

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Bejaïa

Faculté de technologie
Département de génie électrique



Mémoire de Fin d'Etude

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

Spécialité : Commande électrique

Thème



Réalisé par :

M^r AFIR Soufiane

M^r SACI Massinissa

Encadré par :

M^{me} ABDELLI. R

Promotion 2018

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre promotrice Mme : R. ABDELLI, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

J'ai le plaisir de dédie ce modeste travail à Mes chers parents qui ont tout sacrifié pour moi et dont les mots sont insuffisants pour exprimer toute ma gratitude et mon profond amour, Je les remercie pour leur confiance et « que Dieu leurs accordent une très longue vie ».

Mes grands parents

Mes frères

Tous les membres de ma famille

Tous mes ami(e)s (hamza, akli, rosa, rougi vlotmix, lamine, younes, islem,...)

Enfin, à tous ceux de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, en guise de reconnaissance.

SACI.M

Dédicaces

J'ai le plaisir de dédie ce modeste travail à Mes chers parents qui ont tout sacrifié pour moi et dont les mots sont insuffisants pour exprimer toute ma gratitude et mon profond amour. Je les remercie pour leur confiance et « que Dieu leurs accordent une très longue vie ».

Mon frère

Ma sœur

Touts(es) mes cousins et mes cousines

Tous mes amis

Enfin, à tous ceux de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, en guise de reconnaissance.

AFIR.S

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Etat de l’art sur les systèmes de pompage photovoltaïque	
Introduction.....	2
I.1) Historique du photovoltaïque et état actuel.....	2
I.2) L’effet photovoltaïque.....	3
I.2.1) Définition et Principe de fonctionnement d’une cellule photovoltaïque.....	4
I.2.2) Constitutions d’une cellule photovoltaïque.....	4
I.2.3) Caractéristiques du fonctionnement d’une cellule photovoltaïque.....	5
I.2.3.1) Caractéristique courant – tension (I-V).....	5
I.2.3.2) Caractéristique puissance-tension (P-V).....	6
I.2.4) Les différents Types des cellules photovoltaïques.....	6
I.2.4.1) 1 ^{ère} génération à base de Silicium Cristallin.....	7
I.2.4.2) 2 ^{ème} génération à base de couche-mince.....	7
I.2.4.3) 3 ^{ème} génération «les cellules organiques ».....	7
I.2.5) Avantages et inconvénients du photovoltaïque.....	9
I.2.5.1) Avantages.....	9
I.2.5.2) Inconvénients.....	9
I.2.6) Structure générale d’une cellule photovoltaïque.....	9
I.2.7) Association des cellules photovoltaïques.....	11
I.2.7.1) Association série.....	11
I.2.7.2) Association parallèle.....	11
I.2.7.3) Association mixte.....	12
I.2.8) Module photovoltaïque.....	12
I.2.9) Générateur photovoltaïque.....	13
I.2.10) Les différents systèmes photovoltaïques.....	13
I.3) Les convertisseurs statiques.....	14
I.3.1) Les convertisseurs DC/DC.....	14

I.3.1.1) Hacheur dévolteur.....	14
I.3.1.2) Hacheur survolteur.....	15
I.3.2) Convertisseurs DC/AC.....	15
I.4) Moteurs d’entraînement.....	16
I.4.1) Moteur à courant continu.....	16
I.4.2) Moteurs à courant alternatif.....	16
I.4.2.1) Moteurs asynchrones.....	16
I.4.2.2) Moteurs synchrones.....	17
I.5) Pompes entraînées.....	17
I.5.1) Pompe centrifuge.....	18
I.5.2) Pompe volumétrique.....	18
I.6) Pompage photovoltaïque.....	19
I.6.1) Pompage avec stockage d’énergie hydraulique.....	19
I.6.2) Pompage avec stockage d’énergie électrique.....	20
I.6.3) Structure du système de pompage photovoltaïque à étudié.....	21
Conclusion.....	21

Chapitre II : Modélisation de la chaine de pompage photovoltaïque

Introduction.....	22
II.1) Modélisation du générateur photovoltaïque.....	22
II.1.1) Modèle électrique d’un générateur photovoltaïque.....	22
II.1.2) Effets des Variations Climatiques sur la Cellule Photovoltaïque.....	25
II.1.2.1) effets de l’irradiation.....	25
II.1.2.2) effets de la température.....	26
II.2) Modélisation du hacheur BOOST.....	26
II.3) Modélisation de l’onduleur de tension à MLI.....	27
II.4) Modélisation du moteur asynchrone.....	29
II.5) Modélisation de la pompe centrifuge.....	33

Conclusion.....	34
Chapitre III : Dimensionnement et contrôle du système de pompage photovoltaïque	
Introduction.....	35
III.1) Les étapes de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque.....	35
III.1.1) Evaluation des besoins en eau.....	35
III.1.2) Calcul de la puissance hydraulique nécessaire.....	36
III.1.3) Détermination de l'énergie solaire disponible.....	37
III.1.3.1) positionnement optimal des capteurs photovoltaïque.....	37
III.1.3.2) Mois de dimensionnement.....	38
III.1.4) Choix des composants de l'installation.....	38
III.1.4.1) dimensionnement de la pompe centrifuge.....	38
III.1.4.2) dimensionnement du champ photovoltaïque.....	39
III.2) Contrôle du système de pompage photovoltaïque.....	40
III.2.1) Commande MPPT.....	40
III.2.1.1) Algorithme Perturbation et Observation (P&O).....	41
III.2.2) commande de l'onduleur.....	44
III.2.2.1) Contrôle des courants par régulateurs à hystérésis.....	44
III.2.3) Commande de la machine asynchrone.....	45
III.2.3.1) Commande vectorielle.....	45
III.2.3.1.1) Commande vectorielle directe.....	45
III.2.3.1.2) Commande vectorielle indirecte.....	46
III.2.3.2) Commande vectorielle par orientation du flux rotorique.....	46
III.2.3.2.1) Conception des régulateurs.....	48
III.2.3.2.2) Caractéristiques des régulateurs.....	49
III.2.3.2.3) Régulateur de vitesse.....	49
III.2.3.2.4) Régulateurs de flux ϕ_r	50

III.2.3.3) Commande par mode glissant.....	51
III.2.3.3.1) Principe de la commande par mode glissant.....	51
III.2.3.3.2) Principe de l’algorithme de commande par mode de glissement.....	52
III.2.3.3.3) Application de la commande à la MAS.....	54
III.2.3.3.4) Les avantages et les inconvénients de la commande par mode glissant...	55
Conclusion.....	56

Chapitre IV : Simulation de la chaine de pompage photovoltaïque

Introduction.....	57
IV.1) Résultats de la simulation du système de pompage photovoltaïque.....	57
IV.1.1) contrôle par PI classique.....	59
IV.1.2) contrôle par mode glissant.....	62
IV.2) Interprétation des résultats.....	65
IV.3) Teste de robustesse.....	66
Conclusion.....	66
Conclusion générale.....	67

BIBLIOGRAPHIE

Annexes

Liste des figures

Liste des figures

Figure	Intitulé	Page
I.1	Conversion de l'énergie solaire en électricité	3
I.2	Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	4
I.3	Structure basique d'une cellule solaire	5
I.4	Caractéristique courant – tension d'une cellule photovoltaïque	5
I.5	Caractéristique puissance-tension d'une cellule photovoltaïque	6
I.6	Structure équivalente d'une cellule PV	9
I.7	Modèle équivalent d'une cellule idéale	11
I.8	(a) Schéma d'un module formé d'un groupement des cellules en série (b) Caractéristique I (v) d'un groupement des cellules en série	11
I.9	(c) Schéma d'un module formé d'un groupement des cellules en parallèle (d) Caractéristique I (v) d'un groupement des cellules en parallèle	12
I.10	Groupement mixte de cellules PV	12
I.11	Module photovoltaïque	13
I.12	Générateur photovoltaïque	13
I.13	Hacheur dévolteur	14
I.14	Hacheur survolteur	15
I.15	Circuit de l'onduleur connecté à une MAS	15
I.16	Moteur à courant continu avec balais	16
I.17	Moteur asynchrone a cage d'écureuil	17
I.18	Moteur synchrone	17
I.19	Classification des pompes	18
I.20	Vue éclatée d'une pompe centrifuge	18
I.21	Pompe volumétrique	19
I.22	Pompage photovoltaïque au fil du soleil	20
I.23	Pompage photovoltaïque avec batterie	20
I.24	Structure du système de pompage photovoltaïque à étudié	21
II.1	Modèle d'un générateur photovoltaïque à une diode	22
II.2	Caractéristique courant –tension et puissance –tension du module photovoltaïque conçu avec variation d'éclairement	25
II.3	Caractéristique puissance –tension et courant –tension du module conçu photovoltaïque avec variation de température	26
II.4	Montage BOOST	26
II.5	Circuit électrique de l'onduleur	28
II.6	Passage du triphasé vers le biphasé	32
III.1	Irradiation globale moyenne mensuelle journalière sur plan horizontal du site de Bejaia du 2013 au 2016	37
III.2	Signe de dP/dV à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance	41
III.3	Organigramme de l'algorithme MPPT par la méthode P&O	42
III.4	Divergence de la méthode P&O	43
III.5	Illustration de la bande de courant à hystérésis	44
III.6	Principe du contrôle vectoriel	47
III.7	Structure générale de la commande par PI	48
III.8	Schéma bloc de la régulation de vitesse	49
III.9	Schéma bloc de la régulation de flux	50
III.10	Différents modes de trajectoire	52
III.11	Phénomène de broutement	56
IV.1	Schéma global de la chaine de pompage photovoltaïque étudiée	57

Liste des figures

IV.2	Profil d'ensoleillement	58
IV.3	Profil de la température	58
IV.4	Allure de la puissance	59
IV.5	Evolution de la Vitesse	59
IV.6	Allure des courants statoriques	60
IV.7	ZOOM sur les courants statoriques	60
IV.8	Allure du Couple électromagnétique/Couple résistant	61
IV.9	Evolution du flux	61
IV.10	Evolution du débit	62
IV.11	Evolution de la Vitesse	62
IV.12	Allure des Courants statoriques	63
IV.13	Zoom sur les Courants statoriques	63
IV.14	Allure du Couple électromagnétique/Couple résistant	64
IV.15	Evolution du flux	64
IV.16	Evolution du débit	65
IV.17	Evolution de la vitesse de rotation en mode glissant	66
IV.18	Evolution de la vitesse de rotation en mode PI	66

*Liste des
tableaux*

Liste des tableaux

tableau	Intitulé	Page
I.1	Tableau récapitulatif des différents types des cellules PV	8
III.1	Inclinaison/orientation et taux de productivité optimum des PV	38
III.2	Résumé de l'algorithme P&O	42

*Liste des
symboles*

Nomenclature

- ❖ I_{mpp} : courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum (A).
- ❖ I_{ph} : photo courant ou courant généré par l'éclairement (A).
- ❖ I_{od} : courant de saturation de la diode (A).
- ❖ R_s : résistance série (Ω).
- ❖ R_p : résistance shunt (parallèle) (Ω).
- ❖ k : constante de Boltzmann ($k= 1,38.10^{-23}$ (SI)).
- ❖ q : charge de l'électron ($q= 1,62.10^{-19}$ C).
- ❖ T_j : température de la cellule ($^{\circ}C$).
- ❖ I_{ph} : représente le photo- courant, il dépend de l'irradiation et de la température (A).
- ❖ I_d : courant de polarisation de la jonction PN (A).
- ❖ V_{mpp} : tension au point de puissance maximale appelé aussi tension optimal (V).
- ❖ V_{co} : tension en circuit ouvert (V).
- ❖ MPP: point de puissance maximum (maximum power point).
- ❖ G_{stc} et G : représentent respectivement, le niveau d'ensoleillement dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques (W/m^2).
- ❖ T_{stc} , T_c : représentent respectivement, la température dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques ($^{\circ}C$).
- ❖ ΔI_{pv} : représentent la variation du courant par rapport à l'ensoleillement et à la température (A).
- ❖ ΔV_{pv} : représentent la variation de la tension par rapport à l'ensoleillement et à la température (V).
- ❖ α_{cc} : représentent un coefficient d'incrémentatation du courant I_{cc} quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ($A/^{\circ}C$) (sous les conditions standards de fonctionnement).
- ❖ β_{oc} : représentent un coefficient d'incrémentatation de la tension V_{co} quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ($V/^{\circ}C$) (sous les conditions standards de fonctionnement).
- ❖ E_g : la bande d'énergie du semi-conducteur.
- ❖ N_s et N_p : sont respectivement, le nombre de cellules en série et le nombre de cellules en parallèle.
- ❖ V_a, V_b, V_c : Tensions à la sortie de l'onduleur (V).
- ❖ V_{an}, V_{bn} et 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 fictif «O» (V).
- ❖ V_{ao}, V_{bo}, V_{co} : Tensions à l'entrée de l'onduleur (V).
- ❖ T_d : est la période de découplage.
- ❖ K_i : Sont des interrupteurs.
- ❖ ID_c : Le courant modulé par l'onduleur.
- ❖ V_{Dc} : La tension modulée par l'onduleur.
- ❖ S_1, S_2 et S_3 : Sont des fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur pour un seul bras.
- ❖ MAS : Machine asynchrone.
- ❖ P : le nombre de paires de pôles.
- ❖ w : Vitesse du moteur asynchrone (rad/s).
- ❖ w_r : Vitesse de rotation de la machine asynchrone (rad/s).
- ❖ R_r : Résistance d'une phase rotorique (Ohm).
- ❖ R_s : Résistance d'une phase statorique (Ohm).
- ❖ L_r : Inductance propre d'une phase rotorique.
- ❖ L_s : Inductance propre d'une phase statorique.
- ❖ M : Inductance mutuelle entre stator et rotor (H).
- ❖ I_{ra}, I_{rb}, I_{rc} : Courants rotorique (A).
- ❖ I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} : Courants statorique (A).
- ❖ I_{rd}, I_{rq} : Courants rotorique dans le repère de Park (d, q) (A).
- ❖ I_{sd}, I_{sq} : Courants statorique dans le repère de Park (d, q) (A).
- ❖ J : Moment d'inertie (kg.m^2).
- ❖ C_e : Couple électromagnétique (N.m).
- ❖ C_r : Couple résistant (N.m).
- ❖ V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Tension d'alimentation des enroulements statorique (a, b, c) (V).
- ❖ V_{rd}, V_{rq} : Tensions rotorique dans le repère de Park (d, q) (V).
- ❖ V_{sd}, V_{sq} : Tensions statorique dans le repère de Park (d, q) (V).
- ❖ $[I_{rabc}]$: Vecteurs des courants rotoriques.
- ❖ $[I_{rdqo}]$: Vecteurs des courants rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère de Park.
- ❖ $[I_{sabc}]$: Vecteurs des courants statoriques.
- ❖ $[I_{sdqo}]$: Vecteurs des courants statoriques dans les axes (d, q, o) du repère de Park.
- ❖ $[R_r]$: Vecteurs des résistances rotoriques.
- ❖ $[R_s]$: Vecteurs des résistances statoriques.
- ❖ $[V_{rdqo}]$: Vecteurs des tensions rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère de Park.
- ❖ $[V_{sabc}]$: Vecteurs des tensions statoriques.

- ❖ $[V_{sdqo}]$: Vecteurs des tensions statoriques dans les axes (d, q, o) du repère de Park.
- ❖ $[\varphi_{rabc}]$: Vecteurs des flux rotoriques.
- ❖ $[\varphi_{rdqo}]$: Vecteurs des flux rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère de Park.
- ❖ $[\varphi_{sdqo}]$: Vecteurs des flux statoriques dans les axes (d, q, o) du repère de Park.
- ❖ $[\varphi_{sabc}]$: Vecteurs des flux statoriques.
- ❖ β : L'angle entre les enroulements et l'axe direct d (rad).
- ❖ θ : Angle électrique de position de la machine (rad).
- ❖ θ_r : Angle relatif entre la première phase rotorique de la machine et l'axe direct (d) du repère de Parck.
- ❖ θ_s : Angle relatif entre la première phase statorique de la machine et l'axe direct (d) du repère de Parck.
- ❖ P_n : puissance nominale du moteur asynchrone (W).
- ❖ I_n : Courant nominal du moteur asynchrone (A).
- ❖ ω_n : vitesse nominale du moteur asynchrone (rad/s).
- ❖ I_{as}, I_{bs} et I_{cs} : sont des courants statoriques de la machine (A).
- ❖ φ_{SO} : le vecteur flux à l'instant $t=0$ (Wb).
- ❖ $\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$: Flux statorique direct et quadratique (Wb).
- ❖ $\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$: Flux rotorique direct et quadratique (Wb).

- ❖ η_m : le rendement du moteur.
- ❖ η_p : Temps de pompage.
- ❖ R_p : le rendement de la pompe.
- ❖ Q : Débit journalier (m^3 / jour).
- ❖ HMT : Hauteur manométrique (m).
- ❖ g : Constante de gravité (9.81 m/s-1).
- ❖ ρ : La densité de l'eau ($1000kg/m^3$).
- ❖ K_p : un coefficient de proportionnalité $[(Nm/ rad.s^{-1})^2]$
- ❖ P_{hyd} : puissance hydraulique (W).
- ❖ P_{mec} : puissance mécanique (W).

- ❖ $E_{éle}$: énergie électrique requise par la pompe exprimée en [KWh].
- ❖ E_H : énergie hydraulique (Wh/jour) .
- ❖ C_H : La constante hydraulique.
- ❖ i_i : représentent les courants des phases statoriques (i_a, i_b, i_c).

- ❖ $i_{i\ ref}$: représentent les courants de référence issus des circuits de commandes de trois bras de l'onduleur.
- ❖ T_r : La constante de temps rotorique.
- ❖ S : La variable de la transformée de Laplace.
- ❖ ξ : Amortissement du système ou facteur d'amortissement.
- ❖ PI : proportionnel intégral.
- ❖ $[X]$: est le vecteur d'état.
- ❖ $[U]$: est le vecteur de commande.
- ❖ λ : Constante positive.
- ❖ $e(x)$: L'écart entre la variable à réguler et sa référence.
- ❖ r : Degré relatif, c'est le nombre de fois qu'il faut dériver la surface pour faire apparaitre la commande.
- ❖ U_d : est la commande discontinue.
- ❖ K est une constante positive.

*Introduction
générale*

Introduction générale

En Algérie, malgré les immenses projets réalisés par la SONELGAZ pour couvrir et satisfaire le territoire national en l'électricité, plusieurs régions restent non connectées au réseau public d'électricité et le problème d'isolement persiste. Ce qui a poussé à investir dans le domaine des énergies renouvelables, particulièrement dans l'énergie solaire vue que notre pays la dispose avec abondance. Cela afin de combler ce déficit et répondre ainsi aux besoins du consommateur dans les régions isolées.

Cette énergie solaire est captée, ensuite transformée en électricité grâce à une technologie connue sous le nom de photovoltaïque, qui consiste à mettre en exposition au soleil des panneaux qui captent le rayonnement solaire et le transforment ainsi en une énergie électrique prête pour la consommation.

Parmi les grandes applications de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque, le pompage photovoltaïque, (pompage au fil du soleil et pompage avec batteries) qui est devenu une solution prometteuse pour soulever le problème majeur dont la majorité des agriculteurs souffrent quotidiennement dans les régions isolées et montagneuses en pompant de l'eau pour irriguer leurs plantations.

Dans notre étude on abordera la problématique d'approvisionnement d'eau par pompage solaire avec stockage hydraulique pour l'irrigation d'un champ d'orangers dans une petite ferme situé au site de Bejaia.

Pour ce faire, notre travail est divisé en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous allons décrire et mettre en évidence les différents composants constituant une chaîne de pompage photovoltaïque (générateur photovoltaïque, hacheur, onduleur, moteur asynchrone, pompe centrifuge) qui feront l'objet de la modélisation dans le second chapitre dont nous allons établir pour chaque composant du système complexe un modèle simplifié. Le troisième chapitre est consacré pour le dimensionnement de notre système de pompage ainsi qu'au contrôle de ce dernier où nous allons élaborer deux stratégies de commande ; la première s'agit du contrôle vectoriel à base de PI classique, la seconde est la commande par mode glissant qui est employée afin d'améliorer les performances du système de pompage. Le quatrième chapitre portera les résultats de la simulation de notre système de pompage, enfin on clôturera par une conclusion générale où on récapitulera le travail présenté.

Chapitre I

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

Introduction

Dans nos jours, la demande en eau est de plus en plus importante. Le problème se multiplie en particulier dans les zones rurales et les sites isolés où l'accès à l'énergie classique est difficile. Ce phénomène a fait qu'un intérêt grandissant est porté sur l'utilisation des générateurs photovoltaïque comme nouvelle source d'énergie. La réalisation d'un système de pompage photovoltaïque autonome, fiable et à bon rendement, constitue une solution pratique et économique au problème du manque d'eau, en particulier dans les régions désertique. En effet, un système photovoltaïque devient intéressant lorsqu'il est facile à installer avec une autonomie acceptable et une excellente fiabilité de service [1].

Dans ce chapitre nous allons présenter et définir les éléments basiques qui constituent une station de pompage photovoltaïque.

I.1) Historique du photovoltaïque et état actuel

En plaçant deux électrodes métalliques dans un liquide conducteur et en exposant l'ensemble au rayonnement solaire, on peut mesurer une faible tension. C'est ainsi que fut découvert l'effet photovoltaïque en 1839 par le physicien français Antoine BECQUEREL. Ce fut donc la première fois que l'énergie solaire fut transformée en énergie électrique. Dans les années 1880, l'américain Charles FRITTS mit au point les premières cellules solaires au sélénium. Les investigations sur le silicium, les tentatives pour l'isoler, le purifier, mettre en œuvre ses propriétés physiques, commencèrent avant 1910. Einstein en expliqua les mécanismes en 1912, mais ce n'est qu'entre 1930 et 1945 qu'un premier procédé industriel de purification par refroidissement progressif du silicium fondu fut mis au point.

En 1954, deux chercheurs des laboratoires américains Bell, Darryl Chapin et Carl Fuller, annoncèrent au public que des cellules solaires à base de silicium avaient été obtenues avec un rendement de 6%. Bien que ces deux scientifiques arrivèrent par la suite à fabriquer en laboratoire des cellules à 15% de rendement, ils rencontrèrent des obstacles économiques et les laboratoires Bell abandonnèrent leurs efforts de recherche pour diminuer les coûts de fabrication [2].

L'énergie photovoltaïque eut un regain d'intérêt dans les années 1950 lors des premiers lancements spatiaux de satellites (Vanguard I, 1958). Les crises économiques des années 1970 (flambée des prix du pétrole, 1973) puis les accidents de centrales nucléaires tels ceux de Three Mile Island (USA, 1979) ou de Tchernobyl (URSS, 1986) renforcèrent l'intérêt envers

les énergies renouvelables, en particulier l'énergie photovoltaïque qui s'impose comme une des sources d'énergies renouvelables les plus prometteuses.

Actuellement, on peut citer quelques-uns des nouveaux axes de recherches dans le domaine de l'énergie photovoltaïque tels que :

- L'utilisation des nanotubes de carbone pour un meilleur rendement.
- Le recours à de nouveaux nanomatériaux pour une meilleure absorption des rayons du soleil.
- La fabrication de cellules solaire flexibles [3].

I.2) L'effet photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le signe « PV », a été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800.

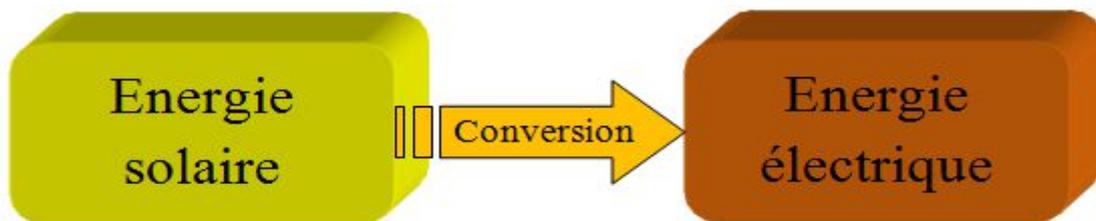


Figure I.1 : conversion de l'énergie solaire en électricité.

L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité.

Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable [4].

- Dans un **isolant électrique** : les électrons de la matière sont liés aux atomes et ne peuvent pas se déplacer.
- Dans un **conducteur électrique** (un fil de cuivre par exemple) les électrons sont totalement libres de circuler et permettent le passage d'un courant.
- Dans un **semi-conducteur** : la situation est intermédiaire, les électrons contenus dans la matière ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes. Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, ces photons

apportent une énergie permettant aux électrons de se déplacer, ce qui signifie la présence d'un courant électrique sous l'exposition à la lumière [4].

I.2.1) Définition et Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La cellule solaire ou photopile est un semi-conducteur sensible à la lumière, pour l'obtenir il faut réaliser une structure de diode, c'est-à-dire réaliser une jonction du type P-N [5]. Une cellule photovoltaïque est conçue en se basant sur le phénomène physique appelé « effet Photovoltaïque ». Elle est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel [6]. Une force électromotrice apparaît lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. En traversant la cellule photovoltaïque, les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium, et avec un contact électrique, les électrons se déplacent dans le circuit et génèrent un courant électrique.

