

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira de Bejaïa



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

Filière : énergie renouvelable

Spécialité : énergie renouvelable en électrotechnique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du master en électrotechnique

Thème

Etude d'une chaine de production photovoltaïque autonome

Réalisé par

AIT ABDELMALEK Dylia

CHENNA Ilham

Encadré par :

Mr REKIOUA Toufik

Mr ZEBBOUDJ Mourad

Soutenu le :

24 juin 2023

Devant le Jury composé de :

Madame mokrani zahra

Madame tadjine katia

Année Universitaire : 2022/2023

Remerciements

Nous remercions, en premier lieu ALLAH le tout puissant de nous avoir accordé la volonté et le courage pour réaliser notre mémoire.

On offre nos sincères et chaleureux remerciements, a notre encadreur de mémoire monsieur Toufik rekioua pour avoir accepté de diriger notre travail avec ses précieux conseils.

Nous remercions aussi monsieur le président de jury, ainsi que les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Enfin, on ne peut pas achever sans exprimer notre profonde gratitude à Mr IHAMMOUCHEN Syphax et Mr Mebarki Nasserddine et Mr oubelaid adel pour le temps qu'ils ont consacré et l'aide qu'ils ont apporté à nous malgré leur occupation.

Ilhem et Dylia

Dédicaces

A celui qui a donné un sens à ma vie... mon stylo
A ceux qui ont rempli ma vie d'amour, de gentilles et
d'accueil... Mes parents.
A ceux avec qui je passe les plus beaux moments... mes
sœurs et frères Cylia, thilili , thiziri , thafath , billi ,
Amir .
A toute la famille chenna .
A tout mes amis .
Je dédie ce travail.

Ilhem

Dédicaces

*A celui qui m'a éclairé sur le chemin de la connaissance
et de la justice mon père.*

Au bon cœur et à la chaleureuse étreinte Ma mère

Aux étoiles de ma vie Lina et amine

A toute la famille ait Abdelmalek

A mon cher Walid Bendahmane

A tous mes amis.

Je dédie ce travail.

Dylia

Sommaire

Sommaire

SOMMAIRE.....	II
LISTE DES FIGURES	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
INTRODUCTION GENERALE	1
I CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SYSTEMES D'ENERGIE PHOTOVOLTAIQUE.....	4
I.1 L'ENERGIE RENOUVELABLE.....	4
I.1.1 DEFINITION	4
I.1.2 DIFFERENTES SORTES D'ENERGIES RENOUVELABLES	4
I.2 LE RAYONNEMENT SOLAIRE.....	5
I.2.1 RAYONNEMENT DIRECT	5
I.2.2 RAYONNEMENTS DIFFUS	5
I.2.3 LES RAYONNEMENTS SOLAIRES REFLECHIS :	5
I.2.4 LE RAYONNEMENT GLOBAL	5
I.3 APPLICATIONS DE L'ENERGIE SOLAIRE.....	6
I.3.1 L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE.....	6
I.4 LE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE	6
I.4.1 SYSTEME AUTONOME	6
I.4.2 SYSTEME CONNECTE AU RESEAU	7
I.5 COMPOSANT D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE.....	8
I.5.1 LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES.....	8
I.5.2 BATTERIE.....	12
I.5.3 CHARGE	13
I.5.4 ONDULEUR	13
I.5.5 HACHEURS.....	14
I.5.6 REGULATEUR.....	14
I.6 LA COMMANDE MPPT	15
I.6.1 PRINCIPE DE MPPT	15
I.6.2 METHODE DE POURSUITE DU MPPT.....	16
I.7 CONCLUSION	18
II INTRODUCTION.....	20
II.1 QUALITE D'ENERGIE	20
II.2 PERTURBATIONS ELECTRIQUES ET LEURS ORIGINES.....	20
II.2.1 CREUX ET COUPURES DE TENSION :	20
II.2.2 CONSEQUENCES DES CREUX DE TENSION	21
II.2.3 FLUCTUATION DE TENSION.....	21
II.2.4 SURTENSION.....	21

II.2.5	DESEQUILIBRE DU SYSTEME TRIPHASE DE TENSION	21
II.2.6	VARIATION DE FREQUENCE	22
II.2.7	PRESENCE D'HARMONIQUE ET INTER-HARMONIQUES.....	22
II.3	LES HARMONIQUES DANS UN SYSTEME ISOLEE :	25
II.3.1	PERTURBATIONS HARMONIQUES :	25
II.3.2	OUTILS DE CALCUL :	25
II.3.3	REPRESENTATION D'HARMONIQUE	27
II.3.4	NORMES ET REGLEMENTATION :	27
II.4	SOLUTIONS DE DEPOLLUTION DU RESEAU ELECTRIQUE :	29
II.4.1	LES SOLUTIONS TRADITIONNELLES :	29
II.4.2	SOLUTIONS MODERNES :	36
A)	LE FILTRE ACTIF SERIE AVEC DES FILTRES PASSIFS PARALLELES	38
II.5	COMPARAISON ENTRE UN FILTRE ACTIF ET UN FILTRE PASSIF :	39
II.6	AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES SCHEMAS DE DEPOLLUTION :	40
II.7	CONCLUSION :	41
III	<u>INTRODUCTION</u>	43
III.1	L'ARCHITECTURE DU SYSTEME ETUDIE	43
III.2	MODELISATION DU SYSTEME ETUDIE	44
III.2.1	MODELE A UNE DIODE	44
III.2.2	MODELISATION DU HACHEUR	46
III.2.3	ONDULEUR	47
III.2.4	FILTRES PASSIFS LC	48
III.3	SCHEMA DE SIMULATION GLOBALE	49
III.4	RESULTAT DE SIMULATION DU RESEAU SANS FILTRE	49
III.4.1	INTERPRETATION DES RESULTATS.....	53
III.5	RESULTAT DE SIMULATION DU SYSTEME AVEC FILTRE LC	53
III.5.1	INTERPRETATION DES RESULTATS.....	55
III.6	CONCLUSION	56
IV	<u>INTRODUCTION</u>	58
IV.1	PRESENTATION DU LOGICIEL HOMER PRO	58
IV.2	LES PARAMETRES POUR LE CHOIX DE LOGICIEL – HOMER	59
IV.3	FONCTIONNEMENT	59
IV.4	ARCHITECTURE GLOBALE DU PROGRAMME	60
IV.5	L'OBJECTIF PRINCIPAL DE HOMER PRO	61
IV.6	LA METHODE DE DIMENSIONNEMENT	62
IV.7	DEMARCHE GENERALE DU PROJET	62
IV.7.1	LA LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DU LIEU CHOISI.....	62
IV.7.2	L'IDENTIFICATION DES EQUIPEMENTS UTILISES DANS HOMER PRO	63
IV.7.3	APPLICATION SUR LE LOGICIEL HOMER PRO	64
IV.8	DISCUSSION DES RESULTATS OBTENUS	70
IV.8.1	LES RESULTATS OBTENUS SUR LE TYPE DE BATTERIE	73
IV.8.2	LA PUISSANCE GENEREE PAR LE PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE ECONOMIQUE PROPOSE.....	73
IV.9	CONCLUSION	74

CONCLUSION GENERALE76

Liste des figures

Liste des Figures

Figure I.I.1: Système photovoltaïque autonome.....	4
Figure I.I.2 Les trois composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné	5
Figure I.I.3 Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes	7
Figure I.I.4 Exemple de la structure d'un système PV connecté au réseau	8
Figure I.5. principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	9
Figure I.6 montage en série.....	9
Figure I.7 Regroupement en parallèle	10
Figure I.8 Regroupement Mixte	10
Figure I.9 (a) Cellule au Silicium Monocristallin, (b) Cellule au Silicium Polycristallin.....	11
Figure I.10 Cellule au Silicium amorphe (couche mince).....	11
Figure I.11 Symbole d'onduleur.....	14
Figure I.12 Symbole d'un convertisseur DC-DC.....	14
Figure I.13 Régulateur autonome	15
Figure I.14 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT	15
Figure I.15 Organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation	17
Figure I.16 Organigramme de l'algorithme de l'incrémentale de la conductance.....	17
Figure II.1 creux et coupures de tension	21
Figure II.2 FLUCTUATION DE TENSION	21
Figure II.3 DESEQUILIBRE DU SYSTEME TRIPHASE DE TENSION	22
Figure II.4 VARIATION DE FREQUENCE	22
Figure II.5 D'HARMONIQUE ET INTER-HARMONIQUES.....	22
Figure II.6 EXPLICATION D'HARMONIQUE ET INTER-HARMONIQUES.....	23
Figure II.7 EXEMPLE D'UN COURANT DISTORDU ET SA DECOMPOSITION EN COMPOSANTES	24
Figure II.8 diagramme de Fresnel avec présence d'une puissance déformante	27
Figure II.9 Différentes solutions utilisées pour dépolluer le courant.....	29
Figure II.10 Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage.....	30
Figure II.11 Forme d'onde des courants absorbés	31
Figure II.12 Redresseur dodécaphasé, montage série	31
Figure II.13 EXEMPLE D'UN FILTRE PASSIF PASSE-BAS	32
Figure II.14 La bande passante d'un filtre passe-bas.....	32
Figure III.1 Architecture de la chaîne de production d'énergie photovoltaïque.....	44
Figure III.2 Modèle d'une cellule photovoltaïque à une diode	44
Figure III.3 Schéma du hacheur	46
Figure III.4 Schéma électrique d'un hacheur Boost fermé	46
Figure III.5 SCHEMA électrique d'un hacheur Boost ouvert	47
Figure III.6 schéma de simulation du hacheur boost	47
Figure III.7 le filtre LC.....	48
Figure III.8 Le système de simulation sous Matlab Simulink	49
Figure III.9 la tension du panneau I_{pv}	50
Figure III.10 le courant du panneau	50
Figure III.11 la tension à la sortie du hacheur boost	51
Figure III.12 LA TENSION DE LA MODULATRICE ET DE LA PORTEUSE	51
Figure III.13 le courant obtenu avant filtrage	52
Figure III.14 la tension obtenue avant filtrage.....	52
Figure III.15 Analyse spectrale du courant avant filtrage.....	53
Figure III.16 courant obtenu après filtrage.....	54

Figure III.17 tension obtenue après filtrage.....	54
Figure III.18 Analyse spectrale du courant après filtrage	55
Figure IV.1 Modèle conceptuel du logiciel HOMER.....	60
Figure IV.2. Architecture de logiciel HOMER Pro	61
Figure IV.3 Localisation géographique de lieu d'étude.	62
Figure IV.4 Schéma de l'installation	63
Figure IV.5 Le panneau photovoltaïque choisi.....	63
Figure IV.6 batteries Power Safe SBS XC.....	64
Figure IV.7 Visualisation du lieu par HOMER Pro	65
Figure IV.8 choix de la charge qui convient à une habitation.....	65
Figure IV.9 Irradiation solaire du site	66
Figure IV.10 Les températures mensuelles enregistrées.....	67
Figure IV.11 les équipements à choisir sur Homer Po.....	68
Figure IV.12 caractéristique du panneau sous Homer pro	69
Figure IV.13 Caractéristiques de la batterie sous HOMER Pro	69
Figure IV.14 Caractéristiques du système de conversion avec HOMER Pro.....	70
Figure IV.15 Résultats de dimensionnement par le logiciel HOMER.....	70
Figure IV.16 Le résultat optimal pour le l'installation photovoltaïque par Homer Pro.....	71
Figure IV.17 Détail des coûts d'opération pour le système autonome.....	71
Figure IV.18 Résumé des opérations et des remplacements pendant toute la durée de fonctionnement du système	72
Figure IV.19 Production électrique moyenne mensuelle du système PV.....	72
Figure IV.20 L'état de charge du parc batteries du système PV	73
Figure IV.21 La puissance produite par le champ PV	74

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

Tableau I.1 avantage et inconvénient des cellules photovoltaïques .	12
Tableau II.1 Niveaux tolérable pour les tensions harmoniques	28
Tableau II.2 Niveaux tolérable pour les courants harmoniques	28
Tableau II.3 Comparaison entre filtrage actif et passif.....	39
Tableau II.4 avantage et inconvénient de schémas de dépollution.....	40
Tableau III.1 Les caractéristique du panneau photovoltaïque.....	45
Tableau III.2 caractéristique du hacheur.....	47
Tableau IV.1 paramètres pour le choix de logiciel – HOMER Pro.....	59
Tableau IV.2 Caractéristiques du panneau photovoltaïque.....	63
Tableau IV.3 Températures mensuelles.....	67
Tableau IV.4 Résumé des flux de trésorerie pour le système autonome.....	72
Tableau IV.5 La puissance générée par le panneau photovoltaïque économique.....	73

Liste de l'abréviation :

AC : Courant Alternatif.

DC : Courant Continu.

FF : Facteur de Forme.

FP : Facteur de puissance

GPV : Générateur Photovoltaïque.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

PV : Photovoltaïque.

P&O : Perturbation et Observation.

THD : taux de distorsion harmonique

Liste des symboles :

I_{cc} : Le courant de court-circuit (A).

V_{co}: La tension de circuit ouvert (V).

V_{co}: La tension de circuit ouvert (V).

NS : Nombre de modules dans le panneau en série.

N_p: Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

P_{max} : La puissance maximale produite PV (W).

V_{max} :Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

I_{max} : Courant qui correspond à la puissance maximale (A)

θ_{sc} : Coefficient de température de courant de court-circuit

I_f : valeur efficace de l'harmonique de rang h.

I_{eff1} : Valeur efficace du courant fondamental.

f_c : Fréquence de coupure

C : capacité du filtre

L : inductance du filtre

I : courant

Introduction générale

Introduction générale

Depuis quelques années, le contexte environnemental et/ou écologique devient une donnée importante voire prépondérante. En effet, le coût des énergies ainsi que les pollutions diverses qui résultent de leurs utilisations doivent être pris en compte à de nombreux niveaux. De plus, ces dernières années, la demande mondiale d'Énergie augmente de plus en plus, et la raréfaction des sources d'énergie fossile (pétrole, gaz naturel, charbon, ...etc.) dans un avenir proche est prévisible. Le contexte énergétique actuel, caractérisé par l'appauvrissement des réserves d'énergie fossile, le réchauffement de la planète en partie dû à l'émission de gaz à effet de serre et le concept de développement durable nous pousse à trouver des solutions énergétiques alternatives. Un recours systématique aux carburants fossiles permet d'avoir des coûts de production relativement "faibles" mais conduit à un dégagement massif de gaz polluants. Ainsi, la production d'énergie électrique à partir de combustibles fossiles prend une part importante des émissions mondiales de monoxyde de carbone. [1]

Les énergies renouvelables ont tout pour s'imposer, tant aux niveaux environnemental, social, qu'économique elles devraient être le fer de lance de toute politique de lutte contre le réchauffement climatique [2], de plus depuis quelques années, Il existe de nombreux sites isolés dans le monde, alimentés par des systèmes autonomes de génération d'électricité. Ces générateurs utilisent les sources renouvelables locales. On y trouve des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des micros turbines. L'électricité provenant des sources renouvelables est intermittente, et dépendante des conditions climatiques.

