

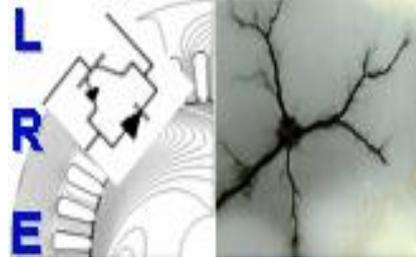
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département d'ELECTROTECHNIQUE
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'
Ingénieur d'état en électrotechnique

Intitulé

Etude d'un Système Hybride Photovoltaïque-Diesel

Présenté par

Abderrahmane AGROUM et Houssam MEHIBEL

Sous la direction de **Pr. L. NEZLI** et le **doctorant B. BOUSSIALA**

Soutenu publiquement le 14 juin 2017

Membres du Jury

Président :	O. Touhami, Professeur à l'ENP
Rapporteur :	L. Nezli, Professeur à l'ENP
Examineur :	A. Hellal, Professeur à l'ENP
	A. Mekhaldi, Professeur à l'ENP

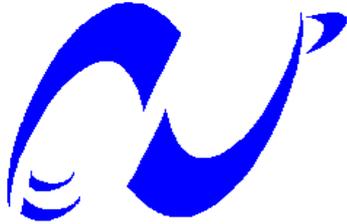
ENP 2017

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique (LRE) - Ecole Nationale Polytechnique (ENP)
10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

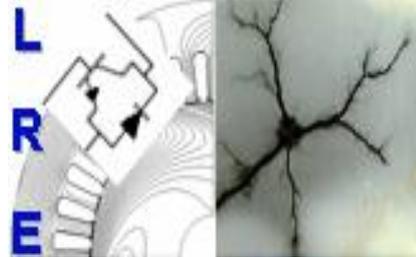
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département d'ELECTROTECHNIQUE
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'
Ingénieur d'état en électrotechnique

Intitulé

Etude d'un Système Hybride Photovoltaïque-Diesel

Présenté par

Abderrahmane AGROUM et Houssam MEHIBEL

Sous la direction de **Pr. L. NEZLI** et le **doctorant B. BOUSSIALA**

Soutenu publiquement le 14 juin 2017

Membres du Jury

Président :	O. Touhami, Professeur à l'ENP
Rapporteur :	L. Nezli, Professeur à l'ENP
Examineur :	A. Hellal, Professeur à l'ENP
	A. Mekhaldi, Professeur à l'ENP

ENP 2017

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique (LRE) - Ecole Nationale Polytechnique (ENP)
10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

ملخص:

يمكن لانظمة الطاقة الهجينة المكونة من مولدات الطاقة الكهروضوئية و مولد الديزل ان تمثل حلا اقتصاديا مثاليا للمشاكل التي تواجهها المناطق المنعزلة في التغذية الكهربائية. مع ذلك، فان تحجيم النظام و وضع برنامج ذكي للتحكم و ادارة الطاقة يبقى اساسيا لتحسين مردوده. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة نظام هجين كهروضوئي-مولد ديزل لتوليد الطاقة الكهربائية، وكيفية التحكم فيه. لهذا، قمنا بدراسة السلسلة الكهروضوئية، و مولد الديزل، ثم قمنا بتحجيم النظام باستعمال برنامج خاص بالانظمة الهجينة (HOMER). بعد ذلك قمنا بتوصيل المصدرين الطاقويين عن طريق المموج. اخيرا، قمنا بتقديم الطريقة المستعملة للتحكم في النظام الهجين و كذلك خوارزمية ادارة الطاقة .

الكلمات المفتاحية : نظام هجين، مولد الطاقة الكهروضوئي، مولد الديزل، استراتيجية التحكم، منطقة منعزلة، شبكة منعزلة، ادارة الطاقة.

Abstract:

Photovoltaic-Diesel hybrid systems could be a technical-economic solution for rural electrification problems. However, proper sizing, and intelligent energy management are always required to optimize system operation. The main objective of this work is the study and control of a hybrid PV-Diesel system. To do this, we studied and modeled the photovoltaic chain, and the diesel generator. Next, we have dimensioned the hybrid system using sizing and optimizing software (HOMER). After, we connected the two sources using a DC / AC converter. Finally, we presented the control techniques for a PV-Diesel hybrid system with and without storage and the global energy management algorithm.

Keywords: Hybrid system, photovoltaic generator, diesel generator, synchronization, energy management, control strategies, DC bus, HOMER, MPPT, isolated sites.

Résumé :

Les systèmes hybrides Photovoltaïque-Diesel pourraient constituer une solution technico-économique pour les problèmes de l'électrification rurale. Cependant, un dimensionnement correct, et une gestion d'énergie intelligent sont toujours nécessaires pour optimiser le fonctionnement du système. L'objectif principal de ce travail est l'étude et la commande d'un système hybride PV-Diesel. Pour cela, nous avons étudié et modélisé la chaîne photovoltaïque, et le groupe diesel. Ensuite Nous avons dimensionné le système hybride à l'aide d'un logiciel de dimensionnement et d'optimisation (HOMER). Après, nous avons connecté les deux sources à l'aide d'un convertisseur DC/AC. Finalement, nous avons présenté les techniques de commande pour un système hybride PV-Diesel avec et sans stockage et l'algorithme global de gestion d'énergie.

Mots clés : système hybride, générateur photovoltaïque, groupe diesel, synchronisation, gestion d'énergie, stratégies de commande, bus continu, HOMER, MPPT, sites isolés, réseau autonome.

Remerciements

Nous remercions Allah, qui nous protège et qui nous a guidés dans la bonne voie des sciences et de la connaissance, de nous avoir accordé la patience, le courage, la volonté et la motivation qui nous ont permis d'achever ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude, notre grand respect et notre sincère reconnaissance à nos promoteurs le Pr L. NEZLI, et le doctorant B. BOUSSIALA, pour avoir assumé la lourde responsabilité de nous encadrer, de nous avoir orienté et conseillé, pour leur disponibilité ainsi pour la confiance qu'ils nous ont accordée et de nous avoir proposer ce travail.

Notre sincère remerciement et notre profonde gratitude vont également au président et aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous accordent, en acceptant de juger notre travail.

Nous tenons à remercier l'ensemble des enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique spécialement ceux du département d'Electrotechnique, pour leur encadrement tout au long de notre formation.

On en profite pour remercier tous ceux qui nous ont soutenus et ont contribués de loin ou de près à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail,

À Mes très chers parents,

*À celle qui a été et est toujours l'exemple du sacrifice et de dévouement. À la source de la tendresse, de l'amour et de la fierté, À celle pour qui je ferais n'importe quoi pour voir son sourire... à **ma très chère mère.***

*À **mon cher père** qui s'est sacrifié toute sa vie de jeune pour sa grande famille.*

*À ma chère sœur **Linda**, et mes chers frères **Hamid**, **Ismaïl** et sa petite **Rita**, **Abdellah.***

*À mes chères cousines, **Hayat** et ces sœurs*

À mes chers amis et À Tous ceux qui m'aiment et tous ceux que j'aime, Merci.

AGROUM Abderrahmane

Dédicaces

*A mes parents, qui m'ont soutenu tout au long de
mes études.*

A tous les membres de ma famille.

À mes amis.

*À tous les professeurs que ce soit du primaire, du
moyen, du secondaire ou de l'enseignement
supérieur.*

MEHIBEL Houssam

TABLE DES MATIERES

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des nomenclatures	
Liste des abréviations	
Introduction générale.....	16

Chapitre I : Etude de la chaine photovoltaïque

I.1. Introduction	19
I.2. Le rayonnement solaire	19
I.3. Gisement solaire	21
I.4. Effet photoélectrique	22
I.5. Le semi-conducteur	22
I.6. Cellule photovoltaïque	22
I.6.1. Modélisation de la Cellule photovoltaïque	23
I.6.2 Caractéristique électrique de la cellule photovoltaïque	25
I.6.3 Influence des conditions climatiques sur les caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque	26
I.7. Générateur photovoltaïque	27
I.7. 1. Protection du générateur PV	28
I.7. 2. Caractéristiques d'un générateur PV	29
I.8. Etage d'adaptation	30
I.9 La commande MPPT Maximum Power Point Tracking	32
I.10. Simulation de la commande P&O	33
I.11. Conclusion	35

Chapitre II : Etude de groupe diesel

II.1. Introduction	37
II.2. Le groupe diesel	37
II.2. 1. Moteur diesel	37
II.2. 1.1. Principe de fonctionnement	38
II.2. 1.2. Les différents circuits	38
II.2.2. Machine Synchrones triphasé	39
II.3. Régulateur de vitesse	42
II.4. Régulateur de tension	43

II.5. Simulation du groupe électrogène	44
II.6. Conclusion	46

Chapitre III : Dimensionnement de système hybride PV-Diesel

III.1. Introduction	48
III.2. Généralités sur les système hybride	48
III.2.1. Définition et missions des systèmes hybrides	48
III.2.2. Avantages et désavantages des systèmes hybrides	48
III.2.3. Classification des systèmes hybride	48
III.2.4. Les différents types des configurations	49
III.3. Problèmes rencontrés dans le fonctionnement des système hybrides PV-Diesel	53
III.4. Dimensionnement du système hybride PV-Diesel avec le logiciel HOMER	54
III.4.1. Présentation du logiciel HOMER	54
III.4.2. L'emplacement choisi	54
III.4.3. Construction de système hybride de génération d'énergie	55
III.4.4. Simulation et interprétation	56
III.5. Conclusion.....	57

Chapitre IV : Contrôle de système hybride PV-Diesel

IV.1. Introduction	59
IV.2. Modélisation de l'onduleur	59
IV.2.1. Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux	59
IV.2.2. Stratégie de commande	60
IV.2.3. Modélisation du filtre LC	61
IV.2.4. Résultats de simulation	62
IV.3. Stratégie de commande de système hybride PV-diesel	66
IV.3.1. Synchronisation avec le groupe diesel	67
IV.3.1.1. Structure générale de PLL	67
IV.3.1.2. La PLL dans le cas d'un réseau triphasé	67
IV.3.1.3. Résultats de simulation	69
IV.4. Commande d'un système hybride PV-diesel sans stockage	70
IV.4.1 Régulation des courants	70
IV.4.2 Régulation de la tension du bus continu	73
IV.4.3 Algorithme de gestion d'énergie du système hybride	77
IV.4.4 Résultats de simulation	77
IV.5. Commande d'un système hybride photovoltaïque-diesel-batterie	81
IV.5.1 Les batteries.....	82
IV.5.2 Modélisation de la batterie	83

IV.5.3 Contrôle du bus continu	83
IV.5.4 Modélisation de l'hacheur réversible en courant	83
IV.5.6 Contrôle du convertisseur DC/AC	84
IV.5.7 Résultats de simulation	85
IV.6. Conclusion	87
Conclusion générale	88
BIBLIOGRAPHIE	90
ANNEXE	94

Liste des figures :

Figure I.1 : Spectre du rayonnement solaire.	20
Figure I.2 : Composantes du rayonnement solaire au sol	20
Figure I.3 : Ensoleillement annuel	21
Figure I.4: Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale.....	21
Figure I.5: Schéma d'une cellule solaire à jonction P-N standard.....	23
Figure I.6: Schéma du circuit équivalent simple d'une cellule photovoltaïque.....	23
Figure I.7 : Modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque.....	24
Figure I.8: Caractéristique courant-tension de la cellule PV	25
Figure I.9 : Caractéristique Puissance-Tension de la cellule PV	25
Figure I.10: Caractéristique courant-tension, puissance-tension en fonction de l'éclairement...	26
Figure I.11: Caractéristique courant-tension, puissance-tension en fonction de la température.	27
Figure I.12: Cellules identiques en série	27
Figure 1.13: Cellules identiques en parallèle	28
Figure I.14: composantes d'un champ de modules photovoltaïques	28
Figure I.15 : (a) Architecture classique d'un panneau solaire avec diodes de protection (b) Défaillance d'une des cellules du module PV et activation de la diode by-pass	29
Figure I.16: Circuit électrique de base d'un Hacheur Boost.....	30
Figure I.17 : Algorithme P&O	33
Figure I.18 : Schéma de la chaîne photovoltaïque principale	33
Figure I.19 : Profil d'irradiation	34
Figure I.20: Rapport cyclique	34
Figure I.21 : Tension de la charge	34
Figure I.22 : Zoom de tension de la charge	34
Figure I.23 : Tension du GPV	34
Figure I.24: Puissance du GPV	34
Figure II.1 : Modèle simplifié du générateur diesel	37

Figure II.2 : Composants principaux d'un moteur diesel	38
Figure II.3 : Les quatre cycles d'un moteur diesel	39
Figure II.4 : Modèle équivalent d'un enroulement	41
Figure II.5 : Bloc diagramme d'un moteur diesel simplifié	42
Figure II.6 : Bloc diagramme de Régulateur de tension	43
Figure II.7 : La puissance générée par le GD	45
Figure II.8 : La fréquence du moteur diesel.....	45
Figure II.9 : La vitesse du système	45
Figure II.10 : Les tensions de la charge	45
Figure II.11 : Zoom des tensions de la charge	45
Figure II.12 : Les courants de la charge.....	46
Figure II.13 : Zoom des courants de la charge.....	46
Figure III.1: Classification des systèmes hybrides	49
Figure III.2: Configuration PV/diesel série	50
Figure III.3: Configuration PV/diesel commutée	51
Figure III.4: Configuration PV/diesel parallèle	52
Figure III.5 : Courbe du rendement d'un groupe diesel	53
Figure III.6 : Rayonnement solaire mensuel de la wilaya d'Adrar	54
Figure III.7: Profil de charge	55
Figure III.8: Configuration de l'installation à dimensionner.....	55
Figure III.9: Résultat de simulation du système hybride par HOMER	56
Figure III.10: Puissance moyenne produite par chaque source durant l'année	56
Figure III.11 : Résultat de simulation du système hybride et non hybride par HOMER	56
Figure III.12: (a) Consommation du carburant dans le système non hybride, (b) Consommation du carburant dans le système hybride	57
Figure III.13: (a) Emissions de gaz dans le système non hybride, (b) Emissions de gaz dans le système hybride	57
Figure IV.1 : Onduleur à deux niveaux utilisant des transistors IGBT	59

Figure IV.2: Principe de fonctionnement de la MLI triangulo-sinusoïdale	61
Figure IV.3: Schéma monophasé équivalent du filtre LC	61
Figure IV.4: Allures de courbes de courants à la sortie de l'onduleur avant et après filtrage.	63
Figure IV.5: Analyse spectrale du courant à la sortie de l'ondule	63
Figure IV.6: Analyse spectrale du courant à la sortie du filtre LC	64
Figure IV.7: Allure des trois tensions simples avant et après filtrage	64
Figure IV.8: Allures de la tension simple et composée à la sortie de l'onduleur et à la sortie du filtre	65
Figure IV.9: Analyse spectrale d'une tension composée à la sortie de l'onduleur.....	65
Figure IV.10: Analyse spectrale d'une tension composée à la sortie du filtre LC	66
Figure IV.11 : Structure générale d'une PLL	67
Figure IV.12 : Principe de la PLL triphasée dans le domaine de Park	68
Figure IV.13: La réponse de PLL pour un déphasage initial de 30°	69
Figure IV.14 : La réponse de PLL pour un changement de fréquence	70
Figure IV.15 : Représentation de la connexion onduleur-groupe diesel	70
Figure IV.16 : Boucle de régulation du courant d'axe direct	72
Figure IV.17: Boucle de régulation réduite du courant	72
Figure IV.18 : Boucle de régulation de la tension du bus continu.....	74
Figure IV.19 : Boucle de régulation réduite de la tension du bus continu.....	75
Figure IV.20: Schéma globale de la commande du système hybride PV-diesel sans stockage.....	76
Figure IV.21 : Algorithme de gestion d'énergie	77
Figure IV.22 : Profile de l'irradiation	78
Figure IV.23 : Puissance générer par le PV	78
Figure IV.24 : Tension du bus DC.....	78
Figure IV.25 : Puissance du groupe diesel.....	78
Figure IV.26 : Vitesse du groupe diesel.....	78
Figure IV.27 : Courants à la sortie du filtre	79

Figure IV.28 : Zoom des courants à la sortie du filtre	79
Figure IV.29 : Courants du groupe diesel	79
Figure IV. 30 : Zoom des courants du groupe diesel.....	79
Figure IV.31 : Courants dans la charge	79
Figure IV.32 : Zoom des courants dans la charge	79
Figure IV.33 : Tensions au bornes de la charge.....	80
Figure IV.34 : Zoom des tensions dans la charge	80
Figure IV.35 : Analyse spectrale du courant de la charge	80
Figure IV.36 : Analyse spectrale de tension de la charge	80
Figure IV.37 Circuit équivalent de modèle de la batterie simplifié	83
Figure IV.38 : Contrôle de tension du bus DC	84
Figure IV.39 : Schéma globale de la commande du système hybride PV-diesel avec stockage.....	85
Figure IV.40 : Profile de l'irradiation	86
Figure IV.41 : Profile de la charge.....	86
Figure IV.42 : Puissance du groupe diesel.....	86
Figure IV.43 : Puissance générer par le PV	86
Figure IV.44 : Tension du bus DC.....	86
Figure IV.45 : Courant des batteries	86

Liste des tableaux :

Tableau I.1 : Les puissances maximales pour les différentes irradiations utilisée dans la simulation	35
Tableau III.1 : Tailles du système hybride proposé à Homer.....	55
Tableau III.2 : Tailles optimisées par Homer	56

Liste des nomenclatures :

Symbole	Description	Unité
V_{ref}	Tension de référence	V
Ω_{ref}	Vitesse de rotation de référence.	rad/s
Ω	Vitesse de rotation du rotor synchrone.	rad/s
Φ	Débit du carburant.	L/h
ω	Pulsation des courants alternatifs.	rad/s
p	Nombre de paires de pôles.	
f	Fréquence des courants alternatifs en	Hz.
Ω_s	Vitesse de rotation du champ tournant	rad/s
E	Force électromotrice	V
K	Coefficient de Kapp	
N	Nombre de conducteurs d'une phase de la machine	
Φ	Flux maximum à travers un enroulement	Wb
n_s	Vitesse de rotation	rpm
e_g	f.é.m. à vide	V
V	Tension aux bornes d'un enroulement de la machine	V
R_g	Résistance de l'enroulement	Ω
L_g	Inductance synchrone	H
J_d	Inertie totale de l'ensemble moteur diesel génératrice synchrone.	kg.m ²
T_d	Couple mécanique sur l'arbre.	N/m
T_{em}	Couple électromagnétique.	N/m
T_{mech}	Couple mécanique produit par le moteur diesel.	N/m
T_r	Constante du temps du filtre passe.	s
K_a	Gain du régulateur.	
T_a	Constante du temps du régulateur.	s
K_e	Constante de l'excitatrice.	s
T_e	Constante du temps de l'excitatrice.	s
T_b	Constante du temps du compensateur d'avance.	s
T_c	Constante du temps du compensateur de retard.	s
K_f	Constante du filtre d'amortissement.	s
T_f	Constante du temps du filtre d'amortissement.	s
V_f	Tension d'excitation.	V
m	Indice de modulation	
r	Taux de modulation	
U_p	Amplitude de la porteuse	
f_p	Fréquence de la porteuse.	Hz
f	Fréquence de la modulante.	Hz
r_f	Résistance du filtre	Ω
L_f	Inductance du filtre	H
L_{bat}	Inductance de convertisseur bidirectionnel en courant	H

C_f	Capacité du filtre	F
C_{DC}	Capacité du bus continu.	F
V_{oi}	Tension à la sortie de l'onduleur.	V
V_{gi}	Tension à la sortie de group diesel.	V
I_i	Courant dans l'inductance de filtre.	A
V_d	Tension direct	V
V_q	Tension quadrature	V
I_d	Courant direct	A
I_q	Courant quadrature	A
P	Puissance active	W
Q	Puissance réactive	VAR
E_{ph}	L'énergie des photons.	J
λ	la longueur d'onde.	m
h	Constante de Planck.	J.s
c	Vitesse de la lumière.	m/s
I	Courant délivré par une cellule.	A
I_{ph}	Courant photoélectrique d'une cellule	A
I_d	Courant dans la diode	A
I_0	Courant de saturation de la diode.	A
V_{th}	Tension thermique.	V
V	Tension de sortie de la cellule.	V
I_{sh}	Courant circulant dans R_{sh} .	A
k	Constante de Boltzmann	J/K
q	La charge d'électron.	C
R_{sh}	Résistance shunt.	Ω
R_s	Résistance série d'une cellule.	Ω
R_p	Résistance parallèle d'une cellule.	Ω
I_{sc}	Courant de court-circuit dans les conditions standards.	A
G	Irradiation solaire.	W/m^2
G_0	Irradiation solaire nominale.	W/m^2
K_i	Coefficient de température du courant.	K^{-1}
T	Température de fonctionnement de la cellule.	K
T_0	Température nominale.	K
E_g	Largeur de bande de silicium.	eV
n	Facteur d'idéalité de la jonction P-N.	
T_a	Température ambiante.	K
I_{s0}	Courant de saturation de la diode dans les condition standards.	A
V_{co}	Tension à vide.	V
I_{cc}	Courant de court-circuit.	A
α	Le rapport cyclique du L'hacheur boost.	

Liste des abréviations :

Acronyme	Signification
UV	Ultraviolet
IR	Infrarouge
GPV	Générateur photovoltaïque
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsions
P&O	Perturbe and Observe
PV	Photovoltaïque.
PPM	Point de Puissance Maximale.
HOMER	Hybrid Optimization Model for Electric Renewables
AC	Alternative Current.
DC	Direct Current
NREL	National Renewable Energy Laboratory
NPC	total Net Present Cost.
COE	Cost Of Energy
PMH	Point Mort Haut
PMB	point Mort Bas
MS	Machine Synchrone
PLL	Phase Locked Loop
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
THD	Taux de Distorsion Harmoniques
VOC	Voltage Oriented Control
SOC	State of Charge

Introduction générale

La diminution des réserves énergétiques traditionnelles (pétrole, charbon, gaz...) due à leur utilisation excessive, est la principale cause qui nous oblige à passer vers d'autres sources d'origine renouvelable qui peuvent être considérées comme inépuisables [2].

L'une des applications des sources d'énergies renouvelables la plus prometteuse est leur utilisation dans les sites isolés [18], où l'extension des réseaux électriques rencontre des contraintes économiques importants [3]. La plupart de ces sites utilisent une énergie d'origine fossile pour répondre à ces besoins d'électrification, donc des groupes électrogènes.

L'utilisation des groupes électrogènes dans ces sites pose des problèmes économiques liées au prix et du transport du carburant. De plus, la consommation de ces combustibles fossiles donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre.

La combinaison de plusieurs sources d'énergies renouvelables peut constituer un complément aux groupes électrogènes, en constituant un système énergétique hybride.

L'énergie photovoltaïque considérée comme l'une des énergies renouvelables la plus prometteuse pour les systèmes hybrides dans les sites isolés, car les générateurs photovoltaïques sont caractérisés par leurs longue durée de vie (plus de 20 ans), avec absence des parties mécaniques donc une faible maintenance.

Le but du système hybride est d'assurer une alimentation continue sans interruption, et de maximiser le bilan énergétique provenant de l'énergie renouvelable, donc une réduction de la consommation du carburant [2].

L'utilisation des éléments de stockage assure la stabilité du système hybride, mais pose des problèmes économiques à cause de la faible durée de vie (3 à 5 ans), ceci engendre des remplacements répétés des batteries au cours de la durée de vie de l'installation et donc des dépenses additionnelles [4].

L'association de plusieurs sources d'énergie offre potentiellement une certaine fiabilité au système global mais elle induit aussi plusieurs problèmes [4]. Il s'agit entre autres :

- Du choix de la taille optimale de chaque composant du système énergétique global.
- De l'optimisation de la gestion de l'énergie au sein du système.

L'objet de ce mémoire est la modélisation, le dimensionnement et la commande du système hybride PV-diesel avec et sans stockage alimentant un site isolé.

Le travail présenté dans ce mémoire comprend quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présentons une modélisation des différentes composantes de la chaîne photovoltaïque, l'algorithme de maximisation de puissance MPPT avec la méthode

de perturbation et d'observation (P&O). Nous finirons ce chapitre par une simulation sur l'environnement Matlab/Simulink.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation du groupe électrogène. Nous exposons les différents régulateurs (tension, vitesse) utilisés pour maintenir la vitesse et la tension à des valeurs de références. Nous finirons ce chapitre par une simulation sur l'environnement Matlab/Simulink.

Dans le troisième chapitre nous présentons les différentes structures des systèmes hybrides PV-diesel, ainsi que le dimensionnement d'un système hybride PV-diesel sans stockage alimentant un site isolé utilisant le logiciel de dimensionnement et d'optimisation HOMER.

Le quatrième chapitre sera consacré à la connexion de la chaîne photovoltaïque au groupe électrogène à l'aide d'un onduleur commandé en tension. Une étude de la PLL (Phase Locked Loop) sera présentée afin d'assurer la synchronisation des tensions de l'onduleur avec les tensions de groupe électrogène. Nous présentons la commande du système hybride PV-diesel avec et sans stockage, ainsi que les différents régulateurs utilisés. Nous exposons ensuite, l'algorithme globale de la gestion d'énergie et les divers résultats obtenus.

Nous terminons par une conclusion générale sur l'ensemble de cette étude.

Chapitre I

« Etude de la chaîne
photovoltaïque »

I.1. Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire. La transformation de cette énergie en électricité s'effectue grâce à des cellules qui sont associées pour former des modules solaires, eux-mêmes associés pour former des générateurs photovoltaïques [36].

Dans ce chapitre, nous allons présenter tout d'abord la source de l'énergie photovoltaïque, les différentes caractéristiques électriques qui définissent la cellule photovoltaïque, ainsi que les différentes composantes du système photovoltaïque et son principe de fonctionnement.

I.2. Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est l'ensemble du rayonnement émis par le soleil (ondes électromagnétiques).

Par leur longueur d'onde on distingue les différents types de rayons [8] :

- Les Ultraviolets (UV) : une longueur d'onde de 200 nm à 400 nm, invisibles, provoquent des dommages sur les cellules.
- La Lumière visible : une longueur d'onde de 400 à 800 nm, visibles, elle nous permet de distinguer les formes et les couleurs.
- Les Infrarouges (IR) : une longueur d'onde de 800 à 1400 nm, invisibles, chauffent la matière solide ou gazeuse qu'ils rencontrent.

Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie E_{ph} , qui s'écrit :

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda}$$

Dans laquelle ' λ ' représente la longueur d'onde, ' h ' la constante de Planck et ' c ' la vitesse de la lumière [36].

Hors atmosphère, l'énergie moyenne annuelle reçue par la terre est d'environ 5,5 KWh/m²/jour. En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre (Figure I.1) à la suite de phénomène complexe d'absorption par les gaz (H₂O, O₂ ...) [31], de diffusion par les molécules, et d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols [36].

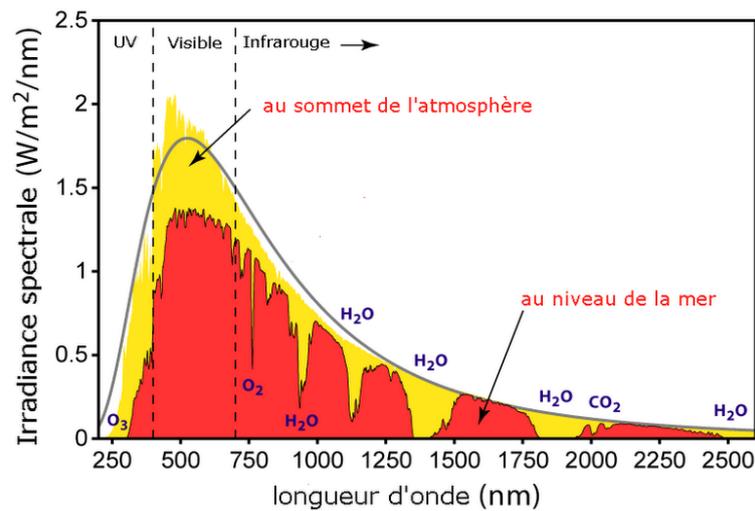


Figure I.1 : Spectre du rayonnement solaire.

Le rayonnement global au sol dépend de la composition et de l'épaisseur d'atmosphère traversée par les rayons lumineux au cours de la journée. Il se décompose en plusieurs composants comme montré dans la Figure I.2 [32].

- **Le rayonnement direct :** c'est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus. Il est reçu directement par le soleil sans diffusion par l'atmosphère.
- **Le rayonnement diffus :** est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.
- **Le rayonnement réfléchi :** c'est le rayonnement réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface., cela dépend de l'environnement du site (eau, neige...etc.).
- **Le rayonnement global :** le rayonnement global est la somme de tous les rayonnements directs, diffus et reflétés par le sol.

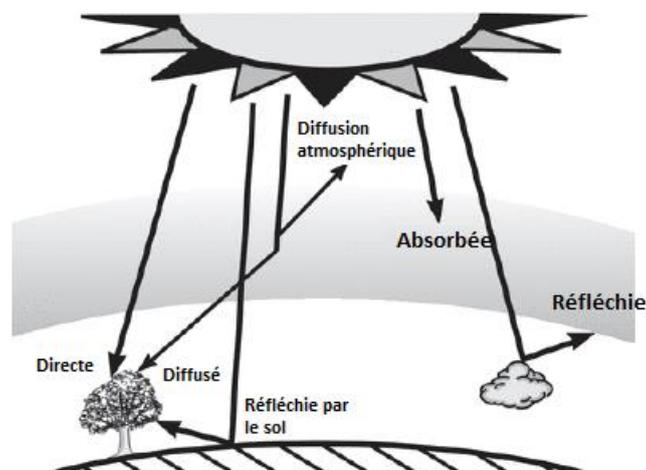


Figure I.2 : Composantes du rayonnement solaire au sol [32].

