

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
**Ministère de L'enseignement Supérieur et de La Recherche  
Scientifique**



جامعة د. الطاهر مولاي – سعيدة  
**Université Dr. Tahar Moulay  
SAIDA**



## **Mémoire de Fin d'Etudes**

En vue de l'obtention du diplôme de

### **Master (LMD)**

Spécialité : **RESEAUX ELECTRIQUES**

Filière : **ELECTROTECHNIQUE**

Intitulé :

### **Etude et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque avec Batteries**

Présenté par :

**HADEF Hamza**

**Dr. AMMARA Mohammed**

**Dr. SEKOUR M'hamed**

**Dr. MOSTEFAI Mohammed**

**Dr. MANKOUR Mohammed**

**Président**

**Encadreur**

**Co-encadreur**

**Examineur**

Soutenu le 11/07/2021  
Promotion 2020-2021

## Remerciements

---

*Nous remercions en premier lieu, Dieu l'unique de nous avoir donné la fois, le courage et la confiance en nous-mêmes pour pouvoir continuer nos études.*

*Nous tenons à exprimer toute notre gratitude à Monsieur **SEKOUR.M**, professeur à l'université Dr. MOULAY TAHAR de Saïda, pour ses orientations éclairées, ses conseils constructifs, son esprit critique et son aide précieuse.*

*Nous remercions tous nos professeurs qui ont fait de gros efforts pour la réussite de notre formation.*

*Nous remercions également tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de notre mémoire.*

*Nous remercions tous ceux qui nous ont permis d'arriver à ce stade nos parents, pour leur soutien et encouragements.*

*Enfin nous tenons à remercier le Dr. **MANKOUR.M** et le Dr. **AMMARA.M** qui nous ont fait l'honneur de juger ce mémoire.*

# Dédicace

*Je dédie ce simple travail à mes très chers parents, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, la patience, le soutien, l'aide et les encouragements sont l'essence de ma réussite. Sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui*

*Je dédie ce travail également :*

- *A toute la famille HADEF*
- *A tous mes amies*
- *A tous ceux qui me sont chers*
- *A toute la promotion RE 2021*

**HADEF Hamza**

# Table des matières

Remerciements.....	I
Dédicace.....	II
Table des matières.....	III
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux.....	X
Liste des symboles.....	XI
Introduction générale.....	1

## Chapitre I : Modélisation d'un Générateur Photovoltaïque

I. Chapitre I .....	5
I.1 Introduction .....	5
I.2 L'énergie solaire .....	5
I.3 Les cellules photovoltaïques .....	6
I.3.1 L'effet photovoltaïque .....	6
I.3.2 Les différents types des cellules photovoltaïques.....	7
I.4 Modélisation de la cellule PV .....	7
I.4.1 Cellule PV idéale.....	8
I.4.2 Cellule PV réelle .....	10
I.5 Regroupement des cellules .....	11
I.5.1 Regroupement en série.....	11
I.5.2 Regroupement en parallèle.....	12
I.5.3 Regroupement Mixte (série & parallèle) .....	12
I.6 Les panneaux photovoltaïques .....	13
I.7 Le champ photovoltaïque.....	14
I.8 Modélisation du Module (panneau) photovoltaïque .....	14
I.8.1 Influence de l'éclairement .....	15
I.8.2 Influence de la température sur la cellule PV .....	16
I.8.3 Influence de la résistance série .....	17
I.8.4 Influence de la résistance parallèle .....	17
I.9 Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT).....	18
I.9.1 Introduction .....	18
I.9.2 Algorithme de perturbation et observation.....	18
I.10 Modélisation des convertisseurs Buck, Boost et Buck-Boost .....	20
I.10.1 Convertisseur Buck.....	21
I.10.1.1 Structure.....	21
I.10.1.2 Dimensionnement du convertisseur Buck.....	21
I.10.1.3 Ondulation du courant $\Delta i_L$ .....	21
I.10.1.4 Courant d'entrée moyen .....	21
I.10.1.5 Résistance critique.....	22
I.10.1.6 Choix de la diode .....	22
I.10.1.7 Choix de MOSFET.....	22
I.10.1.8 Ondulation de la tension de sortie $\Delta V_s$ choix de $C$ .....	23
I.10.1.9 Résultats de simulation.....	23
I.10.2 Convertisseur Boost.....	26

I.10.2.1	Structure .....	26
I.10.2.2	Dimensionnement du convertisseur Boost.....	26
I.10.2.3	Ondulation du courant $i_L$ .....	26
I.10.2.4	Courant d'entrée moyen .....	27
I.10.2.5	Résistance critique.....	27
I.10.2.6	Choix de la diode .....	27
I.10.2.7	Choix de MOSFET.....	28
I.10.2.8	Ondulation de la tension de sortie $V_s$ et choix de C .....	28
I.10.2.9	Résultats de simulation.....	28
I.10.3	Convertisseur Buck-Boost.....	30
I.10.3.1	Structure .....	30
I.10.3.2	Dimensionnement des composants actifs.....	30
I.10.3.3	Courant d'entrée moyen .....	30
I.10.3.4	Courant dans l'interrupteur.....	31
I.10.3.5	Tension maximale aux bornes de l'interrupteur .....	31
I.10.3.6	Courant dans la diode $D$ .....	31
I.10.3.7	Calcul de la valeur du condensateur de sortie .....	32
I.10.3.8	Calcul de la valeur du l'inductance.....	32
I.10.3.9	Résultats de simulation.....	32
I.11	Simulation du système photovoltaïque avec hacheur commandé en MPPT (P&O).....	33
I.11.1	Test pour changement d'éclairement.....	34
I.11.2	Test pour changement du température.....	34
I.11.3	Interprétation des résultats.....	36
I.12	Conclusion.....	36

## Chapitre II : Commande Vectorielle d'un Moteur Asynchrone

Chapitre II.....	37
II. Chapitre II.....	38
II.1 Introduction .....	38
II.2 Modélisation de la machine asynchrone triphasée.....	38
II.2.1 Description .....	38
II.2.2 Hypothèses simplificatrices.....	40
II.2.3 Conventions de signes.....	41
II.2.4 Mise en équations de la machine asynchrone.....	41
II.2.4.1 Equations électriques .....	41
II.2.4.2 Equations magnétiques.....	42
II.2.4.3 Equation mécanique.....	42
II.2.5 Modèle de Park de la machine asynchrone .....	42
II.2.6 Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de PARK.....	44
II.2.6.1 Équations des tensions.....	44
II.2.6.2 Équations des flux .....	45
II.2.6.3 Couple électromagnétique.....	45
II.2.7 Choix du référentiel.....	46
II.2.7.1 Référentiel lié au stator.....	46

II.2.7.2	Référentiel lié au rotor .....	47
II.2.7.3	Référentiel lié au champ tournant.....	47
II.2.8	Représentation d'état de PARK.....	49
II.2.9	Résultats de simulation.....	51
II.2.9.1	Interprétations et commentaires des résultats.....	54
II.3	Le système d'alimentation .....	<b>54</b>
II.3.1	Modélisation de l'onduleur .....	55
II.3.1.1	Modèle mathématique de l'onduleur triphasé.....	55
II.3.1.2	Commande par modulation de largeur d'impulsion MLI .....	57
II.3.1.2.1	La stratégie triangulo sinusoïdale .....	57
II.3.2	Simulation de l'ensemble onduleur moteur asynchrone .....	60
II.3.2.1	Interprétation des résultats .....	63
II.4	Commande vectorielle de la machine asynchrone .....	<b>63</b>
II.4.1	Principe général de la méthode.....	63
II.4.2	Synthèse de la commande vectorielle .....	64
II.4.3	L'orientation du flux rotorique.....	65
II.4.4	Structure de la commande vectorielle .....	68
II.4.4.1	La commande vectorielle directe .....	68
II.4.4.2	La commande vectorielle indirecte.....	69
II.4.5	Méthode de synthèse du régulateur de vitesse .....	70
II.4.5.1	Réglage par structure PI .....	71
II.4.5.2	Réglage de la position .....	71
II.4.5.3	Résultats de simulation.....	73
II.4.5.4	Interprétation des résultats .....	73
II.5	Conclusion.....	<b>82</b>
<b>Chapitre III : Le Pompage Solaire</b>		
III.	Chapitre III .....	84
III.1	Introduction.....	84
III.2	Méthodes de pompage solaire .....	84
III.2.1	Le pompage au fil du soleil .....	84
III.2.2	Pompage avec batteries.....	85
III.2.3	Les avantages et inconvénients des pompes au fil du soleil et avec batteries .....	85
III.3	Les composants d'un système de pompage PV .....	86
III.3.1	Le générateur photovoltaïque .....	86
III.3.2	L'électronique de commande et contrôle .....	86
III.3.2.1	Le convertisseur DC/DC (hacheur) .....	86
III.3.2.2	Le convertisseur DC/AC (onduleur) .....	86
III.3.3	Le groupe électropompe .....	87
III.3.3.1	La pompe.....	87
III.3.3.1.1	Modélisation de la pompe centrifuge .....	89
III.3.3.2	Moteur .....	89
III.3.4	Stockage.....	90
III.3.4.1.1	Le modèle électrique de la batterie.....	90

III.4	Dimensionnement et gestion de l'énergie du système de pompage photovoltaïque avec batteries.....	93
III.5	Méthode de dimensionnement.....	93
III.5.1	Evaluation des besoins en eau.....	93
III.5.1.1	Calcul le débit moyen journalier $Q_{moy}$ .....	93
III.5.1.2	Le débit max journalier ( $Q_{maxj}$ ).....	94
III.5.2	Détermination de l'énergie solaire disponible .....	94
III.5.3	Dimensionnement et choix de la pompe .....	95
III.5.3.1	Données de base.....	95
III.5.3.1.1	Débit (Q) .....	95
III.5.3.1.2	Hauteur manométrique totale (HMT) .....	95
III.5.3.1.3	Niveau statique .....	95
III.5.3.1.4	Niveau dynamique.....	95
III.5.3.2	Calcul le débit horaire de pompe ( $Q_h$ ) .....	96
III.5.3.3	Calcul le diamètre de la conduite de refoulement (D).....	96
III.5.3.4	Calcul la vitesse de refoulement (V).....	97
III.5.3.5	Dimensionnement le Bassin Abreuvoir ( $V_a$ ).....	97
III.5.3.6	Calcul Hauteur manométrique totale (HMT) .....	97
III.5.3.7	Calcul la hauteur géométrique ( $H_g$ ) .....	98
III.5.3.8	Calcul Perte de charge totale ( $P_c$ ).....	98
III.5.3.9	Calcul Perte de charge linéaire ( $\Delta H_l$ ).....	98
III.5.3.10	Calcul du coefficient de frottement ( $\lambda$ ) .....	99
III.5.3.11	Calcul Perte de charge singulière ( $\Delta H_s$ ).....	99
III.5.3.12	Calcul la puissance de pompe (P).....	100
III.5.3.13	Calcul l'énergie quotidienne consommée par la pompe (Energie hydraulique) ( $E_h$ ) .....	100
III.5.3.14	Calcul l'énergie électrique quotidienne requise ( $E_e$ ) .....	100
III.5.3.15	Choix de la pompe .....	101
III.5.4	Le choix de l'onduleur (L'électronique de commande et de contrôle) .....	101
III.5.5	Dimensionnement Le générateur photovoltaïque .....	102
III.5.5.1	Calcul la puissance crête du générateur photovoltaïque ( $P_g$ ) .....	102
III.5.5.2	Calcul Nombre total de module ( $N_m$ ) .....	102
III.5.5.3	Calcul Nombre de module en parallèle ( $N_{mp}$ ) .....	102
III.6	Gestion de l'énergie entre les différents composants du système .....	103
III.6.1	Modes de fonctionnement.....	104
III.7	Simulation du système de pompage photovoltaïque avec batteries connecté au générateur photovoltaïque.....	104
III.7.1	Les résultats de simulation du système globale pour une journée d'été .....	106
III.8	Conclusion.....	113
	Conclusion générale.....	114
	Bibliographie.....	117

# Liste des figures

## Chapitre I : Modélisation d'un Générateur Photovoltaïque

<b>Figure.I.1</b>	Schéma équivalent d'une cellule PV.....	08
<b>Figure.I.2</b>	Schéma équivalent d'une photopile idéale.....	09
<b>Figure.I.3</b>	Constitution de la caractéristique d'une photopile.....	09
<b>Figure.I.4</b>	Caractéristique courant-tension d'une photopile.....	10
<b>Figure.I.5</b>	Caractéristique courant tension de $N_s$ cellules en série.....	11
<b>Figure.I.6</b>	Caractéristique courant tension de $N_p$ cellules en parallèle.....	12
<b>Figure.I.7</b>	Caractéristique résultante du regroupement mixte.....	13
<b>Figure.I.8</b>	Effet de l'éclairement sur la caractéristique (I-V) .....	15
<b>Figure.I.9</b>	Effet de l'éclairement sur la caractéristique (P-V) .....	15
<b>Figure.I.10</b>	Effet de la température sur la caractéristique (I-V) .....	16
<b>Figure.I.11</b>	Effet de la température sur la caractéristique (P-V) .....	16
<b>Figure.I.12</b>	Effet de la résistance série sur la caractéristique (I-V) .....	17
<b>Figure.I.13</b>	Effet de la résistance parallèle sur la caractéristique (I-V) .....	18
<b>Figure.I.14</b>	Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O.....	19
<b>Figure.I.15</b>	Organigramme de la méthode P&O.....	20
<b>Figure.I.16</b>	Le schéma de principe d'un hacheur.....	21
<b>Figure.I.17</b>	Réponses transitoires des modèles Buck développés en boucle ouverte.....	25
<b>Figure.I.18</b>	Réponses transitoires des modèles Buck développés en boucle ouverte Buck lors de la variation de la tension d'entrée et la charge.....	26
<b>Figure.I.19</b>	Schéma du convertisseur Boost.....	26
<b>Figure.I.20</b>	Réponse transitoire de modèle Boost développé en boucle ouverte.....	29
<b>Figure.I.21</b>	Réponses transitoires des modèles Boost développés en boucle ouverte lors de la variation de la tension d'entrée et la charge.....	30
<b>Figure.I.22</b>	Schéma du convertisseur Buck-Boost.....	30
<b>Figure.I.23</b>	Réponses transitoires de la tension de sortie de modèles Buck-Boost développés en boucle ouverte.....	33
<b>Figure.I.24</b>	Réponses transitoires de la tension de sortie de modèles Buck-Boost développés en boucle ouverte lors de la variation de la tension d'entrée.....	33
<b>Figure.I.25</b>	Comparaison entre les puissances $P_{pv}$ , $P_{ref}$ et $P_{ch}$ (P&O) sous un changement d'éclairement.....	34
<b>Figure.I.26</b>	Courbe de la tension sous un changement d'éclairement.....	34
<b>Figure.I.27</b>	Comparaison entre les puissances $P_{pv}$ , $P_{ref}$ et $P_{ch}$ (P&O) sous un changement température.....	35
<b>Figure.I.28</b>	Courbe de la tension sous un changement de température.....	35

## Chapitre II : Commande Vectorielle d'un Moteur Asynchrone

<b>Figure.II.1</b>	Description du moteur asynchrone (catalogue Leroy-Somer) .....	39
<b>Figure.II.2</b>	Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor.....	40
<b>Figure.II.3</b>	Repérage angulaire des systèmes d'axes fictifs de la machine asynchrone.....	43



<b>Figure.II.4</b>	Représentation des différents référentiels.....	48
<b>Figure.II.5</b>	Structure du modèle de la machine alimentée en tension.....	51
<b>Figure.II.6</b>	Démarrage direct du moteur asynchrone à vide.....	52
<b>Figure.II.7</b>	Démarrage direct du moteur asynchrone avec une charge (10 N.m), $t=1s$ .....	53
<b>Figure.II.8</b>	Structure générale de l'onduleur.....	54
<b>Figure.II.9</b>	Structure de l'onduleur & Moteur asynchrone.....	55
<b>Figure.II.10</b>	Schéma simplifié de l'onduleur triphasé.....	55
<b>Figure.II.11</b>	Principe de la commande.....	58
<b>Figure.II.12</b>	Tensions aux bornes de l'onduleur.....	59
<b>Figure.II.13</b>	Structure de l'association onduleur - moteur asynchrone.....	60
<b>Figure.II.14</b>	Démarrage du moteur asynchrone alimenté par un onduleur à MLI à vide.....	61
<b>Figure.II.15</b>	Démarrage du moteur asynchrone alimenté par un onduleur avec application de charge 10 (N.m) à l'instant $t = 1$ .....	63
<b>Figure.II.16</b>	Principe de la commande découplée pour la machine à CC a excitation séparée et la machine AC.....	64
<b>Figure.II.17</b>	Référentiel lié au flux rotorique.....	65
<b>Figure.II.18</b>	Structure de la commande vectorielle.....	68
<b>Figure.II.19</b>	Modèle dynamique d'estimation du flux.....	69
<b>Figure.II.20</b>	Structure de principe de la commande vectorielle indirecte.....	70
<b>Figure.II.21</b>	Structure de régulation de la vitesse de rotation.....	71
<b>Figure.II.22</b>	Structure de la commande en vitesse et en position.....	71
<b>Figure.II.23</b>	Structure de régulation de la position $\theta_r$ .....	72
<b>Figure.II.24</b>	Structure de principe de la commande vectorielle indirecte.....	72
<b>Figure.II.25</b>	Réglage de vitesse par la commande vectorielle indirecte. Inversion de sens de rotation à l'instant $t=1s$ et $t=2s$ .....	75
<b>Figure.II.26</b>	Réglage de vitesse par la commande vectorielle indirecte. Application et élimination de la charge (10 N.m) à $t=1,5s$ et $t=2,5s$ .....	77
<b>Figure.II.27</b>	Réglage de position par la commande vectorielle indirecte. Application et élimination de la charge (5 N.m) à $t=1s$ et $t=2s$ .....	79
<b>Figure.II.28</b>	Réglage de position par la commande vectorielle indirecte. Inversion de sens de rotation à l'instant $t=1s$ .....	81

### Chapitre III : Le Pompage Solaire

<b>Figure.III.1</b>	Modèle électrique d'une cellule.....	91
<b>Figure.III.2</b>	Modèle global de la batterie.....	92
<b>Figure.III.3</b>	Caractéristiques de la batterie.....	92
<b>Figure.III.4</b>	Consommation journalière d'un village.....	94
<b>Figure.III.5</b>	Hauteur manométrique total.....	96
<b>Figure.III.6</b>	Organigramme de gestion d'énergie du système globale.....	103
<b>Figure.III.7</b>	La puissance hydraulique.....	105
<b>Figure.III.8</b>	Puissance électrique demandée par la charge.....	105
<b>Figure.III.9</b>	Variation de la puissance PV le long d'une journée. ....	106

<b>Figure.III.10</b>	<i>Tension aux bornes de la batterie.....</i>	<i>106</i>
<b>Figure.III.11</b>	<i>Allure de l'état de charge de la batterie.....</i>	<i>107</i>
<b>Figure.III.12</b>	<i>Allure du courant de la batterie.....</i>	<i>107</i>
<b>Figure.III.13</b>	<i>Les réponses pour la commande vectorielle.....</i>	<i>109</i>
<b>Figure.III.14</b>	<i>Allure de la vitesse mécanique du moteur.....</i>	<i>110</i>
<b>Figure.III.15</b>	<i>Allure du débit <math>Q</math> (<math>m^3/j</math>) .....</i>	<i>110</i>
<b>Figure.III.16</b>	<i>Allure du couple résistant.....</i>	<i>111</i>
<b>Figure.III.17</b>	<i>Allure d'évolution du volume(<math>m^3</math>) .....</i>	<i>111</i>
<b>Figure.III.18</b>	<i>Allure des différentes puissances.....</i>	<i>112</i>
<b>Figure.III.19</b>	<i>Allure de la puissance de délestage.....</i>	<i>112</i>

# Liste des tableaux

---

## **Chapitre I : Modélisation d'un Générateur Photovoltaïque**

**Tableau I.1**    *Caractéristiques électriques du module Solaire BP SX 150..... 14*

**Tableau I.2**    *Principe de l'algorithme P&O..... 19*

## **Chapitre II : Modélisation d'un Générateur Photovoltaïque**

**Tableau II.1**    *Etablissement des expressions des tensions simples et composées..... 57*

## **Chapitre III : Le Pompage Solaire**

**Tableau III.1**    *Les avantages et inconvénients des pompes au fil du soleil et avec batteries..... 85*

**Tableau III.2**    *Caractéristiques des pompes volumétriques et centrifuges..... 88*

**Tableau III.3**    *Définition des conditions du région de la wilaya de Saïda..... 94*

**Tableau III.4**    *Les caractéristiques électriques de l'onduleur..... 101*

# Liste des symboles

$PV$ :	Photovoltaïques.
$GPV$ :	Générateur photovoltaïque.
$I_{ph}$ :	Photo courant ou courant généré par l'éclairement (A).
$I_d$ :	Courant de polarisation de la jonction PN de la diode.
$R_s$ :	Résistance série ( $\Omega$ ).
$R_{sh}$ :	Résistance shunt ( $\Omega$ ).
$k$ :	Constante de Boltzmann ( $k = 1,38.10^{-23}$ (SI)).
$q$ :	Charge de l'électron ( $q = 1,602.10^{-19}$ C).
$V_{oc}$ :	Tension de circuit ouvert (V).
$I_{oc}$ :	Courant de court-circuit (A).
$P_{pv}$ :	Puissance photovoltaïque (W).
$I_{pv}$ :	Courant photovoltaïque (A).
$V_{pv}$ :	Tension continue donnée par une cellule photovoltaïque (V).
$P_{max}$ :	Puissance maximale fournie par le générateur (W).
$V_{mp}$ :	Tension au point de Puissance maximale (V).
$I_{mp}$ :	Courant au point de Puissance maximale (A).
$DC$ :	Courant continu (direct curent).
$AC$ :	Courant alternatif (alternatif curent).
$E_s$ :	Ensoleillement ( $W/m^2$ ).
$MPPT$ :	Point de puissance maximale (Maximum Power Point Traker).
$I_{opt}$ :	Courant Optimal (A).
$V_{opt}$ :	Tension Optimale (V).
$V_{in}$ :	Tension à l'entrée du convertisseur statique (V).
$V_o$ :	Tension à la sortie du convertisseur statique (V).
$P_c$ :	Puissance crête (Wc).
$N_p$ :	Nombre de module en parallèle.
$N_s$ :	Nombre de module en série.
$MAS$ :	Machine Asynchrone.
$s, r$ :	Indice du stator et du rotor, respectivement.
$d, q$ :	Indice du repère synchrone (lié au champ tournant).
$\Omega_s$ :	Vitesse de rotation du champ tournant d'origine statorique.
$\Omega_r$ :	Vitesse de rotation du champ tournant d'origine rotorique.
$\omega_s$ :	Pulsation statorique, liée à la fréquence du stator.
$\omega_r$ :	Pulsation rotorique.
$\theta$ :	Angle électrique entre l'axe de la phase (a) statorique et la phase (a) rotorique.
$\theta_s$ :	Angle qui fait le repère d-q avec le stator.
$\theta_r$ :	Angle qui fait le repère d-q avec le rotor.
$R_s$ :	Résistance d'un enroulement réel du stator.
$R_r$ :	Résistance d'un enroulement fictif (non mesurable) rotorique.
$l_s$ :	Inductance propre d'un enroulement réel du stator.
$M_s$ :	Inductance mutuelle de couplage entre phases du stator.
$l_r$ :	Inductance propre d'un enroulement factif du rotor.
$M_r$ :	Inductance mutuelle de couplage entre phases du rotor.
$M_{sr}$ :	Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre phase du stator/rotor.
$J$ :	Moment d'inertie des masses tournantes.
$C_r$ :	Couple résistant imposé à l'arbre de la machine.
$\Omega_r$ :	Vitesse rotorique.
$Cem$ :	Couple électromagnétique.
$L_s, L_r$ :	Inductance cyclique statorique, Inductance cyclique rotorique.
$M$ :	Inductance mutuelle cyclique stator-rotor.
$\psi_{sd}, \psi_{rd}$ :	Flux statorique sur l'axe d (Wb), Flux rotorique sur l'axe d (Wb).
$f_p$ :	Fréquence de la porteuse triangulaire (Hz).
$V_{abcM}$ :	Tension de demi-bras a, b ou c (V).
$V_{abc}$ :	Tension de sortie de l'onduleur A, B ou C (V).
$K_i, k_p$ :	Paramètres du régulateur PI.

$FOC$ :	Flux Oriented Control.
$MLI$ :	Modulation de Largeur d'Impulsion
$m, r$ :	Indice de modulation, Taux de modulation.
$Q_h$ :	Débit horaire de pompe
$Q_{maxj}$ :	Débit max journalier.
$Q_{moyj}$ :	Débit moyen journalier.
$Re$ :	Nombre de Reynolds.
$R_p$ :	Rendement de panneau photovoltaïque.
$PS$ :	Pompage solaire
$\Delta_{HL}$ :	Perte de charge linéaire.
$\Delta_{Hs}$ :	Perte de charge singulière.
$P_c$ :	Pertes de charge totale.
$HMT$ :	Hauteur manométrique totale.
$\eta_{mp}$ :	Rendement du groupe motopompe
$\eta_{ond}$ :	Rendement d'onduleur
$\lambda$ :	Coefficient de frottement.

# Introduction Générale

---

## **Introduction Générale**

---

L'eau et l'énergie sont parmi les plus importants éléments essentiels et indispensables à la vie. La demande croissante de l'énergie et l'épuisement futur inévitable des sources classiques exigent des recherches sur des sources alternatives, comme les énergies renouvelables.

La résolution de problématique de l'eau dans les sites isolés joue un rôle très important dans le développement du parcours et l'irrigation dans le vaste territoire saharien.

En effet l'objectif de ce travail, est l'étude et le dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries pour des puits de parcours et d'irrigation dans des sites isolés non connectés au réseau électrique (classique).

L'énergie solaire photovoltaïque est de plus en plus utilisée pour opérer diverses applications terrestres comme l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération et le pompage. Cette source d'énergie convient particulièrement bien pour les utilisations en milieu rural où les populations sont réparties dans de petites communautés et où la demande énergétique est relativement faible.

Notre hypothèse basée que cette solution est particulièrement intéressante pour ce type de site. D'autant plus que le territoire national dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde (durée d'insolation peut atteindre les 3900 heures par an sur le Sahara). l'énergie acquise quotidiennement sur une surface horizontale de  $1 \text{ m}^2$  est de l'ordre de 5 KWh, soit près de  $2263 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$  au sud du pays et qui disposent également d'une grande réserve d'eau souterraine à quelques mètres du sol. [1]

Ce mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre présente le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, en suite nous présentons la cellule photovoltaïque en décrivant les différents modes de regroupement, nous montrons aussi l'influence de la température, l'éclairement, et la technique MPPT sur le rendement.

Le chapitre 2 est consacré à la modélisation et la simulation du moteur asynchrone, le système d'alimentation, et le principe de la commande vectorielle.

Le chapitre 3 nous avons déterminé la méthode de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries pour satisfaire les besoins quotidiens en eau, nous allons aussi présenter un système de gestion, qui a pour but de contrôler l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques. Après les différents résultats obtenus par la simulation avec le programme Matlab.

Nous terminerons par une conclusion générale sur l'ensemble de cette étude et la proposition des perspectives relatives à ce travail.



# **Chapitre I**

## **Modélisation d'un Générateur Photovoltaïque**

---

## I. Chapitre I

# Modélisation d'un Générateur Photovoltaïque

---

### I.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. Ce chapitre présente les concepts dont la connaissance est nécessaire à la compréhension du fonctionnement des cellules photovoltaïques.

Nous commençons ce chapitre par la définition de cette énergie renouvelable en montrant le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, en suite nous présentons la cellule photovoltaïque en décrivant les différents modes de regroupement, nous montrons aussi l'influence de la température, l'éclairement, et la technique MPPT (maximum power point tracking) utilisée dans les systèmes photovoltaïques sur le rendement, et à la fin on termine par une conclusion.

### I.2 L'énergie solaire

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie électromagnétique provenant du soleil et parvenant à la surface de la Terre, après filtrage par l'atmosphère terrestre.

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à  $1367\text{W/m}^2$ .

La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM.

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de  $1000\text{ W/m}^2$  et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1).

Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps,

la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m<sup>2</sup>.

Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.5D. [1]

Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith).

Le « G » représente le rayonnement "global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct. [2]

### **I.3 Les cellules photovoltaïques**

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. [3]

#### **I.3.1 L'effet photovoltaïque**

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire. L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé. Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives.

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. [4]

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les

électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi un pair électron - trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel le courant électrique circule.

### I.3.2 Les différents types des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par a un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [5] :

- 1. Les cellules monocristallines :** Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'à 24.7 % en laboratoire). Cependant, elles coûtent trop chers due à leur fabrication complexe.
- 2. Les cellules poly cristallines :** Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible : de 11% à 15% jusqu'à 19.8% en laboratoire).
- 3. Les cellules amorphes :** Elles ont un faible rendement (5% à 8%, 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres. L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).

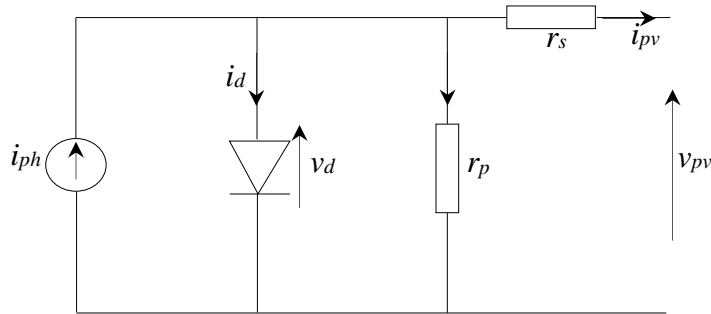
## I.4 Modélisation de la cellule PV

Pour établir le modèle mathématique de la cellule *PV*, il faut tout d'abord retrouver son circuit électrique équivalent. De nombreux modèles mathématiques des cellules *PV* ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire dû à la jonction semi-conductrice. Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode établie par Schottky pour une seule cellule *PV*. Il est généralisé à un

module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle [6]. Il consiste en un générateur de courant  $i_{ph}$  qui est directement dépendant de l'ensoleillement et de la température pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode en antiparallèle pour les phénomènes de polarisation de la cellule, une résistance série  $r_s$  représentant les diverses résistances de contacts et de connexions et une résistance parallèle  $r_p$  caractérisant les divers courants de fuites dus à la diode et aux effets de bords de la jonction. Le circuit électrique équivalent de la cellule est représenté dans la figure (I.2) ; Avec :

- $i_d$  : le courant qui traverse la diode.
- $v_d$  : la tension aux bornes de la diode.
- $i_{pv}$  : le courant délivré par la cellule.
- $v_{pv}$  : la tension à la sortie de la cellule.

Deux cas sont à distinguer dans l'étude de la cellule PV, cas idéal et cas réel.



**Figure I.1 :** Schéma équivalent d'une cellule PV.

#### I.4.1 Cellule PV idéale

La résistance série est très petite et la résistance parallèle est suffisamment grande. Le circuit équivalent de la photopile peut devenir comme suit (figure I.2) :

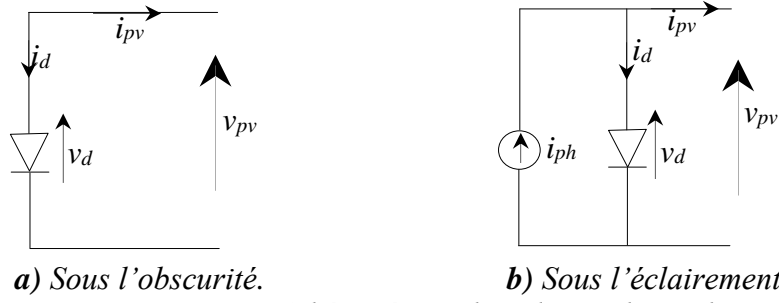
Une photopile dans l'obscurité (figure I.2.a) est régie par l'expression du courant dans la diode :

$$i_{pv} = -i_d = -i_s \left( \exp \left( \frac{q v_{pv}}{a \times K_b \times T} \right) - 1 \right) \quad (I.1)$$

Où :

- $i_s$  est le courant de saturation de la diode.
- $a$  est le facteur d'idéalité de la jonction.
- $k_b$  est la constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ).
- $T$  est la température de jonction des cellules.

$q$  est la charge élémentaire de l'électron ( $1,6 \times 10^{-19}$  C).



**Figure I.2 :** Schéma équivalent d'une photopile idéale.

Si la photopile est maintenant sous l'éclairement (Figure I.2.b), elle sera régie par une nouvelle expression :

$$i_{pv} = i_{ph} - i_d = i_{ph} - i_s \left( \exp\left(\frac{q v_{pv}}{a \times K_b \times T}\right) - 1 \right) \quad (I.2)$$

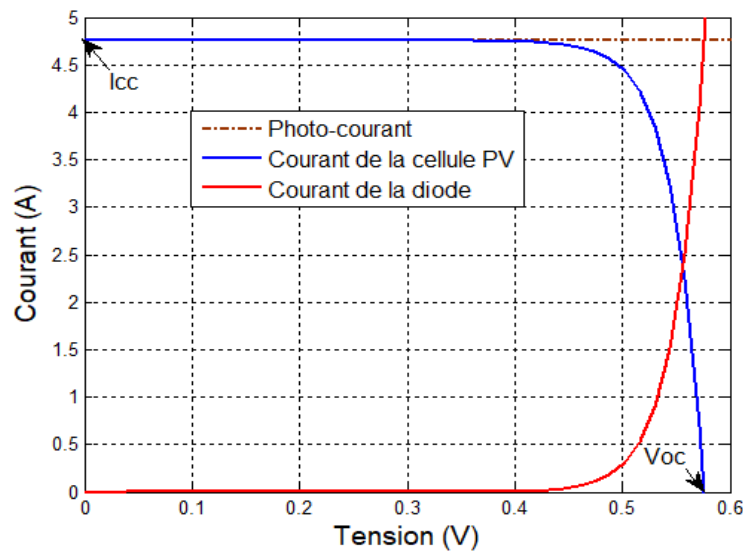
Pratiquement, on utilise une charge résistive ajustable pour construire point par point la caractéristique courant-tension de la photopile (la figure I.3).

Si la charge est nulle, cas de court-circuit, la tension de sortie est égale à zéro. Le courant de la cellule est à son maximum. Ce courant est appelé : courant de court-circuit (short circuit current).

$$i_{sc} = i_{ph} \quad (I.3)$$

Si la charge est suffisamment grande, cas du circuit ouvert, le courant de sortie est égal à zéro. La tension de la cellule est à son maximum. Cette tension est appelée la tension de circuit ouvert (open circuit voltage) :

$$v_{oc} = \frac{a \times K_b \times T}{q} \ln\left(\frac{i_{ph}}{i_s} + 1\right) \quad (I.4)$$



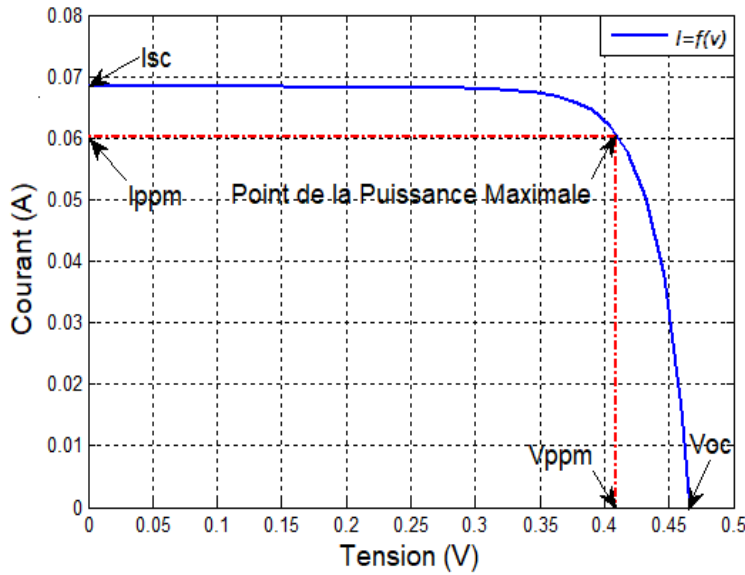
**Figure I.3 :** Constitution de la caractéristique d'une photopile.

### I.4.2 Cellule PV réelle

En réalité, la résistance série est très petite, et la résistance parallèle est suffisamment grande. Dans ce cas, l'expression du courant de la cellule peut avoir la forme suivante [7] :

$$i_{pv} = i_{ph} - i_d - \frac{v_{pv}}{r_p} = i_{ph} - i_s \left( \exp \left( \frac{q(v_{pv} + r_s \times i_{pv})}{a \times K_b \times T} \right) - 1 \right) - \frac{v_{pv} + r_s \times i_{pv}}{r_p} \quad (I.5)$$

En utilisant cette expression, on peut tracer la caractéristique  $I$ - $V$  de la cellule  $PV$  (Figure I.4). Etant donné que la puissance de la cellule est le produit du courant par la tension, alors de même.



**Figure I.4 :** Caractéristique courant-tension d'une photopile.

On peut conclure que la cellule  $PV$  présente une caractéristique  $I$ - $V$  non linéaire allant du point de fonctionnement extrême correspondant au courant de court-circuit vers un autre point extrême correspondant à la tension en circuit ouvert tout en passant par le point de fonctionnement souhaité qui est le  $PPM$ .

La puissance maximale de la cellule  $P_{max}$  peut être exprimée comme suit :

$$P_{max} = v_{opt} \times i_{opt} = v_{oc} \times i_{sc} \times F \quad (I.6)$$

Avec  $F$  est le facteur de forme. Ce facteur mesure la qualité de la photopile et son éloignement du rectangle idéal.

$P_{max}$ ,  $v_{oc}$ ,  $i_{sc}$  sont des paramètres donnés par le fabricant pour des conditions standards  $STC$  (Standard test conditions) qui sont l'ensoleillement de  $1000 \text{ W/m}^2$ , la température de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  et l'air de masse  $AM 1,5$ .

Le rendement de la photopile est le rapport de la puissance maximale produite  $P_{max}$  sur la puissance incidente  $P_{in}$  du rayonnement solaire qui frappe la photopile. Cette dernière puissance est égale au produit de l'éclairement  $G$  par la surface  $\sigma$ .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{opt} \times I_{opt}}{G \times \sigma} \quad (I.7)$$

## I.5 Regroupement des cellules

### I.5.1 Regroupement en série

Une association de  $N_s$  cellule en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. Les équations (I.8, I.9) résument les caractéristiques électriques d'une association série de  $N_s$  cellules.

$$V_{coNs} = N_s \times V_{co} \quad (I.8)$$

$$I_{ccNs} = I_{cc} \quad (I.9)$$

$V_{coNs}$  : La sommes des tensions en circuit ouvert de  $N_s$  cellules en série.

$I_{ccNs}$  : Courant de court-circuit de  $N_s$  cellules en série.

La figure (I.5) représente la mise en série des cellules photovoltaïque :

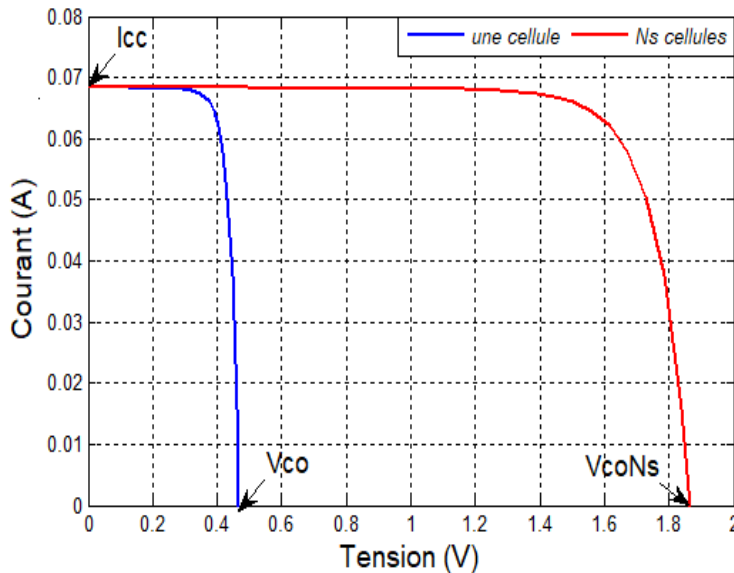


Figure I.5 : Caractéristique courant tension de  $N_s$  cellules en série.



