

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider-Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département: Génie Electrique



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة الكهربائية

Mémoire présenté en vue de l'obtention

Du Diplôme de

Master en Énergie Renouvelable

Spécialité : Énergie solaire Photovoltaïque

Étude et simulation d'un pompage solaire au fil du soleil

Présenté par :

- Alili Zakaria
- Boudehane Sayid Ali

Devant le jury composé de

Mr. BETKA Achour	Pr	Université de Biskra	Président
Mme ABDEDDAIM Sabrina	MCA	Université de Biskra	Rapporteur
Mr. CHARROUF Omar	MCA	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2019 - 2020

Remerciements

Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Je tiens à remercier Mme ABDEDDAIM Sabrina, Maître de conférences à l'Université de Biskra qui a accepté de m'encadrer, et je lui exprime particulièrement toute ma reconnaissance pour m'avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.

J'exprime mes sincères remerciements à Mr BETKA Achour, Professeur à l'Université de Biskra, d'avoir accepté de présider le Jury de cette thèse.

Je remercie sincèrement Mr CHARROUF Omar, Maître de conférences à l'Université de Biskra, d'avoir accepté de faire partie du Jury.

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

À plus près de mon cœur, ma mère, que Dieu la préserve pour nous....

À mon père, mon soutien dans la vie....

À mes chers frères, ceux qui ont un cœur pur....

À ma grand-mère qui m'a soutenu pendant mes études....

À ma deuxième famille Mo cher oncle Noureddine Merabit et sa femme, qui étaient comme des parents, Et ses enfants qui étaient comme des frères....

À mon ami et collègue dans ce domaine, Sayid Ali Boudehane....

À mon professeur et mon encadreur Dr Sabrina Abdeddaim, qui a été le meilleur guide pour nous et le meilleur soutien pendant ce travail

À tous ceux qui m'ont soutenu (Zakaria Alili).

Zakaria Alili

Dédicace

Je dédie ce travail à :

À ma chère mère.

À mon cher père.

Que Dieu leur préserve longue vie et bonne santé À mes frères .

À mes sœurs. À ma grande famille.

À tous mes amis .

À tous mes amis du parcours scolaire et universitaire.

À tous mes enseignants de l'école primaire jusqu'à l'université

Boudehane Sayid Ali

Tableau de matière :

NOTATIONS & SYMBOLES

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre 1	1
1.1. Introduction :.....	2
1.2. Généralités sur les énergies renouvelables :.....	5
1.2.1. Statistiques :.....	6
1.3. Association des énergies renouvelables au pompage d'eau :.....	7
1.3.1. Systèmes de pompage photovoltaïque :.....	7
• Le pompage au fil du soleil.....	8
• Le pompage avec stockage électrochimique (batteries) :.....	9
1.3.2. Systèmes de pompage éolien :.....	10
• Éoliennes de pompage mécanique :.....	11
• Éoliennes de pompage électrique :.....	12
1.3.3. Un système de pompage hybride :.....	13
1.4. Conclusion :.....	14
Chapitre 2	16
2.1. Introduction :.....	17
2.2. Modélisation d'un GPV :.....	18
2.2.1 Modélisation d'une cellule :.....	19
2.2.2. Modèle d'un module PV :.....	25

2.3.	Modélisation des convertisseurs de la chaîne de pompage :.....	27
2.3.1.	Modélisation du convertisseur DC/DC :.....	27
3.2.1	Modèle mathématique :	29
2.4.	Modélisation de L'onduleur :.....	30
2.4.1.	La commande MLI sinus-triangle :.....	32
2.4.1.1.	Equations des signaux de références :.....	33
2.4.1.2.	Equations des états des interrupteurs de l'onduleur :.....	34
2.5.	Modélisation de la machine synchrone :.....	35
2.5.1.	Présentation de la machine synchrone :	35
2.5.2.	Hypothèses simplificatrices :.....	36
2.5.3.	Mise en équation de la machine synchrone dans le système triphasé (a, b, c) :.....	37
2.5.4.	Modelé de la machine dans le système biphasé :	39
2.6.	Modélisation de la pompe centrifuge :.....	41
2.6.1.	La Hauteur Manométrique HMT :.....	43
2.6.2.	Puissance Hydraulique :	45
2.6.3.	Rendement :	45
2.6.4.	Couple résistant :	45
.2.7	Conclusion :.....	46
Chapitre 3	47
3.1.	Introduction :.....	48
3.2.	Commande cote source photovoltaïque :	48
3.2.1.	Principe de la méthode de perturbation et d'observation :.....	50

3.3.	Régulation du bus continu [27]:.....	52
3.4.	Commande vectorielle du MSAP :.....	53
3.4.1.	Stratégie de la commande vectorielle de la MSAP :	53
3.4.2.	Découplage par compensation :	54
3.4.3.	Synthèse des différents régulateurs.....	56
3.4.3.1.	Régulation du courant i_d :	57
3.4.3.2.	Régulation du courant i_q :	59
3.4.3.3.	Régulation de la vitesse :.....	59
3.5.	Conclusion :.....	61
	Chapitre 4	63
4.1.	Introduction :.....	64
4.2.	Résultats des caractéristiques d'un module solaire :.....	64
4.2.1.	Pour les conditions standards :.....	64
4.2.2.	Pour un éclairement variable	66
4.2.3.	Pour une température variable :	67
4.3.	Performance coté générateur photovoltaïque :	68
4.3.1.	Résultats de simulation :.....	69
4.4.	La commande vectorielle de la MSAP :.....	73
4.4.1.	Interprétation des Résultats :.....	76
4.5.	Modèle de la pompe centrifuge :.....	77
4.6.	Caractéristiques d'une pompe centrifuge :	78
4.6.1.	Caractéristique Débit –vitesse :	78
4.6.2.	Caractéristiques couple - vitesse :.....	79

4.6.3.	Caractéristiques Débit - hauteur :.....	80
4.7.	Résultats de simulation du system global :.....	81
4.7.1.	Performances cote GPV :.....	82
4.7.2.	Régulation du bus continu :.....	85
4.7.3.	Résultats de simulation de la commande de la MSAP :	85
4.7.4.	Résultats de simulation cote pompe centrifuge :.....	90
4.8.	CONCLUSION :	93
	CONCLUSION GENERALE	94
	REFERENCs BIBLIOGRAPHIQUES	96
	ANNEXE	100
	Résumé	103

NOTATIONS & SYMBOLES

E : L'irradiation solaire [W/m^2] ;

E_0 : L'irradiation solaire aux conditions standards (STC) .

K_0 : coefficient de température de I_{ph} (donné par le fabricant).

T_0 : Température de la cellule sous les condition standard [$^{\circ}\text{K}$] .

T : température de fonctionnement de la cellule [$^{\circ}\text{K}$] .

V_g : est l'énergie de band gap.

I_{s0} : Courant de saturation de diode sous la condition standard ;

I_{ph} : photo- courant.

V_D : Tension à la borne de la diode.

I_D : courant délivré par la diode.

V_{cell} : Tension la borne de la cellule.

I_{cell} : courant délivré par la cellule.

I_s : Courant de la saturation de jonction non éclairé [A].

V_r : Amplitude de référence.

V_p : Amplitude de la porteuse.

V_{th} : Tension thermique [V].

K : Constant Boltzmann ($8.65 \cdot 10^{-5}$ [$\text{eV}/^{\circ}\text{K}$] = ($1.38 \cdot 10^{-23}$ [$\text{J}/^{\circ}\text{K}$]).

T: Température absolue de la cellule [$^{\circ}\text{K}$].

n : Facteur d'idéalité de la jonction;

L_{ss} : Matrice des inductances propres et des mutuelles entre phases statoriques,

L : Matrice des inductances propres et des mutuelles entre phases statoriques,

M : Matrice des inductances mutuelles entre les phases statoriques et rotor.

L_s : Inductance propre d'une phase statorique.

M_s : Inductance mutuelle entre deux phases du stator.

M_r : Inductance mutuelle entre deux phases du rotor

M'_{sr} : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor.

α : Ecart angulaire entre les axes des phases du stator et du rotor.

J : Moment d'inertie du rotor et des parties tournantes de la machine.

f_r : Coefficient du frottement visqueux.

C_e : Couple électromagnétique.

C_r : Couple de résistant (couple de charge).

ω_r, ω : Vitesse rotorique de moteur.

L_r : Inductance cyclique propre rotorique.

Ph : Puissance communiqué au fluide par la pompe(W).

$Pelec$: Puissance électrique du moteur synchrone (W).

ρ : Masse volumique de l'eau (Kg/m²).

Q : Débit volumique (m³/s).

HMT : Hauteur manométrique totale que doit convaincre la pompe(m)

P_n : Puissance nominale de moteur(W).

g : L'accélération de pesanteur soit $9,81 \text{ m/s}^2$.

P_h : Puissance hydraulique.

η_m : Rendement de groupe motopompe (%).

P_{elec} : Puissance électrique du moteur asynchrone (W)

ρ : Masse volumique de l'eau (Kg/m^3).

Q : Débit volumique (m^3/s).

P_n : Puissance nominale de moteur (W).

V_{ref} : Amplitude de référence.

N_e : niveau d'eau.

H_r : la hauteur de refoulement.

d : la distance entre le réservoir et le puit.

P_c : pertes de charge.

ΔH_1 : les pertes de charges linéaires.

ΔH_2 : les pertes de charges singulières.

λ : Coefficient de pertes de charges linéaires.

L : Longueur de la tuyauterie (m).

D : Diamètre de la tuyauterie (m).

v : Vitesse moyenne du fluide (m/s).

ε : Coefficient de pertes de charges locales.

K_{fr} : Constante de la canalisation.

K_{pd} : est le gain de l'action proportionnelle.

K_{id} : est le gain de l'action intégrale.

T_{id} : est la constante du temps d'intégration.

τ : est le constant du temps en boucle fermée.

ω_n : Pulsation propre du système.

ξ : Coefficient d'amortissement.

s : Opérateur de Laplace.

GPV : générateur photovoltaïque

PV : photovoltaïque

PPM : Point de Puissance Maximale

MPPT: Maximum Power Point Tracking

DC: Direct current

AC: Alternating current

P&O: Perturb and Observe

V_{oc} : Tension de circuit ouvert [V]

I_{cc} : Courant de court-circuit [A]

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion

I_m : Courant Optimal.

V_m : Tension Optimale.

PID : Proportionnel Intégral Dérivé.

P_m : Puissance générée par le panneau PV.

P_i : Puissance incident sur le panneau PV.

V_{dc} : la tension de bus continue (entre de l'onduleur).

P_{mec} : la puissance transmise à la pompe par MSAP.

LISTE DES FIGURES

Chapitre 01 :

Figure 1.1: Points de stockage des eaux souterraines.	4
Figure 1.2: Proportion mondiale de l'exploitation des énergies renouvelables.	7
Figure 1.3: Principe de fonctionnement du pompage au fil de soleil.	8
Figure 1.4: Principe de fonctionnement du pompage avec stockage.....	10
Figure 1.5: systèmes d'éolienne de pompage mécanique.	11
Figure 1.6: systèmes d'éolienne de pompage électrique.....	12
Figure 1.7 : Système autonome hybride photovoltaïque-éolien avec stockage électrochimique pour le pompage d'eau.....	14

Chapitre 02 :

Figure 2. 1 : Le schéma synoptique de la chaine de pompage	18
Figure 2. 2 : Schéma équivalent à une cellule idéale.	19
Figure 2. 3 : Schéma équivalent d'une cellule réelle.	20
Figure 2. 4 : Association des cellules en série et en parallèle.	27
Figure 2. 5 : Schéma électrique d'un hacheur Boost.....	28
Figure 2.6 : Schéma électrique d'un hacheur Boost Durant d'état ON.	29
Figure 2.7 : Schéma électrique d'un hacheur Boos Durant d'état OFF.....	30
Figure 2.8 : Structure de l'onduleur de tension triphasé.	31
Figure 2.9 : Principe de la commande MLI- ST.	33
Figure 2.10 : Modèle de la commande MLI sinus-triangle sous Matlab/Simulink.	35
Figure 2.11 : Représentation de la machine synchrone dans le repère abc.....	37
Figure 2.12 : Machine équivalente au sens de Park.	39
Figure 2.13: Pompe à main absorbante Piston.....	41
Figure 2.14 : Pompe centrifuge.	42
Figure 2.15 : Pompage d'eau dans un réservoir.....	43
Figure 2.16 : Caractéristique de la pompe.	45

Chapitre 03 :

Figure 3.1 : Schéma synoptique de l'étage d'adaptation d'impédance dans un système PV.	49
Figure 3.2: Caractéristique de puissance dans l'algorithme 'Pet O'.	51
Figure 3.3 : Organigramme de la méthode P&O.	51

Figure 3.4: Schéma bloc du régulateur PI.	52
Figure 3.5: Schéma bloc de compensation.	55
Figure 3.6 : Schéma de commande de la MSAP.....	56
Figure 3.7 : Boucle de régulation du courant statorique direct.....	57
Figure 3.8 : Boucle de régulation du courant i_q	59
Figure 3.9 : Boucle de régulation de la vitesse.	60
Chapitre 04 :	
Figure 4.1 : Circuit SIMULINK du générateur PV	65
Figure 4.2 : Caractéristiques (I-V) et (P-V) du générateur photovoltaïque.	66
Figure. 4.3: Caractéristiques (I-V) et(P-V) pour un éclairement variable.	67
Figure. 4.4 : Caractéristiques (I-V) et (P-V) pour une température variable.	68
Figure 4.5 : Étage d'adaptation en SIMULINK.	69
Figure 4.6 : Profil de l'éclairement.....	70
Figure 4.7 : La tension d'entrée et de sortie de l'hacheur élévateur.	71
Figure 4.8 : Les courants d'entrée et de sortie du convertisseur (DC/DC).	71
Figure 4.9 : Puissances à l'entrée et en sortie de l'hacheur.....	72
Figure 4.10 : Le rendement de l'hacheur survolteur.	72
Figure 4.11 : Schéma bloc en SIMULINK de la commande vectorielle avec MSAP.....	73
(a): La vitesse de rotation mesurée avec sa référence.	74
(b): Couple électromagnétique (C_{em}) avec le couple résistant (C_r).....	74
Figure (4.12) : Performances mécaniques de la MSAP.	74
Courants i_{qms} & $i_{qréf}$ - Courants i_{dms} et $i_{dréf}$	75
Figure (4.12) : Courants dans le plan d-q (a) et Courant statorique de la phase-a- (b).....	75
Figure 4.13 : Bloc SIMULINK de la pompe centrifuge.	78
Figure 4.14 : Caractéristiques (Q, ω) d'une pompe centrifuge pour HMT fixe.	79
Figure 4.15 : Caractéristiques couple - vitesse d'une pompe centrifuge.	80
Figure 4.16: Les allures H (Q) de la pompe centrifuge avec la caractéristique de canalisation.	81
Figure 4.18 : Schéma synoptique du système de pompage global.	82
Figure 4.19 : Points de fonctionnement du système de pompage photovoltaïque pour éclairement variable ($T=25^\circ C$). Avant et Après optimisation.....	83
Figure.4.20.a: Tension du générateur PV	84
Figure.4.20.b: Courant du générateur PV.....	84
Figure.4.20.c: La puissance délivrée par le générateur PV.	84

Figure 4.21 : La tension du bus continue avec sa référence.	85
Figure.4.22. a : La vitesse de rotation mesurée avec la vitesse de référence.	87
Figure.4.22. b : Le couple électromagnétique avec le couple résistant	88
Figure.4.22.c : Le courant i_d et sa référence.....	88
Figure.4.22. d : Le courant i_q et sa référence.....	88
Figure.4.22. e: Courant $i_{sa}(t)$ et un zoom de la période (1)	89
Figure 4.23. a : Débit de la pompe $Q(t)$	91
Figure 4.23. b : Hauteur manométrique de la pompe $H(t)$	91
Figure .4.23.c : La puissance de la pompe (t).....	92

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 01 :

Tableau 1.1 : Disponibilité des ressources en eau.....3

Chapitre 02 :

Tableau 2. 1 : Les conditions nominales et les conditions de test standard.....20

Chapitre 04 :

Tableau 4.1: Paramètres électriques du module PV.....65

INTRODUCTION GENERALE

Les énergies renouvelables telle que l'énergie solaire, le vent, l'eau et la chaleur de la terre sont un pilier essentiel du développement humain dans le passé, le présent et le seront dans le futur. L'eau et le soleil sont des éléments de notre vie quotidienne, là où la demande en eau augmente, en particulier dans les zones reculées et désertiques, comme le sud de l'Algérie. Pour résoudre le problème du développement durable, l'utilisation de l'énergie solaire (photovoltaïque ou thermique) est efficace pour le problème du pompage de l'eau surtout par temps chaud, nous obtenons le plus d'énergie solaire.

Le pompage photovoltaïque est l'une des applications les plus prometteuses de l'énergie photovoltaïque, parce que le pompage de l'eau est l'un des facteurs de base du développement des zones reculées, l'utilisation de ce type de système est également fiable ,mais en tenant compte des conditions de dimensionnement du système.

Il existe deux types de ce système, avec ou sans batteries, et nous avons choisi le deuxième type dans cette étude. Durant la journée, la pompe permet de stocker de l'eau dans un réservoir. Nous pouvons approvisionner le consommateur d'eau même en l'absence de soleil (la nuit ou par temps nuageux), où il peut être utilisé dans l'irrigation et les usages domestiques ... etc.

Ce type d'application photovoltaïque s'appelle pompage au "fil du soleil ", c'est simple a mise en œuvre et moins couteux s'il y'avais des batteries. Pour un éclaircissement faible en début de jour, le système commence à pomper de l'eau, tout

en conservant les caractéristiques requises des pompes solaires (débit, pression et rendement).

Dans notre étude, nous nous intéressons à la modélisation et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque, En effet, le présent mémoire est subdivisé en quatre chapitres dont le contenu est succinctement résumé ci-dessous :

Dans le premier chapitre de ce travail, nous traiterons l'importance de l'eau en tant qu'élément de la vie, et sa ressource la plus importante, notamment en Algérie, ainsi que l'importance de l'exploitation des eaux souterraines par application toute sorte de pompage alimentés par les énergies renouvelables, en mentionnant les principes de base de son travail.

Dans le deuxième chapitre, nous modéliserons chaque élément du système de pompage solaire au fil du soleil, en commençant par le générateur photovoltaïque, les convertisseurs statiques, le moteur synchrone a aimant permanent et la pompe centrifuge.

Dans le troisième chapitre, l'optimisation du système a été détaillé via un algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking) 'perturbation et observation'. On termine par la commande vectorielle de la MSAP.

Dans le quatrième chapitre, en exploitant le logiciel MATLAB / SIMILINK, on valide l'étude théorique par une simulation complète de ce système suivi d'une interprétation des résultats.

Chapitre 1

Généralités sur les systèmes de pompage photovoltaïque

1.1. Introduction :

L'eau est un élément important et essentiel dans la vie des organismes vivants sur Terre. Les gens en ont de plus en plus besoin en raison de son importance dans plusieurs domaines clés :

- Industrie : Il s'agit d'un élément clé de plusieurs composants chimiques (médicaments, matériaux de nettoyage... Etc.), Il est également utilisé dans de nombreuses opérations telles que le refroidissement, le transfert de chaleur et la production d'électricité dans les stations et autres.
- Agriculture : utilisé dans l'arrosage des terres agricoles et pour arroser les animaux pastoraux.
- Autres utilisations humaines : cuisiner, boire, nettoyer... Etc.

On sait que l'eau a deux sources principales : les eaux de surface et les eaux souterraines. Cependant, bien qu'existant en quantité abondante, seule une petite portion de cette eau est réellement disponible pour la consommation humaine ou animale. Les eaux salées des mers et des océans représentent près de 97% du volume total d'eau de notre planète, et une grande partie des 3% restants se trouve bloquée sous forme de neige, de glaciers ou d'eaux souterraines profondes.

La quantité d'eau douce sous forme liquide représente environ 0,6% du volume total d'eau, dont seulement 0,014 % est facilement exploitable en tant qu'eaux de surface ou nappes phréatiques peu profondes. Cette ressource n'est d'ailleurs pas répartie équitablement sur la terre, presque la moitié des réserves d'eau de surface se situe en Amérique du Sud et un autre quart en Asie.

La source primaire d'eau douce provient des précipitations. Le total mondial des précipitations est d'environ 500000 km³ par an, dont seul un cinquième de

cette quantité retombe sur les terres. Environ 65 % des eaux de pluies continentales s'évaporent et retournent vers l'atmosphère. Le reste s'écoule dans les rivières et forme les lacs en surface ou s'écoule dans le sol, où elles se stockent éventuellement dans les nappes phréatiques. Ces réserves d'eau peuvent prendre plusieurs centaines, voire des milliers d'années pour se constituer.

- Les nappes d'eau en nord-africain (en Algérie) :

Le tableau (1.1) montre qu'en Algérie, il y a une grande variation dans les rapports de surface et d'eau souterraine et même entre le nord et le sud

Ressource en eau	Taille (1 milliard de mètres cubes)	Site
Eau de surface renouvelable	11	Nord et Sud
Eaux souterraines renouvelables	2.5	Nord
Eaux souterraines non renouvelables	6.1	Sud

Tableau 1.1 : Disponibilité des ressources en eau

Il semble clair que le pays contient un stock important d'eaux souterraines, en particulier dans le sud. La nappe de l'Albien se trouve en grande partie dans le Sahara algérien, elle est la plus grande réserve d'eau douce au monde. Elle contient plus de 50.000 milliards de mètres cubes d'eau douce, l'équivalent de 50.000 fois le barrage de Beni Haroun qui se trouve à l'est du pays et qui alimente six wilayas limitrophes. Cette eau est le résultat de l'accumulation qui s'est effectuée au cours

des périodes humides qui se sont succédé depuis 1 million d'années. La nappe s'étend dans une zone presque deux fois plus grande que la France, entre la Libye, la Tunisie et majoritairement l'Algérie. La répartition territoriale est estimée pour l'Algérie : 70%, pour la Libye : 20% et enfin pour la Tunisie : 10% de m³.

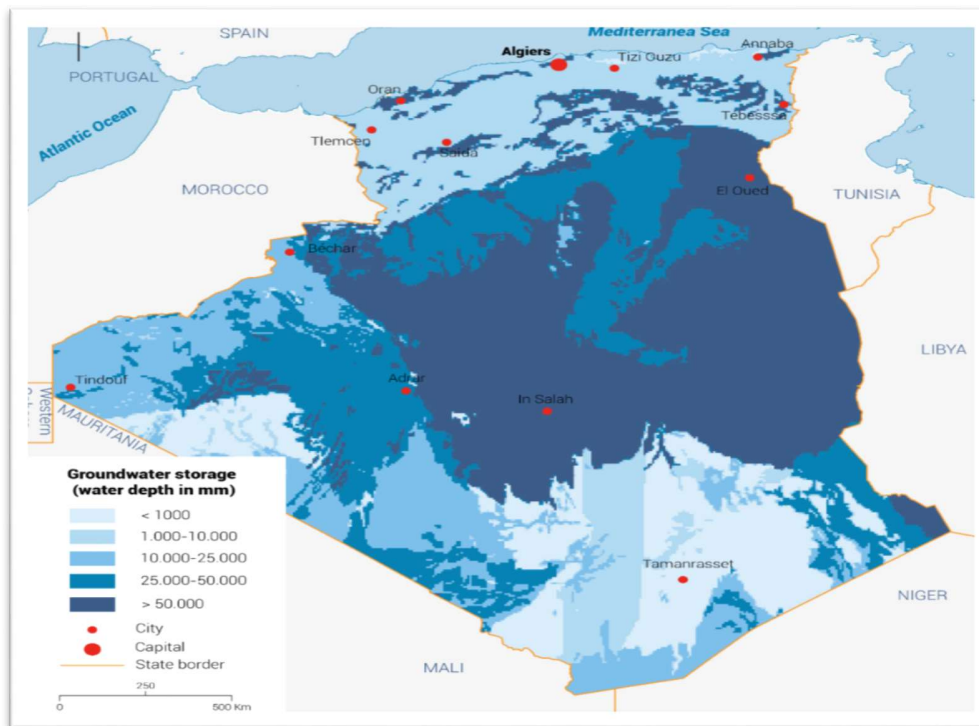


Figure 1.1: Points de stockage des eaux souterraines.

Pour faire face à la pénurie d'eau, l'Algérie adoptent quelques solutions tel que la construction des barrages et les stations de dessalement de mer, mais ses initiatives restent bénéfiques que pour les villes côtières alors que les villes intérieures et au sud ne pourrait bénéficier de cette technologie. Néanmoins avec le pompage des eaux souterraines, les villes intérieures et du sud peuvent lutter contre ce stress hydrique annoncé. L'émergence de pompes électriques pose le problème de leur alimentation avec de l'électricité parce que les puits sont distribués au

hasard, souvent placés à des points éloignés du réseau électrique. Pour remédier à ce problème, une technologie émergente et prometteuse qui associe les sources d'énergies renouvelables aux installations de pompage d'eau présentent une alternative pour contrecarrer l'éloignement des sources d'eau du réseau électrique.

1.2. Généralités sur les énergies renouvelables :

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir, l'augmentation de la consommation d'énergie électrique avec des combustibles fossiles (pétrole, charbon, naturel gaz, etc...) a toujours fourni des coûts adéquats, et en conséquence de nombreux problèmes tels que la crise de l'énergie et plus récemment le changement climatique. Par conséquent, la production d'énergie fossile est responsable de 40% des émissions mondiales de CO₂ des serres et de la durabilité de notre civilisation est gravement menacée par la demande mondiale d'énergie. En effet la recherche d'autres sources d'énergie alternatives est nécessaire pour réduire les émissions de dioxyde de carbone et assurer une énergie sûre, propre et abordable.

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelables les plus utilisées. Elle est totalement gratuite, ne produit aucune pollution, largement disponible, aucune émission d'empreinte carbone, ce qui la rend une source attrayante pour produire de l'électricité destinée aux applications industrielles et domestiques.

La moitié de la population des pays en voie de développement n'ont pas d'accès sûr à l'eau potable. Cette dernière est à l'origine de 80 % des maladies et de la pauvreté dans ces pays. Les efforts pour surmonter ce problème ont donné à des programmes tels que le pompage de l'eau une priorité importante. Dans beaucoup de régions, ce but peut être réalisé seulement par l'utilisation des nappes

souterraines. Dans les régions éloignées des réseaux électriques, il y a des diverses possibilités pour se servir de ces nappes : pompes à main, pompes diesel, pompes solaires, etc.

Aujourd'hui, l'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour le pompage de l'eau est une technologie naissante caractérisée par des coûts graduellement en baisse. Depuis les premières installations à la fin des années 70, les systèmes de pompage solaire ont eu une grande part dans les projets d'application de l'énergie solaire et ils appartiennent de nos jours aux applications les plus significatives de l'énergie photovoltaïque. Ceci peut être principalement attribué au fait qu'il n'est pas économiquement faisable de relier de tels sites éloignés au réseau électrique.

1.2.1. Statistiques :

Les énergies renouvelables devraient voir leurs capacités croître de 50% dans le monde d'ici 2024, tirées notamment par les petites unités solaires, un bond « encourageant », même s'il reste insuffisant pour remplacer les énergies fossiles, selon un rapport de l'Agence internationale de l'énergie (AIE).

Après un tassement en 2018, lié à des réorientations budgétaires en Chine, le secteur est reparti à la hausse avec une croissance à deux chiffres anticipée par l'AIE pour 2019.

Et pour les 5 ans à venir, l'agence prévoit 1.200 gigawatts de capacités nouvelles, soit l'équivalent de la capacité électrique actuelle des Etats-Unis toutes sources confondues.

Poussées par des politiques gouvernementales et la chute des coûts, les renouvelables passeraient ainsi de 26% à 30% de la production d'électricité mondiale (derrière le charbon à environ 34%).

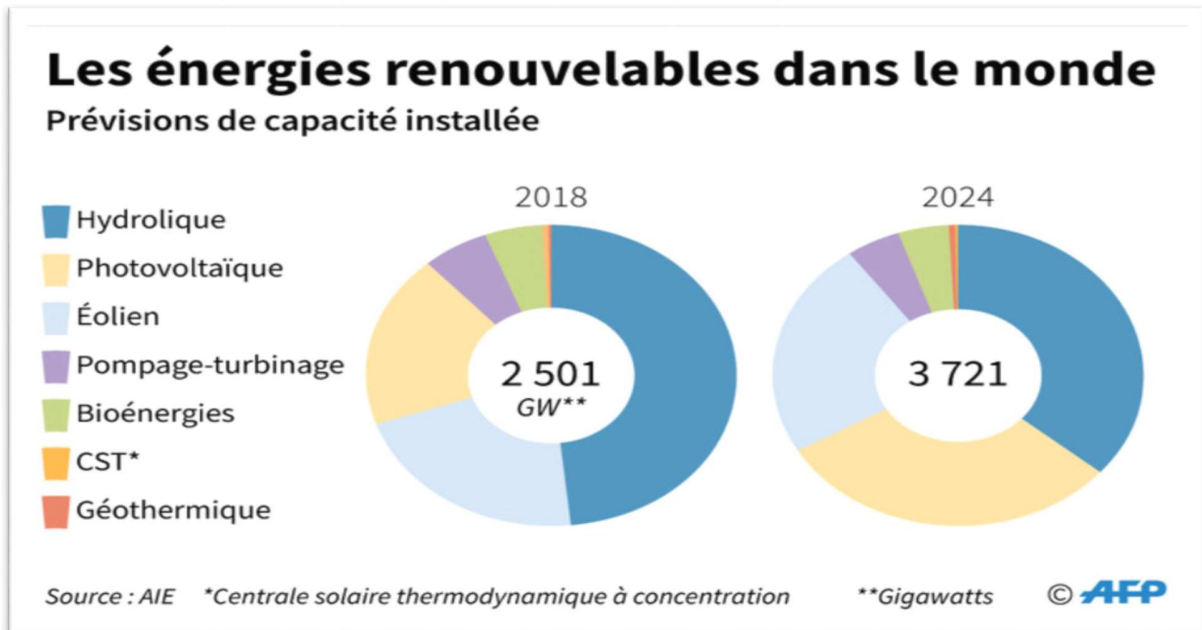


Figure 1.2: Proportion mondiale de l'exploitation des énergies renouvelables.

1.3. Association des énergies renouvelables au pompage d'eau :

L'alimentation en électricité des motopompes par des sources renouvelables est une alternative fiable et économique aux énergies non renouvelables classiques. La variété de ses sources renouvelables et les techniques utilisées, a conduit à l'émergence de plusieurs types de pompage de l'eau. On distingue les principales configurations des systèmes de pompages comme suit :

1.3.1. Systèmes de pompage photovoltaïque :

De nombreuses personnes dans des zones isolées comme les zones rurales et les régions reculées souffrent du problème des pénuries d'eau, en particulier dans les zones désertiques, et même avec des puits de pompage de l'eau posent le problème de l'électricité pour les endroits qui n'atteignent pas le réseau électrique et afin de

résoudre ce problème, le pompage photoélectrique est l'une des meilleures solutions où il adopte un principe relativement simplifié qui est la production d'électricité à travers des panneaux photovoltaïques grâce au rayonnement solaire pour alimenter la pompe, on rencontre deux types de base:

- **Le pompage au fil du soleil**

Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol. Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin. Le pompage au fil du soleil permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple [3], comme la montre la figure 1.4:

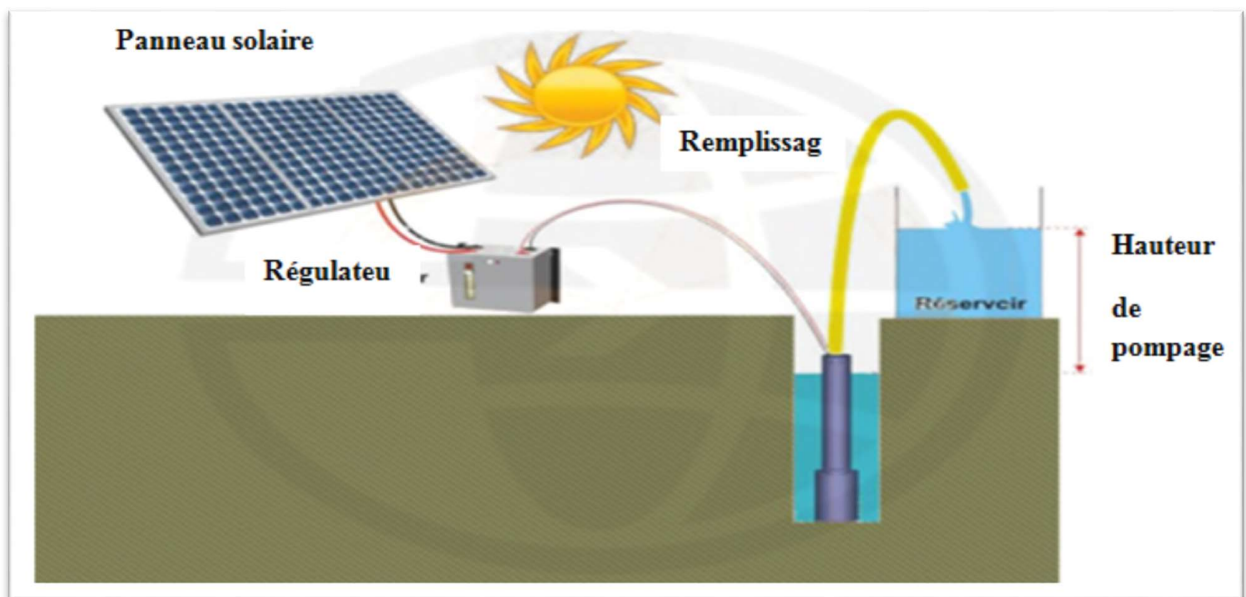


Figure 1.3: Principe de fonctionnement du pompage au fil de soleil.

