



Université Abbas LAGHROUR Khenchela
Faculté de Sciences & de Technologie
Département de Sciences & Techniques
جامعة عباس لغرور خنشلة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم العلوم والتقنيات



N° Série :

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master (LMD)

Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle

Option : Automatique

**Etude et simulation de la commande
d'un moteur asynchrone associé à un
générateur photovoltaïque**

Réalisé par :

- KARA Hicham
- BEDDIAF Yahia

Dirigé par :

- BOUMAARAF Abdelâali
- ZERDOUDI Assia

Présenté le 13/07/2021

Remerciements

Avant tout, Je remercie ALLAH le Tout-puissant de nous avoir donné la santé, le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail dans des meilleures conditions.

*Nous tenon à exprimer nos profondes gratitude en premier lieu à notre encadreur, **Mr : BOUMAARAF-ABD ALALI**, pour son Encadrement, ses directives et sa disponibilité. Aussi, nous le remercions pour ses Encouragements, son indulgence, et sa sympathie.*

*N'oublie pas future docteur **Salah Eddine Farhi** nous a entièrement guidés dans nos réalisations pratiques.*

*Egalement, je remercie mon Co-encadreur, Dr : **ZERDOUDI-ASSIA**.*

*Nous remercions vivement **Dr. CHERFIA NAIM** enseignant à l'université de Constantine 1, nous adressons aussi nos remerciements aux autres membres du jury pour l'honneur de bien vouloir apporter leur jugement à notre travail.*

Nous remercions également, l'ensemble des enseignant de département Sciences et Technologies de l'Université Abbes Laghrour -Khenchela et particulièrement ceux qui ont participé à notre formation.

Enfin, Nous ne peux oublier de remercier nos amies, à nos collègues des départements d'Électrotechnique et d'Électronique, enseignants, techniciens, agents administratifs. Nous remercions tout personne nos ayant aidé de pré ou de loin.



Dédicace



Je dédie ce travail :

A mon père.

À l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis.

A

La lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.

A mon frère mahri.

A mes sœurs.

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études, housam, ilies, laarbi, abdelhak mes aimables amis, collègues d'étude, mes amis, smaail, abdelaali, haroune, abdelhamid, fouad

A mon binôme.

Enfin je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, je vous dis merci.



Beddaif yahia



Dédicace



Je dédie ce modeste travail à :

A mon très cher père.

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A ma très chère mère.

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et sa présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A

Mon épouse et à tous mes enfants : Abderrahmane, Meriem, Asma

A tous mes frères et sœurs.

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études, Hakim, Bachir, Bouziane, mes aimables amis, collègues d'étude,

A mon binôme.

Et pour tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, je vous dis merci.



KARA HICHAM

SOMMAIRE

I. Introduction Générale.....	1
I.Chapitre I :L'énergie solaire et la conversion photovoltaïque.....	4
I.1.Introduction.....	4
I.2.Energie photovoltaïque.....	4
I.2.1.Définition.....	4
I.3. Le rayonnement solaire.....	5
I.3.1. Différents types de rayonnement.....	6
a) Le rayonnement direct.....	6
b) Le rayonnement diffus.....	6
c) Le rayonnement réfléchi.....	6
d) Le rayonnement global.....	6
I.4.Potentiel solaire en l'Algérie.....	7
I.5.Effet Photovoltaïque.....	8
I.6.Cellule photovoltaïque.....	8
I.6.1. Différents types des cellules photovoltaïques.....	9
I.6.2. Caractéristiques électriques d'une cellule.....	10
I.7.Module (panneau) photovoltaïque.....	11
I.8.Champ photovoltaïque.....	12
I.9.Le système photovoltaïque.....	12
I.10.Générateur photovoltaïque GPV.....	13
I.11.Association des Cellules Photovoltaïques.....	13
I.11.1. Association des Cellules Photovoltaïques en Série.....	13
I.11.2. Association des Cellules Photovoltaïques en parallèle.....	14
I.11.3. Association des Cellules Photovoltaïques mixte.....	14
I.12.Caractéristiques d'un module photovoltaïque.....	15
I.13.Influence de l'éclairement et de la température sur un générateur photovoltaïque....	16

I.13.1. Influence de l'éclairage.....	16
I.13.2. Influence de la température.....	17
I.14.Types de Systèmes PV.....	18
I.14.1. Systèmes PV autonomes.....	19
I.14.2. Systèmes PV hybrides.....	19
I.14.3. Systèmes PV raccordés au réseau.....	19
I.15.Les avantages et les inconvénients.....	19
I.15.1. Les avantages.....	20
I.15.2. Les inconvénients.....	20
I.16.Conclusion.....	20
II. Chapitre2 : Modélisation d'un moteur asynchrone.....	21
II.1.Introduction.....	21
II.2.Modélisation de la machine asynchrone.....	21
II.2.1. Hypothèses simplifications	21
II.2.2. Schéma équivalent de la machine asynchrone	22
II.3. Modèle mathématique de la MAS	22
II.3.1. Les équations électriques de la MAS	23
II.3.2. Les équations magnétiques	24
II.3.3. Les équations mécaniques.....	25
II.4. Transformation triphasé-biphasé	26
II.4.1. La Transformation de Park	26
II.4.2. Application de la transformation de Park	26
II.4.3. Choix du référentiel	30
II.4.4. Modèle de la MAS dans le référentiel lié au champ tournant (d, q).....	31
II.5.Conclusion.....	32
III. Chapitre3 : Etude et simulation des éléments de la chaine de conversion photovoltaïque.....	33
III.1. Introduction.....	33
III.2. Présentation du système photovoltaïque.....	33

III.3. Modélisation des cellules PV	34
III.3.1. Modèle à une diode	34
III.3.2. Les équations caractéristiques d'une cellule photovoltaïque	35
III.4. Principe de conversion photovoltaïque	38
III.4.1. Classification de l'algorithme du suiveur la puissance maximale	39
III.4.2. La méthode Perturbe & Observe (P&O).....	39
III.5. Convertisseur DC/DC(les hacheurs).....	43
III.5.1. Convertisseur Boost (hacheur parallèle).....	44
III.5.2. Modélisation du hacheur Boost.....	44
III.6. Convertisseur DC/AC(les onduleurs).....	47
III.6.1. Modélisation de l'onduleur à deux niveaux et de sa commande MLI.....	47
III.6.2. Modélisation de la commande à modulation de largeur d'impulsion	49
III.6.3. Commande MLI sinus – triangle.....	50
III.6.4. Avantages de la commande MLI.....	52
III.7. Conclusion.....	52
IV. Chapitre 4: Résultats et discussions.....	53
IV.1. Introduction.....	53
IV.2. Schéma complet du système sur MATLAB/Simulink	53
IV.3. Résultats de simulation sous MATLAB/Simulink	55
Conclusion générale.....	59

Abréviations et symboles

GPV	: Générateur photovoltaïque
PV	: Photovoltaïque
SPV	: Système photovoltaïque
DC	: Courant Continu (Direct Current)
AC	: Courant Alternatif (Alternating Current)
MPPT	: Maximum Power Point Tracking
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MLI	: Modulation de Largeur d'Impulsion
MLIST	: Modulation de Largeur d'Impulsion Sinus-Triangle
FF	: Facteur de Forme
P&O	: Perturbation et Observation (Perturb & Observe)
MAS	: Machine Asynchrone (Moteur Asynchrone)
VSG	: Tension de sortie d'un générateur
G	: Irradiation ou ensoleillement (w / m^2)
W_C	: Watt crête
V_{OC}	: Tension en circuit ouvert (V)
I_{SC}	: Courant de court-circuit ouvert (A)
I_{mpp}	: Courant maximum fournie par un module (A)
V_{mpp}	: Tension maximale fournie par un module (V)
P_{mpp}	: Puissance maximale fournie par un module (W)
S	: Surface du module PV
ϵ	: Albédo
I_{PV}	: Courant fournie par la cellule (A)
V_{PV}	: Tension aux bornes de la cellule (V) (J/k)
I_d	: Courant de diode (A)
I_{ph}	: Courant photonique (A)
I_{sh}	: Courant dérivé par la résistance parallèle (A)
I_0	: Courant de saturation (A)
I_{scn}	: Courant de court-circuit nominal (A)
V_t	: Tension thermique (V)
R_{sh}	: Résistance en parallèle (Ω)
R_s	: Résistance en série (Ω)
R	: Résistance (Ω)

T_n	: Température nominale ($^{\circ}\text{C}$ ou K)
K_v	: Coefficient de température en circuit ouvert (V/K)
a	: Facteur d'idéalité de la diode
q	: Charge de l'électron ($q = 1,6 \cdot 10^{19}$ C)
K	: Constant de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)
K_i	: Coefficient de la température (A/K)
N_s	: Nombre de cellule en Série
N_p	: Nombre de cellule en parallèle
I_c	: Courant de Condensateur(A)
V_l	: Tension de l'inductance(V)
V_c	: Tension de condensateur(V)
L	: Inductance (H)
C	: Condensateur (F)
C_p	: La largeur du pas d'une perturbation simple
α	: Rapport cyclique
T_e	: La période des impulsions(s)
F_e	: Fréquence (Hz)
P_c	: Puissance de charge (W)
F_s	: Fréquence de commutation
T_s	: Temps de commutation
f_r	: Fréquence de référence de modulation
A_p	: Amplitude d'une porteuse triangulaire
f_p	: Fréquence de modulation
C_{em}	: Représente le couple moteur appliqué
C_r	: Représente le couple résistant
J	: Moment d'inertie du rotor et des parties tournantes de la machine
f	: Coefficient du frottement visqueux.
V_{si} et V_{ri}	: les tensions des phases statoriques et rotoriques, respectivement
I_{si} et I_{ri}	: les vecteurs des courants traversant les phases statoriques et rotoriques
$l_s \omega$: La réactance cyclique de fuite d'une phase primaire
$l_r \omega$: La réactance cyclique de fuite d'une phase secondaire
$X\mu$: La réactance cyclique magnétisante
R_r, l_r	: Les valeurs de $R_r, l_r \omega$ ramenées au primaire
I_r	: le courant secondaire ramené au primaire
I_m	: le courant magnétisant
T_s	: Constante de temps statorique

T_r	: Constante de temps rotorique
R_s	: Résistance propre d'une phase statorique
R_r	: Résistance propre d'une phase rotorique
Ω_r	: Vitesse rotorique de moteur
ω_{mec}	: Vitesse mécanique de moteur
p	: Nombre de paire de pôles
σ	: Coefficients de fuite totale .ou coefficient de dispersion de Blondel
X	: Vecteur d'état
u	: Vecteur de commande
A	: Matrice d'évolution du système
B	: Matrice de commande du système.

Liste des figures et des tableaux

1. Liste des figures

Chapitre I : L'énergie solaire et la conversion photovoltaïque

Figure I.1	: L'énergie solaire et les deux méthodes de conversion.	5
Figure I.2	: Spectre solaire hors atmosphère.	6
Figure I.3	: Les différentes composantes du rayonnement solaire.	7
Figure I.4	: Moyenne annuelle de la durée d'insolation mesurée- Période 1992-2002.	8
Figure I.5	: Principe de fonctionnement de la cellule.	9
Figure I.6	: Types de cellules photovoltaïques. (a) silicium monocristallin, (b) silicium polycristallin, (c) silicium amorphe.	10
Figure I.7	: Caractéristique $I=f(U)$ d'une cellule photovoltaïque.	10
Figure I.8	: Caractéristique $P=f(U)$ d'une cellule photovoltaïque.	11
Figure I.9	: Deux chaînes de modules constituant un champ photovoltaïque.	12
Figure I.10	: Module, cellule et champ photovoltaïques.	12
Figure I.11	: la caractéristique résultante obtenue en association en série.	14
Figure I.12	: la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles.	14
Figure I.13	: la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles/série.	15
Figure I.14	: a -Courbes $I(V)$ d'un panneau à divers ensoleillements à $T=25^\circ$. b -Courbes $P(V)$ d'un panneau à divers ensoleillements à $T=25^\circ C$.	17
Figure I.15	: a - L'influence de la température sur les courbes $I(V)$ à $G=1000 \text{ W/m}^2$. b -L'influence de la température sur les courbes $P(V)$ à $G=1000 \text{ W/m}^2$	18

Chapitre II : Modélisation d'un moteur asynchrone

Figure II.1	: Schéma équivalent du moteur asynchrone en régime permanent.	22
Figure II.2	: Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.	23
Figure II.3	: Représentation de la machine asynchrone triphasée et sa machine biphasée.	27

Chapitre III : Etude et simulation des éléments de la chaîne de conversion photovoltaïque

Figure III.1	: Chaîne élémentaire de conversion Photovoltaïque.	34
Figure III.2	: Modèle d'une cellule PV à une diode.	35
Figure III.3	: Modèle Simulink du générateur photovoltaïque.	38
Figure III.4	: Schéma de converge vers le PPM par P&O.	40
Figure III.5	: Organigramme de l'algorithme perturbation et observation (P&O).	41

Figure III.6	: La trajectoire de PPM sur la caractéristique I-V et P-V.	42
Figure III.7	: Schéma de simulation d'un GPV et MPPT.	43
Figure III.8	: Symbole d'un convertisseur DC-DC.	43
Figure III.9	: Circuit électrique de l'hacheur(Boost).	44
Figure III.10	: Schéma de simulation d'un hacheur boost.	46
Figure III.11	: Tension d'hacheur survolteur.	47
Figure III.12	: Symbole des convertisseurs DC-AC monophasé et triphasé.	47
Figure III.13	: Onduleur de tension triphasé à deux niveaux.	48
Figure III.14	: Schéma de simulation d'un onduleur triphasée.	49
Figure III.15	: principe de la MLI.	50
Figure III.16	: Tension d'onduleur (phase (a), phase (b), phase (c)).	51

Chapitre IV : Résultats et discussions

Figure IV.1	: Modèle de simulation de la chaîne de conversion photovoltaïque.	54
Figure IV.2	: Le courant statorique (i_s) en fonction du temps.	55
Figure IV.3	: Le courant rotorique (i_a) en fonction du temps.	55
Figure IV.4	: Le couple électromagnétique en fonction du temps.	56
Figure IV.5	: La tension V_s après le filtre LC.	56
Figure IV.6	: La tension V_i avant le filtre LC.	56
Figure IV.7	: La vitesse rotorique en fonction du temps.	57
Figure IV.8	: Résultat de simulation du signal du courant d'aimantation du moteur.	57

2. Liste des tableaux

Tableau I.1	: Potentiel solaire en Algérie.	7
Tableau III.1	: Paramètres du module SPR 315 E.	37
Tableau III.2	: Paramètres de simulation du hacheur boost.	46
Tableau III.3	: Paramètres de simulation de l'onduleur.	51

Introduction

Générale

Introduction générale

Depuis le siècle dernier, la consommation en énergie a augmenté de manière considérable. Mais nos ressources en pétrole, charbon ou gaz ne sont pas éternelles et il est en outre préférable de ne pas les brûler plus pour ne pas aggraver la pollution, et augmentation actuelle du prix du pétrole.

La solution consiste en l'utilisation d'énergies renouvelables telles que l'énergie hydraulique, biomasse, éolienne ou solaire. L'utilisation de ce type d'énergie a progressé de 12,5% depuis 1990 [1]. L'Algérie, recèle à cet effet d'importantes ressources énergétiques renouvelables qui peuvent pallier notamment dans le cadre de la production de l'énergie électrique, vecteur principal de tout développement économique et social. Le gisement solaire constitue la principale de ces ressources. L'énergie solaire fournit aujourd'hui un bon rendement de conversion énergétique, alors que le rendement d'un système fondé sur la combustion d'un minerai fossile est au mieux de 30 à 35%.

L'énergie émise par le soleil voyage jusqu'à la terre sous forme de rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement est semblable aux ondes radioélectriques mais il possède une gamme de fréquences différentes. L'énergie solaire disponible est souvent exprimée en unités d'énergie par temps par unité de surface, par exemple en Watt par mètre carré (W/m^2). La quantité d'énergie disponible au cours du trajet entre le soleil et l'atmosphère extérieure de la Terre est égale à environ $1\ 367\ W/m^2$. Cette valeur est proche de celle d'un séchoir à cheveux de forte puissance pour chaque mètre carré de rayonnement solaire! Une partie de l'énergie solaire est absorbée lorsque le rayonnement traverse l'atmosphère terrestre. De plus, l'énergie solaire utilisable dépend de l'énergie solaire disponible, dépend également de l'emplacement géographique, et d'autres conditions météorologiques, de la technologie utilisée et de l'application désirée.

L'utilisation de cette énergie renouvelable de nature « aléatoire et diffuse » nécessite la combinaison de moyens de stockage et de contrôle de gestion de puissance où chaque générateur PV devrait fonctionner en un point optimal, appelé le point de puissance maximale (MPP), qui est subordonné à la variation de la température et de l'insolation.

Pour augmenter le rendement en puissance d'un module PV ou d'un champ de modules PV, un contrôleur électronique est incorporé entre le générateur PV et la charge, dont le rôle principal est la surveillance en continu du point de puissance maximale du générateur

PV appelé communément MPPT (Maximum Power Point Tracking) et cela en général par action sur un dispositif de conversion DC-DC ou DC-AC.

Les techniques de régulation et de contrôle assurent la fonction d'adaptation d'impédance, en transférant à la charge la puissance électrique maximale issue du générateur PV quelque que soit les conditions de température et d'ensoleillement. La comparaison des systèmes avec et sans les dispositifs poursuivant le point de puissance maximale montre que les unités avec un MPPT produisent 21 à 25% de leur puissance maximale théorique, tandis que les unités sans MPPT fonctionnent seulement à 30% de leur rendement de puissance maximale.

Les entraînements à vitesse variable, qui permettent d'optimiser les processus industriels tout en réduisant l'énergie et la matière consommées, connaissent un essor constant. Cet essor est à la fois quantitatif, par le nombre et la puissance unitaire des équipements, et qualitatif, par la précision, la souplesse et la fiabilité de ces équipements.

L'évolution dans le domaine des entraînements électrique à vitesse variable est particulièrement rapide. Elle est rendue possible par les progrès en matière de composants semi-conducteurs et par la généralisation des emplois de l'informatique industrielle. Cette évolution rend indispensable la mise à jour des connaissances.

Les différentes techniques de la commande d'un moteur asynchrone associé à un générateur photovoltaïque (GPV) présente quelques caractéristiques non désirables et des inconvénients tel que l'instabilité du système du au changement d'éclairement instantané et le réchauffement du moteur par les harmoniques de haute fréquence provoqués par la commande PWM.

Pour remédier à ce problème nous proposons un système d'alimentation de moteur asynchrone photovoltaïque robuste et stable, un système de commande qui améliore (optimise) les la tension et le courant d'alimentation ainsi que le taux de distorsion des harmoniques, on agissant sur la MPPT et la PWM, le transfert d'énergie maximale vers le moteur asynchrone pour obtenir un bon rendement.

Donc, L'objectif de ce travail étant de simuler un système photovoltaïque qui alimente un moteur asynchrone (**MAS**) basé sur un système d'interconnexion PV et le réseau, et cela à travers un étage d'adaptation Hacheur survolteur commandé par un algorithme de recherche du point de puissance maximale (**MPPT**), un onduleur commandé par la **PWM** et un filtre LC, en exploitant les travaux de recherche des systèmes interconnectés aux réseaux électriques.

De ce fait, le présent travail est décomposé en quatre parties séquentielles, dont chacune d'elles définit un chapitre.

Le premier chapitre représente une généralité sur l'énergie solaire et la conversion photovoltaïque en donnant un aperçu général sur les systèmes photovoltaïques. On donnera une généralité sur la conversion de l'énergie solaire photovoltaïque avec une description de la cellule PV, l'élément de base de la conversion photonique-électrique, du module PV, du champ PV et du GPV et l'influence de la température et de l'éclairement sur leurs caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation du moteur asynchrone, on traitant la complexité de son modèle mathématique, qui a été réduit grâce aux hypothèses simplificatrices par la transformation de Park en une machine biphasée équivalente.

Dans le troisième chapitre, on a étudié et simulé les convertisseurs statiques utilisés dans les systèmes photovoltaïques, comme le hacheur Boost et l'onduleur à MOSFET, on a présenté aussi la modélisation d'une cellule PV à une seule diode, le panneau PV et le hacheur Boost commandé par un algorithme MPPT. Nous avons choisi pour cela, la méthode P&O (perturbation & Observation). La commande de l'onduleur a été faite par la commande MLI type sinus-triangle.

Le quatrième chapitre, est destiné à la simulation de notre système photovoltaïque et on va présenter les résultats de simulation de chaque élément séparément, afin d'évaluer leurs performances avant d'entamer la simulation de tout le système photovoltaïque proposé et l'interprétation des différents résultats.

Le présent travail se résume brièvement à travers une conclusion générale là où un balisage particulier des points essentiels, tout en proposant des éventuelles perspectives et d'améliorations.

Chapitre I :

L'énergie solaire et la conversion photovoltaïque

I.1. Introduction

De tout temps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, étoile la plus proche de la terre. La plupart des utilisations, connues depuis des siècles, sont directes comme en agriculture à travers la photosynthèse ou dans les diverses applications de séchage et chauffage autant artisanales qu'industrielles.

Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m^2 crête dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m^2 lorsque l'atmosphère est faiblement polluée de poussière ou d'eau.

Signalons dès à présent que le flux solaire reçu au niveau du sol dépend de :

- L'orientation, la nature et de l'inclinaison de la surface terrestre.
- La latitude du lieu de collecte, de son degré de pollution ainsi que de son altitude.
- La période de l'année, l'instant considéré dans la journée.
- La nature des couches nuageuses.