### I.5.2 Regroupement en parallèle

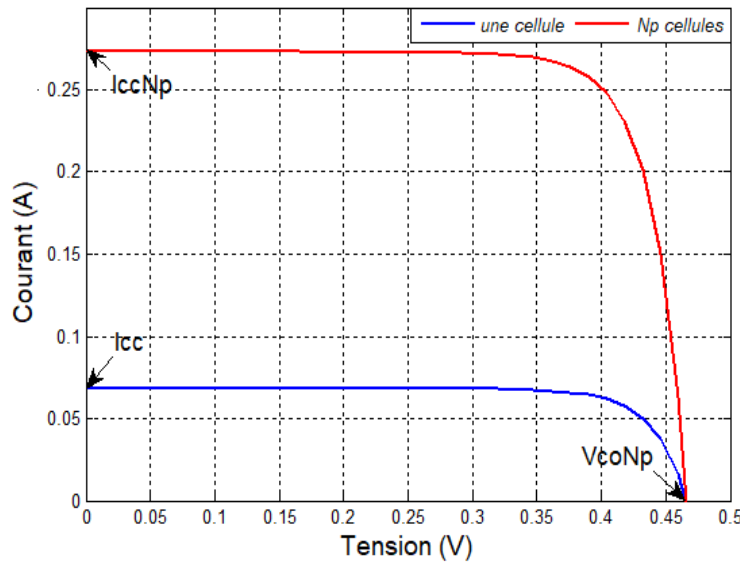
Une association parallèle de  $N_p$  cellules permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, La figure (I.6). Les équations suivantes résument les caractéristiques électriques d'une association parallèle de  $N_p$  cellules.

$$I_{ccNp} = N_p \times I_{cc} \quad (I.10)$$

$$V_{coNp} = V_{co} \quad (I.11)$$

$I_{ccNp}$  : La somme des courants de court circuit de  $N_p$  cellules en parallèle.

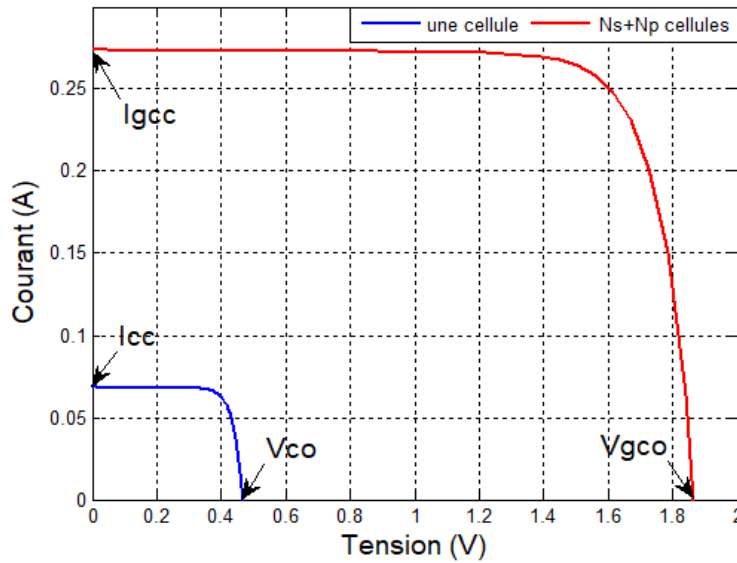
$V_{coNp}$  : Tension de circuit ouvert de  $N_p$  cellules en parallèle.



**Figure I.6 :** Caractéristique courant tension de  $N_p$  cellules en parallèle.

### I.5.3 Regroupement Mixte (série & parallèle)

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par cellules photovoltaïques. La caractéristique électrique globale courant/tension du *GPV* se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport  $N_s$  parallèlement à l'axe des tensions et de rapport  $N_p$  parallèlement à l'axe des courants,  $N_s$  et  $N_p$  étant respectivement les nombres totaux des cellules en série et en parallèle.



**Figure I.7 :** Caractéristique résultante du regroupement mixte.

$I_{gcc} = N_p \cdot I_{cc}$  : courant de court-circuit du module résultant.

$V_{gco} = N_s \cdot V_{co}$  : tension du circuit ouvert du module résultant.

## I.6 Les panneaux photovoltaïques

La cellule individuelle, unité de base d'un system photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau).

Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La puissance crête, obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module.

L'interconnexion des modules entre eux, en série et/ou en parallèle, pour obtenir une puissance plus grande, définit la notion de générateur photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque se compose de plusieurs modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

La puissance du générateur *PV* sera optimal si chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale. Cette puissance est le maximum d'une caractéristique  $P(V)$  du générateur, et correspond au produit d'une tension optimale et d'un courant optimal.

## I.7 Le champ photovoltaïque

Un champ photovoltaïque est un regroupement des modules solaires photovoltaïques interconnectés entre eux en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance électrique requise.

- a- Raccordement en série : même que celui des cellules.
- b- Raccordement en parallèle : même que celui des cellules.
- c- Raccordement mixte : c'est le branchement qui s'impose lorsque l'on a besoin d'une certaine puissance à une tension voulue, les règles du montage en série et celles du montage en parallèle s'appliquent dans le cas du montage mixte.

## I.8 Modélisation du Module (panneau) photovoltaïque

La stratégie de modéliser un module PV n'a aucun différent de modéliser une cellule PV. Les paramètres sont les mêmes, mais seulement la tension qui va changer (la tension du circuit ouvert) est différente et doit être divisé par le nombre de cellules.

Pour réaliser cette modélisation, nous avons utilisé MATLAB comme outil de tests et de simulation. Nous avons choisi le modèle photovoltaïque BP SX 150 w. La série SX de BP Solaire [8] fournit une puissance photovoltaïque rentable destinée à un usage général par exploitation directe de charges courant continu, ou de charges courant alternatif sur les systèmes munis d'onduleur. Le module est composé de 72 cellules solaires multi cristallines en silicone connectées en série pour produire une puissance maximale de 150 w.

Les caractéristiques principales du module sont montrées dans le tableau (1).

**Tableau I.1 : Caractéristiques électriques du module Solaire BP SX 150.**

<b>Module Solaire BP SX 150 w</b>	
Nombre des cellules en série	nCells= 72
Puissance maximale ( $P_{mp}$ )	$P_{mp} = 150 \text{ W}$
Tension à $P_{max}$ ( $V_{mp}$ )	$V_{mp} = 34.50 \text{ V}$
Courant à $P_{max}$ ( $I_{mp}$ )	$I_{mp} = 4.35 \text{ A}$
Tension à circuit ouvert ( $V_{oc}$ )	$V_{oc} = 43.50 \text{ V}$
Courant de court-circuit ( $I_{sc}$ )	$I_{sc} = 4.75 \text{ A}$
Coefficient de température de la puissance	$-0.5 \pm 0.05 \text{ } ^\circ\text{C}$
Coefficient de température de $V_{oc}$	$-160 \pm 20 \text{ } ^\circ\text{C}$
Coefficient de température de $I_{sc}$	$0.065 \pm 0.015 \text{ } ^\circ\text{C}$

### I.8.1 Influence de l'éclairement

L'éclairement est le paramètre le plus influant sur la cellule PV. En effet, le photo-courant est proportionnel à l'éclairement, par contre le courant à travers la diode qui n'est que le photo-courant à l'obscurité, reste inchangé aux variations de ce dernier.

La photopile simulée sous une température de référence de 25 °C et en faisant varier l'éclairement entre 250 w/m<sup>2</sup> et 1000 w/m<sup>2</sup>. Les caractéristiques ( $I_{pv}=f(V_{pv})$ ,  $P_{pv}=f(V_{pv})$ ) sont données par les figures (I.8, I.9)).

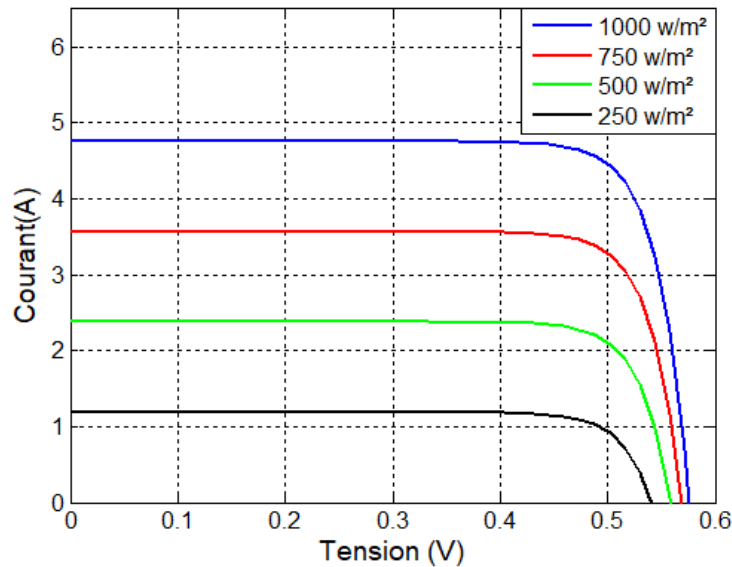


Figure I.8 : Effet de l'éclairement sur la caractéristique (I-V).

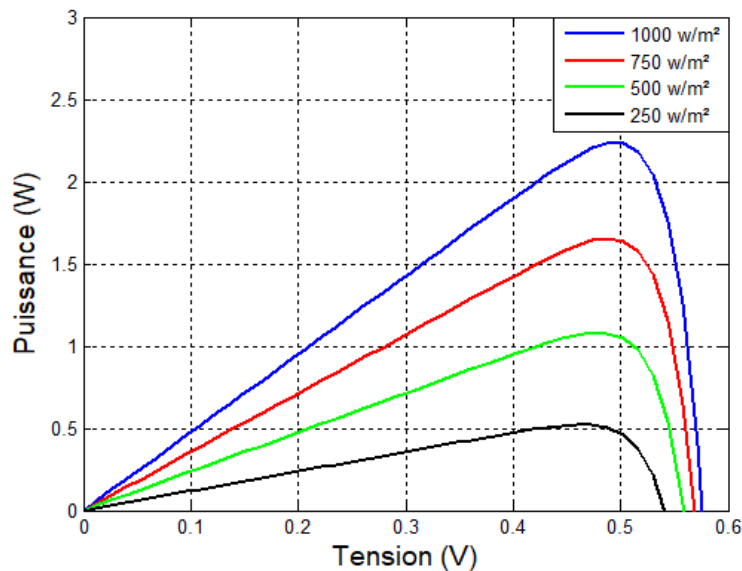
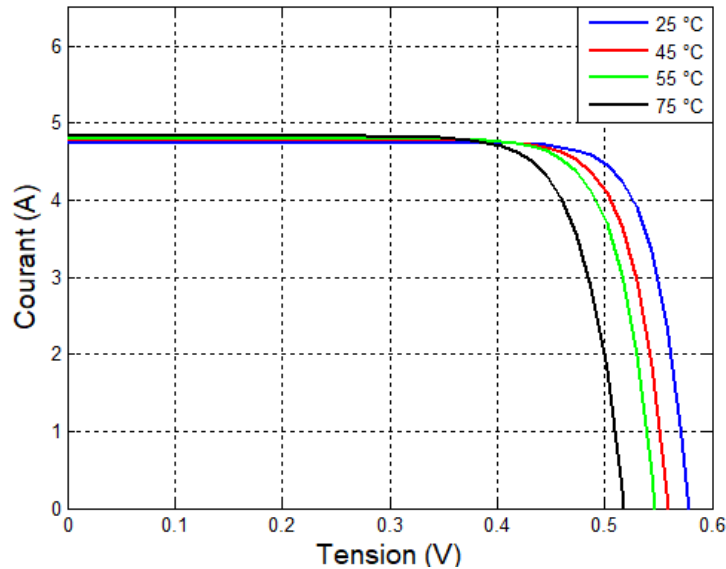


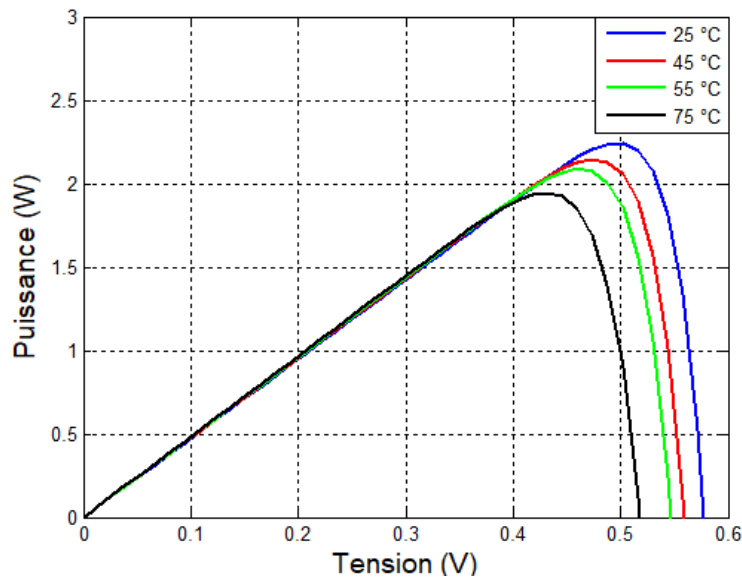
Figure I.9 : Effet de l'éclairement sur la caractéristique (P-V).

### I.8.2 Influence de la température sur la cellule PV

La température est le second paramètre le plus important dans le comportement de la photopile. Les figures (I.10, I.11) illustrent respectivement les caractéristiques I-V et P-V de la photopile simulée sous un éclairement de  $1000 \text{ W/m}^2$  et différentes températures.



**Figure I.10 :** Effet de la température sur la caractéristique (I-V).



**Figure I.11 :** Effet de la température sur la caractéristique (P-V).

On remarque que le courant du court-circuit  $i_{sc}$  reste très peu sensible à la variation de la température mais la tension du circuit ouvert  $V_{oc}$  diminue en augmentant la température ce qui cause une diminution de la puissance à la sortie de la photopile.

### I.8.3 Influence de la résistance série

La résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule.

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que  $R_s$  est grande ou que  $R_{sh}$  est faible. La figure (I.12) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique ( $I-V$ ). Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la courbe  $I=f(V)$  dans la zone où le panneau fonctionne comme source de tension constante. La chute de tension correspondante est liée au courant généré par le panneau. L'effet de la résistance série est très faible. Et ne se fait remarquer que pour une valeur de la résistance parallèle proche de  $R_{sh} = 20 \Omega$ .

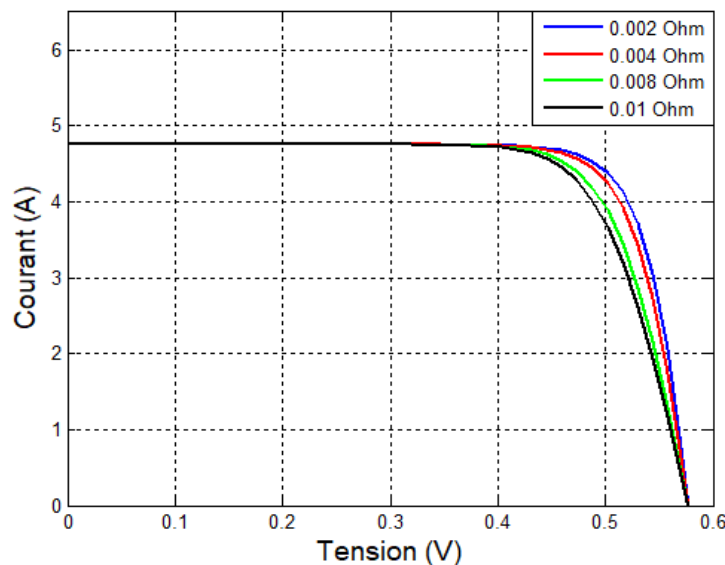


Figure I.12 : Effet de la résistance série sur la caractéristique ( $I-V$ ).

### I.8.4 Influence de la résistance parallèle

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau (courant de fuite entre des cellules, courant de fuite entre la cellule et le bord du module...etc.). La résistance shunt est liée directement au processus de fabrication, et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs du courant (proche du courant de court-circuit). La figure (I.13) montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe  $I=f(V)$  du panneau dans la zone correspondante à un fonctionnement comme une source de courant. Ceci provient du fait qu'il faut soustraire du photo-courant, outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire variant linéairement avec la tension développée.

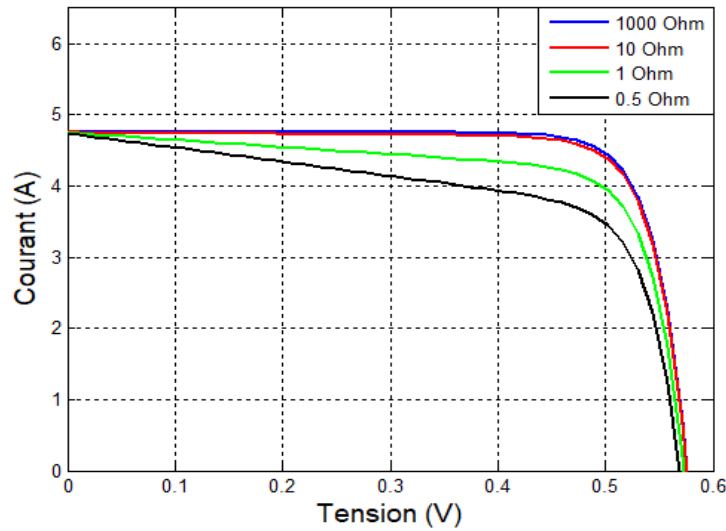


Figure I.13 : Effet de la résistance parallèle sur la caractéristique (I-V).

## I.9 Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)

### I.9.1 Introduction

Un MPPT, en anglais Maximum Power Point Tracker, est une commande associée à un étage d'adaptation permettant de faire fonctionner un générateur électrique non linéaire de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Les systèmes *MPPT* sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens [9]. Un générateur photovoltaïque est un générateur, dont la caractéristique  $I = f(V)$  est fortement non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur *MPPT* permet alors de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge.

### I.9.2 Algorithme de perturbation et observation

L'algorithme de perturbation et observation (communément désignée par *P&O*) est le plus utilisé dans la littérature et surtout dans la pratique en raison de sa facilité de mise en œuvre. Cet algorithme a pour objectif de faire fonctionner le système à sa puissance maximale par l'incrémentation ou décrémentation de la tension du point de fonctionnement et l'observation de l'effet de cette perturbation sur la puissance débitée par le *GPV*. Selon cette observation, l'algorithme décide sur l'acte à faire pendant la prochaine itération. Quatre cas de situation pour *P&O* sont envisagés par la figure (I.14) et récapitulés dans le Tableau I.2.

Cas n°	$\Delta V$	$\Delta P$	$\frac{\Delta P}{\Delta V}$	Sens de la poursuite	Action de contrôle
1	+	+	+	Bon	Incrémenter $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
2	-	-	+	Mauvaise	Incrémenter $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
3	+	-	-	Mauvaise	Décrémenter $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$
4	-	+	-	Bon	Décrémenter $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$

Tableau I.2. Principe de l'algorithme P&amp;O.

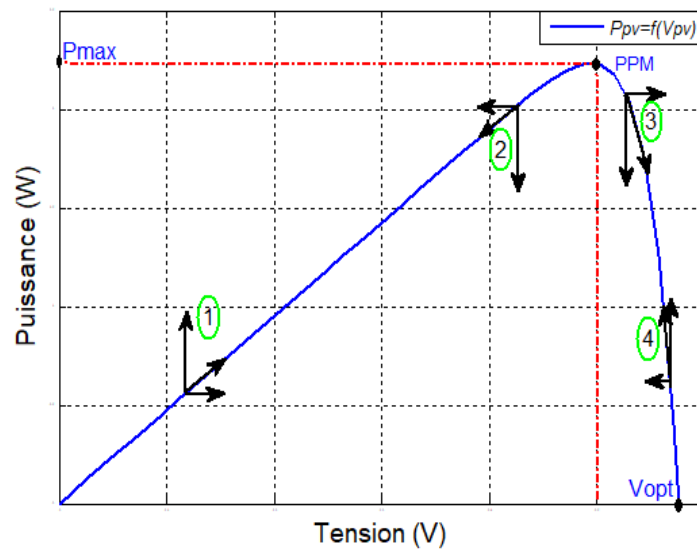


Figure I.14: Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&amp;O.

L'algorithme P&O (Figure I.15) a comme avantage la précision et la rapidité de réaction, Il permet de déterminer le point de puissance maximale pour un ensoleillement et une température ou un niveau de dégradation des caractéristiques. Le problème avec cet algorithme est :

- l'oscillation autour du PPM dans les conditions de fonctionnement normales.
- la mauvaise convergence de l'algorithme dans le cas des variations brusques de la température et/ou de l'ensoleillement.

Il faut noter que ces oscillations peuvent être réduites si on fixe un faible pas d'incrémentement mais au détriment du temps de convergence. Alors, un compromis doit être fait entre précision et rapidité lors du choix de ce pas de mise à jour.



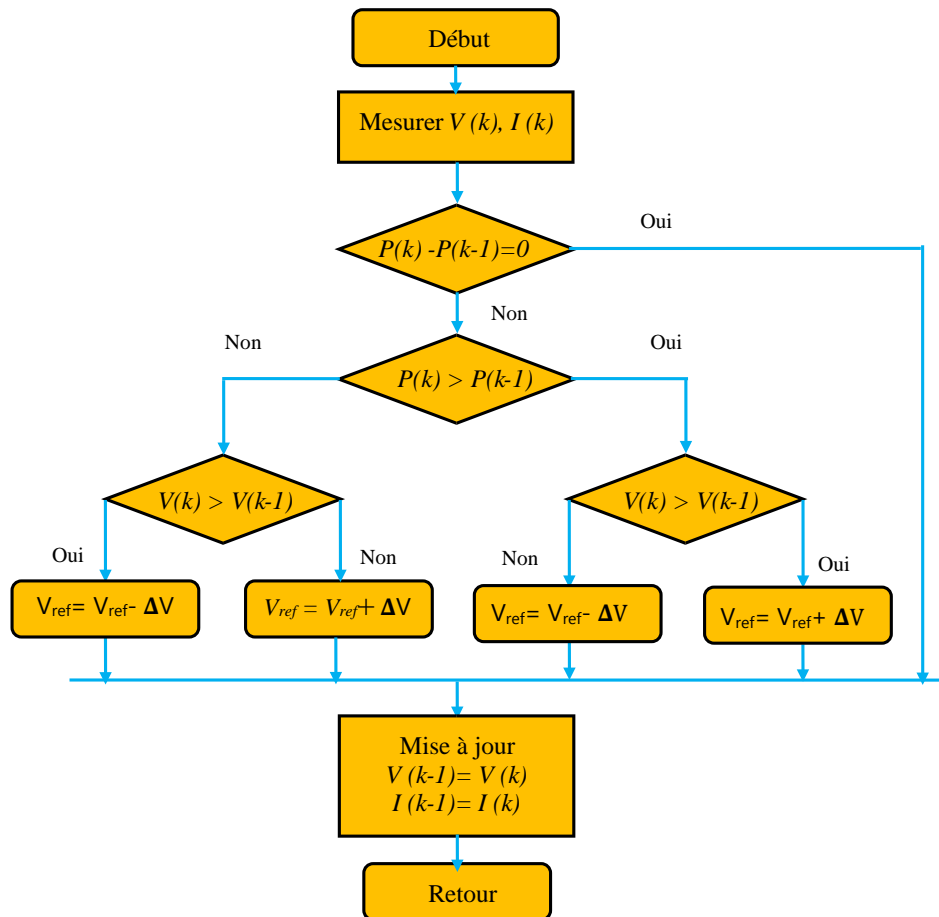


Figure I.15 : Organigramme de la méthode P&O.

## I.10 Modélisation des convertisseurs Buck, Boost et Buck-Boost

La modélisation des convertisseurs a pour but d'analyser le comportement dynamique de ceux-ci, afin de synthétiser les lois de commande nécessaires qui permette d'atteindre les performances désirées. La difficulté majeure vient du principe même de ces convertisseurs : ils sont non linéaires et présentent plusieurs configurations électriques distinctes lors d'une période de commutation. La modélisation du comportement dynamique doit permettre de caractériser le fonctionnement de convertisseur DC-DC dans les deux modes de conduction (continu et discontinu) [10]. Cette étude vise le développement des modèles des convertisseurs Buck et Boost fonctionnant en conduction continue et d'étudier leurs réponses en boucle ouverte, de sorte que ces modèles peuvent être utilisés en cas de conception d'un système en boucle fermée.

### I.10.1 Convertisseur Buck

#### I.10.1.1 Structure

Ce hacheur est formé d'une source de tension continue  $V_e$  à l'entrée, d'une diode de roue libre  $D$ , d'un transistor  $S_w$  commandable de puissance, d'une inductance  $L$ , d'un condensateur  $C$  et d'une résistance de charge  $R$  [11].

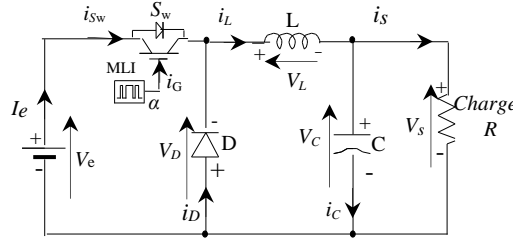


Figure I.16: Le schéma de principe d'un hacheur.

#### I.10.1.2 Dimensionnement du convertisseur Buck

Afin de pouvoir dimensionner correctement les composants et notamment les semi-conducteurs, il est nécessaire de connaître les valeurs maximales (dans les conditions de fonctionnement les plus sévères) des tensions et des courants.

L'interrupteur MOSFET (et donc sa diode de corps) n'ont pratiquement aucune influence dans le fonctionnement fin du montage. A tel point que l'on peut remplacer cet interrupteur par un interrupteur idéal sans affecter les formes d'onde du montage [12].

#### I.10.1.3 Ondulation du courant $\Delta i_L$

On peut écrire pour un courant d'ondulation maximum désiré  $\Delta i_L$  (max) :

$$L \geq \frac{V_e}{4\Delta i_{L(\max)}f} = \frac{V_s(V_e - V_s)}{\Delta i_L f V_e} \quad (\text{I.12})$$

On peut écrire pour un courant d'ondulation maximum désiré  $i_{L(\max)}$  :

$$\Delta i_{Lon} = (0.2 \text{ à } 0.4) i_{s(\max)} \quad (\text{I.13})$$

#### I.10.1.4 Courant d'entrée moyen

Tous les éléments étant supposés parfaits, le rendement théorique de ce convertisseur est égal à 1. On peut donc écrire :

$$V_s i_s = V_e i_e \quad (\text{I.14})$$

On peut exprimer le courant d'entrée, comme suit :

$$i_s = d i_e \quad (\text{I.15})$$

### I.10.1.5 Résistance critique

Le courant de la bobine ayant une forme triangulaire, sa valeur moyenne, qui est le courant de sortie, est située à mi-hauteur. Si le courant débité à l'extérieur change, la courbe se déplace verticalement parallèlement à certain valeurs critique (DCM). Correspond donc à  $i_e = i_L/2$ , or si  $R$  est la charge de sortie alors  $V_s = Ri_e$  . La condition de continuité s'écrit donc [13] :

$$\Delta i_L \prec 2 \frac{V_s}{R} \quad (\text{I.16})$$

En remplaçant le premier membre par sa valeur et en explicitant  $R$  , on obtient :

$$R_{critique} \leq 2 \frac{LfV_e}{V_e - V_s} \quad (\text{I.17})$$

C'est une limitation pour des valeurs grandes de  $R$  , la charge doit être inférieure à cette limite.

### I.10.1.6 Choix de la diode

L'utilisation de diodes Schottky permet d'éviter les problèmes de recouvrement et donc des pertes par commutation supplémentaires. Des fréquences d'ordre supérieur exigent de la rigueur sur toutes les origines de pertes dépendantes de la fréquence [13].

$$i_D = i_{s(max)}(1 - \alpha) \quad (\text{I.18})$$

La diode présente dans le circuit Buck est aussi génératrice de pertes. Ces pertes peuvent être calculées de la façon suivante :

$$p_D = i_D V_D \quad (\text{I.19})$$

La valeur moyenne du courant dans la diode est donc égale au courant de sortie :

$$i_{D(moy)} = i_s \quad (\text{I.20})$$

On adoptera pour la valeur efficace du courant dans la diode la valeur approchée :

$$i_{Deff} = i_e \sqrt{1-d} = \frac{i_s}{\sqrt{1-d}} \quad (\text{I.21})$$

### I.10.1.7 Choix de MOSFET

Le courant crête  $i_M (Max)$  dans l'interrupteur  $S_w$  est atteint à  $t = dT$  . Il est plus courant dans l'inductance  $L$  étant égale au courant d'entrée  $i_e$  on peut écrire :

$$\hat{i}_{M(\max)} = i_{L(\max)} = \frac{i_s}{1-d} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (\text{I.22})$$

La valeur moyenne s'écrit :

$$i_{M(\text{moy})} = di_e = \frac{d}{1-d} i_s \quad (\text{I.23})$$

On démontre que la valeur efficace s'écrit :

$$i_{M(\text{eff})} = i_e \sqrt{d \left[ 1 + \frac{1}{12} \left( \frac{\Delta i_L}{i_e} \right)^2 \right]} \quad (\text{I.24})$$

### I.10.1.8 Ondulation de la tension de sortie $\Delta V_s$ choix de $C$

Le courant  $i_c$  traversant le condensateur  $C$  est égal à la différence entre le courant circulant dans l'inductance  $L$  et le courant de sortie  $i_s$   $i_c = i_L - i_s$ . On en déduit la valeur de la capacité  $C$  nécessaire pour obtenir une ondulation de la tension de sortie  $V_s$  ( $\Delta V_s = \Delta V_c$  si le condensateur est parfait :

$$C \geq \frac{1}{8f\Delta V_s} = \frac{1}{8L\Delta V_s f^2} V_s \left( 1 - \frac{V_s}{V_e} \right) \quad (\text{I.25})$$

La taille du condensateur est inversement proportionnelle à la valeur carrée de  $f$  (la fréquence de commutation), donc en augmentant  $f$ , nous pouvons réduire la taille du filtre capacitif, mais d'autre part, nous devrions considérer que l'augmentation de  $f$  conduit à baisser le rendement du convertisseur [13].

On démontre que la valeur efficace du courant  $i_c$  s'écrit :

$$i_{c(\text{eff})} = i_s \frac{\Delta i_L}{\sqrt{12} i_s} \quad (\text{I.26})$$

Dans la réalité, les condensateurs ne sont pas parfaits et on doit tenir compte de leurs résistances série équivalente, notée  $ESR$  (Equivalent Series Resistances), qui introduit une ondulation supplémentaire  $V_{ESR}$  en phase avec l'ondulation de courant  $i_L$  [14].

$$\Delta V_{ESR} = \Delta V_s = ESR \Delta i_L \quad (\text{I.27})$$

### I.10.1.9 Résultats de simulation

Les figures (I.17) présentent le comportement des convertisseurs Buck idéal :

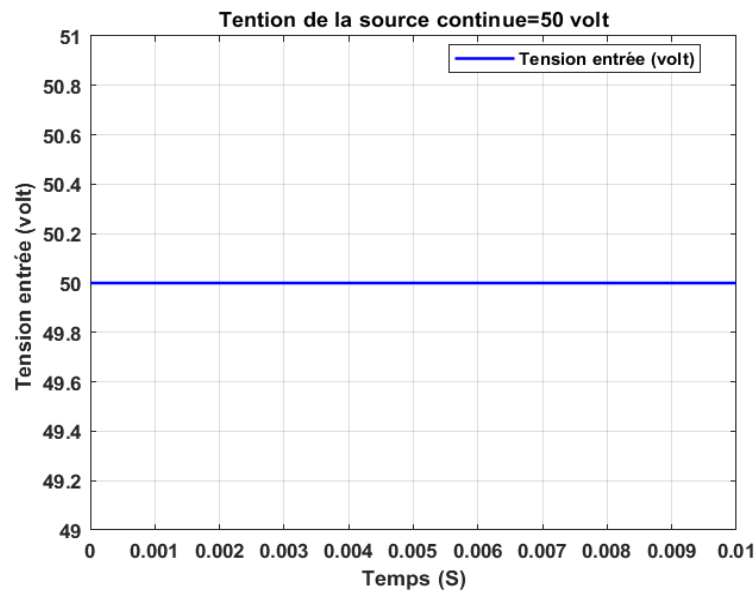
Lorsque la fréquence est assez élevée on peut considérer le signal de commande  $d$  comme un signal continu. Nous présentons dans les figures (I.17) Réponses transitoires développés en

boucle ouverte du modèles Buck sans pertes. Sans la présence des résistances internes qui jouent le rôle d'amortisseurs, Dans la figure (I.17-(a),(b)) on observe des oscillations et un dépassement de 32% Volt, à temps de réponse égal  $7 \times 10^{-4}$  s pour la tension de sortie.

Les figure (I.18-(a), (b)) représentent le comportement du convertisseur Buck lors de la variation de la tension d'entrée à  $t=5\text{ms}$  et la variation de la charge à  $t=6\text{ms}$  en boucle ouverte.

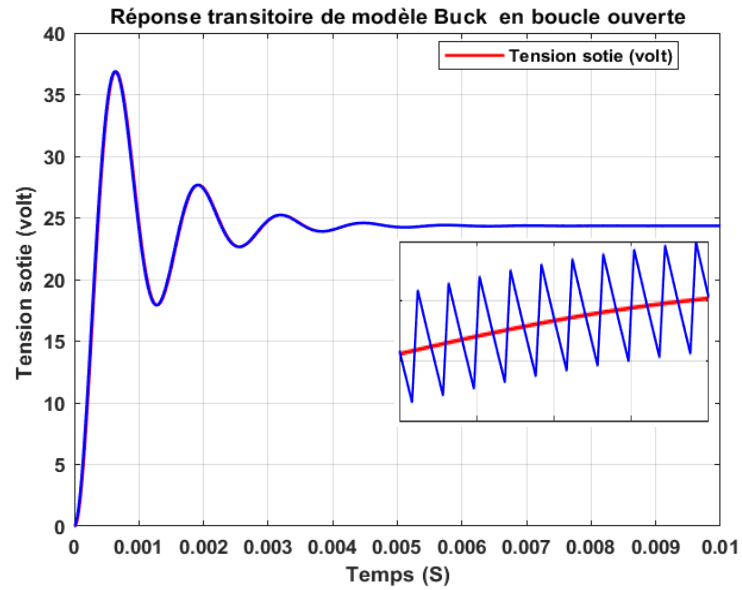
A partir de ces courbes, on remarque que ou moment de la variation, la tension de sortie subit un dépassement de 32%, avec une augmentation événementielle du courant sortie de 5A a 6.8A, afin de maintenir la puissance de sortie constante. A  $t=6\text{ms}$ , la charge augmente, le courant de sortie présente un pic important de 25% avec diminution de la tension vers une valeur 9 Volt. La diminution de la charge provoque une augmentation du rapport cyclique. Cette augmentation a comme effet de maintenir la tension à sa valeur de référence.

(a)



*Réponses de la tension appliquée à l'entrée.*

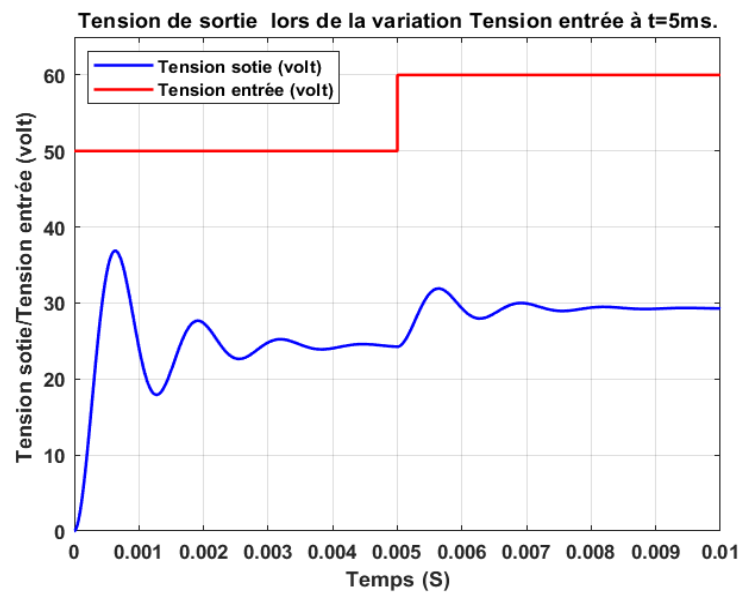
(b)



Réponses transitoires du tension de sortie en boucle ouverte.

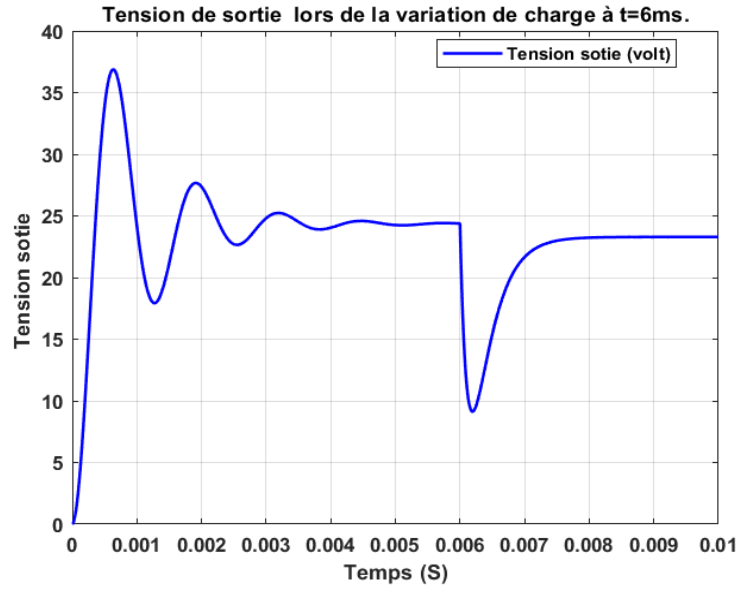
Figure I.17: Réponses transitoires des modèles Buck développés en boucle ouverte.

(a)



Tension de sortie du convertisseur Buck lors de la variation de la tension d'entrée à  $t=5\text{ms}$  en boucle ouverte.

(b)



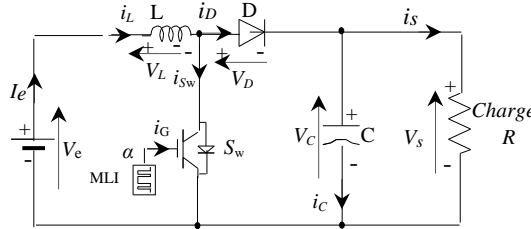
Tension de sortie du convertisseur Buck lors de la variation de la charge à  $t=6\text{ms}$ .

**Figure I.18 :** Réponses transitoires des modèles Buck développés en boucle ouverte Buck lors de la variation de la tension d'entrée et la charge.

## I.10.2 Convertisseur Boost

### I.10.2.1 Structure

Le circuit électrique du convertisseur Boost est présenté par la figure (I.19)



**Figure I.19 :** Schéma du convertisseur Boost.

### I.10.2.2 Dimensionnement du convertisseur Boost

#### I.10.2.3 Ondulation du courant $i_L$

On peut écrire pour un courant d'ondulation maximale désiré  $i_{L(\max)}$  :

$$L \geq \frac{dV_e}{\Delta i_L f} = \frac{V_e}{\Delta i_L f} \left( 1 - \frac{V_e}{V_s} \right) \quad (\text{I.28})$$

si  $L$  est inconnue on peut calculer  $L$  à partir de la relation suivante :

$$\Delta i_L = (0.2 \text{ à } 0.4) i_{s(\max)} \left( \frac{V_e}{V_s} \right) \quad (\text{I.29})$$

- Une valeur trop faible de  $i_L$  conduit à une valeur excessive de l'inductance  $L$ .

- Une valeur trop élevée de  $i_L$  augmente la valeur maximale de courant que le commutateur  $S_w$  et la diode doivent supporter, le maximum correspond en outre au courant que  $S_w$  doit pouvoir interrompre.