I.3. Gisement solaire :

Le gisement solaire représente l'ensemble de données sur l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour calculer l'énergie reçue par le système solaire. Il aide au dimensionnement le plus exact possible des systèmes solaires [32].

Par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'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) (Figure I.3).

Sur la majeure partie du territoire national, l'énergie reçue sur une surface horizontale de 1m^2 est près de $1700\text{KWh/m}^2/\text{an}$ au Nord et $2263\text{ KWh/m}^2/\text{an}$ au Sud du pays [11] (Figure I.4).

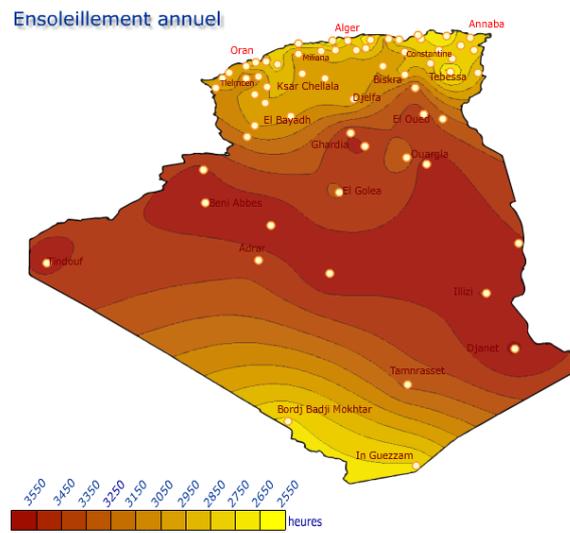


Figure I.3 : Ensoleillement annuel [14].

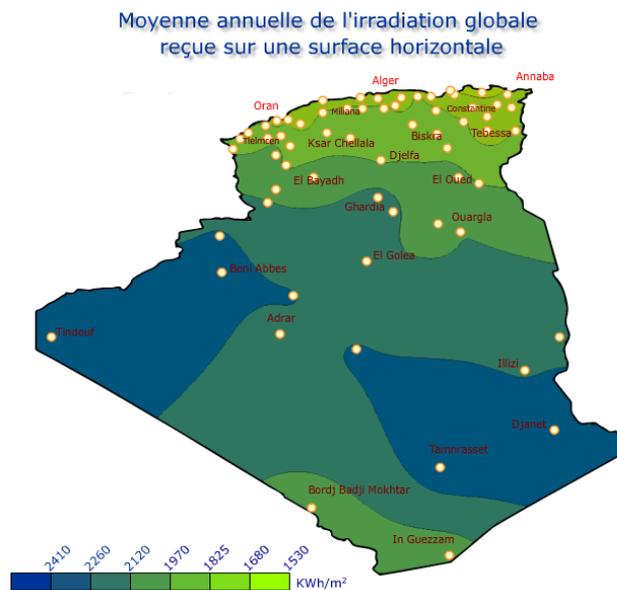


Figure I.4: Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale [14].

I.4. Effet photoélectrique :

L'effet photoélectrique est un phénomène physique propre à certains matériaux, consiste à l'émission d'électrons lorsque celui-ci est exposé à la lumière ou à un rayonnement électromagnétique de fréquence suffisamment élevée.

L'effet photovoltaïque est l'un des effets photoélectriques. Il est mis en œuvre dans les cellules photovoltaïques pour produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire.

I.5. Le semi-conducteur :

Un semi-conducteur est un matériau dont la conductivité électrique est intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants. Pour qu'un électron lié à son atome devienne libre il faut lui fournir une énergie "énergie du band gap" qui est propre à chaque matériau. Pour les applications photovoltaïques cette énergie varie entre 1 et 1.8 eV.

On utilise une technique appelée le dopage pour augmenter la photosensibilité du matériau.

Types de dopage :

- **Dopage de type n (négatif) :**

Introduire dans le cristal des atomes étrangers (phosphore P) qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire libre de se mouvoir dans le cristal.

- **Dopage de type p (positif) :**

Introduire dans le cristal des atomes étrangers (bore) qui ont la propriété de donner des trous chacun excédentaire.

I.6. Cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique, produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque, les cellules les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (Si), la recombinaison de deux semi-conducteurs de dopage N est P forme une cellule et donne une jonction PN ou les charges libres (électrons et trous) se recombine, un champ électrique constant se crée par la présence d'ions fixes positifs et négatifs, ce champ électrique est le moteur des électrons libéré par l'effet photoélectrique, d'où la circulation de courant dans un circuit extérieur (Figure I.5).

Elle se présente sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres, prises en sandwich entre deux contacts métalliques, pour une épaisseur de l'ordre du millimètre.

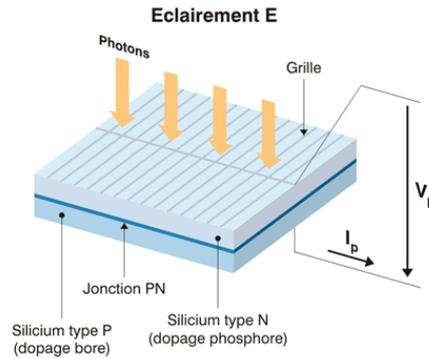


Figure I.5: Schéma d'une cellule solaire à jonction P-N standard [32].

I.6.1. Modélisation de la Cellule photovoltaïque :

- **Modèle idéale :**

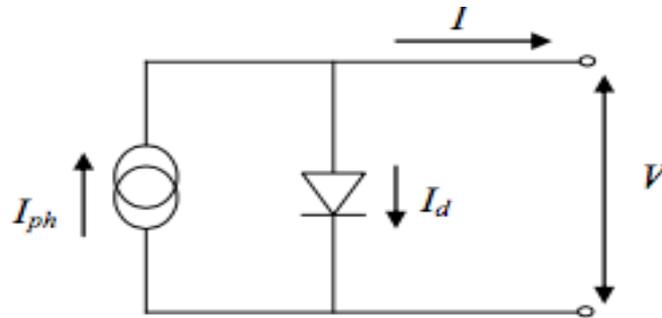


Figure I.6: Schéma du circuit équivalent simple d'une cellule photovoltaïque [36].

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque idéale montrer dans la Figure I.6 comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN. L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff [32] [36] :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (I.1)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V+I \cdot R_s}{V_t}} - 1 \right) \quad (I.2)$$

Avec :

I : Le courant généré par la cellule photovoltaïque.

I_{ph} : Le courant photoélectrique créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident) .

I_d : Le courant circulant dans la diode.

I_0 : Le courant de saturation de la diode [A], dépendant de la température.

V : La tension de sortie.

V_t : La tension thermique.

R_s : La résistance série.

• **Modèle à une diode :**

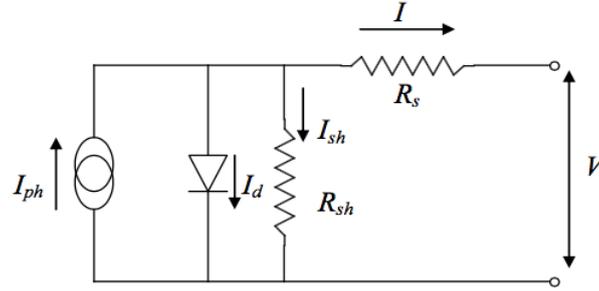


Figure I.7 : Modèle équivalent à deux résistance d'une cellule photovoltaïque [36].

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique de la Figure I.7 se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, les pertes sont modélisées par deux résistances, une résistance série représentant les pertes par effet Joule, une résistance shunt caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_s) [32] [36].

L'équation caractéristique :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{I.3}$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V+I \cdot R_s}{v_t}} - 1 \right) - \frac{V+I \cdot R_s}{R_{sh}} \tag{I.4}$$

$$I_{ph} = \frac{G}{G_0} [I_{sc} + k_i(T - T_0)] \tag{I.5}$$

$$I_{sc} = I_{s0} \left(\frac{G}{G_0} \right)^{\frac{3}{n}} * e^{\frac{qE_g}{nk} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \tag{I.6}$$

Avec :

R_{sh} : La résistance shunt

I_{sh} : Le courant circulant dans R_{sh} .

I_{sc} : Le courant de court-circuit dans les conditions standards.

G : L'irradiation solaire.

G_0 : L'éclairement solaire nominal.

K_i : Coefficient de température du courant.

T_0 : Température nominale.

E_g : Largeur de bande de silicium.

I_{s0} : Le courant de saturation de la diode dans les conditions standards.

I.6.2 Caractéristique électrique de la cellule photovoltaïque :

Nous allons simuler le modèle précédent sous MATLAB/SIMULINK pour une irradiation de 1 kW/m^2 . Nous prenons l'exemple d'une cellule photovoltaïque, dans les paramètres sont illustrés dans le tableau (Annexe).

Les résultats de simulation sont représentés dans les figures ci-dessus :

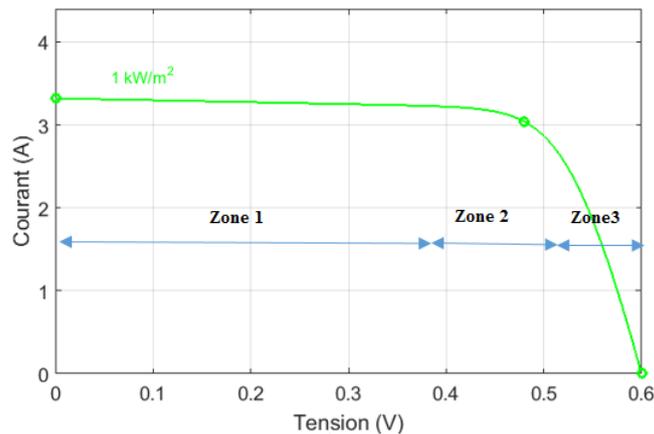


Figure I.8: Caractéristique courant-tension de la cellule PV.

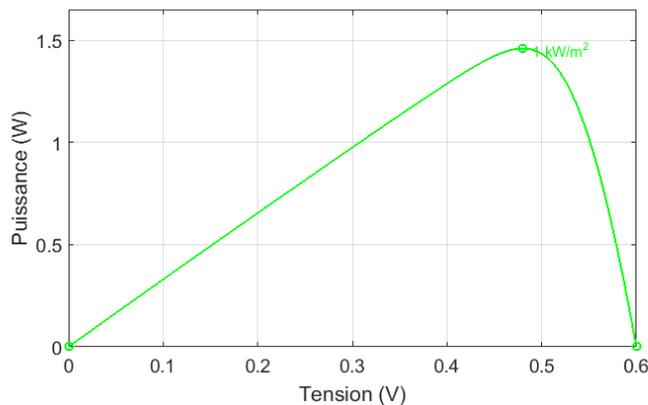


Figure I.9 : Caractéristique Puissance-Tension de la cellule PV.

De la Figure I.8 on peut distinguer trois zones différentes [35] :

- Zone 1 : Dans cette zone le courant est constant quel que soit la tension, la cellule PV fonctionne comme une source de courant.
- Zone 2 : C'est là où se trouve le point de fonctionnement qui permet au cellule PV de fournir une puissance maximale, ce point est appelé point de puissance maximal, qu'on peut voir dans la Figure I.9.
- Zone 3 : Dans cette zone la cellule PV se comporte comme une source de tension.

Donc, la cellule PV peut fonctionner comme une source de courant ou une source de tension, cela dépend du choix du point de fonctionnement.

I.6.3 Influence des conditions climatiques sur les caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque :

- **Influence de l'Éclairement**

La Figure I.10 représente l'effet de l'éclairement sur le courant de court-circuit de la cellule photovoltaïque. On remarque que le courant de court-circuit est proportionnel à l'éclairement.

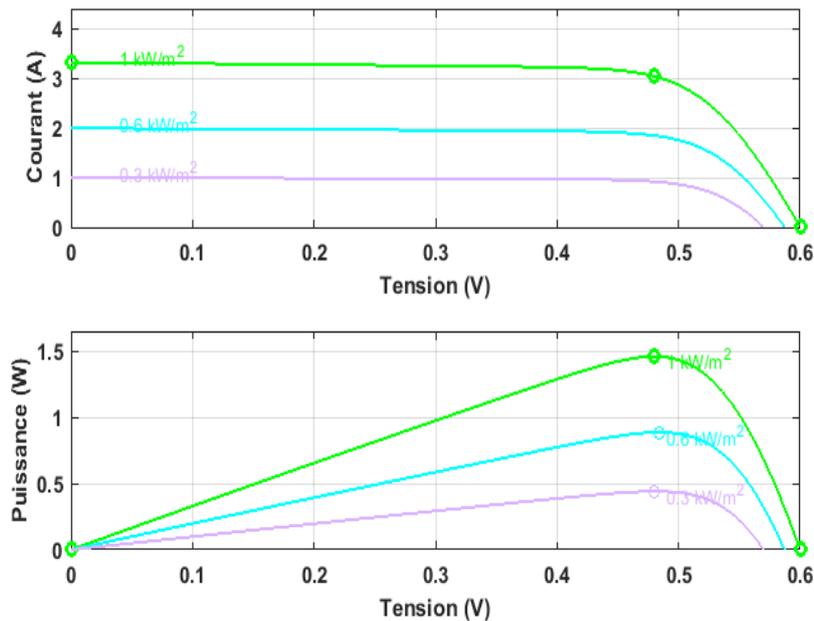


Figure I.10: Caractéristique courant-tension, puissance-tension en fonction de l'éclairement.

- **Influence de la Température**

Une grande partie du rayonnement absorbé par la cellule n'est pas convertie en énergie électrique, il se dissipe sous forme de chaleur, qui provoque l'augmentation de la température tel que [38] :

$$T_c = T_a + \frac{E_m}{800} (TUC - 20) \quad (I.7)$$

- T_c : Température de la cellule.
- T_a : Température ambiante.
- TUC : Température d'une cellule sous une irradiance de 800 W/m^2 .
- E_m : Irradiance en W/m^2 .

La tension de circuit ouvert diminue quand la température augmente, ceci engendre une diminution de la puissance maximale comme il est montré dans la Figure I.11.

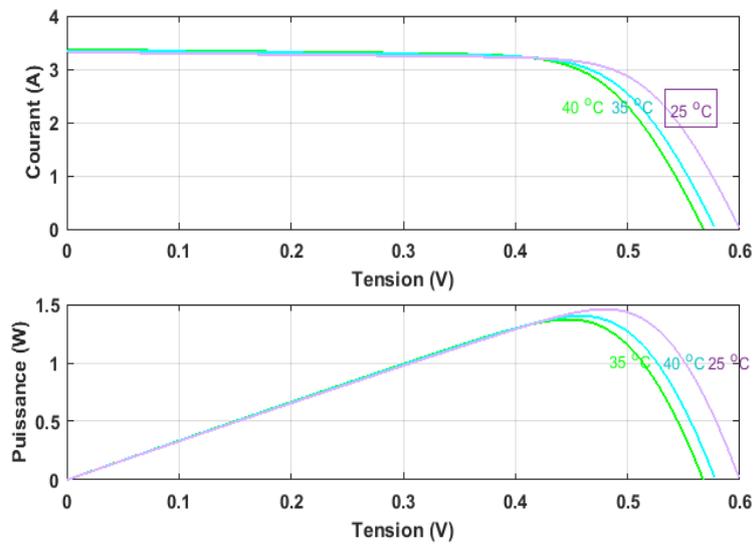


Figure I.11: Caractéristique courant-tension, puissance-tension en fonction de la température.

I.7. Générateur photovoltaïque :

Les cellules cristallines telles quelles ne permettent pas d'utiliser l'énergie photovoltaïque de manière efficace. En effet, les cellules ne développent qu'une puissance relativement faible (3W) et sont extrêmement fragiles et sensibles aux éléments extérieurs (corrosion). Pour utiliser l'énergie PV à grande échelle, les cellules sont connectées entre elles en série pour augmenter la tension et en parallèle pour augmenter le courant [13].

- Association en série

En additionnant des cellules identiques en série, le courant reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre des composants série (Figure I.12) [35].

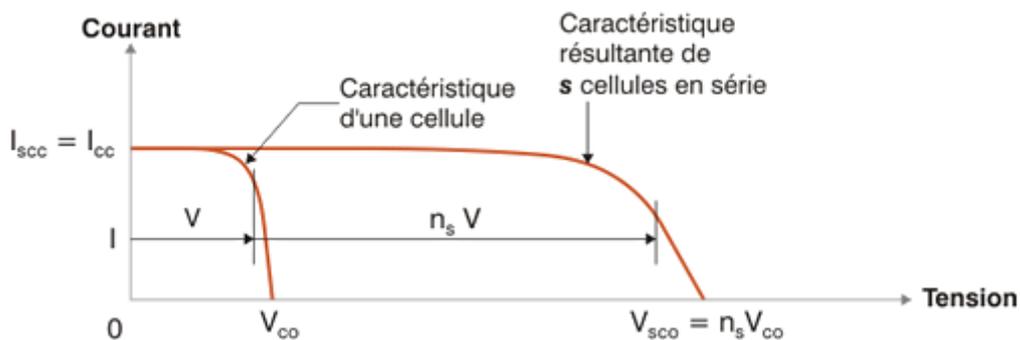


Figure I.12: Cellules identiques en série [7].

- Association en parallèle :

En additionnant des cellules identiques en parallèle, le courant reste constant mais la tension augmente proportionnellement au nombre des composants mis en parallèle (Figure 1.13) [7].

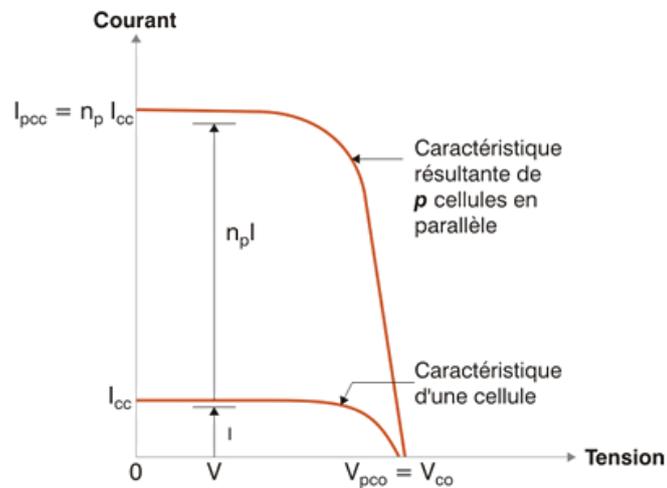


Figure 1.13 : Cellules identiques en parallèle [7].

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un module photovoltaïque.

Le générateur photovoltaïque est réalisé par une association en série et en parallèle de modules photovoltaïques (Figure 1.14).

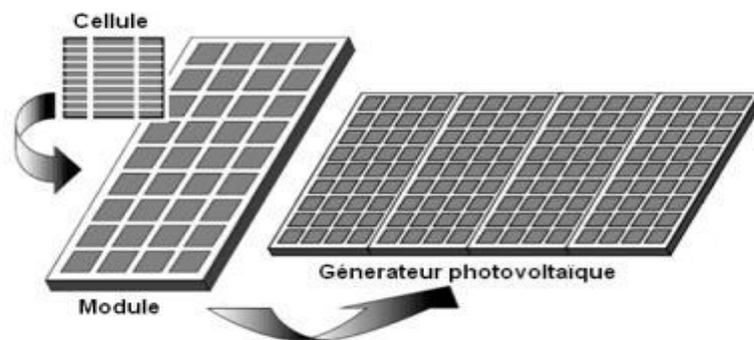


Figure I.14: Composantes d'un champ de modules photovoltaïques [16].

I.7. 1. Protection du générateur PV :

Pour assurer qu'une branche de cellules connectées en série ne reçoivent de l'énergie d'autres branches connectées en parallèle, il faut installer dans chacune des branches des diodes série appeler diode anti-retour (Figure I.15).

Il peut arriver qu'une photopile occultée ait à supporter une polarisation inverse dépassant 30 V, soit la tension de claquage. Sachant qu'une photopile standard ne peut supporter que des tensions inverses de l'ordre de la dizaine de volts. On monte une diode au

silicium "by-pass", en parallèle en tête-bêche sur une branche de plusieurs photopiles en série (Figure I.15).

En cas de déséquilibre, la diode fait passer le courant des modules qui se trouvent dans la même branche de la partie occultée et en fonctionnement normal la diode de protection doit pouvoir être polarisée avec une tension inverse égale à la tension de travail du module, ainsi pour éviter le problème de "hot-spot" (point chaud) qui est due à un déséquilibre d'éclairement, ou la partie ombrée va devoir faire passer d'avantage de courant qu'elle ne peut normalement en fournir, dissipant alors la puissance qui ne pouvant pas être extraite. Cette dissipation a comme effet immédiat à un échauffement de la zone sous-irradiée [13].

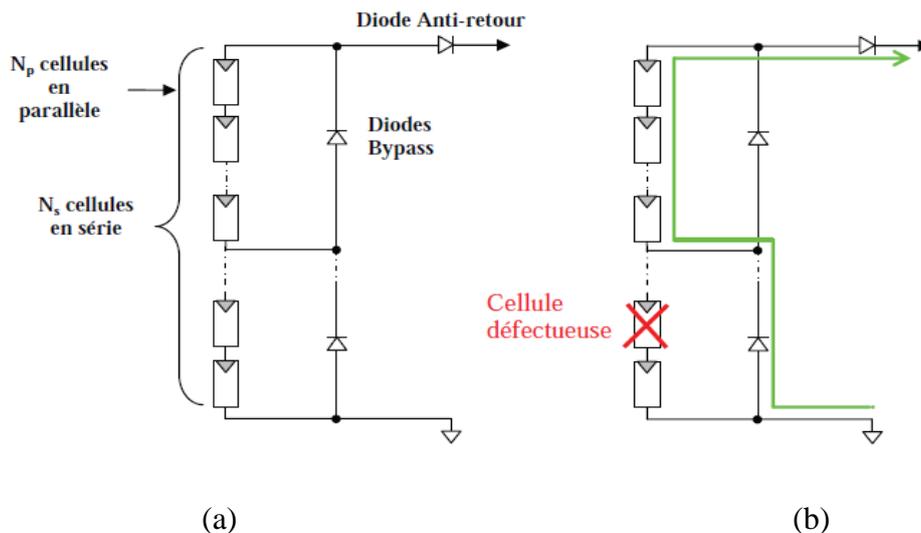


Figure I.15 : (a) Architecture classique d'un panneau solaire avec diodes de protection (b) Défaillance d'une des cellules du module PV et activation de la diode by-pass [16].

I.7. 2.Caractéristiques d'un générateur PV :

Les modules sont généralement des parallélépipèdes rectangles rigides minces (quelques centimètres d'épaisseur), caractérisé par [30] :

- . La puissance crête P_c : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m^2) $P_c = V_{CO} \cdot I_{CC}$.
- . La caractéristique $I=f(V)$: Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- . Tension à vide V_{CO} : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un maximum d'éclairement.
- . Courant de court-circuit, I_{CC} : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- . Point de fonctionnement optimal, $P_m (V_m, I_m)$: Calculé en plein soleil, $P_m = V_m \cdot I_m$.
- . Rendement : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de l'irradiation incidente.

- Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale.

I.8. Etage d'adaptation :

L'utilisation des convertisseurs d'électronique de puissance dans les systèmes hybrides est incontournable, un convertisseur DC/DC (hacheur Boost) est nécessaire pour l'adaptation de la tension du générateur photovoltaïque à la tension du bus continu par régulation, qui va prendre le double rôle d'augmentation de la tension, aussi pour tirer le maximum de puissance du générateur.

I.8.1. Convertisseur DC/DC hacheur :

Hacheur ou convertisseur continu - continu est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs électroniques commandés dans le but de modifier la valeur de la tension moyenne d'une source de tension continue [34].

Il existe trois types d'hacheur qui sont :

- **Convertisseur Boost** ou hacheur parallèle, qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur.
- **Convertisseur Buck** ou hacheur série, qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur.
- **Convertisseur Buck-Boost** qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur.

I.8.2. Convertisseur Boost :

Généralement dans les systèmes photovoltaïques a fort puissance on aura besoin d'élever la tension du bus continu d'où l'utilisation dans notre étude d'un hacheur de type Boost [34], représenté par la Figure I.16:

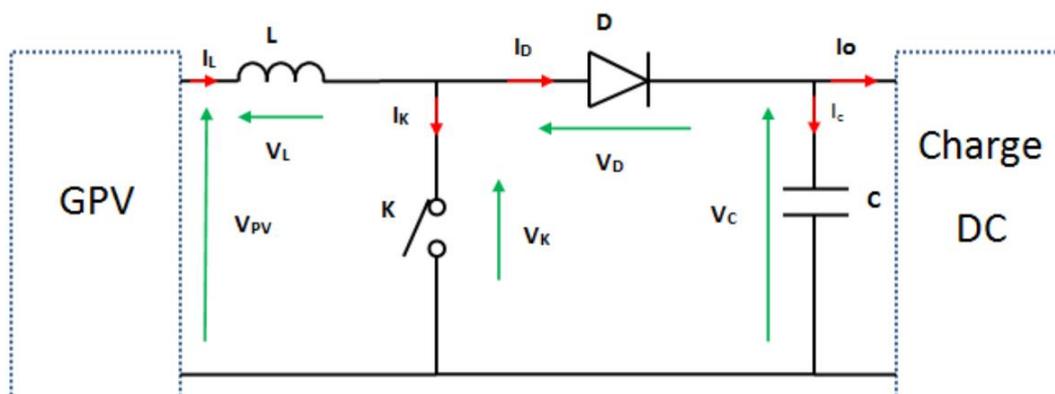


Figure I.16: Circuit électrique de base d'un Hacheur Boost [32].

Nous considérons que l'hacheur Boost fonctionne toujours en conduction continue, donc le courant I_L traversant l'inductance ne s'annule jamais.

On distingue deux intervalles de fonctionnement de l'hacheur [32] [34] :

- Intervalle $[0, \alpha T_s]$:

Dans cet intervalle l'interrupteur K est passant, cela entraîne le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique dans l'inductance L, la diode D est polarisée en inverse ($V_D = -V_{dc}$) elle est bloquée, la charge est alors déconnectée de l'alimentation.

Les équations qui régissent cet intervalle sont :

$$i_{cpv} = C_{pv} * \frac{dV_{pv}(t)}{dt} = i_{pv}(t) - i_l(t) \quad (I.8)$$

$$i_c = C_{dc} * \frac{dV_{dc}(t)}{dt} = -i_0(t) \quad (I.9)$$

$$V_L = L * \frac{di_L(t)}{dt} = V_{pv}(t) \quad (I.10)$$

- Intervalle $[\alpha T_s, T_s]$:

Dans cet intervalle l'interrupteur K est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa FEM s'additionne à celle du générateur (effet survolteur), ce qui entraîne un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité.

$$i_{cpv} = C_{pv} * \frac{dV_{pv}(t)}{dt} = i_{pv}(t) - i_L(t) \quad (I.11)$$

$$i_c = C_{dc} * \frac{dV_{dc}(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \quad (I.12)$$

$$V_L = L * \frac{di_L(t)}{dt} = V_{pv}(t) - V_{dc}(t) \quad (I.13)$$

En calculant les valeurs moyennes dans une période de hachage, le système d'équations devient :

$$(1 - \alpha)(I_{pv} - I_L) + \alpha(I_{pv} - I_L) = 0 \quad (I.14)$$

$$(1 - \alpha)(I_L - I_0) - \alpha I_0 = 0 \quad (I.15)$$

$$(1 - \alpha)(V_{pv} - V_{dc}) + \alpha V_{pv} = 0 \quad (I.16)$$

D'où on peut tirer le rapport de conversion de tension qui représente le rapport de la tension de sortie sur la tension d'entrée :

$$M(\alpha) = \frac{V_{dc}}{V_{pv}} = \frac{1}{1 - \alpha} \quad (I.17)$$

I.9 La commande MPPT Maximum Power Point Tracking :

La commande MPPT est une méthode de commande dans l'objectif est d'obtenir la puissance maximale possible depuis un (ou plusieurs) panneau(x) photovoltaïque(s).

L'énergie délivrée par les cellules photovoltaïques dépend d'une équation complexe non linéaire mettant en relation le rayonnement solaire, la température, et la résistance du circuit.

Le principe de fonctionnement de cette commande est d'analyser en permanence la sortie du panneau solaire tel que pour un même éclairement, une même température, la puissance délivrée sera différente selon la charge, donc la commande MPPT permet de piloter le convertisseur statique reliant la charge et le panneau photovoltaïque en agissant sur le rapport cyclique donc sur la tension aux bornes du panneau, de manière à fournir en permanence le maximum de puissance [9].

Différentes méthodes de maximisation de puissance classées en deux catégories [9] :

- **Méthodes indirectes :**

Elles 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.

- **Méthodes directes :**

Ce sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux, l'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Parmi ces méthodes, on trouve la méthode de différenciation, la méthode Perturb & Observ (P&O), l'incrément de conductance.

I.9.1. La méthode de perturbation et d'observation (P&O) :

Il s'agit en fait d'un algorithme qui va chercher la valeur optimale de puissance en faisant varier la valeur de la tension U_{pv} à la sortie du panneau, et en analysant la puissance de sortie pour la maximiser, tel que si la valeur de la puissance actuelle $P_{pv}(n)$ du générateur est supérieure à la valeur précédente $P_{pv}(n-1)$ alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent [29].

La méthode P&O est caractérisé par sa facilité d'implémentation cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM, une solution est qu'une fois ce dernier est atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la perturbation, ce qui nous amène au compromis entre la précision et la rapidité de la méthode [6].