Aujourd'hui, On remarque une augmentation de la demande de l'énergie électrique ce qui provoque en parallèle l'élévation des perturbations qui affectent la qualité d'énergie. Ceci est dû au développement des équipements à base d'électronique de puissance qui prennent place dans les systèmes de contrôle et de commande, tels que les redresseurs, les convertisseurs statiques, les radios, les ordinateurs, les télévisions, les imprimantes, etc. Le facteur commun entre ces équipements c'est qu'il représente tous des charges non linéaires.

Ces charges non linéaires absorbent un courant non sinusoïdal lorsqu'elles sont Alimentées par une tension sinusoïdale. De plus, elles consomment de la puissance réactive et provoquent des harmoniques.

Afin de remédier à ce problème, il existe deux solutions qui consistent soit à utiliser les Convertisseurs statiques moins ou peu polluants, soit à utiliser une structure compensant les harmoniques produits par ces charges tel que l'utilisation des filtres.

Ainsi, notre travail portera sur l'étude d'un système photovoltaïque autonome avant et après filtrage passif passe-bas .

Ce document présenté est rédigé en quatre chapitres principaux qui se résument dans ce qui suit :

- ✚ Dans le premier chapitre, on fait une généralité sur l'énergie renouvelable le système photovoltaïque, On présente le principe de fonctionnement d'une cellule PV et ces différents types ainsi que les différents composants du système.
- ✚ Dans le deuxième chapitre, recense les perturbations qui peuvent apparaître dans un réseau électrique basse tension et expose leurs origines ainsi que les solutions de dépollution des existantes, tant traditionnelles que modernes.

- ✚ La modélisation et la simulation sous Matlab/Simulink du système étudié fait l'objet du second chapitre.

- ✚ Au dernier chapitre, une étude économique sera faite en utilisant le logiciel HOMER pro.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes d'énergie photovoltaïque

I Introduction

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables : l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Hormis la géothermie qui provient de la chaleur des profondeurs de la terre, ces sources d'énergie proviennent directement ou indirectement du soleil. Par conséquent, ils sont disponibles indéfiniment tant que celui-ci brille.

L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle présente les avantages d'être non polluante, flexible et fiable. [3]

Dans ce chapitre nous décrivons la conception d'un système photovoltaïque « stand-alone » fondamentale de notre mémoire, dans le but d'expliquer le principe de fonctionnement de ce système.

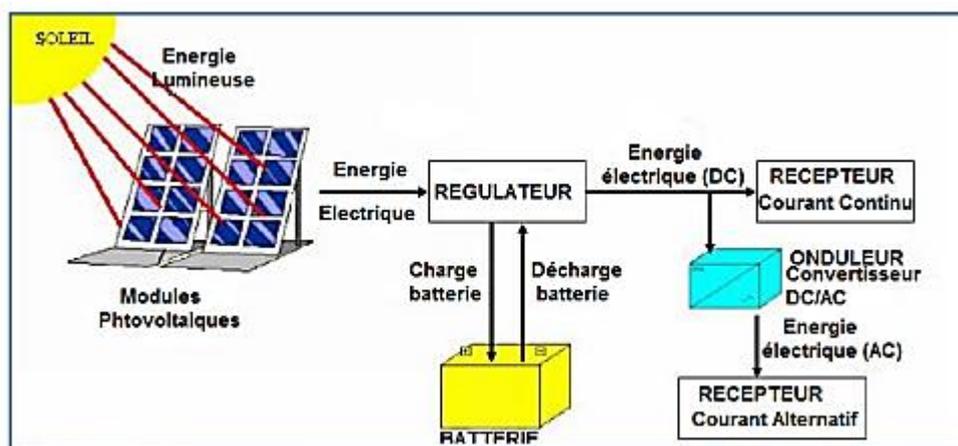


Figure.I.1: Système photovoltaïque autonome

I.1 L'énergie Renouvelable

I.1.1 Définition

L'énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant si rapidement qu'elle est considérée comme inépuisable à l'échelle des temps humains. L'énergie renouvelable est produite par des phénomènes naturels réguliers ou continus provoqués par les astres.

I.1.2 Différentes sortes d'énergies renouvelables

Il existe de nombreux types de sources d'énergies renouvelables tels que l'énergie Hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Excepté l'énergie géothermique qui provient de la chaleur des profondeurs de la terre, ces sources d'énergie sont directement ou indirectement fournies par le soleil. À l'exception de l'énergie géothermique, qui est issue de la chaleur des profondeurs terrestres. Par conséquent, il peut être utilisé indéfiniment tant qu'il brille.

L'énergie solaire est la plus récente parmi les sources d'énergie renouvelables et a l'avantage d'être verte, flexible et fiable. [4]

I.2 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une onde de longueur qui varie entre 0.2 et 4.10⁻⁶ m. sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent . [1]

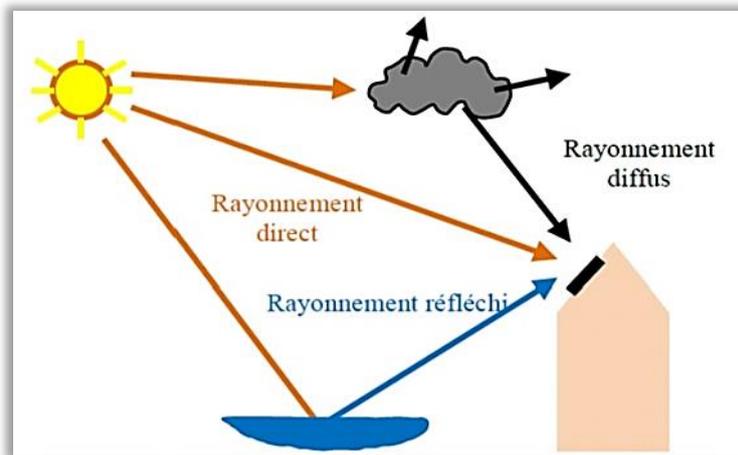


Figure I.I.2 Les trois composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné.

I.2.1 Rayonnement direct

Qui désigne le rayonnement solaire qui atteint directement la surface de la terre sans avoir été diffusé par l'atmosphère. Autrement dit, c'est le rayonnement solaire qui passe directement à travers l'atmosphère sans être dévié ou absorbé par les nuages, la poussière ou les molécules d'air. Ses rayonnements sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre. [5]

I.2.2 Rayonnements diffus

Est constitué de la lumière diffusée par l'atmosphère (air, brouillard, aérosols). La diffusion est un phénomène où un rayon parallèle est divisé en plusieurs rayons allant dans tous les directions. Dans le ciel, cette (éclaboussure) de rayons solaires est générée par des molécules d'air, des gouttelettes d'eau (nuages) et de la poussière. Par conséquent, cela dépend principalement des conditions météorologiques. [5]

I.2.3 Les rayonnements solaires réfléchis :

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

I.2.4 Le rayonnement global

Est la somme du rayonnement direct et diffus du soleil qui atteint la surface de la terre. Il est mesuré à l'aide de pyromètres et est utilisé dans de nombreux domaines, notamment la planification énergétique, la conception de bâtiments et la climatologie. Sa quantité dépend de

facteurs tels que l'heure de la journée, la saison, l'altitude, l'attitude et les conditions météorologique.

I.3 Applications de l'énergie solaire

L'énergie solaire peut être utilisée pour produire de l'électricité à l'aide de panneaux photovoltaïque ou de centrales solaires thermique. Outre le chauffage de l'eau dans les maisons , les bâtiments et les piscines à l'aide de capteurs solaires , ils sont également utilisés pour l'éclairage des espaces extérieurs , utiliser des panneaux solaires et des batteries rechargeables pour alimenter les lampes solaires , et des panneaux solaires installés sur le toit ou une autre surface du véhicule pour alimenter les véhicules électriques , ainsi que pour utiliser la chaleur les aliments peuvent également être séchés à l'aide d'un séchoir solaire qui absorbe fruits secs , légumes et herbes au soleil . Et plus récemment, il peut également être utilisé pour le dessalement, en utilisant la chaleur solaire pour transformer l'eau de mer en eau potable. Ces applications contribuent à réduire notre dépendance aux combustibles fossiles et à fournir une énergie propre et renouvelable.

I.3.1 L'énergie solaire photovoltaïque

Le mot « photovoltaïque », est souvent abrégé par les lettres PV, le mot grec pour la lumière, et le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la cellule électrochimique en 1800. Il est dérivé de volta. L'effet photovoltaïque, est La conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Les cellules photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir Directement la lumière en électricité. Cette conversion appelée photoélectricité et a été Découverte par E. Becquerel en 1839. [6]

I.4 Le système photovoltaïque

Est un système qui utilise des cellules solaires pour convertir l'énergie solaire en électricité, les éléments qui composent le circuit de conversion photovoltaïques, un système de contrôle, des convertisseurs statiques et éventuellement un système de stockage qui permet le stockage de l'énergie solaire excédentaire et de la charge. [7]

Le système PV sont classés en deux grandes catégories selon la manière dont l'énergie est utilisée :

-  Systèmes isolés et autonomes.
-  Systèmes raccordés au réseau.

I.4.1 Système autonome

le système photovoltaïque hors réseau est un système qui fonctionne indépendamment du réseau électrique ou d'autres sources d'énergie, le plus souvent, cette plante est utilisée dans des endroits isolés. De tels systèmes doivent pouvoir fournir de l'énergie même lorsque le soleil ne brille pas (la nuit ou par mauvais temps), une partie de la production quotidienne des panneaux photovoltaïques doit donc être stockée dans des batteries. Cette installation est constituée d'un ou plusieurs panneaux photovoltaïques, d'un régulateur de charge, d'une ou plusieurs batteries et éventuellement d'un onduleur [8].

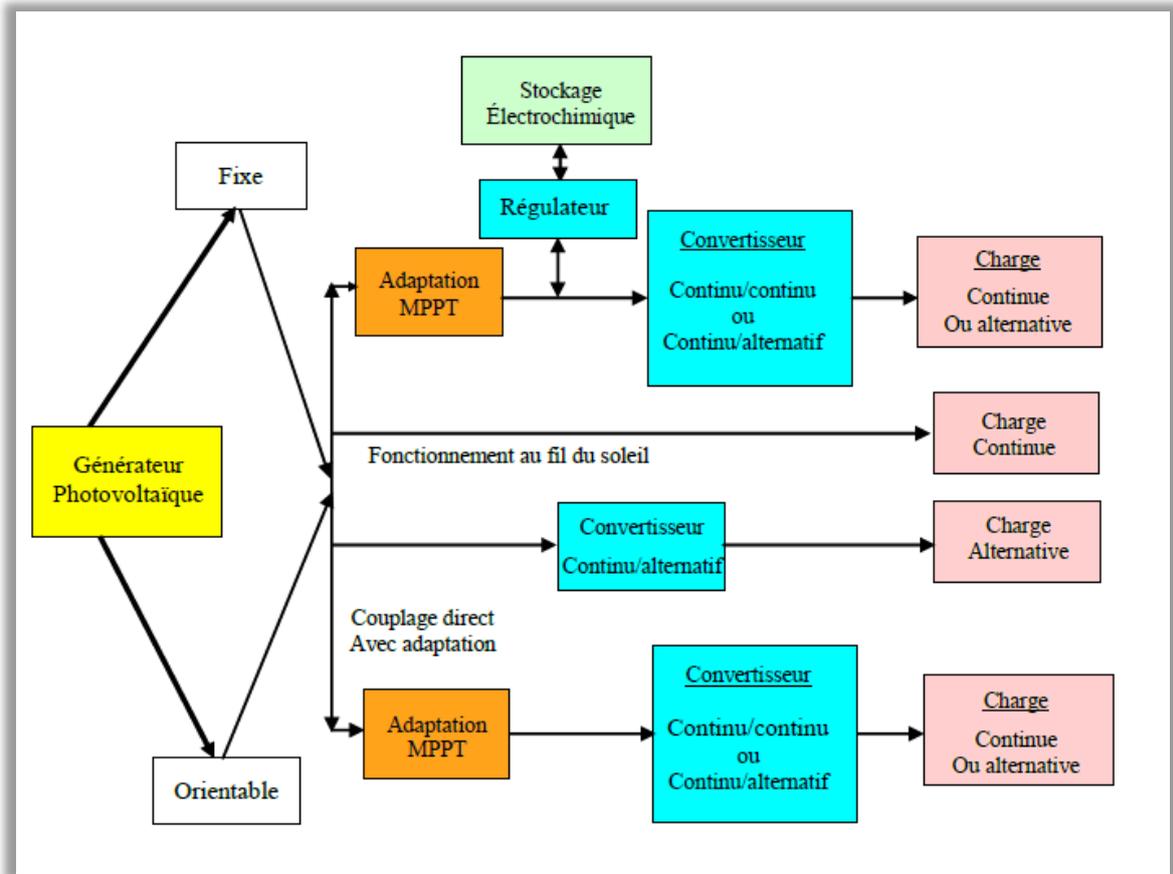


Figure I.I.3 Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes.

I.4.2 Système connecte au réseau

Le système photovoltaïque peut être connecté au réseau électrique en parallèle. Les panneaux solaires sont connectés en série pour former une chaîne, qui est ensuite connectée à un onduleur. Le rôle de l'onduleur est de convertir le courant continu du module en courant alternatif. Chaque onduleur est sélectionné en fonction de la puissance du module et peut desservir une ou plusieurs chaînes. Si la consommation locale est supérieure à la production du système PV, l'alimentation de secours sera prélevée sur le réseau. D'autre part, l'énergie est injectée dans le réseau public et utilisée pour approvisionner les consommateurs [9].