Le principe de fonctionnement d'une telle installation reste relativement simplifiée avec des panneaux photovoltaïques alimentant une pompe (de surface ou immergée) assistée par un régulateur contrôleur (pouvant être intégré à la pompe selon le fabricant) qui approvisionnent l'eau lorsque les panneaux sont

exposés au soleil. Le pompage au fil du soleil utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation.

Cette solution est moins coûteuse, mais ces pompes n'ont pas un débit constant et ne fonctionnent pas en dessous d'un certain niveau d'éclairement (début et fin de journée), leur rendement étant plus faible en dehors de la puissance nominale de fonctionnement. Selon le type de l'actionneur, Les principaux constituants de ces systèmes sont :

Avec un moteur cc

- Le Générateur photovoltaïque.
- Un convertisseur DC/DC (hacheur).
- Moteur à courant continu.
- Pompe.

Avec un moteur courant alternatif :

- Le Générateur photovoltaïque.
- Un convertisseur DC/DC (hacheur).
- Un convertisseur DC/AC (onduleur).
- Moteur synchrone ou asynchrone.
- Pompe.

• Le pompage avec stockage électrochimique (batteries) :

Très souvent, le pompage photovoltaïque ne correspond pas aux heures d'ensoleillement où nécessite une intensité régulière, ce qui implique un stockage. Le pompage photovoltaïque avec batterie, permet d'assurer une autonomie énergétique, et un débit constant selon la demande [4].

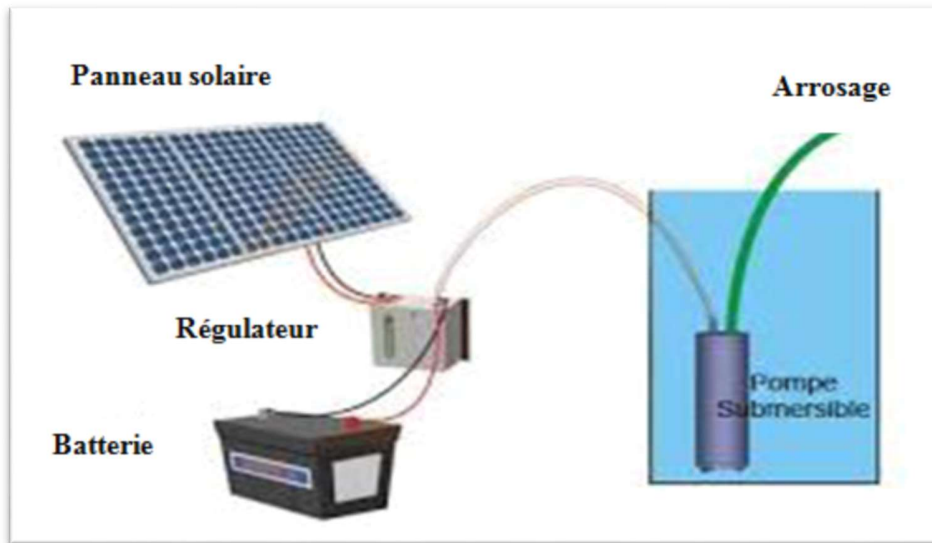


Figure 1.4: Principe de fonctionnement du pompage avec stockage.

Les batteries permettent de stocker l'électricité afin de la restituer en temps voulu. Un régulateur est alors indispensable pour protéger les batteries contre les surcharges ou Les décharges profondes nocives pour sa durée de vie.

1.3.2. Systèmes de pompage éolien :

Les premières éoliennes de pompage étaient des éoliennes mécaniques. Ces dernières années, un nouveau procédé de pompage éolien dit 'pompage éolien électrique' a été mis au point. Dans ces nouveaux systèmes, l'énergie mécanique du rotor est d'abord transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice, qui alimente par la suite, une pompe électrique. A l'origine, le pompage éolien était destiné pour abreuver le bétail dans les prairies et pour la consommation domestique des foyers isolés. Ce n'est que ces derniers temps que l'intérêt pour l'irrigation, s'est vu accru mais pour des petites surfaces [6]. On rencontre les formes suivantes :

- **Éoliennes de pompage mécanique :**

L'éolienne de pompage mécanique traditionnelle utilise un système bielle manivelle monté sur l'arbre du rotor comme le montre la figure (1.5). Elle possède normalement plusieurs pales montées sur un rotor qui tourne relativement lentement. Le système bielle manivelle transforme le mouvement rotatif de la bielle en un mouvement rectiligne alternatif qui commande la pompe à piston installée dans un puits à la base de l'éolienne. Le mouvement alternatif du piston de la pompe assure le pompage de l'eau. Les éoliennes de pompage mécaniques ont leurs avantages et leurs inconvénients. Elles sont d'un entretien facile et d'un coût abordable. La contrainte principale réside dans le fait qu'elles doivent être installées directement au-dessus du puits, même si l'eau doit être utilisée à une certaine distance de ce puits [6].

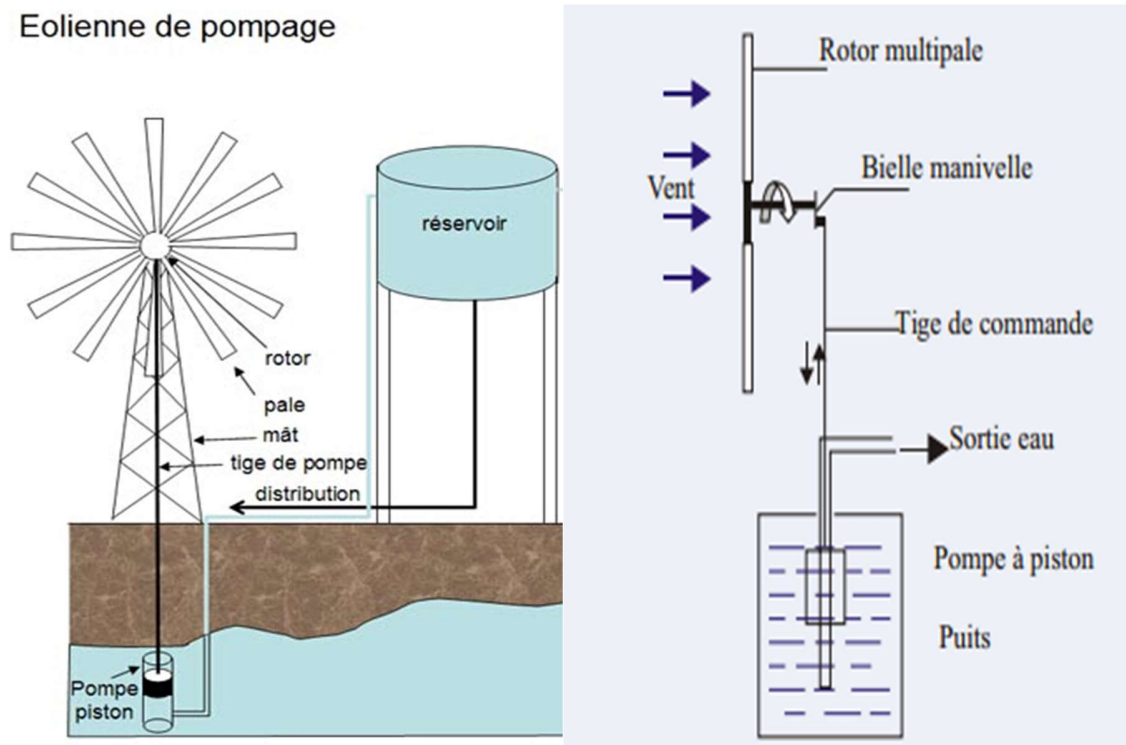


Figure 1.5: systèmes d'éolienne de pompage mécanique.

- **Éoliennes de pompage électrique :**

Dans ce cas, le système éolien électrique n'est pas obligé de se trouver près de la source d'approvisionnement en eau. Le système éolien électrique commande une pompe électrique, (après conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique) qui aspire l'eau de la source (un puits ou un étang) et la refoule à l'endroit de son utilisation (un abreuvoir a bétail, un étang ou un système d'irrigation). La quantité d'énergie consommée par la pompe électrique peut être adaptée à la puissance de sortie de l'éolienne, de manière à ce que l'énergie éolienne soit utilisée efficacement. Les éoliennes de pompage électriques ne comprennent pas de batteries. L'eau est stockée dans un réservoir qui sert de réserve d'énergie. La figure (1.6) montre un système de pompage électrique (eolien) pour le pompage de l'eau [18].

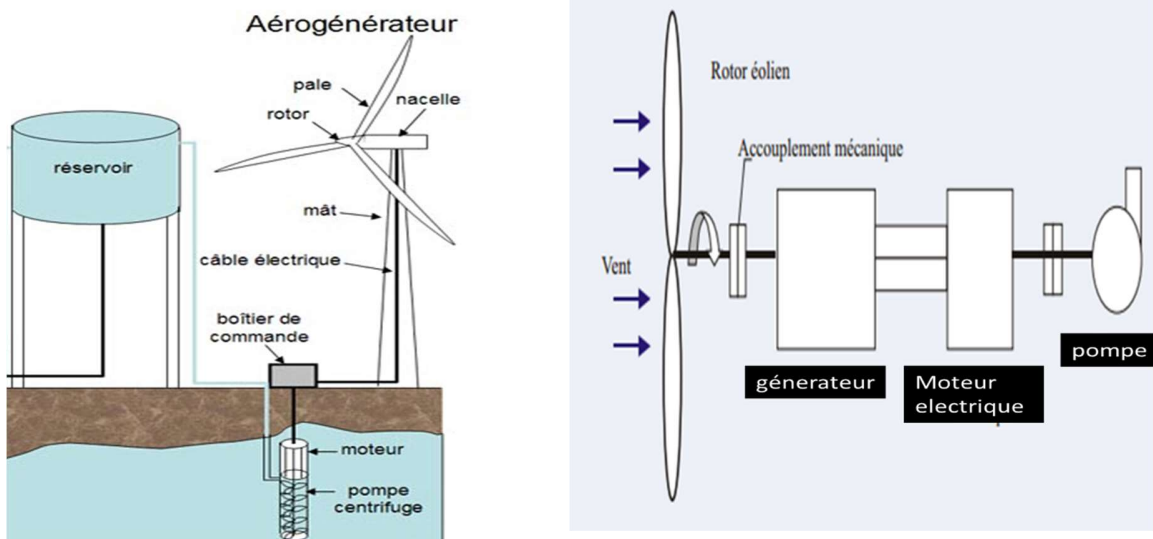


Figure 1.6: systèmes d'éolienne de pompage électrique.

1.3.3. Un système de pompage hybride :

Au cours de la dernière décennie, de nombreuses recherches ont été menées sur l'utilisation de sources d'énergies renouvelables pour le pompage d'eau mais très peu d'études ont été effectuées sur les systèmes hybrides à énergies renouvelables pour pomper l'eau [20]. Il est évident que les énergies éolienne et solaire sont une solution alternative pour l'irrigation des terres agricoles. Toutefois, le principal inconvénient de ces systèmes est lié à leurs caractéristiques stochastiques et intermittentes, ce qui limite leur mise en œuvre en tant que source d'énergie primaire dans les zones rurales [21]. Une solution alternative est de combiner une ou plusieurs sources d'énergie renouvelable pour former un système hybride à énergies renouvelables (SHER).

Les systèmes hybrides conçus pour fonctionner dans les applications agricoles sont plus flexibles et fiables. Une étude sur les préfinances de système de pompage éolien, système de pompage photovoltaïque et système de pompage hybride a été menée en Grèce dans la ville de Xanthi [20]. Les auteurs rapportent que les performances d'un système de pompage hybride sont meilleures que celles des systèmes éolien et photovoltaïque individuellement. On conclut que les systèmes de pompage hybrides sont adaptés pour les petits systèmes de pompage d'eau. En d'autres termes, les systèmes hybrides à énergies renouvelables pour le pompage d'eau présentent un intérêt considérable par leur flexibilité et leur souplesse de fonctionnement.

Il suffit de développer un algorithme de gestion de puissance efficace pour s'adapter aux variations de la vitesse du vent et de l'irradiation solaire. L'objectif de toute stratégie de gestion est d'optimiser l'échange d'énergie et de puissance entre les différents composants du système. La figure (1.7) présente un exemple du

système hybride à énergies renouvelables. Il est composé d'un sous-système photovoltaïque constitué de panneau photovoltaïque et de convertisseur de puissance; d' un sous-système éolien comprenant une turbine éolienne entraînant une génératrice synchrone à aimant permanent et un redresseur; d' un sous-système de stockage d'énergie à court terme, c' est-à-dire des accumulateurs électrochimiques; d' un système de pompage d' eau constitué d' une pompe centrifuge, d' un moteur et d'un réservoir d' eau et enfin des charges électriques domestiques [19].

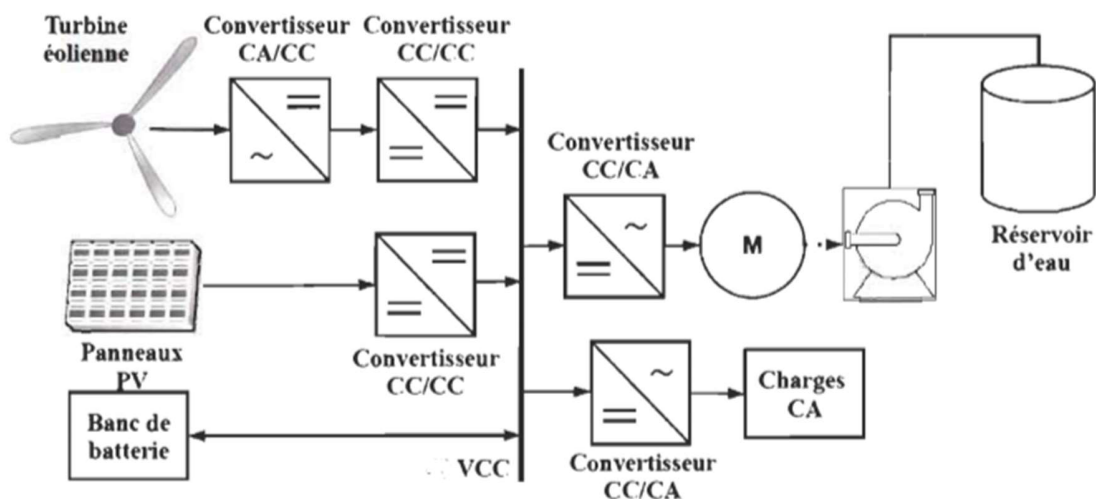


Figure 1.7 : Système autonome hybride photovoltaïque-éolien avec stockage électrochimique pour le pompage d'eau.

1.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté des généralités sur les systèmes de pompage d'eau associés à des sources renouvelables notamment le solaire et l'éolien ainsi que les systèmes hybrides. Ces systèmes de pompage existent sous différentes architectures à une seule source d'énergie tel que les panneaux photovoltaïques et

les éoliennes mais qu'il était possible d'hybrider ces systèmes avec ou sans éléments de stockage.

Ce chapitre nous a donc permis de fixer notre choix sur le pompage d'eau photovoltaïque au fil du soleil. Ce choix est paramétré par :

Le fait que c'est un système qui utilise un stockage hydraulique au lieu d'un stockage électrochimique, moins coûteux et nécessite peu d'entretien. De plus le gisement solaire est abondant en Algérie, donc le choix de l'utilisation des panneaux photovoltaïques comme source est adéquat et enfin l'autonomie du système aide à diminuer le stress hydrique dans les endroits éloignés du réseau, surtout la zone sud de l'Algérie. L'optimisation et la synthèse de la commande de ce système nécessite une modélisation qui sera développée dans le chapitre suivant.

Chapitre 2

Modélisation d'un système de pompage photovoltaïque

2.1. Introduction :

Cette étude porte sur un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil. Malgré que la source photovoltaïque est une source intermittente, notre choix était porté sur un stockage hydraulique au lieu d'un stockage électrique par batteries pour assurer l'approvisionnement en eau aux demandeurs. La figure 2.1 présente le schéma synoptique du système étudié :

- Un générateur photovoltaïque (GPV) associé à un convertisseur DC-DC raccordé au bus continu.
- Un moteur synchrone à aimant permanent alimenté par un convertisseur DC-AC et qui sert à entraîner une pompe centrifuge.
- Une pompe centrifuge.
- Un réservoir d'eau pour stockage de l'eau.

La modélisation d'un système physique conduit à l'établissement des équations mathématiques régissant la dynamique de ce système, d'où un modèle est la représentation mathématique d'une entité réelle et de son fonctionnement :

Quand on dispose d'un modèle, on peut simuler le comportement de cette entité.

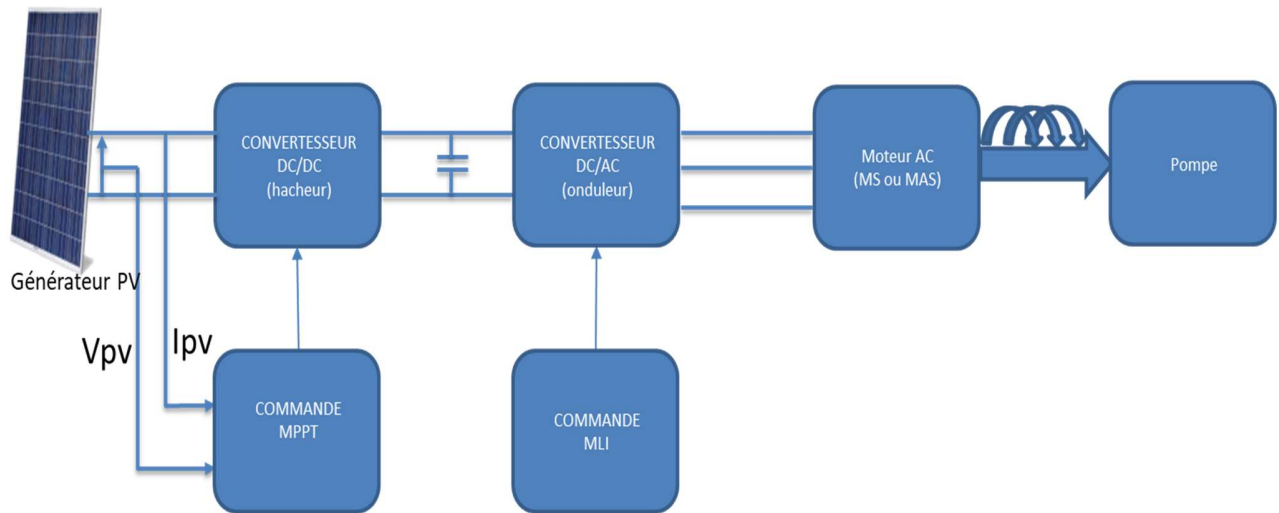


Figure 2. 1 : Le schéma synoptique de la chaîne de pompage

2.2. Modélisation d'un GPV :

L'effet photovoltaïque se manifeste par l'apparition d'une différence de potentiel à la jonction entre un métal et un semi-conducteur ou entre deux semi-conducteurs lorsque le dispositif reçoit un rayonnement lumineux de longueur d'onde adéquate. Ainsi une cellule photovoltaïque peut convertir l'énergie solaire en énergie électrique en mettant en jeu ce phénomène physique optoélectronique. Industriellement les matériaux les plus utilisés sont à base de silicium. Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12 % avec du silicium poly cristallin et enfin 7 à 8% pour le silicium amorphe en films minces. Les caractéristiques ainsi obtenues sont celles d'une photodiode mais en convention générateur.

On présente le modèle à une diode, c'est le modèle sur lequel s'appuient les constructeurs en donnant les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires (data sheets).

Il est aussi considéré satisfaisant et même une référence pour les constructeurs pour cataloguer typiquement les modules solaires. Il tient compte non seulement des pertes en tension exprimées par la résistance série R_s , mais aussi des fuites de courants exprimées par une résistance parallèle R_p .

2.2.1 Modélisation d'une cellule :

C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule solaire, car il ne tient compte que du phénomène de diffusion. Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN. Mais le schéma équivalent réel tient compte de l'effet résistif parasite dû à la fabrication,

Modèle d'une cellule idéale :

Dans le cas idéal, la jonction PN d'un générateur photovoltaïque soumis à un éclairement, peut être schématisée par un générateur de courant en parallèle avec une diode qui représente la jonction P-N de la cellule [5]. La figure (2.1) illustre le circuit électrique équivalent au modèle à une diode.

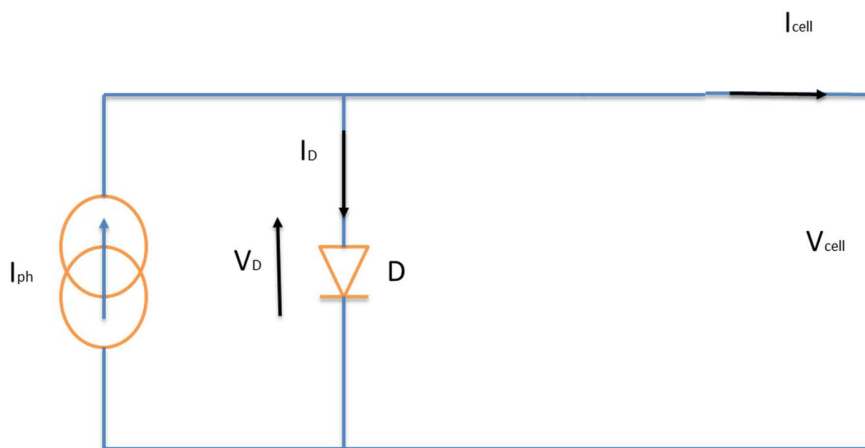


Figure 2. 2 : Schéma équivalent à une cellule idéale.

Le modèle mathématique d'une cellule PV idéal illuminée utilisant la loi de Kirchhoff est donné par l'équation (2.1) suivante :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D \quad (2.1)$$

$$I_D = I_s \times \left[e^{\frac{V_{cell}}{V_{th}}} - 1 \right] \quad (2.2)$$

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \times \left[e^{\frac{V_{cell}}{V_t}} - 1 \right] \quad (2.3)$$

$$V_{th} = \frac{n \times k \times T}{q} \quad (2.4)$$

Modèle d'une cellule réelle :

Pour tenir compte des chutes de tension dans les zone P et N, on doit ajouter une résistance série dans le modèle idéalisé, une résistance série et pour le courant de fuite, une résistance parallèle [3]. La figure (2.3) illustre le circuit électrique équivalent au modèle à une diode avec une résistance shunt.

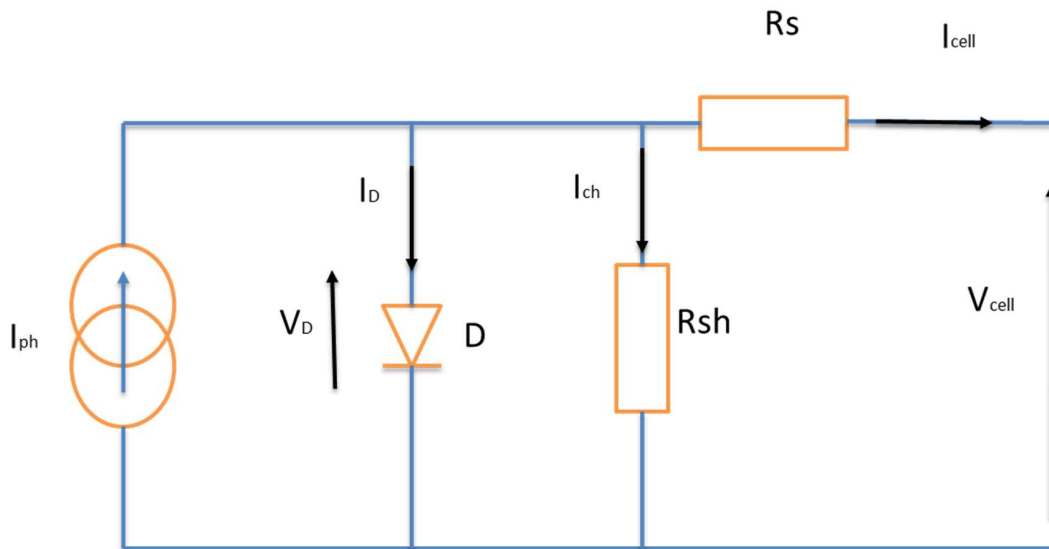


Figure 2. 3 : Schéma équivalent d'une cellule réelle.

Tel que :

Rs : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contacte).

Rsh : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule [6].

D'où l'expression est donnée par l'équation (2.5) suivante :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (2.5)$$

$$I_{sh} = \frac{VD}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

$$VD = V_{cell} + R_s \times I_{cell} \quad (2.7)$$

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \times \left[e^{\frac{V_{cell} + R_s \times I_{cell}}{v_t}} - 1 \right] - \frac{V_{cell} + R_s \times I_{cell}}{R_s} \quad (2.8)$$

Pour une modélisation plus précis de la cellule PV, l'influence du niveau d'éclairement ainsi que celle de la température doivent être présent en compte.

Alors, les paramètres de la cellule sont donné par le fabricant dans des conditions de test standard (STC: Standard Test Conditions) ou nominale comme l'indique le tableau suivant:

Condition nominales	Conditions de Test standard
Eclairement $E_{nom}=800 \text{ W/m}^2$	Eclairement $E_0=1000 \text{ W/m}^2$
Température ambient $T_{a, nom}=20 \text{ }^\circ\text{C}$	Température de la cellule $T_0=25 \text{ }^\circ\text{C}$
Vitesse du vent : 1 m/s	

Tableau 2. 1 : Les conditions nominales et les conditions de test standard.

Sous les conditions nominales, la température de la cellule TNOCT (NOCT: Nominal Operating Cell Température) est mentionnée sur le catalogue du fabricant.

La température de fonctionnement de la cellule T elle dépend de l'éclairement E et de la température ambiante T_a, nom , selon l'équation empirique suivant :

$$T = T_a + \frac{T_{NOCT} - T_{a,nom}}{E_{nom}} \quad (2.9)$$

Le courant photonique est lié à l'éclairement, à la température et au courant photonique mesuré aux conditions de test standard, l'expression suivante représente le courant photonique en fonction de l'irradiation E à température de référence T_0 sous STC [16]:

$$I_{ph(T_0)} = \frac{E}{E_0} I_{cco} \quad (2.10)$$

Le courant photonique dépend aussi de la température, son expression est donnée par :

$$I_{ph} = I_{ph(T_0)} (1 + K_o (T - T_o)) = \frac{E}{E_0} I_{cco} (1 + K_o (T - T_o)) \quad (2.11)$$

Le courant de saturation dépend de la température. Sa valeur pour une température donnée et calculer par l'équation suivant :

$$I_s = I_{so} \left(\frac{T}{T_o}\right)^3 e^{\left(\frac{-qV_g}{nk} \left(\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T}\right)\right)} \quad (2.12)$$

V_g : est l'énergie de band gap.

Iso : Courant de saturation de diode sous la condition standard.

Avec :

$$I_{so} = \frac{I_{cco} + K_o(T - T_o)}{e^{(V_{co} + k_o(T - T_o) / N_s \cdot V_{tho})} - 1} \quad (2.13)$$

Alors le courant généré par la cellule est donné par l'expression :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \times \left[e^{\frac{V_{cell} - R_s \times I_{cell}}{V_t}} - 1 \right] - \frac{V_{cell} - R_s \times I_{cell}}{R_{sh}} \quad (2.14)$$

2.2.1.3. Paramètres caractéristiques d'une cellule solaire :

Ces paramètres sont caractérisés par ceux des modules constituant le champ PV [7] :

- Courant de court-circuit ICC :

Si les deux électrodes sont en court-circuit à travers un ampèremètre, les électrons drainés par un champ interne de la jonction vont donner naissance à un courant de court-circuit I_{cc} qui correspond au photo courant I_{ph} généré par le rayonnement. Pour une distribution spectrale donnée, ce photo courant est proportionnelle à l'irradiation du rayonnement incident et à la surface active de captation. Il définit la quantité de paire électron trou générée G qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion L_n et L_p : Il est obtenu pour une tension de sortie nulle :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \times \left[e^{\frac{R_s \times I_{cc}}{V_{th}}} - 1 \right] - \frac{R_s \times I_{cc}}{R_{sh}} \quad (2.15)$$

- Tension en circuit ouvert VCO :

Si la cellule est laissée en circuit ouvert, les porteurs générés par le rayonnement et séparés par le champ interne vont s'accumuler de part et d'autre de la jonction, induisant une auto polarisation de la jonction dans le sens passant. Cette auto polarisation induit un courant de diode dans le sens direct égal et opposé au photo courant. La tension alors mesurée aux bornes des électrodes est appelée tension de circuit ouvert V_{oc} . C'est la tension qu'il faudrait appliquer à la diode dans le sens passant générer un courant égal au photo courant, Elle est obtenue pour un courant de sortie nul à partir de l'équation (2.10) :

$$0 = I_{ph} - I_s \times \left[e^{\frac{V_{oc}}{V_t}} - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_s} \quad (2.16)$$

- **Facteur de forme FF :**

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale).

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{cc}} \quad (2.17)$$

- **Point de puissance maximale P_m :**

L'utilisation optimale d'une photopile consiste à faire fonctionner une charge sous la tension maximale et à un courant maximal. En effet, suivant la formule $P=V.I$, pour que P soit maximal : il faut être dans les conditions où le produit $V.I$ est maximale, c'est le point de charge idéal de la photopile, ou point de puissance maximale P_m :

$$P_m = V_m \times I_m \quad (2.18)$$

- Rendement énergétique maximum η :

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_i . On appelle rendement maximal le rapport de la puissance maximale fournie (P_m) sur la puissance du rayonnement solaire incident ($P_i = E \times s$) :

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} \quad (2.19)$$

2.2.2. Modèle d'un module PV :

Câblage des cellules photovoltaïques : les cellules sont connectées entre elles par un fins ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+) [8].

2.2.2.1. Association des cellules :

Dans des conditions d'ensoleillement standard, la puissance maximale délivrée par une cellule en silicium de 150 cm^2 est d'environ 2.3 Wc sous une tension de 0.5 V , ce qui est une puissance insuffisante pour la plupart des applications domestiques ou industriels. Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un générateur photovoltaïque. Le passage d'un module à un générateur se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules. Leur rôle est la limitation de la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser les pertes de production associée.