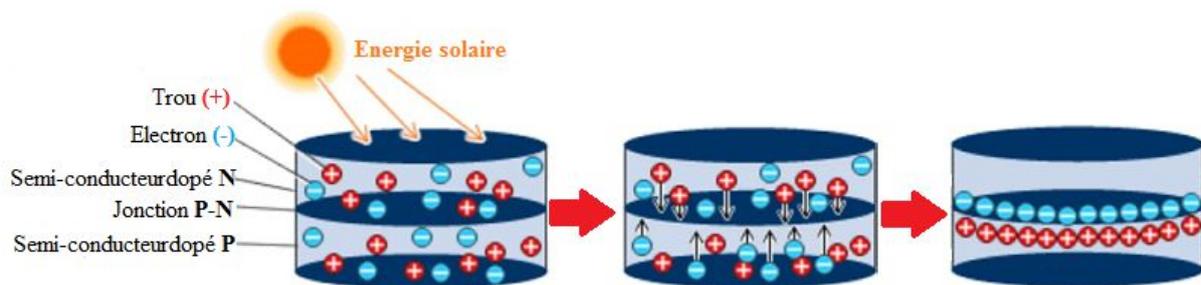


Figure I.2 : Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque [WEB3].

La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé, sa disposition, température de la cellule ainsi que le vieillissement de la cellule [6].

I.2.2) Constitutions d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est essentiellement constituée :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle d'une barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.

- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode [5].
- ❖ Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement [7], la figure ci-dessous illustre la structure basique d'une cellule solaire.

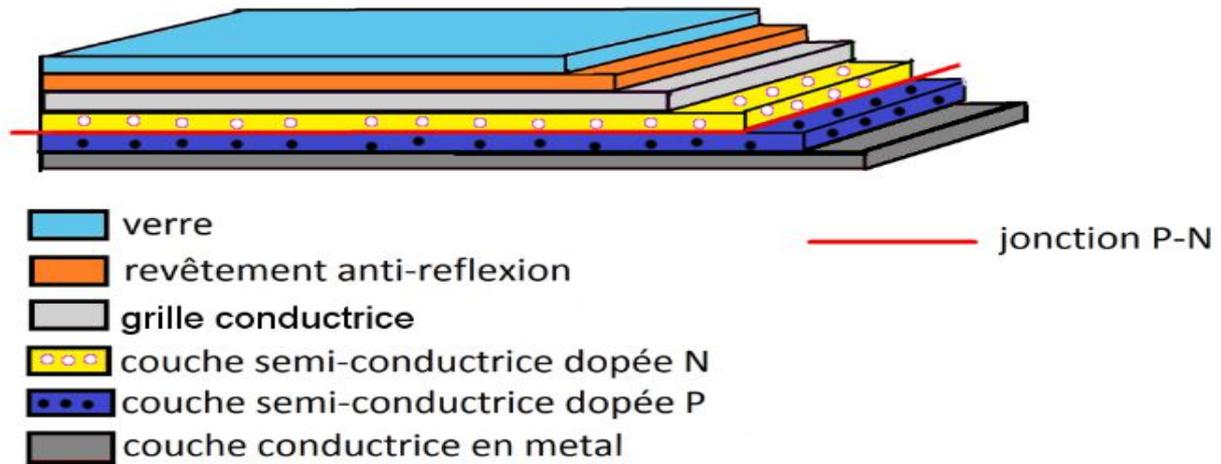


Figure I.3 : Structure basique d'une cellule solaire [WEB3].

I.2.3) Caractéristiques du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est une diode à jonction PN particulière. Dans l'obscurité, elle se comporte comme une photodiode dont le fonctionnement nécessite une alimentation, et sa caractéristique est identique à celle d'une diode. Une fois exposée à la lumière elle joue le rôle d'un générateur de courant continu (DC) [8]. De façon générale, le quadrant où se trouve la zone de puissance utile est utilisé de façon inversée pour y faciliter la lecture du comportement des générateurs photovoltaïques en fonctionnement normal [9].

I.2.3.1) Caractéristique courant – tension (I-V)

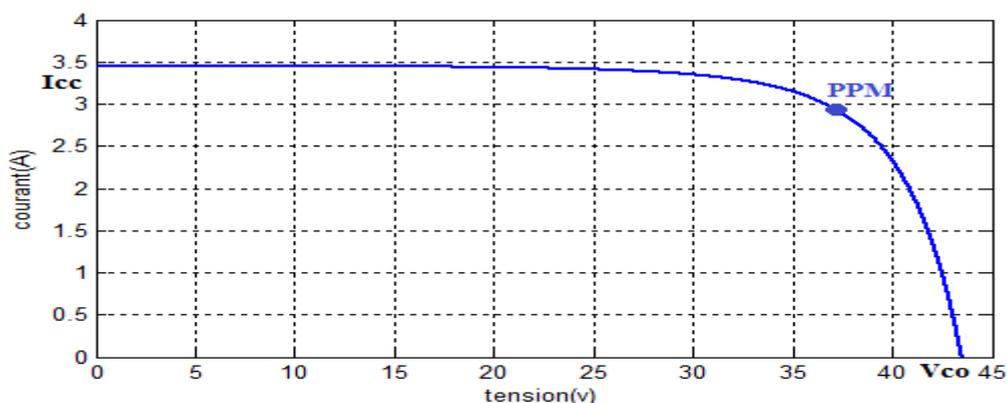


Figure I.4 : Caractéristique courant – tension d'une cellule photovoltaïque.

Comme nous le voyons sur la figure I.4, la cellule solaire PV est caractérisée par la courbe $I(V)$ non linéaire qui dépend particulièrement des conditions d'ensoleillement et de température. Cette courbe nous informe sur trois points importants [6]:

- ❖ Le point de fonctionnement optimal PPM (la puissance maximale de la cellule).
- ❖ Le point du courant maximal (I_{cc}). Il se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. Il est appelé courant de court-circuit (I_{cc}).
- ❖ Le point de la tension maximale de la cellule (V_{co}), (environ 43,5 V) pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert ou tension à vide (V_{co}).

I.2.3.2) Caractéristique puissance-tension (P-V)

La puissance crête d'une cellule PV, notée W_c (Watt crête) ou W_p (Watt peak) représente la puissance électrique maximum délivrée dans les conditions suivantes dites conditions standard [6] :

- ❖ éclairement solaire de $1 \text{ kW} / \text{m}^2$;
- ❖ température de la cellule PV égale à $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

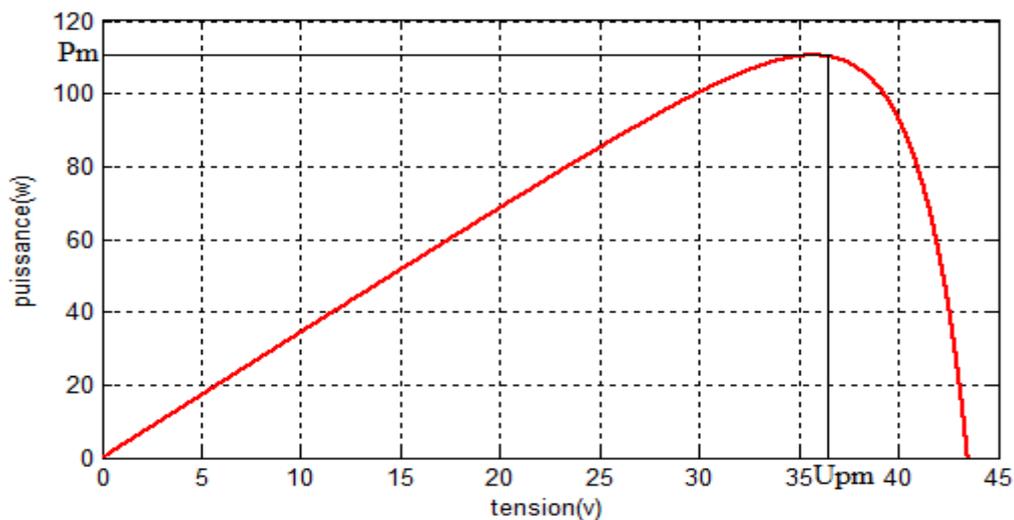


Figure 1.5 : Caractéristique puissance-tension d'une cellule photovoltaïque.

I.2.4) Les différents Types des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules photovoltaïques, et chaque type possède un rendement et un coût qui lui est approprié. Cependant, quel que soit leurs type, leurs rendements reste assez faible : de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. Il existe trois générations principales à l'heure actuelle qui sont [10] :

I.2.4.1) 1^{ère} génération à base de Silicium Cristallin

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction P-N qui utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. La méthode de production basée sur les wafers de silicium est très énergivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium d'une grande pureté. On différencie également les cellules à base de silicium monocristallin et poly cristallin [11].

I.2.4.2) 2^{ème} génération à base de couche-mince

Plus récemment sont apparues les technologies de couches minces, plus fines et dont la part du marché semble promise à une augmentation rapide. Les cellules dites couche mince (Thin-film) constituent ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin relativement épaisses. On distingue plusieurs types de cellules couche minces à savoir :

- ❖ le silicium amorphe (a-si).
- ❖ le tellure de Cadmium (CdTe).
- ❖ le cuivre/indium/sélénium ou cuivre/indium/Gallium/sélénium (CIS ou CIGS) [12].

I.2.4.3) 3^{ème} génération «les cellules organiques»

Elles sont constituées de molécules organiques. Il y a trois types de ces cellules: les moléculaires, celles en polymères et les organiques hybrides. Ces technologies sont encore au stade de la recherche et de développement [11].

Les types cités précédemment sont récapitulés dans le tableau suivant :

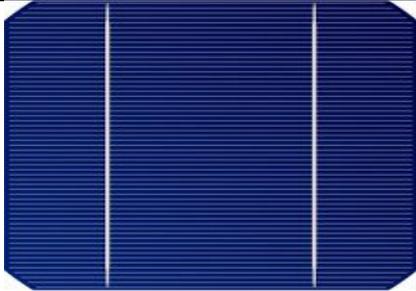
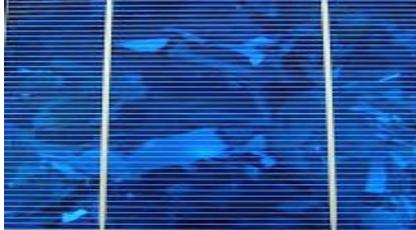
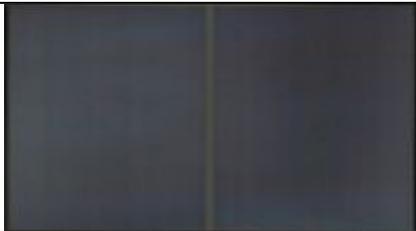
Type de cellule	Rendement	Avantages	Inconvénients	Illustration
Silicium monocristallin	13-17 %	Bon rendement pour une cellule.	Coût de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication	
Silicium polycristallin	11-15%	Bon rendement pour un module	Coût de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication	
Silicium amorphe.	5-6 %	Facile à fabriquer	Mauvais rendement	
CdTe	7-11%	Absorbe 90% des photons incidents	Cadmium très polluant	
CIGS	20%	Energie de gap ajustable 99% des photons absorbés	Manque de matière première	
Cellules organiques	5%	Faible coût de fabrication flexible	Rendement encore trop bas	

Tableau I.1 : tableau récapitulatif des différents types des cellules PV [14].

I.2.5) Avantages et inconvénients du photovoltaïque

I.2.5.1) Avantages [13]

- Le combustible est gratuit (le rayonnement solaire).
- Entretien minimal.
- Génère l'énergie requise.
- Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.
- Aucun bruit.
- Non polluant.
- L'extension des systèmes est facile.

I.2.5.2) Inconvénients [14]

- Le coût actuel de la technologie PV est beaucoup plus élevé que celui de l'énergie traditionnelle.
- Ils sont dépendants des conditions météorologiques.
- Ils ne conviennent pas aux utilisations à forte consommation.

I.2.6) Structure générale d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode.

Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances R_s et R_p comme le montre le schéma équivalent de la figure suivante [15]:

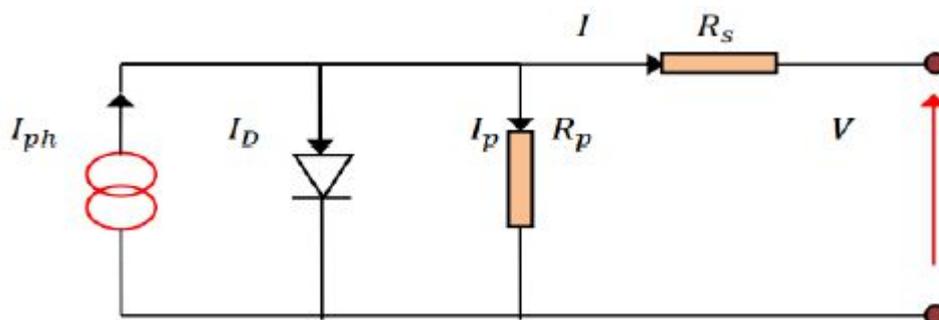


Figure 1.6 : Structure équivalente d'une cellule PV [16].

La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et

de la résistivité de ces grilles. La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction [16].

Le courant I issu de la cellule s'écrit alors :

$$I = I_{ph} - I_{od} \left[e^{\frac{q(V+R_s I)}{K.T_j}} - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (I.1)$$

$$I_D = I_{od} \left[e^{\frac{q(V+R_s I)}{K.T_j}} - 1 \right] \quad (I.2)$$

Tel que :

- I_{ph} : photo courant ou courant généré par l'éclairement (A).
- I_{od} : courant de saturation de la diode (A).
- R_s : résistance série (Ω).
- R_p : résistance shunt (Ω).
- k : constante de Boltzmann ($k= 1,38.10^{-23}$ (SI)).
- q : charge de l'électron ($q= 1,62.10^{-19}$ C).
- T_j : température de la cellule ($^{\circ}\text{C}$).

Dans le cas idéale, la résistance série R_s qui modélise les pertes ohmiques du matériau ainsi que le courant I seront négligés devant la tension V ; d'où le courant issu de la cellule peut s'écrire de la façon suivante [16] :

$$I = I_{ph} - I_{od} \left[e^{\frac{q(V+R_s I)}{K.T_j}} - 1 \right] - \frac{V}{R_p} \quad (I.3)$$

Vu que la valeur de la résistance R_p mise en parallèle est fortement élevée que la résistance mise en série R_s , le courant I peut s'écrire de la manière suivante :

$$I = I_{ph} - I_{od} \left[e^{\frac{q(V+R_s I)}{K.T_j}} - 1 \right] \quad (I.4)$$

La figure (I.17) illustre le modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.

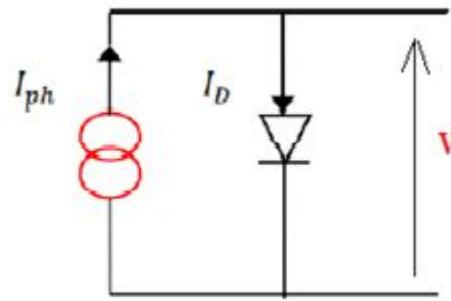


Figure I.7 : modèle équivalent d'une cellule idéale [16].

I.2.7) Association des cellules photovoltaïques

Pour concevoir un module photovoltaïque il est nécessaire d'associer plusieurs cellules photovoltaïques, pour ce fait on distingue les types suivants :

I.2.7.1) Association série

Dans cette association les tensions des cellules associées s'additionnent, ce qui résulte l'augmentation de la tension totale du générateur à courant constant [15].

La figure suivante illustre le groupement des cellules en série.

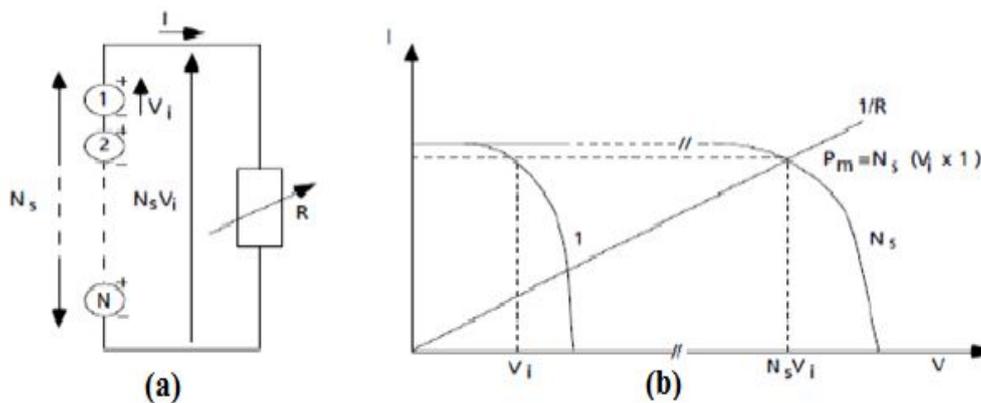


Figure I.8: (a) Schéma d'un module formé d'un groupement des cellules en série.

(b) Caractéristique $I(v)$ d'un groupement des cellules en série. [5]

I.2.7.2) Association parallèle

Dans cette association les courants issus des cellules associées s'additionnent, ce qui résulte l'augmentation du courant totale émis par le générateur [15] :

La figure suivante illustre le groupement des cellules en parallèle.

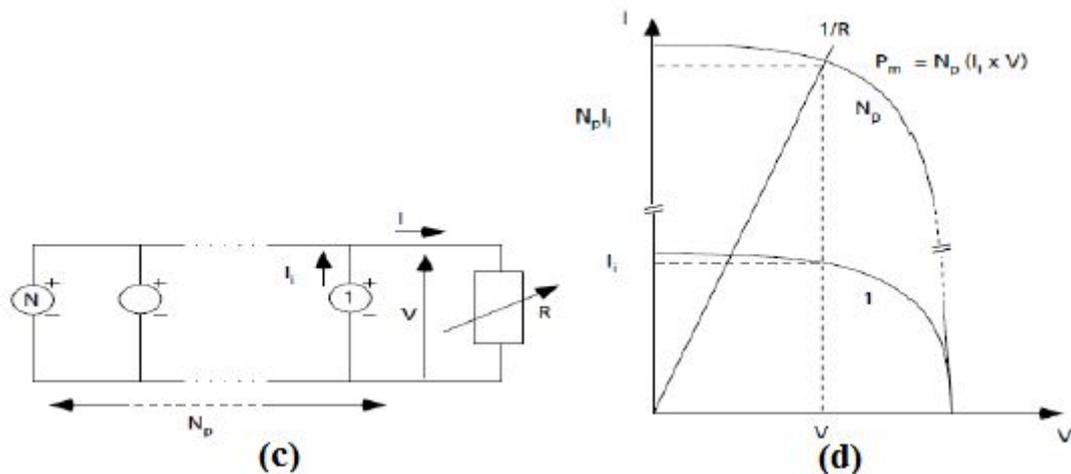


Figure I.9: (c) Schéma d'un module formé d'un groupement des cellules en parallèle

(d) Caractéristique $I (v)$ d'un groupement des cellules en parallèle [5].

I.2.7.3) Association mixte

Pour atteindre une puissance importante, il faut associer plusieurs cellules en série et en parallèle [15].

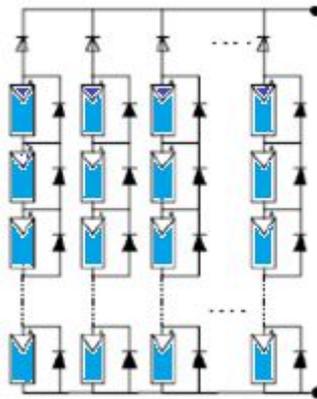


Figure I.10: Groupement mixte de cellules PV [3].

I.2.8) Module photovoltaïque

L'association mixte de plusieurs cellules photovoltaïque forme un module photovoltaïque connu sous le nom: panneau solaire.

Le module est généralement entouré d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation [17]. A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant 2 diodes antiparallèles. Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module exposé au soleil ne se décharge dans un autre module situé à l'ombre [18].



Figure I.11 : Module photovoltaïque [17].

I.2.9) Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est conçu suite à l'interconnexion de plusieurs modules, en série ou en parallèle, permettant ainsi d'obtenir une puissance intéressante.

La figure suivante montre la constitution basique d'un générateur photovoltaïque [17].

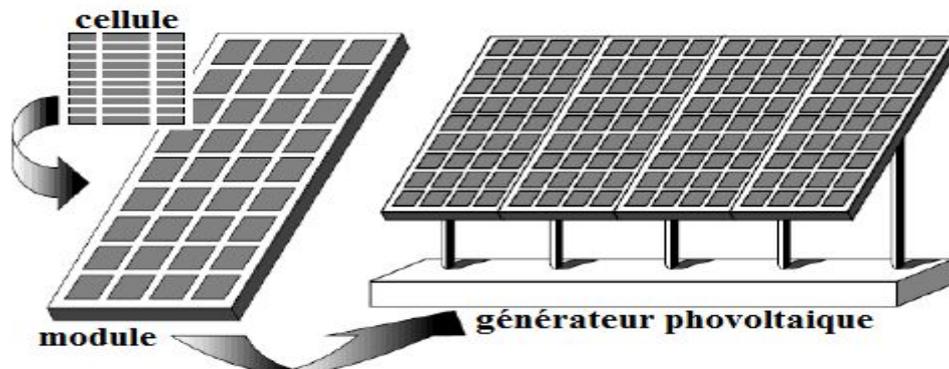


Figure I.12 : générateur photovoltaïque [17].

I.2.10) Les différents systèmes photovoltaïques [18]

Les systèmes photovoltaïques peuvent être divisés en trois catégories : autonome, systèmes hybrides et raccordé au réseau. Pour les endroits isolés du système de production d'électricité conventionnel, des systèmes autonomes d'alimentation en énergie photovoltaïque ont été considérés comme une meilleure alternative.

I.3) Les convertisseurs statiques

Pour répondre aux besoins d'électricité chez le consommateur, l'électronique de puissance a mis sous notre disposition des convertisseurs statiques afin de réguler et contrôler le courant et la tension selon notre désir.

I.3.1) Les convertisseurs DC/DC [19]

Les convertisseurs statiques du type DC/DC se divisent généralement en deux catégories : abaisseur de tension (Hacheur dévolteur), élévateur de tension (Hacheur survolteur).

L'impédance d'entrée d'un convertisseur statique du type DC/DC doit être adaptée afin de forcer le générateur photovoltaïque à travailler au point de puissance maximale. Ce convertisseur peut fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. En fonction des caractéristiques de la charge, la tension de sortie (V_s) peut être supérieure ou inférieure à la tension d'alimentation (V_o).

I.3.1.1) Hacheur dévolteur [19]

Ce type de convertisseur est généralement utilisé dans les applications photovoltaïques comme une alimentation DC ou V_s varie en fonction de l'ensoleillement et la température alors que V_o reste presque constante. La figure (I.14) représente le circuit de base d'un hacheur dévolteur ou le commutateur connecte et déconnecte l'entrée du circuit et ainsi une tension de forme rectangulaire va apparaître au niveau de la diode. Cette tension est filtrée par un filtre passe bas (LC) en fournissant une tension quasi continue en sortie du circuit.

La valeur moyenne de la tension de sortie est ajustée en contrôlant les états ON et OFF (ton et toff) du commutateur.

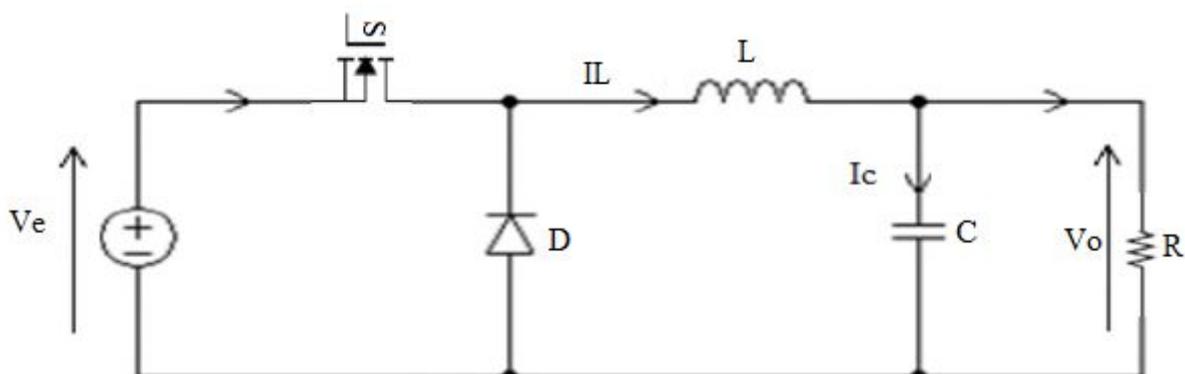


Figure I.13 : Hacheur dévolteur.

I.3.1.2) Hacheur survolteur [19]

Le hacheur élévateur ou survolteur est généralement utilisé dans les applications photovoltaïques spécialement pour la charge des batteries. La figure (I.14) représente le circuit de base d'un élévateur ayant les mêmes composants que l'abaisseur de tension avec une disposition différente. Les états de commutations sont contrôlés avec une période constante et un rapport cyclique variable.

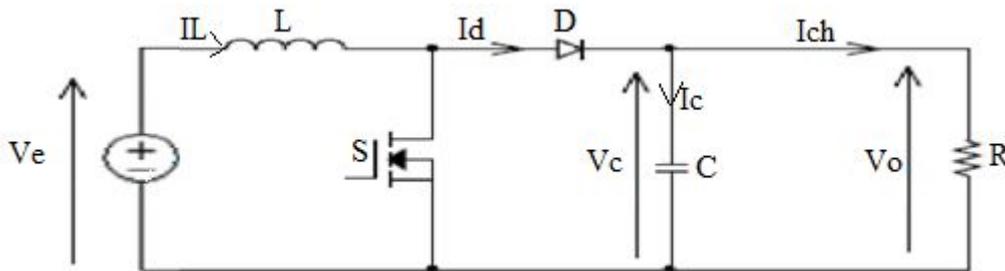


Figure I.14 : Hacheur survolteur.

I.3.2) Convertisseurs DC/AC

Pour transformer le courant continu produit par un générateur photovoltaïque en courant alternatif, on fait appel à l'onduleur.