#### I.10.2.4 Courant d'entrée moyen

Tous les éléments étant supposés parfaits, le rendement théorique de ce convertisseur est égal à 1. On peut donc écrire :

$$V_s i_s = V_e i_e \quad (\text{I.30})$$

On trouve l'expression du courant d'entrée :

$$i_e = i_{L(moy)} = \frac{i_s}{1-d} \quad (\text{I.31})$$

#### I.10.2.5 Résistance critique

Comme dans le cas précédent, le courant moyen dans la self augmente avec le courant de sortie. A la limite de la conduction continue le courant moyen dans  $L$  est  $\frac{i_L}{2}$  [15]. On a donc dans ce cas :

$$i_{L(moy)} = i_s \frac{V_s}{V_e} = \frac{i_s}{1-d} = \frac{\Delta i_L}{2} \quad (\text{I.32})$$

En utilisant l'expression précédente de  $i_L$  et en écrivant  $i_s = V_s / R$  on obtient une valeur limite maximale de la résistance de charge :

$$R_{critique} \leq \frac{2LfV_s}{V_e d(1-d)} \quad (\text{I.33})$$

#### I.10.2.6 Choix de la diode

L'intégralité du courant transitant de la source vers la charge traverse la diode  $D$ . La valeur moyenne du courant dans la diode est donc égale au courant de sortie :

$$i_{D(moy)} = i_s \quad (\text{I.34})$$

On adoptera pour la valeur efficace du courant dans la diode la valeur approchée :

$$i_{D(eff)} = i_e \sqrt{1-d} = \frac{i_s}{\sqrt{1-d}} \quad (\text{I.35})$$

Durant la phase ( $0 < t < dT$ ), lorsque l'interrupteur  $S_w$  conduit, la diode est soumise à la tension de sortie  $V_s$  (Tension maximale aux bornes de la diode  $D$ ):

$$V_{D(max)} = V_s \quad (\text{I.36})$$



La diode présente dans le circuit Boost est aussi génératrice de pertes. Elles peuvent être calculées de la façon suivante :

$$P_D = i_D V_D \quad (I.37)$$

#### I.10.2.7 Choix de MOSFET

Le courant crête  $i_M (Max)$  dans l'interrupteur  $S_w$  est atteint à  $t = dT$ . Il est exprimé par :

La valeur moyenne s'écrit :

$$\hat{i}_{M(max)} = i_{L(max)} = \frac{i_s}{1-d} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (I.38)$$

La valeur moyenne s'écrit :

$$i_{M(moy)} = di_e = \frac{d}{1-d} i_s \quad (I.39)$$

On démontre que la valeur efficace du courant dans le transistor s'écrit :

$$i_{M(moy)} = di_e = \frac{d}{1-d} i_s, \quad i_{M(eff)} = i_e \sqrt{d \left[ 1 + \frac{1}{12} \left( \frac{\Delta i_L}{i_e} \right)^2 \right]} \quad (I.40)$$

#### I.10.2.8 Ondulation de la tension de sortie $V_s$ et choix de $C$

Durant la phase ( $0 < t < dT$ ), le condensateur fournit seul l'énergie à la charge.

On en déduit la capacité du condensateur de sortie :

$$C \geq \frac{i_s d}{8 \Delta V_s f} \quad (I.41)$$

On démontre que la valeur efficace du courant dans le condensateur s'écrit :

$$i_{C(eff)} = i_s \sqrt{\frac{d + \frac{1}{12} \left( \frac{\Delta i_L}{i_s} \right)^2}{1-d}} \quad (I.42)$$

Dans la pratique, il faut également tenir compte de la résistance série équivalente ESR du condensateur.

$$\Delta V_s = ESR \left( \frac{i_{s(max)}}{1-d} + \frac{\Delta i_L}{2} \right) \quad (I.43)$$

#### I.10.2.9 Résultats de simulation

Lorsque la fréquence est assez élevée on peut considérer le signal de commande  $d$  comme un signal continu [16]. Nous présentons dans les figures (I.20), (I.21-(a), (b),) les réponses transitoires des modèles Boost développés en boucle ouverte avec et sans variation de la tension d'entrée et la charge. On remarque que les oscillations présentent fortement à cause d'absence des résistances internes qui jouent le rôle d'amortisseurs.

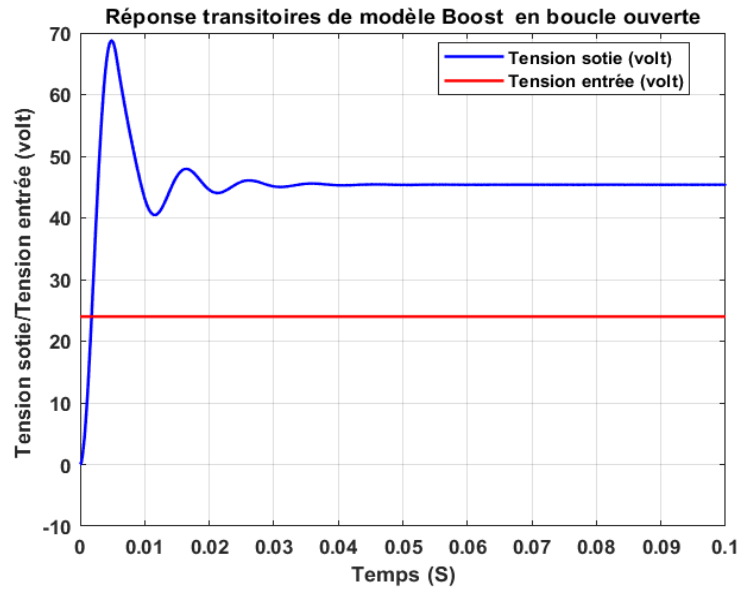
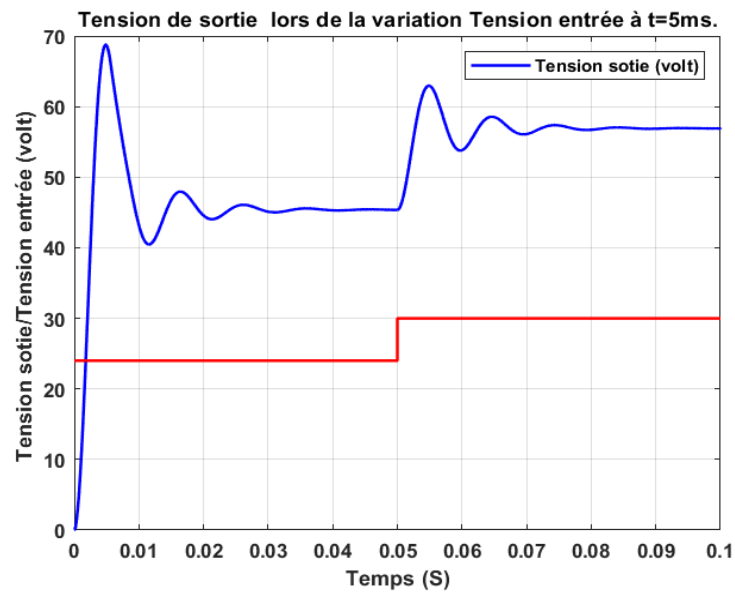


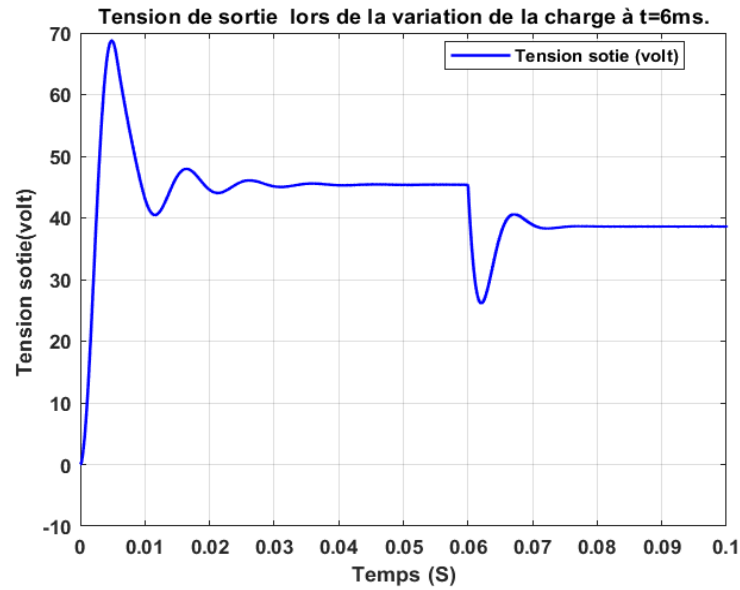
Figure 1.20 : Réponse transitoire de modèle Boost développé en boucle ouverte.

(a)



Tension de sortie du convertisseur Boost lors de la variation de la tension d'entrée à  $t=5\text{ms}$  en boucle ouverte.

(b)



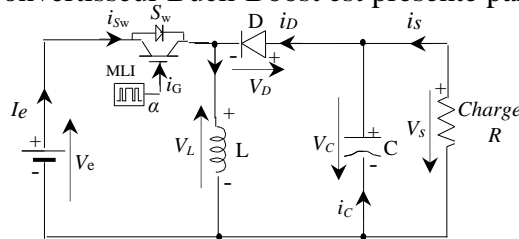
Tension de sortie du convertisseur Boost lors de la variation de la tension d'entrée à  $t=5ms$  en boucle ouverte.

**Figure I.21 :** Réponses transitoires des modèles Boost développés en boucle ouverte lors de la variation de la tension d'entrée et la charge.

### I.10.3 Convertisseur Buck-Boost

#### I.10.3.1 Structure

Le circuit électrique du convertisseur Buck-Boost est présenté par la figure (I.22)



**Figure I.22 :** Schéma du convertisseur Buck-Boost.

#### I.10.3.2 Dimensionnement des composants actifs

Afin de pouvoir dimensionner correctement les composants et notamment les semi-conducteurs, il est nécessaire de connaître les valeurs maximales (dans les conditions de fonctionnement les plus sévères) des tensions et des courants. Rappelons que le calcul des pertes de conduction dans les semi-conducteurs nécessite la connaissance des valeurs crête, moyenne et efficace du courant qui les traverse.

#### I.10.3.3 Courant d'entrée moyen

Tous les éléments étant supposés parfaits, le rendement théorique de ce convertisseur est égal à 1. On peut donc écrire :

$$V_s i_s = V_e i_e \quad (I.44)$$

On trouve l'expression du courant d'entrée

$$i_e = i_{L(moy)} = \frac{di_s}{1-d} \quad (I.45)$$

#### I.10.3.4 Courant dans l'interrupteur

Le courant crête  $i_M$  (max) dans l'interrupteur  $S_w$  est atteint à  $t = dT$ .

La valeur moyenne s'écrit :

$$\hat{i}_{M(max)} = i_{L(max)} = \frac{i_s}{1-d} + \frac{\Delta i_L}{2} \quad (I.46)$$

La valeur moyenne s'écrit :

$$i_{M(moy)} = i_e = \frac{d}{1-d} i_s \quad (I.47)$$

On démontre que la valeur efficace du courant dans le transistor s'écrit [17] [18] :

$$i_{M(eff)} = i_e \sqrt{d \left[ \frac{1}{(1-d)^2} \left( \frac{\Delta i_L}{i_e} \right)^2 \right]} \quad (I.48)$$

#### I.10.3.5 Tension maximale aux bornes de l'interrupteur

Durant la phase 2, lorsque la diode D conduit, l'interrupteur K est soumis à la somme de la tension de sortie  $V_s$  et de la tension d'entrée  $V_e$ .

$$V_{M(max)} = V_s + V_e \quad (I.49)$$

#### I.10.3.6 Courant dans la diode D

Le courant crête dans la diode est identique à celui traversant l'interrupteur.

L'intégralité du courant transitant de la source vers la charge traverse la diode  $D$ . La valeur moyenne du courant dans la diode est donc égale au courant de sortie [19] :

$$i_{D(moy)} = i_s \quad (I.50)$$

On adoptera pour la valeur efficace du courant dans la diode :

$$i_{D(eff)} = i_e \sqrt{(1-d) \left[ \frac{1}{(1-d)^2} \left( \frac{\Delta i_L}{i_e} \right)^2 \right]} \quad (I.51)$$

La valeur approchée :

$$i_{D(eff)} = i_e \sqrt{1-d} = \frac{i_s}{\sqrt{1-d}} \quad (I.52)$$

Durant la phase  $0 \leq t \leq dT$ , lorsque l'interrupteur  $S_w$  conduit, la diode est soumise à la tension de sortie  $V_s$  (Tension maximale aux bornes de la diode  $D$ ) :

$$V_{D(\max)} = V_s + V_e \quad (I.53)$$

La diode présente dans le circuit Boost est aussi génératrice de pertes. Elles peuvent être calculées de la façon suivante :

$$P_D = i_D V_D \quad (I.54)$$

### I.10.3.7 Calcul de la valeur du condensateur de sortie

Durant la phase 1 qui dure, le condensateur de sortie fournit seul l'énergie à la charge. On en déduit la capacité du condensateur de sortie :

$$C \geq \frac{i_s d}{8 \Delta V_s f} \quad (I.55)$$

### I.10.3.8 Calcul de la valeur du l'inductance

Cet élément est le plus délicat à déterminer. Car, une inductance trop faible ne permet pas le bon fonctionnement de la carte puissance, cela est dû à la saturation de la bobine qui par la suite se comporte comme une résistance, et une inductance trop forte quant à elle provoquerait d'importantes pertes de puissance par effet Joule.

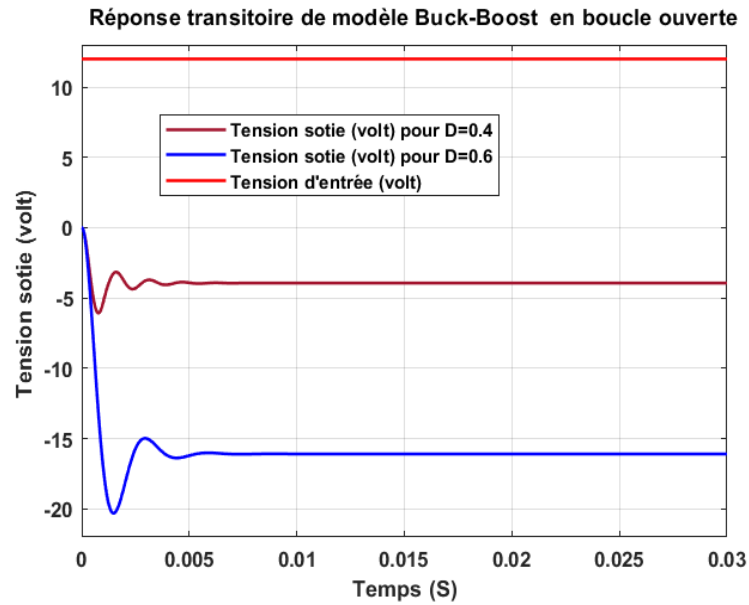
$$L \geq \frac{dV_e}{\Delta i_L f} = \frac{V_e}{\Delta i_L f} \left( 1 - \frac{V_e}{V_s} \right) \quad (I.56)$$

### I.10.3.9 Résultats de simulation

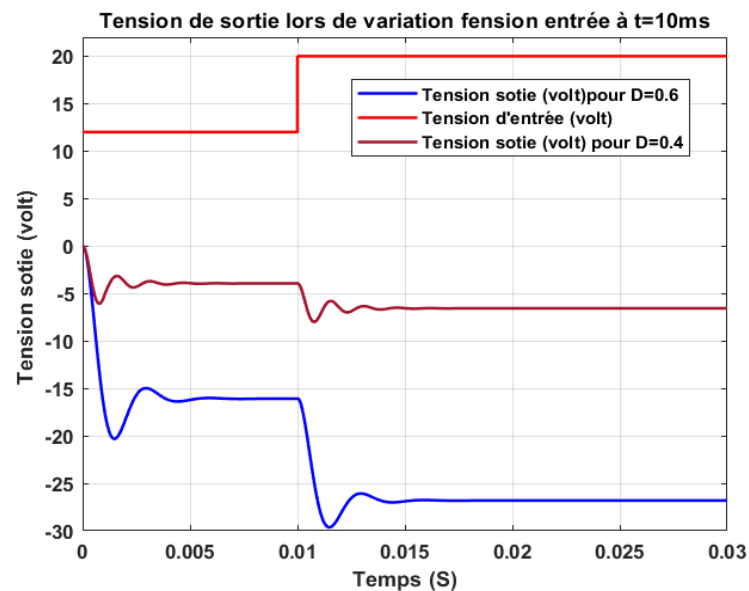
Nous présentons dans les figures (I.23 ; I.24) Réponses transitoires développés en boucle ouverte du modèles Buck-Boost sans pertes. Sans la présence des résistances internes qui jouent le rôle d'amortisseurs, Dans la figure (I.23) on observe des oscillations et un dépassement de 8%, Volt à temps de réponse égal  $7 \times 10^{-4}$  S pour la tension de sortie et courant de sortie.

La figure (I.24) représente le comportement du convertisseur Buck lors de la variation de la tension d'entrée à t=5ms et la variation de la charge à t=6ms en boucle ouverte.

A partir de ces courbes, on remarque que au moment de la variation, la tension de sortie subit un dépassement de 16%, avec une augmentation événementielle du courant sortie de 5A à 6.8A, afin de maintenir la puissance de sortie constante. A t=6ms, la charge augmente, le courant de sortie présente un pic important de 25% avec diminution de la tension vers une valeur 9 Volt. La diminution de la charge provoque une augmentation du rapport cyclique. Cette augmentation a comme effet de maintenir la tension à sa valeur de référence.



**Figure I.23 :** Réponses transitoires de la tension de sortie de modèles Buck-Boost développés en boucle ouverte.



**Figure I.24 :** Réponses transitoires de la tension de sortie de modèles Buck-Boost développés en boucle ouverte lors de la variation de la tension d'entrée.

### I.11 Simulation du système photovoltaïque avec hacheur commandé en MPPT (P&O)

La simulation consiste à faire varier les deux paramètres influents sur la chaîne de conversion PV, à savoir les conditions climatiques  $G$ ,  $T$ . Les résultats sont obtenus pour une durée de 8 secondes.

Pour le test de chaque paramètre, on garde constant deux paramètres et on varie le second par un changement brusque à quatre reprises 2s, 4s, 6s et 8s (profil en escalier).

### I.11.1 Test pour changement d'éclairement

Premièrement, la commande du technique  $P\&O$  est testée pour des éclairements successives de  $250 \text{ W/m}^2$  à  $0\text{s}$ ,  $500 \text{ W/m}^2$  à  $2\text{s}$ ,  $750 \text{ W/m}^2$  à  $4\text{s}$  et  $1000 \text{ W/m}^2$  à  $6\text{s}$  tout en fixant une charge de  $100\Omega$ , et la température à  $25^\circ\text{C}$ . Les résultats de simulation correspondants sont montrés aux figures (I.25 et I.26).

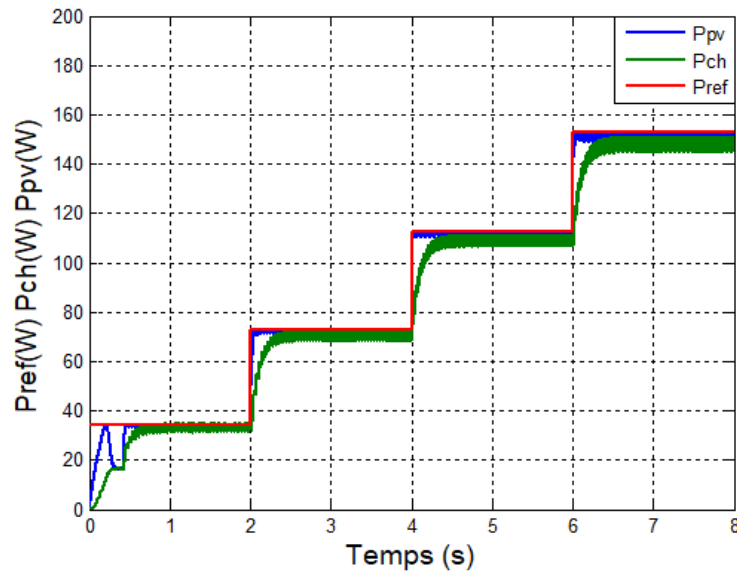


Figure I.25 : Comparaison entre les puissances  $P_{\text{pv}}$ ,  $P_{\text{ref}}$  et  $P_{\text{ch}}$  ( $P\&O$ ) sous un changement d'éclairement.

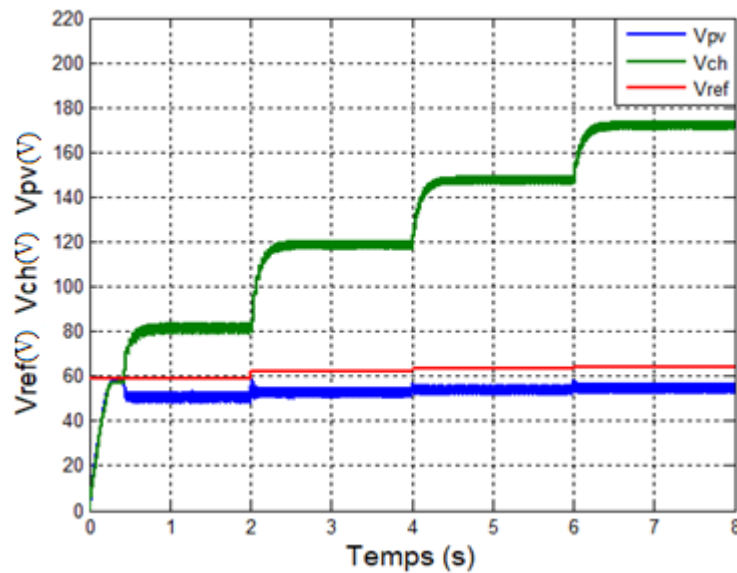


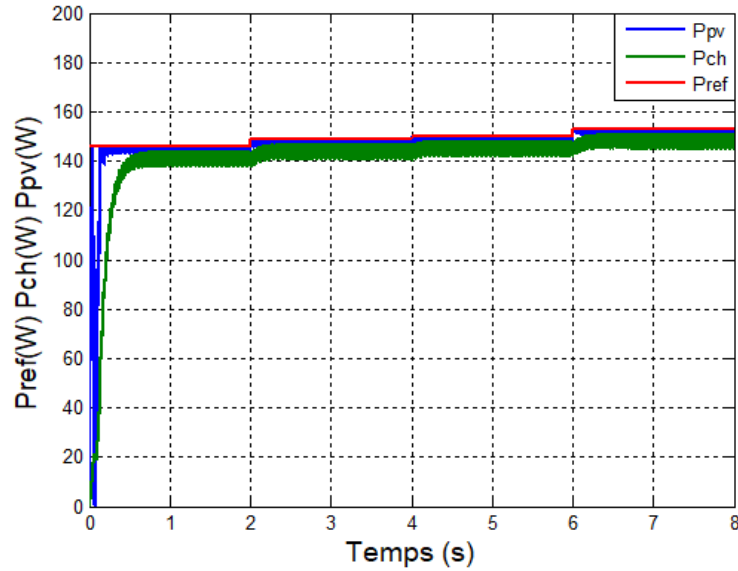
Figure I.26 : Courbe de la tension sous un changement d'éclairement.

### I.11.2 Test pour changement du température

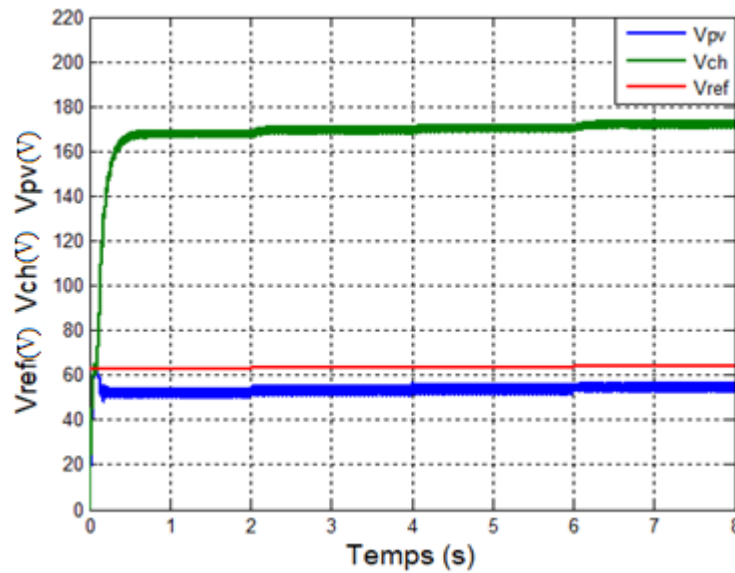
Un second test est fait pour le système  $PV$  sous un éclairement constant de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une charge constante de  $100 \Omega$ , mais cette fois-ci, pour un changement successif de la

température de 25 °C, 45 °C, 55 °C puis à 75 °C. Les figures (I.27 et I.28) illustrent les résultats de la simulation avec ces conditions.

La figure (I.28) montre que les forme d'ondes du tension de sortie et d'entrée confirme que le convertisseur utilisé est un éleveur de tension .



**Figure I.27 :** Comparaison entre les puissances  $P_{pv}$ ,  $P_{ref}$  et  $P_{ch}$  (P&O) sous un changement température.



**Figure I.28 :** Courbe de la tension sous un changement de température.



### I.11.3 Interprétation des résultats

A partir de ces résultats, On constate que la puissance maximale générée par un module solaire dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température.

Pour avoir une puissance maximale le module solaire doit génère une certaine tension et courant de fonctionnement. Pour que le module fourni sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque.

Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC Boost contrôlé par un mécanisme de poursuit « Maximum Power Point Tracking » (*MPPT*).

D'après les résultats de simulation de module *PV (Solaire BP SX 150)* pour différent ensoleillement et température l'algorithme *P&O* a comme avantage la précision et la rapidité de réaction il permet de déterminer le point de puissance maximale pour un ensoleillement et une température ou l'oscillation autour du *PPM* dans les conditions de fonctionnement normales.

## I.12 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre des généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque (Les cellules photovoltaïques, effet photovoltaïque,...etc.), ainsi que les différentes technologies d'une cellule *PV*, et à travers une étude sur les types de regroupement des cellules nous avons montré comment augmenter le courant ou la tension la modélisation de la cellule *PV* en montrant l'influence des différentes paramètres (l'éclairement, la température, la résistance série et la résistance parallèle) sur le rendement du générateur *PV*. Nous avons également montré comment nous pourrions optimiser la puissance fournie par le *GPV* par le biais d'un étage d'adaptation avec fonction de recherche du point de puissance maximale *MPPT*.

Ensuite, nous avons entamé la partie la plus importante, qui est le comportement du convertisseur de puissance (*DC/DC*). Dans un premier temps, le comportement non linéaire des convertisseurs (*Buck*), (*Boost*) et (*Buck-Boost*) est précisément analysé afin de mieux comprendre et choisir des lois de commande. Ces dernières sont déterminées selon les exigences pour atteindre certains niveaux de performances (précision, rapidité, ...) et de robustesse exprimée par le cahier des charges.

## **Chapitre II**

# **Commande Vectorielle d'un Moteur Asynchrone**

---

## II. Chapitre II

### Commande Vectorielle d'un Moteur Asynchrone

---

#### II.1 Introduction

Le moteur asynchrone bien que très séduisant sur le plan industriel, de part son faible coût de conception et de maintenance, cache une grande complexité de modélisation due aux non linéarités et aux grandeurs rotoriques non mesurables qui sont la conséquence du rotor à cage d'écureuil. L'intérêt de l'utilisation des moteurs à courant alternatif est d'éliminer les inconvénients des machines à courant continu.

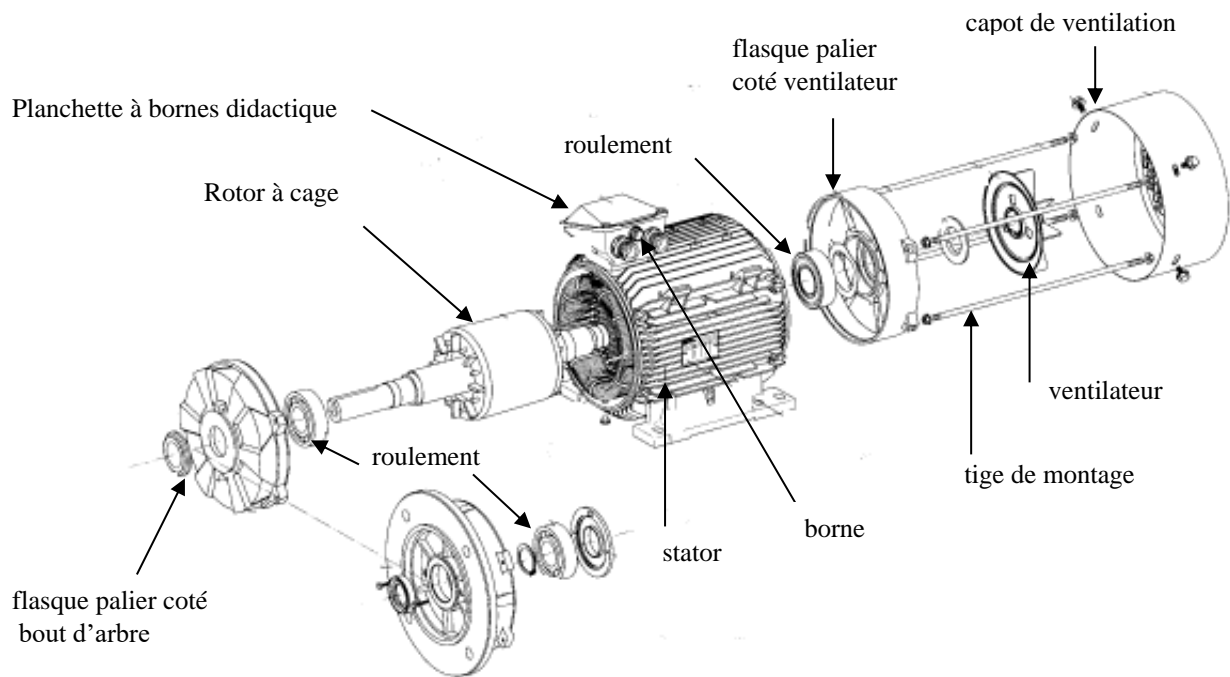
Dans ce chapitre, nous introduisons la modélisation de la machine asynchrone dans une première partie dans les repères utilisés, le système d'alimentation et la commande vectorielle.

#### II.2 Modélisation de la machine asynchrone triphasée

##### II.2.1 Description

La machine asynchrone dont nous allons étudier sa mise en équation correspond à la structure de principe représentée par la figure (II.1) dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation. Elle comporte deux armatures à champ tournant cylindriques et coaxiales, séparées par un entrefer constant : l'une est fixée, l'autre est mobile, aussi les appelle-t-on respectivement, stator et rotor. [20]

Dans des encoches régulièrement réparties sur la face interne du stator sont logés trois enroulements ( $a_s$ ,  $b_s$ ,  $c_s$ ) identiques à "p" paires de pôles. Un moteur asynchrone à cage se présente (figure II.1).



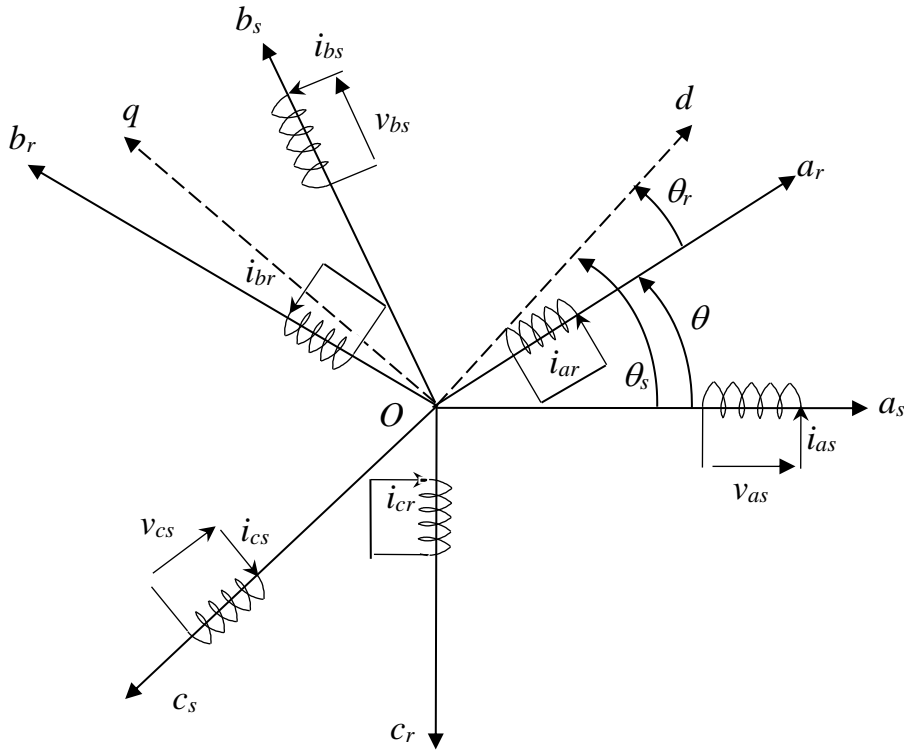
**Figure II.1 :** Description du moteur asynchrone (catalogue Leroy-Somer)

La structure électrique du rotor peut être réalisée :

- Soit par un système d'enroulement triphasé (rotor bobiné), raccordé en étoile à trois bagues sur lesquelles frottent trois balais fixes accessibles par la plaque à bornes et mis en court-circuit pendant les régimes permanents.
- Soit par une cage conductrice intégrée aux tôles ferromagnétiques (rotor à cage).

Il sera admis que la deuxième structure est électriquement équivalente à la première.

Cependant la structure électrique du rotor est représentée schématiquement par trois enroulements  $a_r$ ,  $b_r$  et  $c_r$  en court-circuit.



**Figure.II.2 :** Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor.

Nous transformons les équations par l'utilisation de deux axes perpendiculaires "od" et "oq".

On aura les définitions angulaires dans le sens trigonométrique (II-1)

$$\left\{ \begin{array}{l} (oa_s, od) = \theta_s \\ (ob_s, od) = \theta_s - \frac{2\pi}{3} \\ (oc_s, od) = \theta_s - \frac{4\pi}{3} \\ (oa_r, od) = \theta_r \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} (ob_r, od) = \theta_r - \frac{2\pi}{3} \\ (oc_r, od) = \theta_r - \frac{4\pi}{3} \\ (oa_s, or_r) = \theta_s - \theta_r = \theta \\ (oa, od) = \frac{\pi}{2} \end{array} \right. \quad (II.1)$$

Notons que  $\theta$  caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator, d'où la vitesse angulaire (en bipolaire) :

$$\omega = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \quad (II.2)$$

### II.2.2 Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la machine asynchrone est basée sur les hypothèses simplificatrices suivantes : [21]

1. On suppose que la machine est de construction symétrique équilibrée, tant au rotor qu'au stator.

2. L'entrefer est d'épaisseur uniforme.
3. On ne tient compte que du premier harmonique d'espace de la distribution de la force magnétomotrice de chaque phase du stator.
4. La force magnétomotrice est à répartition sinusoïdale.
5. On néglige la saturation et hystérésis du circuit magnétique ainsi que les pertes par hystérésis et par courants de Foucault.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses :

- Superposition des flux.
- La constante des inductances propres.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements.

### II.2.3 Conventions de signes

On adoptera les conventions de signes suivantes :

- Un courant positif crée à travers son propre enroulement un flux positif ;
- Une f.e.m positive fait circuler un courant positif ;
- Le stator et le rotor sont considérés comme récepteurs ;
- Les angles et les vitesses de rotation sont comptés positivement dans le sens trigonométrique.

### II.2.4 Mise en équations de la machine asynchrone

Le comportement de la machine asynchrone peut être traduit par trois types d'équations : équations électriques, équations magnétiques, équations mécaniques. [21]

#### II.2.4.1 Equations électriques

Compte tenu des conventions de signes (II.2.3), les six enroulements de la figure (II.2 ) obéissent aux équations suivantes écrites sous forme matricielle : [22]

$$\begin{cases} [V_s] = R_s [I_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \\ [V_r] = R_r [I_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \end{cases} \quad (\text{II-3})$$

Avec :

$$\begin{aligned} [V_s] &= [V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]^t; \quad [I_s] = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^t; \quad [\phi_s] = [\phi_{as} \ \phi_{bs} \ \phi_{cs}]^t \\ [V_r] &= [V_{ar} \ V_{br} \ V_{cr}]^t; \quad [I_r] = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^t; \quad [\phi_r] = [\phi_{ar} \ \phi_{br} \ \phi_{cr}]^t \end{aligned}$$

Les trois enroulements  $a_r, b_r, c_r$  sont en court-circuit d'où :  $[V_r] = [0 \ 0 \ 0]^t$ .

### II.2.4.2 Equations magnétiques

Sous les hypothèses simplificatrice (II.2.3), les relations entre flux et courants, s'écrivent sous forme matricielle : [22] [23]

$$\begin{bmatrix} [\phi_s] \\ [\phi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad (\text{II-4})$$

Avec :

$$\begin{aligned} [L_s] &= \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} & [L_r] &= \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \\ [M_s] &= [M_r]^t = m_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{II-5})$$

### II.2.4.3 Equation mécanique

Le fonctionnement d'une charge mécanique en rotation est régi par l'équation suivante :[23]

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f_c \Omega \quad (\text{II.6})$$

$\Omega$  étant la vitesse mécanique de rotor,  $J$  moment d'inertie,  $C_e$  le couple moteur,  $C_r$  le couple résistant,  $f_c$  le coefficient de frottement.

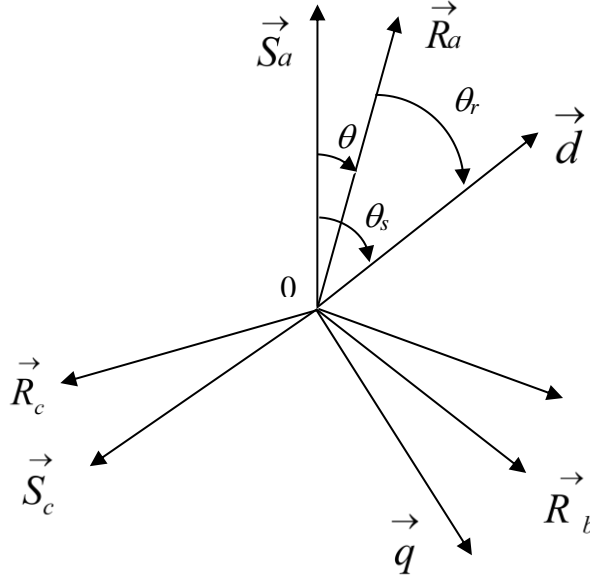
### II.2.5 Modèle de Park de la machine asynchrone

La transformation de Park permet de d'écrire les équations de la machine asynchrone dans le référentiel du champ tournant sur les axes (d, q). [23][24][25]. Elle consiste à appliquer aux courants, tensions et flux un changement de variable faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et les axes "d" et "q".

Ainsi, les enroulements statoriques  $S_a, S_b, S_c$  et les enroulements rotoriques  $R_a, R_b$  et  $R_c$  sont remplacés respectivement par deux enroulements statoriques  $d_s, q_s$ , et deux enroulements rotoriques  $d_r, q_r$ .

La figure (II.3) permet de définir les divers référentiels et les relations spatiales qui les lient. [31]. [3]

On désigne par ( $d$  : axe direct,  $q$  : axe en quadrature).



**Figure.II.3 :** Repérage angulaire des systèmes d'axes fictifs de la machine asynchrone.

On remarque sur la figure (II.3) que  $\theta_s$  et  $\theta_r$  sont liés par la relation rigide :

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II.7})$$

Dans la transformée de Park, on définit une matrice unique de transformation qui est la suivante :

$$[P(\theta_s)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Et son inverse est défini par :



$$[P(\theta_s)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Cette dernière permet en général, le passage du système triphasé par  $a, b, c$  à un système diphasé  $d, q$  quelques soient les grandeurs électriques ou électromagnétiques (flux, courant et tension). La transformation des grandeurs statoriques est définie par :

$$[i_{dq}] = [p(\theta_s)][i_{abc}] \quad (\text{II.10})$$

$$[v_{dq}] = [p(\theta_s)][v_{abc}] \quad (\text{II.11})$$

$$[\phi_{dq}] = [p(\theta_s)][\phi_{abc}] \quad (\text{II.12})$$

La matrice  $[p(\theta_s)]$  représente la matrice de transformation appliquée au stator.

