الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique et de l'Informatique



Projet de Fin d'Etudes

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master enGénie Électrique

Spécialité : *Automatique des systèmes*

THEME

Etude d'un système intelligent pour gérer une installation électrique hybride.

Proposé et dirigé par,

Dr. HENINI NOUREDDINE

Préparé et présenté par,

M.RAMDANE OMARI

M. HOCINE SENOUSSAOUI

REMERCEMENT

Je remercie en premier lieu Dieu qui m'a donné ce bien là et pour que je vie ce jour et la force et la patience pour terminer ce travail.

Je tiens à exprimer mes remerciements à mon encadreur Prof. N.HENINI qui a proposé et a dirigé ce travail.

Je remercie monsieur le président de jury, ainsi que les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Je tiens à remercier les responsables et tout le personnel du département de Génie Electrique d'UNIV_MEDEA pour les facilités qu'ils m'ont accordés pour terminer ce travail.

Le travail de mémoire que j'ai effectué doit beaucoup à certaines personnes que je tiens à les remercier sincèrement.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation et à l'élaboration de ce modeste mémoire

Résumé.

ملخص

هذا العمل يقوم بدراسة نضام هجين للطاقة (الفوتوضوئية_الديزل) مربوطة ببطارية للتخزين والتسيير المنظم و يستمل لذالك تعقب نقطة الاستطاعة العظمى لمنبعي الطاقة قمنا بنمذجة أنظمة للحصول على طاقة عظمى

Résumé

Ce travail porte sur l'étude d'un système hybride d'énergie (photovoltaïque-diesel), avec batterie de stockage et gestion, suivi par le point de puissance maximum (MPPT) pour les deux sources d'énergie. Nous avons fait un architecteur qui couplé les systèmes pour adapter le maximum de puissance

Abstract

This work focuses on the study of a hybrid energy system (photovoltaic - diesel), with battery storage and management, followed by the maximum power point tracking (MPPT) for the two energy sources. We made a architecteur coupled systems that adapt to the maximum power

Liste des symboles

C : Vitesse de la lumière (3.10_8 m/s)

I : Courant délivré par la cellule photovoltaïque

V : Tension délivrée par la cellule photovoltaïque

V_G : Tension du générateur photovoltaïque

I_G : Courant du générateur photovoltaïque

I_{ph} : Courant photo généré

I_s : Courant de saturation de la diode dépendant de la température

I_{s1} : Courant de saturation de la première diode

I_{s1} : Courant de saturation de la deuxième diode

I_d : Courant de diode

I_{d1} : Courant traversant la première diode de la cellule photovoltaïque

I_{d2} : Courant traversant la deuxième diode de la cellule photovoltaïque

I_{d1G} : Courant traversant les premières diodes du générateur photovoltaïque

I_{d1G} : Courant traversant les deuxièmes diodes du générateur photovoltaïque

I_{RSh} : Courant dérivé par la résistance shunt de la cellule photovoltaïque

$I_{RSh,G}$: Courant dérivé par la résistance shunt du générateur photovoltaïque

R_s : Résistance série de la cellule photovoltaïque

R_{sh} : Résistance shunt de la cellule photovoltaïque

R_{sG} : Résistance série du générateur photovoltaïque

R_{shG} : Résistance shunt du générateur photovoltaïque

R_{sh0} : résistance parallèle de référence donnée par le constructeur

q : Charge de l'électron =$1.602.10^{-19}$ C

K : Constante de Boltzmann =$1.381.10^{-23}$ J/K

T : Température de la cellule en Kelvin (K)

V_{co} : Tension de circuit ouvert

I_{co} : Courant de circuit ouvert

I_{cc} : Courant de court circuit

V_{cc} : Tension de court circuit

Eg : Energie de gap du semi conducteur

IBB : courant de la batterie (A)

IGAZ : courant de gazage de la batterie (A)

QMAXC : Capacité maximale de charge (Ah)

R0D : Résistance interne de déchargement (Ω)

QMAXD : Capacité maximale de décharge (Ah)

α : Rapport cyclique du hacheur

V_{ref} : Tension de référence

PV : Photovoltaïque.

n_s : Nombre de cellules en séries

n_p : Nombre de cellules en parallèles

n_1 : Facteur d'idéalité de la première diode

n_2 : Facteur d'idéalité de la deuxième diode

Liste des acronymes

SEH: systèmes hybrides d'énergie

GP: générateur photovoltaïque

PV: panneaux photovoltaïque

GD: générateur diesel

MPPT: The maximum power point tracker

P et O: perturbation et observation

SOMMAIRE

Introduction général……...01

CHAPITRE I

Etat de l'art d'un système hybride d'énergie électrique

I .1 Introduction…….…...03

I .2 l'origine de la notion du système…….....…….03

I.3 Définition et mission……...……..03

I.4 Importance de l'hybridation ……...…….04

I.5 Etat de l'art……..05

I.6 principaux composants des SHE……...……..08

I.6.1 Composants principaux…….……..08

I.6.2.Générateurs photovoltaïques…….…….08

I.6.3. Générateur diesel……...……..09

I.6.4. Composants auxiliaires……..….10

I.6.4.1. Système de supervision……...…….10

I.6.4.2. Convertisseurs…….…….11

I.6.4.3. Charges……..12

I.7 Architectures des systèmes hybrides d'énergie (SHE)……... …….12

I.7.1 Architecture à bus à CC…….……..12

I.7.2 Architecture mixte à bus à CC/CA ……...……...13

I.8 Dimensionnement des systèmes hybrides d'énergie (SHE)……... …….14

I.9 commande des SHE ……...……..16

I.9.1 Stratégie de fonctionnement……...……..16

I.9.1.1 Gestion du stockage…….……..17

I.9.1.2.Gestion des charges…….……..17

I.9.1.3. Réserve tournante……..……..18

I.9.1.4 Temps de fonctionnement minimal…….19

I.9.1.5 Hystérésis……..…….19

I.9.2 Qualité de l'énergie électrique produite par les SHE……..…….19

I.10. Conclusion……...……..20

CHAPITRE II
Modélisation du générateur photovoltaïque et stockage d'énergie

II.1. Introduction ..... …….21

II.2. Cellules photovoltaïques ..... ……21

II.2.1. Structure d'une cellule photovoltaïque ..... ……21

II.2.2. Principe de fonctionnement ..... ……22

II.3. Regroupement des cellules ..... ……23

II.3.1. Regroupement en série (modules…….23

II.3.2. Regroupement des modules en série ou en parallèle (Les champ)…….. …….23

II.4. Modélisation d'une cellule photovoltaïque…….....…….25

II.4.1. Modélisation d'une cellule photovoltaïque à une seule diode……..……..25

II.4.1.1. Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque à une diode……..26

II.4.1.2. Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque à une diode……..26

II.4.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque à deux diodes……..27

II.4.2.2. Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque à deux diodes……...27

II.5. Modélisation d'un générateur (champ) photovoltaïque (GPV)……28

II.5.1. Modélisation d'un générateur (champ) photovoltaïque à une seule diode…….....28

II.5.1.1. Modèle électrique d'un champ photovoltaïque à une diode……28

II.5.1.2. Paramètres externes…….....28

II.5.2. Modèle électrique d'un générateur (champ) photovoltaïque à deux diodes (GPV)…….29

II.5.2.1. Modèle mathématique d'un champ photovoltaïque à deux diodes ……29

II.6. Résultat de la simulation de GPV à une seule diode 30

II.6.1. Influence de l'éclairement 31

II.6.2. Influence de la température 31

II.6.3.Influence du branchement série parallèle sur les caractéristiques I(V) et P(V)……. ..32

II.7. Modélisation des accumulateurs électrochimiques 32

II.7.1. Description du modèle 34

II.7.1.1. Modèle de la capacité…….……..34

II.7.1.2. Modèle de l'état de charge (ou SOC)…….....35

II.7.1.3. Modèle de la tension…….....35

II.7.2. Résultat de la simulation 36

II.8. Conclusion 39

CHAPITRE III

Système de conversion statique DC-DC avec sa commande

III.1. Introduction.....40

III.2. Electronique de puissance.....40

III.2.1. Convertisseurs électriques.....40

III.3. Les Hacheurs.....40

III.3.1. Exigences de l'utilisateur.....41

III.3.2. Type des hacheurs 41

III.3.2.1. Hacheur Buck ..... …….42

III.3.2.2. Hacheur boost..... ……44

III.3.2.3. Hacheur Buck-Boost..... …...47

III.4. Commander MPPT.....51

III.5. Les méthodes de poursuite de MPP.....52

III.5.1. Méthodes a contre réaction de tension.....52

III.5.2. Méthodes a contre réaction de courant.....52

III.5.3. Méthodes a contre réaction de puissance.....52

III.5.3.1. Algorithme perturbation et observation.....52

III.9. Conclusion..... 54

CHAPITRE IV

Resultants de simulation et interpretations

IV.1.Introduction……..55

IV.2.Gestionnaire intelligent ……...……55

VI.3. Régulateur……...…….55

VI.4. Cadran de visualisation à distance……...……..55

VI.5 .Les batteries de stockage……56

IV.6 .Résultat de simulation…….57

IV.7. Conclusion……59

Conclusion générale……...60

LISTES DES FIGURES

Figure I 1 : Architecture des systèmes hybrides d'énergie (SHE)……..05

Figure I.2.Modules photovoltaïques sur support……09
Figure I.3. Configuration du générateur diesel……...10
Figure I.4 : système de supervision……..11
Figure I.5 : configuration du SHE à bus à CC…….13

Figure I.6 : configuration du SHE à deux bus à CC et à CA……..14

Figure I.7 : diagramme des priorités des charges……...18

Figure I.8 : classification des perturbations du point de vue qualité de l'énergie électrique…….19

Figure II.1: Structure d'une cellule photovoltaïque au silicium (jonction P-N).....…..22
Figure II.2: Diagramme de bandes d'énergie au voisinage de la jonction P-N……..23
Figure II.3 : Cellule, module et panneaux photovoltaïque…….24
Figure II.4 : Champ photovoltaïque……25
Figure II.5: Schéma équivalent d'un cellule photovoltaïque à une diode……..26
Figure II.6. Schéma électrique équivalent du modèle à deux exponentielles de la cellule solaire…….27
Figure II-7: Schéma électrique équivalent d'un groupe de panneaux, modèle 1diode……..28
Figure II.8: Schéma électrique équivalent d'un générateur photovoltaïque……...29
Figure II.9 : Caractéristiques obtenues pour les conditions standards d'éclairement 1000 W/m² et de température 25 °C……...30
Figure II.10 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I(V) et P(V)……..31
Figure. II.11 : Influence de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V)……31
Figure. II.12 : Influence du branchement série parallèle sur les caractéristiques I(V) et P(V). ……32
Figure. II.13: Modèle équivalent d'une batterie plomb-acide……33
Figure II.14: Schéma de bloc d'une batterie……...34

Figure. II.15: Comportement de la batterie lors de la charge…….37

Figure. II.16: Comportement de la batterie lors de la décharge…….38
Figure.III. 1: Symbole d'un convertisseur DC-DC…….41

Figure.III. 2: Schéma électrique d'un hacheur buck……...42

Figure.III. 3 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck……..43

Figure.III. 4 : Schéma électrique d'un hacheur buck fermé……43

Figure.III. 5: Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert……44

Figure.III. 6: Schéma électrique d'un hacheur boost……..45

Figure.III. 7: Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost……..46

Figure.III. 8: Schéma électrique d'un hacheur boost fermé……46

Figure.III. 9: Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert……...47

Figure.III.10: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost……...48

Figure.III.11: Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck-boost……49

Figure.III.12: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost fermé……49

Figure.III. 13: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost ouvert……...50

Figure.III. 14: Schéma de simulation d'un hacheur buck- boost……51

Figure III.15. Rapport de conversion M(D) en fonction du rapport cyclique D pour un hacheur buck-boost……51

Figure.III. 16: Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O)…….53

Figure.III.17: Schéma de simulation de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P et O) ……53

Figure .IV.1 schéma de la gestion de la chaine hybride……..56

Figure IV.2 : puissance générer par la charge……57

Figure IV.3 : puissance de générateur photovoltaïque……...57

Figure IV.4 : puissance générer par la batterie……...58

Figure IV.5 : puissance fournie par photovoltaïque +batterie……58

Figure IV.6 : puissance fournie par le photovoltaïque……58

Figure IV.7 : Puissance fournie par le générateur diesel……59

Figure IV.8 : puissance fournie par l'installation……...59

LISTE DES Tableau

Tab1 : classification des SHE par gamme de puissance…….06

Tab. 2 : classification des systèmes éolien-diesel basée sur le taux de pénétration de l'énergie éolienne ……07

Introduction générale

Face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causés par l'émission des gaz à effet de serre, lors de l'exploitation de ces ressources, des ressources énergétiques alternative sont été développées et doivent continuer à l'être.

Le développement et l'exploitation des ressources énergétiques renouvelables et des systèmes de production décentralisés d'électricité d'origine renouvelable ont connu une forte croissance ces dernières années, d'ici une vingtaine d'années, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Il est intéressant de les exploiter sur le lieu de consommation, en les transformant directement soit en chaleur, soit en électricité selon les besoins. Cette production par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant le caractère aléatoire de ces sources nous impose d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux, Les techniques d'extraction de la puissance de ces ressources demandent des recherches et des développements plus approfondis visant à fiabiliser, baisser les coûts (de fabrication, d'usage et de recyclage) et augmenter l'efficacité énergétique.

La production d'électricité au moyen d'un système hybride combinant plusieurs sources d'énergies renouvelables est d'un grand intérêt pour les paysen développement, comme les pays de Maghreb, Ces pays possèdentde nombreuses régions, isolées et éloignées des réseaux classiques de distribution d'électricité, Ainsi, l'extension de ces réseaux serait d'un coût financier exorbitant. Pour résoudre ce problème, l'exploitation du potentiel en énergies renouvelables dont dispose ces pays doit être une priorité.

Le travail qui a été défini pour cette étude concerne uneapplication stationnaire de petite taille, isolée du réseau, alimentée par un système hybride autonome, L'objectif assigné est d'étudier les performances d'un système hybride et d'évaluer les potentialités d'une installation de conversion d'énergies utilisantdes sources renouvelables, un groupe électrogène comme générateur de secours et leurs hybridations avec des batteries etautres composant système, Par ailleurs, il fait état des récents développements concernant les systèmes de conversion de l'énergie renouvelables et les composants qui y sont associés. Ce

travail présente aussi une modélisation et simulation d'un système de conversion hybride, Dans ce contexte, cette étude constitue une contribution pour une meilleure intégration des sources d'énergie renouvelable dans un système d'énergie hybride SEH.

Afin d'accomplir au mieux cette étude, le présent mémoire est structuré en quatre principaux chapitres en plus de l'introduction générale et de la conclusion générale [73]. Dans le premier chapitre, une recherche bibliographique sur les systèmes hybrides de génération d'énergie renouvelable a été faite, Nous nous intéressons à l'état de l'art, en particulier relatif aux sources d'énergie qui composent ces systèmes habituellement. Nous décrivons les différentes solutions technologiques permettant d'exploiter les différentes sources d'énergies renouvelables existantes en réseau électrique.

Le deuxième chapitre concerne une présentation la modélisation et la commande des équipements d'électronique de puissance utilisés dans les systèmes photovoltaïques avec stockage, les différentes méthodes de recherche du point de puissance maximale

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation et la commande des différents convertisseurs de la chaîne hybride photovoltaïque – diesel. Plusieurs stratégies de commande MPPT utilisant une porteuses bipolaires sont élaborées, les performances de ces stratégies sont analysées sur la base de la caractéristique de réglage et du taux d'harmonique.

Par ailleurs, l'analyse et la modélisation du fonctionnement électrique du convertisseur

DC/DC abaisseur-élévateur (Buck_boost) sont abordées.

Le dernier chapitre est consacré à l'optimisation et la gestion de la chaîne hybride, Pour ce faire le résultat de simulation et l'interprétation.

I .1 Introduction

Le terme « Système d'Energie Hybride » fait allusion aux systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types de sources, La combinaison des sources d'énergie renouvelable comme l'éolienne, le photovoltaïque ou les petites centrales hydroélectriques peut constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes diesels, Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées mais la présence du générateur diesel dans ce type de système hybride autonome suscite certaines discussions quant aux notions de « propreté » et de durabilité [1] et [2].

I .2 l'origine de la notion du système.

Un système est un ensemble d'objets organisés en fonction d'un but et immergé dans un environnement.

Le système est un outil conceptuel, L'ensemble doit former une identité ou une unité cohérente et autonome, Les objets ou éléments peuvent être réels ou conceptuels, La notion d'organisation implique des relations, interrelations, interactions dynamiques entre les objets [42].

I.3 Définition et mission

Un système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale se distingue de deux façons :

Il combine et exploite plusieurs source et technologies de production disponibles et facilement mobilisables [4], [5].

Sa complexité spécifique au niveau de la gestion des apports est à bien des égards identique à celle d'un réseau électrique traditionnel [5].

Actuellement, les systèmes hybrides d'énergie (SHE) associent au moins deux technologies complémentaires : une on plusieurs sources d'énergie classique, généralement des générateurs diesels, et au moins une source d'énergie renouvelable [6], [7], [8]. Les sources d'énergie renouvelable, comme l'éolienne et photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance constante. Leurs association avec des sources classique permet l'obtenir une d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans des régions isolées.

Un système hybride doit notamment :

Assures, et tout tems, l'énergie suffisante demandée par la charge et, si possible, de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable, tout en maintenant une qualité déterminée d'énergie fournie [6], [5],

Obéir à des règles d'exploitation tems réel basées sur une priorisation économique des ressources énergétique disponibles,Compter sur une gestion automatisée des composants du système afin de garantir la stabilité du système au tout temps, y inclus Dans les transitions entre les déférents modes d'opération du système (ex : dans un système éolien-diesel, trois modes d'alimentation du réseau local existent selon la qualité du vent :

Éolien seul, diesel seul et éolien-diesel).

De plus, l'économie de Carburant et la baisse de prix obtenus par la génération hybride doivent au moins couvrir l'investissement fait pour les générateurs d'énergie renouvelable et les autres composants auxiliaires du système.

Du pion de vue technologique, la fiabilité n'est pas seulement une question de respect des normes pour l'alimentation en électricité, mais aussi de maintenant, compte tenu des conditions particulières des régions isolées. Les systèmes isolés sont souvent caractérisés par une infrastructure (communication, services, etc.) pauvre, un accès difficile et un manque de personnel qualifié [9].

Les performances d'un SHE, le rendement et la durée de la vie, sont influencées en partie par sa conception, c'est-à-dire le dimensionnement des composants, le type de composants, architecture etc., et d'autre par, par le choix de la stratégie de fonctionnement. Quelques paramètres permettant d'évaluer ses performances sont : l'économie de carburant, le cout du KW, le nombre et la durée des pannes, le nombre d'arrêts pour l'entretien, etc.

La durée de vue des composants d'un SHE peut être beaucoup plus courte que la durée de vie normale des composants individuels (fonctionnement en connexion aux réseaux interconnectés) [6]. Les points les plus critiques sont en général la dégradation des batteries, l'endommagement des démarreurs diesel et du système mécanique de freinage des éoliennes et la carbonisation excessive des cylindres du moteur diesel.

I.4 Importance de l'hybridation

La combinaison de plusieurs sources d'énergies sur tout les renouvelables permet l'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technologique qu'économique. Les solutions technologiques nouvelles proposées par les générateurs hybrides, même si elles sont très complexes comparativement aux solutions courante mono sources, présentent par contre un intérêt évident considérable par leur flexibilité incomparables, leur souple de fonctionnement et leur prix de revient vraiment attractif.

De plus, l'hybridation permet de :

*lisser la puissance délivrée par la source d'énergie par exemple, l'absorption des pies aléatoires de puissances positives ou négatives générés par la charge (phases d'accélération ou de freinage de véhicules électrique ….). Autrement dit, il s'agit ici d'être capable, d'une manière puissance moyenne du générateur électrique ou récupérer de l'énergie pour recharger la source de puissance.

* palier pendant une durée limitée une indisponibilité partielle ou total de la d'énergie. Par exemple, pendant le démarrage d'une pile à combustible, on lorsque le soleil est masque par des nuages devant le générateur photovoltaïque ou en l'absence de vent.

Cependant, ces solutions exigent un dimensionnement laborieux préalable basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation à l'amont, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval et un savoir faire dans l'ingénierie que seule l'expérience dans l'ingénierie des système énergétique pourvu assurer. Cette gestion rigoureuse de l'énergie s'appuie sur l'intelligence des dispositifs de régulation et de contrôle rendu possible grâce à des logiciels très puissance.

I.5 Etat de l'art

En plus d'un on plusieurs générateurs diesels (GD) et d'un moins une source d'énergie renouvelable, un SHE peut aussi incorporer un système de distribution à courant alternatif (CA), un système de distribution à courant continu (CC), un système de stockage, des convertisseurs, des charge, des charge de délestage et une option de gestion des charges ou système de supervision.

Toutes ces composantes peuvent être connectées en différentes architectures. Celles-ci sont résumées dans la figure1.

Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides classiques contiennent deux bus [7] : un bus à CC pour les sources, les charges à CC et les batteries et un bus à CA pour les générateurs à CA et le système de distribution.

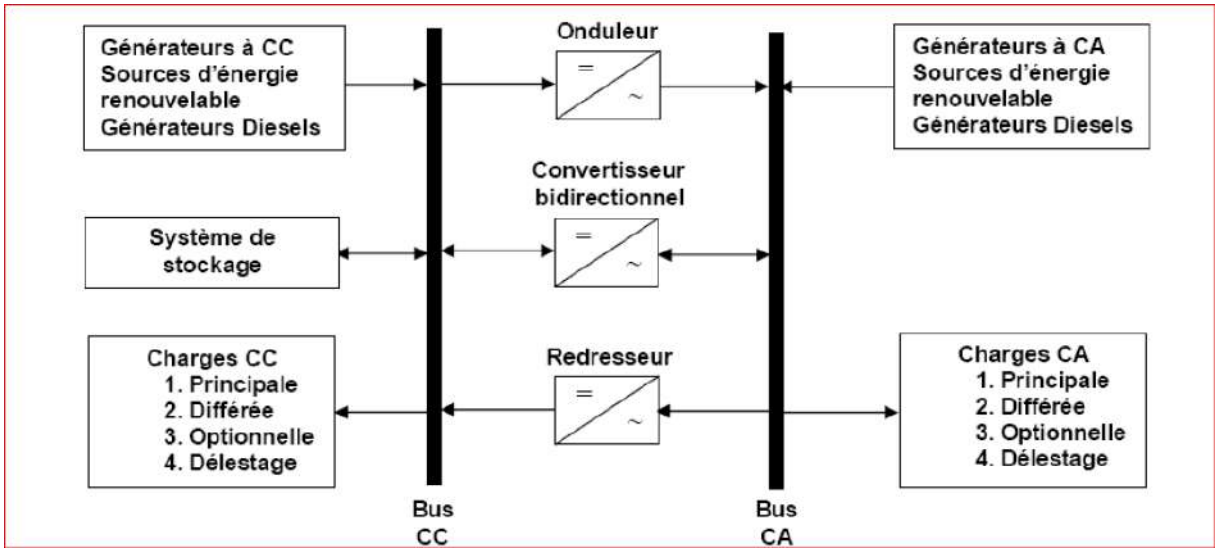


Figure I.1 : Architecture des systèmes hybrides d'énergie (SHE) [9]

Les sources d'énergie renouvelables peuvent être connectées au bus à CA ou à CC en fonction de la dimension et la configuration du système. L'interconnexion entre les deux bus peut être réalisée par l'intermède de l'électronique de puissance : onduleurs/ redresseurs ou convertisseurs bidirectionnels. A part la charge principale, un système hybride peut contenir aussi des charge auxiliaires (charge différée, charge optionnelle, charge de délestage) pour réalises l'équilibre énergétique [9]. Si la charge principale est alimentée sans interruption, les charges auxiliaires sont alimentées en énergie par ordre de priorité, seulement quand il existe un sur plus d'énergie. Ainsi, dans un SHE avec des batteries de stockage et charges auxiliaires, s'il existe un excès d'énergie (venant des sources d'énergie renouvelable et des diesels), celui-ci passera d'abord dans les autres charges auxiliaires en fonction de leur priorité. Dans un tel système, les batteries de stockage jouent un double rôle : charge et source

La puissance délivrée par les SHE peut varier de quelques watts pour des applications domestique jusqu'à quelques mégawatts pour les systèmes utilisés dans l'électrification de petites iles [8]. Ainsi, pour les systèmes hybrides ayant une puissance en-dessous de 100kW, la connexion mixte, bus à CA et bus à CC, avec des batteries de stockage, est très répondue

[10], [11]. Le système de stockage utilisé un nombre élevé de batterie pour être capable de couvrir la charge moyenne pendant plusieurs jours. Ce type de SHE utilisé des petites sources d'énergie renouvelable connectées au bus à CC. Quand il existe une production en CA, elle vient, en principe, des générateurs diesels. Une autre possibilité est de convertir la puissance continue en puissance alternative à l'aide des onduleurs. Les systèmes hybrides utilisés pour des applications de très faible puissance (en-dessous de 5 kW) alimentent généralement des charges à CC [12].

