

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



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de fin de d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master en Electromécanique
Option Electromécanique

Thème :

**Contrôle direct du couple appliqué à un système de
pompage photovoltaïque**

Réalisé et présenté par :

M^r BOUCHEFFA Halim

M^r ARKOUB Nabil

Encadré par :

M^{me} S. BELAID

M^r Y. SAHRI

Année Universitaire : 2018/2019

Remerciement :

Nos remerciements les plus vifs et chaleureux, vont à notre promotrice Mme S. BELAND, pour son aide, son orientation judicieuse et sa disponibilité, aussi pour la patience et la compréhension qu'elle nous a toujours manifestées.

Nous remercions également Mr Y. SARRI, qui nous a apporté une aide appréciable pour l'élaboration de ce travail.

Et nous adressons nos chaleureux remerciements aux membres du jury pour nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail.

A travers ce mémoire, nous adressons notre reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Dédicace

A ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurais point te remercier comme il se doit.

Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles de la vie.

A ma future femme

Qui est l'amour de ma vie elle a toujours été là pour moi, elle m'a soutenu pendant toute la durée de ce travail et elle a tout fait pour m'aider M^{lle} Y.

ABBAS.

A mes sœurs

*Qui m'ont toujours donné du courage et que j'adore même si je ne le montre pas trop
sautant N. S. W. N. K. BOUCHEFFA.*

A mon frère

*Qui m'a soutenu et que j'ai trop soulé pendant mon travail et qui a été toujours
là pour moi R. SAÏD.*

Et à tous mes amis, mes collègues et tous ceux qui m'encouragent.

A mon père et à mon frère

*Qui m'ont encouragé pendant ma soutenance et pour leur présence durant mon
mémoire je vous dis merci B. N. BOUCHEFFA*

H. BOUCHEFFA

Liste des Figures

Figure I - 1 : composantes de rayonnement	5
Figure I - 2 : Carte de l'éclairement solaire direct (W/m ²) Prévion - (26/12/17 à 10h30 GMT)	6
Figure I - 3 : Schéma de principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.	8
Figure I - 4 : Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil et avec batterie	11
Figure I - 5 : Systèmes de petite puissance.	12
Figure I - 6 : schéma qui représente les différents composants d'un système photovoltaïque.	13
Figure I - 7 : Pompe centrifuge	16
Figure I - 8 : Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge.	16
Figure I - 9 : Pompe volumétrique.	17
Figure I - 10 : Caractéristiques d'une pompe volumétrique.	17
Figure I - 11 : Irradiation globale moyenne mensuelle journalière sur plan horizontal du site de Bejaïa de 1998 à 2007.	19
Figure I - 12 : structure d'un système de pompage photovoltaïque.	20
Figure II - 1 : schéma équivalent d'un module photovoltaïque.	22
Figure II - 2 : Exemple de caractéristique courant-tension d'un module PV.	24
Figure II - 3 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) et P(V) à T=25°C (1) :1000W/m ² ; (2) : 800W/m ² ; (3) : 600W/m ² ; (4) :400W/m ² .	25
Figure II - 4 : Influence de la température sur la caractéristique I(V) et P(V) à E=1000W/m ² (1): 0 °C ; (2): 25 °C ; (3) : 50 °C ; (4) : 75 °C .	26
Figure II - 5 : schéma électrique d'un hacheur survolteur ou booster.	27
Figure II - 6 : Circuit électrique de l'onduleur.	28
Figure III - 1 : caractéristique $P_{pv} (V_{pv})$ d'un panneau solaire.	38
Figure III - 2 : Organigramme de la méthode Perturbation et Observation.	39
Figure III - 3 : Le schéma synoptique d'un système flou.	40
Figure III - 4 : Structure du contrôleur MPPT flou appliqué au système photovoltaïque.	43
Figure III - 5 : Fonction d'appartenance des entrées et de la sortie du régulateur flou choisi.	44
Figure III - 6 : Principe de fonctionnement du contrôleur MPPT flou.	45
Figure III - 7.a : Allure de la tension photovoltaïque.	46

Figure III - 7.b : Allure de la tension photovoltaïque en régime transitoire.	46
Figure III - 7.c : Allure de la tension en régime permanent.	46
Figure III - 8.a : Allure de la puissance photovoltaïque.	47
Figure III - 8.b : Allure de la puissance photovoltaïque en régime transitoire.	47
Figure III - 8.c : Allure de la puissance en régime permanent.	47
Figure III - 9 : Représentation des vecteurs de tensions générés par l'onduleur.	51
Figure III - 10 : Exemple de l'évolution de l'extrémité de Φ_s pour $R_s \cdot i_s$ négligeable.	52
Figure III - 11 : Exemple d'évolution de l'extrémité de Φ_s pour $R_s \cdot i_s$ négligeable.	53
Figure III - 12 : Sélection du vecteur tension selon la zone N=1.	55
Figure III - 13 : Evolution du flux en utilisant un correcteur à hystérésis à deux niveaux.	57
Figure III - 14 : Evolution du couple en utilisant un correcteur à hystérésis à trois niveaux.	58
Figure III - 15 : schéma global de la DTC avec régulation de vitesse	60
Figure IV - 1.a : Système de pompage PV	63
Figure IV-1.b : Allure de la perturbation	64
Figure IV - 2 : Allure de la tension à la sortie du PV	65
Figure IV - 3 : Allure du courant à la sortie du PV	65
Figure IV - 4 : Allure de la puissance à la sortie du PV.	66
Figure IV - 5 : Allure de vitesse de rotation de la machine en (rad/s) pour la DTC6.	66
Figure IV - 6 : Allure du Courant statorique du moteur asynchrone pour la DTC6.	66
Figure IV - 7 : Allure du Couple électromagnétique et du couple résistant pour la DTC6.	67
Figure IV - 8 : Allure du flux du moteur pour la DTC6.	67
Figure IV - 9 : Allure de l'évolution du flux (Wb) pour la DTC6.	67
Figure IV - 10 : Allure du débit réel à la sortie de la pompe pour la DTC6.	68
Figure IV - 11 : DTC avec 12 secteurs.	69
Figure IV - 12 : Comparateur à hystérésis.	70
Figure IV - 13 : Allure de vitesse de rotation de la machine en (rad/s) pour la DTC12.	71
Figure IV - 14 : Allure du Courant statorique du moteur asynchrone pour la DTC12.	71
Figure IV-15 : Allure du Couple électromagnétique et du couple résistant pour la DTC12.	72
Figure IV - 16 : Allure du flux du moteur pour la DTC12.	72
Figure IV - 17 : Allure de l'évolution du flux (Wb) pour la DTC12.	72
Figure IV - 18 : Allure du débit réel à la sortie de la pompe pour la DTC12.	73

Figure IV - 19 : schéma global de la DTC avec un contrôleur flou.	74
Figure IV - 20 : fonctions d'appartenances d'erreur de flux statorique.	75
Figure IV - 21 : fonctions d'appartenances d'erreur de couple.	75
Figure IV - 22 : fonctions d'appartenances de l'angle de flux statorique.	75
Figure IV - 23 : fonctions d'appartenances du vecteur de commutation de sortie de régulateur FLC.	76
Figure IV - 24 : Allure de vitesse de rotation de la machine en (rad/s) pour la DTC FLC.	77
Figure IV - 25 : Allure du Courant statorique du moteur asynchrone pour la DTC FLC.	77
Figure IV - 26 : Allure du Couple électromagnétique et du couple résistant pour la DTC FLC.	78
Figure IV - 27 : Allure du flux du moteur pour la DTC FLC.	78
Figure IV - 28 : Allure de l'évolution du flux (Wb) pour la DTC FLC.	78
Figure IV - 29 : Allure du débit réel à la sortie de la pompe pour la DTC FLC.	79
Figure IV - 27 : Zoom sur les courants statoriques du moteur asynchrone.	80
Figure IV - 28 : Zoom sur le flux statorique du moteur asynchrone.	81
Figure IV - 29 : Zoom le couple électromagnétique et couple résistant du moteur asynchrone.	81

Liste des tableaux

Tableau I - 1 : Performance des différentes technologies des cellules photovoltaïques.	9
Tableau III - 3 : Table de règles de décision floue.	45
Tableau III - 2 : La table de commutation avec correcteur du couple a trois niveaux.	59
Tableau IV - 1 : Effet des vecteurs de tension pour le DTC 12 secteurs.	69
Tableau IV - 2 : table de vérité pour la DTC à 12 secteurs.	70
Tableau IV - 3 : Base de règles floues.	76
Tableau IV - 4 : Taux de distorsion harmonique pour chaque stratégie de commande.	82
Tableau IV - 5 : Avantages et inconvénients de chaque stratégie de commande.	82

Liste des symboles

- ❖ I_{mpp} : Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum (I_{opt}).
- ❖ V_{mpp} : Tension au point de puissance maximale appelé aussi tension optimum (V_{opt}).
- ❖ I_{sc} : Courant en court-circuit.
- ❖ V_{oc} : Tension en circuit ouvert.
- ❖ I_{od} : Courant de saturation de la diode (A).
- ❖ R_s : Résistance série (Ω).
- ❖ R_{sh} : Résistance shunt (Ω).
- ❖ k : constante de Boltzmann ($k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ (SI)).
- ❖ q : charge de l'électron ($q = 1.62 \cdot 10^{-19} C$).
- ❖ 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).
- ❖ 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} et T_c : Représentent respectivement, la température dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques ($^{\circ}C$).
- ❖ ΔT_c : Représente la variation de la température.
- ❖ ΔI_{pv} : Représente la variation du courant par rapport à l'insolation et à la température.
- ❖ ΔV_{pv} : Représente la variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température.
- ❖ α_{sc} : Représente un coefficient de température, d'incrément de courant I_{sc} quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ($A/^{\circ}C$) (sous les conditions STC).

- ❖ β_{oc} : Représente un coefficient de température, d'incrément de la tension V_{oc} quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ($V/^{\circ}C$) (sous les conditions STC).
- ❖ S_1, S_2, S_3 : Les fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur pour un seul bras.
- ❖ K_f : Coefficient de frottement.
- ❖ P : Nombre de paires de pôles.
- ❖ Ω : Vitesse du moteur asynchrone (rad/s)
- ❖ K_r : Un coefficient de proportionnalité [$(Nm / rad.s^{-1})^2$].
- ❖ P_n : Puissance nominale du moteur asynchrone (W).
- ❖ Ω_n : Vitesse nominale du moteur asynchrone (rad/s).
- ❖ E_{elec} : Energie électrique Habituellement exprimé en (KWh).
- ❖ Q : Débit journalier (m^3 / jour).
- ❖ HMT : Hauteur manométrique (m).
- ❖ R_p : En général le rendement des groupes motopompes.
- ❖ λ : Coefficient des pertes de charge linéaires.
- ❖ D : Diamètre de la tuyauterie (m).
- ❖ L : Longueur de la tuyauterie (m).
- ❖ ε : Coefficient de pertes de charges locales.
- ❖ K_p : Constante de la canalisation.
- ❖ g : Constante de gravité ($9.81 m / s^{-1}$).
- ❖ ρ : La densité de l'eau ($1000 kg / m^3$).
- ❖ i_{as}, i_{bs}, i_{cs} et v_{as}, v_{bs}, v_{cs} : Les courants et tensions statoriques de la machine.
- ❖ φ_{so} : Le vecteur flux à l'instant t=0 (Wb).
- ❖ T_e : La période de commande.
- ❖ $\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$: Flux statorique direct et quadratique (Wb).
- ❖ $\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$: Flux rotorique direct et quadratique (Wb).
- ❖ MPP : Point de puissance maximum (maximum power point).
- ❖ DTC : Contrôle directe du couple (Direct torque control).

❖ FLC : Fuzzy Logic Controller.

I. Chapitre 1	4
I.1 Introduction :	4
I.2 La ressource solaire :	4
I.3 Atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère :	4
I.4 Historique et quelques dates déterminantes dans l'histoire du photovoltaïque :	5
I.5 Gisement solaire en Algérie :	6
I.6 Les composants d'un système photovoltaïque :	7
I.6.1 La cellule photovoltaïque :	7
I.6.2 Principe de fonctionnement :	7
I.6.3 Technologies des cellules photovoltaïques :	8
I.7 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :	10
I.8 Le pompage photovoltaïque :	11
I.8.1 Configuration typique d'un système de pompage photovoltaïque :	11
Systèmes de petite puissance (50-400W) :	12
Les systèmes de moyenne puissance (400-1500 W) :	12
I.8.2 Constitution du système de pompage photovoltaïque a étudier :	13
I.8.2.1 Générateur photovoltaïque	13
I.8.2.2 Les convertisseurs statiques :	13
a) Convertisseur DC-DC (hacheur) :	13
b) Convertisseur DC/AC :	14
I.8.2.3 Groupe moteur-pompe :	14
A. Les moteurs :	14
B. Les pompes :	15
Les pompes centrifuges :	15
Les pompes volumétriques :	16

I.8.3	Quelques définitions	18
I.8.4	Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque :	18
I.9	Conclusion :	21
II.	Chapitre 2	22
II.1	Introduction :	22
II.2	Modélisation du générateur photovoltaïque :	22
II.2.1	Caractéristique courant-tension d'un module :	24
II.2.2	Influence de l'irradiation :	25
II.2.3	Influence de la température :	26
II.3	Modélisation du convertisseur statique DC/DC :	27
II.4	Modélisation de l'onduleur de tension à MLI :	27
II.5	Modélisation de la machine asynchrone à induction :	28
II.5.1	Hypothèses simplificatrices :	28
II.5.2	Equations électriques de la MAS :	29
II.5.3	Equations magnétiques dans le repère <i>abc</i> :	30
II.5.4	Expression du couple électromagnétique :	31
II.5.5	Modèle biphasé de la MAS :	31
II.5.5.1	Equations des flux :	32
II.5.5.2	Expressions du couple électromagnétique :	33
II.5.6	Choix du référentiel :	33
II.6	Modèle de simulation	34
II.7	Modèle de la pompe centrifuge :	35
II.8	Conclusion :	36
III.	Chapitre 3	37
III.1	Introduction :	37
III.2	Adaptation de l'énergie photovoltaïque et la commande MPPT :	37

III.2.1	Méthode de perturbation et d'observation (P&O) :	37
III.3	Méthode à base de logique floue :	39
III.3.1	Introduction à la logique floue :	39
III.3.2	Description d'un régulateur flou :	40
III.3.3	Interface de fuzzification :	40
III.3.4	Bases règles floues :	41
III.3.5	Logique de prise de décision :	41
III.3.6	Interface de défuzzification :	42
III.4	Application de la logique floue pour l'optimisation de la puissance de générateur photovoltaïque :	42
III.4.1	Fuzzification :	43
III.4.2	Inférence floue :	44
III.5	Défuzzification :	45
III.6	Résultats de simulation :	45
III.7	Commande de la machine asynchrone :	48
III.8	La commande directe du couple :	48
III.8.1	Principe de la commande DTC :	48
III.8.2	Caractéristiques principales de la commande directe du couple :	48
III.8.2.1	Avantages :	49
III.8.2.2	Inconvénients :	49
III.8.3	Fonctionnement et séquence d'un onduleur de tension triphasé :	50
III.8.4	Stratégie de commande directe du flux et de couple :	51
III.8.5	Contrôle du couple électromagnétique :	53
III.8.6	Estimateur du flux statorique :	54
III.8.7	Sélection du vecteur de tension :	55
III.8.8	Estimation du couple électromagnétique :	56

III.8.9	Elaboration du correcteur du flux :	56
III.8.10	Elaboration du correcteur du couple :	57
III.8.11	Elaboration de la table de commutation :	58
III.8.12	Schéma fonctionnel de la DTC :	60
III.9	Conclusion :	60
IV.	Chapitre 4	62
IV.1	Introduction :	62
IV.2	Dimensionnement du générateur photovoltaïque :	62
IV.3	Simulation du système de pompage photovoltaïque :	62
IV.4	Résultat de simulation :	65
IV.5	La commande DTC avec table à 12 secteurs :	68
IV.5.1	Résultats de simulation :	71
IV.5.2	Interprétation des résultats :	73
IV.6	Application de la logique floue à la DTC :	73
IV.6.1	Variables floues et fonction d'appartenance :	74
IV.6.2	Base de règles floues :	76
IV.6.3	Résultats de la simulation :	77
IV.6.4	Interprétation des résultats :	79
IV.7	Etude comparative entre les méthodes proposées :	80
IV.8	Conclusion :	83

Introduction générale

Introduction générale

Toujours plus de demandes en énergie ! La consommation énergétique ne cesse d'augmenter à travers le monde dû à la croissance démographique, l'urbanisation et le développement économique. Ceci au détriment des ressources combustibles et fossiles (non-renouvelables) en voie d'extinction. Pour y faire face, plusieurs travaux de recherche visant à trouver des solutions alternatives, basées sur les énergies renouvelables étant inépuisables, permettraient ainsi de garantir la satisfaction mondiale [ZID18].

Dont l'énergie solaire photovoltaïque, prisée dans diverses utilisations comme l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération et le pompage. Les systèmes PV ne nécessitent aucun apport extérieur de combustible ; de plus, leurs générateurs eux-mêmes ne contiennent aucune pièce mobile et ne requièrent donc pratiquement pas d'entretien. Par conséquent, les coûts récurrents d'opération et de maintenance sont relativement bas. C'est pour ces raisons, que cette source d'énergie convient particulièrement bien pour les utilisations en milieu rural où les populations sont réparties dans de petites communautés et où la demande énergétique est faible [AIT07].

Le pompage photovoltaïque est l'une des applications prometteuses de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque. vu que le pompage d'eau est un facteur important dans le développement des zones rurales et isolées des pays en voie de développement. L'emploi de système de pompage photovoltaïque (PV) pour l'exhaure d'eau dans ces zones s'avère une solution très fiable à condition d'être bien dimensionné. Le dimensionnement des systèmes PV, en particulier ceux de pompage d'eau, nécessite l'utilisation de modèles qui reflètent la réalité et ils se doivent d'être précis [BAK12].

Afin d'améliorer les performances du système de pompage, une commande non linéaire sera appliquée. La machine asynchrone répond parfaitement à cette instruction, c'est pour cela qu'elle a pu bénéficier d'une grande attention depuis son apparition, dans le but de moderniser les installations. Grâce à l'évolution technologique de l'électronique de puissance et de la micro-informatique, le domaine d'entraînement électrique à vitesse variable a connu ces dernières années un essor considérable. Cet avantage a joué en faveur de la MAS, car actuellement, elle est au podium de la réalisation de la majorité des entraînements à vitesses variables.

Des commandes assez laborieuses ont été mises au point pour réaliser un contrôle découplé de la machine asynchrone en utilisant des repères appropriés. La commande directe du couple « Direct Torque Control » proposée par Takachachi et Depenbrok, est apparue dans

la deuxième moitié des années quatre-vingt. Ce type de commande se démarque par son innovation par rapport à ce qui a été conçu auparavant et constitue une avancée méthodologique dans la commande des machines. En effet, la commande DTC à partir des références : le couple et le flux, ne recherche pas les tensions à appliquer à la machine, mais recherche le meilleur état de commutation de l'onduleur pour satisfaire les exigences de l'utilisateur. C'est une technique de plus en plus utilisée pour la commande des associations onduleur-machine asynchrone. Elle a fait ses preuves mais qui n'étaient pas sans inconvénients. De ce fait, beaucoup de recherches ciblent à développer les performances de cette stratégie de commande. Or simultanément, des nouvelles techniques dites intelligentes ont été dévoilées et sont de plus en plus réclamées dans des applications d'entraînement à vitesse variable de moyenne puissance, telle que la théorie de la logique floue [ROY00].

Dans le but de bien situer notre travail, nous l'avons structuré suivant quatre chapitres :

Le premier chapitre fera l'objet d'une documentation bibliographique sur l'énergie photovoltaïque. S'accompagnant d'une description des différents éléments constituant le système de pompage photovoltaïque.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de chaque élément constituant du système à savoir le générateur photovoltaïque, les convertisseurs statiques, le moteur asynchrone à cage d'écureuil et la pompe centrifuge.

Dans le troisième chapitre, nous allons nous intéresser à l'optimisation de la puissance produite par le générateur photovoltaïque. Une étude comparative entre deux méthodes MPPT sera présentée pour tester leurs performances et faire le choix sur la technique à adopter pour la suite du travail. S'en suivra le principe, avantages et les inconvénients de la commande DTC (Direct Torque Control).

Enfin le quatrième chapitre sera focalisé sur le dimensionnement et la commande du système de pompage photovoltaïque. On souligne dans cette partie les différentes stratégies de commande pour l'amélioration de la commande DTC. Tout en comparant leurs performances statiques et dynamiques.

Nous clôturerons par une conclusion générale sur l'ensemble de cette étude et nous proposerons quelques perspectives.

I. Chapitre 1

I.1 Introduction :

Pour commencer cette partie nous allons exposer des généralités sur l'énergie solaire, en suite citer les différents types de pompage existants. Nous définirons les constituants d'un système de pompage photovoltaïque, et pour finir, nous ferons le choix sur chaque composant du système. [BOU12]

I.2 La ressource solaire :

Le Soleil est l'étoile la plus proche de notre planète. Ses radiations sont essentiellement la seule source d'énergie qui influe sur l'atmosphère et le climat terrestre. Le rayonnement solaire est un phénomène électromagnétique qui est compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 μm [GAC08], [HAD03] L'énergie associée à ce rayonnement solaire est approximativement décomposée comme suit :

- 9% dans la bande des ultraviolets (<0,4 μm),
- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm),
- 44% dans la bande des infrarouges (>0,8 μm).

L'atmosphère terrestre reçoit un rayonnement solaire d'une puissance moyenne de 1367 W/m^2 . Mais, l'atmosphère absorbe une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement 1200 W/m^2 . Ainsi, la rotation et l'inclinaison de la terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison.

I.3 Atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère :

Les phénomènes atmosphériques influencent le rayonnement solaire perçu sur la surface de la terre. Ces phénomènes sont les nébulosités, les poussières, l'humidité, la couverture du sol, etc.

L'éclairement solaire sur un plan d'une inclinaison donnée est composé de grandeurs suivantes figure (I.1) :

- **Eclairement direct** : le rayonnement solaire reçu directement du Soleil.
- **Eclairement diffus** : le rayonnement solaire provenant de toute la voûte céleste (dû à l'absorption et la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages).
- **Eclairement réfléchi** : le rayonnement solaire réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Ce rayonnement dépend de l'albédo du sol et il est potentiellement important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (neige, eau, etc.). [SER12]

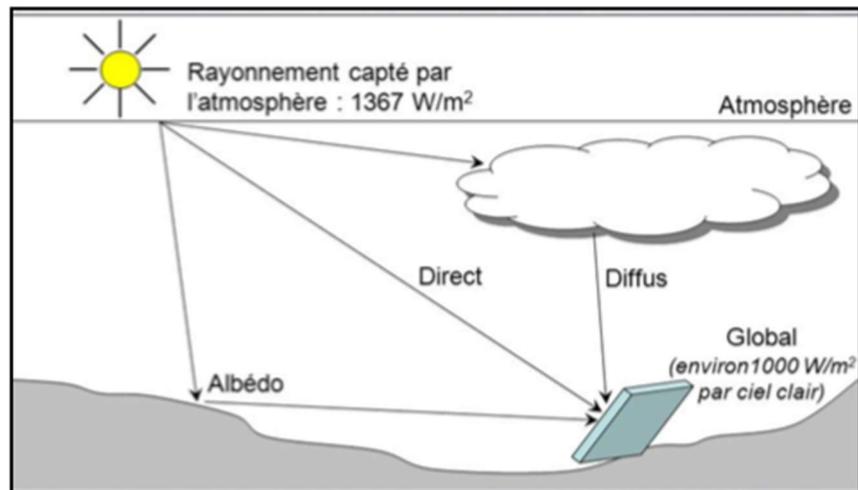


Figure I - 7 : composantes de rayonnement [MAA00]

I.4 Historique et quelques dates déterminantes dans l'histoire du photovoltaïque :

- 1839 : Le physicien français EDMOND BECQUEREL découvre le procédé d'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- 1875 : WERNER VON SIEMENS expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- 1954 : Trois chercheurs américains, CHAPIN, PEARSON et PRINCE, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie. [ANK12]
- La progression des techniques de production de cellules photovoltaïques ainsi que l'augmentation des volumes de production ont entraîné, à partir des années 1990, une baisse des prix. La fabrication de modules se fait en Chine (près de 60 % de la production totale), au Japon, aux EU, en Allemagne et en Europe, avec en particulier des grandes compagnies comme Yingli Green Energy, First Solar et Suntech Power. Cette

production mondiale de modules photovoltaïques est passée de 5 MWc en 1982 à plus de 18GWc en 2013[BEL15].

I.5 Gisement solaire en Algérie :

L'étude du gisement solaire est le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'énergie solaire. Le gisement solaire est un ensemble de donnée décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans un lieu donné et au cours d'une période donnée, Son évaluation peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. Elle sert à simuler le fonctionnement probable d'un système énergétique solaire et donc d'effectuer son dimensionnement le plus exacte possible compte tenu des demandes en énergie à satisfaire. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde.

La durée d'ensoleillement moyenne nationale dépasse les 2000 heures annuellement. Cette valeur peut atteindre facilement les 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara. Ainsi, l'énergie moyenne reçue quotidiennement sur une surface inclinée à la latitude est d'environ 7 kWh/m²/jour [MAA00] Elle est répartie comme suit :

- Au Nord : 5,6 kWh/m²/jour
- Au Sud : 7,2 kWh/m²/jour

La figure (I-2) montre l'irradiation globale moyenne annuelle reçue sur plan incliné à la latitude du lieu.

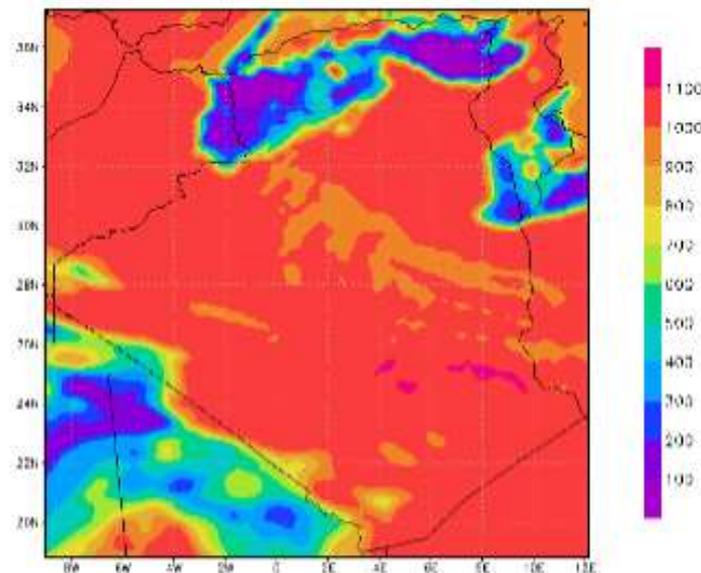


Figure I - 8 : Carte de l'éclairement solaire direct (W/m²)Prévission -(26/12/17 à 10h30 GMT) [ABD17]

I.6 Les composants d'un système photovoltaïque :

I.6.1 La cellule photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque ».

Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants [AOU14].

I.6.2 Principe de fonctionnement :

Cette photopile, qu'on appelle aussi cellule solaire ou photovoltaïque, est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs. On peut la représenter comme une diode plate qui est sensible à la lumière.

Un photon (particule de lumière) dont l'énergie est suffisante et heurtant un atome peut arracher un électron. Il crée ainsi une paire électron – trou. L'électron ayant acquis suffisamment d'énergie peut se déplacer vers la jonction N/P, où la présence du champ électrique a pour conséquence la collecte de l'électron vers la région N. Une tension électrique apparaît entre les deux côtés N et P. Le dispositif devient donc générateur électrique sous l'effet de la lumière. La collecte de courant se fait par les contacts métalliques (électrodes). Si ces électrodes sont reliées à un circuit extérieur, un courant circule. Le courant produit par une cellule photovoltaïque est un courant continu. Figure (I-3) [MIC03]

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des « impuretés ») sont substitués dans un réseau cristallin. Cette action est appelée dopage.

- Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type N (exemple : silicium dopé au phosphore).
- Si au contraire, l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le silicium, le matériau sera déficitaire en électrons : il sera dit de type P (exemple : silicium dopé au bore). [MIC03]

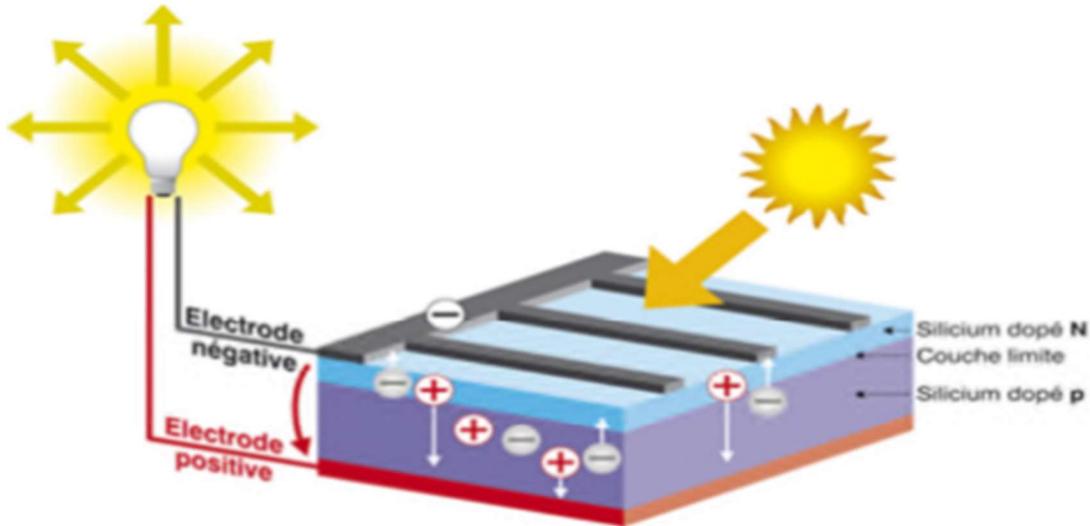


Figure I - 9 : Schéma de principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque [MAA00].

I.6.3 Technologies des cellules photovoltaïques :

On distingue trois générations des cellules photovoltaïques en fonction des développements technologiques. [AOU14]

a. Technologies de la 1^{ère} génération à base de silicium cristallin :

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction P-N qui utilise généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. La méthode de production basée sur les wafers de silicium est très énergivore et 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. [AOU14]

b. Technologies de la 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 un accroissement rapide. Les cellules dites couche mince 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 couches minces :

- Le silicium amorphe (a-si).
- Le tellure de cadmium (CdTe).
- Le cuivre/indium/sélénium ou cuivre/indium/gallium/sélénium (CIS ou CIGS).

c. Technologies de la 3ème génération « les cellules organiques » :

Elles sont constituées de molécules organiques combinant flexibilité et légèreté. 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 du développement. [AOU14]

Tableau I.1 : Performance des différentes technologies des cellules photovoltaïques
[MCE12]

Type de cellule	Rendement	Avantage	Inconvénient
Silicium monocristalline	13-17 %	Bon rendement pour une cellule	Coût de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication
Silicium poly-cristallin	11-15%	Bon rendement pour un module	Un bon rapport qualité prix, fabrication plus simple
Silicium amorphe	5-9%	Facile à fabriquer	Mauvais rendement
CdTe	7-11%	Absorbe 90% des photons incidents	Cadmium très polluant
CmIGS	20%	Energie de gap ajustable 99% des photons absorbés	Manque de matière première
Cellules organique	≥5%	Faible coût de fabrication, flexible	Rendement encore trop bas

I.7 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

Avantages :

- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.
- Réduit la vulnérabilité aux pannes d'électricité.
- Entretien minimal.
- Aucun bruit.

