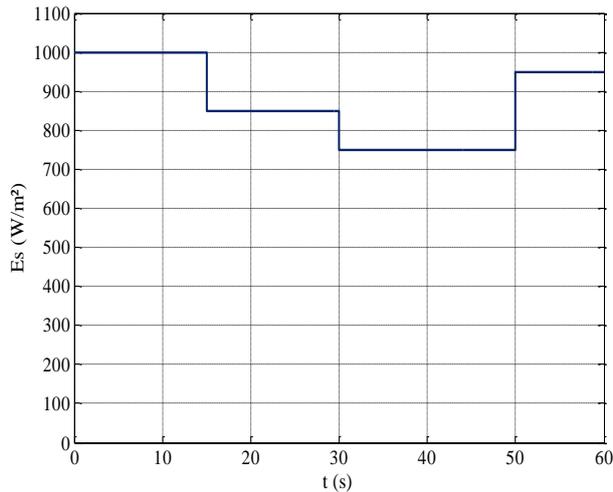


Figure (IV.10) : Variation d'insolation.

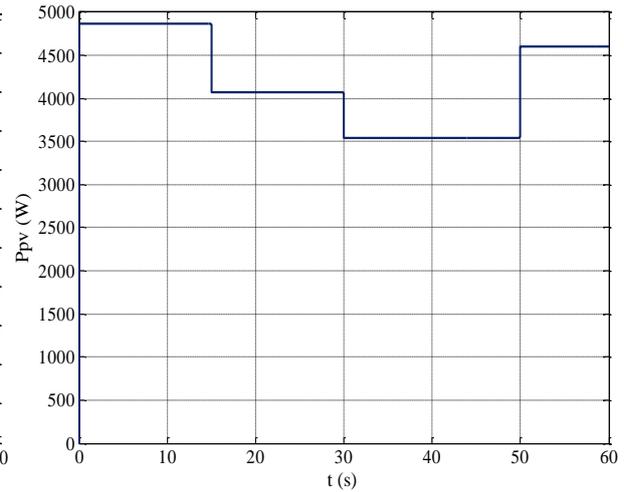


Figure (IV.11) : Allure de la puissance photovoltaïque.

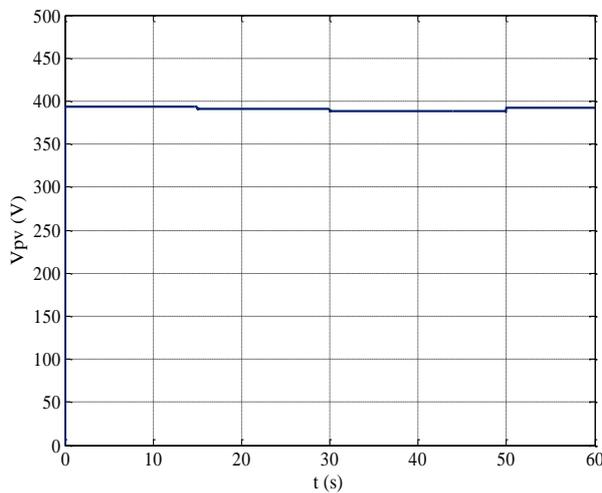


Figure (IV.12) : Allure de la tension photovoltaïque.

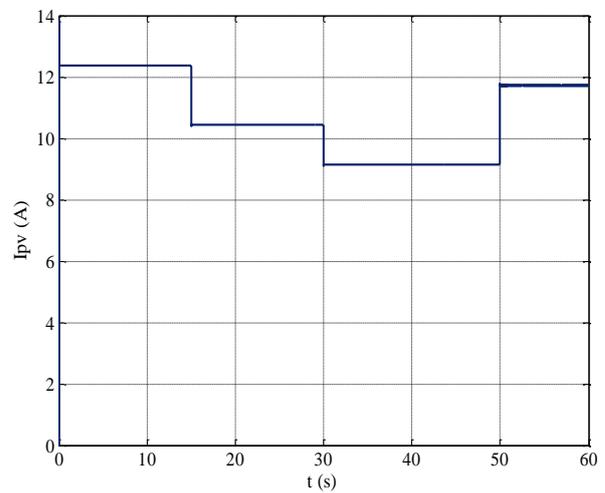


Figure (IV.13) : Allure du courant photovoltaïque.

On voit bien que la puissance et le courant photovoltaïque varie proportionnellement par rapport à la variation de l'insolation et la tension photovoltaïque varie très peu.

La figure (IV.14) représente les différentes puissances (éolien, photovoltaïque et hybride).

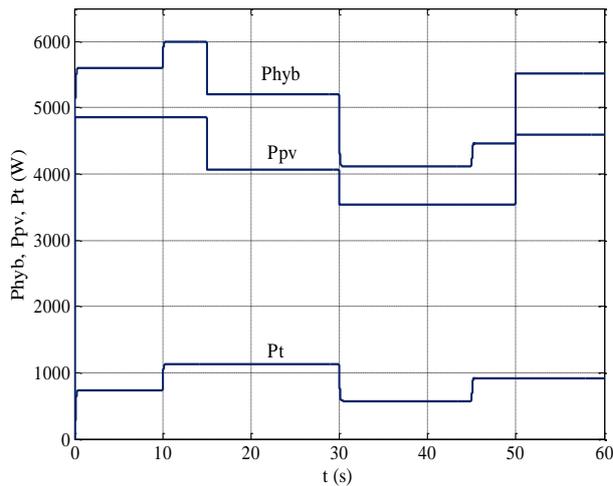


Figure (IV.14) : Puissances (Hybride, éolienne et photovoltaïque).

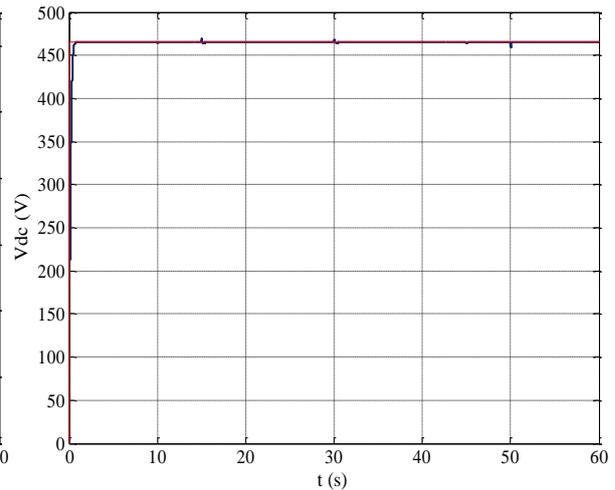


Figure (IV.15) : Tension du bus continu V_{dc}.

Un zoom sur le régime transitoire et un autre zoom sur le régime permanent à 30s est représenté sur les figures (IV.15.a) et (IV.15.b) ci-dessous.

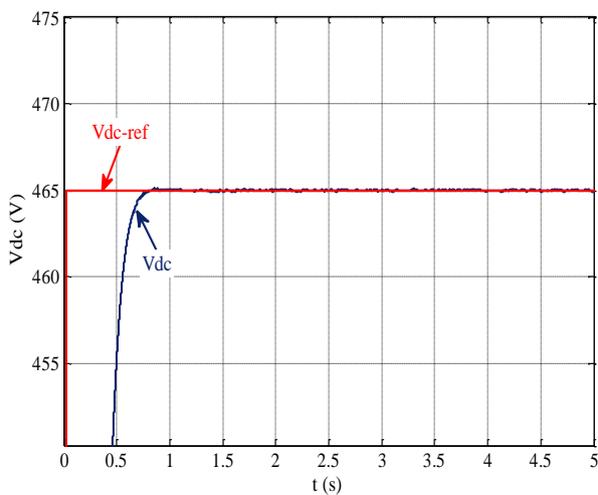


Figure (IV.15.a) : Zoom sur le régime transitoire de la tension V_{dc}.