Les systèmes plus grands, ayant une puissance supérieure à 100 kW, sont centrés sur le bus à CA, avec des sources d'énergies renouvelable conçues pour être connectées aux grands réseaux interconnectés [13]. Si ces systèmes contiennent des sous-systèmes de stockages, ce qui est rare, c'est pour lisser les variations de l'énergie de nature renouvelable.

Le champ d'application des SHE est très charge et par conséquent il est difficile de classer ces systèmes. On peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance (Tab1). Les seuils de puissance donnée ne sont que des ordres de grandeurs.

Tab I.1 : classification des SHE par gamme de puissance [9].

Puissance du SHE (kW)	Application
Faible :<5kW	Système autonomes : station de télécommunication, de pompage de l'eau, poste de frontière, autre application isolées
Moyenne : 10-250Kw	Micro-réseaux isolés, alimentation d'un village isolé, d'un hameau, des zones rurales,…
Grand : > 500kW	Grand réseaux isolés (ex : réseaux insulaires)

Les grands SHE en site isolé peuvent être calcifiés en fonction du degré pénétration de l'énergie renouvelable [8]. Les expressions qui permettent à calculer l'indice de pénétration sont :

$$I_{ins} = \frac{P_{rw}}{P_{ch}}$$

$$I_{moy} = \frac{\mathrm{W_{rw}}}{\mathrm{W_{ch}}}$$

I_{ins} Est la pénétration instantanée. Elle représente la production de la puissance produite par les sources d'énergie renouvelable par rapport à la puissance de la charge. P_{wr} Représente la puissance renouvelable et, P_{ch} la puissance électrique de la charge (la charge principale, s'il y a plusieurs types de charges).

I_{moy} Est la pénétration moyenne (mesurée pendant des jours, des mois ou même des années).

W_{rw} Représente l'énergie renouvelable et W_{ch} représente l'énergie consommée par la charge principale.

Une classification des grands systèmes éolien-diesel sur trois niveaux à été proposée en [8]. Cette classification sépare les systèmes en fonction du taux de pénétration de l'énergie éolienne et donne leurs caractéristiques de fonctionnement (Tab2).

Tab. I.2 : classification des systèmes éolien-diesel basée sur le taux de pénétration de l'énergie éolienne [8]

Niveau de penetration	Caractéristique de Fonctionnement	Pénétration Pic instantané	moyenne annuelle
faible	GD fonctionne sans arrêt La production renouvelable réduit la charge du diesel Toute l'énergie renouvelable alimente la charge principale Il n'y a pas de système de supervision	<50%	<20%
	GD fonctionne sans arrêt Commande relativement simple Pour des niveaux élevés d'énergie renouvelable, des charges secondaires sont réparties pour assurer une charge suffisante pour le diesel ou la production renouvelable est réduite	50% -100%	20% -50%
Elevé	GD peut être arrêt en fonction de la production renouvelable Système auxiliaires pour contrôler la tension et la fréquence Commande complexe	100% - 400%	20% - 150%

I.6 principaux composants des SHE

I.6.1 Composants principaux

L'univers des systèmes hybrides regroupe une variété de technologies agencées dans une grande diversité d'architectures. Les éoliennes, les panneaux photovoltaïques (PV) et les générateurs diesels sont souvent utilisés dans les systèmes SHE. Ceux-ci peuvent aussi inclure d'autres sources d'énergie comme l'énergie hydraulique, géothermique ou l'énergie contenue

dans l'hydrogène (piles à combustibles). Les convertisseurs, les charges, les charges de délestage et une forme de gestion de l'énergie peuvent également faire partie d'un SHE.

Les batteries sont habituellement utilisées pour le stockage d'énergie, mais il existe d'autres options telles que le stockage inertiel (volant d'inertie), le stockage sous forme d'air comprimé et le stockage d'hydrogène.

Mathématiquement parlant, on peut combiner des technologies et créer des hybrides d'une multitude de façons que : éolien-hydraulique, éolien-diesel, éolien-diesel-stockage, éolien-photovoltaïque-diesel, éolien-photovoltaïque-stockage-diesel, photovoltaïque-stockage, photovoltaïque-diesel, photovoltaïque-stockage-diesel, etc. Economiquement parlant, certain système hybride présente plus d'intérêts que d'autres en fonction de la nature d'application (réseaux autonomes, applications spécialisées, etc.)

I.6.2.Générateurs photovoltaïques

Une cellule élémentaire composée de matériaux semi-conducteurs est capable de convertir l'énergie de photons reçus à sa surface en une différence de potentiel, créée par une délocalisation d'électrons dans le matériau. La circulation des électrons dans le circuit extérieur permet à la cellule PV de fonctionner comme un générateur.

Les cellules PV sont combinées ensemble pour former un module PV qui peut produire une certaine quantité d'énergie sous des conditions d'éclairement et de température variables. Par la suite les modules PV peuvent être regroupés à leur tour afin de former un générateur PV, Il est dimensionné selon la puissance nécessaire pour une installation donnée [8].

La plupart des cellules PV mesurent autour de 100 cm^2 et ne produisent qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt
[9], [10] et [11].

Le rendement énergétique d'un module dépend de la nature des matériaux utilisés. Les valeurs communément rencontrées sont de l'ordre (13 à 16 % pour les cellules composées de silicium monocristallin, 11 à 13 % avec du silicium polycristallin et 7 à 8 % avec du silicium amorphe).

Les modules PV sont protégés par des diodes by-pass (diode by-pass, diode antiretour) afin d'éviter le fonctionnement inverse des cellules occultées, pouvant entraîner une surchauffe voire une destruction de celles-ci.

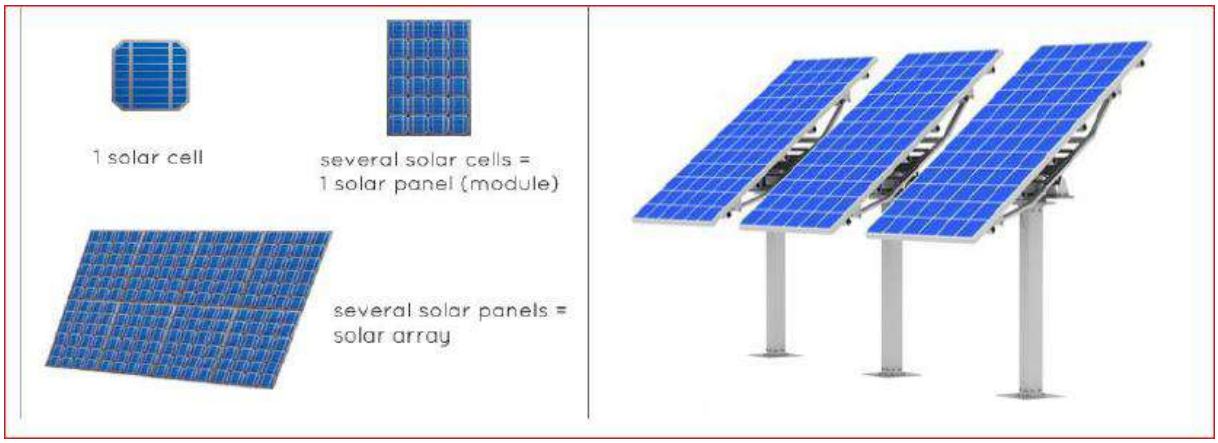


Figure I.2. Modules photovoltaïques sur support

Voici la description des paramètres d'un module [12] :

- La puissance crête Pc : la puissance maximale produite par un module photovoltaïque dans les conditions standards : ensoleillement de 1000 W/m² à l'horizontale, température ambiante de 25°C, masse d'air optique (AM) égale à 1,5.
- La caractéristique I (V): Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- Tension à vide Vco : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- Courant de court-circuit Icc : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- Point de fonctionnement optimum (Um, Im) : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, Pm = Um. Im
- Rendement maximal : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale Pm et la puissance maximale que peut avoir la cellule : Vco. Icc.

I.6.3. Générateur diesel

Dans le cas des installations à sources d'énergie renouvelables autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage ou d'ajouter un ou plusieurs groupes électrogènes diesels.

Dans un SEH, le générateur classique est généralement le moteur diesel directement couplé au générateur synchrone (figure I.12), La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue

par un gouverneur de vitesse (régulateur de vitesse) sur le moteur diesel [17]. Le gouverneur fonctionne en ajustant le flux de carburant au diesel, pour garder la vitesse du moteur et la vitesse du générateur constante. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré.

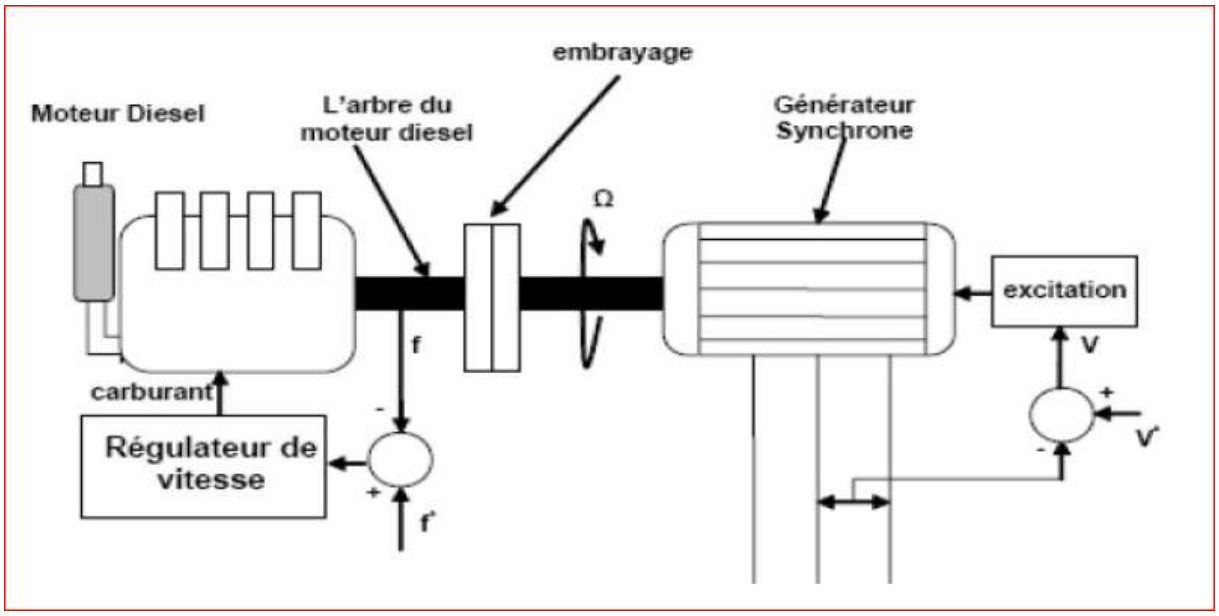


Figure I.3. Configuration du générateur diesel

Les réseaux de courant alternatif avec diesel, tout comme ceux interconnectés fournissent pour leurs charges, deux formes d'énergie : active et réactive.

Quand plusieurs générateurs diesels fournissent de l'énergie au réseau, ceux-ci sont connectés généralement à un bus à CA. Dans ce cas, un système de commande doit être utilisé pour une distribution correcte de la puissance fournie par les générateurs diesels.

I.6.4. Composants auxiliaires

I.6.4.1. Système de supervision

La plupart des systèmes hybrides comportent une certaine forme de commande. Les chargeurs des batteries, par exemple, incluent souvent un système de commande pour empêcher la surcharge des batteries ou que leur état de charge baisse trop. Les réseaux multi-diesel peuvent utiliser des méthodes relativement sophistiquées pour gérer les générateurs diesels et régler le flux de puissance.

Parfois, la commande est intégrée individuellement dans chaque composant du système. Quelques exemples de commandes intégrées sont le gouverneur de vitesse sur le moteur diesel, le régulateur de tension sur le générateur synchrone du diesel ou la commande de l'éolienne.

Un autre type de commande plus global permet la surveillance de certains ou de tous les composants (figure I.2). Ce système de surveillance est d'habitude automatique. Les fonctions spécifiques peuvent inclure la commande de décharge et d'arrêt des générateurs diesel, l'ajustement de leurs points de fonctionnement, le chargement des batteries et la répartition de la puissance pour les différents types de charges.

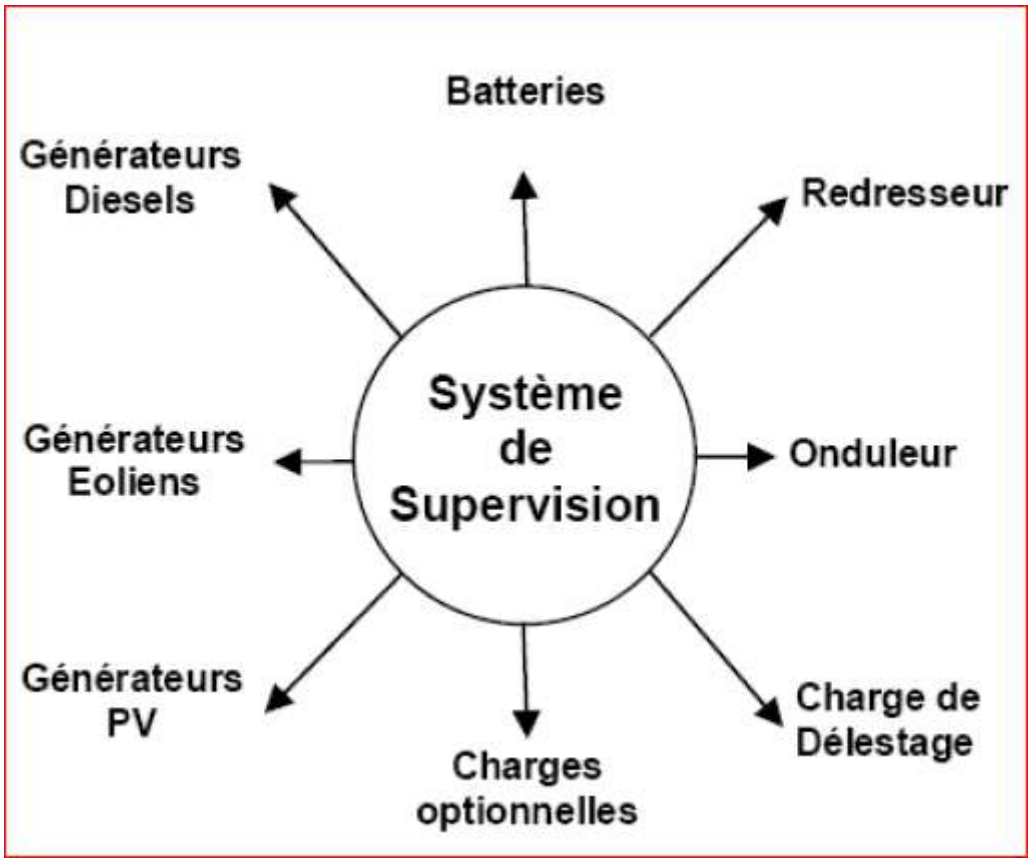


Figure I.4 : système de supervision [9]

I.6.4.2. Convertisseurs

Dans un SHE, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le CC en CA et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SHE : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs.

Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Dans le SHE, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement. Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes exige la présence d'une source à CA pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement : autonome ou en parallèle avec un autre générateur. Ceux-ci sont les plus flexibles, mais sont aussi les plus chers. Parfois, les fonctions de redresseur et d'onduleur sont réalisées par un seul appareil.

Les hacheurs, le troisième type de convertisseurs, permettent de réaliser la conversion CC/CC, par exemple, pour adapter la tension entre deux sources.

I.6.4.3. Charges

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistifs incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau, etc. les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactifs, mais les seuls effets introduits les changements dans le fonctionnement du système.

I.7 Architectures des systèmes hybrides d'énergie (SHE)

Les générateurs électriques d'un SHE peuvent être connectés en différentes configurations. Deux configurations s'imposent parmi les systèmes d'énergie hybrides constitués par des sources d'énergie renouvelable, des systèmes de stockage et des générateurs diesels : architectures à bus CC et architectures mixte à bus CC-CA [14].

I.7.1 Architecture à bus à CC

Dans le système hybride présenté dans la figure I.2, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus à CC. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à CA fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie en CC. Le ou les générateurs diesels sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges à CA. Les générateurs diesels ne peuvent donc pas alimenter les charges à CA directement. L'onduleur doit alimenter les charges à CA à partir du bus à CC et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence. Les batteries et l'onduleur sont dimensionnés pour alimenter des

pics de charge, alors que le générateur diesel est dimensionné pour alimenter les pics de charge et les batteries en même temps. La puissance délivrée peut être contrôlée par la commande du courant d'excitation de la partie électrique du générateur diesel ou en incorporant un régulateur de charge dans les sources d'énergie renouvelable. Les avantages et les désavantages d'un tel système sont présentés ci-après.

Avantage :

- La connexion de toutes les sources à un bus à CC simplifie le système de commande,
- Le générateur diesel peut être dimensionné de façon optimal, c'est-à-dire de sorte à fonctionner à puissance nominale pendant les processus de chargement des batteries jusqu'à un état de charge de 75-85%.

Inconvénient

- Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs,
- Les générateurs diesels ne peuvent pas alimenter directement la charge, l'onduleur doit être dimensionné pour assurer le pic de charge.

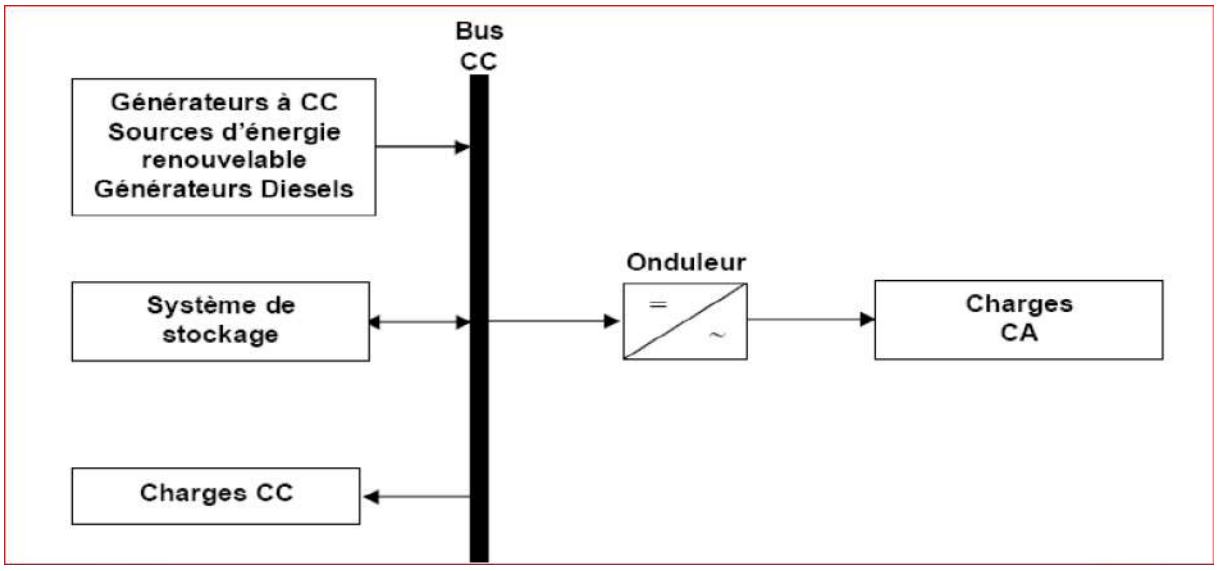


Figure I.5 : configuration du SHE à bus à CC [9]

I.7.2 Architecture mixte à bus à CC/CA :

La configuration à deux bus, à CC et à CA, et représentée dans la figure I.3. Celle-ci a des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure. Dans cette configuration,

les sources d'énergie renouvelable et les générateurs diesels peuvent alimenter une partie de la charge à CA directement, ce qui permet d'augmenter le rendement du système et de réduire la puissance nominal du GD et de l'onduleur. Le ou les générateurs(s) diesel(s) et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle en synchronisant leurs tensions en sortie. Les convertisseurs situés entre les deux bus (le redresseur et l'onduleur) peuvent être remplacés par un convertisseur bidirectionnel, qui, en fonctionnement normal, réalise la conversion CC/CA (fonctionnement onduleur) [14], [15]. Quand il y a un surplus d'énergie de la part du générateur diesel, il peut aussi charge les batteries (fonctionner en redresseur). L'onduleur bidirectionnel peut alimenter les pics de charge quand le générateur diesel et surchargé.

Les avantage et désavantage d'un tel système sont présentés ci-après.

Avantage :

Le GD et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle.

Quand le niveau de la charge est bas, l'un ou l'autre peut générer le nécessaire d'énergie. Cependant, les deux sources peuvent fonctionner en parallèle pendant les pics de charge.

La possibilité de réduire la puissance nominale du GD et de l'onduleur sans affecter la capacité du système d'alimenter les pics de charge.

Inconvénient :

La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle (l'onduleur doit être capable de fonctionner en autonome et non-autonome en synchronisant les tensions en sortie avec les tensions en sortie GD).

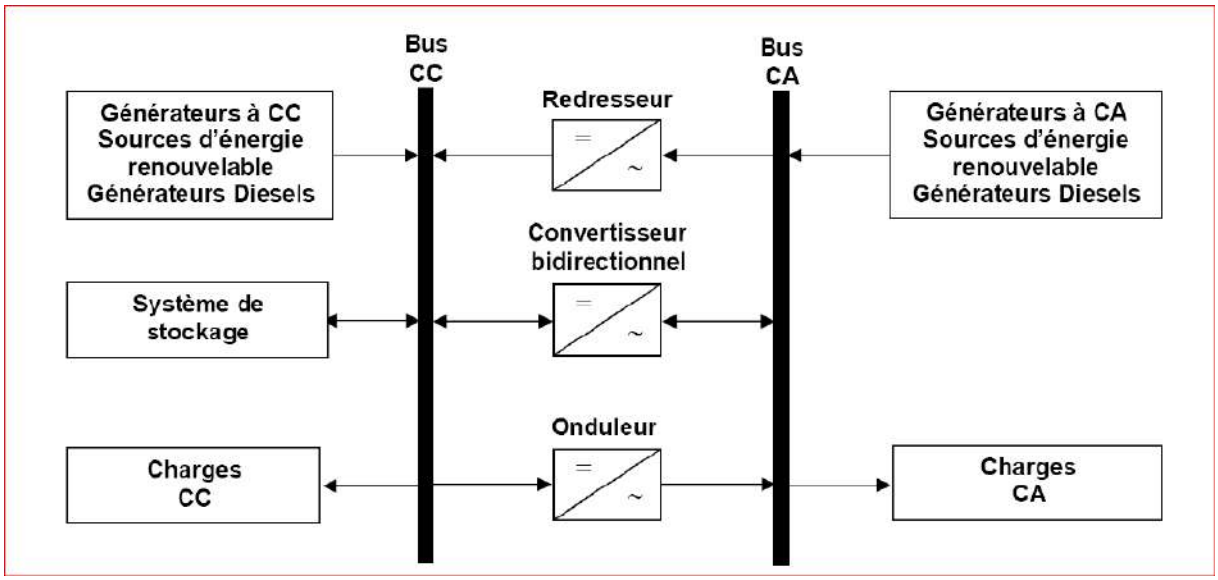


Figure I.6: configuration du SHE à deux bus à CC et à CA [9]

I.8 Dimensionnement des systèmes hybrides d'énergie (SHE)

La conception des SHE exige la sélection et le dimensionnement de la combinaison la plus appropriée des sources d'énergie, des convertisseurs et du système de stockage, ainsi que l'implémentation d'une stratégie de fonctionnement efficace [16], [17]. De plus, pour obtenir un taux de pénétration important des sources d'énergie renouvelables, sans la dégradation de la qualité de l'énergie fournie, une étude de dimensionnement du système hybride s'impose [18].

Les logiciels de dimensionnement sont des outils indispensables pour l'analyse et la comparaison des différentes combinaisons possibles des sources utilisées dans les SHE.

Les principaux facteurs du dimensionnement sont :

Les conditions environnementales du site (vitesse du vent, éclairement énergétique, température, humidité) ;

Le profil de charge ;

Les préférences et les demandes du client ;

Les ressources financières ;

La disponibilité de la technologie et le support technique.