Inconvénients :

- La fabrication des panneaux photovoltaïques relève de la haute technologie demandant énormément de recherche et de développement engendrant des investissements coûteux.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques et industrielle.
- Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher. [LAL05]

Applications :

Nous avons vu précédemment comment transformer les rayons lumineux en électricité, nous allons maintenant parler des différentes applications possibles, il existe différentes applications de l'énergie photovoltaïque, on peut citer quelques-unes :

- Electrification hybride (photovoltaïque-éolienne).
- La climatisation solaire.
- Dessalement de l'eau de mer.
- Le pompage photovoltaïque qui sera le sujet de notre étude.

I.8 Le pompage photovoltaïque [HAD04] :

Il existe différents types de pompage photovoltaïque ils résident dans l'origine de l'eau (rivière, puits, fourrage...) et dans le mode de fonctionnement de l'installation (sur batteries ou au fil du soleil).

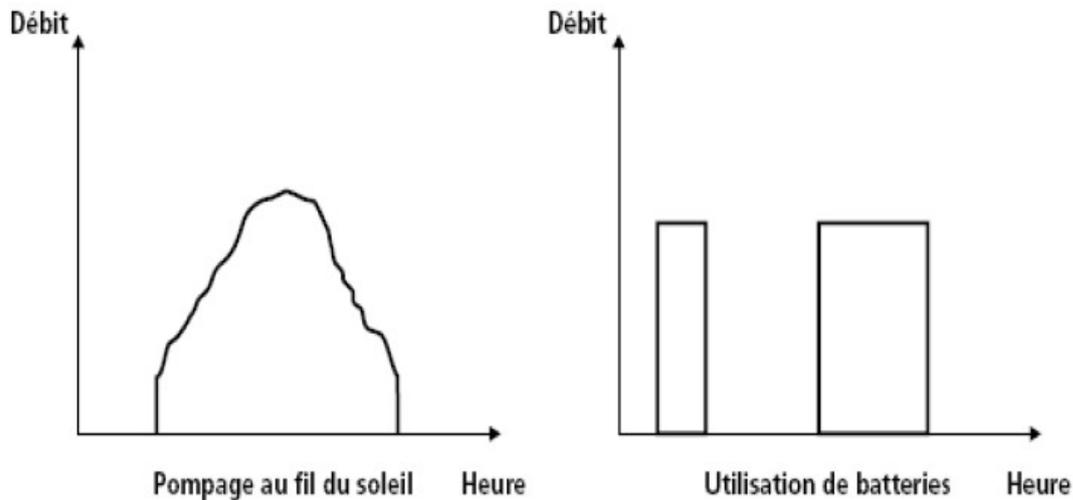


Figure I - 10 : Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil et avec batterie [BEL15]

Le pompage au fil du soleil : Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau est pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol. Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin.

- Permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable.
- Moins coûteux qu'un système avec batterie.

Le pompage avec batterie : permet de s'affranchir des aléas du soleil et des problèmes d'adaptation entre générateur photovoltaïque et motopompe.

- Le débit de pompage peut se faire à la demande, lorsque les utilisateurs en ont besoin, ou permettre un pompage régulier durant toute la journée.
- L'utilisation d'un réservoir de stockage pour l'eau sera nécessaire afin de pouvoir fournir à la demande d'eau.
- L'utilisation de batteries comporte davantage de composants qui influent sur la fiabilité et le coût global du système.

I.8.1 Configuration typique d'un système de pompage photovoltaïque :

Les éléments d'un système de pompage photovoltaïque doivent être conçus pour fonctionner comme un seul ensemble pour la maximisation des performances globales du

système. Différentes solutions peuvent être adoptées pour pomper un certain volume d'eau à une certaine hauteur en fonction des plages de puissance nécessaire dans une application spécifique. Bien que les pompes soient installées en surface ou bien flottante, la configuration la plus commune est une pompe immergée installée dans un trou de forage.

La configuration d'un système de pompage PV est déterminée par la définition du type de générateur photovoltaïque, le type de pompe et du type de moteur ; ainsi que le type de conditionnement de puissance. On peut distinguer les types de systèmes de pompage photovoltaïques suivants : [AOU14]

- **Systèmes de petite puissance (50-400W) :**

Dans ces systèmes, on utilise principalement un moteur à courant continu entraînant une pompe centrifuge ou un déplacement positif. Entre le générateur PV et le moteur/pompe on intercale un convertisseur DC/DC pour améliorer son adaptation. Les applications de cette configuration sont généralement destinées au pompage des volumes d'eau pouvant atteindre jusqu'à 150 m³/Jour. La figure (I-5) montre un schéma synoptique de ce type de configuration.

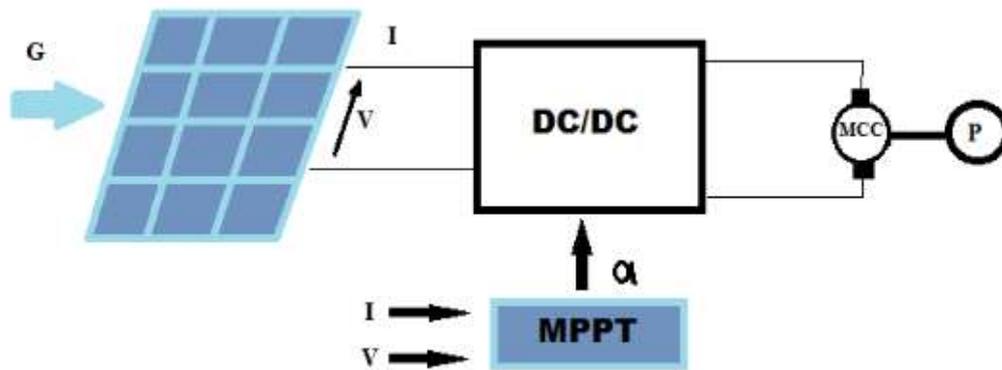


Figure I - 11 : Systèmes de petite puissance.

- **Les systèmes de moyenne puissance (400-1500 W) :**

Composés essentiellement d'une pompe immergée centrifuge entraînée par un moteur à induction à courant alternatif via un convertisseur DC/AC triphasé travaillant à fréquence variable. Un convertisseur DC/DC est généralement intercalé entre le générateur PV et le convertisseur DC/AC pour l'adaptation d'impédance et la recherche du point de puissance maximale (MPPT). Ces types de systèmes sont caractérisés par leur haute fiabilité ainsi que de leur large utilisation depuis les premières installations de pompage photovoltaïque. Les volumes d'eau pouvant être pompés varient entre 150 jusqu'à 1500 m³/jour . La figure (I-6) montre un schéma synoptique de ce type de configuration.

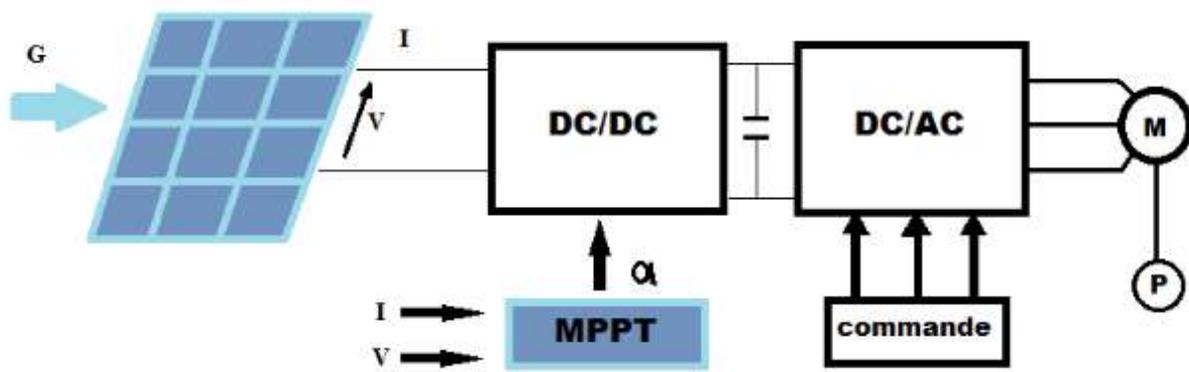


Figure I - 12 : schéma qui représente les différents composants d'un système photovoltaïque.

I.8.2 Constitution du système de pompage photovoltaïque à étudier :

I.8.2.1 Générateur photovoltaïque [KEH12].

Qui représente l'outil de conversion de l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique en courant continu. Il est composé d'un ensemble de panneaux. Le panneau est constitué de plusieurs modules (structurés en série ou en parallèle ou hybride). Le module contient des rangés de cellules (structurées en série ou en parallèle ou hybride) et généralement des cellules à base de silicium.

- **Mise en série :** Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné.
- **Mise en parallèle :** Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée.

I.8.2.2 Les convertisseurs statiques :

a) Convertisseur DC-DC (hacheur) :

C'est un convertisseur continu-continu mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue avec un rendement élevé [MEH07]

On utilise un hacheur parallèle lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue (les panneaux, les batteries). Sa commande à l'amorçage et au blocage est basée sur un interrupteur commandé (IGBT, MOSFET, Bipolaire ...).

On se sert d'un hacheur série lorsque la tension à la sortie est plus basse que celle de l'entrée (panneaux ou batteries), sa structure a besoin d'un interrupteur à amorçage et à blocage commandé (transistor bipolaire, IGBT ...) et une diode de roue libre. [MEH07]

b) Convertisseur DC/AC :

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Il est habituellement conçu pour fonctionner sur une plage assez réduite. Il est très efficace pour des caractéristiques d'entrée et de sortie fixes. Il existe d'innombrables types d'onduleurs DC/AC selon la qualité du signal de sortie.

- Onduleur à onde sinusoïdale modifiée.

- Onduleur à modulation de largeur d'impulsion (MLI). [ROY98]

L'onduleur à onde sinusoïdale modifiée peut supporter de fortes surcharges et sa distorsion harmonique est relativement faible, de sorte qu'il n'introduit que peu de pertes par effet Joule susceptibles de causer l'échauffement des moteurs.

L'onduleur à modulation de largeur d'impulsion utilise des commutateurs électroniques rapides pour varier la largeur d'impulsion. Grâce à un filtre à la sortie, l'onde sinusoïdale peut être reconstruite. Ces onduleurs relativement peu coûteux sont très efficaces, procédant à près de 90%-95% de rendement.

I.8.2.3 Groupe moteur-pompe :

C'est un ensemble composé d'un moteur électrique entraînant une pompe hydraulique.

A. Les moteurs :

On peut voir fréquemment dans les systèmes de pompage photovoltaïque certains types comme les moteurs à courant continu (excitation série, shunt, à aimant permanent etc.) et moteur alternatifs (Asynchrone, synchrone). Pour ce projet nous exploitons un moteur asynchrone à cage d'écureuil.

L'utilisation du moteur à courant alternatif pour les applications de pompage photovoltaïques est de plus en plus répandue en raison du coût peu élevé du moteur et de la maintenance, mais aussi, de l'efficacité accrue des onduleurs solaires les rendent très attrayants pour ce type de système. De dimension compacte, le moteur asynchrone est utilisé particulièrement pour le pompage immergé dans les forages et les puits ouverts. De plus,

l'utilisation d'onduleurs efficaces permet un contrôle de la vitesse du moteur et ce dernier point est préférable pour des mises en pratique de pompage solaire.

Le moteur alternatif pour le pompage solaire est en général de type asynchrone, triphasé et à rotor en court-circuit (rotor à cage d'écureuil). Le rendement moyen d'un moteur asynchrone est de 85%. À ceci il faut ajouter le rendement de l'onduleur qui est de 90%-95% sur une plage de fonctionnement importante. Le rendement moyen du moteur/onduleur sera donc de 80% sur une plage de fonctionnement relativement importante.

Selon les besoins de l'installation et du site, nous avons jugé plus utile de choisir une machine asynchrone à cage d'écureuil adéquate ; suite à ses nombreux avantages de robustesse et d'entretien minimal, de plus son coût est moins cher par rapport aux autres machines [BEL15].

B. Les pompes :

Les pompes à eau sont classées comme suit :

- Leur principe de fonctionnement : soit de type **centrifuge** ou **volumétrique**.
- Emplacement physique de la pompe : par rapport à l'eau pompée la pompe à **aspiration** et la pompe à **refoulement**.

La hauteur d'aspiration de n'importe quelle pompe est limitée à une valeur théorique de 9.8 mètres (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres. Les pompes à aspiration sont donc toujours installées à une hauteur inférieure à celle-ci. Ces pompes doivent également être amorcées, c'est-à-dire que la section en amont de la pompe doit être remplie d'eau pour amorcer l'aspiration d'eau.

Les pompes à refoulement sont immergées dans l'eau, leur moteur peut être immergé avec la pompe (pompe monobloc), ou moteur en surface ; la transmission de puissance se fait par un long arbre reliant la pompe au moteur.

- **Les pompes centrifuges :**

Elles usent des variations de vitesse du fluide pompé combinées avec l'effet de la force centrifuge pour obtenir une hausse de pression. L'énergie cinétique transmise au fluide est fournie par la rotation d'une roue munie d'aubes ou d'ailettes, et une partie de cette énergie est transformée en pression par réduction de vitesse.

Les caractéristiques des pompes centrifuges :

- Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage, la pompe tourne même par un très faible ensoleillement, mais il faut une certaine vitesse du moteur pour que la pression de l'eau soit suffisante pour fonctionner.
- La puissance absorbée est bien adaptée aux modules photovoltaïques, fournissant un bon rendement global.

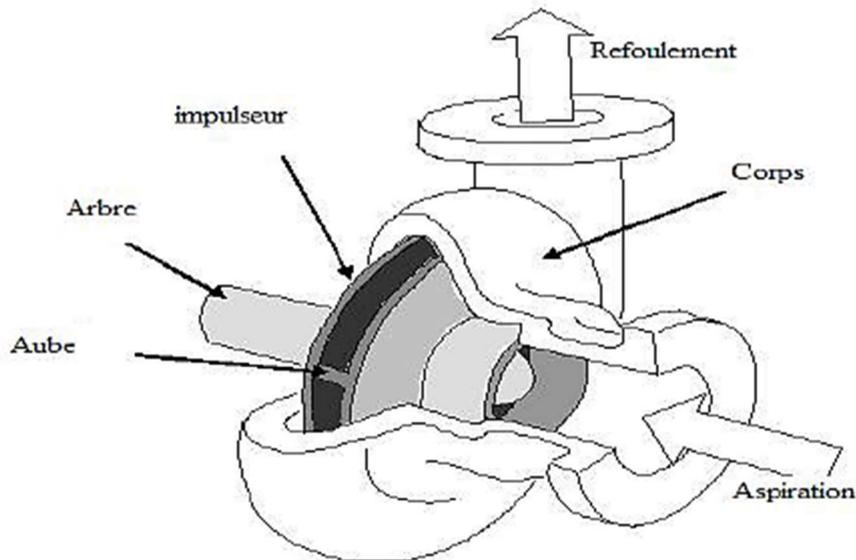


Figure I -7 : Pompe centrifuge [BEL15]

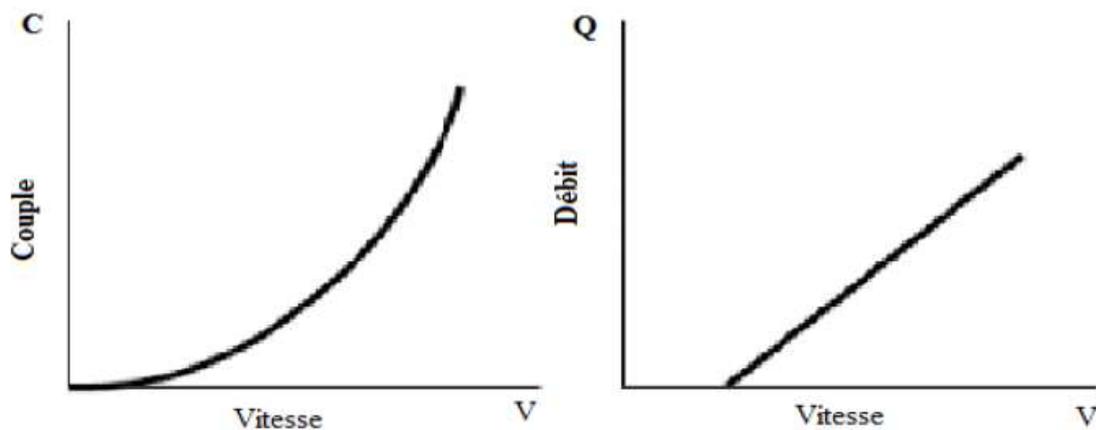


Figure I - 8 : Courbes du couple et du débit en fonction de la vitesse d'une pompe centrifuge [BEL15].

- **Les pompes volumétriques :**

Dans ces pompes, le fluide est mis en mouvement par une variation du volume qui le contient. Les pompes volumétriques sont de deux sortes, les pompes volumétriques alternatives

(exemple : pompe à piston, à membranes, etc.) et les pompes volumétriques rotatives (pompe à vis, etc.)

Leurs principaux atouts sont les suivants :

- Elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à $5 \text{ m}^3/\text{h}$) et aux grandes hauteurs.
- Elles ont de bons rendements, et les pompes de surface sont à auto-amorçages.

Le couple de démarrage d'une pompe volumétrique (de 3 à 5 fois le couple nominal) et la caractéristique $C=f(V)$ de ce modèle de pompe fait que sa manœuvre en direct sur un panneau photovoltaïque n'est pas économiquement viable.

Pour pallier au problème de surdimensionnement du générateur résultant de cette inadéquation, un adaptateur d'impédance est disposé pour permettre un rendement aussi élevé que possible de tous le système.



Figure I - 9 : Pompe volumétrique [BEL15].

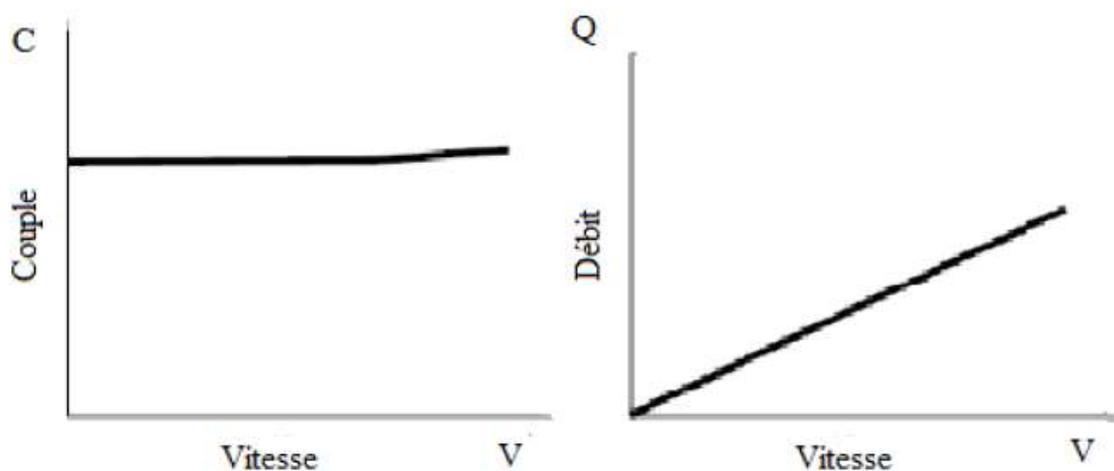


Figure I - 10 : Caractéristiques d'une pompe volumétrique [BEL15].

I.8.3 Quelques définitions [BEL15] :

- **Débit :** Le débit (**Q**) est la quantité d'eau que la pompe peut fournir durant un intervalle de temps donné. En pompage, le débit est communément donné en litres par heure (l/h). En pompage solaire, le débit (ou le besoin en eau) est souvent exprimé en [m³ /jour].
- **Hauteur manométrique totale : (HMT)** d'une pompe est la différence de pression en mètres de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement.

L'expression de la hauteur manométrique totale (HMT) est donnée par le modèle de Pleider-Peterman :

$$HMT = a_0\omega + a_1\omega Q + a_2Q^2 \quad \text{I.1}$$

Avec : a_0, a_1, a_2 : des coefficients constants donnés par le constructeur.

La HMT peut être aussi calculée comme suit :

$$HMT = H_g (1 + P_c) \quad \text{I.2}$$

Où :

H_g = hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée (niveau dynamique) et le plan d'utilisation (**H_r+N_d**). Pour une pompe de surface sur un plan d'eau, H_g sera choisi en fonction de la hauteur de la pompe à son niveau le plus bas.

P_c = pertes de charge produites par le frottement de l'eau sur les parois des conduites. Ces pertes sont en fonction de la distance des conduites (**D**), de leur diamètre (**dc**) et du débit de la pompe (**Q**) et s'expriment en mètres d'eau. Le diamètre des conduites doit être calculé afin que ces pertes de charge correspondent au plus à 10 % de la hauteur géométrique totale.

- **Niveau statique :** Le niveau statique (**N_s**) d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau avant pompage.
- **Niveau dynamique :** Le niveau dynamique (**N_d**) d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau pour un pompage à **un débit donné**. Pour le calcul de la HMT, le niveau dynamique est calculé pour un débit moyen.
- **Rabattement :** La différence entre le niveau dynamique et le niveau statique est appelée rabattement **R_m**.

I.8.4 Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque :

Le dimensionnement d'un tel système est organisé de la façon suivante :

- Evaluation des besoins en eau.
- Définition des conditions du site.
- Dimensionnement du champ photovoltaïque.

a. Evaluation des besoins en eau :

Il faut choisir ou définir la charge, c'est-à-dire :

- Déterminer le maximum des besoins journaliers en eau.
- Mesurer le niveau statique, le rabattement maximal, la hauteur du réservoir et les pertes de charges dues à la tuyauterie.
- Choisir un type et une puissance de pompe capable de remplir les conditions requises.

L'énergie quotidienne requise se calcule comme suit :

$$E_{ch} [KWh] = \frac{C_H \cdot Q \cdot HMT}{\eta_{mp}} \quad \text{I.3}$$

Avec :

C_H : La constante hydraulique.

Q : débit journalier.

η_{mp} : Rendement du groupe moteur pompe.

b. Définition des conditions du site :

Il faut recueillir les données d'ensoleillement du site pour ensuite déterminer le mois où l'ensoleillement est le plus faible et les besoins en eau sont au sommet.

Il est essentiel de connaître l'énergie solaire reçue en moyenne par jour sur le site pendant une période donnée [AMR15].

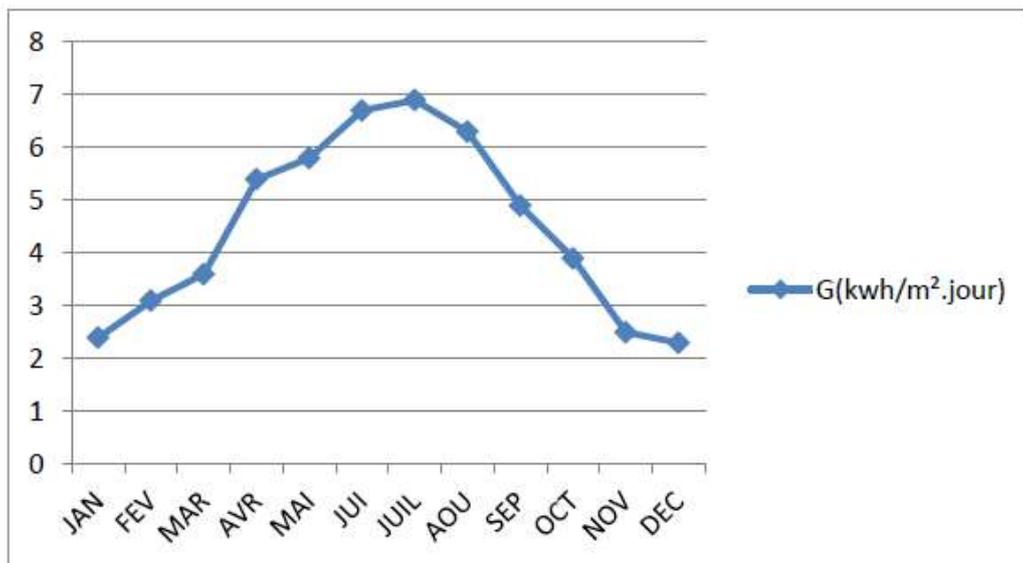


Figure I - 11 : Irradiation globale moyenne mensuelle journalière sur plan horizontal du site de Bejaïa de 1998 à 2007 [AMR15].

c. Dimensionnement du champ photovoltaïque :

L'inclinaison β des modules photovoltaïques (PV) par rapport au plan horizontal doit se faire de manière à optimiser le rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire.

L'inclinaison optimale est la latitude du lieu plus 10° . Les panneaux doivent constamment maintenir un angle droit avec les rayons du soleil, sinon orienté en plein Sud dans l'hémisphère Nord et plein Nord dans l'hémisphère Sud [HAD05].

Le calcul de la puissance du champ photovoltaïque est donné par l'équation suivante :

$$P_{pv,tot} [W] = \frac{E_{ch}}{N_{eq} \cdot C_p} \tag{I.4}$$

Avec :

N_{eq} : Nombre d'heures par jour d'exposition aux conditions STC.

C_p : Coefficient de pertes [ROY98]

Structure du système de pompage à étudier [DAO13] :

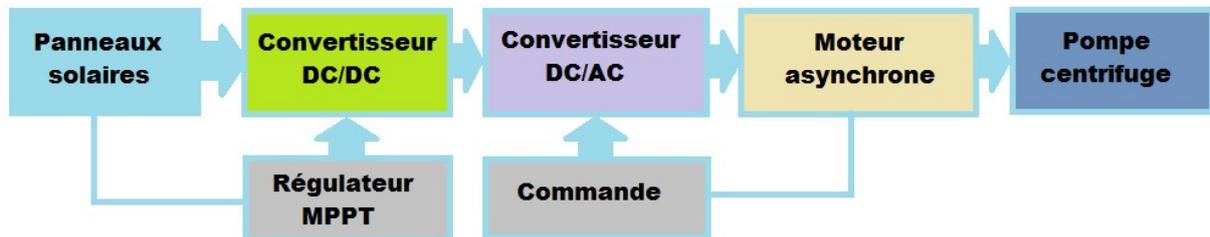


Figure I -12 : Structure d'un système de pompage photovoltaïque.

Le pompage solaire photovoltaïque au fil du soleil représente la solution idéale pour l'approvisionnement en eau partout où le réseau électrique est absent. Il est destiné pour une durée de pompage tout au long de la journée. Dans ce cas, le stockage d'énergie peut se faire de deux façons : stockage d'énergie électrique ou stockage d'eau. Cette dernière solution est souvent adoptée car il est plus pratique de stocker l'eau dans des réservoirs que l'énergie électrique dans des accumulateurs lourds, coûteux, fragiles, et requérant un entretien.

La simplicité d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil se heurte au problème d'adaptation de charge puisque le couplage direct ne permet pas au générateur de délivrer sa puissance maximale durant une journée complète. Il est donc primordial de faire marcher ces générateurs à leur puissance optimale, l'approche du problème consiste à intercaler

entre le générateur et les convertisseur statique (hacheur ou onduleur) pour effectuer le transfert optimal de puissance. Du coup, le système de pompage solaire sera généralement composé d'un générateur photovoltaïque, d'un groupe moteur-pompe, d'un dispositif électronique de commande et de contrôle.

De ce fait l'emploi d'un moteur asynchrone (à courant alternatif triphasé) plus robuste moins cher et sans entretien devient une solution plus économique et plus pratique même au prix d'un circuit électronique de commande plus complexe. L'utilisation d'un moteur asynchrone augmente ainsi l'autonomie et la fiabilité de l'installation. Le moteur est alimenté par un onduleur (convertisseur DC/AC).

Et on a choisi la pompe centrifuge qui présente d'innombrables avantages par rapport aux types de pompage, elle possède un volume moins encombrant, un service relativement silencieux et une mise en œuvre faible avec tous les types de moteurs électriques disponibles sur le marché. Elle s'adapte aussi aisément à tous les problèmes de traitement des liquides, et elle répond aux exigences spécifiques des installations. Tous ces avantages nous emmènent à la choisir comme pompe pour notre système de pompage.

I.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur le photovoltaïque et le principe de conversion d'énergie solaire vers l'énergie électrique, nous avons aussi présenté et illustré les différents éléments qui constituent un système de pompage photovoltaïque et établi également les différentes caractéristiques du fonctionnement des éléments du système. Cela nous a permis de faire le bon choix sur chacun des constituants de notre système de pompage photovoltaïque (panneau, moteur, pompe, convertisseur (hacheur/onduleur), ils seront modélisés afin d'être simulés dans le prochain chapitre.

II. Chapitre 2

II.1 Introduction :

L'étude de tout système physique nécessite une modélisation, celle-ci nous permet de simuler le comportement de ce système face à différentes sollicitations et d'appréhender ainsi les mécanismes régissant son fonctionnement.

Dans ce chapitre, nous présenterons les équations caractérisant le fonctionnement et les modèles mathématiques bien détaillés qui seront utilisés pour modéliser les différentes parties du système de pompage photovoltaïque, afin de prévoir son comportement. En représentant en premier lieu les modèles électriques d'un générateur PV et les équations régissant son fonctionnement, le modèle de hacheur BOOST et de l'onduleur, la modélisation du moteur asynchrone et de la pompe centrifuge.

II.2 Modélisation du générateur photovoltaïque [BEL15] :

De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques existent dans la littérature, nous avons choisis un modèle simplifié à cinq paramètres (I_{sc} , V_{oc} , I_{mpp} , V_{mpp} , R_s) qui tient compte de la variation du courant et de la tension du panneau photovoltaïque en fonction des conditions climatiques.

Le schéma ci-dessous et le schéma équivalent d'un module photovoltaïque qui comprend un générateur de courant modélisant l'éclairement, une diode en parallèle qui modélise la jonction PN et des résistances en série et en parallèle qui tiennent en compte de l'effet résistif des parasites dus à la fabrication.

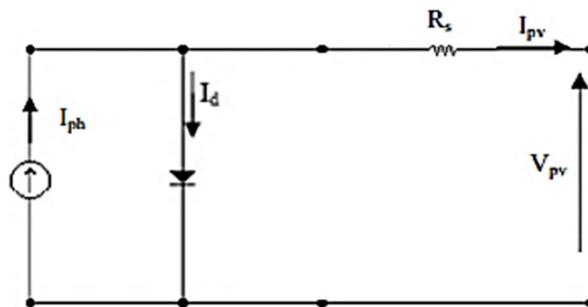


Figure II - 7 : schéma équivalent d'un module photovoltaïque [BEL15]

L'expression du courant du module photovoltaïque est donnée par [BEL15] :

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

$$I_{pv} = I_{sc} \left\{ 1 - K_1 \left[\exp(K_2 V_{pv}^m - 1) \right] \right\} \quad \text{II.2}$$

Où les coefficients K_1 , K_2 , K_3 , K_4 et m sont donnés par :

Chapitre 2: Modélisation des différents éléments du système de pompage photovoltaïque

$$K_1=0.01175 \quad \text{II.3}$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{oc}^m} \quad \text{II.4}$$

$$K_3 = \ln \left[\frac{I_{sc} (1 + K_1) - I_{mpp}}{K_1 I_{sc}} \right] \quad \text{II.5}$$

$$K_4 = \ln \left(\frac{(1 + K_1)}{K_1} \right) \quad \text{II.6}$$

$$m = \frac{\ln \left[\frac{K_3}{K_4} \right]}{\ln \left[\frac{V_{mpp}}{V_{oc}} \right]} \quad \text{II.7}$$

I_{mpp} : Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum (I_{opt}) ;

V_{mpp} : Tension au point de puissance maximale appelé aussi tension optimum (V_{opt}) ;

I_{sc} : Courant en court-circuit ;

V_{oc} : Tension en circuit ouvert.

