

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
المركز الجامعي لعين تموشنت
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut de Technologie
Département de Génie Electrique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE.
Filière : ELECTROMECHANIQUE.
Spécialité : ELECTROMECHANIQUE.

Thème

Simulation d'un système de pompage photovoltaïque

Présenté Par :

- ADADA Mohamed-El Amine.
- BOUDIEB Kamel.

Devant les jurys composés de :

Mr. ZEBENTOUT Abdel Djawed Boumédiene	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
Mr.. KRIM Mohamed	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Mr. AISSOU Massinissa	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examinateur

Année universitaire 2019/2020

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

Dédicace

Je dédie ce travail :

À ma mère et mon père pour tous les sacrifices qu'ils ont faits pour moi, pour leur soutien continu durant mon travail. Que Dieu vous protège.

À mes frères, que Dieu vous garde, je vous aime et je vous souhaite une vie pleine de succès et de réussite.

À toute ma famille.

*Toute la promotion
2019/2020*

ADADA



Dédicace

Je dédie ce travail :

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, à mes frères et sœurs, à toute ma famille et à tous mes amis qui m'aiment et qui m'apprécient.

2019/2020

BOUDIEB



Remerciement

Ce travail est l'aboutissement d'un dur labeur et de beaucoup de sacrifices; nos remerciements vont d'abord au Créateur de l'univers qui nous a doté d'intelligence, et nous a maintenu en santé pour mener à bien cette année d'étude. Je tiens aussi à adresser mes remerciements à ma famille qui m'ont toujours soutenus et poussés à continuer mes études. Ce présent travail a pu voir le jour grâce à leur soutien.

Nous tenons à remercier également les membres du jury « Mr D.B. ZEBENTOUT », « Mr M.AISSOU » pour avoir accepté d'examiner ce travail et leurs commentaires constructifs

Je souhaite également remercier le directeur d'études Mr KRIM mohamed qui malgré son temps difficile nous a aidé à travers ses remarques pertinentes. En dernier lieu je remercie l'administration de centre universitaire belhadj bouchaib de la wilaya d'Ain-Temouchent.

Nos remerciements aux responsables et les ingénieurs du Bureau d'études Hydro-Projet –Engineering d'Es-Sénia de nous avoir aidé à accomplir notre travail de perfectionnement.



Table des matières

<i>Dédicaces</i>	<i>i</i>
<i>Remerciement</i>	<i>iii</i>
<i>Table des matières</i>	<i>iv</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>vii</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>x</i>
<i>Introduction Générale</i>	<i>2</i>

CHAPITRE 1 : Généralités Sur Le Système Du Pompage Photovoltaïque

1. Introduction	5
1.1 Chaîne d'énergies renouvelable du pompage d'eau	5
1.2 Des énergies renouvelables :	6
1.2.1 Les différents types d'énergies renouvelables.....	6
1.2.2 Historique du photovoltaïque	7
1.2.3 Le système photovoltaïque :	8
1.2.4 L'énergie solaire photovoltaïque :	8
1.2.5 Principe de l'énergie solaire photovoltaïque.....	8
1.2.5.1 Gisement solaire	9
1.2.6 Les générateurs photovoltaïques	11
1.2.6.1 L'effet photovoltaïque	11
1.2.6.2 Principe de fonctionnement de la cellule PV.....	12
1.2.6.3 Les Différents Types de Cellules Photovoltaïques.....	12
1.2.6.4 Générateur photovoltaïque (GPV).....	13
1.2.7 Caractéristiques électriques d'une cellule :	17
1.2.8 Protection D'un GPV	19
1.3 Groupe moteur-pompe :	20

1.3.1	Moteurs :.....	20
1.3.2	Eléments du système de pompage d'eau.....	21
1.4	Différentes architectures envisageables des systèmes de pompage	24
1.5	Conclusion :.....	28

CHAPITRE 2: Modélisation et Commande Vectorielle du Système de Pompage Photovoltaïque

2.	Introduction :.....	29
2.1	Modalisation de commande vectorielle de la machine asynchrone :.....	29
2.1.1	Commande vectorielle :.....	29
2.1.2	Découplage par compensation :.....	31
2.1.3	Dimensionnement des régulateurs :.....	34
2.1.4	Conception de la chaine de pompage photovoltaïque avec commande vectorielle :...	36
2.2	Contrôle direct du couple du système de pompage photovoltaïque :.....	38
2.2.1	Méthodes de commande directe du couple :	38
2.2.2	Principes Generaux De La Commande DTC :	38
2.2.3	Commande directe du couple de la machine asynchrone.....	40
2.3	Modélisation vectorielle de la machine et de l'onduleur de tension:.....	45
2.4	Regle De Comportement Des Grandeurs A Controler :	47
2.5	Estimation du flux statorique et du couple électromagnétique :.....	53
2.6	Table de vérité et structure du DTC	54
2.7	Conception de la chaine de pompage photovoltaïque avec DTC:.....	55
2.8	Conclusion :.....	57

CHAPITRE 3: Simulation d'une Chaine de Système Pompage Photovoltaïque

3.	Introduction.....	58
3.1	Modélisation d'un système de pompage photovoltaïque :	58
3.1.2	Modélisation d'un système photovoltaïque :.....	59
3.2	Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque et contrôlé par une commande MPPT....	64
3.2.1	Le principe de la commande MPPT :.....	65

3.2.2	Gestion de la MPPT.....	65
3.2.3	Commande de Perturbe & Observe (P&O).....	67
3.3	Simulation du commande DTC appliquée au système de pompage photovoltaïque.....	68
3.4	Dimensionnement de la pompe photovoltaïque :	77
3.5	Conclusion.....	78
	<i>Conclusion Générale</i>	79

Références

<i>Référence Bibliographiques</i>	81
<i>Référence Webgraphiques</i>	86

Resumés

Liste des figures

CHAPITRE 1 : Généralités Sur Le Système Du Pompage Photovoltaïque

Figure 1.1 : Différentes techniques de pompage d'eau [5]	5
Figure 1.2 : Les six familles énergies renouvelables.....	6
Figure 1.3 :L'énergie solaire photovoltaïque.	8
Figure 1.4 : Principe de l'énergie solaire photovoltaïque.	9
Figure 1.5 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM [19].	9
Figure 1.6 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.....	10
Figure 1.7 : Effet photovoltaïque.	11
Figure 1.8:Exemple d'un matériau semi-conducteur dopé (Le Silicium).	12
Figure 1.9 : Évolution de la taille des cellules silicium photovoltaïques ces dernières années.....	12
Figure 1.10 :Ruban métallique d'une cellule.	14
Figure 1.11 : Encapsulation des cellules.	14
Figure 1.12 :Caractéristique courant-tension de (N_s) cellule série [26]	15
Figure 1.13 : Caractéristique courant tension de (N_p) cellule parallèle [26].	16
Figure 1.14 : Caractéristique de courant en fonction de la tension $I=f(U)$ d'une cellule photovoltaïque [27]	17
Figure 1.15 : Caractéristique de puissance en fonction de la tension $P=f(U)$ d'une cellule photovoltaïque [27]	18
Figure 1.16 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec Diodes By-Pass et Diode Anti-Retour[29]	20
Figure 1.17 : Station de pompage alimentée par le réseau électrique.	25
Figure 1.18 : Schéma du principe de pompage au fil du soleil.	26
Figure 1.19 : Schéma du principe de pompage avec stockage d'énergie.	27
Figure 1.20 : Diagramme du pompage PV par électropompe AC.....	28

CHAPITRE 2: Modélisation et Commande Vectorielle du Système de Pompage Photovoltaïque

Figure 2.1: Principe de la commande vectorielle[39].....	30
Figure 2.2: Schéma simplifié de la commande vectorielle indirecte de laMAS alimentée en tension..	30
Figure 2.3:Découplage par addition des termes de compensation.	31

Figure 2.4: Boucle du courant I_{qs} après découplage.....	32
Figure 2.5: Schéma de principe d'une MAS alimentée en tension (commande vectorielle indirecte)[39].	33
Figure 2.6: Boucle de régulation du courant I_{qs}	34
Figure 2.7: Schéma Boucle de la régulation de vitesse [39].	35
Figure 2.8: Conception de principe d'une MAS alimentée en tension de la commande vectorielle de la chaîne de pompage.	37
Figure 2.9 : Schéma structurel de la DTC appliquée à une machine asynchrone.	39
Figure 2.11 : schéma synoptique d'un M.L.I.	43
Figure 2.12 : M.L.I à échantillonnage naturel.	44
Figure 2.13 : Représentation d'un onduleur de tension à deux niveaux.	45
Figure 2.14 : Elaboration du vecteur de tension à partir des états de commutation de l'onduleur.....	46
Figure 2.15 : Exemple d'évolution du vecteur flux statorique dans le plan $\alpha s - \beta s$	48
Figure 2.16 : Trajectoire du flux statorique dans le repère $\alpha s - \beta s$	49
Figure 2.17 : Comparateur à hystérésis utilisé pour contrôler le flux statorique.....	50
Figure 2.18 : Représentation complexe des vecteurs flux statorique et rotorique	51
Figure 2.19 : Contrôle du couple à l'aide d'un comparateur à hystérésis à trois	52
Figure 2.20 : Structure générale du contrôle direct de couple (DTC)[41].....	56

CHAPITRE 3: Simulation d'une Chaîne de Système Pompage Photovoltaïque

Figure 3.1: Système d'une chaîne de système pompage photovoltaïque.	58
Figure 3.2 : Schéma de simulation d'une cellule photovoltaïque idéale.	59
Figure 3.3 : Modèle de simulation d'une cellule photovoltaïque photovoltaïque idéale.....	60
Figure 3.4 : Résultats de simulation de Caractéristique P-V d'une cellule PV	61
Figure 3.5 : Résultats de simulation de Caractéristique I-V d'une cellule PV	61
Figure 3.6 : Schéma de simulation d'une cellule photovoltaïque réelle.....	62
Figure 3.7 : Modèle de simulation d'une cellule photovoltaïque réelle.	62
Figure 3.8 : Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension Pour différents insolation et une température $T=25^{\circ}\text{C}$	63
Figure 3.9 : Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension Pour différents insolation et une température $T=25^{\circ}\text{C}$	64
Figure 3.10 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.....	65
Figure 3.11: Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.	66
Figure 3.12 : courbe de la convergence vers le PPM par P&O.....	67
Figure 3.13 : Organigramme de l'algorithme perturbation et observation.....	67

Figure 3.14 : modèle Simulink de la machine asynchrone alimentée en tension.	69
Figure 3.15: modèle Simulink de la estimateur flux et couple	69
Figure 3.16 : modèle Block de simulation du modèle global.	70
Figure 3.17: Allure de débit de la pompe	71
Figure 3.18: Allure de hauteur manométrique de la pompe.	71
Figure 3.19: Allure de Vitesse de rotation de la pompe	72
Figure 3.20: Flux Statorique de référence et estimé.....	72
Figure 3.21: Allure du couple.....	73
Figure 3.22: Caractéristique couple en fonction de la vitesse et point de fonctionnement.	74
Figure 3.23: Allure de courant statorique	74
Figure 3.24: Trajectoire du flux statorique.....	75
Figure 3.25: Allure du rendement motopompe.	75
Figure 3.26 : Analyse spectrale : (a) signal étudié ,(b) transformé de fourier rapide FFT du signal étudié (c) Le niveau de THD sur une phase du courant satirique.	76

Liste des tableaux

CHAPITRE 1 : Généralités Sur Le Système Du Pompage Photovoltaïque

Tableau 1.1 : Différent les types des cellules et leurs avantages et inconvénients.....	13
Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients pour les deux moteurs, MCC et MAS.	21
Tableau 1.3 : Classification des pompes[31]......	22
Tableau 1.4 : Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique [35]	23
Tableau 1.5 : Les avantages et inconvénients des pompages au fil du soleil et avec batteries [37].....	27

CHAPITRE 2: Modélisation et Commande Vectorielle du Système de Pompage Photovoltaïque

Table.2.1 : Table de commutation de la DTC étendu [42]......	55
--	----

CHAPITRE 3: Simulation d'une Chaîne de Système Pompage Photovoltaïque

Tableau 3.1.Valeurs des paramètres de simulation caractéristique de la cellule de module KC-60.	60
Tableau 3.2.Valeurs des paramètres de simulation.	63
Tableau 3.3: Paramètres de la machine asynchrone [45]	68

Introduction Générale

Introduction Générale

Aujourd'hui l'utilisation de l'énergie renouvelable, solaire (thermique ou photovoltaïque) dans les différents systèmes d'applications, tel que le pompage d'eau, présente une solution excellente pour le problème, l'utilisation de ce type d'énergie pour le pompage d'eau surtout dans l'agriculture, atteint son maximum par temps chaud et sec où c'est justement le moment où l'on a accès au maximum d'énergie solaire [1]. Cette source l'énergie photovoltaïque, présente- deux inconvénients qui sont un rendement faible est un coup élevée. Le développement des aimants permanent, surtout ceux de types de terres rares, et l'évolution de l'électronique de puissance ont permis des progrès importants dans le développement des machines à vitesse variable.

L'objective de ce mémoire concerne la simulation d'un système de pompage photovoltaïque.

L'utilisation de système de pompage photovoltaïque (PV) pour l'exhaure de l'eau dans ces zones s'avère une solution très fiable à condition d'être bien dimensionner. Le dimensionnement des systèmes PV, en particulier ceux de pompage d'eau, nécessite l'utilisation de modèle qui reflète la réalité et ils se doivent d'être précis [2].

La solution d'un système photovoltaïque qu'on a choisi est au fil du soleil ce procédé consiste à pomper l'eau tant que le soleil est présent vers un réservoir qui assure la régulation de la consommation d'énergie . Ce système est le plus simple puisque l'énergie photovoltaïque est utilisée directement à partir des panneaux. La pompe ne fonctionnera qu'en présence de la lumière et dès que l'éclairement sera suffisant elle atteint la puissance demandée. La particularité des pompes solaires installées au fil du soleil est que les caractéristiques (débit, pression, rendement) sont en fonction de l'éclairement qui varie au cours de la journée et au cours des saisons [3]. L'eau pompée peut être employée dans beaucoup d'applications, telles que l'utilisation domestique et l'irrigation [4].

Entrons sans plus tarder dans le vif du sujet : comment transmettre l'énergie solaire, qui arrive sous forme de rayonnement, au réseau électrique, conçu pour transporter l'électricité dans un système de pompage photovoltaïque ? C'est ce que nous allons voir dans cet étude le système de transformation de l'énergie a base des panneaux photovoltaïque (PV). L'effet du générateur photovoltaïque (GPV) est un des manières d'exploitation de l'énergie en

transformant l'énergie des photons en électricité au moyen des cellules solaires. Ainsi ce générateur n'a pas une énergie mais il peut fournir une puissance mais et quand il a fourni une certaine puissance pendant un certain temps, il a fourni une certaine quantité d'énergie

Les performances d'un système PV dépendent fortement des conditions climatiques, telles que l'ensoleillement et la température. Le dimensionnement correct d'un système PV est important pour assurer une fourniture l'énergie continuellement durant toute l'année. Une étude profonde et rigoureuse est exigée dans le but de faire le meilleur choix, le plus performant et au moindre coût. Malheureusement les informations fournies par les constructeurs d'équipements photovoltaïques ne permettent que de dimensionner approximativement le système PV.

Dans ce contexte, l'énergie photovoltaïque (PV) a un rôle important à jouer car il s'agit d'une source verte. Les seules émissions liées à la production d'électricité photovoltaïque sont celles relative à la production de ses composants. Ces derniers, après leur installation, produisent de l'électricité à partir du rayonnement solaire sans émettre de gaz à effet de serre.

Pour que le point de fonctionnement, qui dépend de la charge alimentée par le GPV, soit au voisinage du PPM, un étage d'adaptation doit être introduit entre le générateur et la charge. Plusieurs algorithmes de contrôle proposés dans la littérature pour la recherche du PPM, appelés commande MPPT (maximum power point tracking) lorsque le GPV est couplé à une charge à travers un convertisseur statique. Dans de nombreuses applications industrielles, il est nécessaire parfois d'avoir un système de réglage de la tension délivrée par le système photovoltaïque fonctionnant toujours à sa puissance maximale ; nous avons étudié dans cette thèse quelques techniques de contrôle de la tension de sortie du convertisseur.

Le pompage photovoltaïque est l'une des applications de l'énergie solaire photovoltaïque. Cette technologie est en développement et caractérisée par un coût graduellement en baisse. La première génération des systèmes de pompage solaires utilise des moteurs à courant continu à aimant permanent, surtout pour les applications à des basses et moyennes hauteurs. Ces dernières années, le moteur asynchrone est de plus en plus utilisé pour les applications de pompes solaires à cause de sa simplicité, sa robustesse et son faible prix. La chaîne de pompage étudiée dans notre cas, dotée d'une commande MPPT, utilise un moteur asynchrone triphasé alimenté par un onduleur triphasé comme outil

d'entraînement de la pompe centrifuge. La commande de la vitesse du moteur est aussi envisagée. Ainsi, pour extraire le maximum de puissance du GPV, la chaîne de pompage doit comporter une commande MPPT.

Pour ce faire nous avons présenté ce manuscrit de la façon suivante :

- La *première chapitre* de ce travail correspond à une généralité sur les systèmes de pompage photovoltaïque et la modélisation de chaque élément qui constitue le système à savoir le générateur photovoltaïque, les convertisseurs statiques, le moteur asynchrone à cage d'écureuil et la pompe centrifuge.
- Dans le *deuxième chapitre*, nous avons présenté la Modalisation et contrôle d'une Commande vectorielle du système de pompage photovoltaïque.
- Dans le *troisième chapitre*, nous avons présenté la simulation sous l'environnement logiciel MATLAB du model système de pompage photovoltaïque, la simulation d'une générateur photovoltaïque ainsi que la présentera les techniques d'algorithme MPPT , ensuite on fait appel à une alternative stratégie de contrôle pour la commande du système de pompage, à savoir la commande directe du couple(DTC).
- *Finalemnt*, ce travail est terminé par conclusion générale.

Chapitre 1 :

Généralités Sur Le Système Du Pompage Photovoltaïque

1. Introduction :

Toute les systèmes d'eau dans le domaine des électromécaniques se fait par le biais d'une chaîne des techniques de pompage d'eau. Dans ce chapitre, on se contentera de définir les différents éléments constituant notre chaîne sur d'énergies renouvelable du pompage photovoltaïque.

1.1 Chaîne d'énergies renouvelable du pompage d'eau :

L'eau est une ressource essentielle et il faut pouvoir extraire l'eau quel que soit l'endroit de la planète. L'organe essentiel pour l'extraction de l'eau est la pompe. Selon la source d'énergie disponible (solaire, électrique, éolienne) et selon l'utilisation (zone urbaine, zone rurale) l'architecture de la chaîne d'énergie et le choix des pompes sera différent [5].

La figure 1.1 montre les différentes techniques qui permettent de disposer de l'énergie hydraulique.

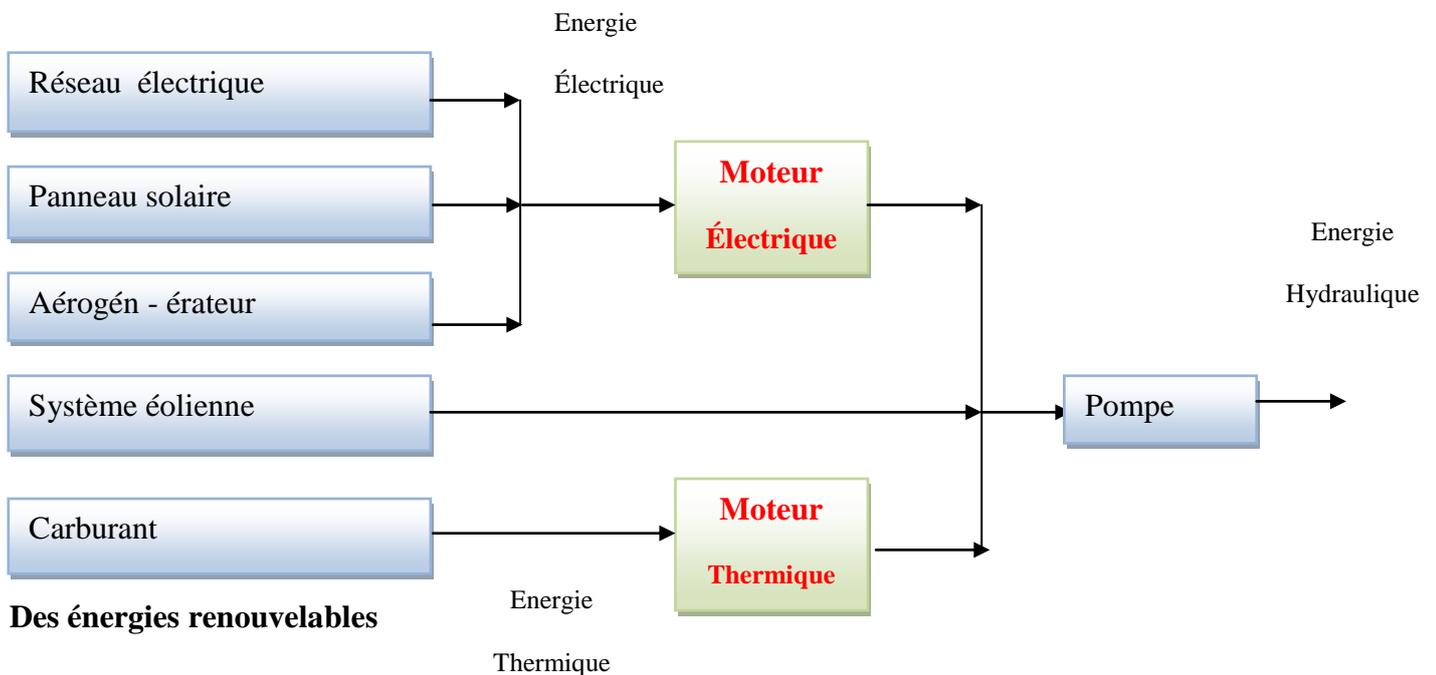


Figure 1.1 : Différentes techniques de pompage d'eau [5] .

1.2 Des énergies renouvelables :

Les énergies renouvelables proviennent de deux grandes sources naturelles : le Soleil et la Terre. Surnommées « énergies propres » ou « énergies vertes », leur exploitation engendre très peu de déchets et d'émissions polluantes mais leur pouvoir énergétique est beaucoup plus faible que celui des énergies non renouvelables [6] .

La figure (1.2), représente les cinq familles énergies renouvelables :

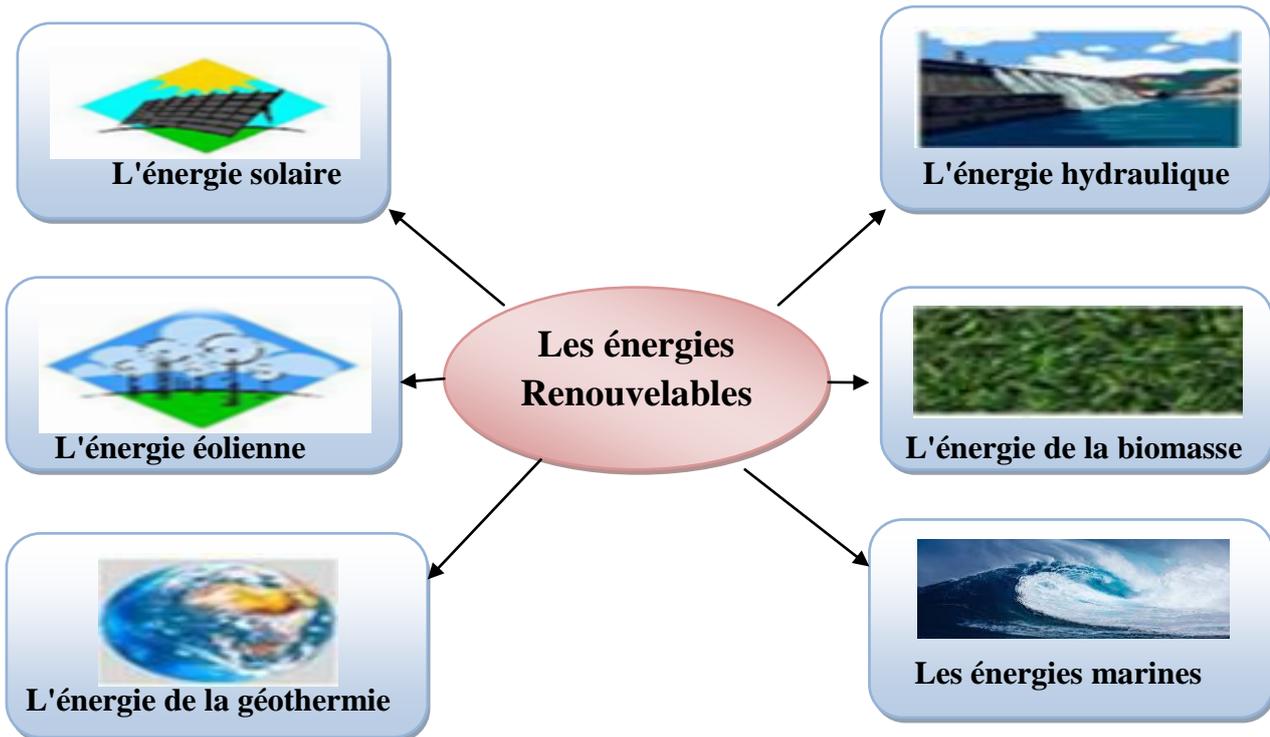


Figure 1.2 : Les six familles énergies renouvelables

1.2.1 Les différents types d'énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont divisées en six catégories :

1. **L'énergie hydraulique** : La force de l'eau des chutes retenue par des barrages ou celle qui alimente les aménagements "au fil de l'eau" fait tourner les turbines des centrales pour produire de l'électricité.
2. **L'énergie éolienne** : La force du vent fait tourner des éoliennes qui produisent de l'électricité.
3. **L'énergie solaire** : Les rayons du soleil chauffent l'eau grâce à des capteurs solaires ou fournissent de l'électricité grâce à des cellules photovoltaïques ou des centrales solaires.
4. **L'énergie de la géothermie** : La chaleur du sous-sol chauffe directement l'eau ou fait tourner les turbines des centrales pour produire de l'électricité.

5. **L'énergie de la biomasse** : La combustion de la matière organique (plantes, arbres, déchets animaux, agricoles ou urbains) produit de la chaleur ou de l'électricité.
6. **Les énergies marines** : Énergie marine ou d'énergie des mers désigne l'ensemble des énergies renouvelables extraites ou pouvant l'être du milieu marin.

1.2.2 Historique du photovoltaïque

Le terme « *Photovoltaïque* », souvent abrégé par les lettres (PV), peut désigner le phénomène physique (l'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839) ou la technologie associée. Le mot « photovoltaïque » vient du mot « photo » (du grec « phos » qui signifie « lumière ») et du mot « Volt » (nom du physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité).

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire au moyen d'une cellule photovoltaïque [50] . Les cellules photovoltaïques sont fabriquées avec des matériaux semi-conducteurs principalement produits à partir de silicium. Ces matériaux capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée effet photovoltaïque [7],[50].

Quelques dates importantes [8-9],[51]:

- **1954** : Une cellule photovoltaïque pour l'industrie spatiale est mise au point.
- **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.
- **1970** : Des applications autonomes terrestre apparaissent (phare, bouée, balise, pompes solaire).
- **1983** : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000km en Australie.
- **1995** : Premières installations photovoltaïques raccordées au réseau en Allemagne et au Japon.
- **2002**, il a progressé de 20 % à 25 % par an atteignant 427 MW en 2002. Néanmoins, le photovoltaïque représente moins de 0,1 % de toute la production énergétique mondiale.
- **2010 à 2016** : la puissance installée du parc photovoltaïque mondial a été multipliée par 6 entre fin 2010 (50 GW) et fin 2016 (305 GW) .

1.2.3 Le système photovoltaïque :

Le système photovoltaïque SPV est constitué par un générateur photovoltaïque, les convertisseurs statiques de puissance (DC-DC et DC-AC avec un système de commande) et une charge. Le rôle principal du convertisseur statique est de faire une adaptation d'impédance de sorte que le générateur délivre le maximum d'énergie [10] .

1.2.4 L'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable qui produit d'énergie électrique par la transformation du rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque [11].

La figure (1.3), représente la structure de la chaîne de l'énergie solaire photovoltaïque.

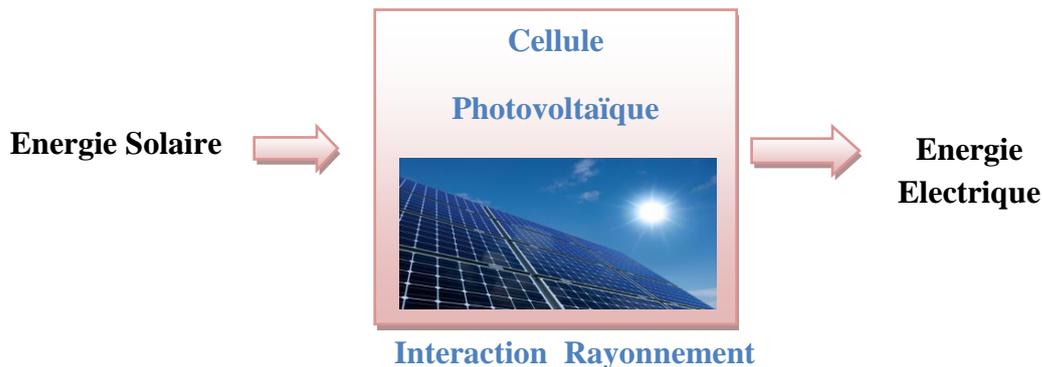


Figure 1.3 :L'énergie solaire photovoltaïque.