Les onduleurs ont des structures en pont constituées le plus souvent d'interrupteurs électroniques comme les IGBT (transistors de puissance) [20].

L'onduleur fournit au moteur une grandeur variable en tension ou en fréquence ou les deux en même temps suivant le cas. En effet, une alimentation de l'onduleur :

- En tension ou en courant continue variable, lui permet de réguler la vitesse du moteur en fréquence.
- En tension continue constante, lui impose de réguler la vitesse du moteur en tension et en fréquence [21].

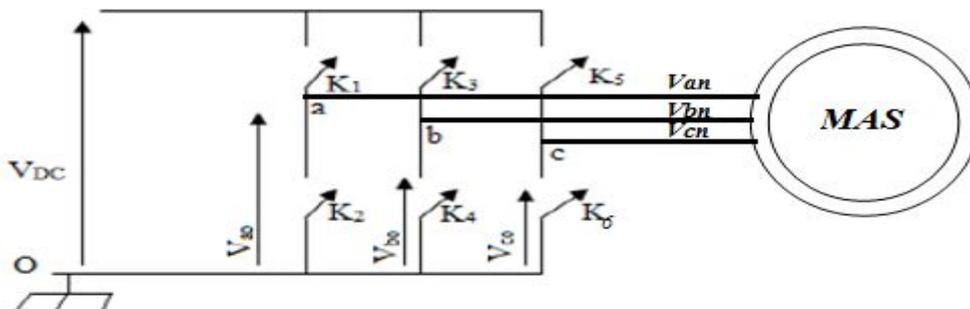


Figure I.15 : Circuit de l'onduleur connecté à une MAS [20].

I.4) Moteurs d'entraînement

Un moteur électrique est un dispositif électromécanique permettant la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique [22]. On distingue deux grandes familles selon la nature du courant d'entraînement :

I.4.1) Moteur à courant continu

C'est des moteurs alimentés par un courant continu. L'énergie électrique appliquée à ce moteur est transformée en énergie mécanique en variant le sens du courant circulant dans un induit (habituellement le rotor) soumis à un champ magnétique produit par un inducteur (habituellement le stator). La commutation du courant dans le rotor d'un moteur à courant continu est effectuée à l'aide de balais composés de charbon et de graphite ou par commutation électronique [23].

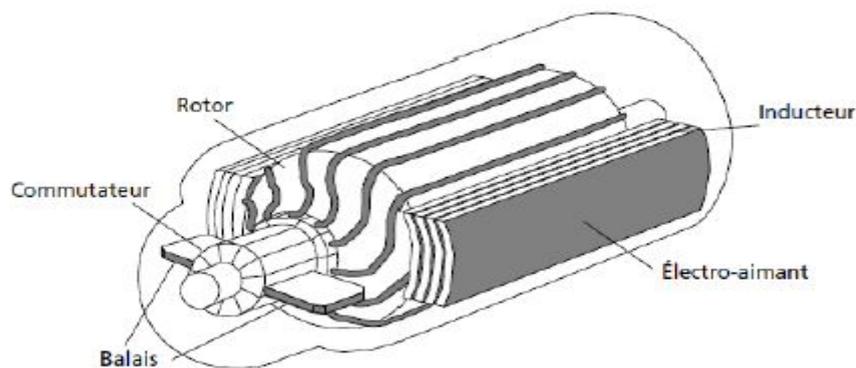


Figure I.16 : Moteur à courant continu avec balais [23].

I.4.2) Moteurs à courant alternatif

On distingue deux grandes familles :

I.4.2.1) Moteurs asynchrones

Les moteurs alternatifs asynchrones (rotor à cage) sont les plus couramment employés pour une gamme variée d'applications industrielles. Il est utilisé particulièrement pour le pompage immergé dans les forages et les puits ouverts. L'arrivée d'onduleurs efficaces a permis l'utilisation de ce type de moteurs dans les applications de pompage solaire [23].

L'utilisation des moteurs asynchrones (à courant alternatif triphasé), plus robuste moins cher et sans entretien, devient une solution plus économique et plus pratique même au prix

d'un circuit électronique de commande plus complexe pour les systèmes de pompage photovoltaïques [24].



Figure I.17 : moteur asynchrone à cage d'écureuil. [WEB2]

I.4.2.2) Moteurs synchrones

La machine synchrone est un convertisseur électromécanique réversible qui peut fonctionner soit en génératrice (alternateur), soit en moteur ;

- En génératrice : elle produit un courant électrique dont la fréquence est déterminée par la vitesse de rotation de la machine.
- En moteur : elle absorbe un courant électrique dont la fréquence détermine la vitesse de rotation de la machine [25].

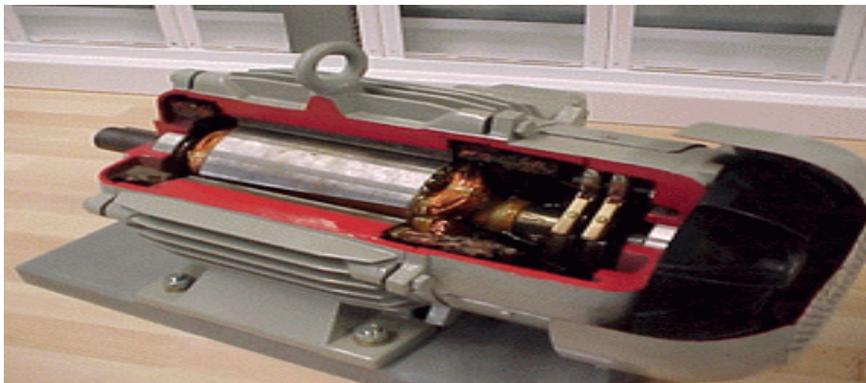


Figure I.18 : moteur synchrone. [WEB3]

I.5) Pompes entraînées

Une pompe est un dispositif permettant d'aspirer et de refouler un fluide. Il existe deux types de pompes : les pompes centrifuges et les pompes volumétrique. La classification des pompes peut se faire selon deux critères : conception de la pompe et sa position dans le système [26].

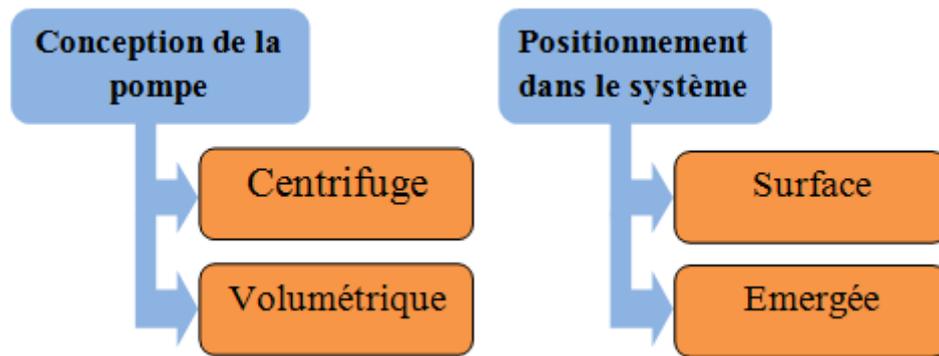


Figure I.19 : Classification des pompes.

I.5.1) Pompe centrifuge

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou à ailettes. L'eau qui rente au centre de la pompe sera poussée vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages [26].

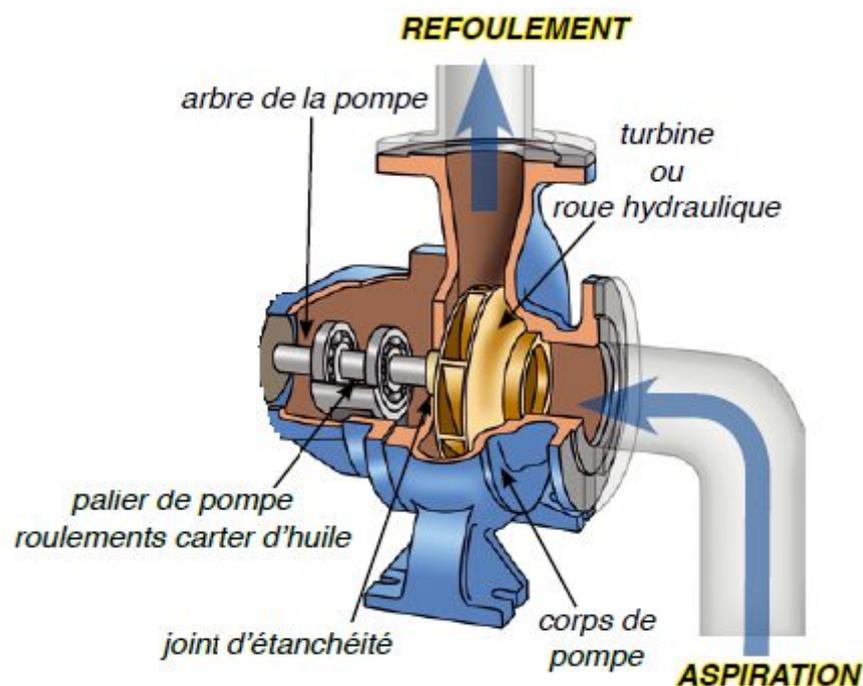


Figure I.20 : vue éclatée d'une pompe centrifuge. [WEB4]

I.5.2) Pompe volumétrique

La pompe volumétrique transmet l'énergie cinétique du moteur en mouvement de va et vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement. Une pompe volumétrique comporte toujours une pièce mobile dans une pièce creuse qui déplace le liquide

en variant le volume contenu dans la pièce creuse. Le principal intérêt des pompes volumétriques est de pouvoir véhiculer un fluide sous de très fortes pressions.

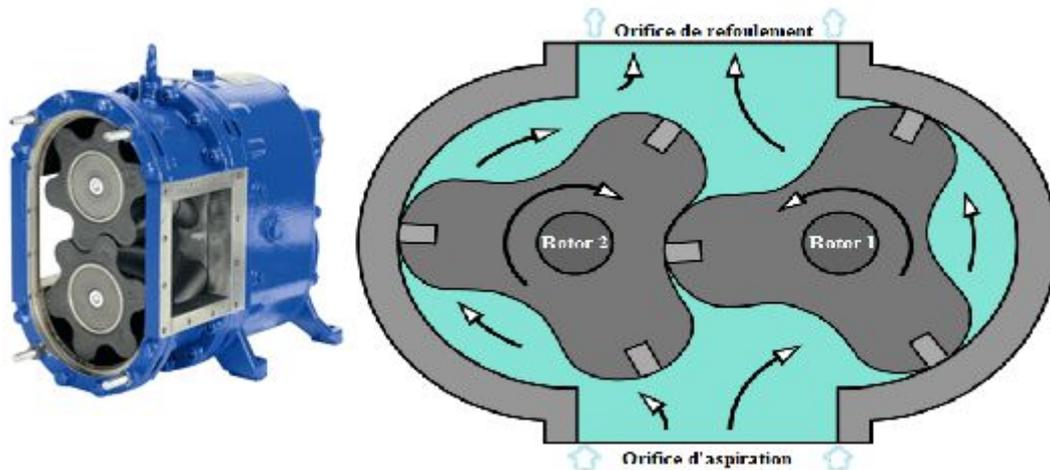


Figure I.21 : pompe volumétrique. [WEB4]

L'utilisation d'un type de pompes ou d'un autre dépend des conditions d'écoulement du fluide. De manière générale, si on veut augmenter la pression d'un fluide on utilisera plutôt les pompes volumétriques, tandis que si on veut augmenter le débit on utilisera plutôt les pompes centrifuges [27].

I.6) Pompage photovoltaïque

Pour être ramenées en surface, les eaux souterraines ont besoin d'être pompées. Par conséquent, la nécessité d'une pompe et d'une source fiable d'énergie comme le photovoltaïque s'impose. Le pompage photovoltaïque se présente fondamentalement en deux façons [28]:

I.6.1) Pompage avec stockage d'énergie hydraulique

Le pompage « au fil du soleil » permet d'avoir un système photovoltaïque simple, fiable et moins coûteux. Dans ce cas l'eau est pompée et stockée dans un réservoir, au fil de la journée [26]. On parle alors d'un stockage hydraulique. L'eau stockée sera distribuée au besoin.

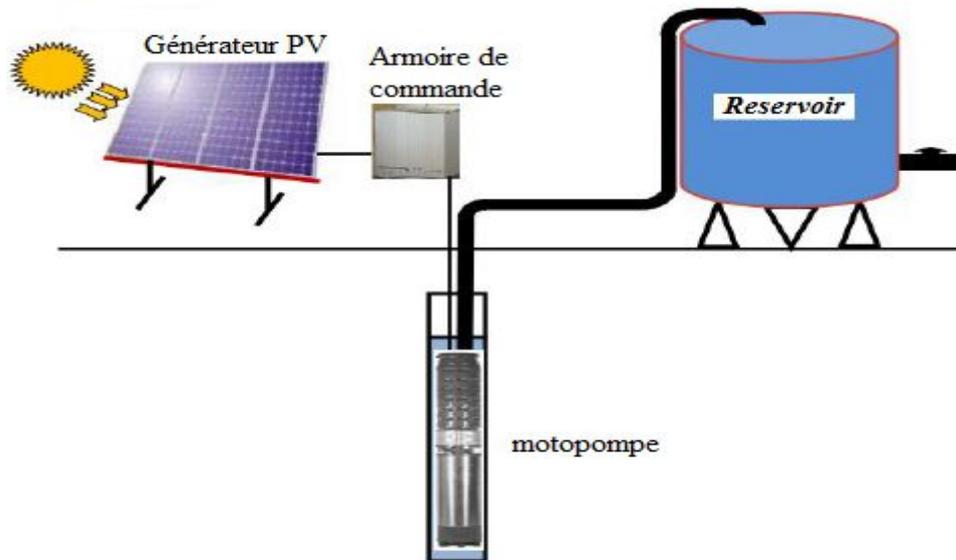


Figure I.22 : Pompage photovoltaïque au fil du soleil [26].

I.6.2) Pompage avec stockage d'énergie électrique

Dans cette technique l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque sera stockée dans des batteries en parallèle avec le pompage afin de rendre le pompage possible même en absence de l'énergie solaire. Un tel système est plus coûteux que le précédent, vu l'exigence d'un entretien périodique et la nécessité de changer les batteries, car elles ont durée de vie courte [26].

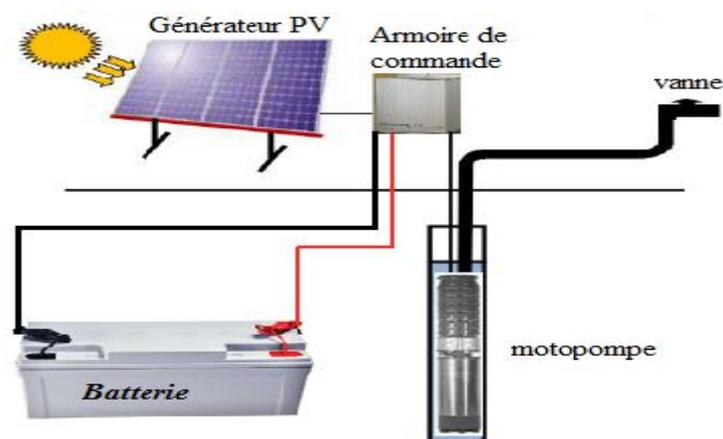


Figure I.23 : pompage photovoltaïque avec batterie [26].

I.6.3) Structure du système de pompage photovoltaïque à étudié

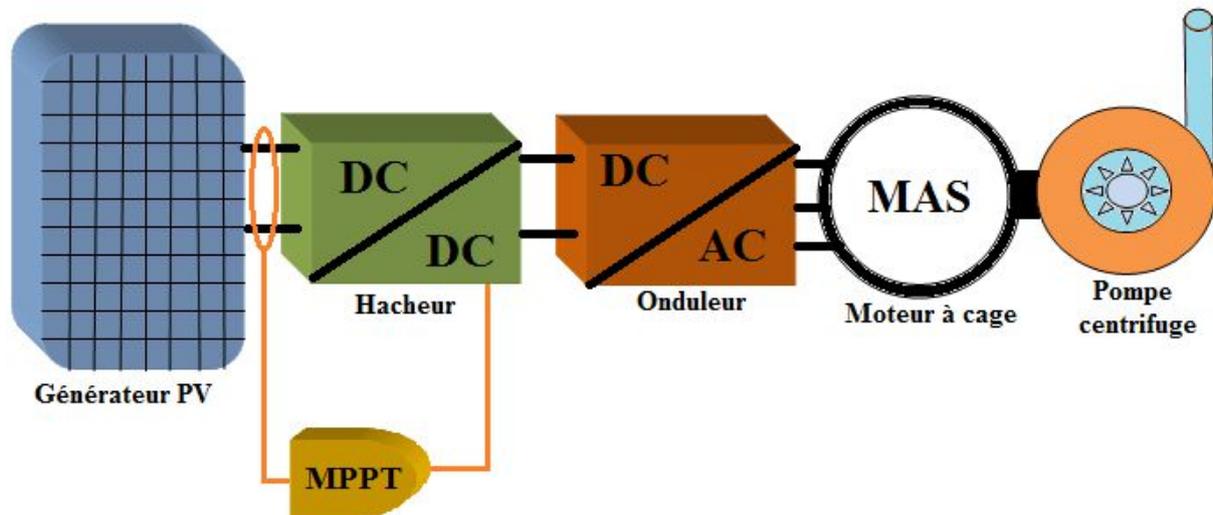


Figure I.24 : structure du système de pompage photovoltaïque à étudié.

Pour notre étude qui sera développée dans les chapitres suivants, on a mis le choix sur le pompage photovoltaïque avec stockage hydraulique car il est plus pratique de stocker l'eau dans des réservoirs que de stocker l'électricité dans des batteries lourdes, coûteuses et qui nécessite un entretien périodique.

Notre système de pompage comporte un générateur photovoltaïque comme source d'énergie, des convertisseurs statiques (hacheur et onduleur) pour la régulation et la conversion d'énergie électrique émise par le générateur photovoltaïque, enfin le groupe motopompe qui se compose essentiellement d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil qui a été choisi vue sa robustesse ainsi que sa contribution remarquable à augmenter l'autonomie et la fiabilité de l'installation. Ce dernier est accouplé à une pompe centrifuge qui débite ainsi sur un réservoir de stockage.

Conclusion

A travers cet état de l'art nous avons présenté et illustré les différents éléments qui constituent un système de pompage photovoltaïque. En revanche, ces derniers seront particulièrement développés et modélisés dans le chapitre suivant.

Chapitre II

Modélisation de la chaîne de pompage photovoltaïque

Introduction

Comme nous l'avons montré précédemment, notre chaîne de pompage photovoltaïque se compose d'un générateur photovoltaïque, d'un hacheur BOOST, d'un onduleur, d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil et d'une pompe centrifuge.

Dans ce chapitre nous allons élaborer des modèles mathématiques et électriques détaillés pour les différents éléments constituant cette chaîne de pompage afin de prévoir leurs comportements.

II.1) Modélisation du générateur photovoltaïque

II.1.1) Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles du GPV qui sont différents entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant. Parmi ces modèles on recense [24] :

- **Le modèle à une diode** : pour tenir compte des chutes de tension dans les zones P et N on doit ajouter dans le modèle une résistance série (équivalente) R_s et pour le courant de fuite, une résistance parallèle (équivalente) R_p .
- **Le modèle idéalisé** : c'est le modèle le plus simple, la valeur de la résistance R_p étant généralement grande, elle est donc souvent supposée infinie (et donc négligée), la valeur de la résistance R_s étant généralement petite, elle est supposée nulle.

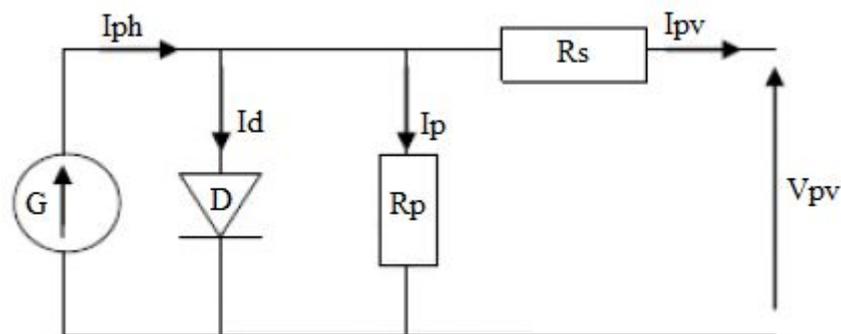


Figure II.1 : Modèle d'un générateur photovoltaïque à une diode

En revanche, on rencontre des modèles plus complexes comme :

- **Le modèle à deux diodes** : une diode supplémentaire mise en parallèle avec l'autre diode dans le schéma de la figure (II.1) permettant de reproduire les effets chimiques de recombinaison des électrons.
- **Le modèle à trois diodes** : la troisième diode incluant dans le modèle à deux diodes fait reprendre les effets non pris en compte dans les autres modèles (ex : courant de fuite liées aux diodes) [4].

Dans notre étude, pour une élaboration plus simple et une précision majeure qui sont délicates à réaliser dans les autres modèles vu précédemment, on a mis le choix sur le modèle à une seule diode.

Le modèle choisi est le **SIMENS SM 110-24.110Wc**. Ce dernier comporte cinq paramètres (I_{cc} , I_{mpp} , V_{co} , V_{mpp} , R_s), qui dépendent de la variation de la tension et du courant du panneau photovoltaïque en dépit des conditions météorologiques.

D'après la figure (II.1), le courant (I_{pv}) du générateur photovoltaïque sous les conditions standards de fonctionnement en négligeant R_p est donné par l'équation (II.1) :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (II.1)$$

I_{ph} : représente le photo-courant, il dépend de l'irradiation et de la température.

I_d : courant de polarisation de la jonction PN.

L'expression (II.1) peut s'écrire de cette manière [13]:

$$I_{pv} = I_{cc} \left[1 - K_1 \left(e^{(k_2 * V_{mpv} - 1)} \right) \right] \quad (II.2)$$

Où K_1 , K_2 et m des coefficients donnés par les équations suivantes :

$$K_1 = 0.01175$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{co}} \quad (II.3)$$

$$m = \frac{\ln \left[\frac{K_2}{K_4} \right]}{\ln \left[\frac{V_{mpp}}{V_{co}} \right]} \quad (II.4)$$

$$K3 = \frac{\ln[I_{cc}*(1+K1)-I_{mpp}]}{I_{cc}*K1} \quad (II.5)$$

$$K4 = \ln \left[\frac{1+K1}{K1} \right] \quad (II.6)$$

Avec :

I_{mpp} : courant optimum.

V_{mpp} : tension optimale.

I_{cc} : courant de court circuit.

V_{co} : tension en circuit ouvert.

Il est à noter que l'équation (II.1) est applicable que pour un niveau d'ensoleillement G et de température particuliers ($G=1000\text{W/m}^2$, $T=25\text{ }^\circ\text{C}$), relatif aux conditions standards de fonctionnement STC. Quand l'ensoleillement et la température varient, les paramètres du module changent suivant les équations suivantes [29] :

$$\Delta T_c = T_c - T_{stc} \quad (II.7)$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{cc} \left(\frac{G}{G_{stc}} \right) * \Delta T_c + \left(\frac{G}{G_{stc}} - 1 \right) I_{cc, stc} \quad (II.8)$$

$$\Delta V_{pv} = -\beta_{co} * \Delta T_c - R_s * \Delta I_{pv} \quad (II.9)$$

Avec :

- G_{stc} et G : représentent respectivement, le niveau d'ensoleillement dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques.
- T_{stc} , T_c : représentent respectivement, la température dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques.
- I_{pv} : représente la variation du courant par rapport à l'ensoleillement et à la température.
- V_{pv} : représente la variation de la tension par rapport à l'ensoleillement et à la température.

- α_{cc} : représente un coefficient d'incrémentation du courant I_{cc} quand la température de la surface augmente d'un degré Celsius ($A/^{\circ}C$) (sous les conditions standards de fonctionnement).
- β_{co} : représente un coefficient d'incrémentation de la tension V_{co} quand la température de la surface augmente d'un degré Celsius ($V/^{\circ}C$) (sous les conditions standards de fonctionnement).
- R_s : résistance série.

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

$$I_{pv, new} = I_{pv, stc} + \Delta I_{pv} \quad (II.10)$$

$$V_{pv, new} = V_{pv, stc} + \Delta V_{pv} \quad (II.11)$$

II.1.2) Effets des Variations Climatiques sur la Cellule Photovoltaïque

Le courant et la puissance produits par un module varient conformément à l'éclairement solaire et à la température des modules.

II.1.2.1) effets de l'irradiation

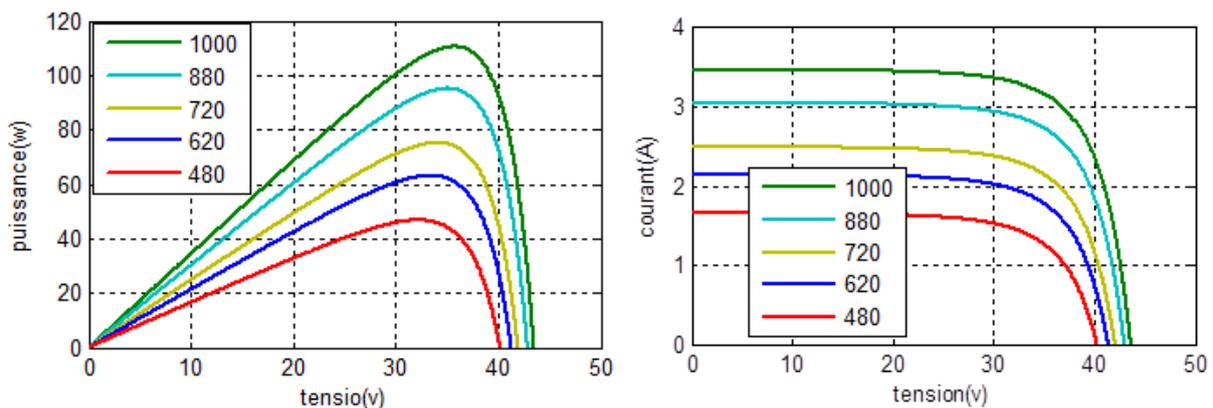


Figure II.2 : Caractéristique courant –tension et puissance –tension du module photovoltaïque conçu avec variation d'éclairement

A température ambiante constante ($T_c=25^{\circ}C$), La variation d'énergie incidente (ensoleillement, $E=480, 620, 720, 880, 1000 \text{ W/m}^2$) entraîne une variation du courant proportionnel à cette dernière et une variation de la tension relativement faible (figure II.3).