Ainsi, il existe des zones dans le monde plus favorisées que d'autres du point de vue ensoleillement, répertoriées sous forme d'atlas et mettant en évidence des «gisements solaires», l'exploitation de l'énergie solaire se fait avec deux méthodes : l'exploitation à travers l'effet thermique et le deuxième l'effet photovoltaïque.[2]

I.2. Energie photovoltaïque

I.2.1. Définition

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules ou de photopiles fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible qui réalisent cette transformation d'énergie[3].L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension $I(V)$ non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble [4].

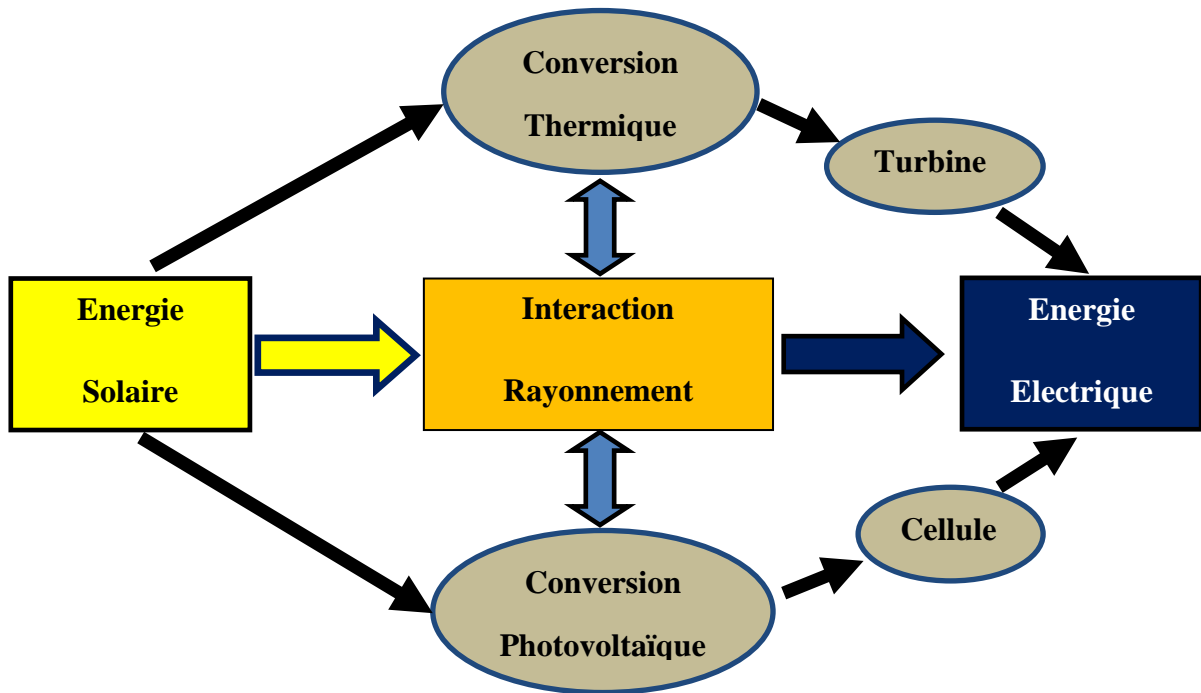


Figure I.1 : L'énergie solaire et les deux méthodes de conversion.

I.3. Le rayonnement solaire

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150.10 Km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180.10 GW, c'est pour ça que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autre sources d'énergie. Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de 0.22 à 10 μm , l'énergie associe à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit :

- 9% dans la bande des ultraviolets ($< 0.4 \mu\text{m}$)
- 47% dans la bande visibles (0,4 à 0.8 μm)
- 44% dans la bande des infrarouges ($> 0.8 \mu\text{m}$)[5].

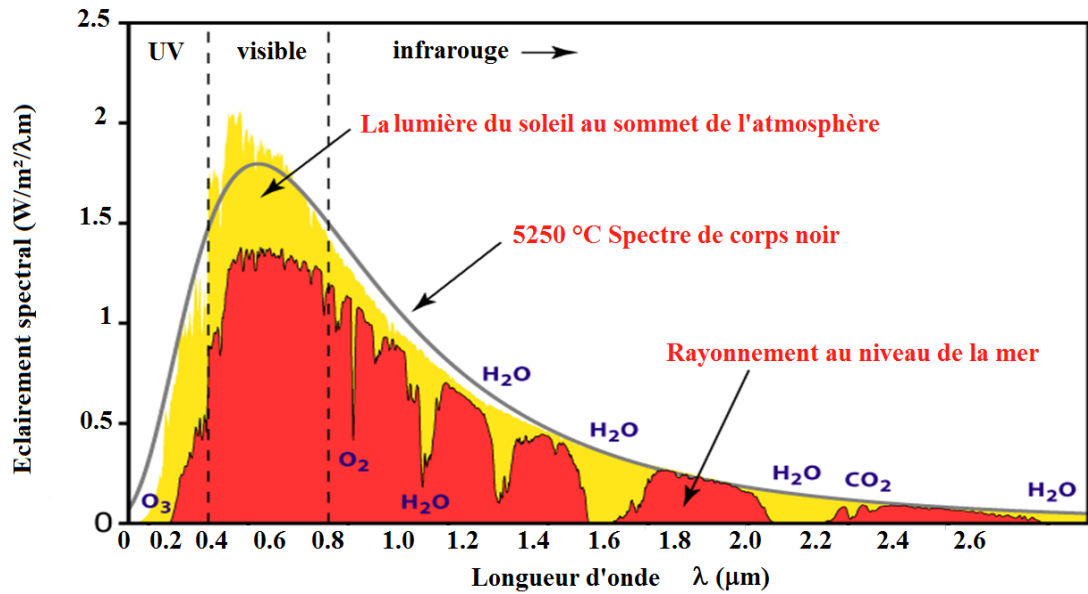


Figure I.2: spectre solaire hors atmosphère [6].

I.3.1. Différents types de rayonnement

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes :

a) Le rayonnement direct

Flux solaire sous forme des rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.

b) I.3.1.2. Le rayonnement diffus

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère.

c) Le rayonnement réfléchi

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé albédo (ϵ) $0 \leq \epsilon \leq 1$.

d) Le rayonnement global

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct diffus et réfléchi[7].

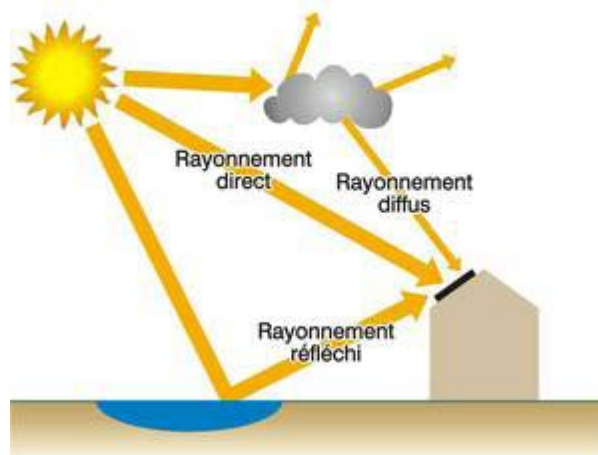


Figure. I.3 : Les différentes composantes du rayonnement solaire [8]

I.4. Potentiel solaire en l'Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose l'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5KW/h sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 (KW/h/m²)/an au Nord et 2263 (KWh/m²)/an au Sud[9].

Le tableau suivant illustre les statistiques des degrés d'ensoleillement par zones :

Région	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	04	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (H/A)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /An)	1700	1900	2650

Tableau I.1 : Potentiel solaire en Algérie[9]

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500 h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6 h/j en période estivale[10].

Grace à sa position géographique (la latitude $\varphi = 27.8^\circ$, la longitude $\lambda = - 0.18^\circ$ et l'altitude = 230 m), la région d'Adrar est grossièrement ensoleillée et est considérée parmi les wilayas qui contiennent le plus grand potentiel de toute l'Algérie (figures I.2).

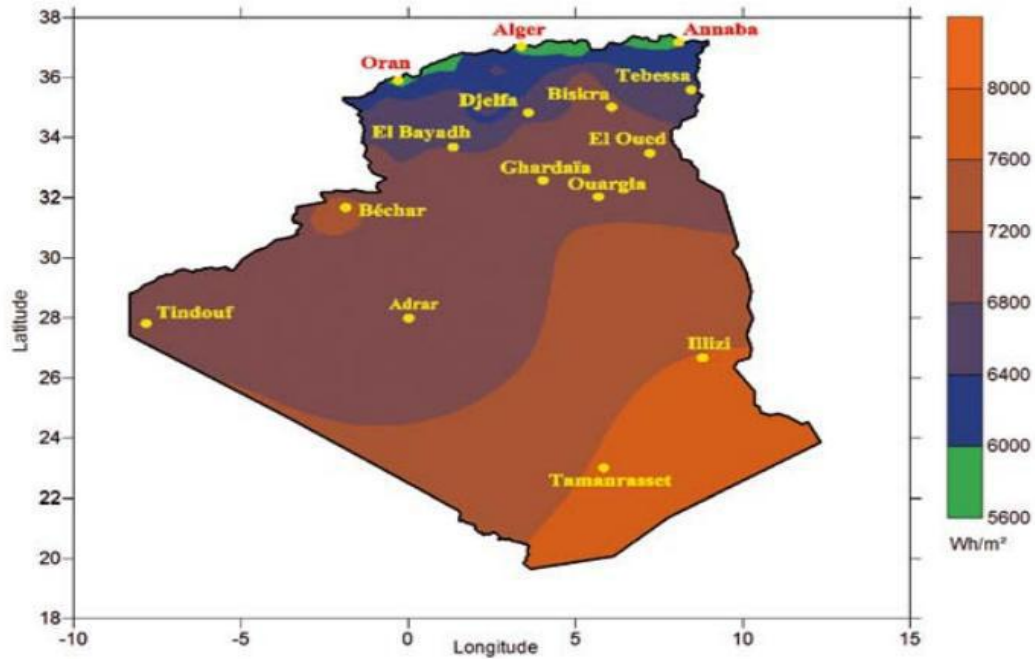


Figure I.4: Moyenne annuelle de la durée d'insolation mesurée- Période 1992-2002 [10].

I.5. Effet Photovoltaïque

Le terme « **photovoltaïque** » vient du Grec, « **photos** » signifie lumière et « **volta** » nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt. En 1905, Einstein découvrit que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique.

L'effet photovoltaïque se manifeste sous forme d'une différence de potentiel entre les deux côtes d'une jonction P-N à semi-conducteur lorsque cette jonction reçoit le rayonnement solaire de longueur d'onde adéquate et reliée à l'extrémité avec une charge, le matériau le plus utilisé industriellement est à base de silicium[11].

I.6. Cellule Photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photovoltaïque, c'est à dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée, l'énergie des photons absorbés permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur, générant ainsi des paires

électron-trou, qui peuvent contribuer au transport du courant par le matériau lorsqu'on le polarise. Comparable à une diode utilisée classiquement en électronique, une cellule PV peut être réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore). Entre les deux zones se développent une jonction PN avec une barrière de potentiel. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode (contact avant) et surtout de collecteurs d'électrons, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode[12].

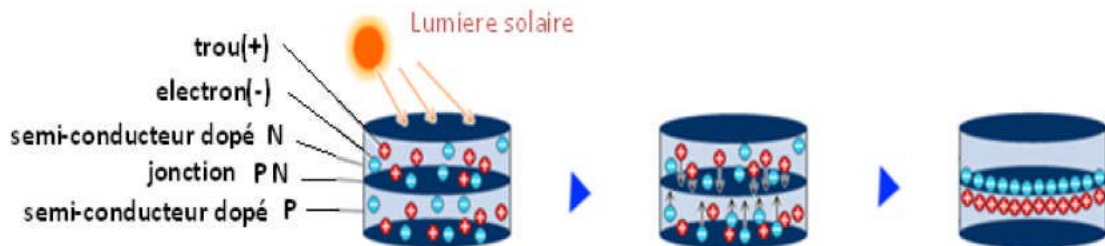


Figure I.5 : Principe de fonctionnement de la cellule [12].

I.6.1. Différents types des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par 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 : Monocristalline, Polycristalline et Amorphe.

- **Les cellules Monocristallines** : sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 15 à 22% (voir Figure 1.4.a).
- **Les cellules Polycristallines** : sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples, Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines (Voir Figure I.4.b).
- **Les cellules Amorphes** : sont composées d'un support en verre ou en matière synthétique sur lequel est disposée une fine couche de silicium (l'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal).

Elle présente l'avantage de fonctionner avec un éclairage faible et d'être sensible aux températures élevées que les cellules mono et poly cristallines. En revanche, leur rendement est faible, compris entre 5 et 9% [13], (Voir Figure I.4.c).

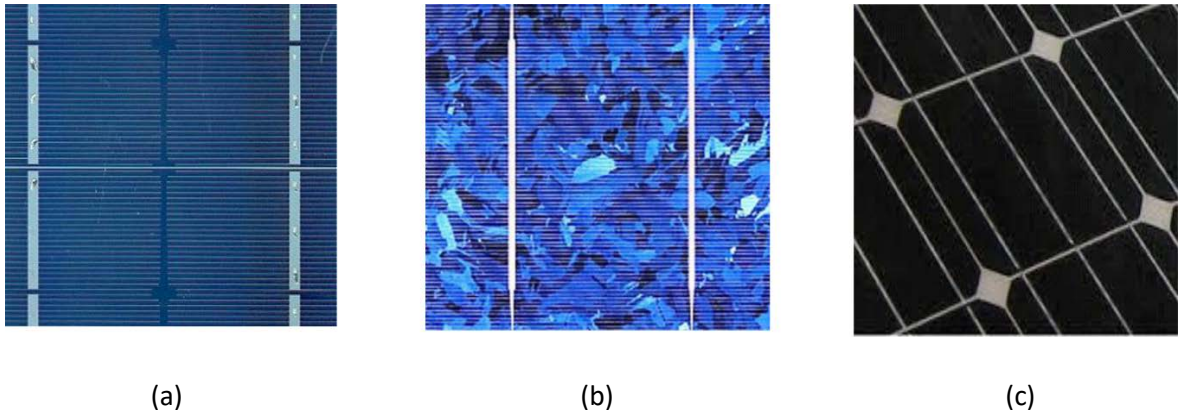


Figure I.6: Types de cellules photovoltaïques. (a) silicium monocristallin, (b) silicium polycrystalline, (c) silicium amorphe[14].

I.6.2. Caractéristiques électriques d'une cellule

a. Caractéristiques courant / tension :

A température et éclairage fixés ($G = 1000\text{W/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$), la caractéristique courant /tension d'une cellule a l'allure suivante :

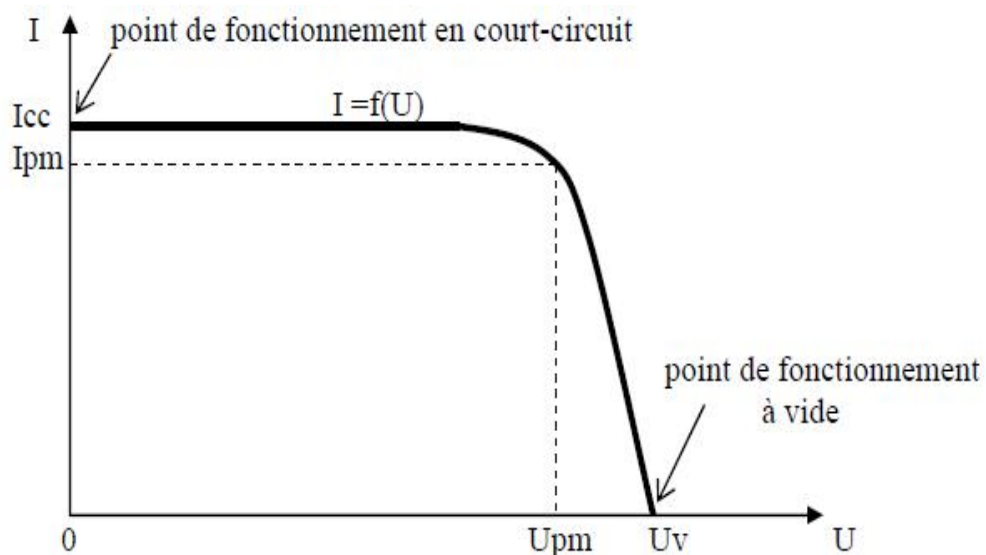


Figure I.7 : Caractéristique $I=f(U)$ d'une cellule photovoltaïque[13].

Sur cette courbe, on repère :

- Le point de fonctionnement à vide : U_v pour $I=0A$.
- Le point de fonctionnement en court-circuit : I_{cc} pour $U=0V$.

b. Caractéristiques puissance / tension :

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

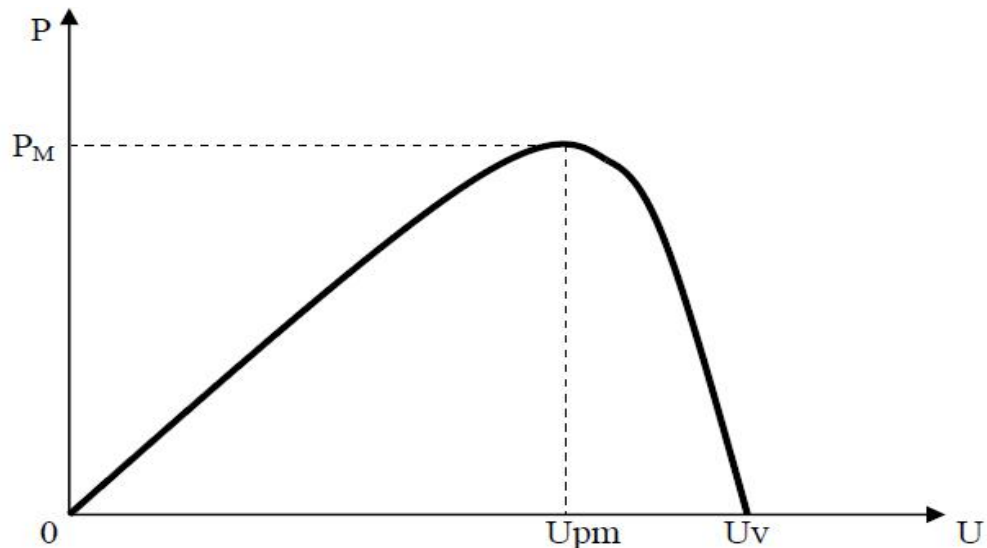


Figure I.8 : Caractéristique $P=f(U)$ d'une cellule photovoltaïque[13].

Cette courbe passe par un maximum de puissance (P_M). A cette puissance correspond, une tension U_{pm} et un courant I_{pm} que l'on peut aussi repérer sur la courbe $I=f(U)$.

I.7. Module (panneau) photovoltaïque

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement de 0,5 Volt. Alors pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module. Une association série de plusieurs cellules donne un module solaire (appelé aussi panneau photovoltaïque), et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un champ photovoltaïque.

Un module photovoltaïque se compose généralement d'un circuit de 36 cellules en série, protégées de l'humidité par un capsulage de verre et de plastique. L'ensemble est ensuite muni d'un cadre et d'une boîte de jonction électrique.

Le passage d'un module à une chaîne (string) se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-

pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée[15].

I.8. Champ photovoltaïque

Afin d'obtenir la tension nécessaire pour une charge, les panneaux sont connectés en série. Ils forment alors une chaîne de modules ou string. Les chaînes sont ensuite associées en parallèle et forment un champ photovoltaïque (champ PV).

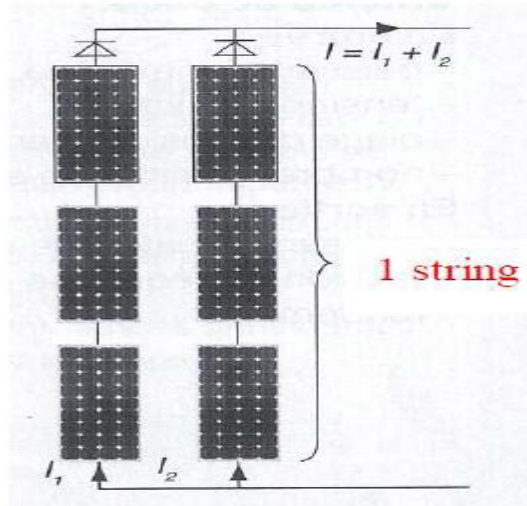


Figure I.9: Deux chaînes de modules constituant un champ photovoltaïque[16] .