1.2.5 Principe de l'énergie solaire photovoltaïque.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque [52].

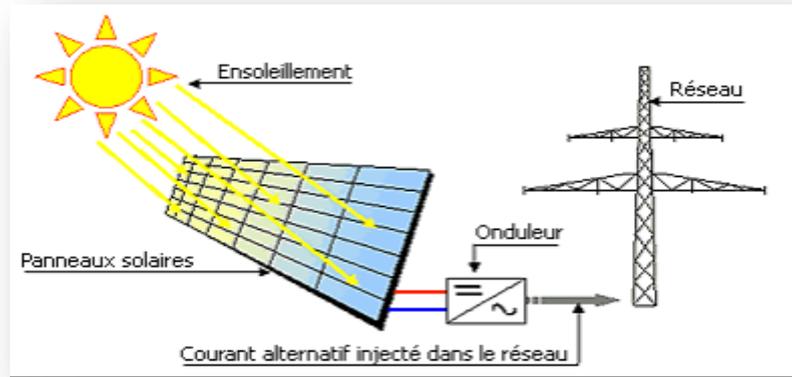


Figure 1.4 : Principe de l'énergie solaire photovoltaïque.

1.2.5.1 Gisement solaire

a) Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet à l'infrarouge [12-13],[53]. Pour caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise, on utilise la notion AM pour «Air Mass».

Dans l'espace hors atmosphère terrestre (AM 0), l'énergie transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1350 W/m^2 (Figure 1.5). En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une diminution et une modification de son spectre dû aux phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz. Sa valeur est de l'ordre de 1000 W/m^2 au niveau du sol, à 90° d'inclinaison (AM 1).

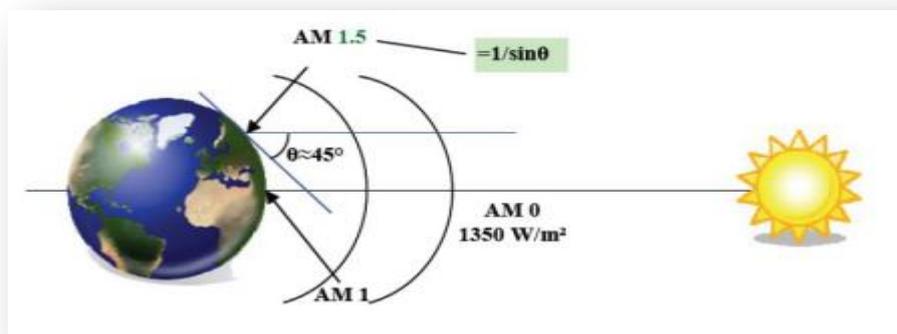


Figure 1.5 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM [14].

b) Spectre du rayonnement :

Le rayonnement électromagnétique (**REM**) est composé de *grains* lumière appelés les ondes des photons. Ces ondes contiennent de l'énergie électrique et magnétique. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ où plus la longueur d'onde courte, et l'énergie du photon est grande comme indique la relation suivante [54]:

$$E_{ph} = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Où : h est la constante de Planck , c la vitesse de la lumière et λ : la longueur d'onde

Avec :

- $E (J)$: Energie en Joule;
- $h (J.s)$: Constante de Planck ($h= 6,62607004 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{s}$) ;
- $c (ms^{-1})$: Vitesse de la lumière ($c= 299\,792\,458 \text{ m} / \text{s}$) ;
- $\lambda (m)$: Longueur d'onde (souvent exprimée en micromètre) ;
- $\nu (Hz) = \frac{c}{\lambda}$: Fréquence.

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement en figure (1.6) [15] :

- -Ultraviolet UV $0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$ 6.4%.
- -Visible $0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$ 48.0%.
- -Infrarouge IR $0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$ 45.6%.

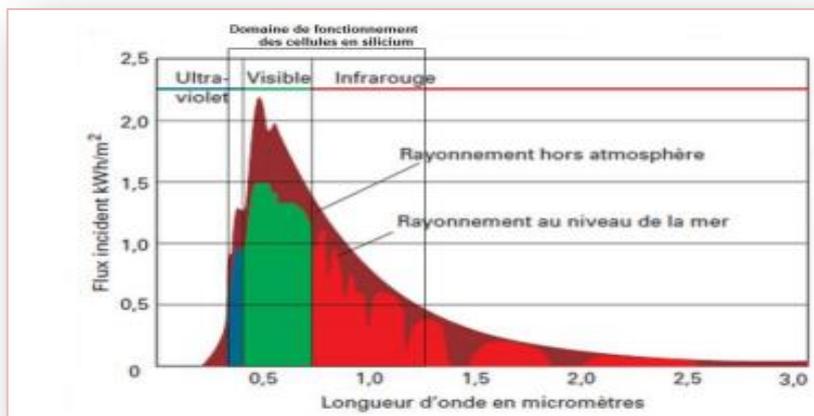


Figure 1.6 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.

1.2.6 Les générateurs photovoltaïques :

1.2.6.1 L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque (PV) utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse (Photons) des rayons solaires en électricité, par le biais du déplacement de charges électriques dans un matériau semi-conducteur (Silicium).

Lorsque les photons heurtent une surface mince de ce matériau, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière. Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique.

Le matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P.

La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique [16].

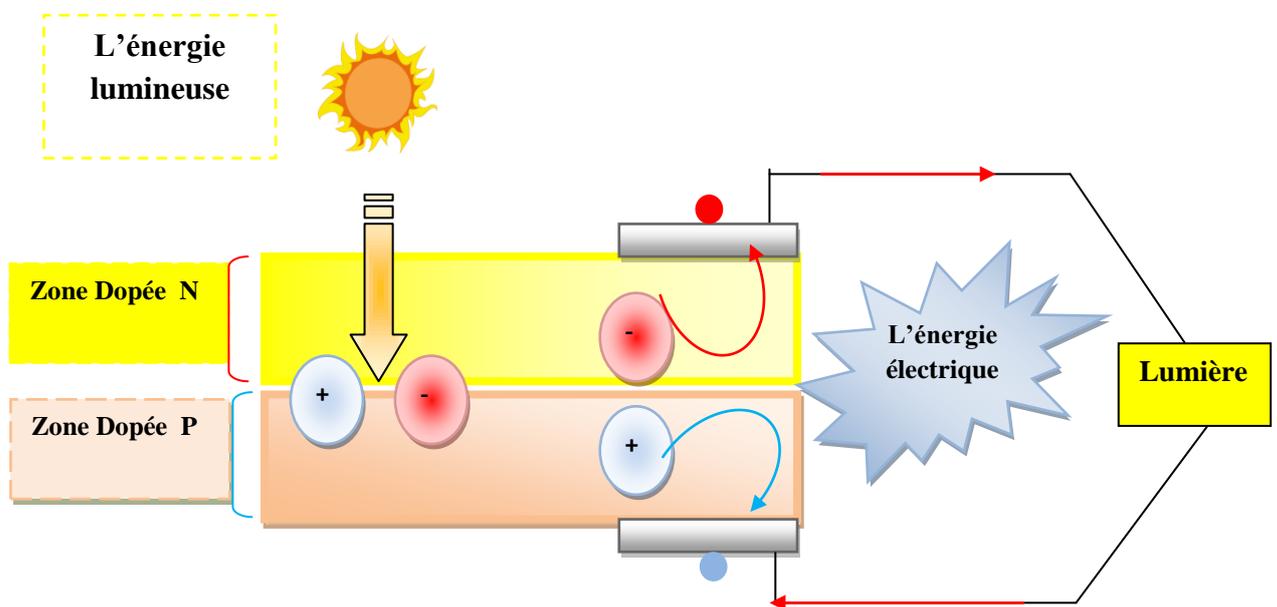


Figure 1.7 : L'effet photovoltaïque.

La figure (1.8), représente un exemple d'un matériau semi-conducteur dopé (Le Silicium).

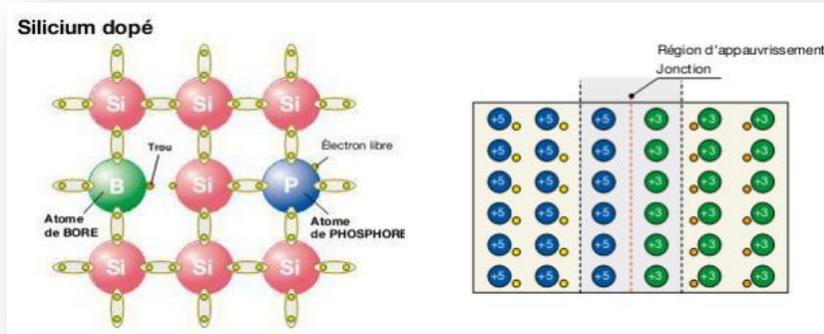


Figure 1.8 :Exemple d'un matériau semi-conducteur dopé (Le Silicium).

C'est ce que l'on appelle le dopage : C'est une technique est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Donc, le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne. [17]

1.2.6.2 Principe de fonctionnement de la cellule PV :

A) La cellule photovoltaïque :

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi- conducteurs de type P-N qui produisent un courant électrique sous l'effet des photons lumineux.

B) Structure et principe de fonctionnement :

La figure (1.9), représente évolution de la taille des cellules silicium photovoltaïques ces dernières années [17].

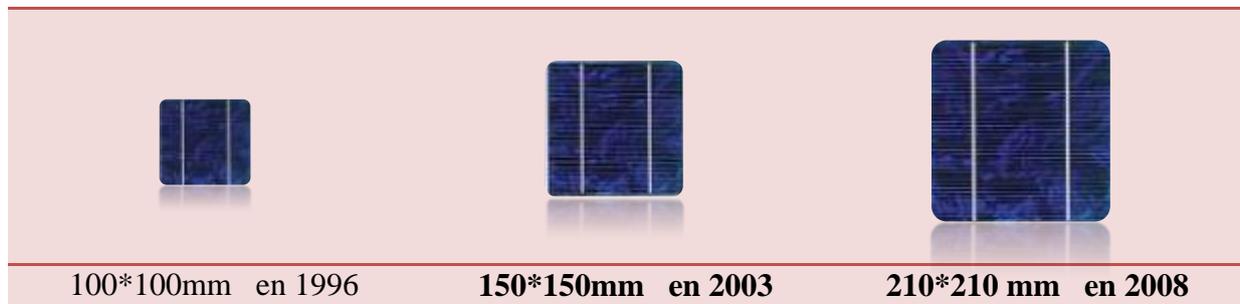
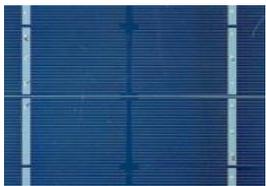


Figure 1.9 : Évolution de la taille des cellules silicium Photovoltaïques ces dernières années.

1.2.6.3 Les Différents Types de Cellules Photovoltaïques :

Le tableau suivant montre différents types de cellules et leurs avantages et inconvénients [18]

Tableau 1.1 : Différents types de cellules et leurs avantages et inconvénients

Technologie	silicium Monocristallines	silicium Poly-cristallines	silicium Amorphe
Cellule et Module			
Rendement	14 à 16 %	12 à 14 %	6 à 8 %
Avantages	-Bon rendement -Nombre de fabricants élevé	-Très bon rendement -Moins cher que le monocristallin	-Fonctionnement avec un éclaircissement faible -Un peu moins chère
Inconvénients	-Coût élevé -Rendement plus faible sous un faible éclaircissement	-Rendement faible sous faible éclaircissement	-Rendement faible en plein soleil -Diminution des performances avec le temps
Applications	Appareil de faible puissance. Application spatiale.	Générateurs à toutes tailles (relié au réseau ou en sites isolés).	Appareil de faible puissance. Production d'énergie (calculatrices et montres solaires)

1.2.6.4 Générateur photovoltaïque (GPV) :

Contrairement au terme de "panneau solaire" souvent utilisé, l'appellation "générateur photovoltaïque" désigne bien ce dispositif qui permet de produire de l'électricité à partir de la lumière.

La figure (1.11), présente un ruban métallique d'une cellule. Les cellules sont connectées entre elles par un fin ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+)[14]

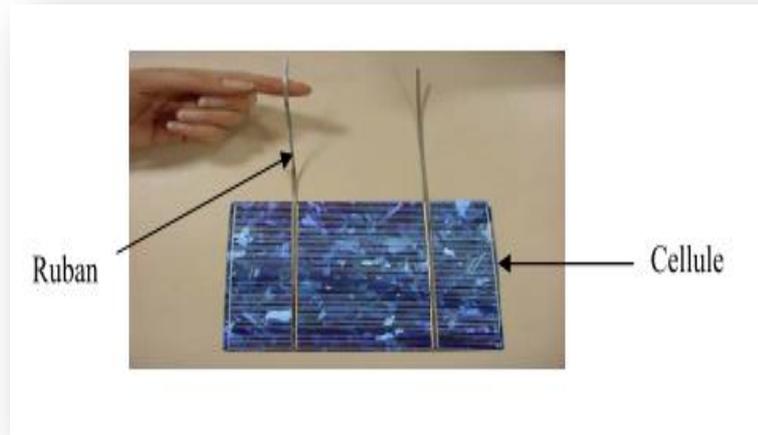


Figure 1.10 :Ruban métallique d'une cellule.

- Les cellules sont encapsulée sous vide entre 2 films thermoplastiques transparents (EVA : Ethylène Acétate de Vinyle) .
- Le plus souvent présence d'un cadre en aluminium avec joint périphérique pour permettre la dilatation . et un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière . Ensuite la face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLAR. connexion ; la boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass . Les deux câbles unipolaires sont raccordés

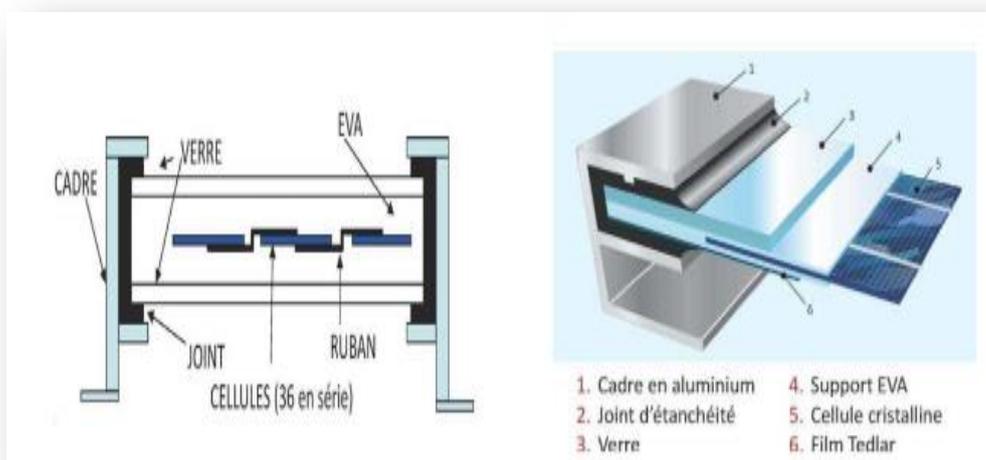


Figure 1.11: Encapsulation des cellules.

Les cellules PV en série ou en parallèle.

Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour (N_s) cellules en série, constituant des branches elles-mêmes (N_p) en parallèle.

La puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par relation (1.2) [14]:

$$P_{pv} = N_s \cdot V_{pv} \cdot N_p \cdot I_{pv} \tag{1.2}$$

Avec :

P_{pv} : La puissance disponible en sortie du GPV.

V_{pv} : La tension à la sortie du GPV.

I_{pv} : Le courant de sortie du GPV.

A- Association en série et parallèle d'un module photovoltaïque :

B.1 Association en série :

L'équation (1.3) résume la caractéristique électrique d'une association série de (N_s) cellules [19].

Le courant-tension de (N_s) cellule série :

$$V_{pv} = N_s * V_{co} \tag{1.3}$$

$$I_{pv} = I_{cc} \tag{1.4}$$

Avec : V_{pv} : La tension générer par le module photovoltaïque de N_s cellules en série.et

I_{pv} : Le courant aux bornes du module photovoltaïque de N_s cellules en série.

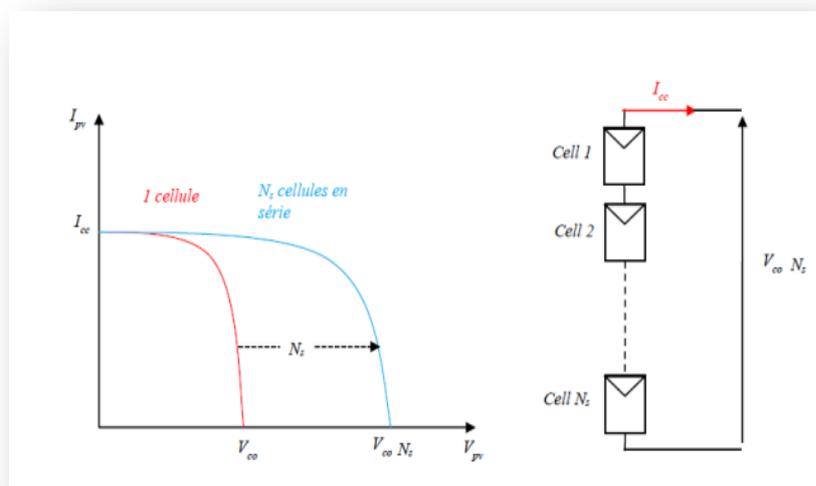


Figure 1.12 : Caractéristique courant-tension de (N_s) cellule série [20]

B.2 Association en parallèle :

L'équation (1.5) résume la caractéristique électrique d'une association parallèle de (N_p) cellules [19].

Le courant-tension de (N_s) cellule parallèle et définir par l'équation suivant:

$$V_{pv} = V_{co} \tag{1.5}$$

$$I_{pv} = N_s * I_{sc} \tag{1.6}$$

Avec :

V_{co} : La tension générer par le module photovoltaïque de N_p cellules en parallèle.

I_{pv} : Le courant aux bornes du module photovoltaïque de N_p cellules en parallèle.

Une association parallèle de (N_p) cellules est possible et permet d'accroitre le courant de sortie du générateur ainsi crée.

Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [19].

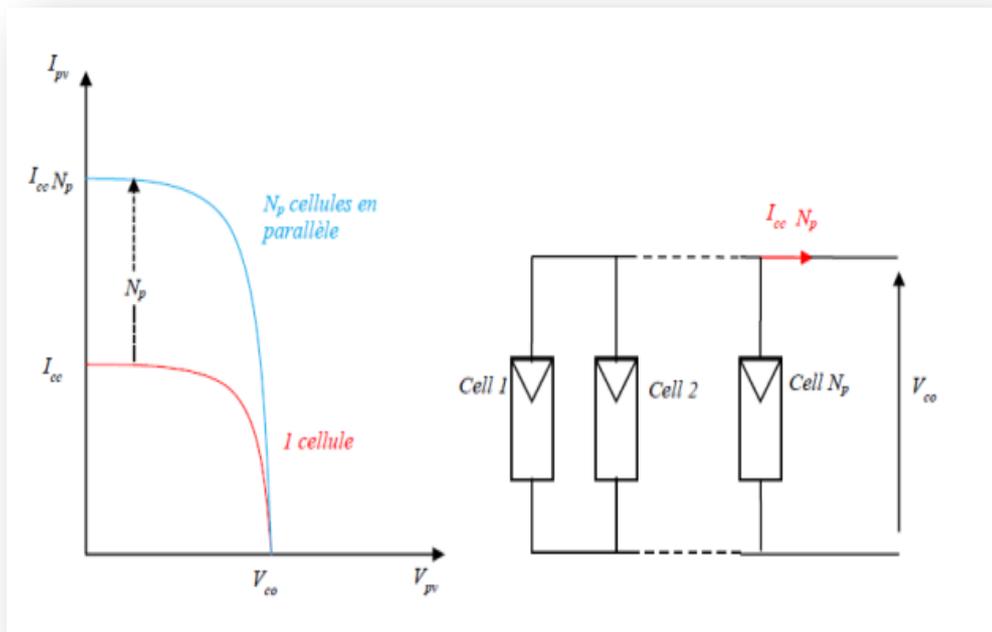


Figure 1.13 : Caractéristique courant tension de (N_p) cellule parallèle [20-21].

1.2.7 Caractéristiques électriques d'une cellule :

a. Caractéristiques courant / tension :

La caractéristique courant / tension d'une cellule a l'allure suivante :

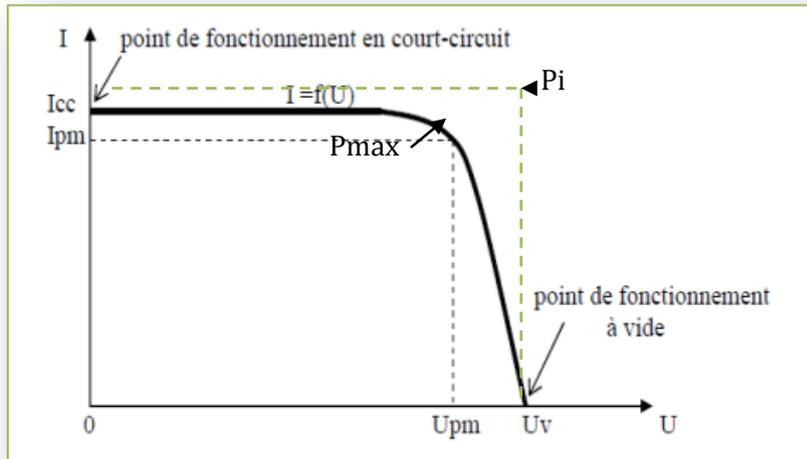


Figure 1.14 : Caractéristique de courant en fonction de la tension $I=f(U)$

d'une cellule photovoltaïque [22]

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc..), le courant électrique disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque figure (1.15). Le caractéristique $I=f(U)$ d'une cellule photovoltaïque, sur cette courbe, on repère :

- Le point de fonctionnement à vide ou de circuit ouvert ($U_{CO}= U_v$) : U_v pour $I = 0 A$
- Le point de fonctionnement en court-circuit : I_{cc} pour $U = 0V$

b. Caractéristiques puissance / tension :

La puissance délivrée par la cellule a pour expression ($P = U.I$) Pour chaque point de la courbe précédente, on peut calculer la puissance P et tracer la courbe ($P = f(U)$). Cette courbe a l'allure suivante :

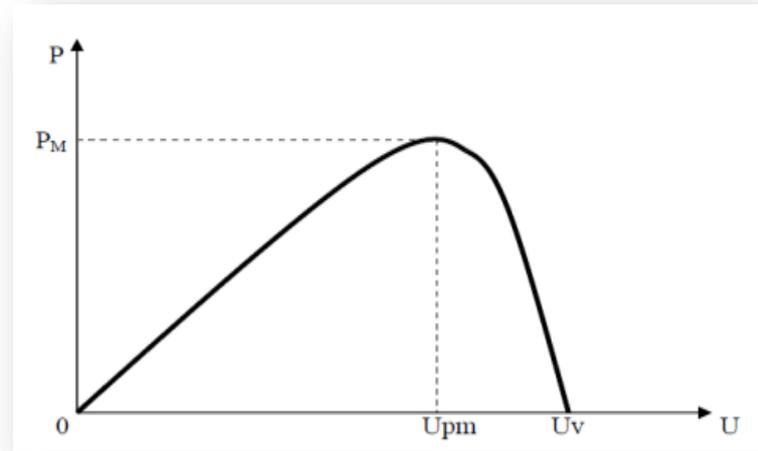


Figure 1.15 : Caractéristique de puissance en fonction de la tension $P=f(U)$ d'une cellule photovoltaïque [22]

La figure (1.15), représente le caractéristique $P=f(U)$ d'une cellule photovoltaïque, sur cette courbe passe par un maximum de puissance (P_m). A cette puissance correspond, une tension U_{pm} et un courant I_{pm} que l'on peut aussi repérer sur la courbe $I = f(U)$ [].

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximum idéale P_i correspondrait donc à la tension de circuit ouvert ($U_{CO}= U_v$) multipliée par le courant de court-circuit I_{CC} (figure 1.14):

$$P = P_{maxeideal} = U_{CO} \cdot I_{CC} \quad (1.7)$$

Un générateur photovoltaïque GPV élémentaire décrit par les paramètres suivants [23]:

- **La puissance de crête P_c :**

Puissance nominale délivrée par le module dans les conditions standards ($25\text{ }^\circ\text{C}$ et un éclairement de 1000 W/m^2). Elle s'exprime en Watt crête (W_c).

- **La caractéristique $I(V)$:**

Courbe représente le courant I débit par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

- **La tension à vide V_{oc} :**

Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement « plein soleil ».

- **Le courant de court-circuit I_{sc} :**

Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement « plein soleil ».

- **Le point de fonctionnement optimum (point de puissance maximale) :**

Il est en fonction de l'insolation. C'est le point pour lequel le module fournit son maximum du courant I_{mpp} sous sa tension maximale V_{mpp} (lorsque la puissance de crête est maximale en plein soleil) :

$$P_{mpp} = V_{mpp} * I_{mpp} \quad (1.8)$$

- **Le rendement :**

c'est le rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente ; Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite P_{mpp} et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module. Soit (S) la surface du module et (G) l'éclairement, ce rendement a pour expression :

$$\mu = \frac{P_{mpp}}{G * S} \quad (1.9)$$

- **le facteur de forme :**

c'est le rapport entre la puissance optimale (P_{mpp}) et la puissance maximale que peut avoir le module.

$$FF = \frac{P_{mpp}}{V_{oc} * I_{sc}} = \frac{V_{mpp} * I_{mpp}}{V_{oc} * I_{sc}} \quad (1.10)$$

1.2.8 Protection D'un GPV :

Deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles (figure 1.16):

1. La protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (Diode Anti-Retour)
2. La protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (Diode By-Pass) et éviter les points chauds.

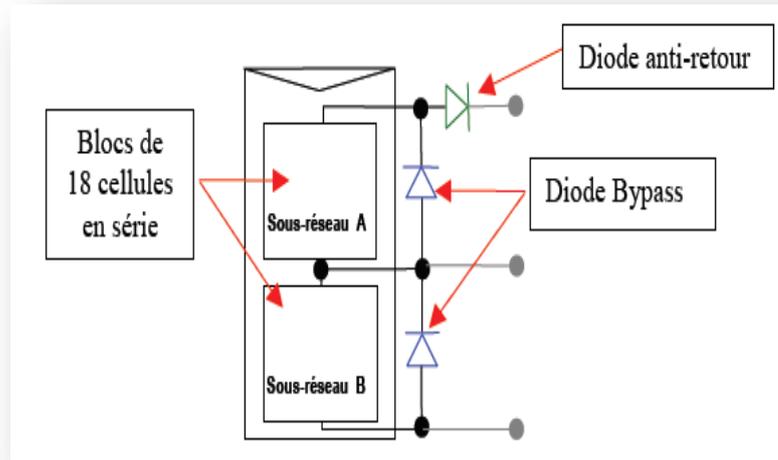


Figure 1.16 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec Diodes By-Pass et Diode Anti-Retour[23]

1.3 Groupe moteur-pompe :

Un groupe motopompe est un ensemble composé d'un moteur électrique entraînant une pompe hydraulique.

1.3.1 Moteurs :

Le moteur d'un groupe motopompe convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou alternatif. Dans ce dernier cas, un convertisseur électronique ou un onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu provenant d'un générateur photovoltaïque en courant alternatif. Pour cette raison, le choix d'un moteur à courant continu peut sembler, de prime abord, plus intéressant, mais nous allons voir que l'évolution des convertisseurs électroniques efficaces permet également de choisir des moteurs alternatifs efficaces et surtout, moins cher [25].

La pompe nécessite une énergie mécanique en entrée. Cette énergie mécanique est fournie dans la plupart des cas par un moteur électrique (électropompe), qui peut être à courant continu ou alternatif, et d'autre cas par un moteur thermique (Motopompe) Diesel ou essence [12] ,[26] .

Quelques avantages et inconvénients de chacun sont donnés ci-dessous :

Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients pour les deux moteurs, MCC et MAS.

types de moteur	Avantages	Inconvénients
Moteur à courant continu	Facilité de régulation (variation de vitesse, couple, ...) Rendement de 90%	Coût d'entretien : le système balai/collecteur nécessite beaucoup d'entretiens
Moteur asynchrone	Fiabilité, nécessite peu d'entretien Rendement de 90%	Difficulté et coût de régulation (nécessite la réalisation de commandes vectorielles)

Dans ce travail, on utilise la machine asynchrone, parce qu'elle est la machine la plus fiable.

1.3.2 Eléments du système de pompage d'eau :

1.3.1.1 Pompe :

On appelle pompe toutes machines hydrauliques qui servent à déplacer les liquides d'une région de basse pression vers une région à grande pression. Son fonctionnement consiste à produire une différence de pression entre la région d'aspiration et la région de refoulement au moyen de l'organe actif (piston, roue,...etc.) de la pompe. Du point de vue physique, la pompe transforme l'énergie mécanique en énergie hydraulique [27].