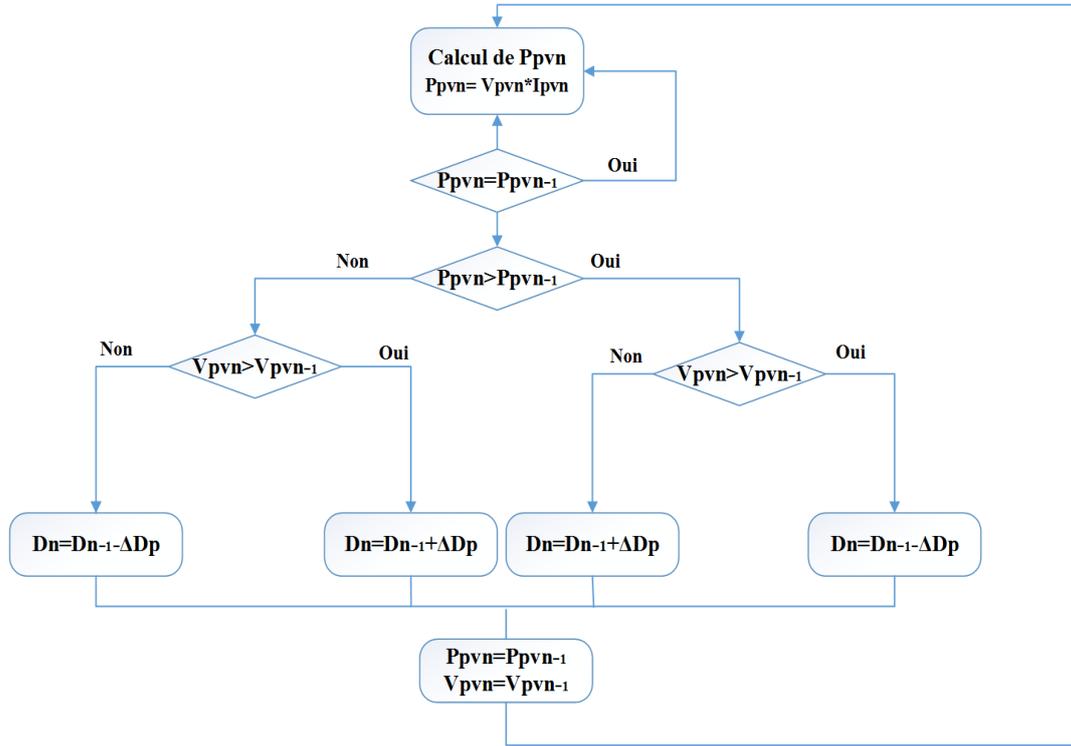


Figure I.17 : Algorithme P&O.

I.10. Simulation de la commande P&O :

La chaîne principale de commande est représentée par la Figure I.18 :

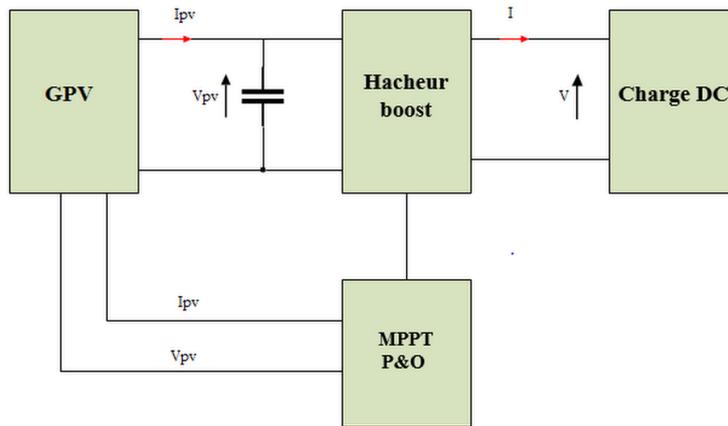


Figure I.18 : Schéma de la chaîne photovoltaïque principale.

Pour la simulation de cette chaîne sous MATLAB/SIMULINK, on suppose un profil d'irradiation présenté par la Figure I.19.

Les paramètres de GPV, de la charge et du l'hacheur Boost sont illustrés dans les tableaux (Annexe).

Les résultats de simulation sont présentés par les figures ci-dessous :

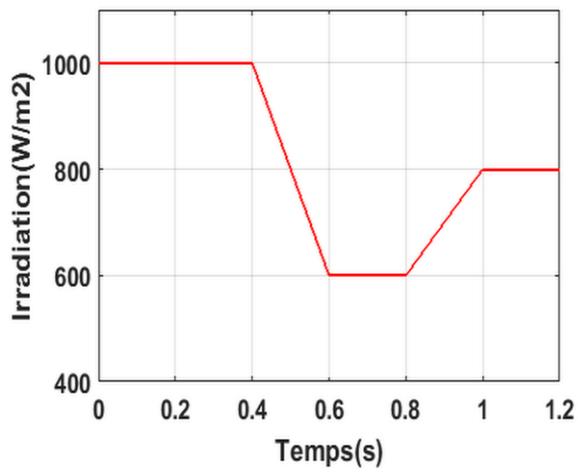


Figure I.19 : Profil d'irradiation.

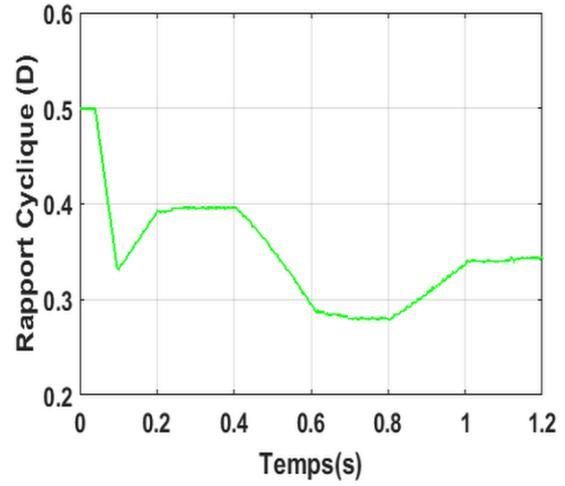


Figure I.20: Rapport cyclique.

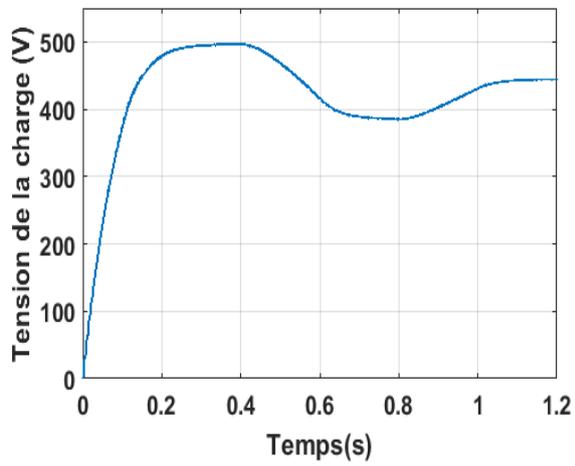


Figure I.21 : Tension de la charge.

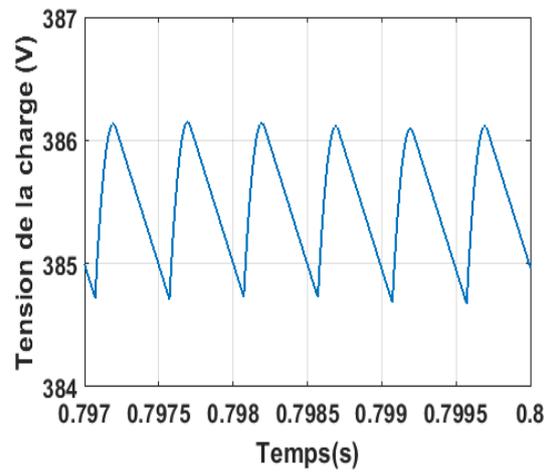


Figure I.22 : Zoom de tension de la charge.

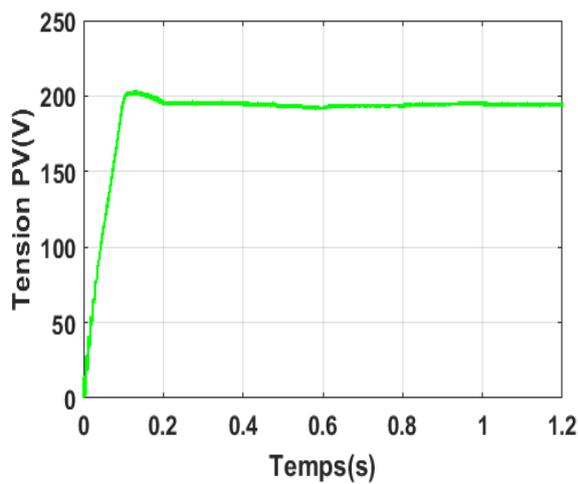


Figure I.23 : Tension du GPV.

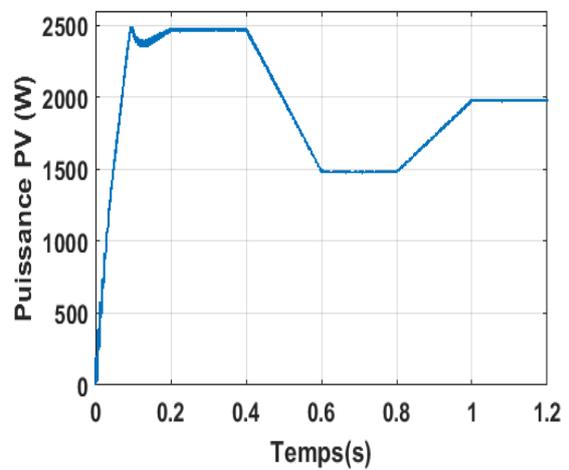


Figure I.24: Puissance du GPV.

Les puissances maximales pour les différentes irradiances utilisées dans la simulation sont représentées dans le Tableau I.1 :

Irradiation [W/m^2]	Puissance maximale (Pmax) [W]
600	1500
800	2000
1000	2500

Tableau I.1 : Les puissances maximales pour les différentes irradiances utilisées dans la simulation.

La Figure I.20 représente l'évolution du rapport cyclique en fonction de temps, montre bien que le rapport cyclique varie avec la variation de l'irradiation.

La Figure I.21 montre que la tension de la charge varie en fonction de l'irradiation, ceci est dû à la variation du rapport cyclique. Cette tension présente des ondulations due à l'utilisation de la technique MLI, représentées dans la Figure I.22.

De la Figure I.24 on observe que l'allure de la puissance de GPV suit l'allure de l'irradiation et du Tableau I.1 on voit que le GPV fonctionne à sa puissance maximale quel que soit l'irradiation, ce qui montre le bon fonctionnement de l'algorithme P&O.

I.11. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit le principe de la conversion photovoltaïque, la modélisation d'une cellule photovoltaïque, et l'effet des conditions climatiques sur ces caractéristiques électriques.

La modélisation nous a permis de bien simuler le fonctionnement de la cellule photovoltaïque. Nous avons remarqué que l'irradiation influe directement sur le courant généré et la température influe défavorablement sur la tension.

Nous avons aussi mis en évidence le principe de la commande MPPT avec l'algorithme P&O, ainsi que la simulation de cette dernière en introduisant un hacheur Boost comme un étage d'adaptation entre le GPV et la charge.

Chapitre II

« Etude de groupe diesel »

II.1. Introduction :

Les générateurs diesel ou bien les groupes électrogènes sont des dispositifs autonomes capable de produire de l'énergie électrique. Ils sont utilisés le plus souvent comme une source d'électricité dans les sites isolés, ou pour assurer la continuité du réseau dans le cas des alimentations sans interruption. On les trouve aussi associé avec d'autres générateurs d'énergie électrique en construisant un système hybride [41].

Dans ce chapitre nous allons présenter la constitution et le principe de fonctionnement du groupe électrogène, ainsi que les différents régulateurs (tension, vitesse) utilisés pour maintenir la vitesse et la tension à des valeurs de références.

II.2. Le groupe diesel :

Un groupe diesel est une machine de production d'électricité autonome. La plupart des groupes sont constitués d'un moteur thermique qui entraîne une génératrice électrique. Ils fournissent à la charge, deux formes d'énergie : active et réactive.

Pour la puissance active elle est assurée en régulant la fréquence du réseau donc en maintenant la vitesse du moteur constant est cela par un gouverneur de vitesse qui fonctionne en ajustant le flux du carburant au moteur diesel [44].

Notons que la puissance réactive est assurée par le réglage de la tension, en ajustant le courant d'excitation du générateur synchrone [44].

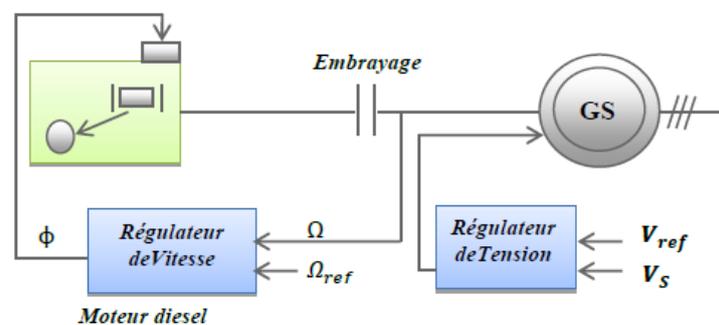


Figure II.1 : Modèle simplifié du générateur diesel [41].

II.2. 1.Moteur diesel :

Le moteur Diesel est un moteur à combustion interne, il utilise l'énergie chimique d'un combustible, en la transformant en travail mécanique en passant par l'énergie thermique de la combustion est cela dans une enceinte fermée qui est le cylindre.

Le cylindre est un élément central du moteur dans lequel se déplace le piston entre deux points qui sont le PMH point mort haut et le PMB point mort bas.

Le mouvement alternatif du piston est ensuite transformé en mouvement rotatif de vilebrequin qui est l'arbre du moteur, la transformation de mouvement se fait par l'intermédiaire

des bielles, le mouvement rotatif est lissé par un volant d'inertie.

Le mouvement rotatif de vilebrequin entraîne aussi un arbre à cames qui commande les soupapes d'admission (admission de l'air nécessaire à la combustion) et d'échappement (échappement des gaz générés par la combustion) généralement on trouve deux cames par piston décalées sur l'arbre pour permettre aux soupapes d'être ouvertes chacune dans un temps bien définie de cycle.

Le moteur peut être à deux temps ou généralement à quatre temps.

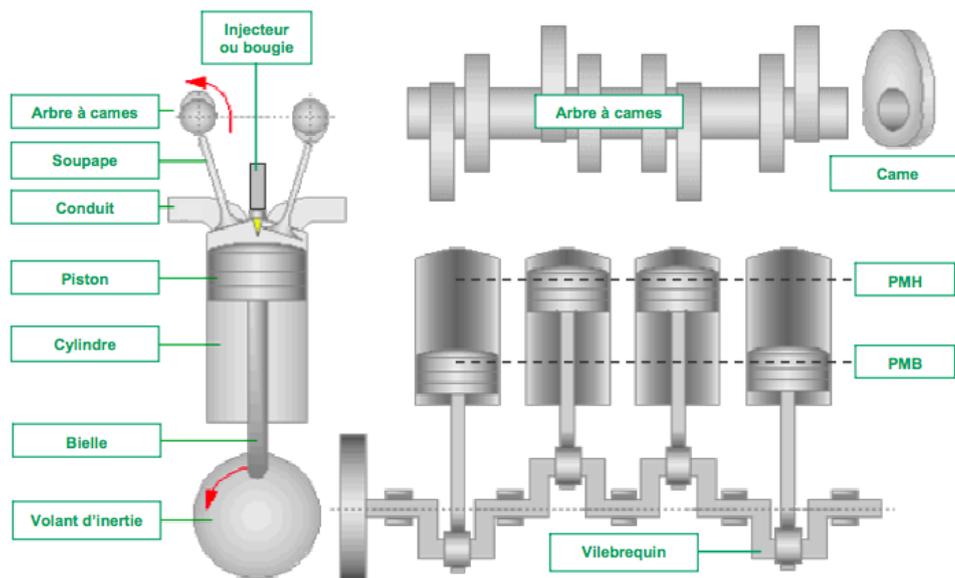


Figure II.2 : Composants principaux d'un moteur diesel.

Rendement de la combustion

Il définit la proportion de la chaleur délivrée par la combustion convertie en travail mécanique sur le vilebrequin. Ce rendement varie entre 0.3 et 0.4 en fonction de la charge.

Consommation spécifique (g/KWh)

La consommation spécifique du moteur est la quantité de combustible qui doit être dépensée pour la production d'une unité d'énergie, ou bien c'est le rapport entre la consommation du carburant et la puissance produite pour une unité de temps, elle s'exprime en g/KWh. Elle définit la qualité de la transformation de l'énergie au sein du moteur. Cette grandeur est proportionnelle à l'inverse du rendement. La consommation spécifique (donc aussi le rendement) dépend, de la forme du cycle thermodynamique décrit dans le moteur.

II.2. 1.1. Principe de fonctionnement :

1^{er} temps : Admission d'air par l'ouverture de la soupape d'admission et la descente du piston.

2^{eme} temps : Compression de l'air par remontée du piston, la soupape d'admission étant fermée.

3^{eme} temps : Temps moteur peu avant le point mort haut le combustible est introduit par l'injecteur qui se mélange avec l'air comprimé qui s'ensuit par le phénomène d'auto inflammation. La combustion rapide qui s'ensuit constitue le temps moteur : les gaz chauds repoussent le piston, libérant une partie de leurs énergies.

4^{eme} temps : Échappement des gaz brûlés par l'ouverture de la soupape d'échappement, poussés par la remontée du piston [25].

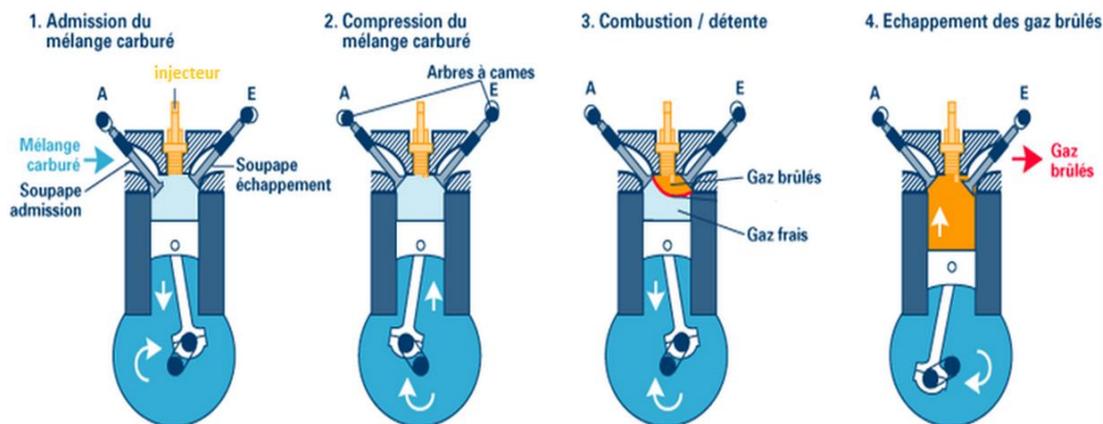


Figure II.3 : Les quatre cycles d'un moteur diesel.

II.2.1.2. Les différents circuits :

1.Circuit de combustible :

C'est un composant indispensable d'un moteur à combustion interne moderne, dont la fonction est d'introduire dans les cylindres le combustible essentiel à la combustion [39].

Il est constitué de :

- **Circuit d'alimentation** constitué principalement d'un réservoir pour stocker le carburant liquide et une pompe d'alimentation qui alimente la pompe d'injection en combustible.
- **Circuit d'injection** est le circuit chargé de la distribution de combustible dans les cylindres, en fonction de la vitesse et de la charge du moteur.
- **Circuit de retour** il permet la récupération du carburant excédentaire ou des fuites des deux précédents circuits.

2.Circuit d'air d'admission :

L'air d'admission est aspiré généralement à partir de la partie haute du moteur, il est filtré avant rentrer dans la chambre de combustion, ainsi il passe par un turbocompresseur pour

augmenter la pression des gaz admis, en permettant un meilleur remplissage des cylindres en air et en carburant pour augmenter la puissance du moteur.

3.Circuit des gaz d'échappement :

Les gaz d'échappement issus de la combustion sont évacués par le collecteur d'échappement. Lorsque le moteur est muni d'un turbocompresseur, ces gaz vont entraîner la partie turbine du turbocompresseur donc il y aura une amélioration de rendement, les gaz d'échappement sont ensuite refoulés à l'atmosphère [39].

4.Circuit d'huile :

L'huile est utilisée comme un fluide de lubrification ainsi de refroidissement contenu dans le carter qui se trouve en bas du moteur elle est aspirée par une pompe, avant qu'elle soit refoulé aux différentes articulations, elle passe par un circuit contenant des filtres pour éliminer les particules qui peuvent créer une usure, puis elle passe par un radiateur ou elle va échanger la chaleur avec l'air de refroidissement [20].

5.Circuit de réfrigération :

Le circuit de réfrigération assure le refroidissement de moteur est minimise la chaleur dégagée par la combustion est cela par un liquide qui circule dans un circuit principalement constitué d'une pompe, un radiateur, est un ventilateur [39].

II.2.2. Machine Synchron triphasé :

La puissance mécanique fournit par le moteur diesel est convertie en puissance électrique grâce à la machine synchrone qui est composée de :

- **Stator :**

Le stator comprend un circuit magnétique constitué par un empilage de tôles en forme de couronne, isolées les unes des autres pour limiter les courants de Foucault. L'ensemble des couronnes avec leur isolation est fortement serré, il constitue le circuit magnétique du stator.

Dans sa partie intérieure, le circuit magnétique comporte des encoches uniformément réparties dans lesquelles vient se loger l'enroulement triphasé du stator. Le circuit magnétique du stator est en fer afin d'augmenter le champ magnétique engendré par le rotor, il supporte le bobinage du stator. Le bobinage d'un stator triphasé comprend trois bobines décalées l'une par rapport à l'autre de 120° électrique.

- **Rotor :**

Le rotor tourne à l'intérieur du stator qui est immobile. Il porte dans les encoches disposées à sa périphérie un enroulement parcouru par un courant continu. Le courant continu provient du système d'excitation.

Le rotor excité tournant, produit un champ tournant avec lui. Ce champ tournant engendre des forces électromotrices dans chacune des phases de l'enroulement du stator, donc un courant alternatif si elles sont fermées sur un circuit extérieur.

Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique tournant à la pulsation :

$$\Omega_s = \frac{w}{p} \quad (\text{II. 1})$$

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (\text{II. 2})$$

Ω_s : vitesse de rotation du champ tournant en rad.s-1.

W : pulsation des courants alternatifs en rad.s-1.

n_s : vitesse de rotation du champ tournant en tr.s-1.

f : fréquence des courants alternatifs en Hz.

P : nombre de paires de pôles.

II.2.2.1. Schéma équivalent d'une phase de l'alternateur

Un enroulement de l'induit (stator) soumis au champ magnétique tournant créant une force électromotrice $e(t)$ de valeur efficace E [41] :

$$E = KN\Phi p n_s \quad (\text{II. 3})$$

K : coefficient de Kapp (caractéristique de la machine)

N : nombre de conducteurs d'une phase de la machine (1 spire = 2 conducteurs)

Φ : flux maximum à travers un enroulement [Wb]

n_s : vitesse de rotation [rpm]

Le modèle équivalent d'un enroulement du générateur synchrone est montré dans la Figure II.4

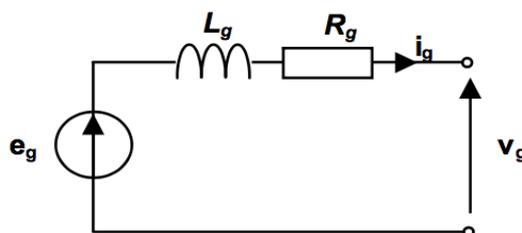


Figure II.4 : Modèle équivalent d'un enroulement [41].

e_g : f.é.m. à vide [V]

V : tension aux bornes d'un enroulement de la machine [V]

R_g : résistance de l'enroulement [Ω]

L_g : inductance synchrone [H]

D'après le schéma de la Figure II.4, on trouve selon la loi des mailles :

$$e_g = V_g + L_g \frac{di_g}{dt} + R_g i_g \quad (II. 4)$$

Dans le modèle simplifié de la machine synchrone, la partie mécanique sans l'apparition du frottement est décrite par l'équation :

$$J_d \frac{d\Omega_s}{dt} = T_d - T_{em} \quad (II. 5)$$

J_d : est l'inertie totale de l'ensemble moteur diesel génératrice synchrone.

Ω_s : est la vitesse de rotation.

T_d : est le couple mécanique sur l'arbre.

T_{em} : est le couple électromagnétique.

II.3. Régulateur de vitesse :

Les moteurs diesel sont munis d'un régulateur de vitesse, dont le rôle est de contrôler automatiquement la vitesse du moteur diesel, en réglant l'injection du carburant en fonction de la charge. Il agit sur le mécanisme d'accélération pour fournir le carburant nécessaire et répondre aux variations de la charge [41] [18].

Le moteur diesel est un système non linéaire. Il présente des temps morts et des retards, ce qui rend difficile sa modélisation et son contrôle. Tel qu'il existe de nombreux modèles plus ou moins complexes du moteur diesel, en fonction de la disponibilité des données constructeurs [23].

Dans notre étude on a utilisé le modèle illustré dans la Figure II.5, et les paramètres sont illustrés dans le tableau (Annexe) :

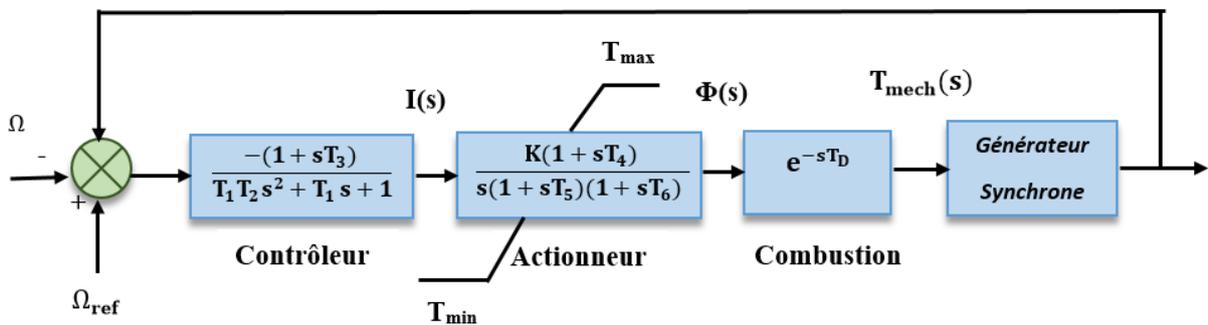


Figure II.5 : Bloc diagramme d'un moteur diesel simplifié [23] [12].

Avec :

Ω_{ref} : Vitesse de rotation de référence.

Ω : Vitesse de rotation du rotor synchrone.

Φ : Débit du carburant.

T_{mech} : couple mécanique produit par le moteur diesel.

L'entrée du contrôleur de vitesse est l'erreur de vitesse de rotation et la sortie est le signal de commande de l'actionneur $I(s)$. La dynamique de fonctionnement de l'actionneur est approchée par une fonction de transfert avec le gain K ; qui adapte la relation entre le couple et la consommation du carburant.

$$\Phi(s) = \frac{K(1 + sT_4)}{s(1 + sT_5)(1 + sT_6)} I(s) \tag{II. 6}$$

Le bloc combustion inclut un retard qui représente le temps nécessaire pour que le moteur diesel réponde à une demande de modification du taux d'injection du carburant. Ce temps mort T_D est le résultat de plusieurs cylindres qui ne sont pas tous dans la position permettant d'accepter plus du carburant à un instant donné, ce temps peut être approché par [41] :

$$T_D = \frac{60h}{2n_c\Omega} + \frac{60}{4\Omega} \tag{II. 7}$$

Où :

h : 4 pour un moteur à quatre temps.

n_c : Le nombre de cylindres.

Ω : La vitesse de rotation en tours par minute

Le couple $T_{mech}(s)$ produit par le moteur diesel est en fonction du débit du carburant $\Phi(s)$:

$$T_{mech}(s) = e^{-sT_D} \Phi(s) \tag{II. 8}$$

II.4. Régulateur de tension :

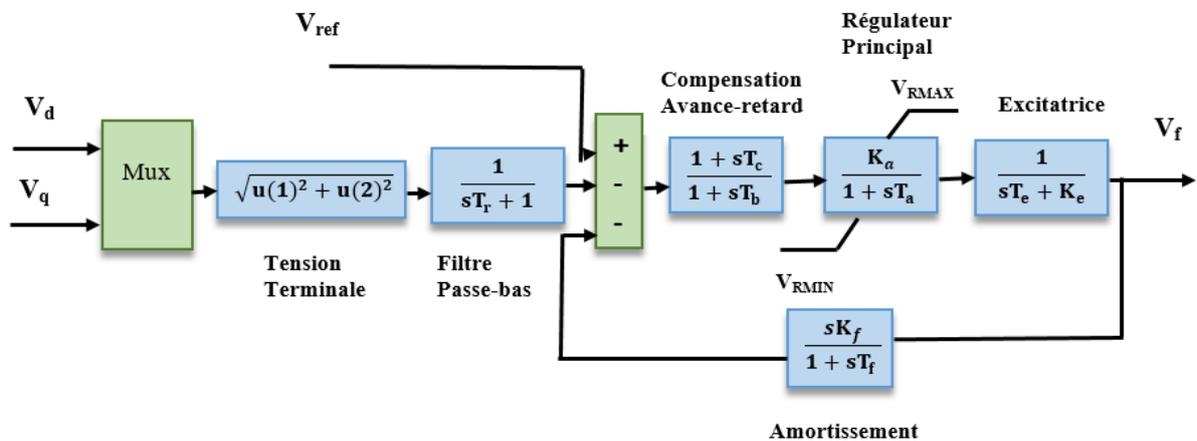


Figure II.6 : Bloc diagramme de Régulateur de tension [22] [23].

Où :

T_r : Constante du temps du filtre passe bas.

K_a : Gain du régulateur.

T_a : Constante du temps du régulateur.

K_e : Constante de l'excitatrice.

T_e : Constante du temps de l'excitatrice.

T_b : Constante du temps du compensateur d'avance.

T_c : Constante du temps du compensateur de retard.

K_f : Constante du filtre d'amortissement.

T_f : Constante du temps du filtre d'amortissement.

V_f : Tension d'excitation.

V_{RMIN}, V_{RMIN} : Valeurs minimale et maximale de la tension d'excitation.