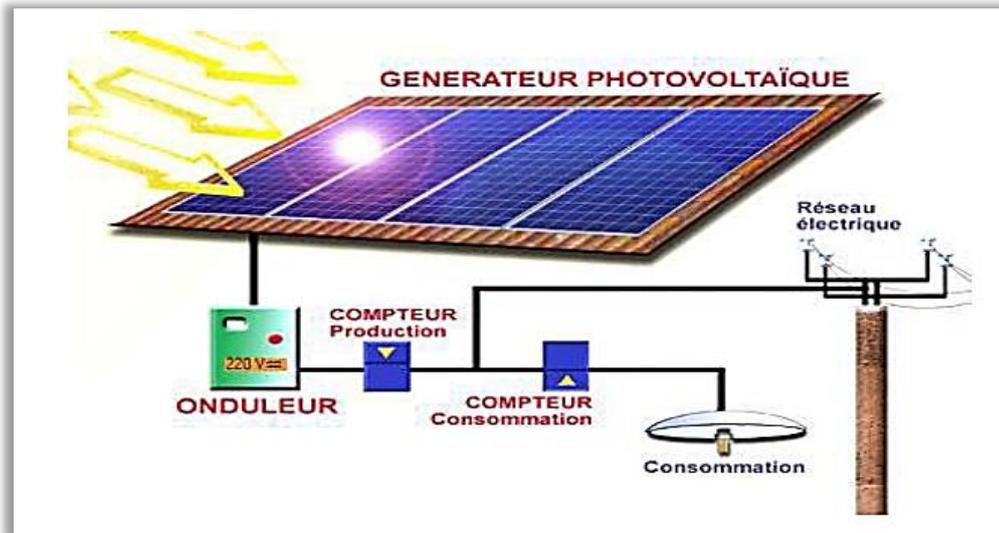


Figure I.I.4 Exemple de la structure d'un système PV connecté au réseau.

I.5 Composant d'un système photovoltaïque

I.5.1 Les cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques. Elle est exposée à la lumière et générée de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque sous-jacent à ce phénomène. Les capteurs photovoltaïques sont fabriqués en absorbant des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors une tension électrique. Les cellules photovoltaïques génèrent du courant continu à partir du rayonnement solaire, qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou charger une batterie. Son fonctionnement dépend du rayonnement solaire et des conditions de température. La puissance électrique générée par une cellule industrielle est très faible typiquement de 1 à 3 Watts avec une tension de moins d'un volt [10].

I.5.1.1 Principes de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un composant semi-conducteur généralement à base silicium. Il est constitué de deux couches, l'une dopée P et l'autre dopée N, créant une jonction PN avec barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transfèrent leur énergie aux atomes de la jonction PN, libérant les électrons de ces atomes, créant des électrons (charges N) et des trous (charges P). Cela crée une différence de potentiel qui peut être mesurée entre les deux couches. Cette différence de potentiel peut être mesurée entre les bornes positive et négatives de la cellule [11].

Le Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est illustré dans la figure :

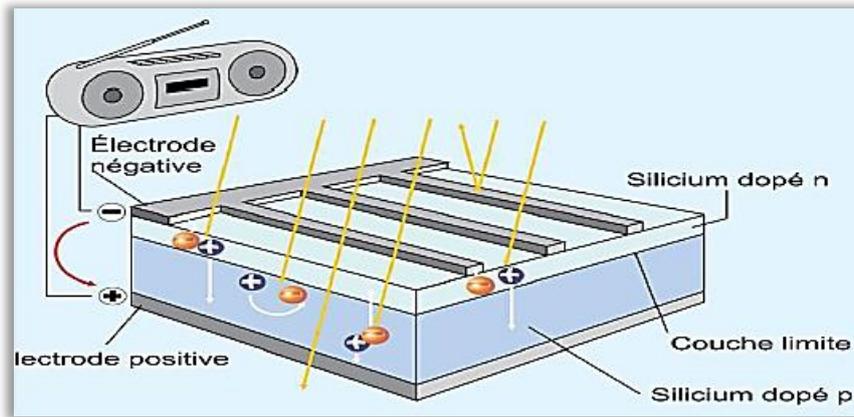


FIGURE I.5. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

1.5.1.2 Regroupement des cellules

- ✚ **Regroupement des cellules en série** : la cellule photovoltaïque, c'est l'élément principal du système photovoltaïque, produit très peu de puissance électrique, typiquement 2,5 W a une tension inférieure à un volt. Afin de générer plus de puissance, les éléments sont connectés en série et /ou en parallèle. La connexion d'éléments en série des cellules donne une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal au courant d'un élément.

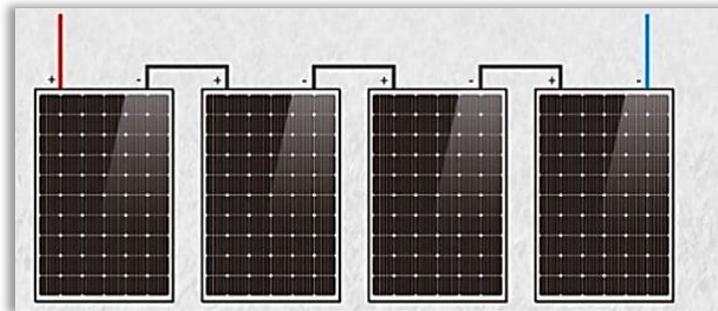


FIGURE I.6 MONTAGE EN SERIE

- ✚ **Regroupement des cellules en parallèle** : dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et un égal à la somme des courants individuels.

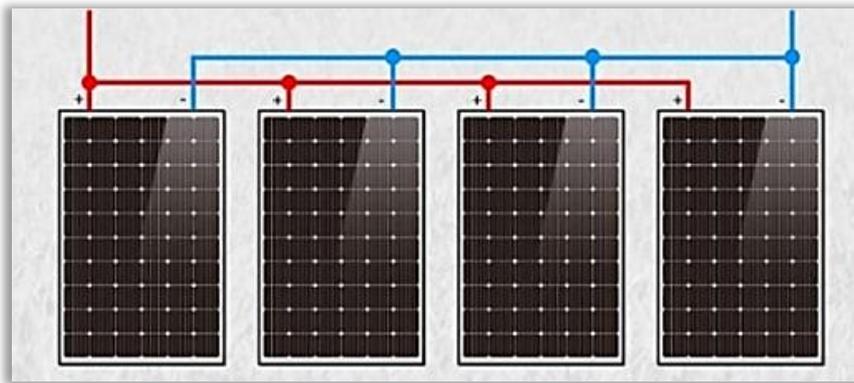


FIGURE I.7 REGROUPEMENT EN PARALLELE

- ✚ **Regroupement des cellules (série / parallèle) :** pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est-à-dire série-parallèle.

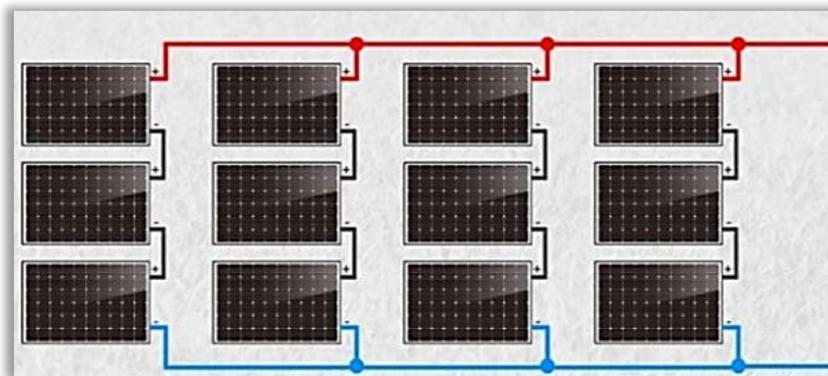


FIGURE I.8 REGROUPEMENT MIXTE

1.5.1.3 Différents types d'une cellule photovoltaïque :

Il existe deux technologies principales pour les cellules solaires, celle au silicium cristallin (cellule en silicium monocristallin, les cellules au silicium poly-cristallin) et celle au silicium à couche minces (amorphe).

- ✚ **Silicium cristallin :** Le silicium cristallin est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales, mais de nombreux autres matériaux sont disponibles. Le terme (cristallin) signifie que tous les atomes du matériau actif PV font partie d'une structure monocristalline et que l'arrangement ordonné des atomes n'est pas perturbé. [10]

On reconnaît deux types de cellules :

- ✓ **La cellule monocristalline :** La cellule est constituée d'un monocristal divisé en deux couches. C'est la cellule avec le meilleur rendement le plus élevé (12- 16% ; jusqu'à 23% en laboratoire), c'est la cellule la plus proche du modèle théorique, mais elle a aussi le rendement le plus élevé, en raison de sa forme carrée et de sa fabrication complexe. [12].

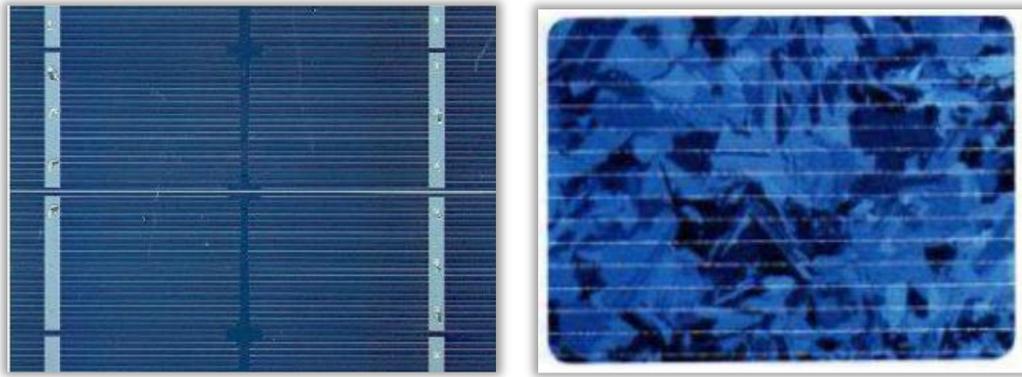


FIGURE I.9 (A) CELLULE AU SILICIUM MONOCRISTALLIN, (B) CELLULE AU SILICIUM POLYCRISTALLIN

- ✓ **La cellule poly-cristalline :** Le silicium poly cristallin est un matériau composé de cristaux adjacents obtenus par moulage. La conception la plus simple des cellules poly cristallines consiste en une collection de cristaux. Ils peuvent également être obtenus par sciage de blocs de cristal, mais ces blocs sont coulés et sont moins chers à produire, mais avec des rendements aussi faibles que 11% à 14% (laboratoire 18%). Ils sont reconnaissables à leur forme carrée. [12]
- ✓ **Cellules à couche minces :** Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre substrat flexible. L'arrangement désordonné des atomes réduit partiellement la conductivité du semi-conducteur. Les cellules amorphes sont utilisées lorsqu'une solution économique est souhaitée et lorsque très peu d'énergie est nécessaire, comme les montres, les calculatrices de poche et les lamineurs d'urgence. Ils présentent des coefficients d'absorption élevés et permettent des épaisseurs très fines de l'ordre du micron. En revanche, le rendement de conversion est faible (7%-10%) et les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière. [13]

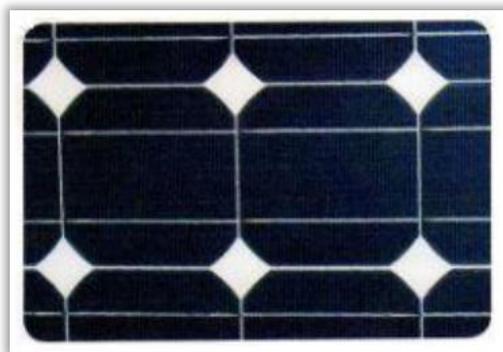
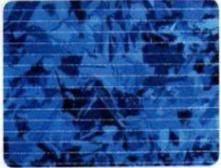
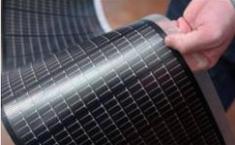


FIGURE I.10 CELLULE AU SILICIUM AMORPHE (COUCHE MINCE).

Le tableau 1 présente les avantages et les inconvénients pour les technologies les plus Utilisées d'une cellule photovoltaïque.

TABEAU I.1 AVANTAGE ET INCONVENIENT DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES [14].

Type de cellule	Rendement	Avantage	Inconvénient	Image
Silicium Monocristalline	13-17 %	Bon rendement pour une cellule	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication.	
Silicium Poly-cristalline	11-15%	Bon rendement pour un module	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication.	
Silicium Amorphe	5-9%	Facile à fabriquer	Mauvais rendement	
Cdt	7-11%	Absorbe 90% des photos incidents	Cadmium très polluant	
CIGS	20%	Energie de gap ajustable 99% des photos absorbés	Manque de matière première	
Cellules Organiques	5%	Faible cout de fabrication, flexible.	Rendement encore trop bas	

I.5.2 Batterie

Volta, était un physicien italien du début du XIXe siècle, a été le le premier à générer de l'électricité par des phénomènes électrochimiques. Après quelques années, toujours au XIXe siècle, Gaston plante met au point la première pile rechargeable. Les batteries d'aujourd'hui sont basées sur la mémé principe. La batterie permet de stocker de l'énergie dans un système isolé et de la restituer le jour, la nuit l'énergie stockée pendant la journée la nuit ou les jours nuageux.

Il existe différents types de batteries, on peut citer : [15]

- ✚ La batterie plomb acide
- ✚ La batterie nickel cadmium
- ✚ La batterie sodium chlorure de nickel
- ✚ La batterie lithium-ion

Le principe de fonctionnement d'une batterie repose sur la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique. Les batteries au plomb ont été les premières et les plus utilisées sur le marché, mais elles sont restées compétitives grâce à de nombreuses innovations. La batterie au plomb est constituée de cellule appelée accumulateur qui fournisse une tension de 2,1 volts. Elle est constituée de 6 accumulateurs disposés en série, fournissant ainsi une tension totale de 12,6 volts. L'accumulateur est un ensemble de plaques (positives et négatives) immergées dans une substance acide qui s'appelle électrolyte (un mélange d'acide sulfurique et d'eau). Lors de décharge, les plaques d'anode subissent (réduisent), c'est-à-dire qu'ils consomment des électrons et que la cathode libère des électrons (réaction d'oxydation). Le phénomène inverse se produit lors de la charge. [11]

I.5.3 Charge

Il existe des charges à caractère résistives et des charges inductives. Les charges résistives comprennent les ampoules électriques, les chauffe-eaux etc. Les appareils qui utilisent l'électromécanique sont des charges résistives et inductives. Ce sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges CC peuvent également avoir des composants inductifs, mais leur seul effet est les variations de tension et courant avec des changements dans le fonctionnement du système [16].