Ces paramètres sont donnés dans le tableau des caractéristiques du panneau photovoltaïque se trouvant dans l'annexe.

Ces équations ne sont applicable que dans les conditions standards de fonctionnement c'est-à-dire un niveau d'ensoleillement G et de température particuliers ($G_{stc}=1000\text{W}/\text{m}^2$, $T_{stc}=25^\circ\text{C}$).

Le modèle du PV étant établi, nous intégrons la variation de la température et de l'ensoleillement à partir des équations qui suivent :

$$\Delta T_c = T_c - T_{stc} \quad \text{II.8}$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{sc} \left(\frac{G}{G_{stc}} \right) \Delta T_c + \left(\frac{G}{G_{stc}} - 1 \right) I_{sc.stc} \quad \text{II.9}$$

$$\Delta V_{pv} = -\beta_{oc} \Delta T_c - R_s \Delta I_{pv} \quad \text{II.10}$$

Avec : G_{stc} et G : Représentent respectivement, le niveau d'insolation dans les conditions standards de fonctionnement (STC) et dans des conditions quelconques.

T_{stc} Et T_c : Représentent respectivement, la température dans les conditions STC et dans des conditions quelconques.

Chapitre 2: Modélisation des différents éléments du système de pompage photovoltaïque

ΔT_c : Représente la variation de la température.

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

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

α_{sc} : Représente un coefficient de température, d'incrémention du courant I_{sc} quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ($A/^{\circ}C$) (sous les conditions STC).

β_{oc} : Représente un coefficient de température, d'incrémention de la tension V_{oc} quand la température de la surface augmente de un degré Celsius ($V/^{\circ}C$) (sous les conditions STC).

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

$$V_{pv,nouv} = V_{pv} + \Delta V_{pv} \quad \text{II.11}$$

$$I_{pv,nouv} = I_{pv} + \Delta I_{pv} \quad \text{II.12}$$

II.2.1 Caractéristique courant-tension d'un module :

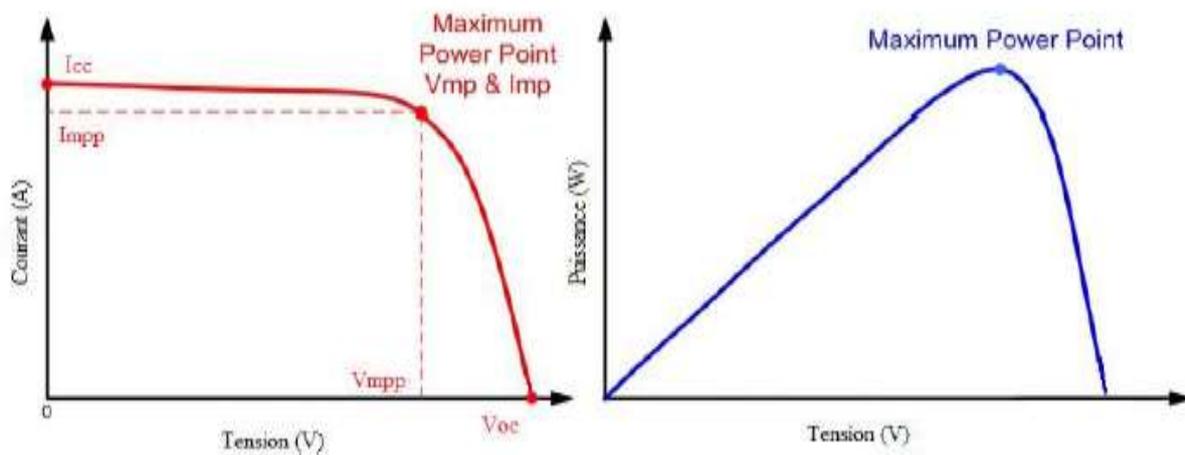


Figure II - 8 : Exemple de caractéristique courant-tension d'un module PV [HAD03]

II.2.2 Influence de l'irradiation :

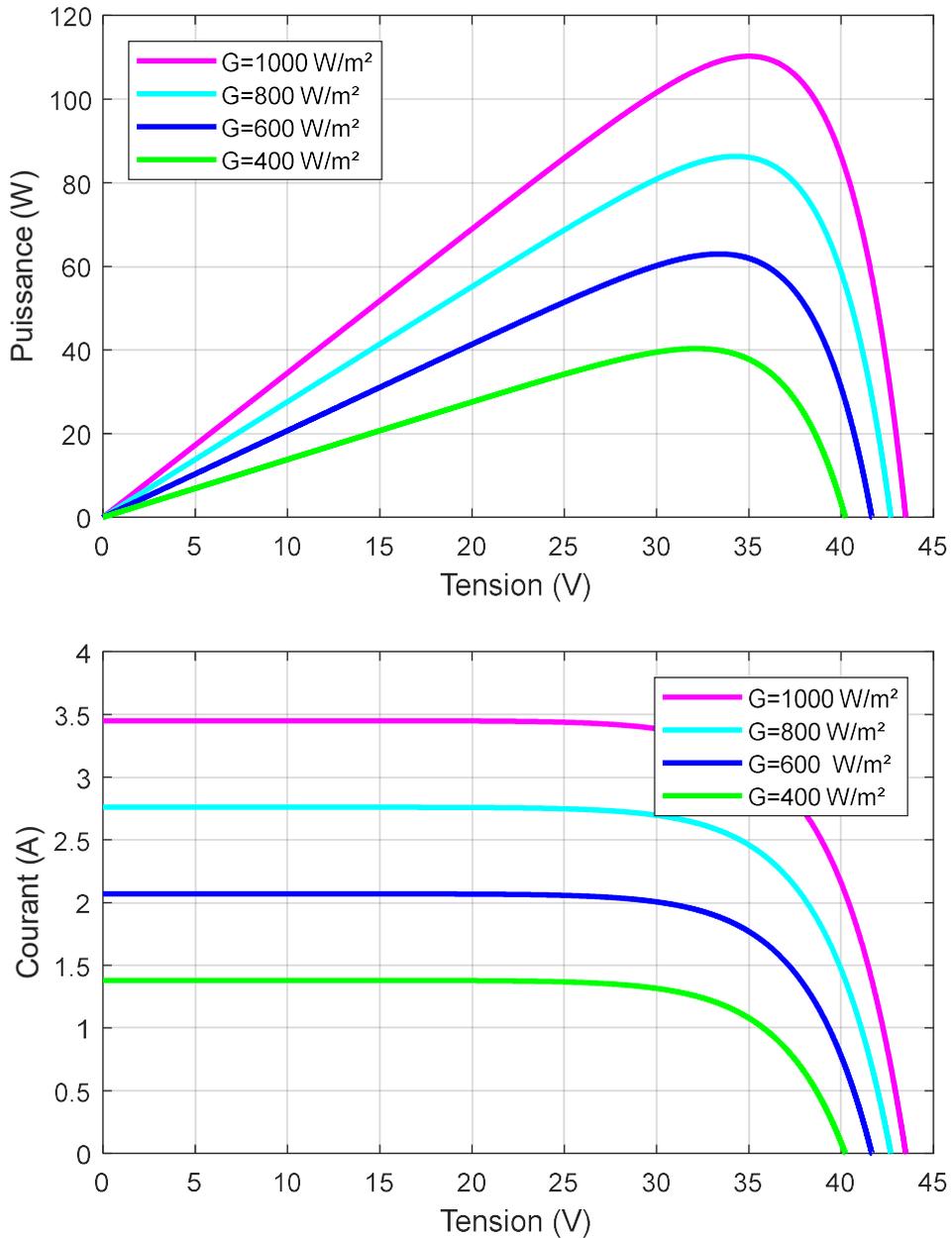


Figure II - 9 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) et P(V) à T=25°C
 (1) :1000W/m² ; (2) : 800W/m² ; (3) : 600W/m² ; (4) :400W/m² .

Les caractéristiques des figures (II-3) montrent bien la variation du courant du module photovoltaïque ainsi que de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairement. On peut voir aussi sur le graphe, l'existence de maximum sur les courbes de puissance. Ces points correspondent aux points de puissances maximales lorsque l'irradiation varie pour une température donnée. On peut voir que le courant de court-circuit I_{sc} varie proportionnellement à l'irradiation. De même, la tension de circuit ouvert V_{oc} (à vide) varie très peu.

II.2.3 Influence de la température :

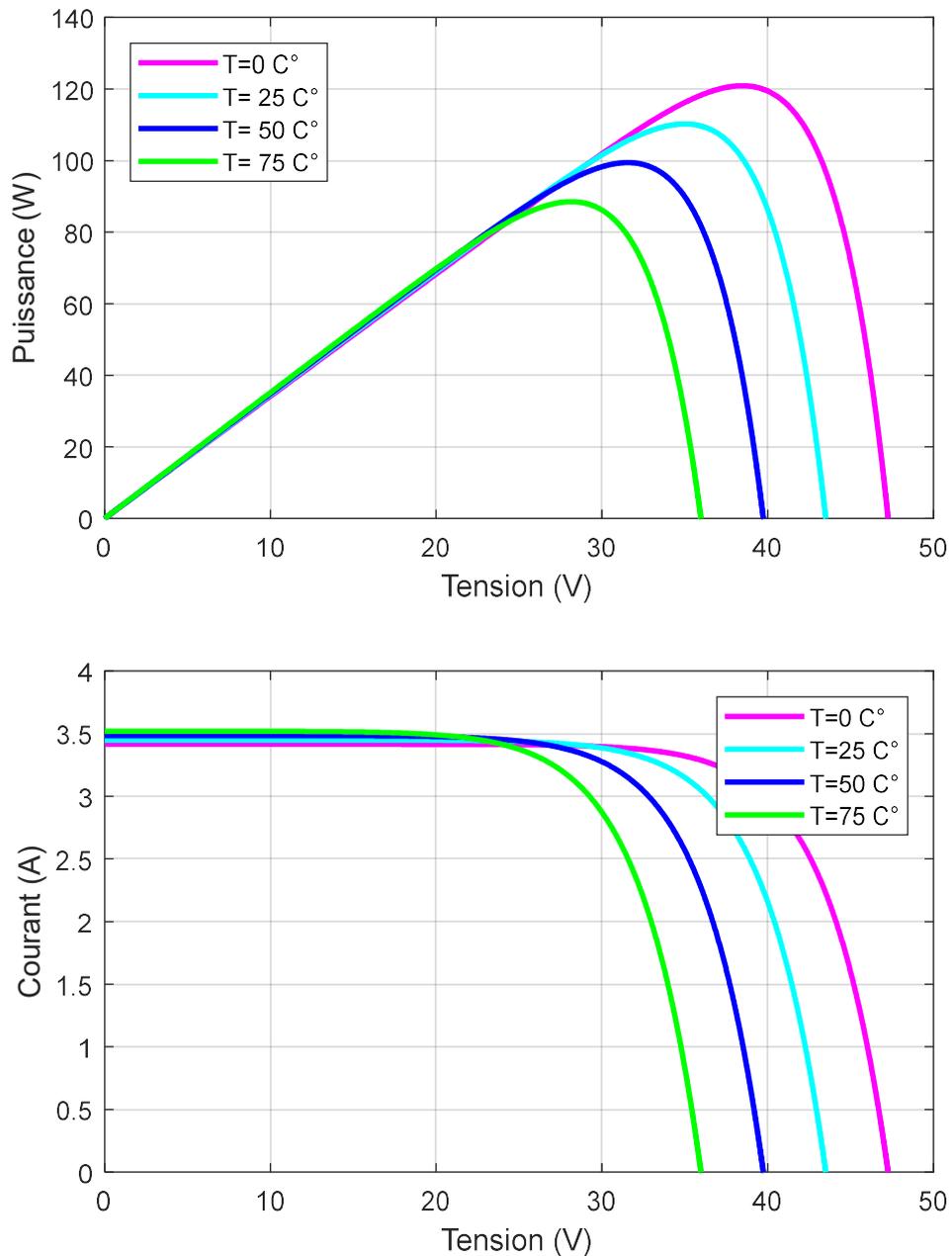


Figure II - 10 : Influence de la température sur la caractéristique I(V) et P(V) à $E=1000W/m^2$
(1): 0 °C ; (2): 25 °C ; (3): 50 °C ; (4): 75 °C .

Suivant les figures (II-4), on constate que lorsque la température croît à irradiation constante la tension de circuit ouvert V_{oc} décroît fortement et le courant de court-circuit I_{sc} augmente légèrement.

II.3 Modélisation du convertisseur statique DC/DC [ZID18] :

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de BOOST ou hacheur parallèle ; Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est supérieure à celle de l'entrée.

Son circuit de base est celui de la figure si dessous.

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} \cdot V_{pv} \quad \text{II.13}$$

$$I_s = (1-\alpha) \cdot I_L \quad \text{II.14}$$

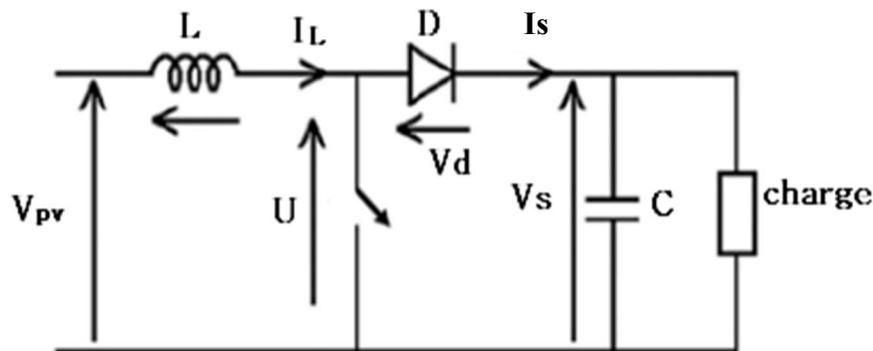


Figure II - 11 : schéma électrique d'un hacheur survolteur ou booster.

II.4 Modélisation de l'onduleur de tension à MLI [LOU09] :

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

A partir du schéma de l'onduleur triphasé présenté sur la figure (II-6), on développera les différentes équations qui modélisent le fonctionnement de ce dernier. Pour simplifier l'étude on suppose que :

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

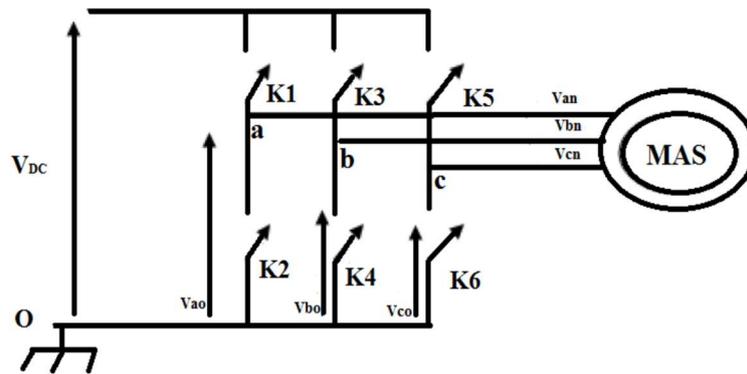


Figure II - 12 : schéma asymptotique de l'onduleur.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad \text{II.15}$$

Le courant modulé par l'onduleur est donné par :

$$I_{DC} = S_1 \cdot i_{ach} + S_2 \cdot i_{bch} + S_3 \cdot i_{cch} \quad \text{II.16}$$

Avec : S_1, S_2, S_3 et des fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur pour un seul bras.

II.5 Modélisation de la machine asynchrone [AOU17] :

Pour supprimer la non-linéarité, on transforme les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux en utilisant la transformation Concordia ou Clarke suivie par la matrice de rotation de Park. Ces enroulements statoriques et rotoriques a, b, c par 2 enroulements équivalents statoriques ds, qs et rotoriques dr, qr . Le système d'axes d, q tourne à une vitesse ω_s quelconque.

II.5.1 Hypothèses simplificatrices :

Dans cette étude, nous considérons les hypothèses suivantes :

- Le circuit magnétique est non saturé ;
- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées ;
- Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdale, la f.mm est variable, les inductances propres sont des constantes et les inductances mutuelles entre deux enroulements sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre leurs axes magnétiques ;

Chapitre 2: Modélisation des différents éléments du système de pompage photovoltaïque

- Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligé ;
- La machine est de constitution symétrique.

II.5.2 Equations électriques de la MAS :

Les équations des tensions de la MAS dans le repère abc représentent pour chaque enroulement la somme des chutes ohmique et inductive due au flux.

$$\begin{cases} v_{as} = R_s i_{as} + \frac{d\varphi_{as}}{dt} \\ v_{bs} = R_s i_{bs} + \frac{d\varphi_{bs}}{dt} \\ v_{cs} = R_s i_{cs} + \frac{d\varphi_{cs}}{dt} \end{cases} \quad \text{II.17}$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} v_{ar} = R_r i_{ar} + \frac{d\varphi_{ar}}{dt} \\ v_{br} = R_r i_{br} + \frac{d\varphi_{br}}{dt} \\ v_{cr} = R_r i_{cr} + \frac{d\varphi_{cr}}{dt} \end{cases} \quad \text{II.18}$$

La forme matricielle est la suivante :

$$\text{Pour le stator : } [v_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s] \quad \text{II.19}$$

$$\text{Pour le rotor : } [v_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\varphi_r] \quad \text{II.20}$$

$$\text{Avec : } [v_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}; [v_r] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} \quad \text{II.21}$$

$$\text{Et : } [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad \text{II.22}$$

Les matrices des résistances statoriques et rotoriques sont :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_{as} & 0 & 0 \\ 0 & R_{bs} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cs} \end{bmatrix} \text{ et } [R_r] = \begin{bmatrix} R_{ar} & 0 & 0 \\ 0 & R_{br} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cr} \end{bmatrix} \quad \text{II.23}$$

Les enroulements statoriques et rotoriques étant symétriques, on aura :

$$R_{as} = R_{bs} = R_{cs} = R_s; R_{ar} = R_{br} = R_{cr} = R_r \quad \text{II.24}$$

II.5.3 Equations magnétiques dans le repère *abc* :

$$[\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix}; [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad \text{II.25}$$

Où : $[\varphi_s]$ et $[\varphi_r]$: Vecteurs des flux statoriques et rotoriques.

Pour un enroulement statoriques (enroulement rotoriques), il faut intervenir : l'inductance propre statoriques ou rotoriques ; les inductances mutuelles entre les deux autres phases statoriques ou phases rotoriques ; les inductances mutuelles entre les trois enroulements rotoriques (statoriques) qui dépendent de la position rotoriques par rapport la position statoriques. Chaque flux comporte une interaction avec les courants de toutes phases.

❖ Exemple de la phase *a* statoriques :

$$\varphi_{sa} = l_s i_{as} + m_{ab} i_{bs} + m_{ac} i_{cs} + m_{aA} i_{As} + m_{aB} i_{Br} + m_{aC} i_{Cr} \quad \text{II.26}$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \\ \varphi_{Ar} \\ \varphi_{Br} \\ \varphi_{Cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & m_{ab} & m_{ac} & m_{aA} & m_{aB} & m_{aC} \\ m_{ba} & l_s & m_{bc} & m_{bA} & m_{bB} & m_{bC} \\ m_{ca} & m_{cb} & l_s & m_{cA} & m_{cB} & m_{cC} \\ m_{Aa} & m_{Ab} & m_{Ac} & l_r & m_{AB} & m_{AC} \\ m_{Ba} & m_{Bb} & m_{Bc} & m_{BA} & l_r & m_{BC} \\ m_{Ca} & m_{Cb} & m_{Cc} & m_{CA} & m_{CB} & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{Ar} \\ i_{Br} \\ i_{Cr} \end{bmatrix} \quad \text{II.27}$$

Où : $l_s = l_{fs} + l_{ms}$ Inductances propre, fuite et mutuelle statoriques respectivement ;

$l_r = l_{fr} + l_{mr}$: Inductances propre, fuite et mutuelle rotoriques respectivement.

L'expression (II.27) devient :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \\ \varphi_{Ar} \\ \varphi_{Br} \\ \varphi_{Cr} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{Ar} \\ i_{Br} \\ i_{Cr} \end{bmatrix} \quad \text{II.28}$$

$$\text{Avec : } [L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_{fs} + l_{ms} & -\frac{l_{ms}}{2} & -\frac{l_{ms}}{2} \\ -\frac{l_{ms}}{2} & l_{fs} + l_{ms} & -\frac{l_{ms}}{2} \\ -\frac{l_{ms}}{2} & -\frac{l_{ms}}{2} & l_{fs} + l_{ms} \end{bmatrix} ; [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_{fr} + l_{mr} & -\frac{l_{mr}}{2} & -\frac{l_{mr}}{2} \\ -\frac{l_{mr}}{2} & l_{fr} + l_{mr} & -\frac{l_{mr}}{2} \\ -\frac{l_{mr}}{2} & -\frac{l_{mr}}{2} & l_{fr} + l_{mr} \end{bmatrix} \quad \text{II.29}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = \begin{bmatrix} l_m \cdot \cos(\theta_r) & l_m \cdot \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & l_m \cdot \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ l_m \cdot \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & l_m \cdot \cos(\theta_r) & l_m \cdot \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ l_m \cdot \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & l_m \cdot \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & l_m \cdot \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad \text{II.30}$$

$$\text{Ou : } l_m = l_{ms} = l_{mr} \quad \text{II.31}$$

II.5.4 Expression du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique s'exprime par la dérivée partielle d'énergie électromagnétique stockée par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor.

$$C_{em} = \frac{\partial W_e}{\partial \theta_{geo}} = p \frac{\partial W_e}{\partial \theta_{ele}} \quad \text{II.32}$$

$$\text{Avec : } W_e = \frac{1}{2} ([i_s]^t [\varphi_s] + [i_r]^t [\varphi_r]) \quad \text{II.33}$$

Le couple électromagnétique est donné par l'expression suivante :

$$C_{em} = \frac{p}{2} \left([i_s]^t \frac{d}{d\theta_r} [M_{sr}] [i_r] + [i_r]^t \frac{d}{d\theta_r} [M_{rs}] [i_s] \right) \quad \text{II.34}$$

L'équation fondamentale du mouvement de la machine est donnée par l'expression suivante :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega_r}{dt} + K_f \Omega_r \quad \text{II.35}$$

Avec : $\Omega_r = \frac{\omega_r}{p}$: Vitesses de rotation mécanique et électrique ; J : Inertie totale des parties

tournante ;

K_f : Coefficient de frottement.

II.5.5 Modèle biphasé de la MAS :

Les composantes homopolaires sont nul, on peut avoir le modèle de la machine asynchrone triphasée sans l'équation mécanique sous forme d'un système d'équations (II.36) :

Chapitre 2: Modélisation des différents éléments du système de pompage photovoltaïque

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega \varphi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega \varphi_{sd} \\ v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega - \omega_r) \varphi_{rq} \\ v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - (\omega - \omega_r) \varphi_{rd} \end{cases} \quad \text{II.36}$$

$$\text{Ou : } \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{II.37}$$

Tensions statoriques ;

$$\begin{bmatrix} v_{rd} \\ v_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ Tensions rotoriques (Rotor en court-circuit) ; } \theta = \int \omega dt : \text{ Angle et vitesse angulaire}$$

du repère choisi; $\omega_r = p\Omega_r$: Vitesses angulaire électrique et mécanique du rotor et nombre de paires de pôles.

II.5.5.1 Equations des flux :

Les relations entre flux et courants sont données par le système suivant :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad \text{II.38}$$

A partir du système d'équations (II.38), on peut calculer :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{\varphi_{sd} L_r - \varphi_{rd} L_m}{L_s L_r - L_m^2} \\ i_{sq} = \frac{\varphi_{sq} L_r - \varphi_{rq} L_m}{L_s L_r - L_m^2} \\ i_{rd} = \frac{\varphi_{rd} L_s - \varphi_{sd} L_m}{L_s L_r - L_m^2} \\ i_{rq} = \frac{\varphi_{rq} L_s - \varphi_{sq} L_m}{L_s L_r - L_m^2} \end{cases} \quad \text{II.39}$$

En utilisant le système d'équations (II.39), on peut écrire le système d'équations (II.36) par apport aux flux :

Chapitre 2: Modélisation des différents éléments du système de pompage photovoltaïque

$$\begin{cases} v_{sd} = k_1 \varphi_{sd} - k_2 \varphi_{rd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega \varphi_{sq} \\ v_{sq} = k_1 \varphi_{sq} - k_2 \varphi_{rq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + \omega \varphi_{sd} \\ v_{rd} = k_3 \varphi_{rd} - k_4 \varphi_{sd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega - \omega_r) \varphi_{rq} \\ v_{rq} = k_3 \varphi_{rq} - k_4 \varphi_{sq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega - \omega_r) \varphi_{rd} \end{cases} \quad \text{II.40}$$

$$\text{Où : } \begin{cases} k_1 = \frac{R_s L_r}{L_s L_r - L_m^2} \\ k_2 = \frac{R_s L_m}{L_s L_r - L_m^2} \\ k_3 = \frac{R_r L_m}{L_s L_r - L_m^2} \\ k_4 = \frac{R_r L_m}{L_s L_r - L_m^2} \end{cases} \quad \text{II.41}$$

On obtient un système d'équations différentielles de la machine électrique généralisée sur les axes dq avec des coefficients constants. Ces axes peuvent tourner avec n'importe quelle vitesse ω .

II.5.5.2 Expressions du couple électromagnétique :

$$\begin{cases} C_{em} = p(i_{sq} \varphi_{sd} - i_{sd} \varphi_{sq}) \\ C_{em} = pL_m(i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \\ C_{em} = pk(\varphi_{rd} \varphi_{sq} - \varphi_{sd} \varphi_{rq}) \end{cases} \quad \text{II.42}$$

$$\text{Où : } k_5 = \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \quad \text{II.43}$$

II.5.6 Choix du référentiel :

Trois types de référentiels existent dans la pratique, le choix se fait selon le problème à étudier.

A. Référentiel lié au stator $\omega=0$

B. Référentiel lié au rotor $\omega=\omega_r$

C. Référentiel lié au champ tournant $\omega=\omega_s$

Ce référentiel n'introduit pas des simplifications dans la transformation des équations électriques, mais l'avantage on obtient les grandeurs continues.

II.6 Modèle de simulation

Le passage de Park (d,q) à celle Concordia (α, β) en faisant une rotation de l'angle :

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad \text{II. 44}$$

On définit également la transformation inverse :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad \text{II. 45}$$

Cela correspond aux changements de repère dans un contexte de modélisation de l'ensemble convertisseur statique - machine asynchrone ; en vue de l'étude des lois de commande basées sur le réglage des grandeurs statoriques de la machine, il paraît plus judicieux le choix d'un repère diphasé, aux axes orthogonaux (α, β) fixes au stator, ayant l'axe α selon la phase a du système d'alimentation. Le système d'équations qui modélise la machine asynchrone à cage dans le repère fixe devient alors [NEF12]

$$\text{Au stator : } \begin{cases} v_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d\varphi_{s\alpha}}{dt} \\ v_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d\varphi_{s\beta}}{dt} \end{cases} \quad \text{II.46}$$

$$\text{Au rotor : } \begin{cases} v_{r\alpha} = 0 = R_r i_{r\alpha} + \frac{d\varphi_{r\alpha}}{dt} + \omega_r \varphi_{r\beta} \\ v_{r\beta} = 0 = R_r i_{r\beta} + \frac{d\varphi_{r\beta}}{dt} - \omega_r \varphi_{r\alpha} \end{cases} \quad \text{II.47}$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \varphi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha} \\ \varphi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + L_m i_{r\beta} \\ \varphi_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha} \\ \varphi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta} \end{cases} \quad \text{II.48}$$

Le couple électromagnétique :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p (i_{s\beta} \varphi_{s\alpha} - i_{s\alpha} \varphi_{s\beta}) \quad \text{II.49}$$

Equation mécanique :

Chapitre 2: Modélisation des différents éléments du système de pompage photovoltaïque

$$\frac{J}{p} \cdot \frac{d\omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_v \frac{\omega}{p}$$

II.50

II.7 Modèle de la pompe centrifuge [CHE07] :

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu trois (03) paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse :

$$f(H, Q, \omega) = 0$$

II.51

Pour résoudre ce système d'équation, on considère généralement la vitesse constante.

La hauteur totale de pompage est la somme de la hauteur statique et la hauteur dynamique.

$$HMT = H_g + P_c$$

II.52

$$P_c = \left(\lambda \frac{L}{D} + \varepsilon\right) \left(\frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g}\right) = K_p Q^2$$

II.53

λ : Coefficient des pertes de charge linéaires.

D : Diamètre de la tuyauterie (m).

L : Longueur de la tuyauterie (m).

g : Accélération de la pesanteur (m/s²).

ε : Coefficient de pertes de charges locales.

K_p : Constante de la canalisation.

Q : le débit de la pompe.

Dans cette application, la pompe centrifuge est caractérisée par un modèle qui sert à déterminer la dépendance de la hauteur manométrique totale HMT en fonction du débit Q. En prenant comme paramètre la vitesse de rotation du moteur, le modèle utilisé est identifié par l'expression :

$$HMT = C_1 \omega^2 + C_2 \omega Q + C_3 Q^2$$

II.54

C_1 , C_2 et C_3 sont des constantes de la pompe données par le constructeur.

La pompe centrifuge oppose un couple résistant C_r .

$$C_r = K_r \Omega^2$$

II.55

Où :

Ω : Vitesse du moteur asynchrone (rad/s).

Avec K_r un coefficient de proportionnalité [(Nm/rad. s⁻¹)²] qui donné par l'équation suivante:

$$K_r = \frac{P_n}{\Omega_n^3}$$

II.56

P_n : Puissance nominale du moteur asynchrone (W).

Chapitre 2: Modélisation des différents éléments du système de pompage photovoltaïque

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

II.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les modèles des différents éléments d'un système de pompage photovoltaïque. Pour le générateur photovoltaïque, nous avons exposé un modèle mathématique qui considère l'influence des différents paramètres météorologique.

Nous avons décrit brièvement le modèle des convertisseurs statiques (onduleur et hacheur) tout en considérant que leurs composants sont parfaits et que la commutation de leurs bras se fait d'une manière instantanée, nous avons ensuite mis en avant un modèle mathématique pour le moteur asynchrone ainsi que la pompe centrifuge, ce qui va nous permettre d'étudier la commande du système de pompage photovoltaïque dans les chapitres qui suivent.

III. Chapitre 3

III.1 Introduction :

On a vu dans le chapitre précédent que les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque dépendent de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la délocalisation du point de puissance maximal.