II.1.2.2) effets de la température

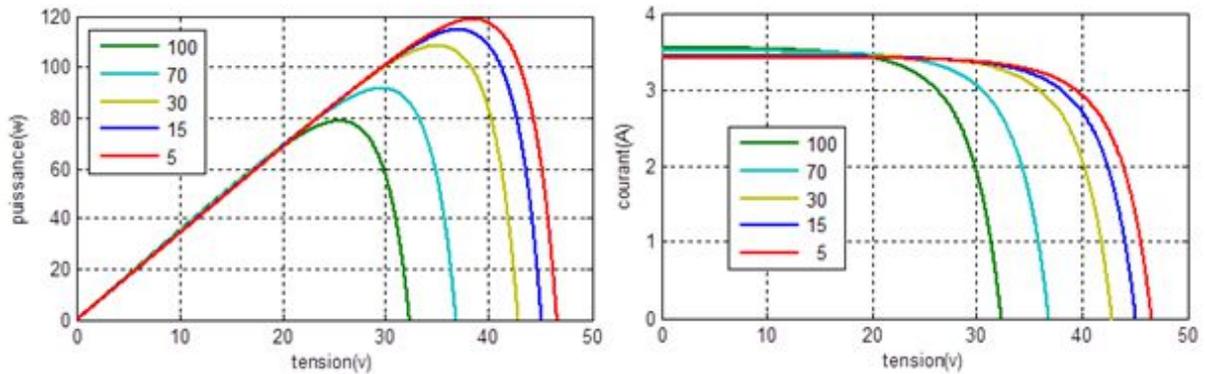


Figure II.3 : Caractéristique puissance–tension et courant-tension du module photovoltaïque conçu avec variation de température.

Puisque l'énergie du band gap décroît avec l'augmentation de la température ($T_c(^{\circ}\text{C})=5, 15, 30, 70, 100$), plus de photons ont assez d'énergie pour créer des paires électrons-trous. Par conséquent, le courant de court circuit augmente légèrement. I_{cc} augmente d'environ $0.07\%/^{\circ}\text{C}$ [30].

La tension de circuit ouvert V_{co} baisse avec la hausse de température. Cette baisse est aux alentours de $0.4\%/^{\circ}\text{C}$. La puissance chute de $0.5\%/^{\circ}\text{C}$ [30].

II.2) Modélisation du hacheur BOOST

Le convertisseur (DC/DC) le plus fréquemment utiliser est le convertisseur élévateur, connu aussi sous le nom de « BOOST » ou hacheur parallèle ; sa principale structure basique est illustrée dans la figure ci-dessous. Un BOOST est un convertisseur qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur supérieure. Nous avons donc deux séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur S, que nous pouvons représenter chacune par une équation différentielle [31].

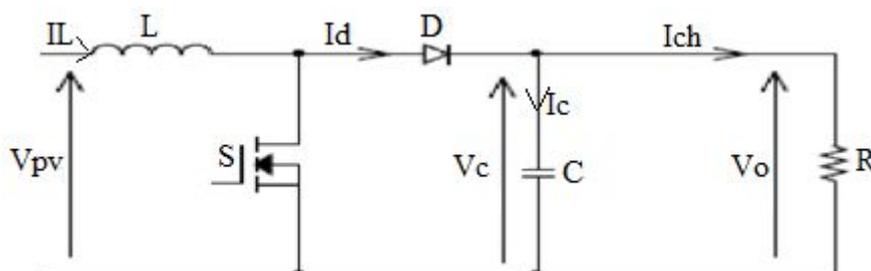


Figure II.4 : Montage BOOST.

Lorsque S est fermé :

$$V_0 = L \frac{di_L}{dt} \quad (II.12)$$

$$C \frac{dv_c}{dt} + ich = 0 \quad (II.13)$$

Lorsque S est ouvert :

$$V_0 = L \frac{di_L}{dt} + Vc \quad (II.14)$$

$$C \frac{dv_c}{dt} + ich = i_L \quad (II.15)$$

En posant $\alpha = 1$ lorsque l'interrupteur S est fermé et $\alpha = 0$ pour S est ouvert, nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équations uniques, que nous qualifions de modèle instantané. Dans ce cas Nous considérons que les interrupteurs sont parfaits [31].

$$V_0 = L \frac{di_L}{dt} + Vc(1-\alpha) \quad (II.16)$$

$$C \frac{dv_c}{dt} + ich = i_L(1-\alpha) \quad (II.17)$$

Le modèle instantané fait apparaître un comportement non linéaire du convertisseur pour la simulation. Donc nous passons au modèle moyen il convient de signaler que $\alpha' = T_{on}/T_d$

T_d : est la période de découplage.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_0 - (1-\alpha')Vc}{L} \quad (II.18)$$

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{i_L(1-\alpha') - ich}{c} \quad (II.19)$$

II.3) Modélisation de l'onduleur de tension à MLI

L'onduleur a pour fonction principale de transformer le courant continu produit par le générateur photovoltaïque, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Dans le pompage photovoltaïque on utilise souvent des onduleurs à fréquence variable, afin de permettre une variation de la vitesse de rotation du moteur qui alimente à son tour la pompe centrifuge.

A partir du schéma de l'onduleur triphasé présenté sur la figure (II.5), on développera les différentes équations qui modélisent le fonctionnement de ce dernier. Pour cela on prend en considération les postulats suivants [29]:

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

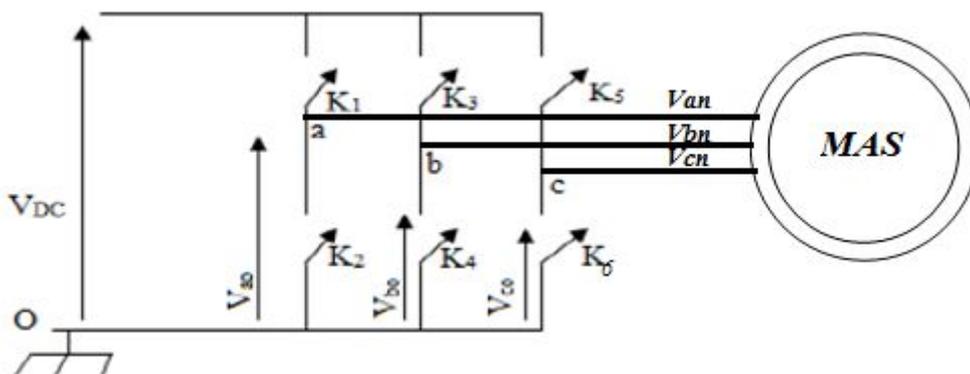


Figure II.5 : Circuit électrique de l'onduleur.

Nous supposons que les interrupteurs K_i (généralement conçus par un transistor et une diode connectés en antiparallèle) sont idéaux et que la charge triphasée est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé :

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

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (II.20)$$

Avec : V_{ao} , V_{bo} , V_{co} , sont les tensions à l'entrée de l'onduleur (continues) et «O» le point milieu d'un diviseur fictif à l'entrée comme référence pour ces dernières tensions.

Les trois tensions à l'entrée continue sont données par la relation de Châle comme suit :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (II.21)$$

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

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (II.22)$$

En introduisant (II.21) dans (II. 22) on aura :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (II.23)$$

En remplaçant (II. 20) dans (II.17) on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(V_{ao} - 2V_{bo} - V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(V_{ao} - V_{bo} - 2V_{co}) \end{cases} \quad (II.24)$$

Supposons que :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{Dc}.S1 \\ V_{bo} = V_{Dc}.S2 \\ V_{co} = V_{Dc}.S3 \end{cases} \quad (II.25)$$

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

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \frac{V_{Dc}}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S1 \\ S2 \\ S3 \end{pmatrix} \quad (II.26)$$

Le courant modulé par l'onduleur est donné par :

$$I_{Dc} = S1.i_{ach} + S2.i_{bch} + S3.i_{cch} \quad (II.27)$$

Tel que : $S1$, $S2$, $S3$ sont des fonctions logiques correspondantes à l'état des interrupteurs pour chacun des bras.

II.4) Modélisation du moteur asynchrone

La mise en équation de la machine asynchrone est effectuée en adoptant les postulats simplificateurs suivants :

- l'entrefer de la machine est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable.
- la saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables
- on admet que la force magnétomotrice créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.
- les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.

Ces choix signifient entre autres que : les flux sont additifs, les inductances propres sont constantes, il y a une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonctions de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

La loi d'Ohm et de Faraday permettent de relier les tensions aux flux totalisés et aux courants dans ces bobinages [32]. Elles s'écrivent sous la forme matricielle suivante:

$$(V_s) = (R_s) \cdot (I_s) + \frac{d}{dt}(\varphi_s) \quad (II. 28)$$

$$(V_r) = (R_r) \cdot (I_r) + \frac{d}{dt}(\varphi_r) \quad (II. 29)$$

Avec :

$$\begin{aligned} (V_s) &= \begin{pmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{pmatrix}; & (I_s) &= \begin{pmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{pmatrix}; & (\varphi_s) &= \begin{pmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{pmatrix} \\ (V_r) &= \begin{pmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{pmatrix}; & (I_r) &= \begin{pmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{pmatrix}; & (\varphi_r) &= \begin{pmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Les hypothèses simplificatrices conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants qui peuvent se mettre sous la forme matricielle suivante [33]:

$$(\varphi_s) = (L_{ss}) \cdot (I_s) + (L_{sr}) \cdot (I_r) \quad (II. 30)$$

$$(\varphi_r) = (L_{rr}).(I_r) + (L_{rs}).(I_s) \quad (II.31)$$

Avec :

$$(L_{ss}) = \begin{pmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{pmatrix}; \quad (L_{rr}) = \begin{pmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{pmatrix}$$

La matrice des mutuelles inductances entre les phases du stator et du rotor est donnée par :

$$M_{sr} = (M_{sr}^T) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (II.32)$$

Où θ représente l'angle électrique que fait l'axe de la phase **A** du rotor avec celui de la phase **a** du stator.

En utilisant (II.30) et (II.31), les équations de tension deviennent alors :

$$(V_s) = (R_s).(I_s) + \frac{d}{dx} [(L_{ss}).(I_s) + (L_{sr}).(I_r)] \quad (II.33)$$

$$(V_r) = (R_r).(I_r) + \frac{d}{dx} [(L_{rr}).(I_r) + (L_{rs}).(I_s)] \quad (II.34)$$

Les coefficients des équations différentielles (II.33) et (II.34) varient en fonction du temps par l'intermédiaire de l'angle θ . La résolution analytique de ce système est donc difficile, mais ils existent plusieurs transformations, telle que la transformation de Park, qui permettent de résoudre ce problème et aboutir à un système différentiel non linéaire à coefficients constants.

Pour simplifier les équations de la machine, la transformation de Park normalisée consiste à transformer la machine asynchrone triphasée équilibrée en une machine biphasée équivalente (**d-q**) en appliquant aux valeurs des courants, tensions et flux un changement de variables faisant intervenir l'angle β entre les enroulements et l'axe direct **d**. Pour les grandeurs statoriques $\beta = \theta_s$ alors que pour les grandeurs rotoriques $\beta = \theta_r$. La matrice de Park est donc donnée par :

$$(P[\beta]) = \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \right) \begin{pmatrix} \cos(\beta) & \cos\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin(\beta) & -\sin\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (II.35)$$



Figure II.6 : passage du triphasé vers le biphasé

L'application de la transformation de Park aux équations (II.33) et (II.34) et l'annulation des composantes homopolaires au rotor et au stator, vu le système est équilibré, d'où nous pourrions écrire dans un référentiel tournant à une vitesse arbitraire ωa le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} Vds = Rs.Ids + Ls \frac{dIds}{dt} + M \frac{dIdr}{dt} - \omega a(Ls.Iqs + M.Iqr) \\ Vqs = Rs.Iqs + Ls \frac{dIqs}{dt} + M \frac{dIqr}{dt} + \omega a(Ls.Ids + M.Idr) \\ 0 = Rr.Idr + Lr \frac{dIdr}{dt} + M \frac{dIds}{dt} - \omega r(Lr.Iqr + M.Iqs) \\ 0 = Rr.Iqr + Lr \frac{dIqr}{dt} + M \frac{dIqs}{dt} + \omega r(Ls.Idr + M.Ids) \end{cases} \quad (II.36)$$

Ce système d'équations doit être exprimé dans un référentiel commun. Pour cela, il existe différentes possibilités pour choisir l'orientation de ce repère. Dans notre cas, nous avons choisi comme repère un référentiel fixe par rapport au stator, l'angle entre l'axe **d** et la phase **A** du stator est donc constant et les grandeurs sont sinusoïdales de pulsation égale à celle de l'alimentation. Le système devient alors :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + L_s \frac{dI_{ds}}{dt} + M \frac{dI_{dr}}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + L_s \frac{dI_{qs}}{dt} + M \frac{dI_{qr}}{dt} \\ 0 = R_r \cdot I_{dr} + L_r \frac{dI_{dr}}{dt} + M \frac{dI_{ds}}{dt} - \omega r (L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs}) \\ 0 = R_r \cdot I_{qr} + L_r \frac{dI_{qr}}{dt} + M \frac{dI_{qs}}{dt} + \omega r (L_s \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds}) \end{cases} \quad (II.37)$$

Le couple électromécanique est donné par l'expression suivante :

$$C_e = P \cdot \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} \cdot I_{qs} - \varphi_{qr} \cdot I_{ds}) \quad (II.38)$$

Où P est le nombre de paires de pôles.

L'équation mécanique de la machine est donnée par :

$$C_e - C_r = J \frac{dw_r}{dt} \quad (II.39)$$

Avec :

J : moment d'inertie

C_e : couple électromagnétique

C_r : couple résistant

w_r : vitesse de rotation de la machine

II.5) Modélisation de la pompe centrifuge

La pompe centrifuge développe un couple de charge proportionnel au carré de la vitesse de rotation du moteur donné par [32]:

$$C_r = K_p \cdot w_r^2 \quad (II.40)$$

Tel que :

w_r : vitesse de rotation du moteur asynchrone (rad/s)

K_p : un coefficient de proportionnalité $[(Nm/ rad.s^{-1})^2]$ qui est donné par l'équation suivante :

$$K_p = \frac{P_n}{w_n^3} \quad (II.41)$$

Tel que :

P_n : puissance nominale du moteur asynchrone (W).

w_n : vitesse nominale du moteur asynchrone (rad/s).

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé les différents éléments qui constituent un système complexe d'une motopompe asynchrone alimentée par générateur photovoltaïque à travers un hacheur et un onduleur.

Cette étude montre bien que le modèle du panneau photovoltaïque, basé sur son circuit équivalent est non linéaire. En effet, il est en fonction des conditions météorologiques et de sa charge. En revanche nous avons présenté les modèles simplifiés du moteur et de la pompe centrifuge ainsi que les convertisseurs statiques qui feront l'objet du dimensionnement dans le prochain chapitre ainsi que le contrôle du système de pompage.

Chapitre III

*Dimensionnement et
contrôle du système de
pompage
photovoltaïque*

Introduction

Pour concevoir un système de pompage photovoltaïque, il est nécessaire d'élaborer une étude dimensionnelle des éléments constituant cette chaîne de pompage selon le cahier des charges, répondant ainsi au besoin du consommateur.

Dans ce chapitre, nous présenterons les différentes étapes à suivre pour effectuer un dimensionnement du système de pompage photovoltaïque qui nous sera très utile pour mettre le choix sur les composants utilisés afin de satisfaire les besoins quotidiens en eau demandés.

En revanche, nous allons introduire à la commande vectorielle de la machine asynchrone basée sur l'orientation du flux rotorique qui sera employée avec deux stratégies en vue de tester leurs performances et mettre le choix sur la plus fiable.

III.1) Les étapes de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque

Pour dimensionner un quelconque système de pompage photovoltaïque il faut [32]:

- Evaluer les besoins en eau.
- Calculer la puissance hydraulique nécessaire.
- Déterminer l'énergie solaire disponible.
- Choisir les composants de l'installation.

III.1.1) Evaluation des besoins en eau

Avant de procéder à n'importe quel dimensionnement d'une installation de pompage photovoltaïque il faut d'abord estimer les besoins en eau. Dans le cas d'un système de pompage destiné pour l'irrigation, les besoins en eau dépendent essentiellement des conditions météorologiques, du type de culture et de la méthode d'irrigation.

III.1.2) Calcul de la puissance hydraulique nécessaire

La puissance hydraulique moyenne journalière et mensuelle nécessaire est calculée à partir de la relation suivante [34] :

$$P_H = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot HMT}{3600} \quad (III. 1)$$

Avec :

P_H : puissance hydraulique (W)

HMT : hauteur manométrique totale (m)

Q : volume d'eau (m³/jour)

ρ : densité de l'eau (1000 kg/m³)

g : accélération de la pesanteur (9,81m/s²)

La puissance électrique nécessaire pour soulever une certaine quantité d'eau sur une certaine hauteur pendant une journée est calculée à partir des données de débit et de HMT requises, cette dernière est exprimée en W. Ce calcul est en fonction d'une constante hydraulique nommé C_H [28].

$$P_{\text{éle}} = \frac{C_H \cdot HMT \cdot Q}{\eta_p \cdot \eta_m} \quad (III. 2)$$

Avec :

$P_{\text{éle}}$: puissance électrique requise par la pompe

HMT : hauteur manométrique totale exprimée en [m]

Q : le débit journalier exprimé en [m³/jour]

η_p : Le rendement de la pompe

η_m : Le rendement du moteur

$$C_H = \frac{g \cdot \rho}{3600} = 2,725$$

Où :

g : Accélération de la pesanteur ($9,81\text{m/s}^2$)

ρ : Densité de l'eau (1000 kg/m^3)

III .1.3) Détermination de l'énergie solaire disponible

Pour la conception d'un système de pompage photovoltaïque il est indispensable de connaître les ressources solaires disponibles, et pour déterminer cette énergie il faut calculer les valeurs moyennes journalières mensuelles de l'irradiation solaire [24].

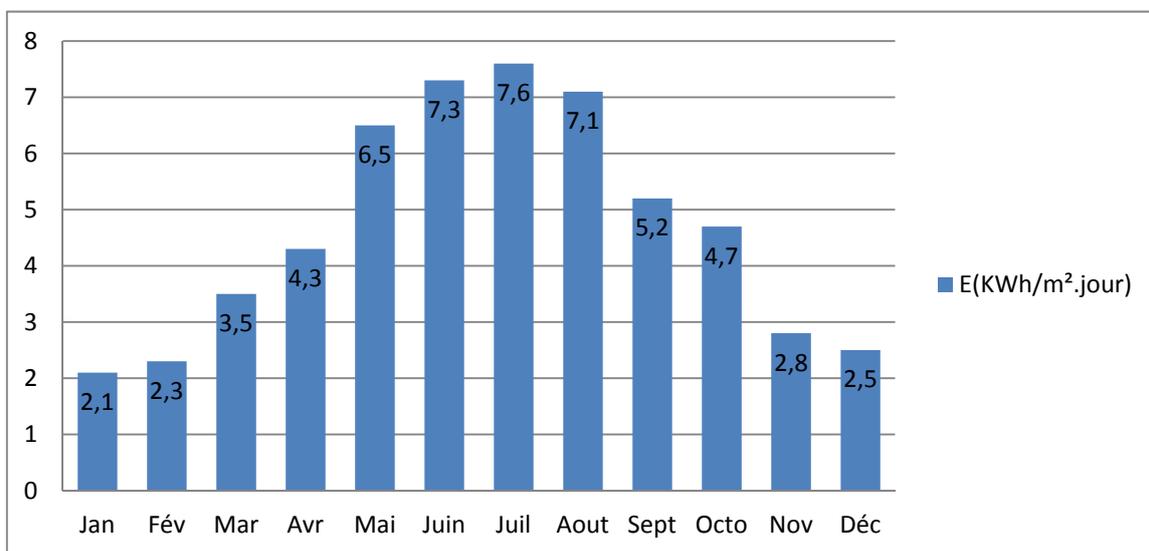


Figure III.1 : irradiation globale moyenne mensuelle journalière sur plan horizontal du site de Bejaia du 2013 au 2016 [WEB6].

III .1.3.1) positionnement optimal des capteurs photovoltaïque

Afin d'optimiser au mieux l'installation photovoltaïque il faut tenir compte de l'énergie fournie par les capteurs solaire qui dépendent à leurs tours du lieu de l'installation, d'orientation et d'inclinaison de ces capteurs. Le tableau ci-dessous résulte le taux de productivité optimum selon l'inclinaison qui dépend de l'orientation.

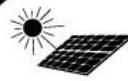
INCLINAISON \ ORIENTATION	0° 	30° 	60° 	90° 
EST	93%	90%	78%	55%
SUD - EST	93%	96%	88%	66%
SUD	93%	100%	91%	68%
SUD - OUEST	93%	96%	88%	66%
OUEST	93%	90%	78%	55%

Tableau III.1 : inclinaison/orientation et taux de productivité optimum des PV. [WEB5]

III .1.3.2) Mois de dimensionnement

Consiste à choisir une puissance crête tel que pendant le mois le moins ensoleillé, l'énergie fournie par le panneau satisfasse les besoins, avec une inclinaison voisine de la latitude du lieu.

C'est la solution généralement adopté par les sociétés commercialisant et installant des systèmes photovoltaïque [35].

III .1.4) Choix des composants de l'installation

On souhaite réaliser une installation de pompage photovoltaïque dans une petite ferme à Bejaia pour alimenter un réservoir d'eau de 50 m³ destiné pour l'irrigation d'un champ d'orangers dont le besoin journalier est estimé à 15 m³/jour. La hauteur manométrique choisie est de 10 m et la pompe choisie est centrifuge de rendement 0,56. Le rendement du moteur d'entraînement est de 0,8 et celui de l'onduleur est estimé à 0,96.

III .1.4.1) dimensionnement de la pompe centrifuge

Dans notre cas le débit journalier est estimé à 23 m³/jour. À partir de l'équation (III.1), nous calculons la puissance hydraulique :

$$P_H = \frac{1000 * 9,81 * 23 * 10}{3600}$$

$$P_H = 626,75 \text{ W}$$

De la relation l'équation (III.2), l'énergie électrique sera :

$$P_{\acute{e}le} = \frac{2,725 * 23 * 10}{0,56 * 0,8}$$

$$P_{\acute{e}le} = 1400 \text{ W}$$

La puissance demandée, transite via l'onduleur :

$$P_d = \frac{P_{\acute{e}le}}{\eta_{\text{onduleur}}} ; P_d = \frac{1400}{0,96} ; P_d = 1458,33 \text{ W}$$

III .1.4.2) dimensionnement du champ photovoltaïque

D'après la figure III.1 on distingue que le mois de Janvier est le mois ou l'ensoleillement (E) est défavorable pour un maximum de 2,1 heures de soleil par jour.

Le taux de pertes liées à la température, à la poussière et au rendement de l'onduleur est estimé à 20% [28], dans ce cas l'énergie journalière demandée par la charge se calcule avec l'équation suivante :

$$E_c = P_d \cdot T_p ; \text{ avec } T_p = \frac{\text{volume}}{\text{débit}} = \frac{50}{23} = 2,17\text{h} \quad (III.3)$$

$$E_c = 1458,33 \cdot 2,17 ; E_c = 3164,57$$

D'où : la puissance théorique du générateur PV est donné par :

$$P_g = \frac{E_c}{T_p(1 - \text{pertes})} ; P_g = \frac{3164,57}{2,17(1 - 0,2)} ; P_g = 1823 \text{ W}$$

$$N_{PV} \geq ENT \left(\frac{P_g}{P_s} \right) \quad (III.4)$$

$$N_{PV} \geq ENT \left(\frac{1823}{110} \right) ; N_{PV} = 17 \text{ Panneaux}$$

III.2) Contrôle du système de pompage photovoltaïque

La conception globale d'un système de pompage photovoltaïque optimisé est par nature difficile. Dans notre cas, pour le contrôle de ce dernier on fait appel aux commandes suivantes :

III.2.1) Commande MPPT

Pour un fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque, il est indispensable d'insérer un convertisseur statique qui est le hacheur BOOST (DC/DC). Ce dernier jouera le rôle d'adaptateur source-charge dans des conditions bien définies.

La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV est indispensable pour la recherche du MPP qui nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables.