I.5.4 Onduleur

Un convertisseur de courant continu (DC) en courant alternatif (AC) est aussi appelé onduleur. Sa fonction principale est de convertir le courant continu généré par le générateur solaire en courant alternatif monophasé ou triphasé. Et parmi ces principales caractéristiques :

- ✚ La puissance nominale
- ✚ Puissance ponctuelle ou de surcharge
- ✚ Consommation à vide
- ✚ Tension d'entrée et de la sortie
- ✚ Efficacité et la durée de vie
- ✚ Rendement et la forme d'onde

On distingue différents types d'onduleurs selon la qualité du signal de sortie : [17]

- a) Onduleurs sinusoïdaux modifiés, pas à pas, un générateur d'onde proche d'une onde sinusoïdale.
- b) Onduleur à modulation de largeur d'impulsion MLI (pulse-witz modulation).
- c) Onduleur sinusoïdale.

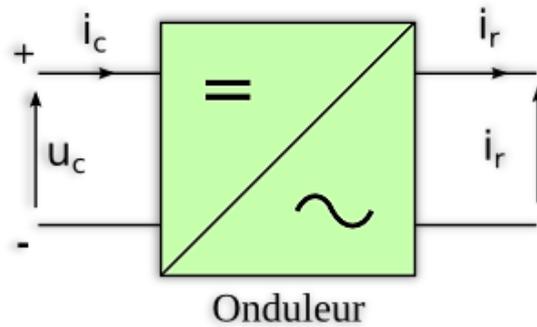


Figure I.11 Symbole d'onduleur

I.5.5 Hacheurs

Un hacheur est un convertisseur CC/CC qui convertit l'énergie CC à une certaine tension (ou courant) en énergie CC à une tension (ou courant) différente. Son utilisation est nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans une batterie, ou pour fournir une charge continue. Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous les appareils ne consomment aucune puissance de fonctionnement c'est pourquoi on a un bon rendement dans le hacheur [18].

Le hacheur est un convertisseur Continu qui conduit en coupant une quantité d'entrée CC, une tension ou un courant, et sa quantité de sortie est également cc ou à faible ondulation. Il existe trois familles de convertisseurs statiques (hacheurs) :

- ✚ Hacheur abaisseur (ou Buck) ;
- ✚ Hacheur élévateur (ou booste) ;
- ✚ Hacheur élévateur - abaisseur (Buck–booste).

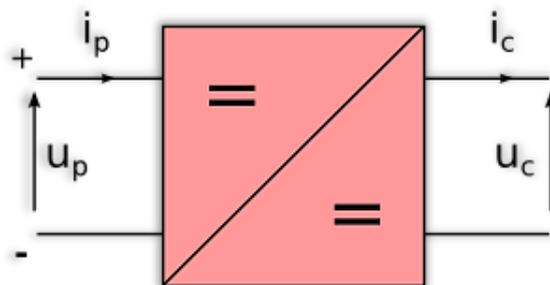


Figure I.12 Symbole d'un convertisseur DC-DC

I.5.6 Régulateur

Le régulateur c'est l'élément central d'un système photovoltaïque autonome. Il est placé entre la plaque et la batterie. Son but est de protéger la batterie contre la surcharge et la décharge excessives pour prolonger sa durée de vie afin que les applications puissent fonctionner automatiquement pendant une longue période.



Figure I.13 Régulateur autonome

I.6 La commande MPPT

Un MPPT, (Maximum Power Point Tracer) comme son nom l'indique, est un principe qui permet de suivre le point de puissance maximum d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement connectés à des centrales photovoltaïques.

Le suivi du point de puissance maximal (MPPT) est une partie importante des systèmes photovoltaïques. Depuis 1968, date à laquelle la première loi fiscale de ce type a été promulguée, plusieurs technologies ont été développées de type PV. Ces techniques diffèrent les unes des autres par leur complexité, le nombre de capteurs requis la vitesse de convergence, le coût, le rendement et la portée. [17]

I.6.1 Principe de MPPT

Par définition, le contrôle MPPT peut être combiné avec un étage d'adaptation intermédiaire pour faire fonctionner un générateur PV de manière à produire en continu une puissance maximale. Elle est donc indépendante des conditions météorologiques (température et éclairage).

La commande du convertisseur amène le système au point de fonctionnement maximum (V_{amp} , I_{mp}) [17].

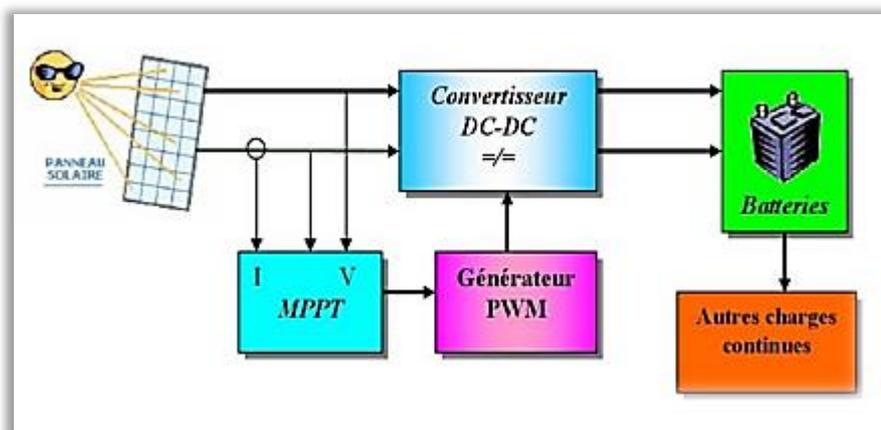


Figure I.14 Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

I.6.2 Méthode de poursuite du MPPT

Pour améliorer l'efficacité de fonctionnement des centrales photovoltaïque, la technique dite de Maximum Power Tracking (MPPT) est utilisée. La technologie consiste à adopter de manière optimale toute la puissance obtenue de cette source d'énergie photovoltaïque à la charge du réseau. Elle doit être utilisée dans toute application utilisant ces générateurs, et deviendra nécessaire selon la théorie du transfert optimal de puissance.

I.6.2.1 Méthodes a contre réaction de tension

Ce type de mécanismes est basé sur le contrôle de la tension de fonctionnement du panneau en le comparant à une tension de référence. Cela crée une tension d'erreur qui modifie le rapport cyclique du la PWM de contrôle pour corriger cette erreur. Selon la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe) il existe trois méthodes :

- a) Méthode à tension de référence fixe
- b) Méthode a tension de référence en fonction de V_{co}
- c) Tension de référence extrême (Cellule pilote)

I.6.2.2 Méthodes a contre réaction de courant

Dans Cette méthode, seules les mesures de courant sont utilisées pour obtenir des informations sur l'état de fonctionnement et réel du système. Vous pouvez déterminer la valeur de courant optimale que le panneau doit exécuter pour tirer la puissance maximale [18].

Méthode du courant de référence selon le courant de court-circuit I_{cc} Méthode de maximisation du courant de sortie

I.6.2.3 Méthodes a contre réaction de puissance

Ces méthodes reposent sur des algorithmes de recherche itératifs pour trouver le point de fonctionnement du panneau afin de maximiser la puissance générée sans perturber le fonctionnement du système. Ils ne sont pas basés sur des valeurs de références prédéfinies, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les modules solaires. Donc pour un point particulier, on regarde dans une direction particulière. L'augmentation de la sortie du panneau maintient cette direction de recherche. Sinon on cherche dans le sens opposé [18].

a) Algorithme perturbation et observation

Il s'agit de l'algorithme de poursuite du PPM le plus utilisé. Comme son nom l'indique, il consiste à perturber le système en augmentation ou en diminuant Réf ou en affectant directement le rapport cyclique du convertisseur DC-DC et en observant l'effet de ces perturbations sur la puissance de sortie du panneau [17].

Si la valeur de la puissance courante du panneau $P(k)$ est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$ elle reste dans le même sens que la 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 (17).

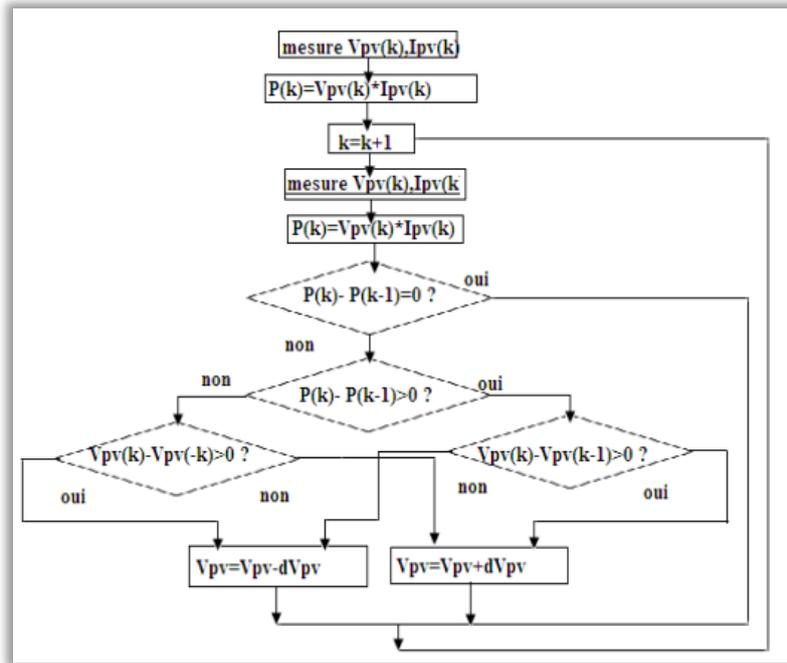


FIGURE I.15 ORGANIGRAMME DE L'ALGORITHME DE PERTURBATION ET DE L'OBSERVATION.

b) Algorithme incrémentation de la conductance

La méthode d'incrément de la conductance a été proposée pour éviter les Inconvénients de la méthode P&O de recherche du MPPT, et indépendante des caractéristiques des différents composants utilisés. Les tensions et courants du panneau sont monitors, de telle manière que le contrôleur peut calculer la conductance et la conductance incrémentale, et décider de son comportement. [17].

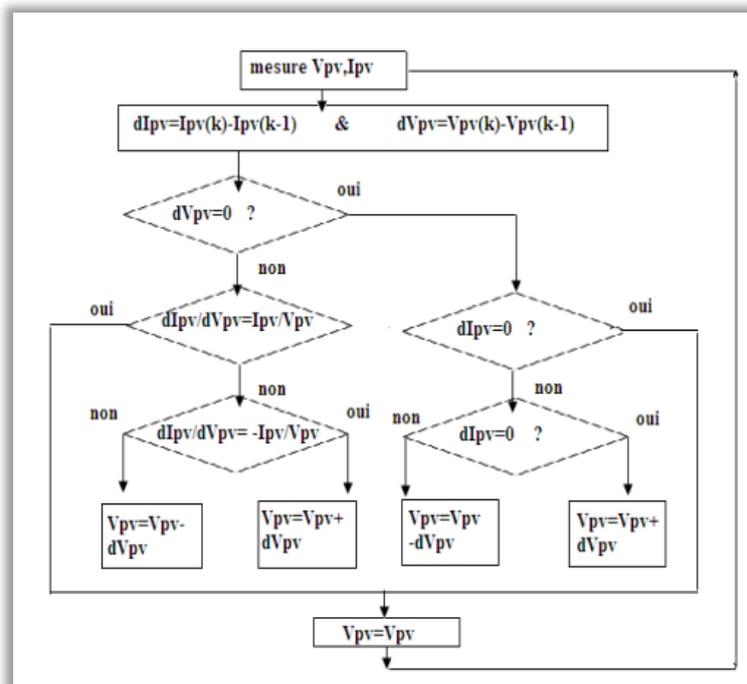


Figure I.16 Organigramme de l'algorithme de l'incrémentale de la conductance

I.7 Conclusion

Ce chapitre a fourni les bases nécessaires pour comprendre le sujet. Nous avons rappelé quelques concepts sur le rayonnement solaire, ses différents types et comment ils peuvent être utilisés dans le secteur photovoltaïque.

Nous avons ensuite donné une explication de la façon dont les cellules photovoltaïques fonctionnent, de leurs caractéristiques clés et de leurs types.

Au terme, nous avons discuté brièvement des différents éléments du système photovoltaïque ainsi que de la commande MPPT.

CHAPITRE II

Perturbations harmoniques et les différentes solutions

II Introduction

Le chapitre précédent a présenté quelques généralités sur les systèmes photovoltaïques pour l'énergie renouvelable, ainsi que les différents composants de ces derniers.

Dans ce chapitre on traite d'abord les perturbations qui peuvent survenir dans le réseau électrique et affecter le courant et la tension. Nous nous interrogeons ensuite sur leurs origines, leurs conséquences et les normes internationales imposées. Enfin, nous présentons les solutions de dépollution conventionnelles et modernes existantes qui compensent ces harmoniques.

II.1 Qualité d'énergie

L'énergie électrique fournie doit être conçue pour un système triphasé à trois tensions sinusoïdales. Chacune de ces phases nécessite les paramètres suivants :

- ✓ Même fréquence
- ✓ Même amplitude
- ✓ Même déphasage

Et doit être équilibré coté source et symétrique coté charge. Ces derniers critères permettent de quantifier la qualité de la tension. La qualité de l'énergie peut être affectée par certains événements ou limitations physiques associés au fonctionnement du réseau, ou par certains récepteurs

II.2 Perturbations électriques et leurs origines

Les interférences électriques affectent l'un des paramètres de qualité de l'énergie. Il en existe différents types tels que : Les baisses de tension ou les pannes, les fluctuations de tension, les déséquilibres de tension dans les systèmes triphasés, la présence d'harmoniques et les fluctuations de fréquence.

II.2.1 Creux et coupures de tension :

Un creux de tension est une chute brutale de tension à une valeur comprise entre 10% et 90% de la tension nominale pendant 10ms à quelques secondes.