Ce chapitre comporte deux parties :

Dans la 1^{ère} partie nous nous intéresserons à deux méthodes pour la recherche de point de puissance maximale. Nous allons aussi faire une étude comparative pour tester les performances de chaque méthode :

- La méthode perturbation et observation (P&O).
- La méthode par contrôleur logique flou.

Dans l'autre partie nous nous pencherons sur la commande directe du couple (DTC) avec régulation de vitesse de la machine asynchrone.

III.2 Adaptation de l'énergie photovoltaïque et la commande MPPT :

Le module photovoltaïque est un générateur de puissance finie pouvant opérer selon toute combinaison de courant et de tension, la meilleure combinaison s'appelle le point de puissance maximale (PPM) qui donne une puissance maximale pour un éclairement et une température donnée. La tension et le courant correspondants sont appelés tension optimale et courant optimum. Une connexion directe ne permet pas de faire fonctionner le module à sa tension optimale (puissance maximale). Il est possible d'insérer un convertisseur DC/DC d'adaptation, appelé extracteur du point de puissance maximale (maximum power point tracker (MPPT)), entre la source photovoltaïque et la charge, qui permet la recherche du (MPP) [LAL09].

Le premier système de puissance MPPT a été introduit en 1968 pour un système spatial. Au cours des années, plusieurs algorithmes (MPPT) ont été développés et largement adaptés pour déterminer le point de puissance maximum [LAL09].

III.2.1 Méthode de perturbation et d'observation (P&O) :

La méthode de perturbation et d'observation est une approche itérative largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures sur le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température. Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation [ici une augmentation ou une diminution] de la tension V_{pv} et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du générateur PV. La figure (III.1) représente l'algorithme de la

méthode P&O. À chaque cycle, V_{pv} et I_{pv} sont mesurés afin de calculer $P_{pv}(k)$. Cette valeur de $P_{pv}(k)$ est comparée à la valeur $P_{pv}(k-1)$ calculée au cycle précédent. Si la puissance de sortie a augmenté, V_{pv} est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance de sortie a diminué, V_{pv} est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent. V_{pv} est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT quand le point de puissance maximale est atteint, V_{pv} oscille autour de la valeur optimale $V_{pv-mppt}$. Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas d'incrément de la perturbation. Le rendement de cette technique est d'environ 85% [ZAR10] [MEH07].

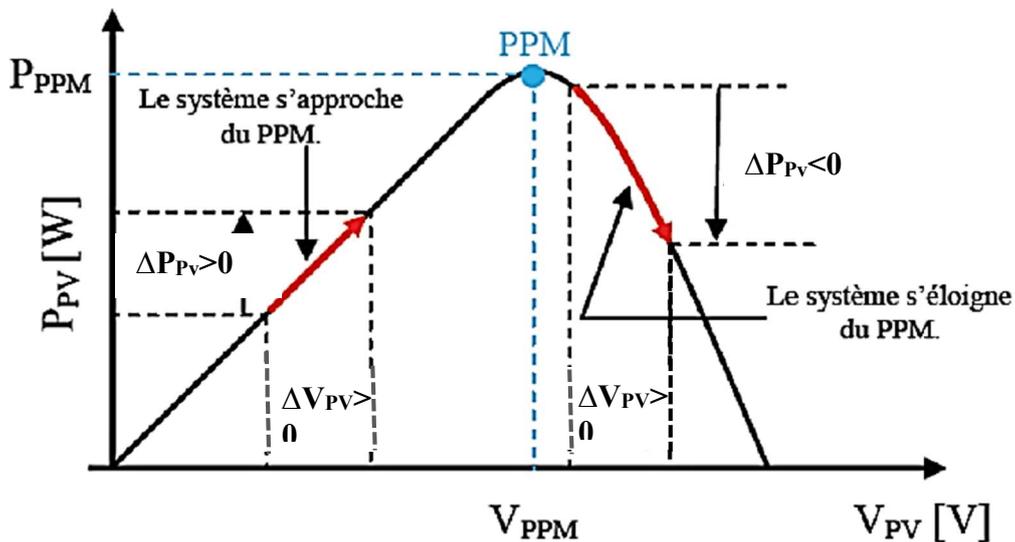


Figure III - 4 : caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau solaire [BEL15].

Facile à utiliser et à implanter dans un système de contrôle d'un panneau photovoltaïque, la P&O présente toutefois des inconvénients. En effet, il arrive que l'algorithme de P&O diverge de point de puissance maximale en cas de fluctuation très rapide de l'ensoleillement. Même en cas de conditions d'exploitation constantes, on observe des variations de la tension et du courant ce qui engendre des oscillations au tour de point de puissance maximale [BER09].

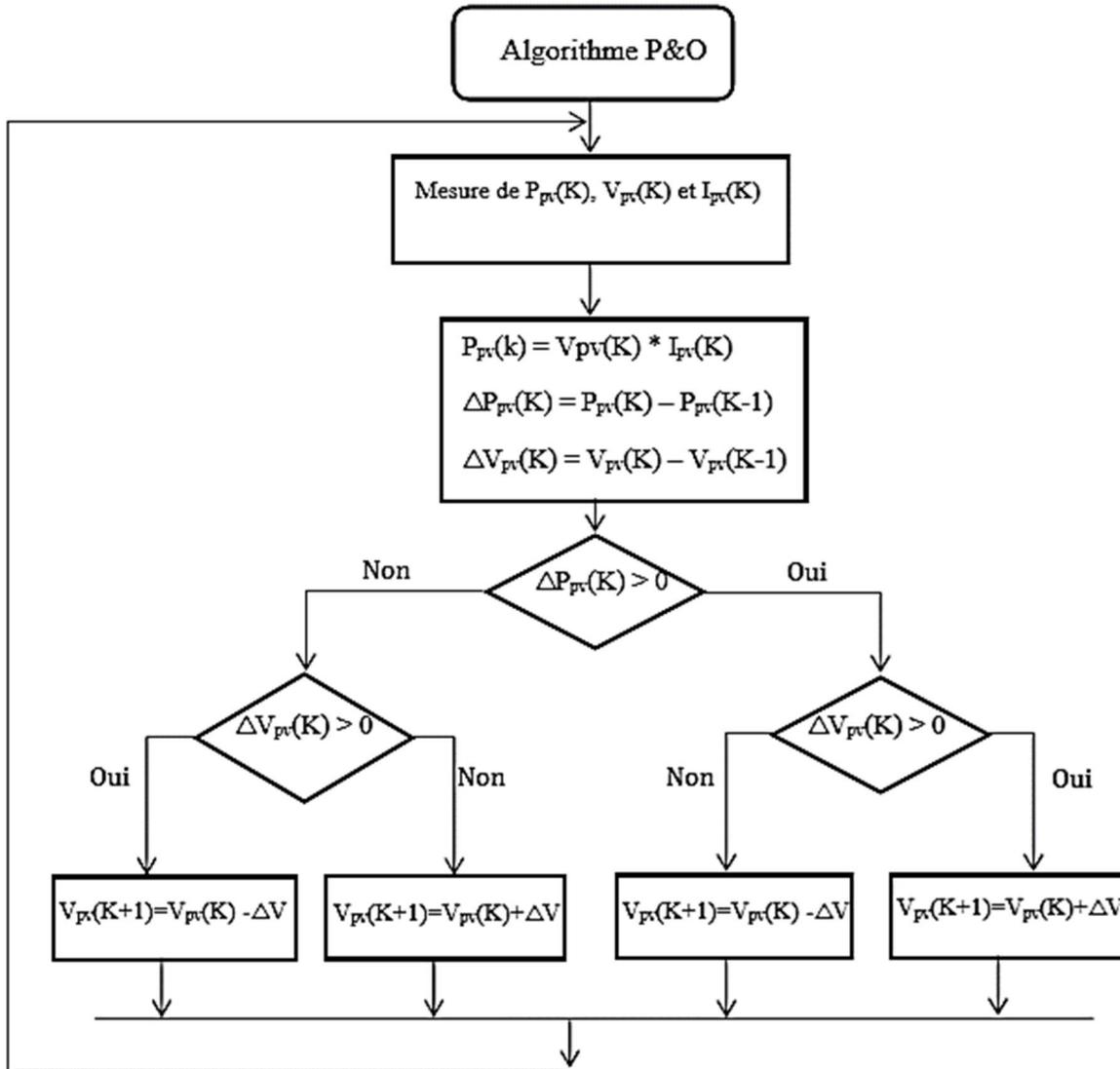


Figure III - 5 : Organigramme de la méthode Perturbation et Observation [HAD03].

III.3 Méthode à base de logique floue :

III.3.1 Introduction à la logique floue :

Les méthodes de réglage conventionnelles se basent sur une modélisation adéquate du système et un traitement analytique à l'aide de fonction de transfert ou d'équations d'état seulement, cette connaissance est souvent entachée d'erreurs et d'imprécisions qui accompagnent toute modélisation du processus. De plus, le couplage existant entre les variables du système rend la commande d'optimisation plus difficile. Il est possible de résoudre ce problème en utilisant des méthodes dites robustes telle que la logique floue. Qui donne une approche plutôt programmatique, permettant d'inclure les expériences acquises par les opérateurs. Les bases théoriques de la logique floue ont été établies en 1965 par le professeur Lotfi Zadeh de l'université de Californie de Berkeley [TOU10] [ZAR10]. Dès 1974, la logique

floue a connu des applications au niveau des systèmes de réglage et de contrôle ; la première implantation d'un contrôleur flou a été appliquée par l'équipe du professeur Mamdani sur une machine à vapeur au Queen Mary Collège de Londres.

La logique floue repose sur la théorie des ensembles flous qui mettent en évidence la notion d'appartenance partielle : chaque élément appartient partiellement ou graduellement aux ensembles flous qui ont été définis, ce qui n'est pas possible avec les théories mathématiques classiques.

III.3.2 Description d'un régulateur flou :

Le régulateur flou ne traite pas une relation mathématique bien définie, comme le font les régulateurs classiques, mais utilise des inférences de plusieurs règles floues se basant sur des variables linguistiques. Ces inférences sont alors traitées par des opérateurs de la logique floue.

Le schéma de Figure (III.3) illustre la structure interne d'un régulateur flou :

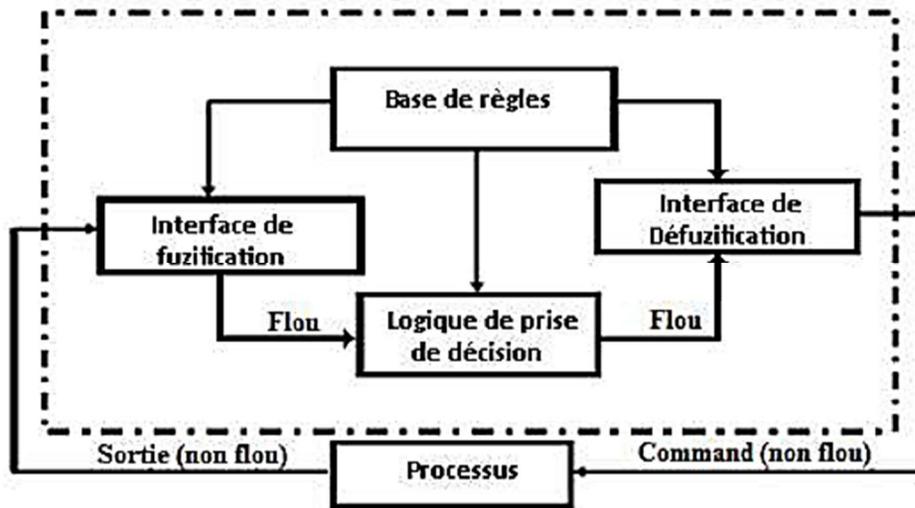


Figure III - 3 : Le schéma synoptique d'un système flou [ZAR10].

Ce schéma est composé de :

- Une interface de fuzzification à l'entrée.
- Une base de règles.
- Une logique de prise de décision.
- Une interface de défuzzification à la sortie.

III.3.3 Interface de fuzzification :

Dans les problèmes de contrôle, les grandeurs observées sont physiques (réelles), or le traitement de ces données est basé ici sur la théorie des ensembles flous. Pour cela une transformation de ces valeurs (numériques) en valeurs floues est nécessaire.

L'interface de fuzzification inclut les fonctions suivantes [ZAR10] :

- Mesure des variables d'entrées.
- Représentation d'une cartographie d'échelle transférant la plage des variables d'entrée aux univers de discours correspondants.
- Transformation des variables d'entrée en variables linguistiques avec la définition des fonctions d'appartenance.

III.3.4 Bases règles floues :

Une base de règles floues est composée de règles qui sont généralement utilisées en parallèle, mais peuvent également être enchaînées dans certaines applications.

Une règle est du type :

Si « prédicat » ALORS « conclusion ». Tel que le prédicat est une combinaison de propositions par des opérateurs ET, OU, NON.

Les bases de règles floues, tout comme les systèmes experts classiques, fonctionnent en s'appuyant sur une base de connaissance issue de l'expertise humaine. Il y a néanmoins de grandes différences dans les caractéristiques et le traitement de cette connaissance [CHE98].

III.3.5 Logique de prise de décision :

La logique de prise de décision est le noyau du contrôleur flou, elle est capable de simuler la prise de décision de l'être humain en se basant sur les concepts flous et les règles d'inférence en logique floue [ZAR10]. Le traitement numérique des règles d'inférence qui permet d'obtenir la sortie linguistique ou floue du régulateur se fait par différentes méthodes, on cite principalement [TOU10] :

- La méthode d'inférence max-min : l'opérateur ET est réalisé par la formation du minimum, l'opérateur OU est réalisé par la formation du maximum, et ALORS, (l'implication) est réalisée par la formation du minimum.
- La méthode d'inférence max-produit : l'opérateur ET est réalisé par la formation du produit, l'opérateur OU est réalisé par la formation du maximum, et ALORS (l'implication) est réalisée par la formation du produit.
- La méthode d'inférence somme-produit. On réalise au niveau de la condition, l'opérateur ET par la formation de la somme (valeur moyenne), et l'opérateur OU par la formation du produit. Pour la conclusion, l'opérateur ALORS est réalisé par un produit.

III.3.6 Interface de défuzzification :

Pour pouvoir définir la loi de commande, le contrôleur flou doit être accompagné d'une procédure de défuzzification jouant le rôle de convertisseur de la commande floue en valeurs physiques nécessaires pour un tel état de processus. Une stratégie de défuzzification est alors nécessaire.

Plusieurs stratégies de défuzzification existent, les plus utilisées sont :

- Méthode par valeur maximum.
- Méthode de centre de gravité.
- Méthode des hauteurs pondérées.

III.4 Application de la logique floue pour l'optimisation de la puissance de générateur photovoltaïque :

Après avoir énoncé et défini les conceptions de base et les termes linguistiques utilisés en logique floue, on s'intéresse dans cette partie une application d'optimisation par logique floue d'un système photovoltaïque.

Dans ce travail, on présente une méthode de MPPT qui utilise la théorie de la logique floue, pour remédier au problème d'oscillation de la méthode perturbation et observation (P&O). Le contrôleur flou proposé optimise l'amplitude de la perturbation pour minimiser les oscillations et pour avoir une réponse rapide et sans oscillations [LAL09].

Les différentes étapes de la conception de ce contrôleur sont présentées et ces performances ont été testées pour des variations des conditions de fonctionnement, tel que la variation de l'ensoleillement de la température et de la charge.

Le régulateur flou, proposé pour l'optimisation du système, est représenté par la figure (III-4). Il reçoit comme entrées la variation de la tension et de la puissance de générateur photovoltaïque ΔV_{pv} , ΔP_{pv} du système ; pour la sortie le contrôleur flou détermine l'incrément optimal qui doit être ajouté à la tension de fonctionnement pour extraire le point de puissance maximal MPP.

La structure du contrôleur par logique floue appliqué au système photovoltaïque est montrée sur la figure (III-4). La tension du générateur photovoltaïque ΔV_{pv} est régulée de manière à ce qu'elle suit la tension photovoltaïque de référence $\Delta V_{pv,ref}$ obtenue à la sortie du contrôleur floue (FLC) la sortie du régulateur de tension est utilisée pour calculer le rapport cyclique du convertisseur DC/DC. Le tableau (II.1) et les fonctions d'appartenance des

variables d'entrées sont adaptés en remplaçant les entrées et les sorties du contrôleur MPPT fluo respectivement par $(\Delta P_{pv}, \Delta V_{pv}$ et $\Delta V_{pv.ref}$), K_1, K_2, K_3 sont des gains adaptatifs [LAL09].

$$\Delta P_{pv} = P_{pv}[K] - P_{pv}[K-1]$$

$$\Delta V_{pv} = V_{pv}[K] - V_{pv}[K-1]$$

$$\Delta V_{pv.ref}[K] = V_{pv}[K] - V_{pv.ref}[K-1]$$

III.6

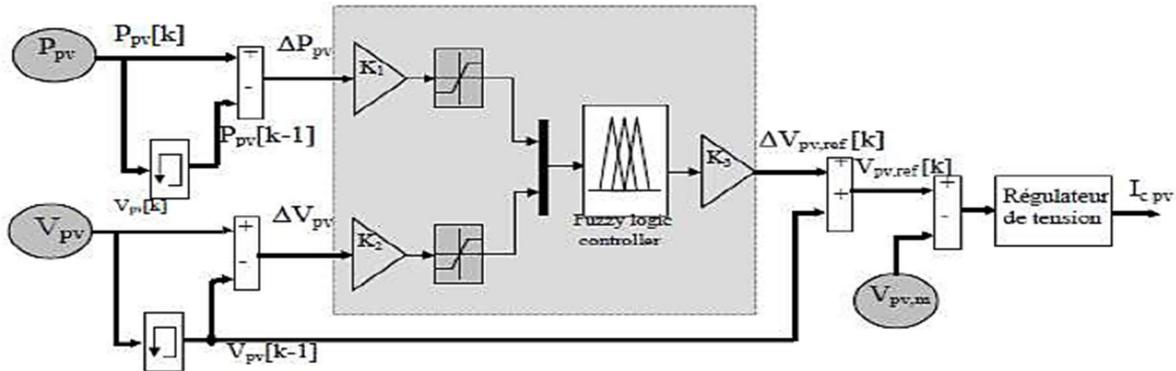


Figure III - 4 : Structure du contrôleur MPPT fluo appliqué au système photovoltaïque [LAL09].

Comme nous l'avons déjà vu un régulateur fluo comporte trois étapes essentielles pour la mise en œuvre d'une commande : Fuzzification, inférence fluo et défuzzification.

III.4.1 Fuzzification :

Dans ce régulateur fluo, l'intervalle d'intérêt de chaque variable d'entrée et de la variable de sortie est divisé en cinq classes, comme le montre la figure (III-5).

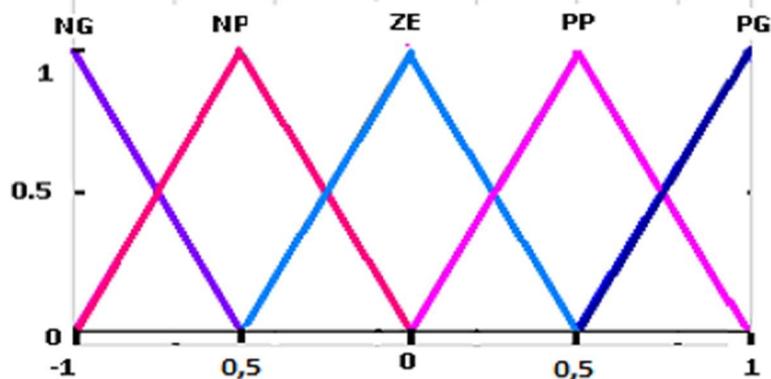


Figure III - 5 : Fonction d'appartenance des entrées et de la sortie du régulateur fluo choisi.

Les classes sont notées comme suit :

NG pour négatif grand, **NP** pour négatif petit, **ZE** pour environ zéro, **PP** pour positif petit, et **PG** pour positif grand.

III.4.2 Inférence floue :

Les règles floues permettent de déterminer le signal de sortie du régulateur en fonction des signaux d'entrées. Elles relient le signal de sortie aux signaux d'entrée par des conditions linguistiques prenant en compte l'expérience ou le savoir-faire acquis par un opérateur humain, en traduisant simplement des remarques de bon sens.

D'après la caractéristique puissance tension (P_{pv} (V_{pv})) figure (III-6). Si une grande augmentation de la tension photovoltaïque (V_{pv}) entraîne une grande augmentation de la puissance photovoltaïque (P_{pv}), on continue d'augmenter fortement la tension de référence $V_{pv.ref}$ (Point A à B ou point B à C). Si une grande augmentation de la tension (V_{pv}) entraîne une diminution de la puissance P_{pv} (point C à D), on diminue la tension de référence $V_{pv.ref}$ pour obtenir une augmentation rapide de la puissance. Si une augmentation ou une diminution quelconque entraîne une variation nulle de la puissance photovoltaïque, on ne fait pas varier la tension de référence $V_{pv.ref}$ (de telle sorte à pouvoir stabiliser le point de fonctionnement sur le sommet de la courbe). Si une variation nulle de la tension photovoltaïque entraîne une augmentation de la puissance, on en déduit que le niveau d'irradiation a augmenté, il faut donc augmenter la tension de référence $V_{pv.ref}$ pour se rapprocher de la nouvelle tension optimale. Si une variation nulle de la tension (V_{pv}) entraîne une diminution de la puissance (P_{pv}), on en déduit que le niveau d'irradiation a diminué, il faut donc diminuer la tension de référence $V_{pv.ref}$ pour se rapprocher de la nouvelle tension optimale [LAL09].

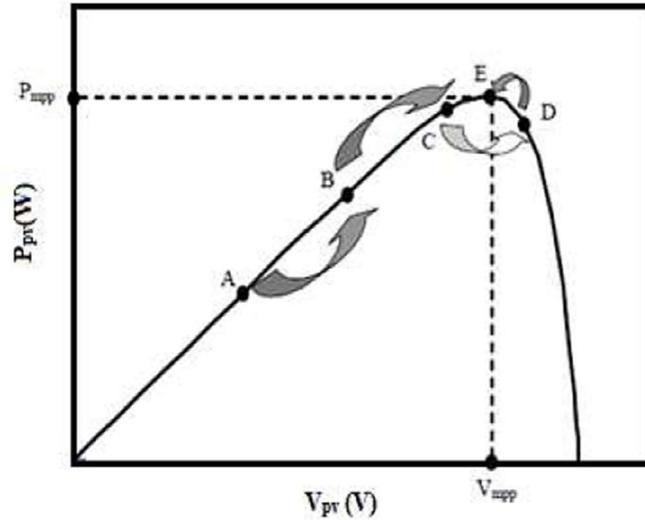


Figure III - 6 : Principe de fonctionnement du contrôleur MPPT fluide [LAL09].

Ces considérations conduisent à adopter une table de décision figure (III-11), résumant les règles choisies.

Tableau III - 6 : Table de règles de décision fluide [LAL09].

ΔV_{pv} ΔP_{pv}	GN	MN	SN	Z	SP	MP	GP
GN	GP	GP	MP	Z	MN	GN	GN
MN	GP	MP	SP	Z	SN	MN	GN
SN	MP	SP	SP	Z	SN	SN	MN
Z	GN	MN	SN	Z	SP	MP	GP
SP	MN	SN	SN	Z	SP	SP	MP
MP	GN	MN	SN	Z	SP	MP	GP
GP	GN	GN	MN	Z	MP	GP	GP

III.5 Défuzzification :

Pour la défuzzification, on utilise la méthode du centre de gravité.

III.6 Résultats de simulation :

Dans les simulations (sous Matlab/Simulink) qui suivent on va simuler les différentes méthodes de MPPT étudiées perturbation et observation (P &O), contrôleur logique fluide (CLF), nous analysons les résultats par une étude comparative.

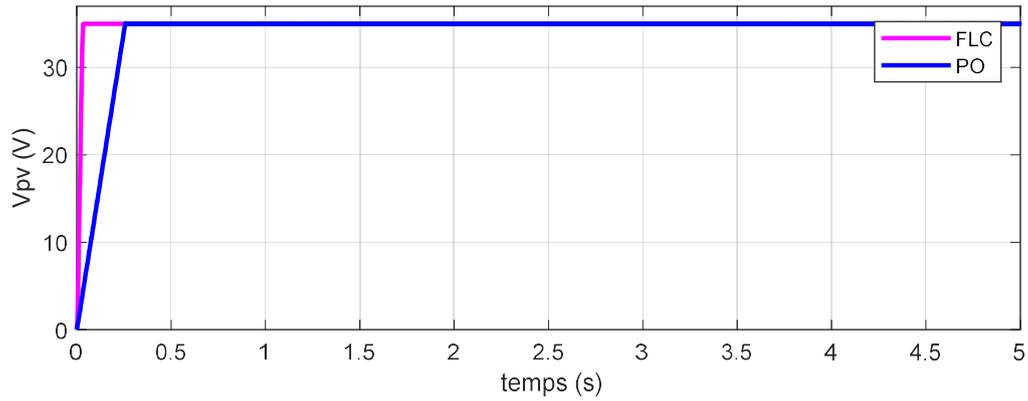


Figure III – 7.a : Allure de la tension photovoltaïque.

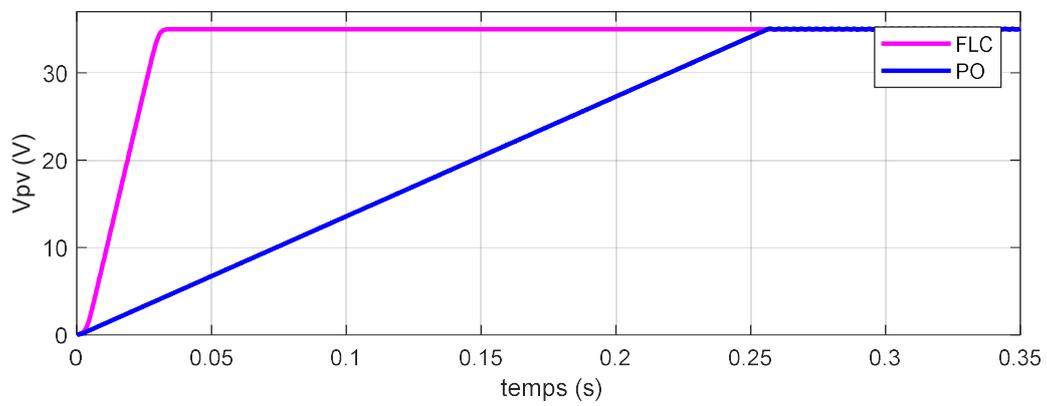


Figure III – 7.b : Allure de la tension photovoltaïque en régime transitoire.

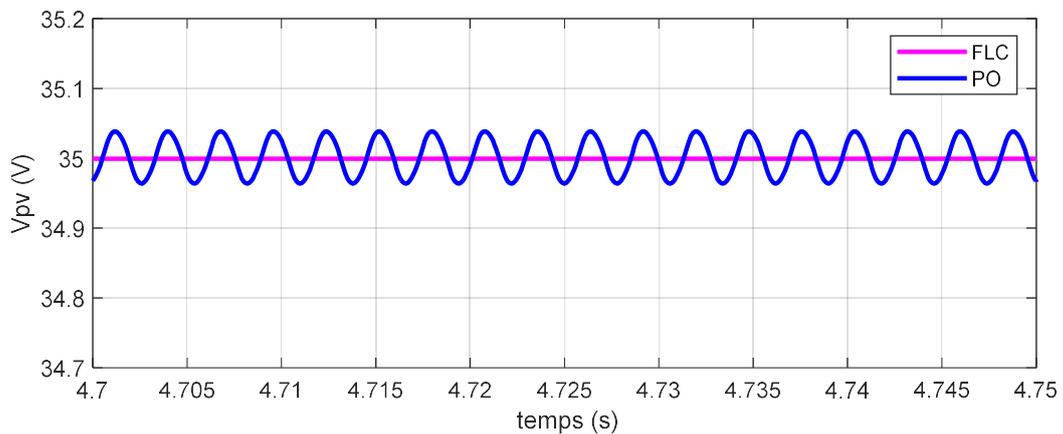


Figure III – 7.c : Allure de la tension en régime permanent.

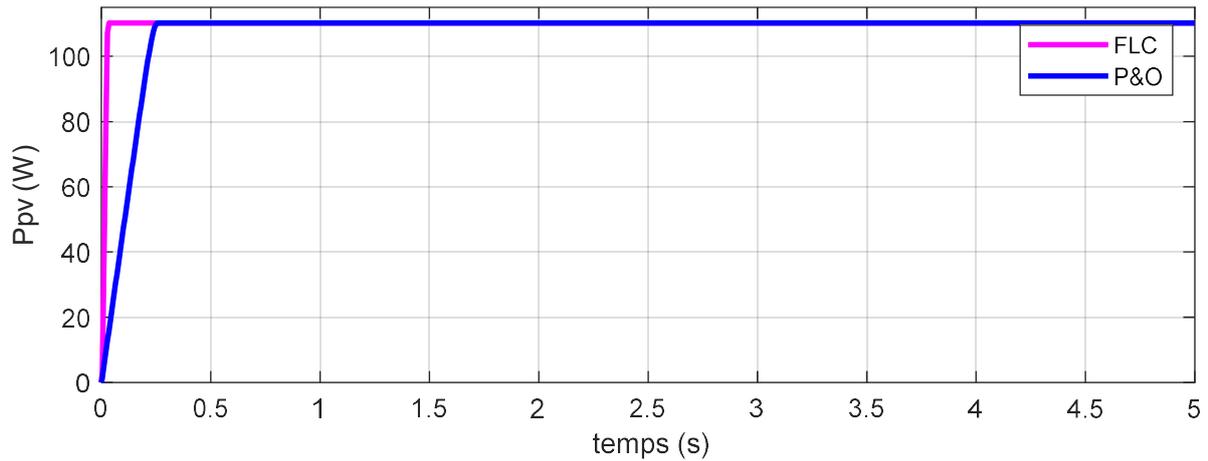


Figure III – 8.a : Allure de la puissance photovoltaïque.

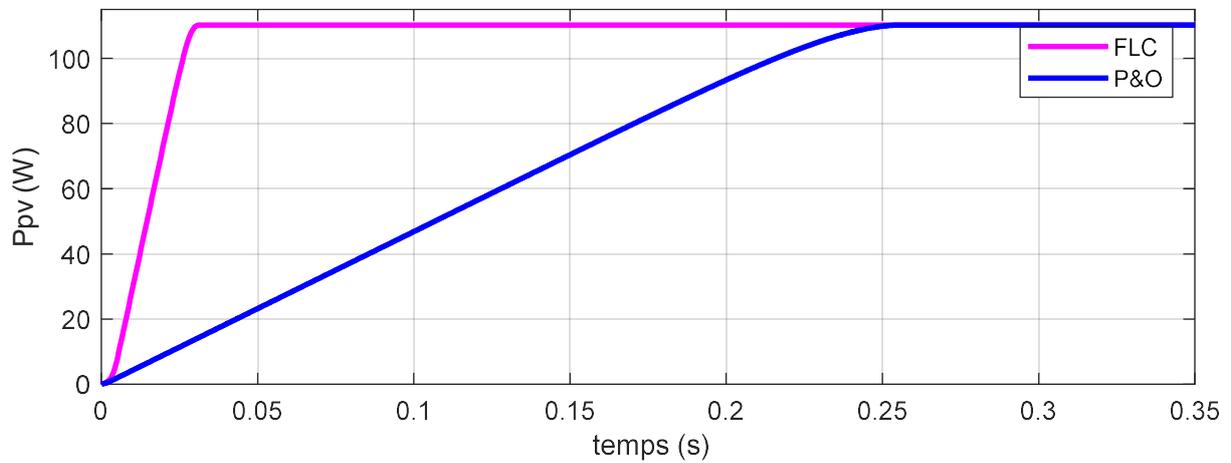


Figure III – 8.b : Allure de la puissance photovoltaïque en régime transitoire.