La transformation des grandeurs rotoriques s'obtient en remplaçant l'indice (s) par l'indice (r).

## II.2.6 Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de PARK

Dans le repère de PARK ( $d, q$ ) tournant à la vitesse angulaire  $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$ , les équations des tensions et flux s'écrivent [22],[26],[27] .

### II.2.6.1 Équations des tensions

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Avec :  $v_{dr} = 0$  et  $v_{qr} = 0$

### II.2.6.2 Équations des flux

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$$L_s = l_s - M_s$$

$$L_r = l_r - M_r$$

$$M = 3/2 M_{sr}$$

$$\text{où : } \begin{cases} i_{ds} = \frac{1}{\sigma L_s} \phi_{ds} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_{dr} \\ i_{qs} = \frac{1}{\sigma L_s} \phi_{qs} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_{qr} \\ i_{dr} = -\frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_{ds} + \frac{1}{\sigma L_r} \phi_{dr} \\ i_{qr} = -\frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_{qs} + \frac{1}{\sigma L_r} \phi_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Avec :  $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s}$  coefficient de dispersion.

Nous obtenons alors les équations électriques de la machine asynchrone dans le repère d'axes  $d, q$  :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s \left(\frac{d}{dt}\right) & -L_s \frac{d\theta_s}{dt} & M \left(\frac{d}{dt}\right) & -M \frac{d\theta_s}{dt} \\ L_s \frac{d\theta}{dt} & R_s + L_s \left(\frac{d}{dt}\right) & M \frac{d\theta_s}{dt} & M \left(\frac{d}{dt}\right) \\ M \left(\frac{d}{dt}\right) & -M \frac{d\theta_r}{dt} & R_r + L_r \left(\frac{d}{dt}\right) & -L_r \frac{d\theta_r}{dt} \\ M \frac{d\theta_r}{dt} & M \left(\frac{d}{dt}\right) & L_r \frac{d\theta_r}{dt} & R_r + L_r \left(\frac{d}{dt}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

### II.2.6.3 Couple électromagnétique

L'expression du couple électromagnétique de la machine s'écrit :

$$C_e = [i_s] \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}] [i_r] \} \quad (\text{II.17})$$

Après utilisation de la transformation de Park, on aboutit à l'expression :

$$C_e = \frac{3}{2} PM (i_{dr} i_{qs} - i_{ds} i_{qr}) \quad (\text{II.18})$$

On peut exprimer l'équation du couple par d'autres expressions telles que :

$$C_e = \frac{3}{2} P (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \quad (\text{II.19.a})$$

$$C_e = \frac{3}{2} P \frac{M}{L_r} (\phi_{qs} i_{dr} - \phi_{ds} i_{qr}) \quad (\text{II.19.b})$$

$$C_e = \frac{3}{2} P \frac{M}{L_r} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \quad (\text{II.19.c})$$

$$C_e = \frac{3}{2} P \frac{M}{\sigma L_s L_r} (\phi_{qs} \phi_{dr} - \phi_{ds} \phi_{qr}) \quad (\text{II.19.d})$$

$$C_e = \frac{3}{2} P (\phi_{qr} i_{dr} - \phi_{dr} i_{qr}) \quad (\text{II.19.e})$$

## II.2.7 Choix du référentiel

Le référentiel est le système «  $Od$  », «  $Oq$  » associé à sa vitesse de rotation. Il existe différentes possibilités concernant le choix du repère d'axe  $d, q$  qui dépendent des objectifs de l'application.

Le glissement de vitesse  $\omega_{gl}$  est défini par  $\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r$ , parmi les équations que nous avons exposées précédemment, les seules dont la formulation sont affectées par le choix du référentiel sont les équations du système.

### II.2.7.1 Référentiel lié au stator

Ce référentiel est noté  $(\alpha, \beta)$ , il se traduit par les conditions  $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$  ;  $\frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_r$ .

D'où les équations électriques suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{\alpha s} = R_s i_{\alpha s} + \left( \frac{d \phi_{\alpha s}}{dt} \right) \\ v_{\beta s} = R_s i_{\beta s} + \left( \frac{d \phi_{\beta s}}{dt} \right) \\ 0 = R_r i_{\alpha r} + \left( \frac{d \phi_{\alpha r}}{dt} \right) + \omega_r \phi_{\beta r} \\ 0 = R_r i_{\beta r} + \left( \frac{d \phi_{\beta r}}{dt} \right) - \omega_r \phi_{\alpha r} \end{array} \right. \quad (\text{II.20})$$

Ce référentiel sera choisi de préférence en vue d'étudier des variations importantes de vitesse de rotation, associées ou non avec les variations de la fréquence d'alimentation.

### II.2.7.2 Référentiel lié au rotor

Ce référentiel est noté  $(X, Y)$ , il se traduit par les équations :  $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_r$ ,  $\frac{d\theta_r}{dt} = 0$ .

D'où les équations électriques :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{Xs} = R_s i_{Xs} + \left( \frac{d \phi_{Xs}}{dt} \right) - \omega_r \phi_{Ys} \\ v_{Ys} = R_s i_{Ys} + \left( \frac{d \phi_{Ys}}{dt} \right) + \omega_r \phi_{Xs} \\ 0 = R_r i_{Xr} + \left( \frac{d \phi_{Xr}}{dt} \right) \\ 0 = R_r i_{Yr} + \left( \frac{d \phi_{Yr}}{dt} \right) \end{array} \right. \quad (\text{II.21})$$

Ce référentiel peut être intéressant dans les problèmes de régimes transitoires ou la vitesse de rotation est considérée comme constante.

### II.2.7.3 Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est noté  $(d, q)$ , il se traduit par les conditions :  $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$ ,

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega_r = \omega_{gl}$$

D'où les équations électriques :

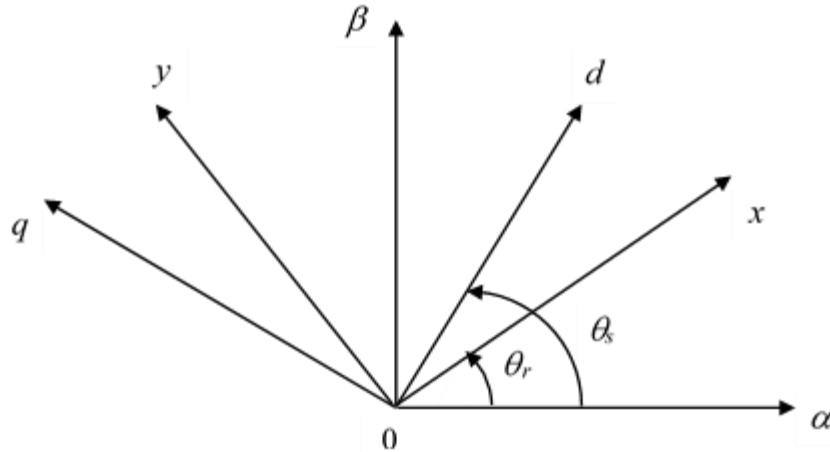
$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \left( \frac{d\phi_{ds}}{dt} \right) - \omega_s \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \left( \frac{d\phi_{qs}}{dt} \right) + \omega_s \phi_{ds} \\ 0 = R_r i_{dr} + \left( \frac{d\phi_{dr}}{dt} \right) - \omega_{gl} \phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \left( \frac{d\phi_{qr}}{dt} \right) + \omega_{gl} \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Ce référentiel est le seul qui n'introduit pas des simplifications dans la formulation des équations électriques. Cependant, il est avantageux dans les problèmes où la fréquence d'alimentation est constante.

Ce référentiel est aussi très utilisé même dans l'étude de l'alimentation des moteurs asynchrones à fréquence variable, lorsqu'on veut étudier la transmittance du moteur relativement à des petites perturbations autour d'un régime donné.

Dans la suite de notre travail nous allons opter pour ce référentiel.

La figure (II.4) montre les différents référentiels qu'on a définis auparavant.



**Figure.II.4 :** Représentation des différents référentiels.

Les équations électriques de la machine s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \\ \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_s \phi_{qs} \\ +\omega_s \phi_{ds} \\ -\omega_r \phi_{qr} \\ +\omega_r \phi_{dr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

En posant :  $T_r = \frac{L_r}{R_r}$  constante de temps rotorique.

Le système (I.16) devient :

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s \left( \frac{d}{dt} \right) & -L_s \omega_s & (1-\sigma)L_s \left( \frac{d}{dt} \right) & -(1-\sigma)L_s \omega_s \\ L_s \omega_s & R_s + L_s \left( \frac{d}{dt} \right) & (1-\sigma)L_s \omega_s & (1-\sigma)L_s \left( \frac{d}{dt} \right) \\ \left( \frac{d}{dt} \right) & -\omega_r & \frac{1}{T_r} + \left( \frac{d}{dt} \right) & -\omega_r \\ \omega_r & \left( \frac{d}{dt} \right) & \omega_r & \frac{1}{T_r} + \left( \frac{d}{dt} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

## II.2.8 Représentation d'état de PARK

Pour la machine asynchrone triphasé alimentée en tension, les tensions statoriques ( $V_{ds}, V_{qs}$ ) et la vitesse du champ tournant ( $\omega_s$ ) sont considérées comme variables de commande. Nous choisissons le référentiel lié au champ tournant. [28] [29]

La représentation d'état consiste à exprimer le modèle de la machine sous la forme :

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = f(x, u, t) \\ Y = g(x, u, t) \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

Avec :

X (4,1) : Vecteur d'état.

U (2,1) : Vecteur d'entrée.

Y (1,4) : Vecteur de sortie.

$$X = (i_{ds} \ i_{qs} \ i_{dr} \ i_{qr} \ \Omega_r)^t \quad (\text{II.26})$$

Donc le système (II.24) peut s'écrire sous la forme suivante : [30]

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU \quad (\text{II.27})$$

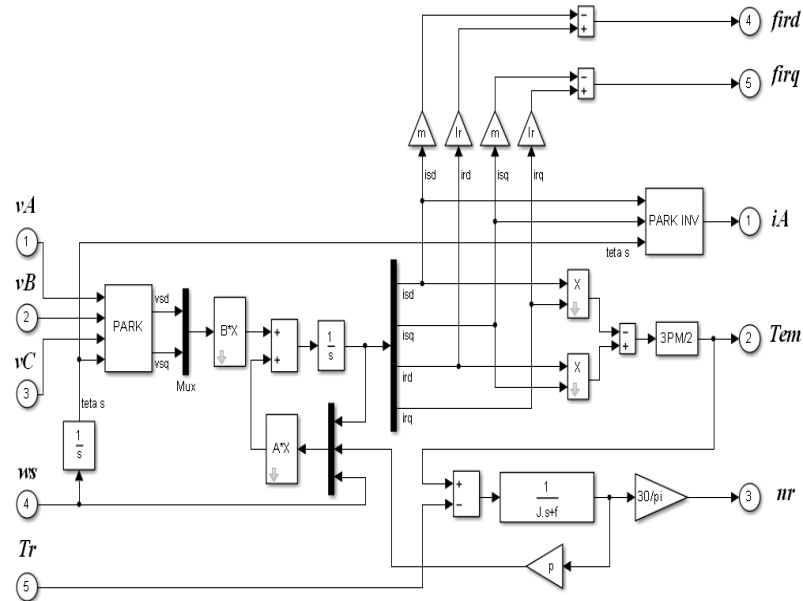
Avec :

$$\begin{aligned}
 X &= \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} & U &= \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} \\
 \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma T_s} & \omega_s + \frac{1-\sigma}{\sigma} \omega_r & \frac{M}{\sigma L_s T_r} & \frac{M}{\sigma L_s} \omega_r \\ -\left(\omega_s + \frac{1-\sigma}{\sigma} \omega_r\right) & -\frac{1}{\sigma T_s} & \frac{-M}{\sigma L_s} \omega_r & \frac{M}{\sigma L_s T_r} \\ \frac{M}{\sigma L_r T_s} & -\frac{M}{\sigma L_r} \omega_r & -\frac{M}{\sigma L_s} \omega_r & \frac{M}{\sigma L_s T_r} \\ \frac{M}{\sigma L_r} \omega_r & \frac{M}{\sigma L_r T_s} & -\omega_s + \frac{1}{\sigma} \omega_r & -\frac{1}{\sigma T_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \frac{1}{\sigma L_s} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -\frac{M}{L_r} & 0 \\ 0 & -\frac{M}{L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})
 \end{aligned}$$

Avec :

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma T_s} & \omega_s + \frac{1-\sigma}{\sigma} \omega_r & \frac{M}{\sigma L_s T_r} & \frac{M}{\sigma L_s} \omega_r \\ -\left(\omega_s + \frac{1-\sigma}{\sigma} \omega_r\right) & -\frac{1}{\sigma T_s} & \frac{-M}{\sigma L_s} \omega_r & \frac{M}{\sigma L_s T_r} \\ \frac{M}{\sigma L_r T_s} & -\frac{M}{\sigma L_r} \omega_r & -\frac{M}{\sigma L_s} \omega_r & \frac{M}{\sigma L_s T_r} \\ \frac{M}{\sigma L_r} \omega_r & \frac{M}{\sigma L_r T_s} & -\omega_s + \frac{1}{\sigma} \omega_r & -\frac{1}{\sigma T_r} \end{bmatrix} & B &= \frac{1}{\sigma L_s} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -\frac{M}{L_r} & 0 \\ 0 & -\frac{M}{L_r} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

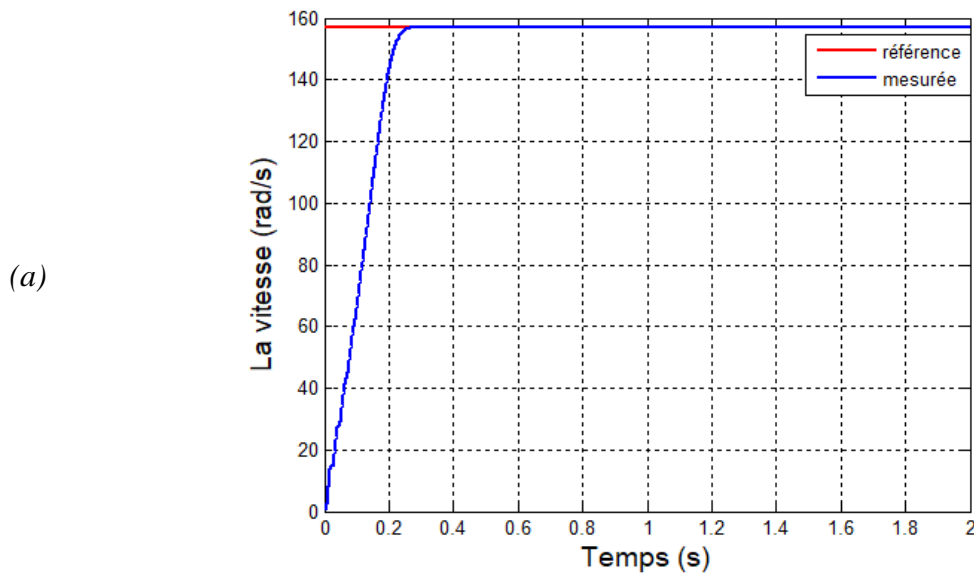
Finalement, le schéma bloc du modèle de la machine alimentée en tension donné par la structure (II.5).



**Figure.II.5 : Structure du modèle de la machine alimentée en tension.**

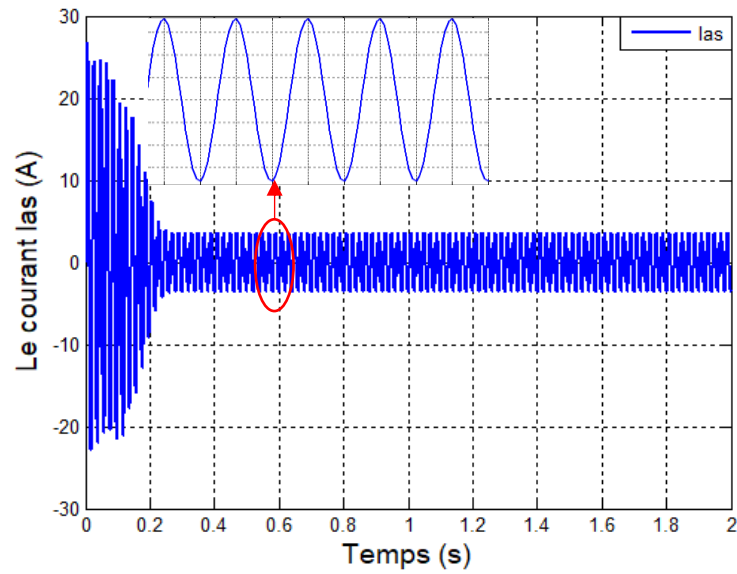
## II.2.9 Résultats de simulation

Pour pouvoir vérifier le fonctionnement de notre système un test de simulation est nécessaire. Nous avons utilisé le logiciel "Matlab Simulink" pour la simulation de la machine asynchrone triphasé et des commandes associées.

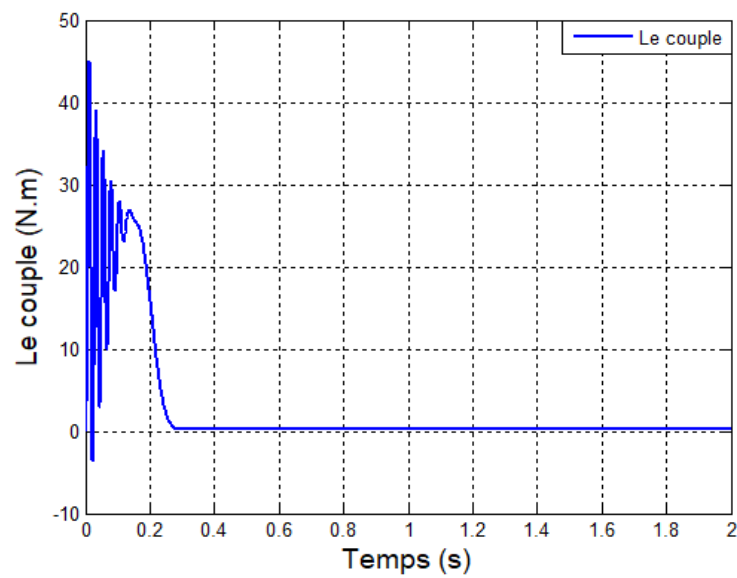




(b)

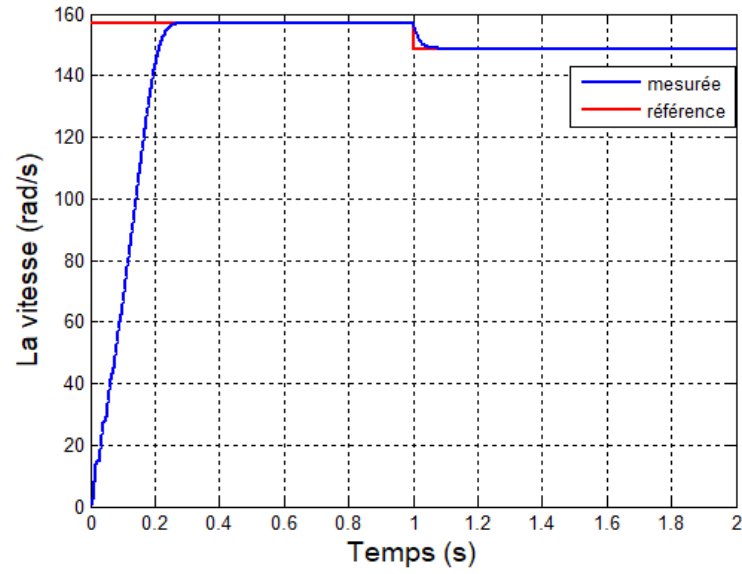


(c)

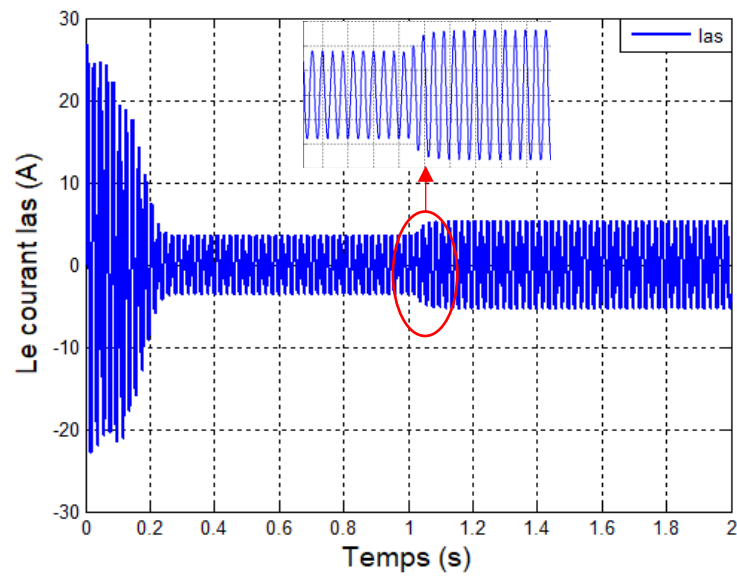


**Figure.II.6 : Démarrage direct du moteur asynchrone à vide**

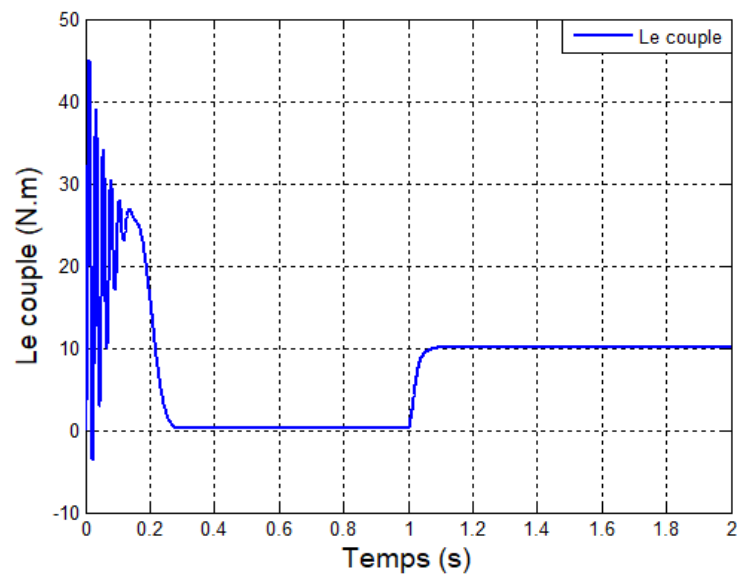
(a)



(b)



(c)



**Figure. II.7 :** Démarrage direct du moteur asynchrone avec une charge (10 N.m),  $t=1s$ .

### II.2.9.1 Interprétations et commentaires des résultats

Démarrage à vide, le couple électromagnétique est fortement pulsatoire et devient presque nul en régime permanent. La machine atteint la vitesse de synchronisme de 1500 tr/min (157rad/sec) puisque la charge est nulle. Cette vitesse est atteinte à 0.25sec environ, l'importance du courant au démarrage ; il atteint des valeurs qui arrivent jusqu'à 5 fois sa valeur en régime permanent.

En charge, le couple tend vers la valeur du couple résistant en régime permanent et l'amplitude du courant vers une valeur correspondante au courant nominal. Quant à la vitesse, on constate une chute de 80 tr/min et cela est dû à l'application de la charge 10 (N.m).

## II.3 Le système d'alimentation

Le développement de l'électronique de puissance a permis la variation de la vitesse. Grâce à la réalisation d'une source d'alimentation à fréquence variable [31].

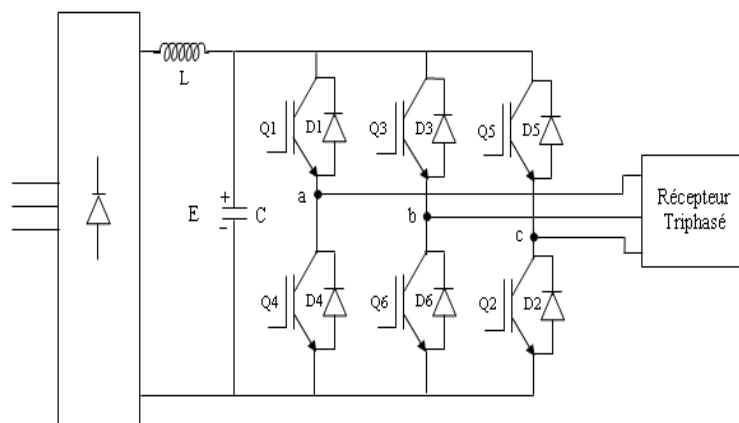
On distingue deux principales sources d'alimentation :

- L'onduleur de tension ou de courant utilisé généralement avec les faibles et les moyennes puissances.

- Le cyclo convertisseur utilisé pour les grandes puissances aux faibles vitesses. Comme les machines de traction et les machines-outils [32].

- On suppose que tous les éléments constituant le circuit du système d'alimentation sont parfaits. Le circuit principal du système d'alimentation représenté par la figure (II.8) possède, sur le côté réseau, un pont redresseur à diode supposé parfait, il est suivi par un filtre passif  $L_c$  qui comporte une inductance  $L_r$  et une capacité  $C_r$ , dont le rôle principal est de réduire les ondulations de courant et de tension redressée.

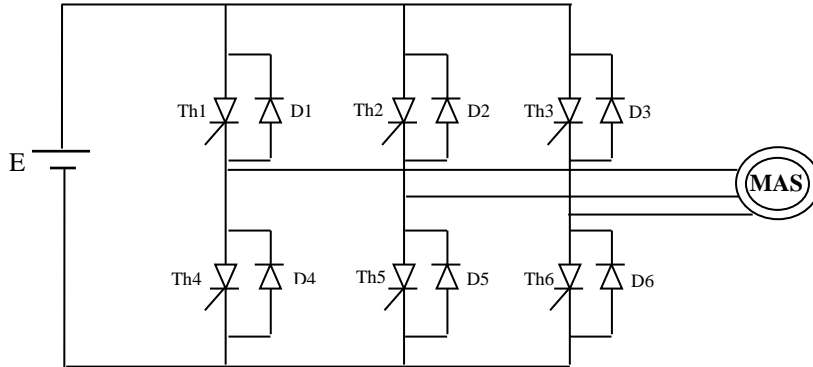
Dans notre travail nous utilisons un onduleur de tension.



**Figure II.8 :** Structure générale de l'onduleur .

### II.3.1 Modélisation de l'onduleur

L'onduleur de tension triphasé comporte trois bras, est représenté dans la figure suivante :



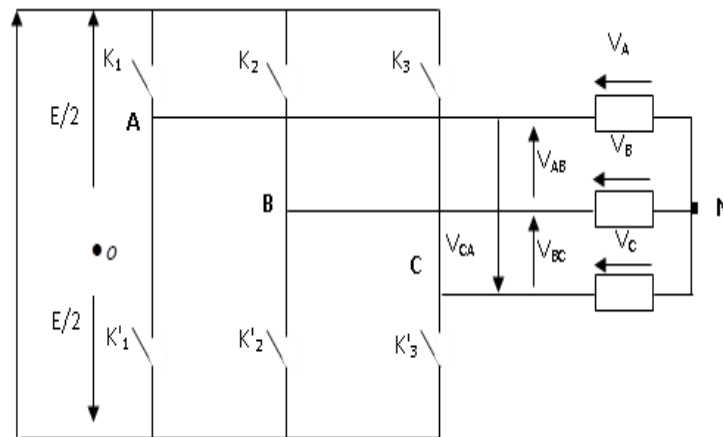
**Figure.II.9 :** Structure de l'onduleur & Moteur asynchrone.

Les interrupteurs  $Th_j$ ,  $D_j$ , ( $j = 1, 2, 3$ ), sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant. Ce sont des éléments commandables.

Ils sont commandés par la technique de modulation de largeur d'impulsion, qui consiste à moduler la tension de sortie.

#### II.3.1.1 Modèle mathématique de l'onduleur triphasé

On peut remplacer chaque groupe thyristor-diode de la figure (II.9) par des interrupteurs  $k_j$ ,  $k'_j$  avec ( $j = 1, 2, 3$ ), on obtient le schéma simplifié comme l'indique la figure (II.10).



**Figure.II.10 :** Schéma simplifié de l'onduleur triphasé

Les équations de tension simples appliquées aux trois phases statoriques sont :

$$\begin{cases} V_A = V_{AO} + V_{ON} \\ V_B = V_{BO} + V_{ON} \\ V_C = V_{CO} + V_{ON} \end{cases} \quad (II.29)$$

Par addition on a :  $V_A + V_B + V_C = V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{ON}$

Sachant que le système des tensions triphasées statoriques est symétrique.

$$\begin{aligned} \text{donc : } & V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{ON} = 0 \\ \text{d'où : } & V_{ON} = -\frac{1}{3}(V_{AO} + V_{BO} + V_{CO}) \end{aligned} \quad (\text{II.30})$$

On remplace (II.29) dans (II.30), on aura le système suivant :

$$\begin{cases} V_A = \frac{2}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_B = -\frac{1}{3}V_{AO} + \frac{2}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_C = -\frac{1}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} + \frac{2}{3}V_{CO} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

On peut écrire le système (II.31) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{AO} = \frac{E}{2}S_1 \\ V_{BO} = \frac{E}{2}S_2 \\ V_{CO} = \frac{E}{2}S_3 \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

$$\text{Tel que: } \begin{cases} S_1 = 1 & \left\{ \begin{array}{l} \text{Si } k_1 \text{ fermé} \\ \text{Si non} \end{array} \right. \\ S_2 = 1 & \left\{ \begin{array}{l} \text{Si } k_2 \text{ fermé} \\ \text{Si non} \end{array} \right. \\ S_3 = 1 & \left\{ \begin{array}{l} \text{Si } k_3 \text{ fermé} \\ \text{Si non} \end{array} \right. \end{cases} \begin{cases} S_1 = -1 \\ S_2 = -1 \\ S_3 = -1 \end{cases}$$

$S_j$ , ( $j=1, 2, 3$ ) l'état ouvert ou fermé des interrupteurs  $k_1, k_2, k_3$ .

On remplace (II.32) dans (II.33), on aura le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{E}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

Le système (II.34) représente le modèle mathématique de l'onduleur triphasé

$$\text{Les tensions composées entre les bornes de sortie sont : } \begin{cases} V_{AB} = V_{AO} - V_{BO} \\ V_{BC} = V_{BO} - V_{CO} \\ V_{CA} = V_{CO} - V_{AO} \end{cases}$$

Le tableau (II.1) montre les expressions qui prennent les tensions simples et les tensions composées, en fonction de l'état ouvert ou fermé des interrupteurs  $k_1, k_2, k_3$ . (Les états de  $k'_1, k'_2, k'_3$  sont respectivement complémentaires de ceux de  $k_1, k_2, k_3$ ).

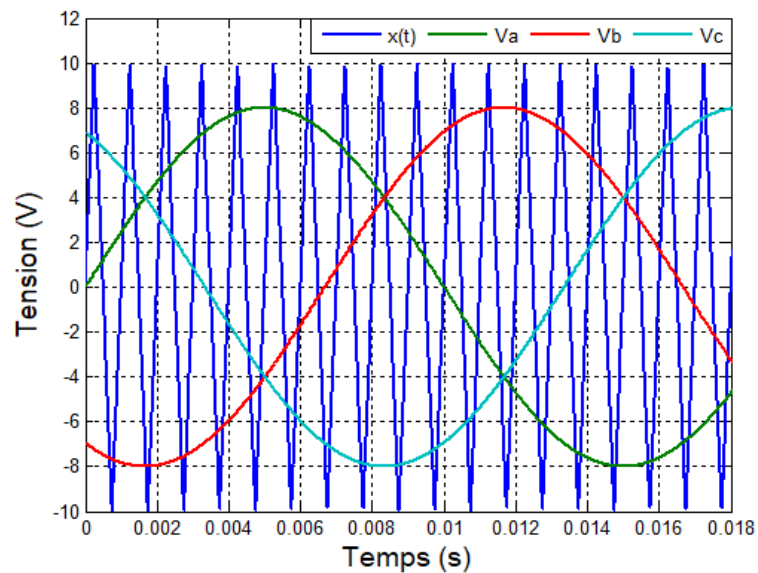
$K_1$	$K_2$	$K_3$	$V_{AO}$	$V_{BO}$	$V_{CO}$	$V_A$	$V_B$	$V_C$	$V_{AB}$	$V_{BC}$	$V_{CA}$
F	F	F	$E/2$	$E/2$	$E/2$	0	0	0	0	0	0
F	0	F	$E/2$	$-E/2$	$E/2$	$E/3$	$-2E/3$	$E/3$	$E$	$-E$	0
F	F	0	$E/2$	$E/2$	$-E/2$	$E/3$	$-E/3$	$-2E/3$	0	$E$	$-E$
F	0	0	$E/2$	$-E/2$	$-E/2$	$2E/3$	$-E/3$	$-E/3$	$E$	0	$-E$
0	F	F	$-E/2$	$E/2$	$E/2$	$-2E/3$	$E/3$	$E/3$	$-E$	0	$E$
0	0	F	$-E/2$	$-E/2$	$E/2$	$-E/3$	$-E/3$	$2E/3$	0	$-E$	$E$
0	F	0	$-E/2$	$E/2$	$-E/2$	$-E/3$	$2E/3$	$-E/3$	$-E$	$E$	0
0	0	0	$-E/2$	$-E/2$	$-E/2$	0	0	0	0	0	0

**Tableau II.1.** Etablissement des expressions des tensions simples et composées.

### II.3.1.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion MLI

#### II.3.1.2.1 La stratégie triangulo sinusoïdale

La stratégie triangulo-sinusoïdale est obtenue par la comparaison du signal de porteuse  $x(t)$  et les signaux de références  $V_{ref.}$ , définissant la fonction logique  $S_j$  comme le montre la figure suivante :



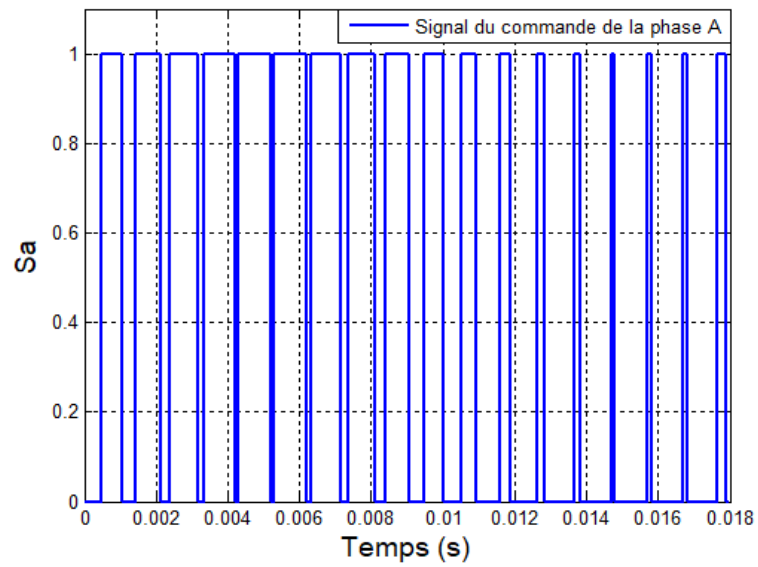
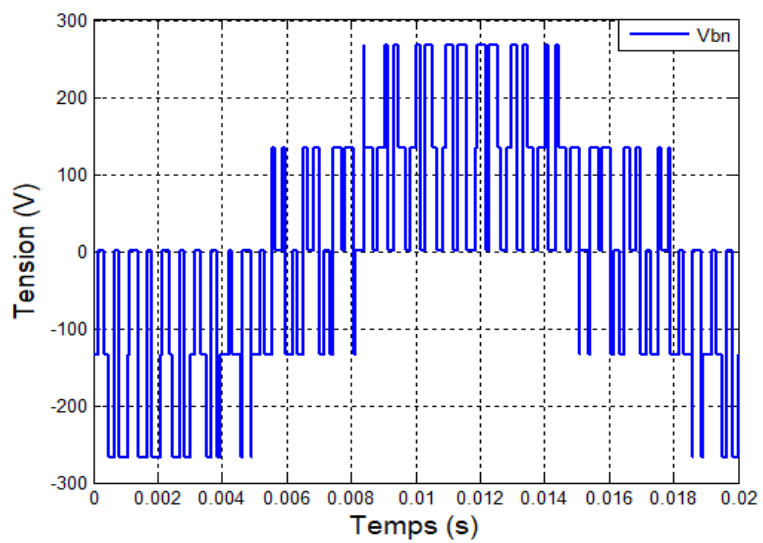
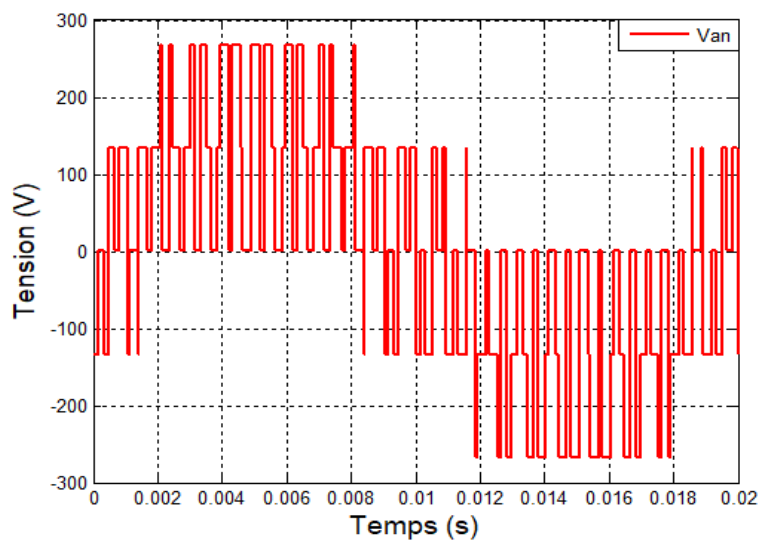
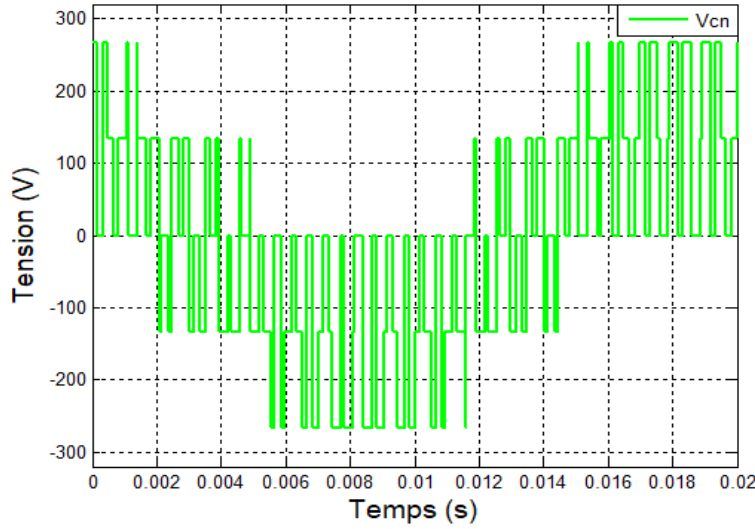


Figure.II.11 : Principe de la commande.





**Figure.II.12 :** Tensions aux bornes de l'onduleur.

Donc les fonctions logiques  $S_j$  associées au signal de commande sont définies par :

$$S_j = \begin{cases} 1 & \text{Si } V_{ref} \geq V_p \\ 0 & \text{Si } V_{ref} < V_p \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

La porteuse est définie par la formule suivante :

$$V_p = \begin{cases} \frac{4t}{T_p} - (4n+1) & \text{Si } t \in \left[ nT_p, \left( n + \frac{1}{2} \right) T_p \right] \\ -\frac{4t}{T_p} + (4n+3) & \text{Si } t \in \left[ \left( n + \frac{1}{2} \right) T_p, (n+1)T_p \right] \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

Avec  $n$  : entier naturel.