Pour cela l'algorithme employé est le suivant :

III.2.1.1) Algorithme Perturbation et Observation (P&O)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en perturbant le système et observant l'impact sur la puissance à la sortie du GPV. Sur la figure III.2, on remarque que si la tension de fonctionnement est perturbée dans une direction donnée et que la puissance augmente ($dp/dV > 0$), alors il est clair que la perturbation à déplacer le point de fonctionnement vers le MPP. L'algorithme P&O continuera à perturber la tension dans la même direction. Par contre, si la puissance diminue ($dp/dV < 0$), alors la perturbation a éloigné le point de fonctionnement du MPP. L'algorithme inversera la direction de la perturbation suivante. Cet algorithme est résumé sur le tableau III.2 [36] [37] et l'organigramme de la figure III.3 [38] [39]. L'algorithme peut être représenté sous l'expression mathématique suivante :

$$V(k) = V(k - 1) + \Delta V \cdot \text{sign} \left(\left. \frac{dP}{dV} \right|_{V=V_{K-1}} \right) \quad (III.5)$$

Le processus est répété périodiquement jusqu'à ce que le MPP soit atteint. Le système oscille alors autour du MPP, ce qui provoque des pertes de puissance. L'oscillation peut être minimisée en diminuant la taille de la perturbation. Cependant, une taille de perturbation trop

petite ralentit considérablement la poursuite du MPP. Il existe alors un compromis entre précision et rapidité [37].

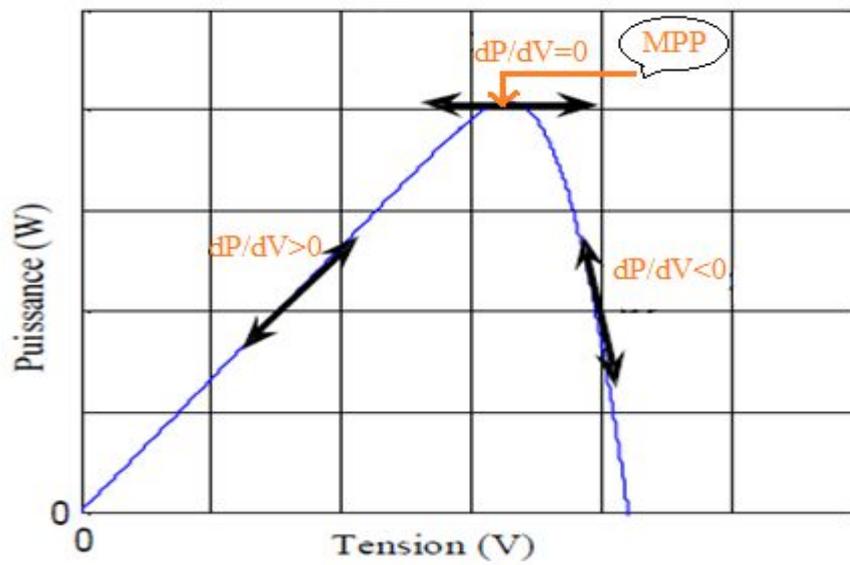


Figure III.2 : Signe de dP/dV à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance.

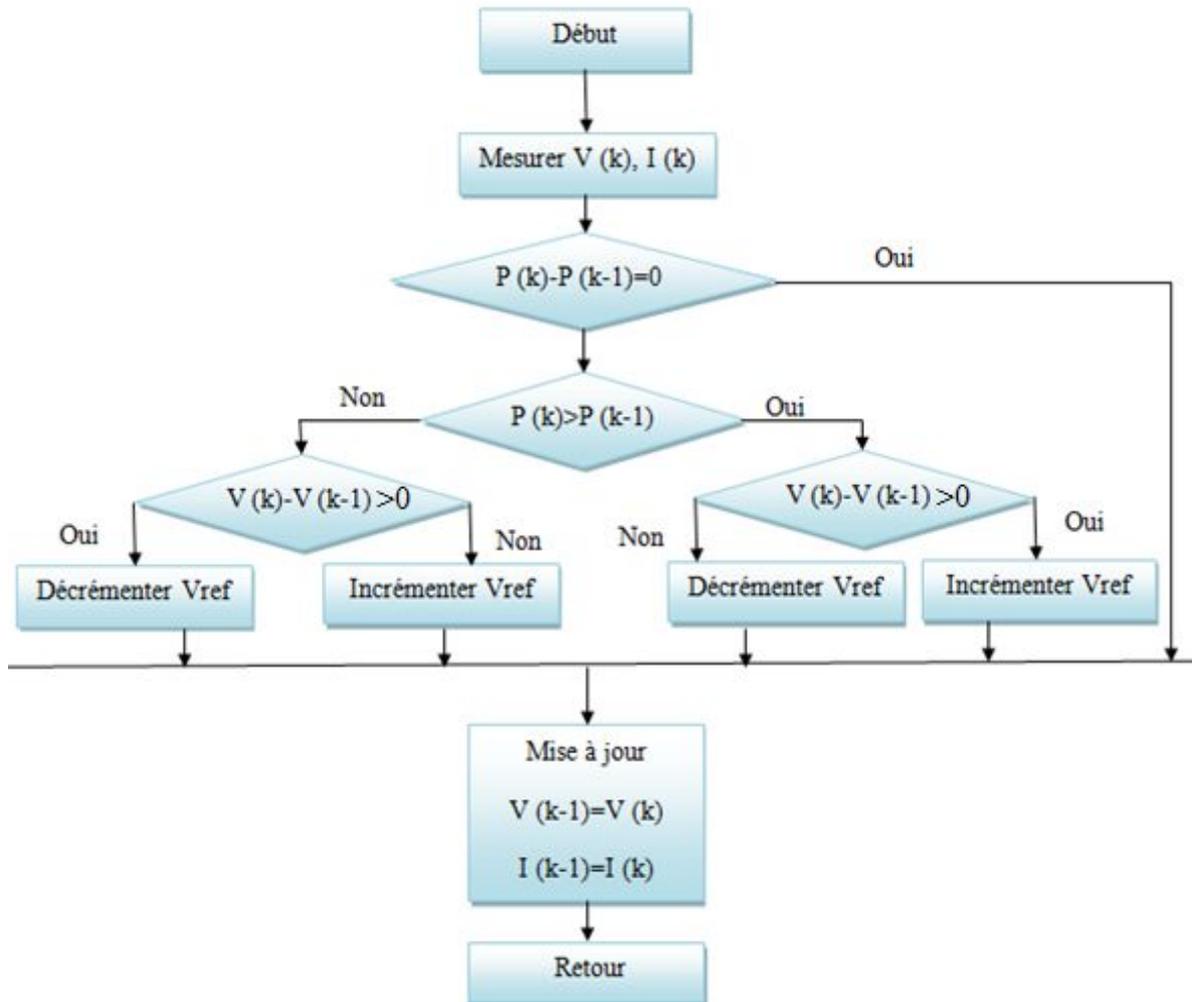


Figure III.3 : Organigramme de l’algorithme MPPT par la méthode P&O [3].

Perturbation initiale	Puissance	Perturbation suivante
positive	positive	Positive
positive	Négative	Négative
Négative	positive	Négative
Négative	Négative	Positive

Tableau III.2 : résumé de l’algorithme P&O

Il est important de noter qu'avec l'algorithme P&O, la variable à contrôler peut être soit la tension soit le courant du GPV. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique [40]. Sur les figures II.3 et II.4, on voit bien que la variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV [37]. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite [39]. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV.

Un inconvénient de la méthode P&O est qu'elle peut échouer lors d'un rapide changement des conditions atmosphériques comme l'illustre la figure III.4 :

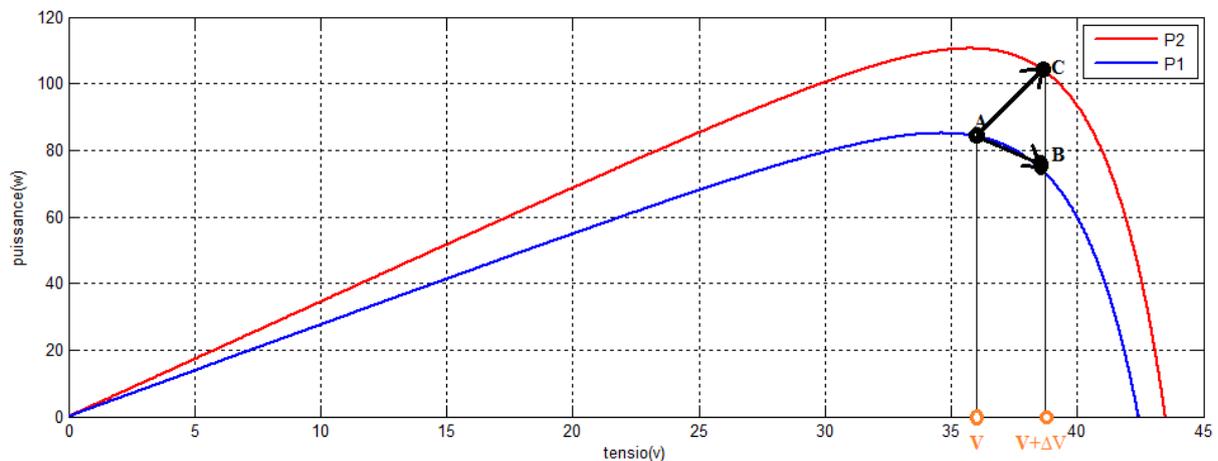


Figure III.4 : Divergence de la méthode P&O

Commençant par un point de fonctionnement A, si les conditions climatiques restent constantes, une perturbation ΔV dans la tension V amènera le point de fonctionnement au point B, et le sens de la perturbation sera inversé à cause de la diminution de la puissance.

Par contre, si l'éclairement augmente et déplace la courbe de puissance de P1 à P2, sur un cycle du MPPT, le point de fonctionnement sera déplacé de A vers C. Cela représente une augmentation de la puissance, l'algorithme croit que ceci est le résultat de sa propre action et le sens de la perturbation restera le même. Par conséquent, le point de fonctionnement s'éloigne du MPP et continuera à s'éloigner si l'éclairement augmente (ou diminue) progressivement [38]. Pour palier à ce problème, on pourra ajouter le poids d'un troisième point et le comparer aux deux autres avant de prendre une décision sur le sens de la perturbation [40]. Une autre solution serait de diminuer le cycle du MPPT [37].

III.2.2) commande de l'onduleur

L'objectif de cette commande est de générer les ordres de conduction et de blocage des interrupteurs d'une manière à avoir la tension créée par l'onduleur proche de celle de la référence. Pour cela on utilise souvent la commande par régulateurs à hystérésis vue sa robustesse et sa simplicité.

III.2.2.1) Contrôle des courants par régulateurs à hystérésis

Cette commande s'intéresse au contrôle du courant pour chaque bras de l'onduleur où les interrupteurs K_i et K_i^* ($i=1, 2, 3$) sont reliés, l'un à la sortie d'un comparateur à hystérésis, l'autre à la même sortie via un inverseur. Le changement de signe de la différence entre le courant de référence et le courant mesuré n'entraîne pas instantanément le basculement du comparateur à cause de l'effet de l'hystérésis, c'est-à-dire que le courant mesuré évolue en augmentant jusqu'à ce que ΔI soit égal à L (L : étant la largeur de la bande d'hystérésis). Le comparateur bascule où l'autre interrupteur rentre en conduction à son tour tant que $\Delta I < L$.

Le contrôle des courants par ces régulateurs force le courant de phase à suivre celui de référence pour imposé des courants sinusoïdaux à la machine afin d'assurer un couple résistant et un couple électromagnétique non fluctuant [41]. L'approche de la figure III.5 illustre la réalisation de la comparaison entre le courant de phase mesuré et celui de la référence.

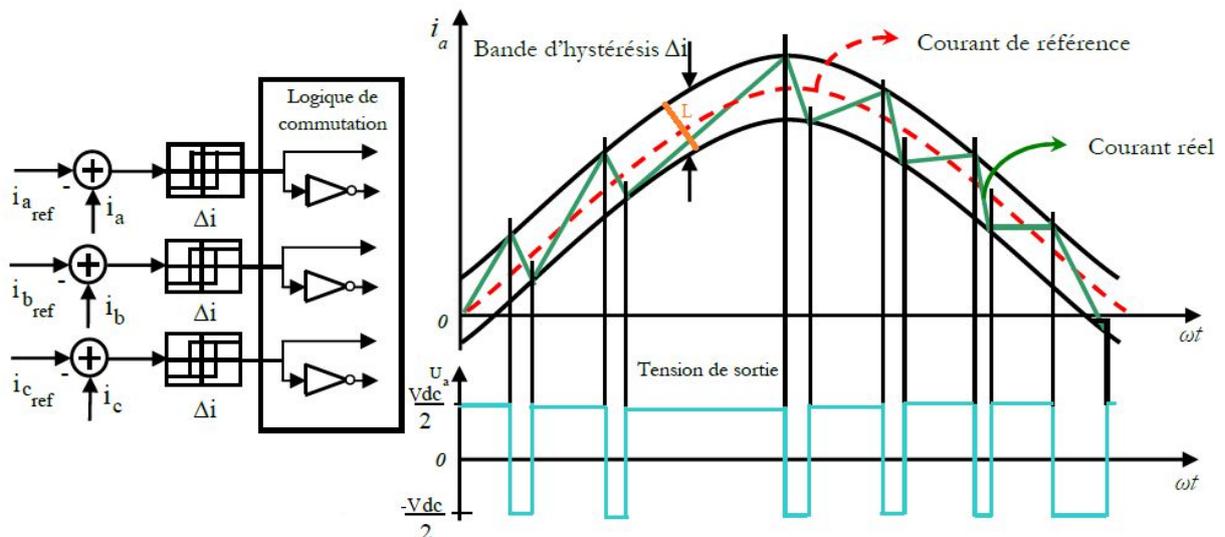


Figure III.5 : Illustration de la bande de courant à hystérésis [41].

Les conditions de commutation des trois commutateurs statiques S_i ($i = 1, 2, 3$) de l'onduleur sont définies en terme des états logiques S_i correspondants de la façon suivante :

$$S_i = \begin{cases} -1 & si & i_i \geq i_{ref} + \Delta i \\ 1 & si & i_i \geq i_{ref} - \Delta i \\ S_{i-1} & si & i_i = i_{ref} \end{cases} \quad tel\ que\ i = 1, 2, 3 \quad (III.6)$$

Avec :

i_i : représentent les courants des phases statoriques (i_a, i_b, i_c).

$i_{i\ ref}$: représentent les courants de référence issus des circuits de commandes des trois bras de l'onduleur.

III.2.3) Commande de la machine asynchrone

III.2.3.1) Commande vectorielle

Cette commande a pour but de contrôler la machine asynchrone afin d'avoir un comportement similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée où le flux et le couple sont découplés. Ce découplage assure une réponse très rapide du couple.

Il existe deux types de commande vectorielle [42]:

- La commande vectorielle directe.
- La commande vectorielle indirecte.

III.2.3.1.1) Commande vectorielle directe

Ce type repose sur la mesure du flux rotorique à partir des capteurs à effet Hall placés sous les dents du stator. Ces capteurs donnent des valeurs locales du flux qu'il est nécessaire ensuite de les traiter afin d'obtenir le flux global. Cette méthode présente des inconvénients au niveau de la fiabilité de la mesure soit [43]:

- Le problème de filtrage du signal mesuré.
- La mesure varie en fonction de la température.
- Le cout de production est élevé (capteurs, conditionneurs, filtre,...).

III.2.3.1.2) Commande vectorielle indirecte

La commande vectorielle indirecte est considérée comme la plus pratique vu les désavantages rencontrés dans la commande précédente. Dans ce contrôle, les courants rotorique sont estimés à partir de la mesure des puissances active et réactive [42]. L'inconvénient majeur de cette commande est lié la sensibilité de l'estimation aux variations des paramètres de la machine due à la saturation du circuit magnétique et la variation de la température.

Dans ce chapitre, nous proposons d'appliquer deux stratégies de réglage de la vitesse de la machine asynchrone à cage d'écureuil. La première est basée sur des régulateurs de type PI (régulateurs classique) et la deuxième est basée sur des régulateurs issus de la technique par mode glissant.

III.2.3.2) Commande vectorielle par orientation du flux rotorique

Le couple électromagnétique développé en régime transitoire s'exprime dans le repère « d-q » par un produit croisé entre le courant et le flux. Ce dernier est donné par la formule suivante :

$$C_e = p * \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} \cdot I_{qs} - \varphi_{qr} \cdot I_{ds}). \quad (III.7)$$

Lors de l'élimination du produit « $\varphi_{qr} \cdot I_{ds}$ », le couple devient similaire à celui d'une machine à courant continu, pour cela, il suffit d'orienter le repère d-q en choisissant l'angle de rotation de Park de sorte que la composante de flux en quadrature soit nulle ($\varphi_{qr} = 0$), de ce fait, le flux rotorique sera entièrement porté sur l'axe directe d. ($\varphi_{dr} = \varphi_r$)

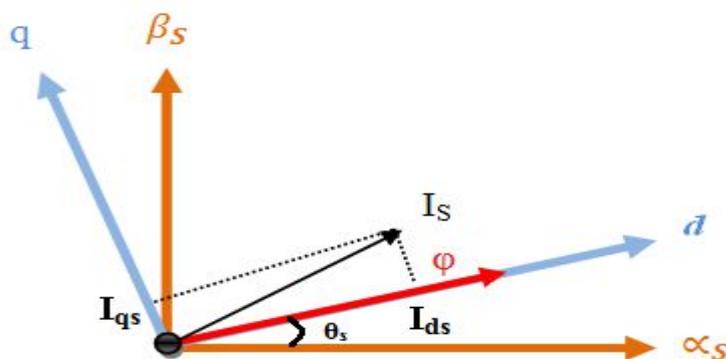


Figure III.6: Principe du contrôle vectoriel.

Le couple devient alors :

$$C_e = p * \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} \cdot I_{qs}) \quad (III. 8)$$

$$\varphi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \quad (III. 9)$$

$$\varphi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \quad (III. 10)$$

$$\varphi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} = \varphi_r \quad (III. 11)$$

$$\varphi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} = 0 \quad (III. 12)$$

$$V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \cdot \varphi_{qs} \quad (III. 13)$$

$$V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \cdot \varphi_{ds} \quad (III. 14)$$

$$0 = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} \quad (III. 15)$$

$$0 = R_r \cdot I_{qr} + \omega_r \cdot \varphi_{dr} \quad (III. 16)$$

A partir de l'équation (III.12), On a:

$$I_{qr} = -\frac{M}{L_r} I_{qs} \quad (III. 17)$$

De l'équation (III.16), On tire ω_r :

$$\omega_r = -\frac{R}{\varphi_{dr}} I_{qs} \quad (III. 18)$$

A partir de l'équation (III.15), On tire l'équation de i_{dr} :

$$I_{dr} = -\frac{1}{R} \frac{d}{dt} \varphi_{dr} \quad \text{Après la transformée de Laplace :} \quad I_{dr} = -\frac{1}{R} \cdot S \cdot \varphi_{dr} \quad (III. 19)$$

En remplaçant I_{dr} dans (III.11), On obtient :

$$\varphi_r = \frac{M}{1 + \frac{L_r}{R_r}} \cdot I_{ds} \quad (III. 20)$$

D'où :

$$I_{ds} = \frac{1 + T_r \cdot S}{M} \cdot \varphi_r \quad (III. 21)$$

Avec :

$T_r = \frac{L_r}{R_r}$ La constante de temps rotorique.

S : La variable de la transformée de Laplace.

Pour la régulation du couple et du flux on doit agir sur I_{qs} et I_{ds} respectivement. C'est le cas similaire d'une machine à courant continu où on rencontre deux variables actionnaires.

Si l'on désire d'augmenter ou de diminuer la vitesse de rotation de la machine, on impose $I_{qs}^{réf}$ positif ou négatif respectivement. Le régulateur du courant I_{qs} va imposer ce courant.

Dans notre cas on a choisi d'insérer des régulateurs de type proportionnel intégral (PI) vu leurs simplicité à mettre en œuvre. Ce type de régulateurs assure une erreur statique nulle grâce à l'action intégrale [44], tandis que la rapidité de réponse est assurée par l'action proportionnelle.

III.2.3.2.1) Conception des régulateurs

Soit $Y_{ref}(t)$ le signal de consigne, et $Y(t)$ le signal de sortie du système à contrôler.

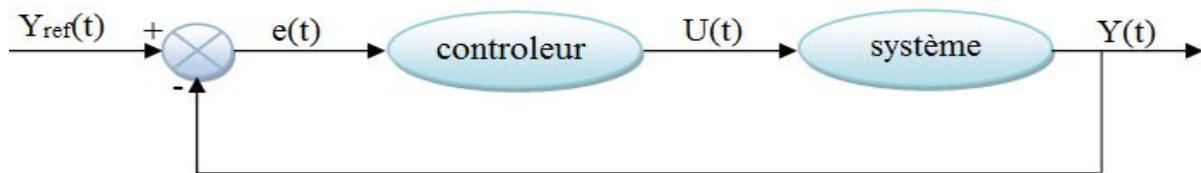


Figure.III.7 : structure générale de la commande par PI.

La loi de commande est :

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) \quad (III. 22)$$

a) Action proportionnelle

- ❖ Si K_p est grand, la correction est rapide. Le risque de dépassement et d'oscillation dans la sortie s'accroît.
- ❖ Si K_p est petit, la correction est lente, il y a moins de risque d'oscillation.

b) Action intégrale

L'action intégrale régit, lentement à la variation de l'erreur et assure le rattrapage progressif de la consigne. Tant que l'erreur positive (ou négative) subsiste l'action $U(t)$ augmente (ou diminue) jusqu'à ce que l'erreur s'annule [32].

III.2.3.2.2) Caractéristiques des régulateurs

❖ **Stabilité**

Un système bouclé doit être stable. Si seulement si les réactions du système de régulation soit énergétique sans être disproportionnées avec l'erreur à corriger. Une correction trop forte ou tardive risque de conduire le système à une instabilité.

❖ **Précision**

En régulation, l'obtention de la précision est issue suite à l'action intégrale implantée dans la boucle.

❖ **Rapidité**

En générale, un système bouclé doit répondre rapidement à la variation de sa consigne (poursuite) et effacer rapidement les perturbations (régulation). Le temps de réaction est bien entendu en relation étroite avec l'inertie propre du processus [45].

III.2.3.2.3) Régulateur de vitesse

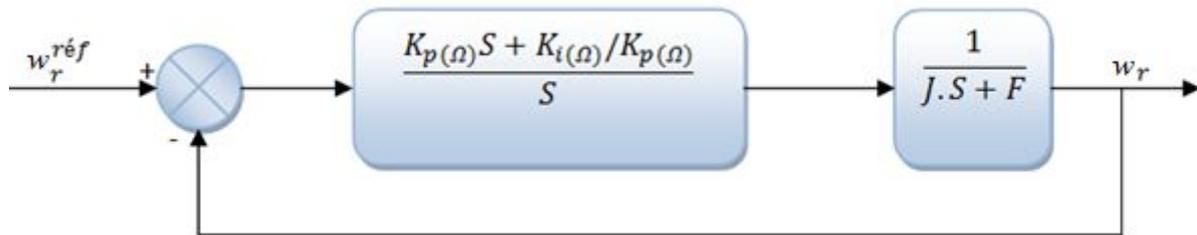


Figure.III.8 : Schéma bloc de la régulation de vitesse.

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit donc :

$$FT_{bo}(s) = K_p(\Omega) \cdot \frac{S + (K_i(\Omega)/K_p(\Omega))}{S} \cdot \frac{1}{S \cdot J + F} \tag{III. 23}$$

Pour rendre les calculs simples, on suppose que le coefficient de frottement visqueux est nul ($F = 0$).

$$FT_{bf}(s) = \frac{1}{1 + FT_{bo}(s)} = \frac{\frac{K_i(\Omega)}{J} \cdot (\frac{K_p(\Omega)}{K_i(\Omega)} \cdot s + 1)}{s^2 + \frac{K_p(\Omega)}{J} \cdot s + \frac{K_i(\Omega)}{J}} \tag{III. 24}$$

Par identification de l'équation (III. 20) à la forme Canonique:

$$G(p) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_n^2} \cdot s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} \cdot s + 1} \tag{III. 25}$$

On aura à résoudre le système d'équation suivant:

$$\begin{cases} \frac{K_i(\Omega)}{J} = \omega_n^2 \\ \frac{K_p(\Omega)}{J} = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \end{cases} \quad (III.26)$$

$$\begin{cases} \frac{K_i(\Omega)}{J} = \omega_n^2 \\ \frac{K_p(\Omega)}{J} = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \end{cases} \quad (III.27)$$

Avec :

ω_n : Pulsation libre ou naturelle ou pulsation propre du système non amorti en (rad/s).

ξ : Amortissement du système ou facteur d'amortissement.