Les constructeurs des cellules photovoltaïques fournissent les paramètres du module sous les conditions standards de fonctionnement. De ce fait un GPV est formé de plusieurs modules photovoltaïques mises en parallèle afin d'augmenter le

courant et/ou, en série afin d'obtenir la tension désirée ; Il en résulte La tension et le courant résultants du GPV [16] :

- **Mis en série :**

Une association de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, figure 2.3. L'équation (2.14) résume les caractéristiques électriques d'une association série de n_s cellules.

$$V_{pv} = N_s \times V_{cell} \quad (2.20)$$

$$V_{co} = N_s \times V_{co} \text{ (d'un cell)} \quad (2.21)$$

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible.

- **Mis en parallèle :**

D'autre part, une association parallèle de N_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, figure 2.4. L'équation (2.16) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_p cellules.

$$I_{pv} = N_p \times I_{cell} \quad (2.22)$$

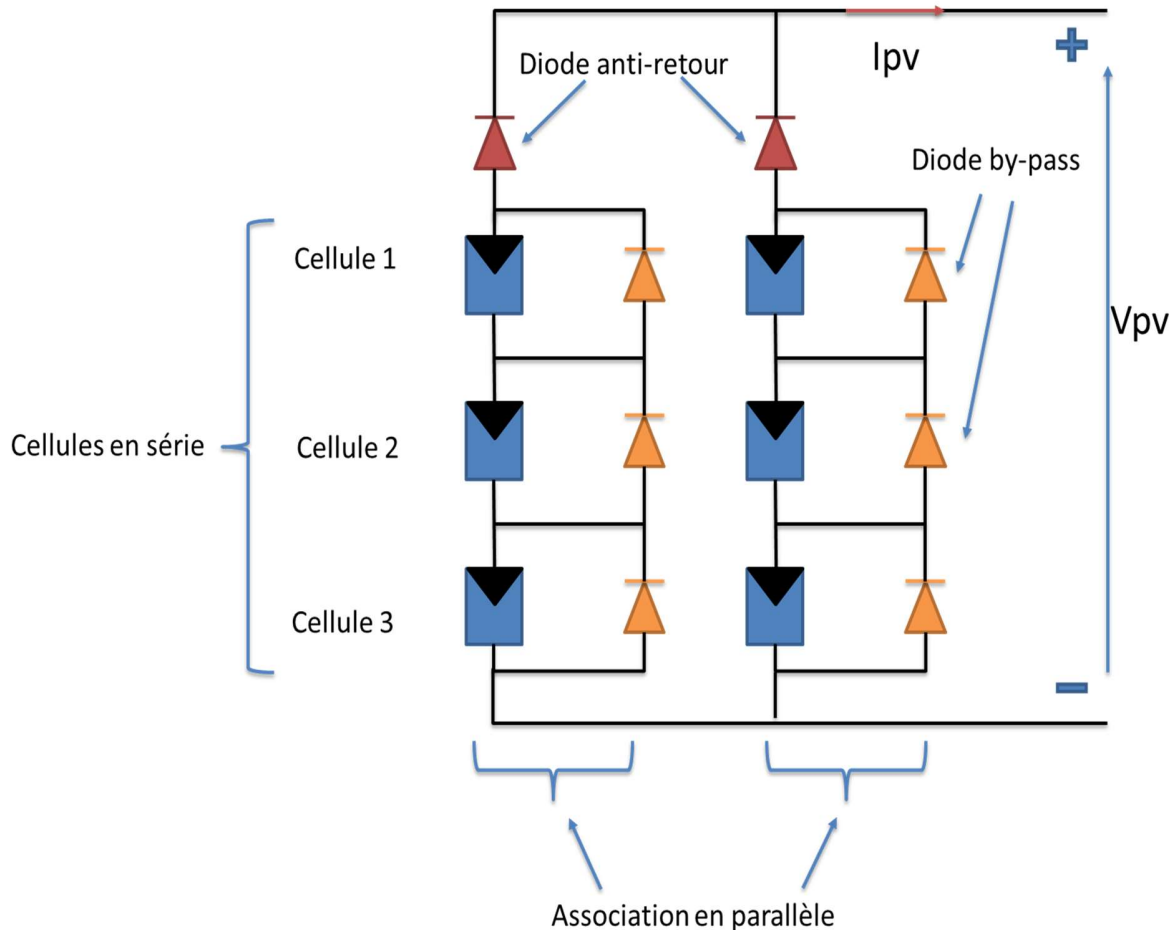


Figure 2. 4 : Association des cellules en série et en parallèle.

2.3. Modélisation des convertisseurs de la chaîne de pompage :

2.3.1. Modélisation du convertisseur DC/DC :

L'hacheur parallèle est appelé aussi hacheur élévateur, hacheur survolteur ou hacheur de type Boost. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur « K »

peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [17].

La modélisation d'un hacheur Boost est représenté dans la figure (2.5) suivant :

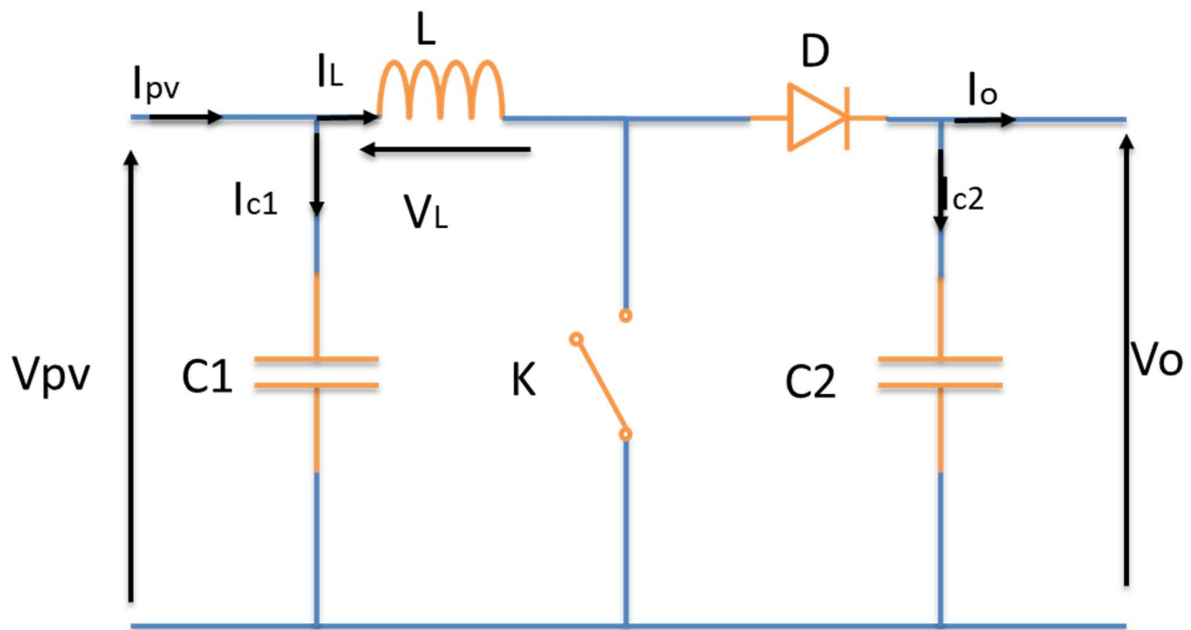


Figure 2. 5 : Schéma électrique d'un hacheur Boost.

- Principe de fonctionnement :

Quand l'interrupteur K est fermé pendant la durée αT , le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Aux deuxième temps $((1-\alpha) T)$, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D [9].

3.2.1 Modèle mathématique :

La modélisation des hacheurs Boost ferme et ouvert :

- Etat ON : le circuit équivalent du convertisseur pendant l'état de fermeture (ON) est représenté sur la figure 2.6.

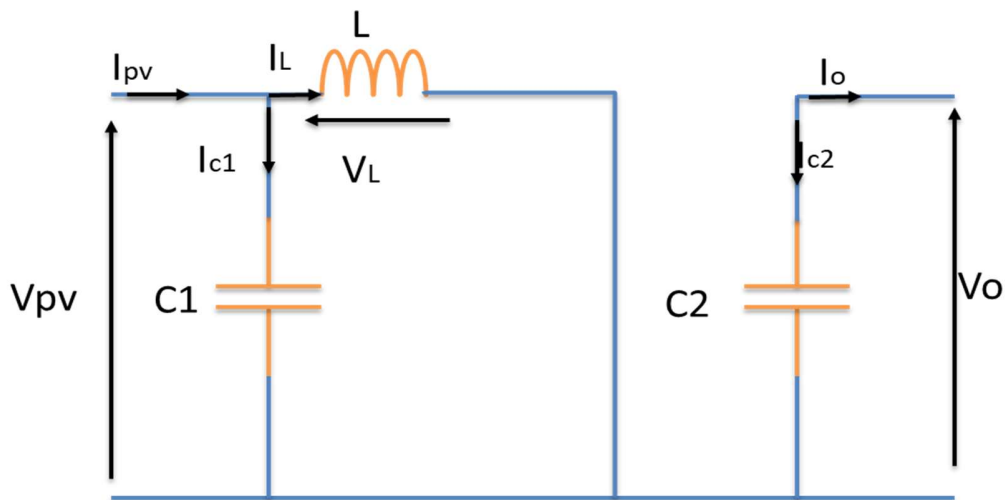


Figure 2.6 : Schéma électrique d'un hacheur Boost Durant d'état ON.

Les formules mathématiques décrivant cette séquence pendant $t_{ON} = \alpha T$ sont données par les équations suivantes :

$$I_{c1} = C_1 \times \left(\frac{dV_{pv}}{dt} \right) = I_{pv} - I_L \quad (2.23)$$

$$I_{c2} = C_2 \times \left(\frac{dV_o}{dt} \right) = -I_o \quad (2.24)$$

$$V_L = L \times \left(\frac{dI_L}{dt} \right) = V_{pv} \quad (2.25)$$

- Etat OFF : le circuit équivalent du convertisseur pendant l'état d'ouverture (OFF) est représenté sur la figure 2.7.

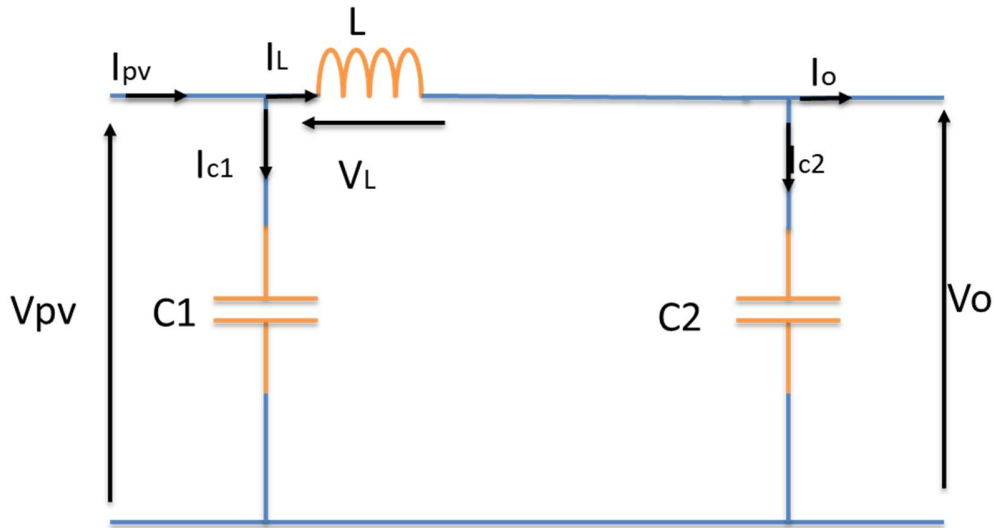


Figure 2.7 : Schéma électrique d'un hacheur Boos Durant d'état OFF.

Les équations mathématiques décrivant cette séquence pendant $t_{OFF} = T - \alpha T$ sont présentée par les équations suivantes :

- Cas 2 : $T_{off} = (\alpha - 1) T$

$$I_{c1} = C_1 \times \left(\frac{dV_{pv}}{dt} \right) = I_{pv} - I_L \quad (2.26)$$

$$I_{c2} = C_2 \times \left(\frac{dV_o}{dt} \right) = I_L - I_o \quad (2.27)$$

$$V_L = L \times \left(\frac{dI_L}{dt} \right) = V_{pv} - V_o \quad (2.28)$$

2.4. Modélisation de L'onduleur :

C'est un onduleur de tension triphasé associé côté bus continu au convertisseur DC/DC et côté alternatif au groupe motopompe comme le montre la figure 2.8 :

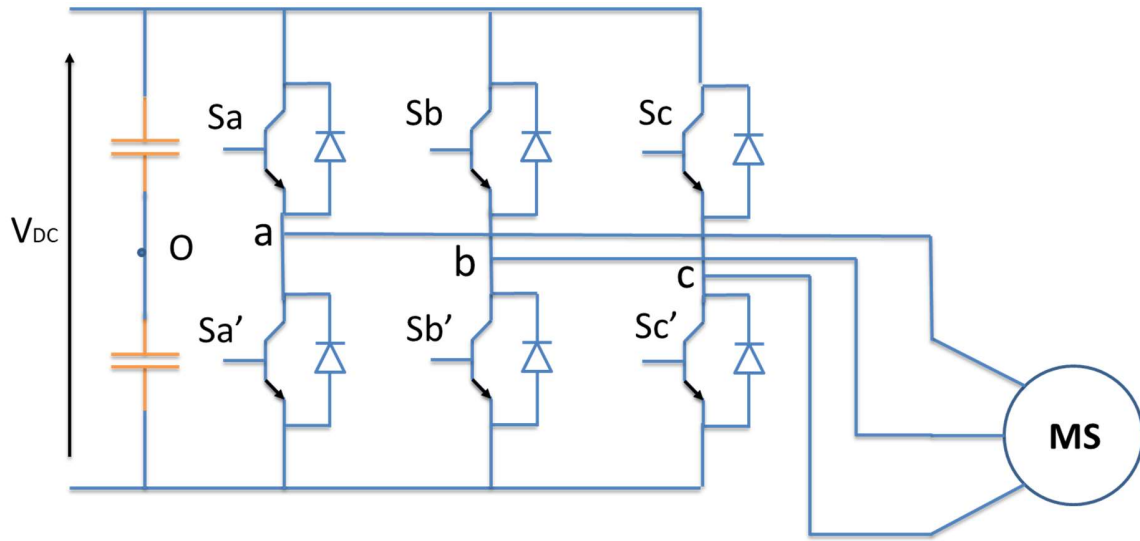


Figure 2.8 : Structure de l'onduleur de tension triphasé.

L'état des interrupteurs, supposés parfaits peuvent être défini par trois grandeurs booléennes de commande S_i ($i=a, b, c$) :

- $S_i = 1$ le cas où l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert.
- $S_i = 0$ le cas où l'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

Les trois tensions composées V_{ab} , V_{bc} et V_{ca} sont définies par les relations suivantes en tenant compte du point fictif « O » :

$$\begin{cases} V_{ab}=V_{ao}+V_{ob} \\ V_{bc}=V_{bo}+V_{oc} \\ V_{ca}=V_{co}+V_{oa} \end{cases} \quad (2.29)$$

Soit « n » le point neutre du coté alternatif (MAS), alors on a :

$$\begin{cases} V_{ao}=V_{an}+V_{no} \\ V_{bo}=V_{bn}+V_{no} \\ V_{co}=V_{cn}+V_{no} \end{cases} \quad (2.30)$$

La charge est considérée équilibrée, il l'en résulte :

$$V_{an}+V_{bn}+V_{cn}=0 \quad (2.31)$$

La substitution nous donne :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (2.32)$$

En remplaçant l'équation (2.30) dans le système d'équation (2.32), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{2}{3}V_{bo} + \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (2.33)$$

Avec:

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{dc}(2S_a - 1) \\ V_{bo} = V_{dc}(2S_b - 1) \\ V_{co} = V_{dc}(2S_c - 1) \end{cases} \quad (2.34)$$

Donc:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

2.4.1. La commande MLI sinus-triangle :

La modulation triangulo-sinusoïdale est appelée également modulation de largeur d'impulsion puisque son principe repose sur l'intersection d'une onde modulante basse fréquence, dite tension de référence, généralement sinusoïdale, avec une onde porteuse haute fréquence de forme, généralement, triangulaire, d'où l'appellation triangulo-sinusoïdale [10].

Le résultat de la comparaison de ces deux signaux sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance.

Deux paramètres caractérisent cette commande si la référence est sinusoïdale :

- L'indice de modulation ' m ' qui définit le rapport entre la fréquence ' f_p ' de la porteuse et la fréquence ' f_r ' de la référence : $m=f_p/f_r$
- Le taux de modulation ' r ' (ou coefficient de réglage en tension ou encore rapport cyclique) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante V_r à la valeur crête V_p de la porteuse : $r=V_r/V_p$

Le principe de fonctionnement de la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI - st) est illustré sur la figure 2.9.

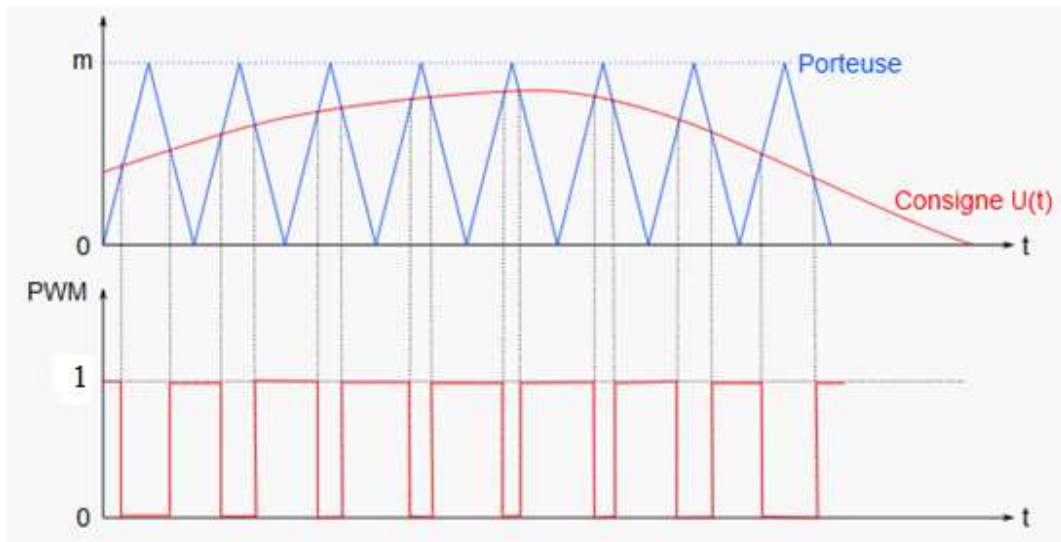


Figure 2.9 : Principe de la commande MLI- ST.

2.4.1.1. Equations des signaux de références :

La référence est un signal sinusoïdal d'amplitude V_r et de fréquence f_r . En triphasé, les trois tensions sinusoïdales de référence sont données par [10]:

$$V_{ar} = V_r \sin(2\pi f_r t)$$

$$V_{br} = V_r \sin(2\pi f_r t - (2\pi/3)) \quad (2.36)$$

$$V_{br} = V_r \sin(2\pi f_r t - (4\pi/3))$$

Equations de la porteuse :

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

$$\begin{cases} X_1(t) = V_p \left(\left(\frac{4t}{T_p} \right) - 1 \right) Si : t \in [0, \frac{T_p}{2}] \\ X_1(t) = V_p \left(\left(-\frac{4t}{T_p} \right) + 3 \right) Si : t \in [\frac{T_p}{2}, T_p] \end{cases} \quad (2.37)$$

2.4.1.2. Equations des états des interrupteurs de l'onduleur :

La commande MLI Sinus-triangle utilise la comparaison avec la porteuse des trois composantes de la tension de référence afin de calculer les états S_a, S_b et S_c des interrupteurs de l'onduleur [10].

Ceux-ci sont donnés par l'équation suivante (2.38):

$$S = \begin{cases} 1 & Si : (V_{rabc} - X(t)) \geq 0 \\ 0 & Si : (V_{rabc} - X(t)) \leq 0 \end{cases} \quad (2.38)$$

La commande MLI sinus-triangle est modélisée sous Matlab/Simulink par le schéma de la figure suivante :

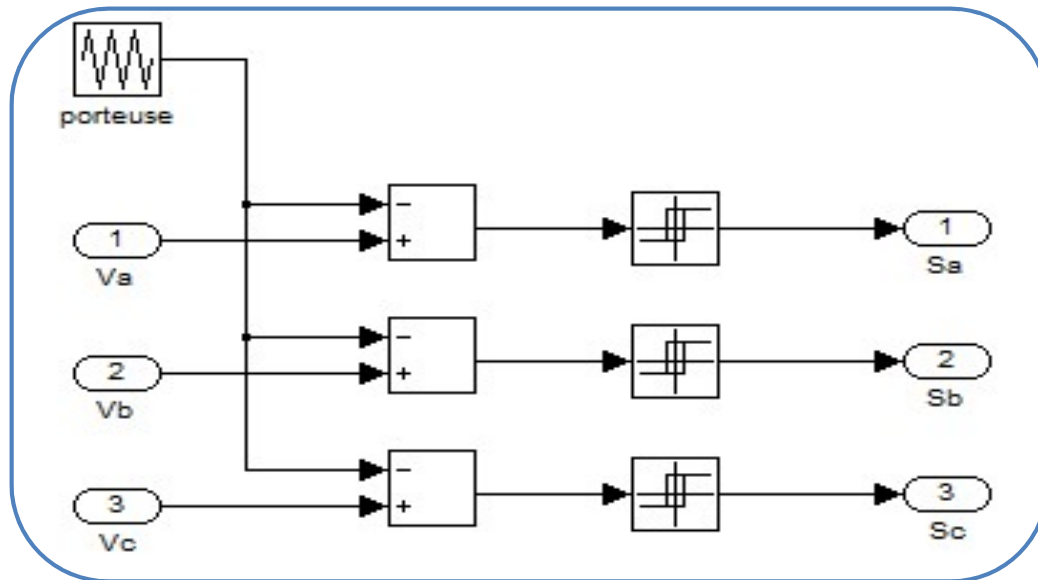


Figure 2.10 : Modèle de la commande MLI sinus-triangle sous Matlab/Simulink.

2.5. Modélisation de la machine synchrone :

2.5.1. Présentation de la machine synchrone :

La machine synchrone à aimants permanents est un dispositif électromécanique qui constitue de deux parties, une partie fixe (stator) et une partie mobile (rotor).

- **Stator :**

Dans des encoches régulièrement réparties sur la face interne du stator sont logés trois enroulements identiques à P paires de pôles, leurs axes sont distants entre eux d'un angle électrique égal à $2\pi/3$, alimenté en triphasé, il produit un champ magnétique tournant à la fréquence d'alimentation.

- **Rotor :**

Le rotor se compose des aimants permanents qui produisent le champ magnétique, leurs vitesses est synchrones avec le champ tournant et ne dépendent que de la fréquence de l'alimentation et du nombre de pôles de la machine.

Ce type de machine possède un bon rendement et a un bon rapport couple/inertie autorisant des accélérations élevées

Les aimants permanents présentent l'avantage d'éliminer les balais, les pertes rotorique et la nécessité d'une source pour fournir le courant d'excitation. Cependant, on ne peut pas contrôler l'amplitude du flux rotorique. Il existe de nombreuses façons de disposer les aimants au rotor.

Les aimants sont montés sur la surface du rotor en utilisant des matériaux adhésifs à haute résistance. Ils offrent un entrefer homogène, le moteur est le plus souvent à pôles lisses. Ses inductances ne dépendent pas de la position du rotor. L'inductance de l'axe d est égale à celle de l'axe q. Cette configuration du rotor est simple à réaliser. Ce type du rotor est le plus utilisé. Par contre, les aimants sont exposés aux champs magnétisant. De plus, ils sont soumis à des forces centrifuges qui peuvent causer leur détachement du rotor. Les machines à aimants permanents peuvent être construites avec plusieurs de configurations rotorique. Leur classification globale en terme du placement des aimants est le suivant :

- Aimants en surface (Surface magnet type)
- Aimants insérés (Inset magnet type)
- Aimants enterrées (Interior magnet type)
- Aimants à concentration de flux (Burried magnet type) [11].

2.5.2. Hypothèses simplificatrices :

Pour simplifier la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) nous adopterons les hypothèses simplificatrices suivantes :

2.5.3. Mise en équation de la machine synchrone dans le système triphasé (a, b, c) :

Pour établir des relations simples entre les tensions d'alimentation du moteur et ses courants, nous considérons le modèle de la machine synchrone suivant :

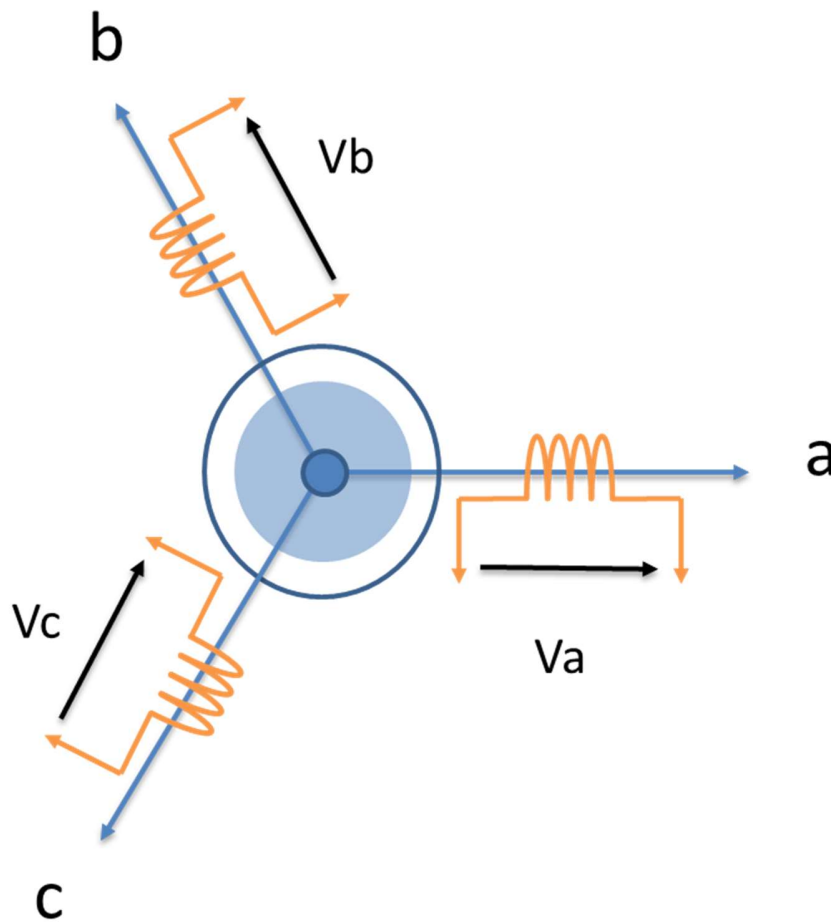


Figure 2.11 : Représentation de la machine synchrone dans le repère abc.
A partir de la figure 2.11, nous écrivons les équations de la machine synchrone dans le repère fixe au stator, en notation matricielle :

- Expression des tension statoriques :

$$[Vs] = [Rs][is] + \frac{d[\varphi s]}{dt} \quad (2.39)$$

- Expression des flux statoriques :

$$[\varphi s] = [Lss][is] + [\varphi sf] \quad (2.40)$$

Avec :

$$[Vs] = [Va \quad Vb \quad Vc]^T \rightarrow \text{Les tension statoriques.}$$

$$[is] = [ia \quad ib \quad ic]^T \rightarrow \text{Les courantes statoriques.}$$

$$[\varphi s] = [\varphi a \quad \varphi b \quad \varphi c]^T \rightarrow \text{Les flux statoriques.}$$

$$[Rs] = \begin{bmatrix} Rs & 0 & 0 \\ 0 & Rs & 0 \\ 0 & 0 & Rs \end{bmatrix} \rightarrow \text{Les résistances statoriques.}$$

$$[Lss] = \begin{bmatrix} La & Mab & Mac \\ Mab & Lb & Mbc \\ Mac & Mbc & Lc \end{bmatrix} \rightarrow \text{Les inductances statoriques.}$$

$$[\varphi sf] = [\varphi af \quad \varphi bf \quad \varphi cf]^T \rightarrow \text{Les flux induit par l'aimant dans les bobines.}$$

- L'équation mécanique :

$$J \frac{d\omega r}{dt} = Cem - Cr - f\omega r \quad (2.41)$$

- Expression des couples électromagnétique :

$$Cem = P \frac{d[\varphi s]}{dt} [is] \quad (2.42)$$

2.5.4. Modelé de la machine dans le système biphasé :

- Application de la transformation de Park :

La transformation de Park est appelée transformation à deux axes, l'application de cette transformation sur la MSAP consiste à une transformation de trois bobines (statoriques) à deux bobines équivalentes reprenant les mêmes aspects en termes de f.m.m, de flux, de couple...etc.

On définit une matrice de transformation pour les courants, tensions et les flux. Elle conserve les puissances et est orthogonale. De plus, on fait l'hypothèse que toutes les grandeurs homopolaires sont nulles. La transformation qui traduit ce passage du système triphasé (a, b, c) au système biphasé (d, q) est donnée par :

$$[X_{dq0}] = [P_\theta][X_{abc}] \quad (2.43)$$

$$[P_\theta] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

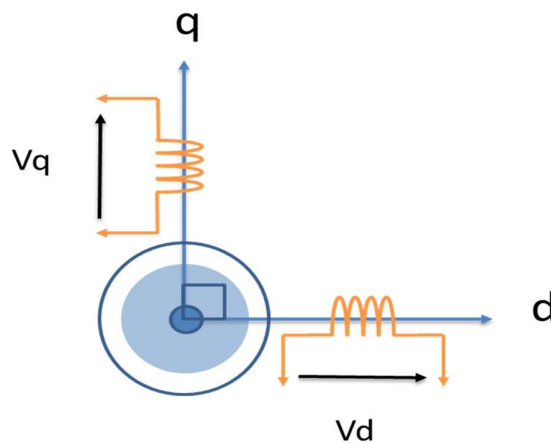


Figure 2.12 : Machine équivalente au sens de Park.

- **Modèle de la MSAP dans le repère (d, q) lié au rotor :**

La figure 2.12 illustre la machine biphasé, équivalente issue de la transformation de Park :

En reportant les transformations dans les expressions des tensions et flux, on obtient :

- Expression des tensions :

$$\begin{aligned}
 [V_{dq}] &= [P_\theta][R_s][i_s] + [P_\theta] \frac{d[\varphi_s]}{dt} \\
 &= [P_\theta][R_s][P_\theta]^{-1}[i_{dq}] + [P_\theta] \frac{d[P_\theta]^{-1}[\varphi_{dq}]}{dt} \\
 &= [P_\theta][R_s][P_\theta]^{-1}[i_{dq}] + [P_\theta] \left[[\varphi_{dq}] \frac{d[P_\theta]^{-1}}{dt} + [P_\theta]^{-1} \frac{d[\varphi_{dq}]}{dt} \right] \\
 &= [P_\theta][R_s][P_\theta]^{-1}[i_{dq}] + [P_\theta] \left[\frac{d\theta}{dt} \frac{d[P_\theta]^{-1}}{d\theta} [\varphi_{dq}] + [P_\theta]^{-1} \frac{d[\varphi_{dq}]}{dt} \right]
 \end{aligned}$$

Avec :

$$[P_\theta][R_s][P_\theta]^{-1} = [R_s]$$

$$[P_\theta] \frac{d[P_\theta]^{-1}}{d\theta} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{et } \frac{d\theta}{dt} = \omega$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} -\varphi_q \\ \varphi_d \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

- Expression des flux :

$$\begin{aligned} [\varphi_{dq}] &= [P_\theta][L_{ss}][i_s] + [P_\theta][\varphi_{sf}] \\ &= [P_\theta][L_{ss}][P_\theta]^{-1}[i_{dq}] + [P_\theta][P_\theta]^{-1}[\varphi_{dqf}] \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varphi_f \\ 0 \end{bmatrix}$$

- Expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = \frac{3P}{2} (\varphi_f i_q + (L_d - L_q) i_q i_d) \quad (2.46)$$

Et finalement :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} \frac{3P}{2} (\varphi_f i_q + (L_d - L_q) i_q i_d) - \frac{1}{J} Cr - \frac{f}{J} \omega r \\ \frac{di_q}{dt} &= -\frac{R}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} \omega i_d - \frac{\varphi_f}{L_q} \omega + \frac{1}{L_q} V_q \\ \frac{di_d}{dt} &= -\frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} \omega i_q + \frac{1}{L_d} V_d \end{aligned} \right. \quad (2.47)$$

2.6. Modélisation de la pompe centrifuge :

En raison de la nécessité urgente d'utiliser les eaux souterraines, le problème de son extraction apparaît, car les humains dépendent des roues manuelles et des pompes hydrauliques classiques.