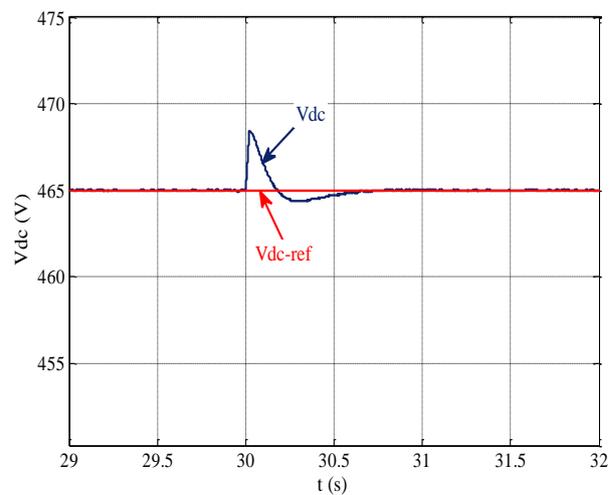


Figure (IV.15.b) : Zoom sur le régime permanent de la tension V_{dc}.

Les figures (IV.15.a et IV.15.b) montrent des zooms sur l'allure de la tension du bus continu, on voit bien que la tension est bien régulée à sa référence de 465V même pour des variations d'ensoleillement et de vitesse de vent.

Une commande vectorielle est appliquée à la MAS entraînant la pompe centrifuge, comme c'est présenté sur la figure (III.19).

La vitesse de référence est calculée à partir des puissances maximisées éolien et photovoltaïque puis comparé à la vitesse de la MAS. Après régulation, le couple électromagnétique est obtenu. Le courant I_{sq} de référence est déterminé à partir du couple de référence. Le courant I_{sd} de référence est obtenu après régulation du flux. Le contrôle des courants statoriques se fait par hystérésis pour déterminer les signaux de commande de l'onduleur MLI.

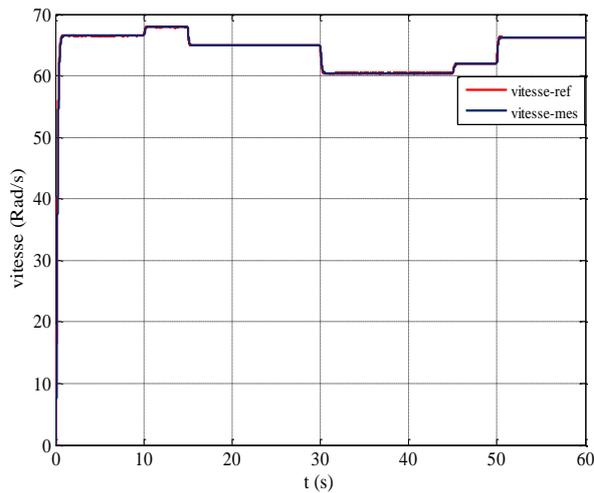


Figure (IV.16) : Allure de la vitesse de la MAS.

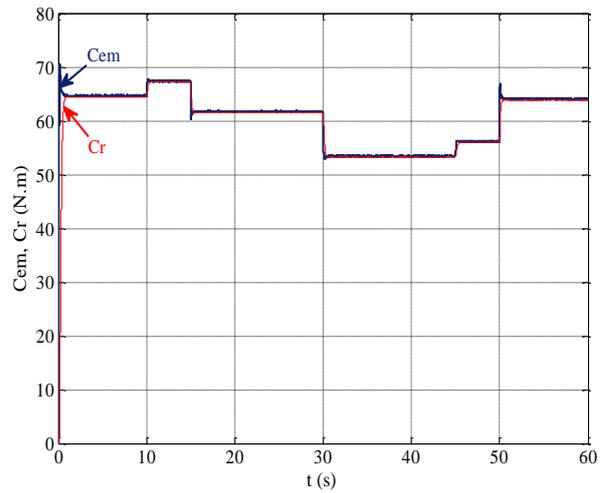


Figure (IV.17) : Allure du Cem et du Cr.

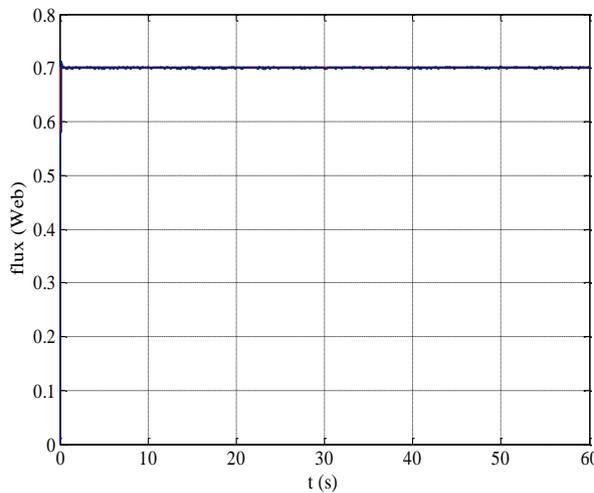


Figure (IV.18) : Allure du flux.

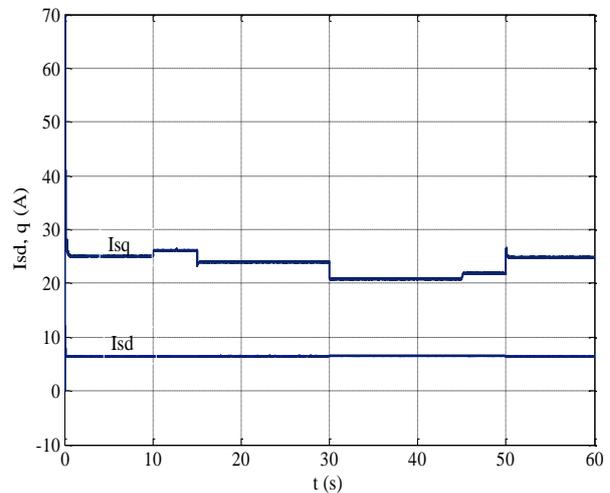


Figure (IV.19) : Courant I_{sd} ' et I_{sq} '.

La vitesse de la MAS est présentée sur la figure (IV.16), elle est variable et dépend des puissances maximales obtenues.

Le couple électromagnétique de la MAS est présenté sur la figure (IV.17). La figure (IV.119) présente les allures des courants suivant les deux axes d et q, l'évolution du courant

(I_{sd}) et similaire à celle du flux figure (IV.18), alors que celle du courant (I_{sq}) suit la variation du couple.

Un zoom sur les courant statorique de la MAS à 30s est représenté sur la figure (IV.20) ci-dessous.