Il existe plusieurs logiciels de dimensionnement et de simulation des SHE [19], [20]: HOMER, SOMER, RAPSIM, SOLSIM, INSEL, etc. tous ces logiciels ont pour but d'optimiser les systèmes hybrides, mais les stratégies d'optimisation sont différentes. Une brève description de chaque outil est donnée ci-après :

1). HOMER : c'est un outil développé par « National Renewable Energy Laboratory » (NREL), capable de dimensionner et d'optimiser un système hybride contenant différents composants : éolienne, PV, micro-hydrocentrale, diesel, réseaux, pile à combustible et batterie. HOMER exécute des simulations pour toutes les configurations possibles du système dans le but de vérifier si elles sont réalisables. HOMER estime ensuite le cout d'installation et de fonctionnement du système et propose une liste des configurations, classées par rapport au cout de leurs cycles de vie.

2). SOMER : c'est un outil de simulation et d'optimisation des systèmes d'énergie renouvelables. SOMER est développé par la « Utrecht University », au Pays-Bas. Les composants disponibles sont : PV, éolienne, générateur diesel, réseau électrique, batterie de stockage et plusieurs types de convertisseur. La simulation est réalisée sur une base de temps horaire. Le système optimal est trouvé en comparant les couts de plusieurs systèmes, dans les limites définies par l'utilisateur.

3). RAPSIM : ce logiciel a été développé par le « Murdoch University Energy Research Institue » d'Australie. Il est conçu pour simuler des systèmes d'énergies alternatives telles que des générateurs PV, des éoliennes et des générateurs diesels. Un dimensionnement optimal est réalisé par tâtonnement. Les utilisateurs changent les paramètres du système (nombre de batterie, d'éoliennes, puissance des générateurs diesels) et jugent le résultat pour choisir la meilleure solution répondant à leurs besoins

4). SOLSIM : il est développé au « Fachhochschule Konstanz » en Allemagne. C'est un outil de simulation qui permet aux utilisateurs de concevoir, analyse et optimiser des systèmes connectés ou pas à un réseau et des SHE. Les sources d'énergie disponibles sont : des panneaux PV, des éoliennes, des installations de biogaz ou de biomasse, des batteries et des générateurs diesels, SOLSIM est un progiciel qui comporte des outils différents : un programme de simulation général appelé SOLSIM, une unité d'optimisation de l'angle d'inclinaison des panneaux PV appelée SolOpti, une unité de calcul des couts du cycle de vie appelée SolCal et l'unité simulant des générateurs éoliens appelée SolWind.

5). INSEL : il est développé par la « University of OLdenbury » d'Allemagne. Il réalisé la simulation des systèmes d'énergie renouvelable. C'est un logiciel de simulation basé sur des diagrammes blocs ou chaque bloc représente un composant d'une puissance prédéterminée. Les utilisateurs doivent sélectionner des blocs à partir d'une bibliothèque et les interconnecter pour définir les systèmes d'énergie à étudier.

I.9 commande des SHE

Le problème principal dans la commande de SHE est de pouvoir fournir l'énergie demandé par la charge, malgré les grandes variations de l'énergie produite, tout en maintenant la fréquence et la tension du bus à CA dans des limites acceptables. Les variations de la production sont causées par la nature stochastique des ressources renouvelables.

Deux aspects principaux doivent être pris en compte dans la commande du SHE :

La stratégie de fonctionnement, qui implique des décisions liées aux flux d'énergie à l'échelle de plusieurs heures ou jours et des actions pour améliorer le fonctionnement du système.

La qualité de l'énergie, à l'échelle des secondes ou millisecondes. Cela concerne la stabilité de la fréquence et de la tension, les protections, est.

I.9.1 Stratégie de fonctionnement

La stratégie de fonctionnement est un algorithme qui permet au système de supervision d'un SHE de décider combien et quels générateurs il faut mettre en marche, quelles charges sont connectées et comment utiliser le stockage, si disponible [15], [29].

Le fonctionnement d'un SHE dépend des paramètres suivants :

Le profile de charge : les variations diurnes, les variations saisonnières, les pics et les creux, etc.

Les caractéristiques des ressources renouvelables : les valeurs moyennes, l'écart-type, la fréquence des événements, les valeurs extrêmes, les variations diurnes et saisonnières, etc.

Les caractéristiques des générateurs classiques : le type de carburant, les limites de fonctionnement, etc.

La configuration du système : le nombre et les types de composants (les sources d'énergie renouvelable, les sources classiques, les charges contrôlables, les types de stockage, les convertisseurs de puissance, etc.).

Les nombres de qualité de l'énergie : les exigences en ce qui concerne les variations de la fréquence et de la tension.

Par conséquent, certaines stratégies de fonctionnement peuvent être plus efficaces dans des applications particulières, en fonction des objectifs du système et les caractéristiques présentées ci-dessus. Une brève description de quelques stratégies de fonctionnement est donnée ci-après :

I.9.1.1 Gestion du stockage

Deux types de stockage [21] sont utilisés dans les SHE : le stockage à court terme et le stockage à long terme.

La stratégie de stockage à court terme, « peak shaving strategy », permet de filtrer les flux actuations des énergies renouvelables et/ou de la charge. Cette stratégie réduit également le nombre de cycles démarrage/arrêt des générateurs diesels, donc la consommation de carburant.

Le stockage à long terme, « cycle charge stategy » est utilisé pour alimenter la charge sur une période de temps plus longue. Cette stratégie, permet d'améliorer l'équilibre énergétique et de réduit les cycles démarrage/arrêt des GD et danc, la consommation de carburant. Avec cette stratégie, le GD est arrêté jusqu'à ce que l'état de charge du système de stockage atteigne un niveau minimal. Une fois ce seuil attient, le GD redémarre et reste en fonctionnement jusqu'à ce que l'état de charge du système de stockage atteigne un niveau maximal et le cycle se répète encore une fois et ainsi de suite.

I.9.1.2.Gestion des charges

La stratégie de gestion des charges peut aussi etre à court terme et à long terme [22]. Les deux types de stratégie utilisent les charges pour faire varier la demande d'énergie. Ainsi, les charges sont connectées et déconnectées par ordre de priorité (figure I.5).

Les pompes à eau et les unités de désalinisation sont des exemples de charges différées de faible priorité en fonctionnement normal. Les charges optionnelles sont toutes des charges

ayant une utilité et pouvant être utilisées durant l'excédent d'énergie qui autrement serait dissipé.

La stratégie de contrôle à court terme connecte et déconnecte les charges du système en fonction du dépassement de certains seuils fixes pour la fréquence du bus à CA. Les charges sont connectées de manière progressive, selon les variations de la fréquence. La charge de délestage (dump load) est une charge spéciale dont la puissance peut être modifiée en fonction de la déviation de fréquence. Elle peut aider à règle la fréquence du réseau dans des conditions de surplus d'énergie.

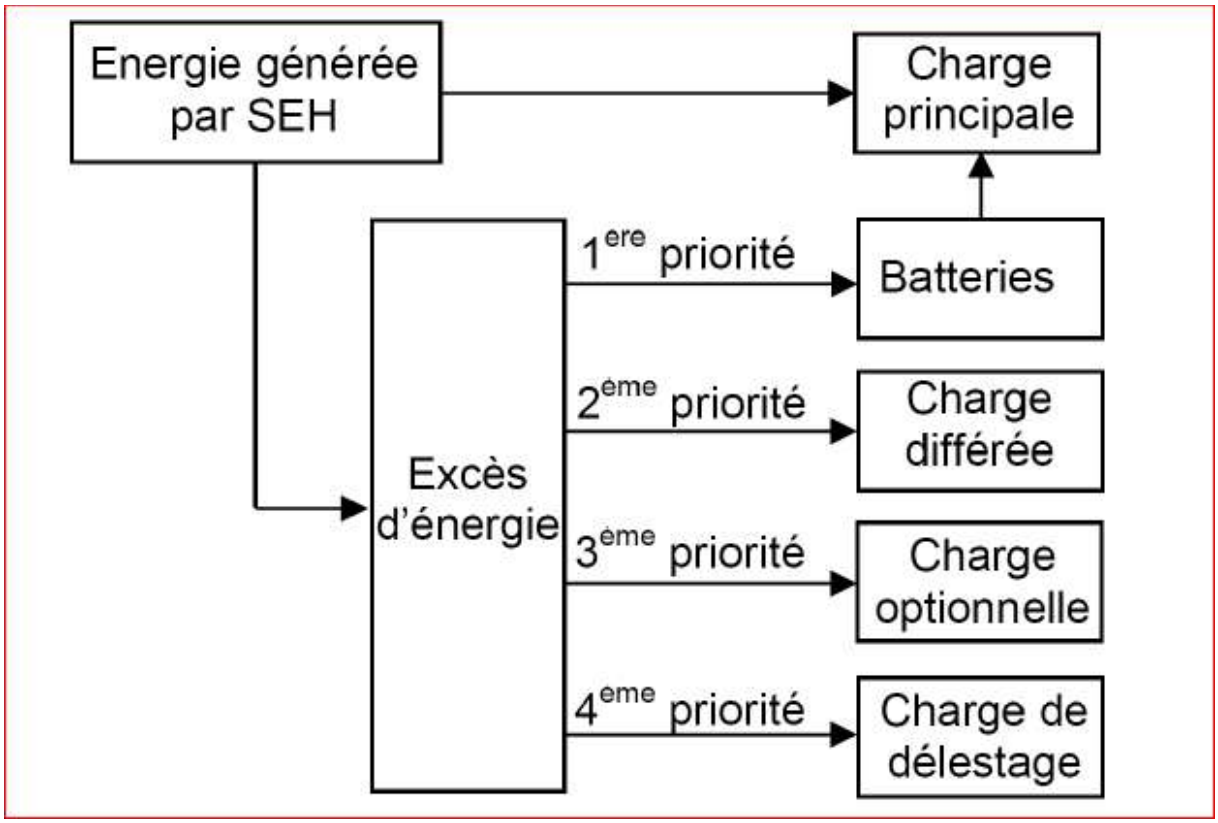


Figure I.7 : diagramme des priorités des charges [9]

La gestion à long terme assure l'équilibre énergétique sur des intervalles de temps importants. Les charges différées et optionnelles ont en général une priorité réduit pendant une partie de la journée. Elles doivent être connectées seulement quand leur régime de priorité est élevé.

Dans le cas du pompage de l'eau, quand le niveau de l'eau dans le bassin est bas, la pompe acquiert une priorité élevée et doit démarrer. La stratégie de gestion des charges peut aussi être utilisée pour réduire les pertes énergétiques du GD.

I.9.1.3. Réserve tournante

La réserve tournante est définie en [23] comme étant l'exigence du système de commande défini par la capacité des générateurs classiques de couvrir les changements immédiats causés par l'arrêt des générateurs d'énergie renouvelable et par l'augmentation soudaine de la charge. En effet, la réserve tournante déterminé la capacité instantanée de réserve minimale du GD en fonction des prévisions de la production d'énergie renouvelable et de l'énergie renouvelable et de l'évolution de la charge. Une réserve d'énergie doit être toujours disponible pour éviter l'effondrement du système lors d'une réduction soudaine de la production d'énergie renouvelable.

I.9.1.4 Temps de fonctionnement minimal

Cette stratégie consiste à maintenir le GD en fonctionnement pour une durée minimale prédéfinie en fonction de la variabilité de la charge ou de la variabilité de l'énergie renouvelable [21]. Celle-ci est utilisée pour réduire le nombre de démarrages/arrêts du GD peut permettre d'éviter l'usure des moteurs diesels et leurs démarreurs et en même temps réduire la consommation de carburant.

I.9.1.5 Hystérésis

Cette stratégie est souvent utilisée pour commander la déconnexion du générateur diesel [22]. Le GD est arrêté seulement si la puissance renouvelable est supérieure à la demande de la charge. Ce surplus minimal d'énergie (ou hystérésis) peut être mesuré à partir de la variation de fréquence du réseau quand cette fréquence est fixée par le GD utilisant un régulateur type proportionnel (P) et à partir de son niveau de charge quand il utilise un régulateur type proportionnel-intégral (PI).

I.9.2 Qualité de l'énergie électrique produite par les SHE

Le terme « qualité de l'énergie électrique » fait référence à la stabilité de la tension, à la stabilité de la fréquence du réseau et à l'absence, dans le réseau électrique, de différents

phénomènes électriques (comme, par exemple, le flicker ou des distorsions harmoniques). La (figure 8) montre une classification de ces perturbations en fonction de leurs caractéristiques [24].

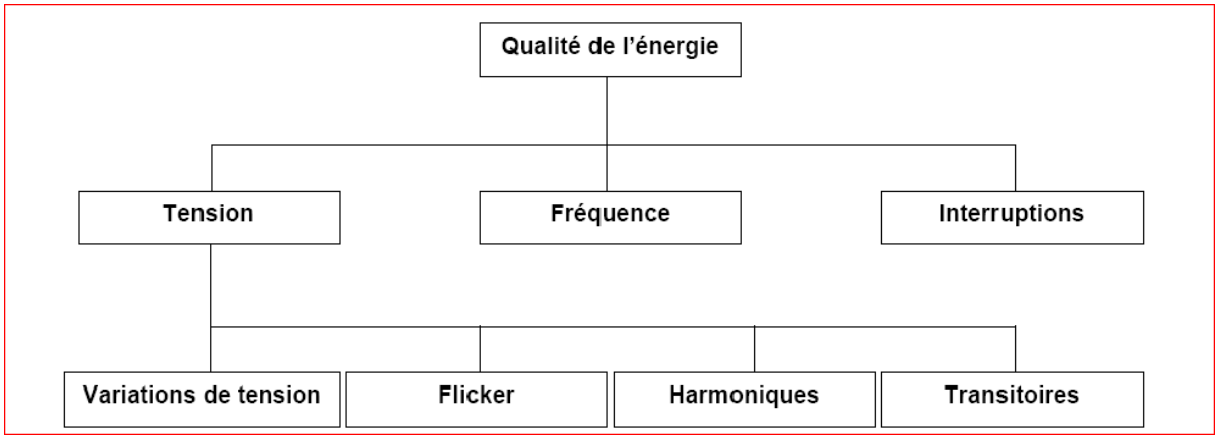


Figure I.8 : classification des perturbations du point de vue qualité de l'énergie électrique [9]

Bien qu'il n'y ait pas de normes internationales spécifiques pour les systèmes de génération en site isolé, les caractéristiques du réseau isolé doivent être semblables aux caractéristiques des grands réseaux interconnectés. Les consommateurs qui sont connectés aux réseaux isolés. Tout comme ceux connectés aux grands réseaux interconnectés, utilisent les mêmes appareils. Par conséquent, les exigences de qualité de l'énergie sont généralement les mêmes.

La plupart des mesures et définition utilisées dans les normes sont basées sur l'analyse de la fréquence et de la tension. Pra exemple, la norme européenne EN50160 [25] inclut des recommandations pour les valeurs de la tension des réseaux isolés, c'est-à-dire des réseaux non reliés à un grand réseau interconnecté.

Plusieurs études ont été réalisées sur la qualité de l'énergie électrique des systèmes isolés comportant des sources d'énergie renouvelable. Lars son [24] présente des mesures expérimentales de la qualité de l'énergie électrique pour les systèmes éolien-diesel. La problématique des systèmes hybrides éolien-diesel est analyse aussi par Sharma en [26].moulinai dans [27] réalise une analyse de la configuration éolien-diesel et des différents types de charges du point de vue de la qualité de l'énergie électrique. Dans [28], Binder présente plusieurs stratégies de contrôle de la tension dans les réseaux faibles avec des systèmes éoliens.

I.10. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une description générale des systèmes hybrides. Tous les composants ont été introduits afin de permettre une bonne compréhension du fonctionnement des systèmes.

Afin de faciliter la conception, nous avons aussi mis en valeur les avantages, les inconvénients et les limites d'utilisation des ces systèmes.

II.1. Introduction

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus abondante parmi les énergies renouvelables. L'électricité photovoltaïque est obtenue par transformation directe de la lumière des rayonnements solaires en électricité, au moyen de cellules photovoltaïque.

Nous nous intéressons dans ce chapitre à la conversion photovoltaïque ; dans un premier temps, nous décrirons brièvement la structure et le fonctionnement des cellules et des générateurs photovoltaïques (GPV) ; dans un environnement Matlab Simulink. Ainsi, nous étudierons l'influence des paramètres météorologiques (Température et Eclairement) et des paramètres internes (résistances série et shunt) sur le comportement électrique d'une cellule solaire. Deux modèles de GPV seront abordées dans ce chapitre, à savoir, le modèle à une seule exponentielle et le modèle à deux exponentielles.

II.2. Cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont des dispositifs à semi-conducteurs, elles sont généralement faites du silicium sous ses différentes formes. Elles ne mettent en œuvre aucun fluide et ne contiennent pas de substances corrosives, ni aucune pièce mobile. Elles produisent de l'électricité du moment qu'elles sont exposées au rayonnement solaire. Elles ne nécessitent pratiquement aucun entretien ; elles ne polluent pas et ne produisent aucun bruit. Les cellules photovoltaïques sont donc la façon la plus sûre et la plus écologique de produire de l'énergie.

Plusieurs technologies ont vu le jour; chacune propose un type de cellule avec un rendement et un coût qui lui est propre.

Les cellules monocristallines : la technologie monocristalline propose des cellules industrielles à base de silicium massif monocristallin avec un rendement de 12 à 18%. Cette technologie soufre d'un coût de fabrication élevé dû principalement à la qualité du matériau.

Les cellules poly-cristallines : la technologie poly-cristalline propose des cellules moins coûteuses, à base de silicium massif poly-cristallin, avec un rendement variant entre 11 et 13%. La technologie couches minces consiste à déposer une couche mince de semi-conducteur sur des substrats à bas coût : silicium métallurgique (peu purifié), plaques de verre, métal…etc. Le rendement reste cependant inférieur à 10%.

Les cellules amorphes : ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 8 à 10%. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium. Elles sont utilisées le plus souvent dans les petits produits de consommation

comme les calculatrices et les montres, mais aussi plus récemment sur les grandes surfaces utilisées pour la couverture des toits

II.2.1. Structure d'une cellule photovoltaïque

La structure de base d'une cellule PV est une jonction PN (Figure I.1) constituée de la manière suivante : un cristal semi-conducteur dopé P est recouvert d'une zone mince dopée N (quelques millièmes de mm). Entre les deux zones se développe une jonction. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. L'épaisseur totale du cristal est de l'ordre du millimètre.

Il est à noter que les cellules photovoltaïques peuvent être réalisées à partir des diodes Schottky (métal déposé sur un semi-conducteur de type P ou N). Réciproquement, le fonctionnement d'une jonction P-N (dont le semi-conducteur de type P est fortement dopé) est analogue à celui d'une diode Schottky.

Un rayon lumineux frappe le dispositif peut pénétrer dans le cristal à travers la grille et provoquer l'apparition d'une tension entre la cathode et l'anode. Le dessus et le dessous de la cellule doivent alors être recouverts de contacts métalliques pour collecter l'électricité générée.

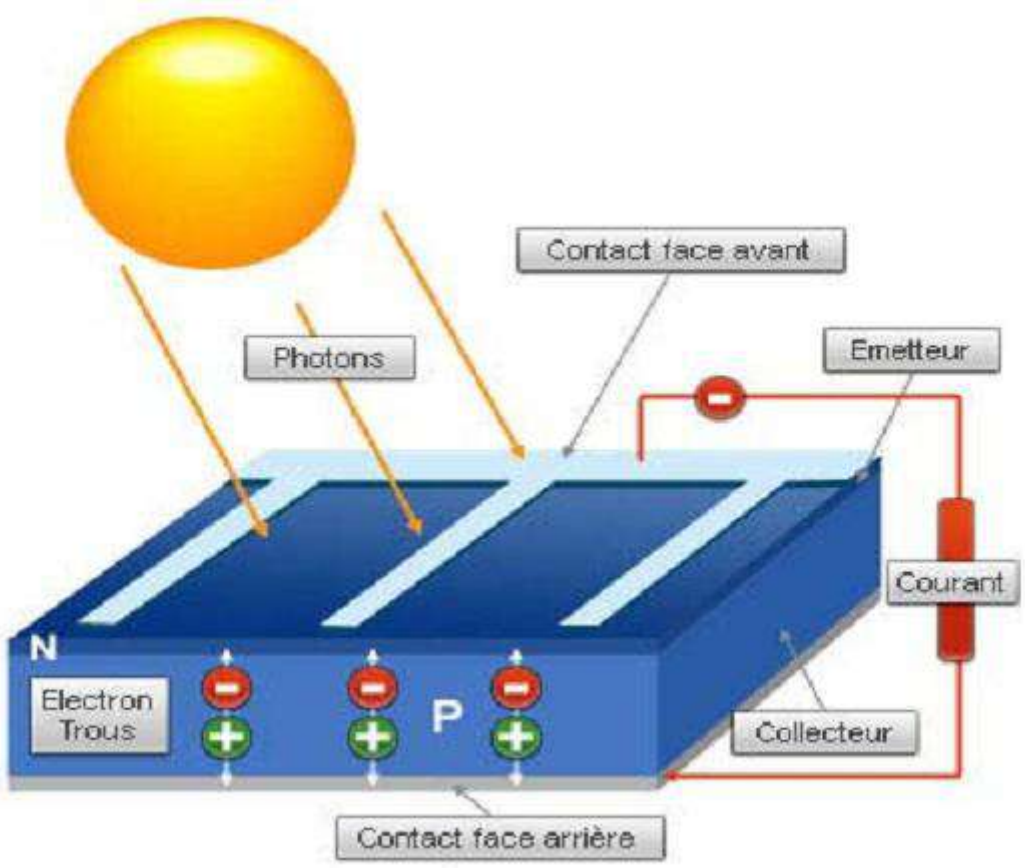


Figure II.1: Structure d'une cellule photovoltaïque au silicium (jonction P-N).

II.2.2. Principe de fonctionnement

Le phénomène de conversion photovoltaïque est dû à la variation de la conductivité d'un matériau sous l'effet de la lumière, selon le concept décrit ci-après, Son principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie de photon ($W_{ph} = \mathrm{h_p}\frac{\mathrm{c}}{\lambda_{\mathrm{ph}}}$) avec λ_{ph} représente la longueur d'onde, h_p constante de Planck et c la vitesse de la lumière. Si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap (W_g) de ce semi-conducteur, l'électron passe de la bande de valence Bv à la bande de conduction Bc en laissant un trou derrière, d'où l'apparition des pairs électrons trou dans la jonction [32]. Donc toute particule minoritaire prés de la jonction a une probabilité très forte pour la traverser et la jonction s'oppose uniquement au passage des porteurs majoritaires.

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons de valence ont tendance à être " arrachés / décrochés: si l'électron revient à son

état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

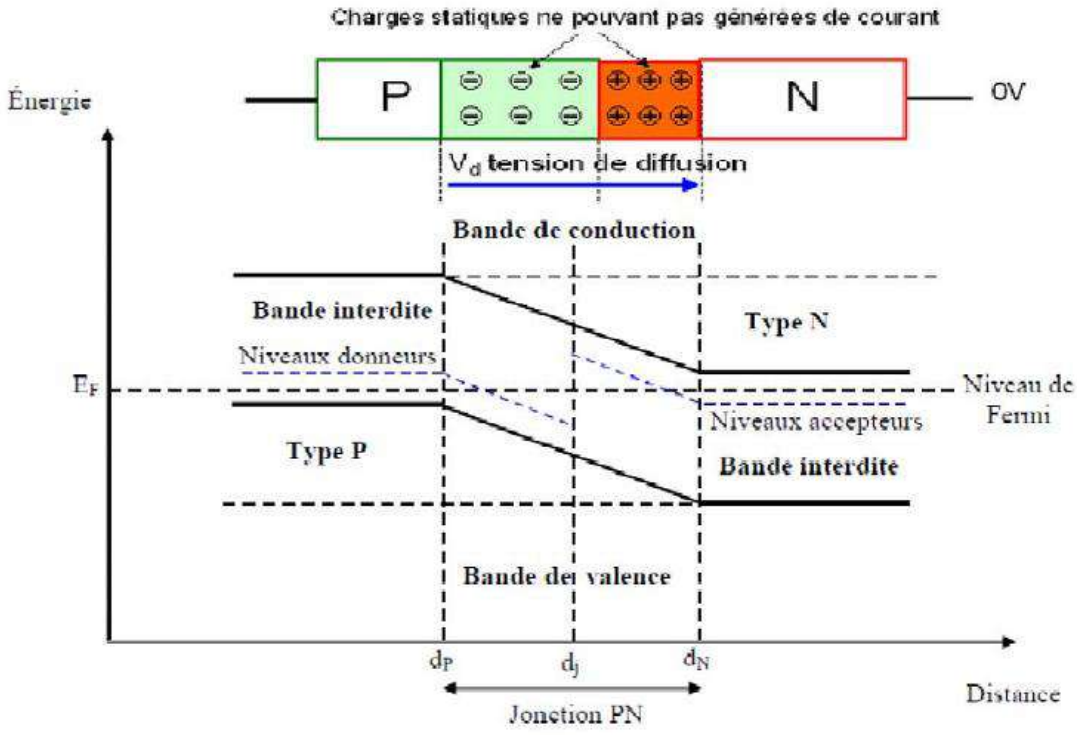


Figure II.2: Diagramme de bandes d'énergie au voisinage de la jonction P-N.

Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique, c'est l'effet photovoltaïque.

II.3. Regroupement des cellules

II.3.1. Regroupement en série (modules)

Une association de (Ns) cellule en série figure (II.4) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électriques d'une association série de (Ns) cellules [32].

Vco=Ns*Vso ; Icc=Ic (II-1)

Icc: courant de court circuit de Ns cellules en série.

Vco: la somme des tensions en circuit ouvert de Ns cellules en serie

La puissance des modules PV s'exprime en Watts-crête (Wc) ou en Watts-peak (Wp). Cette dernière représente la puissance que peut fournir un module lorsqu'il est fermé sur sa charge nominale (optimale), sous les conditions standards de fonctionnement, [32,33,34].

II.3.2. Regroupement des modules en série ou en parallèle (Les champ)

Une association parallèle de (NP) cellule figure (II.4) est possible et permet d'accroitre le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [32].

; Icc= Ns*Ic (II-2)

Icc : la somme des courants en circuit ouvert de Ns cellules en série

Vco : la tension en circuit ouvert de Np cellules en parallèle

L'association série et parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque.

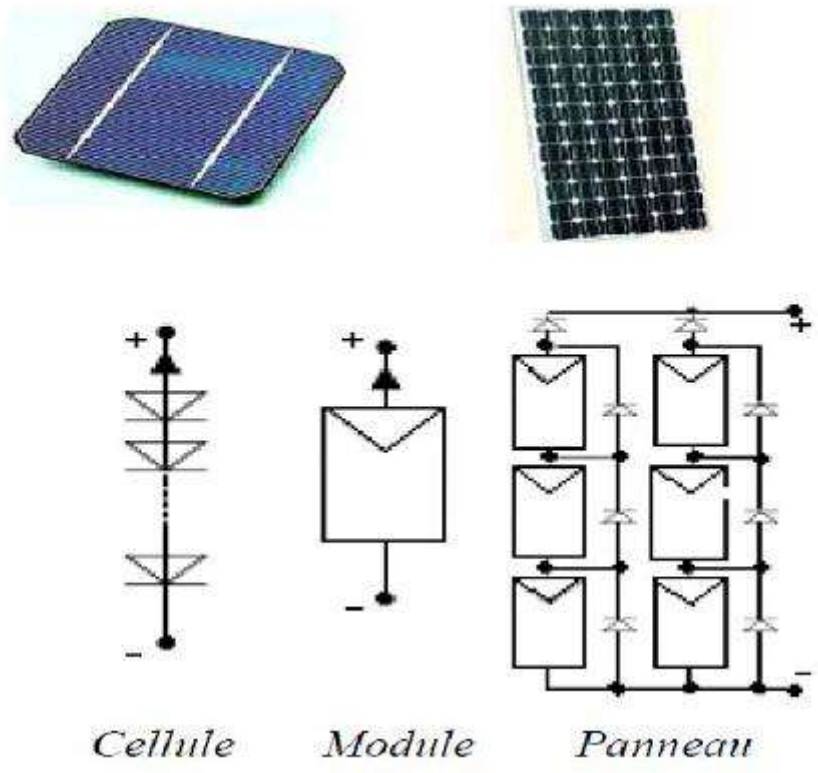


Figure II-3 : Cellule, module et panneaux photovoltaïque.

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions

individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous, ce qui peut être généralisé sur une gamme de Ns modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant.

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque [7].

Plusieurs panneaux qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque ou générateur photovoltaïque GPV.



Figure II-4 : Champ photovoltaïque.

La plupart des panneaux PV commerciaux sont constitués par des sous-réseaux de cellules tels qu'il est décrit plus haut. Le nombre de cellules par sous-réseaux est le fruit d'un compromis économique entre protection et pertes d'une partie importante du GPV en cas de défaut partiel. .

Leurs performances sont données dans des conditions normalisées STC (tests d'étanchéité, résistance mécanique, variations de température, …, selon les normes IEC 61215 et IEC 61646) : un spectre AM1, 5 sous un éclairement de 1000 [W/m2] et une température de la cellule de 25 [°C], à ne pas confondre avec les conditions nominales, qui sont un éclairement de 800 [W/m2], une température ambiante de 20 [°C] et une vitesse du vent égale à 1 [m/s] [33]. Les modules les plus courants sont composés de 36 à 96 cellules ;

Un module de 12V nominal est composé par la mise en série de 36 cellules cristallines. Ces cellules sont protégées par une enveloppe supérieure et inférieure.

II.4. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

L'objectif, est d'obtenir la caractéristique de la puissance fournie au bus continu, P_{PV}, en fonction des conditions météorologiques et électriques, c'est-à-dire l'éclairement dans le plan des panneaux, leur température ainsi que le niveau de tension du bus continu.

II.4.1. Modélisation d'une cellule photovoltaïque à une seule diode

Nous souhaitons obtenir les caractéristiques tension/courant et tension/puissance et déterminer la puissance maximale que peuvent fournir chacun des deux groups de panneaux, pour un ensoleillement et une température donnés. Un travail de comparaison, en terme de simplicité, de temps de calcul et de précision a été effectué en [36] et sa nous a permis de choisir le model a une diode pour notre modélisation.

Il a également été constaté que, les modèles sont très bons pour des ensoleillements supérieurs a la centaine de Watts par mètre carré et que les erreurs n'excédent pas 6% pour des ensoleillements plus faibles.

II.4.1.1. Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque à une diode :

Le modèle d'une cellule à une diode est caractérisé par son schéma électrique équivalent. La source de courant modélise la convection du rayonnement solaire en énergie électrique, la résistance shunt R_{sh} représente l'état de la surface à la périphérie de la cellule, la résistance série R_s correspond au diverses résistance de contact et de connexion réalises sur une cellule et la diode en parallèle modélise la jonction PN. Ces deux résistances représentent les différentes pertes au niveau d'une cellule.

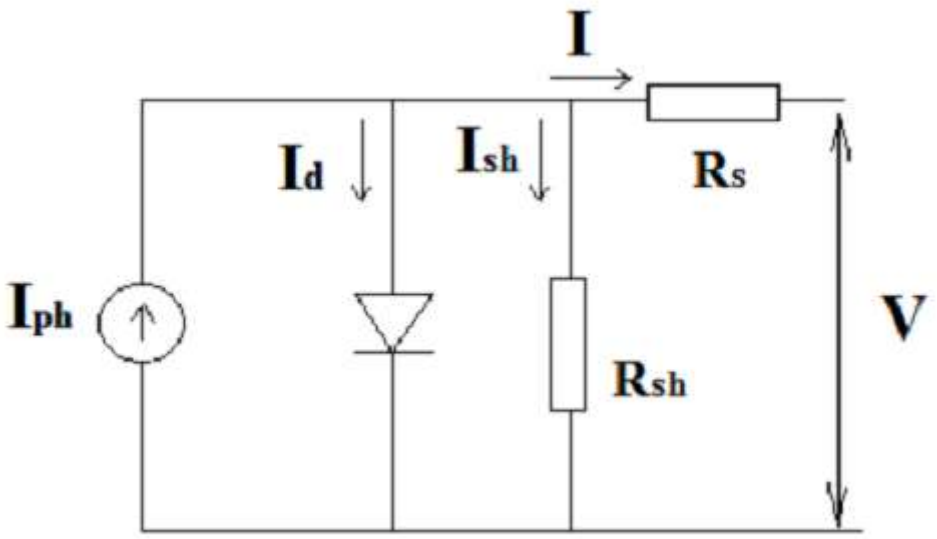


Figure II.5: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque à une diode

II.4.1.2. Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque à une diode :

Le modèle mathématique est donné par l'équation suivante :

$$I = Iph - Id - Ish \qquad \text{(II-3)}$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V+R_s I}{N_{cs}.Gamma\ .k.T_C}\right) - 1\right] - \frac{V-R_s I}{R_{sh}} \qquad \text{(II-4)}$$

Telle que :

I : Courant fourni par la cellule photovoltaïque (A).

V : Tension aux bornes de la cellule (V).

I_{ph} : Photo-courant, proportionnelle à l'irradiation G, avec une correction en fonction de T_C (A).

$$I_{sh} = \left[I_{ph\ ref} - \mu_{Isc}(T_C - T_{Cref})\right]\frac{G}{G_{ref}} \qquad \text{(II-5)}$$

G et G_{ref} : Irradiation efficace et référence (W / m²).

T_C et $T_{C\ ref}$: Température de la cellule efficace et de la référence (° K).

μ_{Isc} = Coefficient de température du courant photoélectrique (ou court-circuit).

Io = Courant de saturation inverse, en fonction de la température (A)

$$I_0 = I_{0\,ref}.\left(\frac{T_C}{T_{C\ ref}}\right)\text{^}3.exp\left(\frac{q.E_g}{Gamma\ .k} \times \left(\frac{1}{T_{C\ ref}} - \frac{1}{T_C}\right)\right) \qquad \text{(II-6)}$$

Rs = Résistance série (ohm).

Rsh = Résistance du shunt (ohm).

q = La charge de l'électron = $1{,}6\times10^{-19}$ Coulomb.

k = constante de Boltzmann = $1{,}38\times10^{-23}$ J / K.

Gamma : Le facteur de qualité de la diode, normalement entre 1 et 2.

NCS = Nombre de cellules en série.

II.4.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque à deux diodes

II.4.2.1. Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque à deux diodes:

C'est le modèle qui décrit le mieux la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque (Figure I.23) , trois mécanismes essentiels sont pris en compte [37][38][40] :

- Le mécanisme de recombinaisons dans les régions quasi-neutres, modélisé par UN terme exponentiel Id1 comportant un courant de saturation Is1.
- Le mécanisme de recombinaisons dans la zone de charge d'espace, représenté par un terme exponentiel Id2 comportant un courant de saturation inverse Is2.
- Le troisième mécanisme pris en compte est l'effet Joule qui se traduit par des pertes d'énergie dans les résistances série Rs et shunt Rsh.

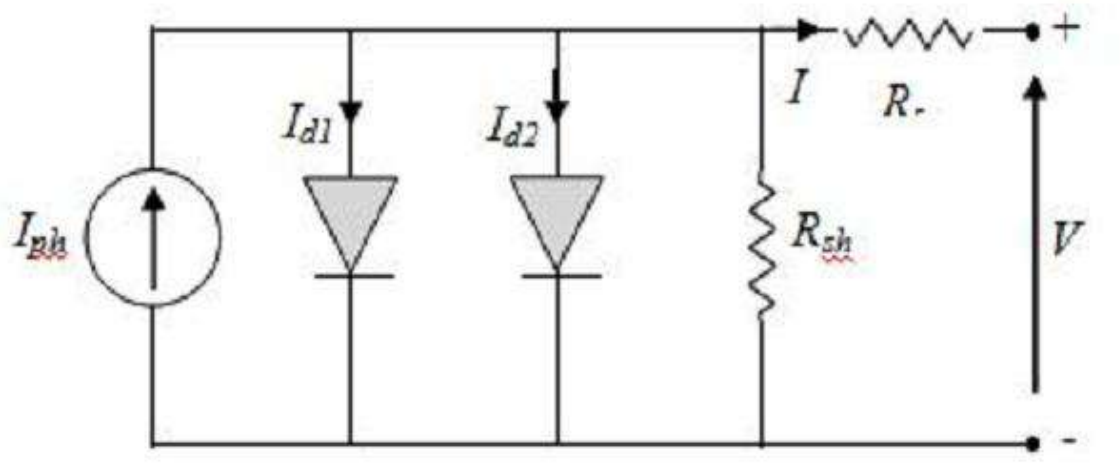


Figure II.6. Schéma électrique équivalent du modèle à deux exponentielles de la cellule solaire.

II.4.2.2. Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque à deux diodes :

Le modèle mathématique est donné par l'équation suivante

$$I = I_{ph} - I_{d2} - I_{sh} \qquad \text{(II-7)}$$

$$I = I_{ph} - I_{01}\left[exp\left(\frac{q(V+R_sI}{N_{CS}.Gamma\ .k.T_C}\right) - 1\right] - I_{02}\left[exp\left(\frac{q(V+R_sI}{N_{CS}.Gamma\ .K.T_C}\right) - 1\right] - \frac{V-R_sI}{R_{sh}} \qquad \text{(II-8)}$$

I : Courant fourni par le module de (A).

V : Tension aux bornes du module (V).

I_{ph} : Photo-courant, proportionnelle à l'irradiation G, avec une correction en fonction de T_C (A).

$$I_{ph} = \left[I_{ph\,ref} - \mu_{Isc}(T_C - T_{C\,ref})\right]\frac{G}{G_{ref}} \quad \text{(II-9)}$$

$$I_{ph} = \left[1 + \left(T_C - T_{C\,ref}\right).5.10\text{^} - 4\right]\frac{G}{G_{ref}} * I_{ph\,ref} \quad \text{(II-10)}$$

G et G_{ref} = Irradiation efficace et de référence (W / m²).

T_C et $T_{C\,ref}$ = Température de cellule efficace et de référence (° K).

μ_{Isc} = Coefficient de température du courant photoélectrique (ou court-circuit).

Io = Courant de saturation inverse, en fonction de la température (A)

$$I_{01} = K1.(T_C).exp\left(\frac{E_g}{T_C\ k}\right) \quad \text{(II-11)}$$

$$I_{01} = K2.(T_C).exp\left(\frac{E_g}{T_C\ k}\right) \quad \text{(II-12)}$$

$$k1 = 1.2\frac{A}{m^{2.}}k^3 \qquad k2 = 2.9\frac{A}{m^{2.}}k^{5/2}$$

k = constante de boltzman.

II.5. Modélisation d'un générateur (champ) photovoltaïque (GPV)

II.5.1. Modélisation d'un générateur (champ) photovoltaïque à une seule diode

II.5.1.1. Modèle électrique d'un champ photovoltaïque à une diode :

Chaque group de panneau est une association série/parallèle de NS.NP panneau élémentaires.

Si touts les panneaux sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, nous obtenons le GPV suivant :

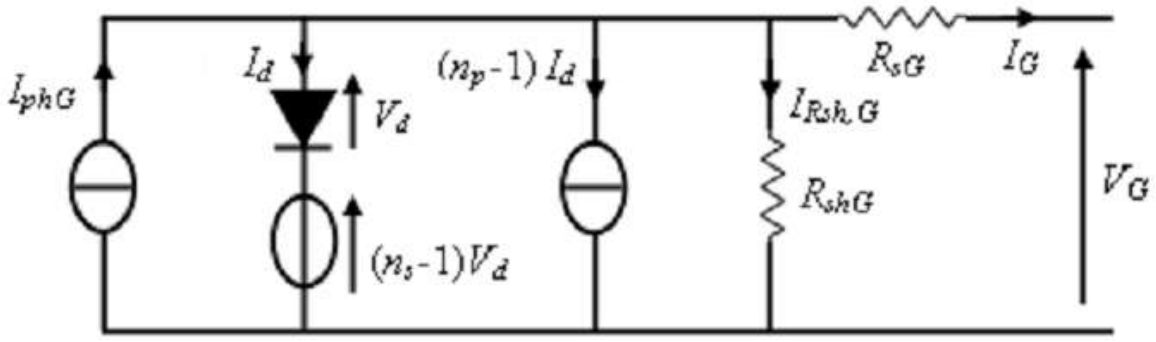


Figure II.7: Schéma électrique équivalent d'un groupe de panneaux, modèle 1diode

II.5.1.2. Modèle mathématique d'un champ photovoltaïque à une diode :

Nous adoptons dans ce qui suit, les notations suivantes :

$$I' = N_{pp}.I_{ph} - N_{pp}.I_0\left[exp\left(\frac{q(V'+R'_sI')}{N_{ps}.N_{Cs}.Gamma\ .k.T_C}\right)-1\right]-\frac{V'-R'_s.I'}{R'_{sh}} \quad \text{(II-13)}$$

II.5.1.2. Paramètres externes :

Ce sont des paramètres pouvant être détermines à partir des courbes I(V) ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sons les suivants [36] :

Courant de court-circuit I_{cc}

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle.

Dans le cas idéal (R_s nulle, R_{sh} infini) ce courant s confond avec le photo-courant I_{ph}.

Dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (II-14) et on obtient :

$$I_{CC} = I_{ph} - I_0\left[exp\left(\frac{q(R_sI_{CC})}{N_{CS}.Gamma\ .k.T_C}\right)-1\right]-\frac{R_s.I_{cc}}{R_{sh}} \quad \text{(II-14)}$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance serie est faible), on peut négliger le terme

$$I_0\left[exp\left(\frac{q(R_sI_{CC})}{N_{CS}.Gamma.k.T_C}\right)-1\right] devant\ I_{ph}$$

L'expression approchée du courant de court-circuit est alors celle donnée par l'expression

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{1+\frac{R_s}{R_{sh}}} \quad \text{(II-15)}$$

Tension de circuit ouvert V_{co}

C'est la tension pour laquelle le courant débité par le GPV est nul (la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur PV). Son expression est déduite de l'expression suivante :

$$0 = I_{ph} - I_0\left[exp\left(\frac{q.V_{CO}}{N_{CS}.Gamma\ .k.T_C}\right)-1\right]-\frac{V_{CO}}{R_{sh}} \quad \text{(II-16)}$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inferieure à $V_{CO} = \frac{N_{CS}.Gamma\ .k.T_c}{q}.ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}+1\right)$

II.5.2. Modèle électrique d'un générateur (champ) photovoltaïque à deux diodes (GPV)

Le modèle électrique de générateur photovoltaïque est donné par la figure suivante [39]:

II.5.2.1. Modèle électrique d'un champ photovoltaïque à deux diodes :

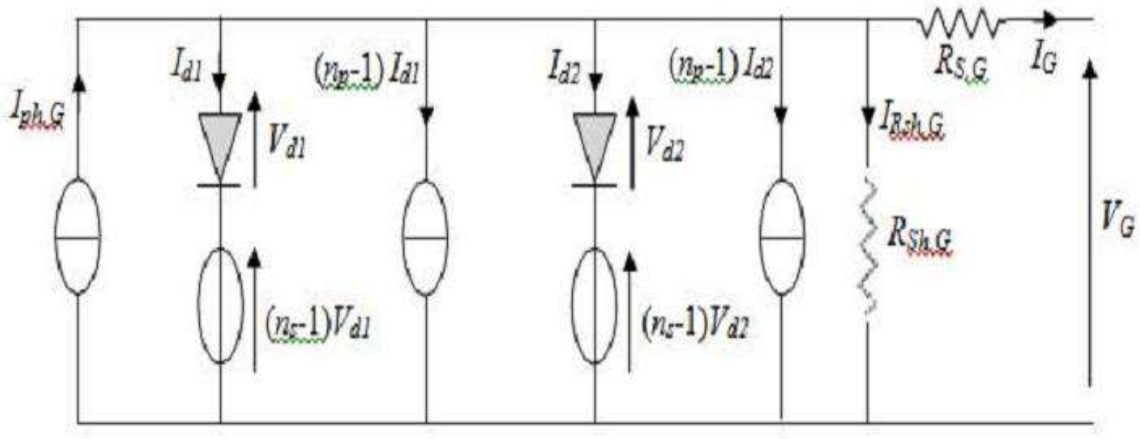


Figure II.8: Schéma électrique équivalent d'un générateur photovoltaïque

II.5.2.1. Modèle mathématique d'un champ photovoltaïque à deux diodes :

Nous adoptons dans ce qui suit, les notations suivantes :

$$I'_1 = N_{pp} \times I_{01} \qquad I'_2 = N_{pp} \times I_{02} \qquad V' = N_{ps} \times V \qquad R'_s = \frac{N_{ps}}{N_{pp}} R_s$$

$$R'_p = \frac{N_{ps}}{N_{pp}} R_p + \frac{N_{ps}}{N_{pp}} R_p (\alpha - 1) e^{-5.5 * G/G_{ref}} \qquad \text{(II-17)}$$

Alors on obtient, une fonction implicite de la forme :

$$I' = N_{pp} . I_{ph} - I'_1 \left[exp\left(\frac{q(V' + R'_s I)}{N_{ps} . N_{Cs} . Gamma \ . k . T_C} \right) - 1 \right] - I'_2 \left[exp\left(\frac{q(V' + R'_s I'}{N_{ps} . N_{CS} . Gamma \ . k . T_c} \right) - 1 \right] - \frac{V' - R'_s I'}{R'_{sh}} \qquad \text{(II-18)}$$

II.6. Résultat de la simulation de GPV à une seule diode:

La figure suivante la caractéristique I(V) et P(V) du générateur photovoltaïque en utilisant le modèle à une diode étude lors d'un fonctionnement sous les conditions standards. (T_c=25°C et G_{ref}=1000 W/m2).

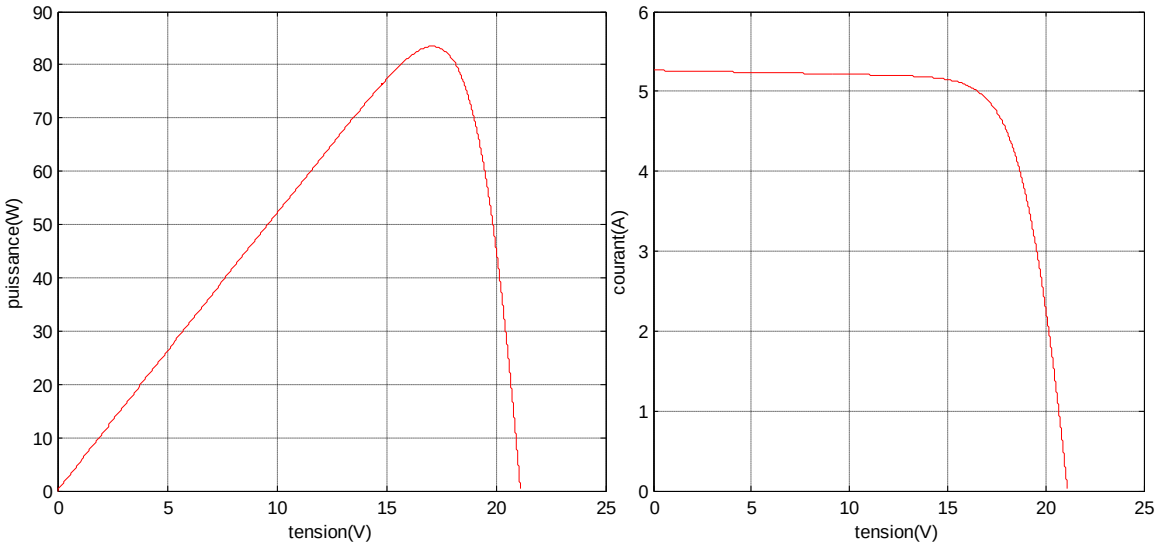


Figure II.9 : Caractéristiques obtenues pour les conditions standards d'éclairement 1000 W/m² et de température 25 °C.

II.6.1. Influence de l'éclairement

Le photo-courant I_{ph} est pratiquement proportionnel à l'éclairement ou aux flux lumineux G.

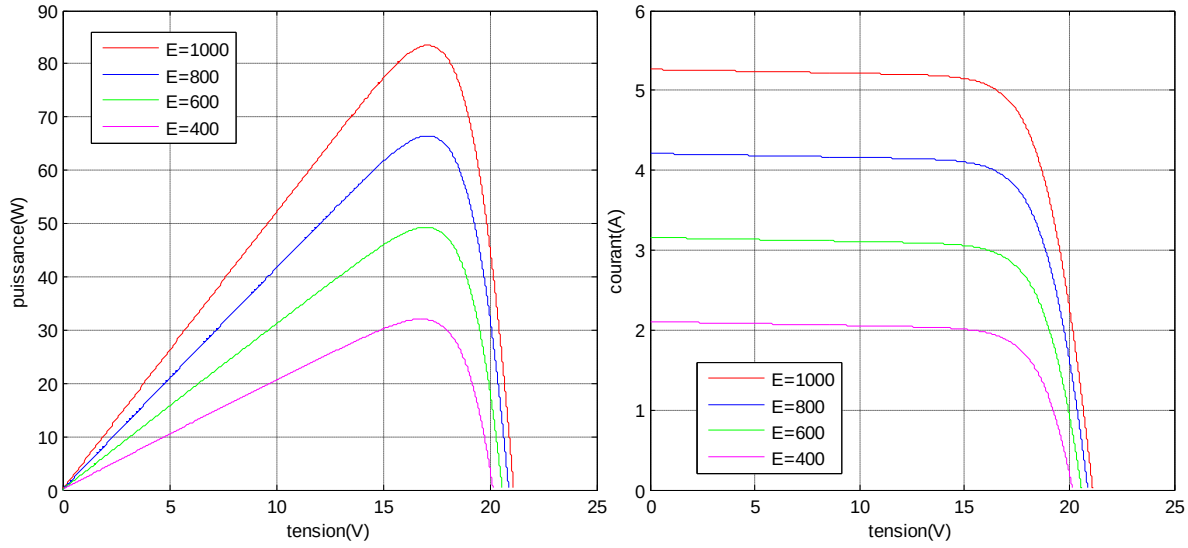


Figure II.10 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I(V) et P(V).