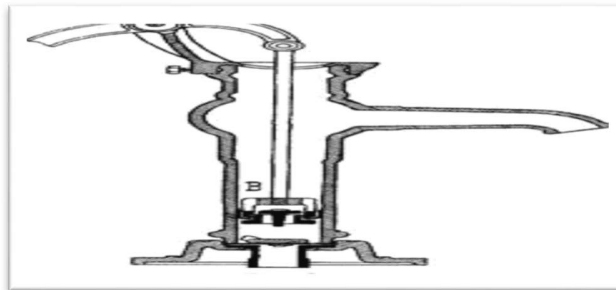


Figure 2.13: Pompe à main absorbante Piston.

Mais en conjonction avec l'émergence de moteurs électriques, qui a été faite pour la première fois en 1888 par le célèbre physicien Nikola Tesla [1], les pompes à eau à propulsion électrique ont par la suite émergé, qui peuvent être classifiées en deux sections principales :

- Les pompes volumétriques.
- Les pompes centrifuges.

Les principes des pompes centrifuges sont la technologie la plus utilisée dans les systèmes de pompage photovoltaïques. Les pompes centrifuges sont conçues pour une tête fixe et leur rendement en eau augmente avec la vitesse de rotation. Les pompes centrifuges sont simples, à prix réduit et sont disponibles pour une large gamme de débit. Dans la présente étude, le principe de base d'opération de la pompe centrifuge et le modèle mathématique sont développés pour décrire son comportement opérationnel [12].

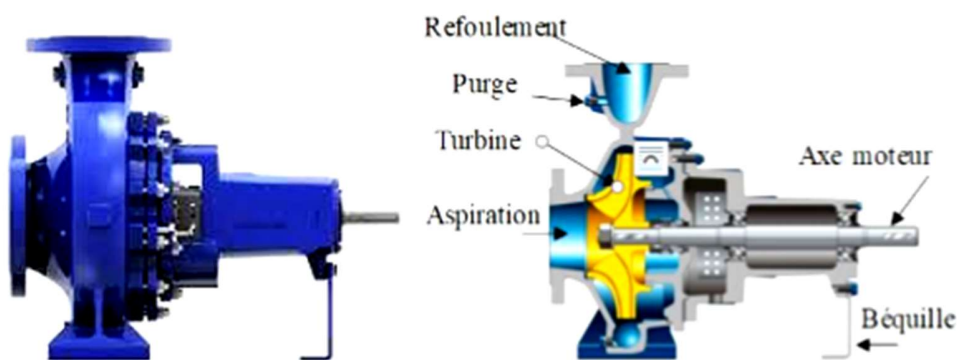


Figure 2.14 : Pompe centrifuge.

2.6.1. La Hauteur Manométrique HMT :

Est la différence de pression en mètres de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement.

$$HMT = \Delta P = H_g + P_c \quad (2.48)$$

$$H_g = N_e + H_r \quad (2.49)$$

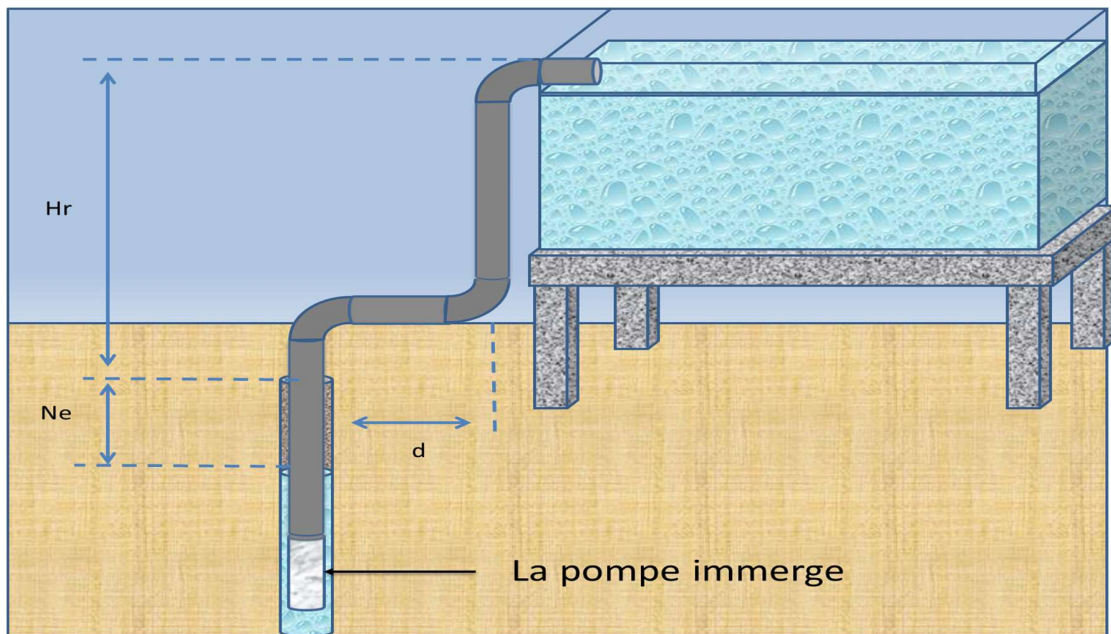


Figure 2.15 : Pompage d'eau dans un réservoir.

H_g : hauteur géométrique entre le point dynamique d'aspiration et la hauteur de refoulement.

N_e : niveau d'eau.

H_r : la hauteur de refoulement.

d : la distance entre le réservoir et le puits.

P_c : pertes de charge.

$$P_c = \Delta H_1 + \Delta H_2 \quad (2.50)$$

ΔH_1 : les pertes de charges linéaires.

ΔH_2 : les pertes de charges singulières.

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (2.51)$$

$$\text{Donc :} \quad \Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \left(\frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) \quad (2.52)$$

$$\Delta H_2 = \varepsilon \frac{v^2}{2g} = \varepsilon \left(\frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) \quad (2.53)$$

$$\text{Alors :} \quad P_c = \left(\lambda \frac{L}{D} + \varepsilon \right) \left(\frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) = K_{fr} Q^2 \quad (2.54)$$

λ : Coefficient de pertes de charges linéaires.

L : Longueur de la tuyauterie (m).

D : Diamètre de la tuyauterie (m).

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

v : Vitesse moyenne du fluide (m/s).

ε : Coefficient de pertes de charges locales.

K_{fr} : Constante de la canalisation.

2.6.2. Puissance Hydraulique :

L'expression générale de la puissance hydraulique est donnée comme suit :

$$P_h = \frac{g \cdot \rho \cdot HMT \cdot Q}{3600} \quad (2.55)$$

ρ : La masse volumique de l'eau étant de 1000kg/m³.

2.6.3. Rendement :

$$\eta_h = \frac{P_h}{P_{ele}} \quad (2.56)$$

2.6.4. Couple résistant :

$$C_r = A \omega_r^2 \quad (2.57)$$

Avec A un coefficient de proportionnalité [(Nm/ (rad.s-1)²] qui est exprimé par l'équation suivante :

$$A = \frac{P_n}{\omega_n^3} \quad (2.58)$$

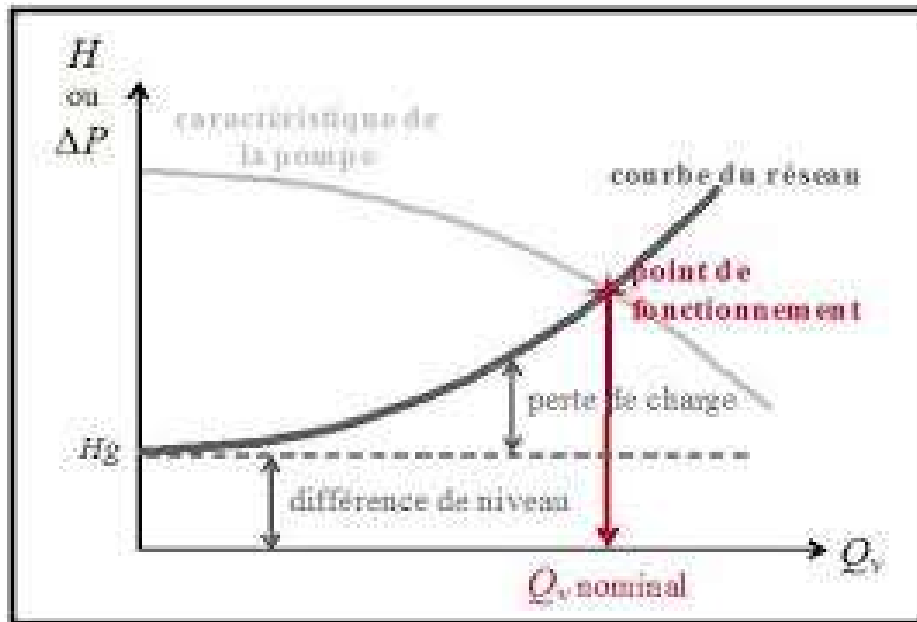


Figure 2.16 : Caractéristique de la pompe.

2.7. Conclusion :

Dans cette chapitre, nous modélisons chaque composant de ce système qui est représenté dans (champ PV, convertisseurs (DC/DC, DC/AC)), moteur asynchrone ; pompe centrifuge). Et c'est en trouvant le modèle mathématique approprié pour chaque composant, cela nous permet d'étudier plus facilement ce système et d'effectuer son processus de simulation sur Matlab.

Chapitre 3

Optimisation et commande de la chaîne de pompage photovoltaïque

3.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on présente la commande du système de pompage d'eau alimenté par une source photovoltaïque. Cette commande permet de piloter les deux convertisseurs statiques introduits, respectivement, cote PV et cote motopompe, et cela pour l'obtention d'une opération optimale du système.

Le dispositif de commande proposé est constitué de trois blocs de contrôle :

- Un bloc de contrôle du premier convertisseur (DC/DC) survolteur associé au générateur PV, il permet la maximisation de la puissance photovoltaïque par application d'algorithme MPPT.

- Un bloc de contrôle du deuxième convertisseur (DC/DC) survolteur en cascade avec le premier, il assure la régulation de la tension du bus continu.

- Un bloc de contrôle en tension du convertisseur (DC/AC), onduleur associé

La machine synchrone à aimants permanents. Les signaux de commande de l'onduleur sont issus d'une commande vectorielle de la MSAP

3.2. Commande cote source photovoltaïque :

Pour permettre une utilisation fiable de cette source il faut une poursuite adéquate des points de puissance maximale de la caractéristique (P-V). Pour ce faire, l'hacheur survolteur doit donc intégrer la fonction MPPT qui permet d'adapter son point de fonctionnement pour garantir l'extraction de la puissance maximale comme le montre la figure (3.1)

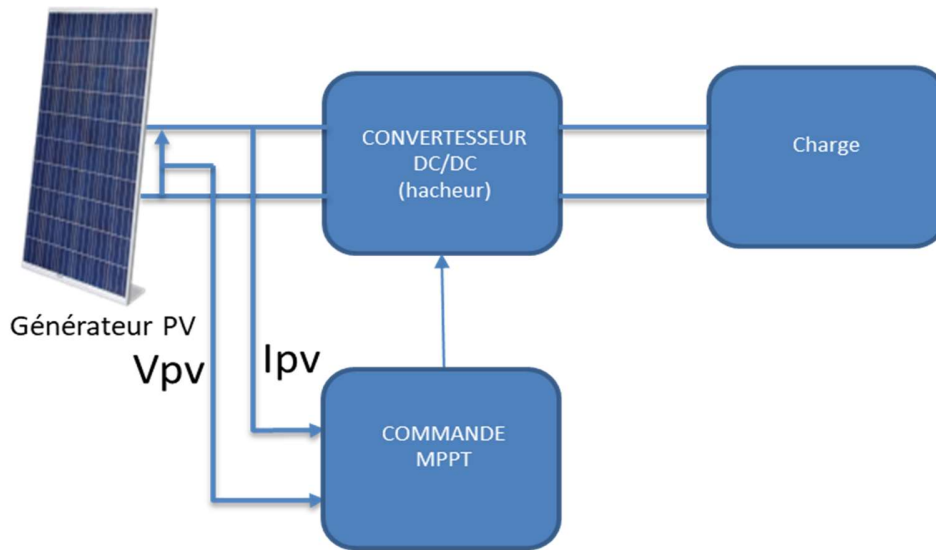


Figure 3.1 : Schéma synoptique de l'étage d'adaptation d'impédance dans un système PV.
Définition du MPPT :

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation) et la variation de la charge, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (VPPM et IPPM). La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir[5].

De nombreuses méthodes MPPT sont développées dans la littérature pour améliorer l'efficacité de ces algorithmes [13]. Dans ce manuscrit, on a choisi l'algorithme le plus populaire pour aboutir à l'extraction maximale, c'est l'MPPT 'perturb and observ' en anglais.

3.2.1. Principe de la méthode de perturbation et d'observation :

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche de MPPT, parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et de courant du PV, V_{PV} et I_{PV} respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température.

Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation de la tension continue de sortie du générateur photovoltaïque et on observe les conséquences sur la puissance de sortie de celui-ci. Si la puissance augmente avec la perturbation incrémentielle, elle continue à faire la perturbation dans le même sens, sinon elle est inversée. En cas d'augmentation de puissance avec la perturbation incrémentielle, le point de fonctionnement serait à gauche du point de puissance maximale. Si une perturbation incrémentielle entraîne une diminution de la puissance, cela indique que le point de fonctionnement se trouve sur le côté droit du MPP. Dans ce cas, il inverse sa perturbation et commence à produire une perturbation préjudiciable de la tension du générateur PV afin de suivre le point de puissance maximale. Une fois le point atteint, il y reste et oscille autour du MPP comme indiqué dans la figure (3.2)

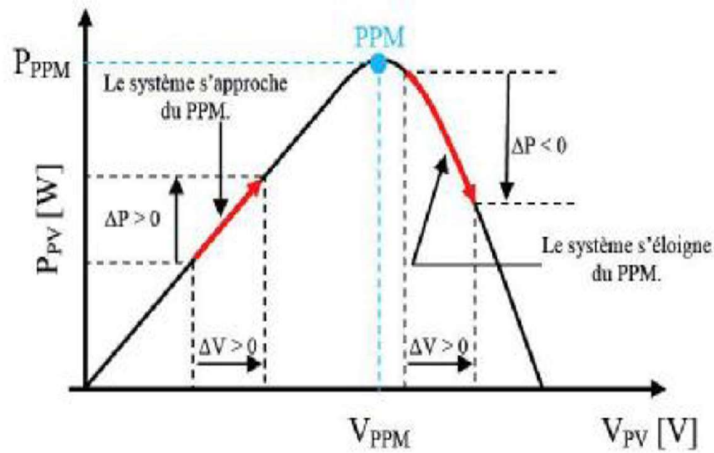


Figure 3.2: Caractéristique de puissance dans l'algorithme 'Pet O'.

On a quatre possibilités de fonctionnement de cet algorithme, selon le signe de $\Delta P_{PV} = P_{PV}(n) - P_{PV}(n-1)$ et $\Delta V_{PV} = V_{PV}(n) - V_{PV}(n-1)$ avec k et $(n-1)$ c'est respectivement l'instant présent et passé, la figure (3.3) résume ces cas de fonctionnement par l'algorithme de cette méthode

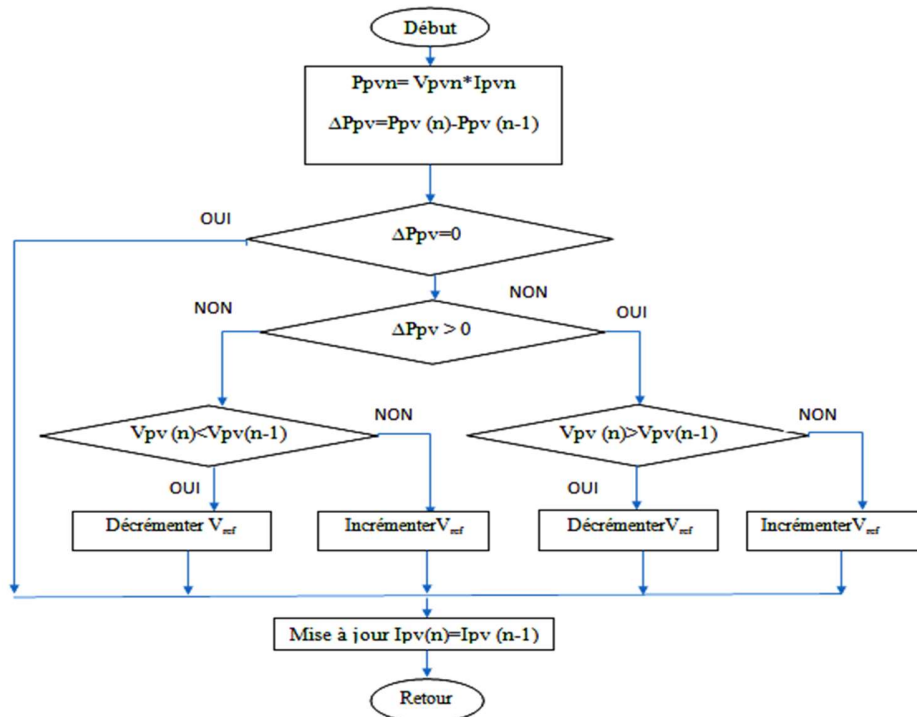


Figure 3.3 : Organigramme de la méthode P&O.

❖ **Avantages et inconvénients de P&O :**

- **Avantages :**

- Structure de régulation simple.
- Nombre des paramètres mesures réduit.

- **Inconvénients :**

- Dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques [15].

3.3. Régulation du bus continu [27]:

Pour réduire les variations et l'instabilité de la tension du bus continu, un régulateur proportionnel-intégral (PI) est proposé pour commander un convertisseur élévateur (DC/DC) comme un deuxième étage dans la chaîne.

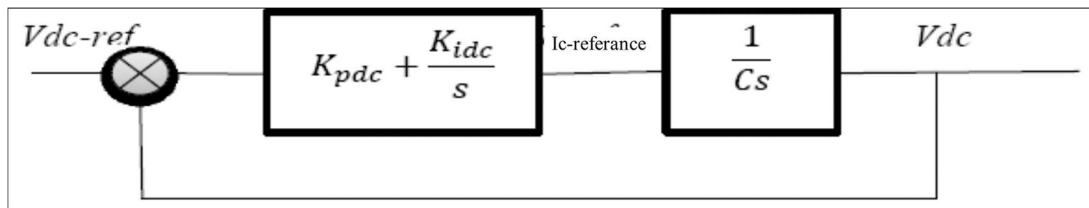


Figure 3.4: Schéma bloc du régulateur PI.

Le régulateur agit via un gain proportionnel K_p , améliorant la dynamique et une quantité d'intégrateur via le gain K_i , pour un bon suivi en régime permanent. Pour identifier les gains du contrôleur, L'équation caractéristique de la fonction de transfert en boucle fermée peuvent s'écrire ainsi :

$$s^2 + \frac{K_{pdc}}{C}s + \frac{K_{fdc}}{C} = 0 \quad (3.1)$$

Par comparaison de cette équation caractéristique à la forme standard du second ordre, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} 2\xi\omega_n = \frac{1}{C}K_{pdc} \\ \omega_n^2 = \frac{1}{C}K_{fdc} \end{cases}$$

Avec : ξ : coefficient d'amortissement.

W_n : pulsation propre du système.

Par un simple placement de pôles, nous pouvons déterminer les valeurs des gains du régulateur k_{pdc} et k_{idc} .

3.4. Commande vectorielle du MSAP :

La difficulté de commander une machine synchrone réside dans le fait que le modèle mathématique de Park est non linéaire multi-variable et fortement couplé.

En 1971, des chercheurs allemands Blashke et Hass ont proposé une nouvelle théorie de commande par l'orientation du champ où le vecteur courant statorique sera décomposé en deux composantes, l'une assure le contrôle du flux et l'autre agit sur le couple et rend sa dynamique identique à celle de la machine à courant continu. La technique est connue sous le nom de la commande vectorielle.

3.4.1. Stratégie de la commande vectorielle de la MSAP :

Le modèle de la MSAP alimenté en tension est donné par les équations suivantes :

$$\begin{cases} J \frac{d\omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f\omega_r \\ V_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + L_d \omega i_d + \varphi_f \omega \\ V_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q \omega i_q \end{cases} \quad (3.2)$$

Avec : $\omega = P\omega_r$

$$C_{em} = \frac{3P}{2} (\varphi_f i_q + (L_d - L_q) i_q i_d) \quad (3.3)$$

Le modèle décrit par les équations précédentes montre que la MSAP est un système multi variable, non linéaire et fortement couplé. Le but principal de la commande vectorielle des machines à courants alternatifs est d'améliorer leurs

comportements statiques et dynamiques grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu.

La machine étudiée est à pôles lisses, son couple électromagnétique est maximal lorsque le courant statorique dans le référentiel de Park est maintenu calé sur l'axe q ($i_s = i_q$). Ceci revient à imposer la composante directe du courant nulle ($i_d = 0$), qui a pour effet la diminution des pertes joule.

Le système d'équations (3.2) est simplifié comme suit :

$$\begin{cases} C_{em} = \frac{3P}{2} (\varphi_f i_q) \\ V_q = R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \varphi_f \omega \\ V_d = -L_q \omega i_q \end{cases} \quad (3.4)$$

On remarque qu'on a éliminé le problème de couplage entre les axes (d, q). Le couple électromagnétique ne dépend que de la composante en quadrature du courant statorique, donc le modèle de la MSAP est réduit au modèle équivalent à la machine à courant continu à excitation séparée.

3.4.2. Découplage par compensation :

L'alimentation en tension est obtenue en imposant les tensions de référence à l'entrée de la commande de l'onduleur. Ces tensions permettent de définir les rapports cycliques sur les bras de l'onduleur de manière à ce que les tensions délivrées par cet onduleur aux bornes du stator de la machine soient les plus proches possible des tensions de référence. Dans les équations statoriques (3.2), les tensions V_d et V_q dépendent à la fois des courants sur les axes (dq), on est donc amené à implanter un découplage [15], donc il faut définir des termes de compensation comme le montre la figure (3.8). Ce découplage permet d'écrire les équations (3.5).

$$\begin{cases} V_q = V_{q1} - e_q \\ V_d = V_{d1} + e_d \end{cases} \quad (3.5)$$

Avec :

$$\begin{cases} e_q = L_d \omega i_d + \varphi_f \omega \\ e_d = -L_q \omega i_q \end{cases} \quad (3.6)$$

Et

$$\begin{cases} V_{q1} = R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} \\ V_{d1} = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} \end{cases} \quad (3.7)$$

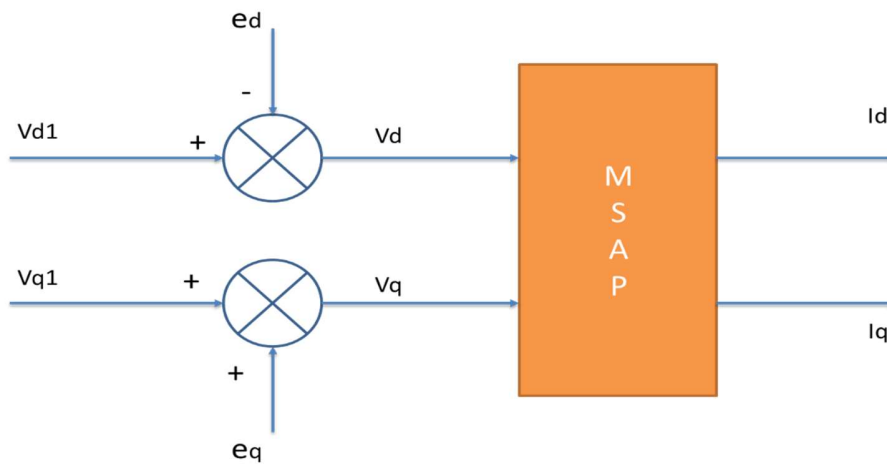


Figure 3.5: Schéma bloc de compensation.

A partir de l'équation (3.8) on peut voir un découplage entre les courants i_d et i_q . Le courant i_d ne dépend que de V_{d1} et i_q ne dépend que de V_{q1} :

$$\begin{cases} i_q = \frac{V_{q1}}{R+sL_q} \\ i_d = \frac{V_{d1}}{R+sL_d} \end{cases} \quad (3.8)$$

s : Opérateur de Laplace.

Le contrôle de la machine synchrone à aimants permanents qui entraîne la pompe d'eau est assuré par une commande vectorielle comportant deux boucles en cascade externe et interne illustré par la figure 3.6 La première boucle est dédiée à la régulation de la vitesse autour d'une valeur de référence, par un régulateur PI. Quant à la seconde boucle, elle a pour rôle via le contrôle des courants direct et en quadrature d'assurer le transfert de toute la puissance générée par le générateur photovoltaïque vers la MSAP. Alors que la référence du courant direct est nulle, le courant en quadrature est issu de la boucle externe. A la sortie des régulateurs, nous obtenons les tensions de référence à imposer à la MSAP via l'onduleur à commande MLI

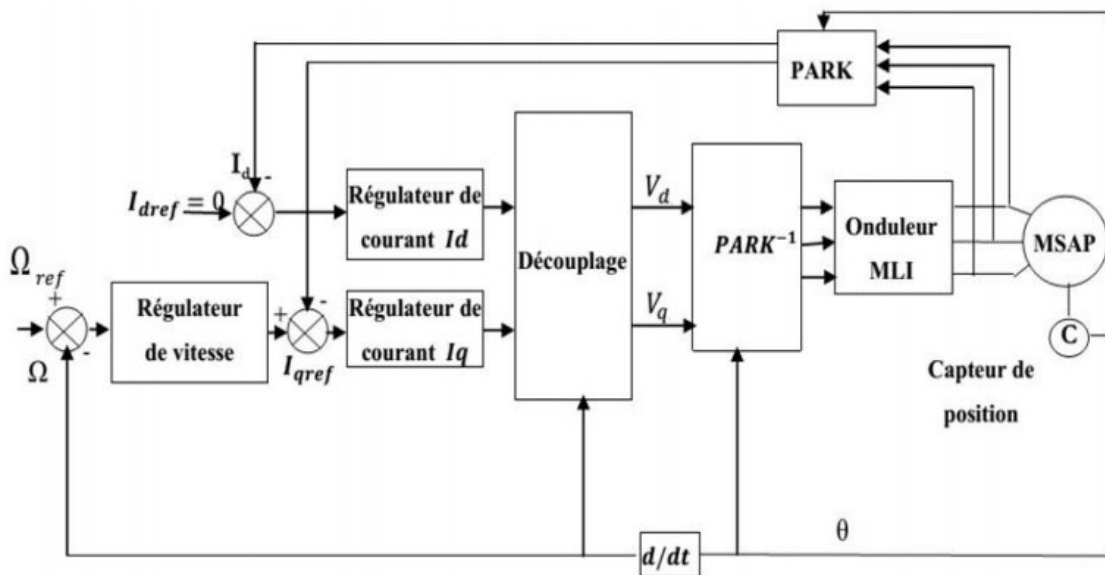


Figure 3.6 : Schéma de commande de la MSAP.

3.4.3. Synthèse des différents régulateurs

Trois régulateurs PI consistent à réguler respectivement les courants statoriques (i_d , i_q) et la vitesse de rotation. Ils comportent une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité avec laquelle la régulation doit avoir

lieu et une action intégrale qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur régulée et la grandeur de consigne.

3.4.3.1. Régulation du courant i_d :

La figure 3.7 montre la boucle de régulation du courant direct. Le courant de référence i_{dr} est maintenu nul, les fonctions de transfert du système et du régulateur PI sont données respectivement par les équations 3.9 et 3.10

$$\frac{i_d}{V_{d1}} = \frac{1}{R+sL_d} = \frac{1}{R} \left(\frac{1}{1+sT_{ed}} \right) \quad (3.9)$$

Avec : $T_{ed} = \frac{L_d}{R}$ (Constante de temps électrique)

$$Reg(PI) = K_{pd} + \frac{K_{id}}{s} = K_{pd} \frac{1+T_{id}s}{T_{id}s} \quad (3.10)$$

Avec : $K_{id} = \frac{K_{pd}}{T_{id}}$

- K_{pd} : est le gain de l'action proportionnelle du correcteur de courant i_d .
- K_{id} : est le gain de l'action intégrale.
- T_{id} : est la constante du temps d'intégration.

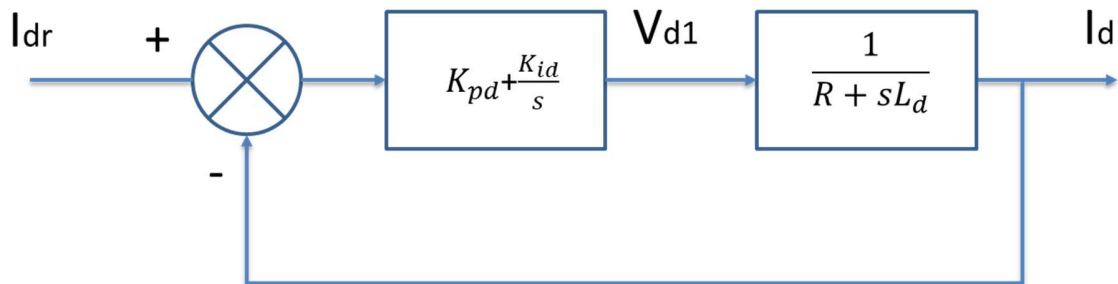


Figure 3.7 : Boucle de régulation du courant statorique direct.
La fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$FTBO = \left(K_{pd} + \frac{K_{id}}{s} \right) \left(\frac{1}{R + sL_d} \right) = K_{pd} \frac{1 + T_{id}s}{T_{id}s} \left(\frac{1}{R} \right)$$

Par l'utilisation de la méthode de compensation des pôles, on aura :

$$1 + T_{id}s = 1 + sT_{ed} \text{ ce qui se traduit par la condition } T_{ed} = T_{id}$$

La fonction en boucle ouverte est réduite à l'équation (3.12) :

$$FTBO = K_{pd} \left(\frac{\frac{1}{R}}{sT_{id}} \right) = \frac{K_{id}}{Rs} \quad (3.12)$$

Pour la fonction de Transfer en boucle fermée est :

$$FTBF = \frac{FTBO}{1 + FTBO} = \frac{1}{1 + \frac{1}{FTBO}}$$

$$FTBF = \frac{1}{1 + \frac{R}{K_{id}}s} \quad (3.13)$$

$$\tau = \frac{R}{K_{id}}$$

τ : est la constante du temps en boucle fermée.

En imposant le temps de réponse : $Tr = 3\tau = 3 \frac{R}{K_{id}}$ (Critère de $\pm 5\%$) donc :

$$K_{id} = \frac{3R}{Tr} \quad (3.14)$$

de la condition précédente ($\frac{K_{pd}}{K_{id}} = \frac{L_d}{R}$), on déduit le gain proportionnel

$$K_{pd} = \frac{L_d K_{id}}{R} = \frac{3L_d}{Tr} \quad (3.15)$$

3.4.3.2. Régulation du courant i_q :

De même pour la régulation du courant i_q figure (3.8), on suit la même procédure pour calculer les gains du régulateur PI (K_{iq} , K_{pq}), avec le courant i_d . Le courant en quadrature de référence i_{qr} est imposé par la boucle de régulation de vitesse.