Afin de régler la tension terminale de la MS, et la quantité de la puissance réactive générée ou absorbée. Un circuit de commande est associé à la MS pour contrôler la tension d'excitation.

Le principe de la commande consiste à calculer la tension terminale en prenant la racine carrée de la somme des carrés des tensions V_d et V_q . Ensuite la tension terminale est filtrée par un filtre passe-bas. La sortie du filtre et un retour de sortie après avoir passé par un circuit d'amortissement sont soustraite de la tension de référence V_{ref} . L'erreur totale passe par un compensateur d'avance-retard, ensuite elle passe par le régulateur principal qui est un simple proportionnel avec un filtre passe-bas.

Le dernier étage est un filtre passe bas permet de tenir compte du gain et de la constante de temps de l'excitatrice. Les paramètres de ce régulateur de tension sont illustrés dans le tableau (Annexe).

II.5. Simulation du groupe électrogène :

Le système fourni de l'énergie électrique à l'aide d'un groupe électrogène constitué d'un moteur diesel et une génératrice synchrone à rotor bobinée d'une puissance apparente de 200kVA, ce système est connecté à une charge principale de 160kW.

Le temps de simulation est de 12s.

La charge primaire étant 100kW jusqu'à $t=4s$, à cet instant on ajoute une autre charge pour voir une charge de 160kW et à $t=8s$ une totalité de charge est de 130kW.

Les résultats de simulation sont montrés dans les figures ci-dessous.

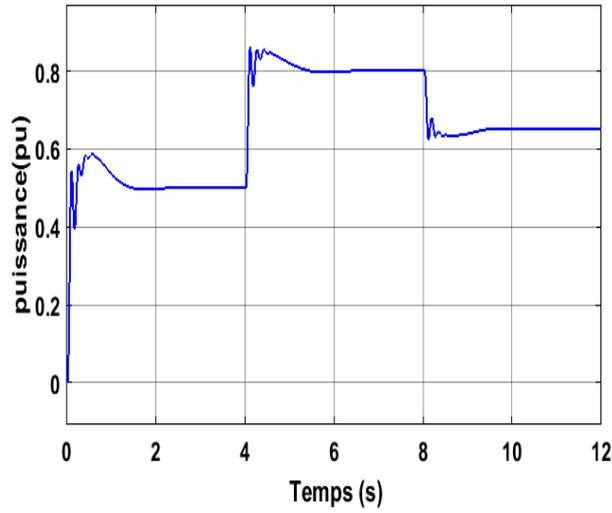


Figure II.7 : La puissance générée par le GD.

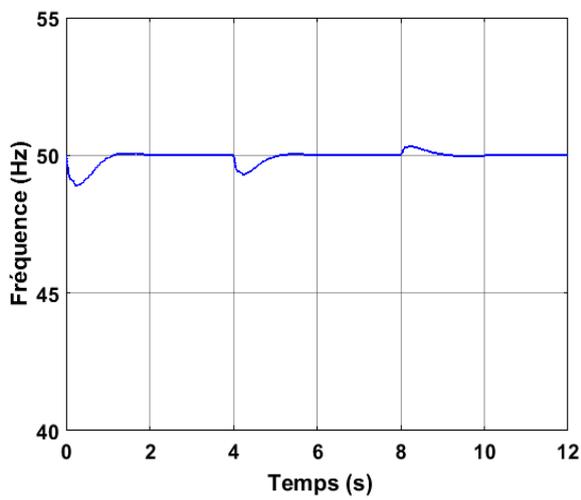


Figure II.8 : La fréquence du moteur diesel.

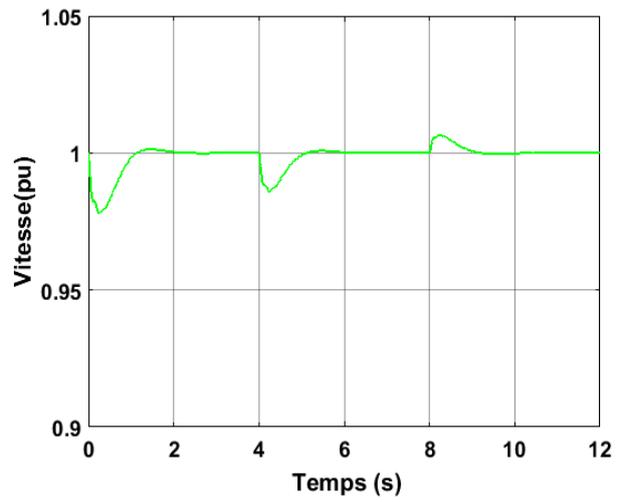


Figure II.9 : La vitesse du système.

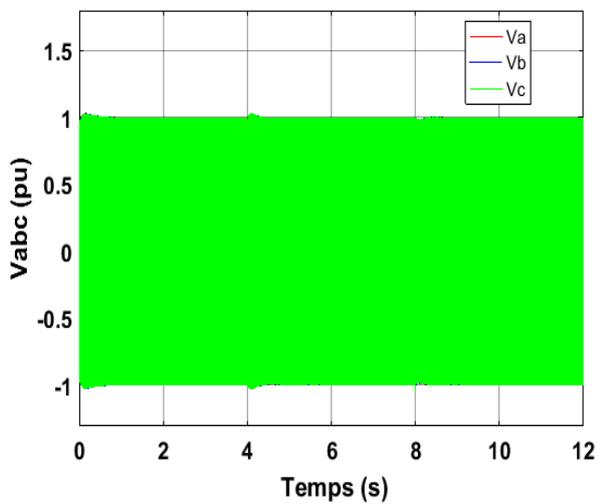


Figure II.10 : Les tensions de la charge.

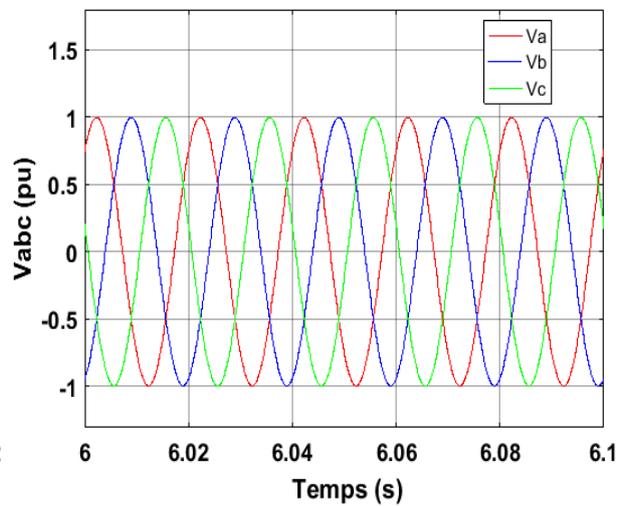


Figure II.11 : Zoom des tensions de la charge.

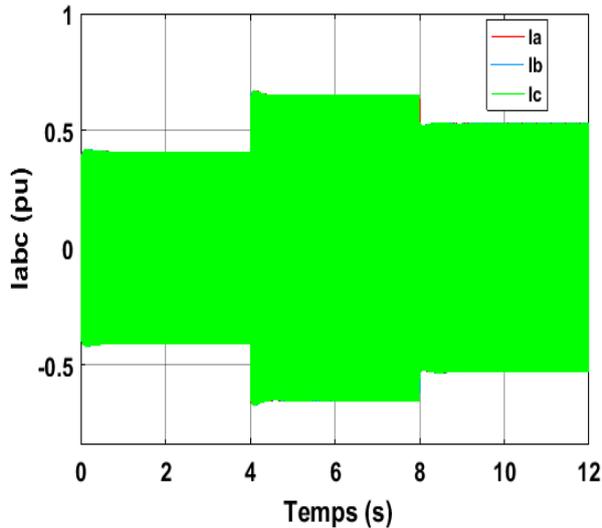


Figure II.12 : Les courants de la charge.

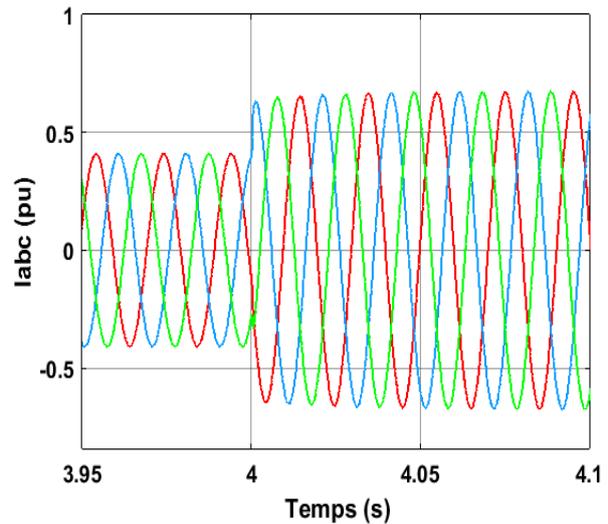


Figure II.13 : Zoom des courants de la charge.

D'après les résultats de simulation on remarque que la puissance fournie par le groupe électrogène varie selon la charge, ce qui montre que le groupe assure le bon fonctionnement du système (Figure II.7).

En ce qui concerne la vitesse du moteur (Figure II.9) on remarque qu'elle est constante pendant le régime permanent 1 pu qui est la valeur de consigne, et lorsque la charge change il y'aura un régime transitoire de faible durée où la vitesse varie, tel que si la charge augmente on remarque que la vitesse diminue et si la charge diminue la vitesse augmente, puis elle reprend sa valeur de consigne, ce qui montre le bon fonctionnement de régulateur de vitesse.

C'est pareil pour la fréquence de système qui est l'image de la vitesse de moteur (Figure II.8).

De la Figure II.10 on remarque que la tension générée par le groupe est constante quel que soit la valeur de la charge, ce qui illustre le bon fonctionnement de régulateur de tension.

II.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit le principe de fonctionnement des différentes parties de groupe diesel.

Nous avons aussi conçu dans l'environnement MATLAB/Simulink, le modèle de générateur diesel afin de simuler le comportement du système, nous avons confirmé le bon fonctionnement des boucles de régulation de tension et de vitesse.

Chapitre III

« Dimensionnement de
système hybride PV-Diesel »

III.1. Introduction :

Avec la baisse des prix des panneaux solaires, les mini-réseaux hybrides PV-diesel suscitent une attention croissante parmi les institutions chargées de l'électrification rurale.

L'objectif étant de compenser la hausse du prix des carburants, de réduire les coûts d'exploitation et d'offrir un service de meilleure qualité que celui des systèmes classiques basés sur une source unique.

Dans les chapitres précédents, nous avons expliqué le principe de fonctionnement des différents composants de système hybride PV-diesel. Nous présentons dans ce chapitre, les différentes configurations et les problèmes rencontrés dans le fonctionnement des systèmes hybrides, ainsi que le logiciel HOMER pour le dimensionnement et l'optimisation de ces systèmes.

III.2. Généralités sur les système hybride :

III.2.1. Définition et missions des systèmes hybrides :

Un Système Energétique Hybrides, est tout système énergétique exploitant simultanément plusieurs sources d'énergie présentant des propriétés différentes.

Généralement des sources d'énergies renouvelables qui doivent être avantageusement associées à des groupes électrogènes afin d'atteindre l'objectif d'électrification des sites autonomes dans un contexte de « développement durable et de réchauffement climatique » [1][3].

III.2.2. Avantages et désavantages des systèmes hybrides :

La réalisation d'un système hybride représente différents avantages :

- Lissage de la production.
- Augmentation de la fiabilité.
- Diminution du stockage.
- Réduction des couts de production.

Par contre on est confronté aux désavantages suivants

- Augmentation de la complexité du système.
- Difficultés d'optimisation des divers organes du système.

III.2.3. Classification des systèmes hybride :

Plusieurs classifications des systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi [2] [3] :

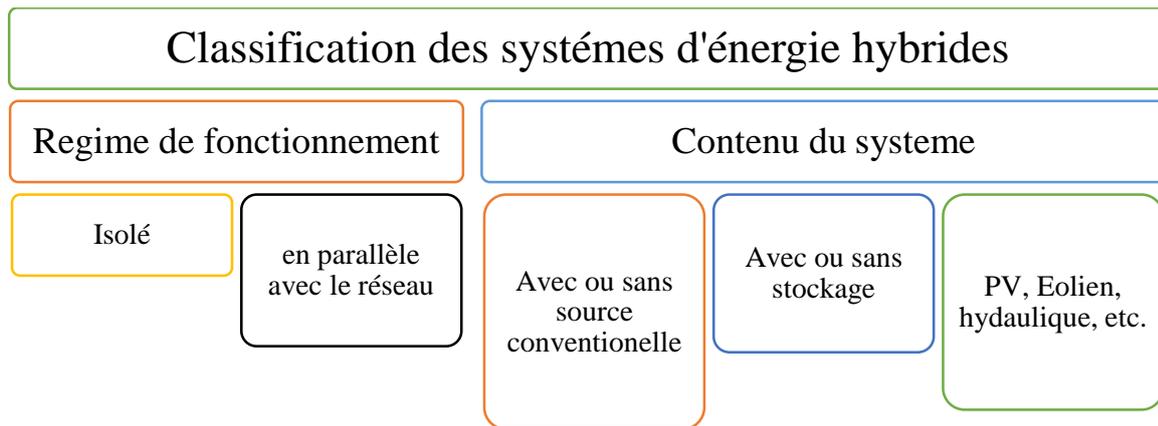


Figure III.1: Classification des systèmes hybrides.

1. Régime du fonctionnement

En fonction de régime du fonctionnement, les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes :

➤ **Connectés au réseau**

Travaillant en parallèle avec le réseau électrique, ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays.

➤ **Autonome**

Appeler aussi en régime isolé. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau.

2. La structure du système

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système :

- La présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz.
- La présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène.
- La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique ou une combinaison de ces sources.

III.2.4. Les différents types des configurations :

Il existe trois principales configurations [1][3][4] :

➤ La configuration PV/Diesel série

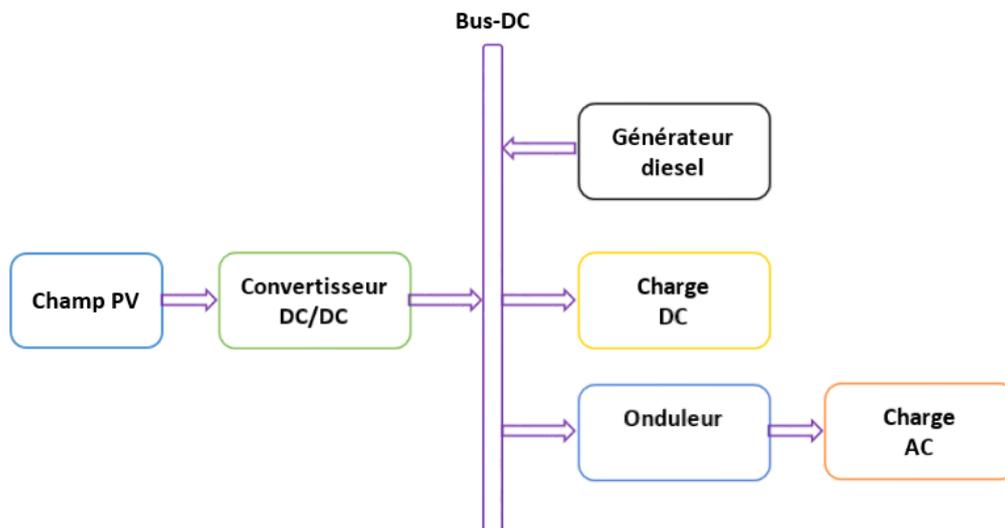


Figure III.2: Configuration PV/diesel série.

Dans ce cas, le générateur diesel est connecté sur le bus courant continu. La connexion peut être directe dans le cas d'un générateur de courant continu ou indirecte à travers un redresseur.

L'installation photovoltaïque et la batterie sont aussi liées à ce bus, la charge est alimentée par un onduleur.

Lorsque l'énergie produite par le champ photovoltaïque et l'énergie stockée sont suffisantes pour alimenter la charge, le groupe diesel est déconnecté du réseau.

Avantages

- Un simple dimensionnement du générateur.
- Une alimentation convenable de la charge par l'onduleur.
- Simplicité de la commande.

Inconvénients

- Une grande capacité de stockage.
- Un rendement relativement faible dans le cas d'un générateur diesel à courant alternatif.
- La détérioration de l'onduleur provoque l'arrêt complet de l'alimentation.

➤ La configuration PV/diesel commutée

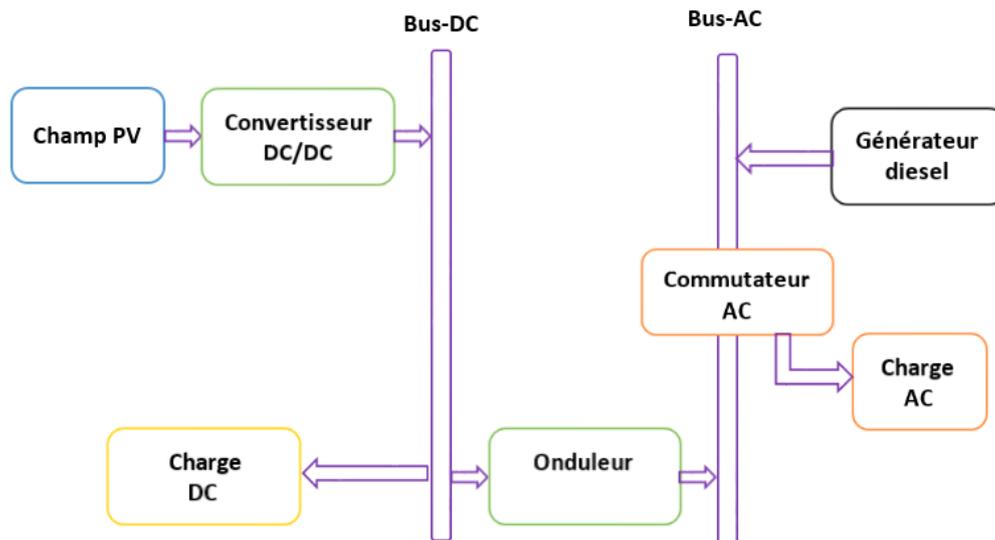


Figure III.3: Configuration PV/diesel commutée.

Dans ce cas, l'énergie produite par le champ photovoltaïque est injectée dans un bus à courant continu à travers un hacheur ainsi que la batterie est reliée à ce bus, le générateur diesel est connecté avec le bus à courant alternatif, les deux bus sont connectés par un onduleur unidirectionnel, bidirectionnel dans le cas où l'on veut alimenter la batterie par le groupe diesel.

Dans ce type de configuration, la charge peut être alimentée soit par la source conventionnelle soit par l'onduleur, la commutation se fait par un commutateur de changement, elle ne peut pas être alimentée par les deux au même temps.

Avantages

- Rendement élevé du générateur diesel à cause de son alimentation directe de la charge.
- Un problème dans l'onduleur n'engendrera pas l'arrêt complet de l'alimentation électrique car le générateur peut satisfaire la charge.
- L'onduleur peut satisfaire la charge par la tension désirée en forme et en valeur.

Inconvénients

- Une coupure instantanée lors de la commutation des sources.
- Un dimensionnement du générateur diesel et de l'onduleur plus grand.
- Nécessite du stockage.

➤ La configuration PV/Diesel parallèle

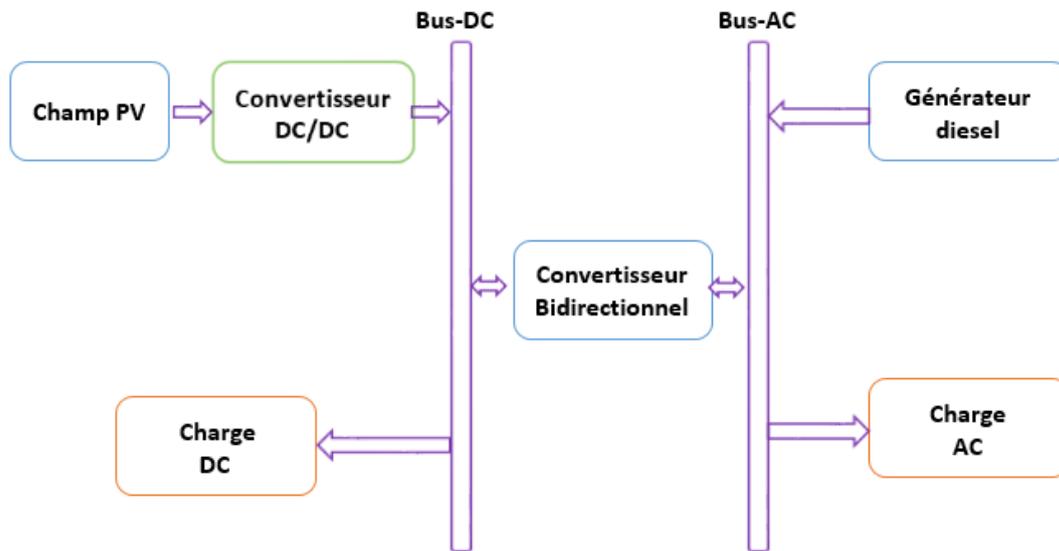


Figure III.4: Configuration PV/diesel parallèle.

Le générateur diesel est connecté au bus du courant alternatif. L'installation photovoltaïque et la batterie sont liées sur un autre bus de courant continu. Les deux bus sont connectés à l'aide d'un convertisseur électronique bidirectionnel.

Cette architecture est similaire à celle de la connexion à commutation sauf dans celle-ci les deux sources peuvent alimenter la charge simultanément et ceci par la synchronisation de l'onduleur avec le générateur diesel.

Avantages

- Le fonctionnement en parallèle diminue la possibilité de coupure de l'alimentation de la charge.
- Le générateur diesel est directement lié à la charge ce qui augmente le rendement.
- Dimensionnement des composants minimale.

Inconvénient

- Une commande complexe, difficulté de contrôle du bus continu.
- L'onduleur doit fournir une tension sinusoïdale, pour que la synchronisation avec le générateur diesel soit possible.
- Nécessité des personnes qualifiées.

Dans notre étude, nous considérons une configuration PV/diesel parallèle.

III.3. Problèmes rencontrés dans le fonctionnement des système hybrides PV-Diesel :

L'association de plusieurs sources d'énergie offre une certaine fiabilité au système global mais pose aussi plusieurs problèmes [4] :

- Nécessité de rechercher la configuration optimale du système.
- Choisir correctement la taille de chaque composant du système.
- Optimiser la gestion de l'énergie au sein de ce système.

L'intégration de l'énergie PV a pour but de diminuer la consommation du carburant, mais ceci peut affectée le rendement du groupe diesel.

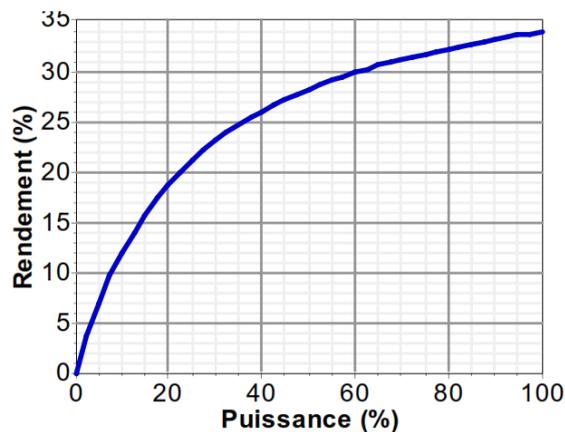


Figure III.5 : Courbe du rendement d'un groupe diesel [44].

La Figure III.5 montre que le rendement de groupe diesel diminue avec la diminution de la puissance demandée.

Dans le cas des charges élevées par exemple. L'intégration de l'énergie PV écrête la puissance demandée au groupe électrogène, et ne l'éloigne que très peu de sa plage de fonctionnement optimale, ce qui lui assure une bonne efficacité.

Mais dans le cas des faibles charges, la contribution du générateur PV diminue la puissance demandée au groupe électrogène, ce dernier est confronté à une charge encore plus faible donc un mauvais rendement.

Aussi un fonctionnement avec une faible charge, peut endommager le moteur diesel. Car le moteur thermique ne fonctionne correctement qu'à une certaine température.

Si celle-ci est trop faible, les pistons diminuent de diamètre et l'étanchéité de la segmentation est moins bonne. L'huile pénètre alors dans les cylindres, brûle et des suies s'accumulent sur les parois, ce qui provoque une usure rapide.

Les moteurs diesels refroidis par eau ne tolère pas une charge inférieure à 30-35% de façon prolongée [10].

III.4. Dimensionnement du système hybride PV-Diesel avec le logiciel HOMER :

III.4.1. Présentation du logiciel HOMER :

Le logiciel de dimensionnement Homer (hybrid optimization model for electric renewables) est un outil connu pour sa fiabilité dans la conception et l'analyse des systèmes d'énergies hybrides, qui contiennent un regroupement de générateurs conventionnels, des éoliennes, des générateurs photovoltaïques, etc...

Le logiciel HOMER développé par NREL (national renewable energy laboratory) aux étas unis, prend en charge l'opération d'évaluation de conceptions des différents systèmes de génération d'énergie électrique, que ce soit connecté à un réseau électrique classique ou bien éloigné de ce dernier pour une variété d'applications [41].

Ainsi, pour une ou plusieurs installations connectées au réseau ou autonomes, Homer permet d'obtenir la configuration optimale après une étude technico-économique.

HOMER simule plusieurs configurations, il optimise le coût pour un cycle de vie donnée et génère des résultats de sensibilité pour la plupart des situations [17].

III.4.2. L'emplacement choisi :

Pour l'exemple de simulation, nous fournissons l'électricité à un village non connecté au réseau, grâce à l'utilisation d'un système hybride PV-diesel pour la production d'énergie dans une région de la wilaya d'Adrar en Algérie.

Afin de construire ce système d'énergie, on doit disposer les informations (profil de charge, rayonnement solaire), pour l'emplacement sélectionné, en s'appuyant sur des données réelles pour le rayonnement solaire de la région, tout au long de l'année et qui ont été récupérées par NREL.



Figure III.6 : Rayonnement solaire mensuel de la wilaya d'Adrar.

Le système hybride destiné pour alimenter une charge à usage domestique, avec une puissance de point de 200 kW (Figure III.7).

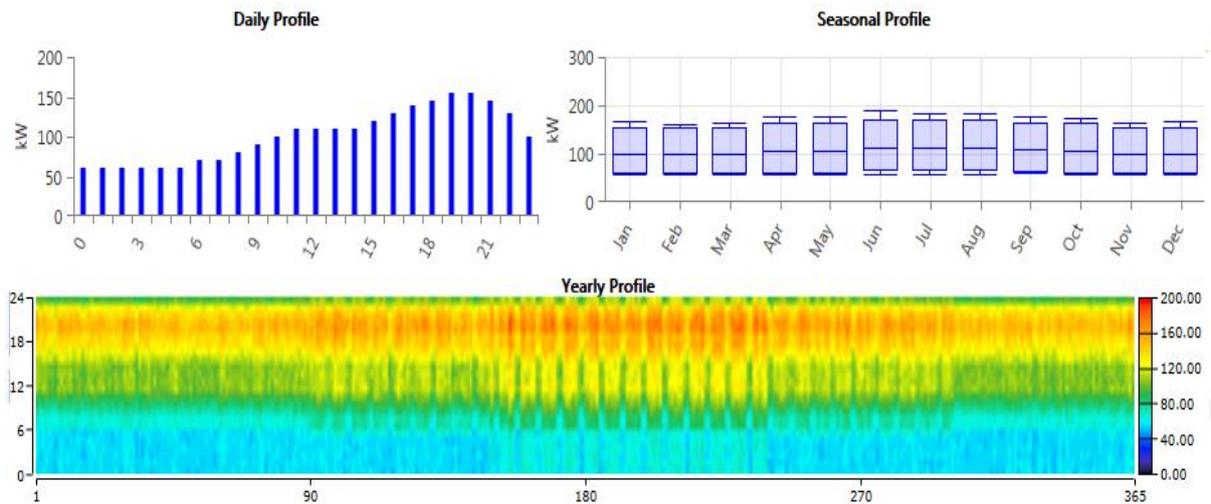


Figure III.7: Profil de charge.

III.4.3. Construction de système hybride de génération d'énergie :

L'architecture de système hybride à dimensionner sous HOMER est présentée dans la Figure III.8.

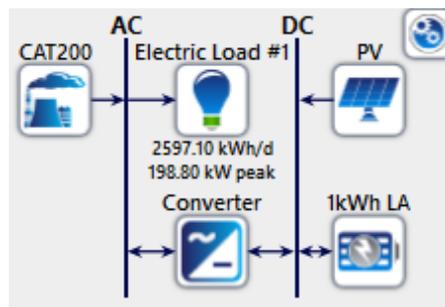


Figure III.8: Configuration de l'installation à dimensionner.

Le groupe diesel doit pouvoir alimenter la totalité de la charge, donc on choisit un groupe diesel de 200 kW de puissance.

Pour le choix de la puissance de l'installation PV, on propose à Homer différentes tailles prédéterminées, selon lesquelles il optimise les meilleures solutions par ordre décroissant (Tableau III.1).

Composant	Puissance (kW)
Générateur PV	40,60,80,90,100,130
GD diesel	200

Tableau III.1 : Tailles du système hybride proposé à Homer.

III.4.4. Simulation et interprétation :

Les résultats de simulation sont fournis sous la forme d'une liste classée par le coût net actuel (NPC).

	PV (kW)	CAT200 (kW)	1kWh LA	Convertir (kW)	Dispatch	COE (\$)	NPC (\$)
	100	200		100	CC	\$0.383	\$4.69M
	100	200	1	100	CC	\$0.383	\$4.69M
		200			CC	\$0.395	\$4.84M

Figure III.9: Résultat de simulation du système hybride par HOMER.

HOMER simule toutes les configurations faisables des systèmes et présente la taille optimale de l'installation PV de système hybride (Tableau III.2) :

Composant	Puissance (kW)
Générateur PV	100
GD diesel	200

Tableau III.2 : Tailles optimisées par Homer.