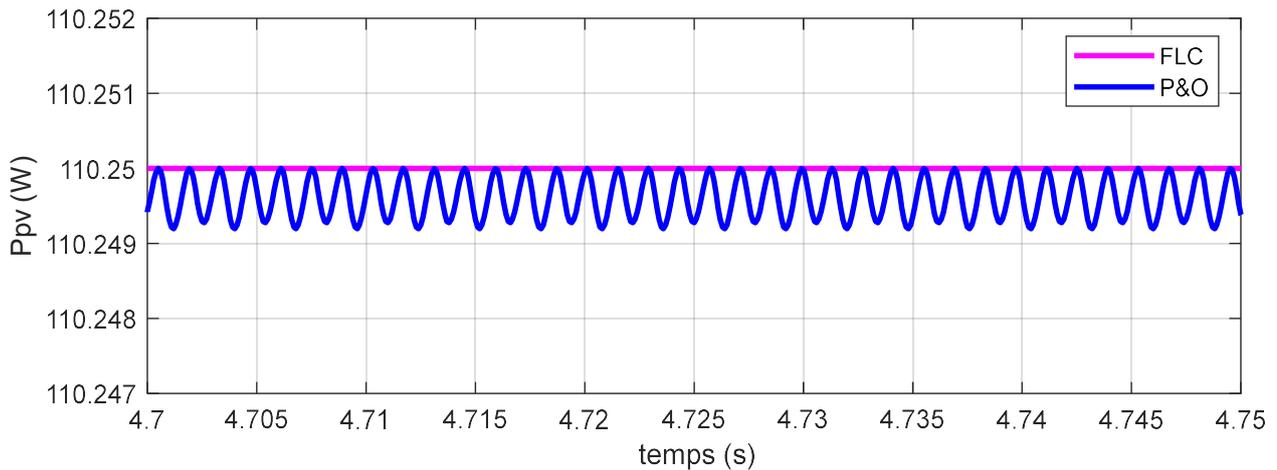


Figure III – 8.c : Allure de la puissance en régime permanent.

Les figures (III-8) présentent la puissance du générateur photovoltaïque (V_{pv}) pour les deux méthodes de control MPPT (perturbation et observation (P&O) et le contrôleur par logique flou (FLC). On peut voir que le (FLC) présente une réponse plus rapide, il atteint sa valeur optimale à 0.03s comparé à la méthode (P&O) qui nécessite plus de temps pour extraire le point de puissance maximale (0.25s) qui présente aussi des oscillations autour du point de fonctionnement en régime permanent. Le contrôleur flou permet une réduction non seulement du temps de convergence pour extraire le MPP, mais aussi des oscillations de puissance en régime établi, comme il est clairement présenté dans les figures.

III.7 Commande de la machine asynchrone :

L'absence totale du découplage entre le flux et le couple dans la machine asynchrone et qui est la seule entrée électrique liée au stator, posent des problèmes difficiles pour sa commande. Dans la commande des systèmes non linéaires ou ayant des paramètres non constants. Les lois de commande classique peuvent être insuffisantes car elles sont non robustes surtout lorsque les exigences sur la précision et autre caractéristiques dynamique des systèmes sont strictes. [IDJ10].

III.8 La commande directe du couple :

La structure de contrôle direct du couple (DTC) de la machine asynchrone a été introduite par I. Takahashi et M. Depenbrock en 1985. Par la suite, plusieurs études ont permis de développer plus précisément la connaissance de cette commande [CHA96].

III.8.1 Principe de la commande DTC :

La commande directe du couple (DTC) a pour objectif la régulation directe du couple de la machine, par l'application des différents vecteurs de tensions de l'onduleur.

Les variables contrôlées sont le flux statorique et le couple électromagnétique qui sont habituellement commandés par des régulateurs à hystérésis. Il s'agit de maintenir ces deux grandeurs instantanées à l'intérieur d'une bande autour de la valeur désirée. La sortie de ces régulateurs détermine le vecteur optimal de tension de l'onduleur à appliquer à chaque instant de commutation [NAA05].

III.8.2 Caractéristiques principales de la commande directe du couple :

Dans une commande (DTC), il est recommandé d'utiliser une fréquence de calcul élevée afin de réduire les oscillations du couple provoquées par les régulateurs à hystérésis. Cette condition

se traduit par la nécessité de faire appel à des calculateurs de haute performance afin de satisfaire aux conditions de calculs en temps réel.

Les caractéristiques générales d'une commande directe de couple sont [ELB06] :

- La commande directe du couple et du flux à partir de la sélection des vecteurs optimaux de commutation de l'onduleur.
- L'obtention des courants statoriques avec une forme sinusoïdale.
- Une très bonne dynamique de la machine.
- L'existence d'oscillations du couple qui dépendent, entre autres, des facteurs de la largeur des bandes des régulateurs à hystérésis.
- La fréquence de commutation de l'onduleur dépend de l'amplitude des bandes à hystérésis.

Cette méthode de commande présente différents avantages et inconvénients qui sont énumérés ci-dessous dans le cas d'une régulation de vitesse en fonctionnement moteur [ELB06] :

III.8.2.1 Avantages [IDJ10] :

- Absence de calculs dans le repère rotorique (d, q) et donc l'utilisation d'une matrice de rotation ;
- Absence de bloc de calcul de modulation de tension MLI ;
- Pas d'obligation de découplage des courants par rapport aux tensions de commande comme dans le cas de la commande vectorielle ;
- Présence d'un seul régulateur PI et deux régulateur a hystérésis, celui de la boucle externe de vitesse ;
- Pas d'obligation de connaître avec une grande précision la position rotorique car seule l'information sur le secteur dans lequel se trouve le vecteur du flux statorique est nécessaire ;
- Très bonne réponse dynamique.

III.8.2.2 Inconvénients [IDJ10] :

- Problèmes de commande à basse vitesse ;
- Nécessité de disposer d'estimations du flux statorique et du couple ;
- Existence d'oscillations de couple ;
- Fréquence de commutations non constantes (utilisation de régulateurs à hystérésis). Cela conduit à un contenu harmonique riche augmentant les pertes, les bruits acoustiques et les oscillations du couple qui peuvent exciter des résonances mécaniques.

III.8.3 Fonctionnement et séquence d'un onduleur de tension triphasé

[IDJ10] :

Dans le cas d'un fonctionnement moteur, les tensions d'alimentation sont estimées en fonction de la tension du bus continu et des états de commutation des bras de l'onduleur.

Ces états sont donnés par le groupe (S_a, S_b, S_c) où chacune des trois variables peut prendre les valeurs : 1 ou 0. Ainsi, huit combinaisons différentes sont possibles :

$$V_0(0\ 0\ 0). V_1(1\ 0\ 0). V_2(1\ 1\ 0). V_3(0\ 1\ 0). V_4(0\ 1\ 1). V_5(0\ 0\ 1). V_6(1\ 0\ 1). V_7(1\ 1\ 1).$$

Ces huit combinaisons engendrent huit vecteurs de tensions qui peuvent être appliqués aux bornes de la MAS. Tous les vecteurs sont actifs hormis les vecteurs V_0, V_7 qui sont nuls. L'équation électrique aux bornes de la machine peut s'écrire en fonction des différents vecteurs de tension, courant et flux, sous la forme suivante :

$$V_s = R_s I_s + \frac{d\Phi_s}{dt} \tag{III.8}$$

Le vecteur de tension V_s est délivré par l'onduleur de tension triphasé supposé parfait.

Ce vecteur est fonction des états de commutation des bras d'onduleur (S_a, S_b, S_c) et peut s'écrire, en utilisant les variables booléennes de l'état des interrupteurs, sous la forme suivante **[CHA96]**:

$$V_s = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{dc} \cdot \left(S_a + S_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + S_c e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) \tag{III.9}$$

En développant le vecteur de tension V_s , la relation entre les tensions réelles (V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}) et les variables booléennes (S_a, S_b, S_c) s'écrit :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \tag{III.10}$$

Par ailleurs, en utilisant la transformée de Concordia, on peut lier les tensions réelles (V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}) aux tensions dans le plan (α, β) par la relation suivante **[ROB07]** :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{III.11}$$

Les positions spatiales, dans le plan (α, β) , des vecteurs de tensions générés par l'onduleur sont présentées dans la figure (III.9) :

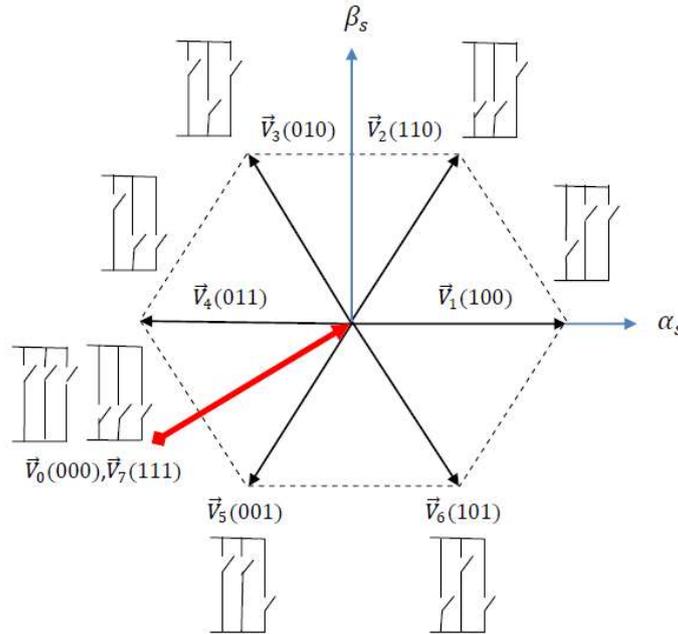


Figure III - 9 : Représentation des vecteurs de tensions générés par l'onduleur [BOU12].

III.8.4 Stratégie de commande directe du flux et de couple :

Principe du contrôle du flux statorique :

A partir de la relation de la tension statorique dans un repère lié au stator, on peut exprimer le flux statorique par :

$$\Phi_s(t) = \int_0^t (V_s - R_s i_s) dt \quad \text{III.12}$$

Sur un intervalle $[0, T_e]$, correspondant à une période d'échantillonnage T_e , les commandes (S_a, S_b, S_c) sont fixes. Par conséquent, on peut écrire [YAN06] :

$$\Phi_s(t) = \Phi_{s0} + V_s T_e - R_s \int_0^{T_e} i_s dt \quad \text{III.13}$$

Où Φ_{s0} est le vecteur flux à l'instant $t=0$. En considérant la chute de tension ($R_s i_s$) négligeable devant la tension V_s (ce qui se vérifie lorsque la vitesse de rotation est suffisamment élevée), l'extrémité du vecteur Φ_s , sur un intervalle $[0, T_e]$, se déplace sur une droite de direction V_s :

$$\Phi_s(t) = \Phi_{s0} + V_s T_e \quad \text{III.14}$$

$$\Delta\Phi_s(t) = V_s \Delta T_e \quad \text{III.15}$$

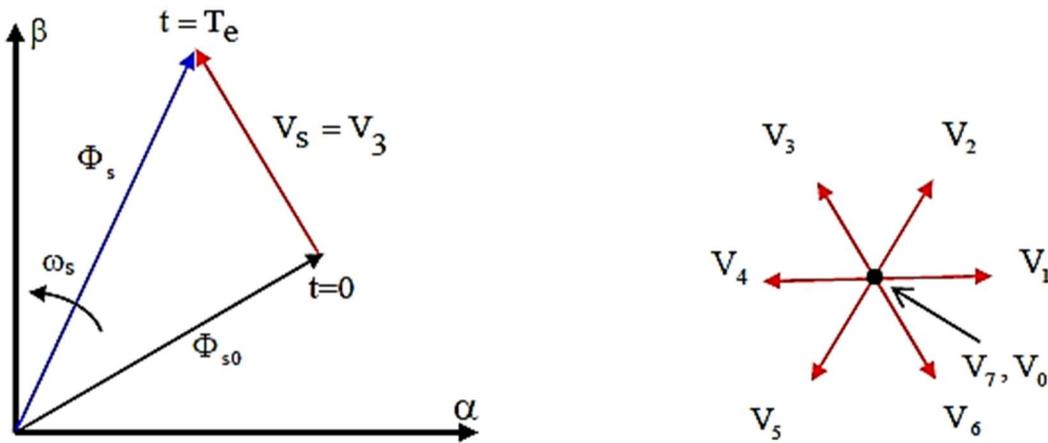


Figure III - 10 : Exemple de l'évolution de l'extrémité de Φ_s pour $R_s \cdot i_s$ négligeable[YAN06]

Par conséquent, en choisissant une séquence correcte du vecteur V_s , sur des intervalles de temps successifs de durée T_e , on peut faire suivre à l'extrémité du vecteur Φ_s la trajectoire désirée. Il est alors possible de faire fonctionner la machine avec un module de flux Φ_s pratiquement constant. Pour cela, il suffit de faire suivre à l'extrémité de Φ_s une trajectoire presque circulaire, si la période T_e est très faible devant la période de rotation du flux statorique [CHA96].

Lorsque le vecteur de tension V_s sélectionné est non nul, la direction du déplacement de l'extrémité de Φ_s est donné par sa dérivée $\frac{d\Phi_s}{dt}$, ainsi que la vitesse de déplacement de

l'extrémité de Φ_s . Lorsqu'on néglige le terme $R_s \cdot i_s$, le vecteur tension est donné par $V_s = \frac{d\Phi_s}{dt}$

la vitesse de rotation Φ_s dépend fortement du choix de V_s .

La figure (III.11) montre un exemple d'évolution de l'extrémité du vecteur Φ_s pour ($V_s = V_2$) avec $R_s \cdot i_s$ négligeable. On constate ainsi que la composante tangentielle du vecteur tension appliqué a pour effet de contrôler le couple alors que la composante radiale agit sur l'amplitude du flux Φ_s .

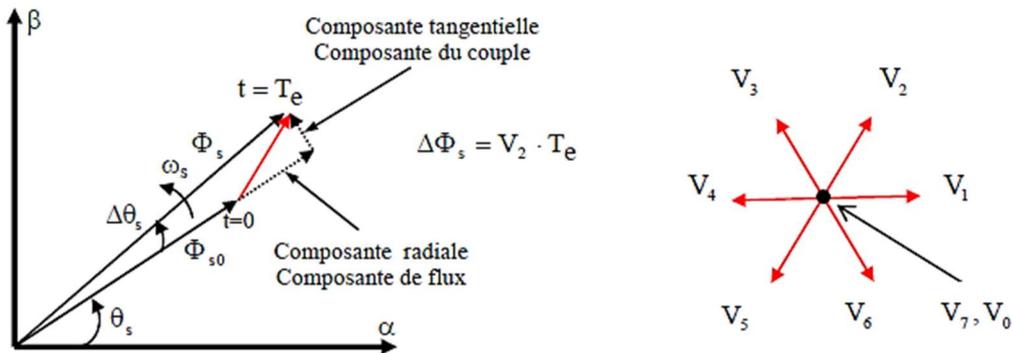


Figure III -11 : Exemple d'évolution de l'extrémité de Φ_s pour $R_s \cdot i_s$ négligeable [IDJ10].

III.8.5 Contrôle du couple électromagnétique :

Les équations électriques de la machine asynchrone peuvent être exprimées, en grandeurs vectorielles dans le référentiel lié au stator, de la manière suivante :

$$\begin{cases} V_s = R_s i_s + \frac{d\Phi_s}{dt} \\ V_r = 0 = R_r i_r + \frac{d\Phi_r}{dt} - j\omega\Phi_r \end{cases} \quad \text{III.16}$$

Le courant rotorique s'écrit :

$$I_r = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{\Phi_r}{L_r} - \frac{M}{L_s L_r} \Phi_s \right) \quad \text{III.17}$$

Les équations deviennent :

$$\begin{cases} V_s = R_s i_s + \frac{d\Phi_s}{dt} \\ \frac{d\Phi_r}{dt} + \left(\frac{1}{\sigma\tau_r} - j\omega \right) \Phi_r = \frac{M}{L_r} \frac{1}{\sigma\tau_r} \Phi_s \end{cases} \quad \text{III.18}$$

Ces relations montrent que :

- Le contrôle du vecteur Φ_s est possible à partir du vecteur V_s , à la chute de tension $R_s i_s$ près.
- Le flux Φ_r suit les variations de Φ_s avec une constante de temps $\sigma\tau_r$.

En régime permanent, l'équation (III.18) s'écrit :

$$\Phi_r = \frac{M}{L_s} \frac{\Phi_s}{1 - j\omega\sigma\tau_r} \quad \text{III.19}$$

En posant $\gamma = (\Phi_s \wedge \Phi_r)$, le couple s'exprime sous la forme suivante :

$$T_{em} = p \frac{M}{\sigma L_s L_r} \Phi_s \Phi_r \sin \gamma \quad \text{III.20}$$

Le couple dépend de l'amplitude des deux vecteurs Φ_s et Φ_r de leur position relative. De ce fait, si on parvient à contrôler parfaitement le flux Φ_s (à partir de V_s) en module et en position, on peut alors contrôler l'amplitude de la position relative de Φ_r et donc contrôler le couple, à condition que la période de commande T_e de la tension V_s est telle que $T_e \ll \sigma\tau_r$ [ELB06] .

III.8.6 Estimateur du flux statorique :

L'estimateur du flux est réalisé à partir des mesures des grandeurs statoriques (courants et tensions) de la machine.

A partir des commandes (S_a, S_b, S_c) et de la tension Vdc, on détermine les valeurs des tensions

$V_{s\alpha}$ et $V_{s\beta}$ en appliquant la transformation de Concordia:

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} \left[S_a - \frac{1}{2}(S_b + S_c) \right] \\ V_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{dc} [S_b - S_c] \end{cases} \quad \text{III.21}$$

De même, les courants $i_{s\alpha}$ et $i_{s\beta}$ sont obtenus à partir de l'application de la transformation de Concordia aux courants i_{sa} , i_{sb} et i_{sc} mesurés:

$$\begin{cases} i_{s\alpha} = \sqrt{\frac{3}{2}} i_{sa} \\ i_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} (i_{sb} - i_{sc}) \end{cases} \quad \text{III.22}$$

L'utilisation de la relation (III.16), permet alors de déterminer directement les composants (α, β) du vecteur flux statorique (Φ_s) [IDJ10]:

$$\begin{cases} \Phi_{s\alpha}(t) = \int_0^t (V_{s\alpha} - R_s \cdot i_{s\alpha}) dt \\ \Phi_{s\beta}(t) = \int_0^t (V_{s\beta} - R_s \cdot i_{s\beta}) dt \end{cases} \quad \text{III.23}$$

Dont le module s'écrit :

$$\Phi_s = \sqrt{\Phi_{s\alpha}^2 + \Phi_{s\beta}^2} \quad \text{III.24}$$

III.8.7 Sélection du vecteur de tension :

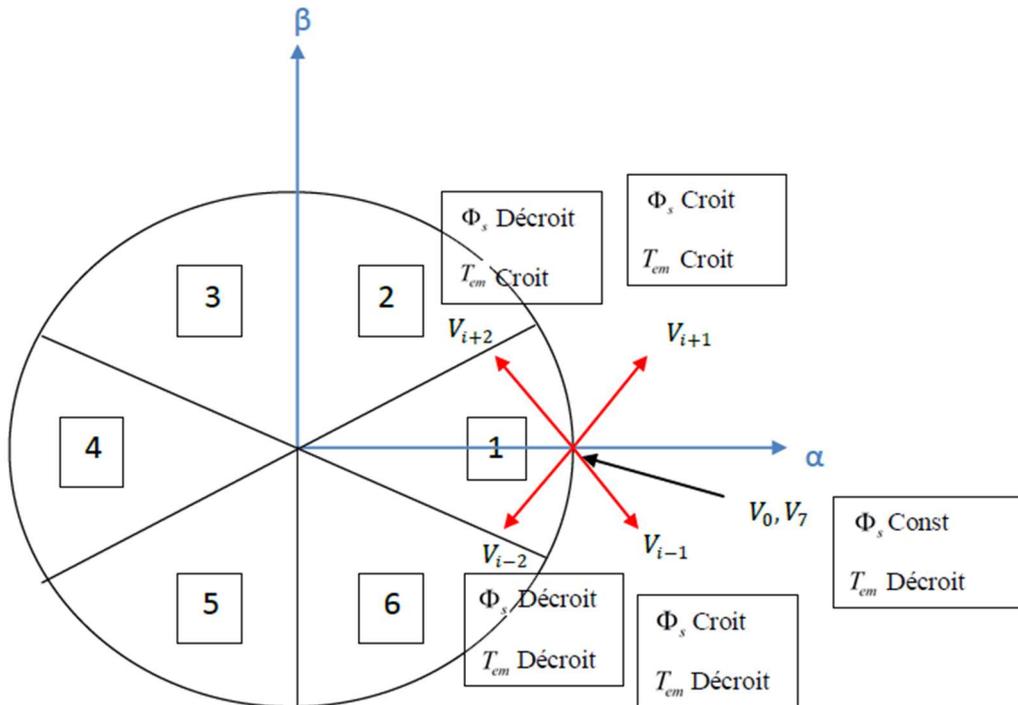


Figure III - 12 : Sélection du vecteur de tension selon la zone N=1 [ANK12]

Le choix du vecteur de tension statorique V_s dépend de la variation souhaitée pour le module du flux (Φ_s) , du sens de rotation de (Φ_s) et de l'évolution souhaitée pour le couple. L'espace de l'évolution de (Φ_s) est décomposé en six zones i , avec $i = [1,6]$, telles qu'elles sont

représentées sur la figure (IV.12). Lorsque le flux (Φ_s) se trouve dans une zone i ($i=1\dots 6$) le contrôle du flux statorique et du couple peut être assuré en sélectionnant l'un des vecteurs tensions suivants [CHA96]:

- Si V_{i+1} est sélectionné alors Φ_s croît et C_{em} croît ;
- Si V_{i-1} est sélectionné alors Φ_s croît et C_{em} décroît ;
- Si V_{i+2} est sélectionné alors Φ_s décroît et C_{em} croît ;
- Si V_{i-2} est sélectionné alors Φ_s décroît et C_{em} décroît ;
- Si V_0 , ou V_7 sont sélectionnés alors l'amplitude du flux demeure constante et le couple décroît si la vitesse est positive, et croît si la vitesse est négative.

III.8.8 Estimation du couple électromagnétique :

Le couple est estimé directement à partir des grandeurs estimées du flux Φ_{sa} et $\Phi_{s\beta}$ et des grandeurs calculées du courant i_{sa} et $i_{s\beta}$ [IDJ10].

$$C_{em} = p(\Phi_{sa} \cdot i_{s\beta} - \Phi_{s\beta} \cdot i_{sa}) \quad \text{III.25}$$

La zone N_i dans laquelle se situe le vecteur, Φ_s est déterminée à partir des composantes Φ_{sa} et $\Phi_{s\beta}$. En effet, l'angle α_s entre le référentiel (α, β) et le vecteur Φ_s est obtenu à partir de la relation suivante :

$$\alpha_s = \arctg\left(\frac{\Phi_{s\beta}}{\Phi_{sa}}\right) \quad \text{III.26}$$

III.8.9 Elaboration du correcteur du flux :

Le but d'utiliser un correcteur de flux est de maintenir l'extrémité du vecteur flux (Φ_s) dans une couronne circulaire comme le montre la figure (III-13). La sortie du correcteur doit indiquer le sens d'évolution du module de Φ_s afin de sélectionner le vecteur de tension correspondant.

Pour cela, un correcteur à hystérésis à deux niveaux convient parfaitement et permet en plus d'obtenir de très bonnes performances dynamiques. La sortie du correcteur, représentée par une variable booléenne C_{flx} indique directement si l'amplitude du flux doit être augmentée

(Cflx = 1) ou diminuée (Cflx = 0) de façon à maintenir $|\Phi_{sref} - \Phi_s| \leq \Delta\Phi_s$. Où Φ_{sref} correspond à la consigne de flux et $\Delta\Phi_s$ est la moitié de la largeur de la bande d'hystérésis du correcteur [ELB06].

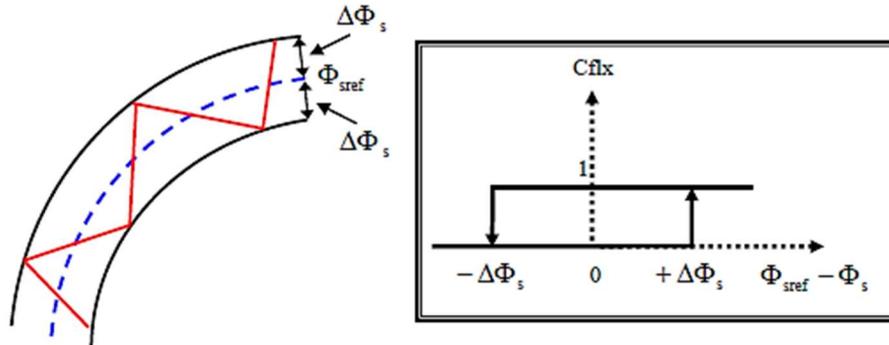


Figure III -13 : Evolution du flux en utilisant un correcteur à hystérésis à deux niveaux [IDJ10].

III.8.10 Elaboration du correcteur du couple :

Ce correcteur a pour fonction de maintenir le couple dans les limites $|C_{em-ref} - C_{em}| \leq \Delta C_{em}$ C_{em-ref} Étant la référence du couple et ΔC_{em} la moitié de la largeur de la bande d’hystérésis du correcteur.

Contrairement au flux, le couple électromagnétique peut être positif ou négatif. Deux solutions peuvent alors être envisagées :

- Un correcteur à hystérésis à deux niveaux
- Un correcteur à hystérésis à trois niveaux

Dans notre cas, nous utilisons un correcteur à trois niveaux afin de contrôler la machine dans les deux modes de fonctionnement soit pour un couple positif ou négatif.

La sortie du correcteur est représentée par une variable booléenne Ccpl, elle indique directement si l’amplitude du couple doit augmenter en valeur absolue (Ccpl=1) pour une consigne positive et (Ccpl=-1) pour une consigne négative et (Ccpl=0) pour maintenir le couple constant [ELB 06].

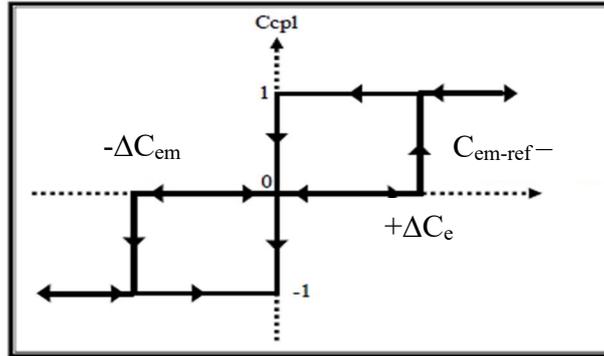


Figure III - 14 : Evolution du couple en utilisant un correcteur à hystérésis à trois niveaux [IDJ10]

III.8.11 Elaboration de la table de commutation :

❖ **Analyse des différentes stratégies de commutation :**

Plusieurs vecteurs de tensions peuvent être sélectionnés pour une combinaison donnée du flux et du couple. Le choix se fait sur la base d'une stratégie prédéfinie et chacune d'elles (les combinaisons) affectent le couple et l'ondulation du courant, les performances dynamiques et le fonctionnement à deux ou à quatre quadrants.

❖ **Fonctionnement à deux quadrants :**

Pour une vitesse positive, deux vecteurs de tensions (en avant) V_{i+1} , V_{i+2} seulement peuvent être appliqués pour augmenter le couple selon le flux statorique exigé. Pour diminuer le couple, il est possible d'appliquer les vecteurs de tensions radiaux V_i , V_{i+3} ou le vecteur nul [CHA96].

❖ **Fonctionnement à quatre quadrants :**

Afin d'améliorer les performances dynamique de la commande DTC à basse vitesse et assurer le fonctionnement en quatre quadrants, il est nécessaire d'appliquer les vecteurs tensions (en arrière) V_{i-1} et V_{i-2} dans le contrôle du couple et du flux. Cette stratégie exige du flux de tourner dans les deux sens de rotation, même à très basse vitesse. Cela induit de larges valeurs de pulsation rotorique, lesquelles sont exigées quand le couple doit diminuer rapidement. Cette stratégie permet d'obtenir un très bon contrôle du flux statorique.

❖ **Table de commutation :**

Comme introduit ci-dessus, il est donc possible d'utiliser deux vecteurs de tensions pour chaque sens de rotation ; l'un fait croître le vecteur flux statorique et l'autre le fait décroître. Ainsi, Le couple peut être contrôlé en utilisant la table logique de commutation optimale, qui

permet de définir le vecteur qu'il faut appliquer dans chaque secteur à partir des sorties des correcteurs et de la position du vecteur flux statorique. Cette table est représentée ci-dessous.

Tableau III -2 : La table de commutation avec correcteur du couple a trois niveaux [IDJ10]

N		1	2	3	4	5	6	Comparateur	
$C_{\text{flx}} = 1$	$C_{\text{cpl}} = 1$	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	02 niveaux	
	$C_{\text{cpl}} = 0$	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0		
	$C_{\text{cpl}} = -1$	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	03 niveaux	
$C_{\text{flx}} = 0$	$C_{\text{cpl}} = 1$	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2	02 niveaux	
	$C_{\text{cpl}} = 0$	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7		
	$C_{\text{cpl}} = -1$	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	03 niveaux	

Il est à noter que la fréquence de commutation dépendra de l'amplitude de la bande d'hystérésis du flux utilisée. Plus la largeur de la bande est faible, plus la fréquence est élevée [CHA96], [ELB06].