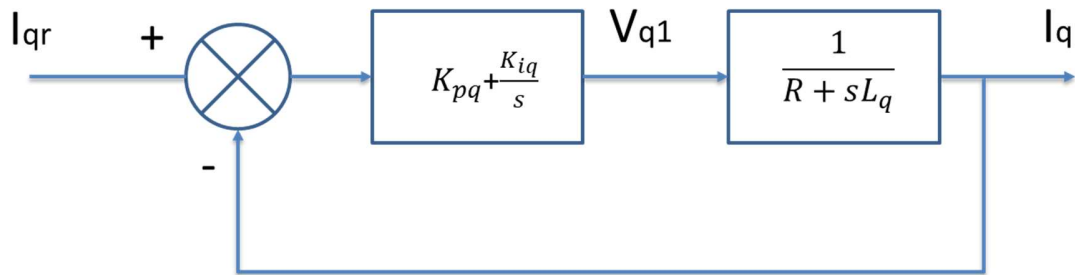


Figure 3.8 : Boucle de régulation du courant i_q .

$$T_r = 3\tau = 3\frac{R}{K_{iq}} \rightarrow K_{iq} = \frac{3R}{T_r} \quad (3.16)$$

$$K_{pq} = \frac{L_q K_{iq}}{R} = \frac{3L_q}{T_r} \quad (3.17)$$

3.4.3.3. Régulation de la vitesse :

$$f\omega_r + J\frac{d\omega_r}{dt} = C_{em} - C_r$$

$$\omega_r = \frac{C_{em} - C_r}{Js + f} = \frac{1}{Js + f}(C_{em} - C_r) \quad (3.18)$$

$$C_{em} = \frac{3P}{2}(\varphi_f i_q) = K i_q \quad (3.19)$$

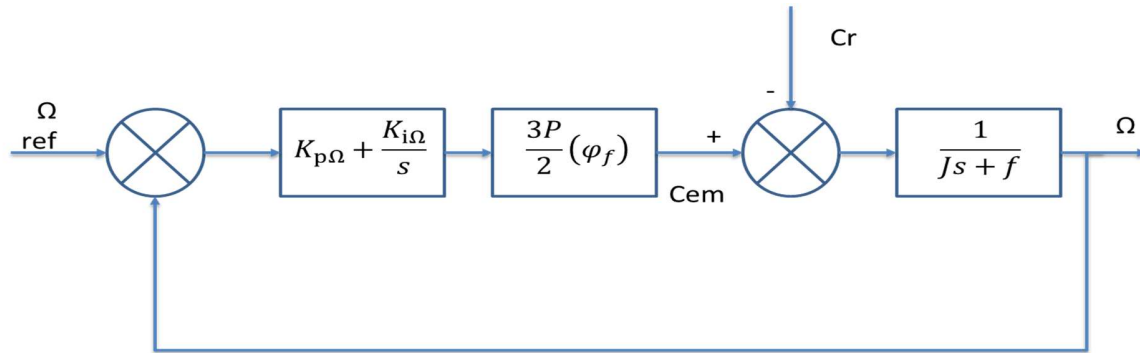


Figure 3.9 : Boucle de régulation de la vitesse.

La fonction de transfert du régulateur de vitesse :

$$K_{p\Omega} + \frac{K_{i\Omega}}{s} = \frac{K_{p\Omega}}{s} \left(s + \frac{K_{i\Omega}}{K_{p\Omega}} \right) \quad (3.20)$$

La fonction de transfert de la vitesse en boucle ouverte est donnée par ($Cr = 0$) :

$$FTBO = \frac{K_{p\Omega}}{s} \left(s + \frac{K_{i\Omega}}{K_{p\Omega}} \right) \frac{3P}{2} \varphi_f \left(\frac{1}{Js + f} \right)$$

$$FTBF = \frac{3P\varphi_f K_{p\Omega} \left(s + \frac{K_{i\Omega}}{K_{p\Omega}} \right)}{2Js^2 + (2f + 3P\varphi_f K_{p\Omega})s + 3P\varphi_f K_{i\Omega}} \quad (3.21)$$

La FTBF possède une dynamique de 2eme ordre, par identification à la forme canonique du 2^{ème} ordre dont l'équation caractéristique est représentée comme suit :

$$\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1 = 0 \quad (3.22)$$

Avec :

ω_n : Pulsation propre du système.

ξ : Coefficient d'amortissement.

Donc :

$$\frac{2J}{3P\varphi_f K_{i\Omega}} = \frac{1}{\omega_n^2} \rightarrow K_{i\Omega} = \frac{2J\omega_n^2}{3P\varphi_f} \quad (3.23)$$

$$\frac{2f+3P\varphi_f K_{p\Omega}}{3P\varphi_f K_{i\Omega}} = \frac{2\xi}{\omega_n} \rightarrow K_{p\Omega} = \frac{4J\xi\omega_n-2f}{3P\varphi_f} \quad (3.24)$$

3.5. Conclusion :

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons étudié l'optimisation d'un système quelconque alimenté par une source photovoltaïque par l'association d'un étage d'adaptation à cette source. Donc nous avons modélisé un convertisseur (DC/DC) élévateur, sa commande est issue d'un algorithme MPPT, permettant de suivre les points de puissance maximale de la caractéristique (P-V) du générateur photovoltaïque.

Une description détaillée d'un algorithme classique, la méthode de perturbation et observation, a été présentée.

Dans la deuxième partie, nous avons présenté la commande vectorielle appliquée à la MSAP, le développement de cette commande vectorielle permet d'atteindre un découplage entre les axes (d et q) ce qui rend la machine synchrone à aimants permanents similaire à la machine à courant continu.

Ce découplage entre le couple et le flux de la machine permet l'amélioration des performances dynamique et statique.

Un calcul détaillé a été effectué sur les paramètres des régulateurs de cette commande, à savoir deux régulateurs de courant direct et en quadrature et enfin un régulateur de la vitesse de rotation

Pour montrer l'efficacité de cette commande sur un système de pompage solaire, des résultats de simulation seront présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Résultats de simulation

4.1. Introduction :

Le coût élevé du générateur photovoltaïque nous impose une utilisation optimale et Rationnelle de ce dernier, afin d'aboutir à un fonctionnement économique et rentable. Pour cela, Nous devons utiliser le générateur photovoltaïque dans la zone où il délivre sa puissance maximale, donc il est indispensable de connaître ses points de puissance optimale pour différents éclairagements et températures.

Le but de ce chapitre est l'optimisation du fonctionnement de système de pompage solaire. A cet effet, l'alimentation du groupe motopompe par un générateur photovoltaïque via un convertisseur est complétée par l'intégration d'un dispositif de suivi de la puissance maximale.

L'étude et la synthèse du système de pompage solaire sont décrites dans le chapitre précédent. L'algorithme de l'optimisation de la puissance et la commande de la MSAP ont été validés par des simulations sous l'environnement du logiciel MATLAB/Simulink 2015. Ces résultats de simulation seront effectués pour vérifier d'une part, que la maximisation de la puissance au niveau du générateur photovoltaïque par l'algorithme 'perturbation et observation' est assurée et la commande de la motopompe permet un stockage d'eau fiable le long d'un profil d'éclairement.

4.2. Résultats des caractéristiques d'un module solaire :

4.2.1. Pour les conditions standards :

Le type du module solaire choisi est **advance solar hydro wind power API156P-200**, d'un nombre de cellule ($N_{cs} = 60$), son modèle est intégré dans la bibliothèque « Simulink » du logiciel « MATLAB 2015 », ces paramètres sont résumés dans le

tableau (4.1). Le schéma de simulation est montré sur la figure (4.1) ou le générateur photovoltaïque est constitué de quatre modules en séries.

Puissance maximale (W)	200.039
Tension a vide (V)	36
Courant de cout circuit (A)	7.75
Tension au point de maximum de puissance (V)	28.7
Courant au point de maximum de puissance (A)	6.97
Nombre de cellules	60

Tableau 4.1: Paramètres électriques du module PV.

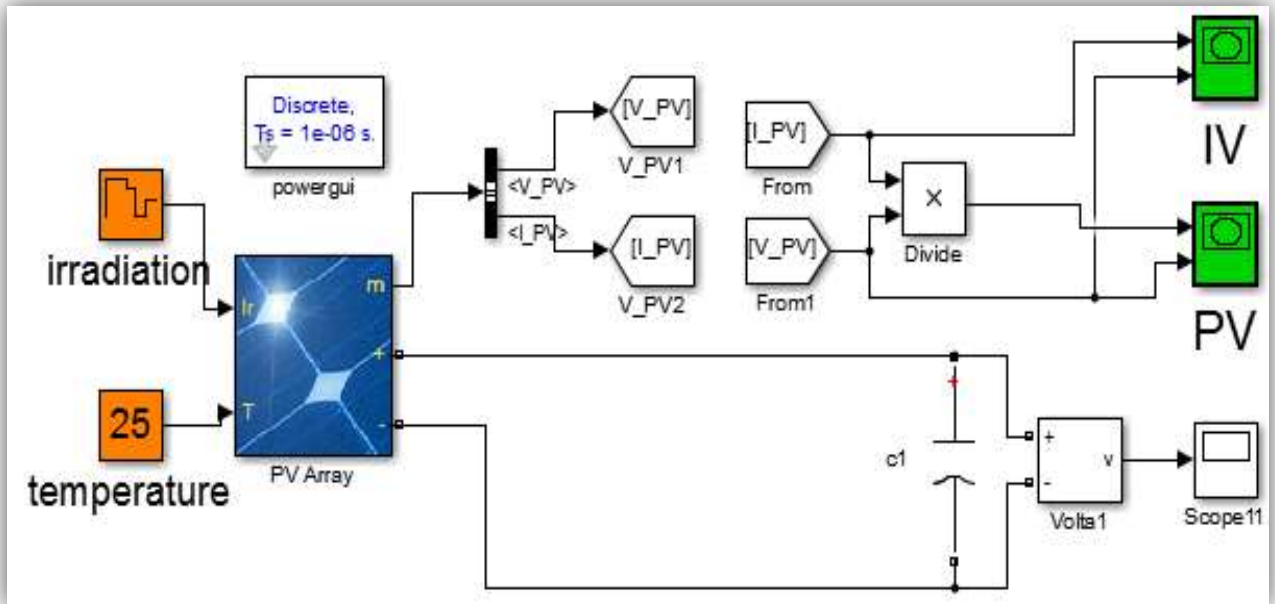


Figure 4.1 : Circuit SIMULINK du générateur PV

La figure (4.2) représente les allures du courant et de la puissance en fonction de la tension du générateur photovoltaïque $I = f(V)$ et $P = f(V)$ pour des conditions standards (STC), d'intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de 25° C .

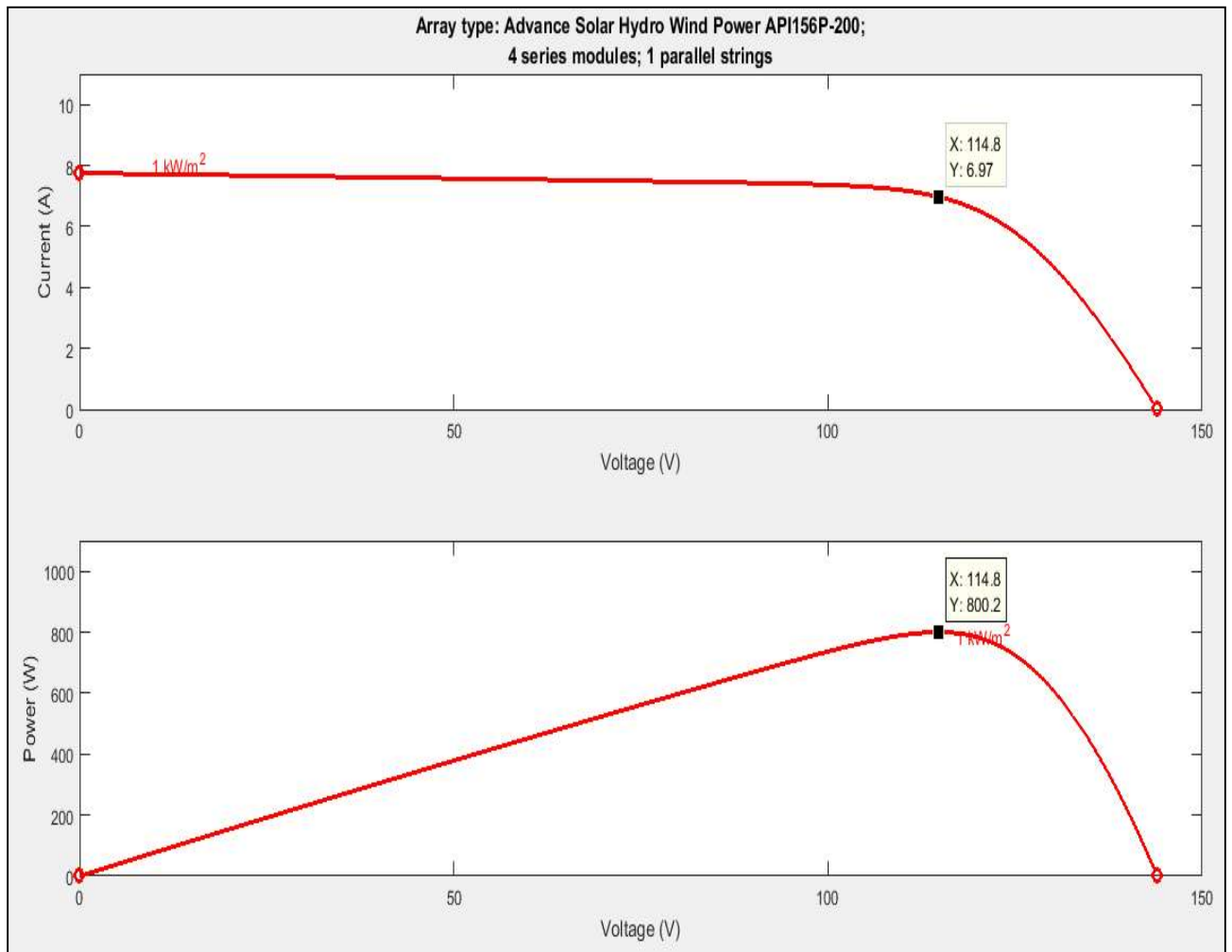


Figure 4.2 : Caractéristiques (I-V) et (P-V) du générateur photovoltaïque.

4.2.2. Pour un éclairement variable

La figure (4.3) montre les résultats de simulation des mêmes caractéristiques ci-dessus, mais pour une température fixe (25° C) et des valeurs d'éclairement variables ($1000-800-600-300 \text{ W/m}^2$).

On constate que pour une variation d'éclairement, la tension du générateur subit une légère variation. Par contre le courant et la puissance varient considérablement avec la variation d'éclairement.

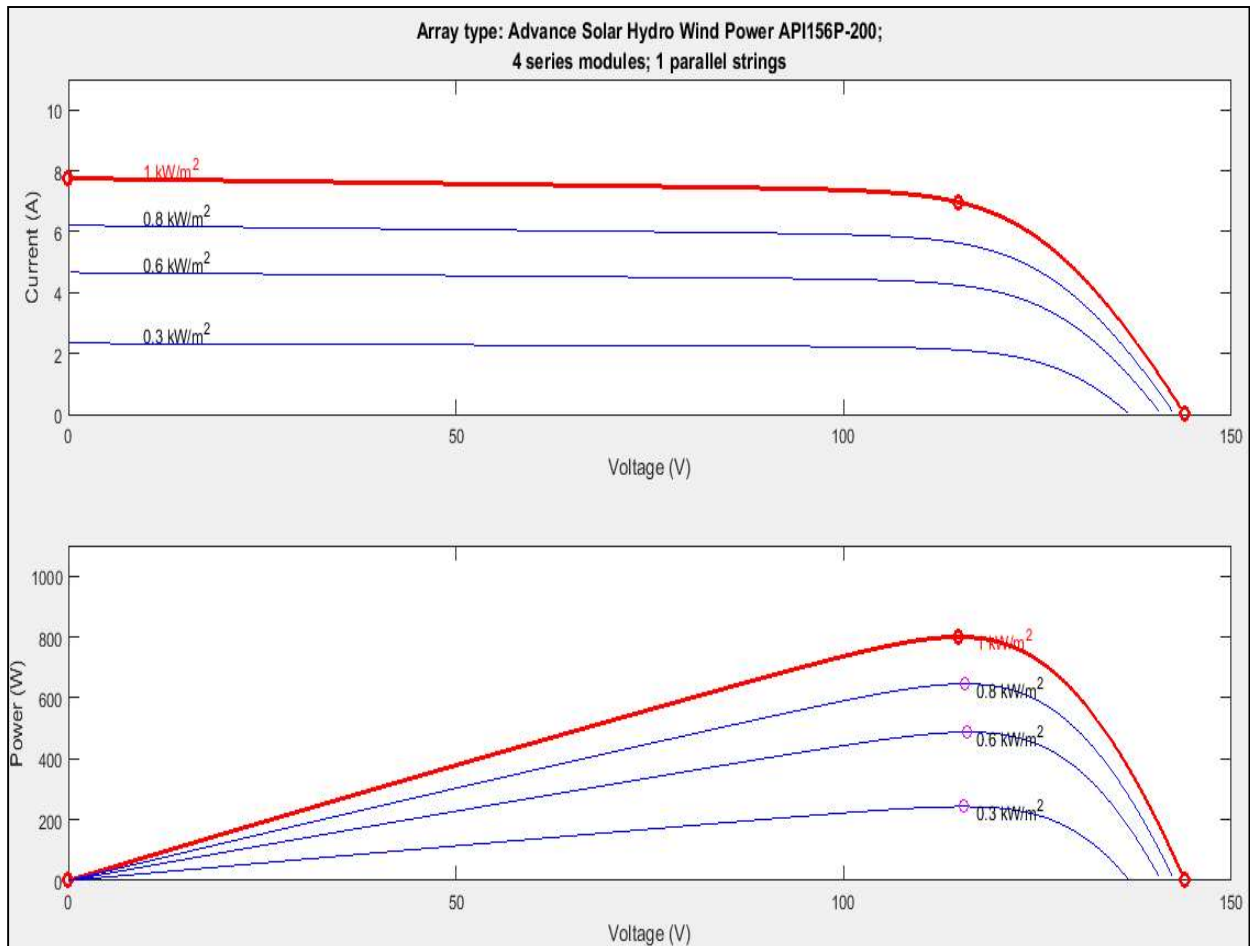


Figure. 4.3: Caractéristiques (I-V) et(P-V) pour un éclairement variable.

4.2.3. Pour une température variable :

La figure (4.4) montre les résultats de simulation des caractéristiques (I-V) et (P-V) du générateur pour un éclairement fixe (1000W/m²) et des valeurs de température variable (0-25-50-75 °C).

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires. Son augmentation entraîne la diminution de la tension du circuit ouvert et

la puissance maximale du générateur. Par contre la température influe faiblement sur le courant.

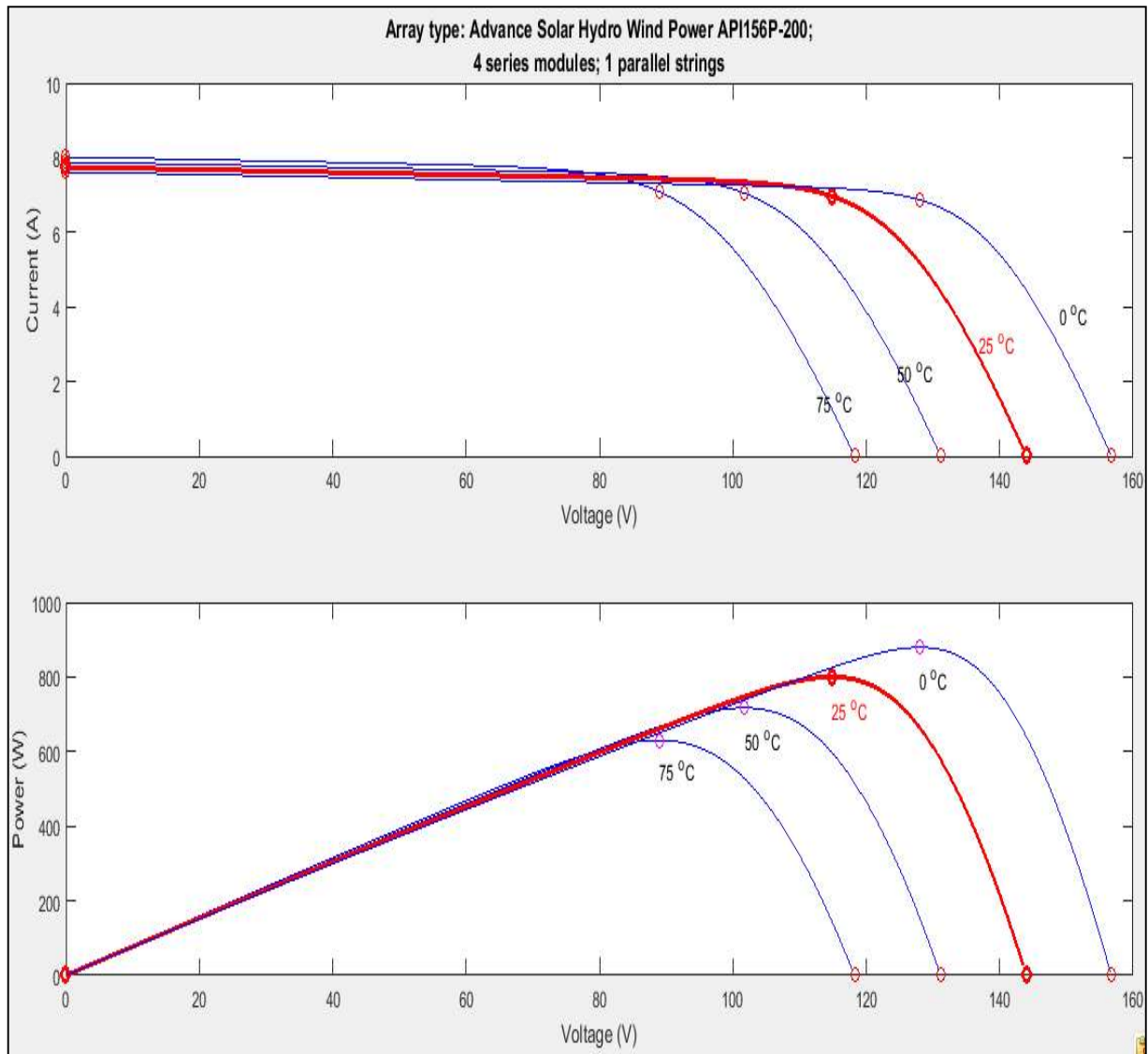


Figure. 4.4 : Caractéristiques (I-V) et (P-V) pour une température variable.

4.3. Performance coté générateur photovoltaïque :

Ce paragraphe met en exergue les performances du premier étage de conversion, le convertisseur (DC/DC) élévateur. Le générateur est commandé de manière à optimiser la puissance générée, la commande est assurée par l'algorithme

perturbation et observation (P et O). Le circuit de simulation est montré sur la figure (4.5), ou ($L=2 \times 10^{-3}$ H), ($C1=100 \times 10^{-6}$ F) et ($C2=100 \times 10^{-6}$ F)

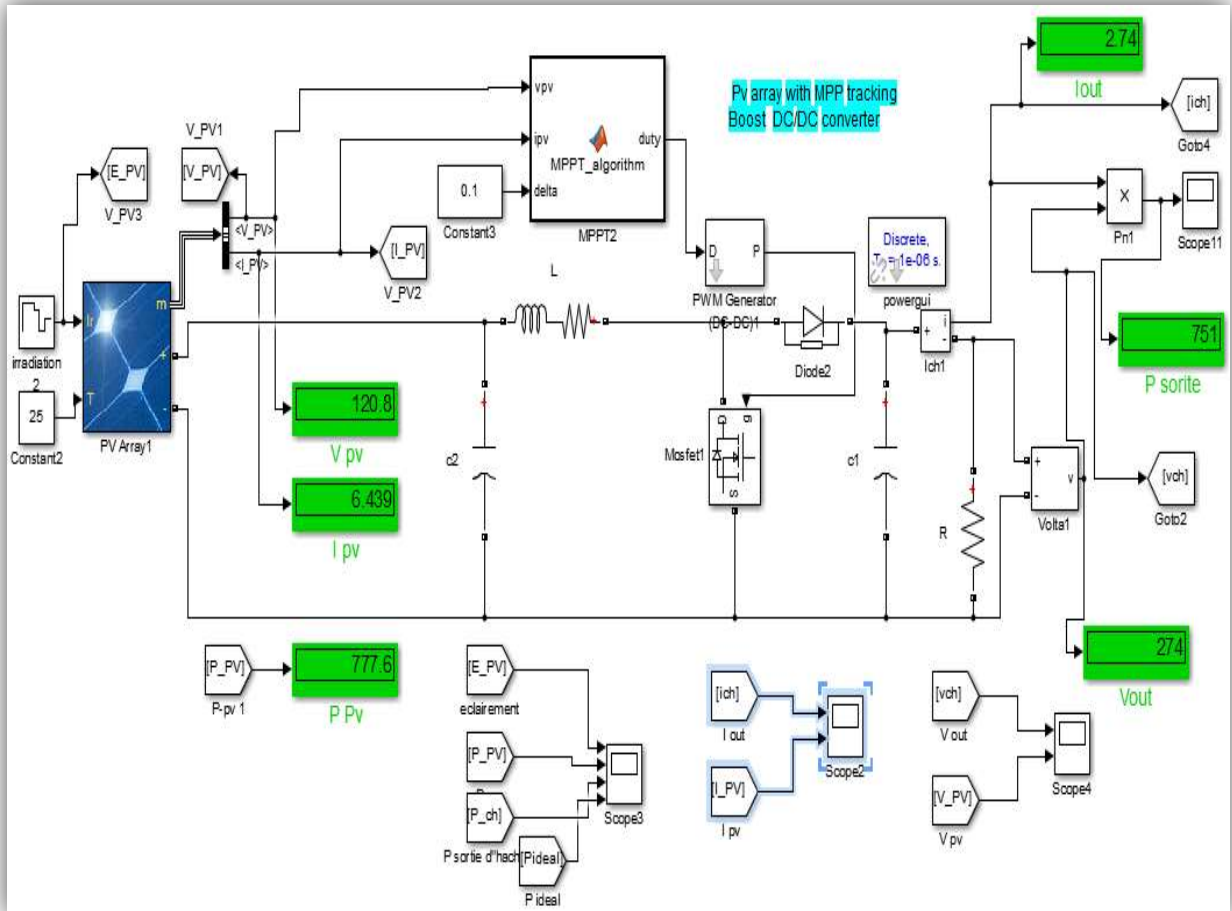


Figure 4.5 : Étage d'adaptation en SIMULINK.

4.3.1. Résultats de simulation :

Pour illustrer de près ces performances, un profil en escalier de l'éclairement solaire est décrit par la figure (4.6). Les figures (4.7) et (4.8) illustrent respectivement les allures des tensions et des courants à l'entrée et en sortie de l'étage d'adaptation du générateur photovoltaïque. Les points de fonctionnement convergent rapidement vers leurs points optimums pour chaque valeur d'éclairement sans dépassement, ce qui prouve l'efficacité de la commande MPPT

choisie. De plus le convertisseur (DC/DC), joue le rôle d'un élévateur de tension et par suite un abaisseur de courant. Pour montrer l'efficacité énergétique du convertisseur statique, les figures (4.9) et (4.10) présentent respectivement les puissances à l'entrée, à la sortie du convertisseur et son rendement, il est clair que les pertes sont négligeables durant la variation de l'éclairement, précisément pour les faibles éclairements.

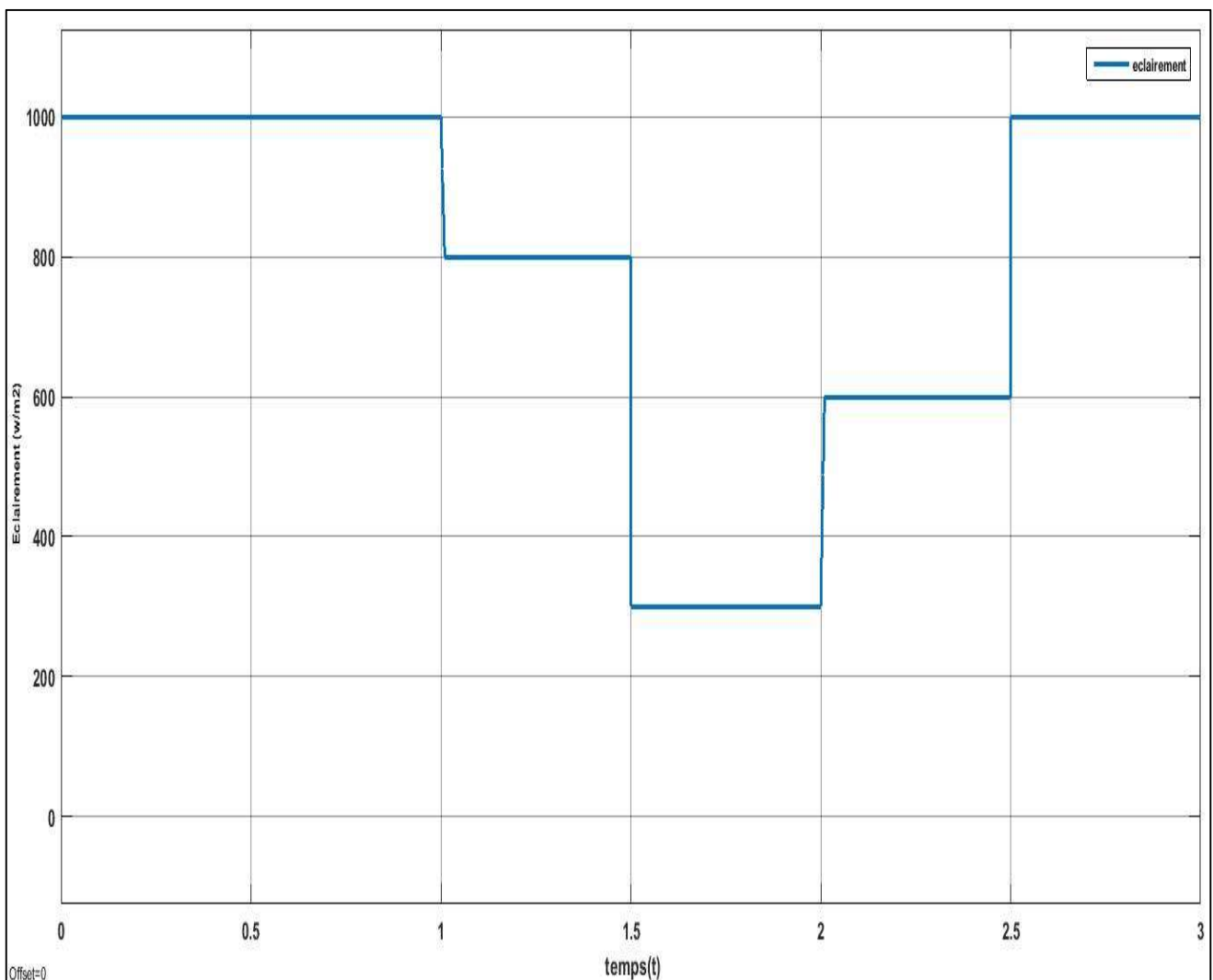


Figure 4.6 : Profil de l'éclairement.