Les creux de tension peuvent être causés par des phénomènes naturels tels que la foudre, ou par des pannes dans les installations, les réseaux publics ou les réseaux d'utilisateurs. Ce problème se produit également avec des opérations de commutation à courant élevé (moteurs, transformateurs, etc.)

Une coupure de tension quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90 % de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. La figure... montre un exemple de creux et de coupure de tension.

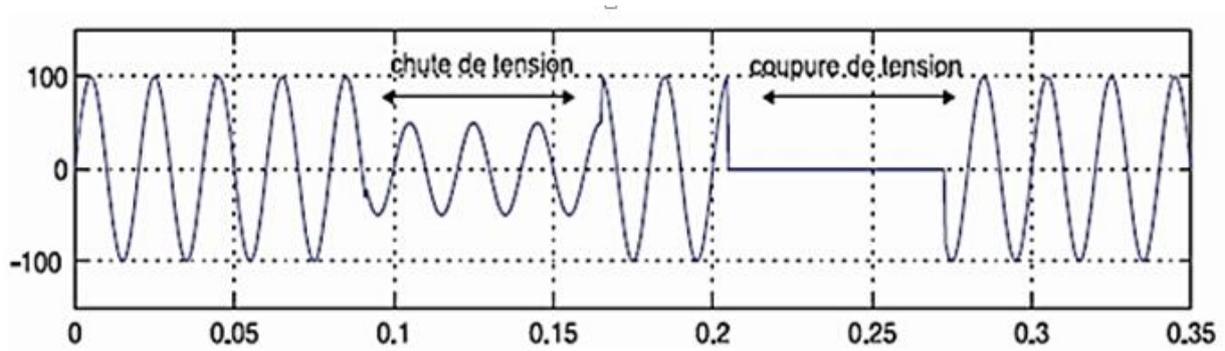


FIGURE II.1 CREUX ET COUPURES DE TENSION .

II.2.2 Conséquences des creux de tension

Ils peuvent provoquer le déclenchement d'équipements, si leur profondeur et leur durée excèdent certaines limites.

II.2.3 Fluctuation de tension

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou irrégulières de l'enveloppe de tension. Il s'agit de fluctuations soudaines d'amplitude de tension de l'ordre de 10 % sur une période de 1/100e de seconde. Elle est notamment due à la propagation de forts courants d'appel sur les lignes électriques principales. L'une des principales causes de ces courants est le fonctionnement d'équipements dont la puissance d'entrée change rapidement, tels que les fours à arc et les soudeurs. Ces fluctuations se traduisent par des fluctuations d'intensité visibles dans le niveau d'éclairage et provoquent des gênes visuels perceptibles à des fluctuations de tension. Ce phénomène de papillotement est appelé Flicker. Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure .

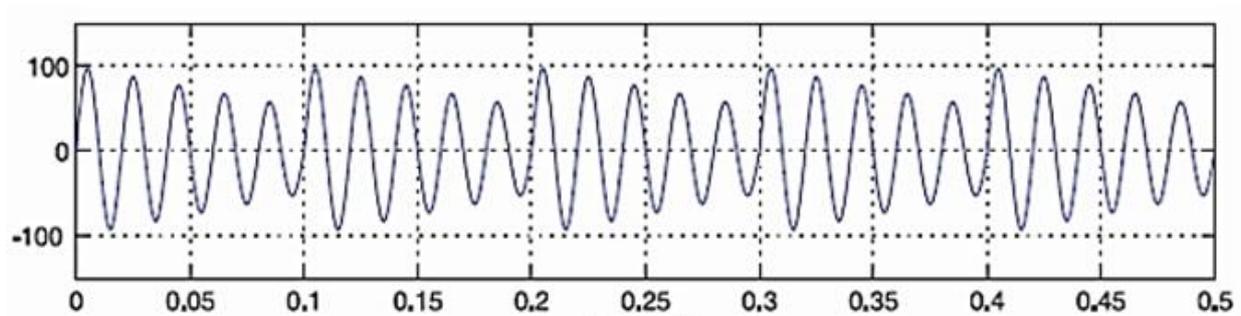


FIGURE II.2 FLUCTUATION DE TENSION

II.2.4 Surtension

Les surtensions temporaires sont des hausses soudaines de la valeur efficace de la tension de plus de 110% de la tension nominale, laquelle se rétablit après une courte durée. Les surtensions temporaires comprennent des durées entre 8 millisecondes et une minute. [3]

II.2.5 Déséquilibre du système triphasé de tension

Un système d'alimentation triphasé est dit équilibré ou symétrique si les tensions et les courants triphasés ont la même amplitude et sont déphasés de 120° l'un par rapport à l'autre. Si

l'un de ces deux conditions n'est pas remplie, le système est alors dit : système en déséquilibre ou asymétrique. Parmi les causes, on peut citer les charges monophasées qui affectent directement le courant et par conséquent engendrent un déséquilibre des tensions.

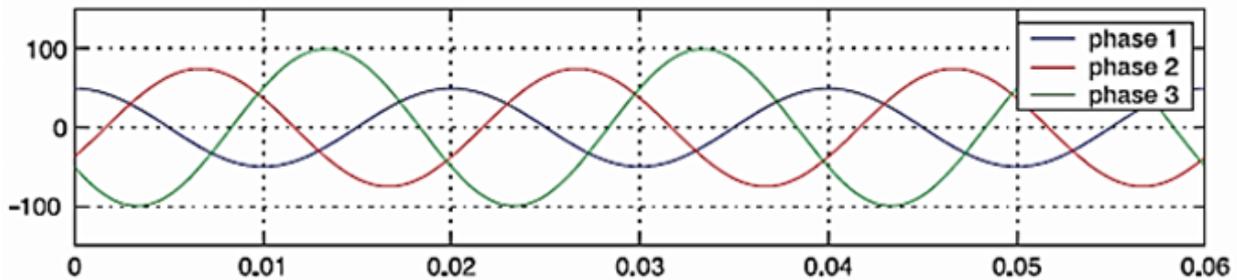


FIGURE II.3 DESEQUILIBRE DU SYSTEME TRIPHASE DE TENSION

II.2.6 Variation de fréquence

Les variations de fréquence sont très rares dans les systèmes d'alimentations électriques. Les consommateurs qui ne sont pas connectés au réseau électrique sont concernés par cette fluctuation. La tolérance de fréquence est de $\pm 1\%$ lorsque la fréquence est de 50Hz ou 60Hz selon le pays [19].

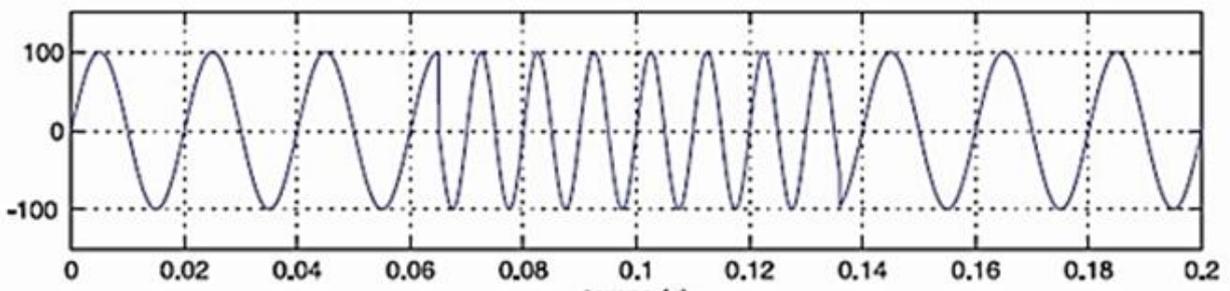


FIGURE II.4 VARIATION DE FREQUENCE

II.2.7 Présence d'harmonique et inter-harmoniques

Selon le pays, la fréquence du réseau est généralement de 50 Hz ou 60 Hz, mais en pratique les formes d'onde de tension et de courant ne sont pas sinusoïdales, en particulier lorsque des charges non linéaires sont présentes et que des harmoniques sont introduites dans le réseau. Électrique. Ces harmoniques sont des composants de formes d'onde périodiques qui oscillent avec une fréquence multiple de la fréquence de la ligne électrique.

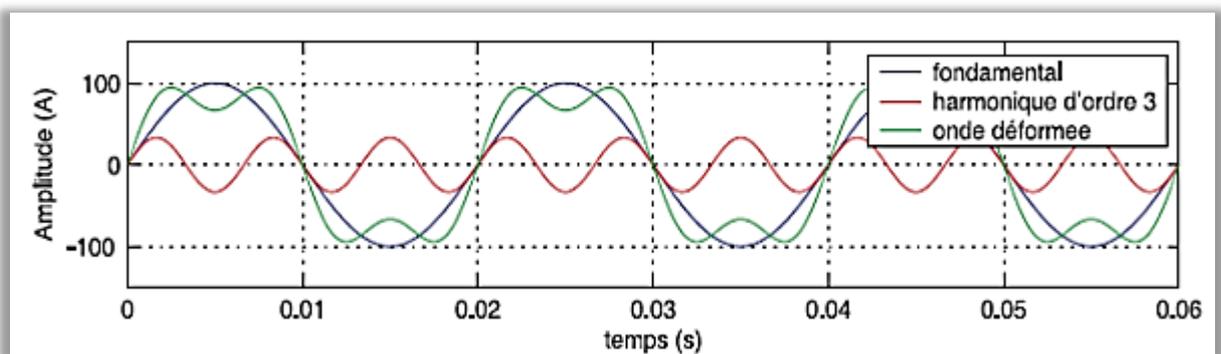


FIGURE II.5 D'HARMONIQUE ET INTER-HARMONIQUES

Par contre, les inter-harmoniques se sont des composants dont les fréquences ne sont pas des multiples entiers de la fréquence de la puissance fondamentale.

Les sources d'harmoniques actuels les plus courantes sont les redresseurs à diodes ou à thyristor qui transforment des tensions ou courants alternatifs en tensions ou courants continus. D'autres sources d'harmoniques existent telles que les variateurs de vitesse, les fours à arc et les dispositifs à base d'électronique de puissance.

Les harmoniques de courant peuvent provoquer une dissipation de l'énergie en chaleur. En présence d'une résonance, ces harmoniques peuvent également détruire les équipements électriques ou enclenché des disjoncteurs. [19]

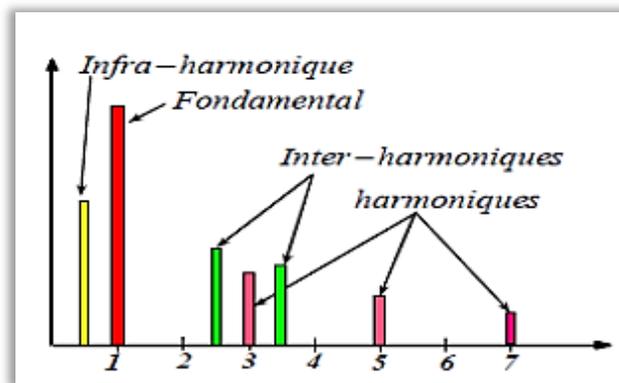


FIGURE II.6 EXPLICATION D'HARMONIQUE ET INTER-HARMONIQUES

II.2.7.1 Définition

Un harmonique est une composante sinusoïdale d'une onde périodique ou un quantile ayant une fréquence qui est un multiple entier de la fréquence fondamentale. Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 Hz et 2000 Hz (entre les harmoniques de rangs $h=2$ et $h=40$). Il peut exister des inter-harmoniques [20].

II.2.7.2 Origine des harmoniques

Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale et d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental. En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impairs existent. Nous pouvons également observer des sous-harmoniques ou des inter-harmoniques à des fréquences non multiples de la fréquence fondamentale [21]. Une source majeure d'harmoniques est la commutation des semi-conducteurs tels que les convertisseurs de puissance et les dispositifs avec des caractéristiques courant-tension non linéaires. Un récepteur d'énergie est considéré comme une charge perturbatrice dans le réseau électrique s'il absorbe des courants non sinusoïdaux ou asymétriques ou s'il consomme de la puissance réactive. Les appareils suivants sont des sources d'harmoniques.

Les convertisseurs statiques à base de composants d'électronique (diodes, transistors...etc.) sont générateurs de courants harmoniques, qui en conséquent le facteur de puissance. Toute fois on rappelle que les charges symétriques ne génèrent pas d'harmoniques de rang pair. Et le spectre des harmoniques est décroissant dont l'harmonique de rang 3 la prépondérante pour les charges monophasées peuvent atteindre 80 % du fondamental [21].

Les courants harmoniques se produisent lorsque l'éclairage est fourni par des lampes à décharge ou des tubes fluorescents.

Pour les fours à arc à courant alternatif, l'arc est non linéaire, dissymétrique et instable. Les spectres possèdent des raies harmoniques impaires, paires et un spectre continu (bruit de fond à toutes les fréquences). Les fours à arc à courant continu sont généralement alimentés par l'intermédiaire d'un redresseur, l'arc est plus stable qu'en courant alternatif.

Dans le cas d'inductances saturées (pour les transformateurs à vide exposés à des surtensions permanentes) l'impédance dépend de l'amplitude du courant qui les traverse, provoquant ainsi une déformation de ce courant.

Les machines tournantes génèrent des harmoniques plus élevées d'amplitude négligeable

Exemple :

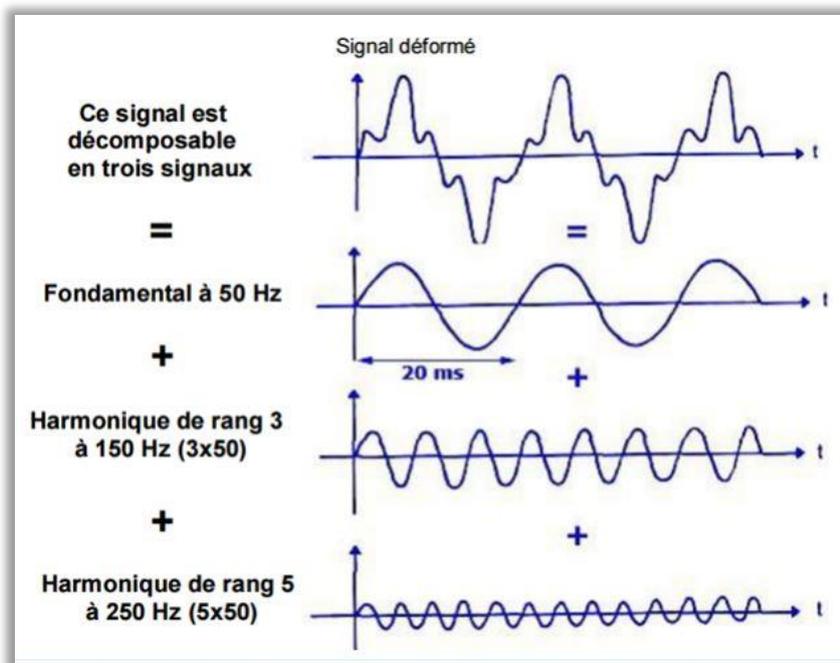


FIGURE II.7 EXEMPLE D'UN COURANT DISTORDU ET SA DECOMPOSITION EN COMPOSANTES .