Les signaux de référence sont donnés par l'équation suivante :

$$V_{ref} = r \cdot \sin \left[ (2\pi f) \cdot t - 2 \cdot (j-1) \cdot \frac{\pi}{3} \right] \quad (\text{II.37})$$

Avec  $j = 1, 2, 3$ .

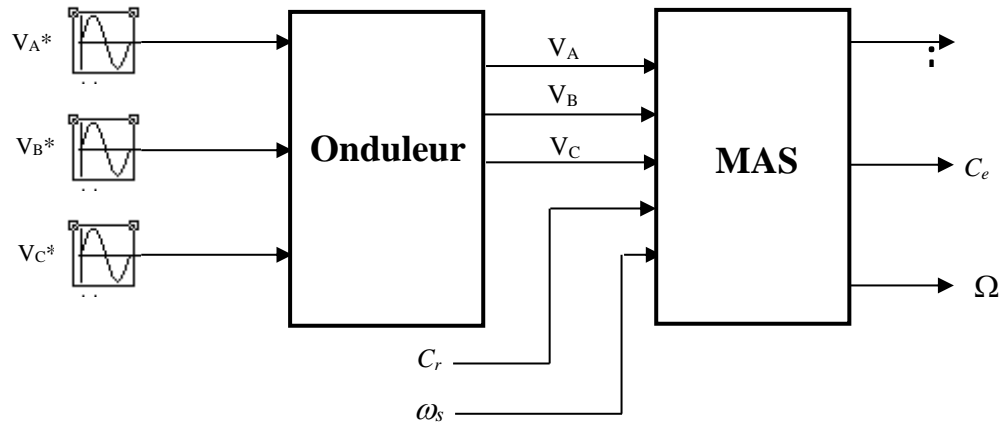
Lorsque la référence est sinusoïdale, dans ce cas deux paramètres caractérisant la commande :

- L'indice de modulation  $m = \frac{f_p}{f}$  est le rapport des fréquences de la porteuse et de la référence.
- Le coefficient de réglage en tension  $r = 2 \frac{V_{ref}}{V_p}$  est le rapport de l'amplitude de tension de référence par rapport à la valeur de crête de l'onde de porteuse.



### II.3.2 Simulation de l'ensemble onduleur moteur asynchrone

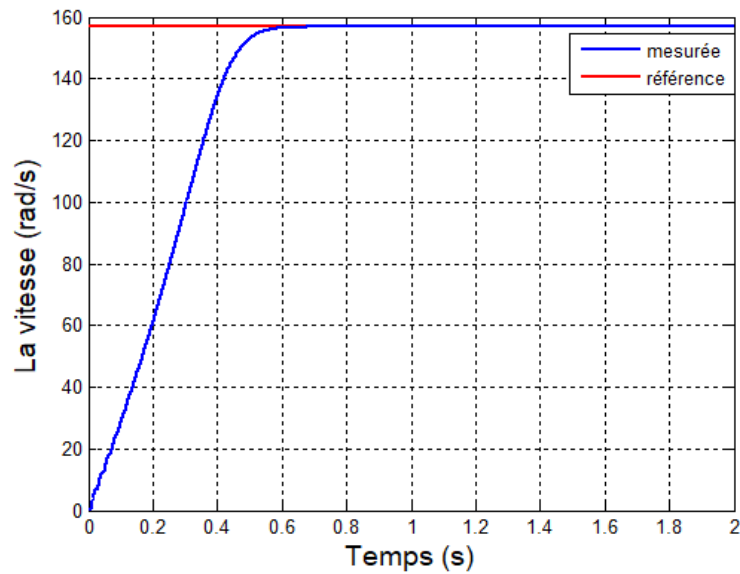
Le moteur asynchrone est alimenté maintenant par un onduleur à MLI, pour ce faire, nous avons simulé le schéma fonctionnel de la figure (II.13).



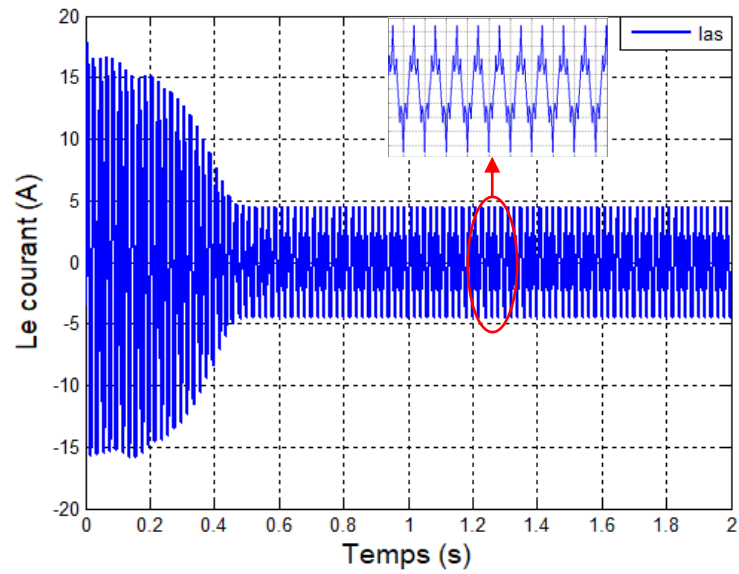
**Figure.II.13 :** Structure de l'association onduleur - moteur asynchrone.

La figure (II.14) montre le résultat d'un démarrage à vide, tandis que la figure (II.15) montre celui d'une application de charge 10 (N.m) à l'instant  $t = 1$  s.

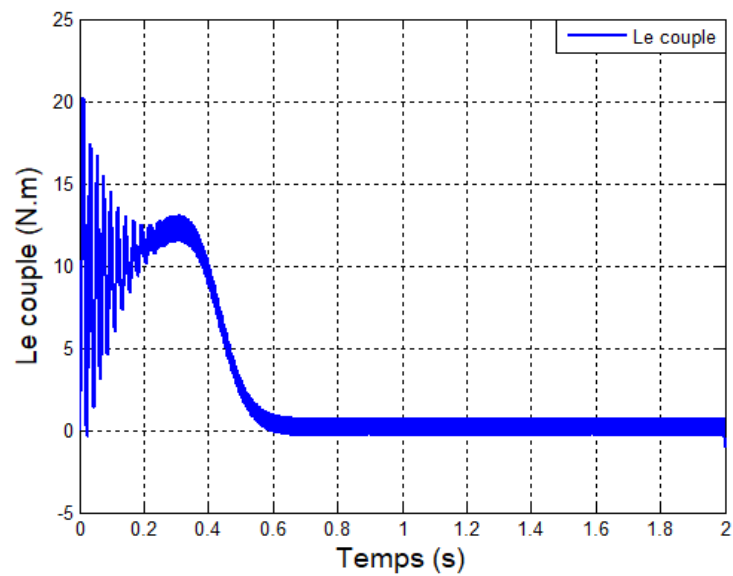
(a)



(b)

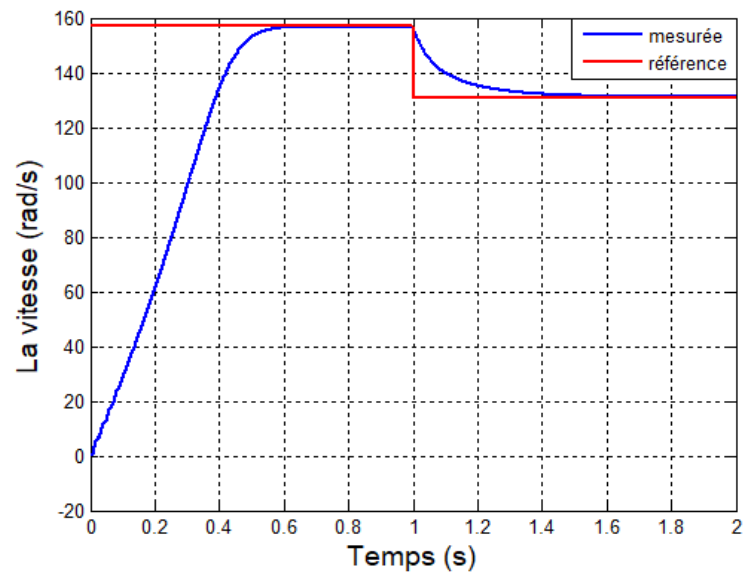


(c)

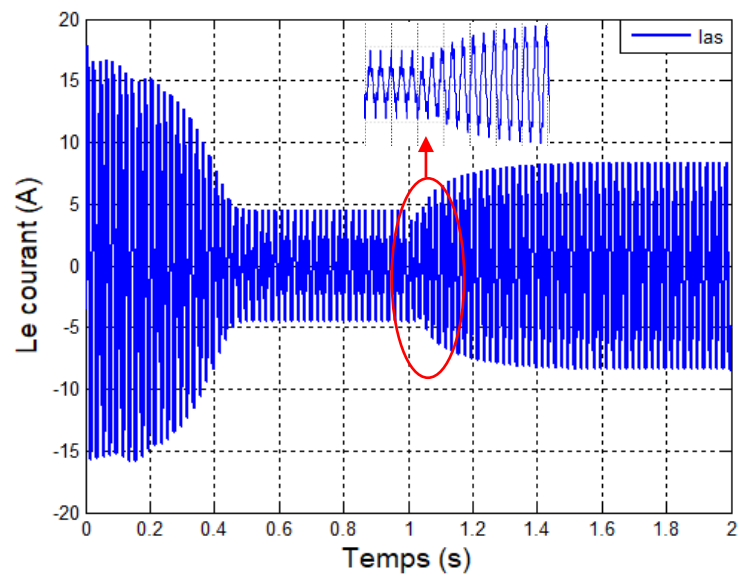


**Figure.II.14 :** Démarrage du moteur asynchrone alimenté par un onduleur à MLI à vide.

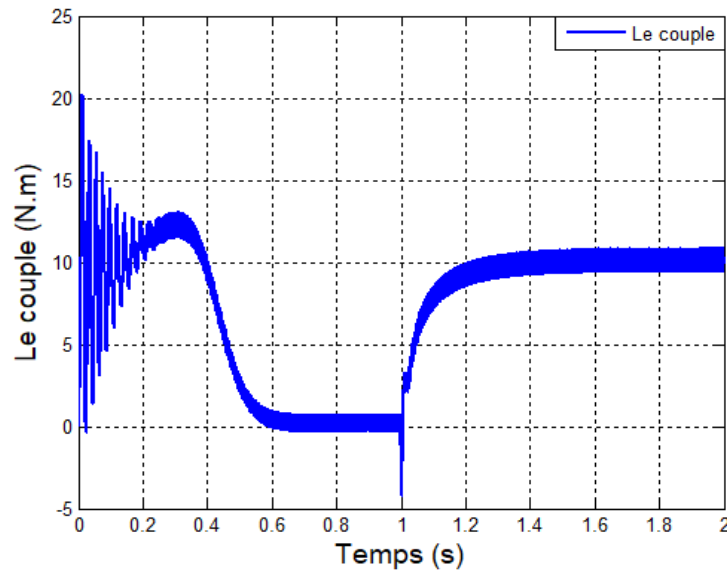
(a)



(b)



(c)



**Figure.II.15 :** Démarrage du moteur asynchrone alimenté par un onduleur avec application de charge 10 (N.m) à l'instant  $t = 1$ .

### II.3.2.1 Interprétation des résultats

La comparaison de ces résultats avec les figures (II.6) et (II.7) nous permet de conclure : Une réponse dynamique plus lente dans tous les cas.

Le courant statorique et le couple électromagnétique sont très ondulés. En régime transitoire, la vitesse présente une faible oscillation au démarrage puis elle augmente avec une allure presque linéaire jusqu'à ce qu'elle se stabilise à la vitesse nominale de la machine.

## II.4 Commande vectorielle de la machine asynchrone

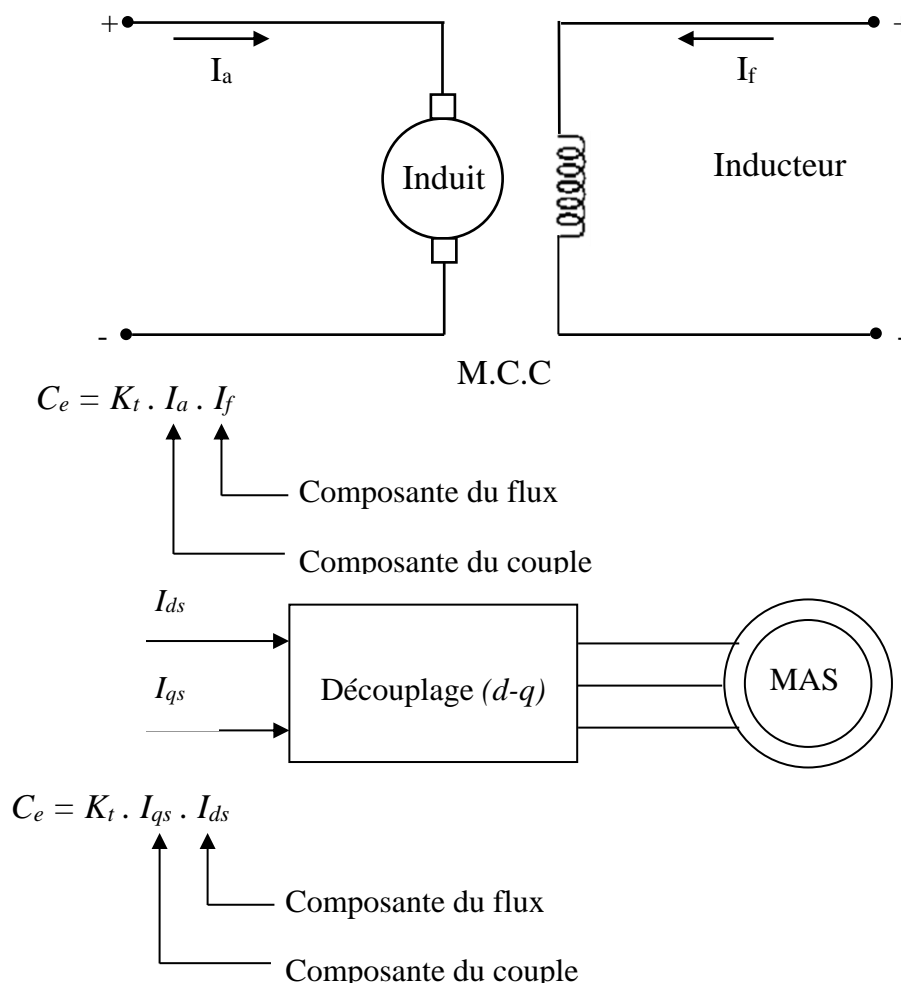
### II.4.1 Principe général de la méthode

La commande par flux orienté est une expression qui apparaît de nos jours dans la littérature traitant les techniques de contrôle des machines électriques à courant alternatif, dont l'étymologie nous ramène à une notion élémentaire et importante de l'électromagnétisme. [31]

A savoir la force exercée sur un conducteur parcouru par un courant et soumis à un champ magnétique est égal au produit vectoriel du vecteur courant par le vecteur champ. Il en résulte évidemment que l'amplitude de cette force sera maximale lorsque le vecteur courant est perpendiculaire au vecteur champ [33].

Dans la machine asynchrone (MAS), le principe d'orientation du flux a été développé par Blaschke au début des années 70. Il consiste à orienter le vecteur courant et le vecteur flux afin de rendre le comportement de cette machine similaire à celui d'une machine à courant continu

à excitation séparée (MCC) où le courant inducteur contrôle le flux et le courant d'induit contrôle le couple. Il s'agit de placer le référentiel (d, q) de sorte que le flux soit aligné sur l'axe direct (d). Ainsi, le flux est commandé par la composante directe du courant ( $i_{ds}$ ) et le couple est commandé par l'autre composante ( $i_{qs}$ ). Dans la littérature, nous trouvons plusieurs types d'orientation, à savoir l'orientation du flux rotorique, l'orientation du flux statorique et l'orientation du flux d'entrefer. Nous nous intéressons dans ce travail à l'orientation du flux rotorique [34]. Cette orientation permet de transformer l'expression du couple électromagnétique à une forme similaire à celle de la machine à courant continu (Figure II.16).



**Figure.II.16 :** Principe de la commande découplée pour la machine à CC à excitation séparée et la machine AC.

#### II.4.2 Synthèse de la commande vectorielle

La synthèse de la commande vectorielle se déroule en plusieurs phases :

- Choisir la machine et l'alimentation (source et convertisseur) en tension ou en courant.
- Déterminer le repère de ( $d, q$ ) et la nature d'orientation :

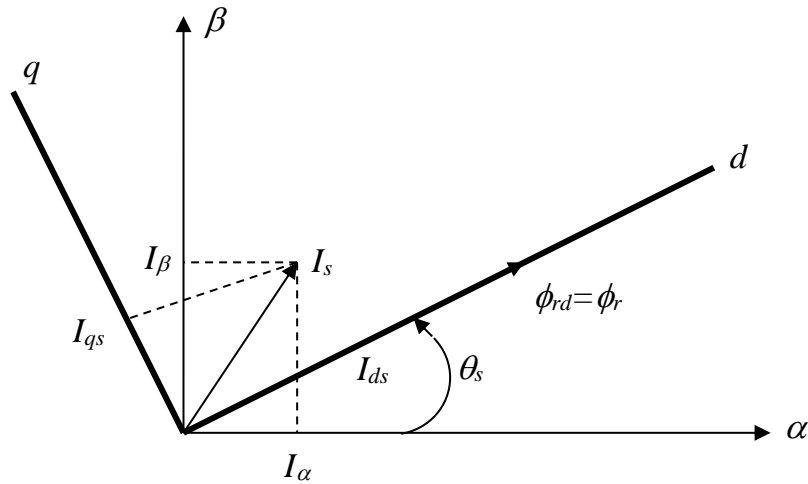
- Flux rotorique.
  - Flux statorique.
  - Flux d'entrefer.
- Déduire les variables de commande adoptées aux types d'alimentation, un modèle d'état faisant apparaître la variable intervenant dans l'orientation (le courant - le flux).
  - Déterminer suivant le modèle d'état, la loi de commande assurant le découplage de flux et de couple et l'orientation du repère.

### II.4.3 L'orientation du flux rotorique

Dans la machine asynchrone, le principe d'orientation consiste à aligner le flux rotorique sur l'axe direct du repère de Park [28] [29]. Dans ces conditions la composante en quadrature du flux rotorique est nulle.

( $\phi_{dr} = \phi_r$ ,  $\phi_{qr} = 0$ ), figure (II.17).

Le choix d'un référentiel lié au flux rotorique est particulièrement avantageux, car il conduit à un découplage fictif total entre le flux rotorique présenté dans la machine et le couple électromagnétique engendré.



**Figure.II.17 : Référentiel lié au flux rotorique.**

En appliquant les conditions de ce choix et partant du système d'équation (II.14), le système d'équation (II.23) devient :

$$\begin{cases} V_{ds} = \left( R_s + R_r \frac{M^2}{L^2} \right) i_{ds} + \sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} - (\sigma L_s \omega_s) i_{qs} - \frac{MR_r}{L^2} \phi_r \\ V_{qs} = \left( R_s + R_r \frac{M^2}{L^2} \right) i_{qs} + \sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} + (\sigma L_s \omega_s) i_{ds} + \frac{M}{L} \omega \phi_r \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

et

$$M i_{ds} = T_r \frac{d\phi_r}{dt} + \phi_r \quad (\text{II.39})$$

$$\omega_{gl} = \frac{M}{\phi_r T_r} i_{qs} \quad (\text{II.40})$$

Ainsi, l'expression du couple devient :

$$C_e = \frac{3}{2} \frac{P M}{L_r} (\phi_r i_{qs}) \quad (\text{II.41})$$

Le couplage indésirable dans les équations (II.38) rend le contrôle séparé du flux et du couple difficilement réalisable. Pour améliorer les performances du système, nous utilisons une méthode de compensation statique. Cette méthode consiste à faire la régulation des courants en découplant les deux courants statorique  $i_{ds}$  et  $i_{qs}$ .

Ces derniers sont rajoutés à la sortie des correcteurs des courants pour obtenir les tensions de référence nécessaires pour le réglage.

Ainsi, définissant deux nouvelles variables de commande  $v_{ds1}$  et  $v_{qs1}$  qui permettent d'éliminer le problème de couplage. Telles que  $v_{ds1}$  n'agisse que sur  $i_{ds}$  et  $v_{qs1}$  sur  $i_{qs}$ .

$$\begin{cases} v_{ds} &= v_{ds1} - fem_d \\ v_{qs} &= v_{qs1} - fem_q \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

$$\begin{aligned} \text{Avec : } fem_d &= (\omega_s \sigma L_s) i_{qs} + \frac{M}{L_r} R_r \phi_r \\ fem_q &= -(\omega_s \sigma L_s) i_{ds} - \frac{M}{L_r} \omega \phi_r \\ fem_q &= -(\omega_s \sigma L_s) i_{ds} - \frac{M}{L_r} (\omega_s - \omega_r) \phi_r \end{aligned} \quad (\text{II.43})$$

$$\text{Soit : } fem_q = -(\omega_s \sigma L_s) i_{ds} - \frac{M}{L_r} \omega_s \phi_r + \frac{M^2}{L_r T_r} i_{qs} \quad (\text{II.44})$$

Ces deux nouvelles tensions  $v_{ds1}$  et  $v_{qs1}$  seront liées respectivement aux composantes des courants statoriques  $i_{ds}$  et  $i_{qs}$ . Les valeurs de  $v_{ds1}$  et  $v_{qs1}$  sont ensuite corrigées, pour compenser l'erreur introduite par le couplage. Ce qui conduit aux équations des tensions statoriques de référence  $v_{ds}$  et  $v_{qs}$  à flux constant.

Les tensions  $v_{ds}$  et  $v_{qs}$  sont alors reconstituées à partir des tensions  $v_{ds1}$ ,  $v_{qs1}$ ,  $fem_d$  et  $fem_q$ .

$$\begin{cases} v_{ds1} = \sigma L_s \frac{d i_{ds}}{dt} + \left( R_s + R_r \frac{M^2}{L_r^2} \right) i_{ds} \\ v_{qs1} = \sigma L_s \frac{d i_{qs}}{dt} + \left( R_s + R_r \frac{M^2}{L_r^2} \right) i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.45})$$

Les actions sur les axes  $d$  et  $q$  sont alors découplées :

$$\begin{cases} V_{ds1} = \frac{(\sigma L_s L_r^2) S + R_s L_r^2 + R_r M^2}{L_r^2} I_{ds} \\ V_{qs1} = \frac{(\sigma L_s L_r^2) S + R_s L_r^2 + R_r M^2}{L_r^2} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

Finalement, nous obtiendrons les relations suivantes :

$$V_{ds} = V_{ds1} - f_{emd} \quad (\text{II.47})$$

$$V_{qs} = V_{qs1} - f_{emq} \quad (\text{II.48})$$

$$M i_{ds} = T_r \frac{d\phi_r}{dt} + \phi_r \quad (\text{II.49})$$

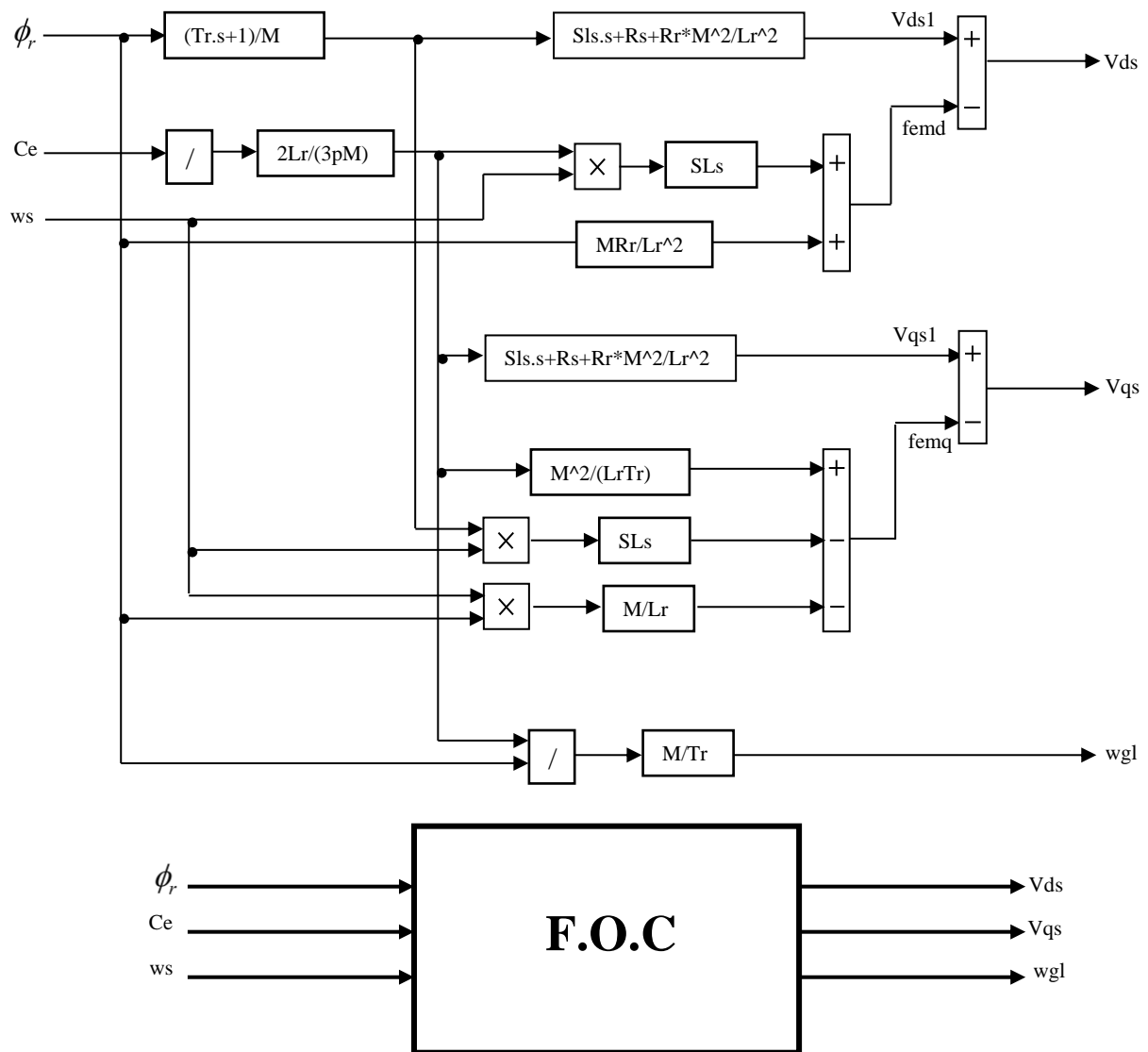
$$i_{ds} = \frac{\phi_r (S T_r + 1)}{M} \quad (\text{II.50})$$

$$i_{qs} = \frac{2}{3} \frac{C_e L_r}{P M \phi_r} \quad (\text{II.51})$$

$$\omega_{gl} = \frac{M}{\phi_r T_r} i_{qs} \quad (\text{II.52})$$

Ces équations sont les lois fondamentales de la commande vectorielle, la structure de commande est donnée par la figure (II.18).





**Figure.II.18 :** Structure de la commande vectorielle.

La structure de la figure (II.18) permet alors de réaliser un découplage entre le couple et le flux. Ce résultat remarquable a entraîné une utilisation systématique de ce schéma de commande dans des processus industriels.

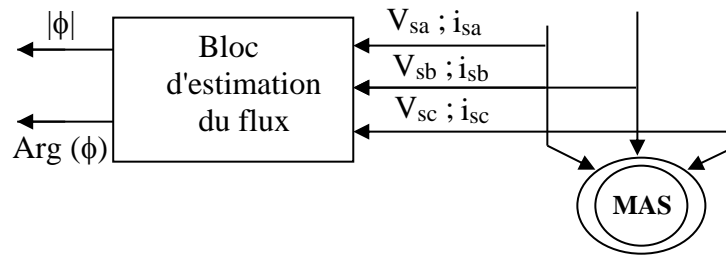
#### II.4.4 Structure de la commande vectorielle

La méthode d'orientation du flux, nous offre la possibilité d'avoir de très bonnes réponses d'entraînement en régime dynamique. Il existe deux méthodes pour la mesure du flux [35].

##### II.4.4.1 La commande vectorielle directe

Pour cette méthode de commande le module du flux et sa phase sont mesurés électriquement en utilisant un modèle dynamique ou un capteur physique du flux, ces deux grandeurs doivent être vérifiées quel que soit le régime transitoire apparu.

L'utilisation d'un modèle dynamique s'effectue à partir de la mesure des grandeurs statoriques (courants et tension), figure (II.19).



**Figure.II.19 :** Modèle dynamique d'estimation du flux.

La valeur estimée par retour de la boucle de correction dont le rôle est d'éliminer l'erreur entre les valeurs de sortie du moteur et les valeurs des signaux de consigne.

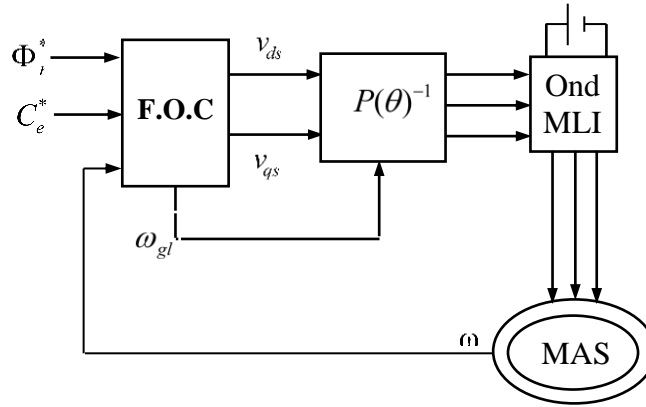
Les capteurs physiques permettant d'avoir des mesures directes du flux, ils sont placés convenablement dans l'entrefer. Ces capteurs peuvent être soit :

- Des capteurs à effet hall placés sous les dents du stator, ils donnent les valeurs locales du flux, sont mécaniquement fragiles et ne peuvent pas travailler dans les conditions de sévères telles que les vibrations et les échauffements excessifs.
- Des bobinages supplémentaires dans le stator.
- Les bobinages statoriques eux-mêmes par mesure de la tension aux bornes.

#### II.4.4.2 La commande vectorielle indirecte

Le principe de cette méthode de commande (slip frequency control) omet l'utilisation de l'amplitude du flux rotorique. Cependant, il utilise sa position calculée en fonction des grandeurs de référence, en considérant que le régime permanent est établi [35]. Cette méthode présente l'avantage qu'elle omet le besoin de la mesure ou de l'estimation du flux rotorique.

La méthode indirecte consiste à générer à l'aide d'un bloc FOC, les tensions d'alimentation de la machine afin d'obtenir le flux et le couple souhaités (figure.II.20).



**Figure.II.20** : Structure de principe de la commande vectorielle

#### II.4.5 Méthode de synthèse du régulateur de vitesse

Pour le réglage de la vitesse du moteur, on a préféré d'utiliser un régulateur PI, ce choix est justifié par :

- La simplicité de sa réalisation et de son réglage (auto réglable) ;
- La connaissance et la maîtrise de ce type de régulateur et son application dans l'industrie ;
- Sa robustesse de commande ;
- Son prix de revient moins cher.

La boucle externe est la boucle de régulation de la vitesse (la grandeur ayant une dynamique plus lente). Pour cette raison, les pôles imposés pour la boucle externe sont plus proches à l'origine du plan des racines par rapport aux pôles de la boucle interne.

D'après l'équation mécanique, nous avons :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f_c \Omega = C_e - C_r \quad (\text{II.53})$$

En appliquant les transformations de Laplace à l'équation mécanique (II.53), il en résulte :

$$(f_c + js)\omega_r = p(C_e - C_r)$$

$$\omega_r = p \frac{(C_e - C_r)}{(f_c + js)} \quad (\text{II.54})$$

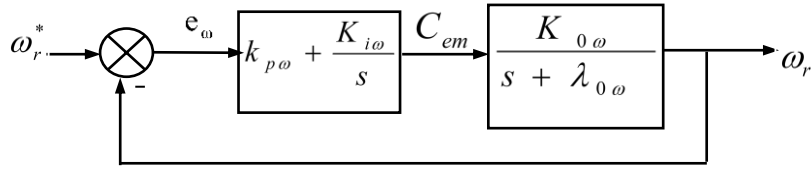
en faisant  $C_r = 0$ , on aura :

$$\frac{\omega_r}{C_e} = \frac{K_{0\omega}}{s + \lambda_{0\omega}} \quad (\text{II.55})$$

Avec  $\lambda_{0\omega} = \frac{f_c}{J}$

et  $K_{0\omega} = \frac{p}{J}$

D'où la structure de la boucle de régulation de la vitesse  $\omega_r$  :



**Figure.II.21 :** Structure de régulation de la vitesse de rotation.

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$\frac{\omega_r}{\omega_r^*} = \frac{K_{0\omega}(S K_{p\omega} + K_{i\omega})}{S^2 + S(\lambda_{0\omega} + K_{p\omega} K_{0\omega}) + K_{i\omega} K_{0\omega}} \quad (\text{II.56})$$

Il existe des méthodes bien définies pour le dimensionnement des coefficients du régulateur, tels que les méthodes de Ziegler-Nichols et extension, méthodes de placement des pôles. [36]

#### II.4.5.1 Réglage par structure PI

Le régulateur PI est caractérisé par la fonction de transfert suivante :

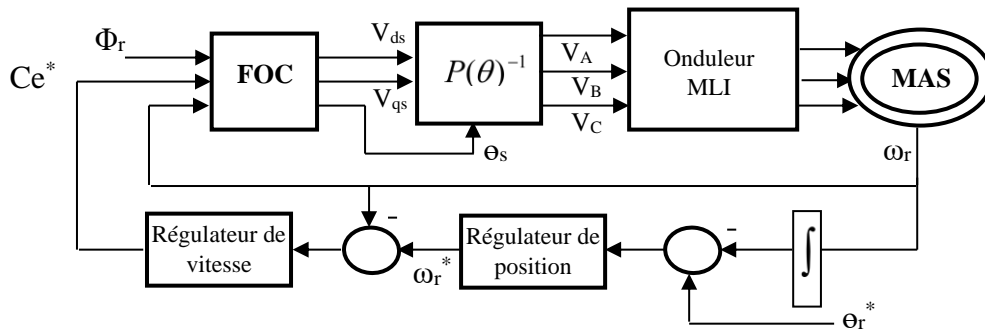
$$F(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (\text{II.57})$$

On supprime l'action intégrale  $k_i$  (ou la mettre à sa valeur la plus faible) et on réduit progressivement la bande proportionnelle  $k_p$  jusqu'à obtenir, en appliquant de petits échelons sur l'entrée de référence, une réponse avec des oscillations s'amortissant dans un rapport d'environ 0.25 sur chaque pseudo période.

A partir de ce réglage, on augmente progressivement (en créant à chaque fois de petits échelons de référence), l'action intégrale jusqu'à obtenir une réponse en vitesse satisfaisante.

#### II.4.5.2 Réglage de la position

La régulation de position est réalisée en ajoutant une boucle supplémentaire à la boucle de régulation de vitesse.

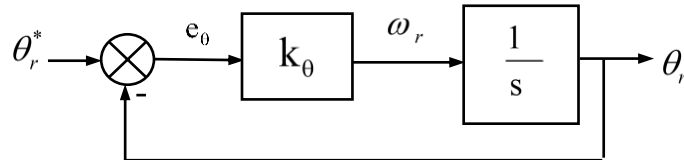


**Figure.II.22 :** Structure de la commande en vitesse et en position.

En tenant compte que la dynamique de vitesse rapide par rapport à celle de la position, et en supposant que la vitesse à sa valeur de référence, la fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$\frac{\theta_r}{\omega_r} = \frac{1}{s} \quad (\text{II.58})$$

Le correcteur est choisi à action proportionnelle. Le schéma fonctionnel de la boucle de régulation de position est indiqué dans la figure (II.23).

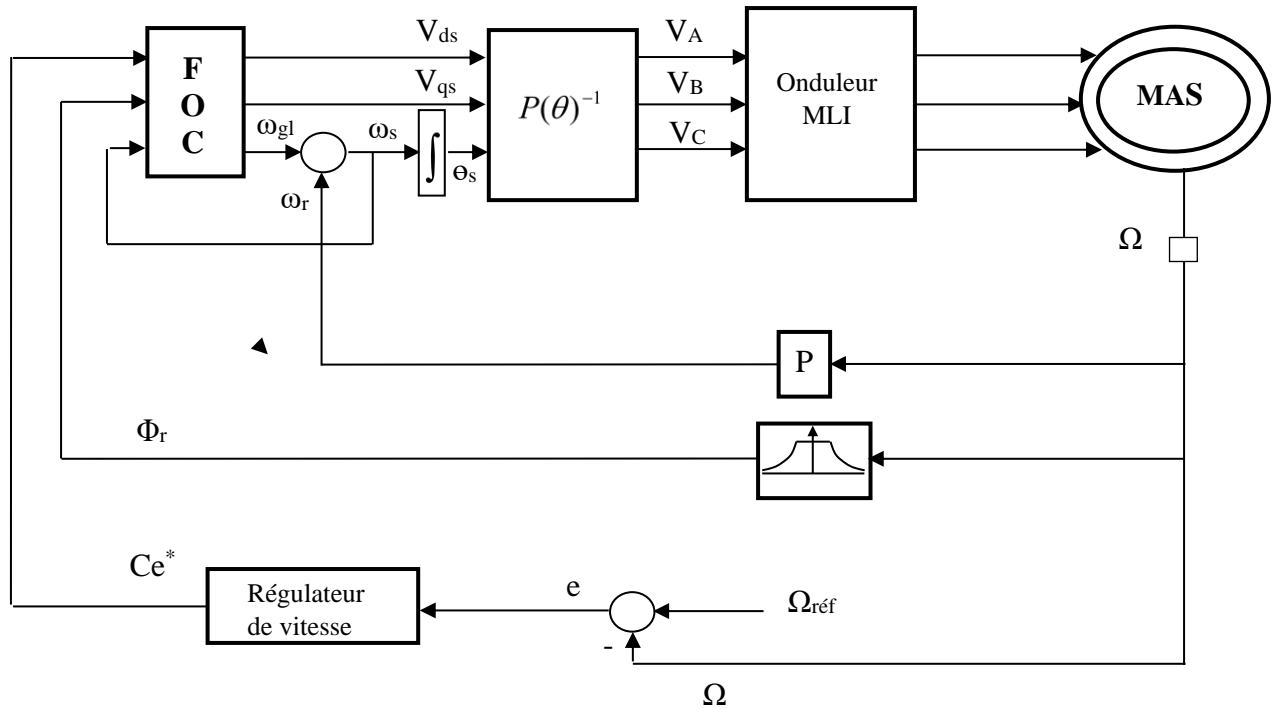


**Figure.II.23 :** Structure de régulation de la position  $\theta_r$ .

La fonction de transfert en boucle fermée peut s'écrire :

$$\frac{\theta_r}{\theta_r^*} = \frac{k_\theta}{s + k_\theta} \quad (\text{II.59})$$

Finalement, le schéma de la structure de commande en tension par orientation du flux rotorique est défini comme le montre la figure (II.24).



**Figure.II.24 :** Structure de principe de la commande vectorielle indirecte.

### II.4.5.3 Résultats de simulation

Nous avons simulé le modèle de la figure (II.24) en insérant un régulateur PI dans le bloc régulateur de vitesse.

#### Essai 1 :

- démarrage à vide avec application d'un échelon de vitesse de 157 rad/sec.
- L'application d'un couple de charge nominale 10 N.m à l'instant ( $t = 1.5s$ ).
- Elimination d'une charge à l'instant ( $t = 2.5s$ ).

#### Essai 2 :

- réglage à une référence de 157 rad/sec avec inversion de sens de rotation (-157 rad/sec) à l'instant ( $t = 1s$ ) et ( $t = 2s$ ).

### II.4.5.4 Interprétation des résultats

Les figures (II.25) et (II.26) montrent que le réglage par un régulateur PI donne des résultats satisfaisants :

La vitesse poursuit la valeur de référence avec la présence d'un dépassement du au changement brusque de la consigne à l'instant ( $t = 1s$ ) et ( $t = 2s$ ), nous remarquons une bonne performance du système après leurs perturbations. Avec un temps de réponse au bout de 40 ms.