Les figures représentent les caractéristiques I(V) et P(V) d'un panneau photovoltaïque sous diverses valeurs d'éclairement. A chacune de ces valeurs de G, correspond une puissance électrique maximale que pourrait fournir le panneau. Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert V_{CO}, suite à une chute du flux lumineux.

I.6.2. Influence de la température

Si la température augmente, le photo-courant augmente, implique le courant augmente. Par contre la tension du circuit ouvert Vco engendre une diminution.

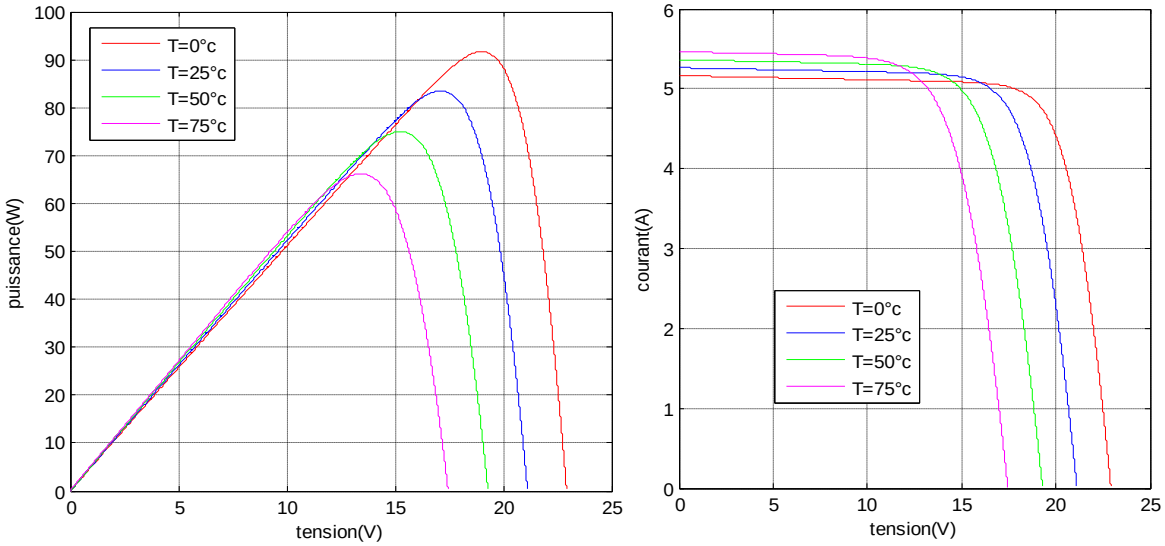


Figure. II.11 : Influence de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V).

L'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible. On résume, un niveau d'ensoleillement élevé favorise la production d'électricité par l'effet photovoltaïque, tandis que les températures élevées diminuent le rendement des panneaux.

II.6.3. Influence du branchement série parallèle sur les caractéristiques I(V) et P(V)

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné.

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée comme indique la figure suivante.

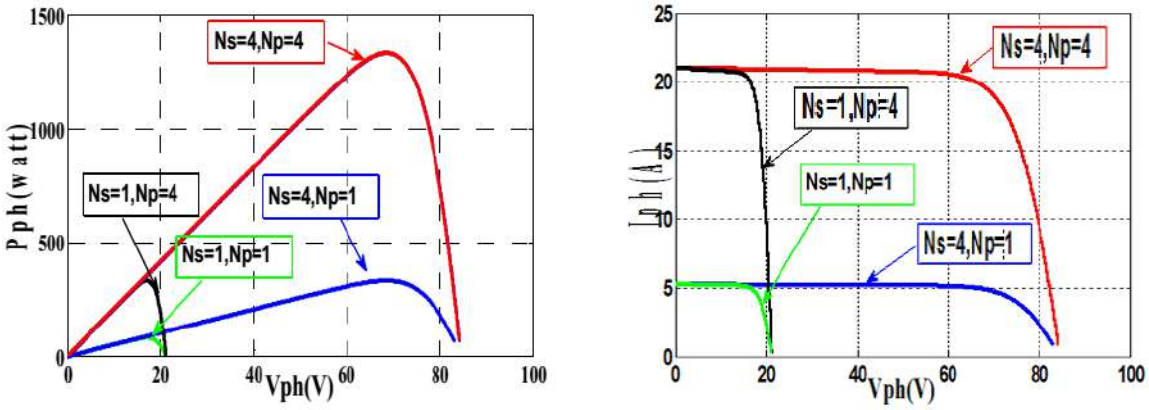


Figure. II.12 : Influence du branchement série parallèle sur les caractéristiques I(V) et P(V).

II.7. Modélisation des accumulateurs électrochimiques

Compte tenu du caractère relativement complexe des accumulateurs électrochimiques, il s'avère difficile de développer un modèle général. Le différent model existant dans la littérature [1] est d'une mise en œuvre complexe notamment à cause du nombre élevé de paramètres à déterminer.

Les deux types de batteries, utilisés le plus couramment, notamment dans les systèmes photovoltaïques, sont les batteries avec accumulateurs au plomb-acide (Pb acide) et les batteries avec accumulateurs au Nikel-cadmium (Ni-Cd). La batterie au plomb-acide est la plus connue, aussi c'est sur celle-ci que notre étude se base.

Le circuit sur la figure décrit les caractéristiques d'une batterie plomb-acide d'une manière complète, pourtant très simplifiée, rapportée par Lu, Liu et Wu [2] ;

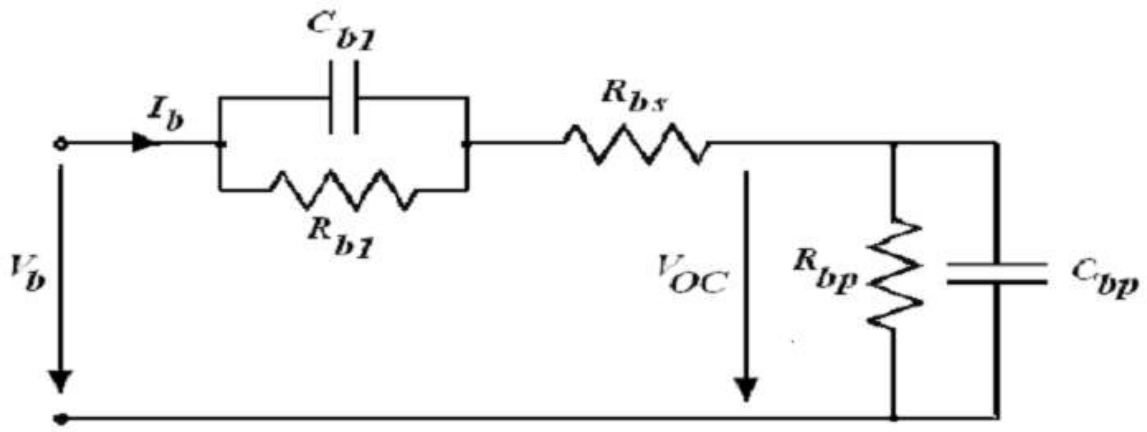


Figure. II.13: Modèle équivalent d'une batterie plomb-acide.

C_{bp} est la capacité de la charge de la batterie

La résistance interne de la batterie est représentée par les deux résistances R_{bs} et R_{b1} en série. La résistance en bloc d'électrolyte et de plaques est représentée par la résistance R_{bs}, tandis que la résistance R_{b1} représente la diffusion d'électrolyte. Ceci représente la tension du circuit ouvert de la batterie dés qu'une charge est reliée, de même on peut observer un saut soudain de tension avec l'application d'un courant de remplissage. C'est le fabriquant qui spécifie les valeurs de ces résistances et capacités.

La décharge spontanée, est représentée par la résistance R_{bp} parallèle avec le condensateur principal C_{bp}. Elle est provoquée par électrolyse de l'eau aux tensions élevées et par la fuite lente à travers les bornes de batterie aux basses tensions [34]

La constante de temps est donnée par : $\tau_{b1} = R_{b1}C_{b1}$

L'impédance équivalente d'entrée d'une batterie plomb-acide s'exprime par la fonction de transfert suivante :

$$Z(S) = \frac{a_2S^2+a_1S+a_0}{b_2S^2+b_1S+b_0} \qquad \text{(II-19)}$$

$$z(p) = Rbs + (Rb1 \| Cb1) + (Rbp \| Cbp) \qquad \text{(II-20)}$$

$$\mathrm{Z(S)} = \mathrm{Rbs} + \frac{\mathrm{Rb\,1}}{\mathrm{Rb\,1.Cb\,1\ s+1}} + \frac{\mathrm{Rbp}}{\mathrm{Rbp\,.Cbp\ \ s+1}} \qquad \text{(II-21)}$$

Les facteurs a1, a2, b1, b2 et a0 s'expriment en fonction des éléments du circuit de la figure.

- a2=Rbs.Rb1.Rbp.Cb1.Cbp
- a1=Rbs.Rb1.Cb1+Rbs.Rbp.Cbp+Rb1.Rbp.Cbp+Rbp.Rb1.Cb1
- a0=Rbs+Rb1+Rbp
- b_2=Rb1RbpCb1Cbp

- b_1=Rb1Cb1+RbpCbp
- b_0=1

C'est donc un modèle qui décrit assez bien l'ensemble des composantes d'une batterie plomb-acide, mais pas ses caractéristiques lentement changeantes telles la charge et la décharge. Une modélisation plus robuste de la même batterie a été proposée dans la littérature [41][42].

II.7.1. Description du modèle

La structure générale d'une batterie. Elle est représentée par quatre blocs comme indique la figure (II.4.) :

a) Bloc capacité ;

b) Bloc de tension ;

c) Bloc de l'état de charge (SOC) ;

d) Bloc des pertes par le courant de gazage.

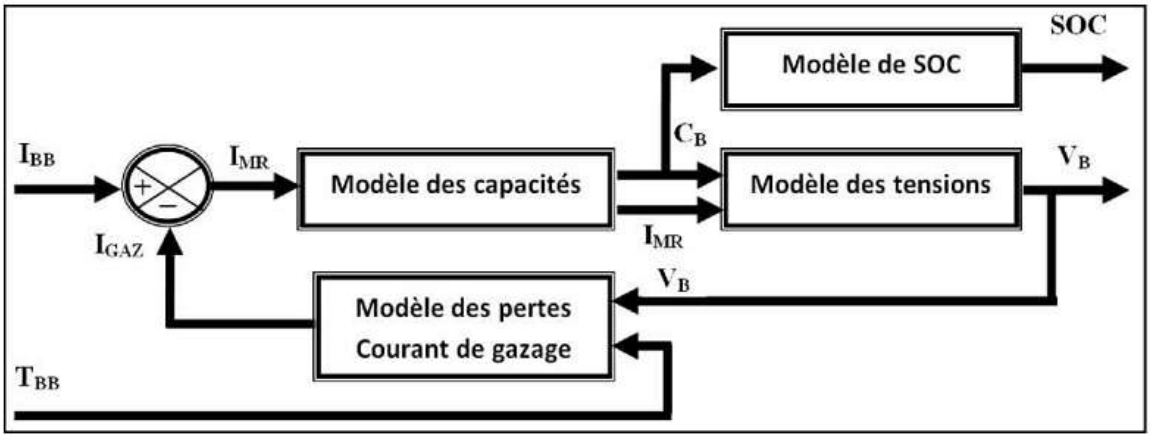


Figure II.14: Schéma de bloc d'une batterie

D'après le modèle proposé, Le courant principal de réaction de la batterie I_{MR} s'exprime comme suit:

$$I_{MR}(t) = I_{BB}(t) - I_{GAZ}(t) \qquad \text{(II-22)}$$

Avec :

I_{BB} : Courant de la batterie (A);

I_{GAZ} : Courant de gazage de la batterie (A).

II.7.1.1. Modèle de la capacité :

La capacité représente la quantité du courant qui peut être extraite d'une électrode via les « Masses actives », c'est-a-dire l'électrolyte et les matériaux actifs des électrodes, sur une décharge, et en pratique, elle dépend du courant, ainsi que de la température [32].

Le modèle de la capacité est décrit par l'intégrale du courant $I_{MR}(t)$ pendant un temps déterminé.

$$C_B(t) = \int I_{MR}(t) + C_{BI}(t)dt \qquad \text{(II-23)}$$

Avec :

$C_B(t)$: Capacité de batterie (Ah);

$C_{Bi}(t)$: Capacité initiale de batterie (Ah).

II.7.1.2. Modèle des pertes par courant de gazéification

Le courant de gazéification du batterie est donné par l'équation suivante:

$$I_{GAZ}(t) = \frac{C_{10}}{100Ah} I_{GO}.e^{[C_V(V_{ELE}(t)-2.23+C_T(T_{BB}(t)-20)]} \qquad \text{(II-24)}$$

Avec :

C_{10} : Capacité de batterie au taux de dix heures de décharge (Ah).

I_{GO}: Courant normalisé de gazéification (A);

C_V: Coefficient de tension (V^{-1});

V_{ELE}: Tension d'un élément de la batterie (V);

C_T: Coefficient de température (K^{-1});

T_{BB} : Température de la batterie (K).

II.7.1.2. Modèle de l'état de charge (ou SOC)

L'état de charge de la batterie est décrit comme étant le rapport entre la valeur de la capacité de batterie CB(t) et la valeur de la capacité de la batterie après un temps de décharge de dix heures 10 C

$$SOC(t) = \frac{C_B(t)}{C_{10}}\ 100\% \qquad \text{(II-25)}$$

Une batterie électrochimique ne peut être exploitée, a sa pleine puissance, sur toute sa plage d'état de charge. Il existe en effet, une zone de travail a privilégier pour la batterie, globalement entre 30 et 70% de l'état de charge qui permet de solliciter la batterie avec des

rendements acceptables. Il en résulte une perte de potentiel considérable qui est fonction de la puissance souhaitée, en d'autres termes de la rapidité de charge ou de décharge [33].

II.7.1.3. Modèle de la tension

La tension est caractérisée par deux processus, la tension de charge et la tension de décharge de la batterie. Pour les distinguer nous utiliserons le C comme indice de charge et D pour la décharge.

Pour la charge $\mathbf{I_{BB} > 0}$

La tension de charge est décrite par l'équation suivante :

$$V_B(t) = E_B(t) - R_{OC} - I_{MR}(t) \quad \text{(II-26)}$$

Avec :

R_{CO} : La résistance interne de chargement.

E_B : La tension interne de la batterie

La tension interne de la batterie EB(t) elle est décrite par l'équation ci-dessous :

$$E_B = E_{OC} + A_C X(t) + \frac{C_C\, X(t)}{(D_C - X(t))^{EFD}} \quad \text{(II-27)}$$

Avec :

E_{OC} : Limite de tension interne de la batterie pour un courant nul et la batterie complètement déchargée.

$X(t)$: Capacité maximum normalisée de charge/décharge.

$$X(t) = \frac{Q_{MAXCD}}{Q_{MAX}\,(I_{MR}\ (t))}\ C_B(t) \quad \text{(II-28)}$$

Avec :

Q_{MAXC}: Capacité maximale de charge (Ah).

$Q_{MAX}(I_{MR}(t))$: Capacité maximale de la batterie.

$$\mathrm{Q}_{MAX}(I_{MR}(t) = C_1 I_{MR}^3(\mathrm{t}) + C_2 I_{MR}^2(\mathrm{t}) + C_{MR}^1(t) + C_4 \quad \text{(II-29)}$$

Où les paramètres AC, CC, DC, EFC, C1, C2, C3, C4 sont relatifs à la batterie (Annexe).

Pour la décharge $\mathrm{I_{BB}} < 0$

La tension de décharge est décrite par l'équation suivante :

$V_B(t) = E_B(t) - R_{OD} - I_{MR}(t)$ (II-30)

Avec :

R_{OD} : La résistance interne de la décharge(Ω).

Effectivement, en charge, la résistance interne dépend encore de l'état de charge de l'accumulateur électrochimique. Sa valeur devient d'autant plus importante lorsque nous approchons de la pleine charge.

Et dans un raisonnement à courant constant, il y aura d'autant plus de pertes que nous nous approchons de la pleine charge et le rendement en charge de l'accumulateur sera donc plus faible dans cette zone [30].

E_B: La tension interne de la batterie.

$$E_B = E_{OD} + A_D X(t) + \frac{C_D\ X(t)}{(D_D - X(t))^{EFD}} \quad \text{(II-31)}$$

Avec :

E_{OD} : Limite de la tension interne de batterie pour un courant nul et la batterie complètement chargée;

$X(t)$: Capacité maximum normalisée de charge/décharge.

$$X(t) = \frac{Q_{MAXCD}\ (Q_{MAXCD} - C_B(t))}{Q_{MAX}\ (I_{MR}\ (t))} \quad \text{(II-32)}$$

Avec :

Q_{MAXCD} : Capacité maximale de décharge (Ah);

$Q_{MAX}(I_{MR}(t))$: Capacité maximale de la batterie.

$$Q_{MAX}(I_{MR}(t) = D_1 I_{MR}^3(t) + D_2 I_{MR}^2(t) + D_{MR}^1(t) + D_4 \quad \text{(II-33)}$$

Où les paramètres A_D, C_D, D_D, EFD, D_1, D_2, D_3, D_4 sont relatifs à la batterie (Annexe).

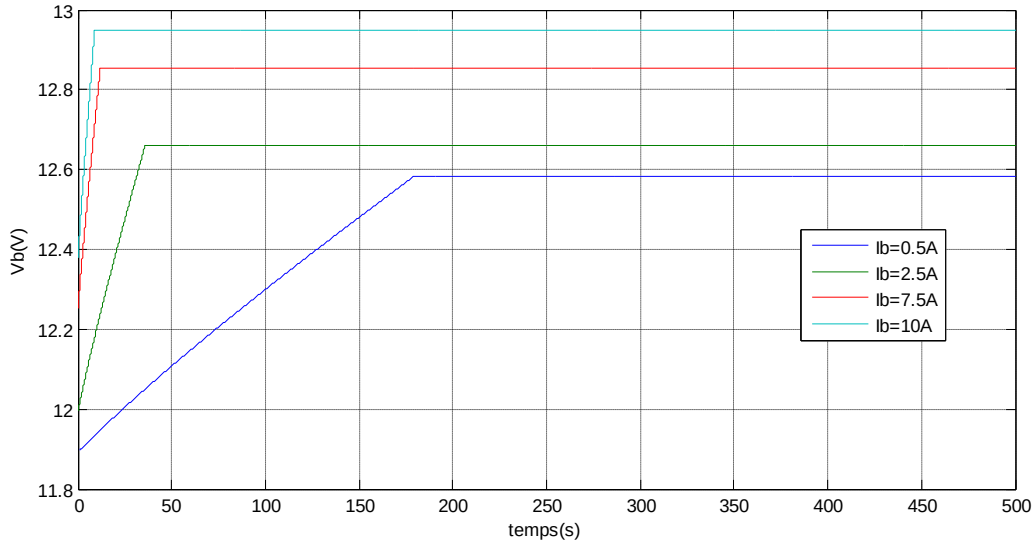
II.7.2. Résultat de la simulation

Pour valider le modèle proposé [31], nous avons entrepris des essais par simulation de la charge et de la décharge de la batterie, pour différents courants batterie IBB .Les allures des courbes VBB (t) et SOC (t) décrivent les résultats que nous avons obtenus avec une batterie 12 V, sachant que dans notre application nous utilisons deux batteries de 12 [V] en série (voir ses caractéristiques en l'annexe).

Ces résultats sont portés sur les deux figures suivantes :

- ✓ **Charge:** $\boldsymbol{I_{BB} > 0}$

La tension Vb



Le SOC

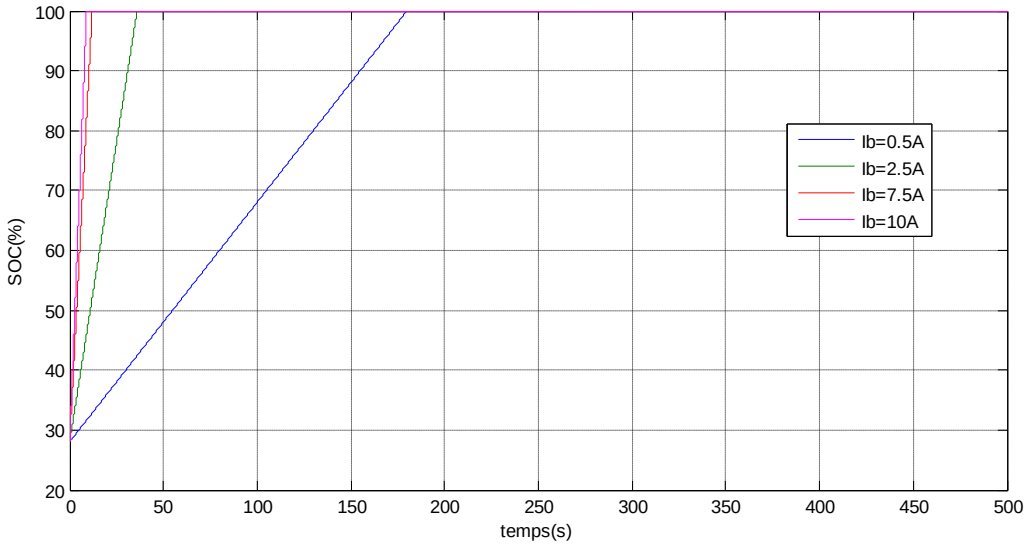
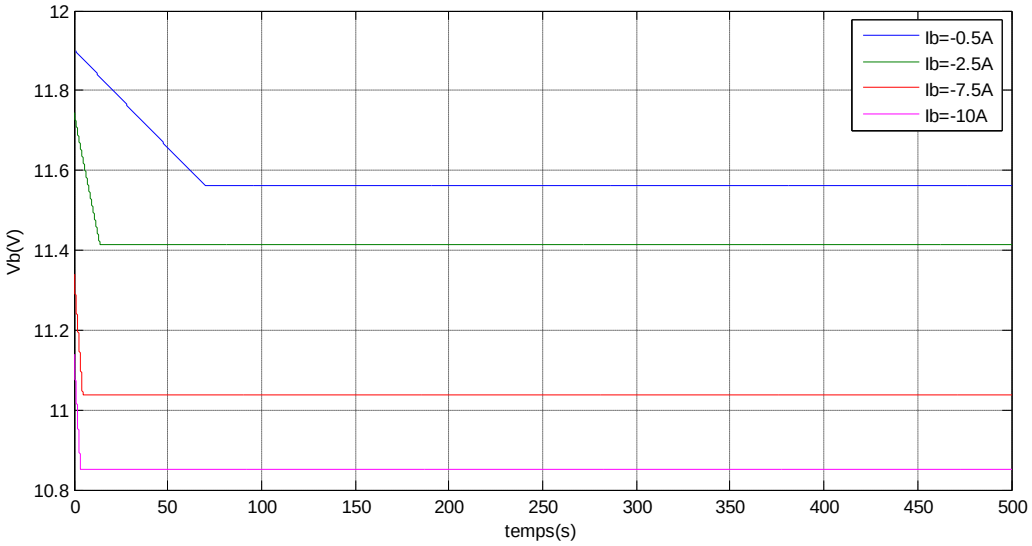


Figure. II.15: Comportement de la batterie lors de la charge.

La figure montre bien l'effet de l'importance du courant sur le temps de chargement de la batterie. Pour exemple, la batterie se charge sur une durée de 10 [s] pour un courant de 10A, alors qu'elle met 170 s lors d'un courant de 0,5A. Nous observons également, que lorsque le courant est faible la tension finale de charge est relativement faible n'atteignant jamais sa valeur nominale. Ces courbent montrent aussi l'effet de la capacité initiale de la batterie.