Pour un coefficient d'amortissement ξ et une pulsation ω_n donnés, on obtient :

$$\begin{cases} K_i(\Omega) = \omega_n^2 \cdot J \\ K_p(\Omega) = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot J \end{cases} \quad (III.28)$$

III.2.3.2.4) Régulateurs de flux φ_r

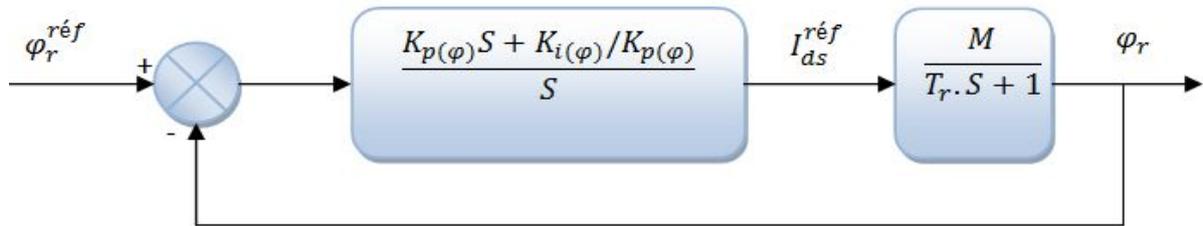


Figure III.9 : schéma bloc de la régulation de flux

Compensons le pôle $(s + \frac{1}{T_r})$ par $(s + \frac{K_i(\varphi)}{K_p(\varphi)})$, ce qui se traduit par la relation suivante :

$$\frac{K_i(\varphi)}{K_p(\varphi)} = \frac{1}{T_r} \quad \text{telque : } T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (III.29)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est la suivante :

$$FT_{bf}(s) = \frac{K_p(\varphi) \cdot M/T_r}{S + K_p(\varphi) \cdot M/T_r} = \frac{1}{\frac{1}{K_p(\varphi) \cdot M/T_r} \cdot S + 1} \quad (III.30)$$

D'où la constante du temps associée à ce régulateur est donnée sous la forme suivante :

$$\tau = \frac{1}{K_p(\varphi) \cdot M/T_r} = \frac{T_r}{K_p(\varphi) \cdot M} \quad (III.31)$$

$$\text{D'où : } \begin{cases} K_p(\varphi) = \frac{T_r}{M \cdot \tau} \\ K_i(\varphi) = \frac{K_p(\varphi)}{T_r} \end{cases} \quad (III.32)$$

III.2.3.3) Commande par mode glissant

La commande par le mode glissant est une commande à structure variable. Les premiers travaux sur ce type de commande ont été menés dans l'ancienne U.R.S.S à partir des années 60. Elle est basée essentiellement sur la résolution des équations différentielles à seconde membre discontinu, initiée par le mathématicien soviétique A.G Filippov. Le véritable essor de l'utilisation de cette technique date de la parution des livres d'Itkis et d'Utkin [46]. Ensuite, les travaux ont été repris aux Etats-Unis par Slotine et au Japon par Young, ce n'est qu'à partir des années 80 que la commande par le mode glissant des systèmes à structure variable est devenue intéressante et attractive. Elle est considérée comme l'une des approches les plus simples pour la commande des systèmes non linéaires et les systèmes ayant un modèle imprécis [47].

III.2.3.3.1) Principe de la commande par mode glissant

La commande par le mode glissant est une technique qui consiste à ramener les trajectoires ou la trajectoire d'état dans le cas d'un système vers une surface de glissement et de commuter en utilisant une loi de commutation appropriée jusqu'au point d'équilibre. Trois modes de fonctionnement peuvent être distingués [46]:

❖ **Le mode convergence (C)**

C'est la phase durant laquelle la variable à contrôler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan d'état et tend vers la surface de glissement (commutation) $S(x)=0$ est caractérisé par le critère de convergence.

❖ **Le mode de glissement (G)**

C'est la phase durant laquelle la variable d'état atteint la surface de glissement. Elle est caractérisée par le choix de la surface de glissement.

❖ **Le mode de régime permanent (P)**

Il est nécessaire pour l'étude de comportement du système autour du point d'équilibre.

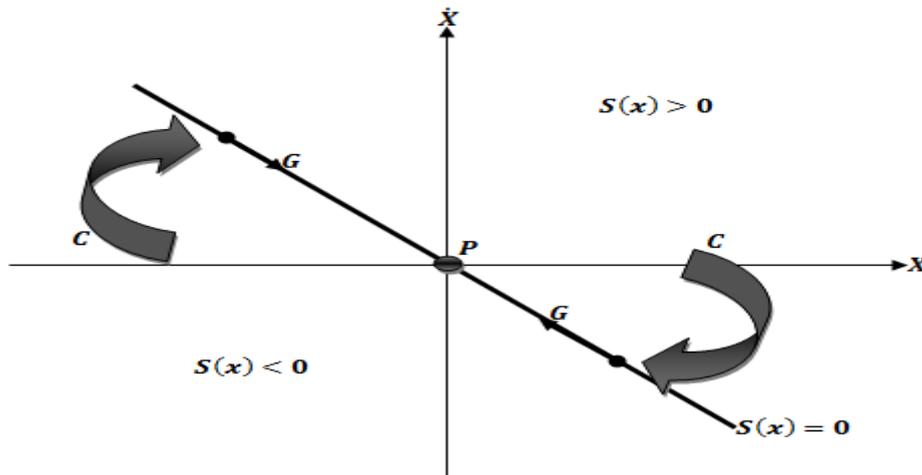


Figure III.10 : Différents modes de trajectoire.

III.2.3.3.2) Principe de l'algorithme de commande par mode de glissement

La conception de la commande par mode glissant prend en compte les problèmes de stabilité et de performances de façon systématique dans son approche qui s'effectue principalement suivant les étapes ci-dessous:

- Choix de la surface,
- Etablissement des conditions d'existence et de convergence.
- Détermination de la loi de commande [48].

a) Choix de la surface de glissement

Le choix de la surface de glissement n'est pas unique, il dépend de l'application et de l'objectif visé. On considère le modèle d'état suivant :

$$[\dot{X}] = [A]. [X] + [B]. [U] \quad (III. 33)$$

Où $[X]$ est le vecteur d'état, $[U] \in \mathbb{R}^m$ est le vecteur de commande, avec $n > m$ généralement, le choix du nombre des surfaces de glissement est égale au dimensionnement du vecteur de commande [46]. Afin d'assurer la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur de référence x^{ref} , on aborde la forme générale suivante [47] :

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{r-1} . e(x) \quad (III. 34)$$

Avec :

- λ : Gain positif.
- $e(x) = x^{r_{\text{éf}}} - x$: L'écart de la variable à réguler.
- r : Degré relatif, c'est le nombre de fois qu'il faut dériver la surface pour faire apparaître la commande, donc $\frac{ds}{dx} \neq 0$ pour assurer la contrôlabilité.

Cette commande réside sur le maintien de la surface $S(x)$ à zéro ($e(x)$ tend vers zéro) pour un choix fiable du gain λ et c'est l'objectif de la commande.

b) Conditions de convergence et d'existence

Les conditions de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation. Pour ce faire, on distingue deux conditions :

➤ Fonction discrète de commutation

C'est la première condition de convergence, elle est proposée et étudiée par **EMILYANOV** et **UTKIN**. Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro, est donnée par la formule suivante :

$$\dot{S}(x).S(x) < 0 \quad (III. 35)$$

➤ Fonction de LYAPONOV :

La fonction de LYAPONOV est une fonction scalaire positive pour les variables d'état du système. Ce choix est indispensable pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence. La fonction de LYAPONOV est définie comme suivant:

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (III. 36)$$

La dérivée de cette fonction est :

$$\dot{V}(x) = \dot{S}(x).S(x) \quad (III. 37)$$

Pour que la fonction $V(x)$ puisse décroître, il suffit d'assurer que sa dérivée est négative. Ceci est possible si la condition $\dot{S}(x).S(x) < 0$ est vérifiée.

L'équation (III.36) explique que le carré de la distance entre un point donné du plan de phase et la surface de glissement exprimée par $S^2(x)$ diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger à partir des deux cotés de cette dernière. Cette condition suppose un régime glissant où la fréquence de commutation est infinie.

III.2.3.3.3) Application de la commande à la MAS

i) Choix des surfaces de glissement

Le choix de la surface de glissement tient compte d'apparaître la grandeur de commande d'une manière explicite via la dérivée temporelle de cette surface. Dans notre cas, nous avons choisi les surfaces de glissement suivantes :

$$S_{\varphi_r} = \varphi_r^{ref} - \varphi_r \quad (III.38)$$

$$S_{W_r} = W_r^{ref} - W_r \quad (III.39)$$

ii) Conditions de convergence et d'existence

$$\dot{S}(x).S(x) < 0 \quad (III.40)$$

$$(\dot{W}_r^{ref} - \dot{W}_r).(W_r^{ref} - W_r) < 0 \quad (III.41)$$

$$V_w(x) = \frac{1}{2}(S^2(x)) = \frac{1}{2}(W_r^{ref} - W_r) \quad (III.42)$$

$$(\dot{\varphi}_r^{ref} - \dot{\varphi}_r).(\varphi_r^{ref} - \varphi_r) < 0 \quad (III.43)$$

$$V_\varphi(x) = \frac{1}{2}(S^2(x)) = \frac{1}{2}(\varphi_r^{ref} - \varphi_r) \quad (III.44)$$

iii) Régulation de flux rotorique

La dérivée de la surface de glissement est donnée comme suite :

$$\dot{S}(\varphi_r) = \dot{\varphi}_r^{ref} - \dot{\varphi}_r \quad (III.45)$$

Avec :

$$\dot{\varphi}_r = -\frac{\varphi_r}{T_r} + \frac{M}{T_r} I_{ds} \quad (III.46)$$

$$\dot{S}(\varphi_r) = \dot{\varphi}_r^{réf} + \frac{1}{T_r} \varphi_r - \frac{M}{T_r} I_{ds} \quad (III.47)$$

$$\dot{S}(\varphi_r) \text{sat}(S(\varphi_r)) \leq -\eta \quad (III.48)$$

$$\dot{\varphi}_r^{réf} + \frac{1}{T_r} \varphi_r - \frac{M}{T_r} I_{ds} \leq -\eta \text{sat}(S(\varphi_r)) \quad (III.49)$$

$$I_{ds} = \frac{T_r}{M} \dot{\varphi}_r^{réf} + \frac{1}{M} \varphi_r + K_1 \text{sat}(S(\varphi_r)) \quad (III.50)$$

iv) Régulation de la vitesse

La dérivée de la surface de glissement de la vitesse de rotation est donnée comme suivant :

$$\dot{S}(w_r) = \dot{w}_r^{réf} - \dot{w}_r \quad (III.51)$$

En remplaçant l'équation (II.39) du 2^{ème} chapitre, dans l'équation (III.8), on obtient :

$$\dot{S}(w_r) = \dot{w}_r^{réf} - \frac{1}{J} p \frac{M}{L_r} \varphi_r I_{sq} + C_r \quad (III.52)$$

$$\dot{S}(w_r) \text{sat}(S(w_r)) \leq -\eta \quad (III.53)$$

$$\left(\dot{w}_r^{réf} - \frac{1}{J} p \frac{M}{L_r} \varphi_r I_{sq} + C_r \right) \leq -\eta \text{sat}(S(w_r)) \quad (III.54)$$

$$I_{sq} = \frac{1}{\varphi_r} \cdot \frac{J L_r}{M p} (\dot{w}_r^{réf} + C_r) + \frac{1}{\varphi_r} \cdot \frac{J L_r}{M p} \eta \text{sat}(S(w_r)) \quad (III.55)$$

III.2.3.3.4) Les avantages et les inconvénients de la commande par mode glissant

➤ Les avantages [49]

- La réponse du système est robuste et insensible aux variations de certains paramètres et aux effets de perturbation de la charge.
- Il suffit de fixer une bonne valeur de k, ce qui simplifie le réglage.
- Le choix de la surface de commutation est assez libre.

➤ Les inconvénients [47]

Dans la pratique, un régime glissant idéal n'existe pas, car la fréquence de commutation des organes de commande a une limite finie. Autrement dit, il n'existe aucun organe de commutation pouvant commuter à une fréquence infinie (en effet, cet organe devait délivrer une énergie infinie). Le caractère discontinu de la commande engendre un comportement dynamique particulier autour d'une couche limite de la surface de glissement qui est communément appelé Phénomène de broutement comme le montre la figure suivante :

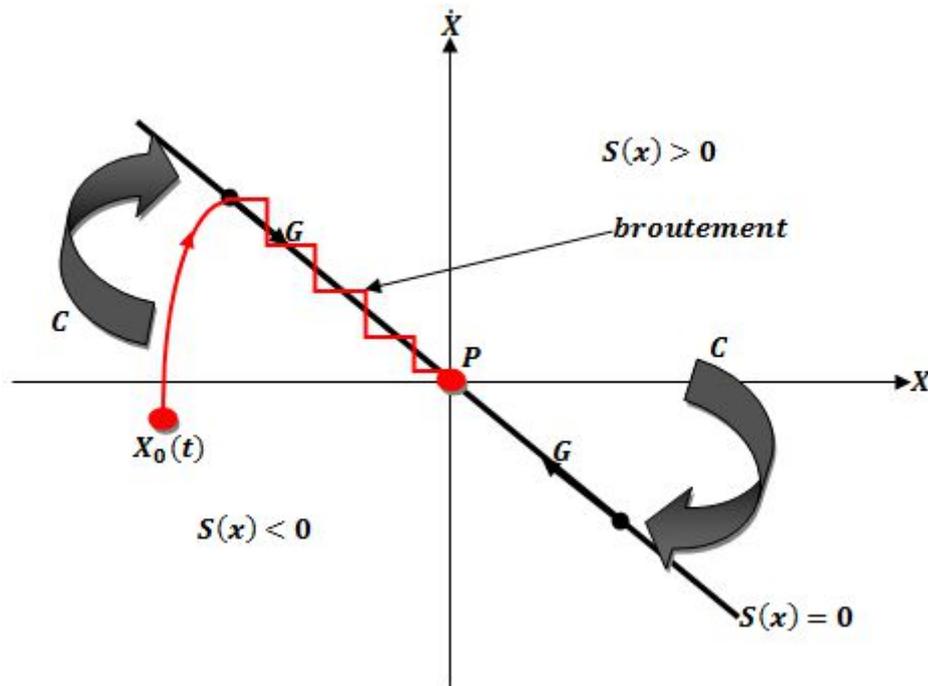


Figure III.11 : Phénomène de broutement.

Conclusion

Dans ce chapitre, la première partie est consacrée au dimensionnement de notre système où nous avons élaboré une étude dimensionnelle des éléments constituant la chaîne de pompage photovoltaïque étudiée. D'autre part, nous avons abordé deux stratégies de commande vectorielle (contrôle par régulateurs PI et contrôle par mode glissant) qui seront implantées et exécutées dans le chapitre suivant ainsi que les résultats de simulation du système global.

Chapitre IV

Simulation de la chaîne de pompage photovoltaïque

Introduction

Afin d'évaluer les performances des méthodes de commande étudiées, on a procédé à des tests en simulation via l'outil MATLAB/SIMULINK. Le premier contrôle vectoriel est linéaire à base de PI classique, tandis que le deuxième est non linéaire par mode glissant, utilisé pour améliorer les performances du système étudié.

La structure globale du système de pompage photovoltaïque exécuté est illustrée dans la figure suivante :

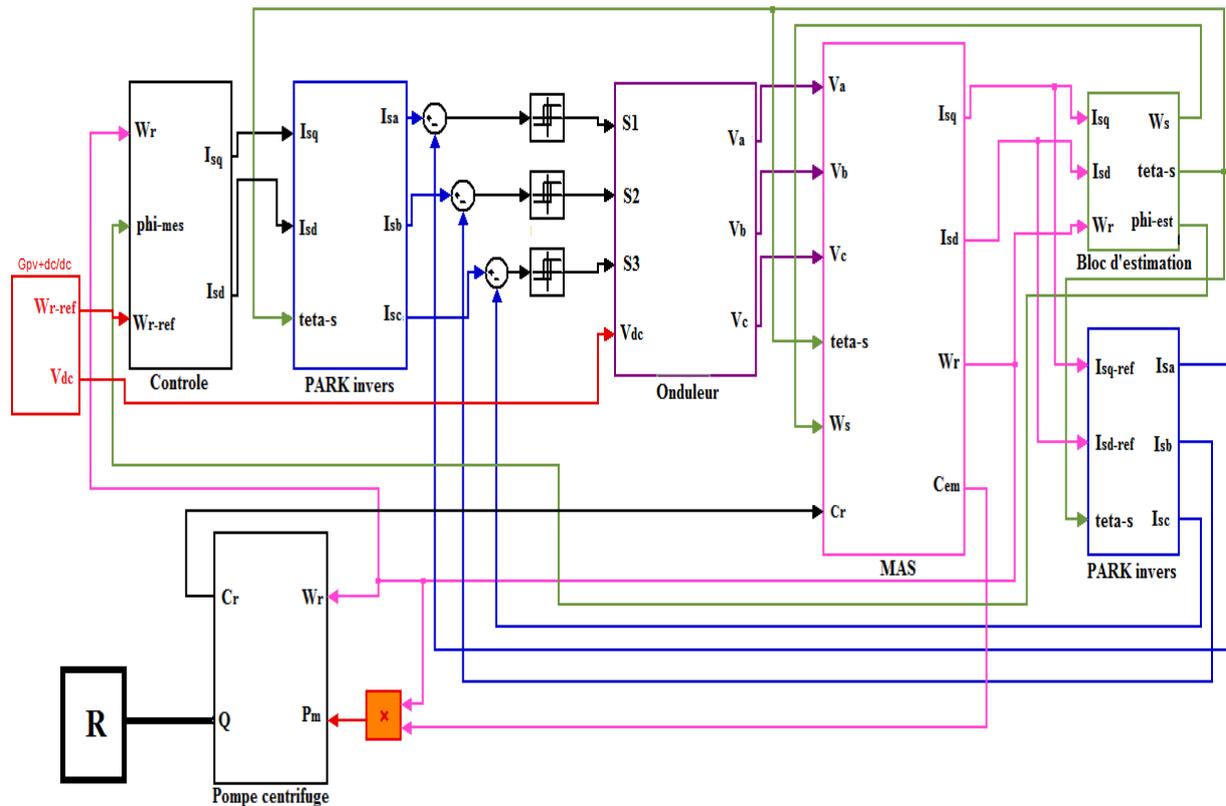


Figure IV.1 : Schéma global de la chaîne de pompage photovoltaïque étudiée

IV.1) Résultats de la simulation du système de pompage photovoltaïque

Pour tout ce qui suit :

- Le temps d'échantillonnage fondamental est fixé à 10^{-5} s
- La vitesse de référence est calculée par la relation suivante :

$$w_r^{ref} = 150 \left(\sqrt[3]{P_{PV} \cdot \frac{R_{mp}}{P_n}} \right);$$

Avec : P_{PV} : puissance photovoltaïque

P_n : puissance nominale du moteur

R_{mp} : Rendement du groupe motopompe

➤ Le profil d'irradiation est le suivant:

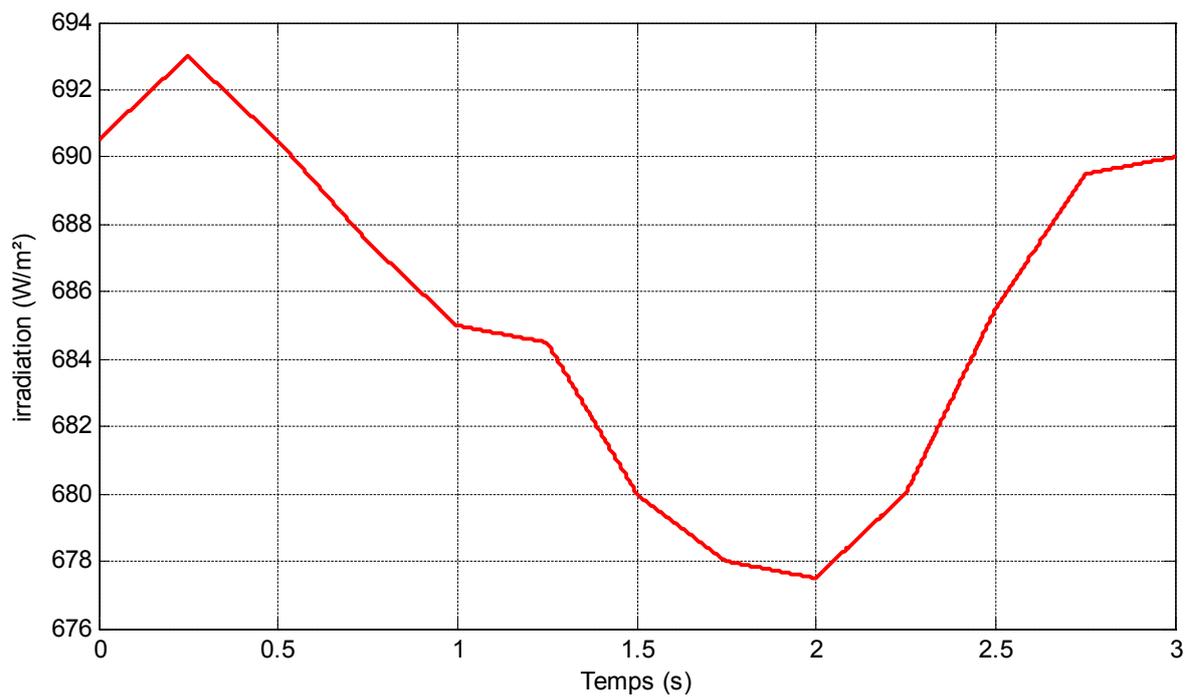


Figure IV.2 : Profil d'enseillement

➤ Le profil de la température est le suivant :

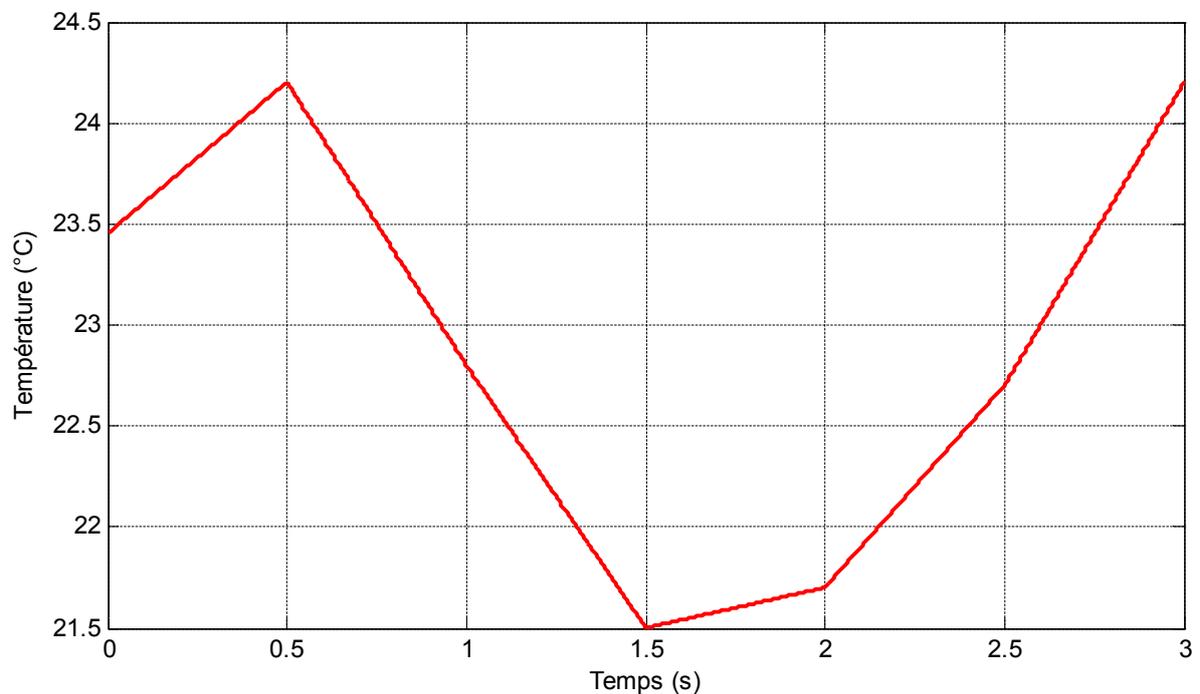


Figure IV.3 : Profil de la température

L'évolution de la puissance générée par le générateur photovoltaïque est illustrée dans la figure ci-dessous :