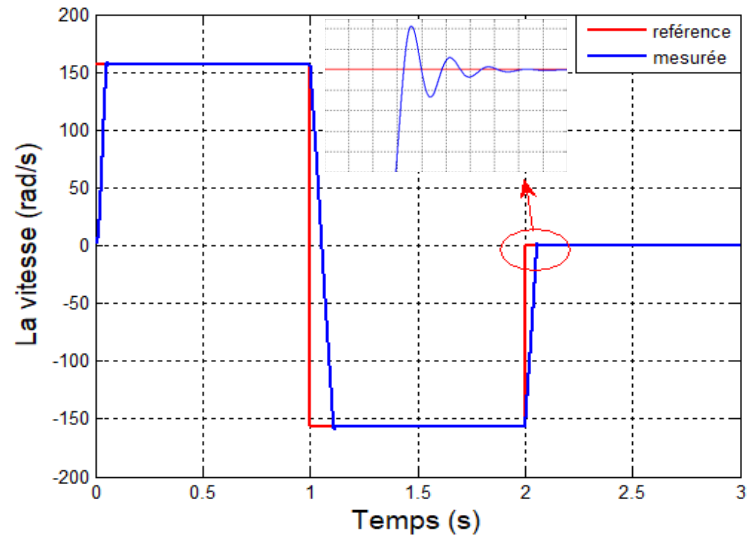
- Le courant ne dépasse pas sa valeur admissible.
- Le découplage est obtenu entre le flux rotorique  $\phi_r$  et le couple électromagnétique  $C_e$ .
- Le flux ( $\phi_{rd}$  et  $\phi_{rq}$ ) et le couple électromagnétique sont maintenus à leurs valeurs désirées, impliquant aussi un bon découplage.

Pour le réglage de position, les essais suivants ont été effectués

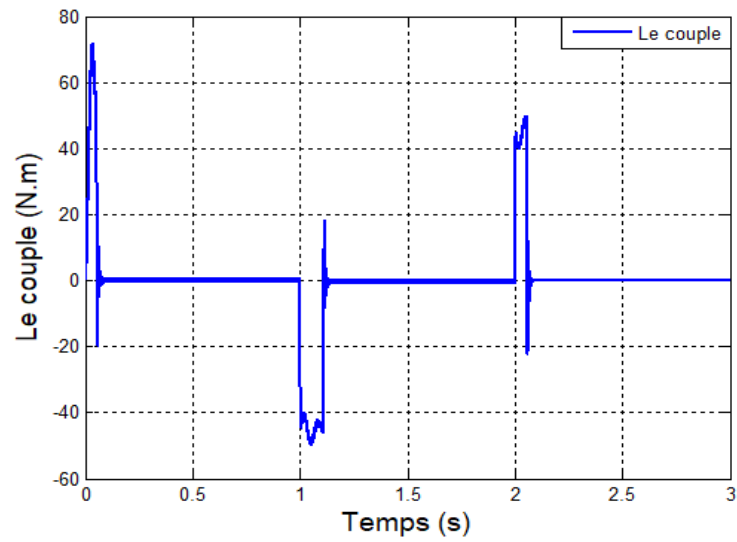
- Figure (II.27). Réglage à une référence (20 rad) avec un application et élimination d'un couple de charge nominale 5 N.m à l'instant ( $t = 1s$ ), ( $t = 2s$ ) respectivement.
- Figure (II.28). Inversion de la consigne à ( $t = 1s$ ), en présence de charge.

Nous constatons que la position suit la référence (dynamique lente) avec un rejet de perturbation remarquable. En plus, le découplage est parfaitement maintenu.

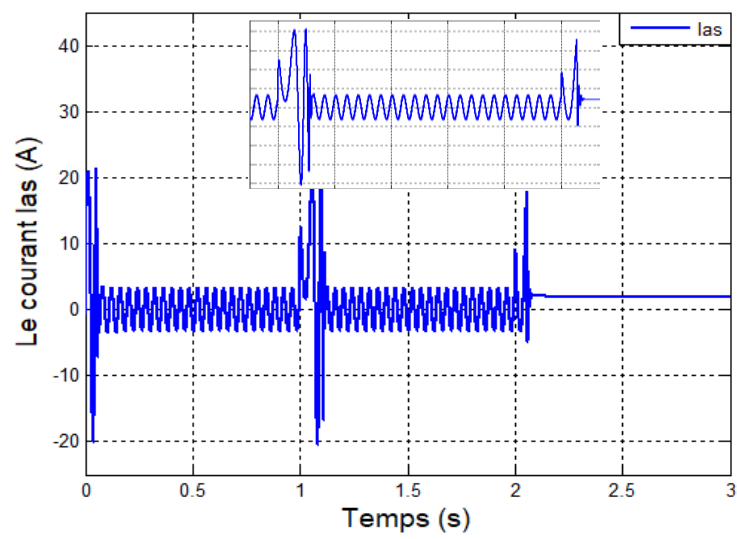
(a)



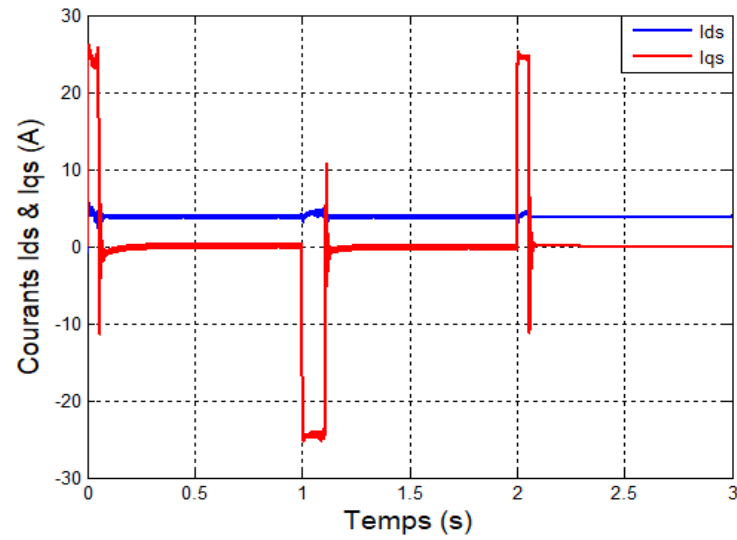
(b)



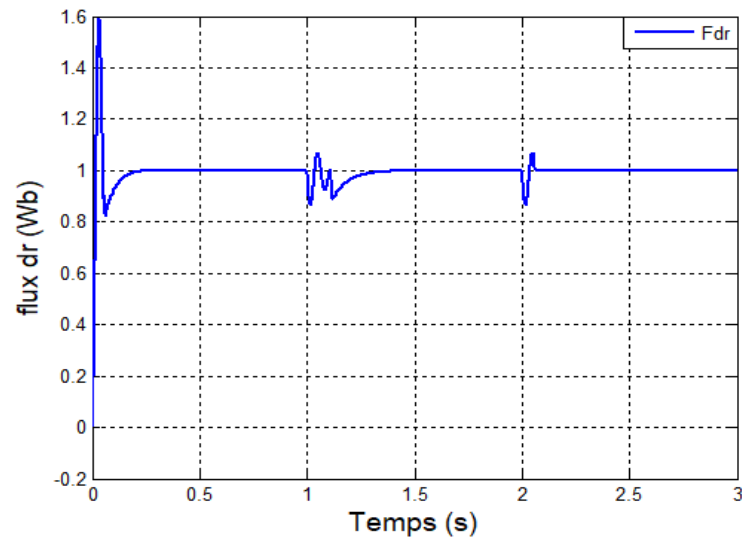
(c)



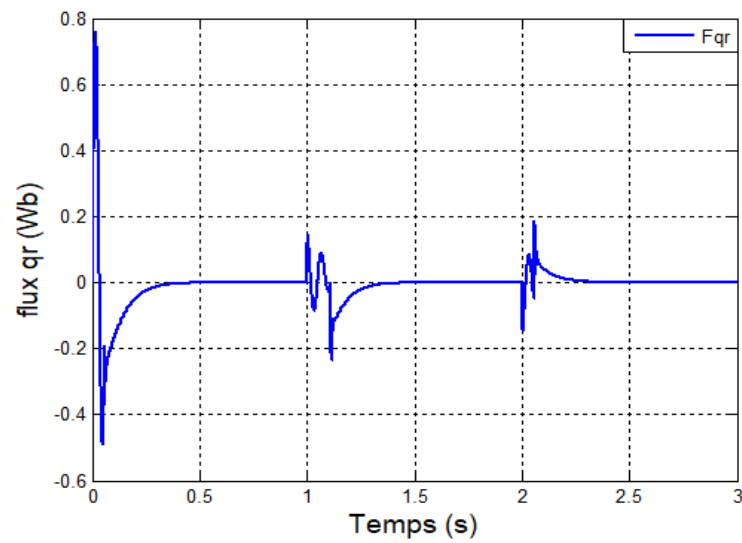
(d)



(e)



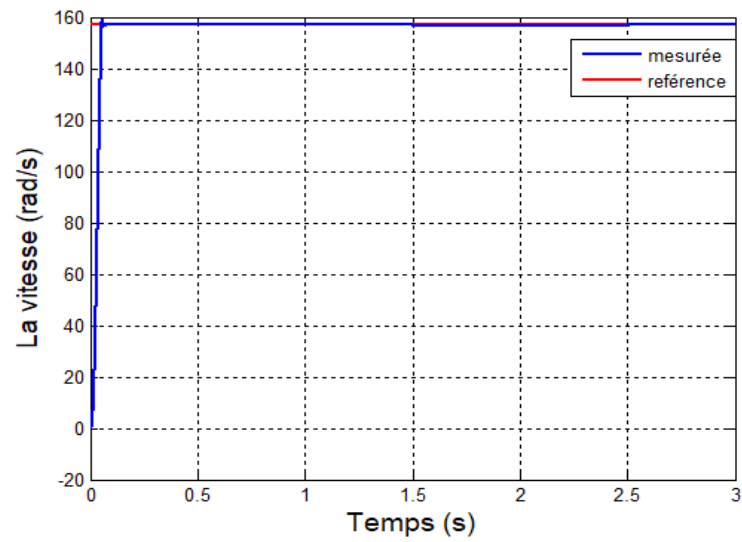
(f)



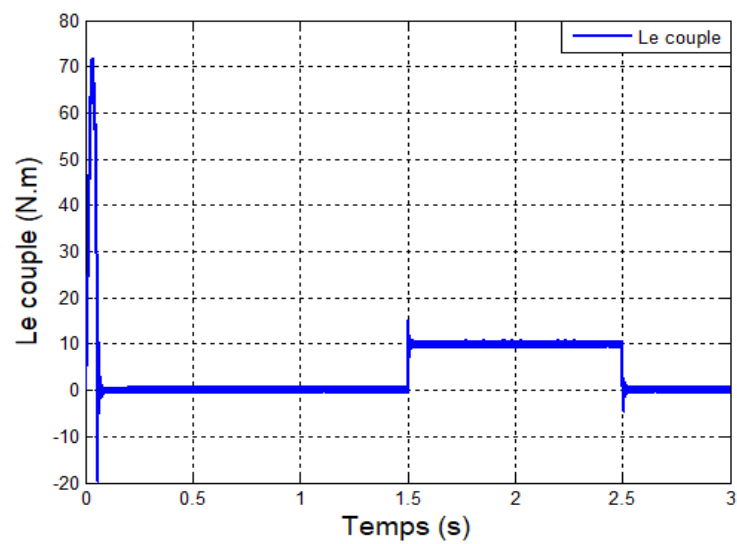
**Figure.II.25 :** Réglage de vitesse par la commande vectorielle indirecte. Inversion de sens de rotation à l'instant  $t=1s$  et  $t=2s$ .



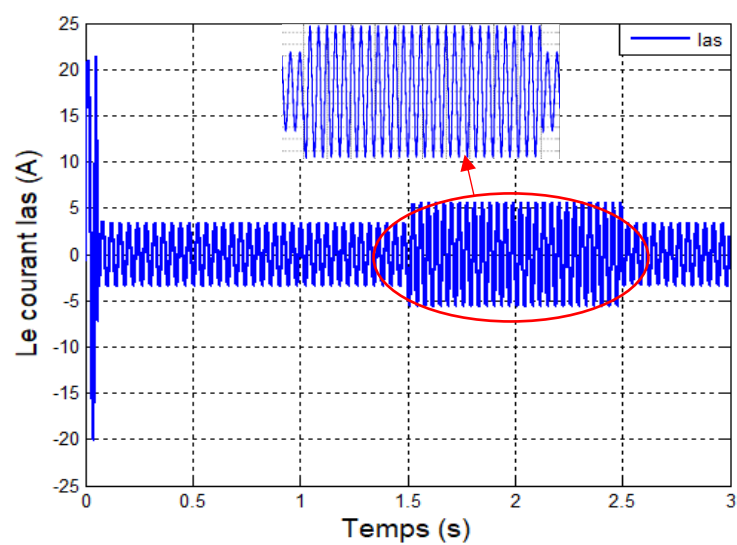
(a)



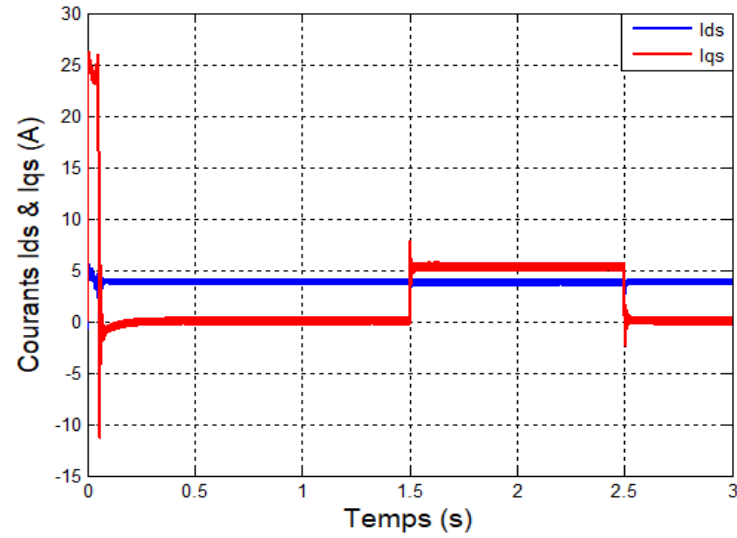
(b)



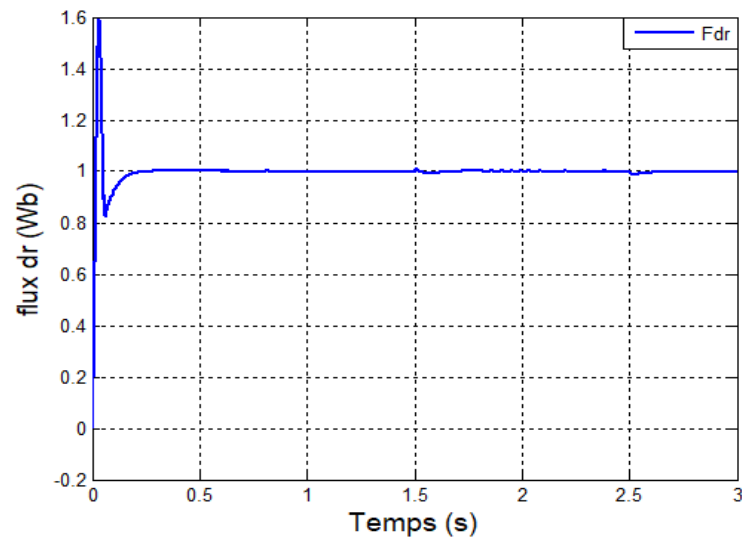
(c)



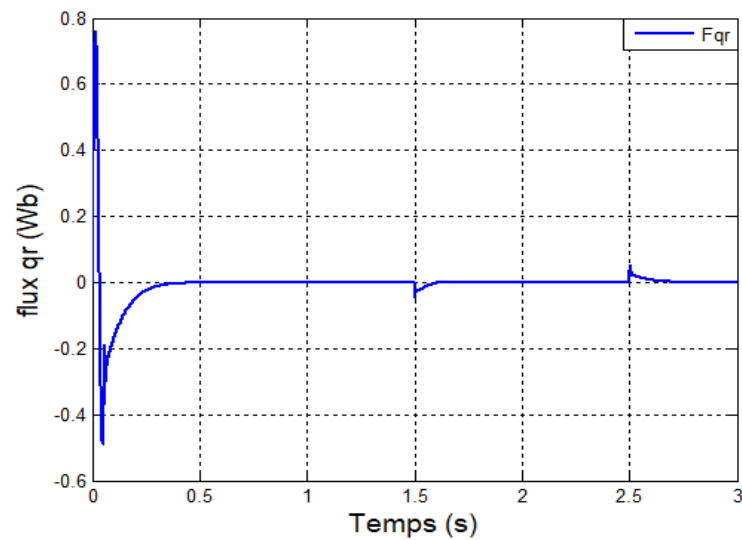
(d)



(e)

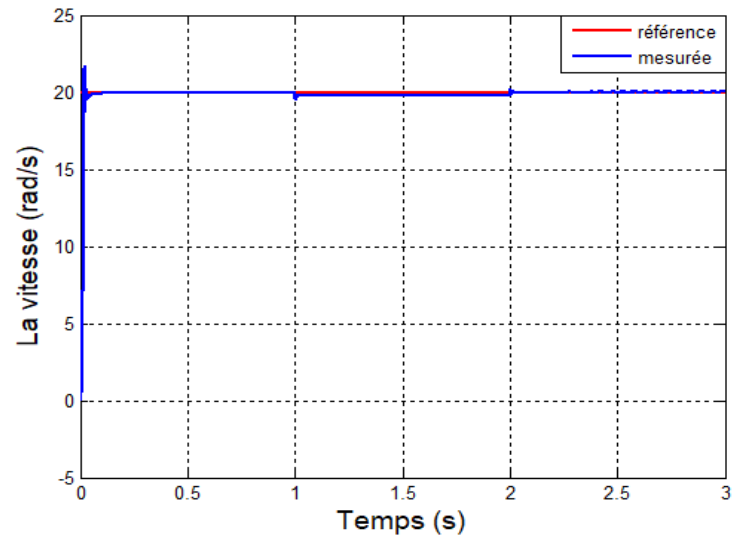


(f)

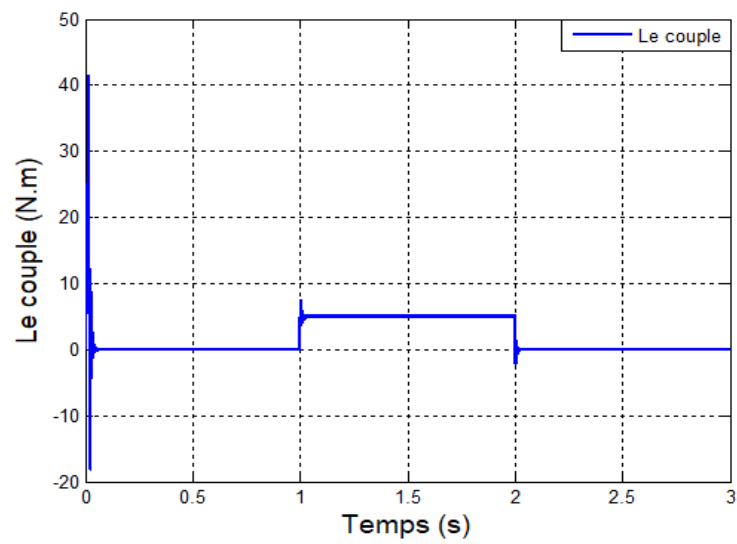


**Figure.II.26 :** Réglage de vitesse par la commande vectorielle indirecte. Application et élimination de la charge (10 N.m) à  $t=1,5$ s et  $t=2,5$ s.

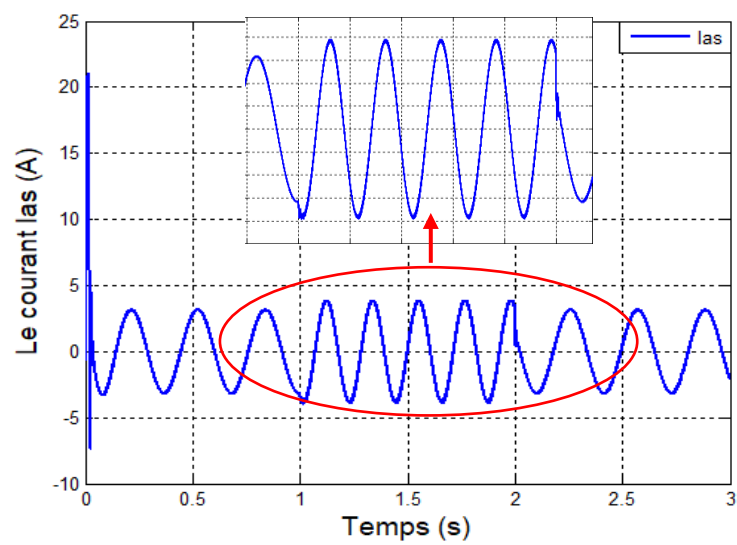
(a)



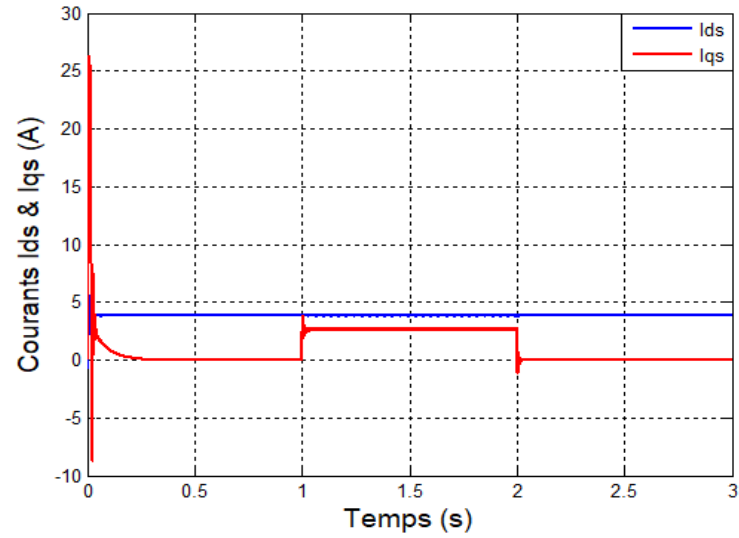
(b)



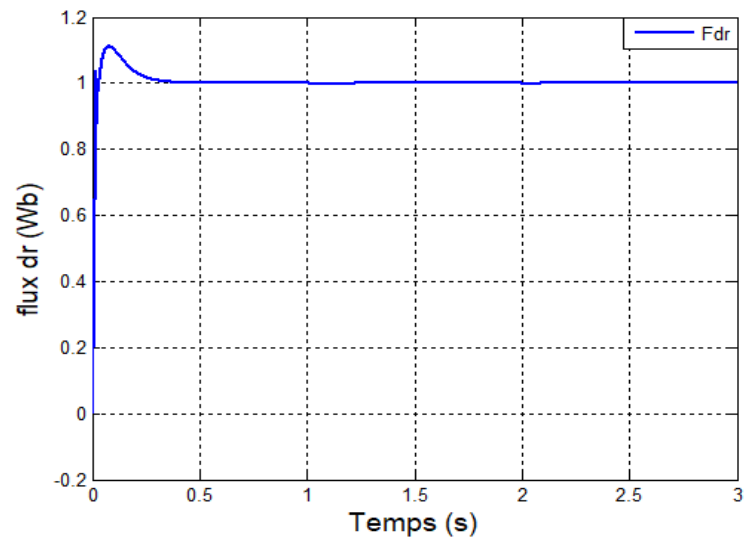
(c)



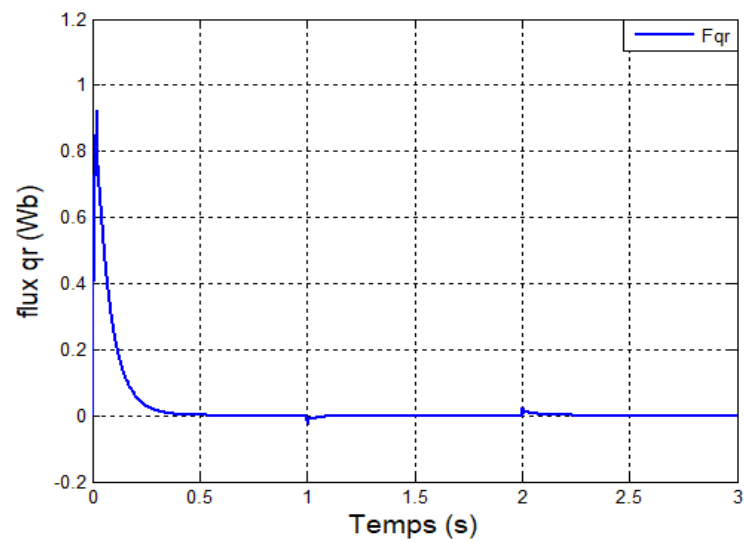
(d)



(e)

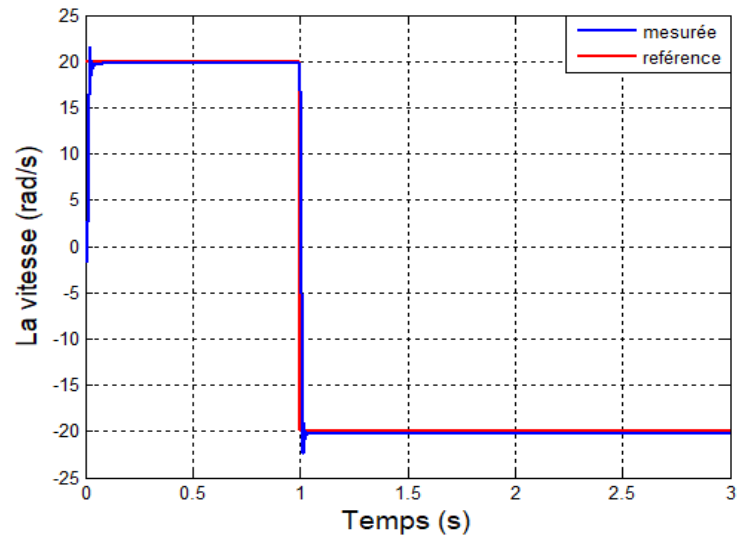


(f)

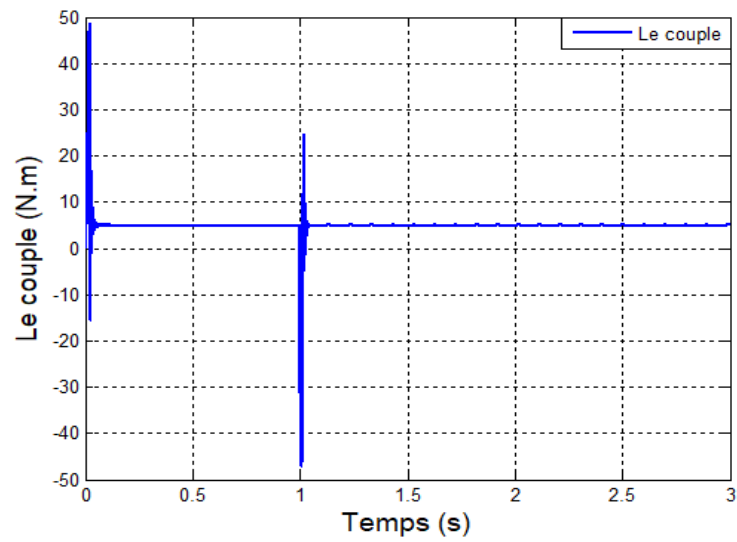


**Figure.II.27 :** Réglage de position par la commande vectorielle indirecte. Application et élimination de la charge (5 N.m) à  $t=1$  s et  $t=2$  s.

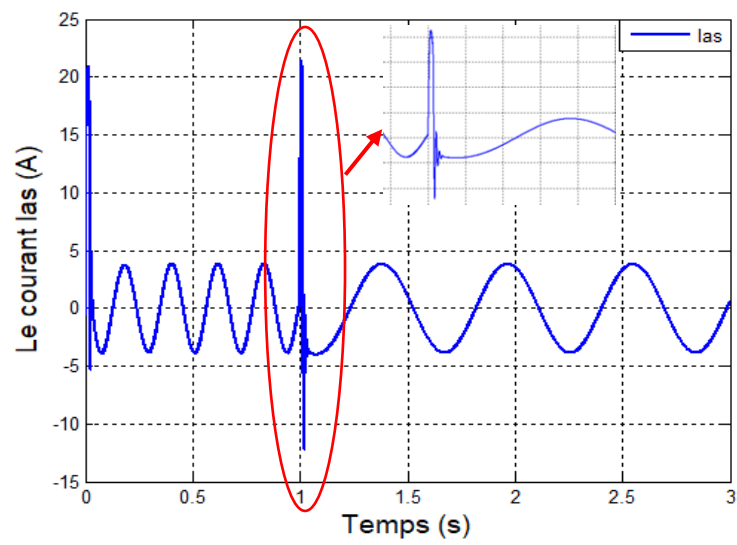
(a)



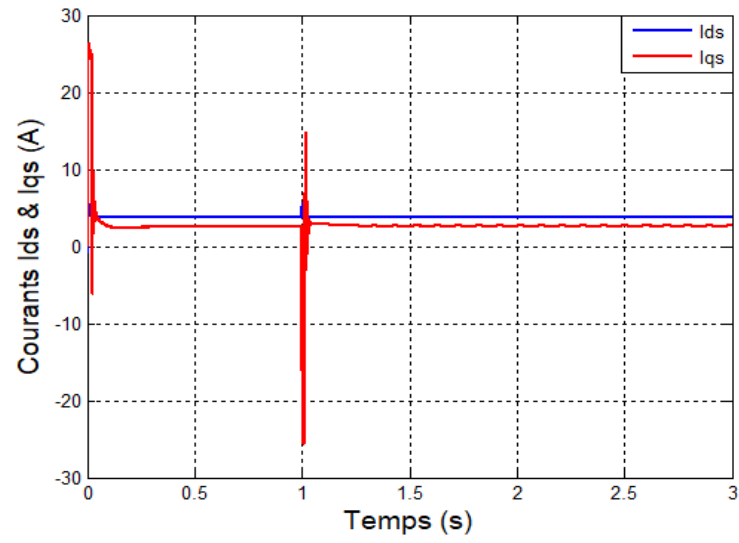
(b)



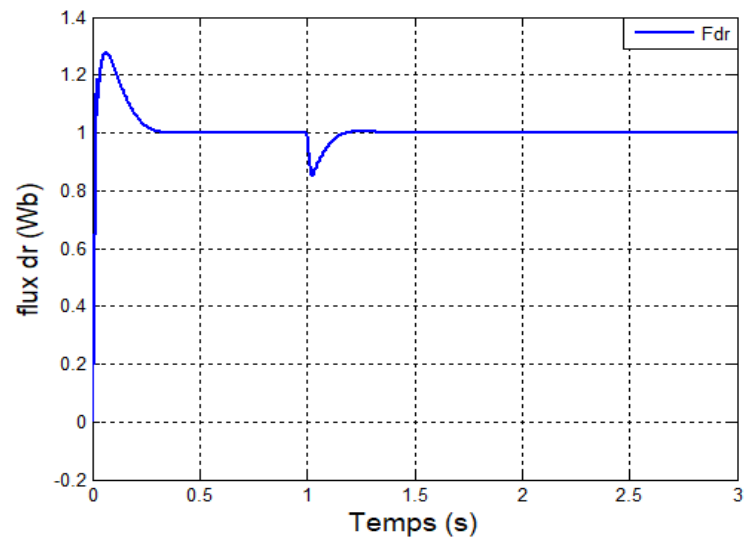
(c)



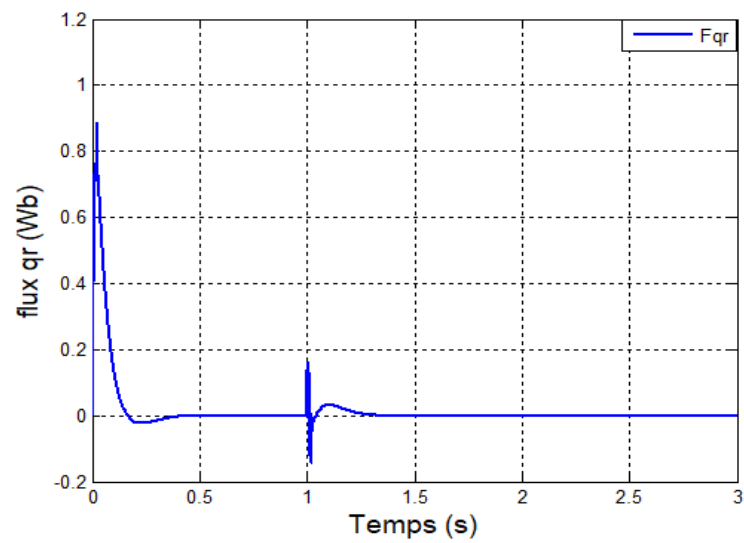
(d)



(e)



(f)



**Figure.II.28 :** Réglage de position par la commande vectorielle indirecte. Inversion de sens de rotation à l'instant  $t=1s$ .

## **II.5 Conclusion**

Dans les applications d'entraînements à vitesse variable, il est nécessaire de modéliser convenablement tous les ensembles du système dont ici le moteur asynchrone est un élément majeur.

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation de l'association onduleur- moteur asynchrone, son modèle a été développer sur la base de Park, ce type d'approche est bien adapté à l'élaboration d'algorithme de la commande vectorielle.

Afin d'avoir une idée sur le comportement dynamique du moteur asynchrone, des simulations numériques ont été effectués.

Nous avons constaté que le comportement de la machine, correspond à un régime dynamique dû à un couplage complexe entre le flux rotorique et le couple électromagnétique, l'orientation du flux rotorique repose essentiellement sur la connaissance exacte du modèle et du paramètre électrique de moteur. Ceci diminue la robustesse et l'utilisation de cette technique dans le domaine des entraînements à haute performance. Le contrôle vectoriel permet d'assurer un découplage " fictif " entre les deux grandeurs principales de la machine asynchrone (flux et couple).

## Chapitre III

### Le Pompage Solaire

---



## III. Chapitre III

### Le Pompage Solaire

---

#### III.1 Introduction

Pour la conception d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries, une étude dimensionnelle est nécessaire, pour appliquer une commande afin d'assurer un bon fonctionnement du système.

Dans ce chapitre, nous présenterons en premier lieu une méthode de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque, qui nous permettra de définir la taille des éléments du notre système, de déterminer le nombre de panneaux nécessaires, pour satisfaire les besoins quotidiens en eau.

Nous allons aussi présenter un système de gestion, qui a pour but de contrôler l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques et de protégé les batteries contre les surcharges et les décharges profondes. Après les différents résultats obtenus par la simulation avec le programme Matlab.

#### III.2 Méthodes de pompage solaire

Beaucoup de populations dans les zones rurales des pays en voie de développement affrontent de grands problèmes dus au déficit en eau. Ces problèmes sont spécialement accentués dans les zones désertiques. Le déficit en eau dans les zones arides est une question vitale pour les populations. L'amélioration des conditions de vie dans ces zones est liée à la recherche des solutions adéquates à ce problème. Le pompage photovoltaïque (PV) représente la solution idéale pour l'approvisionnement en eau partout où le réseau électrique est absent. [37]

##### III.2.1 Le pompage au fil du soleil

Comme on va le constater, la méthode de pompage « au fil du soleil » permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux qu'un système utilisant des batteries pour stocker de l'énergie d'abord. En effet, dans cette première technique, c'est l'eau elle-même qui est pompée et stockée lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement. On parle alors d'un stockage hydraulique. L'eau est stockée dans un réservoir à une hauteur au-dessus du sol pour qu'elle soit, au besoin ensuite, distribuée par gravité. Il faut bien signaler ici que le réservoir d'eau peut souvent être construit localement. En plus, il ne requiert pas un entretien

complexe et peut être réparé localement. La capacité de stockage peut varier d'un à plusieurs jours selon les modèles.

### III.2.2 Pompage avec batteries

La méthode de pompage d'eau en utilisant l'énergie stockée sur des batteries peut avoir l'avantage de garantir une stabilité d'alimentation des équipements (système présente l'avantage d'un débit régulier, la possibilité de pomper lorsque le soleil est absent). Cette technique consiste à utiliser un stockage d'énergie cette fois-ci, via des batteries (pompage avec batterie). Ces batteries stockent l'énergie produite par les cellules photovoltaïques lors des périodes d'ensoleillement afin de pouvoir restituer cette énergie pour pomper l'eau en temps voulu. Le débit de pompage peut se faire à la demande, lorsque les utilisateurs en ont besoin.[38]

### III.2.3 Les avantages et inconvénients des pompages au fil du soleil et avec batteries

Les avantages et inconvénients des deux (2) techniques de pompage photovoltaïque sont résumés dans le tableau 1 [39] ci-après :

**Tableau III.1 :** Les avantages et inconvénients des pompages au fil du soleil et avec batteries.

Méthodes de pompage	Avantages	Inconvénients
<b>Pompage au fil du soleil</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Economie du coût des batteries et par conséquent leur maintenance</li> <li>▪ Système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux</li> <li>▪ Meilleur rendement énergétique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Perte d'énergie au début et à la fin de la journée</li> <li>▪ Le débit de la pompe n'est pas constant et le rabattement du forage peut-être trop élevé durant certaines périodes de la journée.</li> </ul>
<b>Pompage avec batterie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Débit de la pompe régulier et à pression fixe</li> <li>▪ Possibilité de pomper l'eau lorsque le soleil est absent.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Coût élevé d'entretien des batteries.</li> <li>▪ Changement des batteries tous 3 à 5 ans.</li> <li>▪ Les batteries introduisent un certain degré de perte de rendement d'environ 20% à 30% de la production d'énergie.</li> </ul>

### III.3 Les composants d'un système de pompage PV

Un système de pompage solaire est généralement constitué de :

- Le générateur photovoltaïque.
- L'électronique de commande et de contrôle.
- Le groupe électropompe.
- La partie stockage.

#### III.3.1 Le générateur photovoltaïque

Pour obtenir des puissances supérieures, il est nécessaire d'associer en série et en parallèle plusieurs modules. Dans certaines applications, il est possible d'utiliser un ou plusieurs modules de quelques dizaines de cellules. Pour des utilisations plus importantes, les générateurs PV sont groupés dans un champ de plusieurs modules.

Leur nombre dépend des besoins énergétiques de la pompe et de l'ensoleillement du site. Les panneaux solaires peuvent être inclinés de 10 à 60°. En fonction du type de système de pompage Solaire, le générateur photovoltaïque demande une ou plusieurs branches câblées en série.

Le tout est déterminé par la tension d'entrée maximale et à vide du convertisseur ou onduleur.

#### III.3.2 L'électronique de commande et contrôle

Le dispositif de commande et de contrôle est assuré par un onduleur ou hacheur.

##### III.3.2.1 Le convertisseur DC/DC (hacheur)

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur PV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle commandé par son rapport cyclique, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale disponible.

##### III.3.2.2 Le convertisseur DC/AC (onduleur)

Le convertisseur DC/AC assure le transfert optimal de puissance du générateur solaire vers le groupe électropompe et protège la pompe contre le fonctionnement à vide lorsqu'il n'y a pas d'eau dans le puits. Le rendement de l'onduleur est généralement élevé pour valoriser au

mieux l'énergie produite par le générateur. Il est de l'ordre de 95 % au point de fonctionnement nominal [39].

### III.3.3 Le groupe électropompe

Le groupe électropompe est constitué d'un moteur électrique et d'une pompe.

#### III.3.3.1 La pompe

Une pompe est un dispositif permettant d'aspirer et de refouler un fluide. Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. A part ces deux classifications on distingue également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée : la pompe à aspiration et la pompe à refoulement [39].

La hauteur d'aspiration de n'importe quelle pompe à aspiration est limitée à une valeur théorique de 9,8 (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 à 7 mètres. Ces pompes sont donc toujours installées à une hauteur inférieure à celle-ci. Elles doivent également être amorcées c'est-à-dire que la section en amont de la pompe doit être remplie d'eau pour amorcer l'aspiration d'eau.