- ✓ **Décharge :** $\boldsymbol{I_{BB} < 0}$

La tension Vb



Le SOC

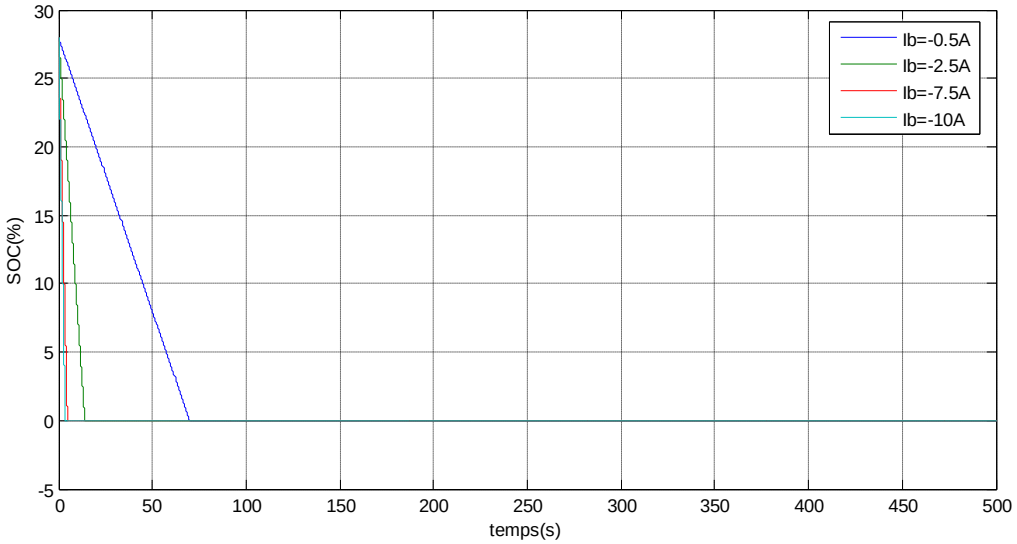


Figure. II.16: Comportement de la batterie lors de la décharge.

Pour le processus de la décharge, nous observons un comportement à peu de choses près identique sauf qu'il semblerait présenter un petit changement dans la forme de l'allure de la courbe. Ceci peut s'expliquer par le phénomène d'hystérésis présent dans la batterie.

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons procédé à la modélisation d'un générateur photovoltaïque en utilisant le modèle à une et à deux exponentielles. Ce dernier est le modèle le plus adapté pour une bonne compréhension des phénomènes physiques intervenant dans chaque région du dispositif, ainsi que pour une simulation adéquate du fonctionnement des cellules solaires.

La simulation effectuée nous a permis d'obtenir des caractéristiques très proches de celles du générateur photovoltaïque réel, ce qui nous a permis de valider notre modélisation. Comme les caractéristiques du générateur photovoltaïque dépendent des paramètres internes de ce dernier et des paramètres météorologiques, il nous a parut nécessaire d'étudier l'influence de ces paramètres sur les caractéristiques de sortie du générateurs photovoltaïque.

Par ailleurs, nous avons constaté que l'influence de la variation des paramètres internes de la cellule sur les caractéristiques du GPV est moins importante que celle des paramètres météorologiques. Ainsi, dans la suite de notre travail on s'intéressera uniquement à l'étude de l'influence des paramètres météorologique sur les caractéristiques du générateur photovoltaïque, Dans le prochain chapitre, nous allons étudier la modélisation d'une éolienne à vitesse variable.

III.1. Introduction :

On a vu dans le chapitre précédent que la puissance maximale générée par un module solaire dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température. Pour avoir une puissance maximale le module solaire doit génère une certaine tension et courant de fonctionnement.

Pour que le module fourni sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque. Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC contrôlé par un mécanisme de poursuite «Maximum Power Point Tracking» (MPPT).

Certain dispositif utilise l'énergie alternative pour les alimenté par un générateur photovoltaïque il faut utiliser un convertisseur DC-AC, il y a plusieurs commande des et le but de ces commande c'est d'avoir un signale sinusoïdale.

Dans ce chapitre on va étudier un type de convertisseur DC-DC, utilisé dans les systèmes photovoltaïques. Ainsi, on décrive la commande MPPT de convertisseur DC-DC.

III.2. Electronique de puissance :

L'électronique de puissance est la branche de l'électrotechnique qui a pour objet de l'étude de la conversion statique d'énergie électrique (notamment les structure les composants, les commandes et les interactions avec l'environnement).

L'électronique de puissance traite l'énergie électrique par voie statique. Elle permet :

- Une utilisation plus souple et plus adaptée de l'énergie électrique
- Une amélioration de la gestion, du transport et de la distribution de l'énergie électrique
- Une discrétion par réduction des masses et des volumes ainsi par un fonctionnement ultrasonore des dispositifs.

La conversion statique est réalisée au moyen de convertisseur statique qu'ils sont des dispositifs qui transforme l'énergie électrique disponible en une forme appropriée à l'alimentation d'une charge. [19]

III.2.1. Convertisseurs électriques :

Les convertisseurs sont des appareils servent à transformer la tension électrique pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative.

L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (éolienne, photovoltaïque, pile à combustible…) [21].

La tension fournie par les panneaux photovoltaïques est une tension de type continu pour l'adapter à nous besoin il y a deux sorte de convertisseur (les hacheurs DC-DC, les onduleurs DC-AC)

III.3. Les Hacheurs :

Un hacheur permet de régler le transfert d'énergie d'une source continue vers la charge avec un rendement élevé. Selon la structure, il peut être abaisseur ou élévateur de tension et, dans certaines conditions, renvoyer de l'énergie à l'alimentation. Il est utilisé dans les alimentations et pour le pilotage des moteurs. [23].

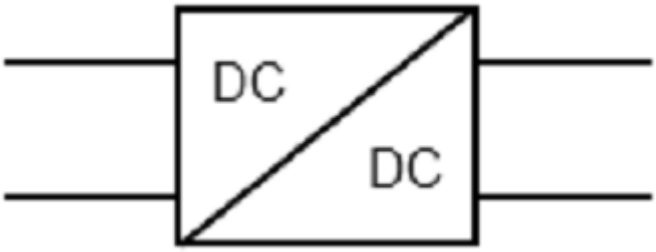


Figure.III. 1: Symbole d'un convertisseur DC-DC

III.3.1. Exigences de l'utilisateur :

La fonction essentielle d'un convertisseur de puissance est double: d'une part adapter la forme de l'énergie aux besoins d'une charge (typiquement en transformant une tension en une tension continue et/ou en modifiant le niveau de la tension) et d'autre part stabiliser ce flux d'énergie en filtrant autant que possible les fluctuations de la source.

Dans le principe, assurer ces deux fonctions n'est pas excessivement complexe: fabriquer une alimentation élémentaire demande un nombre de composants relativement réduit. Mais l'utilisateur privé ou professionnel a beaucoup d'autres exigences. Idéalement, un convertisseur doit en effet [24] :

Délivrer une ou souvent plusieurs tensions parfaitement continues, éventuellement ajustables et stables quel que soit le courant demandé;

- posséder un rendement élevé;
- présenter un niveau de sécurité élevé, notamment en répondant aux normes d'isolation entre l'utilisateur et le réseau;
- posséder une fiabilité élevée relativement à la durée de vie de l'application, en ce compris la résistance aux contraintes de l'environnement (vibrations, température, humidité, etc.);
- ne pas être une source de perturbations pour le réseau électrique amont ou les équipements environnants ni être trop sensible aux perturbations émanant de ceux-ci (compatibilité électromagnétique);
- être la plus petite et la plus légère possible;
- et bien entendu être de préférence peu coûteuse…

III.3.2. Type des hacheurs :

Nous traitons dans cette partie des convertisseurs unidirectionnels en courant et en tension. Cela implique que la fluence d'énergie ne peut se faire, au sein du convertisseur, que dans un seul sens. Cela revient également à considérer [25] :

- des sources de tension non réversibles, unidirectionnelles en courant.
- des sources de courant non réversibles, unidirectionnelles en tension.

Cela conduit à L'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples qui puissent être. Dans ce cadre, on distingue trois familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs).

- hacheur abaisseur (ou buck),
- hacheur élévateur (ou boost),
- hacheur abaisseur-élévateur (buck-boost).

III.3.2.1. Hacheur Buck :

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K figure (II.1) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [26].

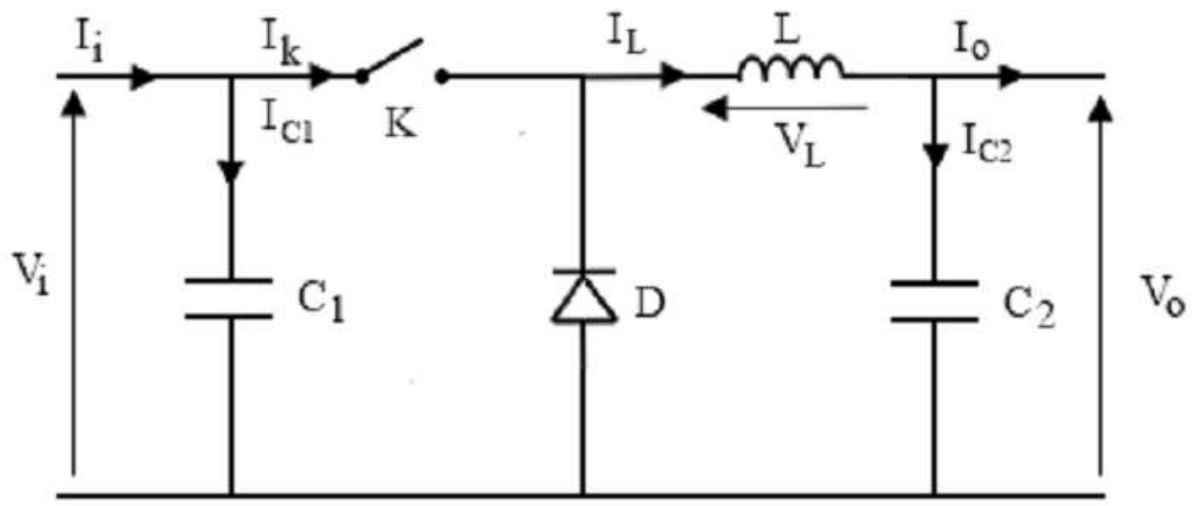


Figure.III. 2: Schéma électrique d'un hacheur buck

a) Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , la tension appliquée aux bornes de la diode est V_i . L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $f_e = \frac{1}{T_e}$. La source fournit V_i de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps $T \in [\alpha T_e, T_e]$, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle [27].

Les chronogrammes (tracés dans le cas idéal) de la figure (fig.III.3) sont tracés dans le cas d'une conduction continue, c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro. Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle [27]:

$$V_0 = \alpha . V_i \qquad \text{(III.1)}$$

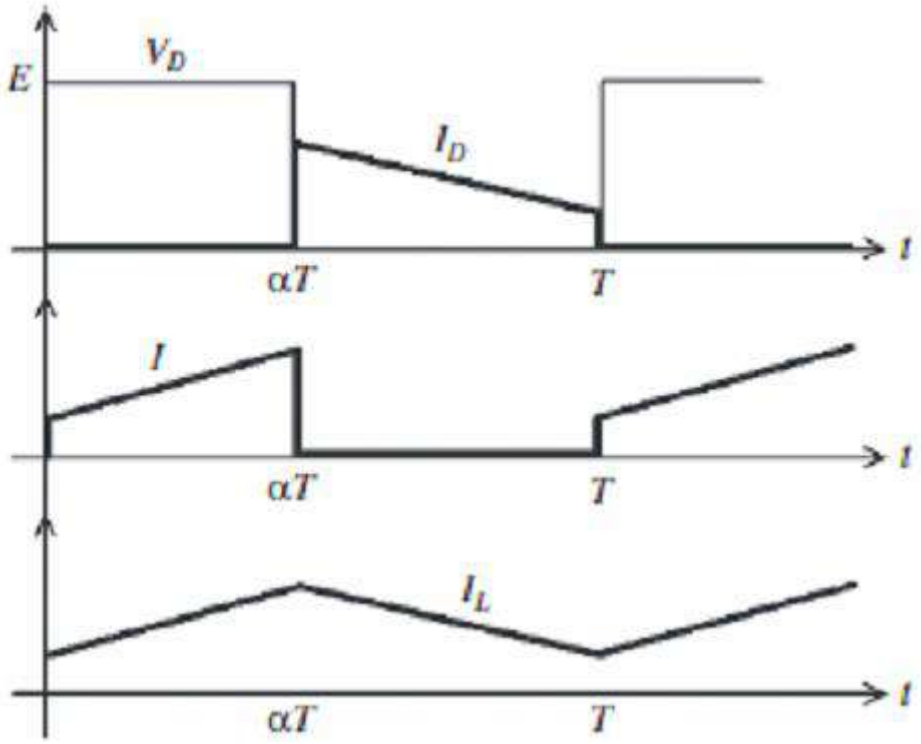


Figure.III. 3 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck

b) Modèle mathématique équivalent :

Pour savoir le comportement réel nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (figure.III.4) montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec le commutateur fermé, tandis que la figure (fig.III.5) représente le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant $(1-\alpha)T_e$ [24].

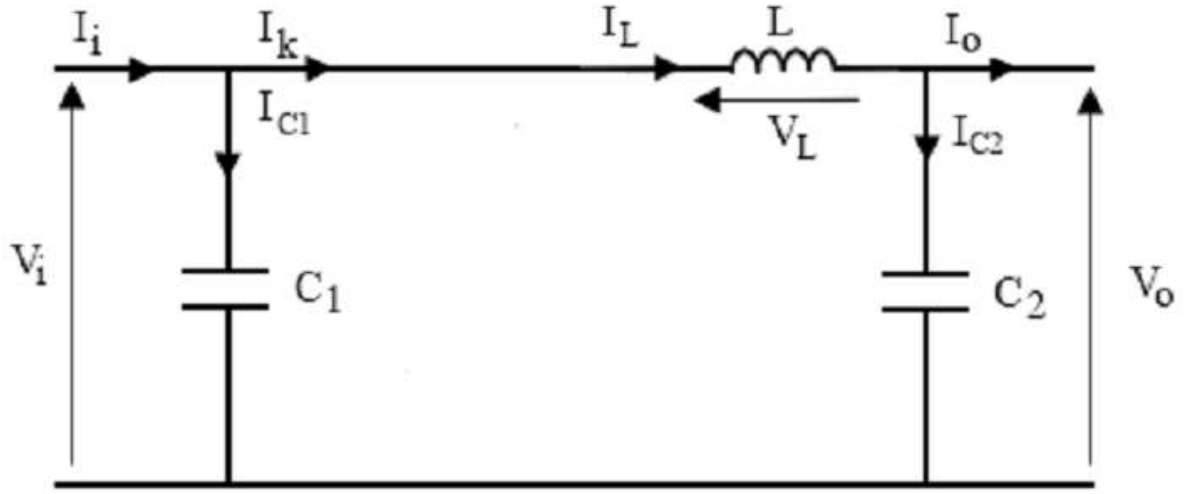


Figure.III. 4 : Schéma électrique d'un hacheur buck fermé

Lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff sur le circuit ci-dessus on aura les équations suivantes:

$$L_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad \text{(III.2)}$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \quad \text{(III.3)}$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \quad \text{(III.4)}$$

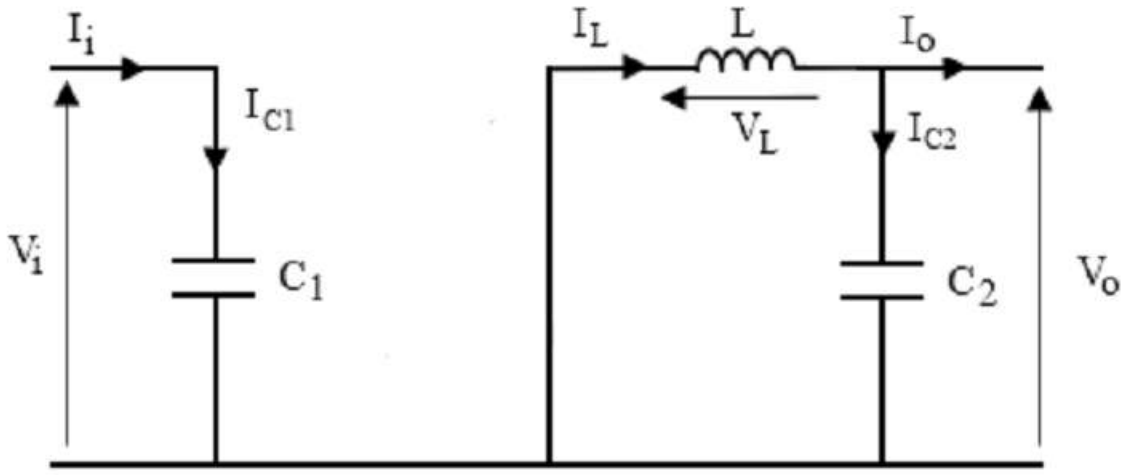


Figure.III. 5: Schéma électrique d'un hacheur buck ouvert

Les équations suivantes sont déduites de la figure (figure.III.5) :

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) \quad \text{(III.5)}$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \quad \text{(III.6)}$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = -V_0(t) \quad \text{(III.7)}$$

III.3.2.2. Hacheur boost:

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [26].

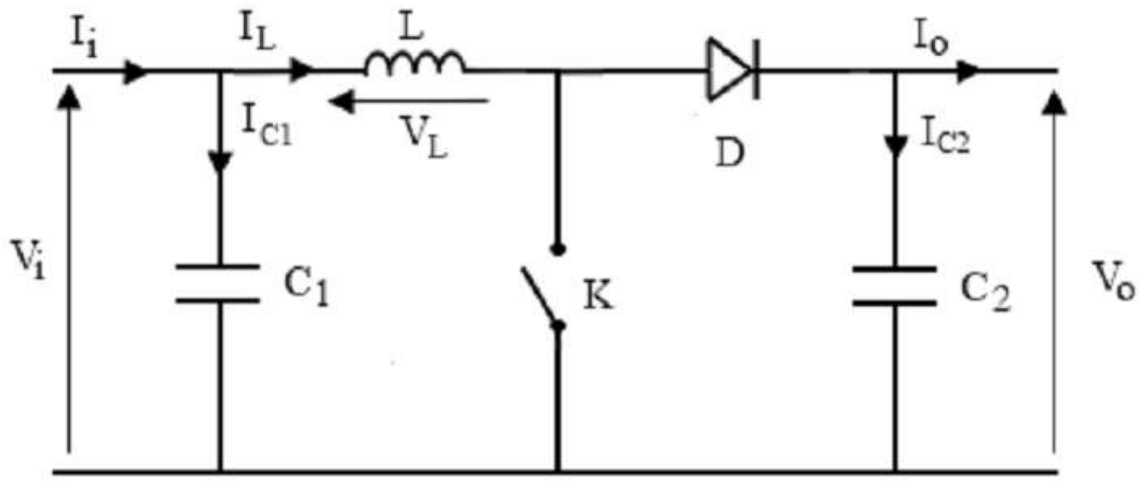


Figure.III. 6: Schéma électrique d'un hacheur boost

a) Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temp $T \in [\alpha T_e, T_e]$, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a alors$V_K = V_0$. En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [27] :

$$V_0(1-\alpha) = V_i \qquad \text{(III.8)}$$

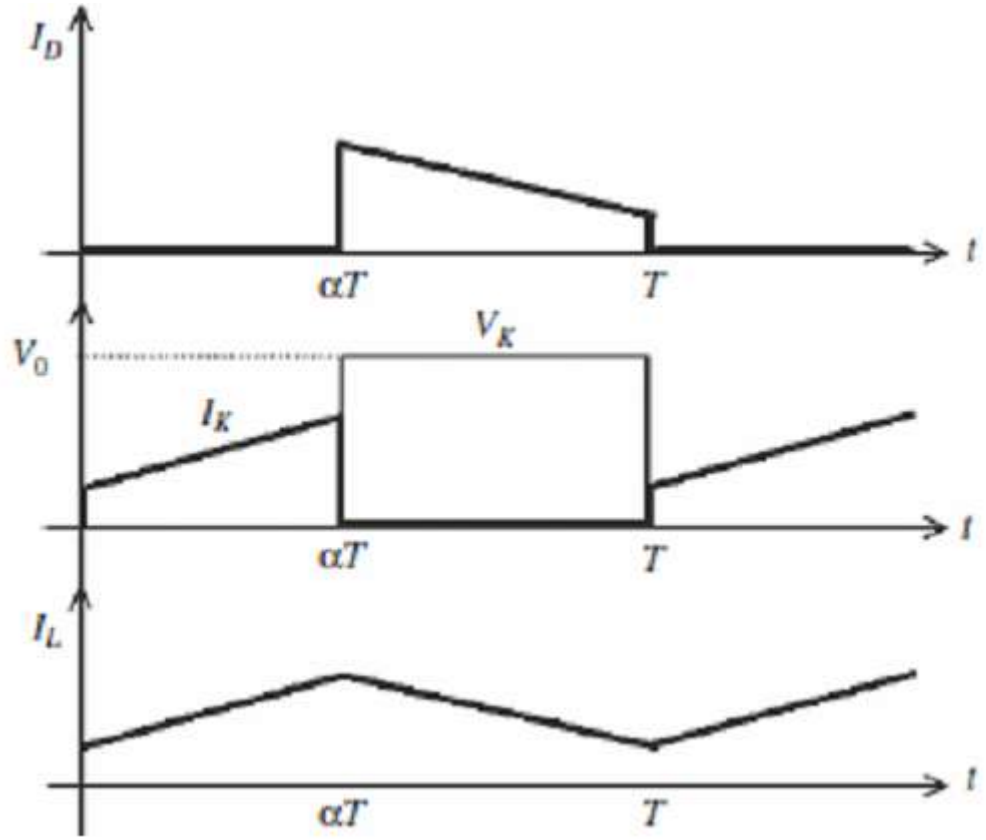


Figure.III. 7: Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost

b) Modèle mathématique équivalent :

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. celui de la figure (fig.II.9), présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c à d entre $[0, \alpha T_e]$ [24].

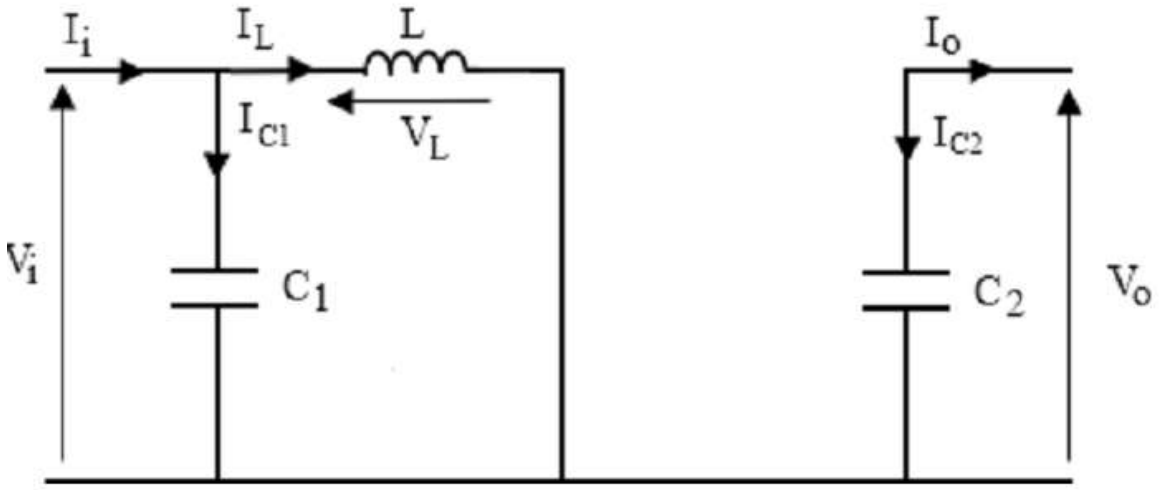


Figure.III. 8: Schéma électrique d'un hacheur boost fermé

Comme pour le circuit buck, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad \text{(III.9)}$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -I_0(t) \quad \text{(III.10)}$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \quad \text{(III.11)}$$

À l'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant:

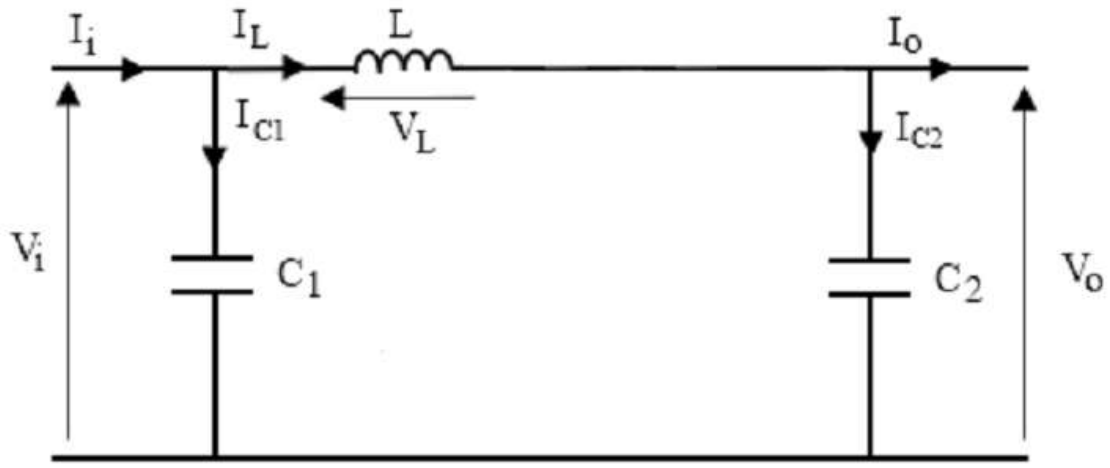


Figure.III. 9: Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad \text{(III.12)}$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \quad \text{(III.13)}$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \quad \text{(III.14)}$$

III.3.2.3. Hacheur Buck-Boost :

Le hacheur buck-boost est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [26].