1.3.1.2 Différents types des pompes :

L'énergie requise pour faire fonctionner une pompe dépend des nombreux facteurs rencontrés dans l'étude des écoulements [28]:

- Les propriétés du fluide : masse volumique, viscosité, compressibilité.
- Les caractéristiques de l'installation : longueur, diamètre, rugosité, ...
- Les caractéristiques de l'écoulement : vitesse, débit, pression ...

1.3.1.3 Classification des pompes :

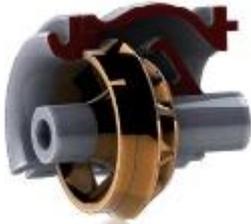
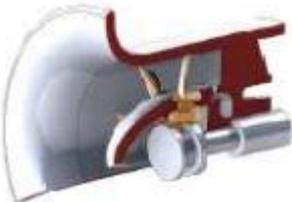
a) Classification selon la conception de la pompe :

Devant la grande diversité de situations possibles, on trouve un grand nombre de pompes que l'on peut classer en deux grands groupes :

- Les pompes volumétriques dont l'écoulement résulte d'une variation de volume de l'espace occupé par le liquide.
- Les pompes centrifuges où le mouvement du fluide est généré par la force centrifuge.

L'utilisation d'un type de pompes ou d'un autre dépend des conditions d'écoulement du fluide.

Tableau 1.3 : Classification des pompes [26].

TYPES	Pompes Rotatives		
	Pompe à vis	Pompe à engrenages	Pompe à palettes
Pompes volumétriques			
	Pompes Alternatives		
			
	Pompe à pistons		Pompe à membrane
Pompes roto-dynamique			
	Pompes centrifuges	hélico centrifuges	Pompes hélices

b) Classification selon la position de pompe :

En fonction de l'emplacement physique de la pompe, nous distinguons : Les pompes de surface, et les pompes immergées [29].

1- Pompes de surface :

Le terme surface définit la position d'une pompe par rapport au liquide à pomper. Elle est dite pompe de surface, car prévue pour être posée en dehors du liquide à aspirer.

2- Pompes immergées :

Les pompes de refoulement sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur immergé avec la pompe (pompe monobloc), soit le moteur en surface. La transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur. Dans les deux cas, une conduite de refoulement après la pompe permet des élévations de plusieurs dizaines de mètres, selon la puissance du moteur.

1.3.1.4 Caractéristiques des pompes volumétriques et centrifuges

Tableau 1.4 : Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique [30] :

Types	Pompe volumétrique	Pompes centrifuge
Mécanique	Met le liquide en mouvement, ce qui crée une pression à la sortie (une pression apparaît, entraînant un débit).	Isole une certaine quantité de liquide et la transfère de l'orifice d'aspiration à celui de refoulement (un débit est créé, entraînant une pression)
Performance	Le débit dépend de la pression variable.	Le débit est constant quelle que soit la pression.
Viscosité	Le rendement diminue avec l'augmentation de la viscosité du fait des pertes par frottement dans la pompe.	Le rendement augmente avec la viscosité
Rendement	Rendement optimal en un point. À des pressions différentes, le rendement diminue.	Le rendement augmente avec la pression.
Conditions d'entrée	Le liquide doit être dans la pompe pour créer un différentiel de pression. Auto-amorçage d'une pompe à sec impossible.	Une pression négative est créée à l'orifice d'entrée. Auto-amorçage d'une pompe à sec possible.

La pompe centrifuge présente d'innombrables avantages par rapport aux types de pompage, elle a 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.

Tous ces avantages nous emmènent à choisir comme pompe pour notre système de pompage, la pompe centrifuge.

1.4 Différentes architectures envisageables des systèmes de pompage :

1.4.1 Pompage avec réseau électrique :

L'eau dans son usage domestique suit un cycle d'utilisation qui peut se résumer en quatre étapes [26] :

1. Extraction de l'eau,
2. Traitement de l'eau,
3. Utilisation domestique de l'eau,
4. Epuration et rejet de l'eau traitée.

Un exemple d'une station de pompage se composant d'un total de trois pompes en parallèle permet alors le relèvement de l'eau depuis le réservoir intermédiaire vers le réservoir de tête [12] .



Figure 1.17 : Station de pompage alimentée par le réseau électrique.

1.4.2 Pompage photovoltaïque :

Le pompage de l'eau est l'une des applications les plus courantes utilisant de l'énergie solaire pour l'irrigation ou l'alimentation en eau potable. La performance du pompage

photovoltaïque dépend des caractéristiques du site (ensoleillement, température, obstacles géographiques), du rendement des modules photovoltaïque, mais aussi des caractéristiques des autres équipements (modules photovoltaïque, onduleur, moteur, pompe, etc.).

3.4.2.1 Composants du système de pompage photovoltaïque :

Un système de pompage solaire de l'eau est généralement composé des éléments suivants [26], [31]:

- Des panneaux solaires photovoltaïques pour capter l'énergie du soleil et la convertir en électricité.
- Un groupe électro- pompe, qui se décompose en deux parties : le moteur et une pompe généralement centrifuge multicellulaire.
- Une unité de conditionnement de puissance, constituée d'un convertisseur permettant de faire varier la fréquence et la tension de sortie en fonction de la puissance disponible du générateur solaire.
- Un câblage électrique, par lequel passe l'énergie du générateur au moteur, et les informations relatives aux contrôles de sécurité.
- Une infrastructure hydraulique qui conduit l'eau de sa source (puits) jusqu'aux points de distribution .

Dans cette étude nous avons basé sur les méthodes de pompage photovoltaïque

Dans les systèmes de pompage photovoltaïque, nous avons deux techniques possibles :

- 1. Pompage au fil du soleil et**
- 2. Pompage avec stockage d'énergie.**

Dans le cas où l'énergie solaire est consommée en temps réel ; on parle alors d'un pompage au fil du soleil sans batterie figure (1.18).

Cette technique permet d'utiliser directement une puissance continuellement variable, celle issue des modules photovoltaïques. Le débit de pompage va donc évoluer avec l'intensité de l'ensoleillement [32].

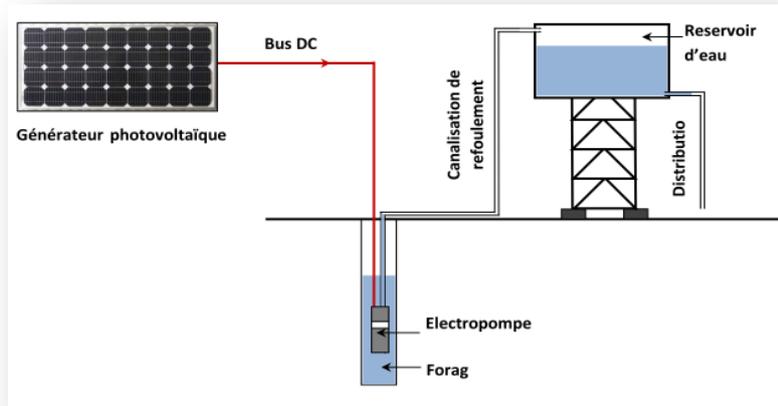


Figure 1.18 : Schéma du principe de pompage au fil du soleil.

La deuxième technique consiste à utiliser un stockage d'énergie (figure 1.19). Cette fois-ci, via des batteries. Ces batteries stockent l'énergie produite par les cellules photovoltaïques lors des périodes d'ensoleillement afin de pouvoir restituer cette énergie pour pomper l'eau en temps voulu. Le débit de pompage peut se faire à la demande, lorsque les utilisateurs en ont besoin [32-33].

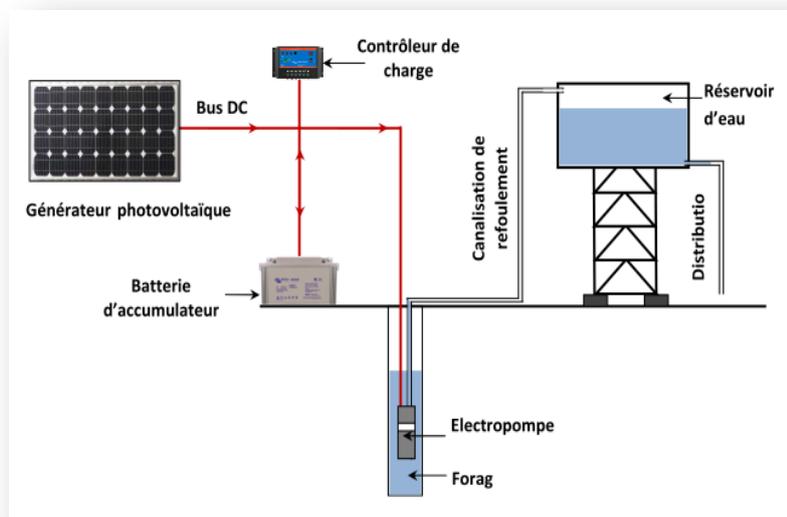


Figure 1.19 : Schéma du principe de pompage avec stockage d'énergie.

Les avantages et inconvénients des deux techniques de pompage photovoltaïque sont résumés dans le tableau 1.5.

Tableau 1.5 : Les avantages et inconvénients des pompes au fil du soleil et avec batteries [32]

Méthodes de pompage	Avantages	Inconvénients
Pompage au fil du soleil	<ul style="list-style-type: none"> - Economie du coût des batteries et par conséquent leur maintenance - Système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux - Meilleur rendement énergétique 	<ul style="list-style-type: none"> - Perte d'énergie au début et à la fin de la journée - Le débit de la pompe n'est pas constant et le rabattement du forage peut-être trop élevé durant certaines périodes de la journée.
Pompage avec batterie	<ul style="list-style-type: none"> Débit de la pompe régulier et à pression fixe. - Possibilité de pomper l'eau lorsque le soleil est absent. 	<ul style="list-style-type: none"> Coût élevé d'entretien et maintenance des batteries - Changement des batteries tous les 5 à 7 ans - Les batteries introduisent un certain degré de perte de rendement d'environ 20% à 30% de la production d'énergie. - Coût élevé du système photovoltaïque.

Dans le cas où le moteur est à courant alternatif, un convertisseur électronique appelé onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu provenant du générateur photovoltaïque en courant alternatif.

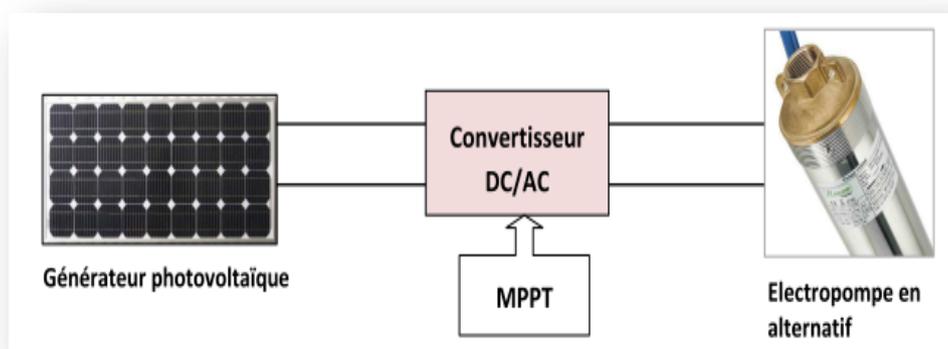


Figure1.20 : Diagramme du pompage PV par électropompe AC

1.5 Conclusion :

Nous avons présente dans ce chapitre les différents notions qui entrent dans l'énergie solaire et la constitution d'un système photovoltaïque et nous avons explore le principe de l'effet photovoltaïque, et les technologies utilisées ainsi que les différents types des cellules photovoltaïques. A étudie le principe de groupe moteur-pompe, éléments du système de pompage d'eau et concernant les différents blocs constituant une chaine sur d'énergies renouvelable du pompage .Ensuite de ce chapitre par les différentes architectures envisageables des systèmes de pompage.

Dans le chapitre suivant nous allons aborder en détail la commande et control vectorielle de ce système du pompage photovoltaïque et son rôle dans l'amélioration des performances du système.

Chapitre 2:

*Modélisation et Commande Vectorielle du Système
de Pompage Photovoltaïque*

2. Introduction :

Dans cette section, nous présentons deux sections premièrement les principes de base de la commande vectorielle. Puis nous exposons les deux types de contrôle du flux direct et indirect avec un aperçu sur les observateurs de flux. D'autre part, nous rappelons d'une manière brève les méthodes de commande en courant et en tension.

Ensuite de ce chapitre, on présentera le principe de la commande directe du couple sur la machine asynchrone à cage et la machine synchrone à aimants permanents afin de contrôler le flux statorique et le couple électromagnétique de ces deux machines.

2.1 Modélisation de commande vectorielle de la machine asynchrone :

2.1.1 Commande vectorielle :

Le principe d'orientation du flux est apparu dans les travaux de Blaschke au début des années 70, il consiste à faire coïncider l'axe 'd' du repère tournant (d-q) avec le flux, afin de rendre le comportement de la machine asynchrone similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée, le flux est donc contrôlé par le courant inducteur et le couple par le courant induit[34].

Le but de cette commande est d'éliminer le couplage qui existe entre l'induit et l'inducteur et de ramener son fonctionnement comparable à celui d'une MCC en décomposant le courant statorique en deux composantes, dont l'une contrôle le flux (I_{ds}) et l'autre contrôle le couple (I_{qs}).

On distingue deux types des contrôles vectoriels:

- 1- **Directe (FOC)** : dans le contrôle vectoriel directe on effectue une régulation du flux qui nécessite la connaissance
- 2- **Indirecte (IFOC)** : dans le contrôle vectoriel indirecte, on s'affranchit de la connaissance de ce flux en faisant quelques approximations.

La figure 2.1. Représente une meilleures performances par rapport aux autres techniques d'orientation.

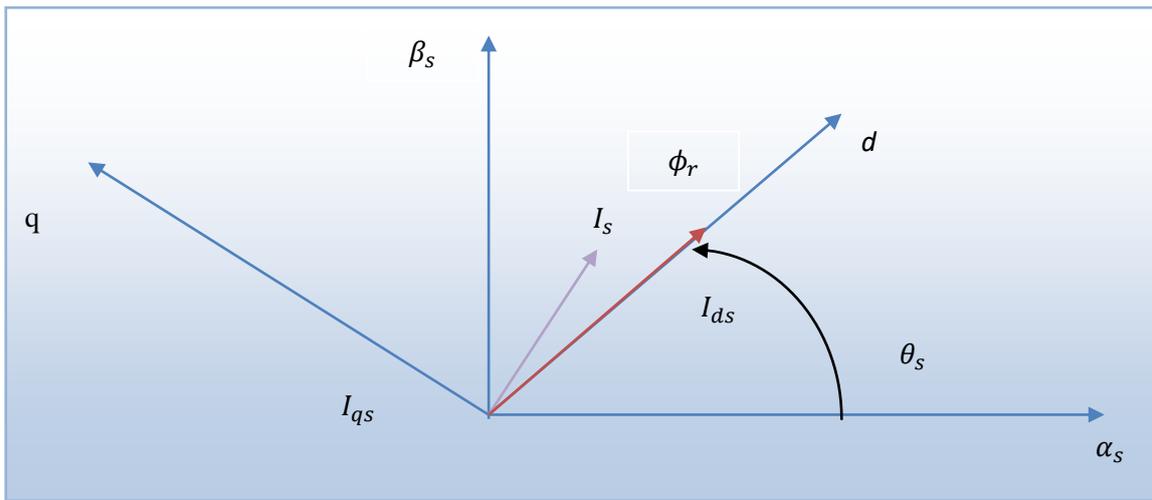


Figure 2.1: Principe de la commande vectorielle [39].

A. Commande est dite indirecte :

La commande est dite indirecte lorsque la position du flux considéré est calculée à partir de la mesure de la vitesse du rotor et d'autres grandeurs accessibles, comme les tensions ou les courants statoriques [35].

La commande vectorielle indirecte de la machine asynchrone alimentée en tension peut être représentée par la figure (2.2)

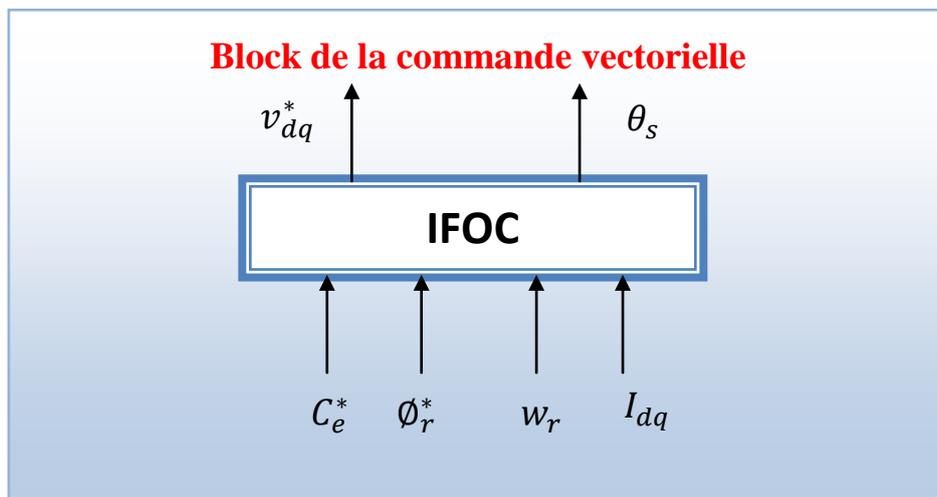


Figure 2.2: Schéma simplifié de la commande vectorielle indirecte de la MAS alimentée en tension.

2.1.2 Découplage par compensation :

Cette méthode consiste à faire la régulation des courants en négligeant les termes de couplage. Ces derniers sont rajoutés à la sortie des correcteurs pour obtenir les tensions des références nécessaires pour le réglage. Les termes supplémentaires sont déterminés de sorte que les tensions restantes soient une relation du premier ordre avec les courants correspondants [36]. Les tensions statorique s'écrivent:

$$\begin{cases} V_{ds} = \lambda\sigma L_s I_{ds} + \sigma L_s \frac{dI_{ds}}{dt} - \omega_s \sigma L_s I_{qs} + \frac{K_s}{T_r} \sigma L_s \phi_{dr} \\ V_{qs} = \lambda\sigma L_s I_{qs} + \sigma L_s \frac{dI_{qs}}{dt} - \omega_s \sigma L_s I_{ds} + \omega_r K_s \sigma L_s \phi_{dr} \end{cases} \quad (2.1)$$

Pour rendre les axes (d et q) complètement indépendant, il est nécessaire d'ajouter des termes identiques de découplages mais de signe opposé à la sortie des régulateurs comme le montre la figure (2.3).

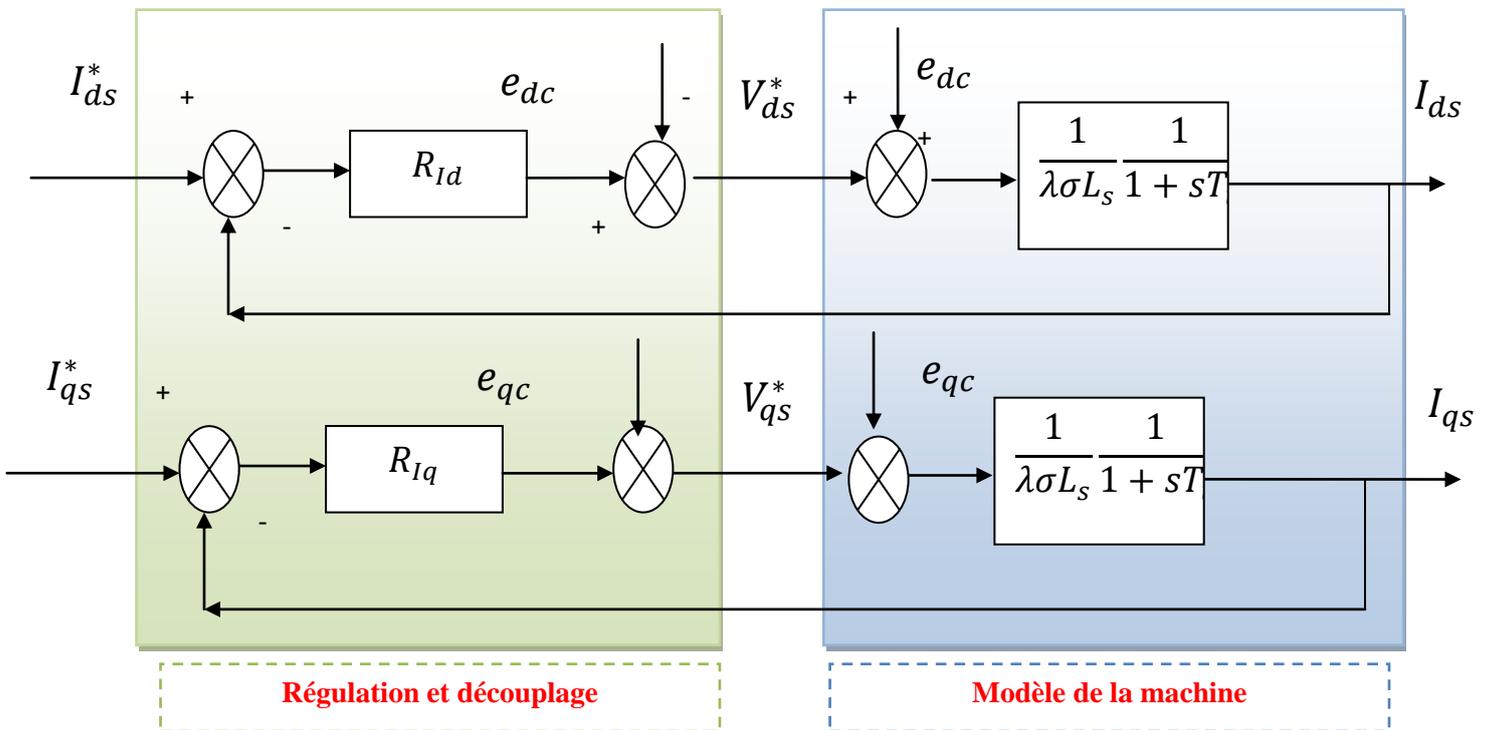


Figure 2.3: Découplage par addition des termes de compensation.

Ceci nous amène à écrire les tensions sous la forme :

$$\begin{cases} V_{ds} = V_{ds}^* + e_{dc} \\ V_{qs} = V_{qs}^* + e_{qc} \end{cases} \quad (2.2)$$

Les termes de compensation sont définis par les f.é.m. e_{dc} et e_{qc} :

$$\begin{cases} e_{ds} = \omega_s \sigma L_s I_{qs} + \frac{K_s}{T_r} \sigma L_s \phi_{dr} \\ e_{qs} = \omega_s \sigma L_s I_{ds} - \omega_r K_s \sigma L_s \phi_{dr} \end{cases} \quad (2.3)$$

Le nouveau système d'équations linéaires parfaitement découplé :

$$\begin{cases} V_{ds}^* = \lambda \sigma L_s I_{ds} + \sigma L_s \frac{dI_{ds}}{dt} \\ V_{qs}^* = \lambda \sigma L_s I_{qs} + \sigma L_s \frac{dI_{qs}}{dt} \end{cases} \quad (2.4)$$

Le découplage permet d'écrire les équations de la machine sous une forme simple ce qui facilite considérablement le dimensionnement des coefficients des régulateurs. Donc, après orientation du flux rotorique et découplage par compensation, on aboutit alors à un schéma bloc simple et identique pour les deux composantes du courant statorique de la figure 2.4.

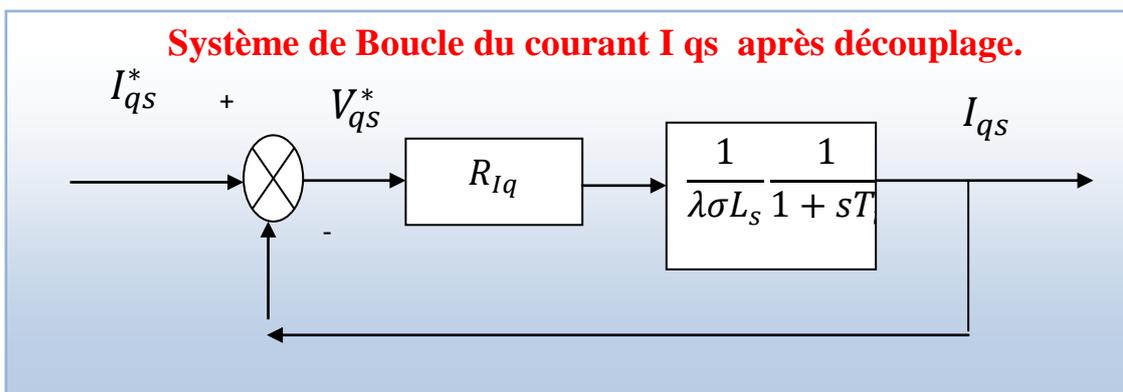


Figure 2.4: Boucle du courant I_{qs} après découplage.

La composante du courant I_{ds}^* contrôlera le couple et celle du courant I_{qs}^* contrôlera le flux.

Model de conception de MAS alimentée en tension à commande vectorielle indirecte :

Le principe du méthode commande vectorielle indirecte , ne régule pas le flux rotorique on a donc besoin ni de capteur, ni d'estimation ou d'observateur de flux. Si l'amplitude du flux rotorique réel n'est pas utilisée, a position doit être connue pour effectuer les changements de coordonnées. Le modèle de conception du système contient des quatre blocks suivant (figure 2.5):

- **Block 1 :** Block générateur de tension Vdc.
- **Block 2 :** Block onduleur (3 Φ)commandée par MLI.
- **Block 3 :** Block moteur asynchrone MAS..
- **Block 4 :** Block commande vectorielle indirecte

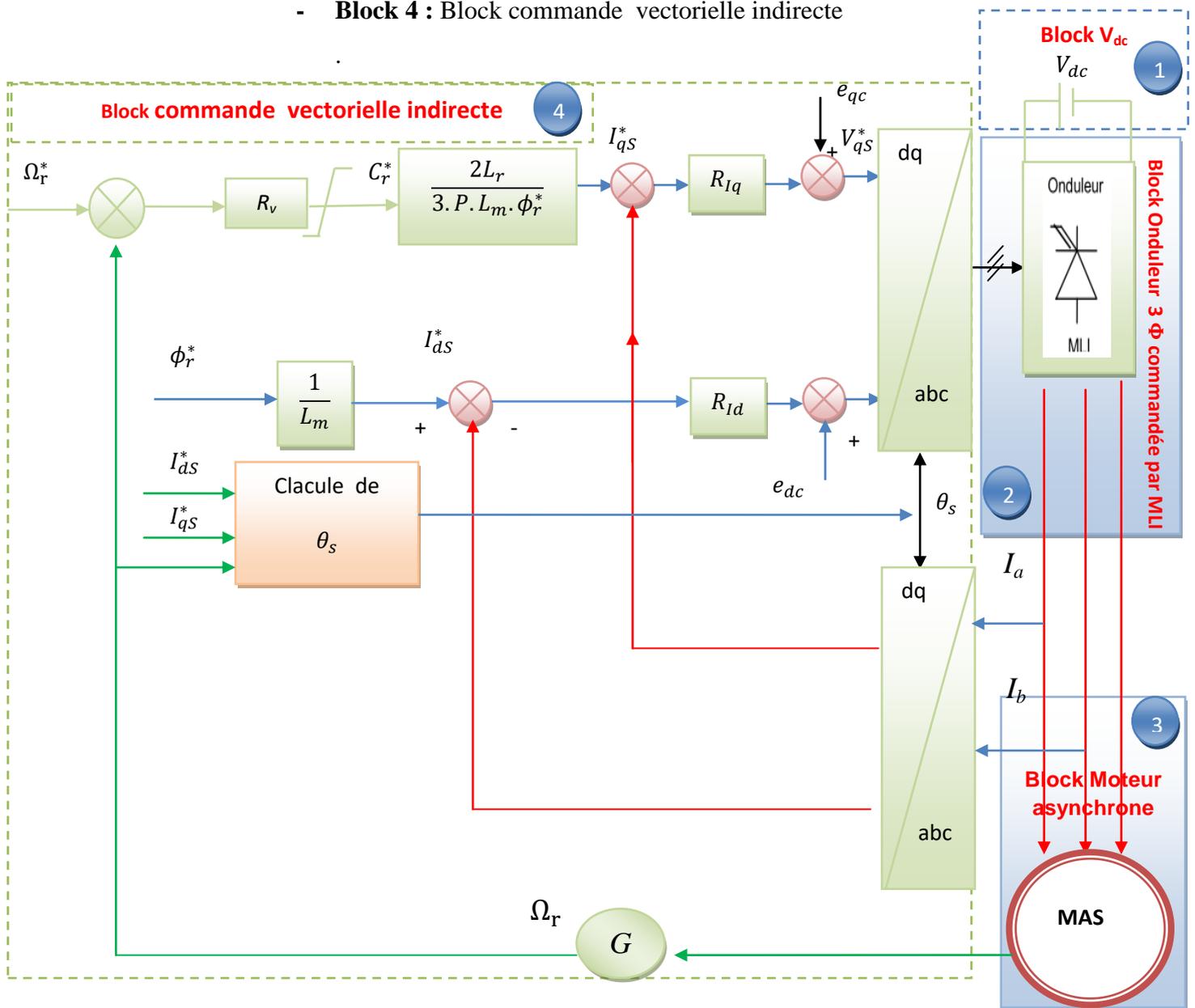


Figure 2.5:Schéma de principe d'une MAS alimentée en tension (commande vectorielle indirecte)[34].