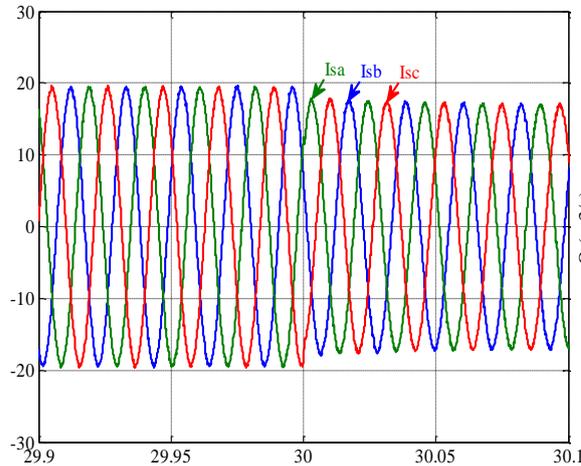


Figure (IV.20) : Zoom sur les courants statoriques.

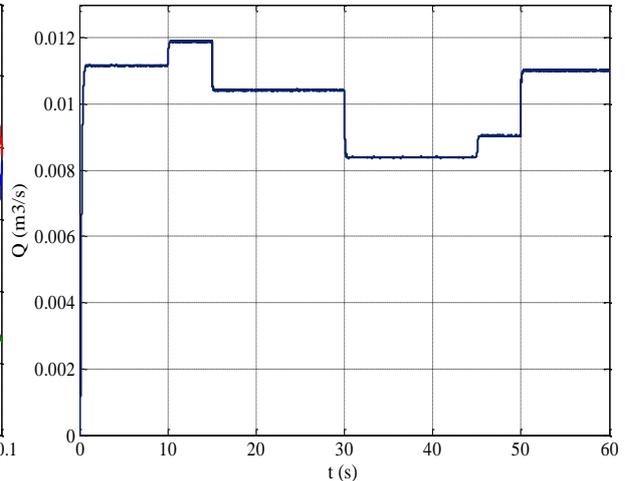


Figure (IV.21) : Allure du débit.

La figure (IV.21) montre l'allure du débit en fonction du temps qui suit la variation de la vitesse qui est dû aux variations des conditions météorologiques et on voit que les courant statorique de la MAS sont sinusoïdaux.

IV.2.2. Fonctionnement sous des conditions variables :

Pour comprendre le comportement du système face aux changements climatiques, on va appliquer différents profils (vitesse de vent, ensoleillement et température) et on relèvera les résultats de simulation du système éolien, photovoltaïque et du système global.

On applique un profil du vent variable comme montré sur la figure (IV.22).

Les figures de (IV.23) à (IV.28) représentent respectivement l'évolution de la vitesse de la turbine éolienne, la puissance de la turbine éolienne, l'allure du coefficient de puissance C_p , l'allure de la vitesse réduite λ , les courants I_{sd} et I_{sq} et les courants statoriques de la MSAP.

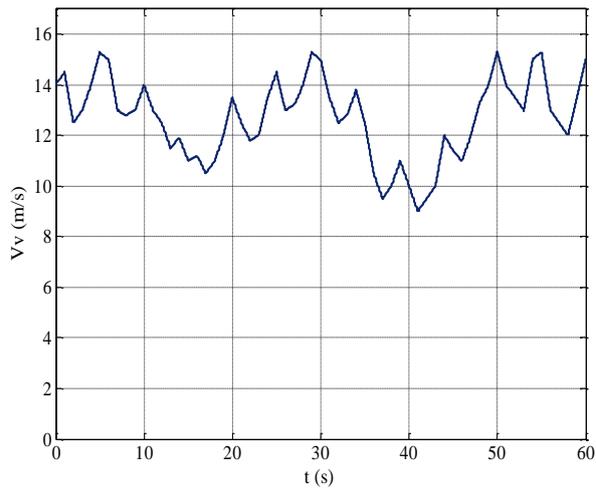


Figure (IV.22) : Profile de vent.

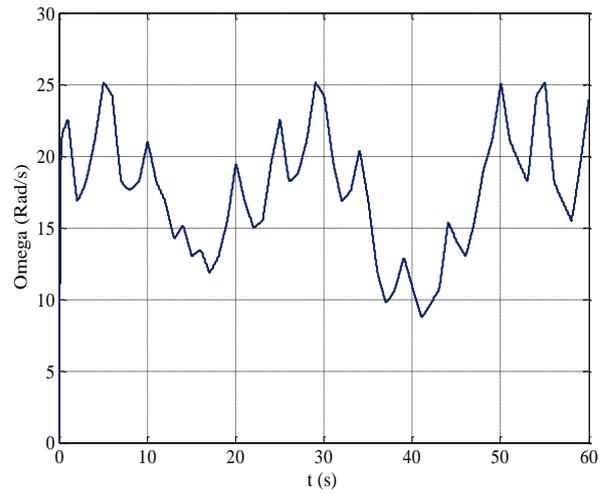


Figure (IV.23) : Vitesse de la turbine éolienne.

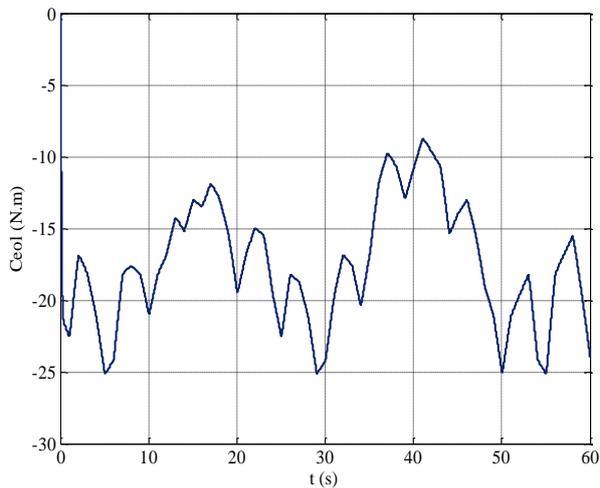


Figure (IV.24) : Couple éolienne.

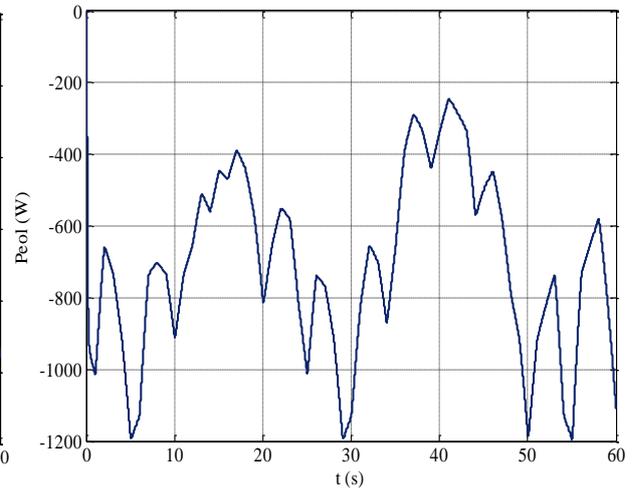


Figure (IV.25) : Puissance éolienne.