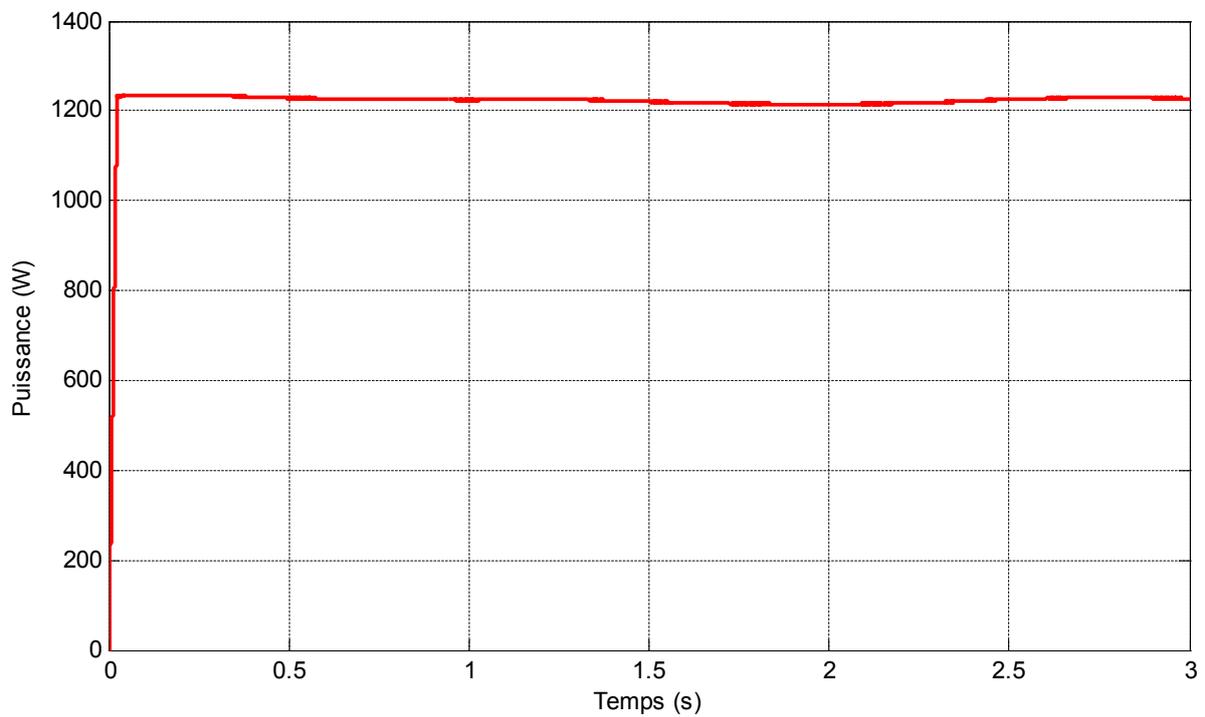


Figure IV.4 : Allure de la puissance

IV.1.1) contrôle par PI classique

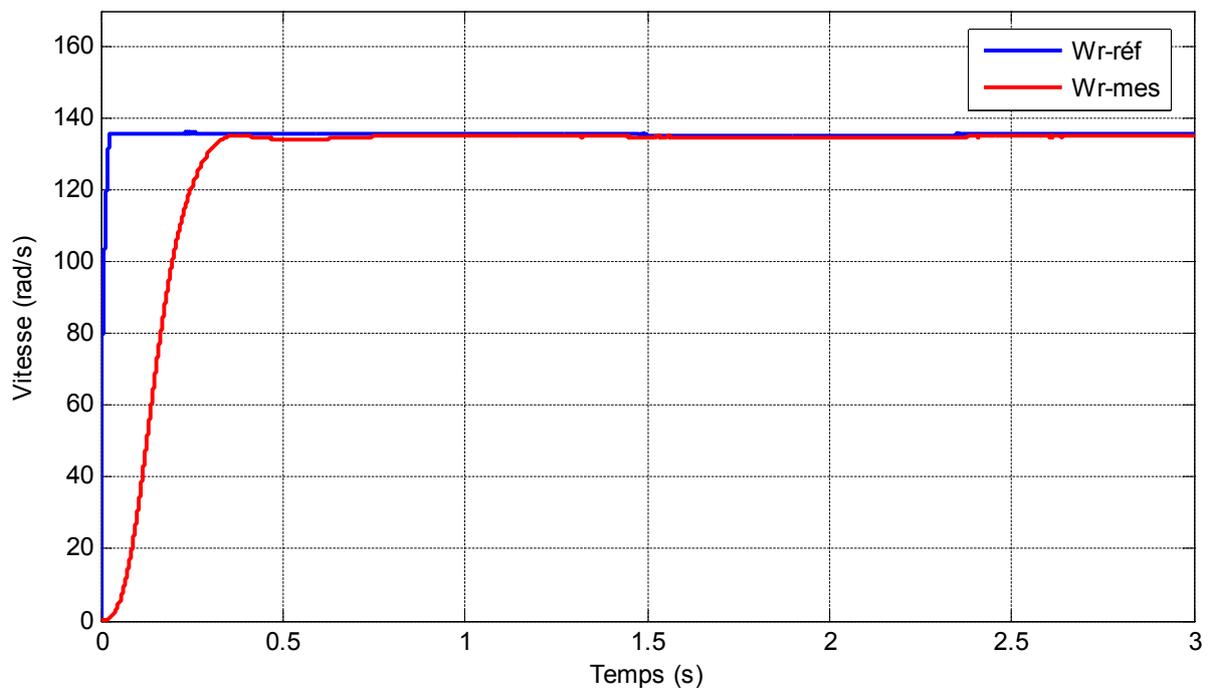


Figure IV.5 : Evolution de la Vitesse

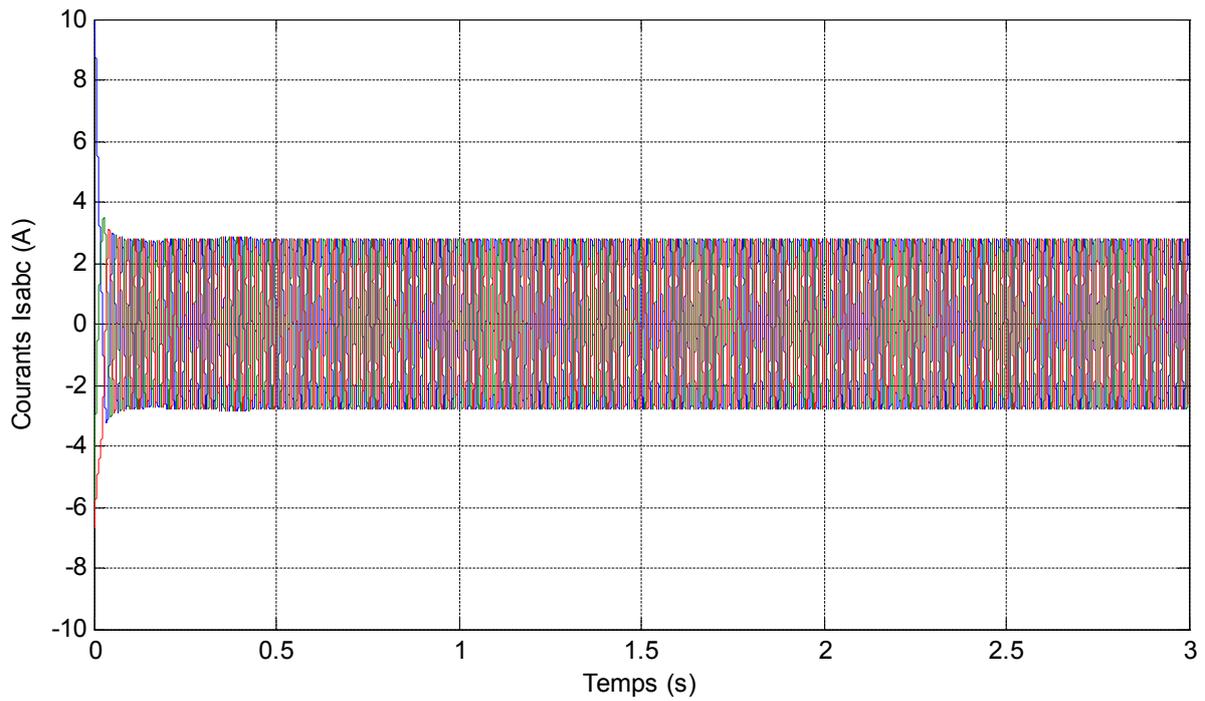


Figure IV.6 : Allure des courants statoriques

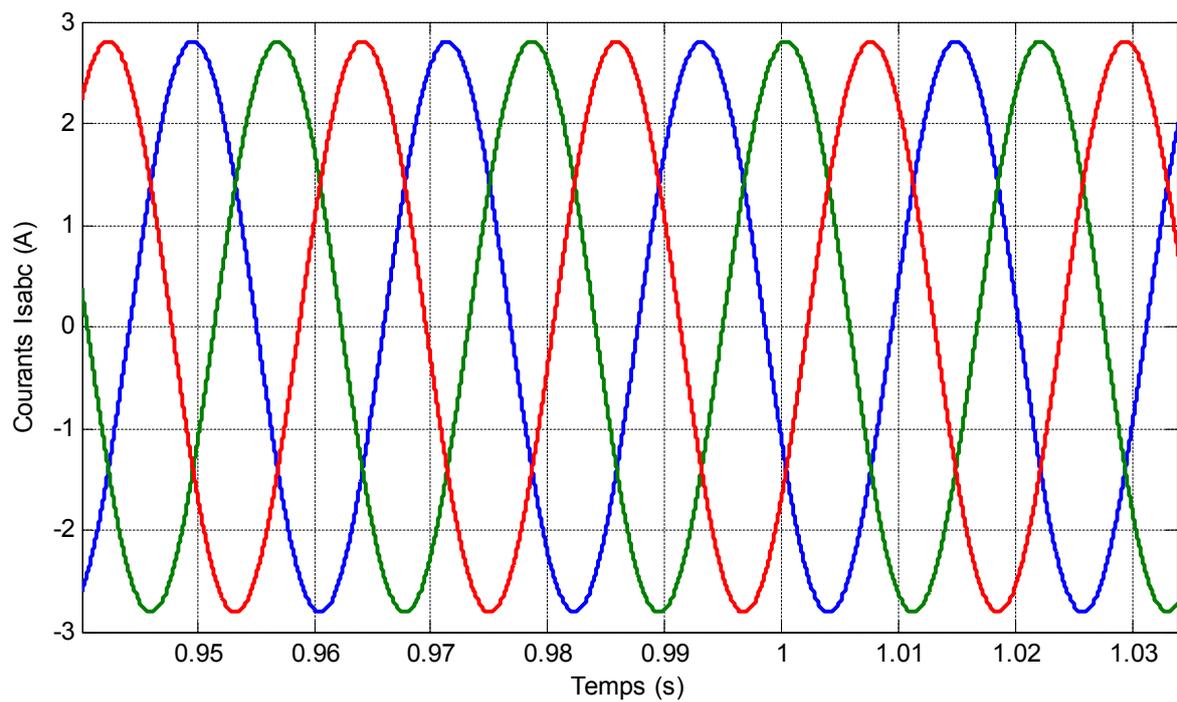


Figure IV.7 : ZOOM sur les courants statoriques

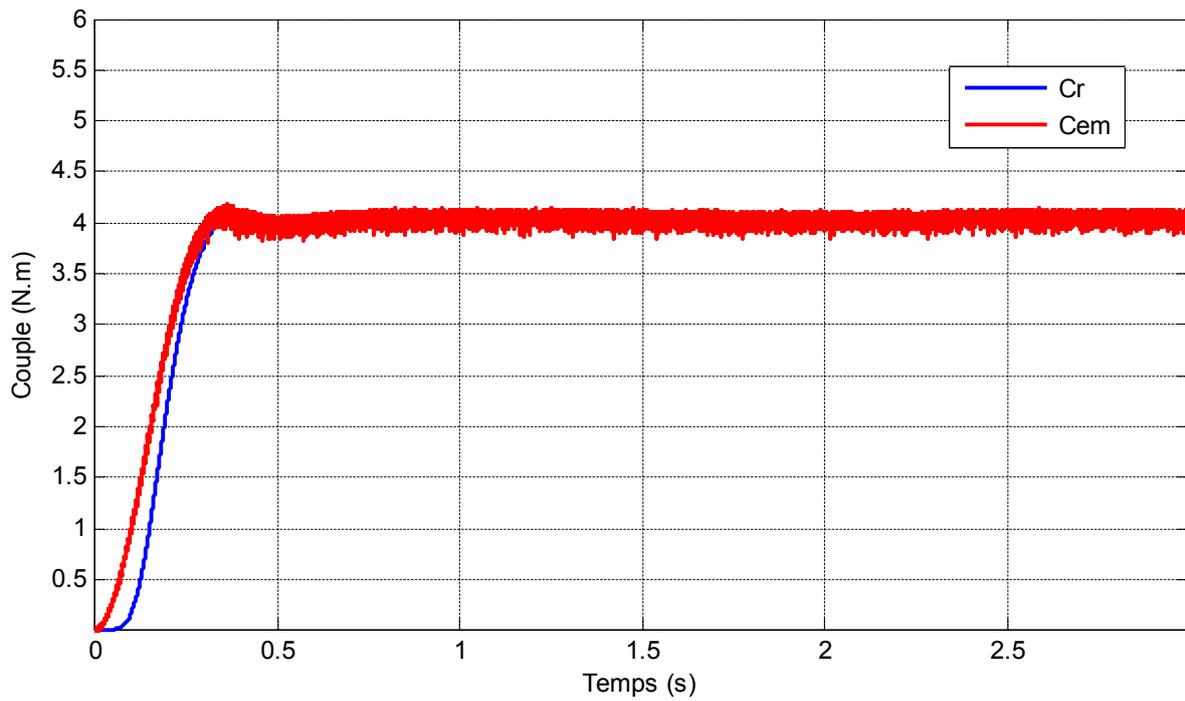


Figure IV.8 : Allure du Couple électromagnétique/Couple résistant

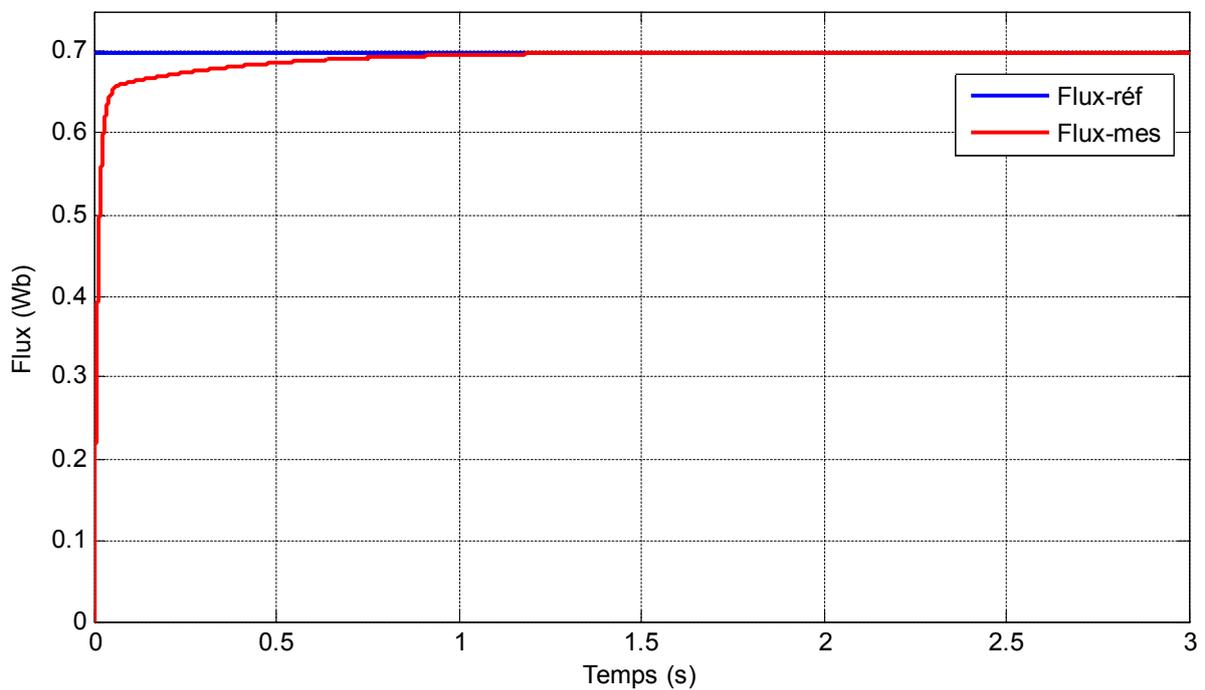


Figure IV.9 : Evolution du flux

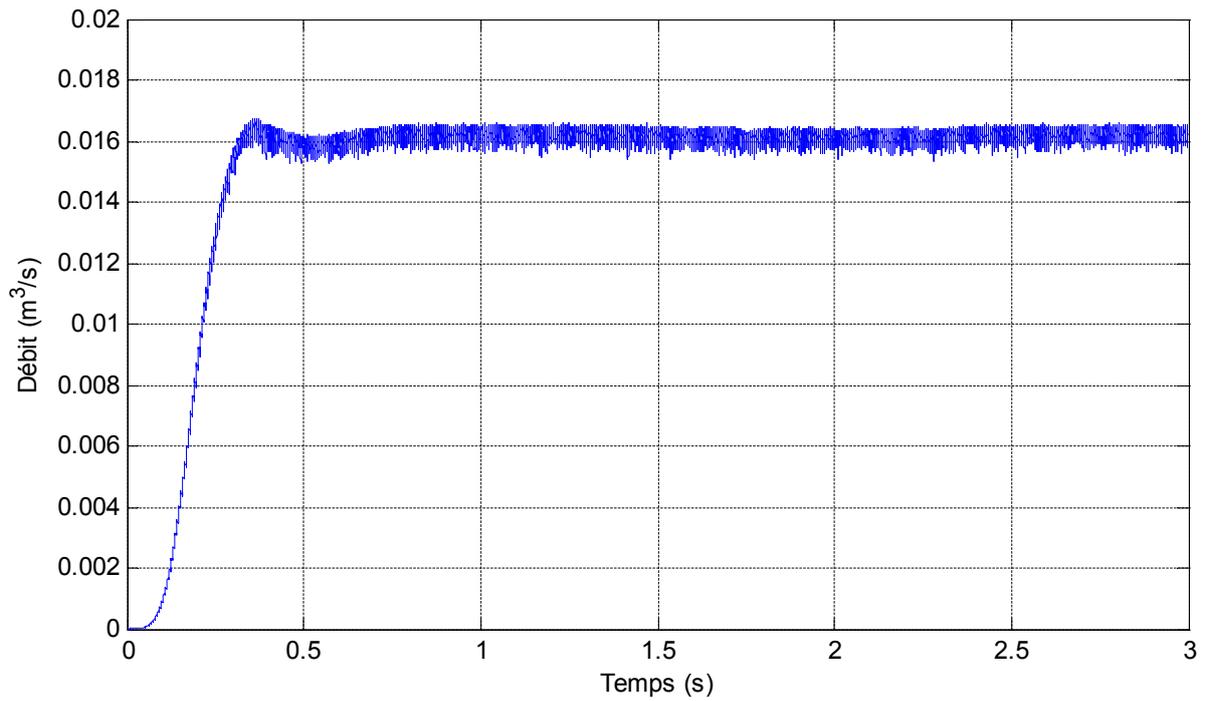


Figure IV.10 : Evolution du débit

IV.1.2) contrôle par mode glissant

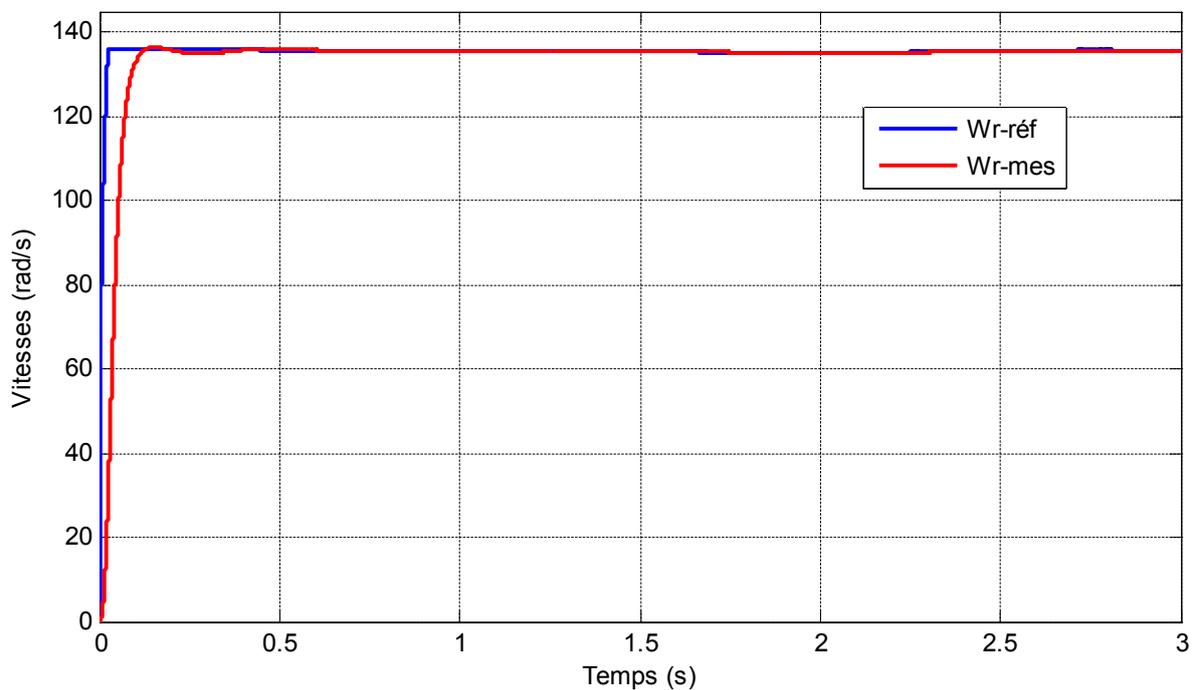


Figure IV.11 : Evolution de la Vitesse

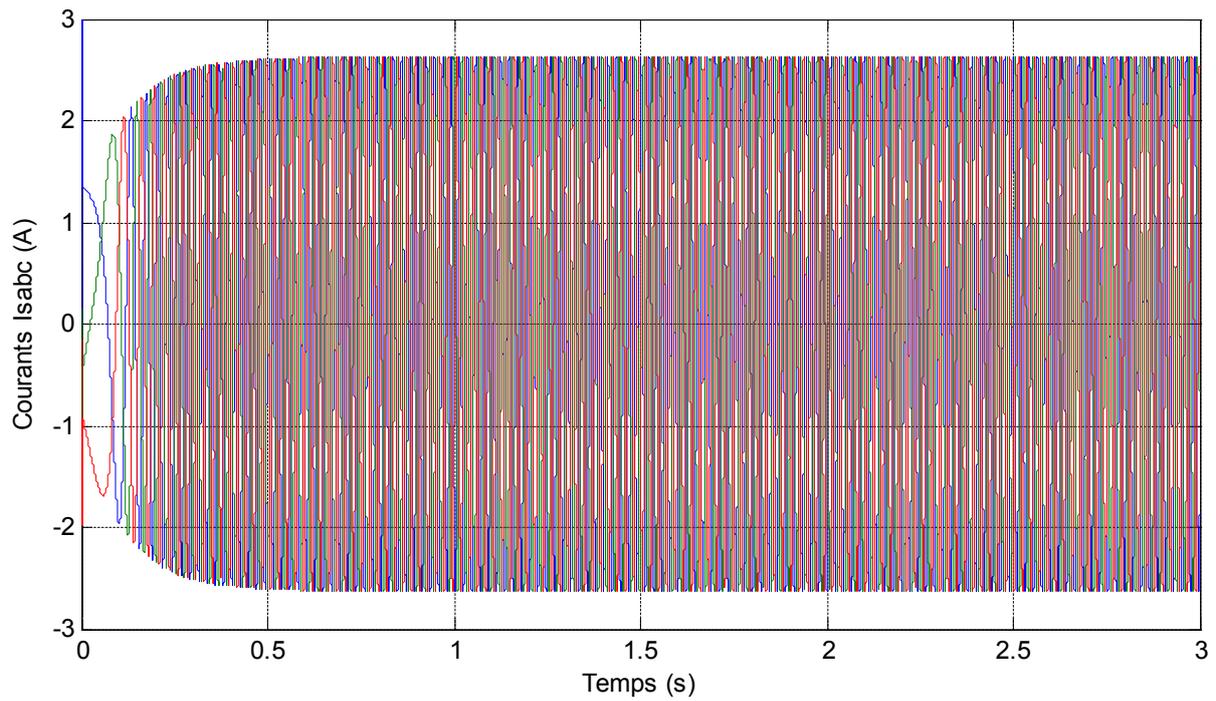


Figure IV.12 : Allure des Courants statoriques

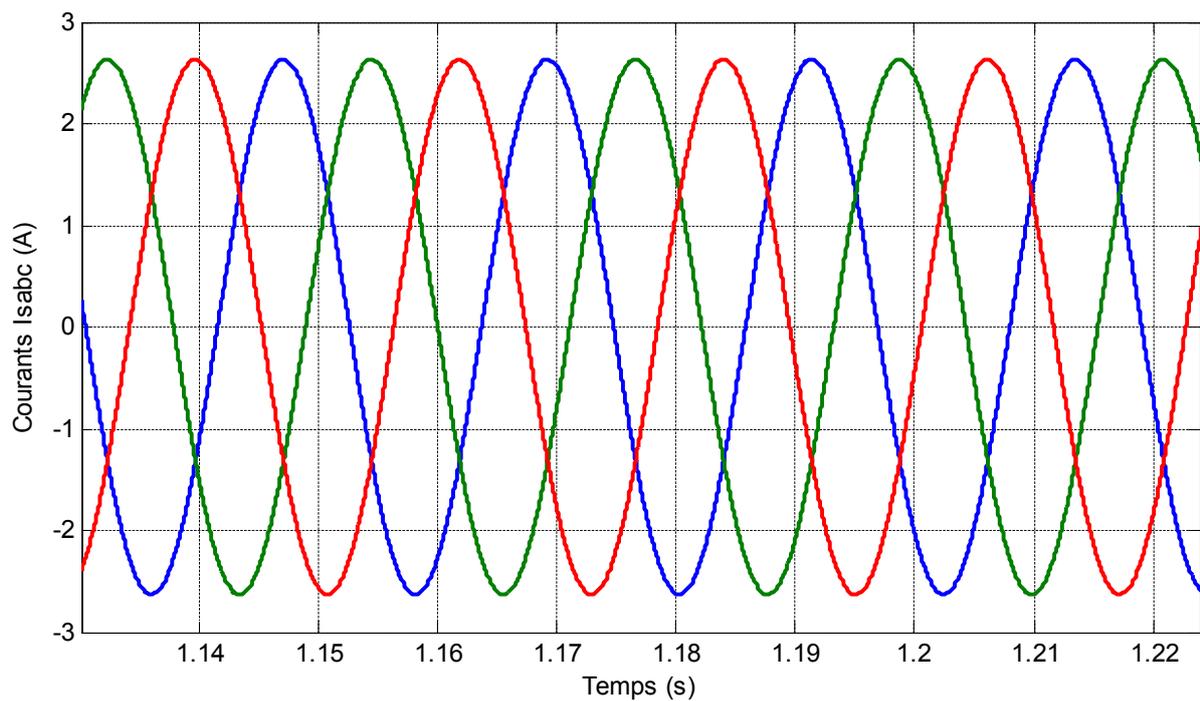


Figure IV.13 : Zoom sur les Courants statoriques

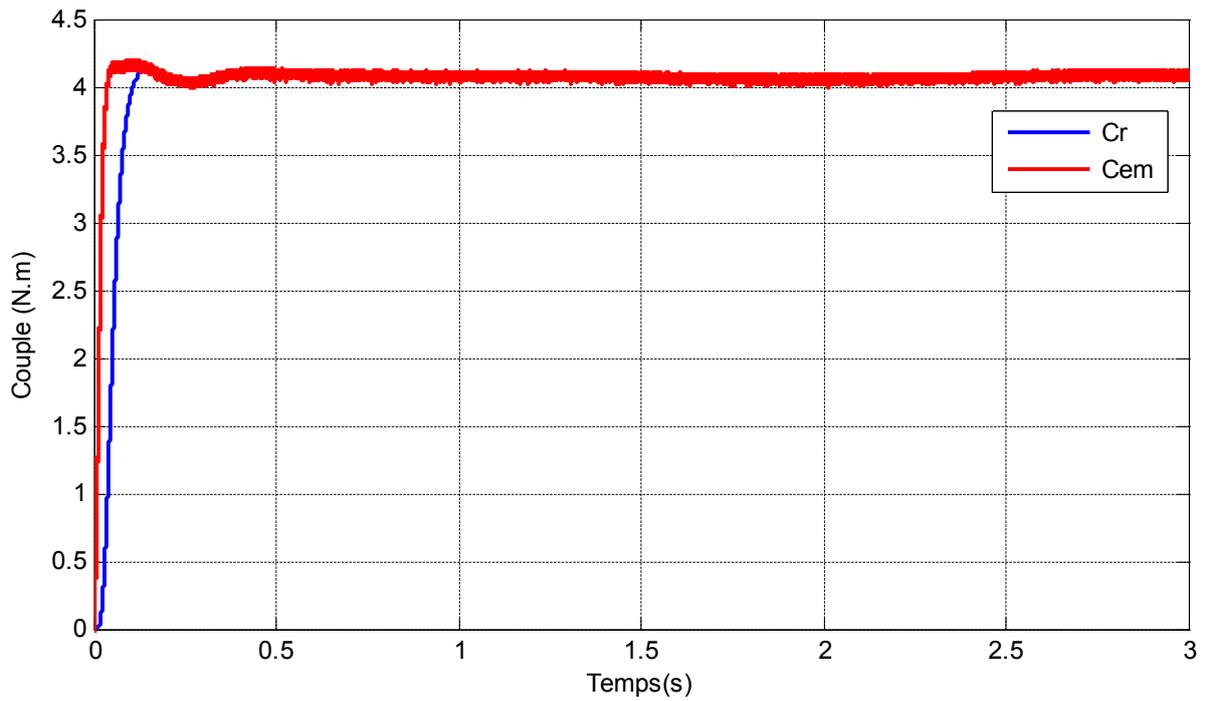


Figure IV.14 : Allure du Couple électromagnétique/Couple résistant

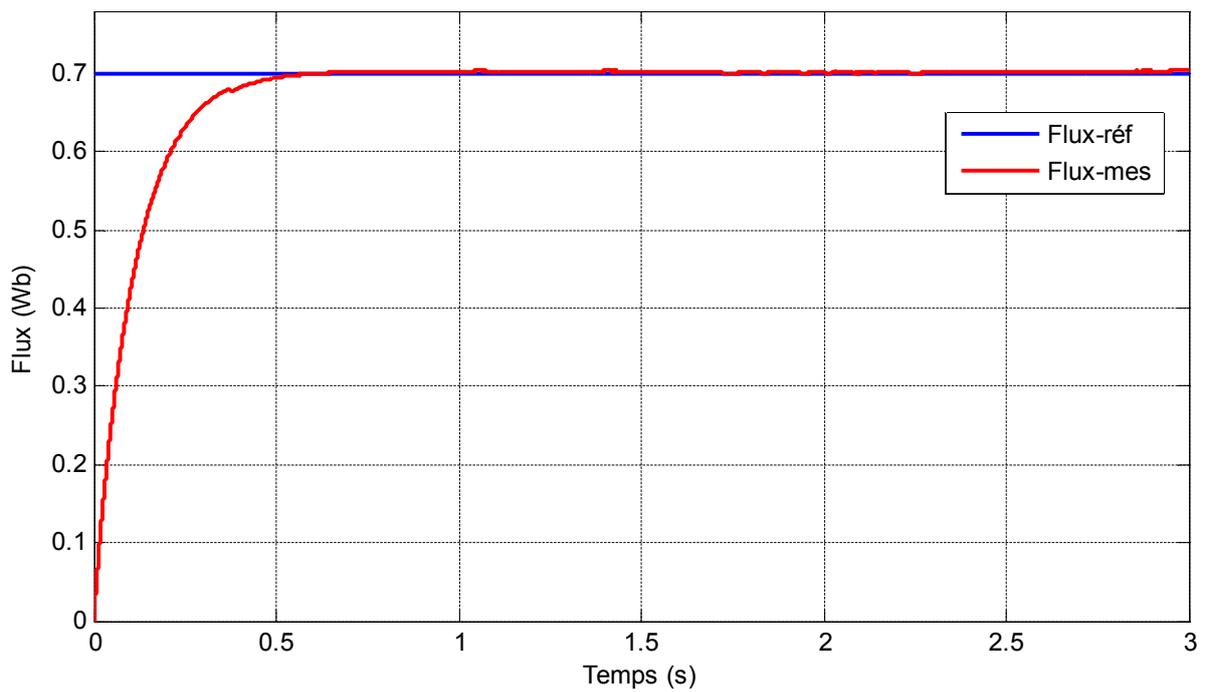


Figure IV.15 : Evolution du flux

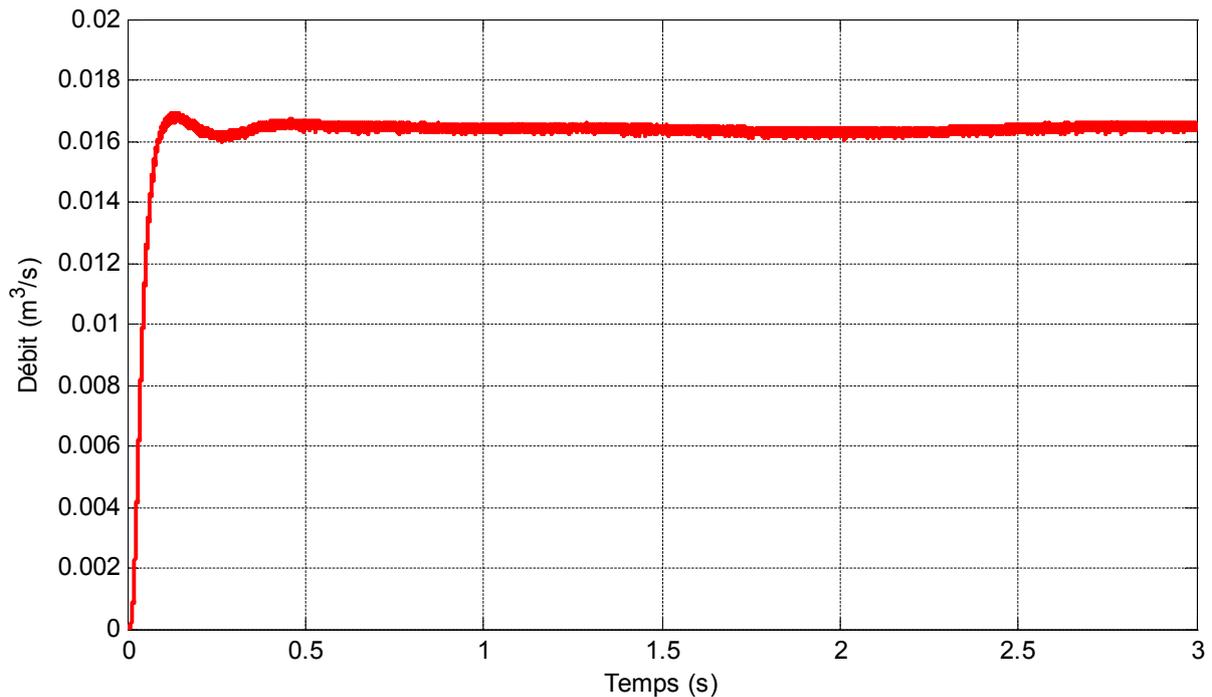


Figure IV.16 : Evolution du débit

IV.2) Interprétation des résultats

A partir des courbes obtenues, on remarque que :

- ❖ La vitesse de rotation $W_{r\text{-mes}}$ du moteur suit convenablement la vitesse de consigne $W_{r\text{-réf}}$ posée comme référence sans dépassement avec un temps de réponse de l'ordre de **0,39s** ; **0,13s** pour le mode PI et glissant respectivement avec une sensibilité remarquable à la variation de la vitesse de consigne pour le mode PI
- ❖ Les courants statoriques I (s_a , s_b , s_c) ont une forme sinusoïdale pour le mode PI et glissant de valeur efficace estimé à **2,84 A** ; **2,63 A** respectivement, avec un appel important au démarrage pour le mode PI.
- ❖ le couple électromagnétique et le couple résistant sont confondus à partir du régime permanent; cela reflète une bonne poursuite du couple.
- ❖ Le flux rotorique évolue jusqu'à ce qu'il atteigne la valeur de référence (**0,7 Wb**) pour le mode PI et glissant avec un temps de réponse de l'ordre de **0,89s** ; **0,66s** respectivement.
- ❖ Le débit délivré par la pompe est variable suivant l'évolution de la vitesse de rotation pour les deux modes avec un broutement remarquable pour le mode PI.

IV.3) Teste de robustesse

On procède comme suite :

On simule notre système de pompage avec les deux stratégies de commande en augmentant la valeur de l'inertie du moteur de 50% ($J'=0,0018$) du moteur asynchrone.

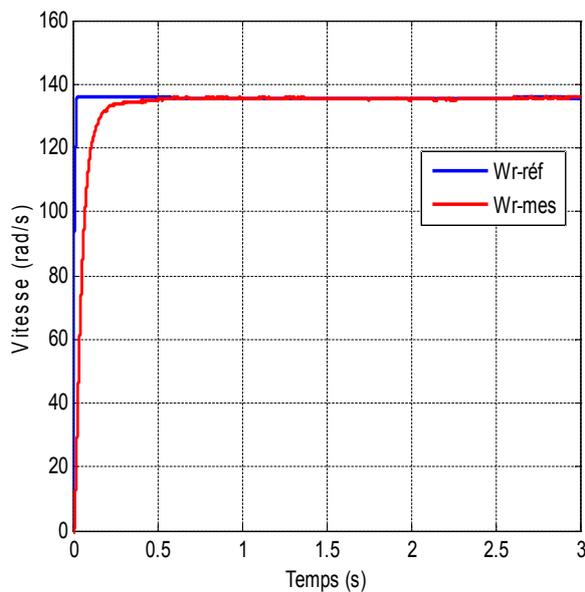


Figure IV.17 : Evolution de la vitesse de rotation en mode glissant

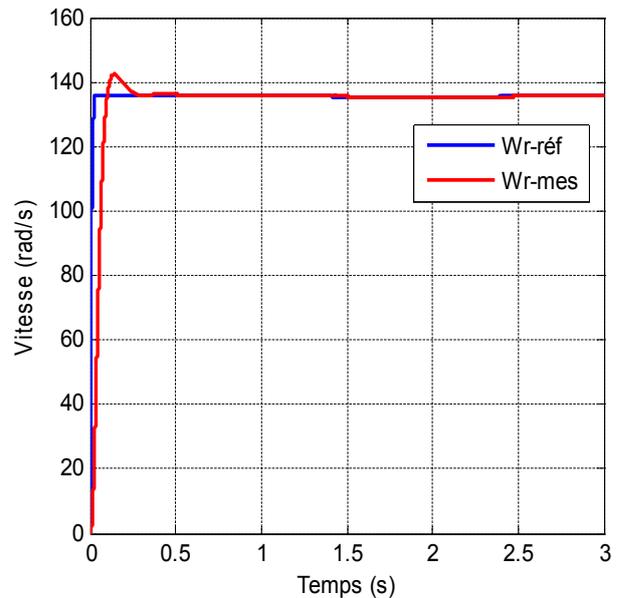


Figure IV.18 : Evolution de la vitesse de rotation en mode PI

Les résultats illustrés dans les figures IV.17, 18 montrent l'efficacité de la commande par mode glissant où la vitesse de rotation suit convenablement la consigne, sans dépassement malgré la variation d'un des paramètres de la machine tandis qu'en mode PI, la vitesse de rotation prend la valeur de la consigne après un dépassement de 7,4%.

Conclusion

Nos résultats de simulation montrent bien la rapidité et la robustesse de la stratégie de commande via mode glissant vis-à-vis les perturbations dues à l'application du couple de charge proportionnel au carré de la vitesse de rotation qui est variable à son tour, et aux variations paramétriques du moteur. En revanche, la poursuite de la vitesse sans dépassement, le découplage, la stabilité et la convergence vers l'équilibre sont assurés sur toute la plage de variations. Ce qui signifie que la commande par mode glissant a amélioré les performances du moteur d'entraînement.

*Conclusion
générale*

Conclusion générale

Notre travail s'est déroulé sur l'implantation d'une commande non linéaire d'un moteur asynchrone utilisé dans un système de pompage photovoltaïque autonome, qui se compose essentiellement d'un générateur photovoltaïque muni d'un hacheur survolteur dit « BOOST » qui assure la conversion « DC/DC » d'une manière élévatrice. Ce dernier est contrôlé par un algorithme dit « MPPT » afin d'atteindre le point de puissance maximale. Le courant issu de ce convertisseur va être transformé en courant alternatif à l'aide d'un onduleur triphasé qui assure la conversion « DC/AC » pour pouvoir alimenter le moteur asynchrone qui entraîne la pompe centrifuge a son tour. Ce dernier est commandé via des régulateurs à hystérésis pour contrôler les courants générés. Finalement, nous avons mis en application deux stratégies de commande vectorielle qui se résume dans le contrôle par régulateurs « PI » et le contrôle par « mode glissant ».

L'objectif de ce travail est d'étudier et contrôler un système de pompage photovoltaïque autonome, avec l'implémentation de la commande non linéaire par mode glissant. Les résultats de simulation ont confirmé l'avantage de cette stratégie en termes de stabilité, rapidité et robustesse ainsi que sa contribution à l'amélioration des performances de la machine.

Comme perspectives nous proposons une commande non linéaire avec des régulateurs flous (la logique floue).

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages et documents techniques

[1] : S. Abouda « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques application aux pompes ». Thèse Doctorat en cotutelle. Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'université de Sfax, année 2015.

[2] : A. Boussekine, N. Guermouche « Contribution à l'étude des systèmes de Pompage photovoltaïque ». Mémoire d'ingénieur d'état. Université de Bejaia 2010.

[3] : M. Belhadj « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome ». Mémoire Magister Centre Universitaire de Bechar 2008.

[4] : A. Laboure, M. Viloz « Energie solaire photovoltaïque ». Environnement et Sécurité. Tome III, Paris, pp. 01-48, 2006.

[5]: SOCOMEC, Cahier technique photovoltaïque 2010.

[6]: P. Werfel « Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts ». Edition Wiley & Sons, February 2009.

[7] : S. Makhoulf « Contribution à l'optimisation des installations photovoltaïques par des commandes intelligentes ». Thèse de doctorat en science. Université de Batna 2013.

[8] : S.LALOUNI « Optimisation de la qualité d'énergie électrique dans le cas d'un chargeur de batteries ». Mémoire de Magister. Université de Bejaia 2005.

[9]: M. Anki et A. Bouallag « Contribution à l'étude et à l'optimisation d'un système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Master. Université de Bejaia 2012.

[10] : N. Touil et S. Ghenbasi « Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Master. Université d'El Oued 2015.

[11] : N. Kehoul et K. Khentache « Etude comparative des modèles d'une cellule photovoltaïque ». Mémoire de Master. Université de Bejaia 2012.

[12] : A. Daoud « Contrôle de la puissance d'un générateur photovoltaïque pour le pompage solaire ». Thèse de Doctorat. Université d'Oran 2013.

[13] : F. Haninou et A. Rouabah « Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Master. Université Ouargla 2014.

[14] : S. AOUI « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque ». Thèse de Magister. Université de Sétif 1 2014.

[15] : L. Boudrahem et L. Djouadi « Commande non linéaire d'un système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Master. Université de Bejaia 2012.

[16]: F. Bendjoudi et F. Lakhdari « Etude et simulation d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries ». Mémoire de Master. Université de Bejaia 2014.

BIBLIOGRAPHIE

- [17] : Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller et Bocar Sada Sy « Le pompage photovoltaïque : manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens ». Université d'Ottawa 1998.
- [18] : Turbomachines -énergies hydraulique et éolienne. Mathieu jenny, MINES NANCY ARTEM, 2017.
- [19] : Dalila Sator-Namane « Machines à courant alternatif ». Edition Ellipses 2010.
- [20]: K. Djermouni et A.Berboucha « commande d'un système photovoltaïque-onduleurs multi niveaux par logique floue optimisé par les algorithmes génétique ». Mémoire de Master. Université de Bejaia 2011.
- [21] : A. Louadah « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Master. Université de Bejaia 2009.