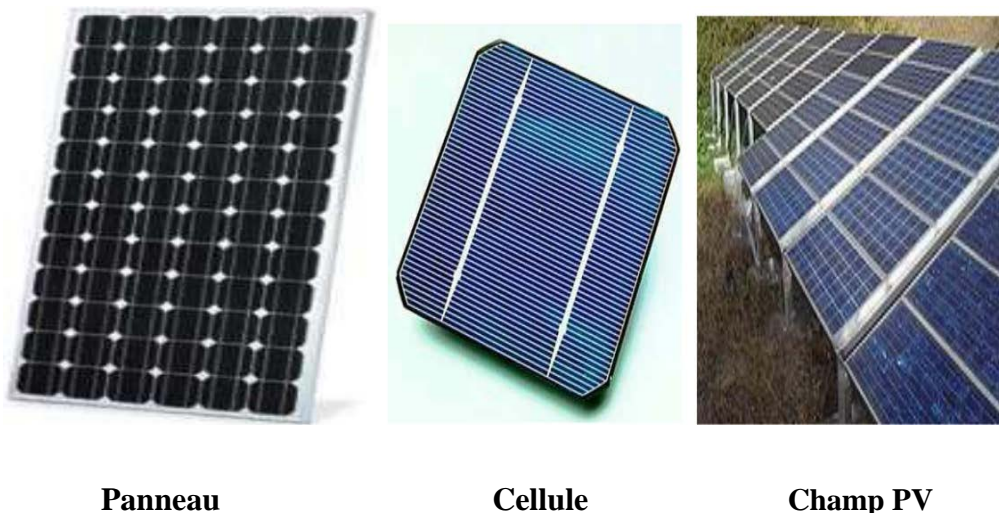


Figure 1.10 : Panneau, cellule et champ photovoltaïques[13].

I.9. Le système photovoltaïque

Le système photovoltaïque SPV est constitué par une source d'énergie (générateur photovoltaïque PV), une interface de puissance (les convertisseurs statiques DC-DC et

DC-AC avec un système de commande) et une charge. Le rôle principal du convertisseur statique est de faire une adaptation d'impédance de sorte que le générateur délivre le maximum d'énergie[17].

I.10. Générateur photovoltaïque GPV

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle la nuit [1].

Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement et nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On équipe alors le système de batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu [1].

Un régulateur est alors indispensable pour protéger les batteries contre les surcharges ou les décharges profondes nocives à sa durée de vie. Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est convertit à l'aide d'un onduleur en courant alternatif [18].

I.11. Association des Cellules photovoltaïques

Le générateur photovoltaïque est obtenu par l'association de plusieurs modules connectés soit en série ou en parallèle selon les besoins des applications visées.

I.11.1. Association des cellules photovoltaïques en Série

Dans un groupement de n_s cellules en série, la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, alors que le courant traversant des cellules reste le même. La (figure I.10) montre la caractéristique résultante [19].

$$(I_{cc_{ns}}, V_{co_{ns}}), \text{ Avec : } I_{cc_{ns}} = I_{cc} \text{ et } V_{co_{ns}} = n_s * V_{co}$$

$$I_{scc} = I_{cc} \text{ et } V_{sco} = n_s * V_{co}$$

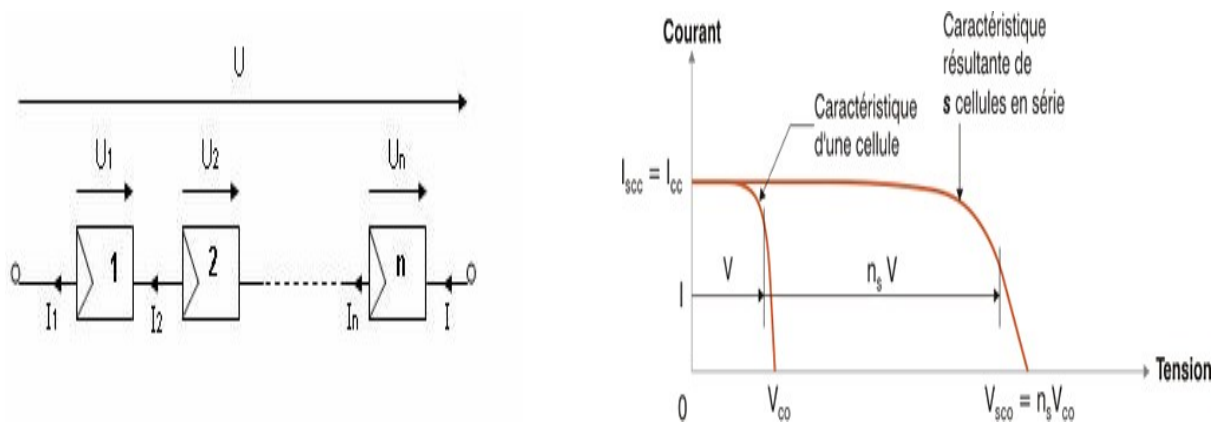


Figure I.11 : la caractéristique résultante obtenue en association en série[19].

I.11.2. Association des cellules photovoltaïques en Parallèle

Dans le cas d'un groupement de np cellules en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par l'addition des courant .la(figure II.11) illustre la caractéristique résultante avec:[19]

$$I_{cc_{np}} = n_p * I_{cc} \text{ et } V_{Co_{np}} = V_{Co}$$

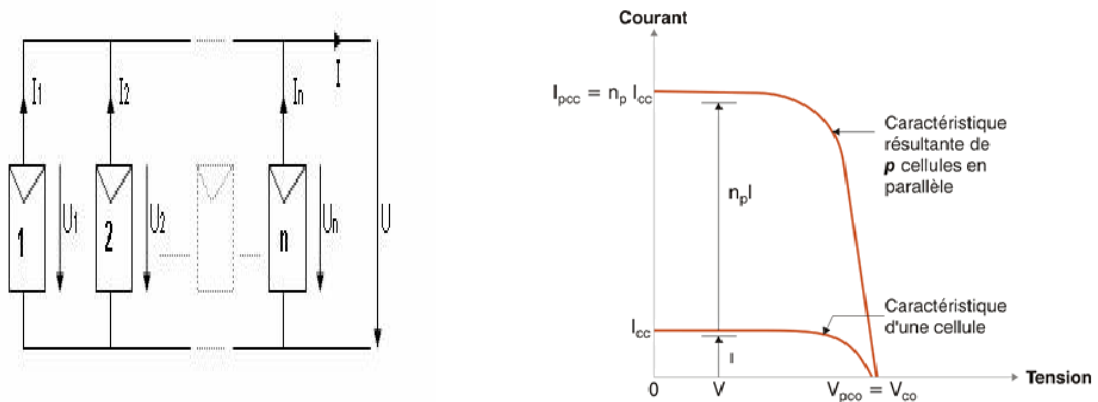


Figure I.12 : la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles[19].

I.11.3. Association des cellules photovoltaïques mixte

Selon l'association en série et en parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale son données par les relations suivant :

$$I_{spcc} = np * I_{cc} \text{ et } V_{spco} = ns * V_{co} [12]$$

n_p : nombre de cellule en parallèle.

n_s : nombre de cellule en série.

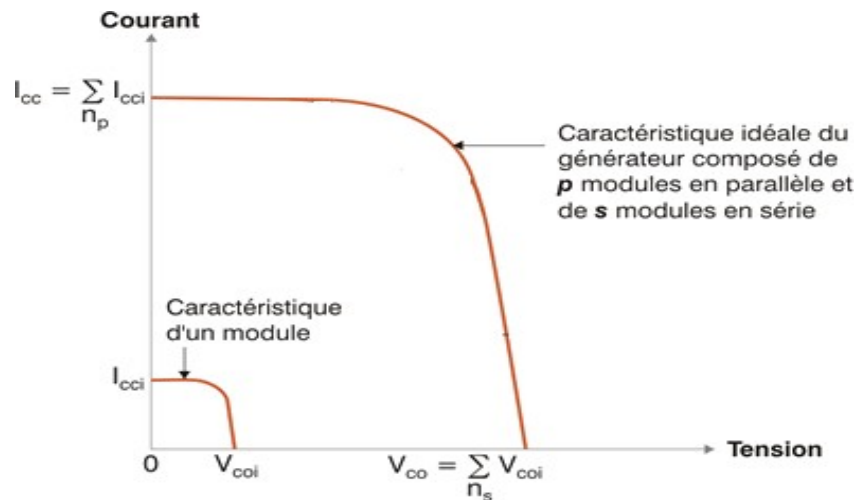


Figure I.13 : la caractéristique résultante obtenue en association en parallèles/série[19].

I.12. Caractéristiques d'un module photovoltaïques

Un GPV élémentaire (peut être un seul panneau) décrit par les paramètres suivants[20]:

- a. **La puissance de crête P_c** : puissance nominale délivrée par le module dans les conditions standards (25 °C et un éclairement de 1000 W/m²). Elle s'exprime en Watt crête (Wc).
- b. **La caractéristique I(V)** : courbe représente le courant I débit par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- c. **La tension à vide V_{oc}** : tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement « plein soleil ».
- d. **Le courant de court-circuit I_{SC}** : courant débit par un module en court-circuit pour un éclairement « plein soleil ».
- e. **Le point de fonctionnement optimum (point de puissance maximale)** : il est en fonction de l'insolation .c'est le point pour lequel le module fournit son maximum du courant I_{mpp} sous sa tension maximale V_{mpp} (lorsque la puissance de crête est maximale en plein soleil ($P_{mpp} = V_{mpp} \times I_{mpp}$)).
- f. **le rendement** : rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente ; Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite P_{mpp} et la puissance du rayonnement solaire

parvenant au module. Soit (S) la surface du module et (G) l'éclairement, ce rendement a pour expression : $\mu = \frac{P_{mpp}}{G * S}$

g. le facteur de forme : rapport entre la puissance optimale P_{mpp} et la puissance maximale que peut avoir le module.

$$FF = \frac{P_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$$

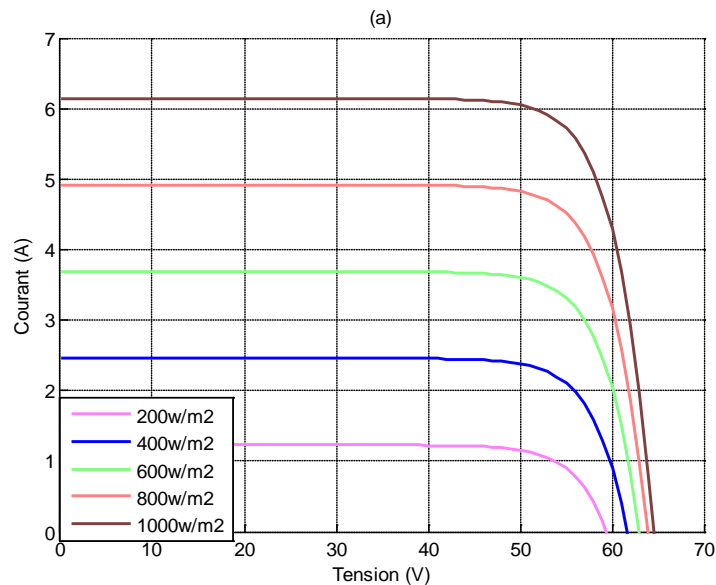
I.13. Influence de l'éclairement et de la température sur un générateur photovoltaïque

I.13.1. Influence de l'éclairement

L'éclairement correspond à l'intensité lumineuse captée par le module photovoltaïque, et se mesure en W/m². La nuit, il est nul (0 W/m²), et il varie au cours de la journée entre 0 et 1000 W/m² (valeur maximum), en fonction de la saison.

L'éclairement a une nette incidence sur la valeur de I_{cc} . Lorsqu'il double, I_{cc} double aussi. Il a très peu d'incidence sur la tension à vide V_{co} .

Dans la figure. (13a, 13b), nous représentons les résultats concernant les caractéristiques I(V) et P(V) du panneau à 25° obtenus pour diverses valeurs de l'éclairement[21].



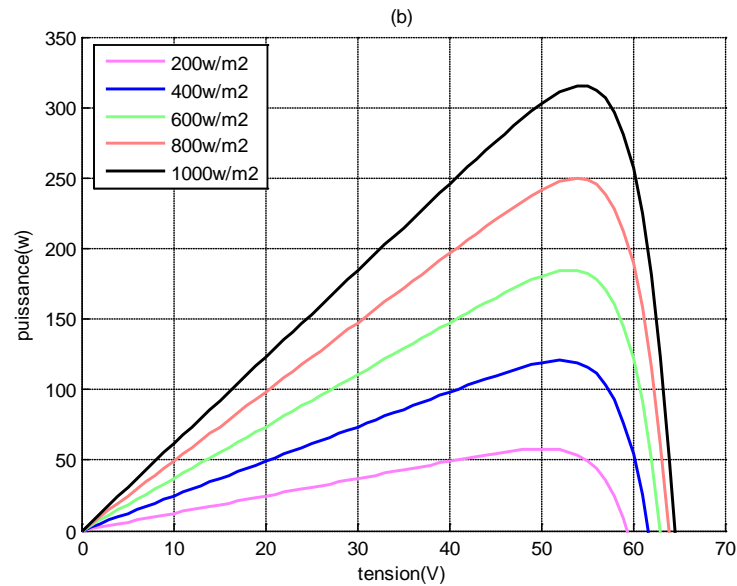


Figure I.14: a -Courbes I(V) d'un panneau à divers ensoleillements à T=25°C

b-Courbes P(V) d'un panneau à divers ensoleillements à T=25°C

I.13.2. Influence de la température

L'influence de la température est importante et a des conséquences pour la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques. La température est un paramètre essentiel puisque les cellules sont exposées aux rayonnements solaires, susceptibles de les échauffer.

La température du module a une forte influence sur la tension à vide du module. Plus elle augmente, plus la tension à vide V_{co} diminue. Par contre, elle influence très peu le courant de court-circuit I_{cc} .

La figure (14a, 14b) décrit le comportement du module sous un éclairage fixe de $1W/m^2$, et à des températures comprises entre 0°C et 45°C. Nous remarquons que le courant augmente avec la température; par contre la tension de circuit ouvert diminue. Ceci entraîne une diminution de la puissance maximale disponible[21].

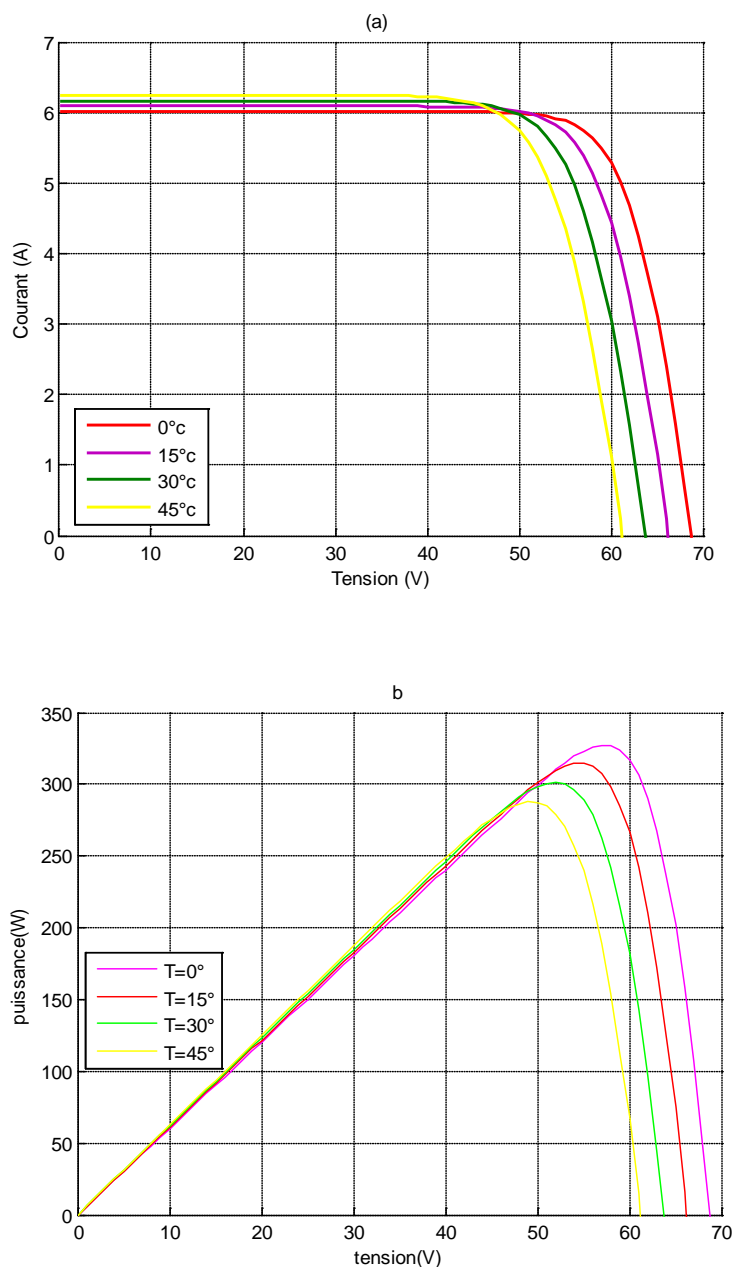


Figure I.15 : a- L'influence de la température sur les courbes $I(V)$ à $G=1000 \text{ W/m}^2$

b- L'influence de la température sur les courbes $P(V)$ à $G=1000 \text{ W/m}^2$

I.14. Types de Systèmes PV

Les systèmes PV sont classés par rapport à leurs fonctionnements en trois types: fonctionnement autonomes, hybrides et reliés au réseau.

Le type de fonctionnement choisi dépendra des besoins énergétiques et de l'emplacement par rapport au réseau.

I.14.1. Systèmes PV autonomes

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique[22].

I.14.2. Systèmes PV hybrides

Les systèmes hybrides consistent en l'association de deux ou plusieurs technologies complémentaires de manière à accroître la fourniture d'énergie. Les sources 'énergie comme le soleil et le vent ne délivrent pas une puissance constante, et leur combinaison peut permettre de parvenir à une production électrique plus continue dans le temps. Les systèmes hybrides fonctionnent tels que, les batteries sont chargées par les panneaux solaires (le jour) et par le générateur éolien (lorsqu'il y a du vent)[21].

I.14.3. Systèmes PV raccordés au réseau

Le système peut être photovoltaïque couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur courant continu- courant alternatif. Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. L'énergie produite est consommée sur place le surplus étant injecté dans le réseau, qui alimente les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil.

Ici en Algérie il n y a pas encore une vaste utilisation de ce type de système mais en France par exemple, il y a eu des lois qui favorise ce type d'installation en obligeant les fournisseurs a racheté l'énergie électrique au particulier[23].

I.15. Les avantages et les inconvénients de la conversion photovoltaïque

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages :

I.15.1. Les avantages

- Une haute fiabilité : elle ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers.
- Leurs couts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits.
- Non polluante, silencieuse et n'entraîne aucune perturbation du milieu.

I.15.2. Les inconvénients

Le système photovoltaïque présente toute fois les inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût initial élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesels que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
- Tributaire des conditions météorologiques[12].

I.16. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur le système photovoltaïque. Dans la première partie on a donné une généralité sur le système solaire ainsi que la conversion photovoltaïque avec une description de la cellule PV, l'élément de base de la conversion photonique-électrique, du module PV, du champ PV et du GPV. La deuxième partie du chapitre est consacrée au générateur PV, l'influence de la température et de l'éclairement sur leur caractéristique $I(V)$ et $P(V)$.

Dans le chapitre prochain, on présentera une étude mathématique sur le moteur asynchrone afin de l'utiliser dans notre simulation par matlab/simulink.

Chapitre II :
Modélisation d'un
moteur asynchrone

II.1. Introduction

Le modèle de la machine asynchrone présenté traditionnellement est un modèle "régime permanent". C'est à dire que la machine est supposée fonctionner en régime établi, qu'elle est alimentée avec un système triphasé de valeur efficace constante et qu'elle tourne à une vitesse constante. Les grandeurs sont alors sinusoïdales et l'approche dans l'espace complexe est valable (vecteurs de Fresnel).

Ce modèle n'est plus valable si la machine est alimentée par un onduleur triphasé commandé suivant un schéma de contrôle. Ce dernier est basé sur le modèle "transitoire" ou «dynamique" de la machine qui est le contrôle vectoriel de la machine. Ce type de contrôle permet d'avoir une dynamique de réponse plus rapide et une meilleure précision du contrôle du couple. Il est cependant plus difficile à implanter puisqu'il requiert plus de puissance de calcul en temps réel de la part de l'organe de commande. C'est pourquoi développer de nouvelles lois de commande[24].

Pour machines à courant alternatifs exige l'aspect de modélisation pour leur pilotage. Cette modélisation repose principalement sur les travaux de G-Kron, basé sur un approche tensorielle et qui ont donné naissance à la notion de machine généralisé, un cas particulier de ce concept est le modèle de Park. Dans ce chapitre sera présentée la modélisation linéaire de Park d'une machine asynchrone suivie d'une simulation numérique du modèle de cette machine dont les paramètres.

II.2. Modélisation de la machine asynchrone

II.2.1. Hypothèses simplifications

L'étude de ce moteur traduit les lois de l'électromagnétisme dans le contexte habituel d'hypothèses simplificatrices suivantes :

- Entrefer constant.
- Effet des encoches négligé.
- Circuit magnétique non saturé.
- Pertes ferromagnétiques négligeables.
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement est négligeable

Parmi les conséquences de ces hypothèses on peut citer :

- L'additivité des flux.
- La constance des inductances propres.

- Il y a une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

II.2.2. Schéma équivalent de la machine asynchrone

Le fonctionnement physique du moteur à induction est représenté par le circuit équivalent par phase de la (figure II.1).

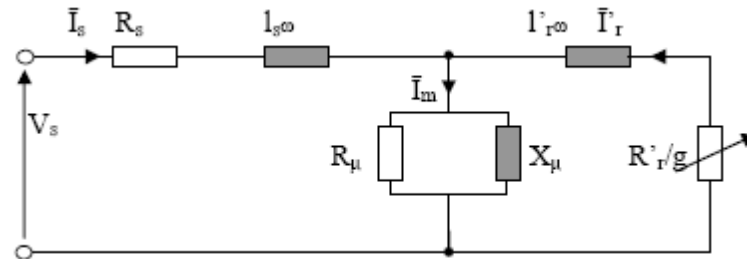


Figure II.1 : Schéma équivalent du moteur asynchrone en régime permanent.