2.1.3 Dimensionnement des régulateurs :

Nous proposons de commander notre machine par des régulateurs classiques de type PI (Proportionnel Intégrateur) pour activer la réaction de la réponse de la vitesse de rotation et annuler l'erreur statique. Les actions proportionnelles et intégrales de ce régulateur sont mises en parallèles.

a) Régulateur de courant :

Nous représentons les retards du convertisseur statique (onduleur MLI) et les blocs de Conversion par la fonction de transfert suivante [35]:

$$F_r(s) = \frac{1}{1+sT_f} \tag{2.5}$$

Pour chacune des boucles de courant, nous avons adopté un régulateur PI. Dont

$$PI = \left\{ K_j \left(\frac{1}{1+sT_f} \right) \text{ ou } j = d, q \right\} \tag{2.6}$$

Le schéma, incluant les différentes fonctions de transfert, pour l'axe q est donné par la figure suivante [36] :

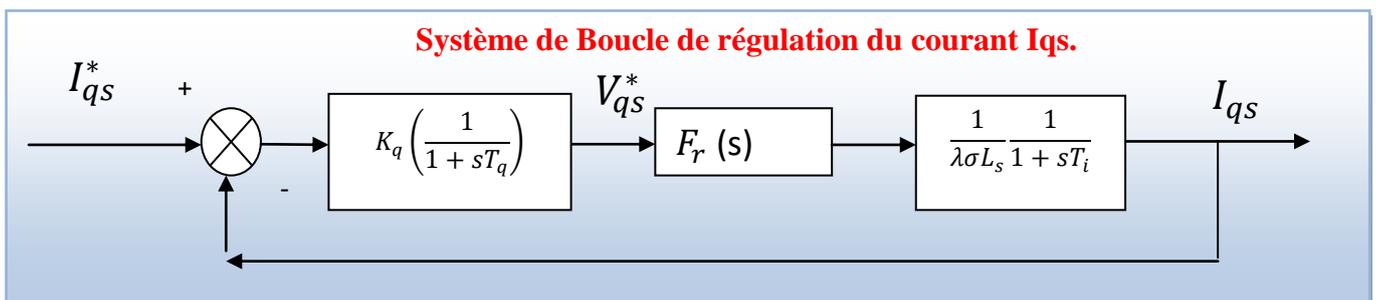


Figure 2.6: Boucle de régulation du courant Iqs.

Où : K_q et T_q : coefficients du correcteur.

T_f : Constante du temps de la commande rapprochée de l'onduleur.

1. Fonction De Transfer :

À partir de ce système de nous avons deux fonctions de transfert :

1- La fonction de Transfer en boucle ouverte FT_{BO} est donnée par équation suivant :

$$FT_{BO}(s) = \frac{K_j}{\sigma L_s} \frac{1}{s(1+sT_f)} \tag{2.7}$$

2- La fonction de Transfer en boucle ouverte FT_{BF} est donnée par équation suivant :

$$FT_{BO}(s) = \frac{K_q}{\sigma L_s T_f} \frac{1}{s^2 + s \frac{1}{T_f} + \frac{K_q}{\sigma L_s T_f}} = \frac{w_0^2}{s^2 + 2s\xi w_0 + w_0^2} \tag{2.8}$$

Avec :

$$\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sigma L_s}{K_q T_f}} w_0 = \sqrt{\frac{K_q}{\sigma L_s T_f}} \tag{2.9}$$

Lors d'un échelon de consigne pour un amortissement $\xi = \frac{1}{\sqrt{2}}$ on a un dépassement de 43%.

D'où:

$$\begin{cases} K_q = \frac{\sigma L_s}{K_q T_f} \\ T_f = 2ms \end{cases} \tag{2.10}$$

b) Régulateur de vitesse :

Le schéma de régulation en cascade nécessite, pour un bon fonctionnement, que la boucle interne (courant) soit plus rapide que la boucle externe. Par conséquent, le schéma bloc de régulation de vitesse peut être représenté par la figure (2.7)[35].

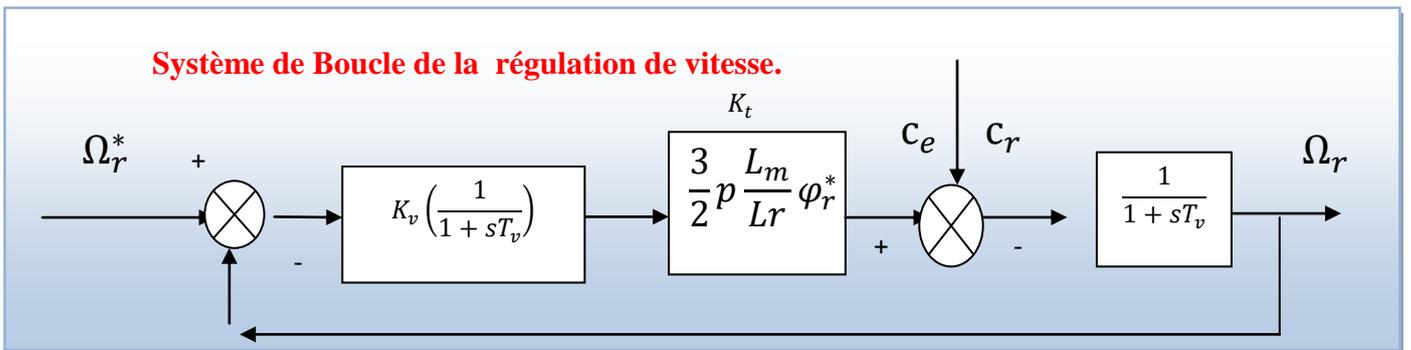


Figure 2.7:Schéma Boucle de la régulation de vitesse [34].

1. Fonction de Transfer :

À partir de ce système de nous avons deux fonctions de transfert :

1- La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par la relation :

$$FT_{BO}(s) = \frac{K_v k_t}{f_r} \frac{1}{sT_m} \quad (2.11)$$

2- La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par la relation :

$$FT_{BF}(s) = \frac{1}{1 + s \frac{T_m}{K_v k_t / f_r}} \quad (2.12)$$

On choisit généralement le temps de réponse à $3\tau_v(t_{rv(5\%)})$ selon la règle de 95%.

$$t_{rv} = 3\tau_v = 3 \frac{T_m f_r}{K_v k_t} \quad (2.13)$$

D'où

$$K_v = \frac{3J}{k_t t_{rv}} \quad (2.14)$$

2.1.4 Conception de la chaine de pompage photovoltaïque avec commande vectorielle :

La figure (2.8) représente les blocks constitutions de la chaine de pompage Photovoltaïque avec la commande vectorielle.

Le modèle de conception de la chaine de pompage photovoltaïque avec commande vectorielle contient des cinq blocks suivant :

- **Block 1** : Block générateur photovoltaïque et commande MPPT.
- **Block 2** : Block onduleur (3Φ) commandée par MLI.
- **Block 3** : Block moteur asynchrone.
- **Block 4** : Block groupe moteur-pompe.
- **Block 5** : Block commande vectorielle indirecte.

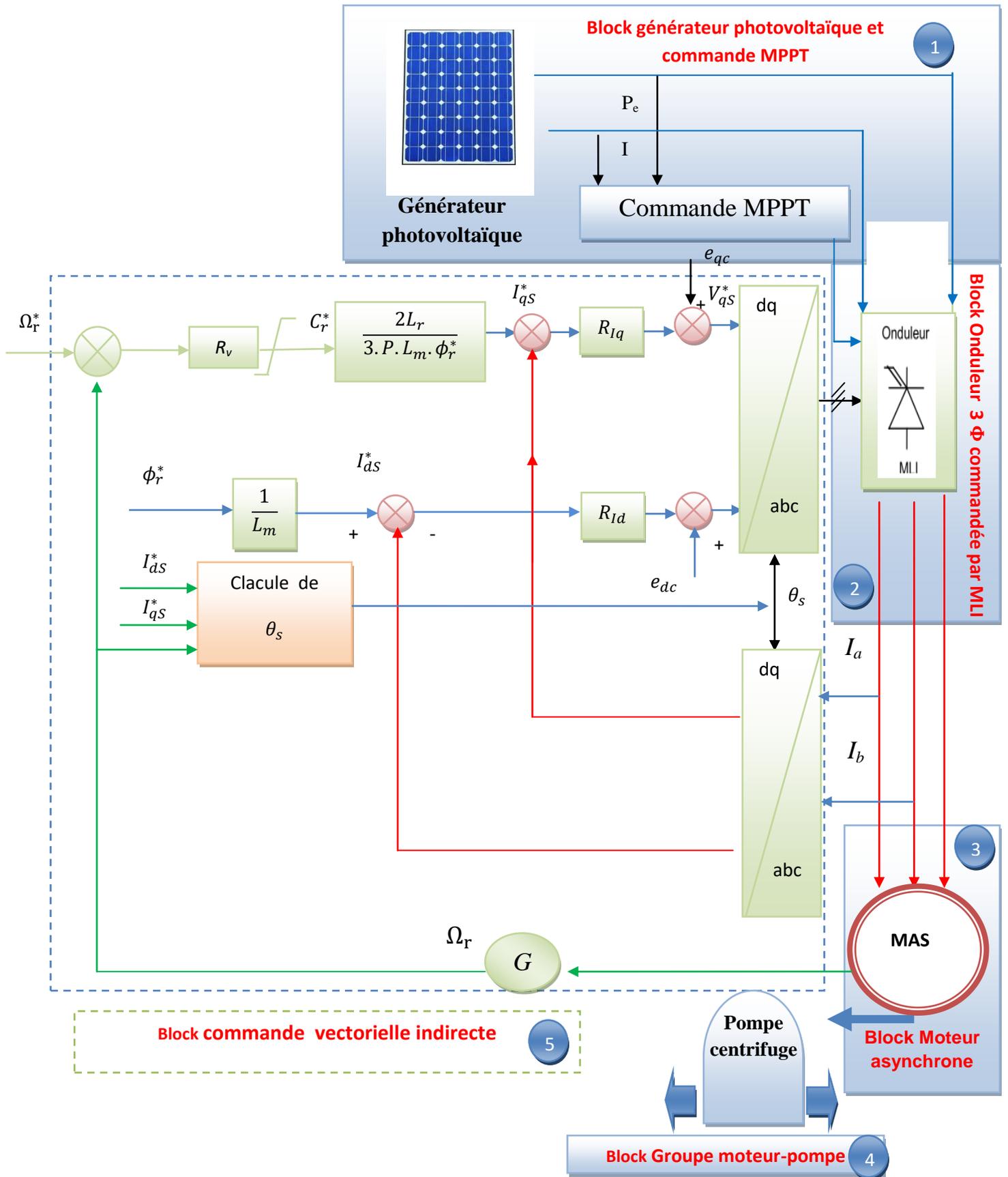


Figure 2.8: Conception de principe d'une MAS alimentée en tension de la commande vectorielle de la chaîne de pompage.

2.2 Contrôle direct du couple du système de pompage photovoltaïque :

2.2.1 Méthodes de commande directe du couple :

Les méthodes de commande directe du couple (Direct Torque Control ou « DTC ») des machines asynchrones sont apparues dans la deuxième moitié des années en 1985 par TAKAHASHI. Plusieurs travaux ont permis une modélisation rigoureuse de cette approche. Elle permet de calculer les grandeurs de contrôle qui sont le flux statorique et le couple électromagnétique à partir des mesures des courants statoriques sans utilisation de capteurs mécaniques [36].

Les méthodes de commande directe du couple consistent à commander comme concurrentielle des méthodes vectorielles qui consistent à découpler le contrôle du flux de celui du couple en utilisant une transformation judicieuse des coordonnées du champ magnétique (orientation du champ), et qui sont basées généralement sur des alimentations par modulation de largeur d'impulsion (MLI)[37].

A l'opposé de ces lois de commande, qui opèrent donc par modulation de la durée (MLI), les stratégies de commande directe du couple sont des lois de commande en amplitude. Dans un repère lié au stator, les valeurs instantanées du flux statorique et du couple électromagnétique sont estimées à partir des grandeurs statoriques. En utilisant des comparateurs à hystérésis, le flux et le couple sont contrôlés directement et indépendamment avec une sélection appropriée de la vectrice tension imposée par l'onduleur.

2.2.2 Principes Generaux De La Commande DTC :

La commande directe du couple est basée sur la détermination directe de la séquence de à appliquer à un onduleur de tension. Ce choix est généralement basé sur l'utilisation de régulateurs à hystérésis dont la fonction est de contrôler l'état du système, à savoir ici l'amplitude du flux statorique et le couple électromagnétique [38].

Les caractéristiques générales d'une commande directe de couple sont [39]:

- La commande directe de couple et de flux, à partir de la sélection des vecteurs optimaux de commutation de l'onduleur.
- La commande indirecte des intensités et tensions du stator de la machine.
- L'obtention des flux et des courants statoriques proches de formes sinusoïdales.
- Une réponse dynamique de la machine très rapide.
- L'existence des oscillations du couple qui dépend, 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.

Le schéma de principe de cette technique est indiqué sur la figure (2.9).

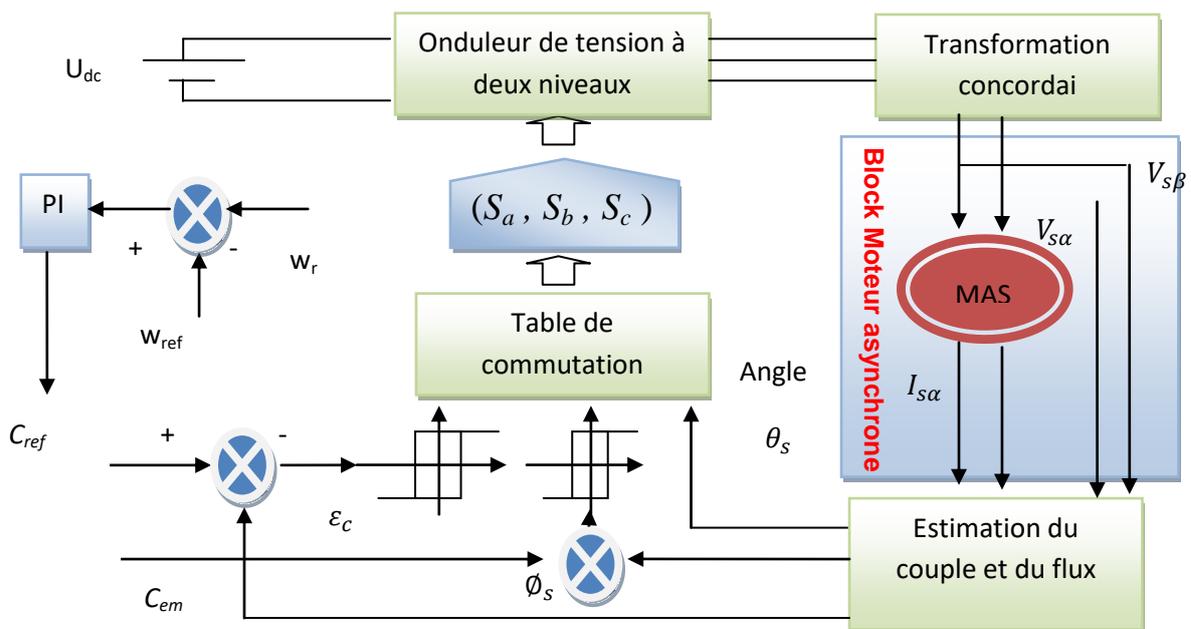


Figure 2.9 :Schéma structurel de la DTC appliquée à une machine asynchrone.

Sur cette figure (2.9), sont représentés les estimateurs de flux et de couple, ainsi que les régulateurs par hystérésis du couple et du flux. La position du vecteur flux est calculée à partir de leurs composantes dans le plan complexe $\alpha \beta$. Le régulateur de flux est à deux niveaux et celui du couple à trois niveaux initialement proposés par Takahashi.

2.2.3 Commande directe du couple de la machine asynchrone :

2.2.3.1 Modélisation de L'onduleur :

La figure 2.10 suivante représente la modélisation de l'onduleur de tension triphasé

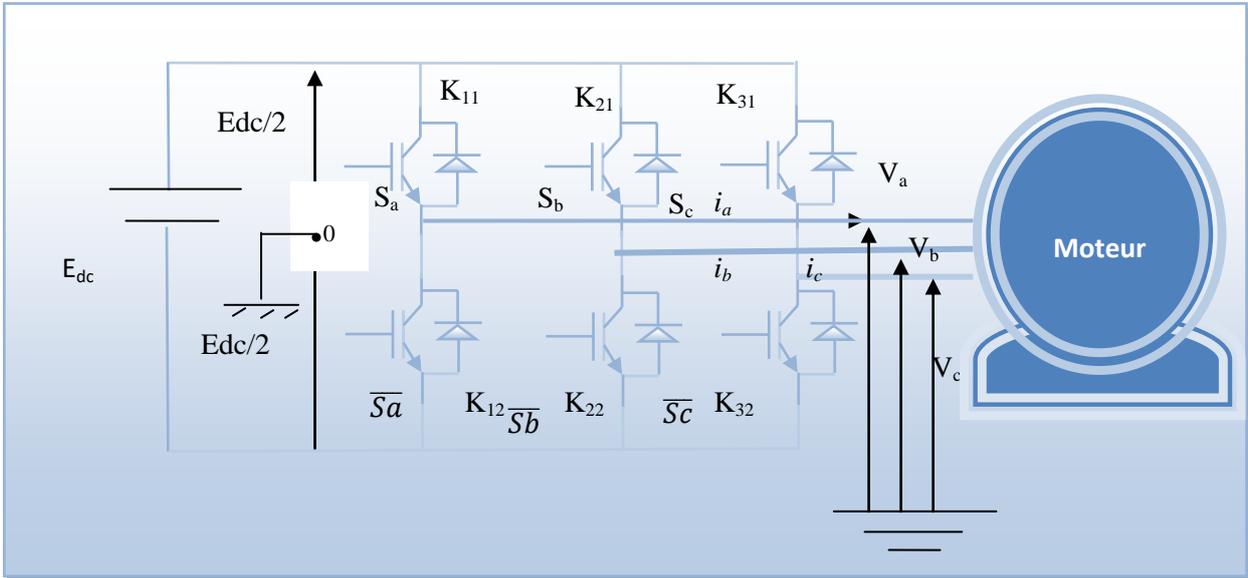


Figure 2.10 : Structure de l'onduleur de tension triphasé.

L'état des interrupteurs, supposées parfaites, peut être défini par trois grandeurs booléennes de commande (*Si avec i = a, b, c*).

- Si le transistor supérieur est en conduction, les variables $S_i = 1$;
- Si le transistor inférieur est en conduction, les variables $S_i = 0$;

Les tensions simples appliquées aux trois phases statorique sont obtenues à partir des relations suivantes en tenant compte du point fictif « o » [40]:

$$\begin{cases} V_{an} = V_{ao} + V_{on} \\ V_{bn} = V_{bo} + V_{on} \\ V_{cn} = V_{co} + V_{on} \end{cases} \quad (2.15)$$

Par addition on a:

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = V_{ao} + V_{bo} + V_{co} + 3 * V_{on} \quad (2.16)$$

Le système de la tension triphasée statorique est symétrique donc :

$$V_{ao} + V_{bo} + V_{co} + 3 * V_{on} = 0 \quad (2.17)$$

D'où, on obtient :

$$V_{on} = -\frac{V_{ao}+V_{bo}+V_{co}}{3} \quad (2.18)$$

En remplaçant l'équation (2.17) dans le système d'équation(2.15), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2 * V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(-V_{ao} + 2 * V_{bo} - V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(-V_{ao} - V_{bo} + 2 * V_{co}) \end{cases} \quad (2.19)$$

Après arrangement les équations des deux systèmes on obtient le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{ao} = E * S_a \\ V_{bo} = E * S_b \\ V_{co} = E * S_c \end{cases} \quad (2.21)$$

Finalement :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

V_{ao} , V_{bo} , V_{co} sont les tensions d'entrée de l'onduleur (valeurs continues), alors V_{an} , V_{bn} , V_{cn} sont les tensions de sortie de cet onduleur (valeurs alternatives), par conséquent l'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage continu-alternatif, [41].

$$[T] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Les composantes de la tension Es alimentant la machine ($V_{s\alpha}$, $V_{s\beta}$) peuvent être exprimées en utilisant le passage triphasé- biphasé par le biais de la matrice « Concordia » respectant le transfert de la puissance,

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \\ V_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

2.2.4 La commande de l'onduleur :

Les onduleurs de tension peuvent être pilotés suivant plusieurs stratégies. Le choix d'une stratégie de commande dépende du type de charge à commander, de la gamme de puissance, des semi-conducteurs utilisés pour l'onduleur et de la simplicité d'implantation de l'algorithme.

A faibles fréquences, ils sont pilotés à pleine onde, le signal de commande sera à la fréquence de la tension désirée à la sortie, et la source continue doit être réglable (à l'aide d'un redresseur à thyristor ou d'un hacheur). A fréquence élevée, ils sont pilotés en modulation de largeur d'impulsion. Cette dernière stratégie permet de régler à la fois [42].

2.2.4.1 Contrôle du courant par M.L.I :

La méthode de contrôle des courants par modulation de largeur d'impulsion (M.L.I) à partir d'une source de tension continue, consiste à imposer aux bornes de la machine des créneaux de tension de manière que le fondamental de la tension soit le plus proche de la référence de la tension sinusoïdale.

La M.L.I. est obtenue par la comparaison de deux signaux : Un signal triangulaire de haute fréquence (F_p) appelé "porteuse" et un signal de référence appelé "modulatrice", de fréquence ($F_m \ll F_p$). Les intersections de ces deux signaux déterminent les instants de commutation des interrupteurs de l'onduleur.

La figure (2.11), représente le schéma synoptique d'un M.L.I.

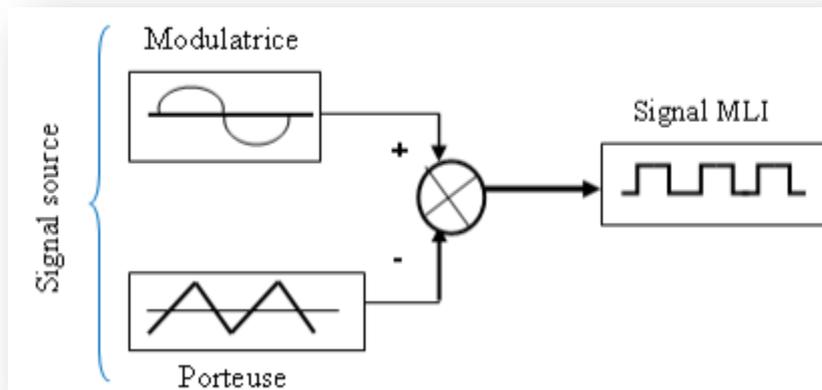


Figure 2.11 : schéma synoptique d'un M.L.I.

Ces deux signaux sont définis comme étant :

L'onde porteuse : qui est signal à haute fréquence (en général, une onde triangulaire).

L'onde modulatrice : qui est un signal image de l'onde de sortie recherchée. (En général une onde sinusoïdale).

Deux principaux paramètres qui caractérisent la MLI :

L'indice de modulation M_L : appelé aussi (taux d'harmonique) qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulatrice (ou référence) à celle de l'onde porteuse :

$$M_L = \frac{V_{ref}}{V_p} \quad (2.25)$$

Le rapport de modulation M_r : qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulatrice (ou la fréquence F_{ref} de la référence):

$$M_r = \frac{F_p}{F_{ref}} \quad (2.26)$$

2.2.4.2 MLI à échantillonnage naturel :

L'échantillonnage naturel, est un processus de sélection naturelle des points échantillonnés, c'est la technique la plus utilisée et la plus simple, consiste à comparer le signal triangulaire (porteuse) avec un signal sinusoïdal (Modulateur). L'intersection de ces deux signaux définit les instants de commutation des interrupteurs.

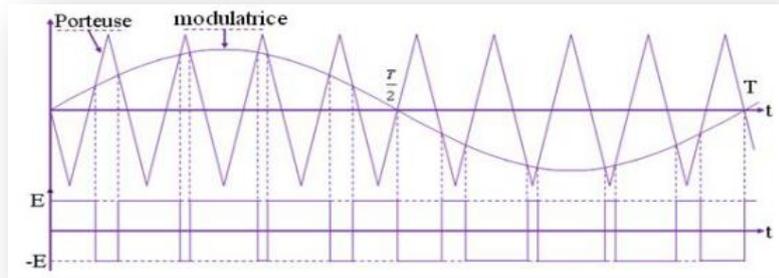


Figure 2.12 :MLI à échantillonnage naturel.

La porteuse est un signal triangulaire caractérisé par sa fréquence (F_p) et sa valeur de crête V_p .
On définit l'équation de la porteuse dans sa période $[0 T_p]$ par[43]

$$\begin{cases} X_1 = V_p \left(-1 + 4 \frac{t}{T_p} \right) & t \in \left[0 \frac{T_p}{2} \right] \\ X_2 = V_p \left(-3 + 4 \frac{t}{T_p} \right) & t \in \left[\frac{T_p}{2} T_p \right] \end{cases} \quad (2.27)$$

La référence est un signal sinusoïdal d'amplitude V_{ref} et de fréquence F_{ref} . En triphasé, les trois tensions sinusoïdales de références sont données par :

$$\begin{cases} V_a = V_r \sin(2\pi f_r t) \\ V_b = V_r \sin(2\pi f_r t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_c = V_r \sin(2\pi f_r t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (2.28)$$

La commande MLI sinus-triangle utilise la comparaison avec la porteuse des trois composants de la tension de référence afin de calculer les états (S_a, S_b, S_c) des interrupteurs de l'onduleur, données par l'équation suivante :

$$S_{abc} = \begin{cases} 1 & \text{si } V_{rabc} - x(t) \geq 0 \\ 0 & \text{si } V_{rabc} - x(t) \leq 0 \end{cases} \quad (2.29)$$

2.3 Modélisation vectorielle de la machine et de l'onduleur de tension :

Pour modéliser l'onduleur de tension figure (2.13), on considère son alimentation comme une source parfaite, constituée de deux générateurs de f. e .m égale à $E_0/2$ connectés à un point noté n_0 [44].

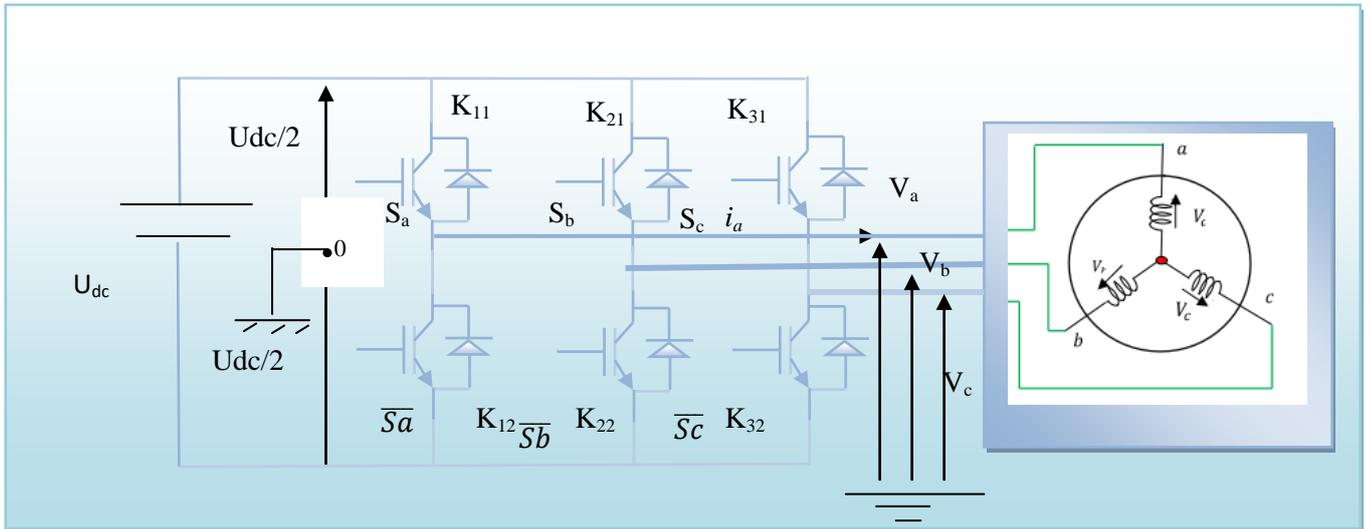


Figure 2.13 : Représentation d'un onduleur de tension à deux niveaux.

La machine a été modélisée à partir des tensions simples notées V_{an} , V_{bn} , V_{cn} . L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques S_j .

Les conditions de contrôle dynamique du couple de la machine asynchrone peuvent être mises en évidence, par le modèle vectoriel de la machine. Pour cela, on prendra les expressions vectorielles de la machine.

Par la suite, on se placera dans le référentiel statorique (S), que l'on définira par un système d'axes lié au stator (α , β). De plus, de manière à simplifier l'écriture des grandeurs exprimées dans le référentiel (S), on choisira la notation suivant : $X_{y(S)} = X_y$.