III.8.12 Schéma fonctionnel de la DTC :

La structure du contrôle direct du couple est représentée comme suit :

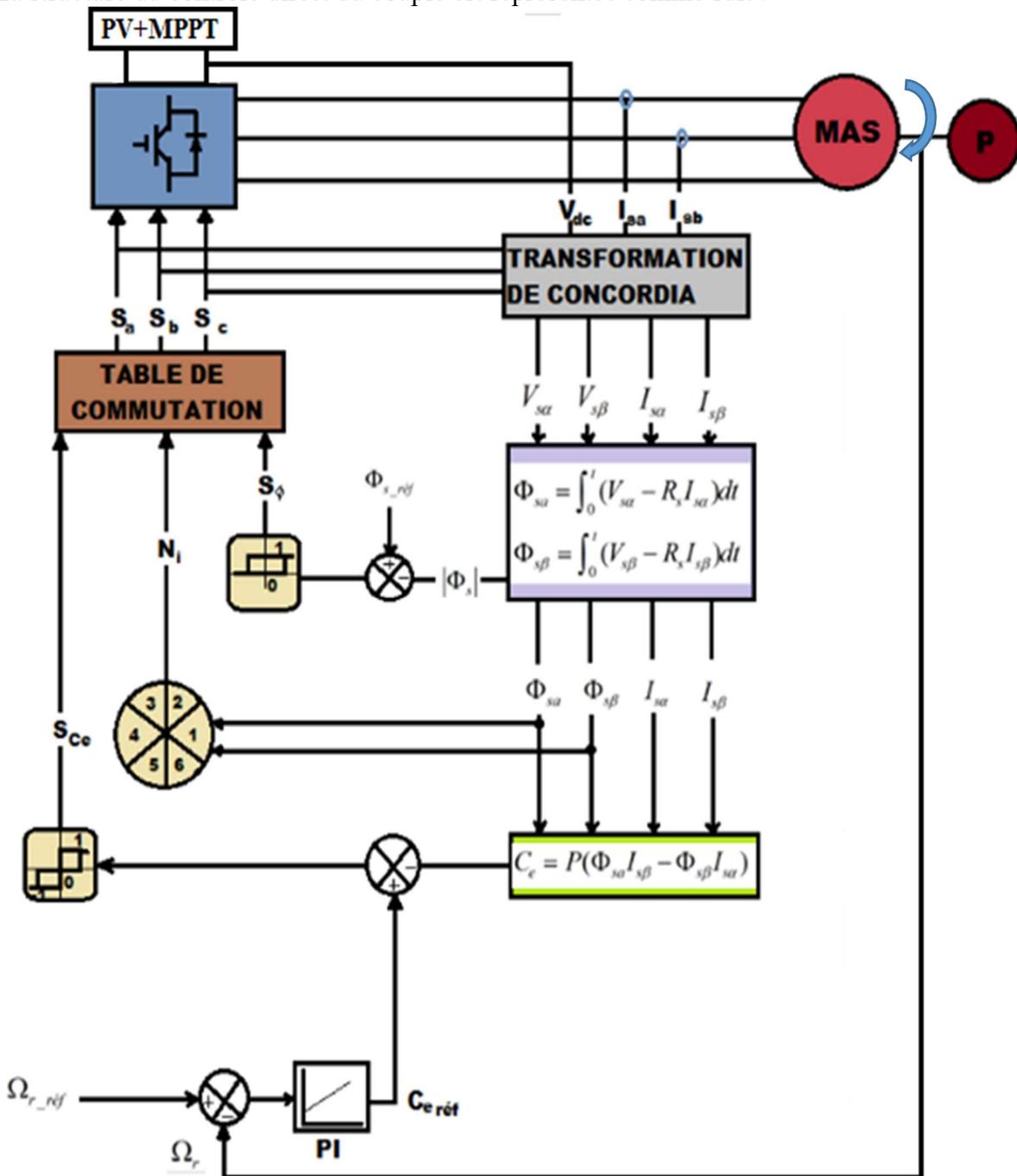


Figure III - 15 : Schéma global de la DTC avec régulation de vitesse

III.9 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté deux méthodes pour l'optimisation de système photovoltaïque en suite nous avons fait une étude comparative entre la P&O et le CLF.

Chapitre 3 : Commande et optimisation du système de pompage photovoltaïque

D'après les constatations on voit que la méthode de contrôleur logique flou présente des performances meilleures, c'est pour cela que le choix de la méthode d'optimisation de système globale se porte sur le contrôleur logique flou.

Nous avons aussi présenté le principe et les avantages et inconvénients de la commande directe du couple appliquée à la machine asynchrone.

IV. Chapitre 4

IV.1 Introduction :

L'objectif de ce dernier chapitre est de faire la simulation numérique sous MATLAB de notre système de pompage photovoltaïque avec la commande non linéaire DTC (Direct Torque Control). Ce dernier est constitué d'un moteur asynchrone accouplé à une pompe centrifuge. L'ensemble est alimenté par un générateur photovoltaïque (GPV), différentes stratégies de commande ont été mise en œuvre pour l'amélioration de la DTC pour contrôler le moteur asynchrone qui entraîne la pompe.

Améliorer les performances de la DTC classique revient surtout à maîtriser la variation de la fréquence de commutation et réduire les ondulations sur le couple et sur le flux.

Dans notre travail on aura présenté trois différentes approches peuvent être adoptées.

- La commande DTC classique avec 6 secteurs.
- La commande DTC avec une table à 12 secteurs.
- Application de la logique floue à la DTC.

Ainsi faire une étude comparative pour tester les performances de chaque méthode.

IV.2 Dimensionnement du générateur photovoltaïque :

Ayant défini le besoin en eau, la puissance du générateur qui doit être fournie est déterminée par la puissance en fonctionnement nominal du groupe motopompe qui est de 1.1kW ajouter à cela le rendement des convertisseurs, le générateur photovoltaïque sera constitué d'une association de panneaux en série.

$$I_{GPV} = N_p \times I = 1 \times 3.15 = 3.15 A \quad \text{IV.1}$$

$$V_{GPV} = N_s \times V = 11 \times 35 = 385 V \quad \text{IV.2}$$

$$P_{GPV} = I_{GPV} \times V_{GPV} = 1212.75 W \quad \text{IV.3}$$

IV.3 Simulation du système de pompage photovoltaïque :

Le but est d'obtenir certains résultats sur des grandeurs qui résultent des éléments du système de pompage photovoltaïque tel que la puissance à la sortie du générateur photovoltaïque, les courants et flux du moteur asynchrone, le couple électromagnétique et résistant, débit réel rendements etc. Ces résultats vont nous permettre de montrer la fiabilité de ce système dans des conditions météorologiques variables.

Le schéma de notre système étudié est représenté sur la figure (IV-1) ci-dessous. La vitesse de référence (Ω_{ref}) est calculée en fonction de la puissance photovoltaïque optimisée par l'algorithme MPPT « P&O », elle est donnée par la relation suivante :

$$\Omega_{ref} = \Omega_n \times \sqrt[3]{P_{pv_tot} \times \eta / P_n} \quad \text{IV.4}$$

P_{pv_tot} : Puissance photovoltaïque totale (W).

Ω_n : vitesse nominale de moteur asynchrone (rad/s).

η : Rendement du groupe motopompe.

P_n : Puissance nominale du moteur (W).

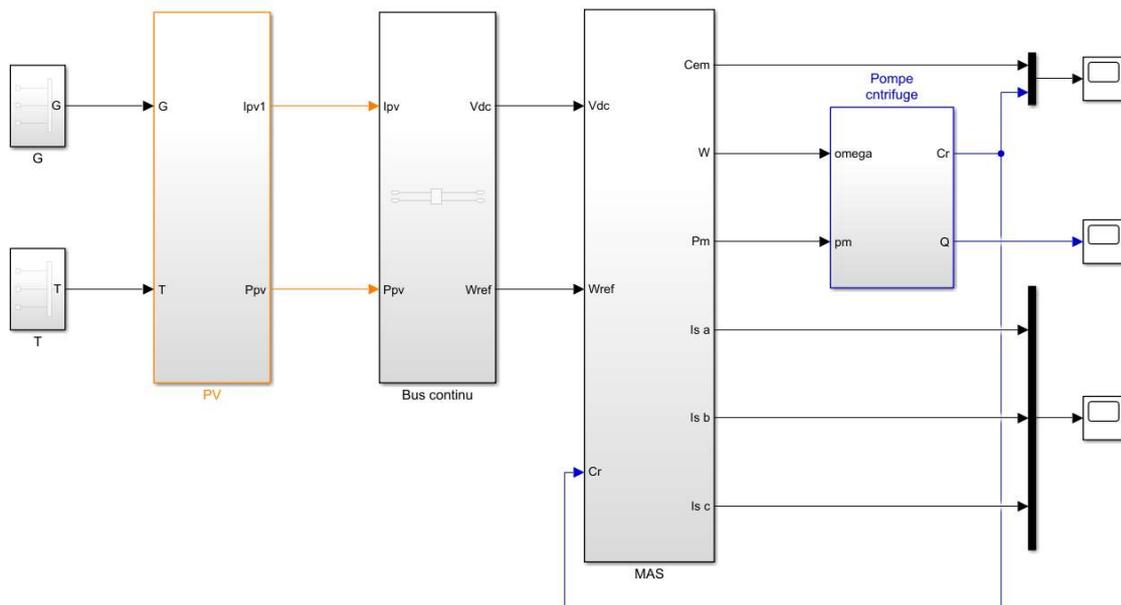


Figure IV-1 : Système de pompage PV

Simulation du système de pompage photovoltaïque a été effectuée dans les conditions ($G=1000W/m^2$ et $t=25^\circ C$) puis en variant la température et l'ensoleillement comme suit :

- $t = [0 - 3]$ ($G=1000W/m^2$; $T=25^\circ C$).
- $t = [3 - 6]$ ($G=800W/m^2$; $T=25^\circ C$).
- $t = [6 - 9]$ ($G=1000W/m^2$; $T=25^\circ C$).
- $t = [9 - 12]$ ($G=1000W/m^2$; $T=40^\circ C$).
- $t = [12 - 15]$ ($G=1000W/m^2$; $T=25^\circ C$).

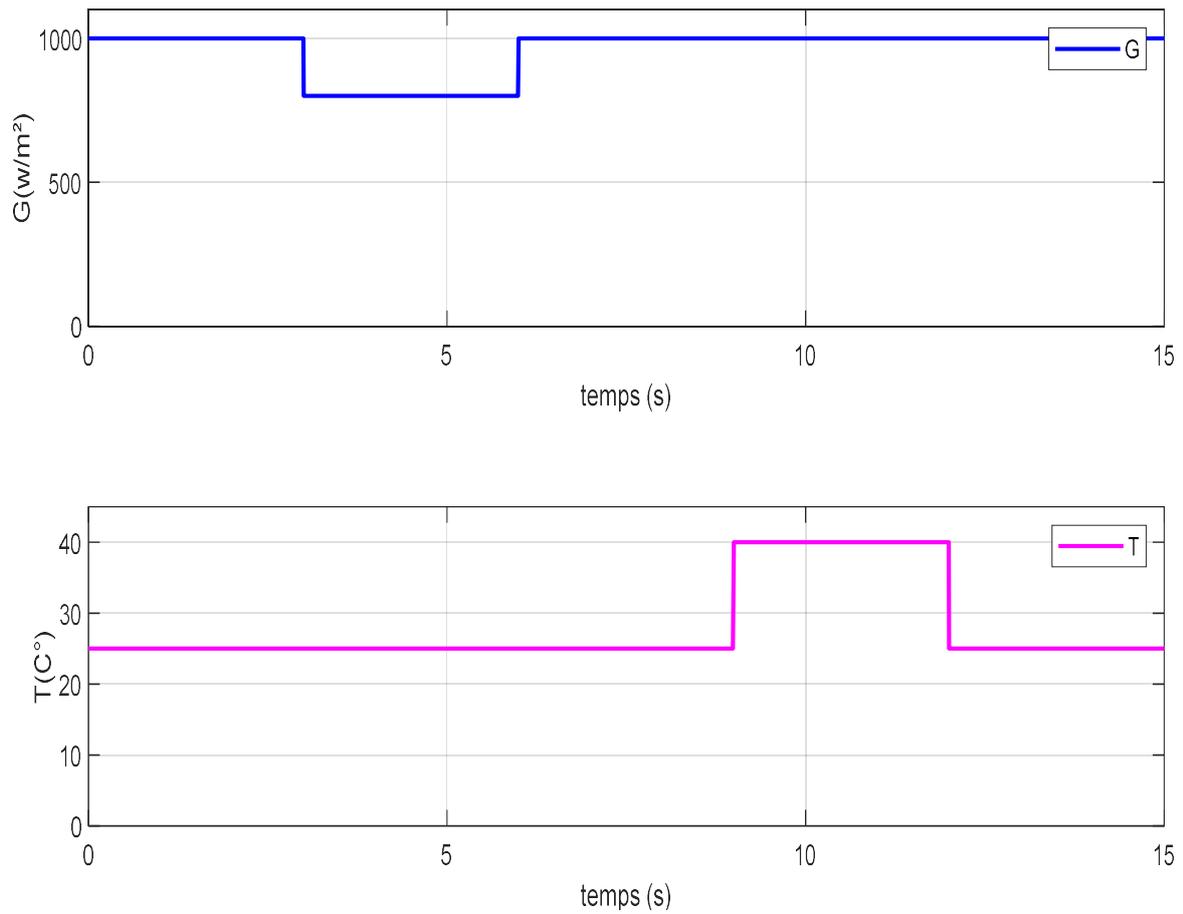


Figure IV-2 : profil d'ensoleillement et de température

Le but est de montrer que le système de pompage photovoltaïque suit et s'adapte aux différentes variations des conditions météorologiques (ensoleillement et température) pouvant se produire durant la journée.

IV.4 Résultat de simulation :

Les résultats ci-dessous représentent la simulation de notre système globale de pompage photovoltaïque, avec l'application de la commande DTC classique (6 secteur) présentée dans le chapitre précédent et une régulation de la vitesse avec un régulateur PI classique la simulation est effectuée en employant le logiciel MATLAB/SIMULINK.

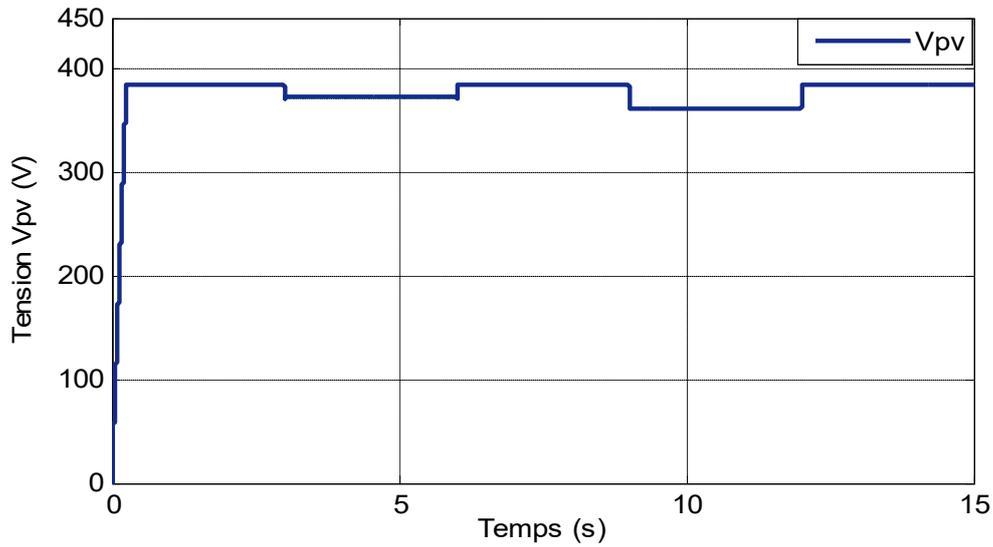


Figure IV-2 : Allure de la tension à la sortie du GPV

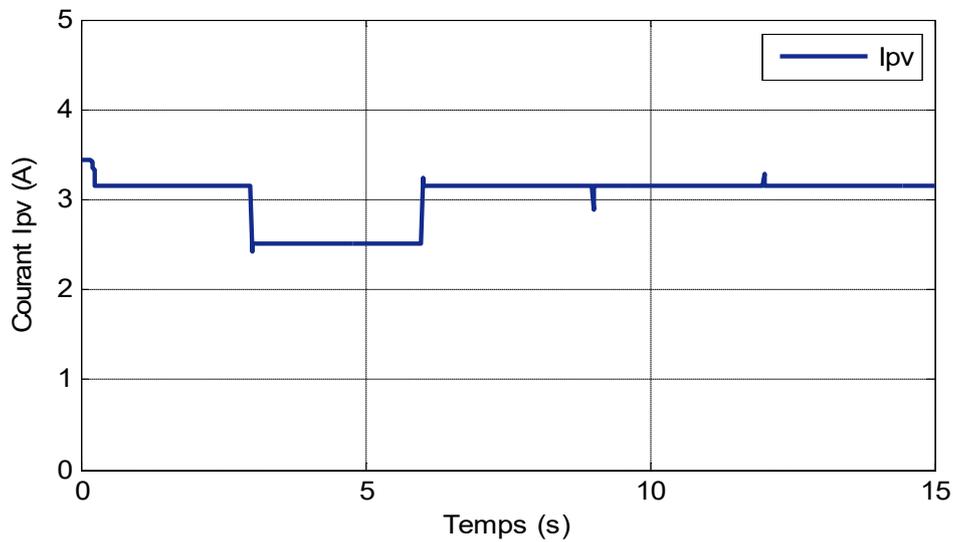


Figure IV-3 : Allure du courant à la sortie du GPV

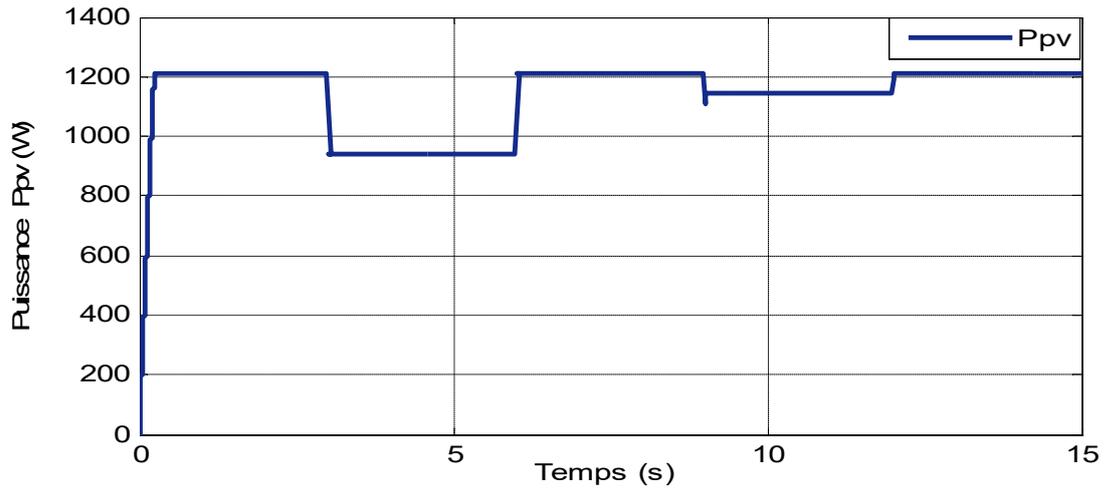


Figure IV-4 : Allure de la puissance à la sortie du GPV.

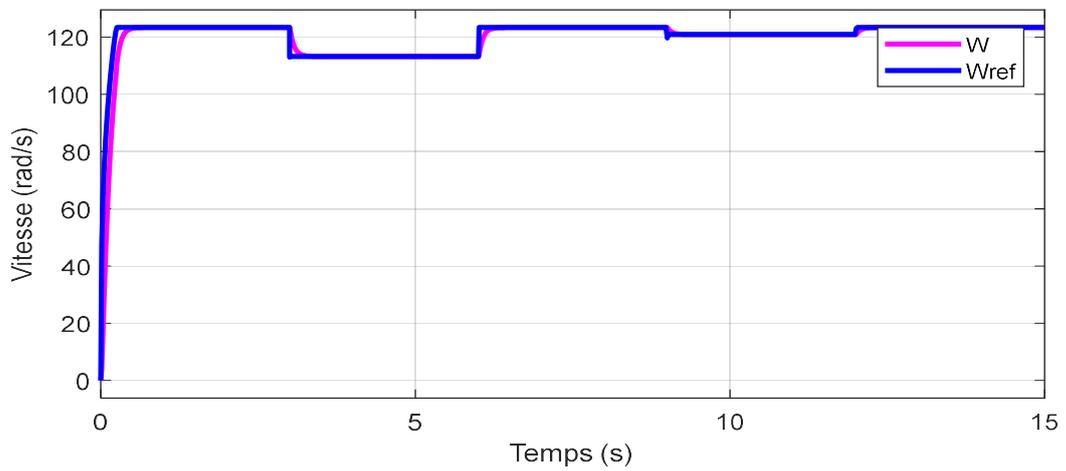


Figure IV-5 : Allure de vitesse de rotation de la machine en (rad/s) pour la DTC6.

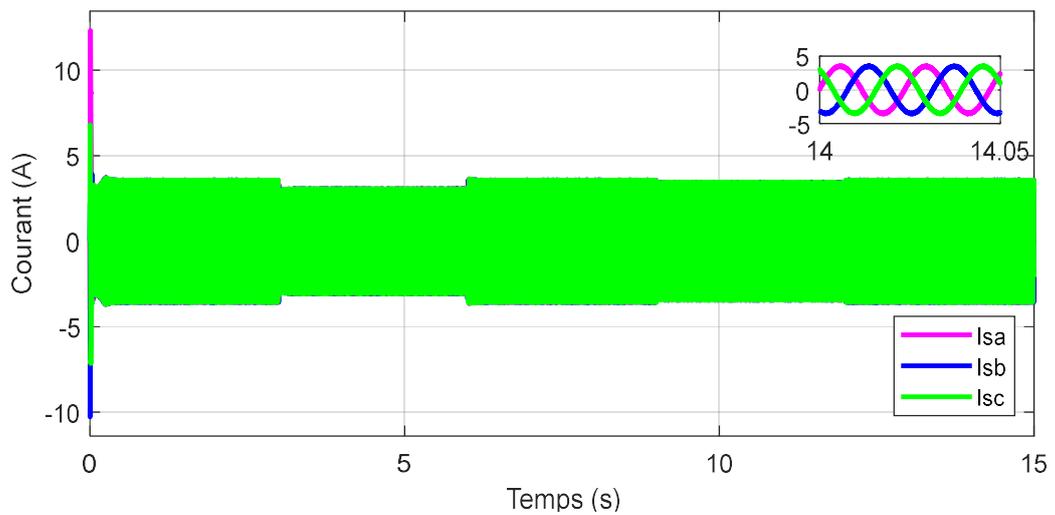


Figure IV-6 : Allure du courant statorique du moteur asynchrone pour la DTC6.

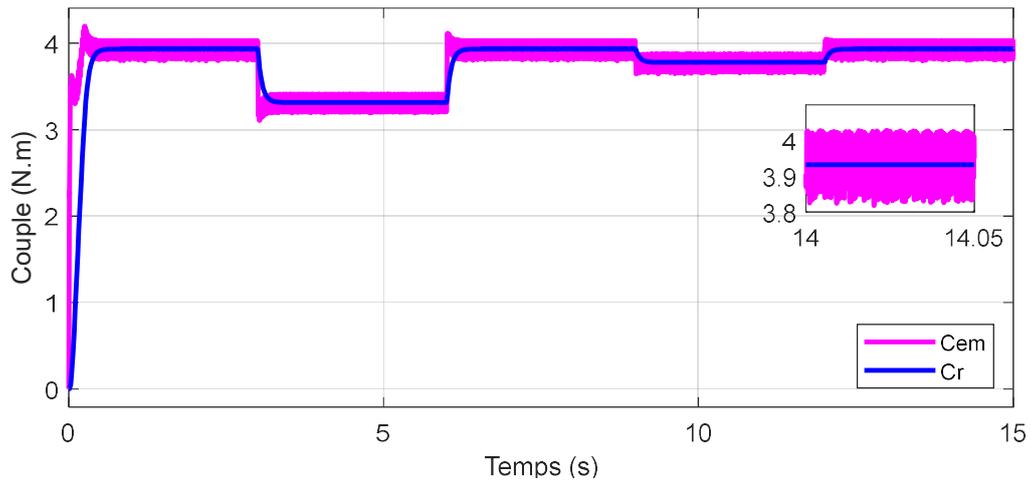


Figure IV-7 : Allure du couple électromagnétique et du couple résistant pour la DTC6.

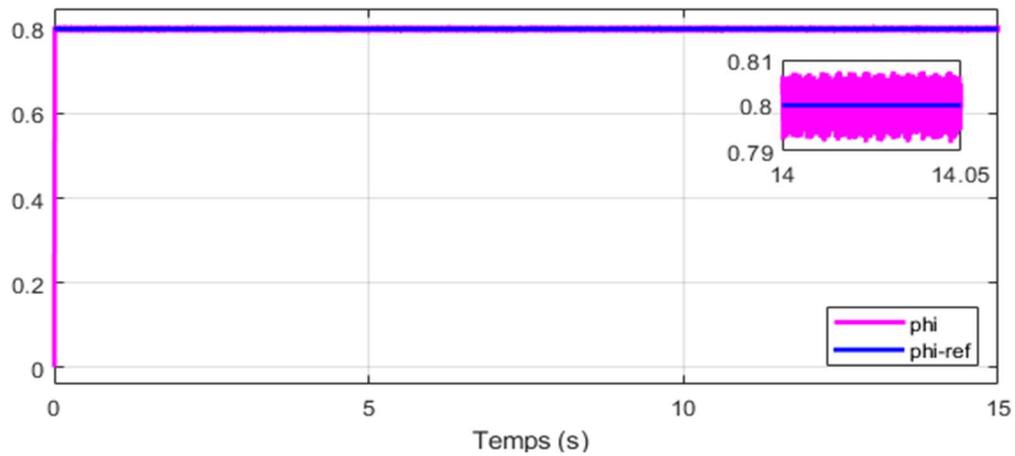


Figure IV.8 : Allure du flux du moteur pour la DTC6.

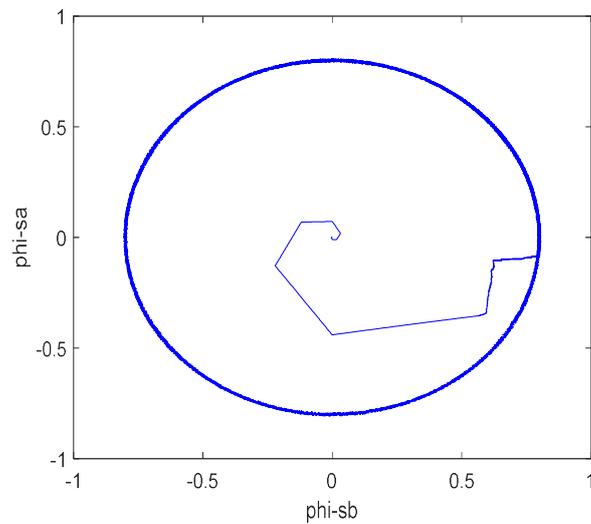


Figure IV-9 : L'évolution du flux (Wb) pour la DTC6.

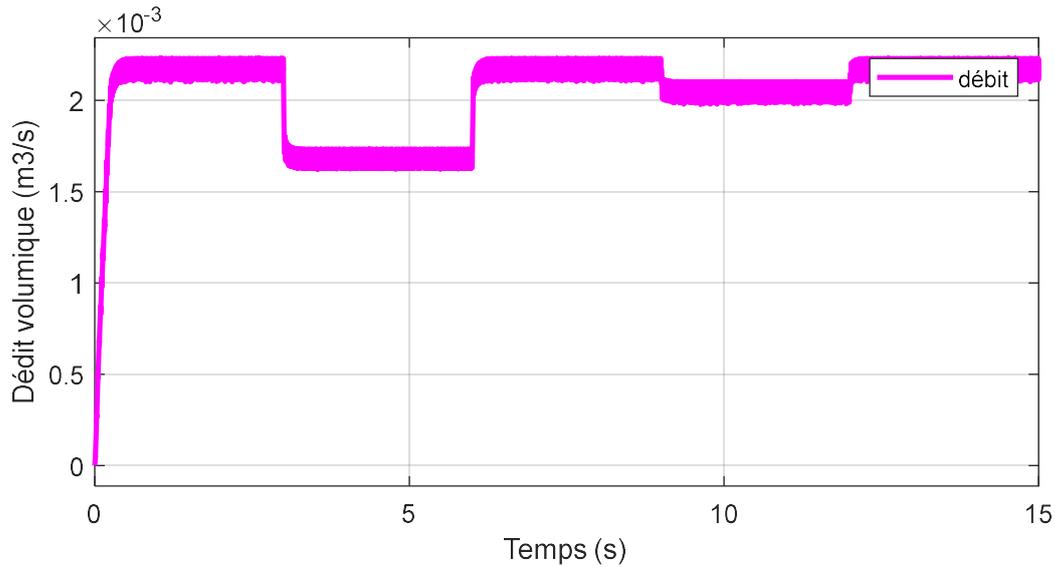


Figure IV-10 : Allure du débit réel à la sortie de la pompe pour la DTC6.

La figure (IV-5) illustre l'évolution temporelle de la vitesse de rotation. La montée en vitesse est quasi linéaire au début du démarrage, la vitesse atteinte est proche de 120 rd/s dans les conditions STC ($G=1000\text{W/m}^2$; $T=25^\circ\text{C}$). Elle reste bien régulière même lors de variation de (G), (T)

Le courant statorique présenté par la figure (IV-6) est caractérisé par une forte amplitude au démarrage allant jusqu'à 12A, puis il se stabilise à sa valeur nominale.

On constate d'après la figure (IV-7) que le couple électromagnétique présente un régime transitoire rapide et des oscillations importantes au niveau de son amplitude autour de sa valeur de référence. Ceci constitue un inconvénient majeur de la commande DTC6.

La trajectoire de l'extrémité du flux statorique figure (IV-9) prend une forme presque circulaire.

La commande DTC6 offre une réponse précise et rapide du couple électromagnétique et du flux statorique, Cependant, les inconvénients majeurs de cette commande sont liés à l'existence des ondulations importantes dans le couple et la variation de la fréquence de commutation due à l'utilisation des comparateurs à hystérésis. L'objet de la prochaine méthode est de développer une solution pour pallier à ces problèmes.

IV.5 La commande DTC avec table à 12 secteurs [TOU08] :

Dans le contrôle DTC à 6 secteur, il y a deux vecteurs par secteur qui présentent une ambiguïté dans le contrôle de couple, donc les vecteurs (V_i et V_{i+3}) ne sont pas utilisés.

Afin d'utiliser les six vecteurs tensions pour les mêmes secteurs, ont utilisé une nouvelle table de sélection basée sur l'utilisation de 12 secteurs au lieu de six comme le montre la figure suivante :

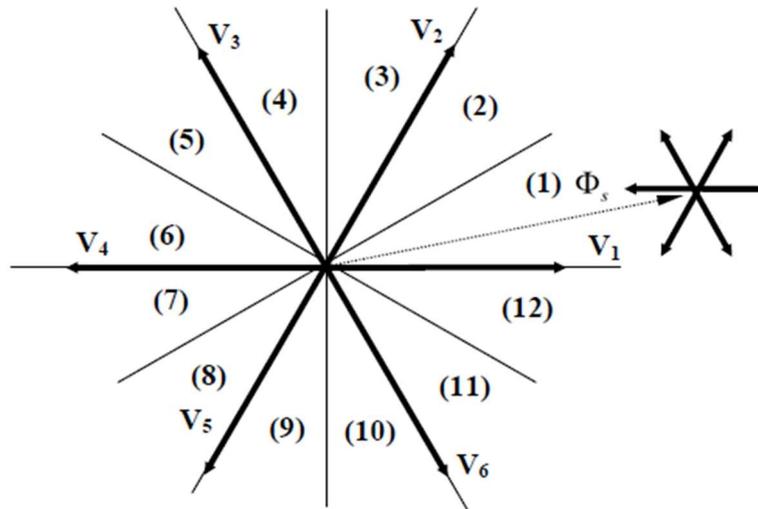


Figure IV-11 : DTC avec 12 secteurs.

Le tableau IV-1 représente les cas où les 6 vecteurs de tensions, peuvent être employés dans les secteurs S1 et S12.

Tableau IV-1 : Effet des vecteurs de tension pour le DTC 12 secteurs [TOU08].