$l_s \omega$: La réactance cyclique de fuite d'une phase primaire,

$l_r \omega$: La réactance cyclique de fuite d'une phase secondaire,

X_μ : La réactance cyclique magnétisante,

R'_r, l'_r : Les valeurs de $R_r, l_r \omega$ ramenées au primaire,

I'_r : le courant secondaire ramené au primaire,

I_m : le courant magnétisant

II.3. Modèle mathématique de la MAS

Une machine asynchrone triphasée comporte trois bobines statoriques (a_s, b_s, c_s) décalées entre elles par un angle de $2\pi/3$ et alimentées par un système de courants triphasés équilibrés. Ces deux conditions sont nécessaires pour la création d'un champ tournant au sein de la machine (théorème de Ferrari).

Les trois autres bobines identiques de répartition similaire à celles du stator sont logées dans l'armature rotorique et subissent l'action du champ tournant. Ces dernières sont montées en étoile et sont accessibles par la plaque à bornes et mises en court-circuit pendant le régime permanent[25].

La machine électrique généralisée triphasée est une machine biphasée idéale avec six enroulements (trois sur le stator et trois sur le rotor).

La mise sous forme d'un modèle mathématique d'une machine asynchrone nous facilite largement son étude pour sa commande dans les différents régimes de fonctionnement transitoire ou permanent, il permet d'observer les différentes évolutions des grandeurs électromécaniques et le contrôle nécessaire aux problèmes qui accompagnent les opérations de freinage, variation de charge, etc.

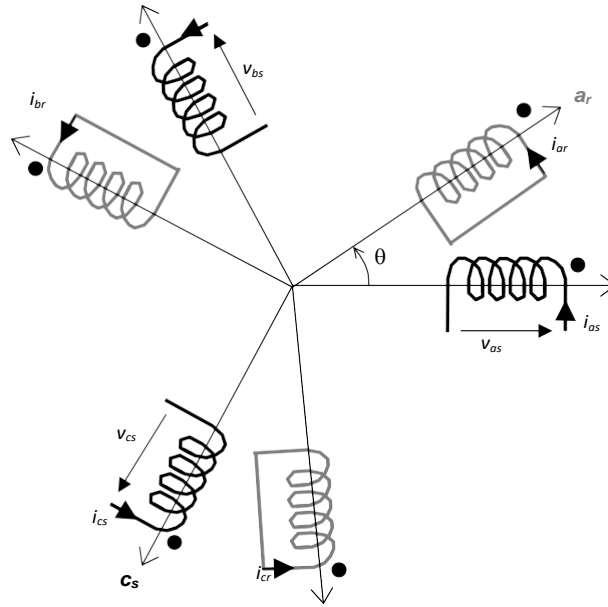


Figure II.2 : Représentation des enroulements statoriques et rotoriques.

a_r, b_r, c_r : correspondent aux trois phases du rotor,

A_s, B_s, C_s : correspondent aux trois phases du stator.

II.3.1. Les équations électriques de la MAS

Les enroulements des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques dans l'espace peuvent être représentés comme indiqué en (figure II.2). Les phases rotoriques sont court circuits sur elles même. θ : est l'angle électrique entre l'axe de la phase a statorique et la phase a rotorique.

Les six enroulements (a_r, b_r, c_r et A_s, B_s, C_s) obéissent aux équations matricielles

$$[V_s] = R_s [i_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad (\text{II.1})$$

$$[V_r] = R_r [i_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \quad (\text{II.2})$$

Les équations liées au stator

$$\begin{cases} V_{as} = R_{as} i_{as} + \frac{d}{dt}(\varphi_{as}) \\ V_{bs} = R_{bs} i_{bs} + \frac{d}{dt}(\varphi_{bs}) \\ V_{cs} = R_{cs} i_{cs} + \frac{d}{dt}(\varphi_{cs}) \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{as} & 0 & 0 \\ 0 & R_{bs} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Les équations liées au rotor

$$\begin{cases} V_{ar} = R_{ar} i_{ar} + \frac{d}{dt}(\varphi_{ar}) \\ V_{br} = R_{br} i_{br} + \frac{d}{dt}(\varphi_{br}) \\ V_{cr} = R_{cr} i_{cr} + \frac{d}{dt}(\varphi_{cr}) \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ar} & 0 & 0 \\ 0 & R_{br} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Tel que :

$$R_{as} = R_{bs} = R_{cs} = R_s \quad (\text{II.7})$$

$$R_{ar} = R_{br} = R_{cr} = R_r \quad (\text{II.8})$$

R_s : Résistance propre d'une phase statorique.

R_r : Résistance propre d'une phase rotorique.

NB : Les tensions des phases rotoriques sont nulles par ce qu'elles sont court-circuitées.

II.3.2. Les équations magnétiques

Les équations magnétiques sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} \varphi_s \\ \varphi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [l_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [l_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Tel que:

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t \quad (\text{II.10})$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_s \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} ; \quad \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$$\begin{bmatrix} i_s \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} ; \quad \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

$$[l_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} ; \quad [l_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_s & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Cette dernière matrice est nommée inductance mutuelle entre le rotor et le stator.

M : représente la valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une bobine statorique et une bobine rotorique lorsque celles-ci sont en regard l'une de l'autre.

l_s : Inductance propre d'une phase statorique.

l_r : Inductance propre d'une phase rotorique.

M_s : Inductance mutuelle entre deux phases de stator.

M_r : Inductance mutuelle entre deux phases de rotor.

θ_r : Écart angulaire entre une phase statorique et la phase rotorique correspondante.

Les équations différentielles décrivant le fonctionnement de cette machine étant fonction de θ_r (système à résolution difficile). L'application de la transformation de Park s'avère nécessaire, cette transformation appliquée aux courants, tensions et flux permet d'obtenir des équations différentielles à coefficients constants.

A partir des équations (II-3), (II-5) et (II-6) on peut tirer les équations électriques suivantes :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt} ([L_s][i_s] + [M_{sr}][i_r]) \quad (\text{II.15})$$

$$[V_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt} ([L_r][i_r] + [M_{sr}][i_s]) \quad (\text{II.16})$$

II.3.3. Les équations mécaniques

Pour une machine à 2P pôles (machine multipolaire) :

$$\frac{d\omega_{mec}}{dt} = \frac{P}{J} (T_e - T_1 - f \frac{\omega}{P}) \quad (\text{II.17})$$

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_L - f \Omega_r) \quad (\text{II.18})$$

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

f : coefficient du frottement visqueux.

T_e : Couple électromagnétique.

T_L : Couple de charge.

Ω_r : Vitesse rotorique de moteur.

ω_{mec} : Vitesse mécanique de moteur.

p : nombre de paire de pôles.

II.4. Transformation triphasé-biphasé

Dans un but simplificateur, pour assurer une bonne simulation, le passage d'une forme triphasé à un autre biphasé est très important par le biais de la transformation de Park.

II.4.1. La Transformation de Park

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et flux un changement de variables faisant intervenir l'angle entre l'axe d'une phase statorique et le système d'axe (d,q), elle est définie par :

$$K(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left[\theta - \frac{2\pi}{3}\right] & \cos\left[\theta + \frac{2\pi}{3}\right] \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

L'angle θ dans la matrice $P(\theta)$ prend la valeur θ_s pour les grandeurs statoriques et la valeur $(\theta_s - \theta_r)$ pour les grandeurs rotoriques d'autre part :

$$K(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

II.4.2. Application de la transformation de Park

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée – diphasée. Elle permet de passer du repère abc vers le repère dq. Le repère d, q est mobile, par contre le repère $\alpha\beta$ est toujours fixe par rapport au repère abc. Il forme avec le repère fixe $\alpha\beta$ un angle qui est appelé l'angle de la transformation de Park ou angle de Park.

La (figure. II.3) illustre la schématisation d'une machine asynchrone triphasée et sa machine biphasée équivalente issue de la transformation de Park.

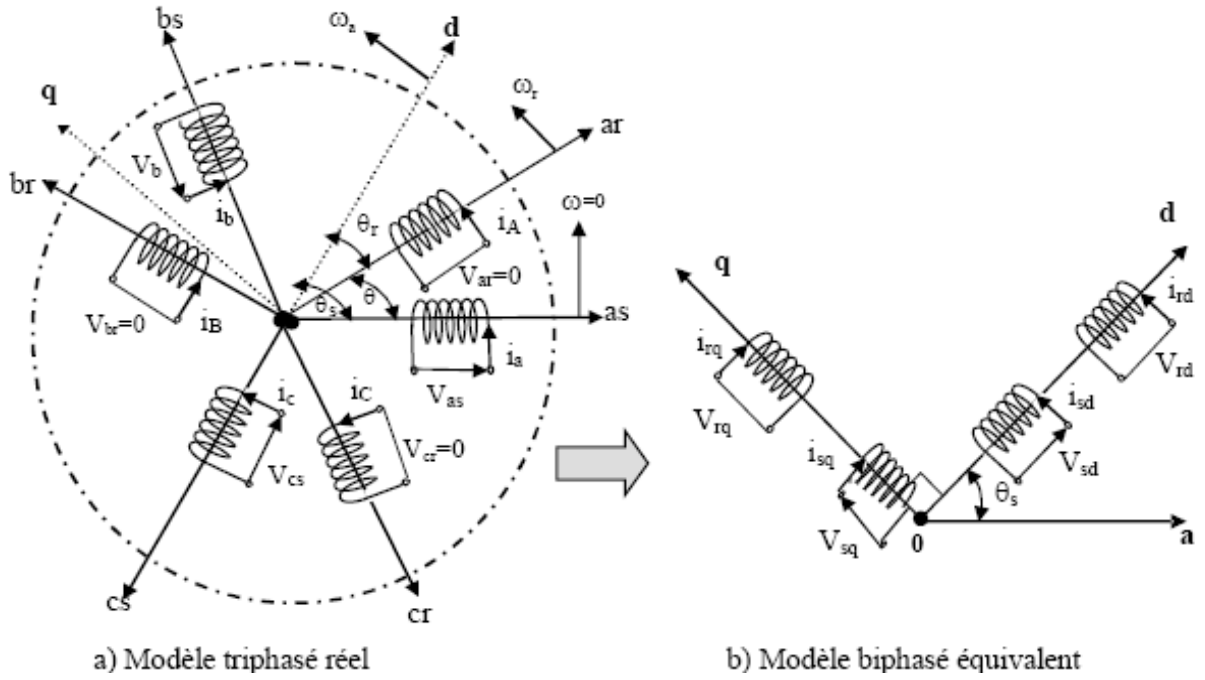


Figure II.3 : Représentation de la machine asynchrone triphasée et sa machine biphasée.

La transformation de Park appliquée sur le système d'équations (II-11)

$$[K(\theta)^{-1}][V_{qd0}] = [R][P(\theta)^{-1}][i_{dq0}] + \frac{d}{dt}([K][\varphi_{dq0}]) \quad (\text{II.21})$$

$$[V_{qd0}] = [R][i_{dq0}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{dq0}] + [K(\theta)]\left[\frac{d[K(\theta)^{-1}]}{dt}\right][\varphi_{dq0}] \quad (\text{II.22})$$

$$[K(\theta)]\left[\frac{d[K(\theta)^{-1}]}{dt}\right] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \left(\frac{d\theta}{dt}\right) \quad (\text{II.23})$$

Tel que :

$\theta_s = \theta$: Pour les grandeurs statoriques.

$\theta = \theta_s - \theta_r$: Pour les grandeurs rotoriques

On remplace la relation (II-18) dans (II-17) on obtient Le modèle électrique dynamique pour l'enroulement triphasé équivalent :

$$\begin{cases} V_d = Ri_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \left[\frac{d\theta}{dt}\right] \varphi_q \\ V_q = Ri_q + \frac{d\varphi_q}{dt} - \left[\frac{d\theta}{dt}\right] \varphi_d \\ V_0 = Ri_0 + \frac{d\varphi_0}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

NB : La composante homopolaire du système (II-19) est de valeur nulle pour un système équilibré. À partir de ce qui précède on tire les équations des tensions statoriques et rotoriques dans le repère de Park sous la forme suivante [13]

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \left[\frac{d\theta_s}{dt} \right] \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} - \left[\frac{d\theta_s}{dt} \right] \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \left[\frac{d\theta}{dt} \right] \varphi_{qr} = 0 \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - \left[\frac{d\theta}{dt} \right] \varphi_{dr} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

On applique la transformation de Park pour établir les relations entre les flux et ceux des axes (abc) :

$$\begin{cases} [\varphi_{dq0s}] = [K(\theta)][\varphi_s] \\ [\varphi_{dq0r}] = [K(\theta)][\varphi_r] \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Au stator :

$$[\varphi_{dq0s}] = [K(\theta)]\{[L_s][i_s] + [M_{sr}][i_r]\} \quad (\text{II.26})$$

$$[\varphi_{dq0s}] = [K(\theta)][L_r][K(\theta)]^{-1}[i_{rdq0}] + [K(\theta)][M_{sr}][K(\theta)]^{-1}[i_{sdq0}] \quad (\text{II.27})$$

Au rotor :

$$[\varphi_{dq0r}] = [K(\theta)]\{[L_r][i_r] + [M_{sr}][i_s]\} \quad (\text{II.28})$$

$$[\varphi_{dq0r}] = [K(\theta)][L_r][K(\theta)]^{-1}[i_{rdq0}] + [K(\theta)][M_{sr}][K(\theta)]^{-1}[i_{sdq0}] \quad (\text{II.29})$$

Après un calcul long et fastidieux les équations (II-27) et (II-29) nous donnent :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{0s} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \\ \varphi_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s - M_s & 0 & 0 & \frac{3}{2}M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & l_s - M_s & 0 & 0 & \frac{3}{2}M_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & l_s + 2M_s & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2}M_{sr} & 0 & 0 & l_r - M_r & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}M_{sr} & 0 & 0 & l_r - M_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_r + 2M_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{0s} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{0r} \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

On pose :

$L_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique statorique,

$L_r = l_r - M_r$: Inductance cyclique rotorique,

$L_m = l_r - M_r$: Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor,

$L_{0s} = l_s + 2M_s$: Inductance homopolaire statorique,

$L_{0r} = l_r + 2M_r$: Inductance homopolaire rotorique.

Si on élimine la composante homopolaire du système (II-26) on obtient :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

En remplaçant les équations des flux dans les équations des tensions.

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s \frac{d}{dt} & -L_s \frac{d\theta_s}{dt} & L_m \frac{d}{dt} & -L_m \frac{d\theta_s}{dt} \\ L_s \frac{d\theta_s}{dt} & R_s + L_s \frac{d}{dt} & L_s \frac{d\theta_s}{dt} & L_m \frac{d}{dt} \\ L_m \frac{d}{dt} & -L_m \frac{d\theta}{dt} & R_r + L_r \frac{d}{dt} & -L_r \frac{d\theta}{dt} \\ L_m \frac{d\theta}{dt} & L_m \frac{d}{dt} & L_r \frac{d\theta}{dt} & R_r + L_r \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Le rotor étant en court circuit :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s \frac{d}{dt} & -\omega_s L_s & L_m \frac{d}{dt} & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_s & R_s + L_s \frac{d}{dt} & \omega_s L_s & L_m \frac{d}{dt} \\ L_m \frac{d}{dt} & -(\omega_s - \omega_r) L_m & R_r + L_r \frac{d}{dt} & -(\omega_s - \omega_r) L_r \\ (\omega_s - \omega_r) L_m & L_m \frac{d}{dt} & (\omega_s - \omega_r) L_r & R_r + L_r \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Avec :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \quad , \quad \omega_s - \omega_r = \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II.30})$$

À partir du système d'équations (II-27) on peut exprimer les courants en fonction des flux comme suit :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{1}{\sigma L_s} \varphi_{ds} - \frac{1-\sigma}{\sigma L_m} \varphi_{dr} \\ i_{qs} = \frac{1}{\sigma L_s} \varphi_{qs} - \frac{1-\sigma}{\sigma L_m} \varphi_{qr} \\ i_{dr} = \frac{1}{\sigma L_s} \varphi_{dr} - \frac{1-\sigma}{\sigma L_m} \varphi_{ds} \\ i_{qr} = \frac{1}{\sigma L_s} \varphi_{qr} - \frac{1-\sigma}{\sigma L_m} \varphi_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

Avec : $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ (σ : coefficients de fuite totale ou coefficient de dispersion V).

A partir des équations du système (II.22)

$$\begin{cases} \left[\frac{d\varphi_{ds}}{dt} \right] = -R_s i_{ds} + \left[\frac{d\theta_s}{dt} \right] \varphi_{qs} + V_{ds} \\ \left[\frac{d\varphi_{qs}}{dt} \right] = -R_s i_{qs} - \left[\frac{d\theta_s}{dt} \right] \varphi_{ds} + V_{qs} \\ \left[\frac{d\varphi_{dr}}{dt} \right] = -R_r i_{dr} + \left[\frac{d\theta_r}{dt} \right] \varphi_{qr} = 0 \\ \left[\frac{d\varphi_{qr}}{dt} \right] = -R_r i_{qr} - \left[\frac{d\theta_r}{dt} \right] \varphi_{dr} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

II.4.3. Choix du référentiel

Le référentiel est choisi en fonction de l'étude à réaliser. Dans la pratique il existe trois types de référentiels:

a. Référentiel lié au stator

On remplace dans le système (1.30) par :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \quad ; \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dt} (\theta_s - \theta_r) = -\dot{\theta}_r$$

Ce référentiel est choisi lorsqu'on étudie les variations de la vitesse de rotation, associé ou non avec des variations de la fréquence d'alimentation.

b. Référentiel lié au rotor

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad \text{et} \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dt} (\theta_s - \theta_r) = 0$$

Ce référentiel est intéressant dans les problèmes où la vitesse de rotation est considérée comme constante, par exemple pour l'étude des contraintes d'un court-circuit.

c. Référentiel lié au champ tournant

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad \text{et} \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dt} (\theta_s - \theta_r) = \omega_s - \omega_r$$

Ce référentiel est le seul qui n'introduit pas de simplifications dans la formulation des équations. Il est très intéressant dans les problèmes où la fréquence d'alimentation est constante, ce qui simplifie considérablement les calculs. Il est également utilisé dans les problèmes d'alimentation des moteurs asynchrones par convertisseurs statiques de fréquence lorsque l'on veut étudier la fonction de transfert du moteur relativement à des petites perturbations autour d'un régime donné. C'est ce référentiel que nous allons choisir parce qu'il est mieux adapté à notre étude.

II.4.4. Modèle de la MAS dans le référentiel lié au champ tournant (d, q)

Le modèle de la machine asynchrone a pour but d'établir les performances que nous pouvons espérer d'un actionneur réel, dans notre travail nous avons choisi un référentiel immobile au champ tournant, afin de pouvoir orienter le flux rotorique.

Les tensions statoriques (V_{ds}, V_{qs}) sont considérées comme variables de commande les courants et les $[i_{ds}, i_{qs}, \varphi_{dr}, \varphi_{qr}]$ et les vitesses mécanique ω_{mec} comme variables d'état.

La représentation d'état des équations (I-31) est donnée sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = \left(-\frac{1}{\sigma T_s} - (1-\sigma)\frac{1}{\sigma T_r}\right) i_{ds} + \omega_s i_{qs} + \frac{(1-\sigma)}{\sigma L_m T_r} \varphi_{dr} + \frac{(1-\sigma)}{\sigma L_m} \omega_r \varphi_{qr} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{ds} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = -\omega_s i_{ds} + \left(-\frac{1}{\sigma T_s} - (1-\sigma)\frac{1}{\sigma T_r}\right) i_{qs} + \frac{(1-\sigma)}{\sigma L_m} \omega_r \varphi_{qr} + \frac{(1-\sigma)}{\sigma L_m T_r} \varphi_{dr} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{qs} \\ \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{ds} - \frac{1}{T_r} \varphi_{dr} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ \frac{d\varphi_{qr}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} i_{qs} - \frac{1}{T_r} \varphi_{qr} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (I.35)$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{L_r^2}{L_s L_r} \quad (\sigma : \text{Coefficients de fuite totale .ou coefficient de dispersion de Blondel}).$$

$$T_s = \frac{L_s}{R_s} : \text{Constante de temps statorique.}$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} : \text{Constante de temps rotorique.}$$

$$\omega_r = P\Omega_r : \text{La pulsation mécanique du rotor.}$$

$$\frac{dX}{dt} = AX + Bu ;$$

Avec :

X : Vecteur d'état.

u : Vecteur de commande.

A : Matrice d'évolution du système.

B : Matrice de commande du système.

Le modèle de la machine asynchrone est donné sous forme matricielle suivante:

$$A = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + (1 - \sigma) \frac{1}{\sigma T_r}\right) & \omega_s & \frac{(1-\sigma)}{\sigma L_m T_r} & \frac{(1-\sigma)}{\sigma L_m} \omega_r \\ -\omega_s & -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + (1 - \sigma) \frac{1}{\sigma T_r}\right) & -\frac{(1-\sigma)}{\sigma L_m} \omega_s & -\frac{(1-\sigma)}{\sigma L_m T_r} \\ \frac{L_m}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & (\omega_s - \omega_r) \\ 0 & \frac{L_m}{T_r} & -(\omega_s - \omega_r) & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \quad (I.36)$$

$$X = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \varphi_{dr} \quad \varphi_{qr}]^t \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} u = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} \quad (I.37)$$

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons traité la complexité du modèle de la machine asynchrone qui a été réduit grâce aux hypothèses simplificatrices par la transformation de Park en une machine biphasée équivalente.