Ainsi, les tensions de la machine, côté stator et rotor, peuvent s'écrire :

Côté stator :

$$\bar{V}_S = R_S \cdot \bar{I}_S + \frac{d\bar{\phi}_S}{dt} \tag{2.30}$$

Côté rotor :

$$0 = R_r \cdot \bar{I}_r + \frac{d\bar{\phi}_r}{dt} - j\omega_r \bar{\phi}_r \tag{2.31}$$

Le vecteur de tension V_s est délivré par un onduleur de tension triphasé, dont l'état des interrupteurs, supposés parfait, est représenté en théorie par trois grandeurs booléennes de commande $S_j = (j = a, b, c)$ telles que :

- $S_j = 1$: interrupteur haut fermé et interrupteur bas ouvert.
- $S_j = 0$: interrupteur haut ouvert et interrupteur bas fermé.

On définit le vecteur \vec{V}_S comme la combinaison des 3 tensions simples :

$$\vec{V}_S = V_{s\alpha} + jV_{s\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_{DC} \left(S_a + S_b e^{\frac{j2\pi}{3}} + S_c e^{\frac{j4\pi}{3}} \right) \quad (2.32)$$

Les différentes combinaisons des trois grandeurs (S_a, S_b, S_c) permettent de générer huit (2³) positions du vecteur V_s dont deux correspondent aux vecteurs nuls $(S_a, S_b, S_c) = (111)$ ou (000) , où les trois interrupteurs du haut (ou du bas) du convertisseur sont actifs en même temps.

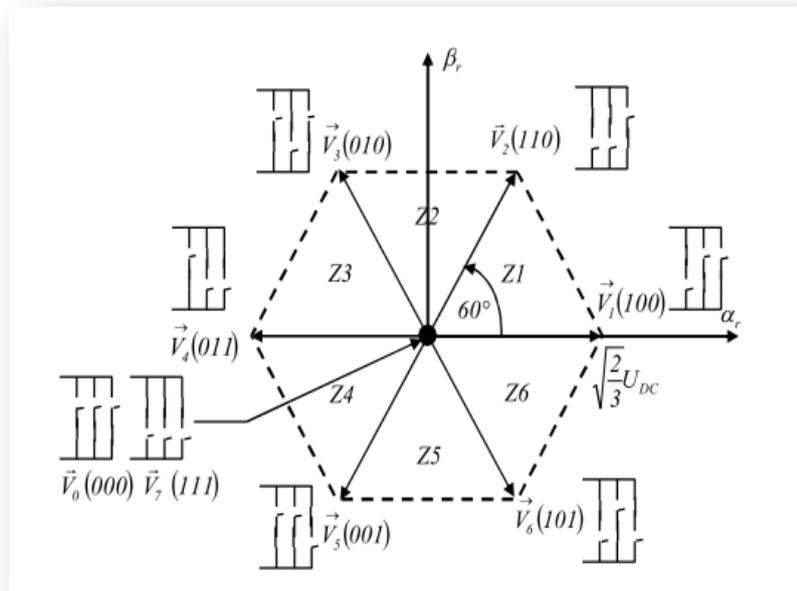


Figure 2.14 : Elaboration du vecteur de tension à partir des états de commutation de l'onduleur.

Les huit vecteurs de tension sont représentés dans le plan $(\alpha_s - \beta_s)$ par la figure(2.14) où V_0 et V_7 sont identiquement nuls. Les six autres ont le même module égale à $\sqrt{\frac{2}{3}} U_{DC}$. Les extrémités de ces six vecteurs définissant les sommets d'un hexagone régulier puisque deux vecteurs successifs font entre eux un angle de $\frac{\pi}{3}$ appelée secteur ou zone.

D'après la figure (2.14), les six vecteurs tensions non nuls peuvent être donnés par :

$$V_i = \sqrt{\frac{2}{3}} U_0 e^{j(i-1)\frac{\pi}{3}} \quad \text{et } i = 1 \dots 6 \quad (2.32)$$

2.4 Règle De Comportement Des Grandeurs A Contrôler :

2.4.1 .Contrôle du vecteur flux statorique :

A partir de l'expression de la tension statorique, on obtient le flux statorique :

$$\phi_s(t) = \int_0^t (V_s - R_s I_s) dt \quad (2.33)$$

La chute de tension due à la résistance du stator (R_s, I_s) peut être négligée par rapport à la tension V_s (ce qui se vérifie lorsque la vitesse de rotation est suffisamment élevée), on trouve alors :

$$\overline{\phi_s} = \overline{\phi_{s0}} \int_0^t \overline{V_s} dt \quad (2.34)$$

Où ϕ_{s0} est le vecteur flux à l'instant $t=0$.

$$\overline{\phi_s} = \phi_{s0} \overline{V_s} T_e \quad (2.35)$$

Pendant un intervalle périodique de contrôle $[0, T_e]$, correspondant à une période d'échantillonnage T_e les commandes (S_a, S_b, S_c) sont fixes, donc le vecteur de tension appliqué reste constant. Ainsi on peut écrire :

$$\overline{\phi_s}(k+1) \approx \overline{\phi_s}(k) + \overline{V_s} T_e \quad (2.36)$$

Ou encore : $\Delta \overline{\phi_s} = \overline{V_s} T_e$

Avec :

$\overline{\phi_s}(k)$:est le vecteur du flux statorique, ou pas d'échantillonnage actuel.

$\overline{\phi_s}(k+1)$:est le vecteur du flux statorique, ou pas d'échantillonnage suivant.

$\Delta \overline{\phi_s}$:est la variation du vecteur flux statorique $(\overline{\phi_s}(k+1) - \overline{\phi_s}(k))$

L'équation au-dessus implique que pour une période d'échantillonnage constante T_e l'extrémité du vecteur $\overline{\phi}_s$ se déplace sur une droite dont la direction est donnée par le vecteur de la tension appliquée \overline{V}_s .

La figure 2.15 décrit ce principe, lorsque l'on sélectionne par exemple une tension $\overline{V}_s = \overline{V}_3$

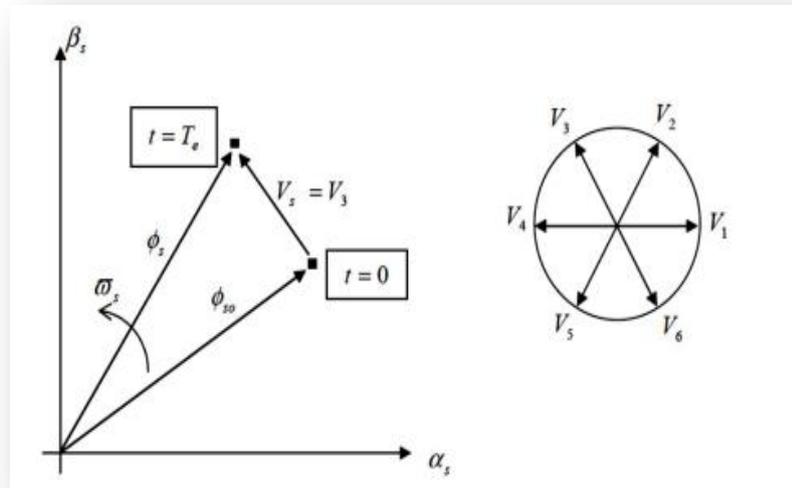


Figure 2.15 :Exemple d'évolution du vecteur flux statorique dans le plan($\alpha_s - \beta_s$).

En choisissant une séquence correcte de vecteur \overline{V}_s . sur des intervalles de temps successifs de durée T_e , on peut donc faire suivre à l'extrémité du vecteur $\overline{\phi}_s$ la trajectoire désirée. Il est possible de fonctionner avec un module du flux $\overline{\phi}_s$ pratiquement constant. Pour cela, il suffit de faire suivre à l'extrémité de $\overline{\phi}_s$ une trajectoire pseudo circulaire (figure 3), si la période T_e , est très faible devant la période de rotation du flux statorique. Lorsque le vecteur de tension \overline{V}_s est non nul, la direction du déplacement de l'extrémité du flux $\overline{\phi}_s$ est donnée par sa dérivée $\frac{d\overline{\phi}_s}{dt}$ correspondant à la force électromotrice E_s .

De manière à obtenir de très bonnes performances dynamiques, le choix d'un correcteur à hystérésis à deux niveaux semble être la solution la plus simple et la mieux adaptée à la commande étudiée. En effet, avec ce type de contrôleur, on peut facilement contrôler et maintenir l'extrémité du vecteur flux statorique $\overline{\phi}_s$ dans une couronne circulaire, comme le montre la figure 2.15.

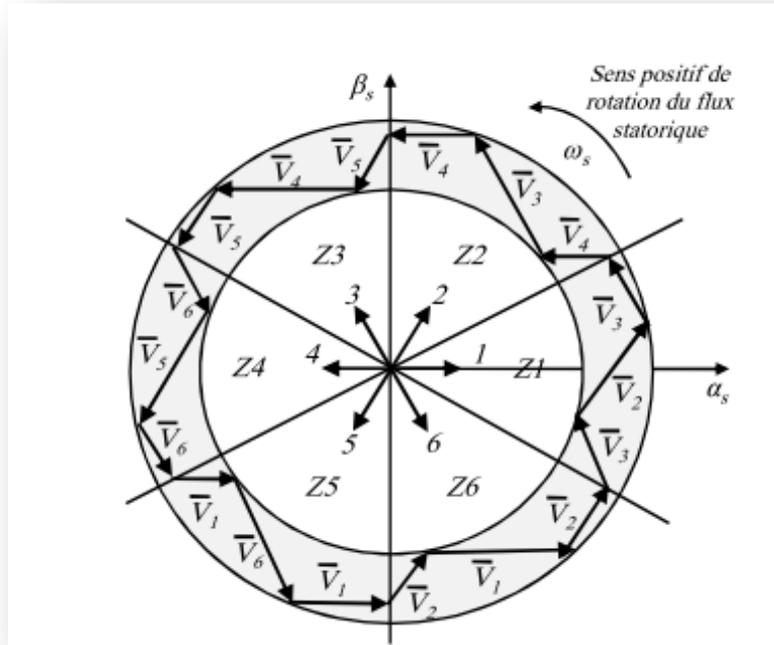


Figure 2.16 : Trajectoire du flux statorique dans le repère $(\alpha_s - \beta_s)$.

La sortie de ce comparateur (C_{flux}) est une variable booléenne prenant la valeur (1) lorsque l'erreur du flux est positive et (0) lorsqu'elle est négative. La largeur de la bande d'hystérésis est choisie suivant l'intervalle de commande des interrupteurs, lui-même choisi en fonction de la fréquence de commutation des interrupteurs ainsi que du temps de calcul dans les applications pratiques.

Connaissant la valeur du module du flux statorique estimé $\hat{\phi}_s$ on va calculer l'écart qui existe entre le flux de la machine et sa valeur de référence :

$$\varepsilon\phi_s = \phi_s^* - \hat{\phi}_s \tag{2.37}$$

Avec : ϕ_s^* et $\hat{\phi}_s$ sont respectivement : le flux statorique de consigne et estimé.

On place le contrôleur à hystérésis à deux niveaux de largeur $2\Delta\phi_s$ (figure 2.17).

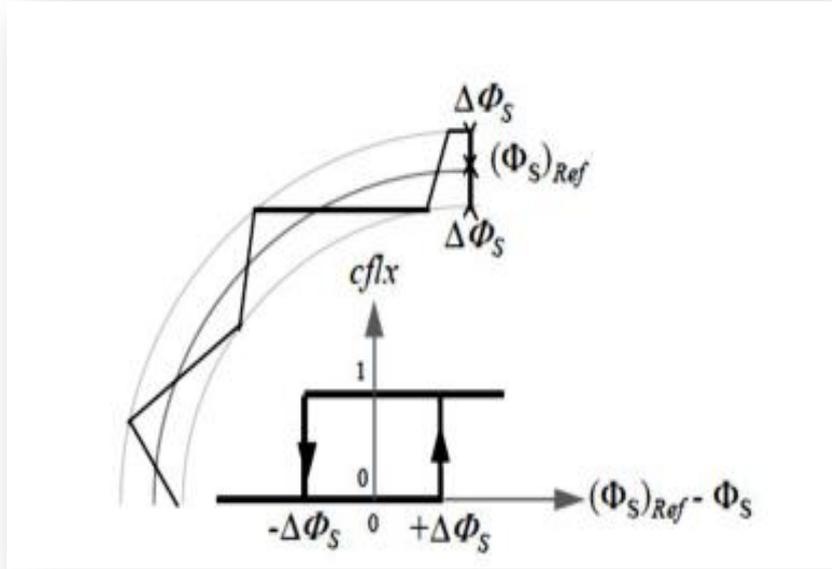


Figure 2.17 : Comparateur à hystérésis utilisé pour contrôler le flux statorique.

Ainsi, le comparateur à hystérésis à deux niveaux, appliqué sur le flux, permet de détecter les dépassements de la zone de contrôle et de respecter :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{si } \varepsilon\phi_s > \Delta\phi_s & \Rightarrow c_{flx} = 1 \\ \text{si } 0 \leq \varepsilon\phi_s \leq \Delta\psi_r \text{ et } \frac{d\bar{\phi}_s}{dt} > 0 & \Rightarrow c_{flx} = 0 \\ \text{si } -\Delta\phi_s \leq \varepsilon\phi_s \leq 0 \text{ et } \frac{d\bar{\phi}_s}{dt} < 0 & \Rightarrow c_{flx} = 1 \\ \text{si } \varepsilon\phi_s \leq -\Delta\phi_s & \Rightarrow c_{flx} = 0 \end{array} \right. \quad (2.38)$$

En effet, si on introduit l'écart $\varepsilon\phi_s$ entre le flux de référence et le flux estimé dans un comparateur à hystérésis à deux niveaux (voir figure 4), celui-ci génère à sa sortie la valeur ($c_{flx} = 1$) pour augmenter le flux et ($c_{flx} = 0$) pour le réduire.

2.4.2 Contrôle du couple électromagnétique :

La transformation de Park est faite avec conservation de puissance, l'expression du couple électromagnétique durant l'intervalle de commande peut être écrite sous la forme:

$$C_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} |\bar{\phi}_s| |\bar{\phi}_r| \sin(\gamma) \quad (2.39)$$

Où $\gamma = \theta_s - \theta_r$ est l'angle entre les vecteurs flux statorique et rotorique.

En utilisant la notation complexe du flux statorique et du flux rotorique on obtient :

$$\bar{\phi}_s = [\phi_s, \theta_s] = \phi_s e^{j\theta_s} \quad (2.40)$$

et

$$\bar{\phi}_r = [\phi_r, \theta_r] = \phi_r e^{j\theta_r} \quad (2.41)$$

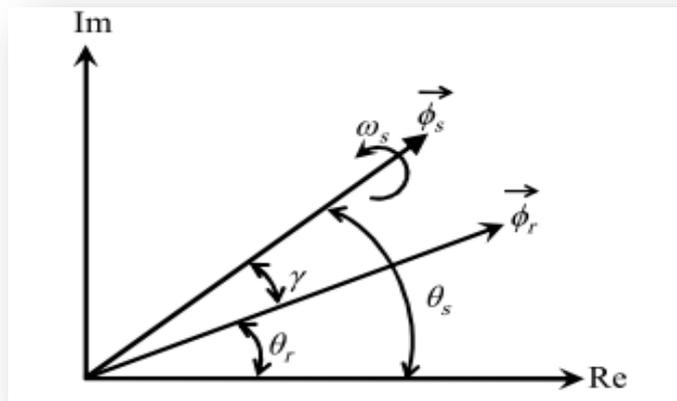


Figure 2.18 : Représentation complexe des vecteurs flux statorique et rotorique .

L'interaction entre le flux statorique et rotorique produit un couple électromagnétique proportionnel à l'angle γ entre les deux vecteurs où il sera maximal lorsque les deux vecteurs seront parfaitement en quadrature.

Car la constante du temps du rotor (l'ordre de 100ms) est plus grande que celle du stator, le flux rotorique change lentement par rapport au flux du stator; en effet, le flux rotorique peut être supposé constant. Le fait que le flux rotorique peut être supposé constant est vrai tant que le temps de réponse de la commande est beaucoup plus rapide que la constante du temps du rotor. Tant que le module du flux statorique est maintenu constant, le couple électromagnétique peut être rapidement changé et contrôlé au moyen de la modification de l'angle γ .

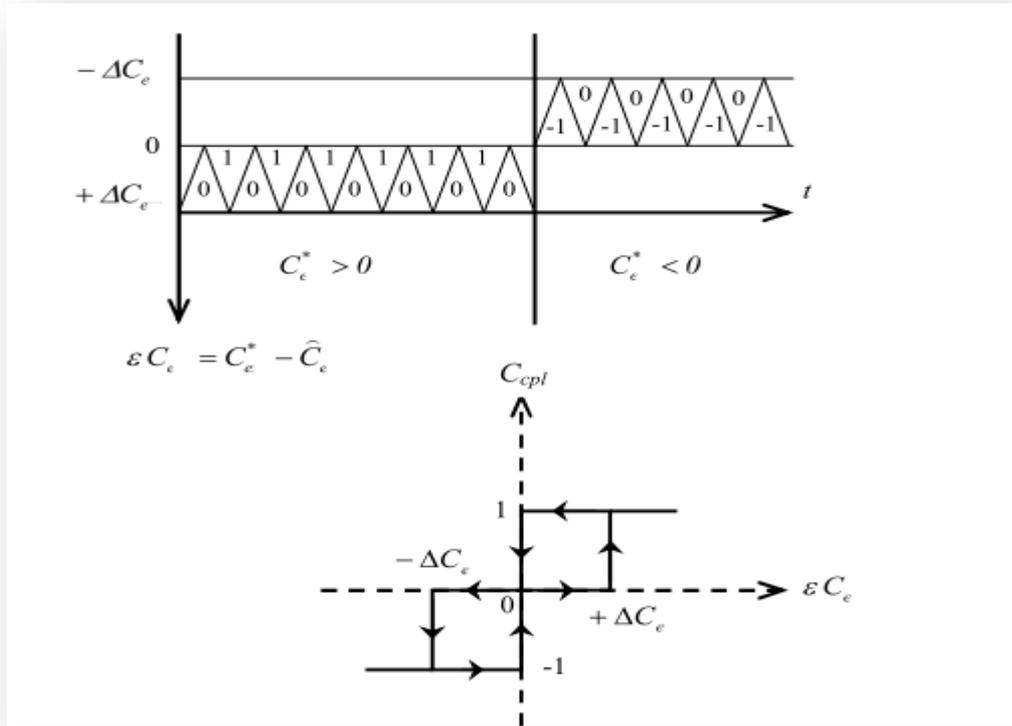


Figure 2.19 : Contrôle du couple à l'aide d'un comparateur à hystérésis à trois.

Pour la correction du couple en utilisant un comparateur à hystérésis à trois niveaux, donné par la figure 6, utilisé pour contrôler la machine dans les deux sens de rotation. C_{cpl} : représente l'état de sortie du comparateur, εc_e : l'écart entre le couple de référence et le couple estimé et Δc_e : la limite de la bande hystérésis.

Ce comparateur est modélisé par l'algorithme de l'équation suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } \varepsilon c_e > \Delta c_e \quad \Rightarrow c_{cpl} = 1 \\ \text{si } 0 \leq \varepsilon c_e \leq \Delta c_e \text{ et } \frac{d\varepsilon c_e}{dt} > 0 \Rightarrow c_{cpl} = 0 \\ \text{si } 0 \leq \varepsilon c_e \leq \Delta c_e \text{ et } \frac{d\varepsilon c_e}{dt} < 0 \Rightarrow c_{cpl} = 1 \\ \text{si } \varepsilon c_e \leq -\Delta c_e \quad \Rightarrow c_{cpl} = -1 \\ \text{si } -\Delta c_e \leq \varepsilon c_e \leq 0 \text{ et } \frac{d\varepsilon c_e}{dt} > 0 \Rightarrow c_{cpl} = 0 \\ \text{si } -\Delta c_e \leq \varepsilon c_e \leq \Delta c_e \text{ et } \frac{d\varepsilon c_e}{dt} < 0 \Rightarrow c_{cpl} = -1 \end{array} \right. \quad (2.42)$$

L'écart εc_e , entre le couple de référence c_e^* et le couple estimé \hat{c}_e est introduit dans le comparateur à hystérésis à trois niveaux, ce dernier va générer à sa sortie la valeur ($c_{cpl} = 1$) pour augmenter le couple, ($c_{cpl} = -1$) pour le réduire et $c_{cpl} = 0$ pour le maintenir constant à l'intérieur d'une bande ($2\Delta c_e$) autour de sa référence.

2.5 Estimation du flux statorique et du couple électromagnétique :

Le défi de la commande directe du couple et de flux consiste à obtenir une estimation fiable la valeur instantanée du couple, du flux ainsi que de l'angle du flux statorique. Les performances du système de contrôle dépendent de la précision dans l'estimation de ces grandeurs.

a) Estimation du flux statorique :

L'amplitude du flux statorique est estimée à partir de ses composantes biphasées

$\phi_{s\alpha}$ et $\phi_{s\beta}$ Soit :

$$\bar{\phi}_s = \bar{\phi}_{s\alpha} + j\bar{\phi}_{s\beta} \quad (2.43)$$

Dans le plan (α - β), les composantes du flux statorique sont déterminées par :

$$\phi_{s\alpha}(t) = \int_0^t (V_{s\alpha} - R_s I_{s\alpha}) dt \quad (2.44)$$

$$\phi_{s\beta}(t) = \int_0^t (V_{s\beta} - R_s I_{s\beta}) dt. \quad (2.45)$$

$$\text{Et } \phi_s = \sqrt{\phi_{s\alpha}^2 + \phi_{s\beta}^2} \quad (2.46)$$

Où $\phi_{s\alpha}$ et $\phi_{s\beta}$ sont estimées en utilisant l'équation au-dessus qui nécessite la connaissance des composantes des vecteurs courants et tensions statoriques : $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$, $V_{s\alpha}$ et $V_{s\beta}$. Les composantes du vecteur courant statorique sont obtenues par l'application de la transformation de Concordia aux composantes triphasées mesurés i_{sa} , i_{sb} et i_{sc}

$$I_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} i_{sa} \quad (2.47)$$

$$I_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} (i_{sb} - i_{sa}) \quad (2.48)$$

Les composantes du vecteur de tension rotorique sont obtenues à partir des états des interrupteurs.

$$V_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_{DC} \left(s_a - \frac{1}{2} (s_b + s_c) \right) \quad (2.49)$$

$$V_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_{DC} (s_b - s_c) \quad (2.50)$$

b) Estimation du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique peut être estimé à partir de l'estimation du flux et de la mesure du courant en utilisant l'expression du couple en fonction du flux et du courant statorique donnée par l'équation[50] :

$$c_{em} = p(\Phi_{s\alpha} I_{sb} - \Phi_{s\beta} I_{sa}) \quad (2.51)$$

2.6 Table de vérité et structure du DTC

2.6.1 Elaboration de la table de vérité

On élabore la table de vérité de la structure de contrôle, en fonction des sorties des contrôleurs c_{flx} et c_{cpl} et des zones Z de position de $\bar{\vartheta}_s$ tel que :

$$\gamma = \arctan \left(\frac{\Phi_{s\beta}}{\Phi_{s\alpha}} \right) \quad (2.52)$$

L'espace d'évolution de $\bar{\vartheta}_s$ dans le référentiel considéré se décompose en six zones $Z(i)$ ($i=1, \dots, 6$), et tel que : $-\frac{\pi}{6} + (i-1)\frac{\pi}{3} \leq Z(i) < \frac{\pi}{6} + (i-1)\frac{\pi}{3}$

On retrouve bien avec la table de vérité (tableau 1), la formulation de sélection des vecteurs tensions $\bar{V}_{i+1}, \bar{V}_{i-1}, \bar{V}_{i+2}$ et \bar{V}_{i-2} correspondant à une zone ($Z=i$) et ceci pour un comparateur à hystérésis à deux ou à trois niveaux.

Table.2.1 : Table de commutation de la DTC étendu [37].

		Comparateur	3 niveaux			3 niveaux		
			2 niveaux			2 niveaux		
Flux		C_{flx}	1			-1		
Couple		C_{cpl}	1	0	-1	1	0	-1
Secteur $Z(i)$ vis-à-vis de l'angle γ	1	(330°, 30°)	V_2	V_0	V_6	V_3	V_7	V_5
	2	(30°, 90°)	V_3	V_7	V_1	V_4	V_0	V_6
	3	(90°, 150°)	V_4	V_0	V_2	V_5	V_7	V_1
	4	(150°, 210°)	V_5	V_7	V_3	V_6	V_2	V_2
	5	(210°, 270°)	V_6	V_0	V_4	V_1	V_7	V_3
	6	(270°, 330°)	V_1	V_7	V_5	V_2	V_2	V_4
$V_0 = [0,0,0]$; $V_1 = [1,0,0]$; $V_2 = [1,1,0]$; $V_3 = [0,1,0]$; $V_4 = [0,1,1]$; $V_5 = [0,0,1]$; $V_6 = [1,0,1]$; $V_7 = [1,1,1]$								

la table (2.1) de sélection des vecteurs optimaux est plus évoluée par rapport à la DTC classique et considère une entrée additionnelle : le signe de l'évolution du couple électromagnétique. Une autre différence concerne les niveaux des régulateurs d'hystérésis. Dans la méthode DTC étendu le régulateur du couple a une sortie à trois niveaux, à la différence de la commande DTC classique où uniquement deux niveaux étaient considérés. En sélectionnant l'un des deux vecteurs nuls \bar{V}_0 ou \bar{V}_7 la rotation du flux $\overline{\phi}_s$ est arrêtée et entraîne une décroissance de la couple C_e . On choisit alternativement \bar{V}_0 ou \bar{V}_7 de manière à minimiser le nombre de commutation sur l'onduleur.

2.7 Conception de la chaine de pompage photovoltaïque avec DTC:

La figure (3.20) représente les éléments constitutions de la chaine de pompage photovoltaïque avec la commande direct DCT. La structure est nettement simplifiée comparativement à la commande vectorielle puisqu'une seule transformation de référentiel est nécessaire, les boucles de régulation proportionnelle et intégrale ont été remplacées par des régulateurs à hystérésis et aucun découplage par compensation n'est nécessaire. Le modèle de conception de la chaine de pompage photovoltaïque avec commande DTC contient des cinq blocks suivant :

- **Block 1** : Block générateur photovoltaïque et commande MPPT.
- **Block 2** : Block onduleur (3 Φ).
- **Block 3** : Block moteur asynchrone.
- **Block 4** : Block groupe moteur-pompe type pompe centrifuge.
- **Block 5** : Block commande DTC avec deux types d'estimateurs.

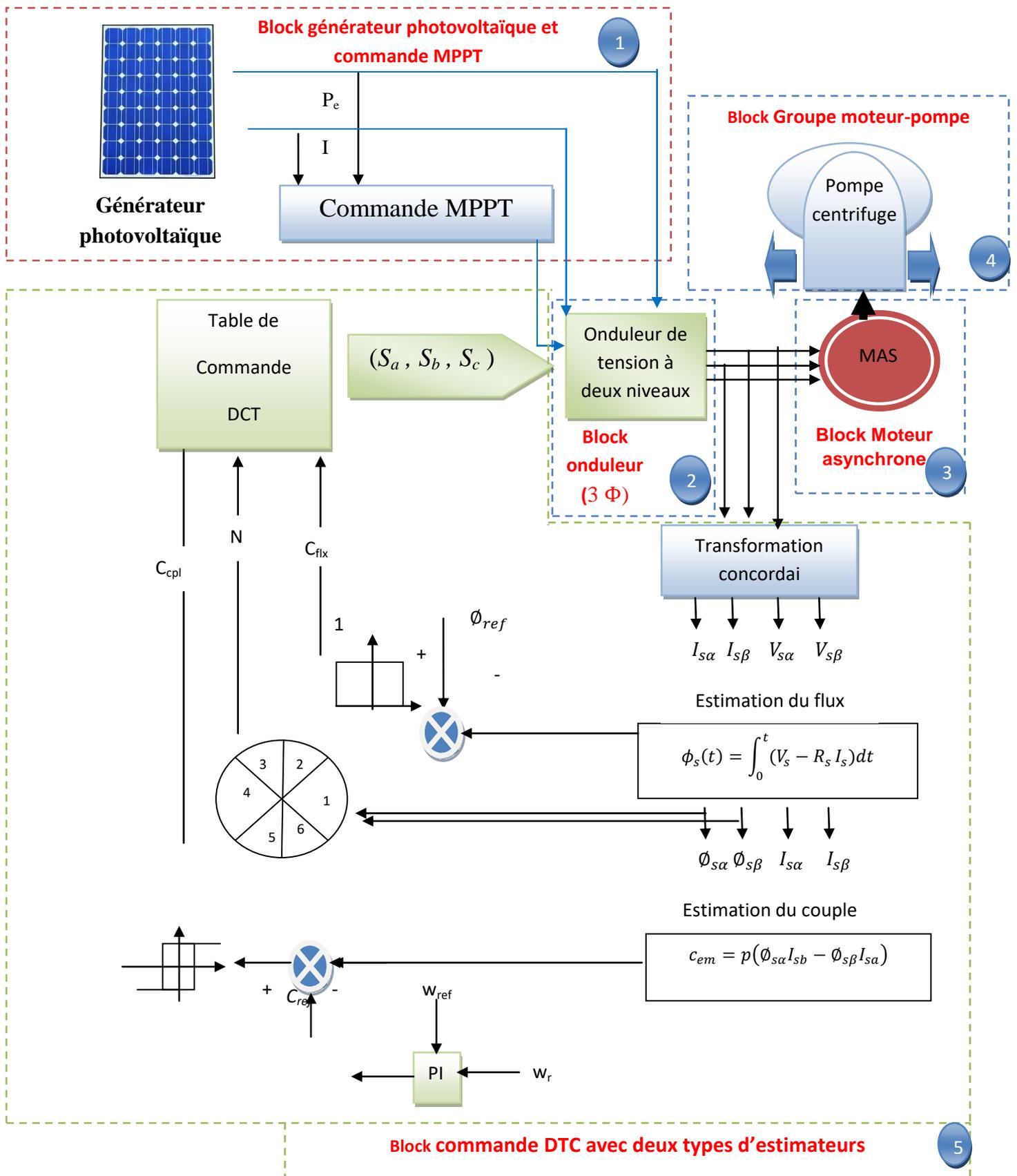


Figure 2.20 : Structure générale du contrôle direct de couple (DTC)[36].