S_{12}	AUGMENTATION	DIMINUTION
Flux Statorique	V_1, V_2, V_6	V_3, V_4, V_5
Couple	V_1, V_2, V_3	V_4, V_5, V_6
S_1	AUGMENTATION	DIMINUTION
Flux Statorique	V_1, V_2, V_6	V_3, V_4, V_5
Couple	V_2, V_3, V_4	V_5, V_6, V_1

Dans notre cas on s'intéresse beaucoup plus au couple, donc pour tenir compte des faibles et des grandes variations du couple on a utilisé un correcteur à hystérésis à quatre niveaux pour le couple et un correcteur hystérésis à deux niveaux pour le flux, figure (IV-12).

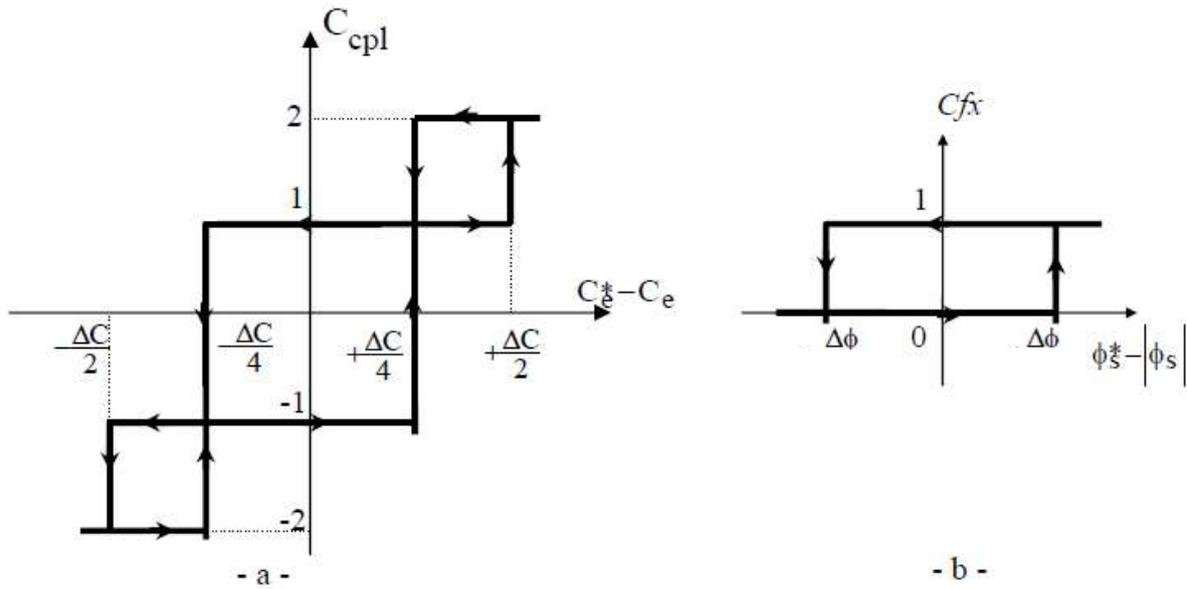


Figure IV-12 : Comparateur à hystérésis [TOU08].

a – pour le couple

b – pour le flux

Finalement, la table de sélection des tensions utilisées pour cette technique est donnée par le tableau IV.2

Tableau IV-2 : table de vérité pour la DTC à 12 secteurs [TOU08].

N		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$C_{fx}=1$	$C_{cpl} = 2$	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2
	$C_{cpl} = 1$	$*V_2$	V_2	$*V_3$	V_3	$*V_4$	V_4	$*V_5$	V_5	$*V_6$	V_6	$*V_1$	V_1
	$C_{cpl} = -1$	V_1	$*V_1$	V_2	$*V_2$	V_3	$*V_3$	V_4	$*V_4$	V_5	$*V_5$	V_6	$*V_6$
	$C_{cpl} = -2$	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6
$C_{fx}=0$	$C_{cpl} = 2$	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3
	$C_{cpl} = 1$	V_4	$*V_4$	V_5	$*V_5$	V_6	$*V_6$	V_1	$*V_1$	V_2	$*V_2$	V_3	$*V_3$
	$C_{cpl} = -1$	V_7	V_5	V_0	V_6	V_7	V_1	V_0	V_2	V_7	V_3	V_0	V_4
	$C_{cpl} = -2$	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5

(-2,2) : grande diminution ou augmentation du couple.

(-1,1) : petite diminution ou augmentation du couple.

* séquence non désirée (pas de petite variation du couple).

IV.5.1 Résultats de simulation :

Les figures ci-dessous représentent les résultats de simulation de système de pompage avec les mêmes conditions précédentes, et en appliquant la commande DTC à douze secteurs :

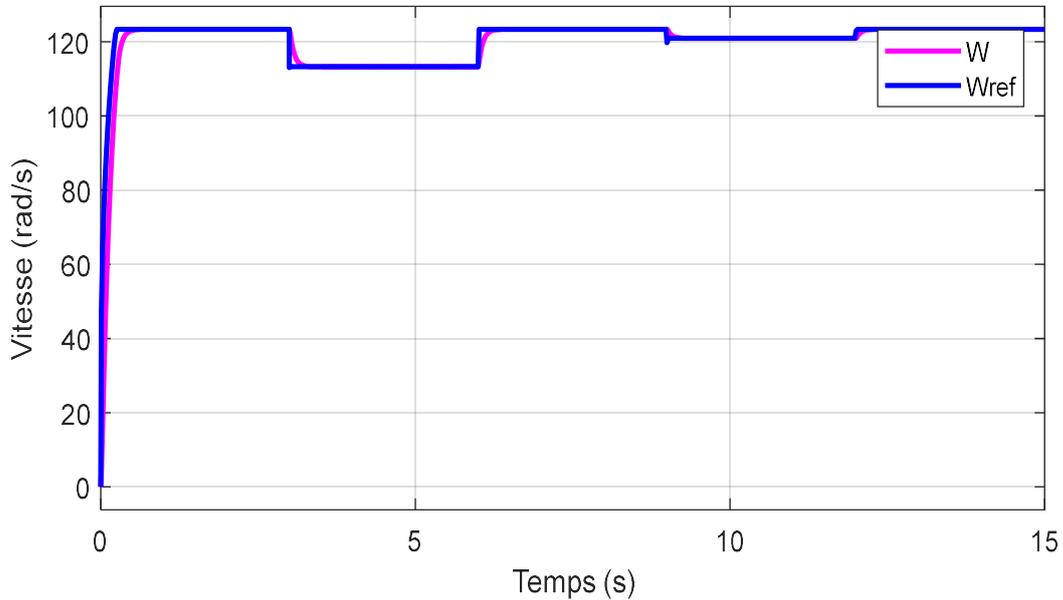


Figure IV-13 : Allure de vitesse de rotation de la machine en (rad/s) pour la DTC12.

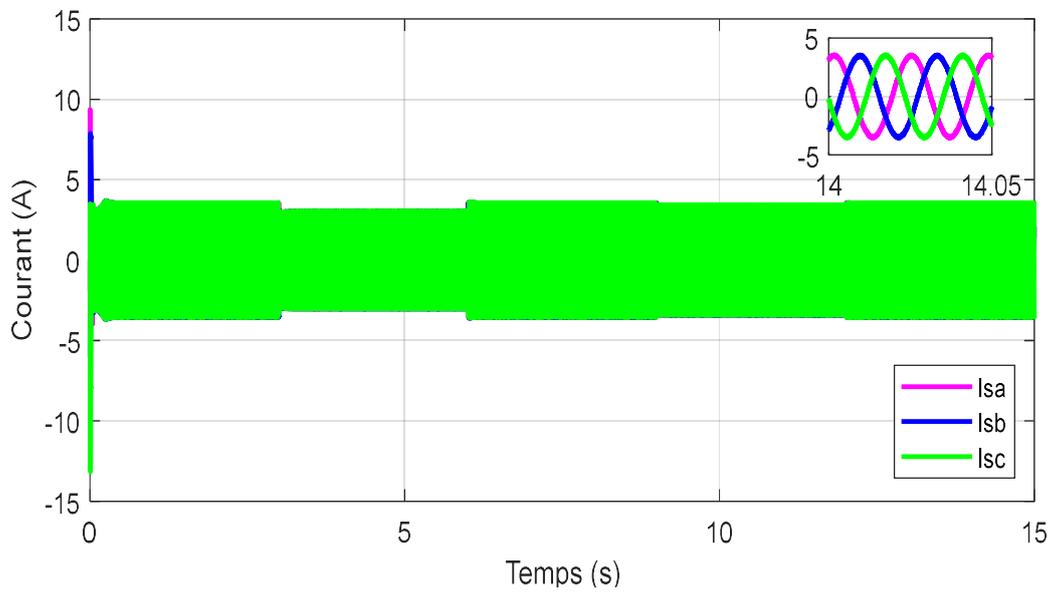


Figure IV-14 : Allure du courant statorique du moteur asynchrone pour la DTC12.

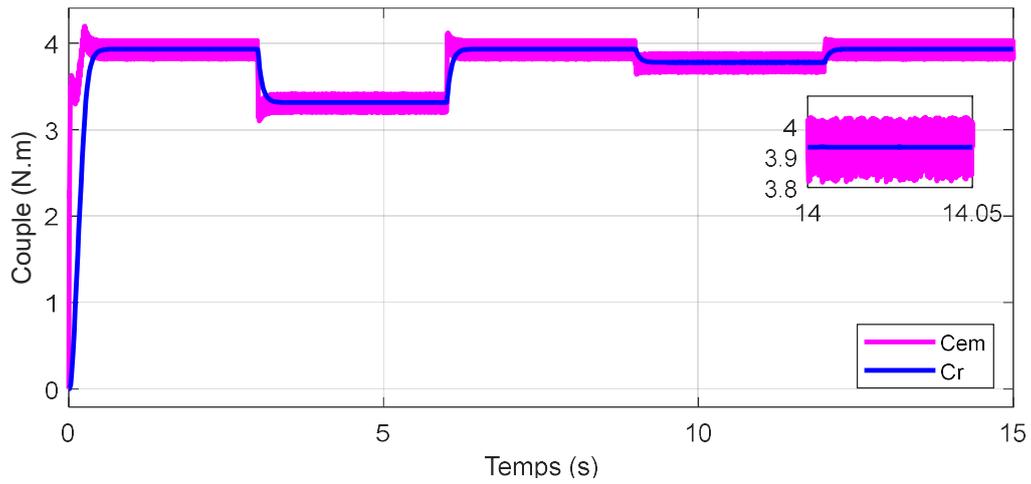


Figure IV-15 : Allure du couple électromagnétique et du couple résistant pour la DTC12.

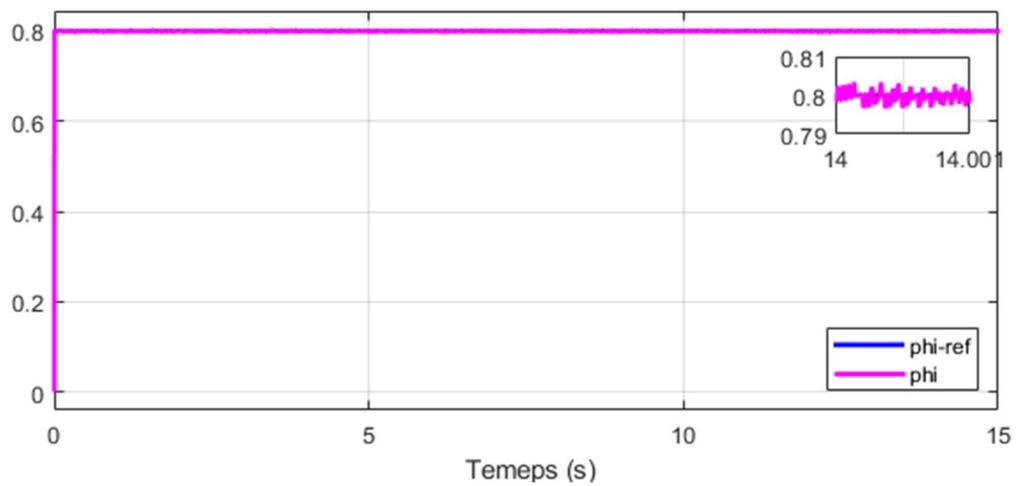


Figure IV.16 : Allure du flux du moteur pour la DTC12.

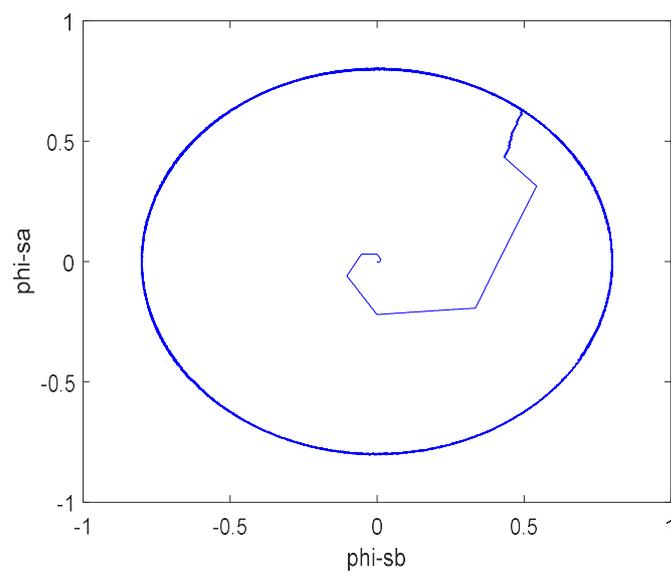


Figure IV-17 : L'évolution du flux (Wb) pour la DTC12.

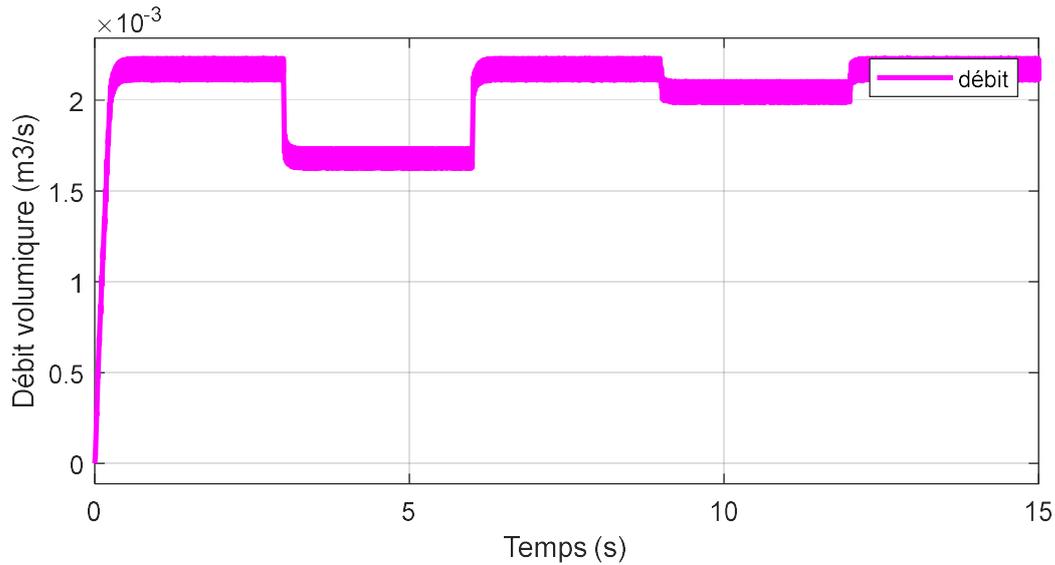


Figure IV-18 : Allure du débit réel à la sortie de la pompe pour la DTC12.

IV.5.2 Interprétation des résultats :

La figure (IV-14) nous montre le courant statorique à moins de pics au démarrage et une forme sinusoïdale au régime permanent.

La figure (IV-15) nous montre un régime transitoire rapide du couple, suivi d'un régime établi où le couple suit sa référence avec moins de dépassement de sa bande hystérésis. D'après la figure (IV-16) on remarque bien que le flux statorique s'établit plus rapidement que celui de la DTC à 6 secteur avec une réduction optimale des oscillations sur leur module, ce qui est bien montré sur la figure (IV-17) où la trajectoire du flux statorique est parfaitement circulaire ;

Cette technique améliore nettement la forme du couple par la minimisation de ses ondulations toute en conservant la même dynamique de la DTC à 6 secteurs.

IV.6 Application de la logique floue à la DTC :

En utilisant la logique floue, nous pouvons diviser l'erreur de couple et l'erreur de flux en plusieurs sous-sections au lieu de deux états. Les valeurs peuvent être comprises entre 0 et 1. Le schéma de principe de DTC en utilisant le contrôleur de logique floue (DTC FLC) est présenté sur la figure (IV-19). Le FLC a trois entrées l'erreur de flux du stator, l'erreur de couple électromagnétique et angle de flux du stator et un vecteur de tension a la sortie contrôlée afin de mettre en œuvre le contrôle direct du couple de la machine asynchrone [SUD16].

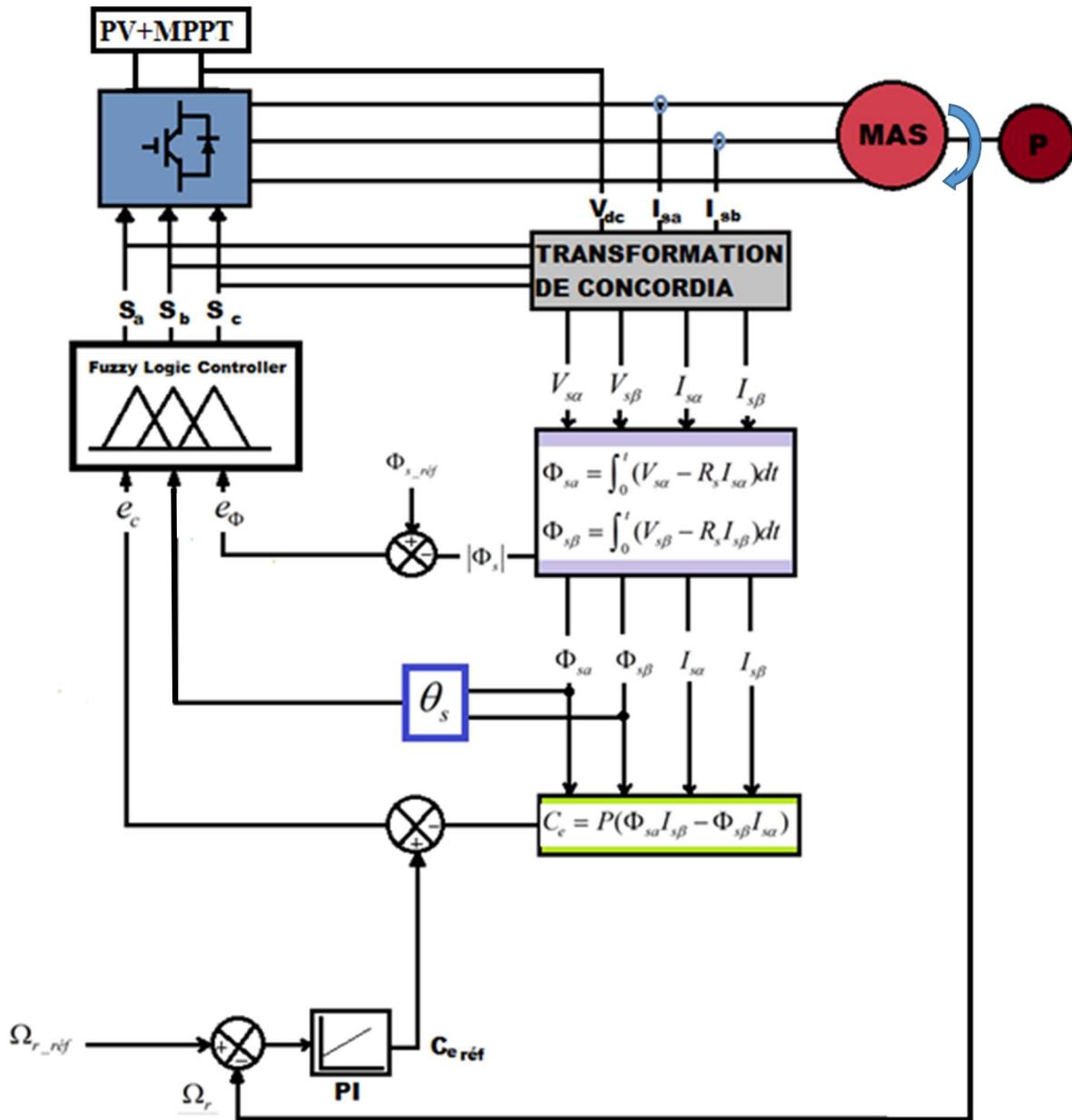


Figure IV-19 : schéma global de la DTC avec un contrôleur flou.

IV.6.1 Variables floues et fonction d'appartenance :

L'entrée d'erreur de flux de statorique est représentée par trois variables linguistiques : valeur négative (N), zéro (Z) et positive (P). Les variables N et P sont représentées par la fonction d'appartenance trapézoïdale et Z par la fonction d'appartenance triangulaire, comme indiqué sur la figure (IV-20) :

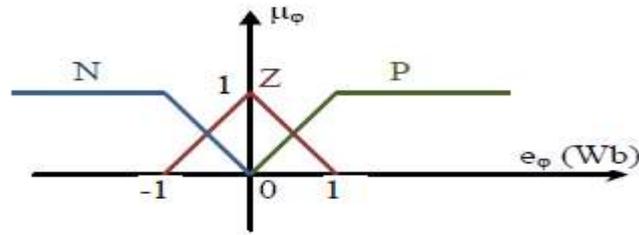


Figure IV-20 : fonctions d'appartenances d'erreur de flux statorique [SUD16].

L'erreur de couple est minimisée, de sorte qu'elle est représentée par cinq variables linguistiques : positif grand (PG), petit positif (PP), négatif grand (NG), négatif petit (NP), zéro (Z). NG et PG sont représentés par des fonctions d'appartenance trapézoïdales et NP, Z, PP par des fonctions d'appartenance triangulaires, comme indiqué sur la figure (IV-21).

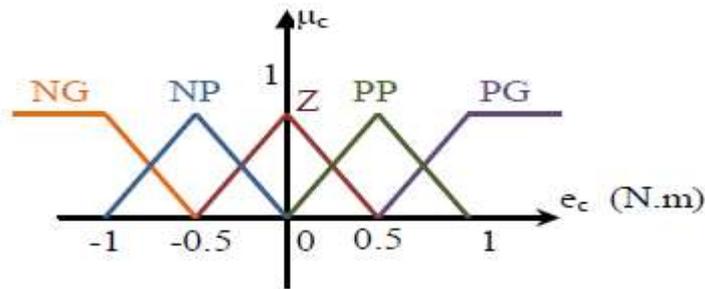


Figure IV-21 : fonctions d'appartenances d'erreur de couple [SUD16].

L'angle de flux statorique (θ_s) est divisé en 12 secteurs pour plus de précision et est représenté par 12 ensembles flous ($\theta_1 - \theta_{12}$). Tous les ensembles flous sont représentés par des fonctions d'appartenance triangulaires de 60° et un chevauchement de 30° avec des ensembles flous de voisinage. Ainsi, chaque ensemble flou fonctionne pour un angle de 30° . La figure (IV.22) montre la répartition des fonctions d'appartenance entre 0° à 360° .

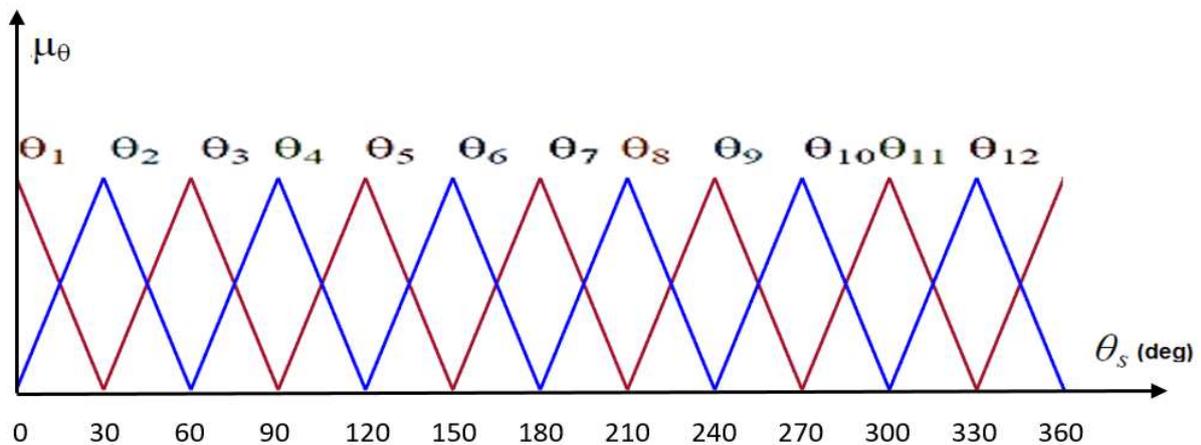


Figure IV-22 : fonctions d'appartenances de l'angle de flux statorique.

Le contrôleur flou fourni à sa sortie les vecteurs de tension $V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5$ et V_6 représentés par les fonctions d'appartenance de la figure (IV-23). Chaque état est représenté par une fonction d'appartenance triangulaire, par exemple, $n = 1$ est représenté par $[0.9, 1, 1.1]$.

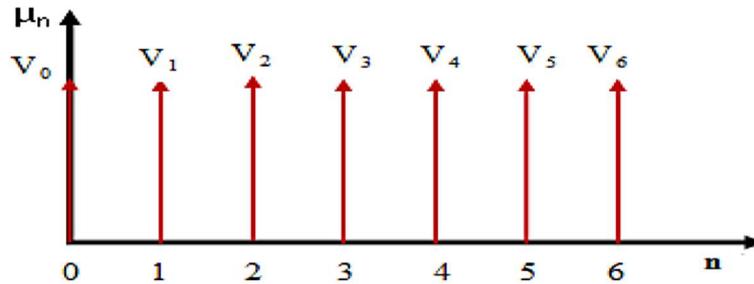


Figure IV-23 : fonctions d'appartenances du vecteur de commutation de sortie de régulateur FLC [SUD16].

IV.6.2 Base de règles floues :

La mise en œuvre effective de la logique floue est basée sur la base de règles qui est développée à l'aide de connaissances expertes.

Une fois les fonctions d'appartenance attribuées, des règles floues sont développées. Le tableau suivant montre la base de règles correspondante pour le contrôleur de logique floue. Le schéma de contrôleur de logique floue est mis en œuvre en utilisant un contrôleur de type MAMDANI sous Matlab / Simulink.

Tableau IV-3 : Base de règles floues [SUD16].

θ		θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
e_T	e_ϕ												
PG	P	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1
	Z	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1
	N	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2
PP	P	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1
	Z	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2
	N	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2
Z	P	V_0	V_0	V_0									
	Z	V_0	V_0	V_0									
	N	V_0	V_0	V_0									
NP	P	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5
	Z	V_0	V_0	V_0									
	N	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4
NG	P	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5
	Z	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5
	N	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4

La règle de contrôle flou de trois entrées et sorties est donnée par :

- Règle : Si e_T est PG et que e_ϕ est P et que θ est θ_1 , alors la sortie est V_1 .

Pour la méthode de défuzzification on a utilisé :

- Méthode de centre de gravité [SUD16]

La sortie du contrôleur flou ne peut pas être directement appliquée aux commutateurs Sa, Sb et Sc. L'expression booléenne est développée pour convertir la sortie du contrôleur Fuzzy avant l'application à la séquence de commutation de l'onduleur.

IV.6.3 Résultats de la simulation :

Les figures ci-dessous représentent les résultats de simulation de notre système de pompage photovoltaïque, avec l'application de la logique floue à la commande DTC dans le but d'apporter une amélioration.

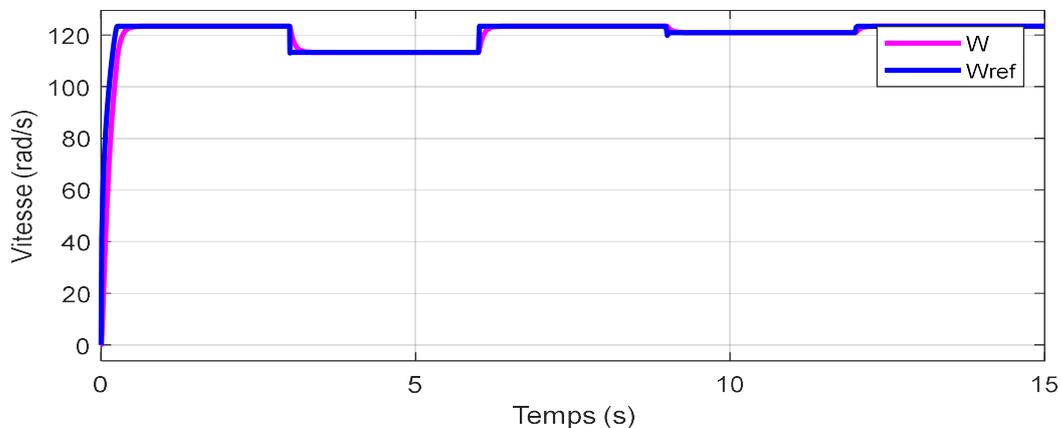


Figure IV-24 : Allure de vitesse de rotation de la machine en (rad/s) pour la DTC FLC.

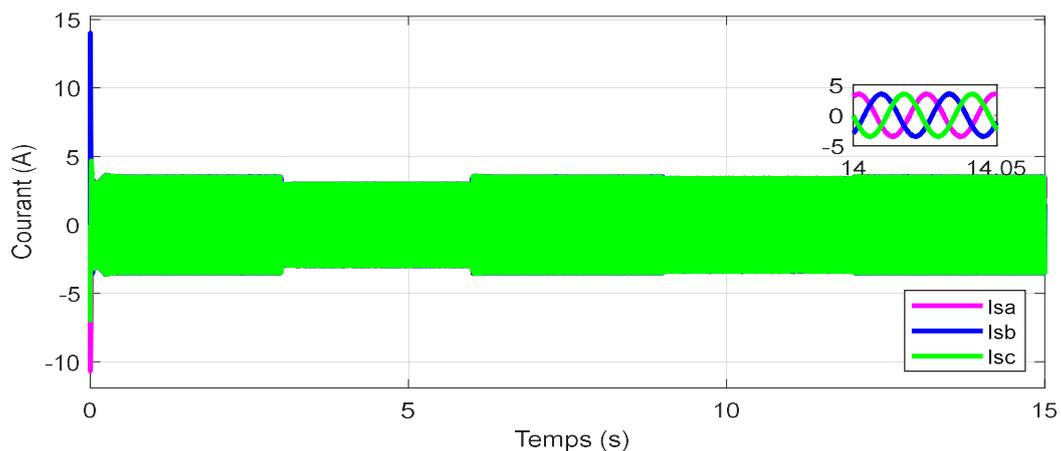


Figure IV-25 : Allure du courant statorique du moteur asynchrone pour la DTC FLC.