Dans le chapitre prochain, on présentera une étude et une modélisation sur les convertisseurs DC-DC (hacheurs), sur l'onduleur et leurs commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale afin d'alimenter un moteur asynchrone.

Chapitre III :

*Etude et simulation des
éléments de la chaîne de
conversion photovoltaïque*

III.1. Introduction

Un système photovoltaïque est une chaîne d'éléments constituant de la source de production représentée par le générateur photovoltaïque qui produit l'énergie électrique à partir de l'énergie solaire, les convertisseurs statiques (hacheur+onduleur) afin d'adapter le système et assurer le point maximum de puissance et la charge qui consomme et exploite la puissance fournie par le GPV. Notre système est composé d'un GPV, d'un hacheur élévateur (Boost), d'un onduleur et d'un moteur asynchrone.

Ce chapitre est destiné à l'étude, la modélisation et l'adaptation de notre travail à un système photovoltaïque SPV donnée, on donnant une illustration sur chaque élément. On va présenter le modèle mathématique d'une cellule et d'un GPV avec le modèle de simulation, le convertisseur DC-DC et leurs différents types, puis on va modéliser le hacheur Boost, le convertisseur DC-AC (l'onduleur). On va citer le principe de la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour chercher le point où la puissance du GPV délivrée au moteur asynchrone est maximale. Ainsi le principe de la commande MLI en précisant celle de sinus-triangle.

III.2. Présentation du système photovoltaïque

Notre système de conversion proposé est constitué de:

- **Générateur photovoltaïque**

Se basé sur un module **SPR 315 E**de chez SUNPOWER, composé de 96cellules en silicium monocristallin connectées entre elle en série pour produire une puissance de 315 W.

- **Hacheur Boost**

Le hacheur boost est élévateur de la tension de sortie du générateur PV, muni d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) permettant la poursuite du point a puissance maximale, basée sur la méthode de Perturbe&observe (P&O).

- **Onduleur**

L'onduleur triphasé à MOSFET (Metal Oxide Semi conductor Field Effect Transistor), son principe de commande est basé sur la méthode du sinus-triangulaire pour la génération des impulsions de commande des MOSFET par MLI (sinus-triangle).

- **Moteur asynchrone**

La charge est représentée par le moteur asynchrone à cage d'écureuil.

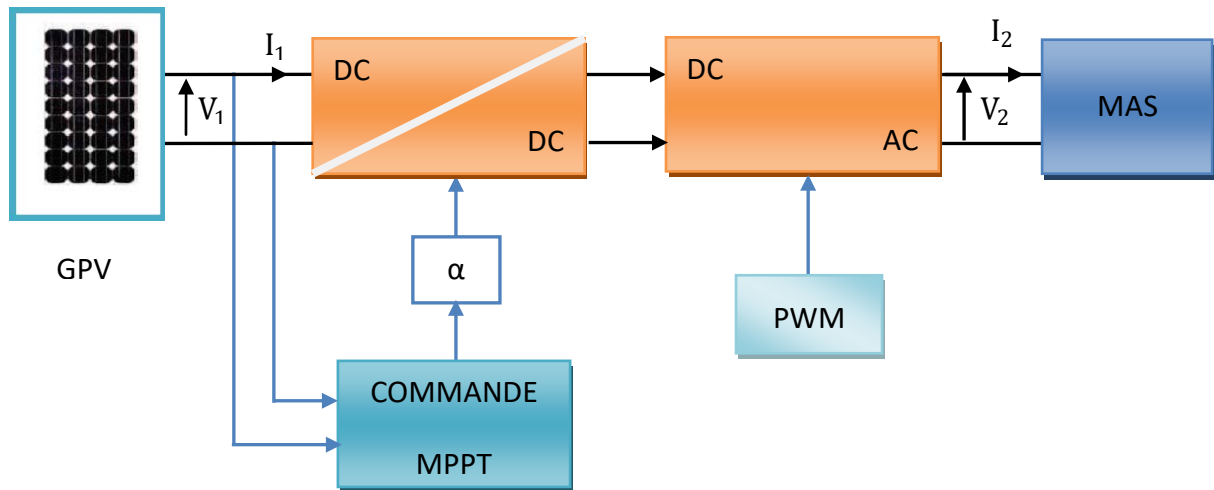


Figure III.1 : Chaîne élémentaire de conversion Photovoltaïque.

III.3. Modélisation des cellules PV

La modélisation des cellules PV passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents.

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie, plusieurs modèles électriques ont été proposés pour représenter la cellule photovoltaïque. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres s'intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module PV[17].

Parmi ces modèles on peut citer les suivants :

- Modèle à une diode (un exponentiel).
- Modèle à deux diodes (deux exponentiels).

Dans notre travail, on a choisi le modèle à une seule diode.

III.3.1. Modèle à une diode

C'est le modèle le plus classique et le plus utilisé dans la littérature. Il a été développé par Eck Stein (1990).

Ce modèle tient compte des phénomènes physiques. Il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux, une diode pour les phénomènes de polarisation de la jonction et deux résistances (série et shunt) pour les pertes[26].

Le circuit électrique équivalent est présenté par la figure (II.2)

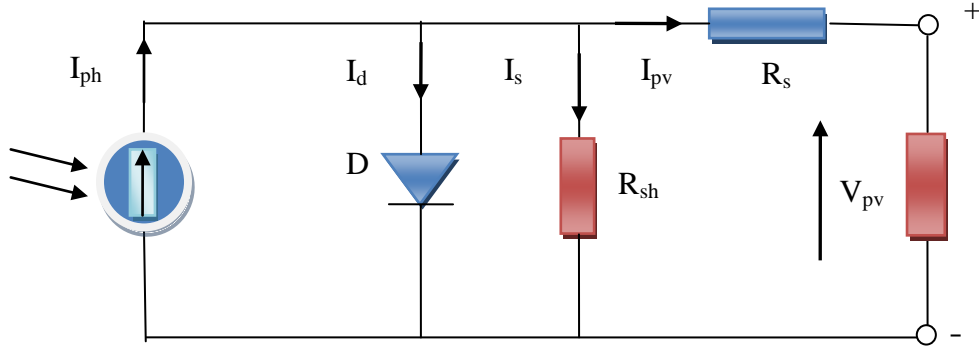


Figure III.2. Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.

Ce modèle a l'avantage d'être simple, il permet d'obtenir le comportement statique d'une cellule PV sous polarisation.

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

I_{pv} : le courant de la cellule PV.

I_{ph} : le courant photonique, il est proportionnel à l'éclairement.

I_d : le courant circulant dans la diode idéale D (diode en parallèle modélise la jonction).

I_{sh} : le courant circulant dans la résistance shunt.

III.3.2. Les équations caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Il existe plusieurs façon sa fin de présenter et calculer le courant d'une cellule PV(II.1).Pour cela, on a choisi un modèle mathématique simplifié et amélioré[27] et [28], et la caractéristique I-V peut être écrite comme suit:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s * I_{pv}}{V_t}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V_{pv} + R_s * I_{pv}}{R_{sh}}\right) \quad (III.2)$$

Et pour un module, on prend en considération le nombre de cellules en série :

$$I_{mpv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s * I_{pv}}{N_s V_t}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V_{pv} + R_s * I_{pv}}{R_{sh}}\right) \quad (III.3)$$

Avec :

V_t : Tension thermique (V).

N_s : Nombre de cellules en série.

I_0 : Le courant de saturation. Il dépend de la température de la jonction(A)

R_s : Résistance série, elle représente les diverses résistances des contacts métallique et de connexion, elle est très faible(Ω).

R_{sh} : Une résistance shunt (très forte par rapport à R_s) faible aura un impact sur la tension du circuit ouvert. Elle caractérise le courant de fuite au niveau de la jonction (Ω).

Généralement, les valeurs des résistances sont données à partir des formules suivantes:

$$R_{sh} > 100 \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad \text{et} \quad R_s < 0,01 \frac{V_{oc}}{I_{sc}}$$

➤ **I_{ph} : le courant photonique**

$$I_{ph} = I_{scn} + K_i(T - T_n) \frac{G}{G_n} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

I_{scn} : Courant de court-circuit nominal (A)

K_i : Coefficient de température de court-circuit (A/K) ou (A/°C)

T : La température de fonctionnement (K)

T_n : La température nominale (298 K)

G_n : Irradiation dans les conditions standards ($G = 1000W/m^2$)

➤ **I_0 : le courant de saturation**

$$I_0 = \frac{I_{ph}}{e \left(\frac{V_{oc}}{V_t N_s} \right)^{-1}} \quad (\text{III.5})$$

Avec :

V_{oc} : La tension de circuit-ouvert

V_t : La tension thermique

La tension de circuit-ouvert est donnée par la formule ci-dessous :

$$V_{oc} = K_v(T - T_n) + V_{ocn} \quad (\text{III.6})$$

Ou :

K_v : Coefficient de température en circuit ouvert (V/K) ou (V/ °C).

V_{ocn} : La tension de circuit –ouvert nominale (V).

Et la tension thermique est donnée par la relation :

$$V_t = \frac{a(T-T_0)K}{q} = \frac{aK(T)}{q} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

a : Le facteur d'idéalité de la jonction, il est compris entre 1 et 2.

K : la constante de Boltzmann est égale à 1.38×10^{-23} (J/K).

q : La charge d'électron ($q = 1.6 \times 10^{-19}$ C).

T : La tension de fonctionnement en Kelvin (K) et $T_0=273$ k.

L'équation de la caractéristique tension-courant d'un GPV :

$$I = N_{pp} \cdot I_{ph} - N_{pp} \cdot I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{pv} + \left(\frac{R_s N_{ss}}{N_{pp}} \right) \cdot I_{pv}}{N_s V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + \left(\frac{R_s N_{ss}}{N_{pp}} \right) \cdot I_{pv}}{R_p \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)} \quad (\text{III.8})$$

Ou :

N_{pp} : Le nombre de modules en parallèle.

N_{ss} : Le nombre de modules en série.

Nous analyserons les caractéristiques électriques du panneau SPR315E de chez SUNPOWER, le module se compose de 96 cellules monocristallines connectées entre elles en série pour produire une puissance de 315W.

A partir des notices techniques fournies par le constructeur disponibles dans la référence, nous avons déterminé les paramètres du panneau dans le tableau suivant:

Puissance nominale	P_{nom}	315	W
Tension à puissance maximale	V_{pm}	54.7	V
Courant à puissance maximale	I_{pm}	5.76	A
Tension en circuit ouvert	V_{co}	64.6	V
Courant de court –circuit	I_{cc}	6.14	A
Coefficient de température (I_{cc})	a	3.5	mA/K

TABLE III.1: Paramètres du module SPR 315 E [29] .

A partir de ces données et l'équation (III.7), nous établissons le modèle Simulink du générateur photovoltaïque donné par la figure suivante :

photovoltaïque à sa puissance maximale. Le MPPT fait ceci en contrôlant la tension ou le courant du générateur indépendamment de celle de la charge. L'emplacement du MPP dans la caractéristique courant-tension du panneau photovoltaïque n'est pas connu à priori. Cependant, en fonction de l'intelligence de l'algorithme de tracking, le MPP peut être localisé et suivi soit par des calculs de modèle ou par un algorithme de recherche. La situation est encore plus compliquée du fait que le MPP dépend d'une manière non linéaire de l'ensoleillement et de la température.

III.4.1. Classification de l'algorithme du suiveur la puissance maximale

La classification des algorithmes du suiveur peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées : méthodes directes et indirectes :

✚ **Les méthodes indirectes** : Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement...) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum. Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et donc difficile à généraliser : la méthode d'ajustement de courbe, la méthode « look-up table », la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit.

✚ **Les méthodes directes** : Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, l'incrément de conductance, la méthode Perturbe & Observe (P&O) ...

On a basée sur les méthodes directes.

III.4.2. La méthode Perturbe & Observe (P&O)

La méthode P&O fonctionne en perturbant périodiquement la tension du panneau V_{PV} , avec une faible amplitude autour de sa valeur initiale (ΔV), et on observe la variation de la puissance P_{pv} qui en résulte[30].

Ainsi, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} c'est-à-dire $\Delta P > 0$, comme illustré dans la Fig 5, la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du PPM (point de

puissance maximal), et on continue à perturber la tension dans la même direction, ceci va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à atteindre le PPM[30, 31].

Si au contraire, la puissance décroît $\Delta P < 0$, le point de fonctionnement s'éloigne du MPP. Alors, on doit perturber la tension avec signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu' à atteindre le PPM.

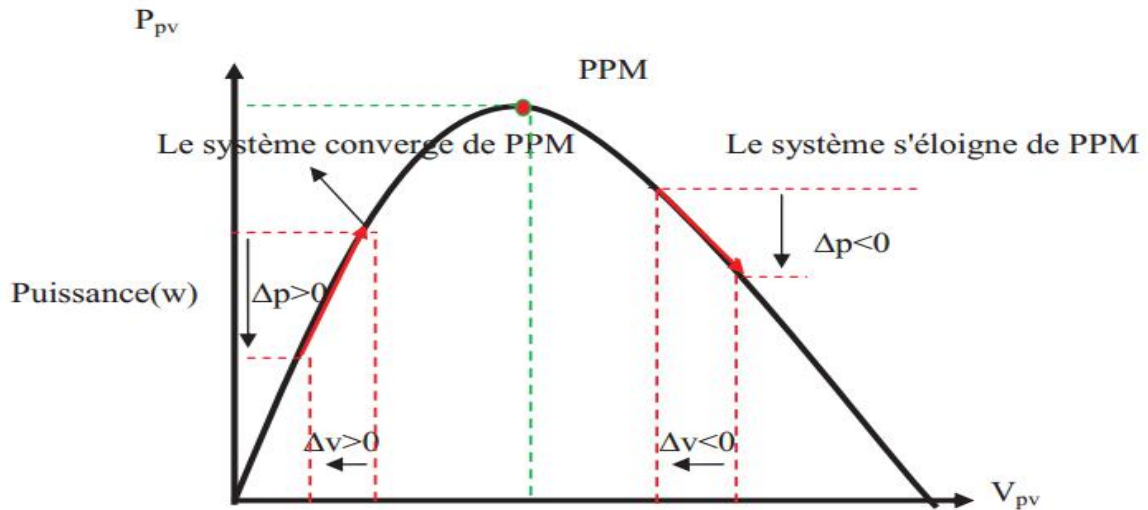


Figure III.4 : Schéma de converge vers le PPM par P&O

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de la tension sur la caractéristique P_{pv} (V_{pv}), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié[32].

En résumé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de V_{ref} .

La figure suivante donne l'organigramme de cet algorithme (P&O).

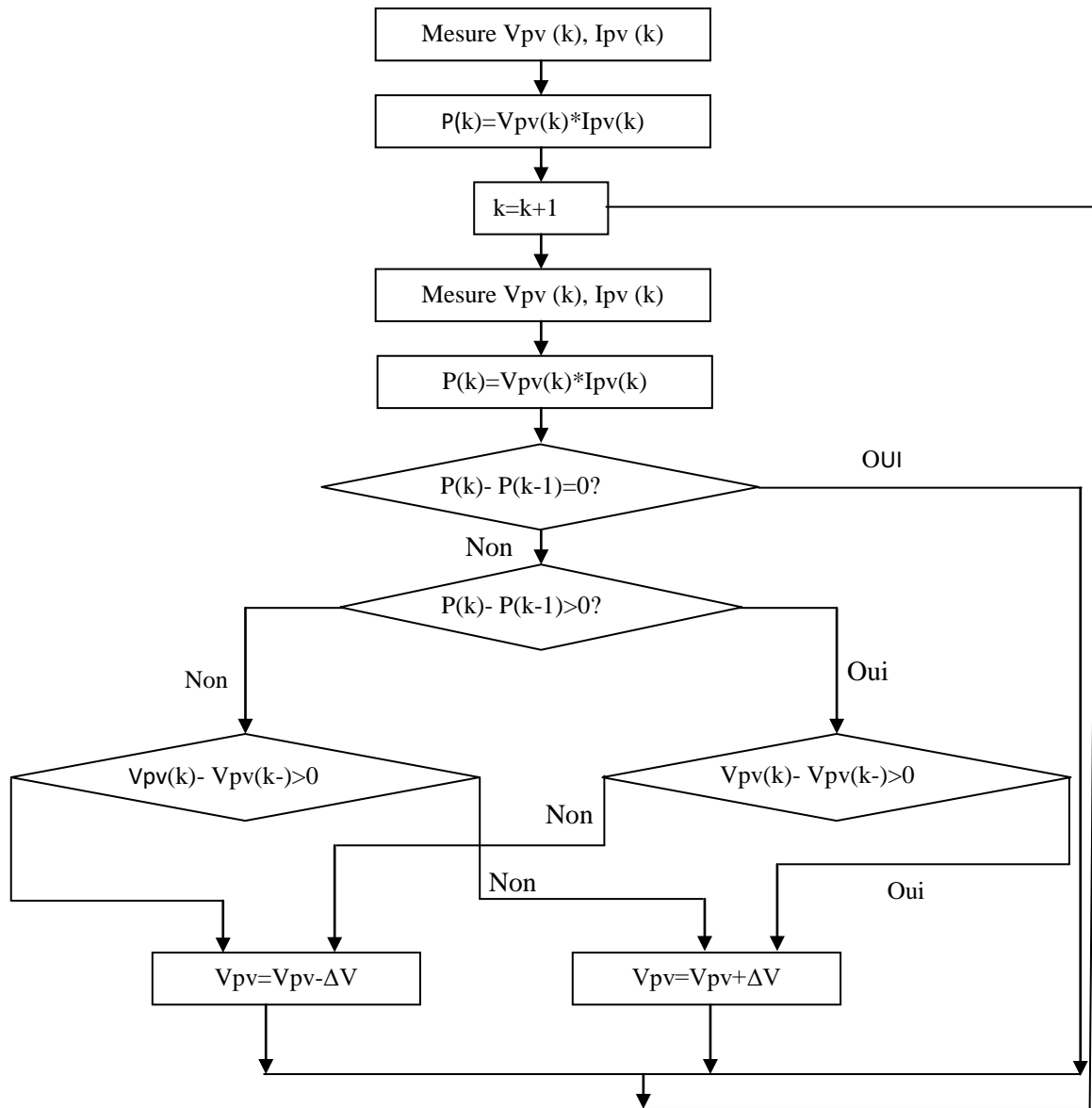


Figure III.5 : Organigramme de l'algorithme perturbation et observation (P&O)

L'inconvénient de la technique de (P&O) est celui en cas de changement rapide des conditions atmosphériques tel qu'un nuage mobile ; cette méthode peut déplacer le point de fonctionnement dans la direction fautive.

On a utilisé l'Organigramme de l'algorithme perturbation et observation (P&O) pour écrire un programme dans Matlab sous forme de S-Function suivi le point optimal de tension maximal et implémenté sur Simulink pour alimenter le hacheur survolteur.

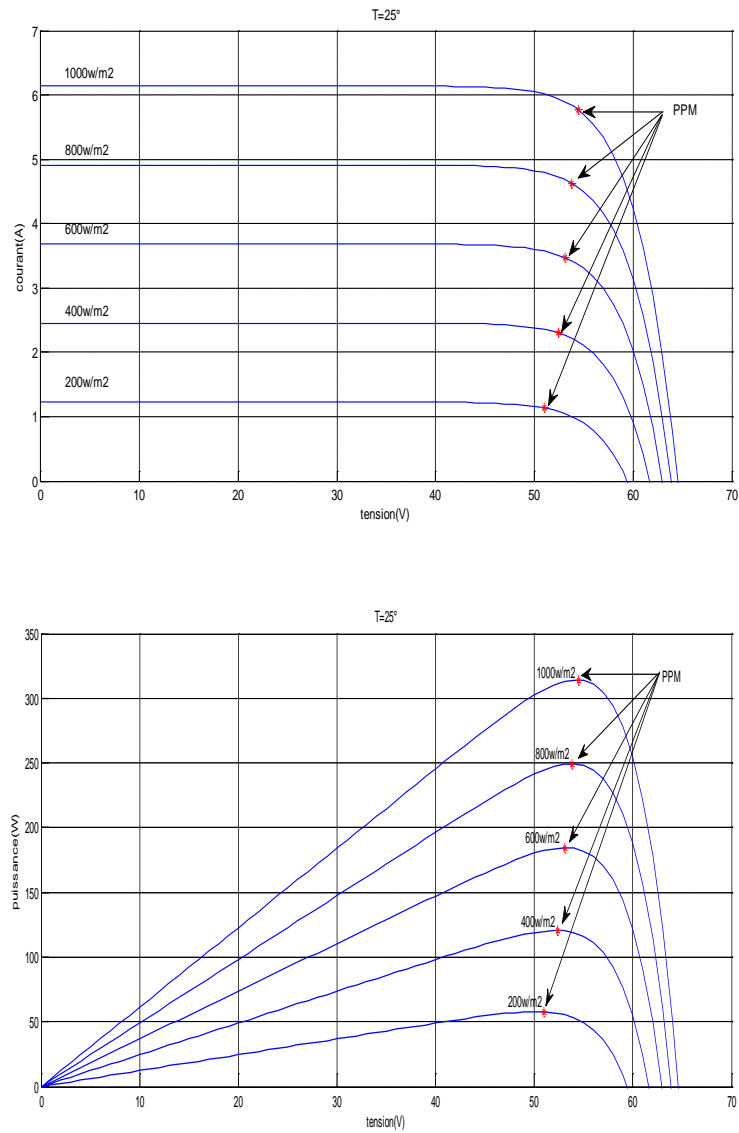


Figure III.6 : La trajectoire de PPM sur la caractéristique I-Vet P-V.