2.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons traité la modulation le système proposée, puis la détermination du dimensionnement de l'installation de pompage. Ensuite nous avons présenté la commande vectorielle à flux rotorique orienté et on a constaté qu'elle donne de meilleures performances pour un système invariant. Cependant, dans le cas des variations paramétriques du système, les performances dynamiques et statiques de cette technique de commande sont dégradées.

Ce handicap de la commande vectorielle a donc conduit à trouver d'autre solution plus robuste pour commander le couple de la motopompe basée sur la machine asynchrone. Cette technique , nous avons présenté le principe du contrôle direct du couple (DTC) , ce type de control obtenu est très performant et ne nécessite aucun capteur mécanique pour connaître la position du rotor ou la vitesse de la machine, On peut conclure que la DTC présente de bonnes performances dynamiques et statiques de couple et de flux, l'étude de principe de la structure de la commande DTC a été élaborée à partir des conditions de fonctionnement idéales .Ce modèle qu'on a étudié est une étape essentielle, elle va nous permettre d'étudier la simulation de la commande vectorielle de ce système du pompage photovoltaïque dans le chapitre trois.

Chapitre 3 :

*Simulation d'une Chaîne de Système Pompage
Photovoltaïque*

3. Introduction :

La demande croissante d'eau dans les zones rurales et sites isolés a fait qu'un intérêt grandissant est porté sur l'utilisation des générateurs photovoltaïques comme source d'énergie aux groupes moteur-pompes. En effet la réalisation de systèmes de pompage autonomes, fiables et à bon rendement constitue une solution pratique et économique au problème du manque d'eau dans les régions désertiques.

Ce chapitre concerne la simulation le système pompage photovoltaïque par la commande DTC de la machine asynchrone (MAS) basée sur l'orientation du flux statoriques. La simulation de ce système a été faite à base de l'environnement du logiciel MATLAB .

3.1 Modélisation d'un système de pompage photovoltaïque :

3.1.1 Description du système à étudier :

Le système photovoltaïque est contrôlé par la commande MPPT, il est présenté à la figure (3.1).

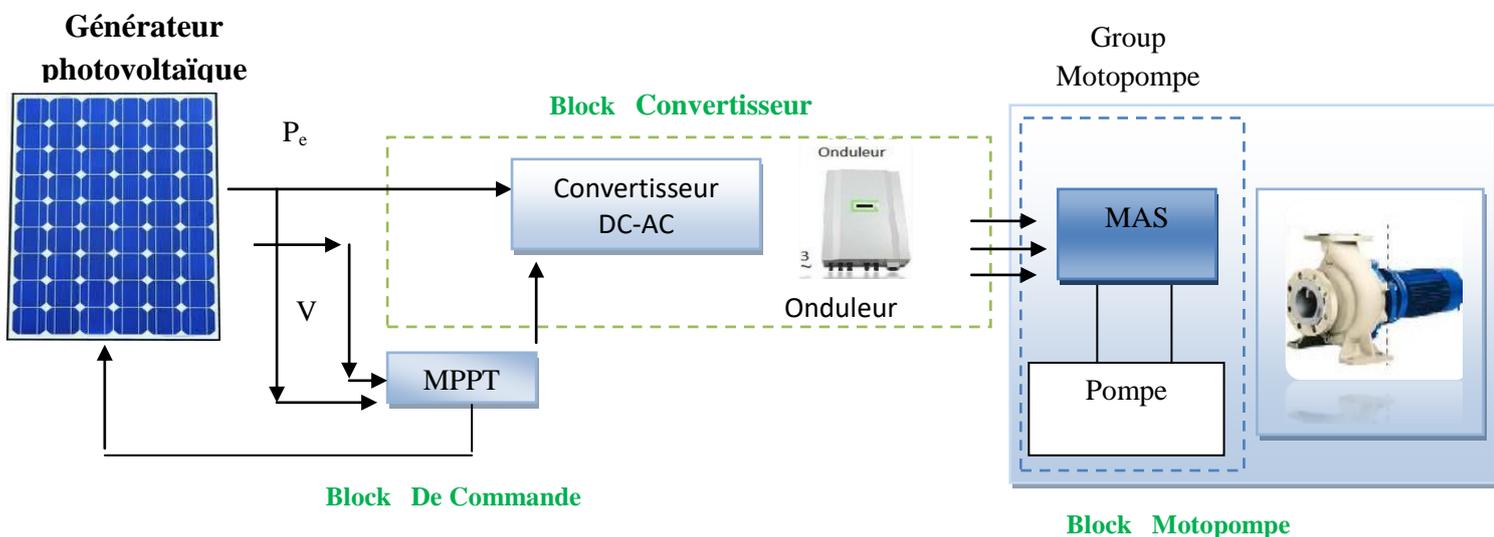


Figure 3.1: Système d'une chaîne de système pompage photovoltaïque.

Le système de pompage photovoltaïque avec MAS qui est chargée par un générateur photovoltaïque. Ses éléments de base sont :

- **Générateur photovoltaïques**: permettent l'alimentation du group motopompe.
- La commande MPPT : permet d'extraire la puissance maximale produite par le champ de modules PV.
- **Convertisseur DC-AC** : Il ya plusieurs type d'onduleur qui peut installer avec un réseau, sont caractérisés par leur technologie et par la forme d'onde qu'ils génèrent : Onduleur à onde sinusoïdale, Onduleur à onde carrée, Onduleur à onde pseudo-sinusoïdaleect . On va choisir dans ce travail l'onduleur à triphasé.
- Groupe motopompe : convertit l'énergie électrique en énergie hydraulique.

3.1.2 Modélisation d'un système photovoltaïque :

3.1.2.1 Modèle idéale d'une cellule photovoltaïque sous Matlab :

Pour résoudre cette équation on utilise le block 'Algébriques Constraint' qui est intégré dans la bibliothèque 'Simulink/Math Opération'

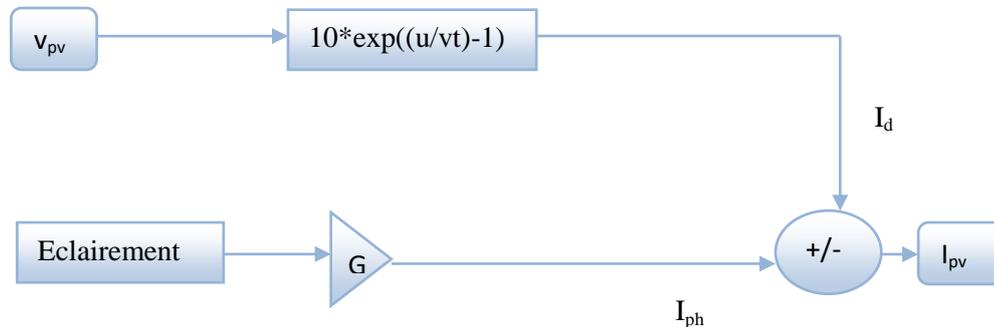


Figure 3.2 : Schéma de simulation d'une cellule photovoltaïque idéale.

La bibliothèque SimPowerSystems du logiciel de simulation MATLAB sera utilisée pour réaliser l'analyse comportementale de circuits électriques correspondant aux modèles mathématiques des différentes parties de la centrale.

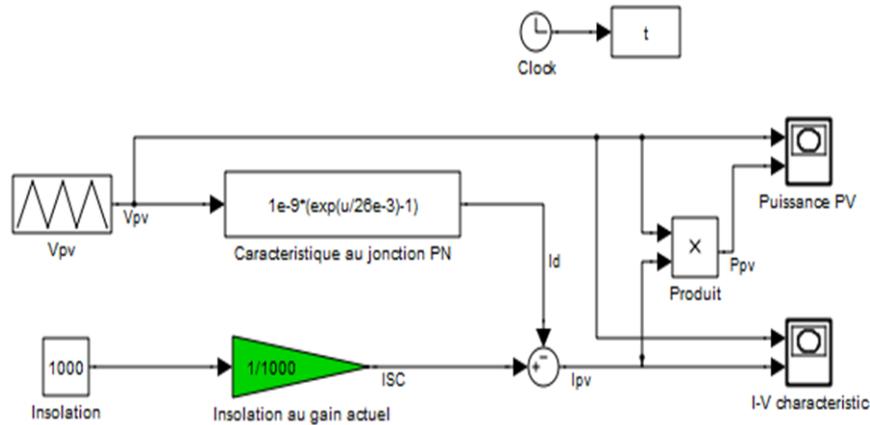


Figure 3.3 : Modèle de simulation d'une cellule photovoltaïque photovoltaïque idéale.

a.1 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque :

Les paramètres de simulation sont donnés dans le tableau (3-1):En prend par exemple une cellule de module KC-60 ce module possède les caractéristique suivantes à 1000 (w/m2) et 25 °C.

Tableau 3.1. Valeurs des paramètres de simulation
Caractéristique de la cellule de module KC-60.

Les paramètres de module	Puissance optimale	Courant de court circuit Ir (A)	Tension à circuit ouvert Voc (V)	Commande optimale	Tension optimale OU maximale Vr à PPM (V)	Le nombre des cellules en série Ns
La valeur de chaque paramètre	60 w	3.73A	20V	3.55A	16.9V	1

Les figures (3.4 et 3.5) suivantes représentent les caractéristiques d'une cellule PV pour un rayonnement constant de 1000 w/m² et une température de 25°C

a.2 Les résultats de simulation et interprétation.

- La caractéristique ($Ppv = f(Vpv)$) est donnée par la figure (3.4) .

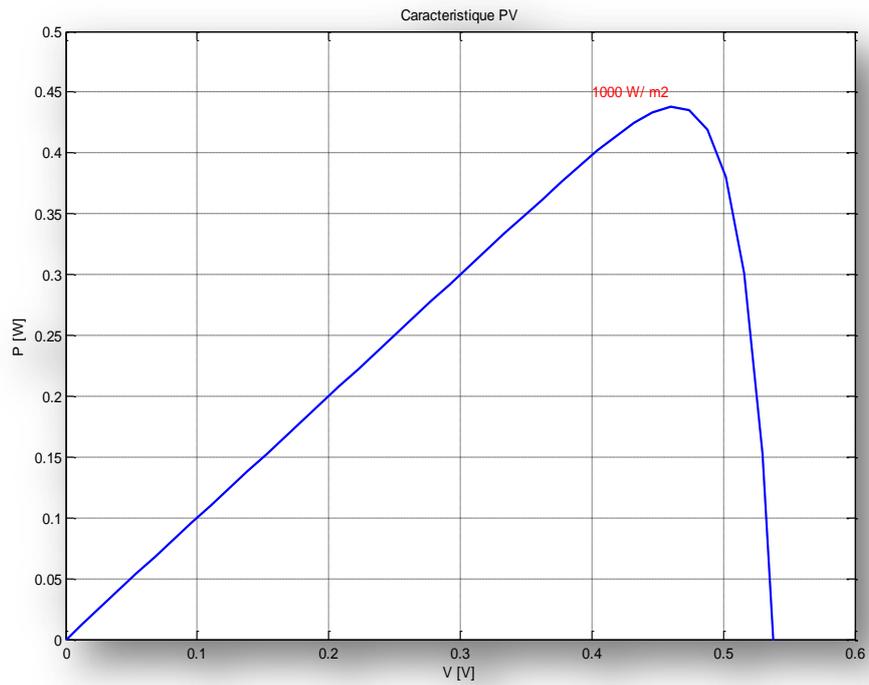


Figure 3.4 : Résultats de simulation de Caractéristique P-V d'une cellule PV.

- La caractéristique ($I_{pv} = f(V_{pv})$) est donnée par la figure (3.5) .

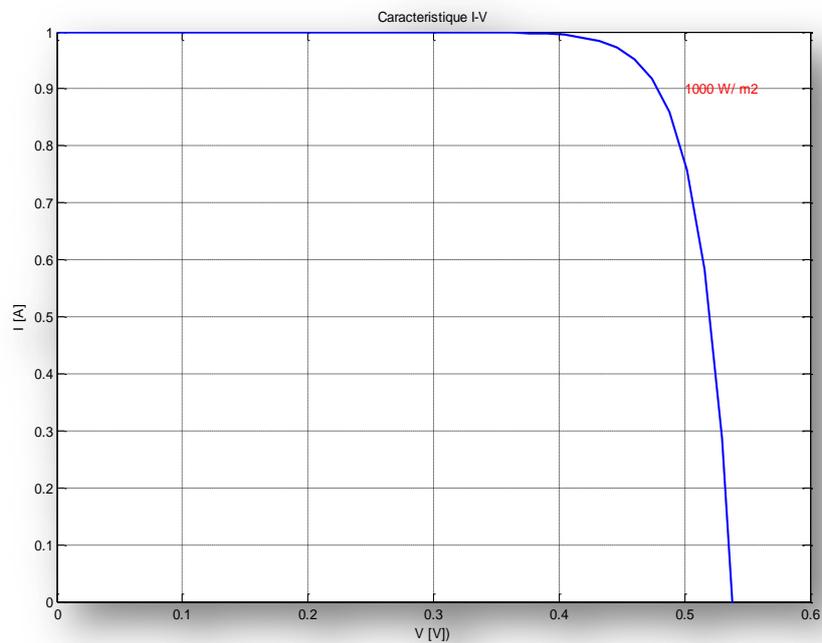


Figure 3.5 : Résultats de simulation de Caractéristique I-V d'une cellule PV.

3.1.3 Modèle réelle d'une cellule photovoltaïque sous Matlab

Pour résoudre cette équation on utilise le block 'Algébriques Constraint' qui est intégré dans la bibliothèque 'Simulink/Math Opération'

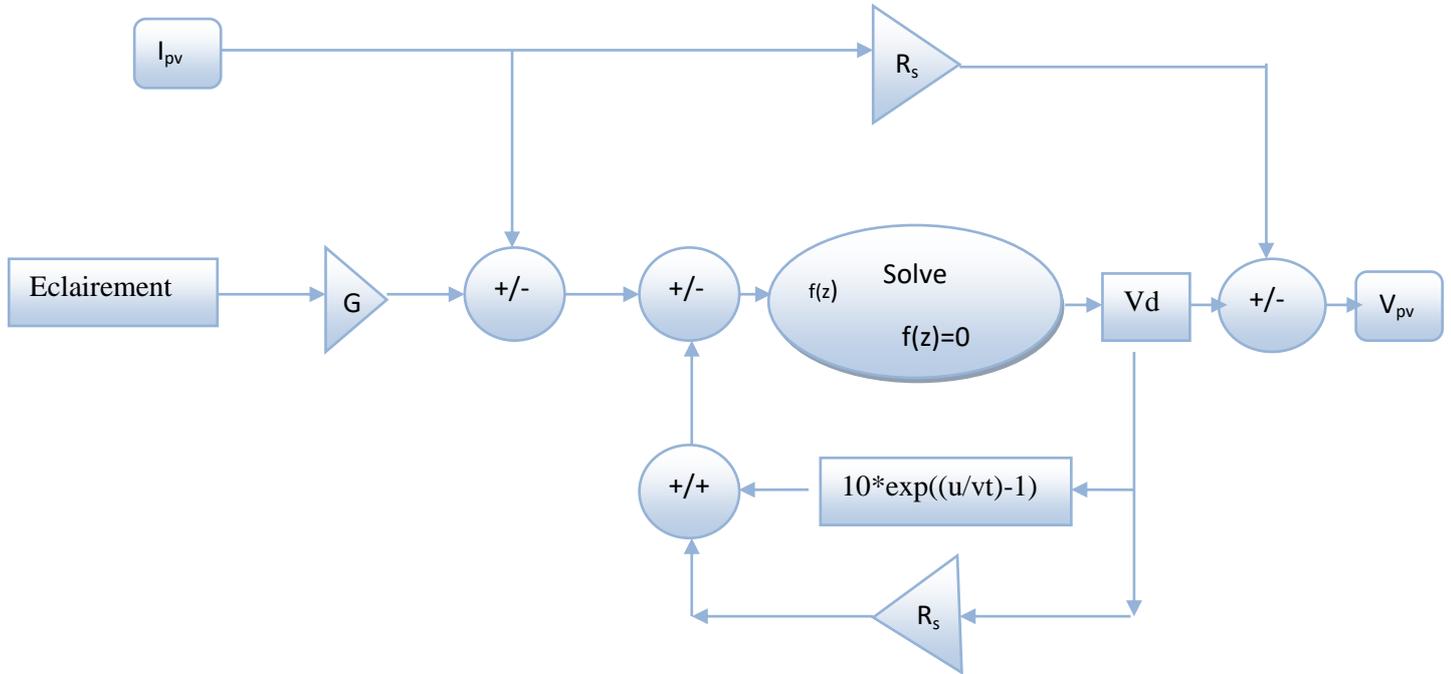


Figure 3.6 : Schéma de simulation d'une cellule photovoltaïque réelle.

La bibliothèque SimPowerSystems du logiciel de simulation MATLAB sera utilisée pour réaliser l'analyse comportementale de circuits électriques correspondant aux modèles mathématiques des différentes parties de la centrale.

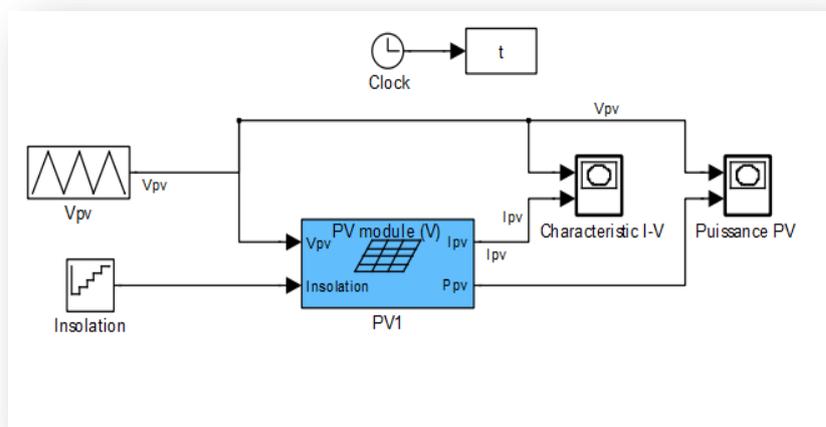


Figure 3.7 : Modèle de simulation d'une cellule photovoltaïque réelle.

Les paramètres de simulation sont donnés dans le tableau (3.2):

Tableau 3.2. Valeurs des paramètres de simulation.

Les paramètres de module	La valeur de chaque paramètre
Le nombre des cellules en série N_s	1
La tension maximale V_r à PPM (V)	0.4822
La tension en circuit ouvert V_{oc} (V)	0.598
Le courant maximal I_r à PPM (A)	3.04
Le courant de court-circuit I_r (A)	3.325

a-1 Les résultats de simulation et interprétation :

Des résultats des courbes pour différents grandeurs sont illustrés sur les figures (3.8 , 3.9).

La Figure 3.8, représente des résultats de simulation de module PV Caractéristique ($I_{pv} = f(V_{pv})$) : À température ($T = 25C^\circ$), et l'éclairement (E) entre 200 et 1000 w/m^2 .

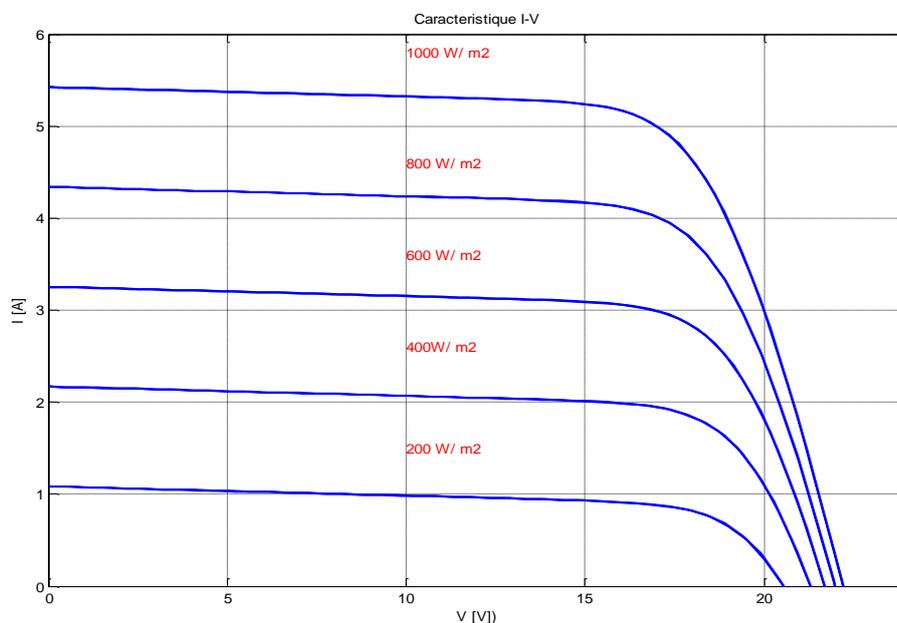


Figure 3.8 : Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension Pour différents insolation et une température $T=25^\circ C$.

D'après la figure 3.8, on remarque une forte diminution du courant de court-circuit Par rapport à l'insolation et une faible diminution de la tension du circuit ouvert.

La figure 3.9 représente des résultats de simulation de Module PV Caractéristique ($P_{pv} = f(V_{pv})$) : À température ($T = 25C^{\circ}$). et l'éclairement (E) entre 200 et 1000 w/m².

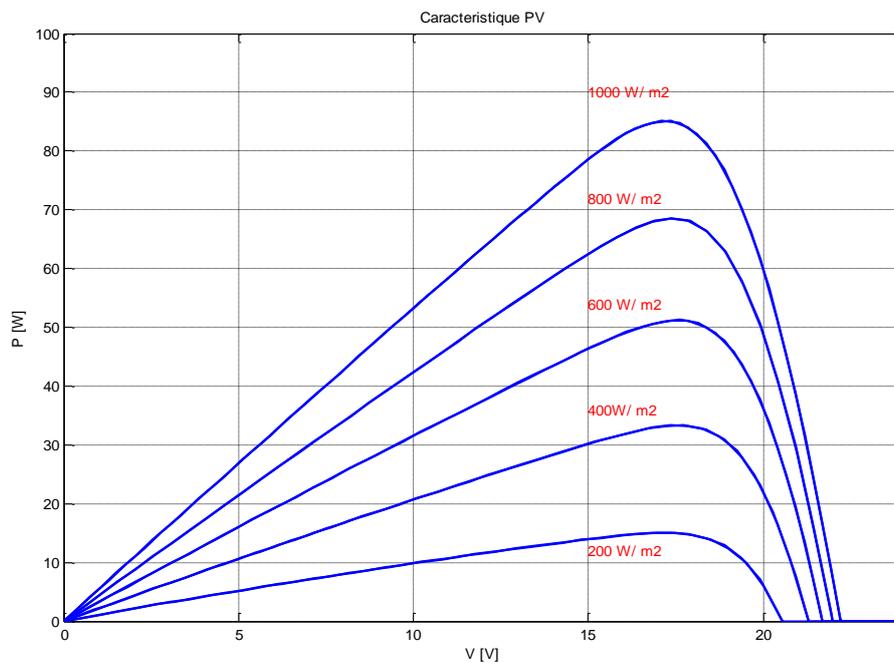


Figure 3.9 : Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension

Pour différents insolation et une température $T=25^{\circ}C$.

D'après la figure (3.9) on remarque que, l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension du circuit ouvert du GPV.

3.2 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque et contrôlé par une commande MPPT :

La figure 3.10 représente une chaîne de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une Commande MPPT. Cette dernière est associée à un convertisseur statique permettant de faire Une adaptation entre le GPV et la charge de telle sorte que la puissance générée correspond à Sa valeur maximale et qu'elle soit transférée directement à la charge.

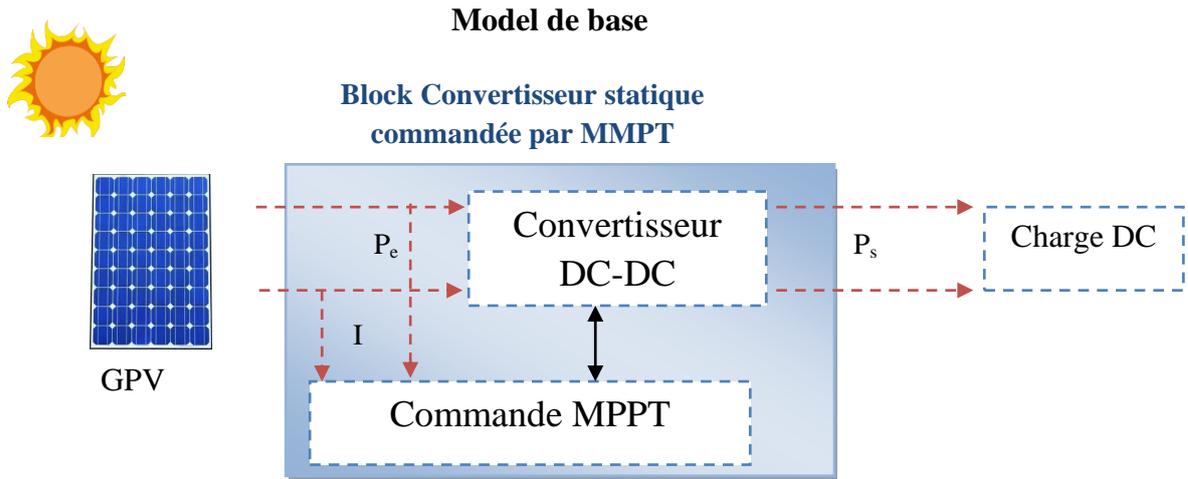


Figure 3 .10 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

3.2.1 Le principe de la commande MPPT :

Le principe de cette commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (DC), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le générateur photovoltaïque peut fournir. Le rendement MPPT (η_{MPPT}) est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} [45].

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{Max}}{P_{in}} \quad (3.1)$$

Le pourcentage de η_{MPPT} ($\eta_{MPPT}\%$) de pertes de puissance d'un module PV (P_{in}), qui correspond à l'entrée de l'étage d'adaptation, par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait produire (P_{Max}).

3.2.2 Gestion de la MPPT :

La figure (3.11) , illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 defonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Dans ce cas, pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Dans le second cas, pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Le dernier cas, une variation du point de fonctionnement peut se produire lié aux

variations de température de fonctionnement du GPV, bien qu'il également agir au niveau de la commande. [46-47].