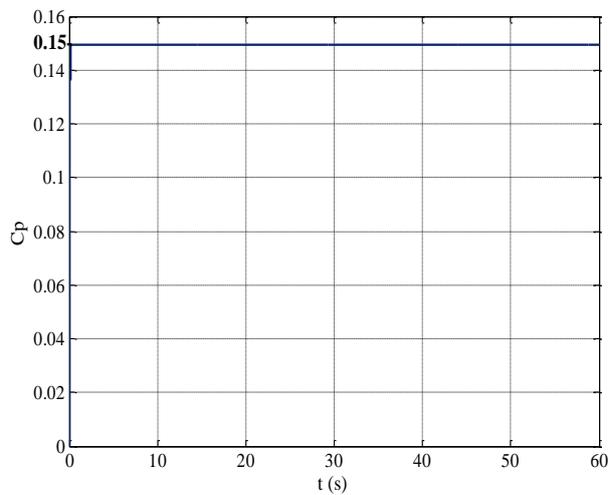


Figure (IV.26) : Allure du coefficient de puissance C_p .

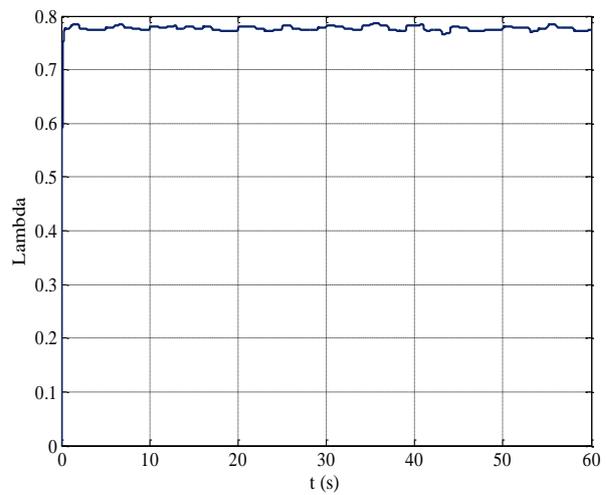


Figure (IV.27) : Allure de λ .

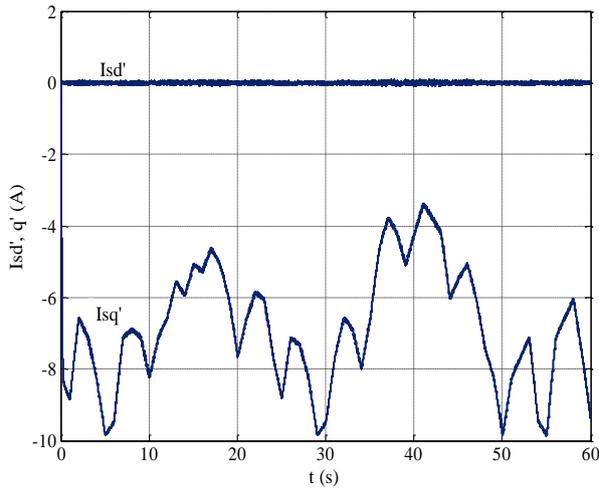


Figure (IV.28) : Courant I_{sd}' et I_{sq}' .

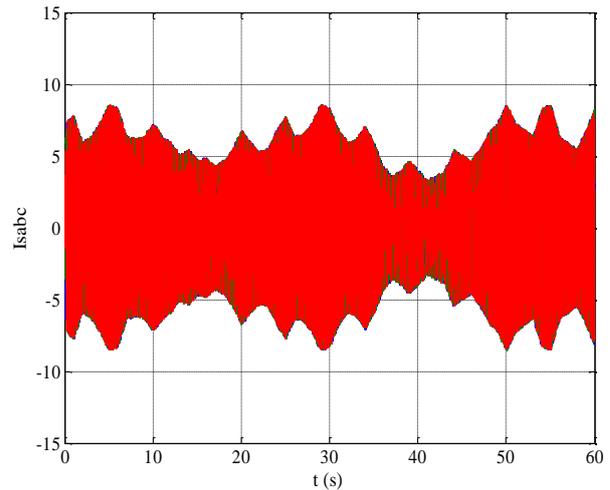


Figure (IV.29) : Courants statoriques I_{sabc} de la MSAP

On voit bien que l'allure de la vitesse de la turbine, la puissance de la turbine éolienne et le couple éolien suit l'allure du profil du vent, l'allure du coefficient de puissance C_p et de la vitesse réduite λ correspond au fonctionnement au point de puissance maximale quel que soit le profil du vent. Le courant I_{sd}' suit toujours sa référence fixé à 0 et le courant I_{sq}' suit l'allure du couple.

La Figure (IV.30 et IV.31) représente respectivement le profil d'ensoleillement et de température appliqué au système photovoltaïque.

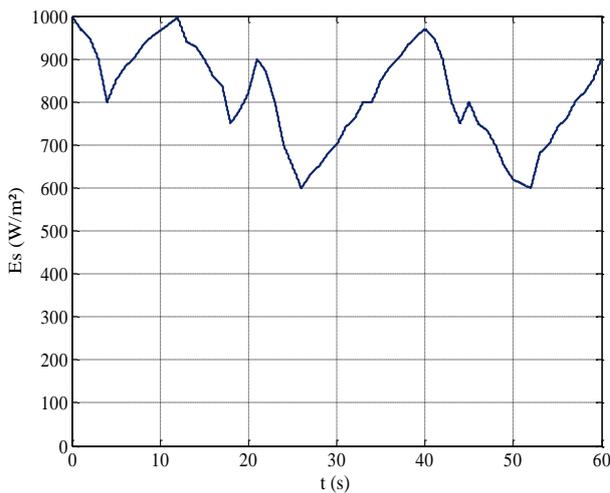


Figure (IV.30) : Profil d'ensoleillement.

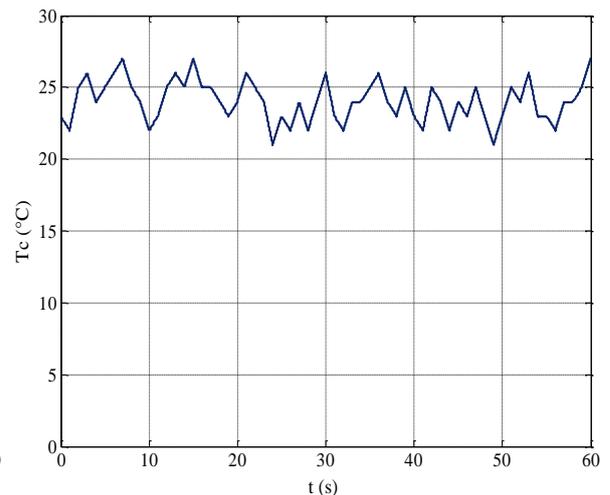


Figure (IV.31) : Profil de température.

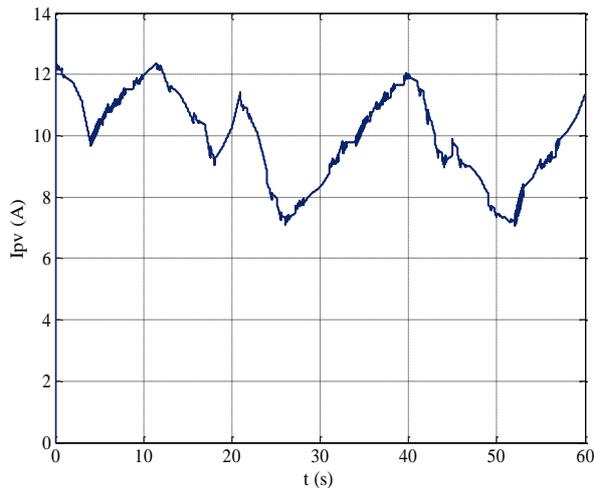


Figure (IV.32) : Allure de la tension photovoltaïque.