Le modèle établi sous matlab/simulink est illustré dans la Fig III.6 ou on montre que la valeur de la tension correspond à la valeur de la puissance maximale ($V=54,7$) pour un panneau et ($V=328,2$) pour six panneaux contacter on série, cette tension alimenté le convertisseur DC/DC[21].

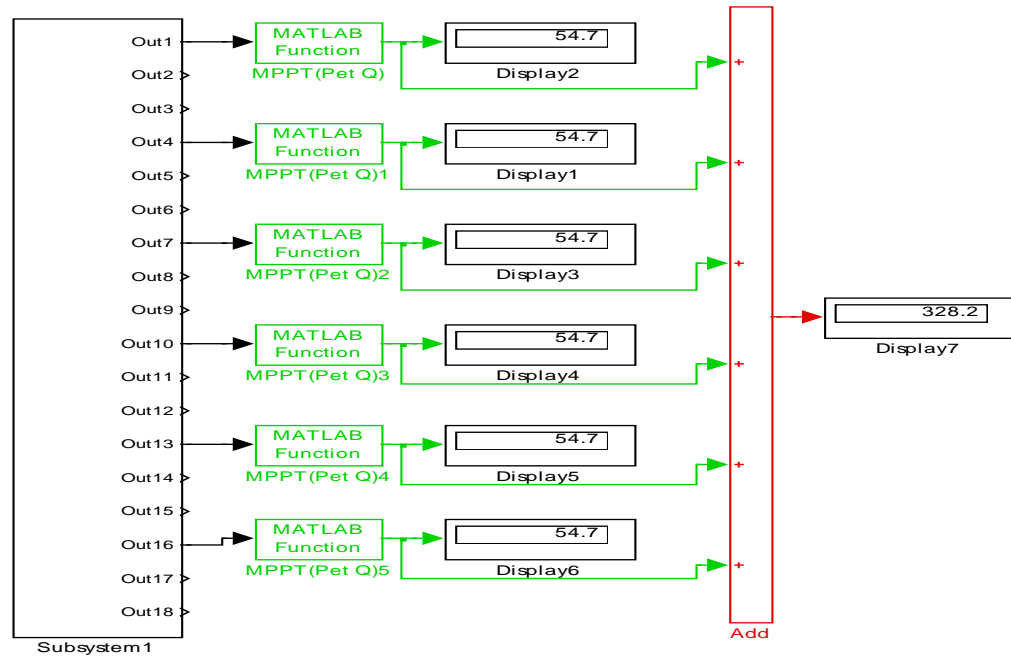


Figure III.7 : Schéma de simulation d'un GPV et MPPT.

III.5. Convertisseur DC/DC(les hacheurs)

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé (fig. III.7). Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle les hacheurs ont de bons rendements.

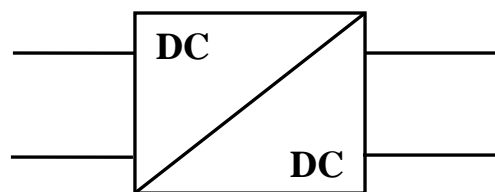


Figure III.8 : Symbole d'un convertisseur DC-DC.

Il existe trois types d'hacheurs :

- **Hacheur dévolteur (Buck ou série) :** la tension moyenne délivrée en sortie est inférieure à celle appliquée en entrée.
- **Hacheur survolteur (Boost ou parallèle) :** la tension moyenne délivrée en sortie est supérieure à celle appliquée en entrée.

- **Hacheur dévolteur-survolteur (Back-Boost ou série-parallèle) :** ce sont des hacheurs capables de fonctionner de deux manières (Buck –Boost) ou la tension moyenne de sortie est inférieure ou supérieure à celle de l’entrée.

Dans notre étude, le convertisseur Boost est utilisé comme adaptateur de la charge, permettant la poursuite du point de puissance maximale[12].

III.5.1. Convertisseur Boost (hacheur parallèle)

Un convertisseur élévateur dit Boost permet de convertir une tension d’entrée continue en une autre tension continue aussi en sortie mais de valeur supérieure à celle de l’entrée. C’est pour cela qu’il est dit élévateur de tension[33].

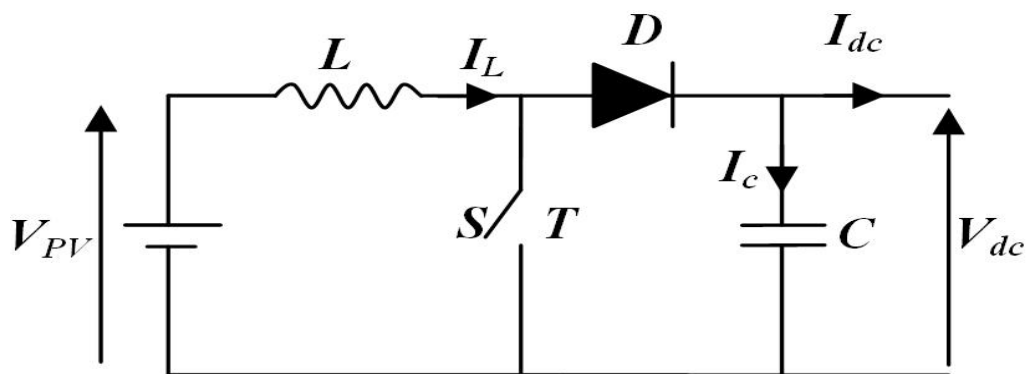


Figure III. 9 : Circuit électrique de l’hacheur(Boost)[34].

L'inductance permet de lisser le courant appelé sur la source. La capacité C permet de limiter l'ondulation de tension en sortie. Son fonctionnement est comme suit:

Au premier temps (αT), l'interrupteur (S) est fermé, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. L'interrupteur (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'oppose à la diminution de courant (I_L), génère une tension qui s'ajoutera à la tension de source. Elle sera appliquée sur la charge à travers la diode (D).

III.5.2. Modélisation du hacheur Boost

La modélisation de ce convertisseur se base sur l'analyse des différentes séquences de fonctionnement que nous supposons de durées fixées par la commande S. (Figure III.9)

Comme résultats on a deux séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur T, que nous pouvons représenter chacune par une équation différentielle[33],[34].

➤ **Lorsque (T) est fermé**

$$V_{PV} = L \frac{dI_L}{dt} = c \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (\text{III.9})$$

➤ **Lorsque (T) est ouvert**

$$V_{PV} = L \frac{dI_L}{dt} + V_{dc} \quad (\text{III.10})$$

$$I_L = c \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (\text{III.11})$$

En posant :

*(S=1) pour T est fermé.

* (S =0) pour T ouvert.

Nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équations unique, que nous qualifions de modèle instantané. Nous considérons ici les interrupteurs parfaits.

$$V_{PV} = L \frac{dI_L}{dt} + V_{dc} (1 - S) \quad (\text{III.12})$$

$$I_L (1 - S) = c \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (\text{III.13})$$

Le circuit de commande du hacheur étudié est constitué des éléments principaux nécessaires pour assurer la commande de l'interrupteur, la commande utilisée de type MLI intersective.

Le bute du circuit de commande est double :

- Lancer les ordre de coumutation de GTO
- Réguler la tension V_{ds} de sortie du hacheur

Les paramètres de la simulation sont inscrits dans le Tableau suivant :

Paramètres	Valeurs numériques
Ki	$23157894.736 \cdot 10^{-6}$
Kp	$2640000 \cdot 10^{-6}$
R	430
C	$40 \cdot 10^{-6}$
L	$225 \cdot 10^{-3}$

Tableau III.2 : Paramètres de simulation du hacheur boost.

On a utilisé l'équation (III-12et III-13) est implanté sur simulink du hacheur avec le circuit de commande MLI :

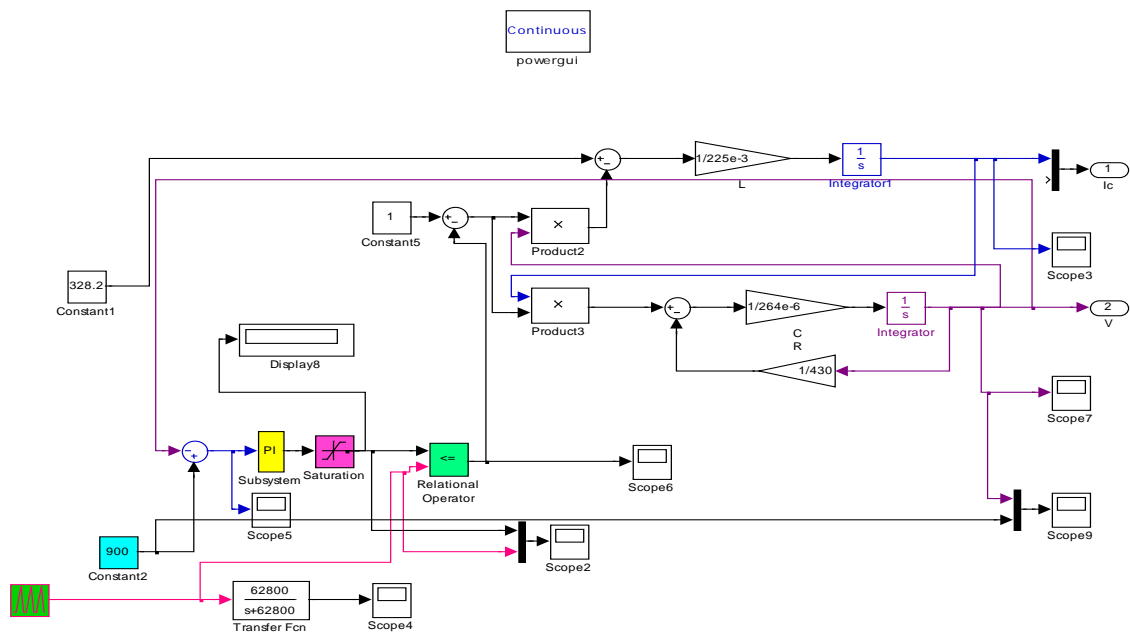


Figure III.10 : Schéma de simulation d'un hacheur boost.

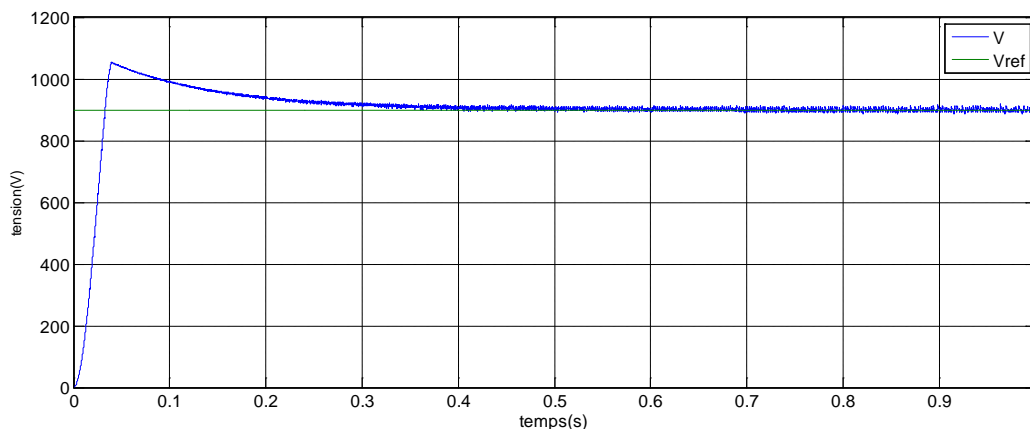


Figure III.11 : Tension d’hacheur survolteur.

III.6. Convertisseur DC/AC(les onduleurs)

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet la transformation de l'énergie de type continue, en une énergie alternative. La forme de la tension de la sortie de l'onduleur doit être plus proche d'une sinusoïde (l'allure sinusoïdale), Il est nécessaire que le taux d'harmonique soit très faible, et cela dépend essentiellement à la technique de commande utilisée (fig. III.13)[35].

Dans le système d'alimentation du moteur asynchrone par le générateur photovoltaïque, le courant continu fourni devrait être converti en courant alternatif afin d'alimenter le moteur. Dans cette condition, un onduleur triphasé de tension est exigé.

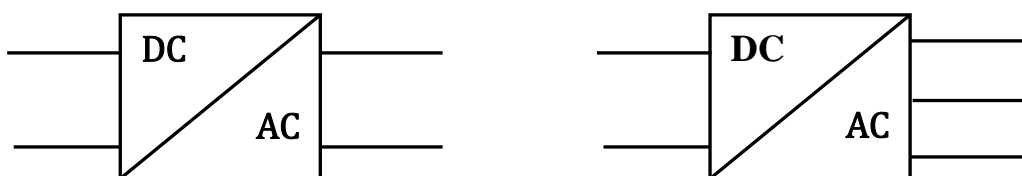


Figure III.12 Symbole des convertisseurs DC-AC monophasé et triphasé.

III.6.1. Modélisation de l'onduleur à deux niveaux et de sa commande MLI

L'onduleur triphasé à deux niveaux de tensions est constitué d'une source de tension continue et de six interrupteurs montés en pont. La tension continue est obtenue par un hacheur Boost. L'onduleur est très utilisé en MLI pour l'alimentation des récepteurs triphasés équilibrés à tension et fréquence variables.

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue, il faut découper la tension d'entrée et l'appliquer au récepteur dans les deux sens. L'onduleur de tension alimenté par une source de tension parfaite impose à sa sortie, grâce au jeu d'ouverture et de fermeture des interrupteurs, une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires à deux niveaux. La fréquence de fonctionnement est fixée par la commande des interrupteurs, le montage onduleur est constitué de six interrupteurs bidirectionnels.

Les couples d'interrupteurs de chaque bras sont commandés d'une manière complémentaire, pour assurer la continuité des courants dans les phases statiques de la machine asynchrone, et pour éviter de court-circuiter la source. Chaque interrupteur est constitué d'un transistor (T) et d'une diode (D) montés en tête-bêche (figure III.13)[36].

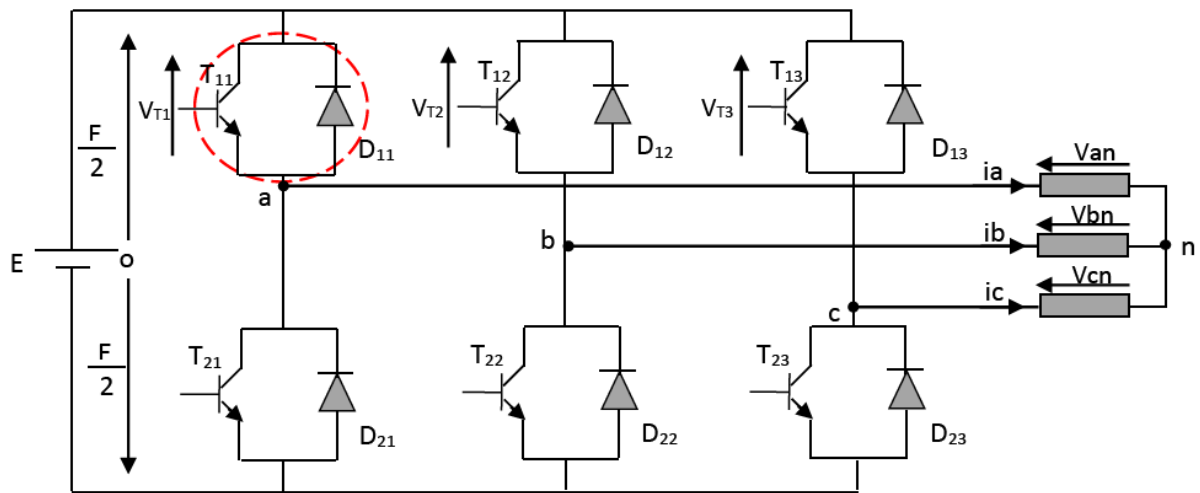


Figure III.13: Onduleur de tension triphasé à deux niveaux[36].

Pour simplifier l'étude et la complexité de la structure de l'onduleur, on supposera que :

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

Sachant que dans un régime équilibré $v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0$, nous pouvons écrire, figure :

$$\begin{cases} v_{an} = v_{a0} + v_{on} \\ v_{bn} = v_{b0} + v_{on} \\ v_{cn} = v_{c0} + v_{on} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

En faisant la somme des équations du système (III.15), on obtient :

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = v_{a0} + v_{b0} + v_{c0} + 3v_{on} = 0 \quad (\text{III.15})$$

D'où :

$$v_{a0} + v_{b0} + v_{c0} = -3v_{on} \quad (III.16)$$

Donc :

$$v_{on} = -1/3(v_{a0} + v_{b0} + v_{c0}) \quad (III.17)$$

En substituant l'équation (III.18) dans le système (II.15), il vient alors :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{a0} \\ v_{b0} \\ v_{c0} \end{bmatrix} \quad (III.18)$$

Après simplification, le modèle mathématique de l'onduleur à deux niveaux de tensions est donné par l'équation (III.14).

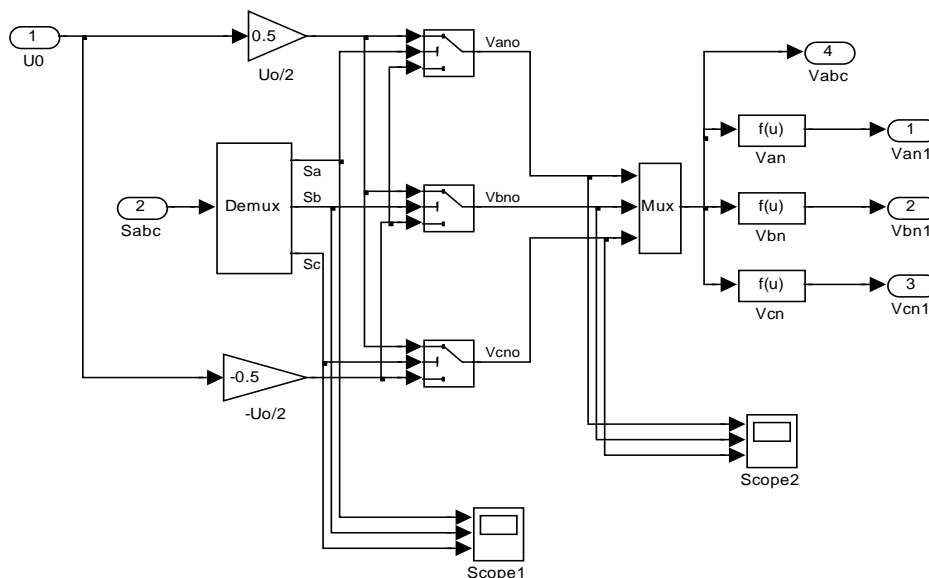


Figure III.14: Schéma de simulation d'un onduleur triphasé

III.6.2. Modélisation de la commande à modulation de largeur d'impulsion

La commande de l'onduleur par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) permet de produire à partir d'une source à fréquence et à tension fixes, des tensions alternatives variables en amplitude et en fréquence, avec un faible taux d'harmoniques[36],[13].

La technique de commande MLI sinus – triangle va être développées dans cette section.

III.6.3. Commande MLI sinus - triangle

La modulation de largeur d'impulsion sinus triangle est réalisée par comparaison d'une bande modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En triphasé, trois références sinusoïdales déphasées de $2\pi/3$ à la même fréquence f_s [37].

Il s'agit d'une modulante sinusoïdale d'amplitude A_r et de fréquence f_r combinée à une porteuse triangulaire d'amplitude A_p de haute fréquence f_p , les angles de commutation de la tension d'entrée d'un pont sont situés aux intersections de la porteuse et de la modulante (figure III.15).

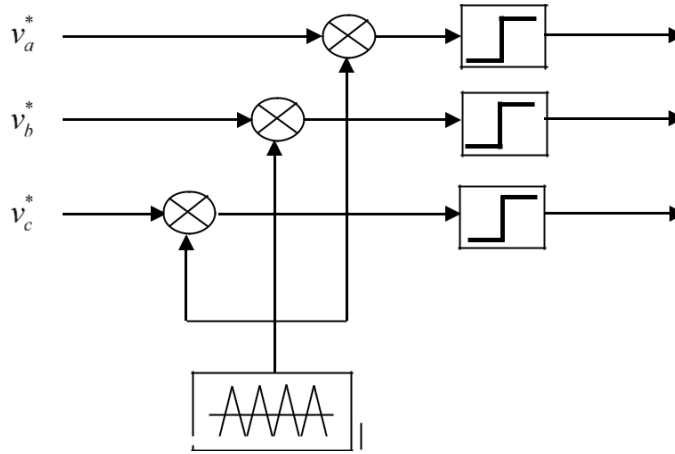


Figure III.15: principe de la MLI[36].

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

$$\begin{cases} V_a = V_m \sin(\omega t) \\ V_b = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c = V_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{III-19})$$

L'équation de la porteuse triangulaire est exprimée par :

$$V_p(t) \begin{cases} V_{pm} \left[4 \cdot \left(\frac{t}{T_p} \right) - 1 \right] & \text{si } 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ V_{pm} \left[-4 \cdot \left(\frac{t}{T_p} \right) + 1 \right] & \text{si } \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (\text{III-20})$$

La commande MLI sinus triangle utilise la comparaison avec la porteuse des trois composantes de la tension de référence afin de calculer les états S_a , S_b et S_c , et des interrupteurs de l'onduleur. Ceux-ci sont donnés par l'équation III.21 suivante :

$$S_{abc} = \begin{cases} 1 & \text{si } (v_{rabc} - x(t)) \geq 0 \\ 0 & \text{si } (v_{rabc} - x(t)) < 0 \end{cases} \quad (\text{III-21})$$

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

1. L'indice de modulation « m » égal au rapport de la fréquence de modulation (f_p) sur la fréquence de référence (f_r), $m = \frac{f_p}{f_r}$.
2. Le taux de modulation r est égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_r) à la valeur crête de l'onde de modulation (V_p), $r = \frac{V_r}{V_p}$.