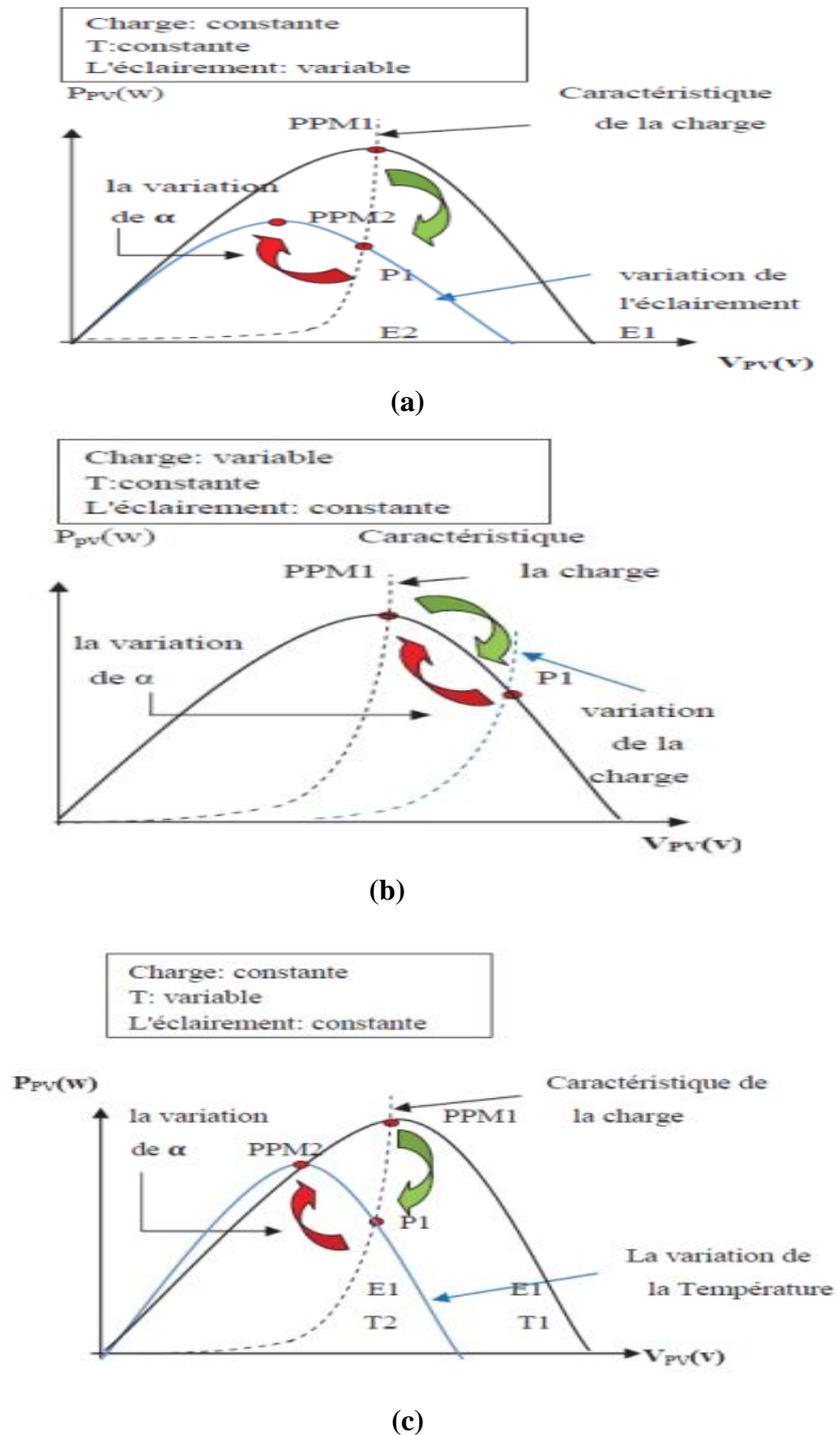


Figure 3.11: Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.

3.2.3 Commande de Perturbe & Observe (P&O)

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure (3.12) on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM [48].

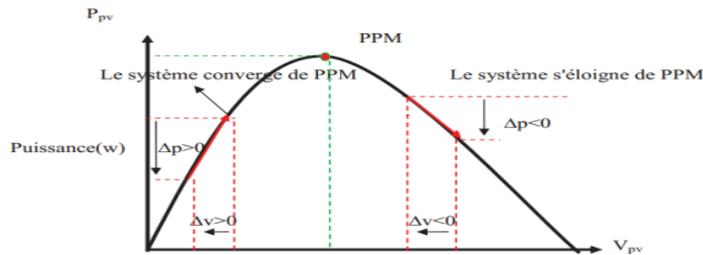


Figure 3.12 : Courbe de la convergence vers le PPM par P&O.

L'organigramme de l'algorithme de (P&O) est donné par la figure 3.13.

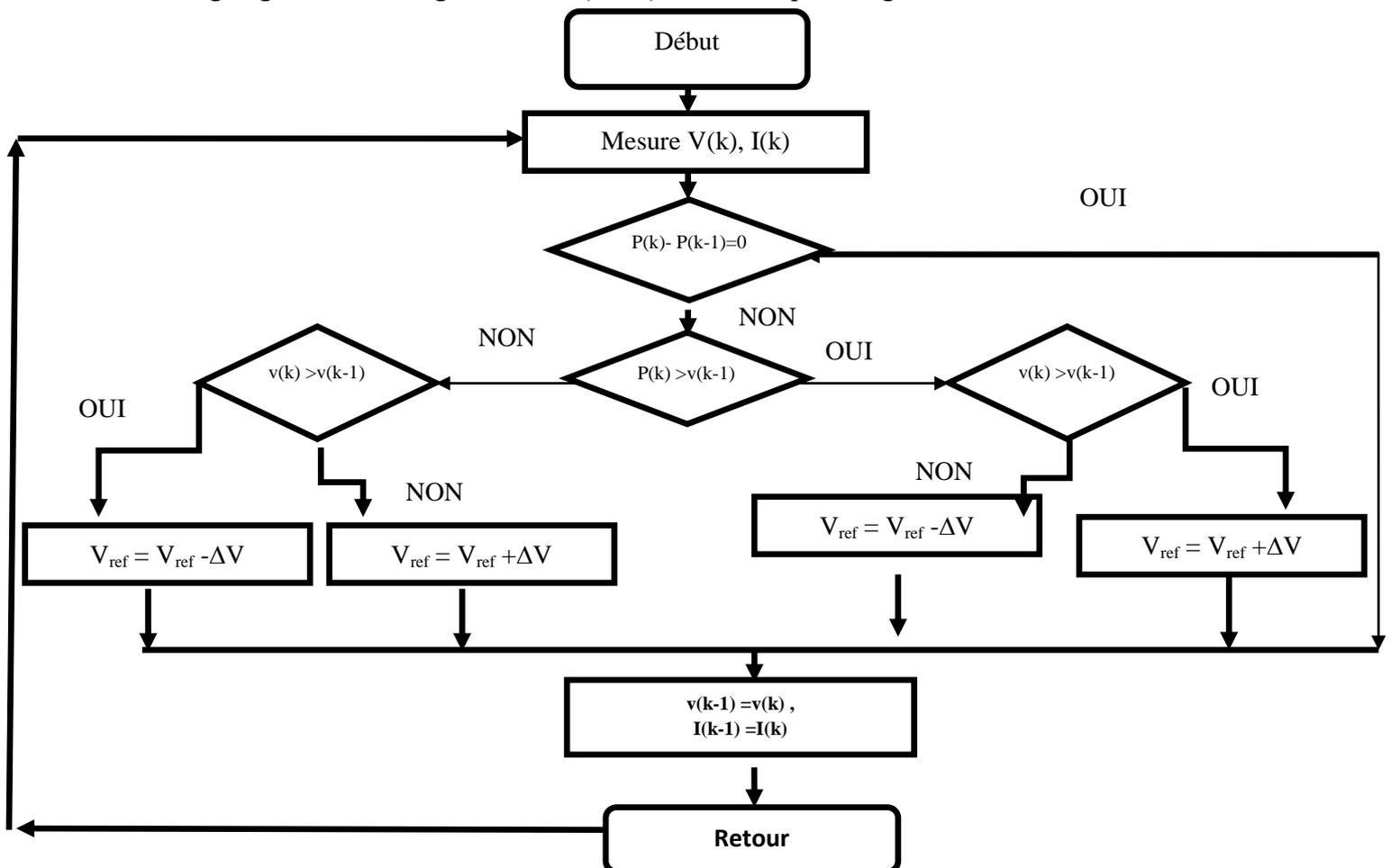


Figure 3.13 : Organigramme de l'algorithme perturbation et observation.

3.3 Simulation de la commande DTC appliquée au système de pompage photovoltaïque :

La simulation est réalisée par Matlab/Simulink, la pompe centrifuge est entraînée par la machine asynchrone et alimentée par un onduleur de tension à deux niveaux associé avec un module photovoltaïque à 22 panneaux en série. La simulation est effectuée dans les conditions suivantes, la bande d'hystérésis du comparateur du couple est constaté à ± 0.05 N.m et celle du comparateur du flux à ± 0.001 Wb. Ensuite, le flux de référence $\Phi_{s,ref} = 1$ Wb ou ($\Phi_{s,ref} = 3.6$ Wb). , le couple résistant de la pompe $C_r = 10$ N.m, le décalage $= 0^\circ$ et une consigne de vitesse $\Omega_{ref} = 156$ rad/s avec un changement d'irradiation G de 1000 W/m^2 à 800 W/m^2 à l'instant $t=0.5$ s.

Le comportement de la structure de la commande DTC appliquée à un moteur asynchrone de forte puissance (1 MW) alimentée par un onduleur de tension à deux niveaux associé avec un module photovoltaïque à 22 panneaux en série est simulé par Matlab/Simulink. Les paramètres de la machine asynchrone que nous avons utilisés dans la simulation sont illustrés.

Tableau 3.3: Paramètres de la machine asynchrone [49]

Les paramètres de la machine synchrone	La valeur de chaque paramètre
Puissance nominale:	1.5 kW
Tension nominale :	220/380 V
Rendement nominal:	78%
Facteur de puissance nominal	: 0.8
Vitesse nominale:	1420 tr/min
Fréquence nominale:	50 Hz
Courant nominal:	11.25/6.5 A
Résistance statorique:	4.850 Ω
Résistance rotorique:	3.805 Ω
Inductance cyclique statorique:	0.274 H
Inductance cyclique rotorique:	0.274 H
Inductance mutuelle:	0.258 H
Nombre de paires de pôles:	2
Moment d'inertie:	0.031 kg.m ²
Coefficient de frottement visqueux :	0.00114 N.m.s/rd

3.3.1.1 Le modèle de la machine asynchrone MAS :

Le modèle de la machine asynchrone MAS alimentée en tension se trouve avec 5 équations (2 magnétiques + 2 électriques + 1 mécanique). Par contre pour la MAS alimentée en courant son modèle est à 3 équations seulement. Le schéma en bloc Simulink du moteur, ce modèle mathématique de la MAS comme le montre la figure (3.15). Réduit à un seul bloc où les entrées sont les tensions d'alimentation triphasés et la charge mécanique, tandis que les sorties sont les courants statoriques, le flux rotorique, le couple électromagnétique, et la vitesse. Et la figure (3.14) représente le schéma Simulink de la estimateur flux et couple.

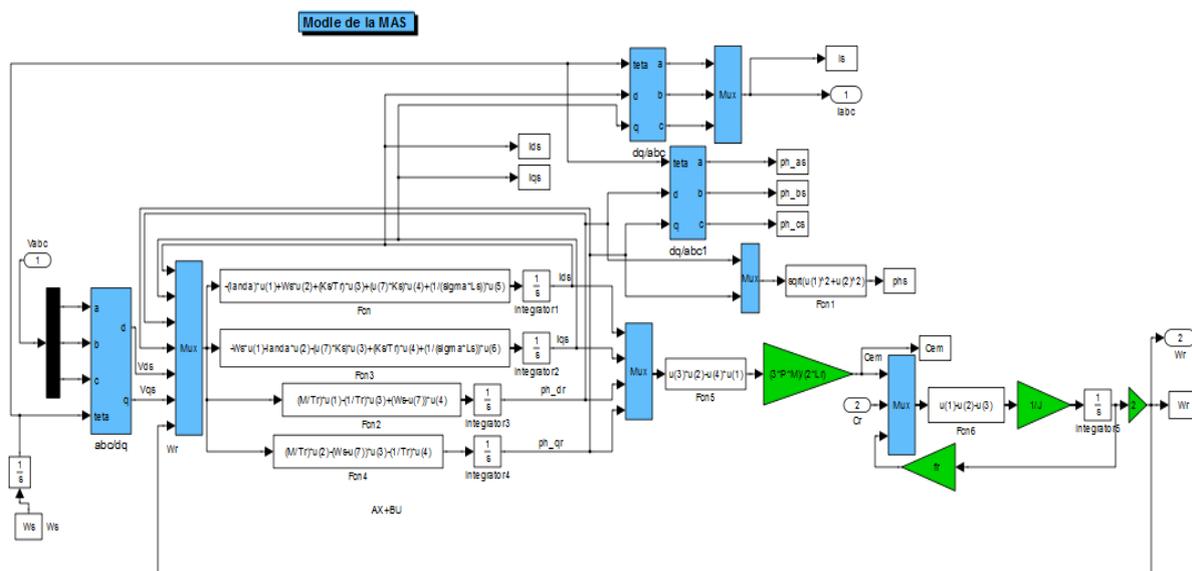


Figure 3.14 : modèle Simulink de la machine asynchrone alimentée en tension.

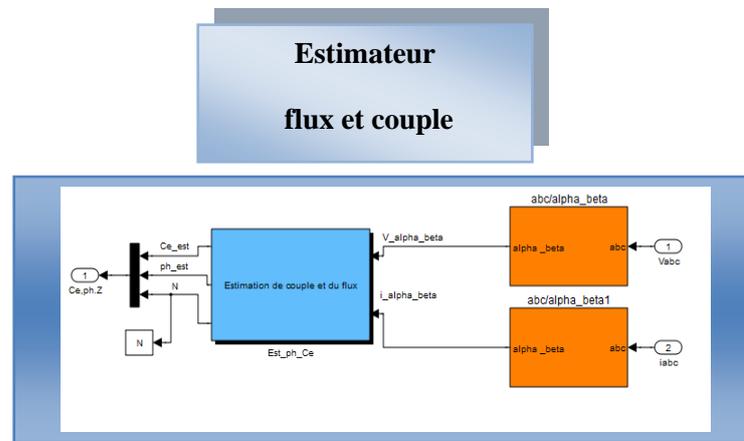


Figure 3.15 : modèle Simulink de la estimateur flux et couple.

3.3.1.2 Modèle global du système :

La figure (3.16) illustre le schéma synoptique du système photovoltaïque global avec les différentes commandes utilisées. Le modèle SIMULINK représente le groupement du générateur photovoltaïque, la commande MPPT, le hacheur survolteur, l'onduleur MLI, et le moteur à induction.

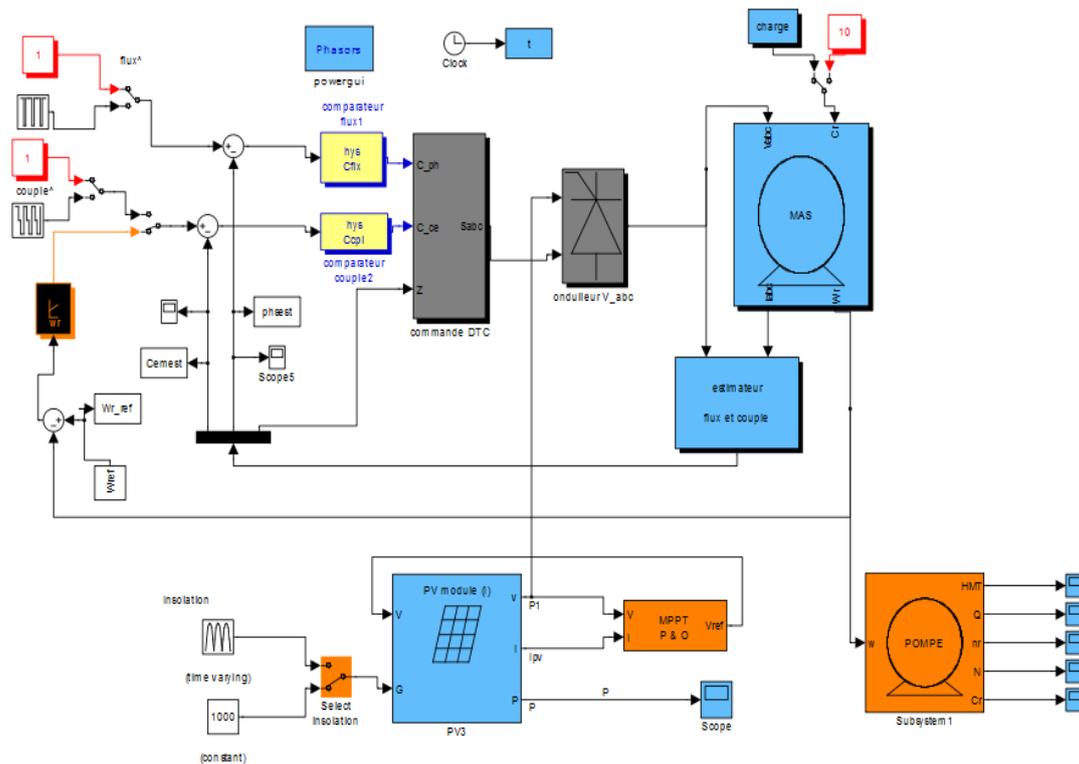


Figure 3.16 :modèle Block de simulation du modèle global.

3.3.1.3 Les résultats et interprétations des simulations du système proposé :

Nous représentons les évolutions en fonction du temps de la tension et courant débité par le GPV , le signal de commande du MPPT, de la vitesse de rotation, des couples électromagnétique et résistant, du débit d'eau, de la hauteur manométrique totale, des tensions simples aux bornes du moteur .

a- Résultats et Interprétations:

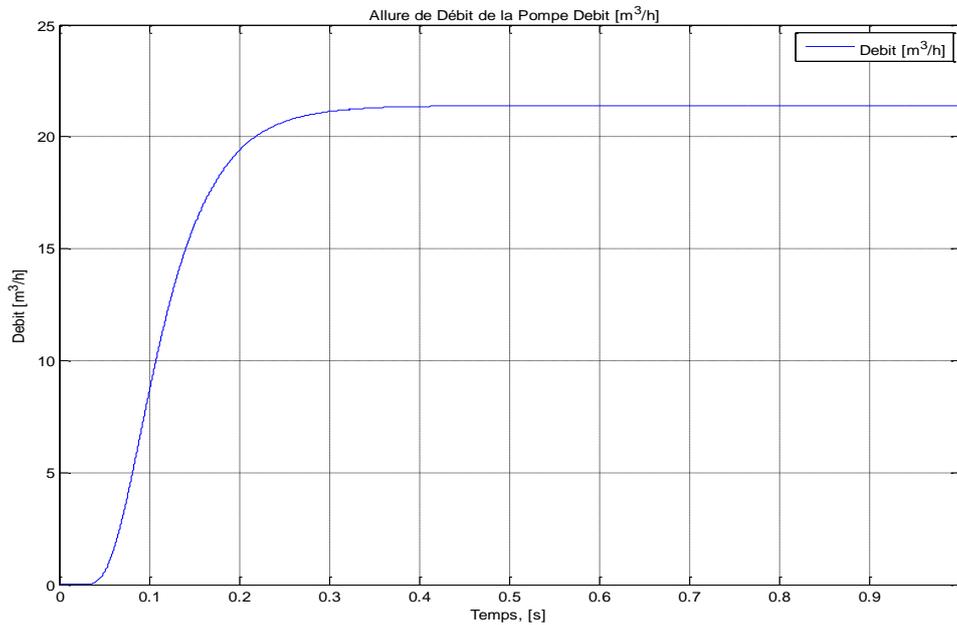


Figure 3.17: Allure de débit de la pompe

D'après la figure (3.17).les résultats obtenus on constate que le débit du système de pompage varie avec la variation de l'ensoleillement Le débit d'eau est quasiment constant, donc atteint la valeur désiré.

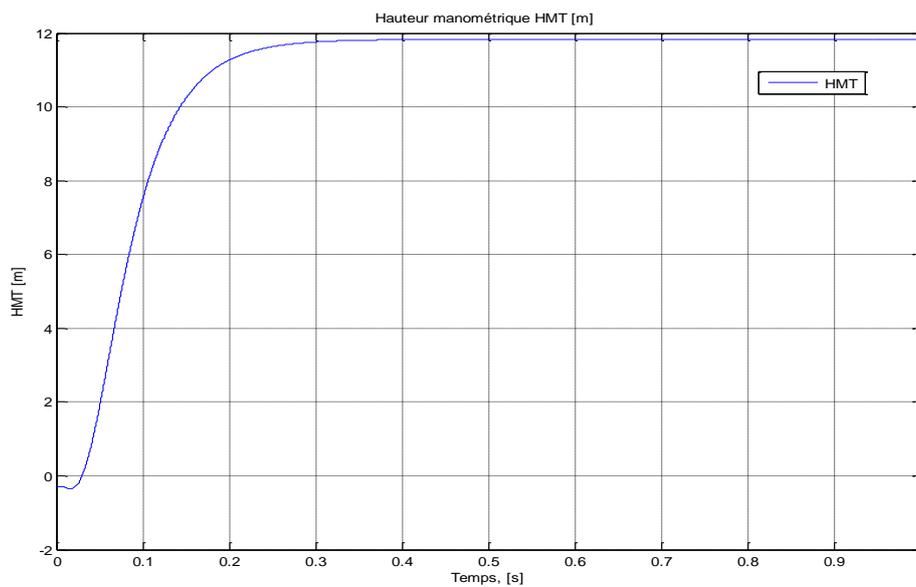


Figure 3.18: Allure de hauteur manométrique de la pompe.

D'après la figure (3.18) on ne constate que la hauteur manométrique de la pompe du maximum à HMT égal à 11.9 m.

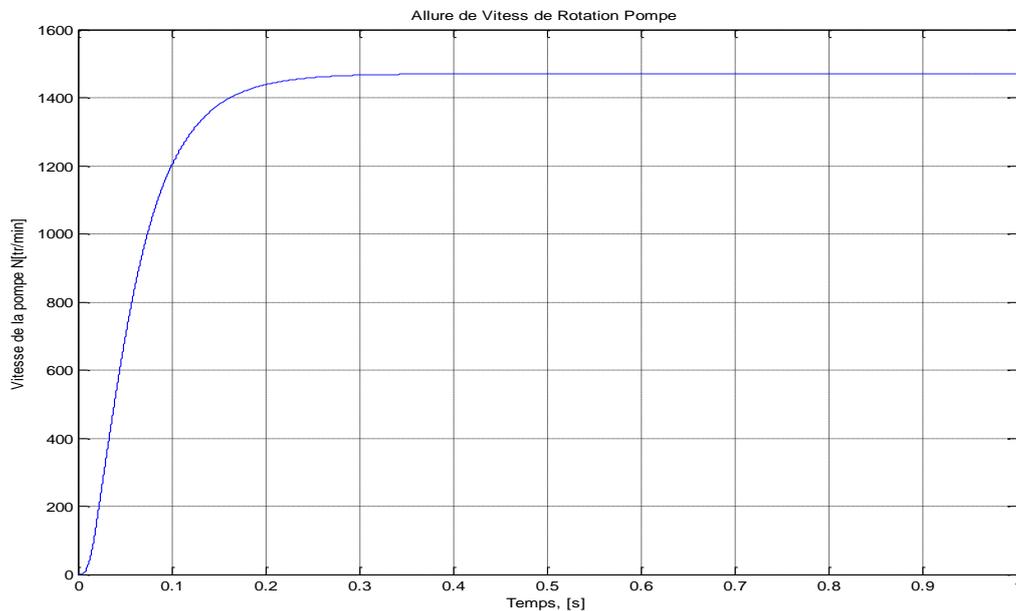


Figure 3.19: Allure de Vitesse de rotation de la pompe

D'après la figure (3.19), vitesse de rotation de la pompe est quasiment constant et 1400 *tr/min* .

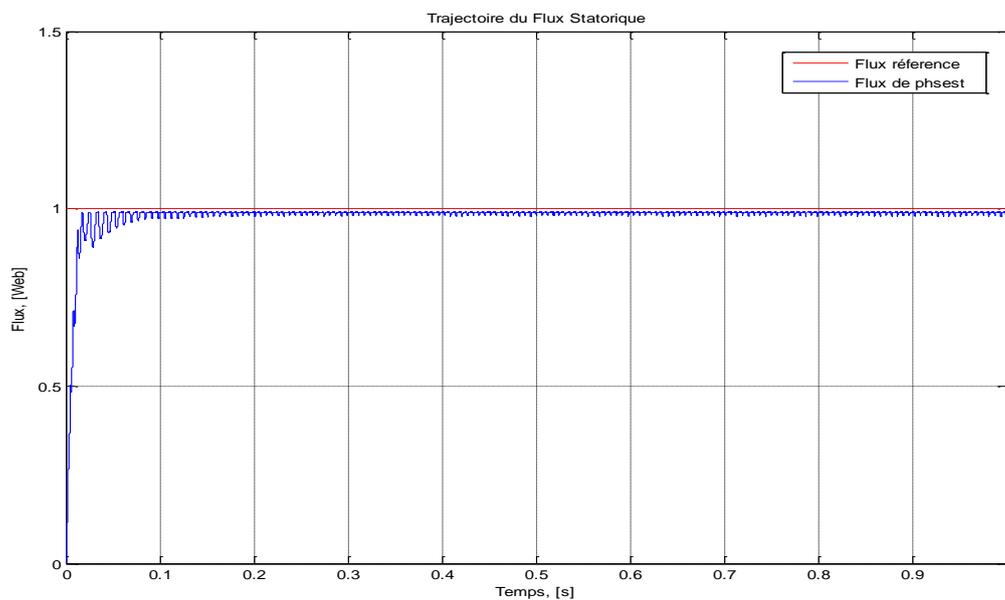


Figure 3.20: Flux Statorique de référence et estimé.

L'évolution du flux dans l'intervalle de temps 0 et 1 sec est une allure caractéristique type de tous les moteurs asynchrone à cage. D'après la figure (3.20) On constate qu'à l'instant de la perturbation, les caractéristiques des flux statorique .

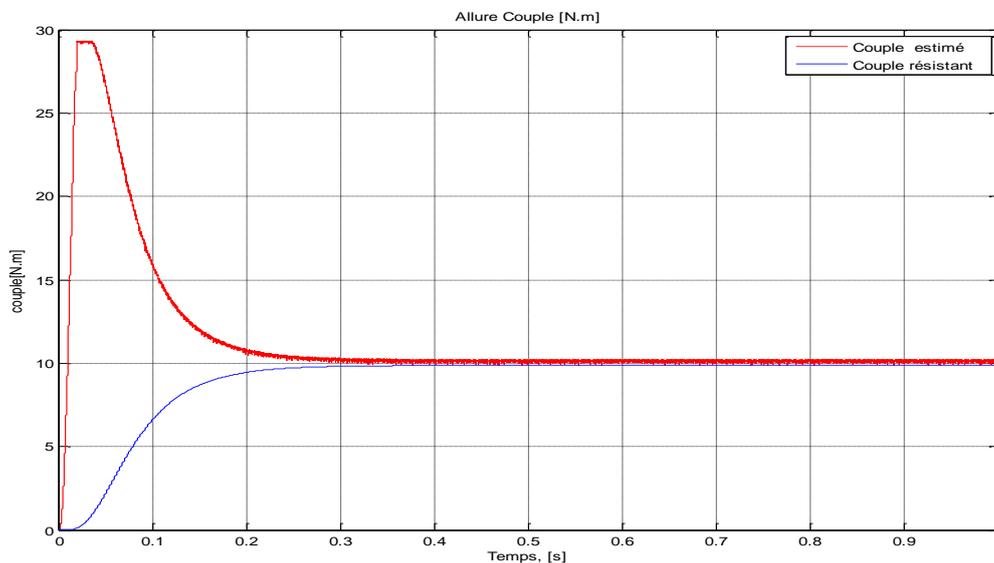


Figure 3.21: Allure du couple.

L'évolution du couple dans l'intervalle de temps 0 et 1 sec est une allure caractéristique type de tous les moteurs asynchrone à cage. Pendant le régime transitoire, le couple est fortement, puis se stabilise en fin du régime

D'après la figure (3.21) le couple résistant et estimé .On constate qu'à l'instant de la perturbation, les caractéristiques flux estimé elle démunie à 0.01s et augmentation les valeurs de couple résister jusqu'a la valeur de deux couples (estimé et résistant) reste constante de 10 tr/min On constate qu'à l'instant de la perturbation, les caractéristiques des couples statorique.

La figure (3.22) représente les caractéristique couple en fonction de la vitesse et point de fonctionnement.

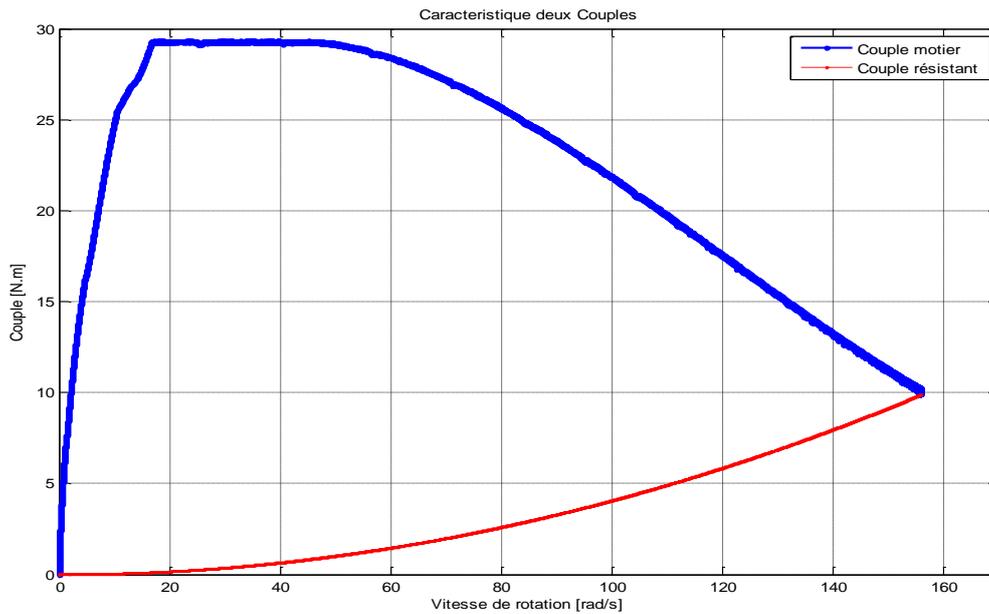


Figure 3.22: Caractéristique couple en fonction de la vitesse et point de fonctionnement.