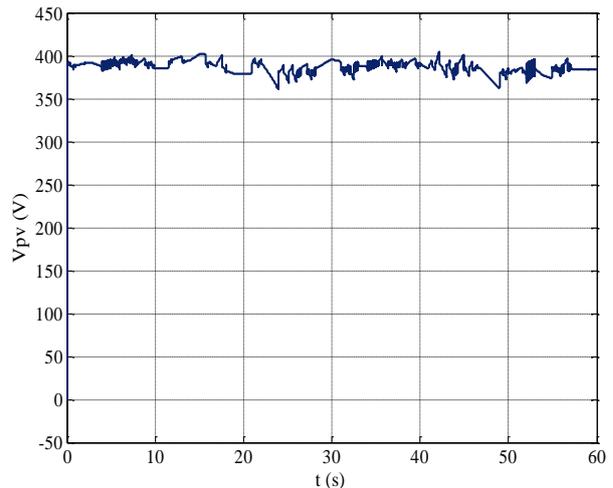


Figure (IV.33) : Allure du courant photovoltaïque.

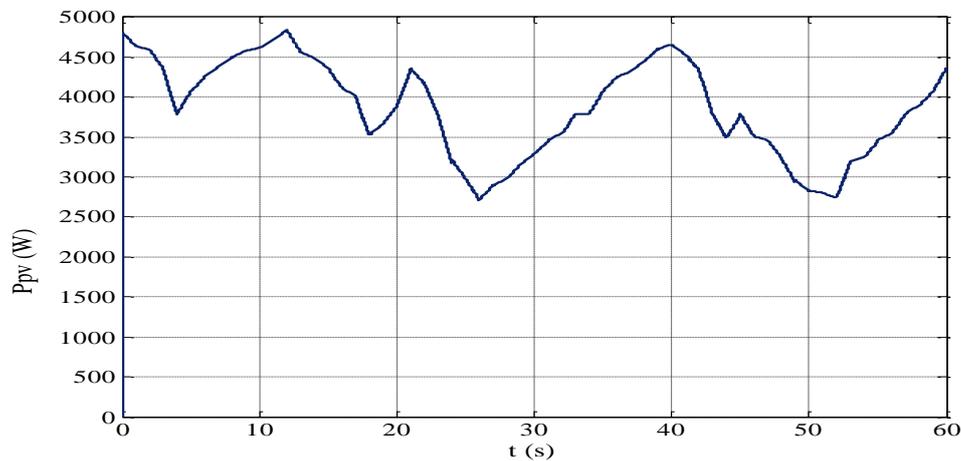


Figure (IV.34) : Allure de la puissance photovoltaïque.

On voit bien que le courant et la puissance photovoltaïque suit l'allure du profil d'ensoleillement, et la tension photovoltaïque présente de petite variation dû au changement de température.

Les figures de (IV.35) à (IV.428) montrent les résultats de simulation du système hybride globale sous les conditions variable d'ensoleillement, de température et de vitesse de vent.

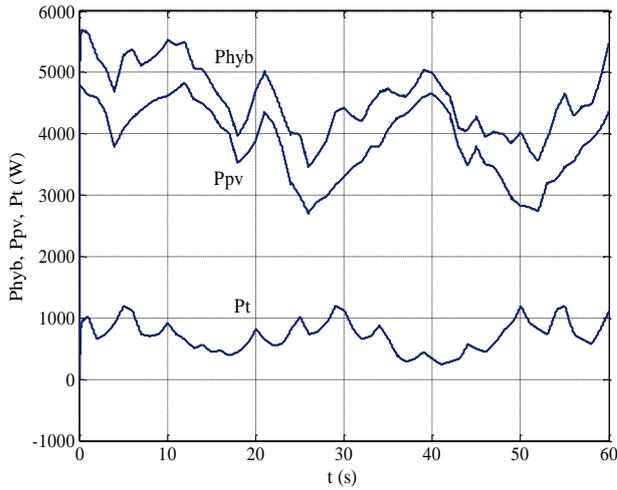


Figure (IV.35) : Puissance (hybride, éolienne et photovoltaïque).

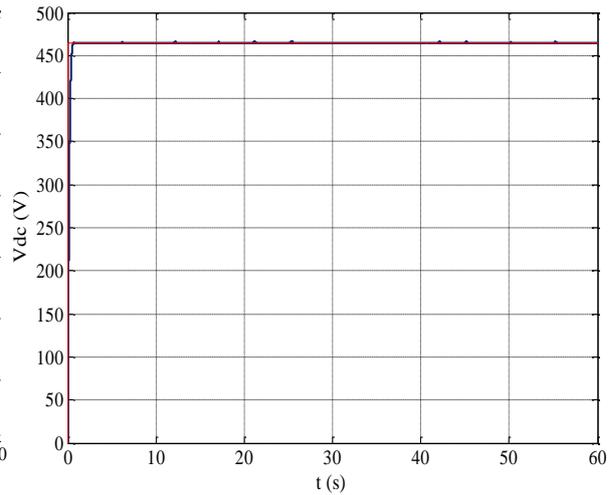


Figure (IV.36) : Allure de la tension Vdc.

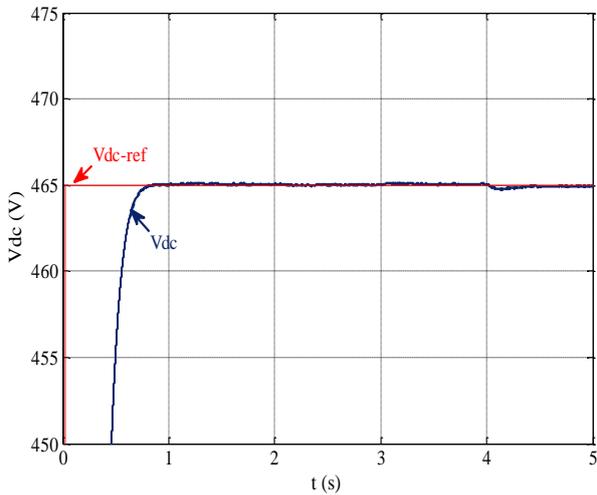


Figure (IV.36.a) : Zoom sur le régime transitoire de la tension Vdc.

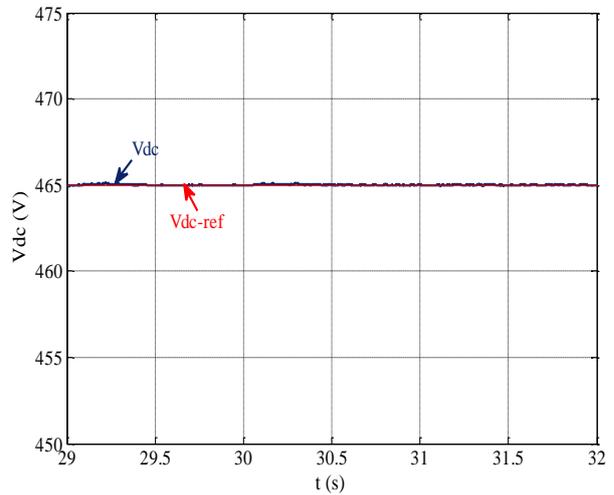


Figure (IV.36.b) : Zoom sur le régime permanent de la tension Vdc.