Pour notre cas, le logiciel HOMER propose une configuration optimale sans stockage.

L'énergie produite du système optimal est montrée dans la Figure III.10 ci-dessous.

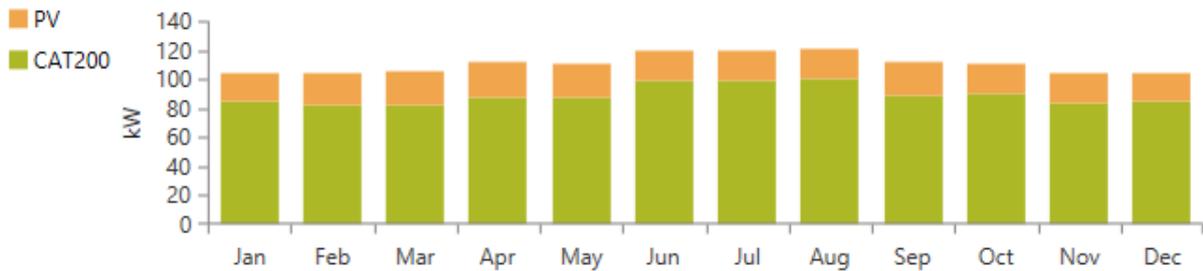


Figure III.10: Puissance moyenne produite par chaque source durant l'année.

D'après la Figure III.10 représentant la puissance moyenne produite par le groupe diesel et le générateur PV, nous remarquons que 16% de l'énergie produite est de nature PV.

Pour montrer l'effet de l'intégration de l'énergie PV, on fait une étude comparative avec un système qui contient qu'un groupe diesel. Les résultats sont représentés ci-dessous :

	PV (kW)	CAT200 (kW)	1kWh LA	Convertir (kW)	Dispatch	COE (\$)	NPC (\$)
	100	200		100	CC	\$0.383	\$4.69M
		200			CC	\$0.395	\$4.84M

Figure III.11 : Résultat de simulation du système hybride et non hybride par HOMER.

D'après la Figure III.11, le système hybride présente un coût net actuel plus faible que le système non hybride, car le système hybride présente un cout de kilowattheure plus faible à cause de l'économisation du carburant.

Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Total fuel consumed	344,922	L	Total fuel consumed	307,906	L
Avg fuel per day	945	L/day	Avg fuel per day	844	L/day
Avg fuel per hour	39.4	L/hour	Avg fuel per hour	35.2	L/hour

(a)

(b)

Figure III.12: (a) Consommation du carburant dans le système non hybride, (b) Consommation du carburant dans le système hybride.

D'après la Figure III.12, nous remarquons que la consommation du carburant est plus faible dans le système hybride. Avec le système hybride on peut économiser 100 L/jour.

Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	911,691.31	kg/yr	Carbon Dioxide	813,852.85	kg/yr
Carbon Monoxide	556.33	kg/yr	Carbon Monoxide	496.63	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	15.89	kg/yr	Unburned Hydrocarbons	14.19	kg/yr
Particulate Matter	52.45	kg/yr	Particulate Matter	46.82	kg/yr
Sulfur Dioxide	2,212.78	kg/yr	Sulfur Dioxide	1,975.31	kg/yr
Nitrogen Oxides	8,837.69	kg/yr	Nitrogen Oxides	7,889.27	kg/yr

(a)

(b)

Figure III.13: (a) Emissions de gaz dans le système non hybride, (b) Emissions de gaz dans le système hybride.

D'après la Figure III.13, nous remarquons aussi que les émissions de gaz dans le système hybride sont plus faibles que le système non hybride, surtout le dioxyde de carbone (CO₂). Ceci à cause de la diminution de la consommation du carburant.

III.5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté le système hybride PV-diesel, et les différentes contraintes qu'on doit prendre en compte lors de dimensionnement de ces systèmes.

Nous avons présenté aussi l'outil de dimensionnement et d'optimisation HOMER afin de simuler notre système hybride.

D'après les résultats obtenus, nous avons remarqué que la combinaison des sources d'énergie renouvelable (PV) dans la présence d'une source classique d'origine fossile à un avantage remarquable dans la diminution de l'utilisation de cette dernière, qui peuvent à priori permettre de diminuer considérablement les coûts d'opération du système et donc le coût de production du kWh (COE) et diminuer aussi les émissions de gaz à effet de serre.

Chapitre IV

« Contrôle de système
hybride PV-Diesel »

IV.1. Introduction :

Les systèmes hybrides utilisent différentes sources d'énergie ce qui améliore la fiabilité de l'alimentation des sites isolées, pour assurer une bonne qualité d'alimentation en électricité en termes de tension et de fréquence, une commande robuste du système est nécessaire.

Dans ce chapitre nous allons présenter la modélisation de l'onduleur triphasé et le filtre LC, ainsi que la stratégie de commande de l'onduleur qui va permettre son raccordement avec le groupe diesel, en passant par la description de la structure générale de la PLL, la méthode de régulation du bus continu et des courants avec un facteur de puissance unitaire, à la fin nous présentons les résultats de simulation du système hybride.

IV.2. Modélisation de l'onduleur :

Pour connecter le bus continu avec le bus alternatif on utilise un convertisseur bidirectionnel DC/AC AC/DC (onduleur redresseur).

IV.2.1. Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux :

L'onduleur de tension triphasé à deux niveaux est composé de trois bras, chaque bras est composé de deux interrupteurs, chaque interrupteur (transistor IGBT commandable à l'ouverture est à la fermeture) et monté en parallèle avec un diode appelé diode antiparallèle qui assure la roue libre.

Les interrupteurs $S_1 S_4$, $S_2 S_5$, $S_3 S_6$ doivent être commandés d'une manière à assurer la continuité des courants et éviter le court-circuit de la source de tension [2].

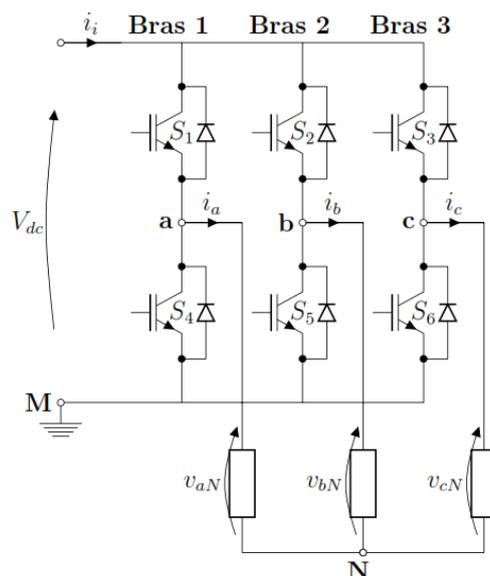


Figure IV.1 : Onduleur à deux niveaux utilisant des transistors IGBT [2].

Pour simplifier la modélisation de l'onduleur chaque paire interrupteur-diode est

modélisé par un seul interrupteur bidirectionnel parfait S_i .

La modélisation de l'onduleur se fait par bras où on définit trois variables S_a , S_b et S_c qui dépendent des états des commutateurs de chaque branche.

Branche i

$S_i = 1$ si l'interrupteur du haut est fermé et par conséquent celui du bas est ouvert.

$S_i = 0$ si l'interrupteur du haut est ouvert et par conséquent celui du bas est fermé.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$u_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) = V_a - V_b \quad (IV.1)$$

$$u_{bc} = V_{dc}(S_b - S_c) = V_b - V_c \quad (IV.2)$$

$$u_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) = V_c - V_a \quad (IV.3)$$

Si on considère que les tensions sont équilibrées alors :

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (IV.4)$$

D'où :

$$V_a = \frac{1}{3}(u_{ab} - u_{ca}), \quad V_b = \frac{1}{3}(u_{bc} - u_{ab}), \quad V_c = \frac{1}{3}(u_{ca} - u_{bc}) \quad (IV.5)$$

Nous obtenons sous la forme matricielle le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (IV.6)$$

IV.2.2. Stratégie de commande :

La technique de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) triangulo-sinusoidale permet de commander la tension de sortie de l'onduleur en amplitude et en fréquence ainsi de contrôler son contenu harmonique à partir des signaux de commandes des interrupteurs qui résultent de la comparaison de deux signaux, une porteuse à haute fréquence de forme triangulaire bipolaire est un signal sinusoïdal de référence appelé modulante comme illustré dans la Figure IV.2 [2].

La porteuse la plus adaptée aux convertisseurs à deux niveaux est la triangulaire bipolaire [36].

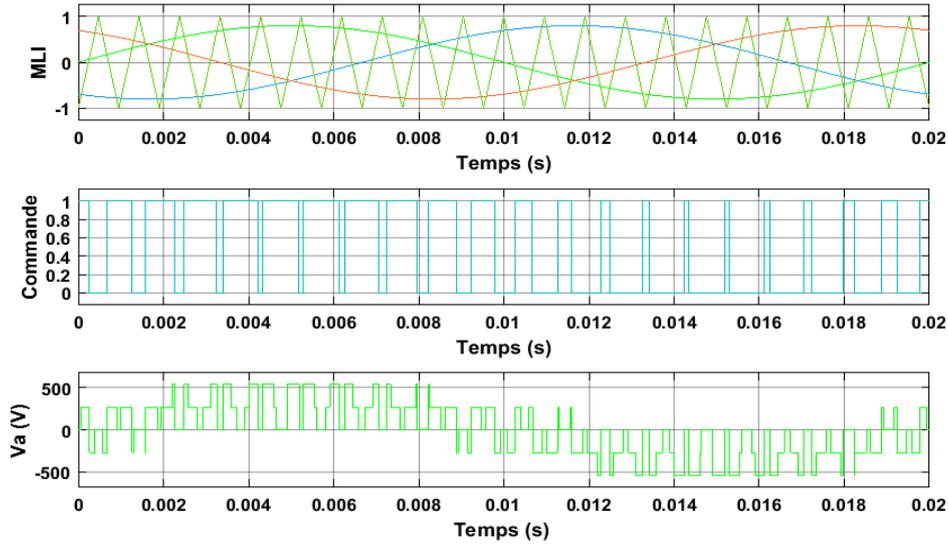


Figure IV.2: Principe de fonctionnement de la MLI triangulo-sinusoïdale.

Deux paramètres caractérisent cette technique :

· L'indice de modulation : $m = \frac{f_p}{f}$ (IV.7)

· Le Taux de modulation : $r = \frac{V_{ref}}{U_p}$ (IV.8)

f_p : la fréquence de la porteuse.

f : la fréquence de la modulante.

U_p : l'amplitude de la porteuse.

V_{ref} : l'amplitude de la modulante.

Pour éliminer les harmoniques de rang pair et les harmoniques de rang 3, l'indice de modulation m doit être impair et multiple de 3 [36].

IV.2.3. Modélisation du filtre LC

Afin de réduire le taux d'ondulation de la tension et du courant de sortie, on utilise un filtre passe bas (LC), schématisé par la Figure IV.3 [32].

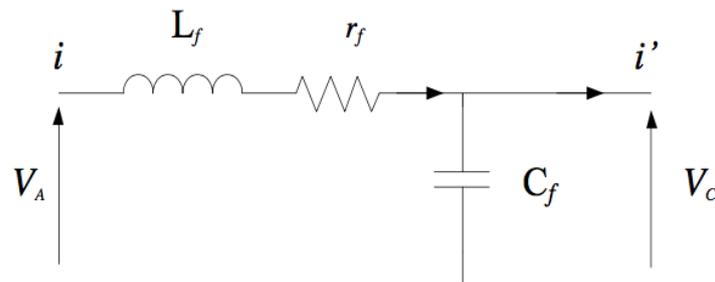


Figure IV.3: Schéma monophasé équivalent du filtre LC.

Avec r_f : la résistance de l'inductance du filtre L_f .

La fonction de transfert du filtre est donnée par l'expression suivante :

$$H(s) = \frac{V_C}{V_A} = \frac{1}{1 + C_f r_f s + L_f C_f s^2} \quad (\text{IV. 9})$$

Cette fonction de transfert est de la forme :

$$H(s) = \frac{1}{1 + \frac{1}{2\xi\omega_n} s + \frac{1}{\omega_n^2} s^2} \quad (\text{IV. 10})$$

Par identification on trouve :

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} \quad (\text{IV.11})$$

$$\xi = r_f \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_f}{L_f}} \quad (\text{IV.12})$$

Le dimensionnement correct de l'inductance et de la capacité du filtre utilisé dépend du choix de la fréquence de coupure et du coefficient d'amortissement adéquat.

IV.2.4. Résultats de simulation :

On alimente l'onduleur à deux niveaux par une source de tension continue de 810 V avec un coefficient de réglage $r=0.8$ et un indice de modulation $m=21$. La charge utilisé est une charge RL ($R=1.45 \Omega$, $L= 2\text{mH}$).

Une première simulation par une source de tension continue permet de bien choisir les paramètres du filtre et la valeur de référence de la tension du bus continu. Après on introduit l'onduleur dans le système hybride.

La tension 810 V est choisie pour obtenir un système triphasée (220/380) Volt, et c'est la valeur de référence de la tension du bus continu utilisé dans le système hybride.

Les courants à la sortie de l'onduleur, avant est après filtrage, sont représentés par la figure ci-dessous :

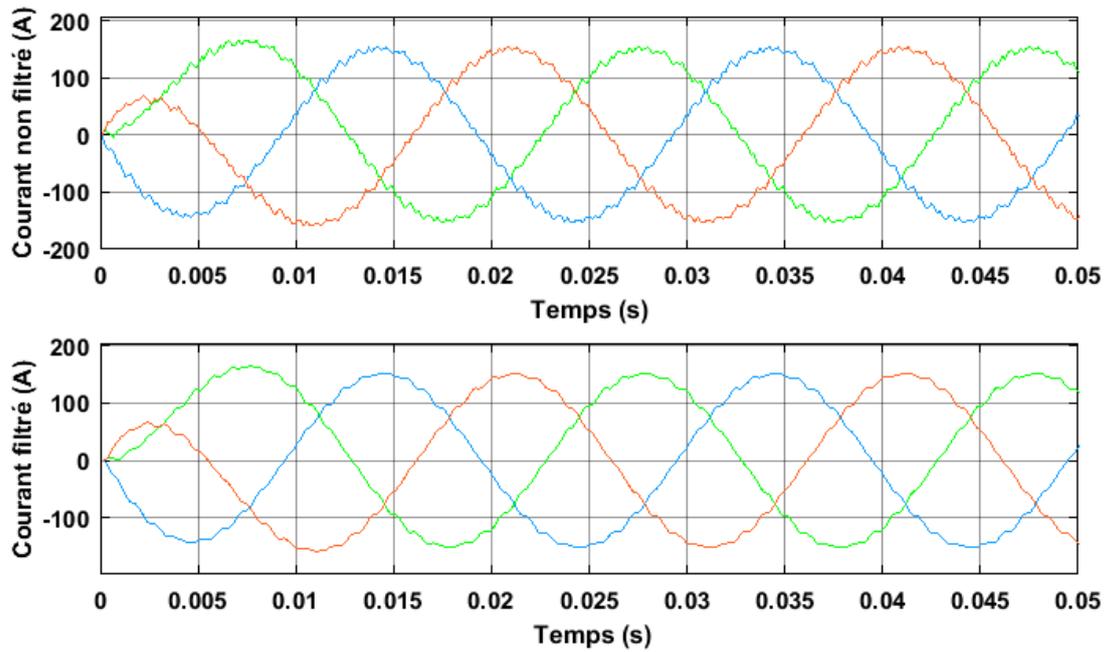


Figure IV.4: Allures des courbes de courants à la sortie de l'onduleur avant et après filtrage.

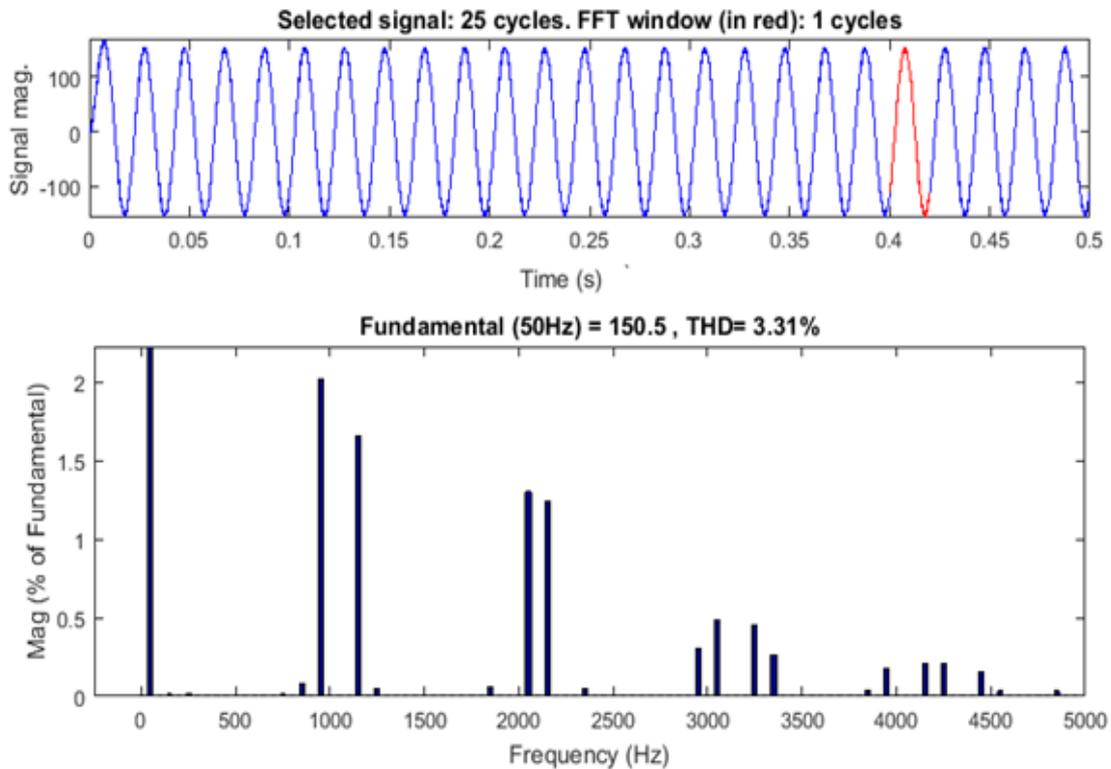


Figure IV.5: Analyse spectrale du courant à la sortie de l'onduleur.

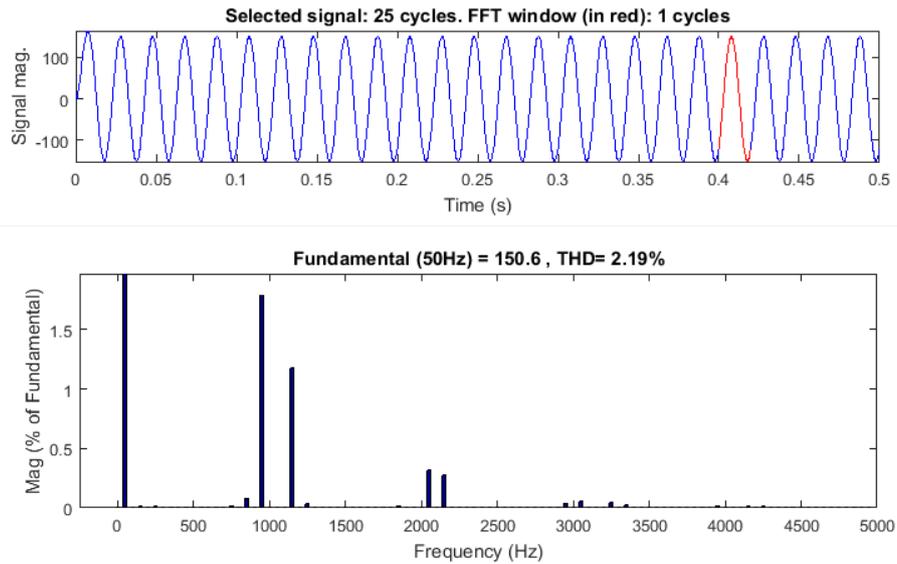


Figure IV.6: Analyse spectrale du courant à la sortie du filtre LC.

On remarque que les courants à la sortie de l’onduleur avant filtrage ne sont pas très déformés, ceci est dû à la présence d’une inductance dans la charge. Après filtrage l’allure de ces courants est moins déformée et proche d’une sinusoïde parfaite.

L’analyse spectrale du courant avant et après filtrage montre que le taux de distorsion harmoniques (THD) en courant diminue après le filtrage.

Les tensions à la sortie de l’onduleur, avant est après filtrage sont présentées dans la figure ci-dessous :

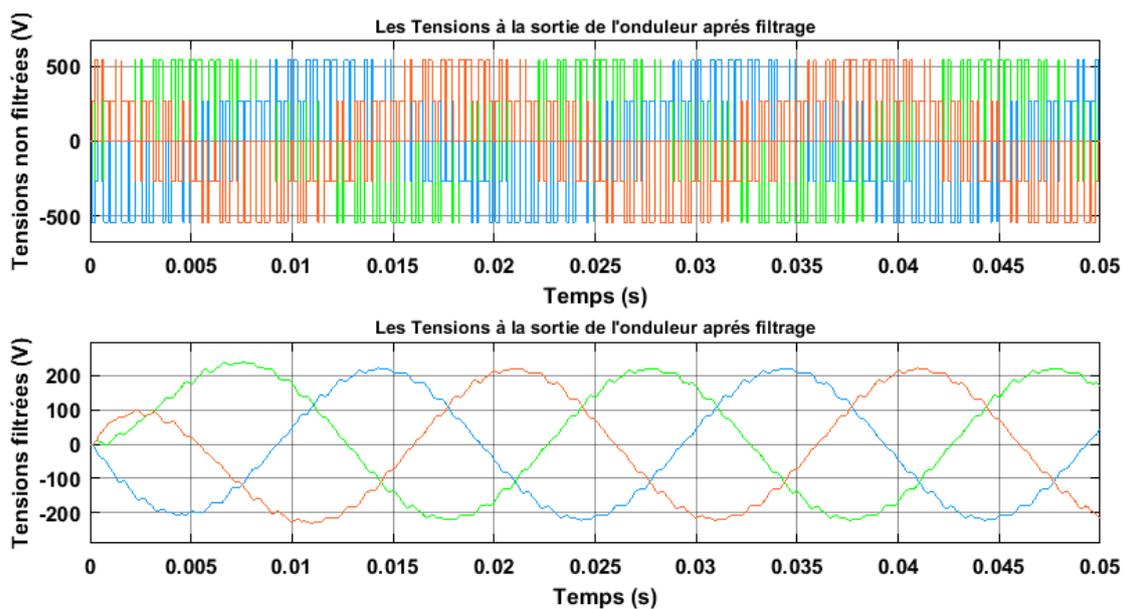


Figure IV.7: Allure des trois tensions simples avant et après filtrage.

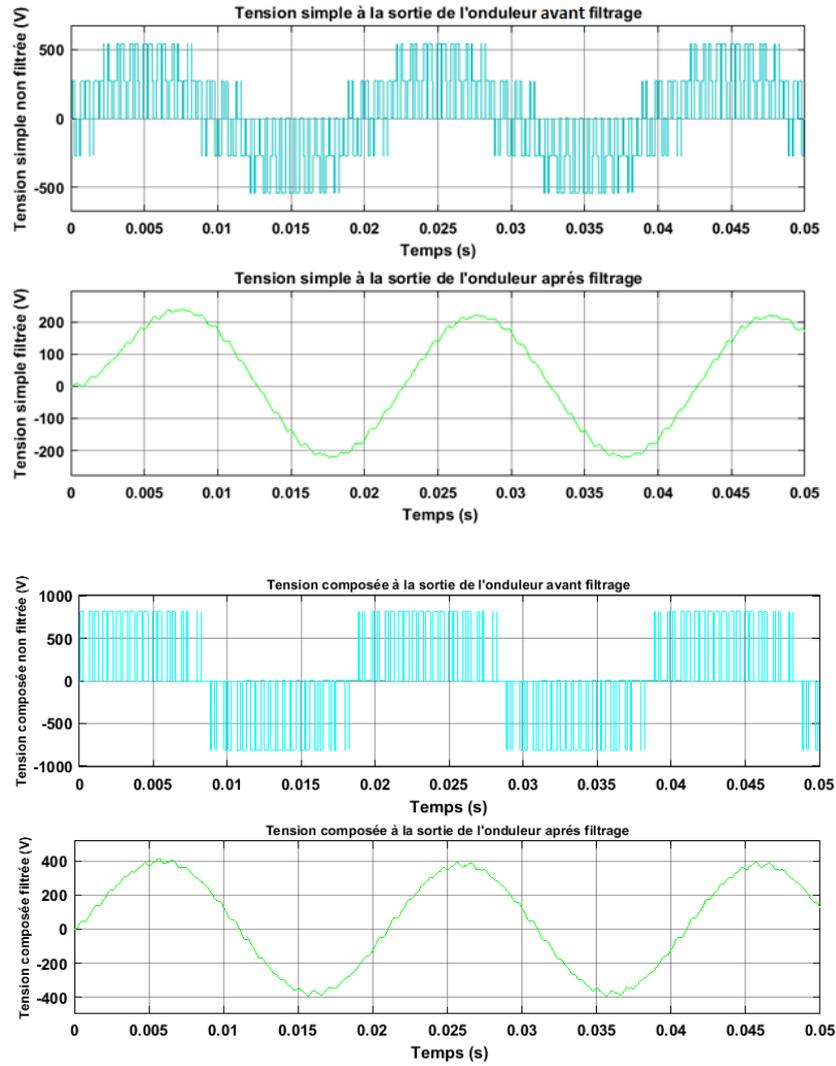


Figure IV.8: Allures de la tension simple et composée à la sortie de l’onduleur et à la sortie du filtre.

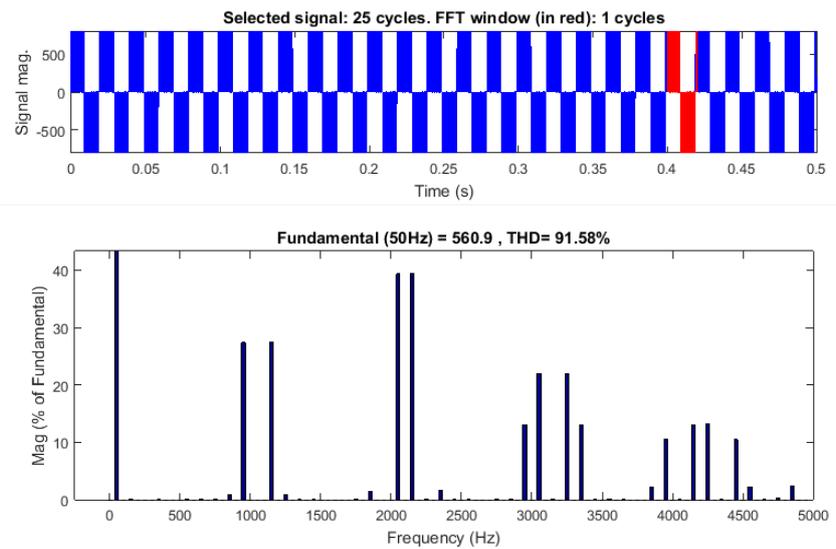


Figure IV.9: Analyse spectrale d’une tension composée à la sortie de l’onduleur.

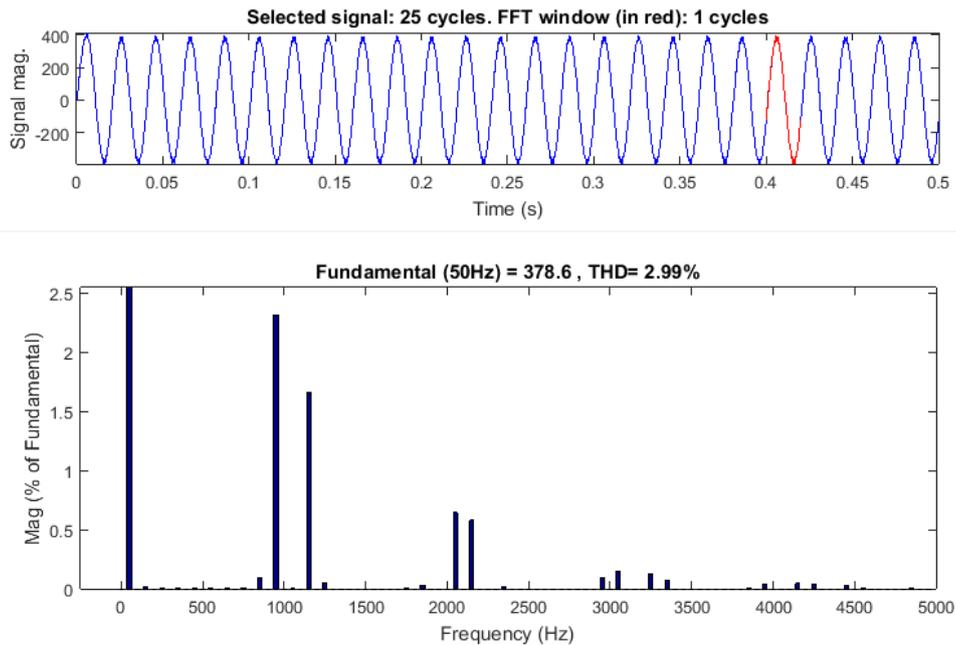


Figure IV.10: Analyse spectrale d'une tension composée à la sortie du filtre LC.

La Figure IV.7 montre que les trois tensions simples avant filtrage ont une forme modulaire, mais après filtrage les formes deviennent sinusoïdales faiblement déformées.

La Figure IV.9 présente l'analyse spectrale de la tension obtenue avant le filtrage. On remarque une grande présence des harmoniques de tensions avec un taux de distorsion harmoniques (THD) en tension très important (91.58%), ces harmoniques sont poussées vers les grandes fréquences à cause de l'utilisation de la méthode MLI.

Après filtrage (Figure IV.10), on remarque une grande diminution des harmoniques avec un taux de distorsion harmoniques (THD) en tension inférieur à 3%.