D'après la figure (3.22), On constate qu'à l'instant de la perturbation, les caractéristiques couple en fonction de la vitesse et on constate que le point de fonctionnement figure égal du couple à l'instant de vitesse de rotation à 150 [rad /s] on à obtien de point de fonctionnement de couple égal à 10 [Nm].

La figure(3.23) représente de courant statorique .

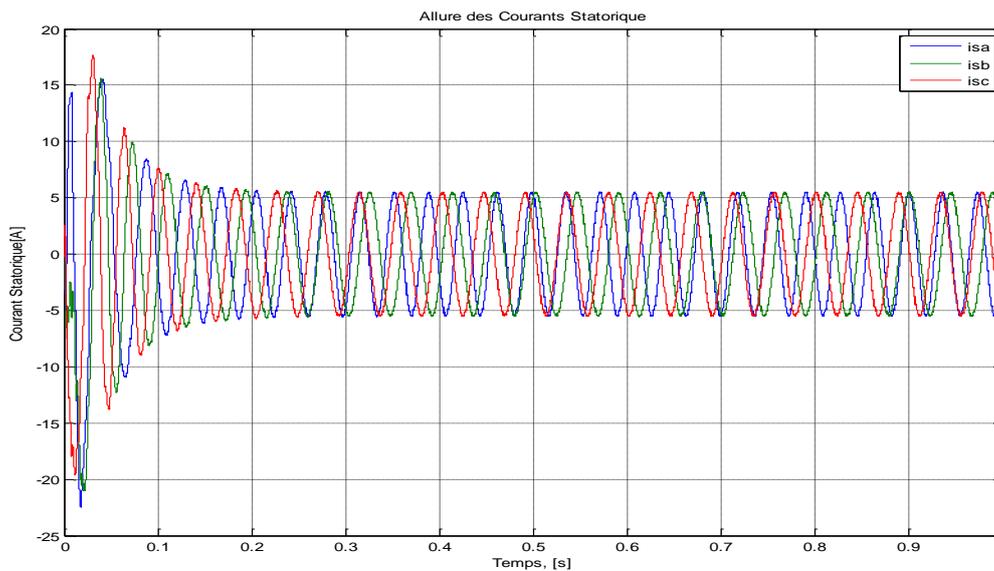


Figure 3.23: Allure de courant statorique .

D'après les résultats de la figure (3.23) obtenus que les triées de courant i_a , i_b et i_c subissent une variation instantanée. Le courant statorique répond bien aux variations imposées sur le couple et sa forme est très proche de la sinusoïde.

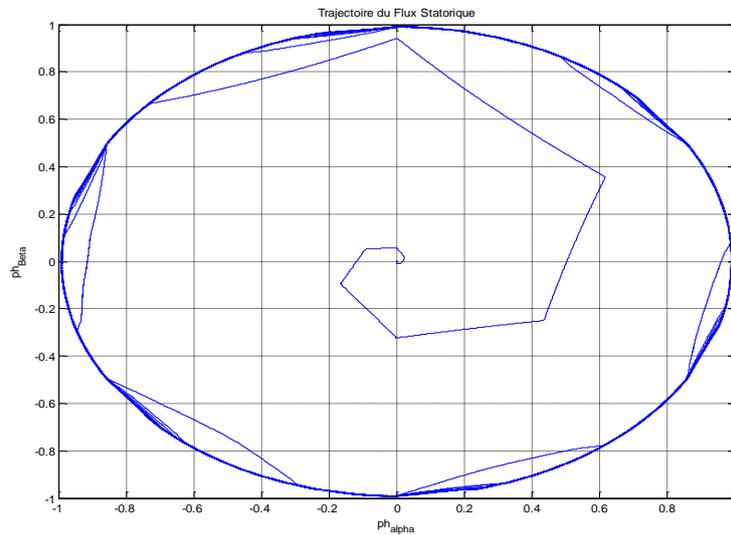


Figure 3.24: Trajectoire du flux statorique.

D'après les résultats de la figure (3.24) .La trajectoire de l'extrémité du flux statorique est pratiquement circulaire ce qui confirme que l'amplitude de ce vecteur est maintenue constante, il démarre au point (0, 0) et tourne dans le sens trigonométrique pour suivre un cercle de rayon (1Wb) fixé par la consigne.

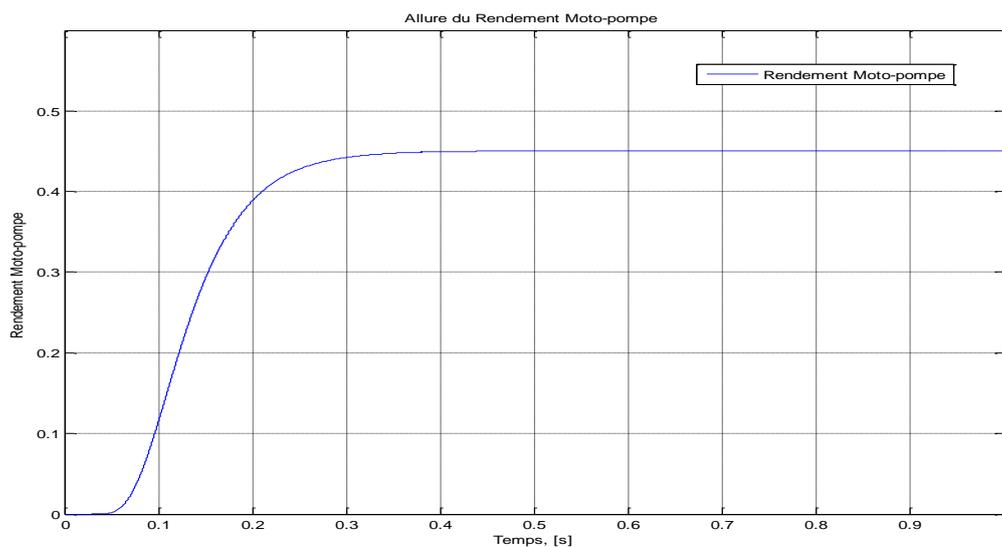


Figure 3.25: Allure du rendement motopompe.

D'après les résultats de la figure (3.25), l'évolution du rendement moto-pompe dans l'intervalle de temps 0 et 1 sec est une allure caractéristique type de tous les moteurs asynchrone à cage. Celui-ci présente aux premiers instants des pulsations très importantes. Et l'efficacité de la motopompe avec un rendement à 0.45 (ou 45%). Finalement nous pouvons conclure que ces résultats sont d'une grande importance pour la gestion de ce type système proposé.

b- Analyse Harmoniques :

Les objectifs du convertisseurs sont achevés, à savoir la minimisation des fluctuations du couple et de flux ainsi que le taux de distorsion harmonique des courants générés, la figure (3.26) montre l'analyse spectrale des courants de sortie de la génératrice.

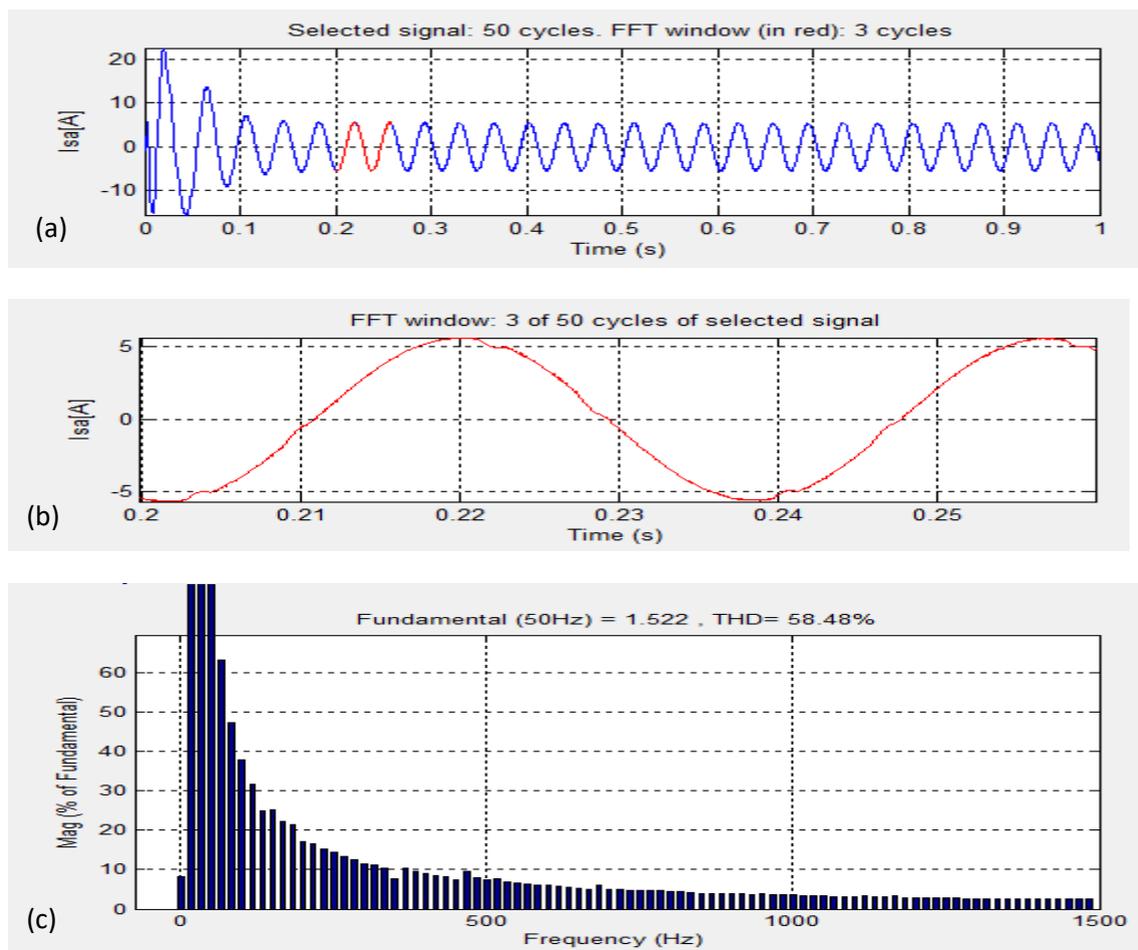


Figure 3.26 : Analyse spectrale : (a) signal étudié ,(b) transformé de four rapide FFT du signal étudié (c) Le niveau de THD sur une phase du courant satirique.

D'après les figures 3.26 montrent respectivement le courant statorique de la phase « a » envoyés au réseau de distribution, ainsi leurs spectres harmoniques. Ce résultat ont confirmé l'influence de la qualité de l'énergie fournit au réseau électrique. Le taux de distorsion harmonique (Total Harmonique Distorsion - THD) est nettement plus important (58.48%) au niveau du courant statorique du convertisseur .

3.4 Dimensionnement de la pompe photovoltaïque :

Pour le besoin en eau potable d'un village isolé, un château d'eau de capacité de 200 m³, et irrigation par un débit nominal $Q_n = 35 \text{ m}^3/\text{h}$ et une hauteur manométrique totale $HMT = 15 \text{ m}$.

Ces calculs permettent de dimensionner le champ photovoltaïque et le nombre de panneaux envisageables à cette application.

1- Puissance hydraulique :

$$P_h = \rho \cdot g \cdot HMT \cdot Q = 1000 * 9.81 * 15 * \frac{35}{3600} \approx 1430 \text{ W} \quad (3.2)$$

2- Puissance mécanique :

La pompe centrifuge avec un rendement de 55%

$$P_{mec} = \frac{P_h}{\eta_{pompe}} = \frac{1430}{0.55} \approx 2501 \text{ W} \quad (3.3)$$

3- Puissance électrique :

Le rendement des moteurs à courant alternatifs est au voisinage de 85%

$$P_{elc} = \frac{P_{mec}}{\eta_{moteur}} = \frac{2501}{0.85} \approx 3060 \text{ W} \quad (3.4)$$

4- Puissance électrique demandée :

$$P_{delivree} = \frac{P_{elc}}{\eta_{onduleur}} = \frac{3060}{0.95} \approx 3221 \text{ W} \quad (3.5)$$

La durée de pompage :

$$P_{pompage} = \frac{V}{Q_n} = \frac{200}{35} \approx 6 \text{ heures} \quad (3.6)$$

$$E_e = P_{delivree} * T_{pompage} = 3221 * 6 \approx 19326 \text{ wH/J} \quad (3.7)$$

5- La puissance du générateur photovoltaïque

Les pertes de puissance attribuables à la température et à la poussière sont estimées au cinquième de la puissance délivrée par l'ensemble des modules.

$$P_g = \frac{P_e / T_{pompage}}{1 - \Sigma T_{pompage}} = \frac{P_{delivre}}{1 - \Sigma Pertes} \approx \frac{3221}{(1-0.2)} \approx 4026 \text{ w} \quad (3.8)$$

Nombre de panneaux : ayant une puissance nominale normalisée de 200 W

$$N > \frac{P_e}{P_s} = \frac{4026}{200} \approx 21 \text{ panneaux} \quad (3.9)$$

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentons la simulation d'une chaîne de système pompage photovoltaïque composé de : Photovoltaïque, convertisseur, moteur asynchrone et pompe centrifuge est présenté. Le modèles Simulink est construit sur la base des modèles mathématiques. les déférentes résultats illustrent la performance d'un modèle de système pompe photovoltaïque. La simulation a été exécutée dans l'ordre que nous déduire des idées évidentes sur le fonctionnement du générateur photovoltaïque, l'onduleur, le moteur asynchrone et la pompe centrifuge.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire nous avons étudié le système de pompage photovoltaïque distribué aux réaux. Ce système se présente comme une solution idéale pour l'alimentation en telle système moderne.

Les contributions de ce travail dans le domaine de l'énergie solaire photovoltaïque sont résumées comme suit :

- La première partie de ce mémoire, nous a permis d'analyser les différents types d'énergie solaire (thermique, photovoltaïque et thermodynamique), les différents composantes du système de pompage PV, comme le générateur photovoltaïque, le groupe électropompe et la partie stockage d'énergie.

- La deuxième partie de ce travaille nous avons présenté la modélisation de tous les éléments de notre la chaine d'un système de pompage photovoltaïque, chaque modélisation est basée essentiellement sur des équations provenant de la littérature scientifique, ainsi qu'on voit l'effet de la température , l'éclairement sur les caractéristiques du GPV (puissance-tension et courant-tension) , le calcul de l'énergie consommé, la détermination de l'énergie solaire disponible.

- Dans la partie chapitre trois , nous avons présenté la modélisation d'une système pompage photovoltaïque sous l'environnement Matlab-Simulink a été arête pour des conditions variables. Ensuite, une étude sur à la connexion qui à conduit au dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque pour l'alimentation en distribué et la charge et la nécessité d'introduire un étage d'adaptation, en courant continu ou alternatif.

Pour que le système photovoltaïque fonctionne à sa puissance maximale, il doit comporter un étage d'adaptation associé à un algorithme MPPT, « P&O » avec laquelle notre générateur photovoltaïque sera optimisé. Ensuite, ce travail été de remplacer la commande vectorielle indirecte du système de pompage photovoltaïque par la commande directe du couple, ou nous avons fait une comparaison entre les résultats des deux commandes afin de constater que la commande DTC donne des meilleures performances dans les conditions de fonctionnement normales de la motopompe, et une grande robustesse dans le cas des variations paramétriques du système. Finalement l'objectif du dernier chapitre que le système pompage photovoltaïque remplace par la commande vectorielle indirecte qui améliorera les performances de notre moteur asynchrone, responsable de l'entraînement de la pompe centrifuge.

Références

Référence Bibliographiques

- [1] BACHSAIS Iméne & SEBBAGH Asma . « Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque pour l'irrigation d'un hectare de palmier dattier en utilisant les méthodes Méta heuristiques. » ; Mémoire de master en Energies Renouvelables , Université M'hamed Bougara-Boumerdes, 2017.
- [2] A.Bakelli 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.
- [3] H. Ammar, M.T. Bouziane et Y. Bakelli « Influence de la variation de débit sur les performances d'une pompe solaire » ; Revue des énergies renouvelables SIENR' 12 Ghardaïa pp 23-28, 2012.
- [4] G. Katchning et S. Julien, « Simulation d'un système de pompage photovoltaïque » ; Projet de pompage photovoltaïque à l'université de Lille1, 2011.
- [5] Jean-Loup PRENSIER – Christophe DAUX, « La chaîne d'énergie du pompage de l'eau ».2006
- [6] Sadi Mohammed El Amine & Hamlat Zohra.« L'impact Des Energies Renouvelables Sur Le Réseau Electrique Ouest Algérien 220 KV », Mémoire de Master, Spécialité : Système Energétique Filière : GenieElectrique, Univercite Dr. Tahar Moulay de.2013-2014.
- [7] HADJAB Moufdi. « Développement des performances d'un système photovoltaïque » , Mémoire de magister Spécialité : Electronique, Université Djilali Liabes De Sidi-Bel-Abbès, 20/01/ 2011.
- [8] H. BENZAGHOU, « Etude a-b initio des propriétés structurales, électroniques des semi-chalcopyrites $CuGaX_2(X=S, Se)$ », Mémoire de Magister en Physique, Université ABOU BEKR Belkaid Tlemcen, 2012.

- [9] Salima Alem-Boudjemline, « Réalisation et caractérisation des cellules Photovoltaïques Plastiques », thèse de doctorat Spécialité : Physique, Ecole Doctorale d'Angers, université d'Angers, 2004.
- [10] MAYOUF Somia, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec une commande vectorielle », Mémoire de master. Université Mohamed Boudiaf - M'SILA. 2016.
- [11] GHAITAOUI Elmoulat & KHELIFI Houdac . « Alimentation d'un Moteur Asynchrone à partir d'un Générateur Photovoltaïque », Mémoire Master Filière : Electrotechnique Spécialité : Commande Electrique. 23 Juin 2019.
- [12] Hocine HAMIDI , « Etude des méthodes d'ingénierie de bandes par les alliages semiconducteurs et leur rôle en photovoltaïque ». Université tlemcen. 2014-2015.
- [13] D Zaouk, Y Zaatari, A Khoury, C Llinares, « Electrical and optical characteristics of NAPS solar cells of Si (PiN) structure », Conference: Environment and Solar , 2000 .
- [14] Lakhdara Amira, « Etude De La Commande De La Puissance Et Stockage D'un Système Photovoltaïque » Badji Mokhtar-Annaba University Université Badji Mokhtar Annaba. Mémoire Master Filière Électrotechnique. 2019
- [15] DEBILI Narimene, « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage photovoltaïque », Mémoire de Magister en Electronique, Option: Matériaux et nanoélectronique , Université des Frères Mentouri Constantine, 2014.
- [16] Mansour Assani Dahouénon. « Le manuel du Technicien Photovoltaïque ». Publication, programme pour la promotion des énergies renouvelables de l'électrification rurale et de l'approvisionnement durable en combustibles domestiques. (PERACOD), 2011.

- [17] Boucli-Hacene Omar , « Conception et Réalisation d'un Générateur Photovoltaïque Munie d'un Convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique », Mémoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid, Tlemcen., 2011
- [18] Aboub Hania, « Commande d'un onduleur neuf niveaux, destiné aux fortes puissances PV », Mémoire de Magister En Électrotechnique, Option : Maîtrise des Énergies, Université El-Oued, 2014.
- [19] BELKADI Nora AKLI Karima , « Thème Contrôle indirect d'un panneau solaire isolé du réseau », Mémoire de Master Domaine : Sciences et Technologies Filière : Electrotechnique Spécialité : Machines Electriques. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou .16/09/2018.
- [20] A. MOHAMMEDI, « Contrôle par MPPT des systèmes de pompage photovoltaïque », Thèse de doctorat en commende et conversion d'énergie Université A. Mira de Bejaia, 2015.
- [21] S. AISSOU, « Caractérisation et optimisation de puissance des systèmes photovoltaïques», Thèse de doctorat Université A. Mira Bejaïa, Mai 2016.
- [22] Arnaud Sivert, « Panneaux Photovoltaïques Etude d'une valise solaire », IUT Génie Electrique & Informatique Industriel de Soissons. Iutenligne, le catalogue de ressources de l'enseignement technologique universitaire.12 mars 2019.
- [23] NAKOUL Zakia, « Optimisation D'une Centrale Solaire A Base D'un Generateur PV [Application Aux Sites Tlemcen Et Bouzaréah] », Mémoire de magister. Université Abou BakrBelkaid Tlemcen. 2010.
- [24] Benlahreche Houssef Eddine , « Etude et optimisation d'un Système de pompage Photovoltaïque » Mémoire de Master , Université Mentouri - Constantine Faculté des Sciences de L'ingénieur département Electrotechnique. Juin 2012.
- [25] A. BELHOCINE et S.ZAIDI, «Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome » Mémoire de Master. Université de Bejaïa, 2012.

- [26] Bessoltane Ismail & Hamit Issaka Doudoua . «Etude technico-économique de système de pompage photovoltaïque, en comparaison aux autres productions d'eau, cas de la région de Mostaganem ».Mémoire de master en Genie Electrique .Option: Electrotechnique Industrielle .Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem. 2019
- [27] Ben Salaheddine Faouzi Ouahrani Houda, «Mise au point d'un banc d'essai d'une motopompe centrifuge», Mémoire de de master ,Université A. Mira de Bejaia 2017.
- [28] Amine BELAID, « Etude et conception d'une pompe Centrifuge », Mémoire de Master ,Université de Biskra.2017.
- [29] BERNT LORENTZ Gmb H & Co. KG, « Système de pompe solaire immergée pour puits 4 ».
- [30] BENDJOURI Faouzi&LAKHDARI Farid , « Etude et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque avec batteries » Mémoire de master en Electrotechnique, Option : Energies renouvelables , Université Abderrahmane Mira De Bejaïa Faculté De Technologie Département de Génie Electrique. 2014.
- [31] DEHOUCHE Karima & MOUHOUBI Kahina , « Etude et Conception D'un Système de Pompage Photovoltaïque Avec Stockage Electrochimique », Mémoire de master en Génie Electrique. Option : Énergie renouvelable. Université Abderrahmane Mira-Bejaia. 2013/2014.
- [32] LAFIA SEIDOU Imorou, « Etude et dimensionnement des systèmes de pompage photovoltaïque dans les localités rurales du Bénin : cas de adjakpata »,Mémoire de master, Institut International d'Ingénierie. BURKINA ,2015/2016.
- [33] DEGLA Mohammed larbi-BEN AHMED Bachir, «Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque », Mémoire de master, Université kasdi Merbah Ouargla.2017.

- [34] A. Meroufel , « Contrôle de la machine asynchrone : -Commande scalaire - Commande vectorielle - Commande directe du couple. simulation avec le logiciel Matlab/Simulink. » Université DjillaliLiabès –Sidi Bel-Abbès Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département d'Electrotechnique , 2008/2009.
- [35] M.NEFSI, «Commande directe du couple d'une machine asynchrone sans capteur mécanique», Mémoire de magister en électrotechnique, Université Djilali Liabes De Sidi-Bel-Abbès, 2008.
- [36] MAGOURA Tarek LEBOUKH Rahabi, « Commande sans Capteur d'un Actionneur de Traction d'un Véhicule Électrique » Université Mohamed Boudiaf - M'SILA. Mémoire de Master. 2017 / 2018.
- [37] Youcef DJERIRI & Abdelkader MEROUFEL « Fascicule de Travaux Pratiques : Techniques de Commande Electrique ». Université DjillaliLiabès de Sidi Bel-Abbès Faculté de Génie Electrique Département d'Electrotechnique. 2019.
- [38] Ameur AISSA, « commande sans capteur de vitesse par DTC d'une machine synchrone a aimants permanents dotée d'un observateur d'ordre complet a modes glissants ». Mémoire de magister en Électrotechnique, Université de Batna ,2005.
- [39] M. Benaissa ,« Minimisation des pulsations du couple dans une commande directe de couple DTC d'une machine asynchrone ». Mémoires de magister en Electrotechnique, université de Batna.
- [40] A. Meroufel, « Commande découplée d'une machine asynchrone sans capteur mécanique », Thèse de doctorat en électrotechnique, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2004.
- [41] J. Camille de Barros, «Application de la Logique Floue à la Commande Optimale du Moteur Asynchrone », Thèse de Doctorat, Université Marseille, France, 2003.

- [42] M. BESSEM ABDELGHANI , « Modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque », mémoire de master en Électromécanique, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR ANNABA 2018.
- [43] KHEDIRI Nasreddine& TEDJINI Lahcene. « Etude, modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque » mémoire de master en Electromécanique .Universite Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes Faculté de Génie Electrique. 2018/2019
- [44] F. Berrabah ,« commande sans capteur de la machine asynchrone », Thèse de doctorat, Université d'Annaba, 2016.
- [45] I.Vechiu, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de doctorat l'université du havre, Paris, 2005.
- [46] BENSEDDIK O., DJALOUF F., « Etude et optimisation d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2012.
- [47] NDIAYE Papa Amadou et KAWTHER Achari . « Production d'énergie électrique à partir d'un système photovoltaïque ». Mémoire de Master, Électromécanique. Université 8 Mai 1945 – Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie Electrotechnique et Automatique. 2018/2019.
- [48] Ziani Seyfeddine & Ould Mammar Mohamed « Etude et simulation d'un hacheur Boost pour suivre le point de puissance maximal (MPPT) ». Mémoire de Master :Électronique Microsystèmes et microélectronique et conception de circuits .Université SAAD DAHLAB de BLIDA , 2016-2017.
- [49] MAMMAR KHALED , Cours d'électronique de Puissance & Application avec SimPowerSystems (Matlab/Simulink). Université de BECHAR Faculté des Sciences et Technologie Département de Génie Electrique.

Référence Webgraphiques

- [50] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaique>.
- [51] www.futura-sciences.com, maison écologique, dossiers, chauffage-chauffe-eau-solaire-bon-choix-coup-792, page 2, 2017.
- [52] www.sti2d.patgue.com, La fabrication des cellules photovoltaïques / Site PV / Ressource PV / Cellule solaire / module solaire.
- [53] www.photovoltaique.guidenr.fr, La fabrication des modules photovoltaïques.
- [54] https://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_%C3%A9lectromagn%C3%A9tique.

Résumés

Résumé

L'objectif dans ce mémoire est d'apporter une contribution à l'étude d'une chaîne de système pompage photovoltaïque fonctionnant à sa puissance maximale. Cette modèle contient une représentation détaillée des principales composantes du système qui sont la commande d'une chaîne de pompage photovoltaïque dans un réseau distribution. Dans ce sens, et pour que le système photovoltaïque fonctionne à sa puissance maximale, il doit comporter un étage d'adaptation associé à un algorithme MPPT. Dans notre étude, nous avons utilisé l'algorithme MPPT "Perturb and Observe" (P&O); la modélisation et la simulation des différents constituants de la chaîne de conversion d'énergie. Ensuite, nous avons étudié le cas d'une chaîne de pompage utilisant un moteur asynchrone triphasé comme moteur d'entraînement. Dans le but d'avoir la possibilité de régler le débit de la pompe- d'eau centrifuge, type de commande classique sont été utilisé, la commande directe du couple (DTC) est utilisée pour la commande de la vitesse de rotation de la motopompe asynchrone.

Mots Clés : Pompage Photovoltaïque, commande MPPT, pompage, commande DTC.

Abstract

The objective in this thesis is to make a contribution to the study of the photovoltaic pumping system chain operating at its maximum power. This model contains a detailed representation of the main components of the system which are the control of a photovoltaic pumping chain. In this sense, and for the photovoltaic system to operate at its maximum power, it must include an adaptation stage associated with an MPPT algorithm. In our study, we used the MPPT algorithm "Perturb and Observe" (P&O); modeling and simulation of the various components of the energy conversion chain. Next, we studied the case of the pumping chain using a three-phase asynchronous motor as a drive motor. In order to have the possibility of adjusting the flow rate of the centrifugal water pump, classic control type has been used, direct torque control (DTC) is used to control the speed of rotation of the motor pump asynchronous.

Keywords : Photovoltaic pumping, MPPT control, pumping, direct DCT torque control.

المخلص

الهدف من هذه الرسالة هو المساهمة في دراسة سلسلة نظام الضخ الكهروضوئي التي تعمل بأقصى طاقتها. يحتوي هذا النموذج على تمثيل مفصل للمكونات الرئيسية للنظام وهي التحكم في سلسلة ضخ الخلايا الكهروضوئية في شبكة التوزيع. وبهذا المعنى ، ولكي يعمل النظام الكهروضوئي بأقصى طاقته ، يجب أن يتضمن مرحلة تكييف مرتبطة بخوارزمية MPPT. في دراستنا ، استخدمنا خوارزمية "Perturb and Observe" (P&O) ؛ نمذجة ومحاكاة المكونات المختلفة لسلسلة تحويل الطاقة. بعد ذلك ، درسنا حالة سلسلة الضخ باستخدام محرك غير متزامن ثلاثي الطور كمحرك دفع. من أجل الحصول على إمكانية تعديل معدل تدفق مضخة المياه بالطرد المركزي ، تم استخدام نوع التحكم الكلاسيكي ، يتم استخدام التحكم المباشر في عزم الدوران (DTC) للتحكم في سرعة دوران مضخة المحرك. غير متزامن.

الكلمات المفتاحية : الضخ الكهروضوئي ، التحكم MPPT ، الضخ ، التحكم المباشر في عزم الدوران DCT .