**Les pompes à refoulement** sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur immergé avec la pompe (pompe monobloc), soit le moteur en surface, dans ce cas la transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant le moteur à la pompe qui engendre des pertes mécaniques.

**Les pompes volumétriques** transmettent l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de va et vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement. Ces pompes aspirent le fluide par l'accroissement d'un volume puis refoulent par diminution de ce même volume.

**Les pompes centrifuges** transmettent l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes. L'eau entre au centre de la pompe et est poussée vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages. Elles utilisent les variations de vitesse du fluide pompé combinée avec l'effet de la force centrifuge pour obtenir un accroissement de pression.

**Tableau III.2 : Caractéristiques des pompes volumétriques et centrifuges [39;40]**

Les pompes volumétriques	Les pompes centrifuges
-Faible débit et une grande hauteur manométrique totale. -Le débit et la puissance absorbée sont proportionnels à la vitesse. -Le couple est fonction de la HMT -Le couple de démarrage est de 3 à 5 fois le couple nominal.	-Grand débit. -Le débit est proportionnel à la vitesse lorsqu'elle atteint une certaine valeur. -La puissance absorbée est proportionnelle au cube de la vitesse -Le Couple est fonction du carré de la vitesse -La pression est proportionnelle à la vitesse. -Couple de démarrage est quasiment nul qui est intéressant dans l'application du système photovoltaïque car la pompe peut tourner à un faible ensoleillement et le moteur peut avoir une vitesse de rotation rapide, à peu constant.

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

Les pompes centrifuges sont très utilisées pour les applications avec énergie photovoltaïque parce que le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage, elles tournent par très faibles ensoleillement, le moteur peut fournir une vitesse de rotation rapide à peu près constante. La pompe centrifuge a un volume moins encombrant, un service relativement silencieux et une mise en œuvre faible avec tous les types de moteurs électriques disponibles sur le marché. Elle s'adapte aussi aisément à tous les problèmes de traitement des liquides, et elle répond aux exigences spécifiques des installations, utiliser pour des débits importants.

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

### III.3.3.1.1 Modélisation de la pompe centrifuge

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu trois paramètres, la hauteur manométrique, le débit et la vitesse. La hauteur de pompage est la somme de la hauteur statique et la hauteur dynamique [41].

Dans cette application, la puissance hydraulique de la pompe centrifuge est donnée par :

$$P_h = R_{mp} \times P_{ele} = \rho \times g \times HMT \times Q \quad (III.1)$$

Avec :

$P_h$  : Puissance communiquée au fluide par la pompe (W)

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

$R_{mp}$  : Rendement du groupe motopompe (%)

$g$  : Accélération de la pesanteur (9.81 m/s<sup>2</sup>)

$\rho$  : Masse volumique de l'eau (1000 Kg/m<sup>3</sup>)

$Q$  : Débit volumique (m<sup>3</sup>/s)

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

La pompe centrifuge oppose un couple résistant  $Cr$ .

$$Cr = K_r \times \Omega^2 \quad (III.2)$$

Où :

$\Omega$  : Vitesse du moteur asynchrone (rad/s).

$K_r$  : un coefficient de proportionnalité [(Nm/ (rad.s<sup>-1</sup>)<sup>2</sup>)] qui est exprimé par l'équation suivante :

$$K_r = \frac{P_n}{\Omega_n^3} \quad (III.3)$$

$P_n$  : Puissance nominale du moteur asynchrone (W).

$\Omega_n$  : Vitesse nominale du moteur asynchrone (rad/s).

### III.3.3.2 Moteur

Le moteur d'un groupe motopompe convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou alternatif. Dans ce dernier cas, un convertisseur électronique ou un onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu provenant d'un générateur photovoltaïque en courant alternatif. Pour cette raison, le choix d'un moteur à courant continu peut sembler, de prime abord, plus intéressant, mais nous allons voir que l'évolution des

convertisseurs électroniques efficaces permet également de choisir des moteurs alternatifs efficaces et surtout, moins cher. [38]

### III.3.4 Stockage

Il existe différents types de stockages comme le stockage électrochimique et le stockage hydraulique...etc.

Dans les systèmes de stockage par batteries électrochimiques, les assemblages de batteries sont conçus pour fournir la puissance et la capacité en fonction des usages (par exemple stabilisation des réseaux, alimentation de secours).

La batterie est souvent intégrée aux générateurs photovoltaïques, elle permet le stockage de l'électricité pour les systèmes isolés, et elle restitue la nuit où les journées nuageuses cette électricité accumulée durant la journée. Il existe différents types de batteries, on peut citer :

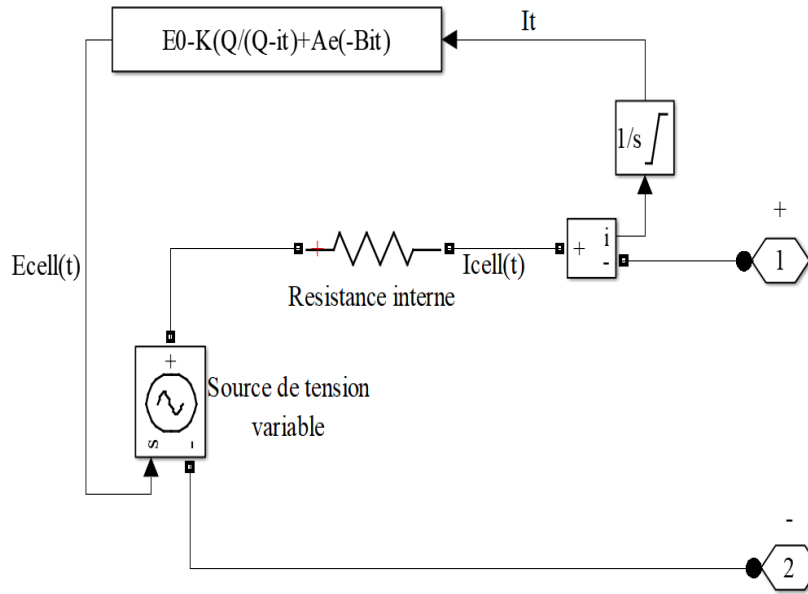
- La Batterie plomb acide ;
- La Batterie nickel cadmium ;
- La Batterie sodium chlorure de nickel ;
- La Batterie lithium-ion ;

#### III.3.4.1.1 Le modèle électrique de la batterie

La batterie utilisée est composée de cellules Lithium Ion de modèle A123 ANR26650m1A. La caractérisation de la cellule A123 est basée sur une analyse expérimentale faite par Angarita et chacun des paramètres du modèle est ajusté en fonction de cette analyse [42].

Le modèle de base d'une cellule, illustré à la figure (III.1), est constitué d'une source de tension variable en série avec une résistance interne [43]. La source de tension varie selon l'équation (III.4).

$$E_{cell} = E_0 - K \times \frac{Q}{Q - i_t} + A e^{-B \cdot i_t} \quad (III.4)$$



**Figure III.1 : Modèle électrique d'une cellule.**

$E_{cell}$  représente la tension de la cellule à vide en V,  $Q$  la capacité de la cellule en Ah et  $i_t$  la capacité consommée en Ah. Les constantes  $A$ ,  $B$ ,  $K$  et  $E_0$  sont déterminées selon un protocole expérimental décrit par Angarita [42]. L'état de charge (en %) peut s'exprimer en fonction de la capacité consommée à l'aide de l'équation (III.5).

$$EDC = 100 - \frac{Q}{Q - i_t} \quad (III.5)$$

La résistance interne est caractérisée expérimentalement en fonction de la température, de l'état de charge et du courant de cellule  $i_{cell}$ . De plus, des coefficients, appelés  $K_1$ ,  $K_2$  et  $K_3$ , ont été ajoutés pour le calcul de la capacité consommée et de la tension de cellule  $V_{cell}$ . Ces coefficients sont proposés par certains auteurs afin d'obtenir un modèle plus proche de la réalité en prenant en compte l'effet du courant de cellule et de la température [44]. Ainsi le calcul de  $i_t$  et  $V_{cell}$  se fait grâce aux équations (III.6) et (III.7), où  $T_c$  est la température de la cellule.

$$i_t = \int_0^t K_1(i_{cell}) \cdot K_2(T_c) \cdot i_{cell}(u) du \quad (III.6)$$

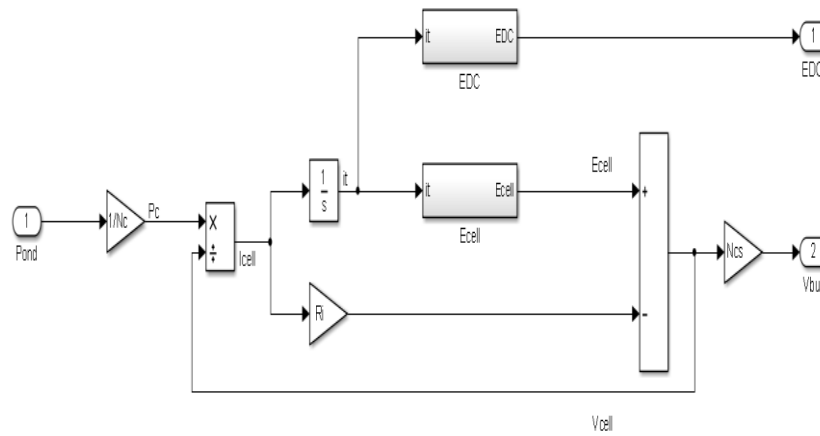
$$V_{cell} = E_{cell} - R_{int} i_{cell} + K_3(T_c) \quad (III.7)$$

Les coefficients  $K_1$ ,  $K_2$  et  $K_3$  ont été déterminés expérimentalement par Angarita et varient en fonction du courant de cellule et de la température. La plage de caractérisation va de 0,46 A à 18,4 A pour le courant de cellule et de -15°C à 50°C pour la température.

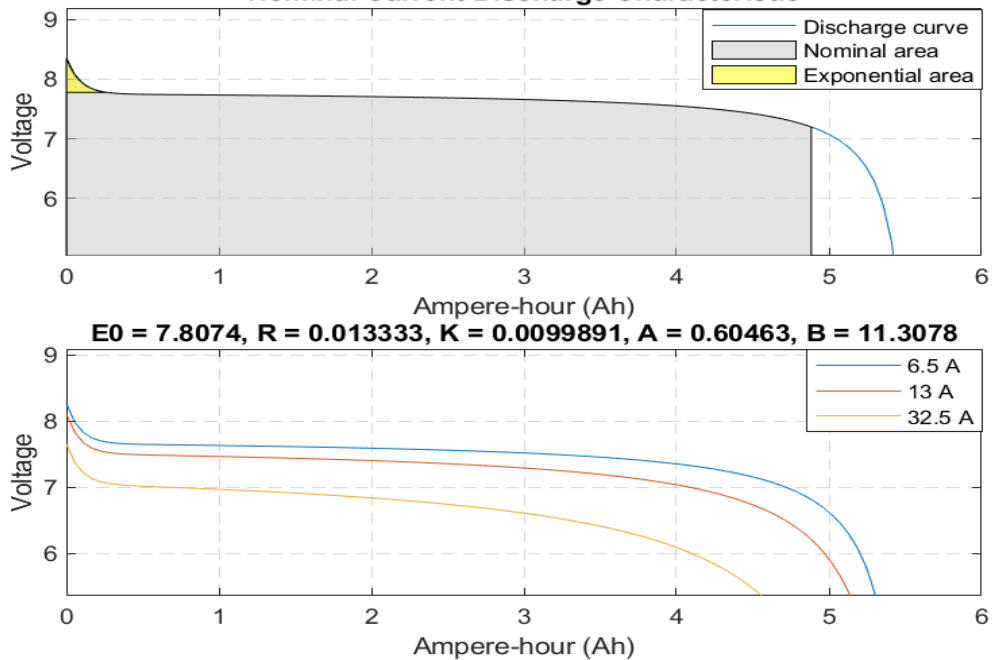


Le modèle final contient quelques hypothèses simplificatrices. En effet la capacité de la cellule est considérée constante quel que soit le courant, l'autodécharge ainsi que le vieillissement de la cellule ne sont pas considérées et une température d'opération constante a été supposée car aucun modèle thermique de la batterie n'a été développé.

En pratique, avec l'aide des différents éléments présentés plus haut, tous les calculs du modèle peuvent être effectués à partir de l'information sur la puissance requise par l'onduleur. Le processus de calcul est illustré à la figure (III.2), où  $P_{ond}$  est la puissance absorbée par l'onduleur,  $P_c$  la puissance fournie par une cellule de la batterie,  $N_c$  le nombre de cellule de la batterie et  $N_{cs}$  le nombre de cellule en série de la batterie. Finalement, une telle modélisation permet de fournir l'information sur la tension aux bornes de la batterie ainsi que son état de charge en fonction de la puissance demandée par l'onduleur.



**Figure III.2 : Modèle global de la batterie.**  
**Nominal Current Discharge Characteristic**



**Figure III.3 : Caractéristiques de la batterie.**

### **III.4 Dimensionnement et gestion de l'énergie du système de pompage photovoltaïque avec batteries**

Pour la conception d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries, une étude dimensionnelle est nécessaire, pour appliquer une commande afin d'assurer un bon fonctionnement du système.

### **III.5 Méthode de dimensionnement**

Afin d'obtenir un dimensionnement satisfaisant, il faut estimer les besoins en eau, prendre compte des données d'ensoleillements et le rendement du groupe motopompe choisi.

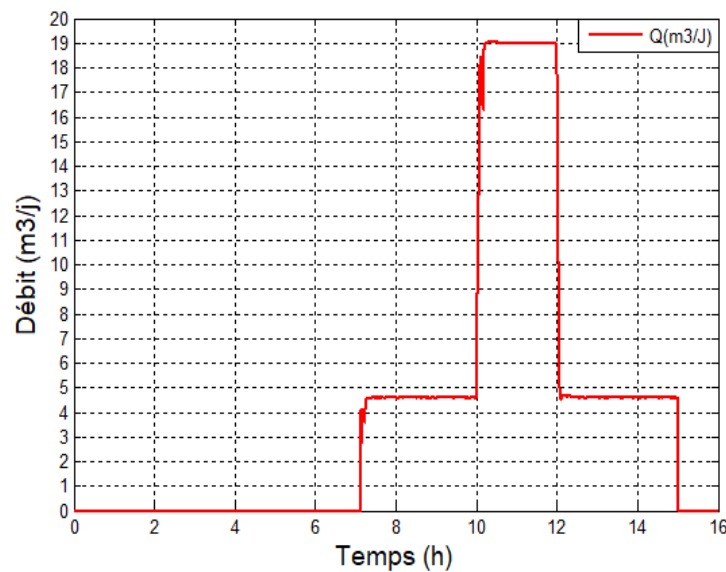
#### **III.5.1 Evaluation des besoins en eau**

La détermination des besoins en eau pour la consommation d'une population donnée dépend essentiellement de son mode de vie. Les besoins en eau que l'on estime nécessaires pour les zones rurales des pays pauvres sont de l'ordre de 20 litres par personne et 30 litres par tête de bétail [45].

Les besoins d'eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, des facteurs météorologiques comme la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, la saison de l'année considérée et de la méthode d'irrigation. Cependant, il est important de se baser sur la pratique et l'expérience locale. La capacité du réservoir sera déterminée selon les besoins en eau journalières et l'autonomie requise du système [37].

##### **III.5.1.1 Calcul le débit moyen journalier $Q_{\text{moy}}$**

Dans notre travail, on a pris comme application, l'alimentation en eau d'un village situé dans une région de la wilaya de Saïda. La consommation d'eau journalière de ce village est représentée sur le graphe ci-dessous :



**Figure.III.4 :** Consommation journalière d'un village.

### III.5.1.2 Le débit max journalier ( $Q_{\max j}$ )

D'après la consommation journalière on prend  $Q_{\max j} = 19[m^3/j]$

### III.5.2 Détermination de l'énergie solaire disponible

La méthode de dimensionnement utilisée est basée sur les calculs des valeurs moyennes journalières mensuelles de l'irradiation solaire disponible à l'inclinaison ( $\beta = 34$ ) des modules photovoltaïques (PV) par rapport au plan horizontal. Ce dernier doit se faire de manière à optimiser la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	<b>Juil</b>	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
Production d'énergie (kWh/j)	7,6	8,2	8,7	8,7	8,0	8,0	<b>8,9</b>	8,9	8,5	8,1	7,5	6,6
Rayonnement (kWh/m² jour)	6,0	6,4	6,9	6,9	6,6	6,3	<b>7,0</b>	7,0	6,7	6,3	5,9	5,2

**Tableau III.3 :** Définition des conditions du régime de la wilaya de Saïda. [46]

Pour choisir l'ensoleillement prend en considération les deux conditions suivantes :

- Choisir les besoins journaliers en eau durant la période de besoin maximal.
- Choisir le mois où l'ensoleillement maximal est le plus faible.

Pour notre exemple, le débit journalier maximal requis est de  $19 \text{ m}^3/\text{j}$  pendant le mois de juillet et l'énergie d'ensoleillement la plus faible pour la saison d'été est égale à  $7,0 \text{ [kWh/m}^2.\text{j]}$ . Pendant le mois d'août et juillet. Ainsi, selon les deux conditions le mois de pointe est : *juillet*.

$$\text{Ensoleillement} = 7.0 \text{ kWh/m}^2.\text{j}$$

### III.5.3 Dimensionnement et choix de la pompe

#### III.5.3.1 Données de base

Les données suivantes seront nécessaires pour dimensionner la pompe solaire et ses composants. Cette partie donne une définition des données utilisées en pompage en général et explique les particularités du pompage photovoltaïque.

##### III.5.3.1.1 Débit (Q)

Le débit (Q) est la quantité d'eau que la pompe peut fournir durant un intervalle de temps donné. En pompage, le débit est habituellement donné en litres par heure (l/h) ou, le débit (ou le besoin en eau) est souvent exprimé en m<sup>3</sup> par jour.

##### III.5.3.1.2 Hauteur manométrique totale (HMT)

La hauteur manométrique totale (HMT) d'une pompe est la différence de pression en mètres de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement. Cette hauteur peut être calculée comme suit :

$$HMT = H_g + P_c \quad (III.8)$$

Avec :

$H_g$  : Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée et le plan d'utilisation.

$P_c$  : Pertes de charge produites par le frottement d'eau sur les parois des conduites.

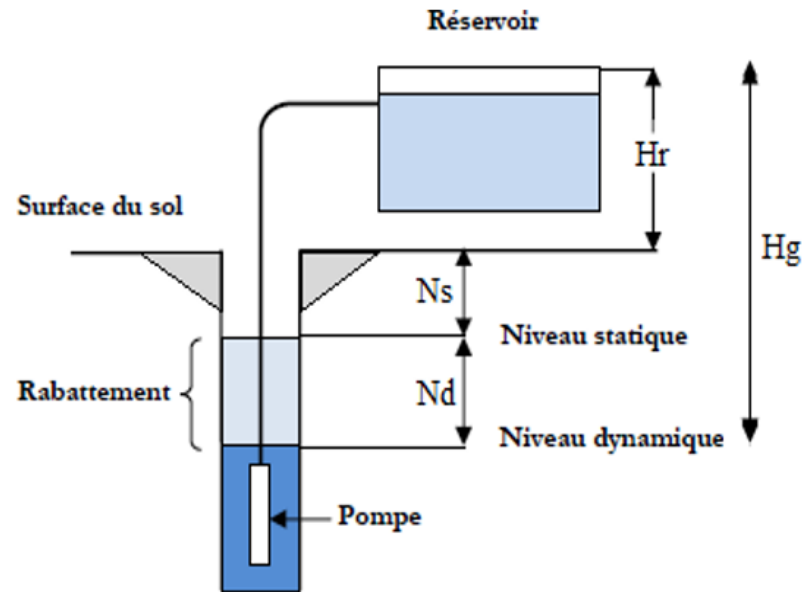
Ces pertes sont en fonction de la distance des conduites (L), de leur diamètre ( $d_c$ ) et du débit de la pompe (Q) et s'expriment en mètre de colonne d'eau. Le diamètre des conduites ( $d_c$ ) doit être calculé afin que les pertes de charge  $p_c$  correspondent au plus à 10% de la HMT.

##### III.5.3.1.3 Niveau statique

Le niveau statique ( $N_s$ ) d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau avant pompage [47].

##### III.5.3.1.4 Niveau dynamique

Le niveau dynamique ( $N_d$ ) d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau pour un pompage à un débit donné. Pour le calcul de la HMT, le niveau dynamique est calculé pour un débit moyen. La différence entre le niveau dynamique et le niveau statique est appelée rabattement ( $R_m$ ) [47].



**Figure.III.5 : Hauteur manométrique total.**

### III.5.3.2 Calcul le débit horaire de pompe ( $Q_h$ )

Il est calculé par la formule suivante :

$$Q_h = \frac{Q [m^3 / j]}{h} \quad [m^3 / h] \quad (III.9)$$

Avec :

$Q$  : le débit max journalier.  $[m^3/j]$ .

$h$  : le nombre d'heures d'ensoleillement. [heur].

Donc :

$$Q_h = \frac{19}{7} = 2.714 [m^3 / h] \quad (III.10)$$

Le débit horaire de pompe est :  $Q_h = 2,714 \text{ m}^3/\text{h}$ .

### III.5.3.3 Calcul le diamètre de la conduite de refoulement (D)

On va calculer le diamètre de la conduite de refoulement par la formule de BONIN :

$$D = \sqrt{Q} = \sqrt{(2.714 / 3600)} = 0.027 = 28 \text{ mm} \quad (III.11)$$

Pour la conduite de refoulement, on choisit le type de conduit PEHD PN 10 :

Donc :

On prend Le diamètre extérieur de la conduite de refoulement : 40 mm, Epaisseur 2,5 mm.

Le diamètre réel de la conduite de refoulement : 35 mm.

**III.5.3.4 Calcul la vitesse de refoulement (V)**

On va calculer la vitesse de refoulement par la formule suivante :

$$Q = v \times S \Rightarrow V = \frac{Q}{S} [m^3 / j] \quad (III.12)$$

Avec :

$Q$  : le débit de pompe [ $m^3/s$ ].

$v$  : la vitesse d'écoulement [ $m/s$ ].

$S$  : la surface de conduite [ $m^2$ ].

Donc la vitesse d'écoulement :

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4 \times (2.714 / 3600)}{3.14 \times 0.035^2} = 0.784 m/s \quad (III.13)$$

La vitesse d'écoulement est admissible  $V = 0,784 \text{ m/s} \in [0.5 - 1.5] \text{ m/s}$ .

**III.5.3.5 Dimensionnement le Bassin Abreuvoir (Va)**

On va calculer le volume de bassin la formule suivante :

$$Q = \frac{V_a}{T} \Rightarrow V_a = Q \times T [m^3] \quad (III.14)$$

Avec :

$Q$  : le débit de pompe [ $m^3/h$ ].

$V_a$  : le volume de bassin [ $m^3$ ].

$T$  : la durée de pompage [h].

$$V_a = Q \times T = 9.2 \times 7 = 64.4 [m^3] \quad (III.15)$$

Donc : le volume de bassin Abreuvoir  $64.4 \text{ m}^3$ .

**III.5.3.6 Calcul Hauteur manométrique totale (HMT)**

Elle correspond à la hauteur géométrique d'une longueur équivalente aux pertes de charge linéaires et singulières au refoulement.

$$HMT = H_g + P_c \quad (III.16)$$

Avec :

$P_c$  : Perte de charge totale [m].

$H_g$  : Hauteur géométrique qui correspond à la différence de niveau entre le trop-plein du réservoir et le niveau dynamique du plan de pompage [m].

**III.5.3.7 Calcul la hauteur géométrique ( $H_g$ )**

La hauteur géométrique déterminée par la formule suivante :

$$H_g = H_r + N_d \quad (\text{III.17})$$

Avec :

$H_g$  : hauteur géométrique [m].

$H_r$  : la hauteur du bassin [m].

$N_d$  : Niveau dynamique [m].

$$H_g = 1 + 11 = 12[m] \quad (\text{III.18})$$

**III.5.3.8 Calcul Perte de charge totale ( $P_c$ )**

$$P_c = \Delta H_l + \Delta H_s[m] \quad (\text{III.19})$$

Avec :

$P_c$  : Perte de charge totale [m].

$\Delta H_s$  : Perte de charge singulière [m].

$\Delta H_l$  : Perte de charge linéaire [m].

**III.5.3.9 Calcul Perte de charge linéaire ( $\Delta H_l$ )**

Le gradient des pertes de charge unitaires est déterminé à partir de la formule de DARCY/WEISBACH qui s'exprime par :

$$\Delta H_l = \frac{\lambda \times L}{D} \times \frac{V^2}{2 \times g} [m] \quad (\text{III.20})$$

Avec :

$L$  : longueur de conduite de refoulement [m].

$\Delta H_l$  : Perte de charge linéaire en [m/m].

$V$  : Vitesse moyenne de l'eau dans la section [m/ s].

$g$  : Accélération de la pesanteur ( $g = 9,81$  [m/ s<sup>2</sup>]).

$\lambda$  : Coefficient de frottement linéaire exprimé par la formule de COLLEBROOK.

$D$  : Diamètre intérieur de la conduite en [m].

$$\lambda = f\left(\text{Re}, \frac{\varepsilon}{D}\right) \quad (\text{III.21})$$

Où :

$Re$  : Nombre de Reynolds.

$\varepsilon$  : Rugosité absolue en [m]. (La Rugosité de conduite PEHD = 0.001 m).

$$Re = \frac{4 \times Q}{\pi \times v \times D} \quad (\text{III.22})$$

Sachant que :

$Q$  : Débit véhiculé en [m<sup>3</sup>/s].

$v$  : Viscosité cinématique de l'eau à 18° C [m<sup>2</sup>/s].

Le calcul du coefficient de frottement se fait comme suit :

La valeur de  $\lambda$  est déterminée par la formule de NIKURADZE :

### III.5.3.10 Calcul du coefficient de frottement ( $\lambda$ )

$$\lambda = \left( 1.14 - 0.86 \ln \frac{\varepsilon}{D} \right)^{-2} \quad (\text{III.23})$$

$$\Rightarrow \lambda = \left( 1.14 - 0.86 \ln \frac{0.001}{0.035} \right)^{-2} = 0.057$$

Donc :

$$\Delta Hl = \frac{0.057 \times 25}{0.035} \times \frac{0.784^2}{2 \times 9.81} = 1.275[m] \quad (\text{III.24})$$

### III.5.3.11 Calcul Perte de charge singulière ( $\Delta Hs$ )

On considère généralement que les pertes de charge singulières sont égales à 10 jusqu'à 15 % des pertes de charge linéaires. Dans notre cas on prend :

$$\Delta Hs = 10\% \times \Delta Hl[m] \quad (\text{III.25})$$

Avec :

$\Delta Hs$  : Perte de charge singulière [m].

$\Delta Hl$  : Perte de charge linéaire [m]

$$\Rightarrow \Delta Hs = 0.1 \times 1.275 = 0.128[m]$$

$$\text{Donc : } Pc = \Delta Hl + \Delta Hs = 1.275 + 0.128 = 1.403[m]$$

La Perte de charge totale  $P_c = 1,035$  m

$$\Rightarrow HMT = Hg + Pc = 12 + 1.403 = 13.403[m] \quad (\text{III.26})$$

On prend La hauteur manométrique totale  $HMT = 13,5$  m.



**III.5.3.12 Calcul la puissance de pompe (P)**

La puissance absorbée de la pompe est donnée par la formule suivante :

$$P = \frac{g \times Q \times HMT}{\eta_{mp}} [kW] \quad (III.27)$$

Avec :

$Q$  : Débit de la pompe (m<sup>3</sup>/s).

$\eta_{mp}$  : Le rendement du groupe motopompe.

Dans de bonnes conditions d'utilisation, et pour un système bien conçu, on peut s'attendre à un rendement du groupe motopompe oscillant entre 35% et 45%.

Donc : On prend  $\eta_{mp} = 45 \%$ .

$$\Rightarrow P = \frac{9.81 \times (2.714/3600) \times 13.5}{0.45} = 0.222 kW \quad (III.28)$$

La puissance de pompe est :  $P = 0,222 \text{ kW}$ .

**III.5.3.13 Calcul l'énergie quotidienne consommée par la pompe (Energie hydraulique) (E<sub>h</sub>)**

L'énergie consommée par la pompe est donnée par la formule :

$$E_h = P \times T [kWh/j] \quad (III.33)$$

Avec :

$E_h$  : Énergie hydraulique [kWh/j].

$T$  : Temps de fonctionnement des pompes  $t = 7$  heures.

$$\Rightarrow E_h = 0.222 \times 7 = 1.553 kWh/j \quad (III.34)$$

L'énergie hydraulique est :  $E_h = 1,553 \text{ kWh/j}$ .

**III.5.3.14 Calcul l'énergie électrique quotidienne requise (E<sub>e</sub>)**

L'énergie électrique quotidienne requise est donnée par la formule :

$$E_e = \frac{E_h}{\eta_{ond}} [kWh/j] \quad (III.35)$$

Avec :

$E_e$  : Energie électrique exprimé en [kWh/j].

$E_h$  : Énergie hydraulique [kWh/j].

$\eta_{ond}$  : Le rendement d'onduleur. On prend  $\eta_{ond} = 95 \%$ .

$$\Rightarrow E_e = \frac{1.553}{0.95} = 1.635 kWh/j \quad (III.36)$$

L'énergie électrique est :  $E_e = 1,635 \text{ kWh/j}$ .

### III.5.3.15 Choix de la pompe

Les pompes doivent satisfaire les conditions suivantes :

- Assurer le débit calculé et la hauteur manométrique calculée :

$$\text{HMT} = 13,5 \text{ m } Q_h = 2,714 \text{ m}^3/\text{h}$$

- Le rendement est meilleur  $\eta_{\max}$ .
- Un poids faible, une anticorrosion, non encombrement.
- Assurer une capacité d'aspiration forte.
- Une vitesse de rotation importante.
- Exploitation simple.

### III.5.4 Le choix de l'onduleur (L'électronique de commande et de contrôle)

Il a pour rôle, la conversion du courant continu produit par les panneaux en courant alternatif identique à celui du réseau. Il est donc indispensable pour l'alimentation des charges à courant alternatif. Le choix de l'onduleur dépend des caractéristiques électriques de la pompe alimentée (puissance, tension). Pour les besoins de notre étude, le convertisseurchoisit est présenté dans le tableau suivant :

**Tableau III.4 : les caractéristiques électriques de l'onduleur.**

<b>Données électriques</b>	Tension max. DC( $V_{oc}$ )	390 V
	Tension recommandée MPPT ( $V_{mpp}$ )	280-380 V
<b>Entrée DC</b>	Puissance recommandée photovoltaïque	2,50 kWh
	Max. rendement MPPT	95%
	Nombre de string	1
<b>Entrée AC</b>	Tension d'entrée nominale Plage de fréquence	230~ V, 1-phase 50~60 Hz
<b>Sortie AC</b>	Puissance <sub>max</sub> moteur Tension nominale Plage de fréquence Courant nominale de sortie	1,50 kW 230~ V, 3-phase 0~50/60 Hz 12,0 A
	Max. efficacité	95%
	Classe de protection	1
<b>Système</b>	Degré de protection température ambiante	IP54 (-) 25°C à (+) 65°C
	Refroidissement	Refroidissement forcé
	Affichage	LCD

### III.5.5 Dimensionnement Le générateur photovoltaïque

Puissance maximale : 150 W.

Tension à  $P_{\max}$  : 34,5 V.

Courant à  $P_{\max}$  : 5,40 A.

Tension à circuit ouvert : 43,5V.

Donc : la surface de panneau (module)  $S_p$  égale :

$$S_p = 1311 \times 1111 = 1456521 \text{ mm}^2 = 1.457 \text{ m}^2 \quad (\text{III.37})$$

#### III.5.5.1 Calcul la puissance crête du générateur photovoltaïque ( $P_g$ )

La puissance du générateur (champ) photovoltaïque est donnée par la formule :

$$P_g = \frac{E_e}{\text{Ensoleillement} \times R_p} [W] \quad (\text{III.38})$$

Avec :

$P_g$  : Puissance du champ photovoltaïque [W].

$E_e$  : L'énergie électrique [W/j].

$R_p$  : rendement de panneau 15%.

$$\Rightarrow P_g = \frac{(1.635 \times 1000)}{7.0 \times (15/100)} = 1557.143 \text{ W} \quad (\text{III.39})$$

La puissance du générateur est :  $P_g = 1557,143 \text{ W}$ .

#### III.5.5.2 Calcul Nombre total de module ( $N_m$ )

$$N_m = \frac{P_g}{P_m} \quad (\text{III.40})$$

Avec :

$P_g$  : La puissance crête du générateur [W].

$P_m$  : La puissance du module PV [W].

$$\Rightarrow N_m = \frac{1557.143}{150} = 10.38 \quad (\text{III.41})$$

On prend : Le nombre total de module  $N_m = 11$  modules.

#### III.5.5.3 Calcul Nombre de module en parallèle ( $N_{mp}$ )

Le nombre de module en parallèle est calculé par l'équation suivante :

$$N_{mp} = \frac{N_m}{N_{ms}} \quad (\text{III.42})$$

Avec :

$N_m$  : nombre total de modules PV.

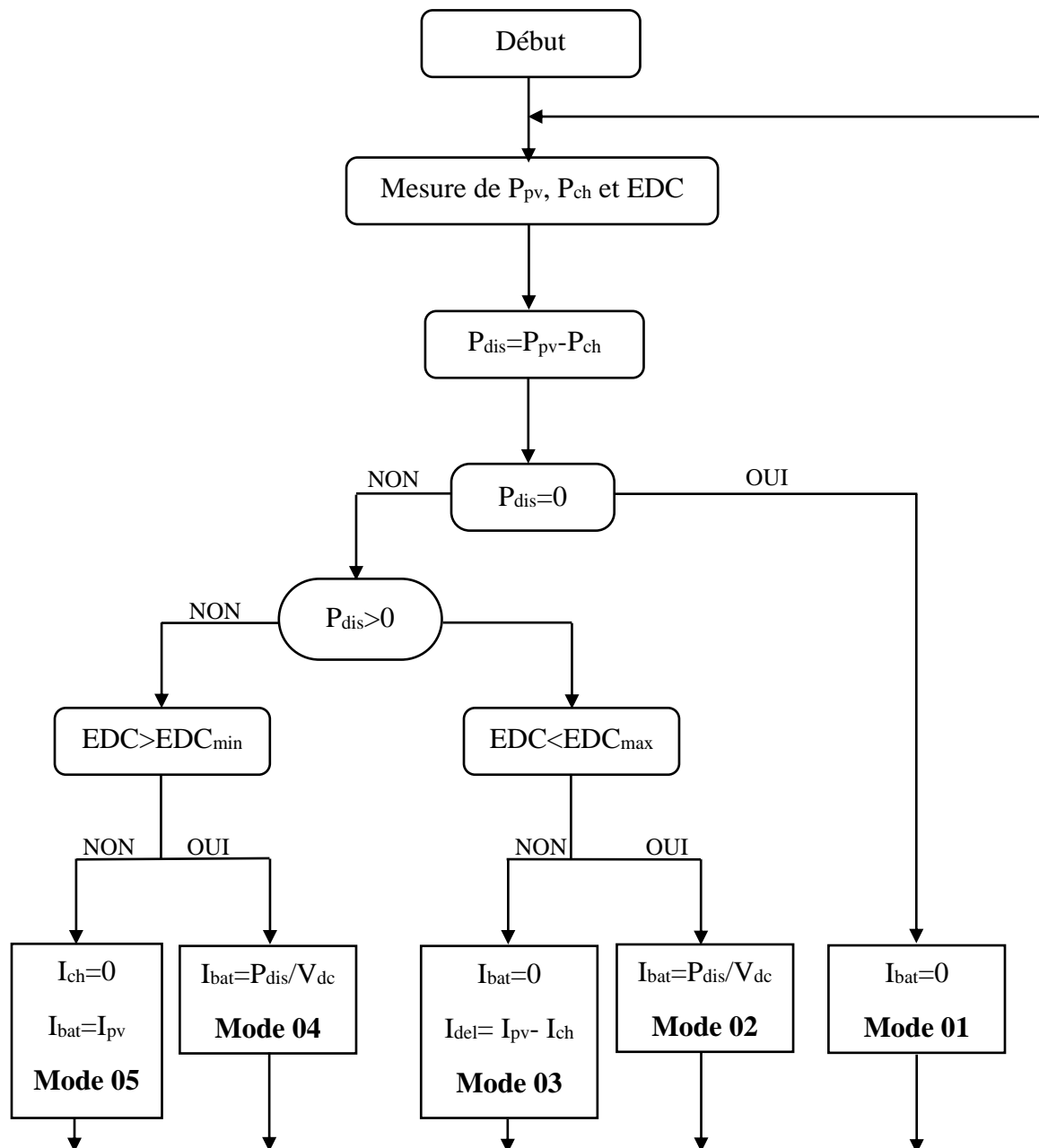
$N_{ms}$  : nombre de modules PV en série. (On prend  $N_{ms} = 1 \text{ module}$ )

### III.6 Gestion de l'énergie entre les différents composants du système

Afin de faire fonctionner le système d'une manière parfaitement autonome, il est primordial de gérer de façon optimale le flux d'énergie entre les différents composants.

L'algorithme de gestion a pour rôle de contrôler les échanges d'énergie entre les différents composants d'une part mais aussi de réguler le processus de charge/décharge du stockage (protection contre les surcharges et les décharges profondes), pour préserver les propriétés physico-chimiques des batteries et de prolonger leur durée de vie.

La figure (III.6) présente le diagramme de l'algorithme de gestion.



**Figure III.6 :** Organigramme de gestion d'énergie du système globale.

A partir de cet algorithme, on peut définir les modes de fonctionnement de ce système de gestion.

Soit  $P_{pv}$  la puissance fournie par les panneaux et  $P_{ch}$  la puissance demandée par la charge, la différence entre ces deux puissances est notée  $P_{dis}$  (puissance disponible) nous obtenons :

$$P_{dis} = P_{pv} - P_{ch} \quad (III.43)$$

### III.6.1 Modes de fonctionnement

- **Mode 1 :** Dans ce cas, la puissance fournie par les panneaux photovoltaïques est égale à la puissance demandée par la charge, ce qui va conduire à l'alimentation directe de la charge.
- **Mode 2 :** Quand la puissance disponible est supérieure à la puissance demandée par la charge, et que l'état de charge de la batterie est inférieur à  $EDC_{max}$  (90%), on alimente la charge et on charge la batterie.
- **Mode 3 :** Quand la puissance photovoltaïque est supérieure à la puissance demandée par la charge et que l'état de charge de la batterie est supérieur à  $EDC_{max}$  (90%), on déconnecte la batterie et la charge sera alimentée par les panneaux photovoltaïques, et le surplus d'énergie sera dirigé vers une résistance de délestage.
- **Mode 4 :** Ce cas représente la situation où la puissance photovoltaïque est inférieure à la puissance demandée par la charge, donc le manque de puissance sera compensé par la batterie étant donné que l'état de charge de la batterie est supérieur à  $EDC_{min}$  (30%).
- **Mode 5 :** Dans ce cas, la puissance photovoltaïque est insuffisante pour alimenter la charge, et l'état de charge de la batterie est inférieur à  $EDC_{min}$  (30%), donc on déconnecte la batterie, et vu que la demande de la charge n'est pas satisfaite, cette dernière va aussi se déconnecter, dès que cela arrive la batterie se reconnecte à nouveau pour emmagasiner le peu d'énergie disponible.