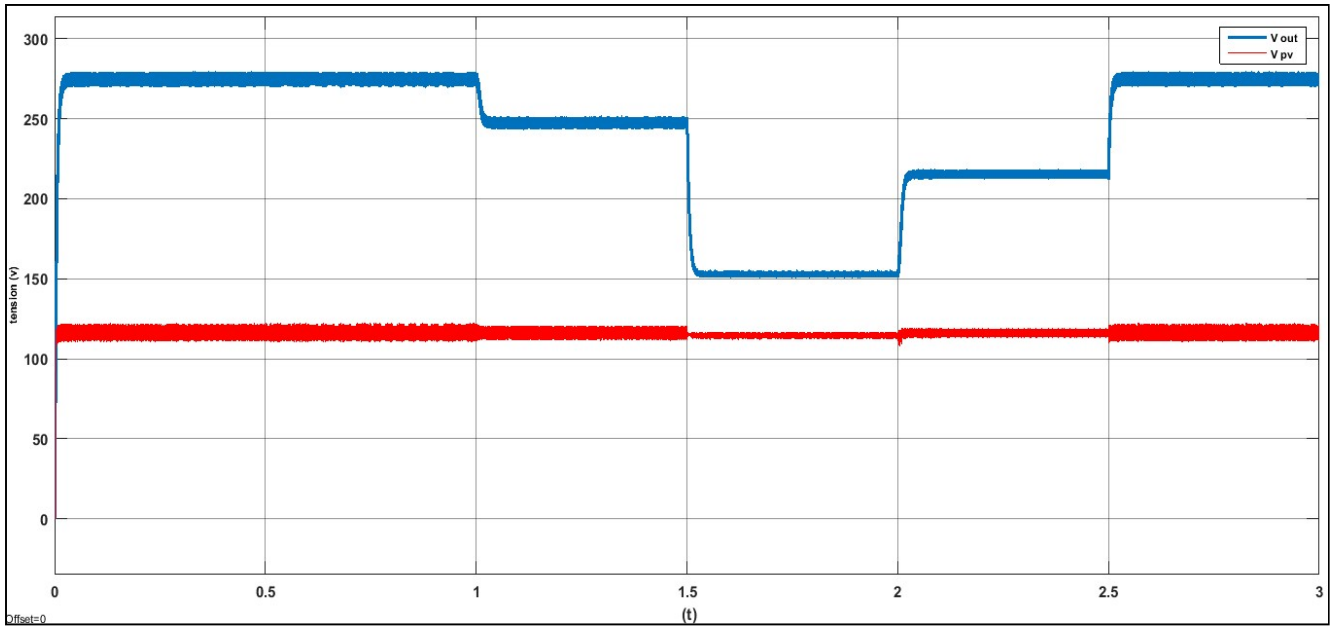


Figure 4.7 : La tension d'entrée et de sortie de l'hacheur élévateur.

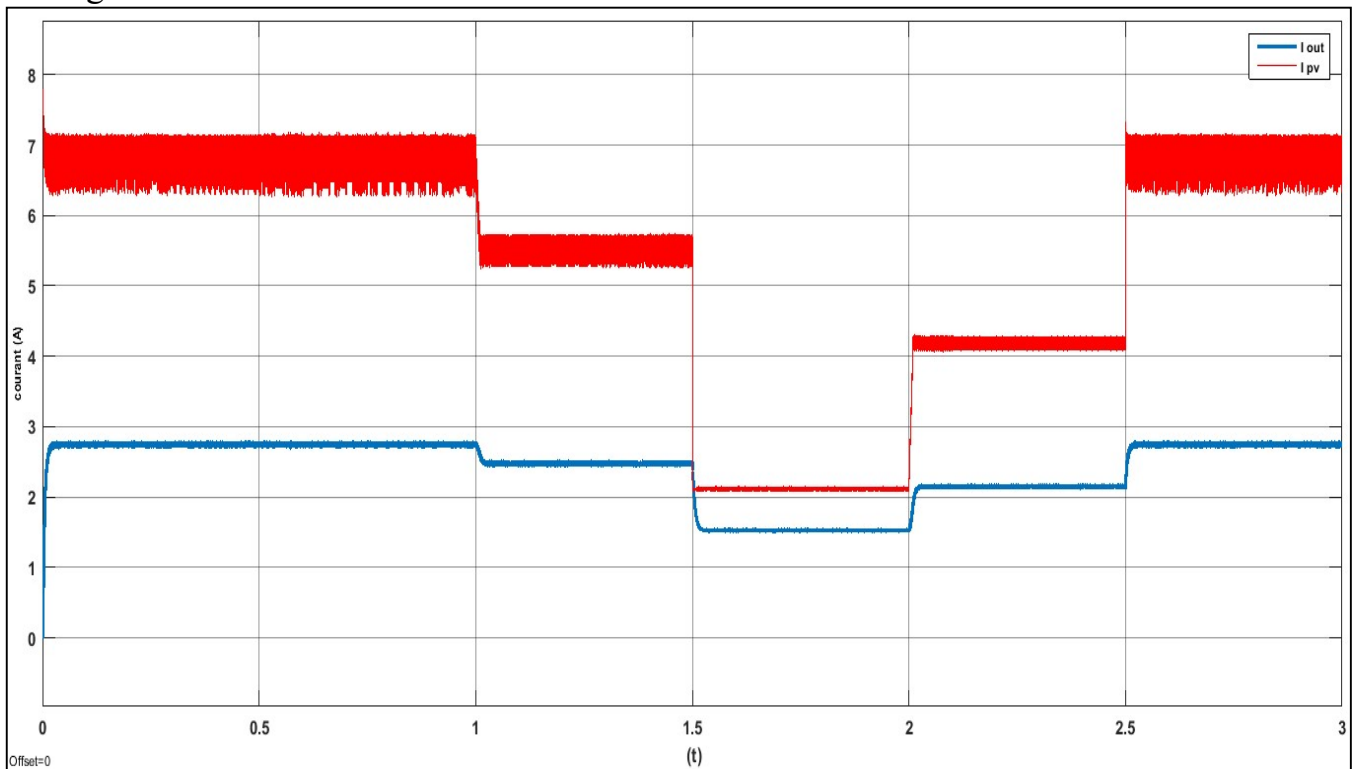


Figure 4.8 : Les courants d'entrée et de sortie du convertisseur (DC/DC).

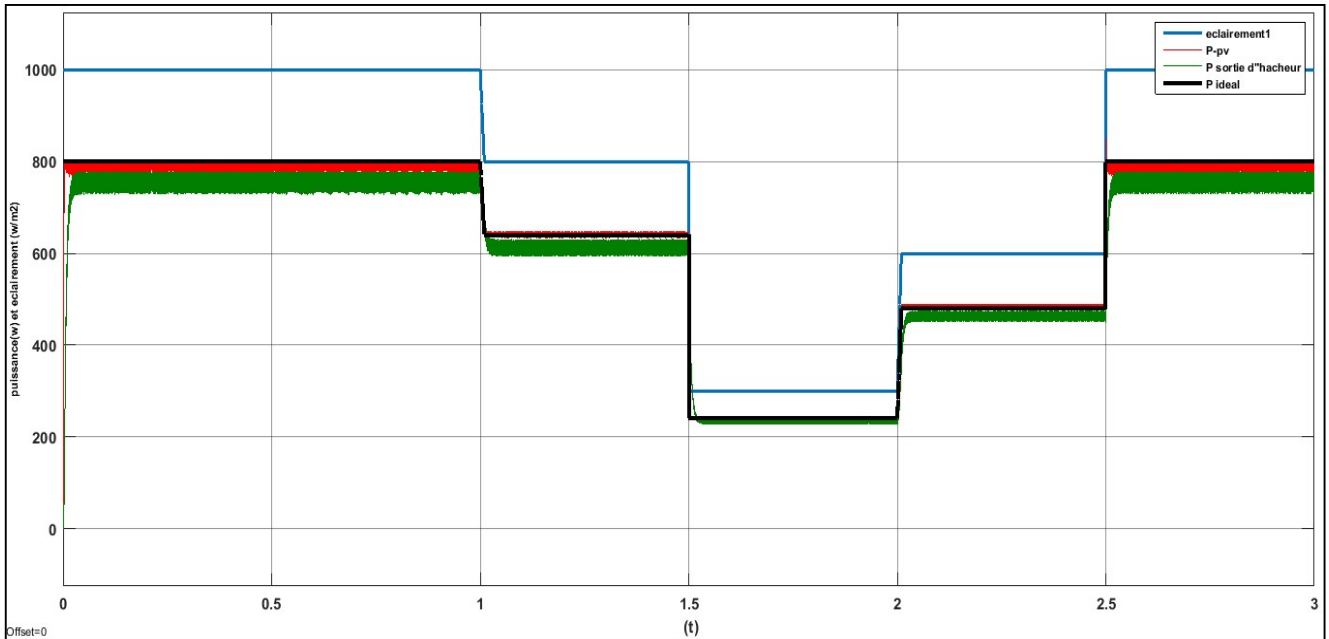


Figure 4.9 : Puissances à l'entrée et en sortie de l'hacheur.

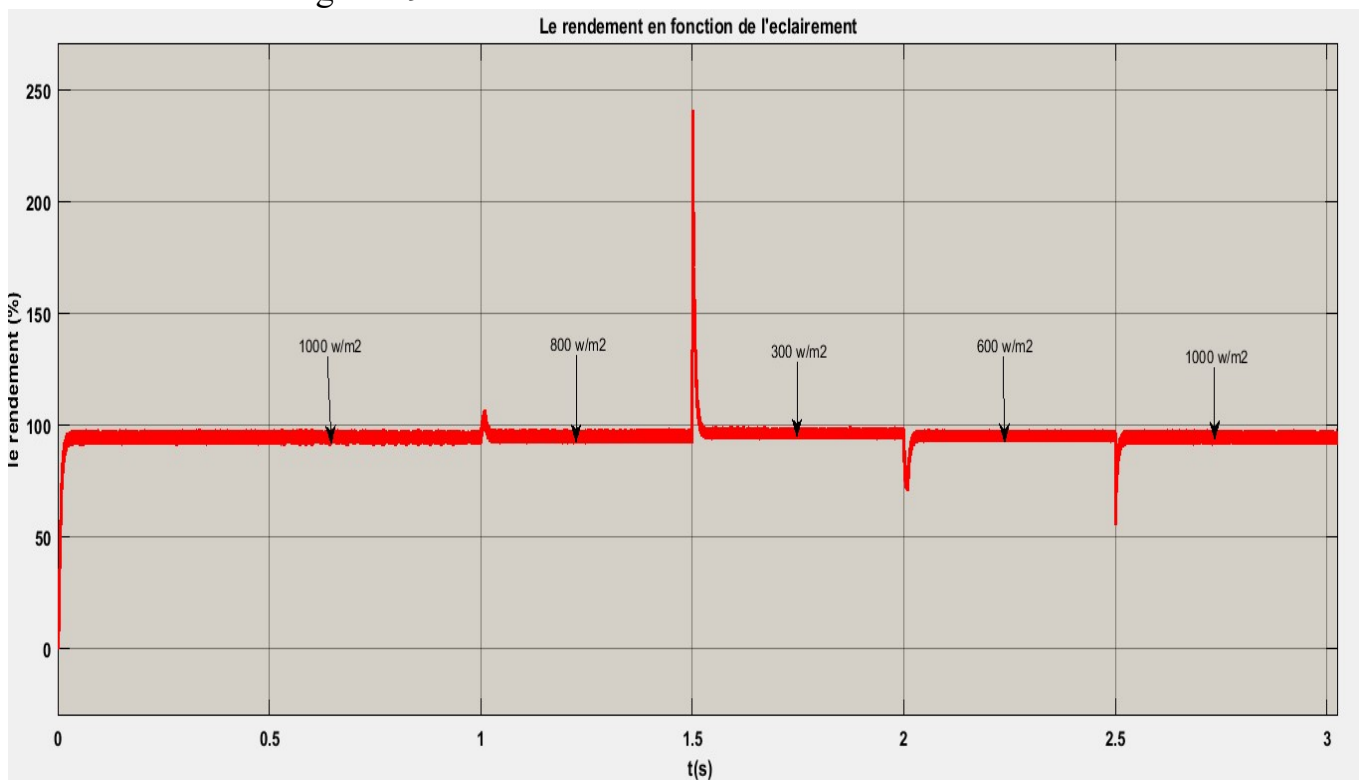
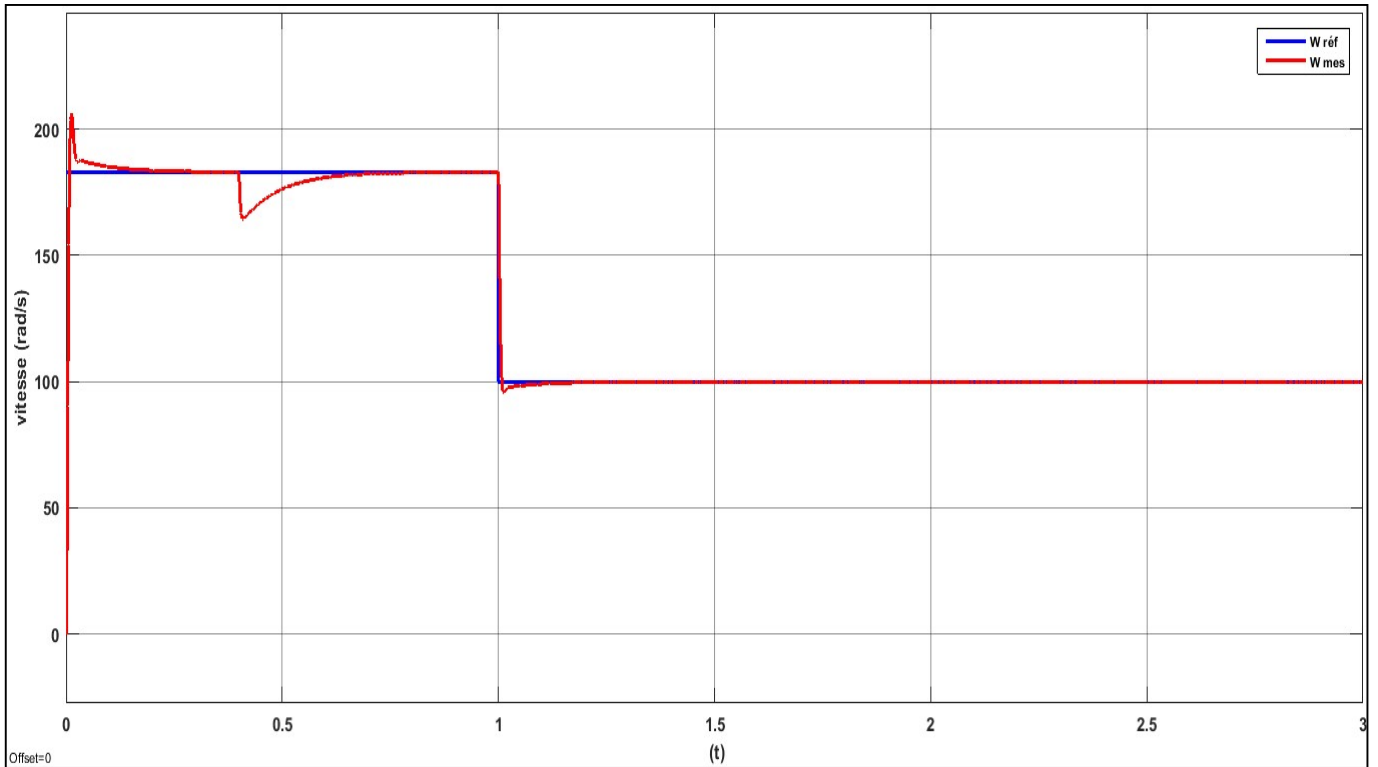
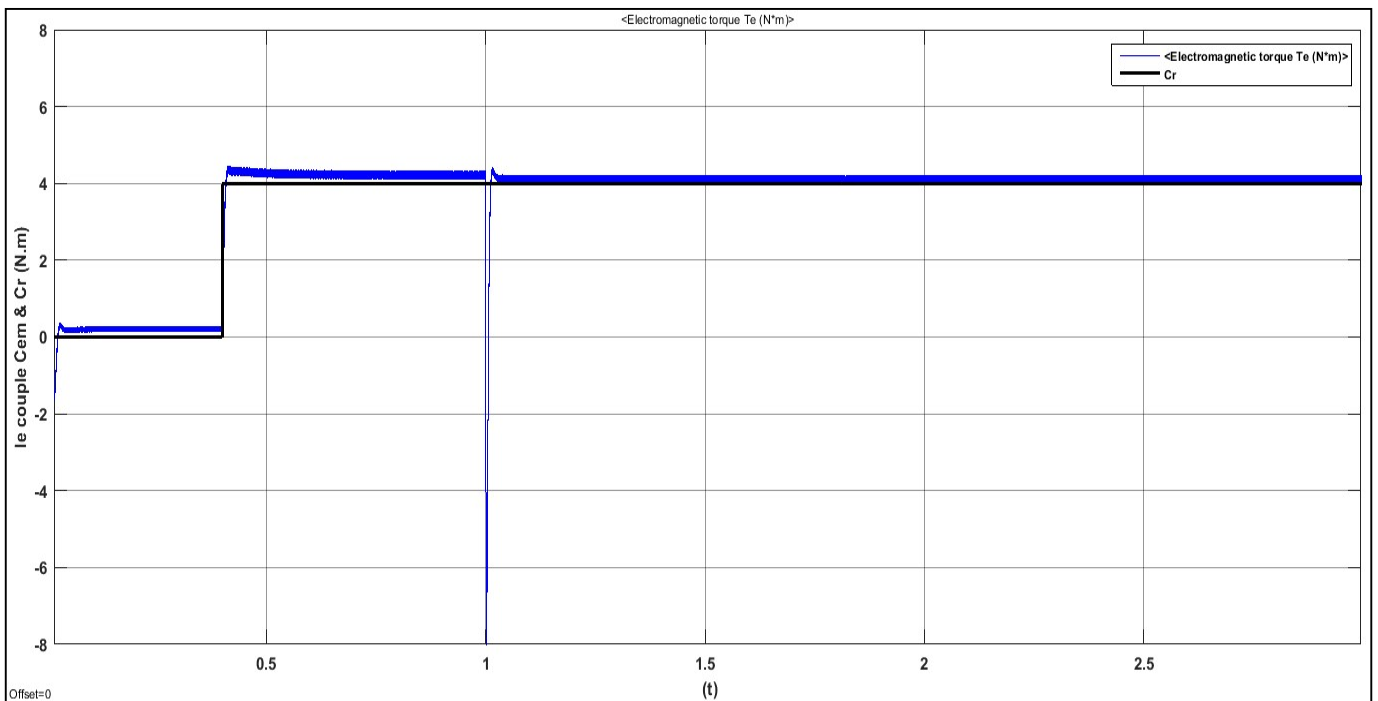


Figure 4.10 : Le rendement de l'hacheur survolteur.



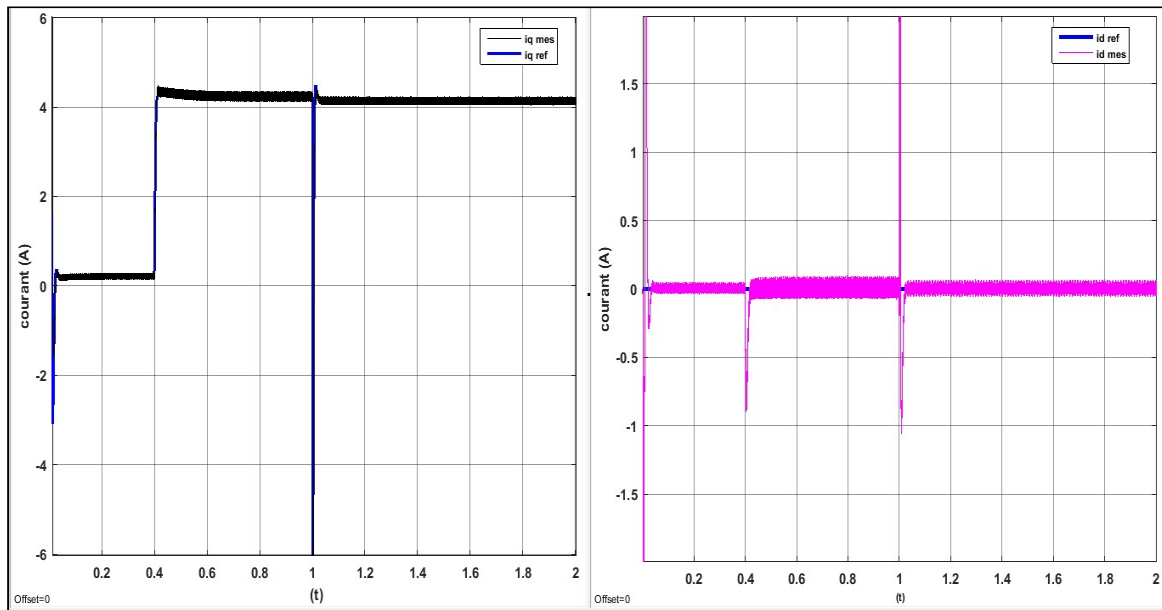
(a): La vitesse de rotation mesurée avec sa référence.



(b): Couple électromagnétique (Cem) avec le couple résistant (Cr).

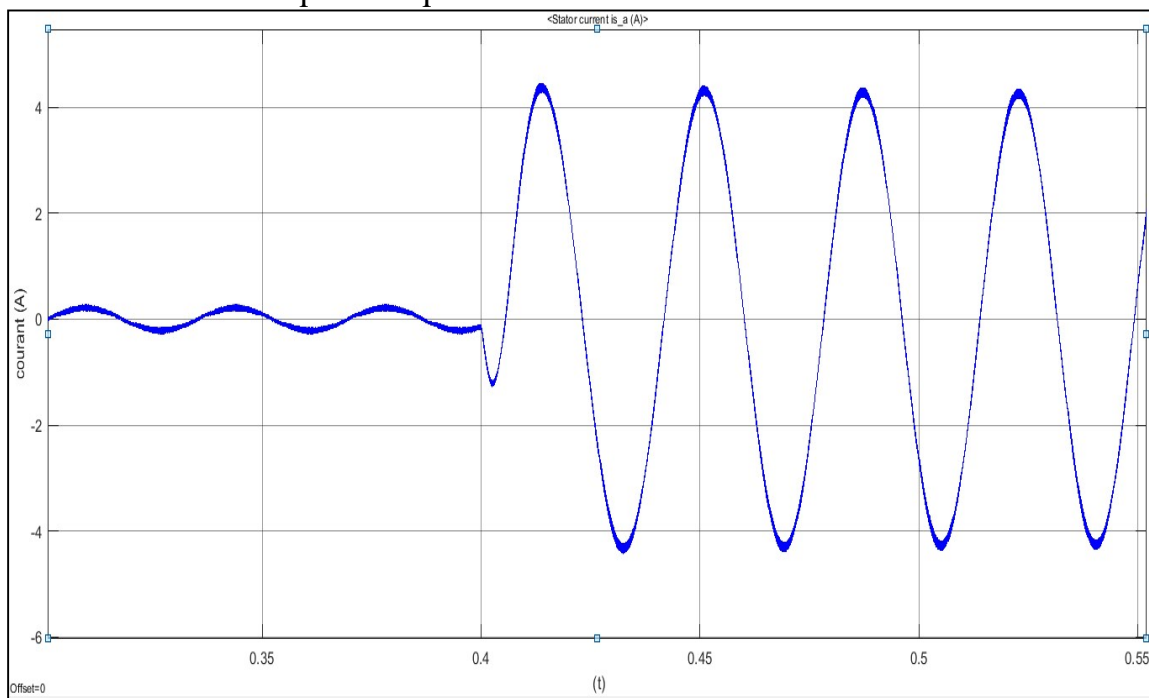
Figure (4.12) : Performances mécaniques de la MSAP.

(a)



Courants $i_{q\text{ mes}}$ & $i_{q\text{ réf}}$

Courants $i_{d\text{ mes}}$ et $i_{d\text{ réf}}$.



(b)

Figure (4.12) : Courants dans le plan d-q (a) et Courant statorique de la phase-a- (b)

4.4.1. Interprétation des Résultats :

La figure 4.12 représente les résultats de simulation de l'essai en charge du MSAP, par une application d'un couple de charge de 4 N.m à partir de $t=0.4s$, suivi d'une variation de vitesse de consigne à l'instant $t=1 s$ de 183 à 100 rad/s. On remarque que :

- L'allure de la vitesse mesurée suit celle de référence (figure 4.12.a) avec un dépassement pendant le régime transitoire, Après l'application de la charge à l'instant $t=0.4s$, la vitesse présente une chute qui est rejetée, puis rejoint sa valeur de référence, ce qui montre l'efficacité du régulateur PI de vitesse de la boucle externe de la commande vectorielle.
- Le couple (figure 4.12.b) subit un pic au premier moment de démarrage, puis atteint la valeur du couple résistant avant et après l'application de la charge,
- La réponse des deux composantes du courant (figure 4.12.c.d) montre bien le découplage introduit par la commande vectorielle de la machine ($i_d=0$)
- Le courant i_q est l'image du couple.

Nous avons établi la technique de la commande vectorielle appliquée à la MSAP, cette stratégie permet le découplage entre le couple électromagnétique et le flux de la machine ce qui rend la machine synchrone à aimants permanents similaire à la machine à courant continu. Le réglage de la vitesse avec un régulateur classique (PI) permet d'obtenir des performances dynamiques et statiques acceptables. Cependant les coefficients des correcteurs PI sont dimensionnés à partir des paramètres de la machine. Si ces derniers varient dans une large plage de fonctionnement, les performances seront détériorées.

4.5. Modèle de la pompe centrifuge :

La pompe centrifuge applique un couple de charge proportionnel au carré de la vitesse de rotation du moteur [22].

$$C_r = A \cdot \omega^2 \quad (4.1)$$

Avec A : désigne la constante de proportionnalité

ω : la vitesse de rotation du moteur.

Pour définir les changements dans la capacité de la pompe : la pression, la puissance, le débit quand un changement de vitesse aura lieu, nous adoptons les lois de similitude représentées par les équations suivantes

$$Q' = Q \cdot (N'/N) \quad (4.2)$$

$$P' = P \cdot (N'/N)^3$$

$$HMT' = HMT \cdot (N'/N)^2$$

Avec :

Q et Q': Débits correspondants respectivement à la vitesse N et N'.

HMT et HMT': Hauteurs manométriques totales correspondantes respectivement à la vitesse N et N'.

P et P': Puissances transmises à la pompe par la MSAP correspondant respectivement à la vitesse N et N'.

La figure 4.13 présente le modèle de la pompe centrifuge basé sur les équations mathématiques précédentes.

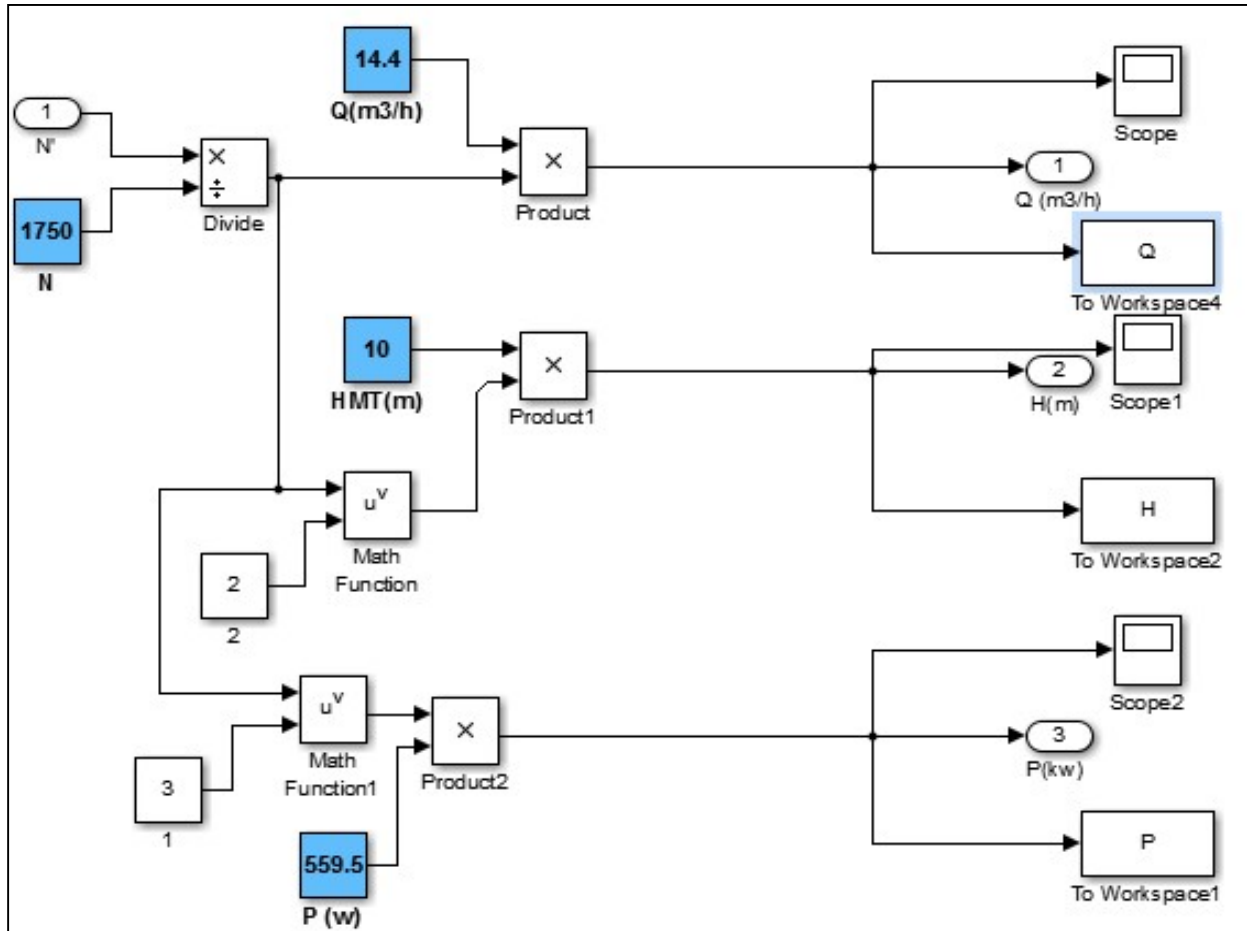


Figure 4.13 : Bloc SIMULINK de la pompe centrifuge.

4.6. Caractéristiques d'une pompe centrifuge :

4.6.1. Caractéristique Débit –vitesse :

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique (HMT) relativement fixe.

Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est en fonction du carré de la vitesse du moteur. On utilise habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres) [23].

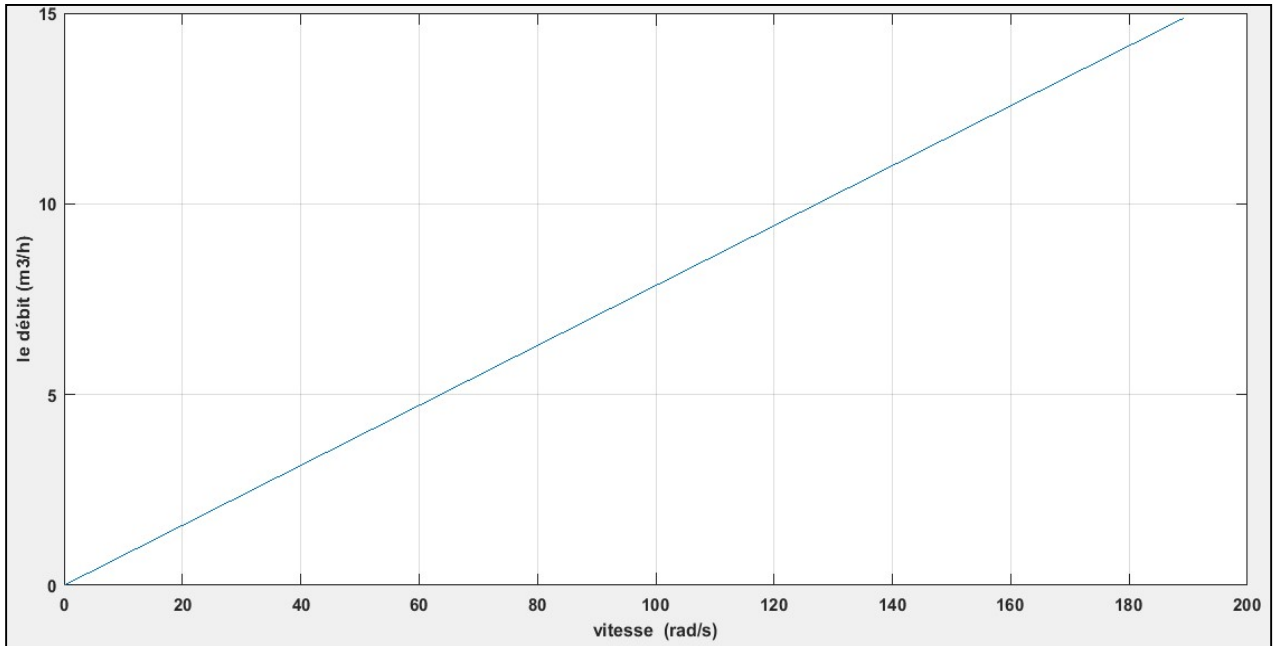


Figure 4.14 : Caractéristiques (Q, ω) d'une pompe centrifuge pour HMT fixe.