II.2.7.3 Les effets des harmoniques

Les harmoniques peuvent avoir des effets néfastes sur les équipements électriques et électroniques, ainsi que sur les réseaux électriques. Les principaux effets sont les suivants :

- ✚ **Distorsion de la forme d'onde** : les harmoniques peuvent provoquer une distorsion de la forme d'onde du signal, ce qui peut affecter le fonctionnement des équipements électriques et électroniques tels que les moteurs, les transformateurs ou les onduleurs.
- ✚ **Echauffement excessif** : les harmoniques peuvent entraîner un échauffement excessif des équipements électriques et électroniques en raison des courants supplémentaires qu'ils peuvent également générer des courants supplémentaires et entraîner un échauffement excessif des équipements.

- ✚ **Perturbations électromagnétiques** : les inters harmoniques peuvent générer des perturbations électromagnétiques qui peuvent affecter le fonctionnement des équipements électriques et électroniques. Ces perturbations peuvent également se propager dans le réseau électrique et affecter les autres équipements connectés au réseau.
- ✚ **Pertes d'énergie** : les harmoniques peuvent entraîner des pertes d'énergie supplémentaires dans les équipements électriques et électroniques, ce qui peut entraîner une baisse de l'efficacité énergétique.
- ✚ Vibrations et les bruits dans les machines tournantes.
- ✚ Surcharge du fils du neutre à cause des courants harmoniques de ranges impaires multiples de trois. Générée par des charges non linéaires monophasées.
- ✚ Abaissement de la précision des appareils de mesure
- ✚ Détérioration du facteur de puissance dans le réseau et augmentation des pertes joules.

II.3 Les harmoniques dans un système isolée :

Elles sont généralement causées par des appareils électroniques tels que les onduleurs, des convertisseurs de fréquence, des alimentations à découpage, des chargeurs de batterie, et un éclairage à LED, etc., Ces équipements ont des charges non linéaires qui peuvent générer des harmoniques.

Les interférences harmoniques peuvent entraîner des problèmes tels qu'une perte de puissance, une surchauffe des appareils, une durée de vie réduite de l'appareil, la stabilité du système, des interférences avec d'autres appareils connectés au réseau.

II.3.1 Perturbations harmoniques :

Parmi toutes les perturbations évoquées ci-dessus, nous nous intéressons principalement aux harmoniques de courant et/ou de tension. Les outils de calcul pour détecter la présence d'harmoniques sont le calcul du facteur de distorsion harmonique THD et le calcul du facteur de puissance Fpp.

II.3.2 Outils de calcul :

II.3.2.1 Total harmonique distorsion :

les effets harmoniques sont caractérisés par le pourcentage de distorsion harmonique globale (THD) .il s'agit d'une mesure importante souvent utilisée pour quantifier le contenu harmonique des signaux déformés. La mesure le degré de distorsion du signal causé par les harmoniques a une onde sinusoïdale. Le THD est défini comme la valeur efficace des harmoniques au-dessus du fondamental.

Le THD est défini pour les signaux de tension de et courant respectivement :

$$\text{THD}_U = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{u_{effh}}{u_{eff1}} \right)^2} \quad (\text{II. 1})$$

$$\text{THD}_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{I_{effh}^2}{I_{eff1}^2}} \quad (\text{II. 2})$$

Avec :

$THDi$: Taux de distorsion harmonique de courant.

$THDu$: Taux de distorsion harmonique de tension.

U_{effh} : Valeur efficace de la composante de tension harmonique du rang h,

Avec $h > 1$.

U_{eff1} : Valeur efficace de la composante fondamentale de tension.

Dans ce qui suit on considère que la tension de la source est purement sinusoïdale.

Un THD élevé indique que le signal est fortement déformé par les harmoniques, tandis qu'un THD faible indique que le signal est relativement propre.

Le THD est couramment utilisé pour évaluer la quantité de l'alimentation électrique dans les systèmes électriques et électroniques, tels que les équipements audios, les amplificateurs, les variateurs de vitesse, les onduleurs, etc. En général, les normes électriques recommandent un THD inférieur à 5% pour les équipements sensibles aux harmoniques.

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer le THD, telles que l'analyse spectrale, la mesure de distorsion moyenne. La méthode utilisée dépendra des spécifications de l'équipement et des exigences de mesure.

II.3.2.2 Facteur de puissance :

le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active (P) et la puissance apparente (S) Pour chaque signal sinusoïdal. S'il y'a des harmoniques, une force supplémentaire se produit appelée force de déformation (D), d'où l'expression de la puissance apparente est comme suit :

$$s = \sqrt{p^2 + Q^2 + D^2} \quad (II. 3)$$

Avec :

D : la puissance déformante. D due aux harmoniques du courant est définie par la formule suivant :

$$D = \sqrt{3U} \sqrt{I_{eff}^2 - I_{eff1}^2} \quad (II. 4)$$

If : valeur efficace de l'harmonique de rang h.

I_{eff1} : Valeur efficace du courant fondamental.

Alors, le facteur de puissance sera comme suit :

$$FP = \cos\phi = \frac{p}{s} = \frac{p}{\sqrt{p^2 + Q^2 + D^2}} \quad (II. 5)$$

$$P = \sqrt{3} U I_{eff1} \cos(\phi_1) \tag{II. 6}$$

$$Q = \sqrt{3} U I_{eff1} \sin(\phi_1) \tag{II. 7}$$

II.3.3 Représentation d’harmonique

La façon la plus simple de représenter un courant non sinusoïdal est d'examiner sa série de Fourier jusqu'au rang significatif. H. En représentant les fréquences discrètes qui composent ce signal avec la précision souhaitée et la complexité acceptable. Dans ce cas, le courant absorbé par la charge non linéaire peut généralement être modélisé comme l'addition de plusieurs sources de courant connectées en parallèle, une pour chaque composante de fréquence, comme illustré :

$$I_h = I_0 + I_{1h} + I_{2h} + \dots + I_{nh} = I_0 + \sqrt{2I_1} \cos(\omega t + \phi_1) + \dots + \sqrt{2I_n} \cos(n\omega t + \phi_n) \tag{II.8}$$

Si on suppose une charge non-linéaire triphasée (abc), alors les courants absorbés par chaque phase seront :

$$I_A(t) = I_0 + \sqrt{2I_1} \cos(\omega t + \phi_1) + \dots + \sqrt{2I_n} \cos(n\omega t + \phi_n) \tag{II. 9}$$

$$I_B(t) = I_0 + \sqrt{2I_1} \cos(\omega t + \phi_1 - \frac{2\pi}{3}) + \dots + \sqrt{2I_n} \cos(n\omega t + \phi_n - n \frac{2\pi}{3}) \tag{II. 10}$$

$$I_C(t) = I_0 + \sqrt{2I_1} \cos(\omega t + \phi_1 - \frac{4\pi}{3}) + \dots \pm \sqrt{2I_n} \cos(n\omega t + \phi_n - n \frac{4\pi}{3}) \tag{II. 11}$$

Dans les réseaux électriques triphasés, les principales composantes harmoniques sont de rangs 5, 7, 11, et 13.

Les harmoniques de rang 2 généralement sont nulles, car les charges sont symétriques.

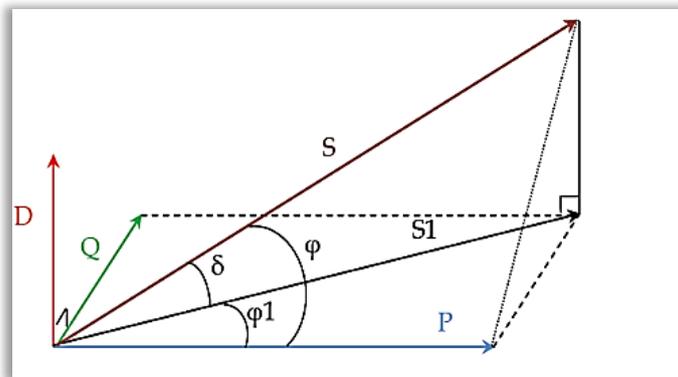


FIGURE II.8 DIAGRAMME DE FRESNEL AVEC PRESSION D’UNE PUISSANCE DEFORMANTE .

II.3.4 Normes et réglementation :

Des normes ont été mises en place pour limiter les effets des interférences harmoniques sur les réseaux électriques et garantir une qualité de produit fiable pour tous les utilisateurs. Ces

normes doivent être respectées par les revendeurs et les utilisateurs en appliquant les recommandations qui fixent les règles de Compatibilité Electromagnétique (CEM). : [22]

- Au niveau international par la CEI,
- Au niveau européen par le CENELEC,
- Au niveau français par l'UTE et le CEF,

II.3.4.1 Concernant la tension :

Les niveaux tolérables pour les tensions harmoniques sur les réseaux basse tension sont détaillés dans le tableau ci-dessous (CEI 61000-2-1 et 61000-2-2). Les valeurs sont exprimées en pourcentage de la tension fondamentale à 50 Hz. [23]

TABLEAU II.1 NIVEAUX TOLERABLE POUR LES TENSIONS HARMONIQUES

Harmoniques impairs Non multiples de 3		Harmoniques impairs Multiples de 3		Harmoniques pairs	
Rang h	Taux %	Rang h	Taux %	Rang h	Taux %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.2	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	21		10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			+12	0.2
+25	0.2+0.5*25/h				

II.3.4.2 Concernant le courant :

La norme CEI 61000-3-2 impose des limites à tous les matériels appelant un courant inférieur ou égal à 16A par phase exceptés les matériels de puissance inférieure à 50W. Ces limites sont définies selon la classe des appareils (A, B, C ou D). [23]

TABLEAU II.2 NIVEAUX TOLERABLE POUR LES COURANTS HARMONIQUES

Harmoniques impairs		Harmoniques pairs	
Rang harmonique n	Courant maxi. Admissible (A)	Rang harmonique n	Courant maxi. Admissible (A)
3	2.4	2	1.09
5	1.15	4	0.45
7	0.78	6	0.31
9	0.43	6 < n < 40	0.23*8/n
11	0.34		
13	0.22		
13 < n < 39	0.16*15/n		

II.4 Solutions de dépollution du réseau électrique :

Le respect des normes de qualité de l'énergie nécessite le développement de système qui restreint la dissipation des composants harmoniques lors de la connexion de charges non linéaires au réseau électrique. Pour éliminer les défauts actuels, il existe deux groupes de solutions de dépollution, classiques et modernes, pour éliminer tous les défauts.

Les solutions traditionnelles qui sont les plus utilisés industriellement : Les filtres passifs.

Les solutions modernes qui sont conçus afin de surmonter les limitations des filtres passifs :

Il existe trois types de filtres permettant de réduire les tensions et courant harmoniques :

- Les filtres actifs (FAP, FAS)
- Les filtres actifs combinés (UPQC)
- Les filtres hybrides (actif et passif)

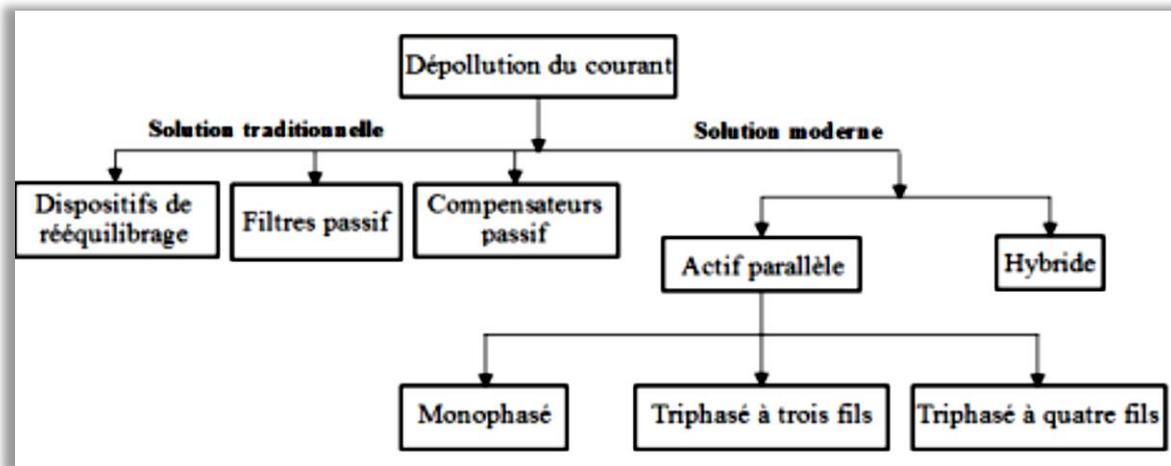


FIGURE II.9 DIFFERENTES SOLUTIONS UTILISEES POUR DEPOLLUER LE COURANT .

II.4.1 Les solutions traditionnelles :

Ce sont des techniques que tout ingénieur électricien devrait connaître. Ils apportent une solution simple et rapide à certains cas de défauts localisés en utilisant des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et des connexions qui modifient le schéma d'installation [29]. Parmi ces techniques on peut citer :

II.4.1.1 Agit sur la structure de l'installation :

Il est souhaitable d'alimenter un grand pollueur par un transformateurs à part, afin de le séparer d'un récepteur sensible. Face à un pollueur moyen il est préférable d'effectuer l'alimentation des câbles distincts au lieu de les connecter en parallèle. Une distribution en étoile permet de découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles. [25]

II.4.1.2 Rééquilibrage des courants du réseau électrique :

Répartit uniformément les charges triphasées lorsque les charges monophasées et biphasées sont mal réparties en raison d'un déséquilibre de courant dans les réseaux basse tension.