Les paramètres de la simulation sont inscrits dans le tableau suivant :

Paramètres	Valeurs numériques
F_p	10^3
A_p	0.7675
F_r	50
A_r	0.85
Tesion(U_0)	904

Tableau III.3 : Paramètres de simulation de l'onduleur.

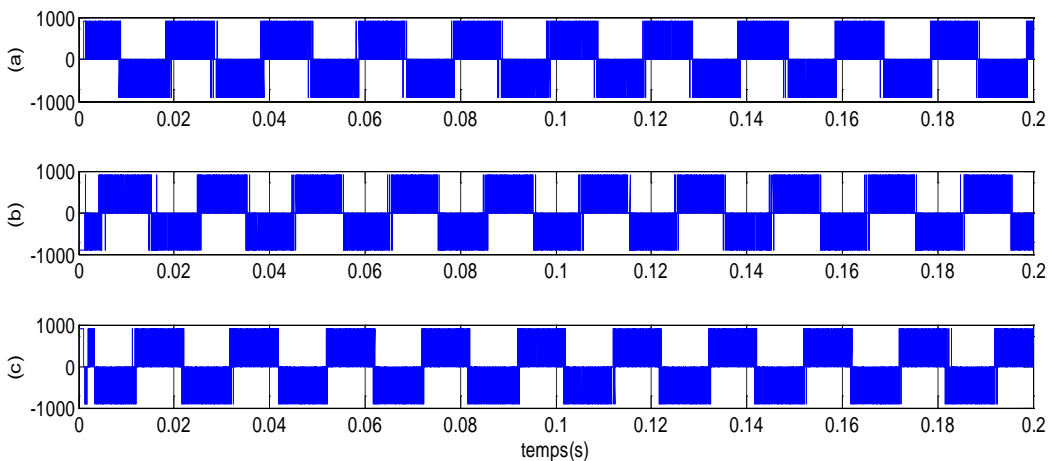


Figure III.16: Tension d'onduleur (phase (a), phase (b), phase (c)).

La MLI permet de former chaque alternance de la tension de sortie à partir de plusieurs créneaux. On constate que la tension ($v=990v$) dans chaque phase et plus riche par les harmoniques.

III.6.4. Avantages de la commande MLI

Comme la sortie de l'onduleur de tension n'est pas purement sinusoïdale, l'intensité de courant ne l'est pas aussi, donc elle comporte des harmoniques, seuls responsables des parasites (pulsation de couple électromagnétique) ce qui engendre des pertes supplémentaires. Cette –MLI sert à remédier ces problèmes et elle a comme avantages :

- Variation de la fréquence de la tension de sortie.
- Elle repousse les harmoniques vers des fréquences plus élevées.

D'autre part les conséquences de ces deux avantages sont :

- Minimisation de la distorsion du courant.
- Faible coût du filtre de sortie[37].

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié les convertisseurs statiques utilisés dans les systèmes photovoltaïques, comme le hacheur Boost et l'onduleur à MOSFET.

On a présenté la modélisation d'une cellule PV à une seule diode, le cœur du GPV, et le hacheur Boost commandé par un algorithme MPPT. Nous avons choisi pour cela, la méthode P&O (perturbation & Observation). La commande de l'onduleur a été faite par la commande MLI type sinus-triangle.

La modélisation de chaque élément de notre système photovoltaïque nous permettra d'assembler notre système de conversion, d'analyser et d'interpréter les résultats obtenus. Cette dernière est le sujet du chapitre suivant.

Chapitre IV :

Résultats

Et

Discussions

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la simulation de notre système proposé, cette chaîne de module, régulation et commande, est composée d'un GPV qui alimente un moteur asynchrone MAS, par le biais d'un hacheur commandé par la méthode P&O au but d'atteindre le point maximum de la puissance quel que soit l'ensoleillement et la température, l'onduleur à base d'un transistor type MOSFET commandé par la technique PWM sinus-triangle, ainsi que un filtre pour éliminer les raies de fréquence indésirable.

La simulation de ce système a été faite à base du logiciel MATLAB SIMULINK 2010Ra.

L'objectif de ce travail est d'exploiter les performances de système interconnecté au réseau pour commander un moteur asynchrone. Pour cela, on a simulé chaque élément.

IV.2. Schéma complet du système sur MATLAB/Simulink

Dans la figure suivante nous présentons notre système de conversion proposé et implanter avec le logiciel de simulation SIMULINK /MATLAB, notre système comporte un GPV, Hacheur boost, onduleur filter et moteur asynchrone associé à des commande MPPT, MLI, PLL et régulateur PID.

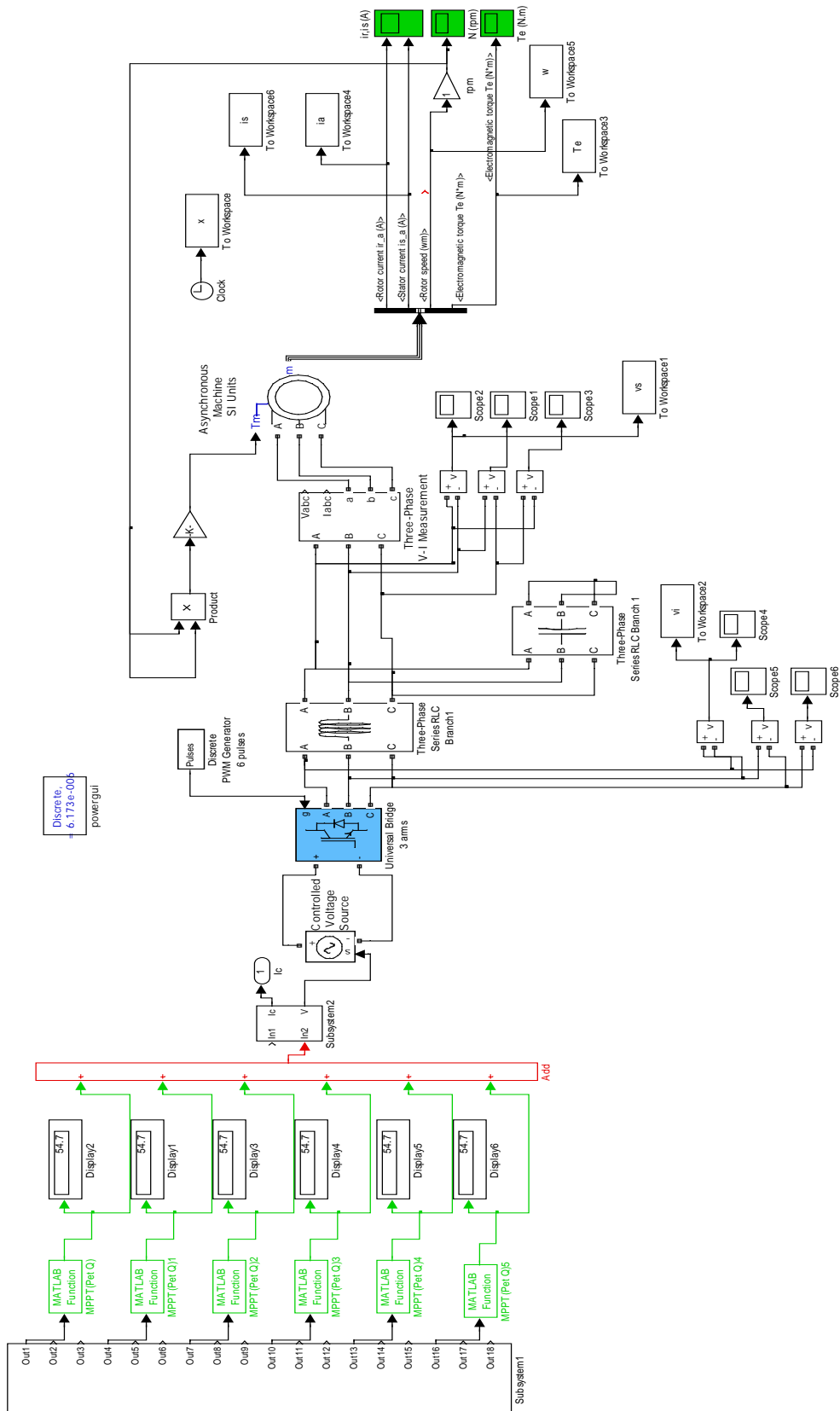


Figure IV.1 : Modèle de simulation de la chaîne de conversion photovoltaïque.

IV.3. Résultats de simulation sous MATLAB/Simulink

Les tensions composées de l'onduleur dans les trois phases avant le filtre sont présentés dans la figure suivante :

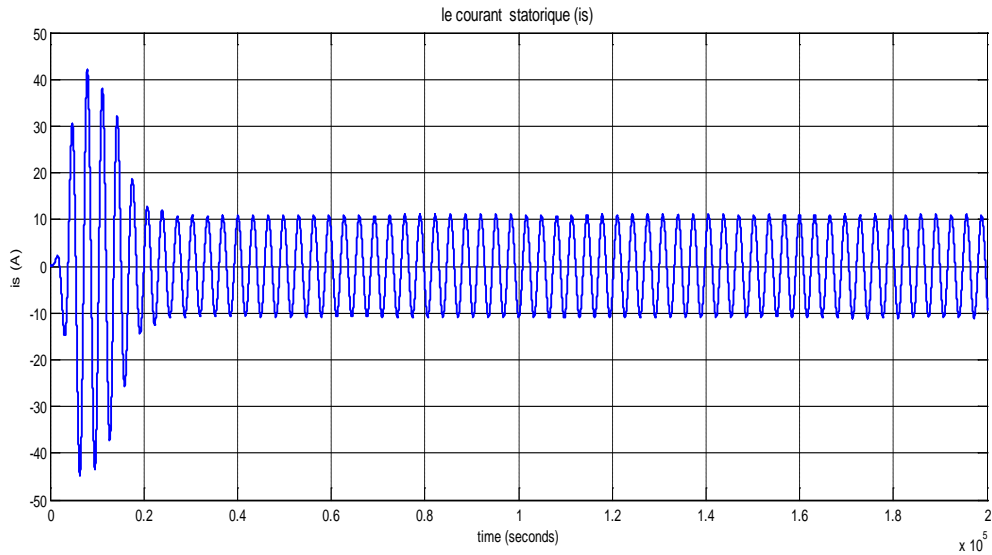


Figure IV.2 : Le courant statorique (is) en fonction du temps.

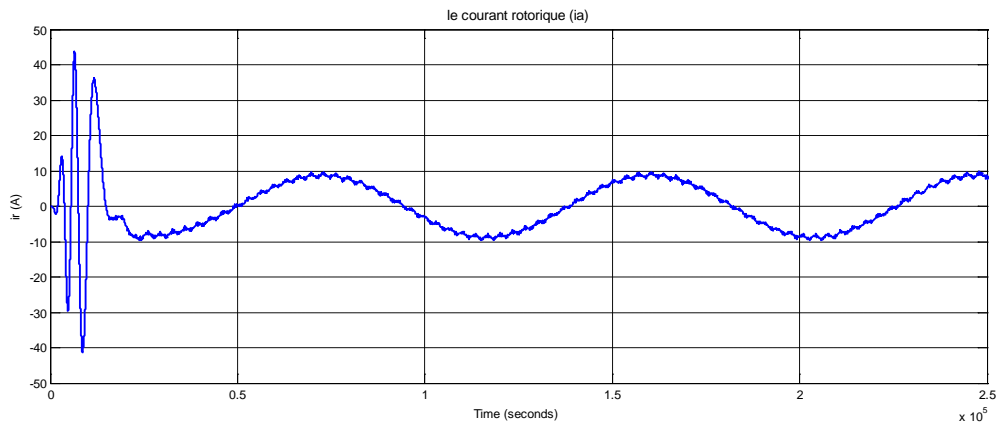


Figure IV.3 : Le courant rotorique (ia) en fonction du temps.

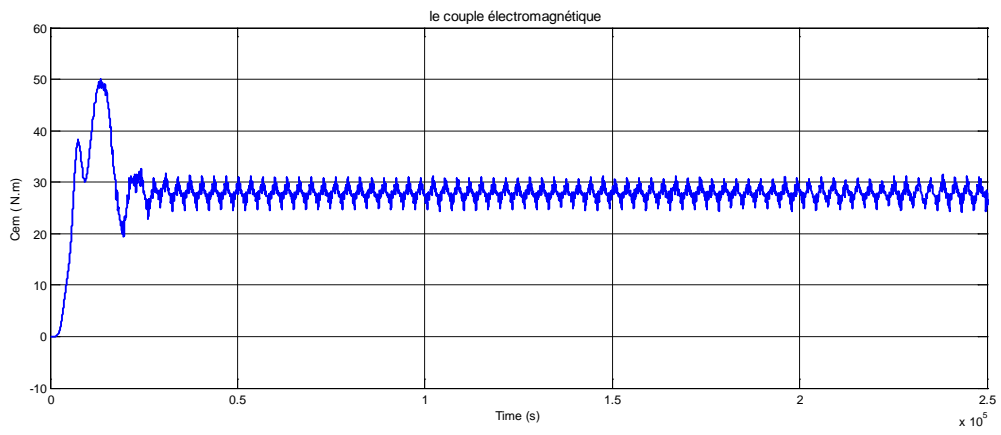


Figure IV.4 : Le couple électromagnétique en fonction du temps.

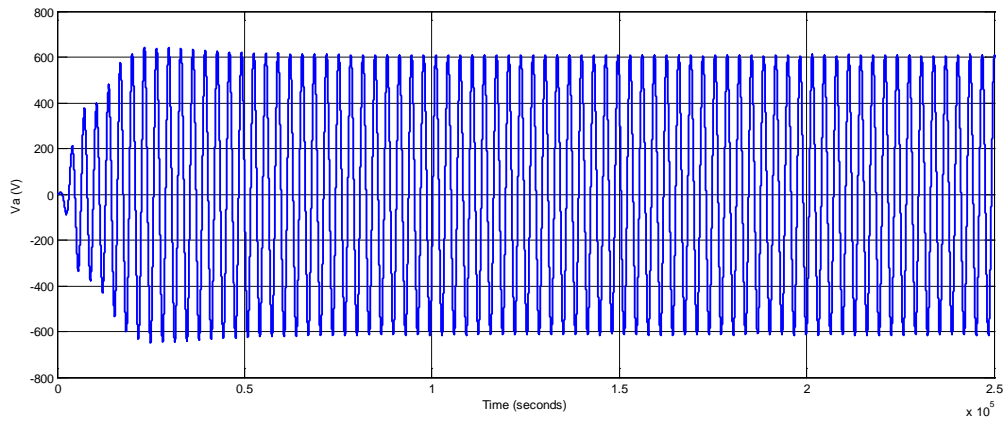


Figure IV.5 : illustre la tension V_s après le filtre LC.

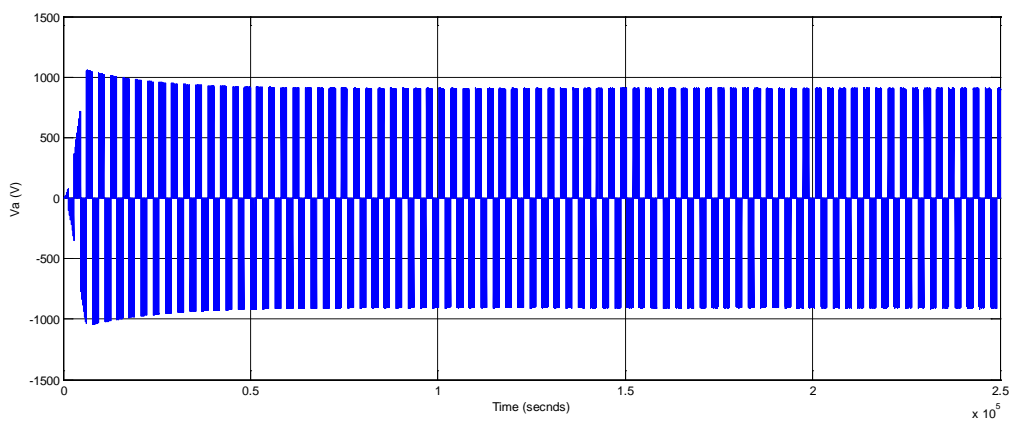


Figure IV.6 : illustre la tension V_i .

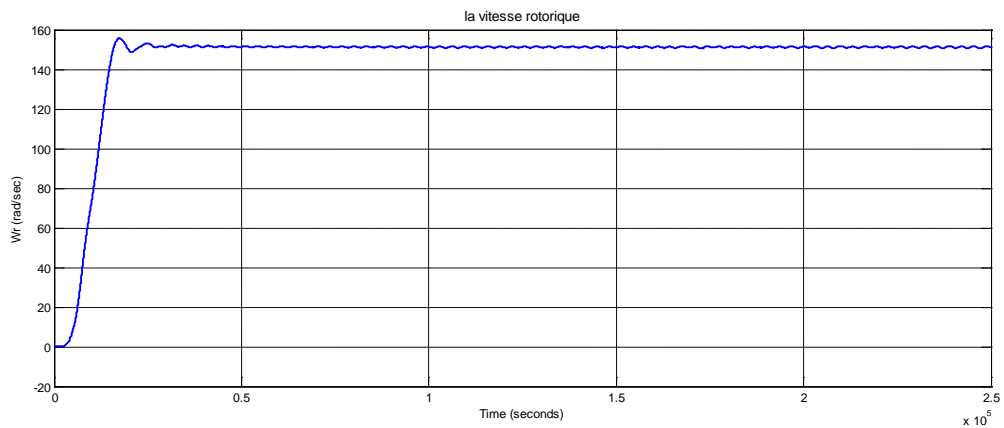


Figure IV.7 : La vitesse rotorique en fonction du temps.

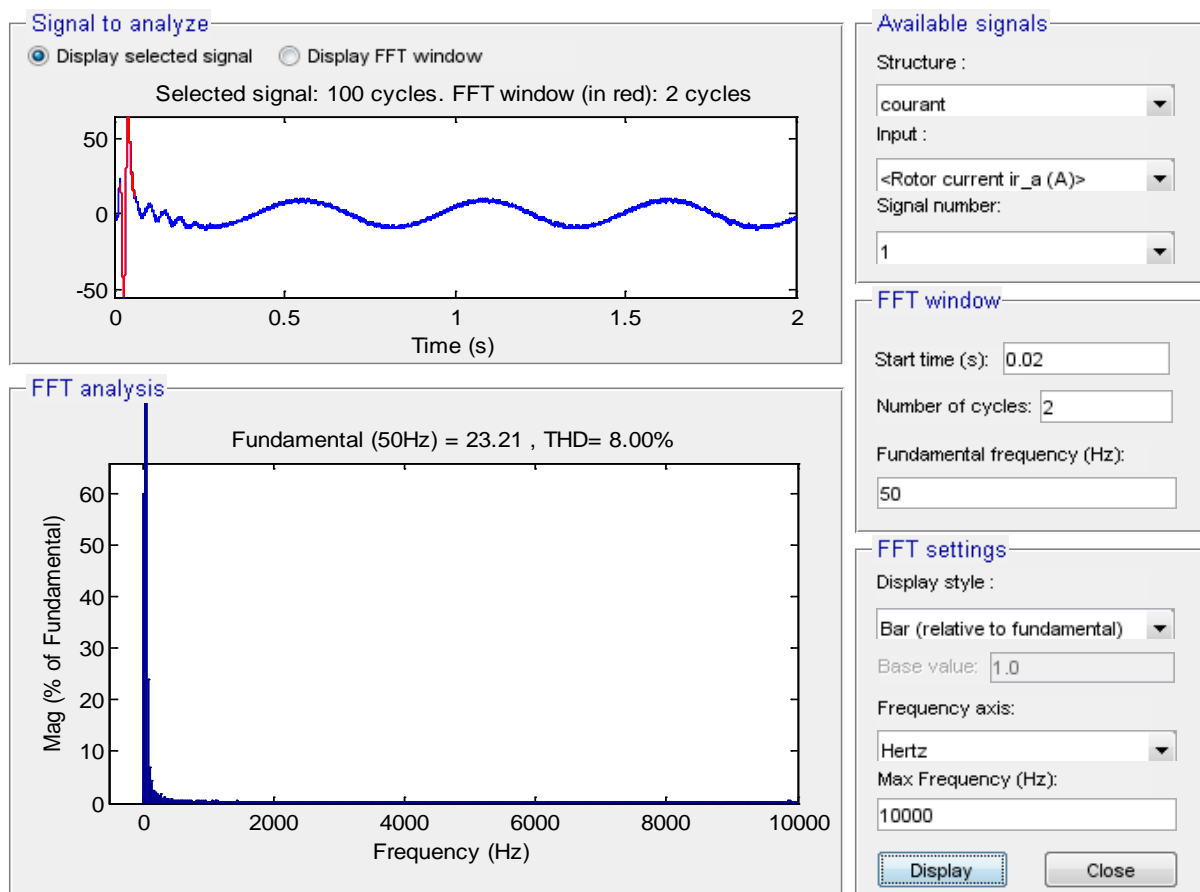


Figure IV.8: Résultat de simulation du signal du courant d’aimantation du moteur.