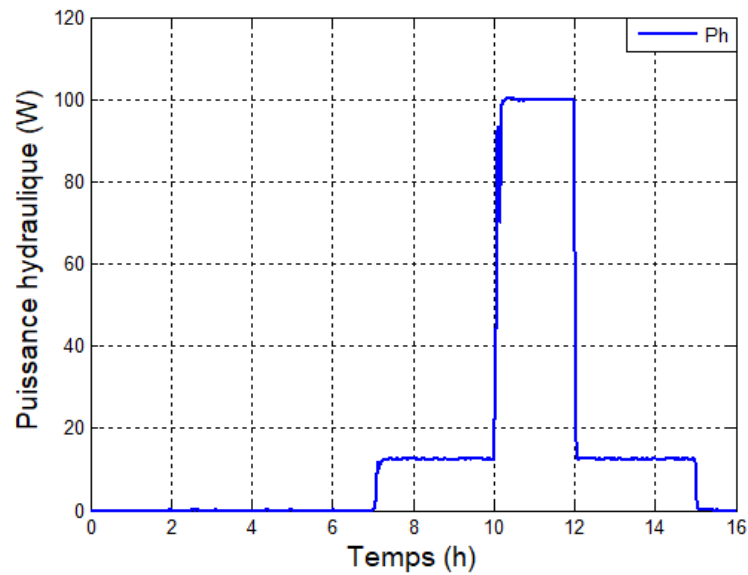
### III.7 Simulation du système de pompage photovoltaïque avec batteries connecté au générateur photovoltaïque

La vitesse de référence est calculée à partir des puissances PV et des batteries, puis comparée à la vitesse du moteur asynchrone, après régulation, le couple électromagnétique est obtenu.

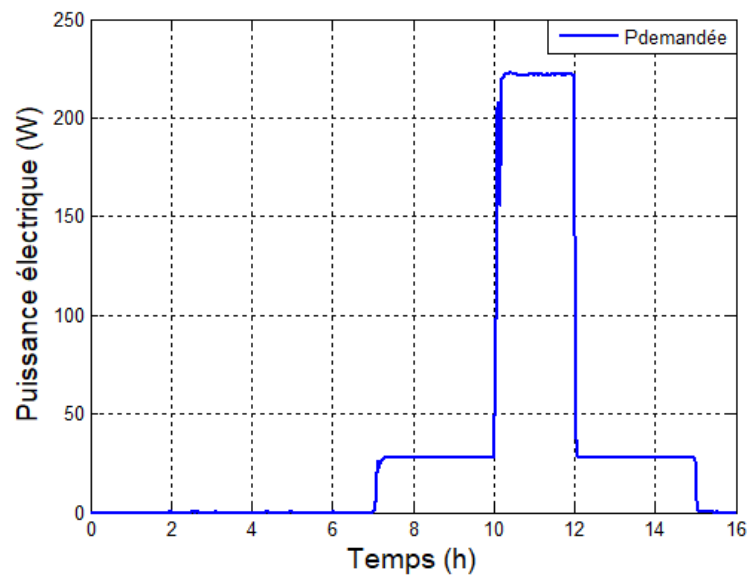
Nous avons simulé le système de pompage PV avec batteries pour une variation de l'éclairement pour une journée d'été.

A partir du débit journalier présenté sur la figure (III.4), nous avons calculé la puissance hydraulique et à partir de cette dernière, nous avons calculé la puissance électrique que doit consommer le moteur afin de satisfaire la demande en eau des consommateurs.

Les profils de la puissance hydraulique et la puissance demandée par la charge ( $P_{\text{éle}}$ ) sont présentés sur les figures suivantes :



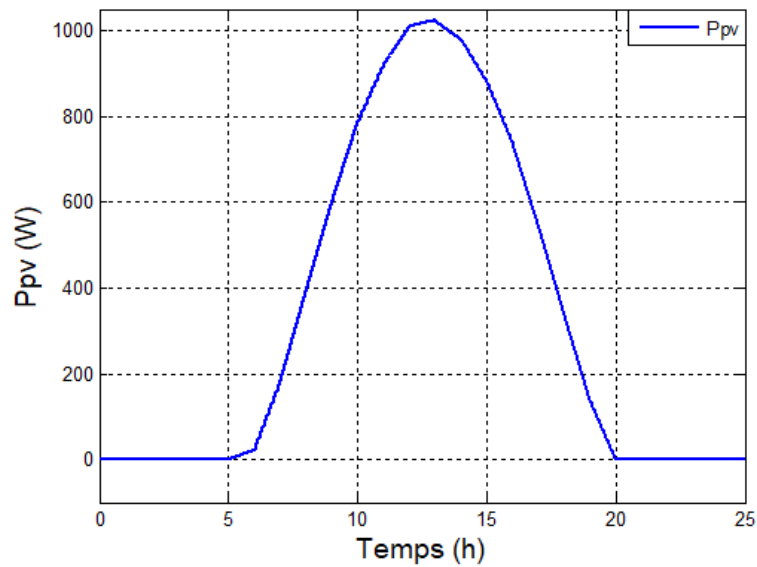
*Figure.III.7 : La puissance hydraulique.*



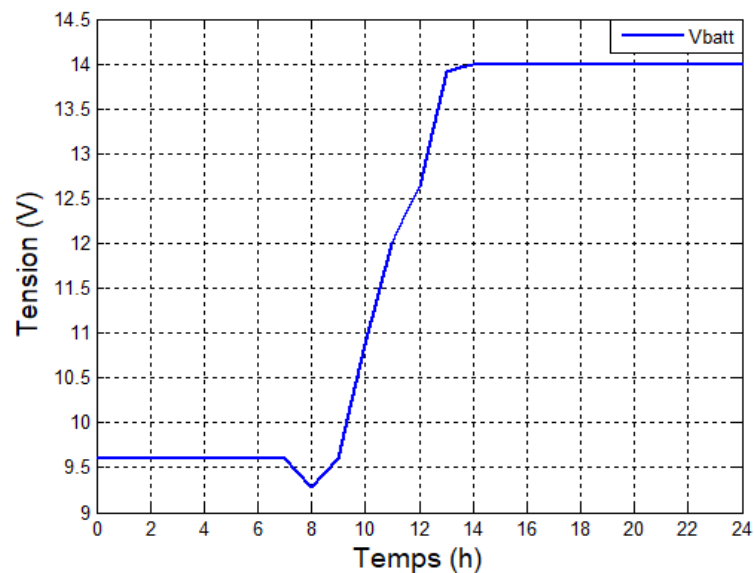
*Figure.III.8 : Puissance électrique demandée par la charge.*

Le système de pompage comporte un générateur PV, qui est composé de 11 panneaux photovoltaïques connectés en série et trois batteries avec une capacité de 780 Ah. Les batteries sont initialement chargées à 60%.

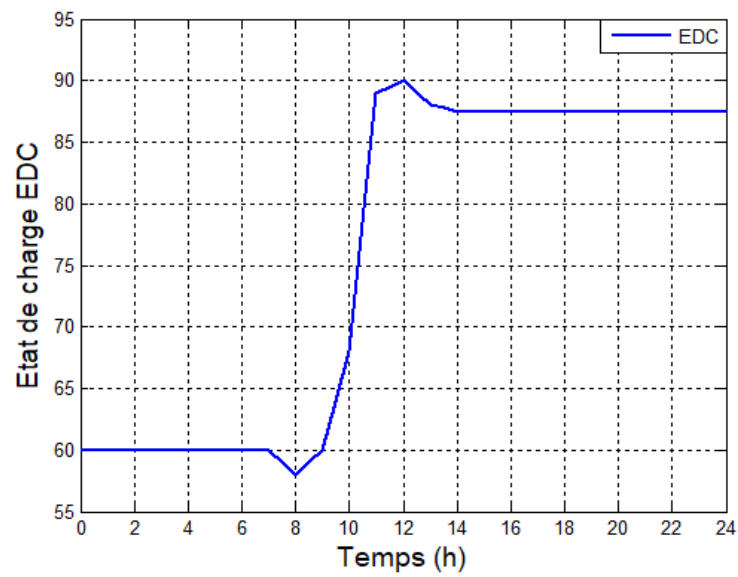
### III.7.1 Les résultats de simulation du système globale pour une journée d'été



**Figure.III.9 :** Variation de la puissance PV le long d'une journée.

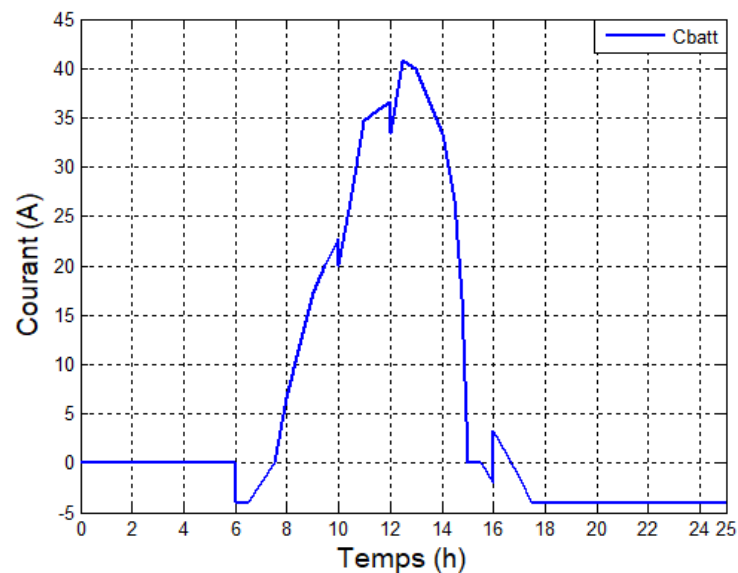


**Figure.III.10 :** Tension aux bornes de la batterie.



**Figure.III.11 :** Allure de l'état de charge de la batterie.

On remarque que l'allure de la tension aux bornes de la batterie figure (III.10), ainsi que celle de l'état de charge, figure (III.11), évoluent de la même manière. Donc l'EDC est l'image de la tension.

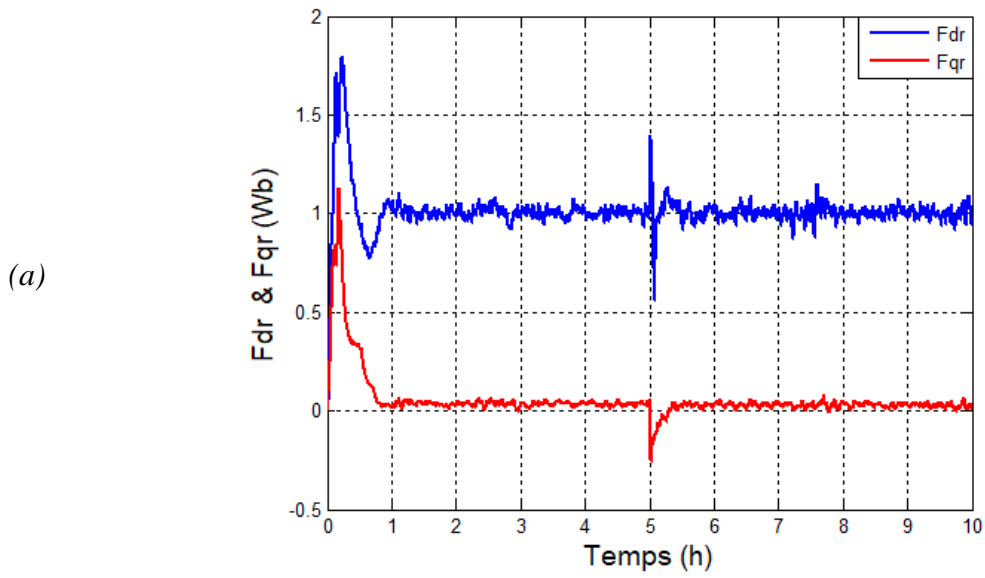


**Figure.III.12 :** Allure du courant de la batterie.

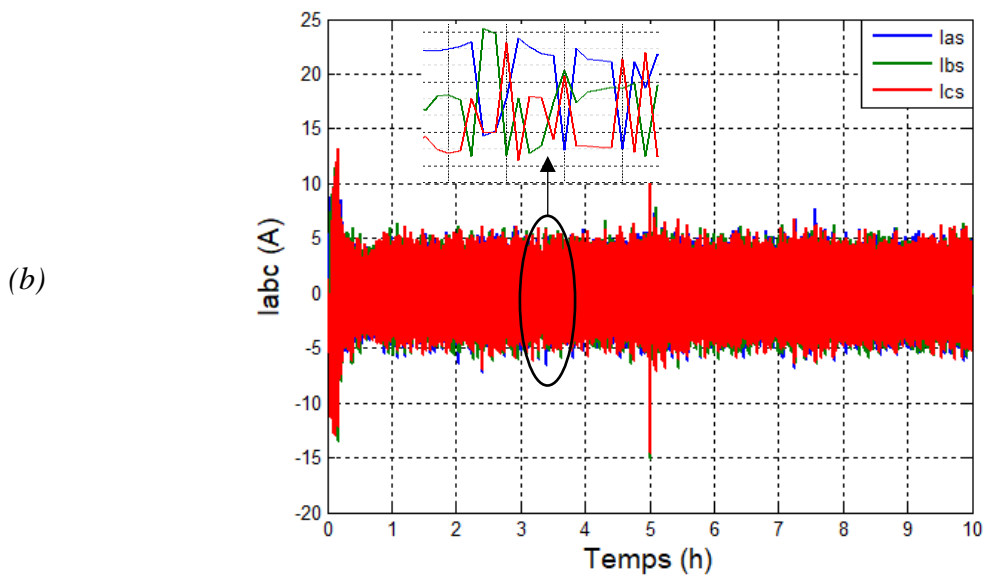
La figure (III.12) présente le courant de la batterie. On peut constater qu'il est positif en cas de charge, et négatif en cas de décharge.



Les réponses pour la commande vectorielle sont représentées dans la figure (III.13) :

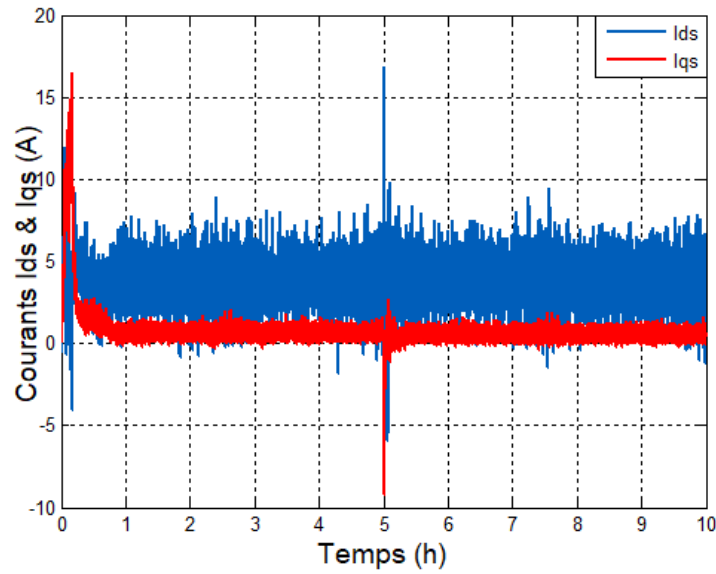


*Allure des flux rotoriques .*

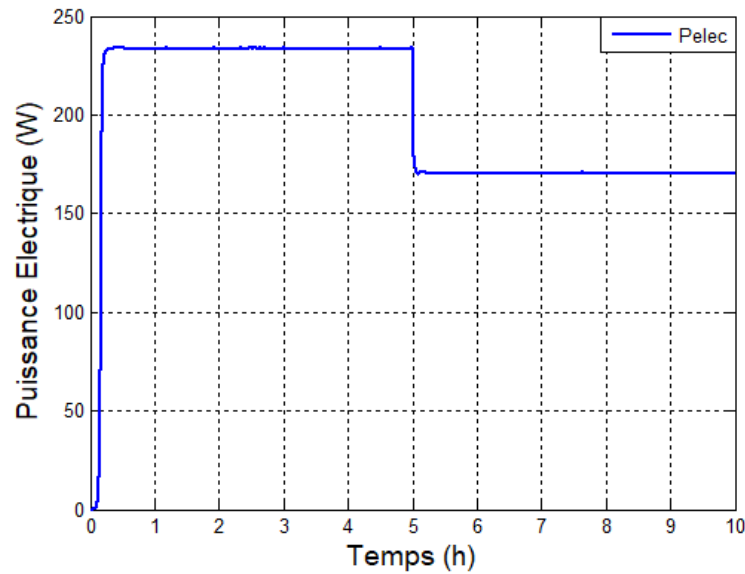


*Allure des courants statoriques  $I_{abc-s}$ .*

(c)

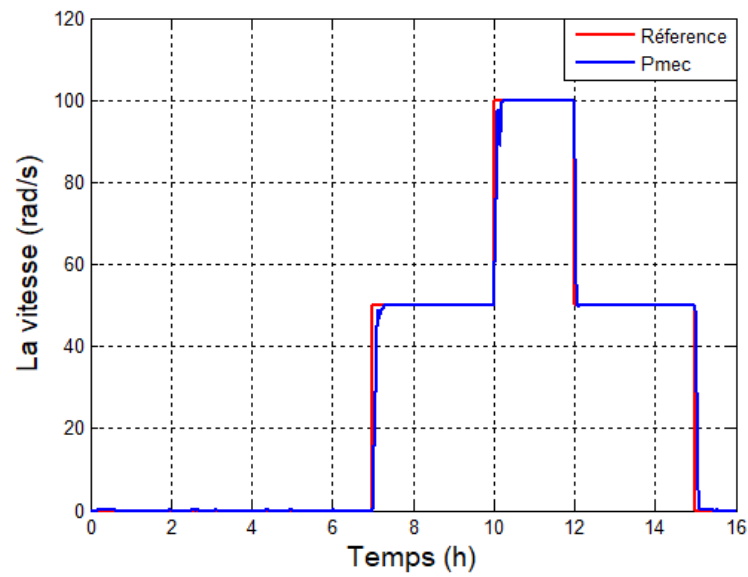
*Allure des courants  $I_{ds}$  &  $I_{qs}$ .*

(d)

*La puissance électrique  $P_{ele}$  (W).***Figure.III.13 :** Les réponses pour la commande vectorielle.

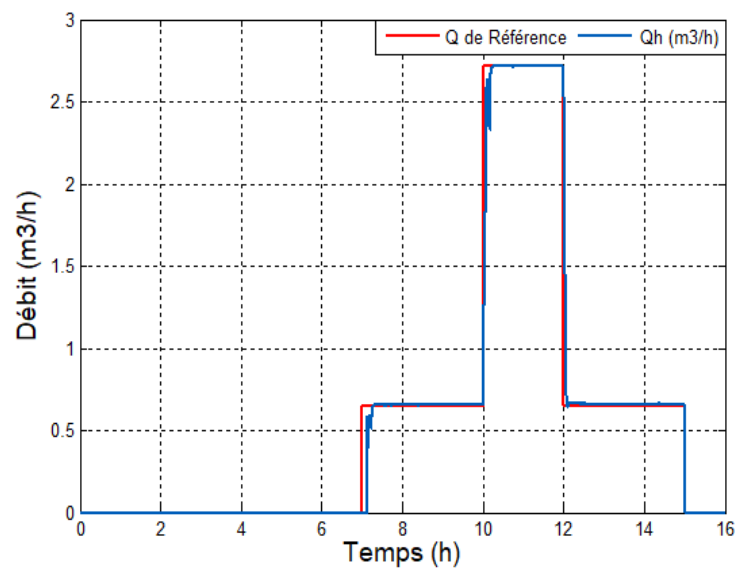
Les résultats de la simulation illustrés par les figures précédentes montrent l'évolution de du flux rotorique, du courant statorique, courant des enroulements statoriques sur les axes  $(d,q)$ , et la puissance électrique, La commande en vitesse du moteur asynchrone entraînant la pompe centrifuge permet de contrôler son débit. Bien entendu, la boucle de régulation de la vitesse nécessite la connaissance de la vitesse de référence. Il est alors impératif de déterminer une relation explicite de la vitesse de consigne en fonction de l'ensoleillement.

Donc le débit et le couple résistant imposés par la quantité d'eau pompée.

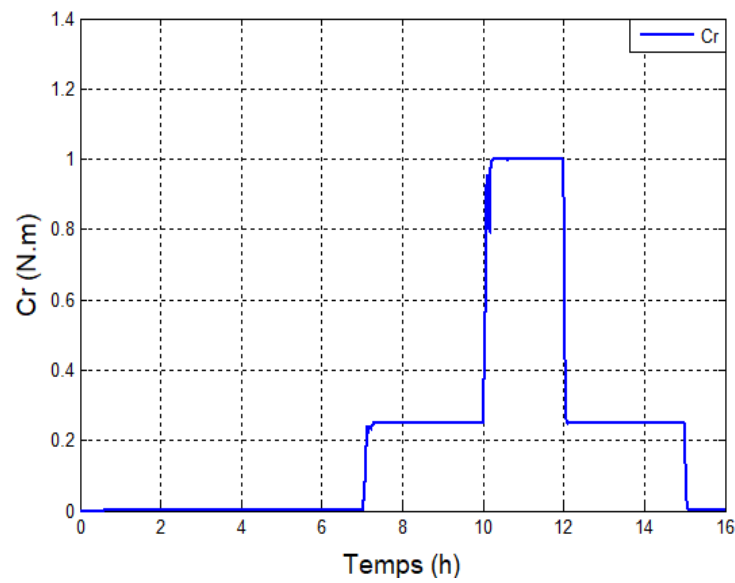


**Figure.III.14 :** Allure de la vitesse mécanique du moteur.

D'après la figure (III.14), on constate que la vitesse mécanique du moteur asynchrone évolue suivant la demande de la charge, figure (III.8).



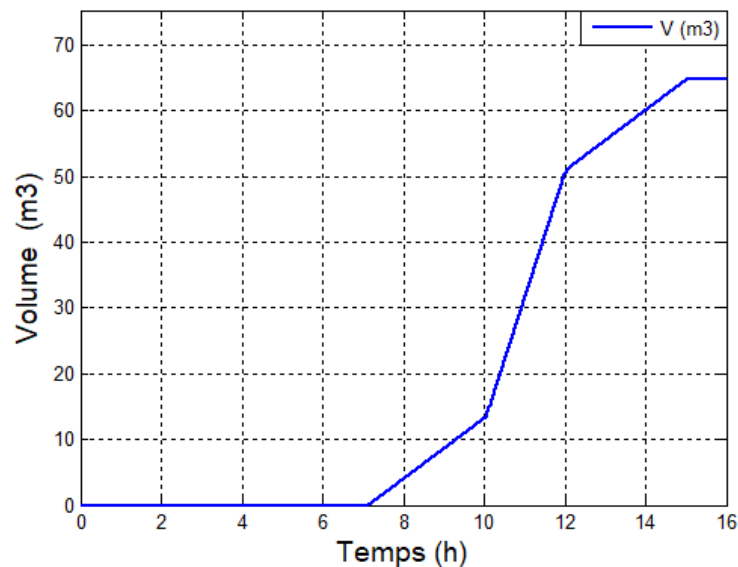
**Figure.III.15 :** Allure du débit  $Q(m^3/h)$ .



**Figure.III.16 :** Allure du couple résistant.

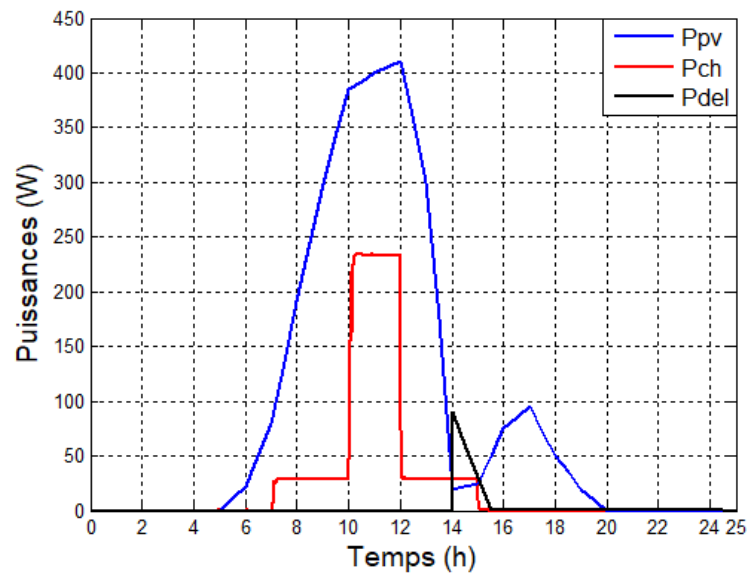
D'après la figure (III.15), on remarque que le débit fourni par la pompe est le même à celui demandé par les consommateurs (référence), et il évolue de la même manière que la vitesse mécanique du moteur asynchrone, figure (III.14), et de couple résistant imposé par la pompe, figure (III.16).

La figure (III.17) représente l'évolution du volume en fonction de temps (h).



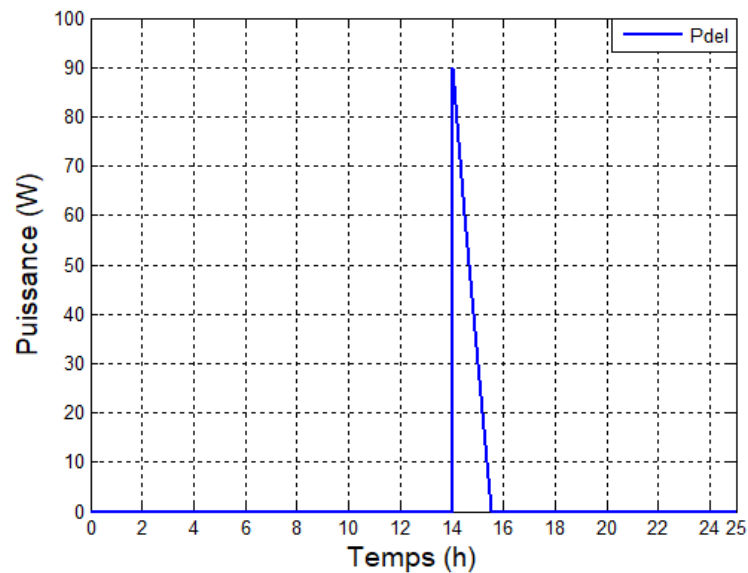
**Figure.III.17 :** Allure d'évolution du volume(m³).

On remarque que cette courbe est de plus en plus d'augmentation selon le débit de la pompe jusqu'à le volume maximal du bassin.



**Figure.III.18 :** Allure des différentes puissances.

La figure (III.18) représente la puissance PV, la puissance demandée par la charge, et la puissance de délestage. D'après cette figure, on voit bien que les allures de la puissance demandée par la charge et la puissance PV sont pratiquement superposées.



**Figure.III.19 :** Allure de la puissance de délestage.

La figure (III.19) représente la puissance de délestage, on déduit que cette puissance existe seulement si la puissance générée par le GPV est inférieure à celle demandée par la charge et le  $EDC > EDC_{min}$ .

### **III.8 Conclusion**

Pour le bon fonctionnement du système de pompage photovoltaïque et dans le but d'avoir des meilleurs rendements, le dimensionnement et la simulation d'un tel système deviennent une étape indispensable. Pour cela ce chapitre a été consacré pour la description d'une méthode de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque.

Nous avons présenté les résultats de la simulation pour différents profils d'ensoleillement, donc nous pouvons conclure que ces résultats sont d'une grande importance pour la gestion de ce type d'installation. Ainsi, une maîtrise des flux énergétiques dans un tel système s'avère intéressante pour une réalisation réelle.

## Conclusion Générale

---

## Conclusion générale

---

L'utilisation de l'énergie solaire dans les sites isolés pour différentes applications tel que le pompage d'eau présente un intérêt très important, cependant les générateurs photovoltaïques possèdent deux inconvénients majeurs qui sont un rendement faible et un coût élevé, cela se vérifie sur la caractéristique ( $I-V$ ) sous l'influence de différentes températures.

Les machines asynchrones apportent une solution intéressante pour la réalisation des systèmes de pompage photovoltaïques. Ces machines présentent plusieurs avantages par rapport aux machines synchrones ou à courant continu, à savoir une durée de vie élevée, un rendement élevé, une maintenance réduite, ...etc. De plus l'évolution de l'électronique de puissance et la technologie des matériaux magnétiques permet d'élargir l'application de ces moteurs, nous avons tout d'abord étudié d'une façon générale l'énergie photovoltaïque, ceci s'est avéré nécessaire pour acquérir une connaissance du comportement du GPV.

Dans ce contexte, l'optimisation du rendement générateur photovoltaïque-moteur Asynchrone est une nécessité pour maximiser la quantité d'eau pompée d'une part et réduire le coût du système photovoltaïque d'autre part. Pour parvenir à cet objectif, il existe différentes techniques d'optimisation.

Notre travail s'est porté sur l'étude et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries, auquel nous avons implanté des algorithmes d'optimisation et de gestion.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque, et à travers une étude sur les types de regroupement des cellules nous avons montré comment augmenter le courant ou la tension par la modélisation de la cellule *PV*, en montrant l'influence des différents paramètres sur le rendement du générateur *PV*. Ensuite, nous avons entamé la partie la plus importante, qui est le comportement du convertisseur de puissance (*DC/DC*).

Dans le second chapitre, nous avons présenté la modélisation de l'association onduleur-moteur asynchrone, Le contrôle vectoriel permet d'assurer un découplage " fictif " entre les deux grandeurs principales de la machine asynchrone. Afin d'avoir une idée sur le comportement dynamique du moteur asynchrone, des simulations numériques ont été effectués.



Le troisième chapitre a été consacré pour la description d'une méthode de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries. On a procédé à la simulation du système de pompage photovoltaïque avec batteries, nous avons présenté les résultats de la simulation pour différents profils d'ensoleillement, donc nous pouvons conclure que ces résultats sont d'une grande importance pour la gestion de ce type d'installation.

Les résultats de ce travail nous permettent de dégager les perspectives suivantes :

- L'utilisation d'autres techniques d'optimisations pour l'extraction du maximum de la puissance photovoltaïque.
- La réalisation d'une telle installation, puis effectués des tests afin de valider les résultats de simulations.
- Tester l'efficacité de l'algorithme de gestion sur un système réel.

## Bibliographie

---

## Bibliographie

- [1]. A. Bouden et M. Marir Benabbas, « Modélisation de système de pompage photovoltaïque optimisé » Conférence Internationale des Energies Renouvelables, Sousse-Tunisie, 2013.
- [2]. M. Capderou, « Atlas Solaire de l'Algérie Modèles Théoriques et Expérimentaux », Synthèse bibliographique par Pr. A. Malek ROULA, Algérie, 2011.
- [3]. Akassewa Tchapo SINGO, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [4]. M.Djeroui Salim « Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone », Mémoire de Master, Chapitre 1. Page (5,6), Université Abbes Farhat de Sétif, 2011.
- [5]. B. Flèche, D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque », Article, STI ELT Approche générale, juin 2007.
- [6]. Soltane Belakehal, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2010.
- [7]. D. Rekioua, E. Matagne, « Optimisation des puissances du système photovoltaïque : Modélisation, Simulation et contrôle », Springer, British Library, 2012.
- [8]. BP Solar BP SX150-150W Multi-crystalline photovoltaïque Module Data sheet.
- [9]. M.S. Aït Cheikh « MPPT par l'utilisation du fuzzy logique contrôle système », Laboratoire des Dispositifs de Communication et de Conversion Photovoltaïque Département d'Electronique, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 2007.
- [10]. S. Singh, D. Fulwani And V. Kumar, « Contrôle robuste en mode coulissant du convertisseur de suralimentation DC/DC alimentant une charge de puissance constante dans l'électronique de puissance », Vol. 8, No. 7, 7/2015.
- [11]. S. Tyagi, G. Verma, « Simulation et analyse du convertisseur DC-DC Boost à l'aide d'un contrôleur de mode coulissant dans des conditions variables », (IOSR-JEEE), Volume 13, Issue 1 Ver. II (Jan. 2018).
- [12]. Christophe Batard, Frédéric Poitiers, Christophe Millet and Nicolas Ginot, « Simulation de convertisseurs de puissance à l'aide de Matlab-Simulink », Institut d'Électronique et des Technologies du Numérique, France, 2012.
- [13]. P. Deepak Reddy1, Basavaraja Banakar, « Technique de contrôle de mode coulissant pour convertisseur DC-DC Buck avec des performances améliorées », Revue internationale de recherche en sciences appliquées & ingénieur en technologie, Volume 3, Décembre 2015.
- [14]. Labdani Meryem. « Commande par mode glissant des convertisseurs de puissance », Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi, 2015/2016.
- [15]. Ourabi.Lassaad, « les convertisseurs continu/continu les hacheur », Support de cours, I.S.E.T de Bizerte, 2012.
- [16]. Ehsan Hosseini, « Modélisation et simulation de commutation de hacheurs via matlab/Simulink », Bulletin Scientifique du Petru Maior, Université de Tîrgu Mures, Vol. 12, 2015.
- [17]. P. Deepak Reddy1, Basavaraja Banakar, « Technique de contrôle de mode coulissant pour convertisseur DC-DC Buck », Revue internationale de recherche en sciences appliquées & ingénieur en technologie, Décembre 2015.
- [18]. Fatima Tahri, Ali Tahri, S. Flazi « Contrôle de mode coulissant pour convertisseur DC-DC Buck », <https://www.researchgate.net/publication/269703867>.
- [19]. Julien Flamant, « Modélisation dynamique des structures de conversion DC/DC pour la régulation », Mémoire de Master, Université de Toulouse III, 2006.
- [20]. C. Chaigne, E. Etien, S. Cauët, L. Rambaul « Commande vectorielle sans capteur des machines asynchrones » Edition HERMES SCIENCE PUBLISHING, LAVOISIER, 2005.
- [21]. BEDDIAF Y. « Etude et Simulation d'estimateurs et observateurs robustes de flux et de vitesse pour la machine asynchrone » Mémoire de Magister Université de BATNA. 2006.
- [22]. Patrick Brunet, « Introduction à la Commande vectorielle des machines asynchrones » LTEG Henri Brisson, Université de Lille, 2006.
- [23]. J.P. HAUTIER et G.P. CARON, « Modélisation et commande de la machine asynchrone », publié chez Technip, 1995.
- [24]. L. Baghli, « Modélisation et commande de la machine asynchrone » IUFM de Lorraine UHP 2005.
- [25]. DAMIEN De Benedittis, « Etude et modèle électromagnétique de la machine asynchrone pour alternateur-démarrateur », thèse de doctorat, institut polytechnique de Grenoble, 2002.
- [26]. Sahraoui Lazhar, « Modélisation identification, et commande d'une machine d'induction à double cage », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2008.
- [27]. Bachani Mohamed « Identification paramétrique de la machine asynchrone », Mémoire de Master, Université des Sciences et de la Technologie, Oran, 2013.

- [28]. A. Ameer « Commande sans capteur de vitesse par DTC d'une Machine asynchrone à aimants permanents dotée d'un observateur d'ordre complet à modes glissants » Mémoire de Magister, Université de BATNA, 2003.
- [29]. R. Casimire « diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissances des formes » Thèse de Doctorat, Université de Lyon, 2003.
- [30]. F. Morand « Techniques d'observation sans capteur de vitesse en vue de la commande des machines asynchrones » Thèse de Doctorat, INSA Université de Lyon, 2005.
- [31]. E.M. Berkouk, « contribution à la conduite des machines asynchrones monophasée et triphasée alimentée par des convertisseur direct et indirects. Application aux gradateurs onduleur multiniveaux ». Thèse de doctorat, CNAM, Paris France 1995.
- [32]. R. Toufouti. « Contrôle Directe du Couple de la Machine Asynchrone, ». Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2003.
- [33]. T.Kume, T.Iyakame « Variateurs de vitesse à contrôle vectoriel hautes performances : Application et nouvelles technologies ». IEEE Sur l'application de l'industrie Vol 1a 23, Septembre/Octobre 1987.
- [34]. F. Blaschke. « Le principe de l'orientation du champ appliqué au nouveau système de contrôle en boucle fermée pour le contrôle en temps réel des moteurs à induction » IEEE Transactions sur l'électronique de puissance, vol.14, P.3-13, 1999.
- [35]. N. Akkari. « Commande adaptative de la machine asynchrone à double alimentation par des sources de courants ». Mémoire de Magister, Université de Batna, 2005.
- [36]. A.Saïbi « Commande par Régulateurs PI et par Mode de Glissement d'une Machine Synchrone à Double Etoile » Mémoire de Magistère de l'Ecole Nationale Polytechnique d'El-Harrach Alger spécialité : Génie Automatique, 2006.
- [37]. A. HADJ ARAB, M. BENGHANEM et A. GHARBI « Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque » Revue des Energies Renouvelables. Vol.8, pp (19 – 26), 2005.
- [38]. A. BELHOCINE et S. ZAIDI « Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome » Mémoire de Master 2. Université de Bejaïa, 2012
- [39]. Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller, Bocar Sada Sy « le pompage photovoltaïque, manuel de cours à l'intention des ingénieurs et techniciens » Institut de l'énergie des pays ayant en commun l'usage français, 1998
- [40]. Ahmed O. Bagré. « Cours sur le pompage photovoltaïque et le dimensionnement de système PV »
- [42]. Angarita Gil, K. P, « Modélisation Électrique et Analyse d'une Cellule Lithium ». Mémoire de Maîtrise, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 2012.
- [43]. Tremblay, O., Dessaint, L. et Dekkiche, A, « Un modèle de batterie générique pour la simulation dynamique de véhicules électriques hybrides ». Dans Conférence sur la puissance et la propulsion des véhicules, IEEE, p. 284-289, 2007.
- [44]. Lijun Gao, Shengyi Liu et Dougal, R. A, « Modèle de batterie lithium-ion dynamique pour la simulation du système. Composants et technologies d'emballage », IEEE, volume 25, numéro 3, p. 495-505, 2002.
- [45]. M. G. Thomas, « Le pompage de l'eau - l'alternative solaire », photovoltaïque design assistance center, Laboratoires nationaux de Sandia, 2009.
- [46]. Logiciel PVSyst v7.1, « source des données : Saïda-PVGIS-API-TMY.SIT ».
- [47]. D. Rekioua A. Hamidat, K. Haddouche, L. Kati « Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque », Colloque National sur l'Energie Solaire ; CNESOL Bejaïa, 2006.

## Résumé

L'eau et l'énergie sont parmi les plus importants éléments essentiels et indispensables à la vie. La demande croissante de l'énergie et l'épuisement futur inévitable des sources classiques exigent des recherches sur des sources alternatives, comme les énergies renouvelables. L'énergie solaire est très utilisée à cause de ces nombreuses qualités.

L'objectif de ce mémoire est l'étude de faisabilité des techniques de pompage solaire pour des sites arides isolés (endroits isolés non connectés au réseau électrique).

Le travail scindé sur une étude théorique de gisement solaire et les techniques de pompage solaire afin d'établir une étude analytique et la simulation d'un système de pompage solaire avec batteries.

À partir de ce travail nous avons constaté que l'utilisation de cette énergie est un gain pour le développement pour ces zones.

**Mots-clés** : Energie renouvelable, Pompage solaire, Convertisseur DC-DC, MPPT, Machine Asynchrone, Pompe centrifuge.

## Abstract

Water and energy are among the most important essentials for life. Growing demand for energy and the inevitable future depletion of conventional sources require research into alternative sources, such as renewable energies. Solar energy is widely used because of these many qualities.

The objective of this dissertation is the feasibility study of solar pumping techniques for isolated arid sites (isolated places not connected to the electricity grid).

The work split on a theoretical study of solar deposit and solar pumping techniques in order to establish an analytical study and simulation of a solar pumping system with batteries.

From this work we have found that the use of this energy is a development gain for these areas.

**Keywords** : Renewable energy, Solar pumping, DC-DC converter, MPPT, Machine Asynchronous, Centrifugal pump.

## ملخص

المياه والطاقة من أهم ضروريات الحياة، الطلب المتزايد على الطاقة والاستنفاد الحتمي للمصادر التقليدية في المستقبل يتطلبان البحث في مصادر بديلة، مثل الطاقات المتجددة. تستخدم الطاقة الشمسية على نطاق واسع بسبب هذه الصفات العديدة.

الهدف من هذه الرسالة دراسة جدوى تقنيات الضخ الشمسي في المناطق القاحلة المعزولة (الأماكن غير المتصلة بشبكة الكهرباء).

انقسم العمل على دراسة نظرية لمجال الطاقة الشمسية وتقنيات الضخ الشمسي من أجل إنشاء دراسة تحليلية ومحاكاة لنظام الضخ الشمسي بالبطاريات.

من نتائج هذا العمل وجدنا أن استخدام هذه الطاقة هو مكسب تطوير لهذه المناطق.

الكلمات المفتاحية: الطاقة المتجددة، ضخ الطاقة الشمسية، محول DC-DC، MPPT، آلة غير متزامنة، مضخة طرد مركزي.