4.6.2. Caractéristiques couple - vitesse :

Le couple du moteur augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est en fonction du carré de la vitesse du moteur. La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit.

Parce que le couple de démarrage est limité au couple de frottement de la pompe à vitesse nulle (qui est plus important qu'en rotation), la pompe requiert une vitesse minimale à une HMT donnée pour obtenir un débit de départ non nul [25].

Donc la pompe centrifuge oppose un couple résistant C_r :

$$C_r = A\omega^2 \quad (4.3)$$

Avec

A : Coefficients de proportionnalité $[(Nm/rad.s^{-1})^2]$.

C_s : Le couple statique, généralement faible.

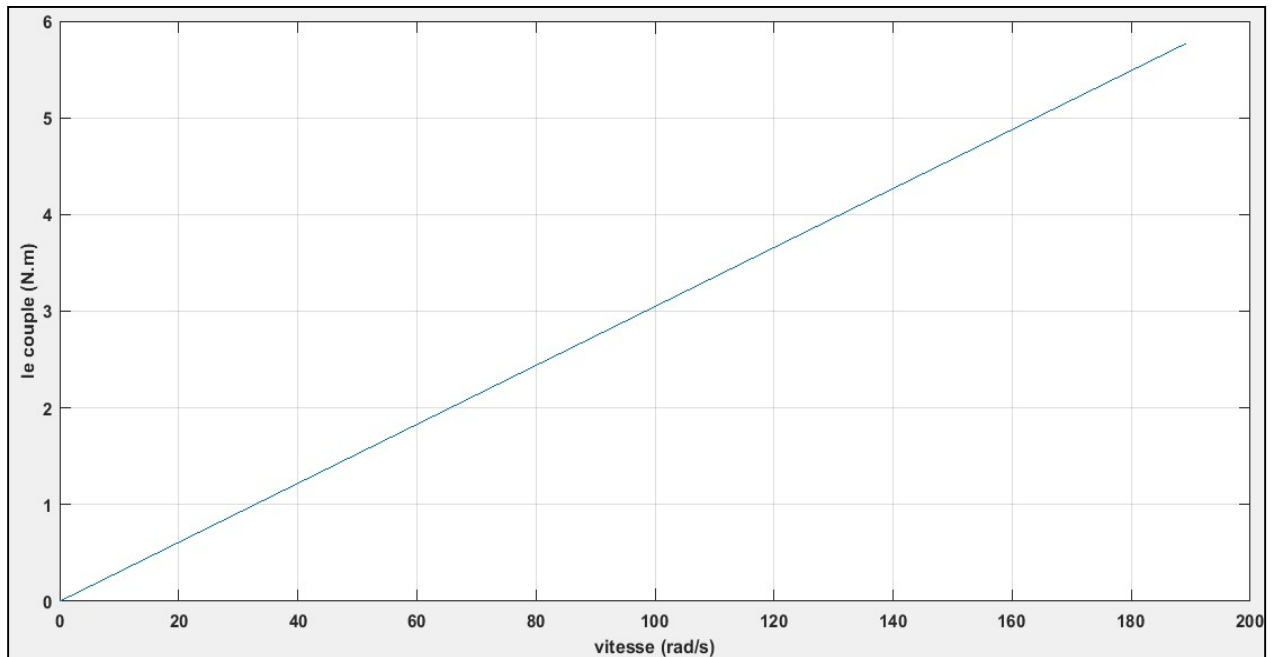


Figure 4.15 : Caractéristiques couple - vitesse d'une pompe centrifuge.

4.6.3. Caractéristiques Débit - hauteur :

La relation liant la hauteur d'eau HMT avec le débit de la pompe Q est donnée par le modèle de « PELEIDER-PETERMANN »

$$HMT = a_0 \times \omega^2 - a_1 \times \omega \times Q - a_2 \times Q^2$$

Avec : a_0 ; a_1 ; a_2 sont des constantes de la pompe donnée par le constructeur.

Le point de fonctionnement est l'intersection de ces deux caractéristiques (HMT(Q) et caractéristique de canalisation). Alors pour une vitesse donnée, il y a seulement un point de fonctionnement qui dépend fortement des caractéristiques de tuyauterie d'une pompe indiquée. Par conséquent une bonne conception et une tuyauterie de bon choix donnent de bons résultats dans le système de pompage.

La courbe HMT (Q) est donnée par la figure suivante :

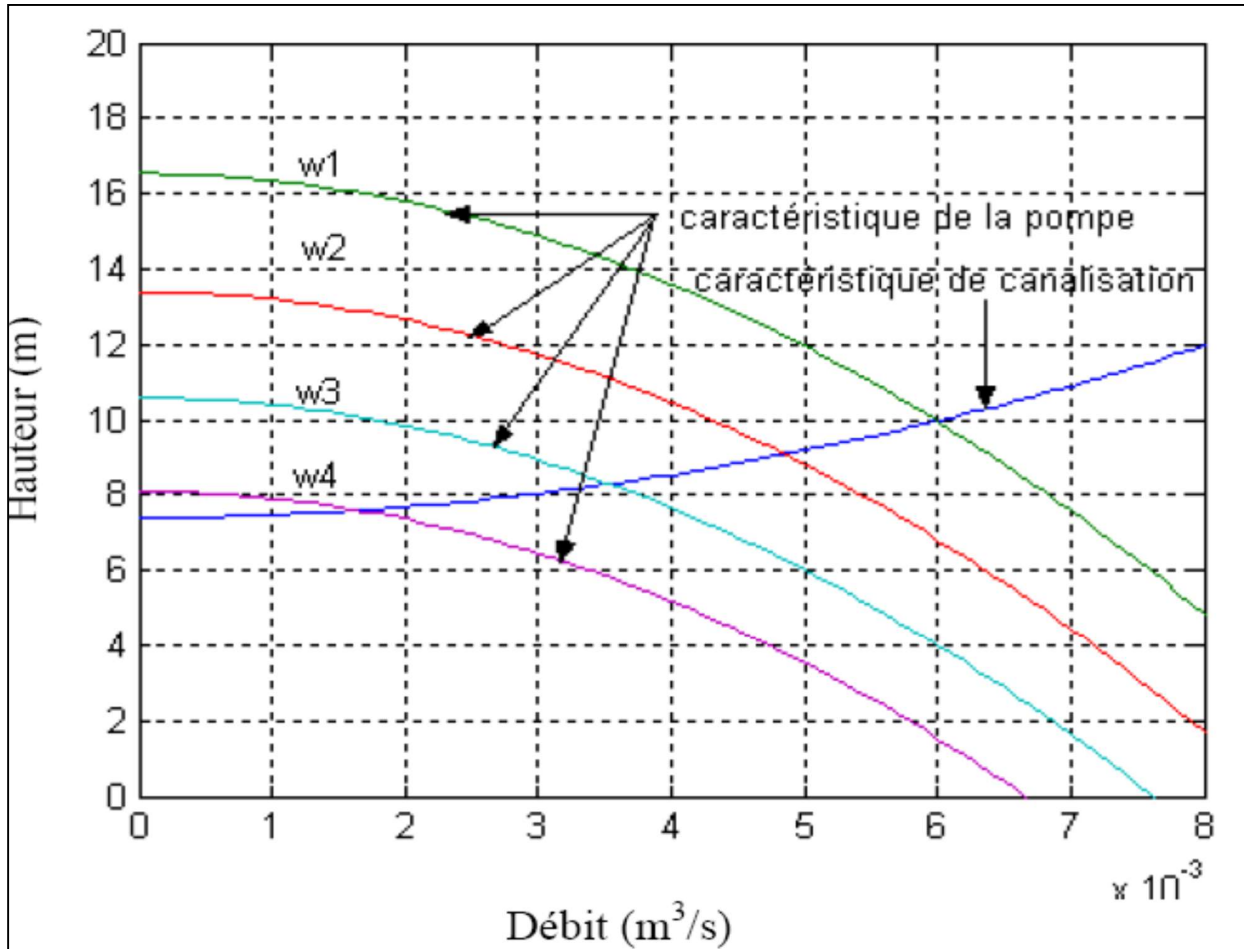


Figure 4.16: Les allures $H(Q)$ de la pompe centrifuge avec la caractéristique de canalisation.

$w_1 = 153 \text{ rad/s}$; $w_2 = 145 \text{ rad/s}$ et $w_3 = 140 \text{ rad/s}$; $w_4 = 132 \text{ rad/s}$

4.7. Résultats de simulation du system global :

La figure 4.18 représente le schéma synoptique du système de pompage photovoltaïque avec les différentes commandes utilisées. On distingue trois étages de conversion

- L'étage d'adaptation qui assure l'optimisation du système
- 2eme étage de conversion qui a pour rôle la régulation du bus continu

- 3eme étage de conversion, l'onduleur triphasé de tension alimentant le groupe motopompe. La commande vectorielle par flux orienté de la MSAP assure les ordres de commande MLI de l'onduleur.

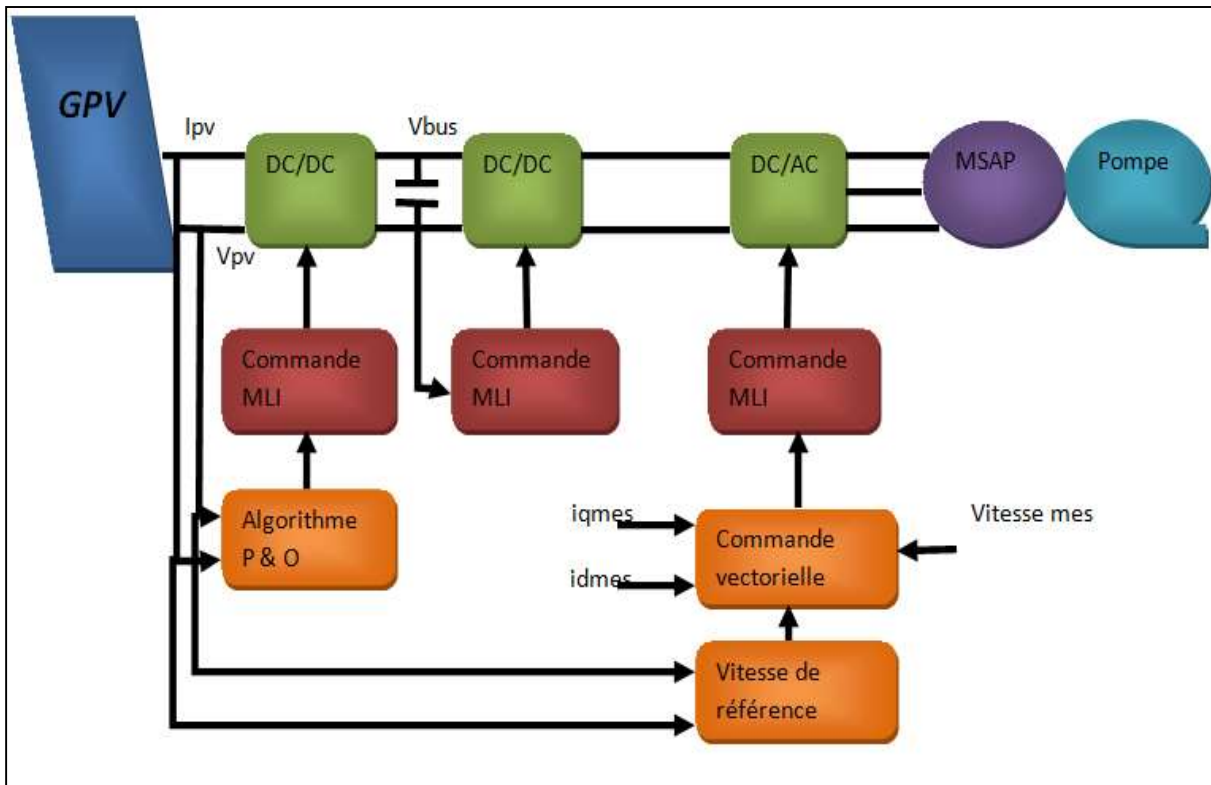


Figure 4.18 : Schéma synoptique du système de pompage global.

4.7.1. Performances cote GPV :

La figure (4.19) présente les points de fonctionnement sur les caractéristiques (I-V) et (P-V) du système de pompage photovoltaïque pour différents éclairages ($T=25^{\circ}\text{C}$), avant et après optimisation.

Où la ligne bleue montre le fonctionnement du système avant l'optimisation.

Tandis que : la ligne verte montre le fonctionnement du système après l'optimisation cela prouve l'efficacité de l'algorithme MPPT qui permet une bonne poursuite des points de puissance maximale.

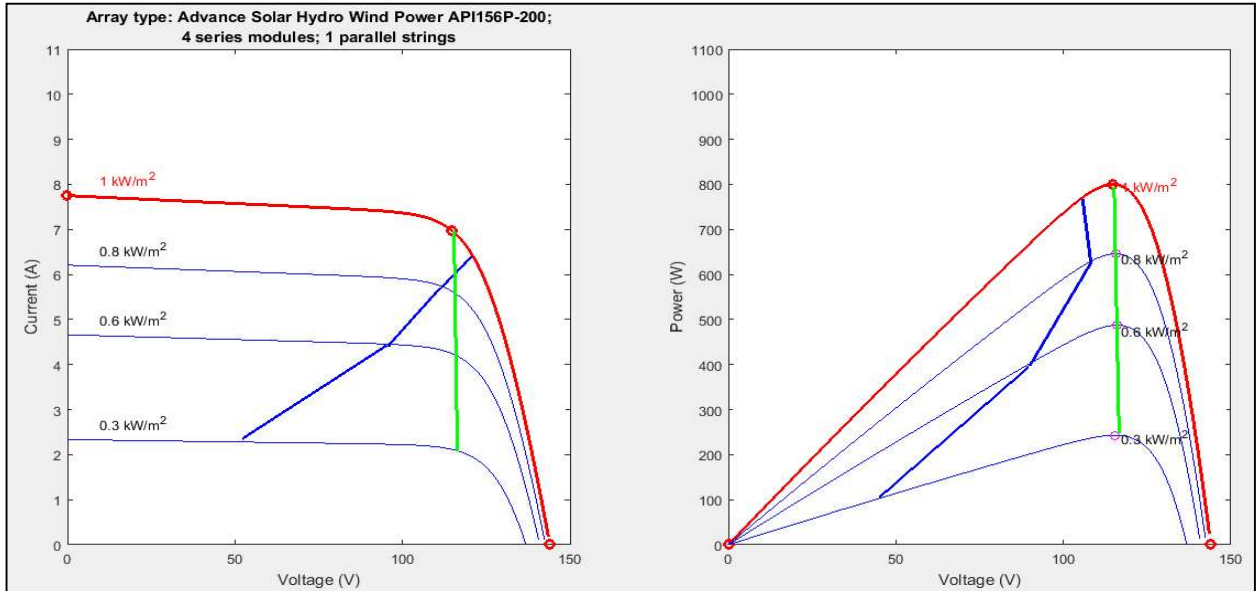


Figure 4.19 : Points de fonctionnement du système de pompage photovoltaïque pour éclairage variable ($T=25^{\circ}\text{C}$). Avant et Après optimisation.

Pour montrer l'efficacité de l'algorithme (**P** et **O**) dynamique et statique, la figure (4.20) illustre respectivement les grandeurs cote PV pour un profil d'éclairage variable. Les allures du caractéristiques ci-dessous :

- Les figures (4.20.a) et (4.20.c) illustrent les allures des courants et de puissances. Ils embrassent l'allure du profil de l'éclairage proposé, l'algorithme MPPT a permet une bonne poursuite des points de puissance maximale
- La figure (4.20.b) montre l'allure de la tension PV presque constante, Le générateur PV fonctionnent sur le coude des caractéristiques (I-V), correspondant aux points de tensions optimums.
- On constate aussi qu'il y a une oscillation autour des points optimums, dû à l'algorithme (P&O). Le choix d'un pas d'incrémention faible (dans ce cas $\Delta V = 0.1$), améliore l'erreur statique de la forme de tension d'alimentation et minimise les oscillations. Cependant le temps de réponse est faible.

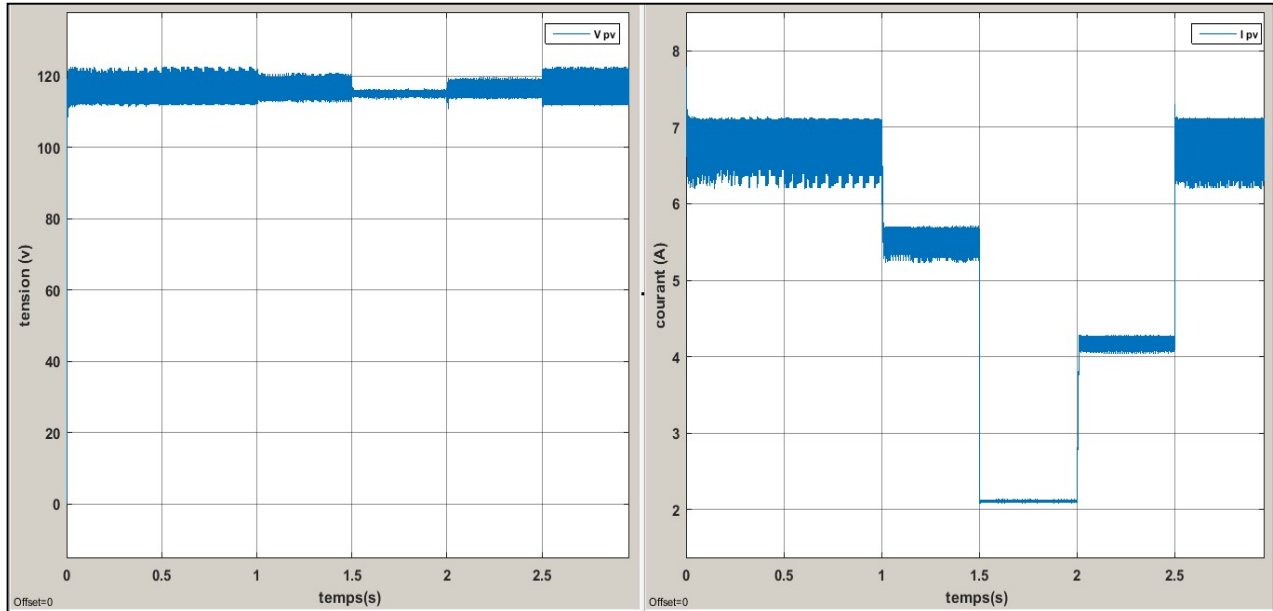


Figure.4.20.a: Tension du générateur PV .

Figure.4.20.b: Courant du générateur PV.

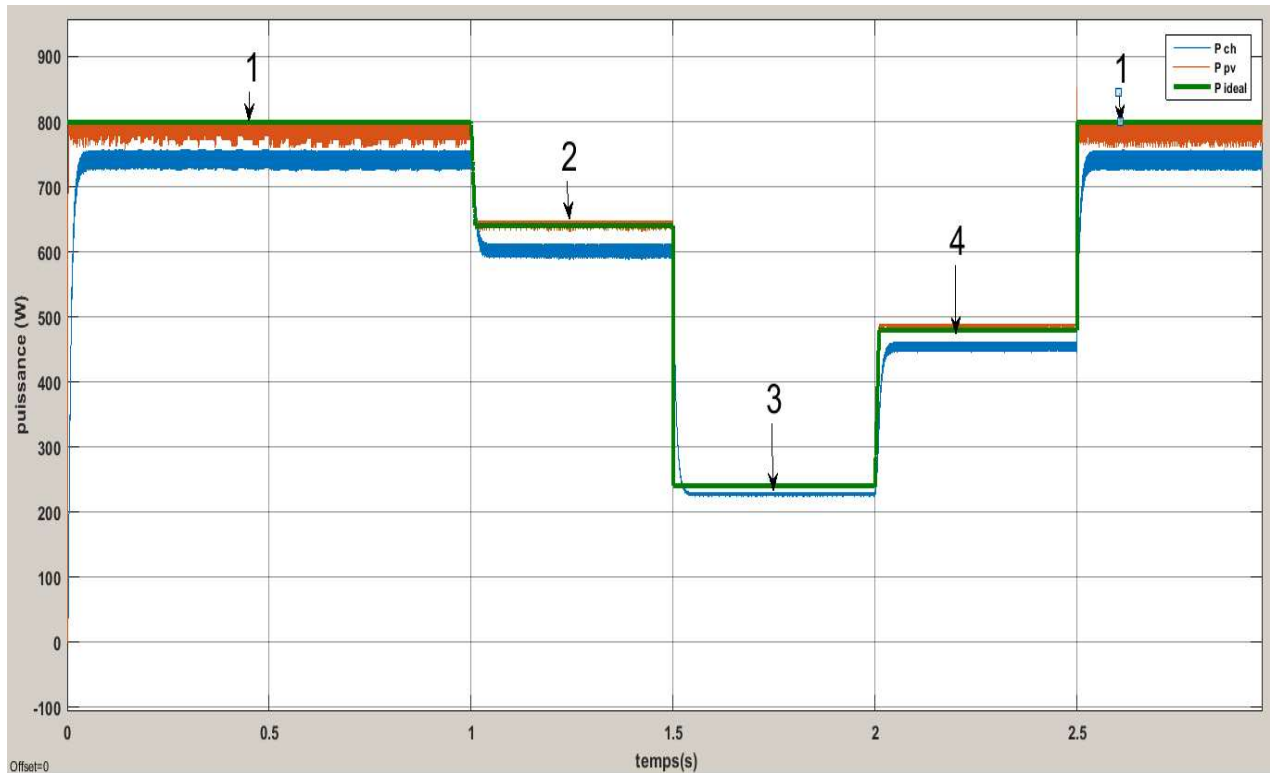


Figure.4.20.c: La puissance délivrée par le générateur PV.

4.7.2. Régulation du bus continu :

Pour réduire les variations et l'instabilité de la tension du bus continu, un deuxième convertisseur (DC/DC) est proposé. La régulation de cette tension est assurée par un régulateur PI. La figure (4.21) montre un bon suivi de la tension du bus continu avec sa référence. Elle est maintenue constante à la valeur 600V en dépit des variations du couple et de la vitesse, ce qui confirme l'efficacité de ce régulateur.

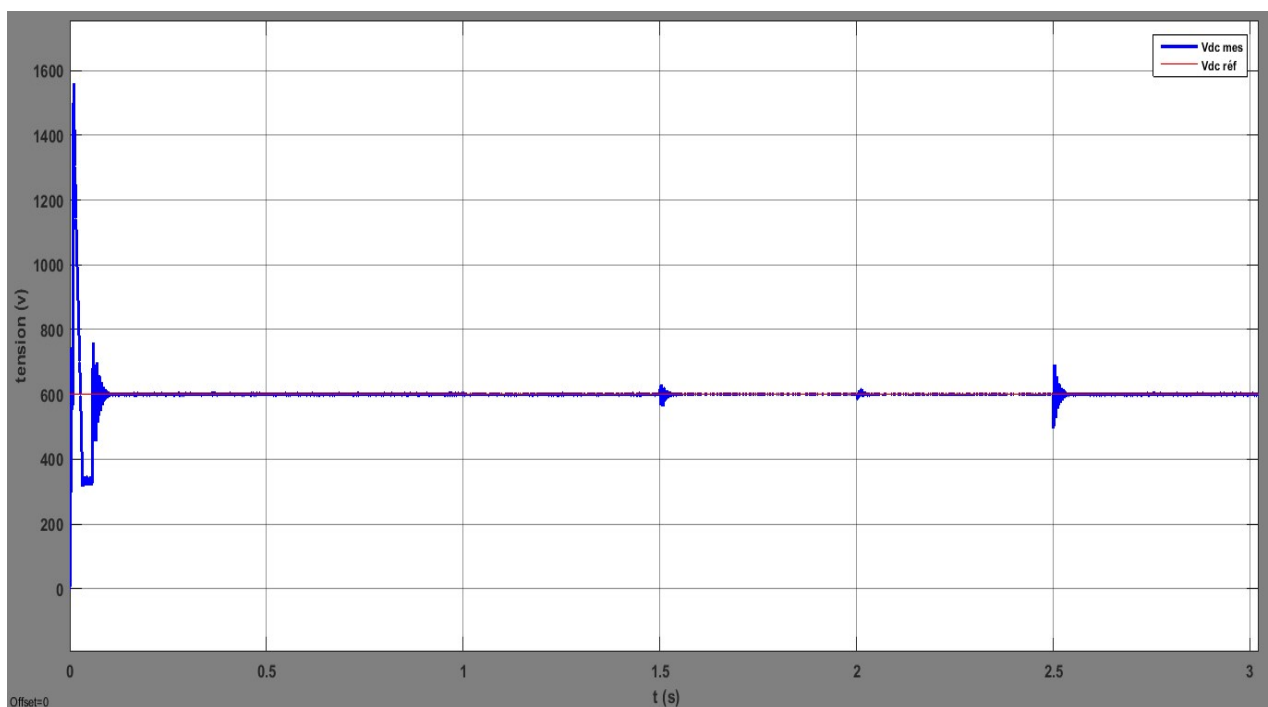


Figure 4.21 : La tension du bus continue avec sa référence.

4.7.3. Résultats de simulation de la commande de la MSAP :

La MSAP qui entraîne la pompe centrifuge est contrôlée à base d'une commande vectorielle. Elle assure le transfert de la puissance optimale du générateur vers la pompe. Les résultats qui suivent, nous renseignent sur l'évolution des paramètres mécanique et électrique de la MSAP durant la variation de l'éclairage.

La boucle de régulation de la vitesse de rotation de la machine est assurée par un régulateur (PI), dont la vitesse mesurée et la vitesse de référence présentent les entrées du régulateur.

Les vitesses de référence de la machine sont déterminées à partir des puissances optimales du générateur PV. En conséquence, la vitesse de rotation de la machine varie avec la variation de l'éclairement et la température. On calcule son expression comme suit :

L'équation (4.4) donne la puissance de la pompe déduite de l'équation du couple :

$$P_p = A \cdot \omega^3 \quad (4.4)$$

Et on sait que:

$$P_{méc} = P_p / \eta_p \quad (4.5)$$

Où η_p : est le rendement de la pompe

$P_{méc}$: la puissance mécanique transmise à la pompe par la MSAP de même la puissance électrique du moteur peut être déterminée en fonction du rendement de ce dernier comme suit :

$$P_{méc} = P_c \cdot \eta_m \quad (4.6)$$

Où η_m : est le rendement du moteur

P_c : la puissance à la sortie du convertisseur.

De même

$$P_c = P_m \cdot \eta_c = \eta_c \cdot V_m \cdot I_m \quad (4.7)$$

Où P_m : est la puissance maximale que le générateur photovoltaïque peut délivrer.

η_c : le rendement du convertisseur.

A partir des équations (4.4) -(4.8)

$$P_p = k_p \cdot \omega^3 = \eta_p \cdot \eta_m \cdot \eta_c \cdot V_m \cdot I_{pm} \quad (4.8)$$

On déduit la vitesse optimale en fonction des valeurs optimales du courant et de tension du générateur photovoltaïque correspondant à la puissance maximale :

$$\omega_{opt} = \sqrt[3]{\frac{\eta_p \eta_m \eta_c V_m I_m}{A}} \quad (4.9)$$

Où $\eta_p=0.73$; $\eta_m=0.91$; $\eta_c=0.94$ sont respectivement le rendement de l'onduleur, du moteur et de la pompe [26].

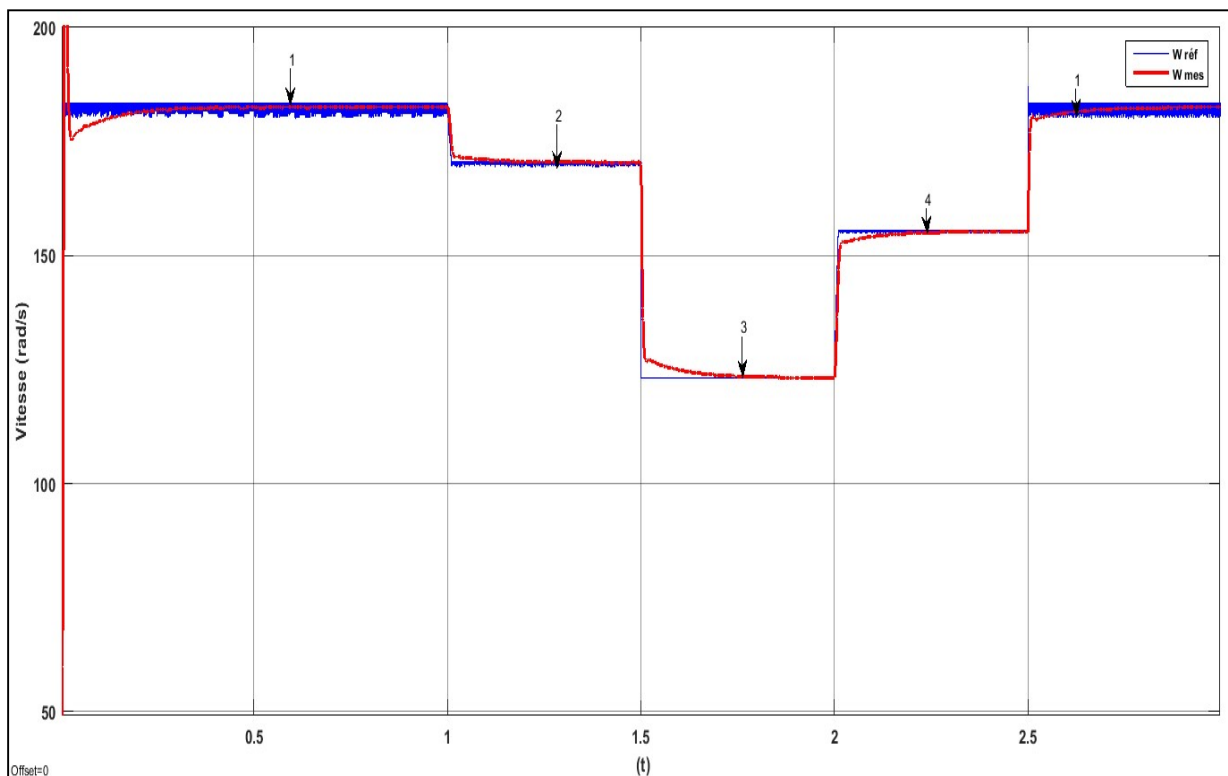


Figure.4.22. a : La vitesse de rotation mesurée avec la vitesse de référence.