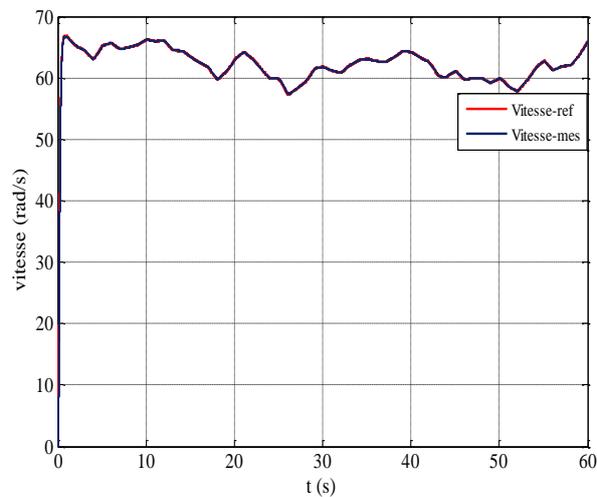


Figure (IV.37) : Allure de la vitesse de la MAS.

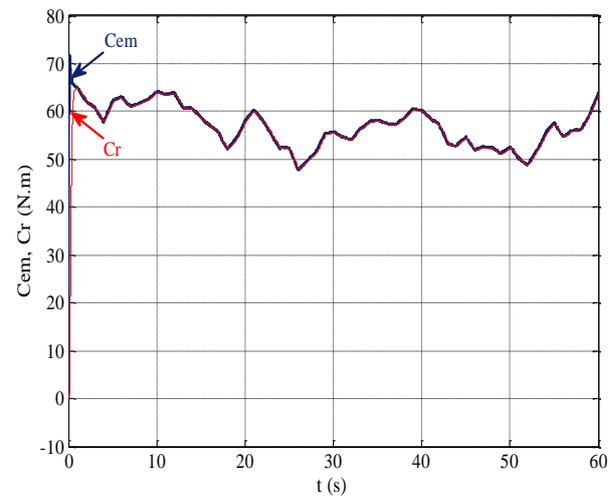


Figure (IV.38) : Allure du Cem et Cr.

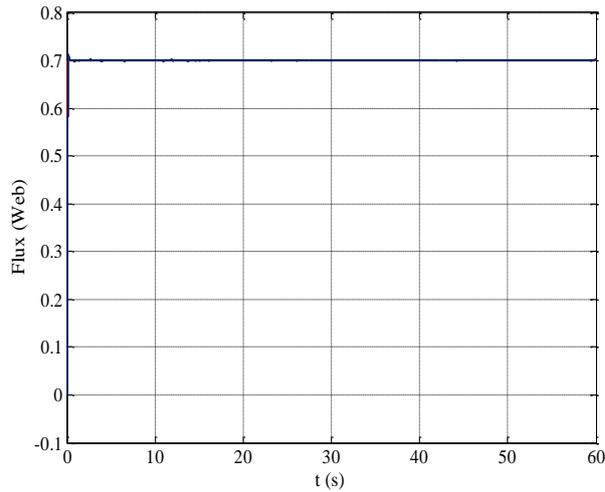


Figure (IV.39) : Allure du flux.

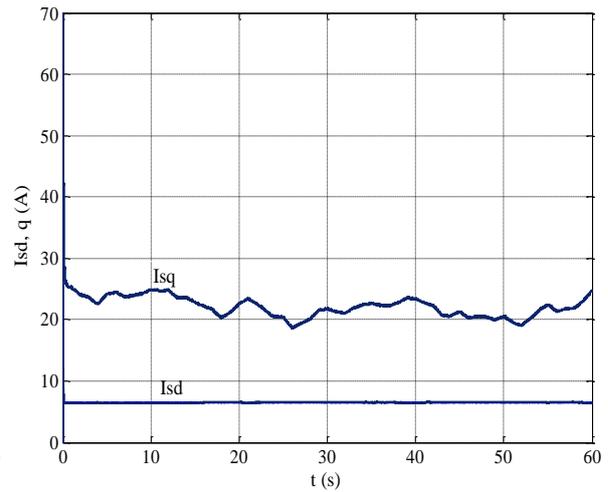


Figure (IV.40) : Courants Isd et Isq.

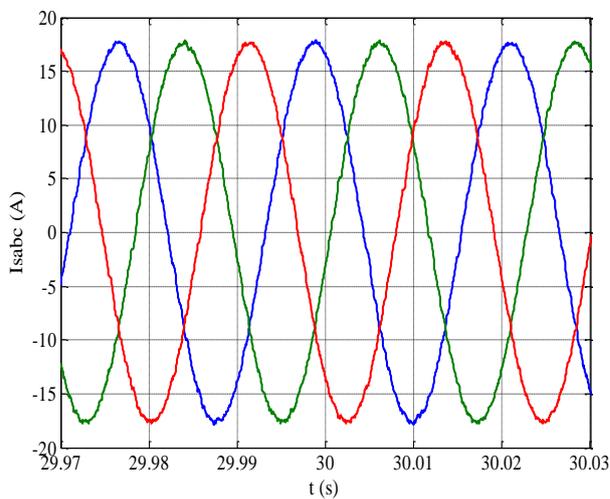


Figure (IV.41) : Zoom sur les courants statoriques de la MAS.

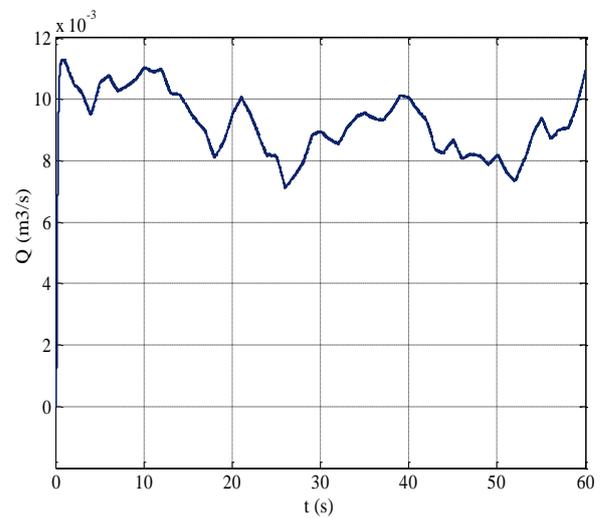


Figure (IV.42) : Allure du débit.

On voit bien que la tension V_{dc} est bien régulée et suit sa référence qui est de 465V, la vitesse de la MAS suit l'allure de la puissance hybride, le courant I_{sd} suit la référence de flux qui suit sa référence fixée à 0.7, le courant I_{sq} suit sa référence qui est l'image du couple, on constate que les courants statoriques de la MAS sont sinusoïdaux et que le débit suit la variation de la vitesse qui est due aux variations des conditions météorologiques.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons fait le dimensionnement des différents composants du système de pompage hybride, on a trouvée après étude technico-économique 44 panneaux photovoltaïque et deux éoliennes, on a simulée le système globale en appliquant différent profil (d'ensoleillement, vitesse de vent et de température). A chaque instant, on retrouve un fonctionnement à puissance maximale des deux générateurs éolien et photovoltaïque grâce aux algorithmes MPPT. La commande vectorielle nous a permis de contrôler indépendamment le flux et la vitesse. Cette dernière a été calculée en fonction de la puissance hybride optimale. Le débit obtenu est variable en fonction des conditions météorologique.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est l'étude, la commande et la simulation du système hybride, qui se compose d'un générateur photovoltaïque, d'un générateur éolienne, des convertisseurs d'électroniques de puissance et d'un groupe motopompe.