Les résultats de simulation montrent que :

- La tension et le courant qui alimente le moteur asynchrone présente une forme purement sinusoïdale avec un déphasage égale acceptable du à la self du filtre.
- La fréquence de la tension est très proche de la fréquence du réseau ($f_{res}=50.09\text{HZ}$) respectant la caractéristique de commande du moteur asynchrone $u/f=4.4$

- Les taux de distorsion harmonique après le filtrage ($THD_{\text{filre}}=8\%$), très performant

Le hacheur Boost donne une tension continue stable avec un pic au début à cause de la recherche du point maximale de fonctionnement.

Malgré l'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion sinus triangle, on a obtenu à la sortie de l'onduleur des tensions de ligne ne sont pas purement sinusoïdales, à cause des harmoniques qui engendrent des pertes et des échauffements au système PV surtout lors du raccordement de l'onduleur avec le MAS.

Après la simulation du MAS, on a remarqué que la vitesse de rotation du moteur asynchrone va évaluer avec le temps et atteigne sa vitesse nominale (149,6 rad/s) et tourne avec un flux constat dans un temps lent (dépassé 0.4 sec), avec une tendance à osciller à cause de l'inertie des masses tournantes et du coefficient d'amortissement du aux faibles valeurs des flux.

L'évolution du couple dans l'intervalle de temps 0 et 0.25 sec est une allure caractéristique type de tous les moteurs asynchrone. Celui-ci présente aux premiers instants des pulsations très importantes. Pendant le régime transitoire, le couple est fortement pulsatoire, puis se stabilise en fin du régime (Figure IV.4).

Conclusion

Générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce Mémoire et le fruit d'une étude sur l'exploitation et l'utilisation d'un système de production décentralisée, dans un réseau basse tension, pour commander un moteur asynchrone en respectant la loi de commande à flux constant en gardant les paramètres de réseau conventionnelle tension, courant et fréquence, afin de l'utiliser dans les sites isolés et au fil de soleil. Dans les installations d'habitation, le courant solaire produit peut être utilisé par l'habitation elle-même ou dans l'irrigation.

Afin d'extraire le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur 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, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale. La solution fréquemment adoptée est l'incorporation d'un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge commandé directement par la technique PWM. Le choix de la structure de conversion est fonction de la charge à alimenter. La deuxième partie de ce mémoire était l'objet de dimensionnement des convertisseurs DC-DC communément utilisés dans les chaînes de conversion photovoltaïque. L'étude par simulation effectuée a montré la validation du calcul théorique des éléments passifs constituant ces convertisseurs.

Pour fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, le convertisseur DC-DC associé doit être contrôlé par un algorithme traqueur du point de puissance maximale MPPT. A cet effet, nous nous sommes intéressés particulièrement à l'application de l'algorithme basé sur la perturbation et l'observation et l'algorithme de contre réaction de tension dans le contrôle des convertisseurs DC-DC. Les résultats de simulation ont montré de bonnes performances en termes de poursuite de la puissance maximale fournie par le panneau photovoltaïque.

Malgré l'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion sinus triangle, on a obtenu à la sortie de l'onduleur des tensions de ligne ne sont pas purement sinusoïdales, à cause des harmoniques qui engendrent des pertes et des échauffements au système surtout lors du raccordement de l'onduleur avec le MAS.

Donc un système de régulation est obligatoire pour maintenir la tension et la fréquence aux valeurs nominales du réseau ordinaire quelle que soit la tension d'entrée. Aussi, et dans le

Conclusion générale

but de réduire les harmoniques hautes fréquences dus à la commande MLI de l'onduleur, un filtre de sortie doit être mis en place afin d'améliorer la qualité de la tension AC produite à partir de la chaîne de conversion GPV-hacheur-onduleur.

Notre système proposé, présente des bonnes performances talque la tension de sortie sinusoïdale, le THD à 8% avec des résultats de simulation avec MATALAB/SIMULINK au niveau du moteur satisfaisante (vitesse de rotation, courant statorique et rotorique le couple magnétique(T_e))...etc.

Pour les perspectives nous nos recommandons de compléter ce travail et afin d'arriver à la performance suitée par:

- Une bonne régulation PID avec répétition
- L'utilisation des nouvelles méthode de régulation (logique flux, réseau de neurones,....
- Une bonne calcule de filtre de sortie en fonction des paramètres du moteur modifié.
- Implanter ce système sur une carte FPGA et d'effectuer une comparaison par rapport à la simulation.

Bibliographie

Bibliographie

Bibliographie

- [1] R. Jimmy, D. Thomas, S. Eric, and S. Bocar, "Le pompage photovoltaïque," *Édition Multi mondes*, 1999.
- [2] L. HAMMOUDI, "Réalisons pratique d'un système photovoltaïque relie par un hacheur," *electotechic*, Université Constantine 1, Constantine, 2014.
- [3] D. D. B. FLECHE, "Energie solaire photovoltaïque " *STI ELT Approche générale*, Juin 2007.
- [4] C. Zidani, F. Benyarou, and B. Benyoucef, "Simulation de la position apparente du soleil et estimation des Energies Solaires incidentes sur un Capteur Plan pour la Ville de Tlemcen en Algérie," *Rev. Energ. Ren*, vol. 6, 2003.
- [5] N. Mchaliikh and C. Hmada, "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau," *Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla*, 2013.
- [6] A. M. Razali, M. Rahman, G. George, and N. A. Rahim, "Analysis and design of new switching lookup table for virtual flux direct power control of grid-connected three-phase PWM AC–DC converter," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, pp. 1189-1200, 2014.
- [7] F. Hananou and A. Rouabah, "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque, mémoire de master," *Université Kasedi Merbah Ouargla*, 2014.
- [8] T. Mambrini, "Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies," Paris 11, 2014.
- [9] M. d. l'énergies. (24 Avril 2019). Available: <http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?page=potentiels>
- [10] D. Benatiallah and M. HAMOUDA, "Etude et simulation de flux solaire avec intégration d'un système d'information géographique (SIG) pour la wilaya d'Adrar," Université Ahmed Draïa-Adrar, 2014.
- [11] P. Pernet, "Développement de cellules solaires en silicium amorphe de type " nip" sur substrats souples," EPFL2001.
- [12] A. Ibelhoulen, A. Chelabi, and K. Idjdarene, "Etude d'un système hybride autonome," Université abderrahmane mira béjaia, 2012.

- [13] E. GHATAOUI, H. KHELIFI, and A. MENASRIA, "Alimentation d'un Moteur Asynchrone à partir d'un Générateur Photovoltaïque," Université Ahmed Draïa-Adrar, 2019.
- [14] Serir.Chafiaa, "Optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque," mémoire de magister, Université de Bégaia, 2012.
- [15] O. Gergaud, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur," École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2002.
- [16] J. Caillaud, "L'énergie solaire photovoltaïque, lycée des métiers de l'énergie de la métallurgie et de la vente," *QualiPV par l'ADEME*, pp. 4-7, 2010.
- [17] F. Chekired, "Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA," Alger, Ecole Nationale Polytechnique, 2008.
- [18] M. Khemliche, S. Djeriou, and S. Latreche, "Diagnostic de défauts dans le système photovoltaïque par les réseaux de neurones artificiels," *Diagnosis of Faults in the Photovoltaic System by Artificial Neural Networks*, *Revue des Energies Renouvelables SIENR*, vol. 12, pp. 331-343, 2012.
- [19] S. ABOUDA, "CONTRIBUTION A LA COMMANDE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES: APPLICATION AUX SYSTEMES DE POMPAGE," Université de REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE, 14 avril 2015.
- [20] M. N. Zakia, "Optimisation d'une centrale solaire à base d'un générateur PV [Application Aux Sites Tlemcen Et Bouzaréah]," *Thème de Magister, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEEN*, vol. 7, 2010.
- [21] A. Zerdoudi and R. Chenni, "Étude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension", Université frères mentouri Constantine, 2018.
- [22] B. Soltane, "Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables," 2017.
- [23] C. Cabal, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque," Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2008.
- [24] L. Baghli, *Modélisation et commande de la machine asynchrone: Les Éditions du Net*, 2015.
- [25] A. Hamza, "Commande Directe du Couple DTC-SVM d'une Machine asynchrone (MAS)," Faculte de technologie/Universite Mohamed Boudiaf-M'sila, 2017.
- [26] A. BELFEDHAL and A. BENATIALLAH, "Etude et Simulation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau à la région d'Adrar," Université Ahmed Draïa-Adrar, 2014.
- [27] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. Ruppert Filho, "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays," *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 24, pp. 1198-1208, 2009.

- [28] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. Ruppert Filho, "Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays," in *2009 Brazilian Power Electronics Conference*, 2009, pp. 1244-1254.
- [29] F. Technique, "Solar Project for a clean futur," Panneau solaire Sun Power 315TM.
- [30] M. Azab, "A new maximum power point tracking for photovoltaic systems," *Waset. Org*, vol. 34, pp. 571-574, 2008.
- [31] H. Knopf, "analysis, simulation, and evaluation of maximum power point tracking (MPPT) methods for a solar powered vehicle," Portland State University Portland, 1999.
- [32] S. Abada, "Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic," 2011.
- [33] M. Ouennoughi and D. Rekioua, "Gestion d'un système photovoltaïque avec stockage," Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2016.
- [34] Z. ALI, "Etude et simulation d'un système hybrid photovoltaïque-eolien", mémoire de master, Université Constantine 1, 2014.
- [35] O. Bouhali, "Contribution des convertisseurs multiniveaux au raccordement de la production d'origine éolienne sur un réseau électrique," Ecole Centrale de Lille, 2007.
- [36] D. CHERIFI, "Estimation de la vitesse et de la résistance rotorique pour la commande par orientation du flux rotorique d'un moteur asynchrone sans capteur mécanique," Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2014.
- [37] A. Nadia and B. Wahiba, "Modélisation et commande d'un onduleur MLI," *Universitaire Larbi Ben M'hidi Oum El-Bouaghi*, 2009.

Résumé :

L'énergie solaire photovoltaïque est considérée parmi les énergies renouvelables et l'énergie verte les plus exploitées dans le monde et plus précisément en Algérie. La commande des moteurs asynchrones au fil de soleil présente une performance idéale pour les sites isolés afin de l'exploiter dans l'irrigation sans utiliser un système de stockage de l'énergie.

L'objectif de ce travail est d'exploiter un système de conversion photovoltaïque interconnecté à un réseau pour commander un moteur asynchrone. Ce système photovoltaïque proposé comporte un convertisseur DC-DC commandé par MPPT avec un algorithme P&O et un onduleur à deux niveaux commandé par la technique PWM et un filtre LC, afin d'obtenir une tension de commande purement sinusoïdale sans perturbation et présente un taux de distorsion harmonique performant.

Mots clé : Générateur Photovoltaïque, Hacheur, MPPT, Onduleur, MLI, Filtre LC, Machine asynchrone.

Abstract:

Photovoltaic solar energy is considered among the most exploited renewable energies and green energy in the world and more specifically in Algeria. Sun wire asynchronous motor control offers ideal performance for remote sites to operate in irrigation without the use of an energy storage system.

The objective of this work is to operate a grid-interconnected photovoltaic conversion system to drive an asynchronous motor. This proposed photovoltaic system has a DC-DC converter controlled by MPPT with a P&O algorithm and a two-level inverter controlled by PWM technique and an LC filter, in order to obtain a purely sinusoidal control voltage without disturbance and exhibits a rate of efficient harmonic distortion.

Keywords: photovoltaic generator, MPPT, Boost chopper, inverter, PWM control, asynchronous machine, LC filter.

المخلص

تعتبر الطاقة الشمسية الكهروضوئية من بين الطاقات المتجددة والطاقة الخضراء الأكثر استغلالاً في العالم وتحديداً في الجزائر. يوفر التحكم في المحرك غير المتزامن بأشعة الشمس أداءً مثاليًا للمواقع البعيدة من أجل ري المحاصيل الزراعية دون استخدام نظام تخزين الطاقة.

الهدف من هذا العمل هو استغلال نظام التحويل الكهروضوئي المربوط بالشبكة للتشغيل و التحكم بالمحرك الغير متزامن. يحتوي هذا النظام الكهروضوئي المقترح على محول DC-DC يتم التحكم فيه بواسطة MPPT مع خوارزمية O&P ومحول ثنائي المستوى يتم التحكم فيه بواسطة تقنية PWM ومرشح LC، وذلك من أجل الحصول على جهد فارق كمون ذو خاصية جيبيية بحتة دون اضطرابات و يمنح نسبة من التوافقية الفعالة دون تشوه.

كلمات مفتاحية: الطاقة الكهروضوئية، المحول، MPPT، العاكس، MLI، آلة لا متزامنة، مرشح LC.

I: Programme pour tracer les caractéristiques du générateur photovoltaïque :

```

Fonction Ia=SPR (Va, G, Tac)
k=1.38e-23;
q=1.60e-19;
A=1.2;
Vg=1.12;
Ns=96;
T1=273+25;
Voc_T1=64.6/Ns;
Isc_T1=6.14;
T2=273+75;
Voc_T2=51.355/Ns;
Isc_T2=6.40;
Tak=273+Tac;
Trk=273+25;
Iph_T1=Isc_T1*G;
a= (Isc_T2-Isc_T1)/Isc_T1*1/ (T2-T1)
Iph=Iph_T1*(1+a*(Tak-T1));
Vt_T1=k*T1/q;
Ir_T1=Isc_T1/ (exp(Voc_T1/(A*Vt_T1))-1);
Ir_T2=Isc_T2/ (exp(Voc_T2/(A*Vt_T1))-1);
b=Vg*q/ (A*k);
Ir=Ir_T1*(Tak/T1).^ (3/A).*exp (-b.*(1./Tak-1/T1));
X2V=Ir_T1/ (A*Vt_T1)*exp (Voc_T1/(Vt_T1));
dVdI_Voc=-1.15/Ns/2;
Rs=-dVdI_Voc-1/X2V
Vt_Ta=A*k*Tak/q;
Vc=Va/Ns;
Ia=zeros (size (Vc));
for j=1:5;
Ia=Ia-(Iph-Ia-Ir.*(exp ((Vc+Ia.*Rs). /Vt_Ta)-1)). / (-1-(Ir.*(exp
((Vc+Ia.*Rs). /Vt_Ta)-1)).*Rs./Vt_Ta);
end
%effet de la température;
Va=0:1:70;
Tac=25;
hold on
for G=0.2:0.2:1
Ia=SPR_315 (Va,G,Tac);

```

```
Pa=Va.*Ia;
plot (Va,Ia)
%plot (Va, Pa)
[Pm, Im, Vm]=SPR_mpp(G,Tac);
plot (Pm,Im,'r*')
% [Pn,Vn]=SPR_MPPT(G,Tac);
%plot (Vn,In,'g')
end
grid
ylabel('puissance(W)')
xlabel ('tension(V)')
%axis ([0 70 0 350])
ylabel ('courant(A)')
axis ([0 70 0 7])
holdoff
```

II: Programme le MPPT:

```
function x=mppt_a(Pa)
Tac=298;
G=1;
dv=0.7;
Va=53;
Vref_new=54;
Va_new=Vref_new;
Ia_new=5.88;
Pa_new=317.76;
deltaPa=Pa_new-Pa;
if deltaPa>0
if Va_new>Va
Vref_new=Va_new+dv;
else
Vref_new=Va_new-dv;
end
elseif deltaPa<0
if Va_new>Va
Vref_new=Va_new-dv;
else
Vref_new=Va_new+dv;
end
end
```

III : Détermination des paramètres et de (k_i et k_p) du hacheur :

$$L \geq \frac{V_s}{4 f \Delta I_s}$$

$$C \geq \frac{V_s \alpha_{max}}{R f \Delta V_s}$$

$$R \approx \frac{V_s}{I_s} \approx \frac{V_{PV}}{I_{PV}(1-\alpha)^2}$$

- ♣ La fonction de transfert en boucle ouverte *FTBO* est donnée par:

$$FTBO(p) = \frac{p + \frac{K_i}{K_p}}{p/k_p} \cdot \frac{1/CV_{dc}^*}{p}$$

Par conséquent:

$$p + \frac{k_i}{k_p} = p$$

Et la *FTBO* devient:

$$FTBO(p) = \frac{k_p}{P \cdot CV_{dc}^*}$$

- ♣ En boucle fermée, la fonction de transfert *FTBF* est définie par:

$$FTBF(p) = \frac{FTBO(p)}{1 + FTBO(p)}$$

$$FTBF(p) = \frac{1}{1 + \tau p}$$

Alors:

$$K_p = \frac{C \cdot V_{dc}}{\tau_{rep}}$$

$$K_i = \frac{K_p}{\tau_{syst}}$$

Avec :

$$\tau_{rep} < \tau_{syst} = R.C$$

VI : Dimensionnement du filtre de sortie :

Dimensionnement de A_p

On va obliger le $\frac{di_{PVAC}}{dt} \leq$ pente de signal de commande (généralement un signal triangulaire)

Pour un période de signal triangulaire

$$0 \leq t \leq \frac{T_p}{4}$$

$$f_1 = a_1 \cdot t + b_1$$

t=0 donc :

$$f_1=0 \text{ et } b_1=0$$

$$t = \frac{T_p}{4} \quad , \text{Donc :}$$

$$A_p = a_1 \cdot \frac{T_p}{4}$$

$$a_1 = \frac{4 \cdot A_p}{T_p}$$

Alors :

$$\frac{di_{PVAC}}{dt} \leq \frac{4 \cdot A_p}{T_p}$$

On a :

$$T_p = \frac{1}{f_p}$$

Donc :

$$\frac{di_{PVAC}}{dt} \leq 4 A_p f_p$$

La chute de tension dans les éléments insérés en série du système de commande est inférieure de 20% de la tension d'entrée ou tension de sortie.

$$\frac{A_p}{A_m} = r = 1.25$$

$A_m \leq 10/100$ * Amplitude de signal de sortie

$$A_p \leq 1.24 * 10/100 * \text{Amplitude de signal de sortie}$$

TABLEAU : RAPPEL SUR DIMENSIONNEMENT DE A_p

	Boucle ouverte	Boucle fermée
C de courant	$A_p = 1.25 * I_n$	$A_p = 1.25 * 10\% * I_n$
C de tension	$A_p = 1.25 * V_n$	$A_p = 1.25 * 10\% * V_n$

Dimensionnement de L_f , R_f et C_f . (paramètres de filtrage)

❖ **Dimensionnement de L_f**

$$\Delta V_f \leq 20\% \cdot V_s$$

On a :

$$\Delta V_f = L_f \frac{di_{PVAC}}{dt}$$

Alors :

$$L_f \frac{di_{PVAC}}{di} \leq 20\% V_s = V_{PVAC} - V_s$$

D'après l'équation (VI-60) :

$$L_f \geq \frac{V_{PVAC} - V_s}{4 \cdot A_p \cdot f_p}$$

Donc :

$$L_f \geq \frac{\max(V_{PVAC} - V_s)}{4 \cdot A_p \cdot f_p}$$

Admettons que le filtre de sortie est inductif donc l'effet de L_f et plus fort que l'effet de R_f , on néglige R_f dans le dimensionnement de L_f .

❖ **Dimensionnement de R_f**

$$Z_f = \frac{\Delta V_{eff}}{I_{PVe\text{ff}}}$$

Et :

$$\Delta V_{eff} \leq 20\% V_{seff}$$

$$R_f = \sqrt{Z_f^2 - (L_f \omega)^2}$$

❖ **Dimensionnement de C_f**

$$i_c = C_f \frac{dV_c}{dt}$$

Avec :

$$V_c = V_f \leq V_{PVAC} - 10\% V_{PVAC}$$

C_f ne diminue pas le courant plus 10 à 20% de sa valeur délivrée par l'onduleur.

$$i_c \leq 10\% i_{PVAC}$$

Donc :

$$C_f = 10\% i_{PVAC} \cdot \frac{1}{\frac{dV_c}{dt}}$$

Et :

$$\frac{dV_c}{dt} \leq 5\% V_c$$

Alors :

$$C_f \leq 10\% i_{PVAC} \cdot 5\% V_c$$

- ❖ Les paramètres de la machine asynchrone que nous avons utilisés dans la simulation sont illustrés dans le tableau ci-dessous

Puissance nominale (Pn)	4000W
Tension (ligne-ligne) (Vn)	400V
Facteur de puissance nominal	0.002985
Fréquence nominale (fn)	50 Hz
Résistance statorique(Rs)	1.405 Ω
Résistance rotorique(Rr)	1.395 Ω
Inductance cyclique statorique	0.005839H
Inductance cyclique rotorique	0.005839H
Inductance mutuelle(Lm)	0.1722H
Nombre de paires de pôles	2
Moment d'inertie(J)	0.0131 Kg/m2
Coefficient de frottement	0.008N.m.s/rad

Tableau III.1: Paramètres de la machine asynchrone

- ❖ **Dimensionnement de Ω ou W_r : la vitesse rotorique**

On détermine la vitesse rotorique w_r (Ω) en rad/sec

On a N=1430 tour/minute, Alors :

$$\Omega = \frac{1430 * 2\pi}{60} = 149,6 \text{ rad/s}$$

- ❖ **Détermination du Gain K :**

On a $P=K * \Omega^3$, alors : $K = 0.0012$

❖ **Calcul du couple électromagnétique C_e :**

$$P = C_e * \Omega, \text{ donc : } C_e = 26,73 \text{ (N.m)}$$