- [22]: H. Othmani, D. Mezghani et A. Mami « Etude d'un système photovoltaïque ». Revue des énergies renouvelables. Vol 3 pp 111-115, 2015.
- [23] : S. Abouda « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques application aux pompes ». Thèse de Doctorat en cotutelle. Université de Reims Champagne-Ardenne et l'Université de Sfax, année 2015.
- [24]: A. Hadj Arab, M. Benghanem et A. Ghabi « Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque ». Revue des énergies renouvelables vol. 8, 2005.
- [25] : FOGELMAN & Régis MONTLOIN « Installations Photovoltaïques dans l'habitat isolé ». Livre édité par : EDISUD, 1983.
- [26] : F .Boumaraf « commande intelligente d'une association convertisseur statique-machine asynchrone à double alimentation ». Thèse de doctorat. Université de Batna 2009.
- [27] : N. Hamdi « modélisation et commande des génératrices éoliennes ». Mémoire de magister. Université de Constantine 2008.
- [28] : K. Kendouci « contribution à la commande sans capteur mécanique d'une machine synchrone à aimant permanent ». Thèse de doctorat. Université d'Oran 2012.
- [29] : A. SI. Amour « contribution a la commande par mode glissant d'ordre fractionnaire ». Thèse de doctorat. Université de tizi-ouzou 2011.
- [30] : N. Hamdi « amélioration des performances des aérogénérateurs ». Thèse de doctorat. Université de Constantine 2011.
- [31] : L. Abdelhamid « contribution à l'amélioration des performances des générateurs éoliens-évaluation de l'impact des énergies renouvelables sur l'environnement ». Mémoire de magister. Université de Batna 2012.

BIBLIOGRAPHIE

- [32]: A. Aberbour, K. Idjdaren et Z. Bouderies « Study on sliding mode control of a wind energy conversion system associated to a flywheel energy recovery system ». 2015.
- [33]: M. Hamadache et N. Ouret « commande d'un système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de fin d'étude. Université de Bejaia 2007.
- [34] : A. Achour et A. Aichouche « réglage par mode glissant d'une machine asynchrone ». Mémoire de fin d'étude. Université Mouhamed Boudiaf , M'sila 2005.
- [35]: A. Moumi, N. Hamani, N. Mouti et A. Z. Mokhtari « Estimation du rayonnement solaire par deux approches semi empiriques dans le site de Biskra ». Centre Universitaire de Béchar–Algérie, 11 et 12 Novembre 2006.
- [36]: F. Lasnier et T. G. Ang « Photovoltaic Engineering Handbook ». IOP Publishing Ltd. 1980.ISBN 0-85274-311-4.
- [37]: Djarallah et Mohamed « Contribution a l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couples au réseau électrique ». Université de Batna. Thèse de Doctorat en Science 2008.
- [38]: B. Mohammed « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque autonome». Centre Universitaire De Bechar Mémoire de Magister, 2007-2008.
- [39]: M. Angel et C. Pastor « Conception et réalisation de modules Photovoltaïque électroniques ». Thèse de Doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse 2006.
- [40]: J. Royer et T. Djako « Le pompage photovoltaïque ». Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens. Université d'Ottawa 2002.
- [41]: M. L. Degla et B. Ben ahmed « Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque ». Mémoire de fin d'étude. Université de Kasdi Merbah, Ouargla 2017.
- [42]: B. Multon, H. B. Ahmed et N. Bernard « Les moteurs électriques pour applications de grande série ». Pierre-Emmanuel CAVAREC Antenne de Bretagne de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan. Revue 3EI juin 2000.
- [43]: B. Azoui et M. Djarallah « Dimensionnement et expérimentation d'un système photovoltaïque de pompage d'eau utilisant un moteur à aimants permanents sans balais collecteur ». Journée d'Etude sur l'Energie Solaire, Mardi 01 mars 2005, Bejaia.
- [44]: W. Xiao « A Modified Adaptive Hill Climbing Maximum Power Point Tracking (MPPT) Control Method for Photovoltaic Power Systems ». The university of British Columbia 2003.
- [45]: Akihiro Oi « Design and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System ». Faculty of California Polytechnic State University 2005.

BIBLIOGRAPHIE

[46]: Lionel Vechiu « Modélisation et Analyse de l'Intégration des Énergies Renouvelables dans un Réseau Autonome ». Université du Havre 2005.

[47]: Nattorn Pongratananukul « Analysis and Simulation Tools for Solar Array Power Systems ». University of Central Florida 2005.

[48]: D. Sera, T. Kerekes, R. Teodorescu and F. Blaabjerg « Improved MPPT method for rapidly changing environmental conditions ». Aalborg University/Institute of Energy Technology, Aalborg, Denmark 2006.

[49]: H. Schmidt « From the solar to the PV generator ». Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems: Course book for the seminar: Photovoltaic Systems, Freiburg 1995.

[50]: Trishan Eram, Student Member, IEEE, and Patrick L. Chapman, Senior Member, IEEE « Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques ». IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION 2006.

[51]: M. boukli Hassan Omar « Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleur gestion énergétique ». Mémoire de magister. Université de Tlemcen 2011.

[52] : S. Belaid Lalouni « Cours énergie solaire photovoltaïque ». Destiné aux étudiants de Master 2 Spécialité Energies Renouvelables, 2015.

[53] Cours électronique de puissance, Conversion continu-alternatif, Onduleurs , DUT, Université Joseph Fourier

[54] : D. ait kaid « commande d'une machine asynchrone sans capteur mécanique, à l'aide des régulateurs fractionnaires ». Mémoire d'ingénieur. Université de tizi-ouzou 2011.

Documents internet

[WEB1]: <http://www2.cnrs.fr/presse/communique/371.htm>, consulté en avril 2018.

[WEB2]: http://elrz.ru/image/data/categri/sait/kak_proverit_asinhronnij_dvigatel.JPG consulté en avril 2018.

[WEB3]: <https://www.energieplus> consulté en mai 2018.

[WEB4]: <https://www.edf.fr> consulté en mai 2018.

[WEB5]: https://www.kitsolaire-autoconsommation.fr/post/bien-exposer-son-kit_solaire.html consulté en mars 2018.

[WEB 6] : <https://www.infoclimat.fr> consulté en mars 2018.

Annexes

✓ Caractéristiques de générateur photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques PV utilisés sont de type SIEMENS SM 110-24, 110 W_c. Ses caractéristiques principales sont présentées dans le tableau suivant :

Paramètres	Valeurs
Puissance maximale de panneau P _{mpp}	110 (W)
Courant au point de puissance maximale I _{mpp}	3,15 (A)
Tension au point de puissance maximale V _{mpp}	35 (V)
Courant de court-circuit I _{cc}	3,45 (A)
Tension en circuit-ouvert V _{co}	43,5 (V)
Coefficient d'incrémentation du courant α_{cc}	1,4 (mA/°C)
Coefficient d'incrémentation de la tension β_{co}	-152 (mV/°C)
Constante de Boltzmann K	1,38.10 ⁻²³ (SI)
Charge de l'électron q	1,602.10 ⁻¹⁹ (c)
Bande d'énergie du semi-conducteur E _g	1,1 (ev)

✓ Caractéristiques de la machine asynchrone

La machine utilisée est une machine asynchrone à cage d'écureuil standard. Ses paramètres principaux sont présentés dans le tableau suivant :

Paramètres	Valeurs
Tension V	220/380 (V)
Puissance nominale P _n	746 (W)
Vitesse de rotation nominale W _n	1433 (tr/min)
Fréquence f	50 (Hz)
Courant I	3,4 (A)
Inertie J	0,0012 (kg/m ²)
Inductance mutuelle M	0,44 (H)
Inductance cyclique statorique L _s	0,462 (H)
Inductance cyclique rotorique L _r	0,462 (H)
Résistance statorique R _s	5,72 (Ω)
Résistance rotorique R _r	4,2 (Ω)
Coefficient de frottement visqueux F	0
Nombre de paire de pôles P	2

✓ Caractéristiques de la pompe centrifuge

La pompe utilisée est une pompe centrifuge. Ses caractéristiques principales sont présentées dans le tableau suivant :

Paramètres	Valeurs
Vitesse nominale ω_n	150 (rad/s)
Débit nominal Q	23 (m ³ /jour)
Hauteur manométrique HMT	10 (m)
Accélération de la pesanteur g	9,81 (m ² /s)
Rendement R _p	0.56
Densité de l'eau ρ	1000 (kg/m ³)

✓ **Régulateurs utilisés pour la commande vectorielle directe de la MAS**

Les régulateurs utilisés sont des régulateurs de type PI et avec le mode glissant, dans le but de réguler la vitesse de rotation et le flux rotorique. Ses paramètres principaux sont présentés dans le tableau suivant :

Paramètres	Valeurs
Régulateur de flux ϕ_r	$K_{p(\phi_r)}=1,556$, $K_{i(\phi_r)}=37$
Régulateur de vitesse w_r	$K_{p(w_r)}=0,0091$, $K_{i(w_r)}=0,2896$
Régulateur de flux ϕ_r	$K_{MG(\phi_r)}=0,26125$
Régulateur de vitesse w_r	$K_{MG(w_r)}=2,344$

✓ **Paramètres du Hacheur BOOST**

Paramètres	Valeurs
C	9 (mF)
L	6,6 (μ H)