Compensateur passif, ex : montage de Steinmetz (Fig. (II.2)) qui provoque un fort déséquilibre pour les fréquences autres que 50Hz avec des résonnances qu'il faut éviter d'exciter à proximité d'un générateur d'harmonique [26].

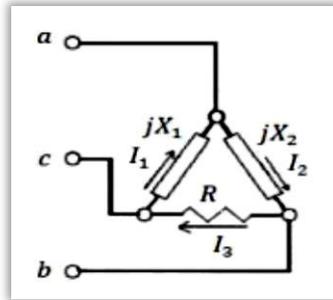


FIGURE II.10 MONTAGE DE STEINMETZ POUR LE REEQUILIBRAGE .

II.4.1.3 Compensation de la puissance réactive :

La compensation de la puissance réactive consommée par les charges polluantes crée des pertes, dégrade la capacité de la ligne de transmission et provoque des perturbations de tension telles que des chutes de tension. Les condensateurs sont connectés en parallèle avec le réseau pour compenser la puissance réactive et améliorer le facteur de puissance. Les machines synchrones triphasées sont également utilisées pour la compensation de puissance réactive [27].

II.4.1.4 Utilisation du redresseur dodécaphasé :

Le principe consiste à utiliser un transformateur à deux secondaires délivrant des tensions décalées de 30° entre elles, chacun de ces secondaires alimentant un redresseur en pont de Graëtz qui réalise un redressement hémiphase.

Les redresseurs doivent fournir des courants continus identiques afin que les courants alternatifs qu'ils prélèvent sur les secondaires des transformateurs aient les mêmes valeurs. Dans ces conditions, il y a une recombinaison des courants harmoniques, générés par chacun des redresseurs au primaire du transformateur et le calcul montre que les harmoniques de rang $6k \pm 1$ avec k impair sont éliminés [28].

C'est le cas en particulier pour les harmoniques 5 et 7 dont les amplitudes théoriques sont les plus importantes. Les harmoniques 11 et 13 sont conservés tandis que les harmoniques 17 et 19 sont éliminés. Les harmoniques restants sont donc de rang $12k \pm 1$ avec k entier naturel.

La figure [11]. Représente le courant absorbé par le primaire du transformateur à partir des courants délivrés par les deux secondaires

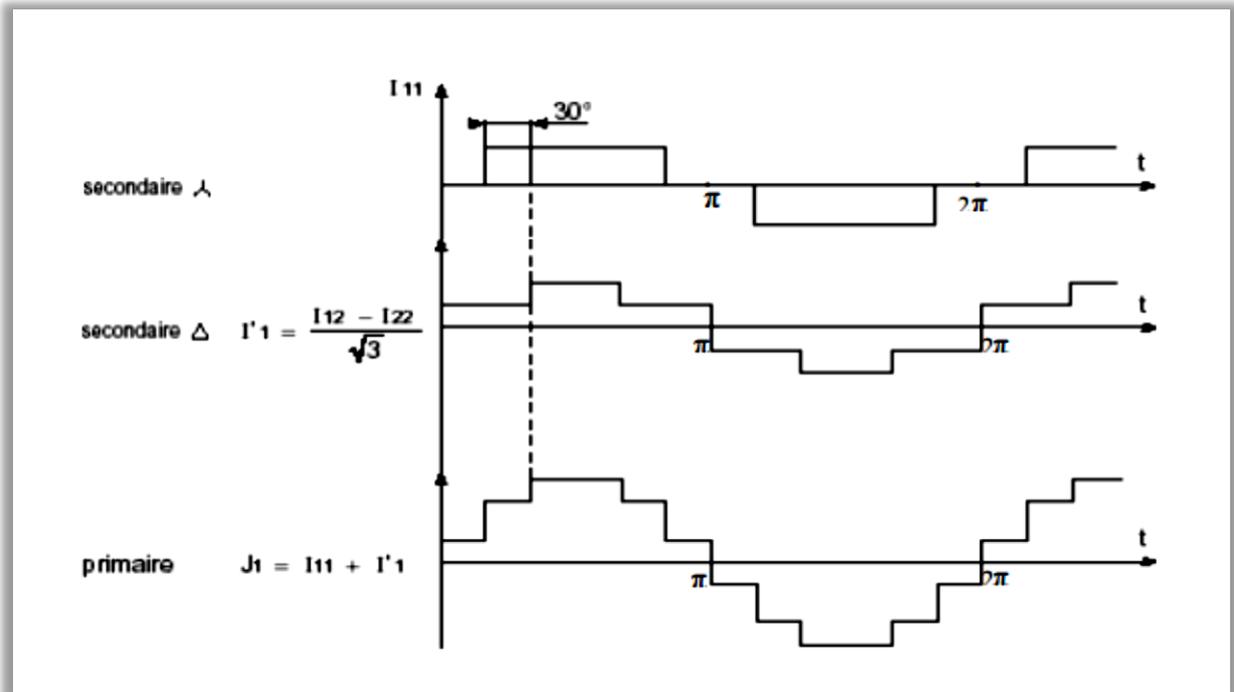


FIGURE II.11 FORME D'ONDE DES COURANTS ABSORBER .

Le courant de ligne a une forme beaucoup plus proche d'une sinusoïde que le courant obtenu avec un seul redresseur. Les deux redresseurs peuvent être connectés en série ou en parallèle.

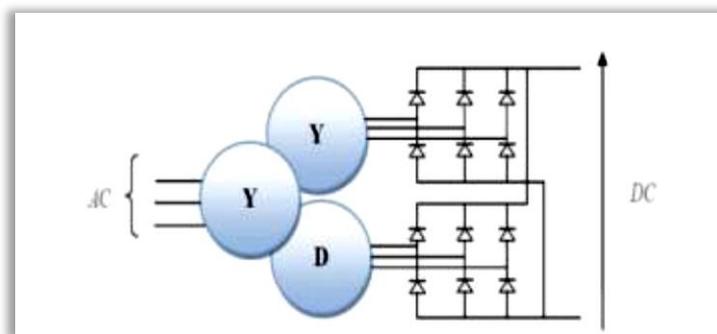


FIGURE II.12 REDRESSEUR DODECAPHASE, MONTAGE SERIE .

II.4.1.5 Transformateur à couplage spécial :

Cette solution empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et de leurs multiples, il s'agit d'une solution centralisée pour un ensemble de charges monophasées. Elle n'a cependant aucun effet sur les autres rangs d'harmoniques 5. Cette solution a pour inconvénient la limitation de la puissance et l'augmentation de l'impédance de la ligne. Il en résulte une augmentation de la distorsion harmonique en tension dû aux autres rangs harmoniques .

II.4.1.6 Renforcement de la puissance de court-circuit :

La réduction de l'impédance totale devant la charge non linéaire peut réduire la tension générée par les harmoniques de courant, réduisant ainsi le facteur de distorsion harmonique de tension à la jonction. Cependant, les courants harmoniques ne sont pas atténués [29].

II.4.1.7 Filtres passifs :

Les filtres passifs sont utilisés pour atténuer les fréquences indésirables dans un signal électrique. Il existe deux types de filtres passifs : les filtres passifs résonants et amortis, et les filtres passifs passe haut, passe bas, passe bande et coupe bande.

Les filtres passifs résonants et amortis sont des types de filtres qui utilisent des composants tels que des bobines, des condensateurs et des résistances pour filtrer les fréquences indésirables dans un signal électrique. Les filtres résonants sont des filtres qui utilisent la résonance pour atténuer ou éliminer les fréquences indésirables, tandis que les filtres amortis utilisent la dissipation d'énergie dans une résistance pour atténuer le signal.

a) Le principe du filtrage passif :

Le principe du filtrage passif consiste à insérer en amont de la charge, un ou plusieurs circuits accordés sur les harmoniques à éliminer. Ainsi pour filtrer un courant à une fréquence particulière. Un filtre résonant série est placé en parallèle sur le réseau est sélectif. Pour atténuer toute une bande de fréquence, un filtre passif amorti du second ordre est préférable. Il est plus facile de rejeter les harmoniques d'ordre supérieur que les harmoniques d'ordre inférieur en utilisant cette technique. [30].

b) Types des filtres passifs :

🚦 Filtre passe-bas (en anglais : low-pass filtre) :

C'est le type de filtres le plus usité en synthèse, à tel point que certains appareils ne proposent parfois que ce type de filtrage. Il est destiné à ne laisser intactes que les fréquences situées en dessous de sa fréquence de coupure, et à atténuer toutes celles situées au-dessus. Il est parfois également appelé « filtre coupe-haut ». [31]

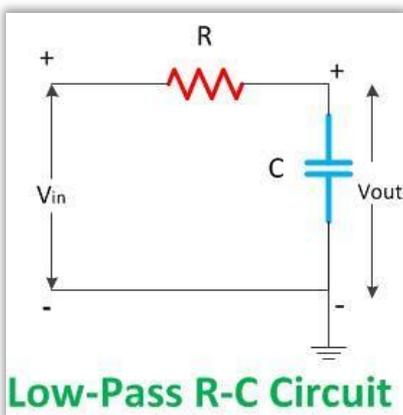


FIGURE II.13 EXEMPLE D'UN FILTRE PASSIF PASSE-BAS

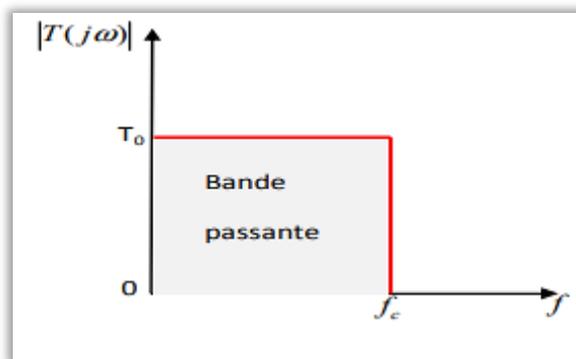


FIGURE II.14 LA BANDE PASSANTE D'UN FILTRE PASSE-BAS

✚ Filtre passe-haut (en anglais : high-pass filter) :

C'est l'inverse du précédent. Le filtre passe-haut est destiné à ne laisser intactes que les fréquences situées au-dessus de la fréquence de coupure, et à atténuer celles situées au-dessous. Il est parfois également appelé « filtre coupe-bas ». Ce filtre est généralement ajusté aux 7ème ou 11ème rangs harmoniques.

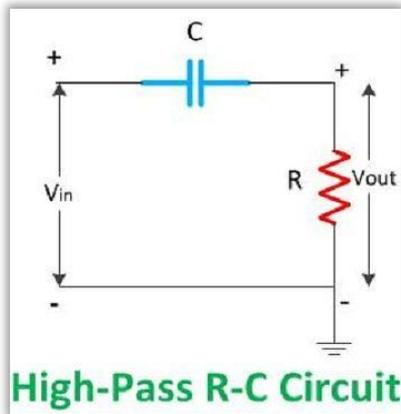


FIGURE II.15 EXEMPLE D'UN FILTRE PASSIF PASSE-HAUT.

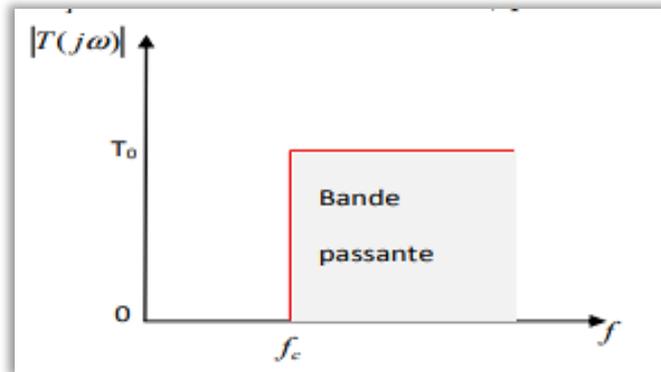


Figure II.16 La bande passante d'un filtre passe- haut.

✚ Filtre passe-bande (en anglais : band-pass filter) :

Ce filtre est destiné à ne laisser passer qu'une certaine plage de fréquences, située entre deux limites. Différemment des deux filtres précédents, celui-ci dispose donc de deux fréquences de coupure, une inférieure et une supérieure. Ce filtre est donc la combinaison d'un passe-haut et d'un passe-bas.

Le filtre harmonique passe-bande est le plus simple et est largement appliqué. Son avantage est l'impédance presque nulle à la fréquence d'accord, conduisant à un filtre presque parfait à cette fréquence. [32]

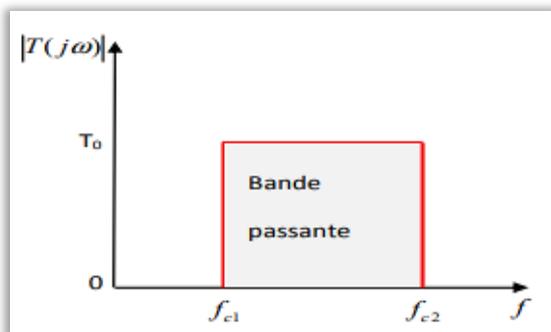


Figure II.17 La bande passante d'un filtre passe-bande .

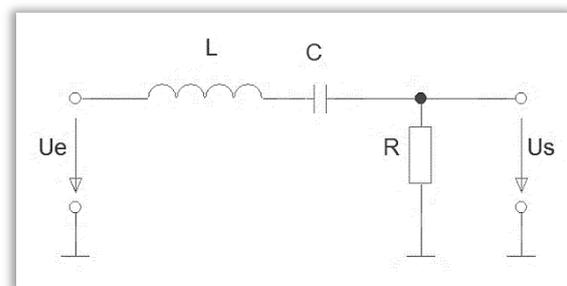


FIGURE II.18 EXEMPLE D'UN FILTRE PASSIF PASSE-BANDE .

✚ Filtre coupe-bande (en anglais : Notch filter) :

Ce dernier type de filtres est le contraire du précédent : il définit une plage de fréquences qui doit être atténuée entre deux limites. Lui aussi dispose donc de deux fréquences de coupure, et combine donc également un passe-haut et un passe-bas. [31]

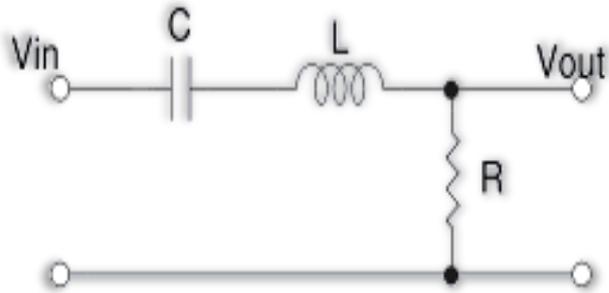


FIGURE II.19 EXEMPLE D'UN FILTRE PASSIF COUPE-BANDE .