Dans le premier chapitre, nous avons donné un aperçu sur les différentes combinaisons des systèmes hybrides et une brève description du système de pompage hybride. Nous avons cité les avantages, les limites des deux sources d'énergies éolienne et photovoltaïque, les différents types de convertisseurs utilisés et du groupe motopompe.

Le deuxième chapitre a été consacré à la modélisation des différents éléments de la chaîne de conversion d'énergie éolienne et photovoltaïque, qui est composée d'une turbine éolienne à axe verticale, fonctionnant à vitesse variable, avec une génératrice synchrone à aimant permanent et de panneaux photovoltaïques. La modélisation des différents convertisseurs utilisés ainsi que le groupe moteur-pompe, qui est composé d'un moteur asynchrone et d'une pompe centrifuge, ont été présentés.

Le troisième chapitre a été dédié à la commande des deux chaînes de conversion d'énergie. L'optimisation de la chaînes de conversion éolienne est effectuée en utilisant l'algorithme MPPT du contrôle en couple, une commande est appliquée à la GSAP en utilisant le principe de la commande vectorielle. Une commande à puissance maximale (MPPT) a été appliquée au système photovoltaïque suivant la méthode basée sur l'algorithme Perturbation et Observation (P&O). Les deux commandes MPPT ont permis de fournir une puissance maximale quel que soit les conditions météorologiques.

Le dimensionnement et la simulation du système hybride a été présenté dans le quatrième chapitre. Après étude technico-économique, la configuration du système hybride la plus économique est celle qui présente $f=0.9$ (44 panneaux photovoltaïques et deux éoliennes). On a simulé le système global en appliquant différents profils (d'ensoleillement, vitesse de vent et de température), les résultats de simulation montrent bien l'efficacité des commandes appliquées aux deux systèmes, le débit obtenu est variable en fonction des variations des conditions météorologiques.

Comme perspectives, il serait intéressant d'utiliser d'autres techniques MPPT pour maximiser la puissance des deux générateurs éolien et photovoltaïque, aussi de faire une implantation du système globale en tenant compte des conditions réelles de fonctionnement.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Bibliographie

- [Abd 07] **A. ABDEL GHANI, H. ABID, M. ABID, A.TAHOUR** « commande par la logique floue et mode glissant d'une machine synchrone autopilotée », revue. roum. science technique. – électrotechnique et énergie. vol 52, n°1, pp 89–103, bucarest, 2007.
- [Abd 10] **A.BOUHARCHOUCHE ; A/N.BOUABDALLAH** «Etude et dimensionnement d'une Centrale Hybride Photovoltaïque-Eolienne». Mémoire d'ingénieur d'état en Electrotechnique ; Ecole Nationale Polytechnique d'Alger ; 2010.
- [Ank 12] **M.ANKI, A.BOUALLAG** «Contribution à l'étude et à l'optimisation d'un système de pompage photovoltaïque»; Mémoire de Master2 en Electrotechnique ; Université de BEJAIA, 2012.
- [Bel 10] **S.BELAKEHAL** «Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables». Thèse de Doctorat en sciences ; Université de Constantine ; 2010.
- [Bel 12] **A/N.BELHOUVINE, S/A.ZAIDI** «Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome»; Mémoire de Master2 en Génie Electrique ; Université de BEJAIA, 2012.
- [Ben 11] **M. BENABDELKADER, A. MALEK ET B. DRAOUI** «Perspective du pompage éolien appliqué à l'irrigation du palmier dattier dans la région de Béchar» Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°3 (2011) 381 – 395
- [Bou 02] **M. T. BOUKADOUM, A. HAMIDAT et N. OURABIA** « Le Pompage Photovoltaïque » ; Revue des Energies Renouvelables : Zones Arides (2002) 69-73.
- [Bou 08] **A. M. BOUDEN** « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque » ; Mémoire de magister en électronique Option : instrumentation ; Université Mentouri De Constantine, 2008.
- [Bou 10] **A.BOUSSEKINE, N.GUERMOUCHE** «Contribution à l'étude des systèmes de pompage photovoltaïque»; Mémoire d'ingénieur d'état en Electrotechnique, Université de BEJAIA, 2010.

-
- [Ber 09] **C.BERNARD, C.S.OLIVEIRA, B.LAVAL, C.VAUDOUER** «Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue », Rapport rédigé dans le cadre de l'UV BA04 –Energie renouvelables 2009.
- [Dav 07] **A.DAVIGNY** «Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie»; Thèse de Docteur de l'Université des Sciences et Technologies de Lille ; 2007.
- [Deb 09] **L. DEBBOU, D. MAGHRIBI** «commande d'un système hybride (photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie»; Mémoire d'ingénieur d'état en Electromécanique ; Université de BEJAIA, 2009.
- [Deo 04] **B.DEODA, D.LUCIEN, D.ADRIEN, G.SIMON** «Etudes des cellules photovoltaïques»; Rapport d'une recherche ; Lycée Jean Marnet-Annemasse en France ; 2004.
- [Fle 07] **B.FLECHE, D.DELAGNES** «Energie solaire photovoltaïque»; Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 2007.
- [Had 05] **A. HADJ ARAB, M. BENGHANEM et A. GHARBI** «Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque »; Revue des Energies Renouvelables. Vol. 8 (2005) page 19 – 26
- [Idj 05] **K. IDJDARENE** «Analyse et contrôle d'une chaîne de conversion électrique par énergie éolienne»; Mémoire de Magister, Université de Bejaia, 2005.
- [Idj 10] **K. IDJDARENE** «Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes»; Thèse de Doctorat en électrotechnique ; Université de BEJAIA, Université Lille 1 (France) 2010.
- [Kou 02] **D.KOUSSA, M. ALEM et M. BELHAMEL** «Système hybride (éolien, solaire) pour l'alimentation électrique d'une charge à usage domestique» ; Revue des Energies Renouvelables, pp : 1-8, 2002.
- [Lal 09] **S. LALOUNI** «Etude, commande et simulation d'une chaîne hybride (photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie électrique»; Thèse de Doctorat en électrotechnique ; Université de Bejaia, 2009.
- [Lop 06] **M. LOPEZ** «Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée» ; Thèse de Doctorat, Université Pares-sus 11, 2006.
- [Lou 09] **A .LOUADAH** « Modélisation et commande d'un système de pompage