On peut déduire que le filtrage est très important dans notre système pour ne pas polluer le réseau de distribution, et pour respecter les normes imposées par ce dernier.

IV.3. Stratégie de commande du système hybride PV-diesel :

La commande du système se fait par le contrôle des tensions de sortie de l'onduleur dans le repère synchrone appelé contrôle à tension orientée VOC , dans le but de réguler la tension du bus continu pour suivre une référence donnée et réaliser un contrôle individuel de la puissance active et réactive en orientant l'axe d de ce repère sur la tension du groupe diesel en utilisons la PLL, dans ce cas la puissance active sera contrôlée par le courant d'axe d et la puissance réactive sera contrôlée par le courant d'axe q.

Pour effectuer ce contrôle on utilise des régulateurs PI qui sont une solution typique pour ce genre de système, une boucle externe pour réguler la tension du bus continu, une boucle interne pour réguler le courant [15] [42].

IV.3.1. Synchronisation avec le groupe diesel :

Pour pouvoir connecter l'onduleur photovoltaïque au groupe diesel, les tensions de sortie de l'onduleur doivent avoir la même fréquence et la même phase que celle du groupe diesel pour chacune des trois phases.

La méthode utilisée pour l'étude de synchronisation dans notre travail s'appelle la boucle à verrouillage de phase, en anglais Phase Locked Loop (PLL), il s'agit d'un système bouclé destiné à asservir la phase du signal de sortie sur la phase du signal d'entrée donc une synchronisation en temps réel.

IV.3.1.1. Structure générale de PLL :

Le circuit de base d'un PLL est généralement constitué de trois éléments [16] :

- Détecteur de phase.
- Filtre de boucle.
- Oscillateur contrôlé en tension.

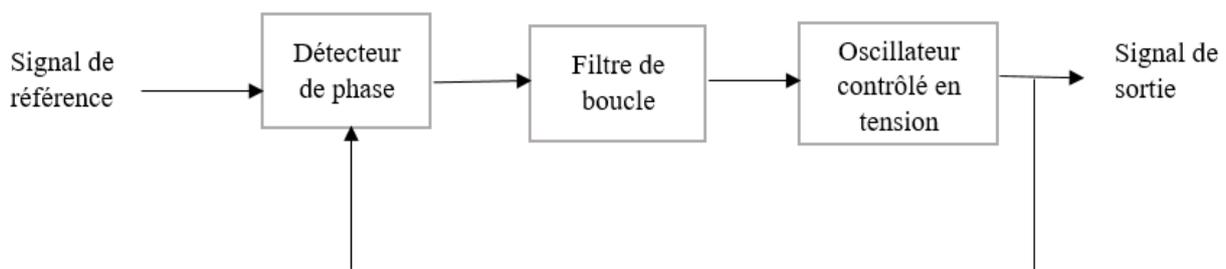


Figure IV.11 : Structure générale d'une PLL [16].

Le détecteur de phase permet de construire un signal dont la valeur moyenne est fonction du déphasage entre les deux signaux d'entrée.

Le filtre passe-bas permet de récupérer la valeur moyenne du signal de sortie du détecteur de phase.

Le dernier bloc est un oscillateur contrôlé en tension : sa fréquence de sortie est fonction de sa tension d'entrée.

IV.3.1.2. La PLL dans le cas d'un réseau triphasé :

La méthode la plus répandue pour les systèmes triphasés est celle basée sur la représentation dans le référentiel de Park des tensions mesurées sur le réseau. Le principe est de considérer les équations du réseau triphasé dans un repère de Park dont l'orientation est telle que $V_q=0$.

Le principe de la PLL dans le domaine de Park est présenté dans la Figure IV.12.

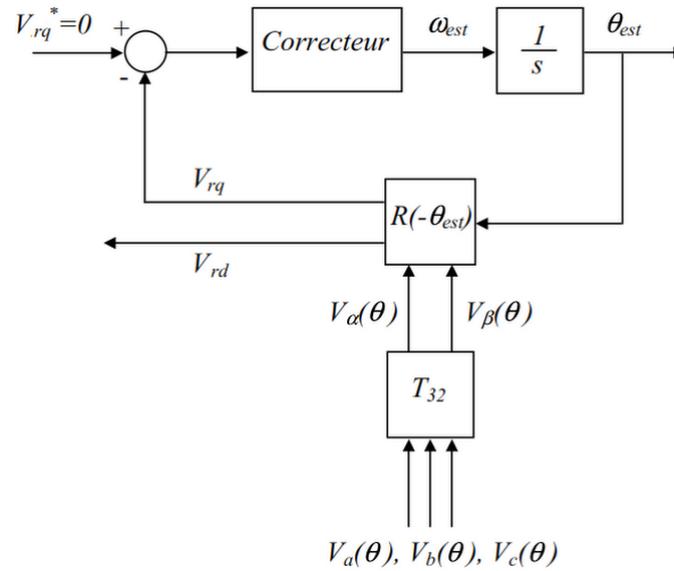


Figure IV.12 : Principe de la PLL triphasée dans le domaine de Park [37].

Dans le cas d'un système équilibré, les tensions du système triphasé s'expriment de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
 V_a(\theta) &= V_m \cdot \sin(\theta) \\
 V_b(\theta) &= V_m \cdot \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 V_c(\theta) &= V_m \cdot \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)
 \end{aligned}
 \tag{IV.13}$$

La transformation de Clarke est d'abord appliquée sur les tensions simples V_a , V_b , V_c [5] :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}
 \tag{IV.14}$$

Avec :

$$T_{32} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}
 \tag{IV.15}$$

Le résultat du produit matriciel nous donne :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \cdot \sin(\theta) \\ V_m \cdot \cos(\theta) \end{bmatrix}
 \tag{IV.16}$$

Les tensions ainsi obtenues sont ensuite exprimées dans le repère de Park par une rotation $R(-\theta_{est})$.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\theta_{est}) & \cos(\theta_{est}) \\ -\cos(\theta_{est}) & \sin(\theta_{est}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (IV.17)$$

On obtient donc l'expressions des tensions dans le repère de Park [5] :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \cdot \cos(\theta - \theta_{est}) \\ -V_m \cdot \sin(\theta - \theta_{est}) \end{bmatrix} \quad (IV.18)$$

En régime établi l'angle estimé θ_{est} est égale à l'angle θ . Cette condition sera obtenue si la grandeur V_q est nulle [40].

IV.3.1.3. Résultats de simulation :

Pour l'étude de la réponse de PLL, on introduit un signal de référence initialement déphasé de 30° par rapport au signal de sortie de PLL, les résultats de simulation sont représentés par la figure ci-dessous :

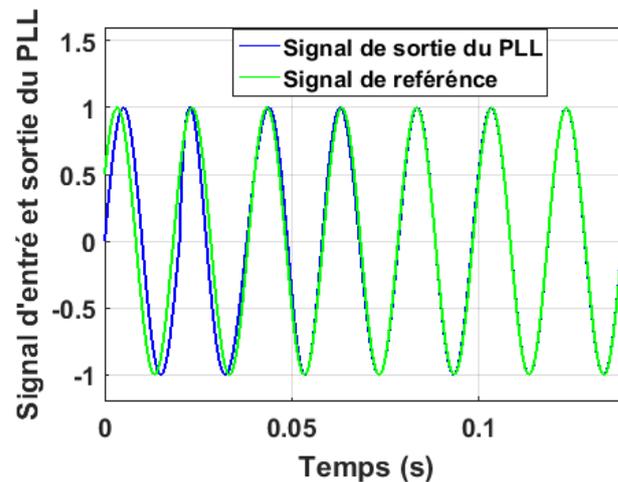


Figure IV.13: La réponse de PLL pour un déphasage initial de 30° .

On voit bien que l'écart de phase est éliminé après 0.1 seconde. Ce qui montre le bon fonctionnement de PLL.

Une deuxième simulation est faite pour voir la réponse de PLL au changement de fréquence.

Initialement on suppose que la fréquence de référence égale à la fréquence de sortie de PLL (50 Hz), ensuite on varie la fréquence de référence de 50 Hz à 52 Hz à l'instant 0.1s, les résultats de simulation sont représentés par la figure ci-dessous :

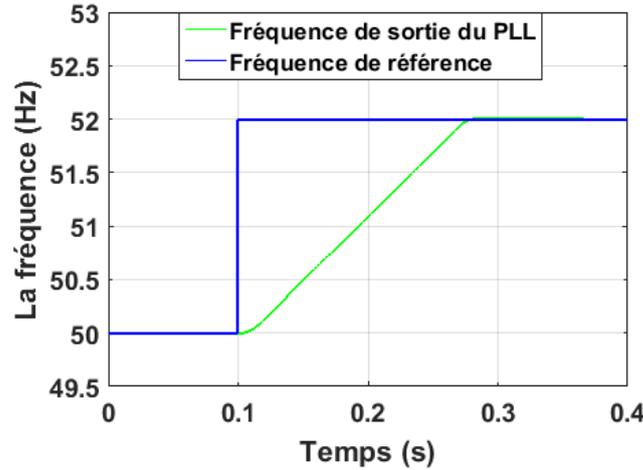


Figure IV.14 : La réponse de PLL pour un changement de fréquence.

On remarque qu’après 0.2 seconde la fréquence de sortie de PLL atteint sa valeur de référence.

Ces résultats de simulation montrent la robustesse du PLL.

IV.4. Commande d’un système hybride PV-diesel sans stockage :

IV.4.1 Régulation des courants :

Pour pouvoir commander le système hybride, on doit tout d’abord le modéliser. La Figure IV.15 représente la connexion de l’onduleur avec le groupe diesel à travers le filtre LC.

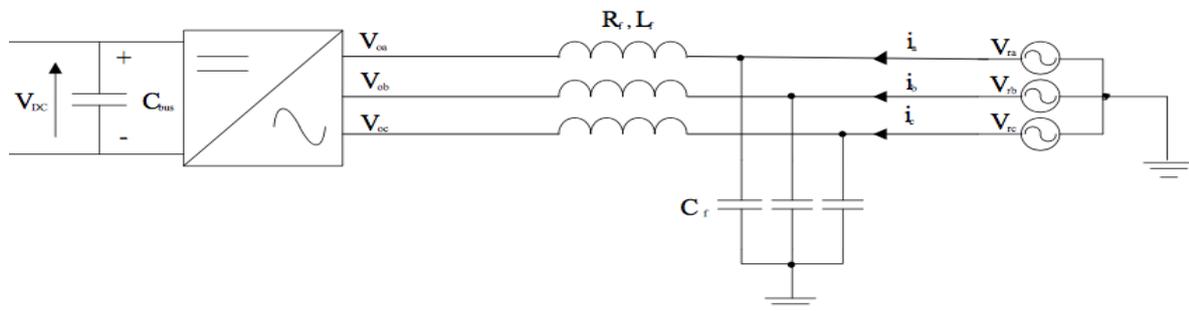


Figure IV.15 : Représentation de la connexion onduleur-groupe diesel [42].

En négligeant le courant dans la capacité de filtre, les équations différentielles permettant de modéliser les tensions et les courants dans l’onduleur sont sous la forme suivante :

$$V_{gi} = R_f I_i + L_f \frac{dI_i}{dt} + V_{oi} \tag{IV.19}$$

Avec :

- V_{oi} : tension à la sortie de l’onduleur.
- V_{gi} : tension à la sortie de group diesel.
- I_i : courant dans l’inductance de filtre.
- R_f, L_f : La résistance et l’inductance de filtre.

On peut représenter le système sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_1}{dt} \\ \frac{dI_2}{dt} \\ \frac{dI_3}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_f}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_f}{L_f} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} + \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} V_{g1} - V_{01} \\ V_{g2} - V_{02} \\ V_{g3} - V_{03} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.20})$$

En appliquant la transformation de Park au vecteur de courant et de tension on trouve :

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_d}{dt} \\ \frac{dI_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & w \\ -w & -\frac{R_f}{L_f} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} V_{dg} - V_{d0} \\ V_{qg} - V_{q0} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.21})$$

$$s \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & w \\ -w & -\frac{R_f}{L_f} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} V_{dg} - V_{d0} \\ V_{qg} - V_{q0} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.22})$$

$$\begin{bmatrix} V_{dg} \\ V_{qg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{d0} \\ V_{q0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_f + sL_f & -L_f w \\ L_f w & R_f + sL_f \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (\text{IV.23})$$

On aura donc le système suivant :

$$\begin{cases} V_{dg} = R_f I_d + L_f \frac{dI_d}{dt} - L_f w I_q + V_{d0} \\ V_{qg} = R_f I_q + L_f \frac{dI_q}{dt} + L_f w I_d + V_{q0} \end{cases} \quad (\text{IV.24})$$

Ces deux équations sont couplées par les termes $L_f w i_{dq}$, ceci rend la régulation très complexe. Dans ce cas on utilise la méthode de découplage par compensation, on utilise un régulateur PI dans chaque boucle pour compenser la chute de tension due à l'impédance de filtre.

Les équations de contrôle sont les suivantes [19] [43] :

$$\begin{cases} V_{dg} = (K_p + \frac{K_i}{s})(I_{dref} - I_d) - L_f w I_q + V_{d0} \\ V_{qg} = (K_p + \frac{K_i}{s})(I_{qref} - I_q) + L_f w I_d + V_{q0} \end{cases} \quad (\text{IV.25})$$

Il s'agit en fait de deux régulateurs, un pour l'axe d et un autre pour l'axe q. Ces deux régulateurs travaillent sur le même modèle de système, d'où il est approprié d'estimer les paramètres de l'un d'entre eux [26].

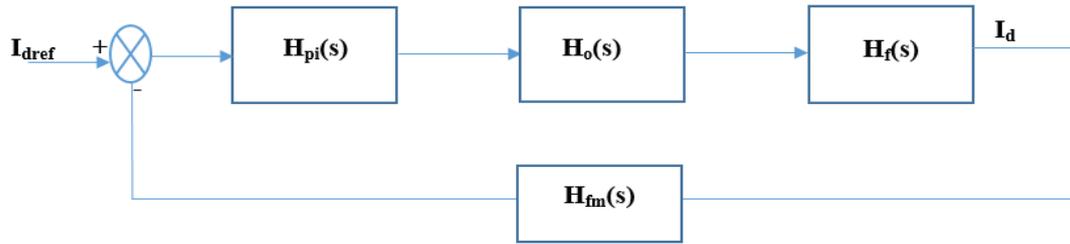


Figure IV.16 : Boucle de régulation du courant d'axe direct.

$H_{pi}(s)$: représente la fonction de transfert de régulateur :

$$H_{pi}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (IV.26)$$

$H_o(s)$: Représente le temps de retard causé par l'onduleur, qui définit le temps que met l'onduleur pour répondre à une nouvelle consigne, ce retard est égal à 0.5 fois le temps d'échantillonnage :

$$H_o(s) = \frac{1}{1+sT_o} \quad (IV.27)$$

$H_f(s)$: Représente la fonction de transfert du filtre LC, et décrit la variation de la tension de sortie de l'onduleur en fonction de la variation de la charge (la chute de tension) :

$$H_f(s) = \frac{1/R_f}{1+sT_f} \quad (IV.28)$$

$$T_f = \frac{L_f}{R_f} \quad (IV.29)$$

$H_{fm}(s)$: Représente la fonction de transfert du filtre de mesure, Il est utilisé pour réduire les bruits indésirables dus à la mesure.

$$H_{fm}(s) = \frac{1}{1+sT_{fm}} \quad (IV.30)$$

La constante de temps T_f de filtre est beaucoup plus grande que les autres constantes de temps, ce qui peut être considéré comme un système d'une grande et plusieurs petites constantes de temps. Par conséquent, le critère de contrôle optimum avec un régulateur PI peut être utilisé comme critère d'optimisation (Annexe).

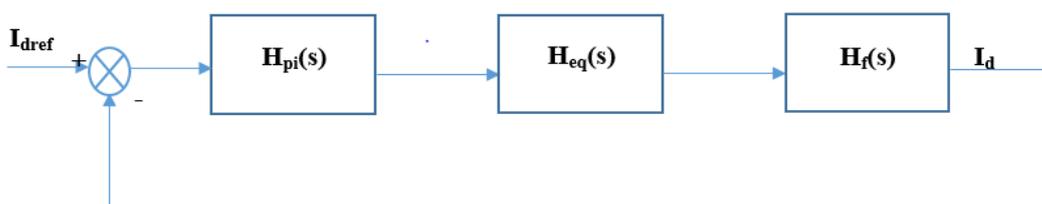


Figure IV.17: Boucle de régulation réduite du courant.

Avec :

$$H_{eq}(s) = \frac{1}{1+sT_{eq}} \quad (IV.31)$$

$$T_{eq} = T_o + T_{fm} \quad (IV.32)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$H_{BO}(s) = (K_p + \frac{K_i}{s}) * \frac{1}{1+sT_{eq}} * \frac{1/R_f}{1+sT_f} \quad (IV.33)$$

$$H_{BO}(s) = K_i(\frac{1+\frac{K_p}{K_i}s}{s}) * \frac{1}{1+sT_{eq}} * \frac{1/R_f}{1+sT_f} \quad (IV.34)$$

On prend $\frac{K_p}{K_i} = T_f$ pour compenser la plus grande constante de temps :

$$H_{BO}(s) = \frac{K_i/R_f}{s(1+sT_{eq})} \quad (IV.35)$$

Ce qui donne la fonction de transfert en boucle fermée :

$$H_{BF}(s) = \frac{H_{BO}(s)}{1+H_{BO}(s)} \quad (IV.36)$$

$$H_{BF}(s) = \frac{K_i/R_f}{s(1+sT_{eq})+K_i/R_f} = \frac{K_i/T_{eq}R_f}{s^2+1/T_{eq}s+K_i/T_{eq}R_f} = \frac{\omega_0^2}{s^2+2\xi\omega_0s+\omega_0^2} \quad (IV.37)$$

Avec :

$$\omega_0 = \sqrt{K_i/T_{eq}R_f} \quad (IV.38)$$

$$\xi = \frac{1}{2}\sqrt{R_f/T_{eq}K_i} \quad (IV.39)$$

IV.4.2 Régulation de la tension du bus continu :

La puissance active injectée dans le réseau dépend des paramètres atmosphériques qui sont l'irradiation solaire et la température [27].

Donc une variation de ces paramètres entraine une variation de cette puissance disponible à injecter, ce qui provoque une variation de tension du bus continu si ce dernier n'est pas contrôlé [27].

Le contrôleur de la tension du bus continu se trouve dans la boucle extérieure de régulation. La sortie de ce régulateur est la référence au contrôleur du courant de l'axe d [56].

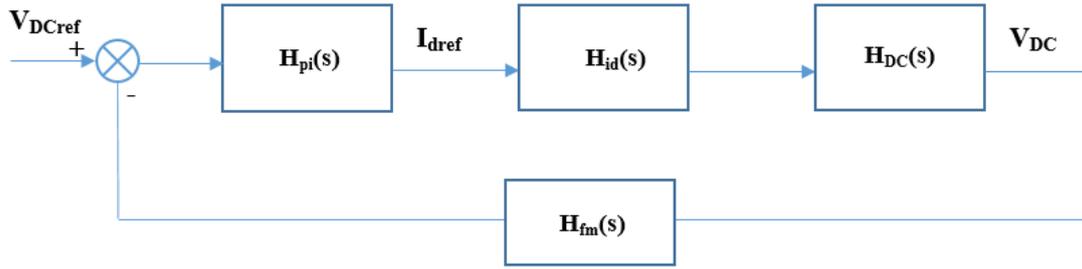


Figure IV.18 : Boucle de régulation de la tension du bus continu.

$H_{pi}(s)$: Représente la fonction de transfert de régulateur :

$$H_{pi}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \tag{IV.40}$$

$H_{id}(s)$: Représente la fonction de transfert interne de régulation du courant d'axe d, pour utiliser le critère d'optimum symétrique on fait l'approximation suivante :

$$H_{id}(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2} = \frac{1}{\frac{s^2}{\omega_0^2} + \frac{2\xi}{\omega_0}s + 1} \tag{IV.41}$$

pour des fréquences $\omega < \omega_0$

$$H_{id}(s) = \frac{1}{\frac{2\xi}{\omega_0}s + 1} = \frac{1}{4\xi^2 T_{eq}s + 1} = \frac{1}{2T_{eq}s + 1} \tag{IV.42}$$

Cette approximation est valable que pour un fonctionnement dans les faibles fréquences.

$H_{dc}(s)$: Représente la fonction de transfert qui relie le courant d'axe d et la tension du bus continu.

$$H_{dc}(s) = \frac{K_{DC}}{C_{DC}s} \tag{IV.43}$$

C_{DC} : la capacité du bus continu.

K_{DC} : relie le courant d'axe d au courant du bus continu, elle peut être trouvée en utilisant le principe de conservation de puissance tel que.

$$V_{DC}I_{DC} = \frac{3}{2}V_d I_d \tag{IV.44}$$

$$V_{ab} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{3}{2}}V_{DC}r \tag{IV.45}$$

$$V_d = \sqrt{\frac{2}{3}}V_{ab} = \frac{1}{2}V_{DC}r \tag{IV.46}$$

D'ou
$$K_{DC} = \frac{I_{DC}}{I_d} = \frac{3}{4}r \tag{IV.47}$$

$H_{fm}(s)$: Représente la fonction de transfert du filtre de mesure, qui est utilisé pour réduire les bruits indésirables dus à la mesure.

$$H_{fm}(s) = \frac{1}{1+sT_{fm}} \quad (IV.48)$$

Le système va satisfaire le critère de l'optimum symétrique où il y a un intégrateur plusieurs constantes de temps de même grandeur qu'on peut additionnées, et un régulateur PI.

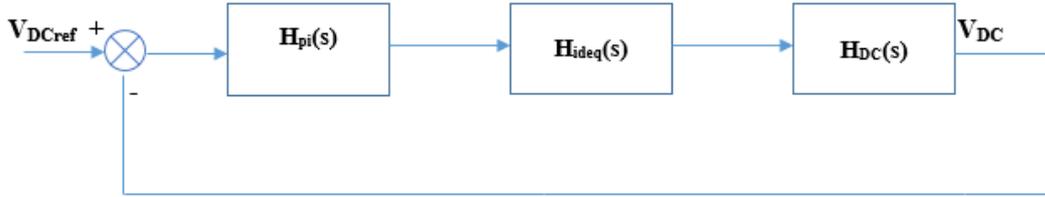


Figure IV.19 : Boucle de régulation réduite de la tension du bus continu.

La fonction de transfert en boucle ouverte devient :

$$H_{BO}(s) = (K_p + \frac{K_i}{s}) * \frac{1}{1+sT_{eqq}} * \frac{K_{DC}}{C_{DC}s} \quad (IV.49)$$

Avec :

$$T_{eqq} = 2T_{eq} + T_{fm} \quad (IV.50)$$

$$H_{BO}(s) = K_i * \frac{1 + \frac{K_p}{K_i}s}{1+sT_{eqq}} * \frac{K_{DC}}{C_{DC}s^2} \quad (IV.51)$$

En boucle fermée :

$$H_{BF}(s) = \frac{H_{BO}(s)}{1+H_{BO}(s)} = \frac{K_i K_{DC} (1 + \frac{K_p}{K_i}s)}{C_{DC}s^2 (1+sT_{eqq}) + K_i K_{DC} (1 + \frac{K_p}{K_i}s)} \quad (IV.52)$$

D'après le critère d'optimum symétrique on trouve :

$$\frac{K_p}{K_i} = 4T_{eqq} \quad (IV.53)$$

$$K_p = \frac{C_{DC}}{2T_{eqq}K_{DC}} \quad (IV.54)$$

Les équations de puissance active et réactive dans le domaine de Park sont :

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} (V_{gd} * I_d + V_{gq} * I_q) \\ Q = \frac{3}{2} (V_{gq} * I_d - V_{gd} * I_q) \end{cases} \quad (IV.55)$$

Puisque le repère de Park lié aux tensions du groupe diesel [21], donc $V_{gq}=0$, on trouve :

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} V_{gd} * I_d \\ Q = -\frac{3}{2} V_{gd} * I_q \end{cases} \quad (IV.56)$$

D'où la puissance active est proportionnelle au courant d'axe d et la puissance réactive et liée au courant d'axe q [21].

Le contrôle de la puissance active se fait à travers le contrôle du courant d'axe d, la référence de ce courant est générée par la boucle de régulation de tension du bus continu.

Le contrôle de la puissance réactive se fait à travers le contrôle de courant d'axe q, donc une référence nulle de ce courant implique un fonctionnement à facteur de puissance unitaire, qui est le but de cette commande [19].

Le schéma global de commande est représenté dans la Figure IV.20.

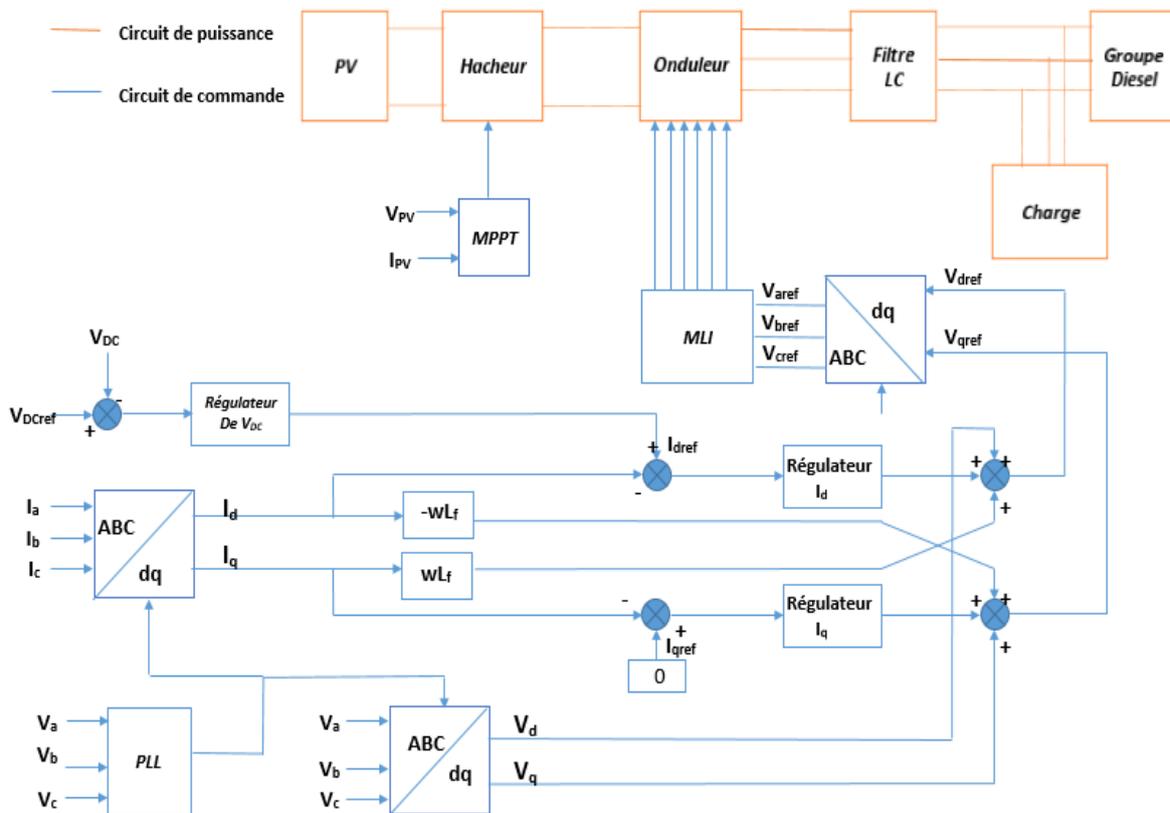


Figure IV.20: Schéma global de la commande du système hybride PV-diesel sans stockage.

IV.4.3 Algorithme de gestion d'énergie du système hybride :

Pour notre système le groupe diesel doit pouvoir couvrir la totalité de la charge à cause de l'absence du stockage.

Une intégration maximale du photovoltaïque est respectée en suivant les critères de sécurité d'alimentation de la charge pour éviter la perte totale ou partielle de la production PV due à l'éclairement.

Un taux d'intégration de 60% maximale à charge a été choisi pour le photovoltaïque, le reste sera assuré par le groupe diesel.

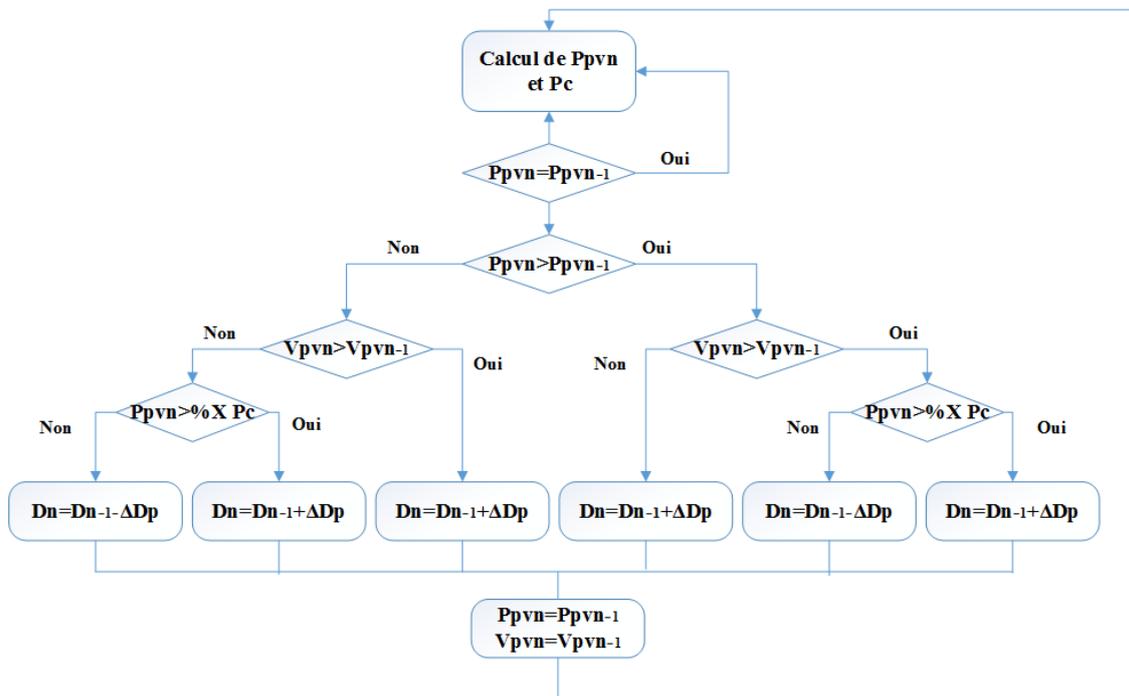


Figure IV.21 : Algorithme de gestion d'énergie.