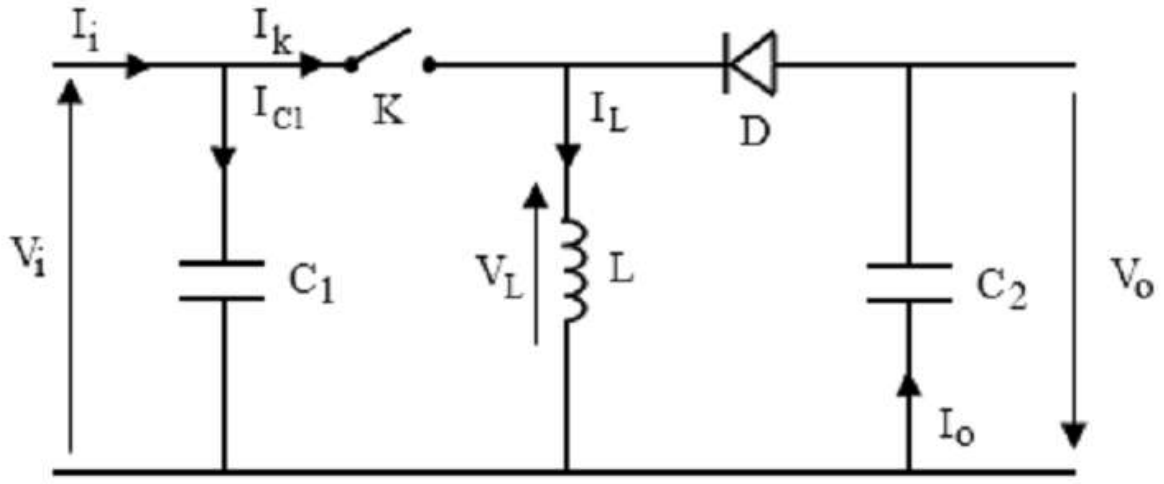


Figure.III.10: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost

a) Fonctionnement :

Cette structure de convertisseur permet d'obtenir des tensions négatives à partir de tension positive. Le schéma de principe est présenté figure (figII.11). Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , le courant augmente linéairement. La tension est égale à V_i . À l'ouverture de K, la diode prend le relais et la tension V_L est égale à $-V_i$. Par définition la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle. Il en résulte que [27] :

$V_i . \alpha . T = V_0(1 - \alpha)T$

Quand le rapport cyclique $\alpha > 0.5$ le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur boost et si le rapport cyclique $\alpha < 0.5$ le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur buck.

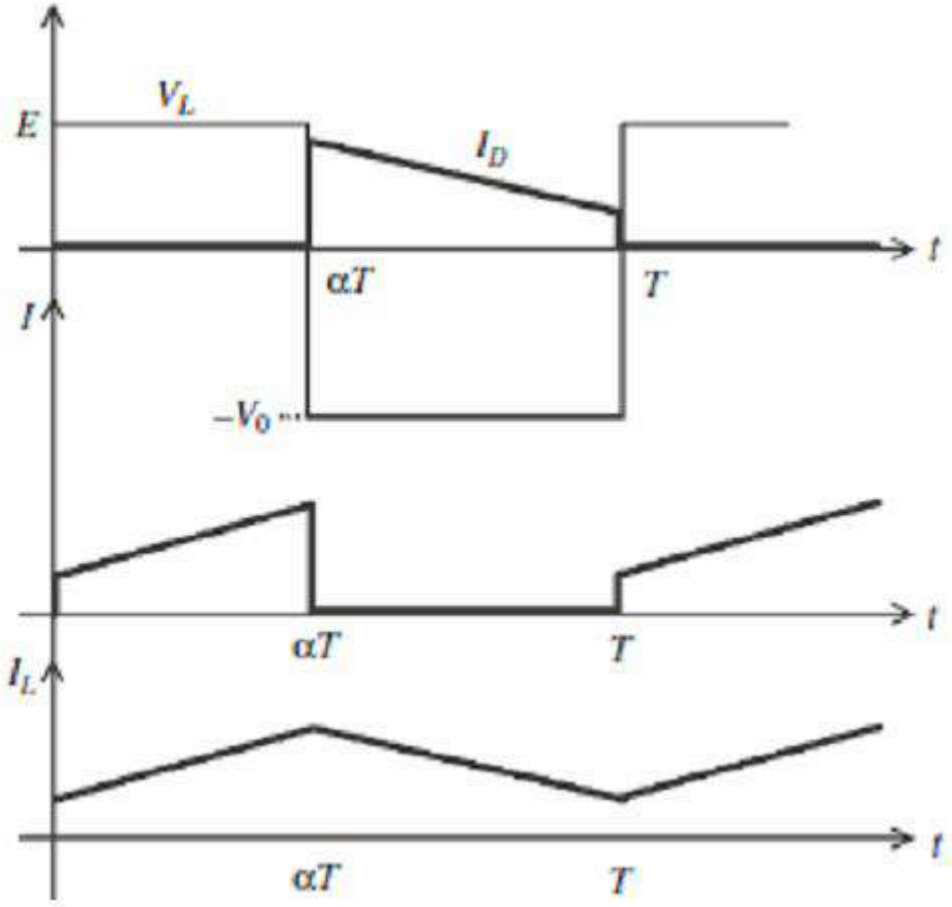


Figure.III.11: Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck-boost

b) Modèle mathématique équivalent :

Lorsque l'interrupteur K est fermé le circuit équivalent est montré sur la figure (figure.III.12)

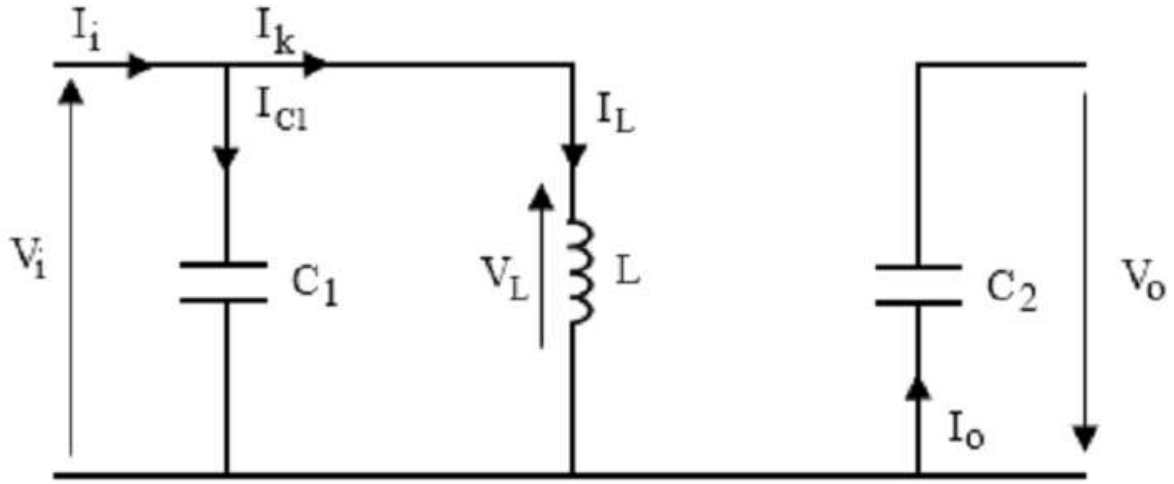


Figure.III.12: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost fermé

En appliquant la loi de Kirchhoff à ce circuit on obtiendra les équations suivantes :

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad \text{(III.16)}$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -I_0(t) \quad \text{(III.17)}$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_0(t) \quad \text{(III.18)}$$

Lorsque l'interrupteur K est ouvert le circuit équivalent apparait à la figure (figure.III.13)

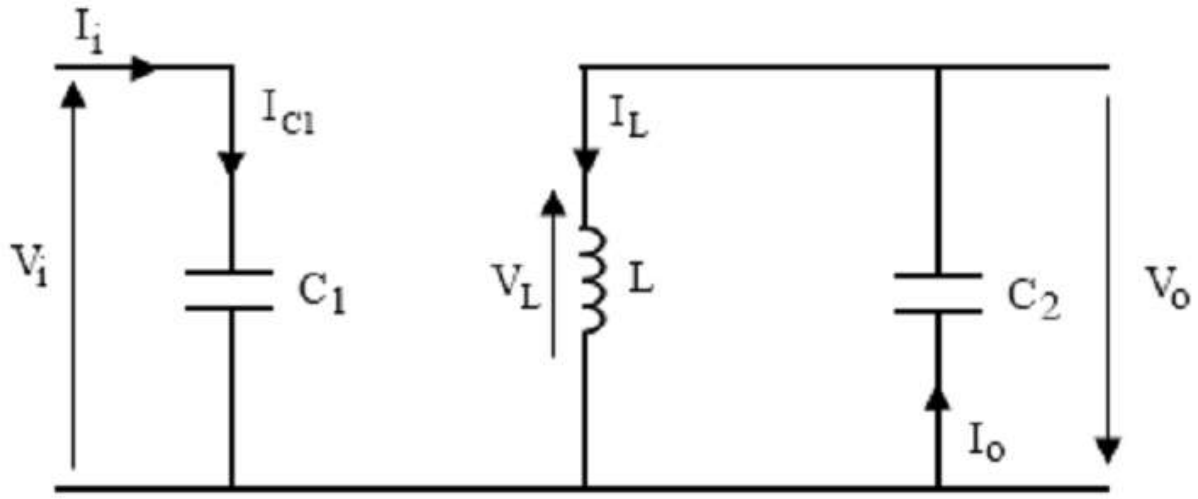


Figure.III. 13: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost ouvert

Le modèle d'équation dans cette configuration est comme suit :

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) \quad \text{(III.19)}$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \quad \text{(III.20)}$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_0(t) \quad \text{(III.21)}$$

Rapport de conversion d'un convertisseur Buck-Boost

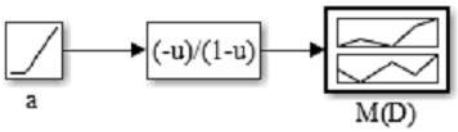


Figure.III. 14: Schéma de simulation d'un hacheur buck- boost

La figure (III.15) illustre le rapport deconversion d'un convertisseur Buck-Boost.

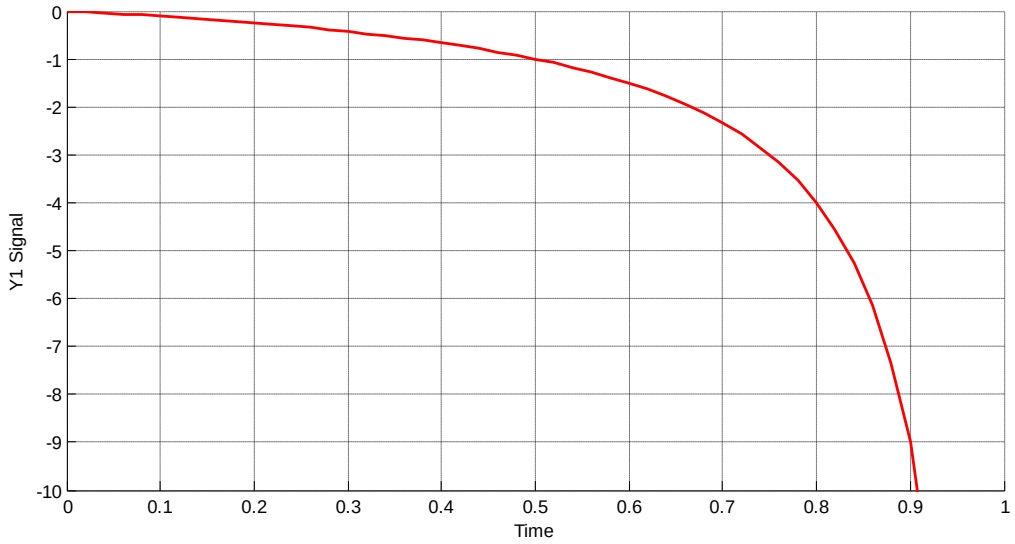


Figure III.15. Rapport de conversion M(D) en fonction du rapport cyclique D pour un hacheur buck-boost

III.4. Commande MPPT :

La poursuite de point de puissance maximale (MPPT) (The maximum power point tracker) est nécessaire pour extraire le maximum de puissance du module PV. En général, un convertisseur DC/DC est placé entre la PV et la charge, et en faisant varier le rapport cyclique du point de fonctionnement [28].

III.5. Les méthodes de poursuite de MPP :

Il existe de nombreux algorithmes utilisés pour trouver le point de puissance maximale. Idéalement, le suivi de la puissance se fait automatiquement pour s'adapter aux conditions météorologiques variables [28].

III.5.1. Méthodes a contre réaction de tension :

Ce genre de mécanismes repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par la comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la PWM de commande afin d'annuler cette erreur. Selon la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe) on a trois types de méthodes [29]:

- Méthode à tension de référence fixe
- Méthode a tension de référence en fonction de
- Tension de référence extrême (Cellule pilote)

III.5.2. Méthodes a contre réaction de courant :

Cette méthode utilise seulement une mesure de courant pour obtenir l'information sur le point opérationnel et actuel du système [30]. Permet de savoir la valeur du courant optimal dans lequel doit fonctionner le panneau pour extraire le maximum de puissance [29] la puissance générée par les panneaux solaires. Ainsi pour un point donne on fait la recherche dans un certain sens, si on a une augmentation de la puissance du panneau alors on maintien cette direction de recherche, sinon on cherche dans le sens opposé [29].

- Méthode à courant de référence en fonction du courant de court-circuit
- Méthode de maximisation du courant de sortie

III.5.3. Méthodes a contre réaction de puissance :

Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du panneau pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de

III.5.3.1. Algorithme perturbation et observation

C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (PPM) le puis utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension de référence, ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC,), puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique (D) [29].

Si la valeur de la puissance actuelle $P(K)$ du générateur est supérieure à la valeur précédente $P(K-1)$ alors on garde la même direction de perturbation précédente

sinon on inverse la perturbation du cycle précédent. L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P et O) est donné par la Figure.III.13 [29].

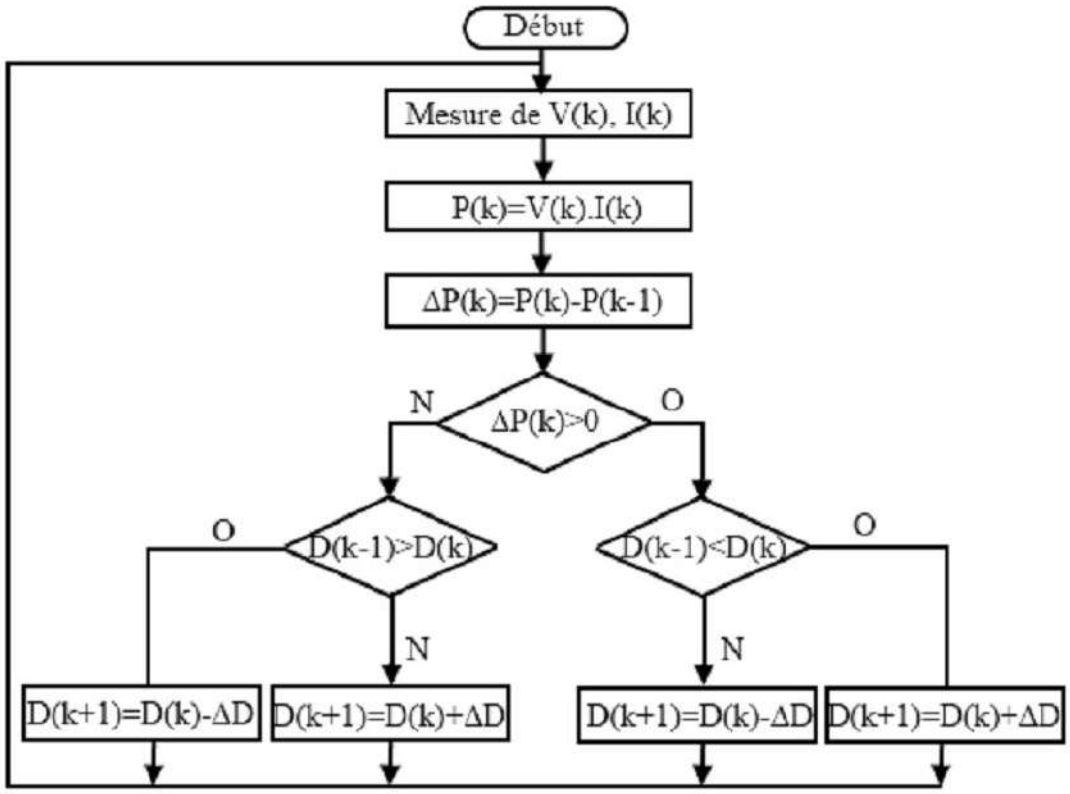


Figure.III. 16: Algorithme de perturbation et de l'observation (P et O)

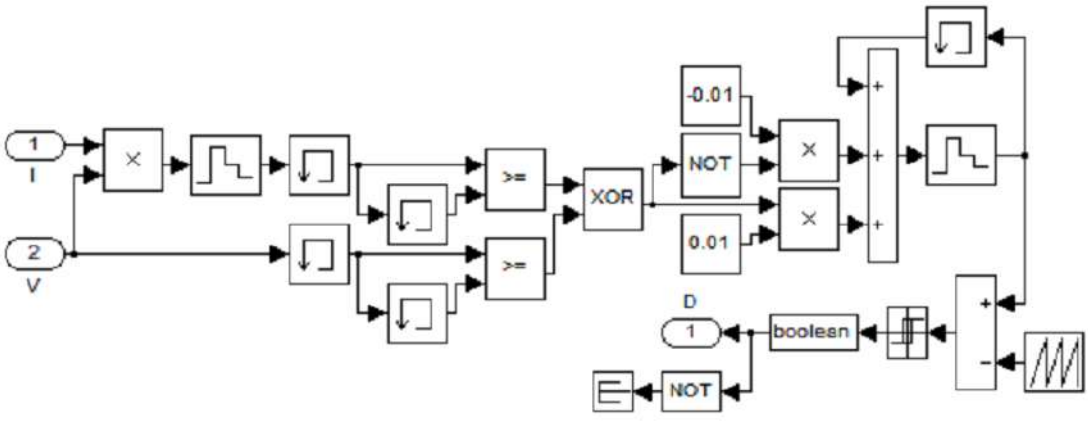


Figure.III.17: Schéma de simulation de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P et O)

III.9. Conclusion :

Dans ce chapitre on a étudié un types convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur et le hacheur mixte (dévolteur-survolteur) la commande MPPT D'après les résultats obtenus de la simulation, on remarque que le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles d'atteindre la puissance maximale de générateur PV. Le hacheur buck-boost peut augmenter la tension de sortie si le rapport cyclique est supérieur à 0.5.

IV.1. Introduction

L'utilisation d'un aérogénérateur ou un système photovoltaïque peut ne pas subvenir à lui seul aux besoins énergétiques souhaités. En effet, l'énergie solaire peut nous faire défaut au moment où nous en avons le plus besoin. Pour assurer le fonctionnement d'une installation durant toute l'année, on envisage l'utilisation d'un système d'appoint.

Plusieurs travaux ont été réalisés en utilisant comme système d'appoint un groupe électrogène, un groupe diesel ou autres dont le fonctionnement dans ces installations est lié à la nature des besoins.

Un système d'appoint à base d'énergie fossile réduit la capacité de stockage nécessaire et le coût, mais d'une part, il nécessite la maintenance et le carburant et d'autre part, il présente comme inconvénients le bruit et la pollution.

Pour un développement écologique et économique, le couplage d'un système photovoltaïque-diesel (PV-D) peut être très intéressant lorsque les conditions locales sont favorables du point de vue vent et ensoleillement [2], Mais cela reste insuffisant, donc une nouvelle technologie basée sur le couplage d'un système hybride de type photovoltaïque-diesel avec la batterie s'avère intéressante.

IV.2Gestionnaire intelligent

Le module du gestionnaire contrôle le fonctionnement de toute l'installation. Les informations concernant les données de démarrage, l'état de consommation énergétique, l'état de charge et décharge des batteries ainsi que les données météorologiques peuvent être consultées facilement sur un écran d'affichage à l'aide des touches de contrôle.

VI.3 Régulateur

La structure du régulateur est modulaire et son rôle est de déterminer le point de puissance maximum du générateur photovoltaïque. Le régulateur protège les batteries en limitant l'entrée d'énergie dans le cas d'une tension de batteries suffisamment élevée. Egalement, il protège les batteries contre une décharge profonde. Le régulateur comprend :

- Une autoconsommation minimum afin de diminuer le rendement global de l'installation.
- Une fonction MPPT pour trouver le point maximum de puissance en fonction de la tension et de l'intensité dépendant de l'ensoleillement sur les modules solaires.
- La modularité permet au régulateur de s'adapter à des champs photovoltaïques d'une puissance allant jusqu'à 2.000Wc chacun.

- La possibilité de maintenir une tension de flottaison à la batterie en maintenant une tension de flottaison aux bornes de la batterie (pour équilibrer les pertes) quand les batteries ont atteint

100% de charge et que le soleil continue de donner de l'énergie.

Chacune des entrées provient de champs photovoltaïques est protégée par un interrupteur magnétothermique de 50A

VI.4 Cadran de visualisation à distance

En plus de l'écran de visualisation du gestionnaire intelligent qui se trouve dans l'abri technique, le mini central photovoltaïque hybride dispose d'un cadran de visualisation à distance placé dans le hall de la bâtisse principale du refuge. L'endroit choisi est proche du personnel gérant afin d'intervenir plus rapidement sur la Distribution de l'énergie entre les différentes bâtisses à l'aide des interrupteurs. Ce cadran de visualisation permet la consultation pratique et instantanée sur l'état des différentes fonctions de l'installation photovoltaïque tels que:

. Etat de charge et de décharge des batteries.

. Source d'énergie utilisée: solaire photovoltaïque directe, batteries ou d'appoint.

. Alarme sonore dans le cas d'arrêt de l'onduleur.

VI.5 Les batteries de stockage

Elles sont constituées de 24 éléments de batterie tubulaire au plomb (900 Ah et de 2 Volts). Les batteries sont placées dans un abri technique spécialement adapté à cette fonction (Fig. 5). Ce local est bien ventilée raison de gaz explosif (hydrogène) que la batterie peut dégager. L'état de charge et de décharge des batteries est continuellement signalé par le cadran de visualisation à distance pour une éventuelle intervention pour réduire la consommation non indispensable ou pour actionner le fonctionnement du groupe électrogène.

Schéma de la gestion de la chaine hybride

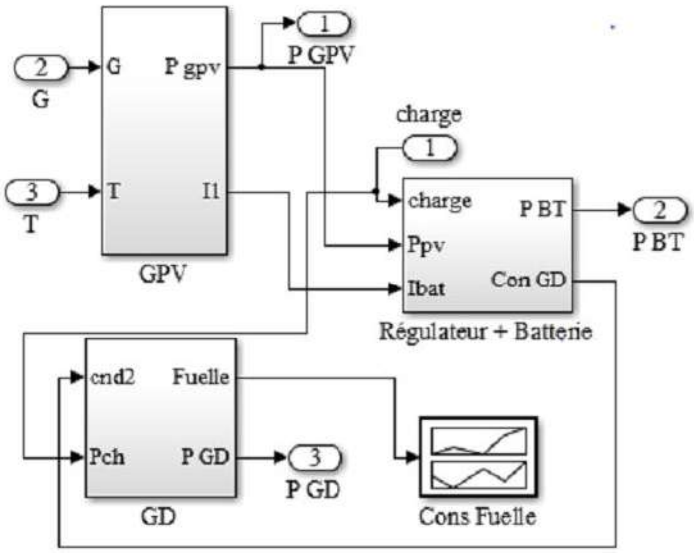


Figure .IV.1 schéma de la gestion de la chaine hybride

IV.6 .Résultat de simulation

Les résultats de simulation reportés sur les figures suivantes concernent la commande de la chaine de conversion photovoltaïque à base d'une commande MPPT à puissance variable, avec l'application des échelons de référence des puissances de batterie.