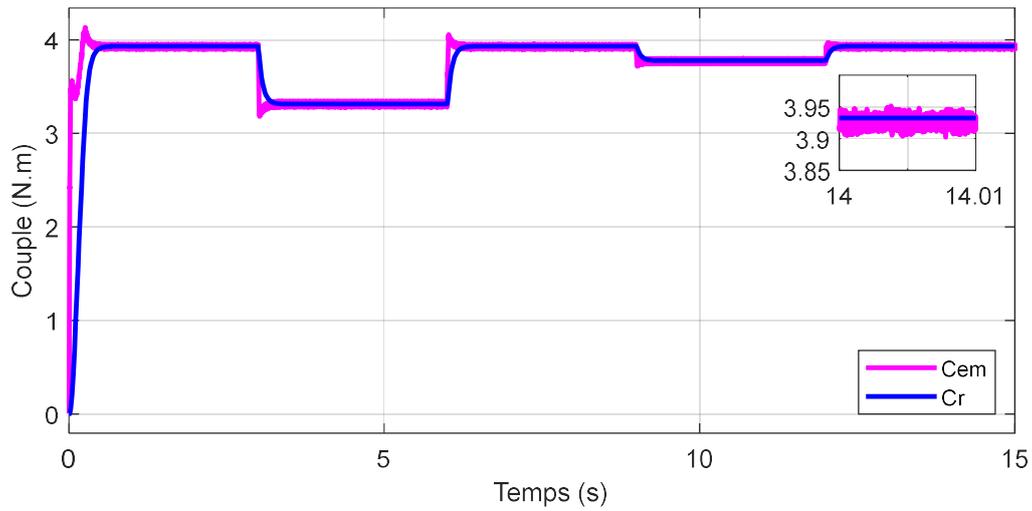


Figure IV-26 : Allure du couple électromagnétique et du couple résistant pour la DTC FLC.

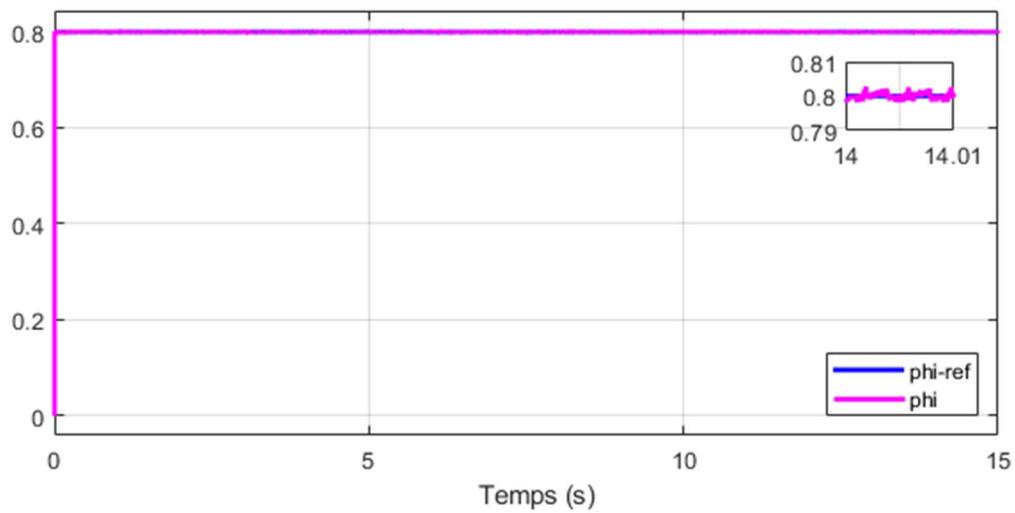


Figure IV.27 : Allure du flux du moteur pour la DTC FLC.

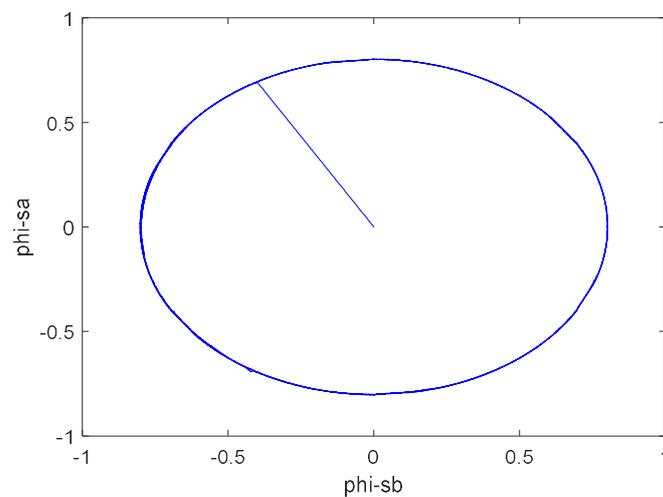


Figure IV-28 : L'évolution du flux (Wb) pour la DTC FLC.

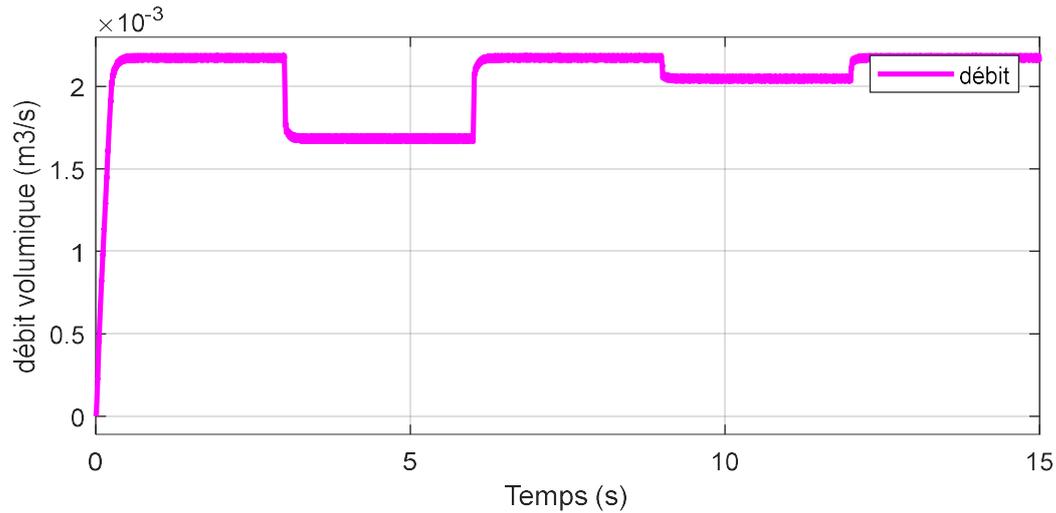


Figure IV-29 : Allure du débit réel à la sortie de la pompe pour la DTC FLC.

IV.6.4 Interprétation des résultats :

La simulation montre de meilleures performances qu'obtenus par la commande directe du couple avec 12 secteurs il est intéressant de remarquer sur la figure (IV-25) une importante atténuation des ondulations de courant qui paraît sinusoïdal, Il est aussi intéressant de remarquer sur la figure. (IV-26) une dynamique de réponse en couple avec un régime transitoire très stable. Le flux statorique présente une très bonne réponse Figure (IV-28), qui a une forme parfaitement circulaire sans aucune ondulation en régime permanent ou le couple et le flux suivent leurs références avec des erreurs statiques qui sont presque nuls.

IV.7 Etude comparative entre les méthodes proposées :

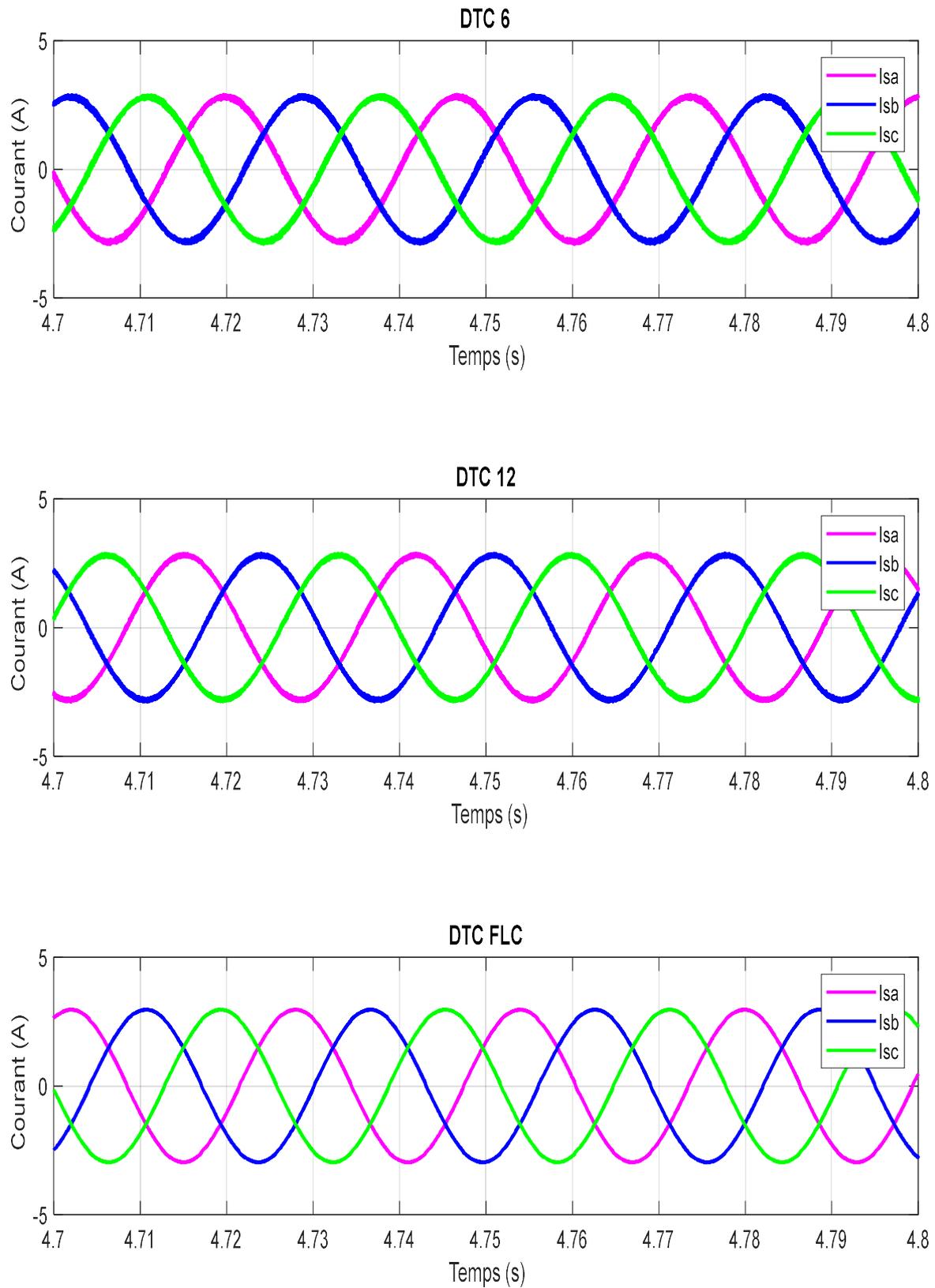


Figure IV-27 : Zoom sur les courants statoriques du moteur asynchrone.

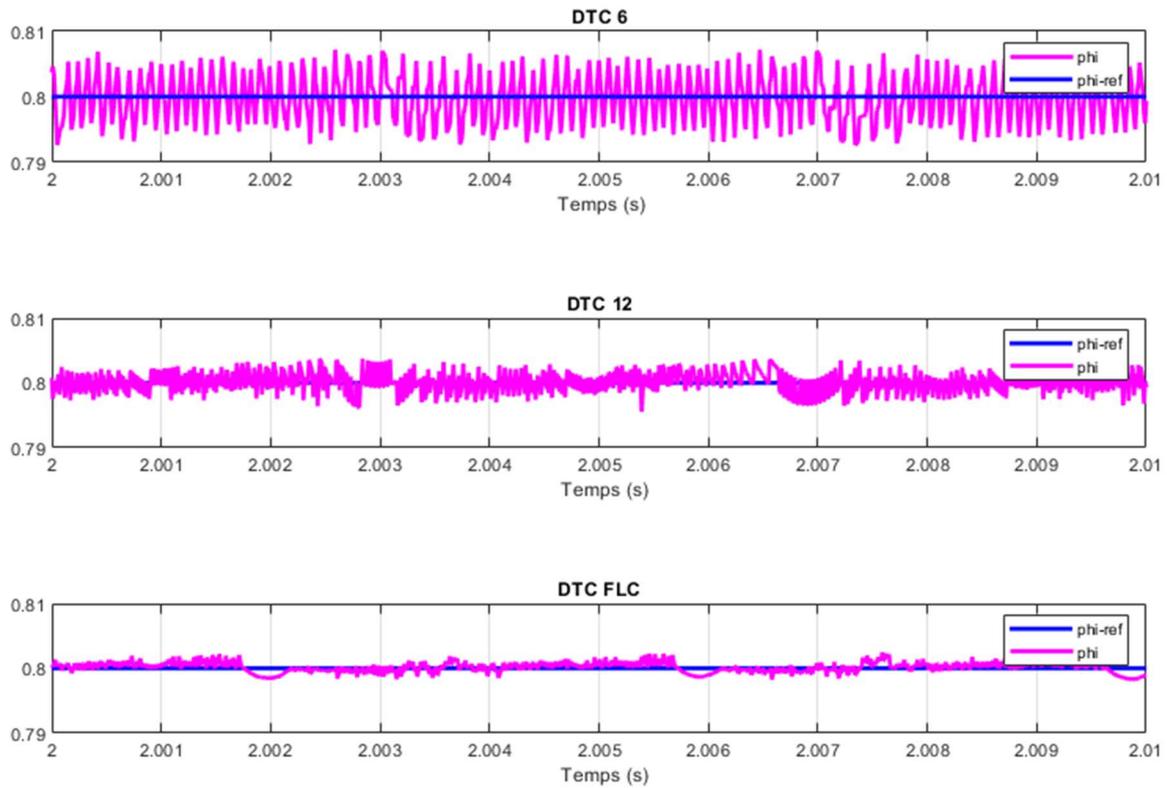


Figure IV-28 : Zoom sur le flux statorique du moteur asynchrone.

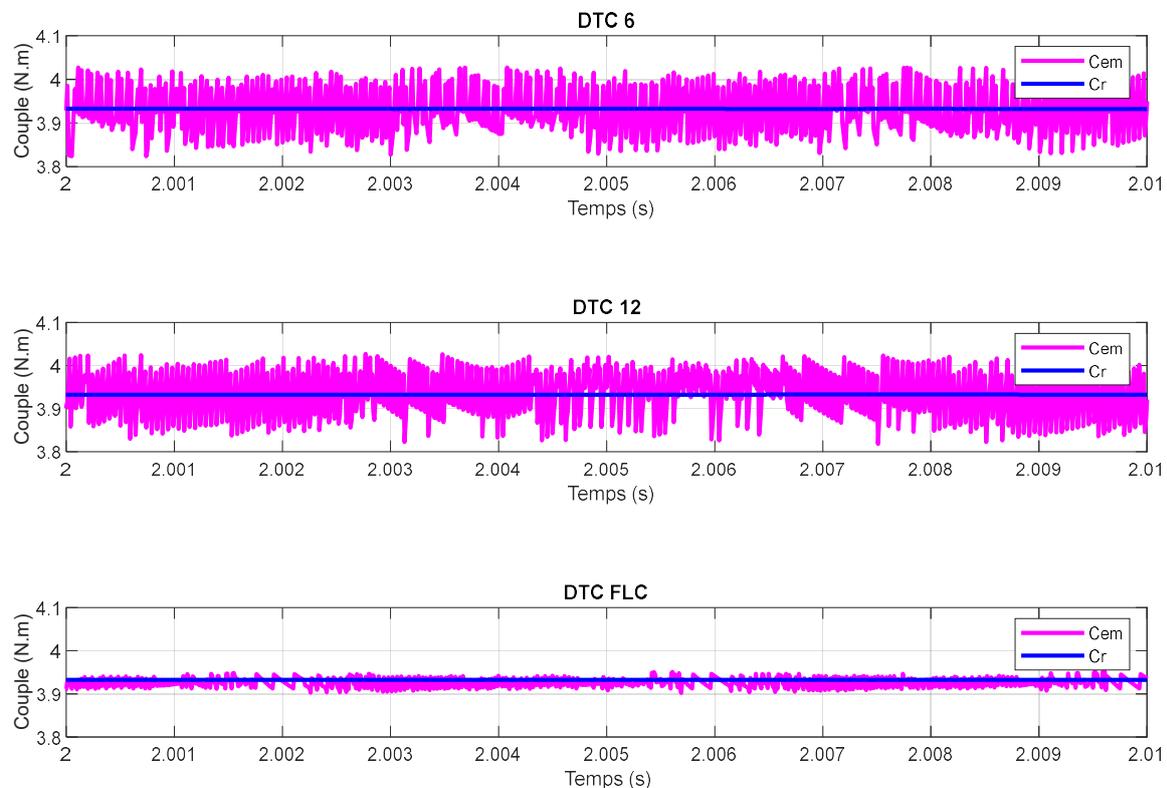


Figure IV-29 : Zoom le couple électromagnétique et couple résistant du moteur asynchrone.

Tableau IV-4 : Taux de distorsion harmonique pour chaque stratégie de commande

<i>Commande</i>	<i>DTC classique</i>	<i>DTC 12 secteurs</i>	<i>DTC_FLC</i>
THD	2.49%	1.79%	0.65%

Tableau IV-5 : Avantages et inconvénients de chaque stratégie de commande

<i>Stratégies</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
<i>DTC classique</i>	<ul style="list-style-type: none"> ◆ La réponse dynamique du couple et le flux sens bien contrôlée ◆ Le flux et le couple suivent parfaitement leurs références. ◆ Le courant statorique sinusoïdal. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Dépassements des bandes ◆ Le flux s'établit lentement. ◆ L'ondulation de flux. ◆ Le courant sinusoïdal bruité avec pics au démarrage. ◆ Fréquence de commutation variable.
<i>DTC 12 secteurs</i>	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Le flux et le couple sont bien contrôlés. ◆ Le courant statorique sinusoïdal. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ La table de grande taille. ◆ Quelque dépassement des bandes de couple.
<i>DTC_FLC</i>	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Le flux et le couple sont bien contrôlés. ◆ Le flux s'établit rapidement. ◆ Le courant statorique sinusoïdal. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Fréquence de commutation un peu élevée. ◆ trop complexe à la réalisation et à la simulation.

Après cette analyse des résultats de simulations présentés dans cette partie, on peut dire que le comportement de la commande directe floue du couple est plus performant que celle de la commande DTC conventionnelle. Ceci met en relief les objectifs de ce chapitre qui consiste en une réduction des ondulations du couple, du flux et du courant statorique, tout en garantissant une bonne dynamique du couple.

IV.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exposé deux méthodes pour améliorer certaines performances de la commande directe du couple de la machine asynchrone. Avec la commande DTC avec 12 secteurs les résultats de simulation ont montré une bonne réponse du couple, et de flux statorique par rapport à la DTC classique. Concernant la logique floue les simulations montrent de meilleures performances que celles obtenues avec la DTC classique (6 secteurs) et la DTC avec 12 secteurs. On remarque des régimes transitoires rapides avec diminution du dépassement au démarrage ainsi qu'une atténuation des ondulations du couple, flux et du courant. Enfin on peut conclure d'après les résultats obtenus l'efficacité des commandes appliquées au système de pompage photovoltaïque.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Notre travail s'est porté sur la commande non linéaire d'un système de pompage photovoltaïque. Le système proposé se compose : d'un générateur photovoltaïque, de convertisseurs statiques et d'un groupe motopompe. Le premier de ces deux convertisseurs, est un Hacheur survolteur, ce dernier est commandé par un algorithme MPPT pour obtenir le point de puissance maximale. Le deuxième est un onduleur triphasé qui sert à convertir le courant continu en courant alternatif pour alimenter le groupe motopompe (moteur asynchrone, pompe centrifuge). On remarque qu'il est souvent plus économique de construire un réservoir pour stocker l'eau plutôt que de stocker l'électricité dans des batteries ainsi le moteur de notre pompe solaire fonctionnera au fil du soleil. Enfin nous avons appliqué une commande : DTC (Direct Torque Control) pour aboutir à un débit maximal, et étudier le contrôle de la vitesse du moteur asynchrone.

La commande DTC est robuste pour les variations paramétriques de la machine, et ne nécessite pas de capteur de position. De plus, elle offre un certain nombre d'avantages considérables. Cependant cette stratégie a aussi des inconvénients importants. D'une part, la fréquence de commutation est fortement variable, ce qui peut entraîner des problèmes de bruits acoustiques, de compatibilité électromagnétique, et d'excitation des modes de résonance mécanique ce qui entraîne un vieillissement prématuré de la chaîne mécanique.

Dans le premier chapitre de ce travail, nous avons présenté des généralités sur l'énergie photovoltaïque et sur les systèmes de pompage utilisant cette dernière comme source d'énergie. A la fin de ce chapitre, nous avons choisi les différents éléments du système étudié.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation des différents composants du système de pompage photovoltaïque. Ensuite, on a simulé un panneau (module) photovoltaïque pour différents ensoleillements et températures afin de tracer les diverses caractéristiques.

L'optimisation du système photovoltaïque a été abordée au troisième chapitre. Nous avons effectué une étude comparative entre deux méthodes MPPT à savoir la méthode P&O et la méthode à base de logique floue, en comparant leurs performances statiques et dynamiques. Les résultats obtenus ont montré la robustesse du contrôleur flou vis-à-vis des variations des conditions climatiques. Le contrôleur flou détermine à chaque instant l'incrément optimal nécessaire pour un fonctionnement au point de puissance maximale. Nous avons

additionnellement élaboré la commande directe du couple basée sur une régulation de vitesse par un PI classique.

L'objectif du quatrième chapitre fut la commande du système de pompage photovoltaïque, en appliquant une commande MPPT de type « P&O » pour l'optimisation de la puissance photovoltaïque. Une commande DTC est donc appliquée sur la machine asynchrone dans le but d'améliorer ces performances, et une comparaison des trois méthodes de commande (DTC classique, DTC 12 et DTC_FLC) fut effectuée. Les résultats obtenus confirment les hypothèses performances souhaitées. Dans un autre contexte, nous avons exposé des résultats de simulation pour différents ensoleillement et températures.

La globalité de nos réflexions et de nos études nous ont conduit à présenter quelques perspectives à ce travail.

- Notre travail ne serait complet sans la validation pratique de ces méthodes de commande.

Ces propositions devraient améliorer les aptitudes des résultats que nous avons obtenus.

Références

Bibliographiques

Références bibliographiques :

- [ABD17] K. Abdeladim *, A. Razagui, S. SemaouiS. Bouchakour, A. Hadj Arab et S. Boulahchiche « Méthodologie de prévision du rayonnement solaire », Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDERB.P. 62, Route de l'observatoire, 16340 Bouzaréah, Alger, Algérie, Revue des Energies Renouvelables Vol. 20 N°3 (2017) pp505-510
- [AIT07] S. M. Ait-Cheikh, « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques », Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [ALL14] H. Allaoua B. Allaoua – « Machine asynchrone par DTC et logique floue », Mémoire de master, université de béjaia, 2014.
- [ANK12] 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.
- [AOU14] S. AOUFI « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque ». Thèse Magister, université Sétif 1, 2014.
- [AOU17] F. Aouzelag « Cours modélisation de la machine asynchrone ». Destiné aux étudiants Master 1 ELM, 2017.
- [BAK12] Y. Bakelli. A. Hadj Arabe et B. Azzoui « Modélisation d'un groupe moteur-pompe dans le banc d'essai de pompage photovoltaïque de l'URAER Ghardaïa ». Revue des énergies renouvelables, vol : 15 No 1, pp 103-109, 2012.
- [BEL12] A. Belhocine et S.Zaidi « Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome » Mémoire de Master, Université de Bejaïa, 2012.
- [BEL15] S. BELAID « Cours énergie solaire photovoltaïque ». Destiné aux étudiant Master 2 ER. 2015.
- [BER09] C. Bernard, C. Sebrao – oliveira, B. Laval, C. Vaudouer « Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue », Rapport rédigé dans le cadre l'UV BA04-Energie renouvelables, Université de technologie Compiègne, 2009.

[BOU12] L.Boudrahem, L.Djouadi «Commande non linéaire d'un système de pompage photovoltaïque» Mémoire de fin d'études, Université Abderrahmane Mira de Bejaia 2012.

[CHA96] Y. A. Chapuis – « Contrôle direct du couple d'une machine synchrone par l'orientation de son flux statorique », Thèse de doctorat, l'I.N. P de Grenoble, Grenoble, France, 1996.

[CHE07] R. Chenni, L. Zarour, E. Matagne et T. Kerbache « Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque », Sciences et Technologie, Vol. N°26, page 49-54, décembre 2007.

[CHE98] F. Chevrie, F. Guély « La logique floue » Cahier Technique de Schneider N° 191 éditions mars 1998.

[DAO13] A. Daoud « Contrôle de la puissance d'un générateur photovoltaïque pour le pompage solaire ». Thèse Doctorat, université d'Oran 2013.

[De-Wit 00] C. C. De Wit – « Modélisation, commande vectorielle et DTC », Hermès science publication, Paris, France, 2000.

[DJE10] K. Djermouni « Etude d'algorithmes MPPT appliqués aux systèmes de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Master, université de Bejaia 2010.

[ELB06] A. Elbacha, M. T. Lamchichi, M. Cherkaoui – « Contrôle direct de couple d'une machine asynchrone, système de régulation de vitesse avec anti emballement », Physical and Chemical News, ISSN 1114-3800, 2006, pp.128-134.

[HAD03] I. Hadj Mohammed, « Modélisation du générateur photovoltaïque ». Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2003.

[HAD04] A. HADJ ARAB, F. CHENLO and M. BENGHANEM, « Loss-of-load Probability of Photovoltaic Water Pumping Systems »; Solar Energy, Vol. 76, N°6, pp 713-723, 2004.

[GAC08] F. Gacem, « Simulation des systèmes de pompage photovoltaïque destinés pour l'alimentation en eau potable ». Mémoire de magister, Université Saad Dahleb de Blida, 2008.

[IDJ10] K. Idjdarene – « Contribution à l'étude et la commande de la génératrice asynchrone à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes », Thèse de Doctorat, Université de Bejaia, 2010.

[KAN07] A. Kanta « Développement d'un système expert basé sur l'intelligence artificielle de pour la prédiction et le contrôle du procédé de projection plasma », Thèse de Doctorat, Université de Franche –Comté et, Université de technologie de Belfort-Montbiard, 2007.

[LAL05] S.Lalouni. « Optimisation de la qualité d'énergie électrique dans le cas d'un chargeur de batterie », Mémoire de magister, Université de Bejaia, 2005.

[LAL09] S.Lalouni « Etude, commande et simulation d'une chaine hybride (photovoltaïque éolienne) de production d'énergie électrique », Thèse de Doctorat, Université de Bejaia, 2009.

[LOU09] A. Louadah « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque » Mémoire Master, université de Bejaia 2009.

[MAA00] A. Maafi, « A survey on PV activities in Algeria ». Renewable Energy, 2000.

[MCE12] A. MCEVOY, L. CASTANER, T. MARKVART « Solar cells »2ème Edition Elsevier 2012.

[MEH07] B. Mehimmedetsi « l'application du formalisme Bond Graph à une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université de Mentourie de Constantine 2007.

[MIC03] E. MICHEL, D. ARNAUD, « Énergie photovoltaïque » comité scientifique et technique des industries climatique COSTIC, FNDNE n°12 document technique réédition 2003.

[MOK11] R. Mokni, N. Amaimia « FNEBTP / CSNER installation et maintenance des Systèmes de Pompage Photovoltaïques », Formation sur les systèmes de pompage photovoltaïques, 2011.

[NAA05] A. A. Naassani, E. Monmasson, et j. p. Louis – « Synthesis of direct torque and rotor flux control Algorithms by means of sliding-mode theory », IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 52, no. 3, June 2005, pp. 785-799.

[NEF12] M. NEFSI, A. MASSOUM, A. MEROUFEL and P. WIRA, “ Contrôle Directe du Couple de la Machine Asynchrone basé sur MLI Vectorielle Discrétisé ”, (DSVM-DTC) vol 53 N° 1, 2012.

[ROB07] B. Robyns, B. François, F. Degobert et J. P. Hautier – « Commande vectorielle de la machine asynchrone, désensibilisation et optimisation par la logique floue », Editions Technip, France, Juillet 2007.

[ROY98] J. Royer, J. Djiako, E. Schiller Et B. Sada « Le Pompage Photovoltaïque » Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens IEPF/Université d'Ottawa/ EIER/CREPA, 1998.

[ROY98] J.Royer, T.Djiako, E.Schiller, B.Sada Sy, Le pompage photovoltaïque: manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF, Université d'Ottawa, EIER, CREPA, 1998.

[ROY00] D. Roye, “ Modélisation, contrôle vectoriel et DTC ”, HERMES Science Europe Ltd, 2000.

[SER12] C. Serir, « Optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Magister, Université de Bejaia 2012.

[SUD16] H. Sudheer SF. Kodad B.Sarvesh «Direct Torque and Flux control of Induction Machine using Fuzzy Logic Controller », International Conference on AEEICB 2016.

[TOU08] : R. Toufouti « Contribution à la commande directe du couple de la machine asynchrone », Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine 2008.

[TOU10] B. Toual « Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable », Mémoire de Magister Université de Batna, 2010.

[WER09] P. Werfel « Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts ». Edition Wiley & Sons, February 2009.

[YAN06] H. Yantour, J. Saadi et A. Khoumsi – « Modélisation et simulation d'une commande directe du couple appliquée à la machine asynchrone (DTC) », 6eme Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM'06), Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes : Défis et Opportunités, Rabat, Maroc, 3-5 Avril 2006, pp. 1-9.

[ZAR10] B. Zarour « Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau », Thèse de Doctorat, Université de Mentouri de Constantine, 2010.

[ZID18] Y.Zidane, I.Doumbia « modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque » Mémoire Master, université de Bejaia 2018.

Annexe

Caractéristiques du panneau photovoltaïque SIEMENS SM 110-24, 100W [BEL15] :

<i>Caractéristiques</i>	<i>Valeurs</i>
Puissance maximale du 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
Tension en circuit ouvert I_{sc}	3.45 A
Courant de court-circuit V_{oc}	43.5 V
Coefficient d'incrémentatation du courant $I_{sc} (\alpha_{sc})$	1.4 mA/°C
Coefficient d'incrémentatation de la tension V_{oc}	-152 mV/°C

Paramètres de la pompe centrifuge :

<i>Constantes</i>	<i>Valeurs</i>
A0	71.851
A1	0.1051
A2	-0.0109
Hauteur manométrique H	10 m

Paramètre de la machine asynchrone :

<i>Constantes</i>	<i>Valeurs</i>
J	0.0049 Kg.m ²
P	2
L _s	0.6015 H
L _r	0.6015 H
M	0.5796 H
R _s	7.6 Ω
R _r	3.6 Ω
F	0
P_n	1.1 kW
V_n	400V/230V
N	1420 tr/min
f	50 Hz

Résumé :

Ce travail concerne la modélisation et l'optimisation d'un système de pompage photovoltaïque. Cette étude porte sur l'implémentation des différents algorithmes pour le suivi du point de puissance maximale tel que l'algorithme perturbation et observation (P&O) et l'algorithme MPPT basé sur la logique floue, puis on s'est intéressé sur la modélisation de la machine asynchrone (MAS) et de son alimentation constituée d'un onduleur de tension triphasé, différentes stratégies de commande ont été appliquées afin d'apporter une amélioration au système global, par la suite une étude comparative a été effectuée entre ces tactique de commandes (DTC classique, DTC 12 secteurs, et DTC_FLC basé sur les contrôleur flou).

Mots clés : Générateur photovoltaïque, PV, MPPT, P&O, FLC, Logique floue, Machine asynchrone (MAS), DTC.