La Figure IV.21 montre l'algorithme de gestion d'énergie qui permet de limiter la puissance générée par le GPV à un taux d'intégration de X%.

Le taux d'intégration X% est calculé en temps réel pour assurer que le groupe diesel ne fonctionne pas au-dessous de 30 % de sa puissance maximale.

IV.4.4 Résultats de simulation :

Pour la simulation du système hybride PV-diesel sans stockage, on suppose un profil d'irradiation représenté par la Figure IV.22.

Les paramètres de GPV, du groupe diesel, ainsi que les paramètres de régulateurs utilisés, sont illustrés dans les tableaux (Annexe).

La charge primaire étant 150kW jusqu'à t=13s, à cet instant on ajoute une autre charge (50kW). Le temps de simulation est de 16s.

Les résultats de simulation sont présentés par les figures ci-dessous :

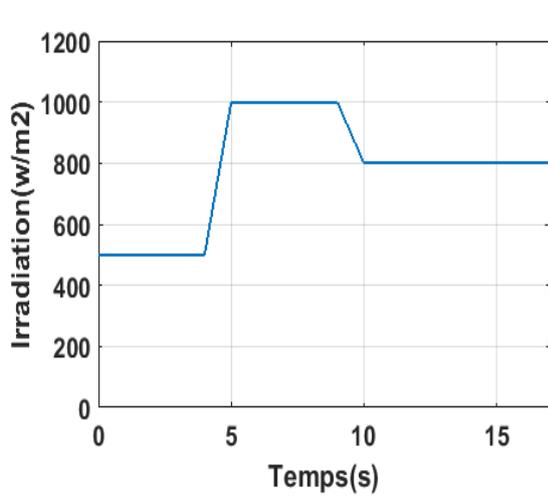


Figure IV.22 : Profile de l'irradiation.

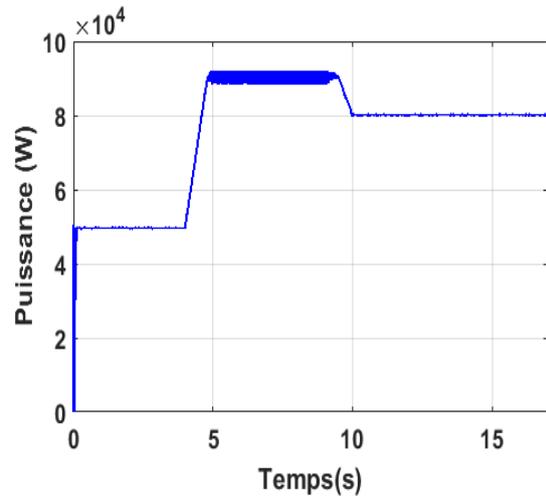


Figure IV.23 : Puissance générée par le PV.

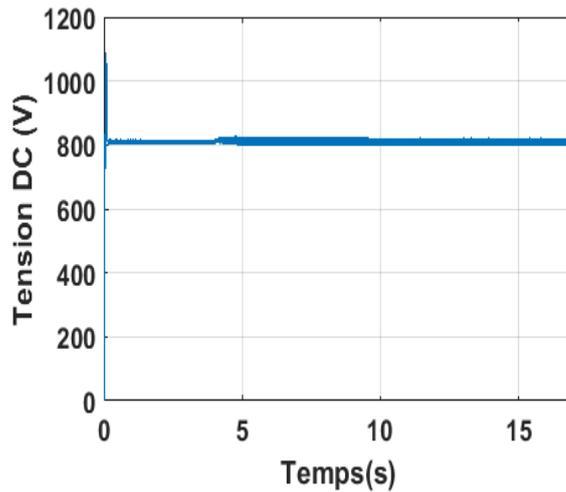


Figure IV.24 : Tension du bus DC.

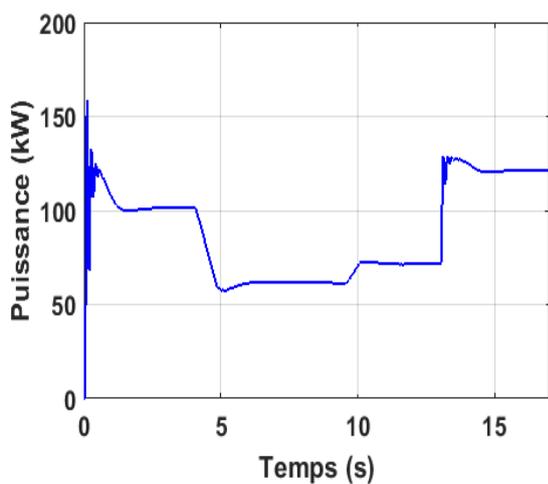


Figure IV.25 : Puissance du groupe diesel.

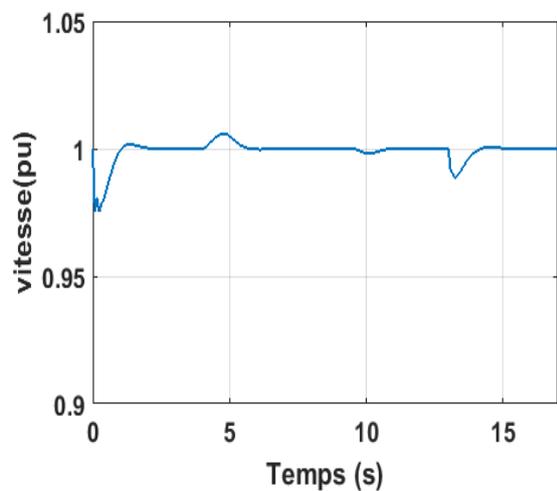


Figure IV.26 : Vitesse du groupe diesel.

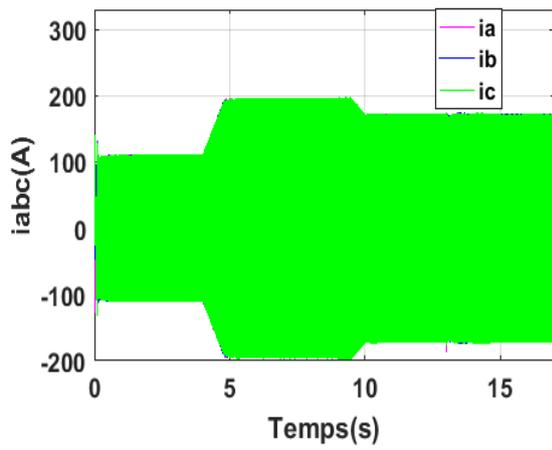


Figure IV.27 : Courants à la sortie du filtre.

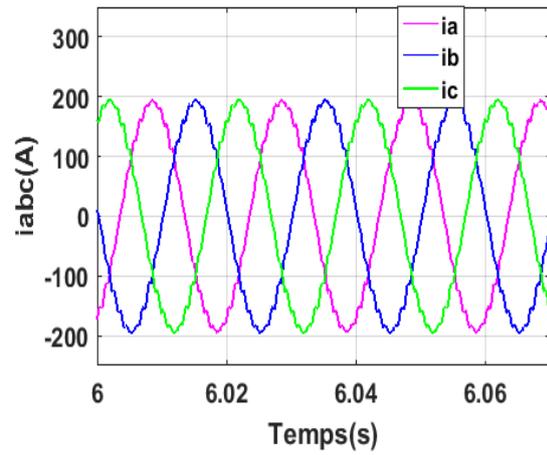


Figure IV.28 : Zoom des courants à la sortie du filtre.

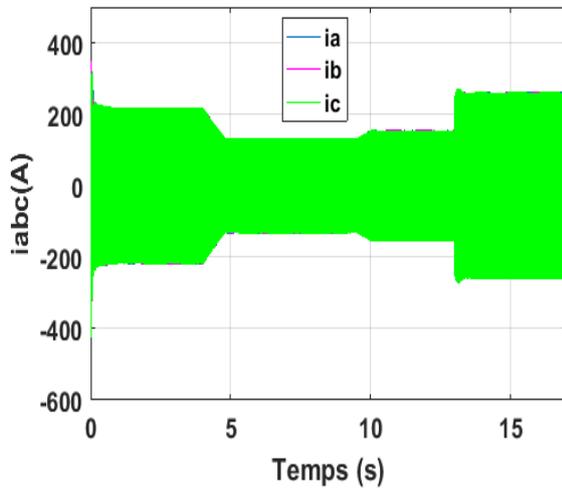


Figure IV.29 : Courants du groupe diesel.

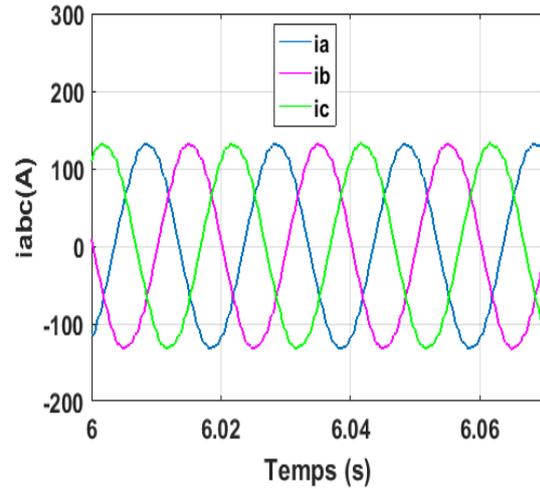


Figure IV.30 : Zoom des courants du groupe diesel.

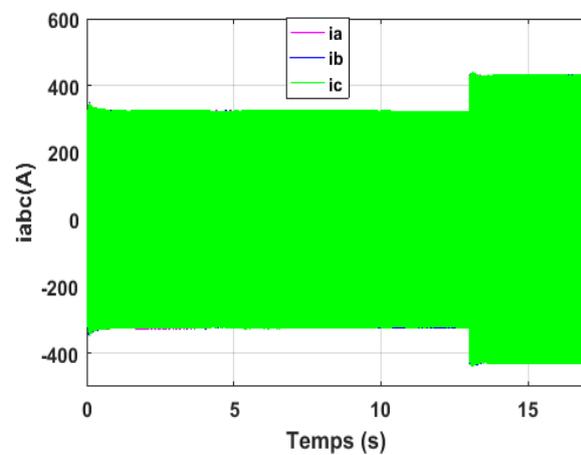


Figure IV.31 : Courants dans la charge.

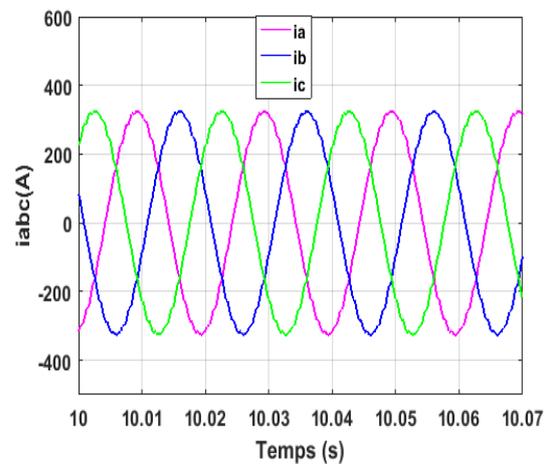


Figure IV.32 : Zoom des courants dans la charge.

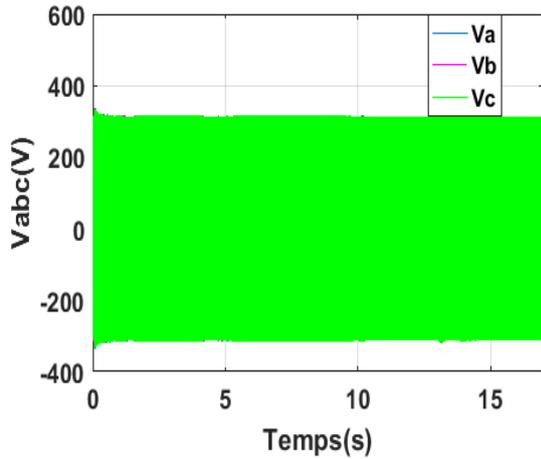


Figure IV.33 : Tensions au bornes de la charge.

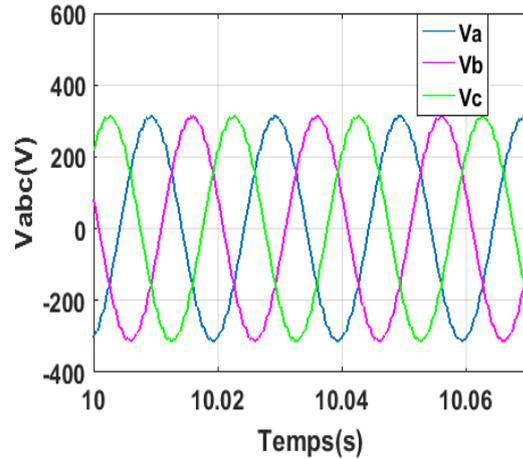


Figure IV.34 : Zoom des tensions dans la charge.

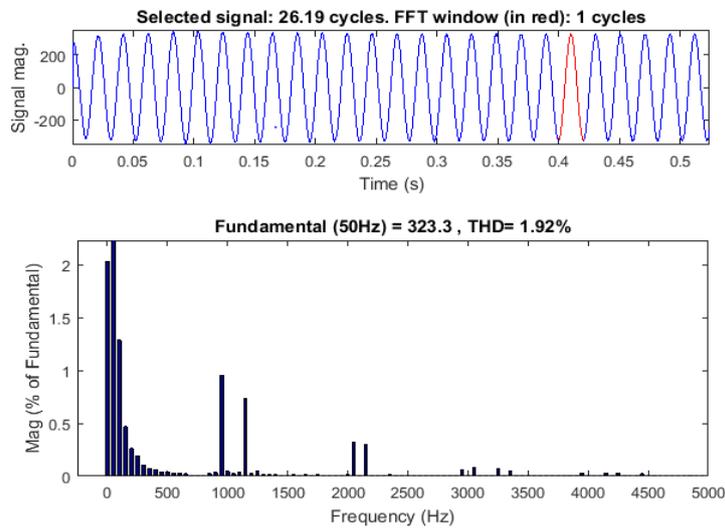


Figure IV.35: Analyse spectrale du courant de la charge.

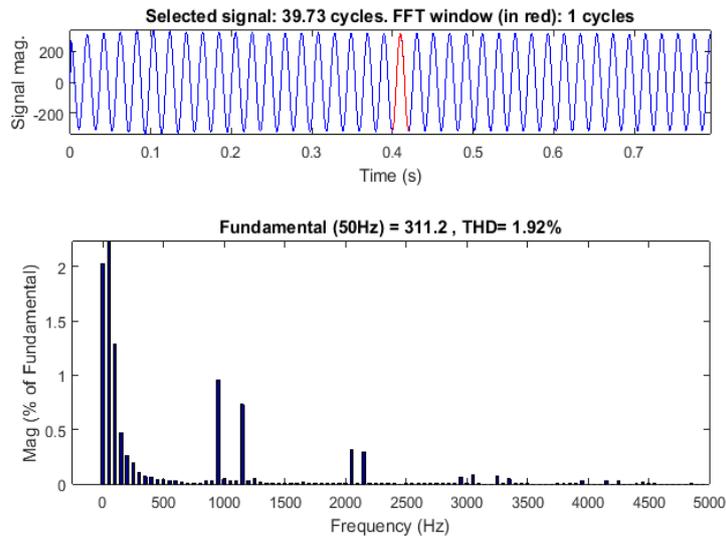


Figure IV.36: Analyse spectrale de tension de la charge.

Interprétations des résultats :

De la Figure IV.22 et la Figure IV.23 on remarque que la puissance générée par les panneaux photovoltaïques suit le profil de la charge, on note que pour l'irradiation 1000 W/m^2 (entre 5 et 9 secondes) la puissance générée par le GPV est limitée à 90 kW au lieu de 100 kW (MPPT), à cause de l'algorithme de gestion d'énergie pour que la puissance du groupe diesel ne descende pas au-dessous de 30% de sa puissance maximale.

Dans la Figure IV.24 on voit que la tension du bus continu reste constante durant le fonctionnement malgré la variation de l'irradiation, et sa valeur suit la valeur de consigne 810 V, qui illustre le bon fonctionnement du régulateur PI et son adaptation au système.

La Figure IV.25 représente la puissance délivrée par le groupe diesel à la charge, elle varie avec la variation de l'irradiation et de la charge selon l'algorithme de fonctionnement, une variation de la puissance demandée au groupe diesel influe directement sur la vitesse de rotation du groupe diesel qui est remarquable dans la Figure IV.26, tel qu'une (augmentation, diminution) de la puissance engendre une (diminution, augmentation) de la vitesse donc de la fréquence pendant un régime transitoire de faible durée et d'une valeur acceptable, après elle revient à sa valeur de consigne, qui explique le bon fonctionnement de régulateur de vitesse.

Dans la Figure IV.27 on remarque la variation de courant délivrée par l'onduleur à la charge suivant la puissance disponible. La Figure IV.29 montre le courant généré par le groupe diesel pour assurer le reste de la puissance demandée par la charge. La Figure IV.31 montre le courant dans la charge qui est constant dans le cas d'une charge constante malgré la variation des conditions atmosphériques, il varie seulement avec la variation de la charge, ce qui montre le bon fonctionnement de la commande.

La Figure IV.33 montre la tension au borne de la charge (tension de bus AC), on remarque que l'amplitude de cette tension est constante malgré la variation des conditions atmosphériques et de la charge

La Figure IV.35 montre l'analyse spectrale du courant de la charge avec un THD de 1,92 qui montre la bonne qualité de l'alimentation en courant triphasé sinusoïdale ce qu'on peut le voir dans les différentes figures (Figure IV.28, Figure IV.30, Figure IV.32).

La Figure IV.36 montre l'analyse spectrale de la tension de la charge avec un THD de 1,92 qui montre la bonne qualité de l'alimentation en tension triphasé sinusoïdale de valeur efficace de 220 V par phase, ce qu'on peut le voir dans La Figure IV.34.

IV.5. Commande d'un Système hybride photovoltaïque-diesel-batterie :

L'utilisation des systèmes de stockage dans les systèmes hybrides photovoltaïque-diesel a comme principale objective la maximisation de l'énergie provenant du photovoltaïque.

Le système de stockage le plus utilisé pour ces systèmes est la batterie d'accumulateurs électrochimiques [16].

De nombreux types d'accumulateurs électrochimiques existent (Li-ion, Pb-acide, CdNi, NiZn), toutefois une des technologies la plus prometteuse est l'accumulateur au lithium-ion caractérisé par une grande capacité et une longue durée de vie ce qui explique notre choix.

IV.5.1 Les batteries

Une batterie est un générateur réversible constituée des cellules électrochimiques capables de stocker l'énergie électrique sous forme chimique, puis de la restituer par la suite sous forme électrique, grâce aux réactions d'Oxydations et de Réductions au niveau des électrodes.

Elles sont caractérisées principalement par les paramètres suivants [16] [24] :

- **Rendement d'utilisation**

Le rendement en ampère-heure (ou faradique) est le rapport entre la quantité d'électricité débitée à la décharge et la quantité d'électricité fournie lors de la charge

- **Résistance interne**

La résistance interne d'un accumulateur est toujours très faible (de l'ordre de quelques centièmes d'ohm) et négligeable en général.

- **Capacité**

La capacité est la quantité d'électricité qu'un accumulateur pleinement chargé peut faire circuler pendant une période de décharge donnée exprimée en ampères-heures (Ah).

- **Profondeur de décharge**

Appelée aussi l'état de charge, représente le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisée pendant un cycle de charge/décharge, généralement on ne descend pas au-dessous de 20% de la capacité de la batterie. Sinon il y'aura une perte de capacité et une augmentation de la résistance interne d'où une baisse de tension.

- **Durée de vie**

La durée de vie est évaluée par le nombre de cycle charge-décharge que la batterie peut soutenir avant de perdre ces caractéristiques exprimées en année (ou en nombre de cycles).

Le choix de la technologie d'accumulateurs va dépendre du cout d'investissement, de la durée de vie des batteries dans les conditions de fonctionnement, correspondent à l'application choisie et de la capacité de stockage. Nous avons choisi les batteries à base de Lithium-Ion (Li-Ion) qui sont l'une des technologies les plus importantes dans le domaine photovoltaïque.

IV.5.2 Modélisation de la batterie :

L'une des modélisations des batteries la plus simple est sa modélisation par une source idéale de tension, une capacité et une résistance qui représente la résistance interne de la batterie comme représenté dans la Figure IV.37. Ce modèle servira à modéliser les courbes de charge et décharge dans la partie linéaire.

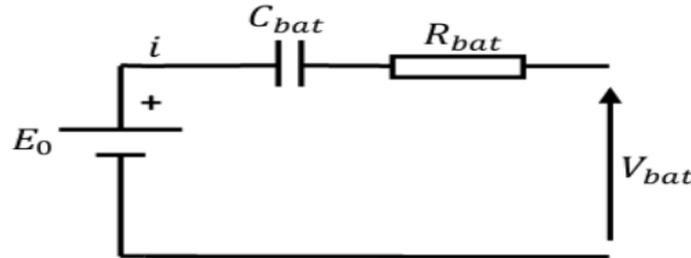


Figure IV.37 : Circuit équivalent du modèle de la batterie simplifiée [28].

Dans notre étude nous considérons que l'état de charge est ($40\% < SOC < 80\%$) durant la simulation pour simplifier l'étude de régulation.

IV.5.3 Contrôle du bus continu :

Le contrôle du bus continu s'effectue par la charge et la décharge de la batterie à travers un convertisseur DC/DC Buck-Boost bidirectionnel en courant qui relie la batterie au bus continu comme représenté dans la Figure IV.38 avec ça boucle de régulation.

Le principe de la régulation est le suivant :

Lorsque la tension aux bornes du bus continu est inférieure à la tension de référence, le courant de référence I_{ref} généré par le régulateur PI est positif, ce qui impose une décharge de la batterie en actionnant l'interrupteur K_{11} donc fonctionnement Boost (1^{ère} configuration).

Lorsque la tension aux bornes du bus continu est supérieure à la tension de référence, le courant de référence I_{ref} généré par le régulateur PI est négatif, ce qui impose une charge de la batterie en actionnant l'interrupteur K_{10} donc fonctionnement Buck (2^{ème} configuration).

IV.5.4 Modélisation de l'hacheur réversible en courant :

Les équations associées à la première configuration sont :

Intervalle $[0, \alpha_{k11}T_s]$

Intervalle $[\alpha_{k11}T_s, T_s]$

$$\begin{cases} V_{Lbat} = V_{bat} \\ i_c = -i_s \end{cases} \quad \begin{cases} V_{Lbat} = V_{bat} - V_s \\ i_c = i_{lbat} - i_s \end{cases} \quad (IV.57)$$

Ce qui donne le modèle suivant en utilisant le principe de la valeur moyenne :

$$\begin{cases} V_{Lbat} = -(1 - \alpha_{k11})V_c + V_{bat} \\ i_c = (1 - \alpha_{k11})i_{lbat} - i_s \end{cases} \quad (IV.58)$$

Les équations associées à la deuxième configuration sont :

Intervalle $[0, \alpha_{k10}T_s]$	Intervalle $[\alpha_{k10}T_s, T_s]$	
$\begin{cases} V_{Lbat} = V_{bat} - V_s \\ i_c = i_{lbat} - i_s \end{cases}$	$\begin{cases} V_{Lbat} = V_{bat} \\ i_c = -i_s \end{cases}$	(IV.59)

Ce qui donne le modèle suivant en utilisons le principe de valeur moyenne

$$\begin{cases} V_{Lbat} = -\alpha_{k10}V_c + V_{bat} \\ i_c = \alpha_{k10}i_{lbat} - i_s \end{cases} \quad (IV.60)$$

Puisque les deux interrupteurs sont en fonctionnement complémentaires alors :

$$\alpha_{k10} = 1 - \alpha_{k11} \quad (IV.61)$$

On déduit que pour les deux configurations, l'hacheur a le même modèle de connaissance, de ce dernier on peut établir le modèle moyen du contrôle de tension du bus dc par la méthode d'inversion du modèle comme représenté dans la Figure IV.38 [33].

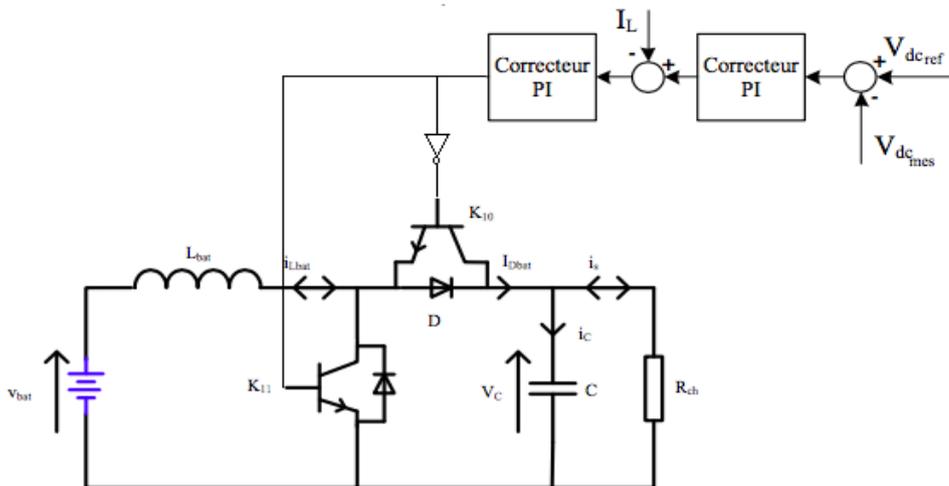


Figure IV.38 : Contrôle de tension du bus DC [28].

IV.5.6 Contrôle du convertisseur DC/AC :

La synchronisation des tensions de sortie de l'onduleur avec celles du groupe se fait par la même méthode que dans le premier système (la méthode VOC), le contrôle de la puissance active se fait par le contrôle du courant d'axe d et la puissance réactive par le contrôle du courant d'axe q, tel que le principe de régulation des courants dans ce cas est le même que celui déjà représenté dans le système hybride photovoltaïque diesel car on travaille sur le même modèle basé sur le système d'équations (IV.25), sauf que la référence du courant d'axe direct n'est plus générée par la boucle de régulation du bus continue, dans ce cas elle est générée par l'algorithme de gestion d'énergie du système globale (Annexe).

Le schéma global de commande est représenté dans la Figure IV.39.

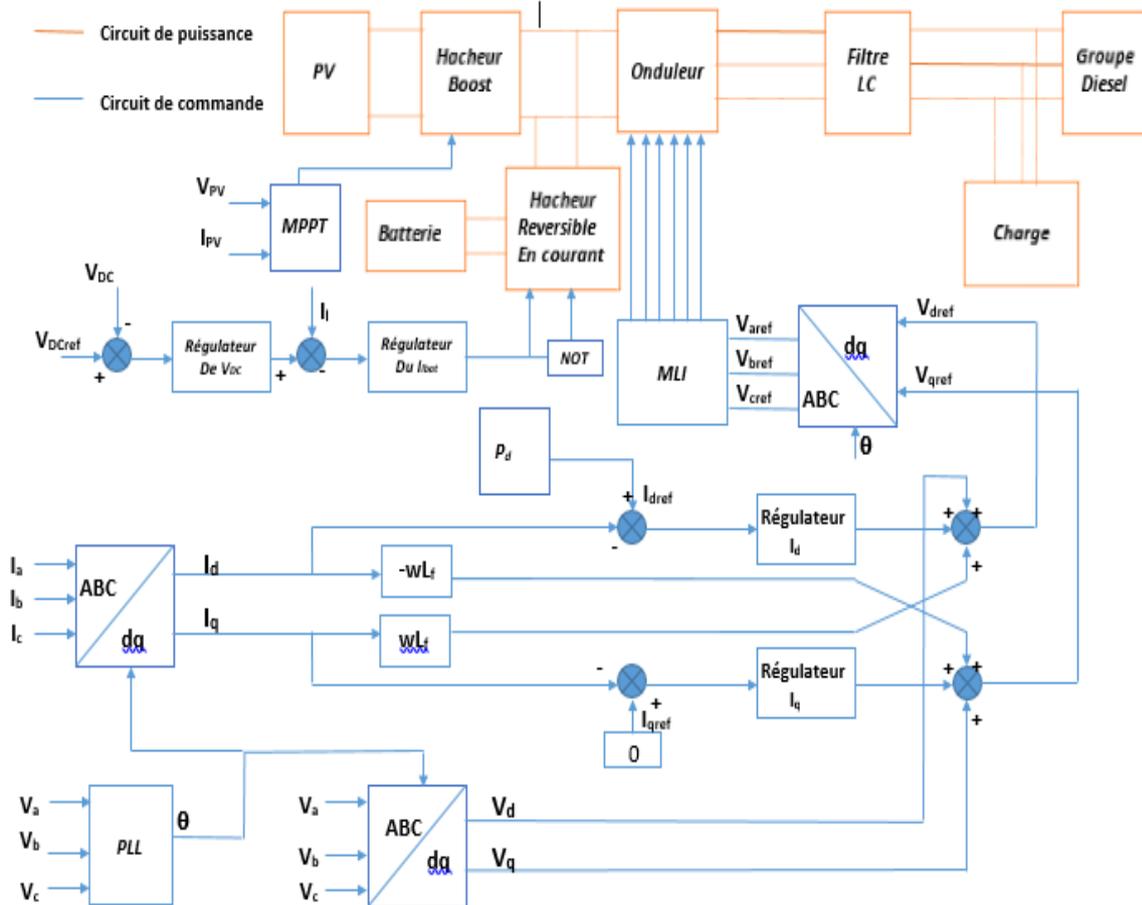


Figure IV.39 : Schéma global de la commande du système hybride PV-diesel avec stockage.