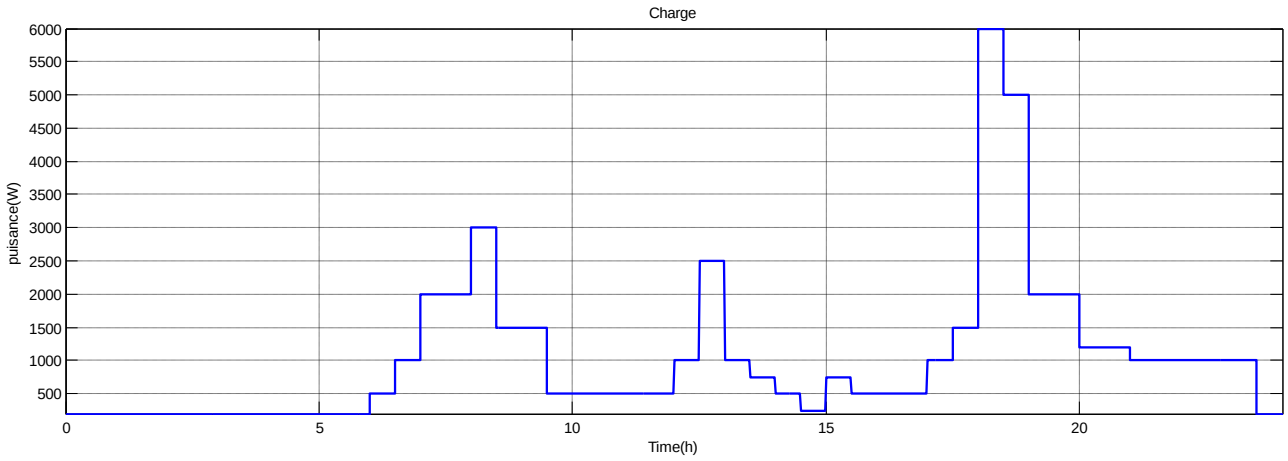


Figure IV.2 : puissance générer par la charge

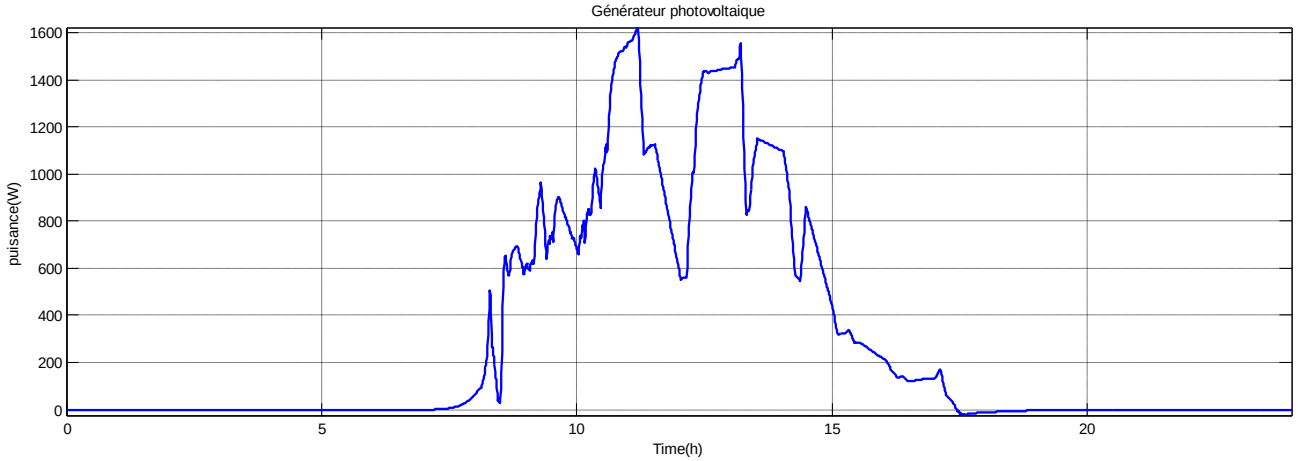


Figure IV.3 : puissance de générateur photovoltaïque

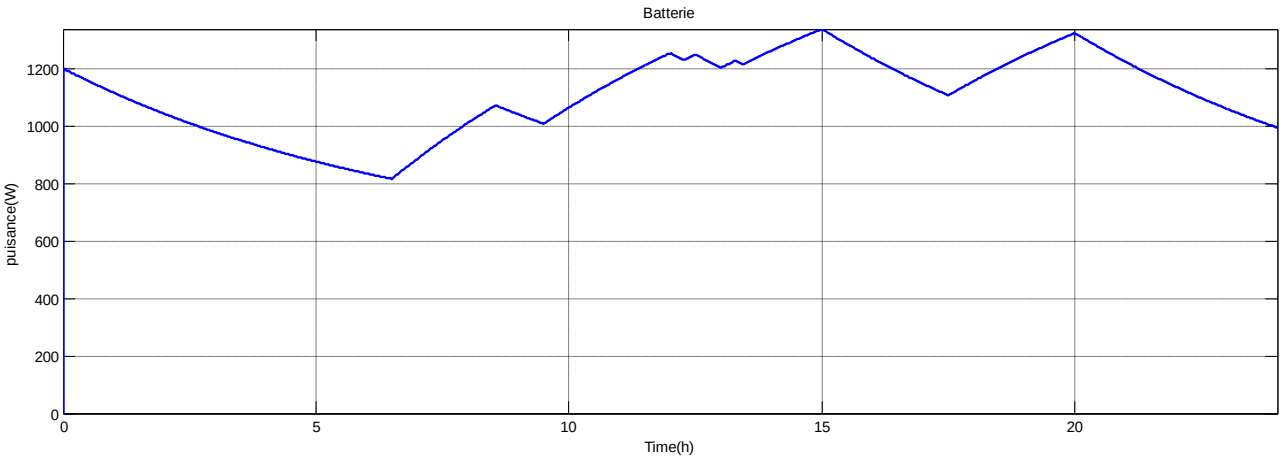


Figure IV.4 : puissance générer par la batterie

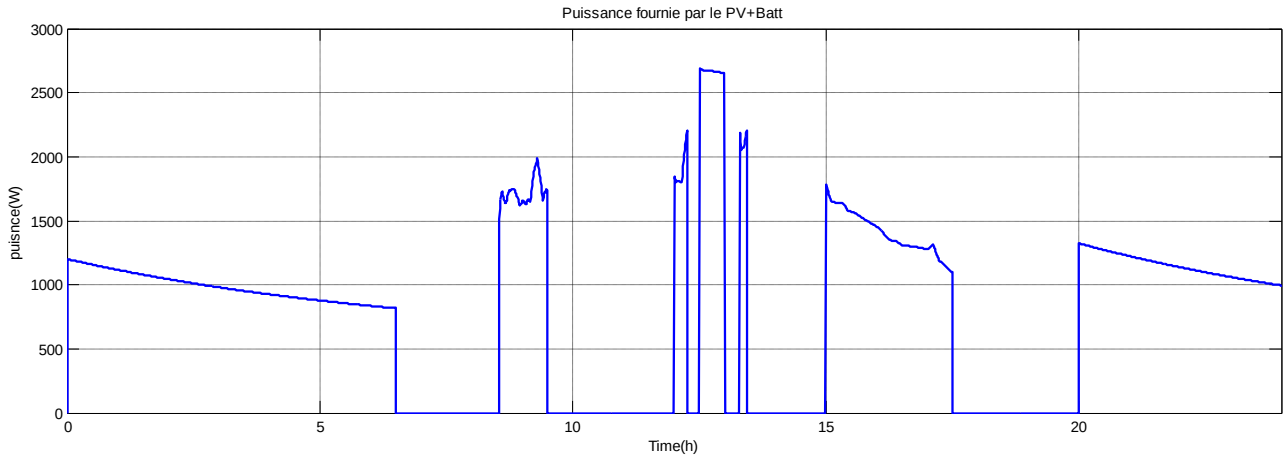


Figure IV.5 : puissance fournie par photovoltaïque +batterie

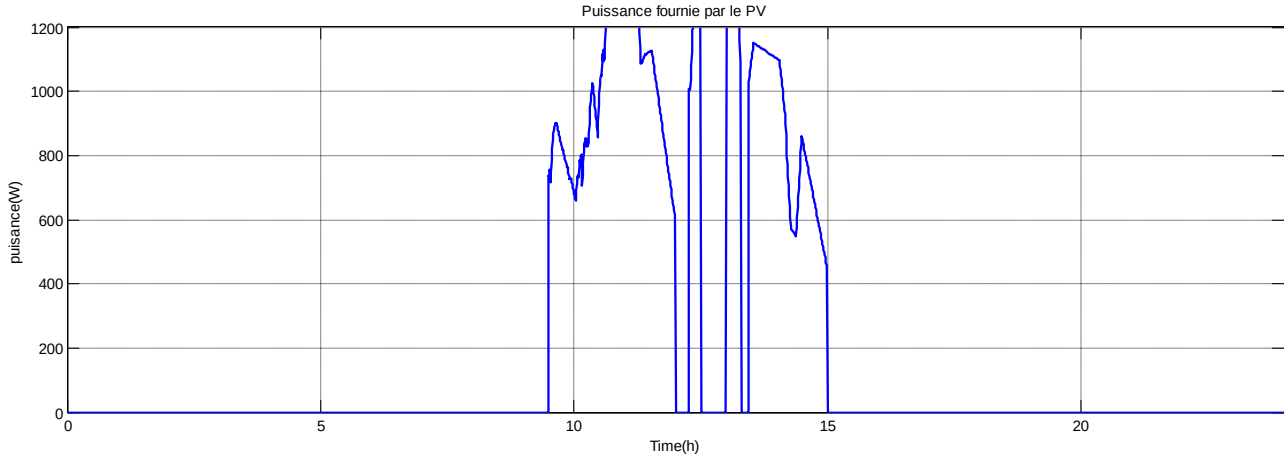


Figure IV.6 : puissance fournie par le photovoltaïque

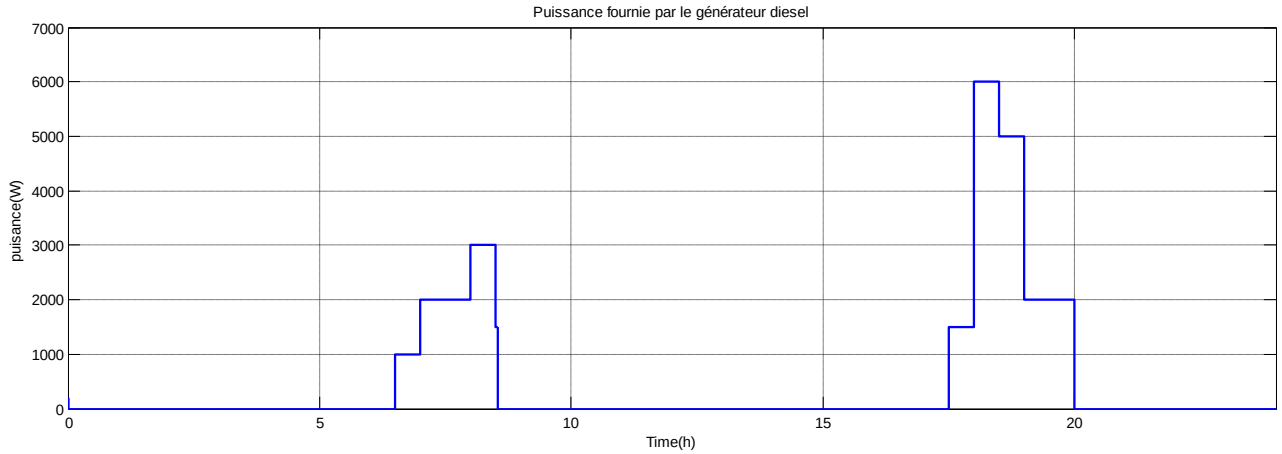


Figure IV.7 : Puissance fournie par le générateur diesel

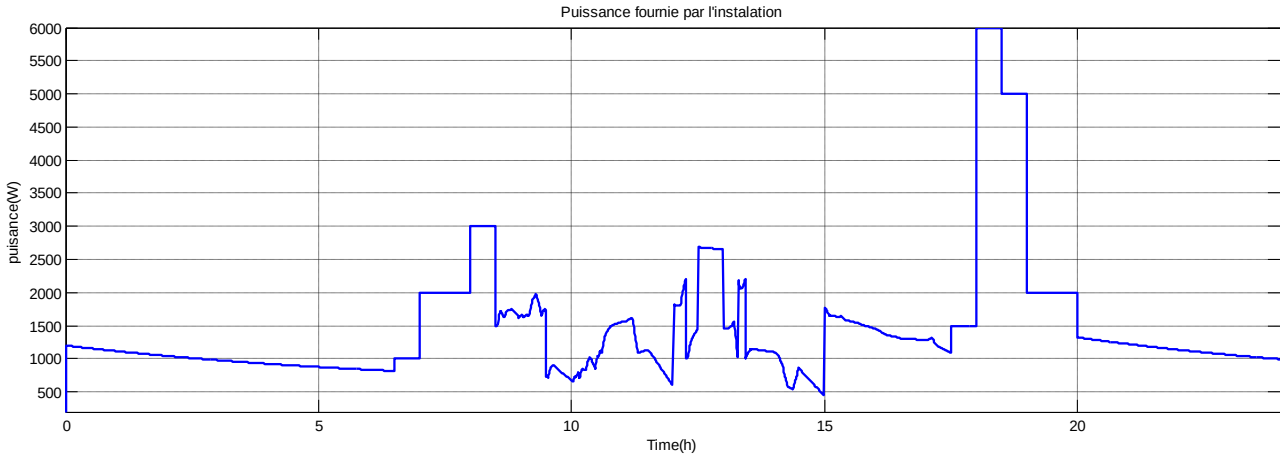


Figure IV.8 : puissance fournie par l'installation

D’après les résultats de simulation on remarque que pendant la journée ensoleillée et d’après l’augmentation d’irradiation à (1000 w /m^2), il y a une augmentation de puissance fournie par l’installation qui arrive jusqu'à (6000W) d’après (18h)

IV.7. Conclusion :

Ces dernières années, l’utilisation des énergies renouvelables comme le photovoltaïque et Diesel est en forte croissance pour la production de l’électricité pour connecté le stockage.

Indépendamment de la méthode utilisée, l’optimisation du dimensionnement d’un système Hybride photovoltaïque / diesel nécessite une analyse détaillée de la consommation (aléatoire),

Des données de l’éclairement solaire avec sa fonction de distribution. En plus des aspects économiques, le facteur d’autonomie est un des critères importants qui doit être pris en considération dans toute l’étude d’optimisation de dimensionnement.

Conclusion générale

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduits à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande du monde jusqu'à maintenant, est l'énergie solaire, qui est libre et abondante dans la plupart des régions du monde, et est avéré une source économique .

L'utilisation d'énergie solaire comme source alternative d'énergie, souffre du coût élevé des cellules solaires, du faible rendement et de puissance intermittent selon la fluctuation des conditions atmosphériques. Par conséquent, n'importe quelle conception de système d'application d'énergie solaire, devrait prendre en compte ces inconvénients.

Le stockage dans un système photovoltaïque contribue pour une part non négligeable au coût total d'exploitation par ses remplacements successifs durant la durée de vie d'un système. En effet, suivant la technologie et l'utilisation des batteries au plomb, leur durée de vie peut varier entre deux et douze ans. En outre, le cout total du stockage ne suit pas la même baisse que celle obtenue sur les autres composants d'un système photovoltaïque.

Dans la première partie, nous avons expose les fondements nécessaires a la Compréhension du sujet. Nous avons rappelé des notions sur le rayonnement solaire, les multiples types et leur application dans le champ photovoltaïque. Puis nous avons explique le fonctionnement de cellules photovoltaïques, leurs particularités essentielles ainsi que les paramètres limitant leur rendement et leur cout. En plus d' une synthèse d'assemblage des panneaux et une spécification des différentes zones de fonctionnement .Nous n'avons pas omis aussi de signaler les modules photovoltaïques et leurs associations En ce qui concerne la deuxième partie, le caractère intermittent de l'énergie solaire étant un des ses principaux inconvénients pour son utilisation permanente ainsi il s'avère indispensable d'emmagasiner une partie de l'énergie produite.

De ce fait, nous avons tente de mettre en exergue, de manière critique un ensemble de caractéristiques techniques et économiques qui permettraient d'améliorer les estimations de cout qui conditionnent l'acceptabilité du stockage. Pour réaliser cela, on dénombre

plusieurs méthodes de stockage : sous forme d'eau, d'hydrogène, dans un volant d'inertie, dans une batterie électrochimique (plomb, lithium) ou un super condensateur.

Dans la troisième partie, l'élaboration de chaque composant du système photovoltaïque Complet a été élaboré a partir de modèles de la littérature (champ PV, convertisseurs, le MPPT, le stockage batteries).

Cette modélisation est une étape fondamentale qui permet d'introduire un certain nombre De modèles puis d'évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les Paramètres constituants. Dans un système énergétique photovoltaïque, on espère toujours Travailler au voisinage du point de puissance maximale MPP, afin de minimiser au maximum les Pertes en énergie produite.

Dans la dernière partie, nous avons expose les résultats de simulations obtenus par la modélisation de la cellule, du module PV, du hacheur et de la batterie, gestion de la chaine hybride.

[1]:"Photovoltaics' systems; a buyer's guide. Naturals resources Canada", Renewable and electrical energy Division.
[2]: Mann Mk, "Economics of renewable hydrogen it's about more than production".
Renewable hydrogen energy forum, Washington.

[3] : Belhamed M., Moussa S., et Kaabeche A. , « Production d'électricité au moyen d'un système hybride éolien-photovoltaïque-diesel, Revue Énergies Renouvelables : Zones Arides (2002), pp. 49-54.

[4] :http:/www.ferme-energie.ca/IREF

[5]: Vaughn C. Nelson, Ken L. Stracher, Robert E. Foster, R. Nolon Clark, Deon Raubenheimer, Wind hybrid systems technology characterization, West Texas AM University – AEI, New Mexico State University – SWTDI, USDA – ARS Bushland, Vista University, May 2002.

[6]:E.IAN Baring-gould,l flowers,p.lundsager worldwide status of wind-diesel applicatios per-workshop wind-diesel 101,anchorage,Alaska,.2004

[7] : Ionel VECHI, Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome, Thèse de doctorat, Université du Havre, France, Décembre 2005.

[8]:S. Ruin, O. Carlson, Wind-hybrid systems with speed and Dc-link, Wind power for the 21 Century, Kassel, Germany, 25-27 September 2000

[9]:P.Lundsager, h.binder, N.clausen, s.frandsen, l.hansen, J.C.Hansen, isolated systems with wind power, RISO-r-1256(en),2001

[10]:E Koutroulis,K. Kalaitzakis,N.c.voulgaris,a hybrid pv-windgenerator systems using a maximum power poit traking technique,renewable energies for islands,chania,crete Greece,2001

[11]:T. L. Jensen, Renewable Energy on Small Islands, Forum for Energy and Development (FED), Second Edition, Denmark, August 2000.

[12]:B. Wichert, PV-diesel hybrid energy systems for remote area power generation – A review of current practice and future developments, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 1, Nº. 3, pp. 209-228, 1997.

[13]:M.A. Elhadidy, S.M.Saahid, parametric study of hybrid (wind/solar/disel)power generating

[14]:M. Muselli, G. Notton, A. Louche, Design of hybrid-photovoltaic power generator with optimization of energy management, Solar Energy, vol. 65, N°3, pp. 143-157, 1999.

[15]:W. Kellogg, M.H. Nehrir, G. Venkataramanan, V. Gerez, Optimal unit sizing for a hybrid wind/photovoltaic generating system, Electric Power Systems research, vol. 39, N°1, pp. 35-38, 1996.

[16]:L.H. Hansen,P Lundsgar,revien of isolated systems,riso-r-1109(en),2000

[17]:D. Turcotte, M. Ross, F. Sheriff, Photovoltaic hybrid system sizing and simulation tools: status and needs, PV Horizon: Workshop on photovoltaic hybrid systems, Montreal, 2001.

[18]:M.AShari,C.V.Nayar,An optimum dispatch strategy using set point for a photovoltaic (pv)-disesl-battrey hybrid power system,renewable enrgy VOL .66 N° .1,pp,1-9,1999

[19]:C.D. Barley, C.B. Winn, Optimal dispatch strategy in remote hybrid power systems, Solar Energy, vol. 58, N°4-6, pp. 165-179, 1996

[20]:M. Pipattanasomporn, A study of remote area internet access with embedded power generation, Etd-12272004-141318, Virginia Polytechnic Institute, 2004.

[21]:A. Pereira, Modular supervisory controller for hybrid power systems, Riso-R-1 202(EN), 2000

[22]:J.F. Manwell, A. Rogers, G. Hayman, C.T. Avelar, J.G. McGowan,

[23]:EN50160, voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems,CENELEC,Belgium,1999

[24]:H. Sharma, S. Islam, T. pryor, C.V. Nayar, power quality issues in a wind turbine driven induction generator and diesel hybrid autonomous grid,

[25]:E. Muljadi, McKenna, Power quality issues in a hybrid power system, NREL/CP-500-3041 2, 2001.

[26]:H.Bindner, power control for wind turbines in weak grid: concepts development ,Riso-R-1118(en),1999 Systems ,renewable energy, vol.66,n^0 1 pp.129 -139,1999

[27]:"Photovoltaics' systems; a buyer's guide. Naturals resources Canada", Renewable and Electrical energy Division.

[28]: Mann Mk, "Economics of renewable hydrogen it's about more than production". Renewable hydrogen energy forum, Washington.

[29]:Vaughn C, Nelson, Ken L. Starcher, Robert E. Foster, R. Nolon Clark, Deon Raubenheimer, "Wind hybrid systems technology characterization", West Texas AM University – AEI, New Mexico State University – SWTDI, USDA – ARS Bushland, Vista University, May 2002.

[30]: Musseli, M., Notton, G. & Louche, A., "Design of Hybrid-Photovoltaic power generator, with optimization of energy management", Solar Energy, Vol.65, No.3,1999,

[31]:C.F. Lu, C.C. Liu, and C.J. Wu, "Dynamic modeling of battery energy storage system and application to power system stability", IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, IEE, Stevenage, Herts, U.K., Vol. 142,N°.4, p. 429–435, July 1995.

[32]:A. Hoque, K. A. Wahid; « New mathematical model of a photovoltaic generator », Journal of Electrical Engineering, Vol. EE 28, N°. 1, June 2000.

[33]:M. Huart ; « Guide des énergies renouvelables », Association pour la Promotion des Energies Renouvelables, Ministère de la Région Wallonne éditeur,)1994.

[34]:J. Muller, R. Desserrières ; «Conversion photovoltaïque », Publié par Club CRIN, 2002.

[35]:A. Alonso, J. Alzeu, C. Andrieu, S. Astier, J. Bonal, A. H. Ben, C. Combes, F. Costa, B.Dakyo, R. Desserrières, J. Fonio, O. Gergaud, C. Glazie, J-C. Muller, B. Multon, C. Nichita, X. Roboam, P. Rossetti ; « L'électronique de puissance vecteur d'optimisation Pour les énergies renouvelables », ECRIN, ISBN: 2- 912154-08-1, Paris, 2002.

[36]: Phatiphat Thounthong, Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des supe condensateurs -Thèse Doctorat en génie électrique, 2005-L'Institut National Polytechnique de Lorraine.

[37]:J.L. Rodriguez-Amenedo, S. Arnalte and J.C. Burgos, "Design criteria of variable speed wind turbines with fed induction generator", European Wind Conference Proceedings, Copenhagen, Denmark, 2001

[38]:J. P. Caron, J. P. Hautier, « Convertisseurs Statiques- Méthodologie Causale de

Modélisation et de Commande", Editions Technip, Paris 1999.

[39]: Ashok, S., "Optimised model for community-based hybrid energy system",Renewable Energy Vol.32, No.7, 2007, pp. 1155-1164.

[40]: MORSLI Abdelkader "Etude d'un système solaire photovoltaïque utilisant des Super condensateurs" 2010 Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hase Badi, El-Harrach, ALGER

[41] BAGHDADI Fazia "modelisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'energies renouvelables" Tizi-Ouzou 26.09.2011

[42]: Le Gallou F, B. Bouchon-Meunier (Coordonnateurs) : "Systémique - Théorie et Applications". Éditions Tec & Doc, Paris, 1994, 341pages.)