- photovoltaïque » ; Mémoire de master en électromécanique ; Université Abderrahmane Mira. Bejaia, 2009.
- [Man 08] **M.N. MANSOURI, N. GHANMI ET M.F. MIMOUNI** (Commande et analyse des performances d'une station de pompage photovoltaïque fonctionnant en régime optimal» Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°1 (2008) 1 – 17
- [Mao 05] **R.MAOUEDJ** «application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah» ; Mémoire de Magister en Physique ; Université de Tlemcen ; 2005.
- [Mau 08] **R. MAOUEDJ, S. BOUSALEM ET B. BENYOUCEF** «Optimisation d'un système de pompage éolien Application aux sites sahariens» ; Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°2 (2008) 239 – 250
- [Mef 12] **A. MEFLAH ET T. ALLAOUI** «Commande d'une chaîne de pompage photovoltaïque au fil du soleil» ; Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°3 (2012) 489 – 499
- [Meh 10] **A. MEHDAOUI, M. SADOK, S.A. CHIKHI ET A. MAMMERI** «Gain énergétique entre deux configurations de système de pompage d'eau photovoltaïque Application au site d'Adrar» Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°4 (2010) 571 – 582.
- [Mer 07] **F.MERRAHI** «Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne)» ; Mémoire de Magister en Automatique ; Ecole Nationale Polytechnique d'Alger ; 2007.
- [Mez 11] **L.MEZIANE, S.OUBELAID** «Etude d'un système de pompage alimenté par une source hybride (éolienne- photovoltaïque)» ; Mémoire de Master en Electrotechnique ; Université de BEJAIA, 2011.
- [Mir 05] **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.
- [Mou 99] **S.MOUSSA, A. KAABECHE et M.BELHAMEL** «Evaluation des performances d'un système hybride de production d'électricité – fourniture d'énergie électrique sans interruption au moyen d'un système hybride (solaire, éolien et diésel) totalement autonome» ; Revue des Energies Renouvelables, pp : 247-250, 1999.
- [Mou 04] **S. MOUSSA** « Production d'électricité au moyen d'un système hybride (éolien-photovoltaïque) » ; bulletin des Energies Renouvelables,N°5, pp : 9-10, 2004.
- [Sah 07] **D. SAHEB-KOUSSA, M.BELHAMEL et K. BENFARHAT**

- «Electrification d'un site isolés par un système hybride a sources d'énergie renouvelables»; Conférence international sur les énergies renouvelable ICRE 07, pp : 1-6, 2007.
- [Thi 07] **KY. Thierry, S. Maurice** « Système Photovoltaïque : Dimensionnement pour pompage d'eau, pour une irrigation goutte-à-goutte » ; Mémoire de DEA en Physique Appliquée ; université de OUAGADOUGOU, 2007.
- [Zar 10] **L. ZAROUR** « étude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau » ; Thèse de Doctorat en électrotechnique ; Université de Constantine, 2010.
- [Zid 11] **N.ZIDANE, L.MEZIANE** «Etude d'une installation photovoltaïque en vue d'un pompage solaire 6m3/jours»; Mémoire d'ingénieur d'état en Electrotechnique ; Université de OUAGADOUGOU, 2007.
- [Eht 13] <http://oooxygene.alwaysdata.net/eolienne.html>.
- [Epl 13] http://www.energieplus-lesite.be/energieplus/page_11530.htm.
- [ImS 13] <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11531>.
- [Ipv 13] <http://www.zoneindustrie.com/Entreprises/AxFlow/Pompes-a-engrenages-12866.html>.
- [Phot] <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16679>.
- [Eol 13] <http://tperama-energies-renouvelables.e-monsite.com/pages/types-d-eoliennes.html>
- [Wca 13] [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).
- [Wpc 13] [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/90/Pompe centrifuge.JPG](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/90/Pompe_centrifuge.JPG)
- [Wmc 13] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_%C3%A0_courant continu](http://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_%C3%A0_courant_continu).

ANNEXES

Annexe I

Tableau 1 : paramètres d'un panneau solaire SIEMENS SM 110-24 [Deb 09]

Paramètre	Valeurs
Puissance maximale du panneau P_{mpp} (W)	110
Courant au point de puissance maximale du panneau I_{mpp} (A)	3.15
Tension au point de puissance maximale du panneau V_{mpp} (V)	35
Courant de court-circuit I_{sc} (A)	3.45
Tension de circuit ouvert V_{oc} (V)	43.5
Coefficient d'incrémentation du courant α_{sc} (A/°C)	0.0014
Coefficient d'incrémentation de la tension β_{oc} (V/°C)	-0.152

Tableau 2 : paramètres de la turbine Savonius : [Deb 09]

Paramètre	Valeurs
Rayon de la voile	$R = 0.5\text{m}$
Hauteur de la voile	$H = 2\text{m}$
Surface active	$S = 2\text{m}^2$
Equation de la courbe caractéristique	$C_p(\lambda) = -.2121. \lambda^3 + 0.0856. \lambda^2 + 0.2539. \lambda$
Vitesse réduite optimale	$\lambda_{opt} = 0.78$
Coefficient de puissance optimale	$C_p^{max} = 0.15$
Inertie de la voile	$j = 16 \text{ kg.m}^2$
Masse volumique de l'aire	$\rho = 1.225 \text{ Kg/m}^3$

Annexe II

Tableau 3 : paramètres de la génératrice synchrone à aimant permanents. [Deb 09]

Paramètre	Valeurs
Tension nominale	$U_n = 90 \text{ V}$
Courant nominal	$I_n = 4.8 \text{ A}$
Puissance nominale	$P_n = 600 \text{ W}$
Nombre de paires de pôles	$P = 17$
Résistances des enroulements	$R_s = 1.137$
Inductance synchrone	$L_s = 2.7 \text{ mH}$
Flux efficace	$\Phi_{\text{eff}} = 0.15 \text{ Web}$
Coefficient de frottement	$F = 0.006 \text{ N.m.s/rad}$
Moment d'inertie	$j = 0.1 \text{ N.m}$

Tableau 4 : paramètre de moteur asynchrone [Idj 10]

- Rotor de type de cage d'écureuil.

Paramètre	Valeurs
Puissance nominale	$P_n = 5500 \text{ W}$
Résistance statorique	$R_s = 1.07131 \text{ } \Omega$
Résistance rotorique	$R_r = 1.29511 \text{ } \Omega$
Inductance statorique	$L_s = 8.9382 \text{ mH}$
Inductance rotorique	$L_r = 4.8613 \text{ mH}$
Nombre de pôle	$P = 4$
Inertie	$J = 0.230 \text{ N.m}$
Coefficient de frottement	$f = 0.0025 \text{ N.m.s/rad}$

Résumé :

Ce mémoire est un projet de fin d'étude pour l'obtention d'un diplôme de Master en électrotechnique, option énergies renouvelables, qui a pour objectif : l'étude d'un système de pompage hybride (photovoltaïque, éolien) ; pour arriver à ce stade, nous avons traité les deux parties photovoltaïque et éolienne pour la production d'énergie et le groupe motopompe ; La modélisation et la commande en MPPT pour l'extraction de la puissance maximale des différentes parties du système ont été élaborées suivies d'une validation sous l'environnement MATLAB/Simulink. Après une étude technico-économique, nous avons pu trouver la configuration du système hybride la plus économique en fonction de la fraction de charge (f) et enfin simulé le système global en appliquant différents profils (d'ensoleillement, vitesse de vent et de température).

Mots clés : Système hybride (photovoltaïque, éolien), commande MPPT, pompage, dimensionnement.

Abstract :

This memory is a project of end of study for obtaining a diploma of Master in electrical engineering, option renewable energies, which aims at: the study of a hybrid system of pumping (photovoltaic, wind); to arrive at this stage, we have treated the two parts photovoltaic and wind for the energy production and the motor-driven pump group; Modeling and the order in MPPT for the extraction of the maximum power of different parts of the system have been elaborated and followed by a validation under the MATLAB/Simulink environment. After a technico-economic study, we could find the system requirements hybrid most economic according to the fraction of load (F) and finally simulated the total system by applying different profiles (of sunning, speed of wind and temperature).

Key words: Hybrid system (photovoltaic, wind), order MPPT, pumping, dimensioning.