IV.5.7 Résultats de simulation :

Pour la simulation du système hybride PV-diesel avec stockage, on suppose un profil d'irradiation représenté par la Figure IV.40.

On suppose que les batteries sont initialement chargées de 70%. Les paramètres de GPV, de groupe diesel, ainsi que les paramètres des régulateurs utilisés, sont illustrés dans les tableaux (Annexe).

Le temps de simulation est de 13s.

Le profil de charge est représenté par la Figure IV.41. La charge primaire étant 100 kW, on ajoute une autre charge de 50kW à l'instant $t=4s$.

Les résultats de simulation sont présentés par les figures ci-dessous :

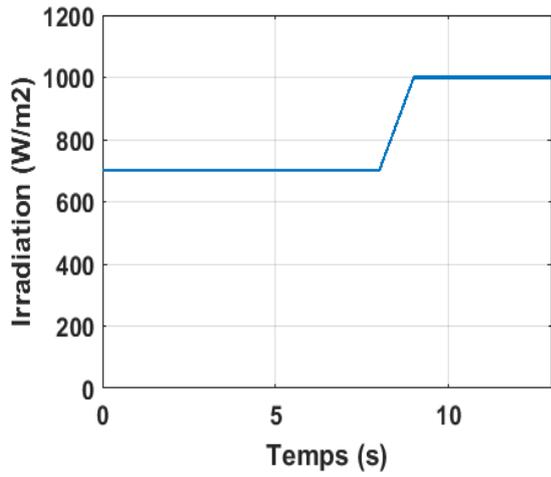


Figure IV.40 : Profile de l'irradiation.

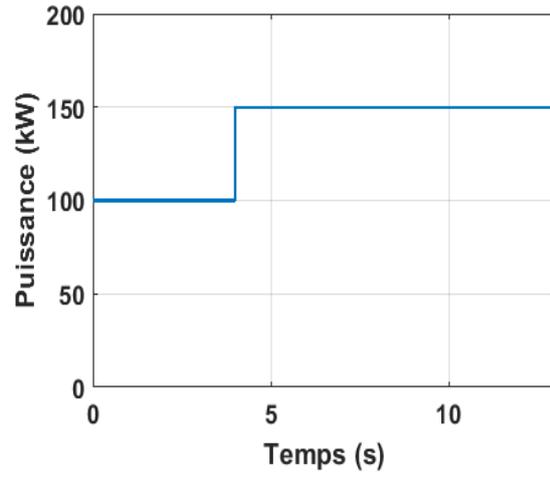


Figure IV.41 : Profile de la charge.

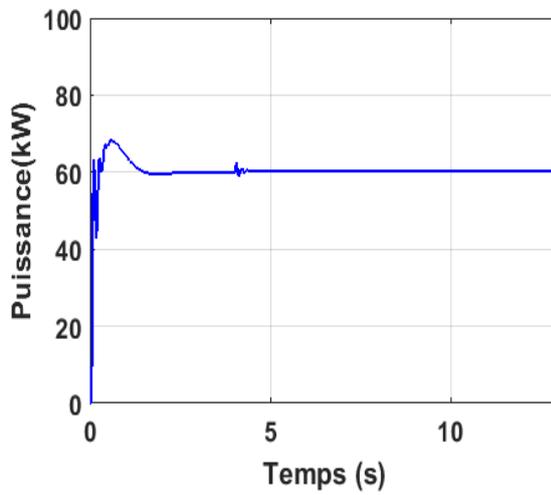


Figure IV.42 : Puissance du groupe diesel.

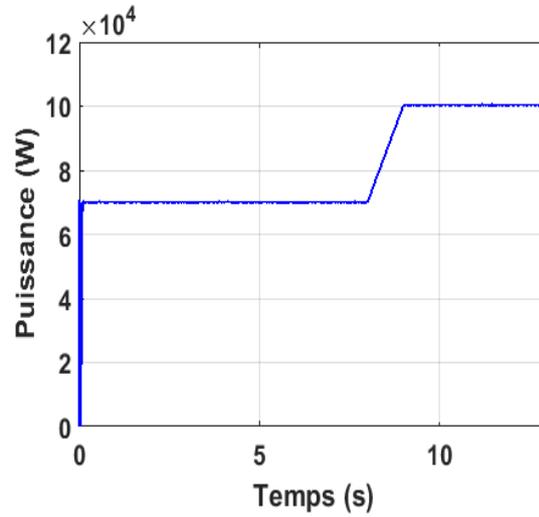


Figure IV.43 : Puissance générée par le PV.

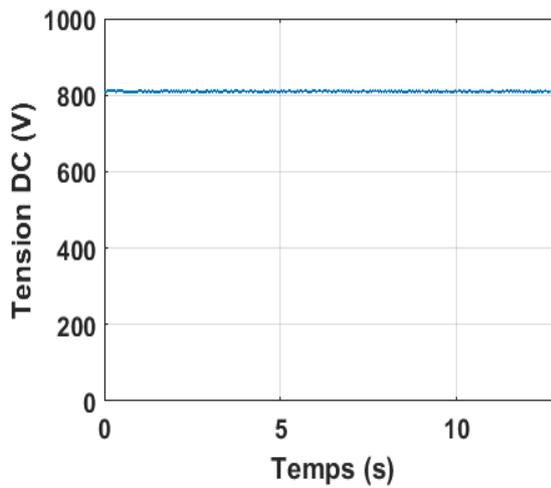


Figure IV.44 : Tension du bus DC.

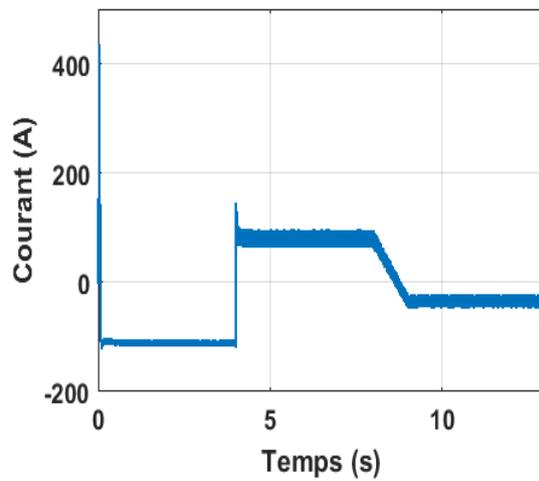


Figure IV.45 : Courant des batteries.

Interprétations des résultats :

On remarque que le générateur photovoltaïque fonctionne au point de puissance maximal (Figures IV.43, Figures IV.40).

La Figure IV.42 montre l'évolution de la puissance générée par le groupe diesel, on remarque que la puissance reste constante (60kW) malgré la variation de la charge et de l'irradiation, ceci à cause de la présence du stockage de sorte que si l'énergie générée par le photovoltaïque suffit pour que le groupe diesel fonctionne à son minimum de puissance (60kW), l'excès de cette puissance est utilisé pour charger les batteries (Figure IV.45, entre 0 et 4 s).

Si l'énergie générée par le photovoltaïque ne suffit pas pour que le groupe diesel fonctionne à son minimum de puissance, les batteries se déchargent (Figure IV.45, entre 4 et 8 s) pour assurer l'énergie manquante. Avec la puissance de groupe diesel la plus petites possible (60kW).

à l'instant $t=8s$ l'augmentation d'irradiation provoque l'augmentation de la puissance générée par le photovoltaïque, on remarque que les batteries passent de l'état de déchargement vers l'état de chargement.

IV.6. Conclusion :

Dans ce chapitre on a fait le raccordement de l'onduleur triphasée avec le groupe diesel pour obtenir un système hybride PV-diesel alimentant une charge variable dans différentes conditions atmosphériques avec un minimum de taux de distorsions harmonique.

D'abord, nous avons commencé par la modélisation de l'onduleur triphasé, le filtre LC et décrire la méthode MLI utilisée pour la commande de l'onduleur.

Ensuite, on a présenté la stratégie de commande du système hybride en définissant la méthode de synchronisation de l'onduleur avec le groupe diesel appeler (PLL), la modélisation du système onduleur filtre et le calcul des régulateurs utilisés pour la commande du système.

Enfin, nous avons simulé le système hybride sans et avec stockage dans différentes conditions atmosphériques et un profil de charge variable pour tester la robustesse de la commande ainsi que pour confirmer le bon fonctionnement de l'algorithme de gestion d'énergie.

Conclusion générale

Le but de cette thèse était l'étude d'un système hybride PV-diesel de génération d'énergie électrique avec et sans stockage pour l'alimentation des sites isolés, avec comme objectif de réduire les émissions des gaz à effets serre, et préserver les énergies d'origine fossile pour les générations futures.

Nous avons fait une modélisation de la chaîne photovoltaïque, et du groupe électrogène. Puis nous avons utilisé le logiciel HOMER afin de dimensionner un système hybride PV-diesel sans stockage alimentant un site isolé. Enfin nous nous sommes dirigés vers la commande et la gestion d'énergie du système hybride PV-diesel avec et sans stockage.

Dans le premier chapitre nous avons présenté la source de l'énergie solaire, le principe de la conversion photovoltaïque qui est basée sur l'effet photoélectrique, ainsi que le potentiel solaire de l'Algérie qui dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde.

Nous avons aussi modélisé la cellule photovoltaïque qui est l'élément de base des générateurs photovoltaïques. Ces cellules sont connectées entre elles en série pour augmenter la tension et en parallèle pour augmenter le courant afin d'améliorer la puissance totale générée. Ainsi nous avons étudié l'effet des conditions climatiques sur ces caractéristiques électriques. Nous avons remarqué que le courant de court-circuit est proportionnel à l'éclairement et la tension de circuit ouvert diminue quand la température augmente.

Nous avons utilisé un hacheur Boost comme un étage d'adaptation pour tirer le maximum de puissance du générateur à l'aide de l'algorithme P&O.

Le chapitre II s'est intéressé à la modélisation du groupe diesel qui est constitué d'un moteur thermique et d'une machine synchrone à rotor bobiné. Nous avons vu que le groupe diesel fournit à la charge, deux formes d'énergie : active et réactive. La puissance active est assurée en régulant la fréquence du réseau donc en maintenant la vitesse du moteur constante est cela par un gouverneur de vitesse qui fonctionne en ajustant le flux du carburant au moteur diesel. La puissance réactive est assurée par le réglage de la tension, en ajustant le courant d'excitation du générateur synchrone.

Le dimensionnement du système hybride a été développé dans le chapitre III, Nous avons exposé la classification des systèmes hybrides PV-diesel, qui dépend du régime de fonctionnement (connectés au réseau ou isolés), et du contenu du système (avec ou sans stockage), ainsi que les différentes configurations (série, commutée, parallèle). Nous avons présenté aussi les problèmes rencontrés dans le fonctionnement des systèmes hybrides PV-diesel (la gestion de l'énergie au sein du système, choix de la taille de chaque composant du système) et le logiciel HOMER pour bien dimensionner ces systèmes.

D'après les résultats obtenus avec le logiciel HOMER, nous avons remarqué que le système hybride permet d'économiser le carburant donc de diminuer l'émission de gaz à effet de serre. Aussi nous avons observé une diminution considérable du coût d'opération du système.

Dans le chapitre IV, nous avons présenté l'onduleur et la boucle à verrouillage de phase (PLL) pour l'étude de synchronisation afin de connecter l'onduleur photovoltaïque au groupe diesel. Nous avons aussi détaillé le principe de la commande du système hybride avec et sans stockage, ensuite nous avons développé un algorithme pour la gestion de l'énergie. Enfin nous nous sommes dirigés vers la simulation de ces systèmes.

La commande du système PV-diesel sans stockage se fait par le contrôle des tensions de sortie de l'onduleur dans le repère synchrone, dans le but de réguler la tension du bus continu pour suivre une référence donnée et réaliser un contrôle individuel de la puissance active et réactive en orientant l'axe d de ce repère sur la tension du groupe diesel en utilisant la PLL.

Pour le cas d'un système PV-diesel avec stockage le contrôle du bus continu s'effectue par la charge et la décharge de la batterie à travers un convertisseur Buck-Boost bidirectionnel.

Le principe de la régulation dans ce cas est le même que le système PV-diesel sans stockage. Cependant la référence du courant d'axe direct est générée par l'algorithme de gestion d'énergie du système global.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Ludmil Stoyanov, " Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables ". Thèse de doctorat, Université Technique de Sofia, 2011.
- [2] MECIKAR Faïçal, LOUKKAS Nassim, " Étude et Commande d'un Système Hybride Éolien-Photovoltaïque Connecté au Réseau". Projet de Fin d'Étude, École Nationale Polytechnique, Alger, 2013.
- [3] Brahim Abdallah BRAHIM, "ETUDE DES DIFFERENTES CONFIGURATIONS DES SYSTEMES D'ENERGIE HYBRIDES PV/DIESEL ET DE LEUR IMPACT SUR LE COUT DE PRODUCTION D'ELECTRICITE". Mémoire de Master, CENTRE COMMUN DE RECHERCHE Energie et Habitat Durable, 2012.
- [4] Daniel YAMEGUEU NGUEWO, "EXPERIMENTATION ET OPTIMISATION D'UN PROTOTYPE DE CENTRALE HYBRIDE SOLAIRE PV/DIESEL SANS BATTERIES DE STOCKAGE : VALIDATION DU CONCEPT « FLEXY ENERGY »". UNIVERSITE DE PERPIGNAN en Sciences pour l'Ingénieur, 2012.
- [5] A. Rennane et D. Saheb – Koussa. Evaluation des performances de la boucle à verrouillage de phase (PLL) pour l'interconnexion d'une source d'énergie renouvelable au réseau électrique. Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°2 (2014) 227 – 243.CDER.2014.
- [6] DERBAL Massinissa, DEBBAH Nabih, "Étude et Commande d'un Système Hybride Eolien Photovoltaïque Connecté au Réseau avec Stockage. Contribution à l'Amélioration de la Qualité de l'Énergie". Projet de Fin d'Étude, École Nationale Polytechnique, Alger, 2013.
- [7] BENZIADA Mohamed Abdelghani, OUAIL Mohamed, " Utilisation du convertisseur Z-source dans un système photovoltaïque". Projet de Fin d'Étude, École Nationale Polytechnique, Alger, 2015.
- [8] Le spectre solaire. [en ligne]. [Consulté le 4 mars 2017]. Disponible sur <<https://www.soleil.info/uv-meteo/soleil-terre-et-uv/le-spectre-solaire.html>>.
- [9] ATOUI Adil," MODÉLISATION ET COMMANDE D'UN SYSTEME HYBRIDE ÉOLIEN-PHOTOVOLTAÏQUE ALIMENTANT UN SITE ISOLÉ". MÉMOIRE DE MAGISTER, ENP, 2011.
- [10] Groupes Electrogènes : interview d'un spécialiste. [en ligne]. [consulté le 16 mai 2017].Disponible sur <<http://www.la-toile-electrique.com/groupes-electrogenes-interview-specialiste>>.
- [11] Potentiels des Energies renouvelables. [en ligne]. [Consulté le 22 mars 2017].]. Disponible sur< <http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?page=potentiels>>

- [12] Mahmood Ul Hassan, Muhammad Humayun, Rizwan Ullah, Baoquan Liu, Zhuo Fang. Control strategy of hybrid energy storage system in diesel generator based isolated AC micro-grids. Journal of Electrical Systems and Information Technology. University of Science and Technology of China. December 2016.
- [13] B. Flèche, D. Delagnes. ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE. Juin 07.
- [14] Cartes de l'irradiation globale et de l'ensoleillement en Algérie.[en ligne]. [consulté le 20 mars 2017]. Disponible sur < <http://portail.cder.dz/spip.php?rubrique66>>
- [15] Thi Minh Chau LE," Couplage Onduleurs Photovoltaïques et Réseau, aspects contrôle/commande et rejet de perturbations". Thèse de doctorat, UNIVERSITÉ DE GRENOBLE, 2006.
- [16] BISKER Asma, CHIRI Meriem. Commande d'un Système Photovoltaïque en mode Isolé et en mode Connecté au Réseau. ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE. Projet de fin d'études. Juin 2012
- [17] Bébé Magloire, NANA NEUWOUH. ANALYSE, MODELISATION ET SIMULATION DES SYSTEMES HYBRIDES PV/DIESEL. Thèse de MASTER. 26 Septembre 2011.
- [18] Hussein IBRAHIM, Adrian ILINCA, Jean PERRON. INVESTIGATIONS DES DIFFÉRENTES ALTERNATIVES RENOUVELABLES ET HYBRIDES POUR L'ÉLECTRIFICATION DES SITES ISOLÉS. Rapport interne. Université du Québec. Septembre 2008.
- [19] Yanan Liu, Lijun Tian, " Research on Low Voltage Ride through Technology of Grid-Connected Photovoltaic System". Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE), 2016 International Conference on, pp. 212-213, 2016.
- [20] Michel Suire. CIRCUIT d'HUILE MOTEUR. 08/03/15.
- [21] Tianfu Huang, Xinchun Shi, Yuwei Sun, Dan Wang, " Three-phase Photovoltaic Grid-connected Inverter Based on Feedforward Decoupling Control". International Conference on Materials for Renewable Energy and Environment (ICMREE), pp. 476-480, 2013.
- [22] IEEE Power Engineering Society. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. IEEE Std 421.5-2005 (Revision of IEEE Std 421.5-1992).
- [23] Miloud REZKALLAH. AMÉLIORATION DE LA QUALITÉ D'ÉNERGIE FOURNIE AU RÉSEAU AUTONOME HYBRIDE ÉOLIEN- DIESEL. UNIVERSITÉ DU QUÉBEC. MONTRÉAL, LE 3 MAI 2010

- [24] M. ZEGGAOUI Said, " Stockage de l'énergie solaire". These master, École Nationale Polytechnique, Alger, 2013.
- [25] Philippe Lerat. Les machines agricoles : Conduite et entretien. Lavoisier, Paris.2015.
- [26] Svein Erik Evju," Fundamentals of Grid Connected Photo-Voltaic Power Electronic Converter Design". These master, Norwegian University of Science and Technology, 2007.
- [27] Rachid Errouissi, " Design and Implementation of a Nonlinear PI Predictive Controller for a Grid-Tied Photovoltaic Inverter". IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, vol. 64, pp. 1241-1250, 2016.
- [28] Ahmed Belila , Bekheira Tabbache. A Control Strategy Of Hybrid System“DieselPhotovoltaic-Battery For Stand-alone Applications. 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC) - 2015
- [29] Souleymane NDOYE, Ibrahima LY, Fabé Idrissa BARRO, Ould Habiboulahi LEMRABOTT, Grégoire SISSOKO. MODELISATION ET SIMULATION SOUS MATLAB/SIMULINK DE LA CHAINE D'ALIMENTATION D'UNE STATION RELAIS DE TELECOMMUNICATIONS EN ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE DANS UNE ZONE ISOLEE DU RESEAU ELECTRIQUE. J. Sci.Vol. 9, N° 2 (2009) 45 – 55 Sénégal.2009.
- [30] Touil Nacer Eddine, Touil Nacer Eddine. Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque. Mémoire de Fin d'Étude. Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued algerie. Septembre 2015.
- [31] HELALI Kamelia.Modélisation d'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative. Mémoire de MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE.
- [32] DJENANE Mohamed Salim. KACIMI EL HASSANI Mohamed Abderrezak. Etude et Commande d'un Onduleur triphasé à Structure Z-Source dans une chaîne photovoltaïque en mode isolé. Projet de fin d'études. Ecole Nationale Polytechnique. Juin 2016.
- [33] ACHOUR Mohamed Tahar, "ÉTUDE ET COMMANDE D'UN ONDULEUR TRIPHASÉ À STRUCTURE Z-SOURCE : APPLICATION AUX SYSTÈMES MULTI-SOURCES". These de Magistère, ÉCOLE MILITAIRE POLYTECHNIQUE. 2015.
- [34] M. SLAMA Fateh. Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique. Mémoire de Magister. UNIVERSITE FERHAT ABBAS SETIF. 2011.
- [35] Elsy MANSOUR. Modélisation des panneaux photovoltaïques sur compact rio. Projet de Fin d'Etudes. Université Libanaise. 2012.

[36] RAIS Younes. Modélisation du rendement du convertisseur DC/AC dans un système photovoltaïque. Mémoire de Magister. Ecole Nationale Polytechnique. 2012.

[37] Yann Pankow. Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension : Application au générateur photovoltaïque. Thèse de doctorat. Ecole Nationale supérieure d'Arts et de Métiers. Lille décembre 2014.

[38] Alain Ricaud. Modules et systèmes photovoltaïques. Sept 2008.

[39] "Risques et précautions liés au matériel Moteur thermiques moteur diesel". ENSPM Formation industrie. 2006

[40] Jim Ögren. PLL design for inverter grid connection: Simulations for ideal and non-ideal grid conditions. juin 2011.

[41] FEDDAOUI Omar. Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération : Application aux Energies Renouvelables. Mémoire de Magister. Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras. 2014.

[42] SANET Arezki, " Etude et commande d'un convertisseur Z-source application au système photovoltaïque". Thèse de master, École Nationale Polytechnique, Alger.

[43] L. Zaghba, M. Khennane, A. Borni, A. Bouchakour, A. Fezzani, I. Hadj Mahamed, S. H. Oudjana, N. Terki " Robust Tracking with Fuzzy Sliding Mod Control Strategy for Grid Connected Photovoltaic System". Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2015 3rd International, 2015.

[44] Ionel VECHIU. MODELISATION ET ANALYSE DE L'INTEGRATION DES ENERGIES RENOUVELABLES DANS UN RESEAU AUTONOME. Thèse de doctorat. Université du Havre. Décembre 2005.

[45] Les caractéristiques électriques des cellules et modules. [en ligne]. [consulté le 01 juin 2017].]. Disponible sur < <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16696> >

ANNEXE

1.1. Caractéristiques de la cellule photovoltaïque :

Caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m²).

Paramètre électrique		Valeur	Unité
Puissance maximale	P _{max}	1.48	W
Tension à P _{max}	V _{mp}	0.484	V
Tension de circuit ouvert	V _{oc}	0.6	V
Courant à P _{max}	I _{mp}	3.02	A
Courant de court-circuit	I _{sc}	3.3	A

Tableau 1 : Paramètres de la cellule photovoltaïque.

1.2. Caractéristiques de GPV :

Caractéristiques électriques de GPV dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m²).

Paramètre électrique		Valeur	Unité
Puissance maximale	P _{max}	2484.3	W
Tension à P _{max}	V _{mp}	191.1	V
Tension de circuit ouvert	V _{oc}	231	V
Courant à P _{max}	I _{mp}	13	A
Courant de court-circuit	I _{sc}	14	A

Tableau 2 : Paramètres du générateur photovoltaïque.

1.3. Dimensionnement de convertisseur DC/DC :

De l'équation (I. 8) a (I. 16), on tire les équations d'ondulation des courant dans les inductances et de tension dans les capacités pour dimensionner le système (9).

$$L_{pv} = \frac{\alpha V_{pv}}{f \Delta I_l}$$

$$C_{pv} = \frac{I_o \alpha (1-\alpha)}{f V_{pv} \Delta I_l}$$

$$C_{dc} = \frac{\alpha V_{pv}}{f R \Delta V_{dc} (1-\alpha)}$$

Avec : $\Delta I_l = 5\%$, $\Delta V_{pv} = 10\%$, $\Delta V_{dc} = 5\%$, $f=5\text{KHz}$

Paramètres du convertisseur Boost :

Paramètre électrique		Valeur	Unité
Capacité d'entrée	C_{pv}	10^{-3}	F
Inductance	L	10^{-3}	H
Capacité de sortie	C_{dc}	10^{-3}	F
Fréquence	f	5	KHz
Charge résistif	R	100	Ω

Tableau 3 : Paramètres de convertisseur DC/DC

2.1. Paramètres de la machine synchrone :

$X_d=1.56$	$X_q=1.06$	$P_n=200kW$
$X_d'=0.296$	$X_q'=0.177$	$V_n=220/380$
$X_d''=0.177$	$X_q''=0.052$	$f_n=50$

Tableau 4 : Paramètres de la machine synchrone.

X_d, X_q : Réactance synchrones d'axe d et q, respectivement en (pu).

X_d', X_q' : Réactance transitoire d'axe d et q, respectivement en (pu).

X_d'', X_q'' : Réactance sous-transitoires d'axe d et q respectivement en (pu).

2.2. Paramètres du régulateur de vitesse :

$T_1 = 0.01$	$T_4 = 0.25$	$T_d = 0.024$
$T_2 = 0.02$	$T_5 = 0.009$	$T_{min} = 0$
$T_3 = 0.2$	$T_6 = 0.0384$	$T_{max} = 1.1$

Tableau 5 : Paramètres du régulateur de vitesse.

T_1, T_2, T_3 : constante de temps du régulateur de vitesse en (s).

T_1, T_2, T_3 : constante de temps de l'actionneur en (s).

T_{min}, T_{max} : couple minimum et maximum respectivement en (pu).

2.3. Paramètres du régulateur de tension :

$T_f=0.02$	$T_a=0.02$	$T_e=0$	$T_c=0$
$T_f=0.1$	$K_a=200$	$K_e=1$	$T_b=0$
$K_f=0.001$	$E_{fmin}=0$	$E_{fmax}=6$	$K_p=0$

Tableau 6 : Paramètres du régulateur de tension.

T_r : constante de temps de filtre passe bas en (s).

K_a, T_a : le gain et la constante de temps en (s) du régulateur respectivement.

K_e, T_e : le gain et la constante de temps en (s) de l'excitatrice.

T_b, T_c : constante de temps d'avance de retard respectivement.

K_f, T_f : le gain et la constante de temps en (s) du filtre respectivement.

$E_{fmax} E_{fmin}$: limite maximale et minimale de la sortie du régulateur en (pu).

$V_{t0}=1.1$ pu, représente la tension de sortie initiale.

3.1. Paramètres du filtre LC :

R(Ω)	0.01
L(H)	0.005
C(F)	0.002

Tableau 7 : Paramètres du filtre LC.

3.2. Paramètres du convertisseur DC/DC utilisés dans le système hybride :

Paramètre électrique		Valeur	Unité
Capacité d'entrée	C_{pv}	10^{-4}	F
Inductance	L	5.10^{-3}	H
Capacité de sortie	C_{dc}	2.10^{-3}	F
Fréquence	Imp	5	KHz

Tableau 8 : Paramètres de convertisseur DC/DC

3.3. Paramètres du GPV utilisés dans le système hybride :

Caractéristiques électriques du GPV dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m²).

Paramètre électrique		Valeur	Unité
Puissance maximale	Pmax	100	kW
Tension à Pmax	Vmp	273	V
Tension de circuit ouvert	Voc	320	V
Courant à Pmax	Imp	363	A
Courant de court-circuit	Isc	393	A

Tableau 9 : Paramètres du générateur photovoltaïque.

Les puissances maximales pour les différentes irradiations utilisées dans la simulation :

Irradiation [W/m ²]	Puissance maximale (Pmax) [kW]
500	50
700	70
1000	100

Tableau 10 : Les puissances maximales pour les différentes irradiations utilisée dans la simulation.

3.4. Paramètres de régulation :

3.4.1 le critère du contrôle optimum :

Le critère de contrôle optimum peut être utilisés pour des processus contenant plusieurs petites constantes de temps est 1 ou 2 grandes constantes de temps.

Les petites constantes de temps sont ajoutées ensemble et considérées comme une seule constante de temps équivalente T_{eq} .

Dans notre cas le système contient une grande constant de temps T et plusieurs petites sous la forme suivant :

$$H_{BO}(S) = K_p \frac{1 + sT_i}{sT_i} \frac{K_s}{1 + sT} \frac{1}{1 + sT_1} * \frac{1}{1 + sT_2}$$

On prend :

$$T_i = T, T_{eq} = T_1 + T_2 + \dots$$

Le système devient :

$$H_{BO}(s) = K_p \frac{K_s}{sT_i} \frac{1}{1 + sT_{eq}}$$

$$H_{BF}(s) = \frac{H_{BO}(s)}{1 + H_{BO}(s)} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2}$$

On prend :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_i = T \\ K_p = T \frac{1}{2K_s T_{eq}} \end{array} \right.$$

3.4.2 le critère d'optimum symétrique :

Si le système à contrôler contiens un intégrateur, le critère d'optimum ne peut pas être utilisés.

Une autre méthode est utilisée qui s'appelle méthode d'optimum symétrique.

Dans notre cas le système contient un intégrateur, une grande constant de temps T et plusieurs petites sous la forme suivant :

$$H_{BO}(s) = K_p \frac{1 + sT_i}{sT_i} \frac{K_s}{sT_s} \frac{1}{1 + sT} \frac{1}{1 + sT_1} * \frac{1}{1 + sT_2} \dots$$

On prend :

$$T_{eq} = T_1 + T_2 + \dots$$

$$H_{BF}(s) = \frac{H_{BO}(s)}{1 + H_{BO}(s)} = K_p K_s \frac{(1 + sT)}{K_p K_s + sK_p K_s T_i + s^2 T T_s + s^3 T T_s T_{eq}}$$

En appliquant le critère :

$$\begin{cases} T_i = 4T_{eq} \\ K_p = T_s \frac{1}{2K_s T_{eq}} \end{cases}$$

D'où :

K_p	0.49
K_i	26

Tableau 11 : Paramètres du régulateur de bus DC.

K_p	4.5
K_i	120

Tableau 12 : Paramètres du régulateur du courant d'axe d et q.

3.5 Dimensionnement de convertisseur DC/DC réversible en courant :

L'équation d'ondulation du courant dans l'inductance : :

$$\Delta i_{lbat} = \frac{V_c}{f4L_{bat}}$$

On prend : $\Delta i_{lbat} = 10\%$

On trouve :

$$L_{bat} = 5.10^{-3} \text{ H}$$