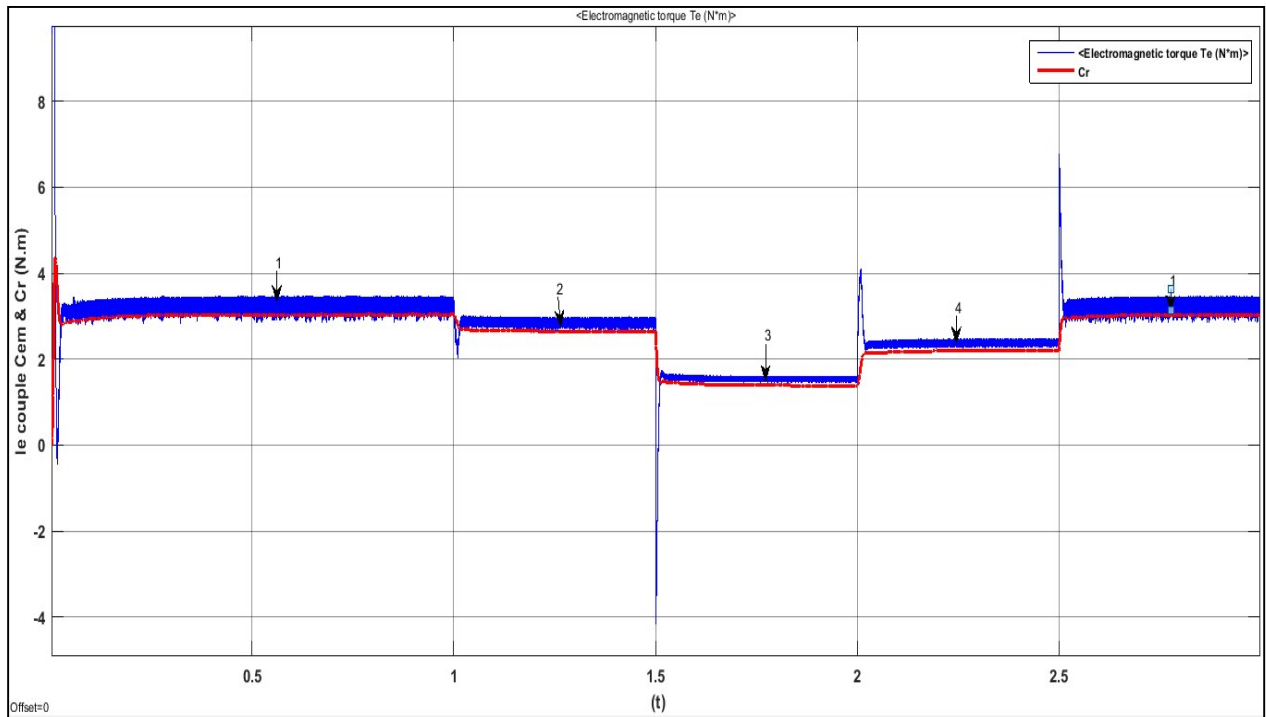


Figure.4.22. b : Le couple électromagnétique avec le couple résistant .

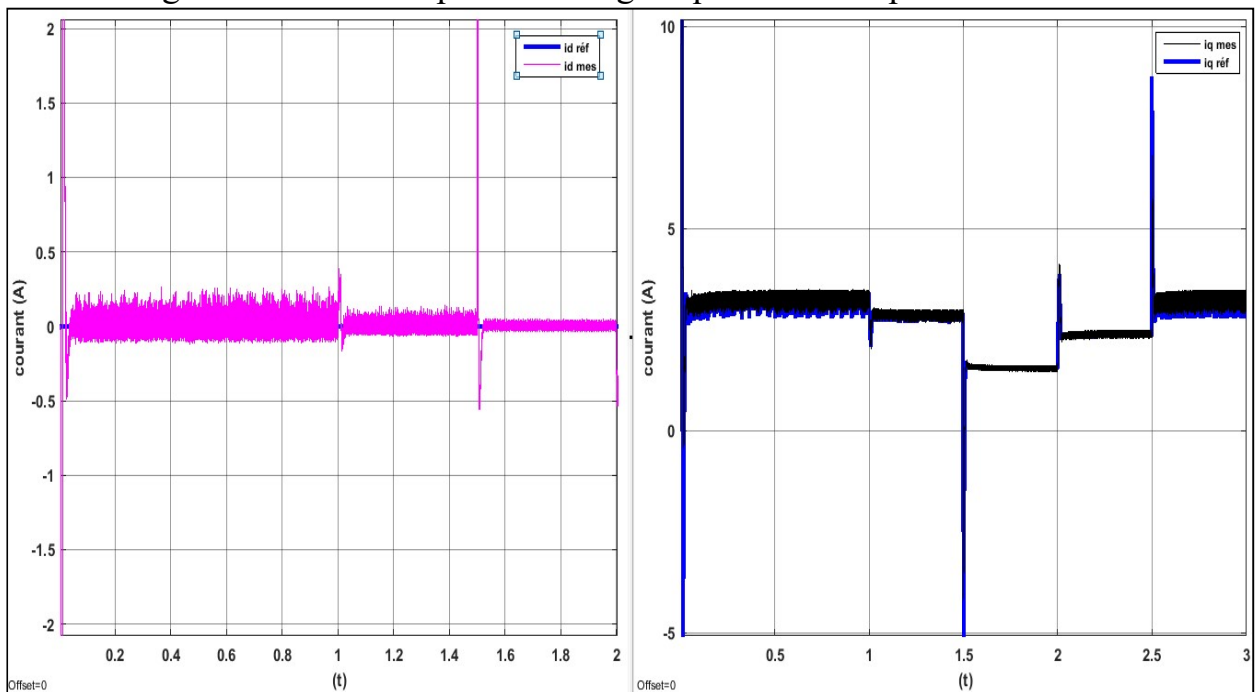


Figure.4.22.c : Le courant i_d et sa référence.

Figure.4.22. d : Le courant i_q et sa référence.

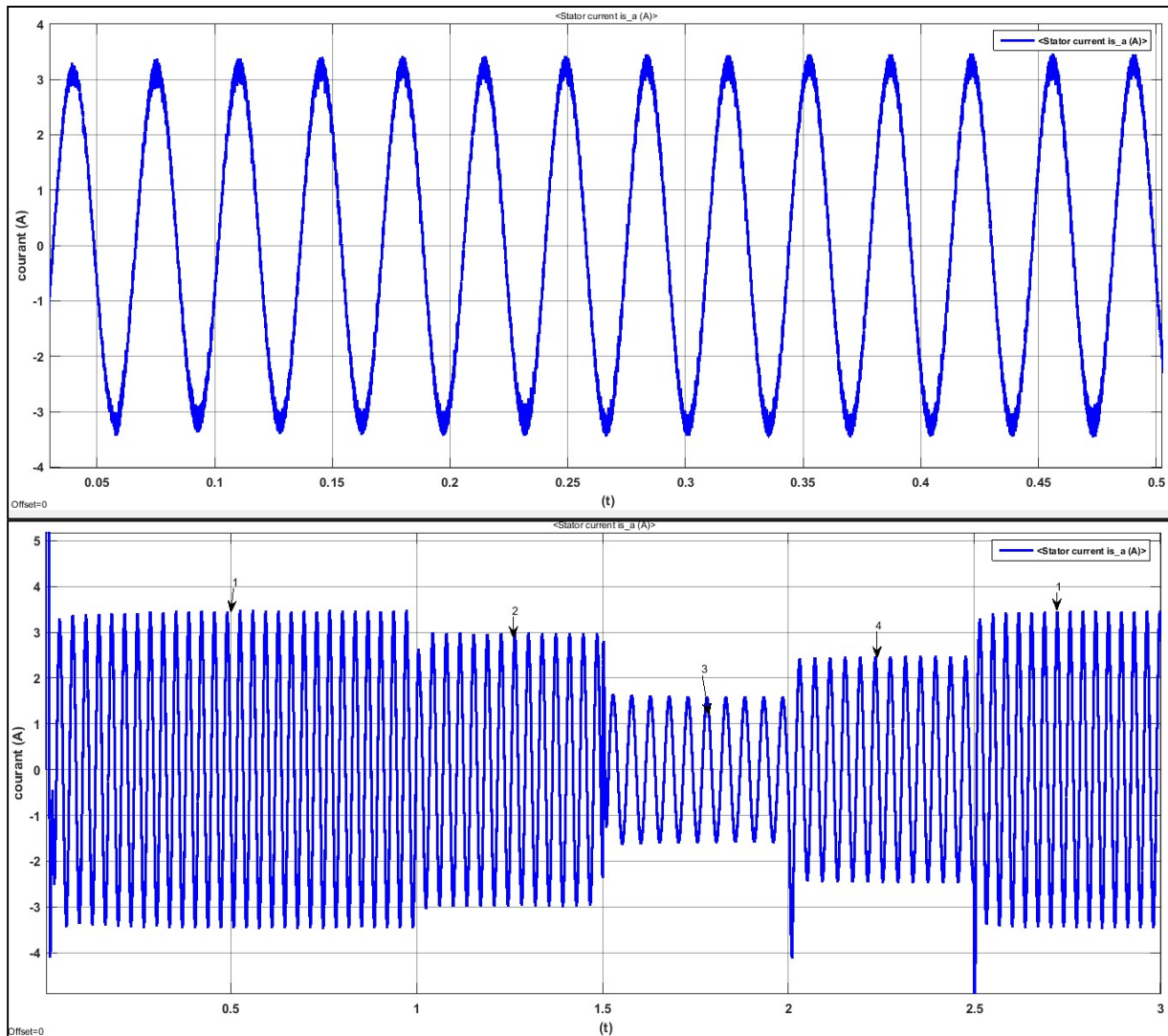


Figure.4.22. e: Courant i_{sa} (t) et un zoom de la période (1) .

La figure 4.22 montre les allures des paramètres électriques et mécaniques de la MSAP :

- La vitesse de la machine suit sa consigne sans dépassement montrant l'efficacité de la boucle de régulation de vitesse. Elle évolue selon le profil d'éclairement proposé.
- Le couple résistant évolue avec la vitesse (proportionnel à la vitesse carré).

- Le couple électromagnétique qui est la grandeur commandée présente une allure variable suivant la référence qui prend l'allure de la vitesse.
- La (figure.4.22. e) nous permet de remarquer que l'amplitude du courant statorique de la MSAP change en fonction de la puissance que doit générer la machine et par conséquent suit le changement de l'éclairement.
- L'orientation du flux par la commande adoptée peut être visible sur l'allure des courants direct et en quadrature (figure.4.22.c, d). Le courant direct est maintenu nul avec absence de perturbation, de même le courant en quadrature est l'image du couple électromagnétique de la MSAP ce qui permet de conclure que les régulateurs de la boucle interne sont performants. La réponse des deux composantes du courant montre bien le découplage introduit par la commande vectorielle de la machine

4.7.4. Résultats de simulation cote pompe centrifuge :

Soumise à la vitesse de rotation de la MSAP, la pompe centrifuge se dote de la puissance mécanique utile de la machine et la transforme en puissance hydraulique sous forme de pression et débit.

La figure 4.23 présente les allures des paramètres hydraulique (le débit et la pression), leur évolution dépend des changement d'éclairement durant une journée, de même pour la puissance hydraulique.

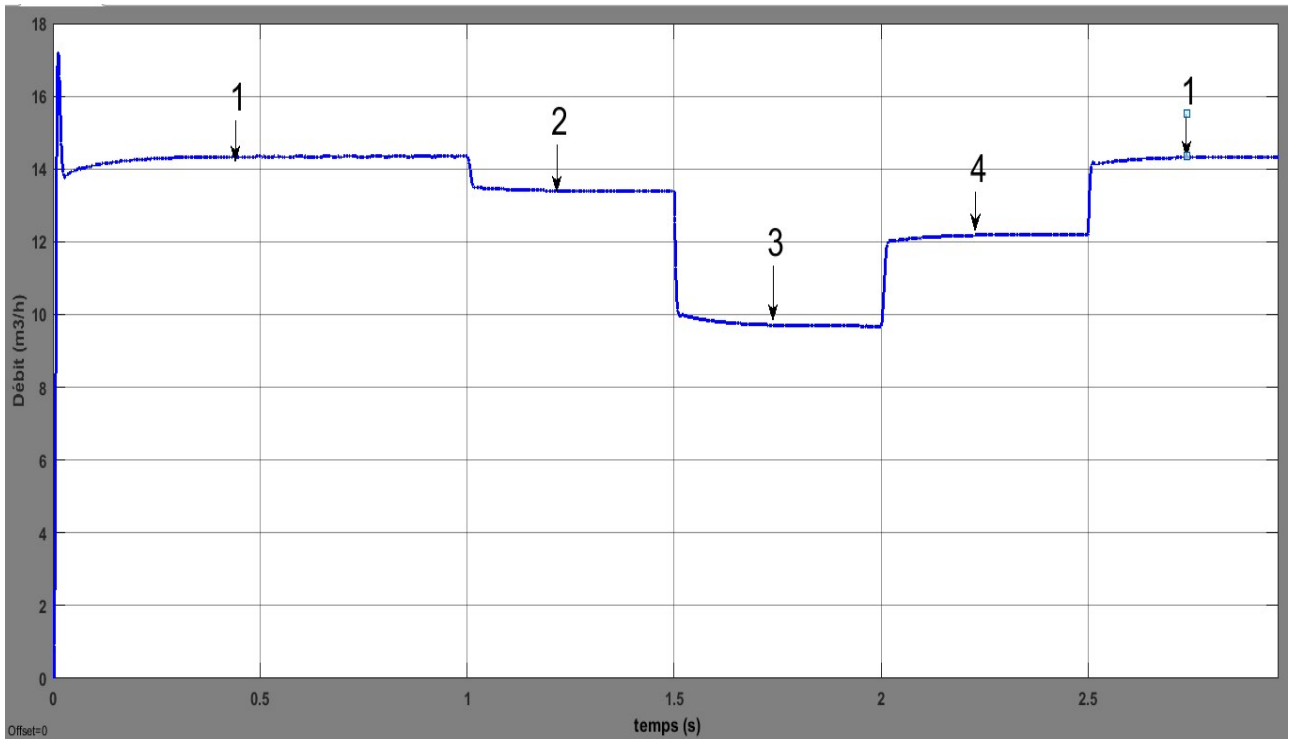


Figure 4.23. a : Débit de la pompe $Q(t)$.

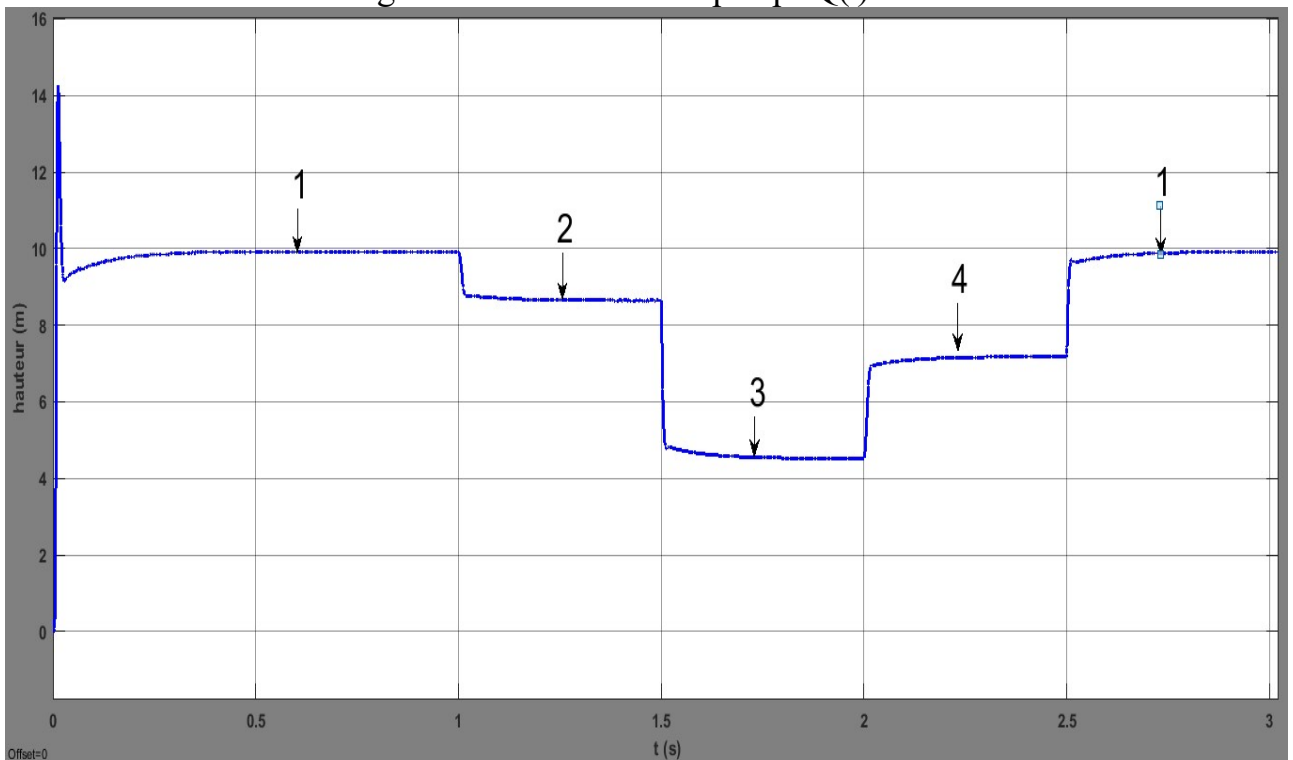


Figure 4.23. b : Hauteur manométrique de la pompe $H(t)$.

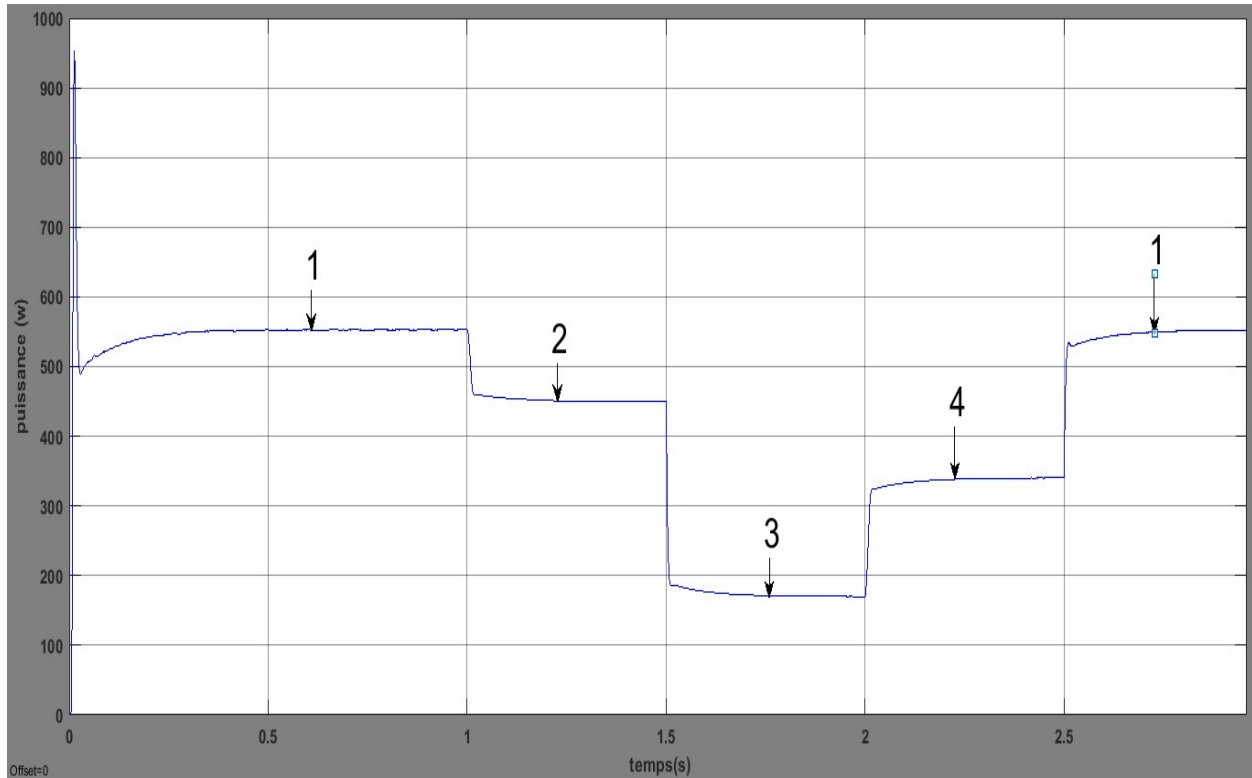


Figure .4.23.c : La puissance de la pompe (t)

On présente quelques résultats numériques obtenu des allures ci-dessous :

Au premier palier d'éclairements $G=1000\text{W/m}^2$, où la valeur de la puissance maximale du GPV est de 800 W correspondant à une tension optimale de 114.8 V et un courant optimal de 6.97 A, ainsi qu'à une vitesse de 183 rad/s comme le montre les figure (4.20.a, l, m et b), la valeur de débit et la HMT de la pompe sont ($D=14.4\text{ m}^3/\text{h}$; $\text{HMT}=10\text{ m}$).

Pour une faible valeur d'éclairement de 300 W/ m^2 , on obtient une puissance électrique maximale de 243W, correspondrait à une tension optimale de 115 V et un courant optimal de 2.093A, la vitesse environ 123.18 rad/s, et le couple résistant égal à 1.4 N.m. la valeur de débit et la HMT de la pompe sont ($D=9.68\text{ m}^3/\text{h}$; $\text{HMT}=4.52\text{ m}$)

Ce qui correspond à des pourcentages de 62.38 % pour la puissance et 27.79 % pour la vitesse par rapport au cas précédent.

4.8. CONCLUSION :

Dans ce dernier chapitre nous avons présentés les différentes simulations des composants du système de pompage solaire tel que le générateur PV ; le convertisseur et le groupe motopompe.

Ensuite on a fait une simulation du système complet en fonction de l'influence du changement de l'éclairement sur les caractéristiques électriques, mécaniques et hydraulique. On a commencé par la simulation du fonctionnement en MPPT par l'algorithme P&O, pour l'adaptation de la puissance, puis La stratégie de commande vectorielle par orientation du flux est utilisée ici comme une solution pour avoir un découplage neutre flux et couple. Ce qui nous a permet de conclure que la commande avec l'algorithme MPPT permet d'optimiser les performances du système de production photovoltaïque en fonction de l'ensoleillement.

CONCLUSION GENERALE

Après avoir rappelé l'importance de recourir aux énergies renouvelables pour pomper l'eau. Notre travail se concentre sur la modélisation du système PV . Le système comprend : Générateur photovoltaïque, contrôlé par l'algorithme MPPT, pour obtenir une puissance maximale un convertisseur statique et une unité de pompage.

Un convertisseur est un onduleur triphasé utilisé pour convertir le courant continu en courant alternatif, pour alimenter l'unité de pompage (moteur synchrone et pompe centrifuge). Un stockage d'eau dans un réservoir au-dessus du sol, est pris comme alternative au stockage de l'électricité pour des raisons techniques et économiques. Dans ce cas la pompe est opérationnelle seulement durant les périodes éclairés. Une commande vectorielle directe contribue à un contrôle performant de la vitesse du moteur synchrone.

Le premier chapitre est consacré à la connaissance des types de pompage aux énergies renouvelables, leurs composants de base et leurs principes de travail.

Dans le deuxième chapitre, nous nous intéressons à la modélisation de tous les éléments du système proposé, toutes les équations de modélisation sont basées sur la littérature scientifique. Ainsi que l'effet de la température et de l'éclairage sur les propriétés des cellules photovoltaïques.

Dans le troisième chapitre, nous étudions certains types d'algorithmes MPPT et sélectionnons P et O pour optimiser la sortie du générateur PV. En plus du contrôle radial direct pour améliorer les performances du moteur synchrone.

Dans le dernier chapitre, nous avons fait une simulation complète du système en utilisant MATLAB/SIMILINK, nous avons présentés les différentes simulations des composants du système de pompage solaire tel que le générateur PV ; le convertisseur et le groupe motopompe. Et l'influence de changement de l'éclairement sur les performance groupe motopompe et l'efficacité de la commande MPPT pour l'adaptation de la puissance, aussi on utilise la commande vectorielle pour avoir un découplage neutre flux et couple.

REFERENCS BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_%C3%A9lectrique#Historique
- [2] Hamiche A, Stambouli A and Flazi S, 2016. '[A review on the water and energy sectors in Algeria: Current forecasts, scenario and sustainability issues](#)'. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41 :261-276.
- [3] F. Bendioudi et F. Lakhdari, « *Etude et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque avec batteries* » ; Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira, Bejaïa, 2014.
- [4] A. Belhocine et S. Zaidi, « *Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome* » ; Mémoire de master., Université de Bejaïa, 2012.
- [5] A. melilie ; « *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque par la commande MPPT (P&O)* » ; Mémoire master, Université Djilali Liabes, 2016.
- [6] Imloul Laria, Louaileche Chahla ; « *Etude d'un système de pompage photovoltaïque avec stockage* » ; Mémoire master, Université Abderrahmane Mira, Bejaïa, 2018.
- [7] Mohamed Ouled Salem ; « *Analyse, Modélisation et Simulation des Pertes dans un Module Photovoltaïque à Base de Silicium Monocristallin* » ; Mémoire master, université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, 2010.
- [8] Helali Kamelia ; « *Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative* » ; Mémoire master, université mouloud mammeri de tizi-ouzou,2012.

- [9] S. Sali et A. Ouakli, « Commande non linéaire d'un système de pompage photovoltaïque » ; Mémoire master, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2017.
- [10] Belahbib Dia Elhak et Mosbah Sid Ali, « commande d'un mada destinée à la production d'énergie éolienne associée à un convertisseur multicellulaire parallèle » ; Mémoire master, université Djilali Liabes de Sidi Bel abbes, 2019.
- [11] LAHCENE BELLAHCENE et MOHAMED DJAOUANI, « Commande vectorielle en vitesse du moteur synchrone `a aimants permanents dotée d'un observateur MRAS » ; Mémoire master, Université Aboubakr Bel kaid, Tlemcen, 2017.
- [12] Melledebili Narimene, « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque » ; Mémoire master, UNIVERSITE CONSTANTINE I, 2015.
- [13] Mr. BELKACEM Mourad, «Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximale (MPPT). » ; Mémoire master, Universite Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2015.
- [14] Sedrati Youcef, Nouar Hatem, «Implémentation de l'algorithme P&O pour un système photovoltaïque. » ; Mémoire master, Universite Kasdi Merbah-Ouargla, 2016.
- [15] Lahcene Bellahcene, Mohamed Djaouani, «Commande vectorielle en vitesse du moteur synchrone `a aimants permanents dotée d'un observateur MRAS. » ; Mémoire master, Université Aboubakr Bel kaid– Tlemcen, 2017.
- [16] Abdeddaim Sabrina, « Optimisation de deux systèmes de génération renouvelable (photovoltaïque et éolienne) connectés au réseau. » ; Mémoire Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2013.

[17] H. LEQUEU – [DIV435] – Fichier : IUT-EDP-9, 2004/2005.

[18] Ghrib Mohamed, « Etude de conception d'une éolienne de pompage mécanique. » ; Mémoire master, UNIVERSITE DE SAAD DAHLEB DE BLIDA –, 2012.

[19] Abdoul Karim Traoré, « Gestion d'un système autonome hybride photovoltaïque éolien pour applications agricoles. » ; Université du Québec ,2016.

[20] C. Gopal, M. Mohanraj, P. Chandramohan, and P. Chandrasekar, Renewable energy source water pumping systems - A literature review," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 25, pp. 351-370, 2013.

[21] V. Prema and K. U. Rao, "Predictive models for power management of a hybrid microgrid - A review," International Conference on Advances in Energy Conversion Technologies (ICAECT), 2014, pp. 7-12.

[22] N. Mansouri, N. Ghanmi « Commande et analyse des performances d'une station de pompage photovoltaïque fonctionnant en régime optimal » Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°1 (2008).

[23] : M. Masour niang & Souleymane Diop. « Les pompe solaires : Dimensionnement d'une station de pompage en zone maraîcher » Institut Supérieur de Technologie Industrielle-DIT électrotechnique- Electromécanique-Froid et Climatisation.2008.

[25] Gabriel BUCHE commande vectorielle de machine asynchrone en environnement temps réel MATLAB /SIMULINK. Mémoire d'ingénieur C.N.A.Men automatisme industriel ;centre régional associé de GRONOBLE (C.U.E.F.A), 7 mars 2001.

[26] Laid ZAROUR, «étude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolienhors réseau», Thèse Doctorat, Université Mentouri de Constantine (UMC), Algérie, 2010.

[27] Charrouf Omar, « optimisation d'un système de dessalement renouvelable », Mémoire magister, Université Mohamed Khider – Biskra,2012.

ANNEXE

A : Algorithme du MPPT « perturbations et observation

```
function duty =MPPT_algorithm(vpv,ipv,delta)
duty_init=0.1;
duty_min=0;
duty_max=0.85;
persistent Vold Pold duty_old;
if isempty(Vold)
    Vold=0;
    Pold=0;
    duty_old=duty_init;
end
P=vpv*ipv;
dV=vpv-Vold;
dP=P-Pold;

if dP~= 0 && vpv>30
if dP<0
if dV<0
            duty=duty_old -delta;
else
            duty=duty_old +delta;
end
else
if dV<0
            duty=duty_old +delta;
else
            duty=duty_old -delta;
end
end
else
    duty=duty_old ;
end
if duty>=duty_max
    duty=duty_max;
elseif duty<=duty_min
    duty=duty_min;
end
duty_old=duty;
Vold=vpv;
```

$P_{old}=P;$

B- Parametres de la machine synchrone à aimant permanent:

Puissance nominale	P	1	Kw
Vitesse nominale	n	1000	tr /min
Résistance d'une phase statorique	RS	10.1	Ω
le moment d'inertie	J	0.0022	Kg/m ²
flux des aimants		0.2214	Wb
Coefficient de frottement visqueux	fv	3.5e-3	Nm / (rad / s)
Nombre de pair de pôles	p	3
Inductance directe	Ld	35.31e-3	H
Inductances en quadrature	Lq	35.31e-3	H

C- Paramètres de la pompe centrifuge :

Puissance nominale	Pn	559.5	w
Vitesse nominale	N	1750	Tr/min
Hauteur totale du pompage	H	10	m
Hauteur statique	HS	7.4	m
Longueur de la tuyauterie	L	7.4	m
Accélération de la pesanteur	g	9.81	m /s ²
La masse volumique de l'eau	ρ	1000	Kg/m ²

Paramètre de la pompe centrifuge :

$$a_0 = 4.2934e-4 \text{ m / (rad /s)}^2 ; a_1 = 1.5825e-5 \text{ .heure / (m}^2 \cdot \text{(rad /h))};$$
$$a_2 = - 0.0410 \text{ (heure)}^2 / (\text{m / (m}^3 \text{ /h)}^2)$$

Résumé :

Le besoin croissant d'énergie et d'eau dans les zones isolées augmente rapidement. L'utilisation de l'énergie photovoltaïque décentralisée présente une solution prometteuse. En conséquence, le but de ce travail est d'étudier un système photoélectrique autonome qui fonctionne à puissance maximale. Cette étude concerne un système de pompage photovoltaïque indépendant destiné pour les régions éloignées du réseau public et où il y'a un besoin accru en eau. Pour améliorer le rendement du générateur, l'optimisation de son énergie a été accomplie par application d'un algorithme classique et populaire l'algorithme MPPT nommé perturbation et d'observation (P&O). La transformation de l'énergie électrique en énergie hydraulique est effectué par un groupe motopompe, une machine synchrone à aimant permanent couplé à une pompe centrifuge. Un control vectoriel de la MSAP, permet l'adaptation de la vitesse avec le changement de l'éclairément, ce qui influe aussi sur les paramètres mécaniques de la pompe. Pour accomplir ces objectifs, une modélisation et simulation de la chaine ont été présentés.

Mots Clés :

Energie photovoltaïque - machine synchrone - commande MPPT- pompe centrifuge - commande vectorielle.

ملخص:

تتزايد الحاجة المتزايدة للطاقة والمياه في المناطق النائية بسرعة. يقدم استخدام الطاقة الكهروضوئية اللامركزية حلاً واعدًا. وفقاً لذلك ، فإن الهدف من هذا العمل هو دراسة نظام كهروضوئي مستقل يعمل بأقصى طاقة. تتعلق هذه الدراسة بنظام ضخ ضوئي مستقل مخصص للمناطق البعيدة عن الشبكة العامة وحيث توجد حاجة متزايدة للمياه. لتحسين كفاءة المولد ، تم تحسين طاقته من خلال تطبيق خوارزمية

كلاسيكية وشائعة تسمى خوارزمية MPPT وهي الاضطراب والمراقبة (P&O) . يتم تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة هيدروليكية بواسطة وحدة مضخة بمحرك ، وهي آلة متزامنة ذات مغناطيس دائم مقرونة بمضخة طرد مركزي. يسمح التحكم المتجه في MSAP بتكييف السرعة مع تغيير الإضاءة ، مما يؤثر أيضاً على المعلمات الميكانيكية للمضخة. لتحقيق هذه الأهداف ، تم تقديم نمذجة ومحاكاة للسلسلة.

كلمات مفتاحية:

الطاقة الكهروضوئية، آلة تزامنية، تحكم MPPT، مضخة الطرد المركزي، التحكم الشعاعي.