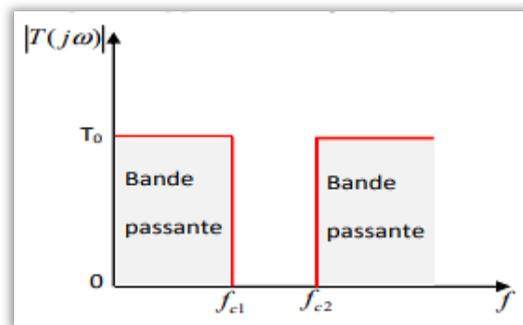


Figure II.20 La bande passante d'un filtre coupe-bande.

✚ Filtres passifs résonants :

Le but d'un filtre résonnant est de présenter une très faible impédance au passage des courants harmoniques d'un ordre particulier. Les filtres résonnants ont un facteur de qualité supérieur. Le réglage du filtre est donc très pointu. Plusieurs filtres résonnants sont souvent installés en parallèle, en fonction des différents rangs d'harmoniques à filtrer. La puissance réactive nécessaire pour l'installation est répartie entre condensateurs des différents filtres. Ceci nécessite une étude fine du profil de charge de l'installation. Les filtres résonnants présentent l'inconvénient d'être sensibles aux variations de l'inductance (dues à la qualité de réalisation) ou de la capacité (dues au vieillissement ou à la température), ce qui entraîne un désaccord de l'ensemble.

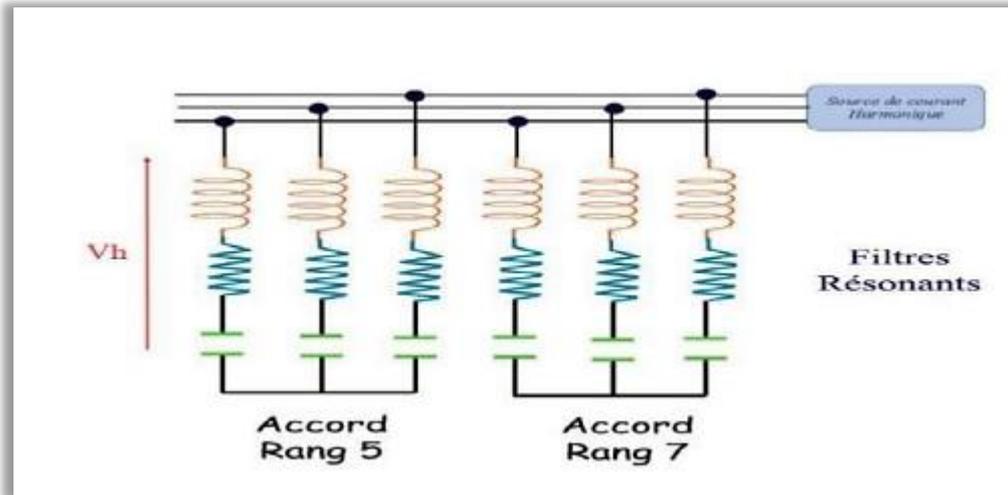


Figure II.21 filtre résonant.

✚ Filtre passif amorti (Passe Haut) :

Il existe trois types de filtres amortis, comme le montre la Figure I.16. (a) possède un filtre d'amortissement du premier ordre, (b) un filtre d'amortissement du second ordre, et (c) un filtre du troisième ordre.

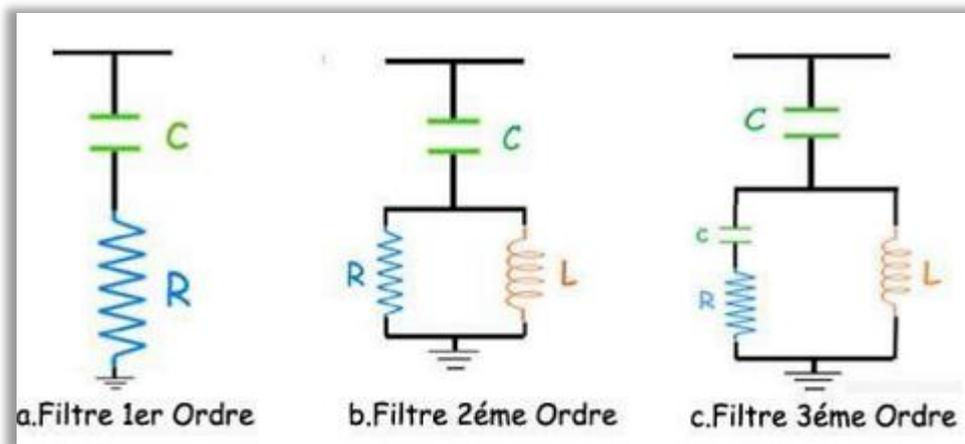


Figure II.22 filtre amorti .

Le filtre de premier ordre exige une grande capacité et présente une perte de puissance excessive à la fréquence fondamentale. Les filtres de second ordre et d'ordre 3 sont couramment utilisés. Tous les deux sont en général conçus avec un faible facteur de qualité F_q compris entre 0,7 et 1,4. Un filtre amorti de second ordre se compose d'une capacité en série avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance appelé résistance d'amortissement. Il est utilisé lorsque les performances demandées ne sont pas enlevées pour filtrer simultanément les plus hautes fréquences du spectre ; c'est un filtre passe-haut de deuxième ordre.

II.4.1.8 Les avantages et les inconvénients : les filtres passifs présentent plusieurs

Avantages et inconvénient :

✚ Les avantages :

- ✓ Sont généralement moins coûteux que les filtres actifs
- ✓ Ils n'ont pas de composants actifs qui peuvent tomber en panne, ce qui le rend plus fiables et plus durables.
- ✓ Ne nécessitent pas d'alimentation électrique externe, ce qui le rend plus économes en énergie.
- ✓ Sont plus faciles à concevoir et à mettre en œuvre que les filtres actifs, car ils ne nécessitent pas de connaissances en amplification et en rétroaction.

✚ Les inconvénients :

- Nécessite une connaissance approfondie du réseau électrique
- Les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer la performance du filtre,
- Ces filtres sont inadaptés en cas d'évolution du réseau et présente un risque d'amplification des harmoniques en cas de modification.
- Risque de surcharge par pollution externe.

II.4.2 Solutions modernes :

Les progrès remarquables réalisés d'une part dans le domaine des composants semi-conducteurs, comme les IGBT, IGCT, GTO et MOSFET, ainsi que la maîtrise de leur mise en œuvre et d'autre part l'existence de nouvelles méthodes de traitement analogique et numérique du signal, ont permis l'émergence de nouvelles solutions modernes et efficaces pour faire face aux différentes perturbations (harmoniques, puissance réactive, fluctuations, creux de tension) affectant les systèmes électriques [33].

Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles comme les filtres passifs non adaptatifs aux variations de la charge et du réseau du phénomène de résonance. Citons :

- ✚ Les filtres actifs (série, parallèle et combinaison série parallèle).
- ✚ Les filtres hybrides (série, parallèle).

Le but de ces filtres est de générer des harmoniques de courant ou de tension en opposition de phase pour rendre le courant ou tension sinusoïdal au point de connexion. Le filtre actif est connecté au réseau soit shunt (FAP), soit série (FAS)

Selon qu'il est conçu respectivement pour compenser les courants ou les tensions harmoniques, soit associé à des filtres passifs pour construire ce qu'on appelle les filtres hybrides (FH).

Les filtres actifs portent des avantages par rapport aux filtres passifs citons :

- ✓ Un volume physique du filtre réduit ;
- ✓ La capacité de filtrage est supérieure ;
- ✓ La supériorité de la flexibilité et l'adaptabilité ;

Avec des inconvénients tel que :

- Cout élevé (ce qui a limité leur implantation) ;
- Les pertes sont plus élevées.

II.4.2.1 Les filtres actifs :

a) Le filtre actif de puissance parallèle :

Utilisé pour compenser les harmoniques de courant et la puissance réactive causée par les charges non linéaires. Il est connecté en parallèle au réseau électrique entre la source de tension et la charge non-linéaire. Il injecte des courants i_{inj} en opposition de phase afin de compenser les harmoniques produites par la charge polluante.

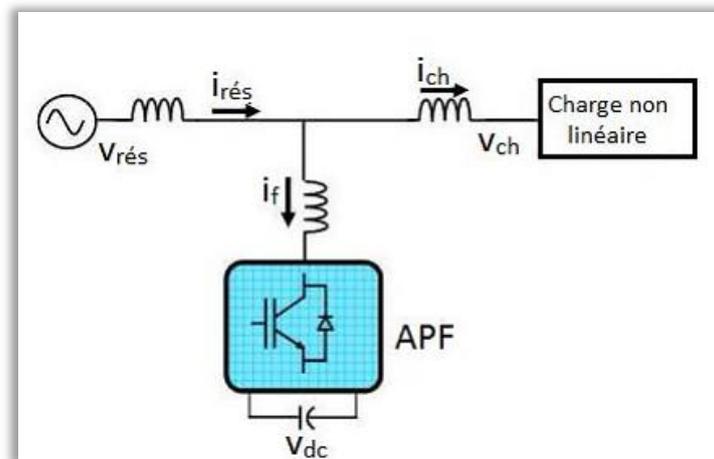


Figure II.23 Le filtre actif de puissance parallèle :

b) Le filtre actif de puissance série :

Considérer comme une source de tension branchée en série avec le réseau électrique. Il est généralement proposé pour résoudre les harmoniques de tension. Le filtre actif de puissance génère des tensions harmoniques pour compenser les tensions harmoniques présentes au réseau électrique.

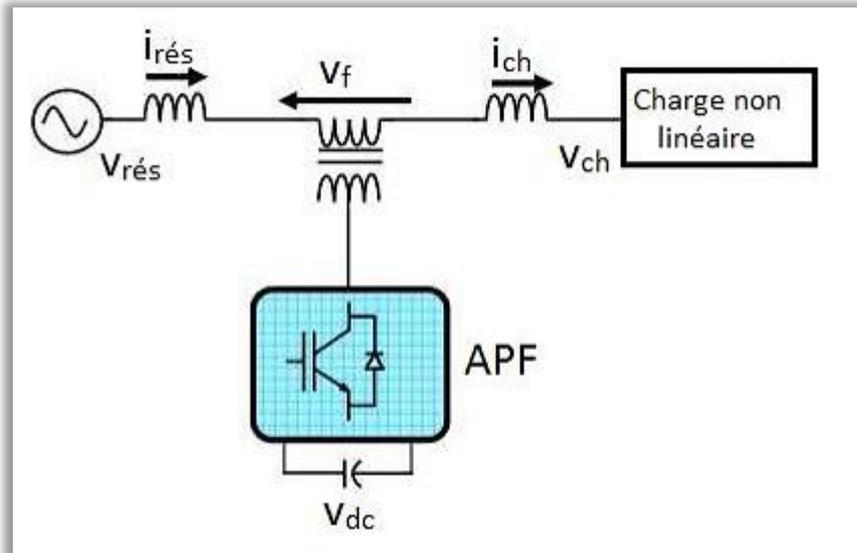


Figure II.24 Le filtre actif de puissance série :

c) Le filtre UPQC :

Basé sur l'utilisation de deux filtres actifs de puissance, l'un mis en série et l'autre en parallèle. L'avantage de ce genre de filtre est de regrouper les avantages de chacun de ces deux filtres.

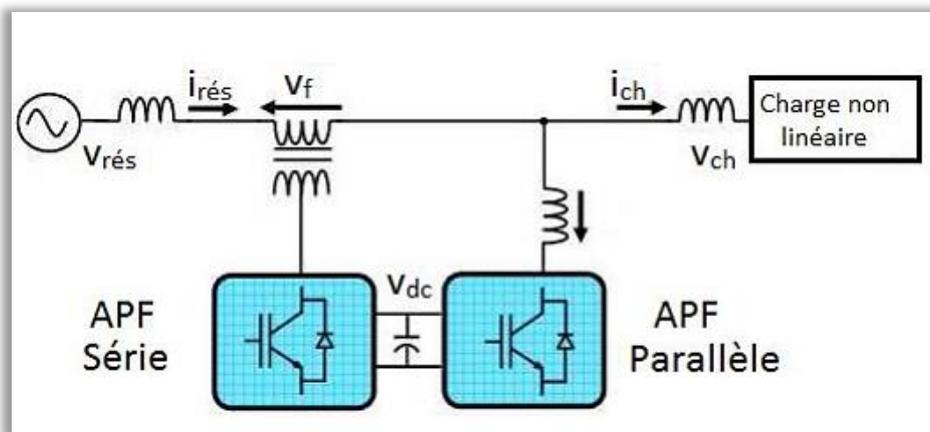


Figure II.25 Le filtre UPQC

II.4.2.2 Filtrage hybride :

Le filtrage mixte ou hybride résulte d'une combinaison de filtres passifs et actifs. L'avantage des filtres mixtes est que les filtres passifs peuvent annuler la plupart des harmoniques. Les filtres actifs maintiennent les performances du filtre à mesure que la charge et le réseau changent. Cela dégrade considérablement les performances du convertisseur, qui est un filtre actif dû aux éléments passifs. Ces structures permettent donc un rapport performance/coût optimisé et une meilleure tenue en tension [34]. On a plusieurs formes de filtre hybride, on prendra les trois exemples suivants :

a) Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles :

Il empêche les courants harmoniques de circuler vers le réseau et les oblige à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences.

b) Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles :

Il a le même principe que la combinaison d'avant avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du FAS car le courant qui le traverse est plus faible. De plus, le FAS est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge.

c) Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle :

Le filtre actif parallèle est pour but de compenser les courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Tandis que le filtre passif est généralement accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle.

II.5 Comparaison entre un filtre actif et un filtre passif :

Dans le tableau I.2 ci-dessous, on résume une comparaison entre le filtre actif et le filtre passif.

Tableau II.3 : Comparaison entre filtrage actif et passif .

Critère de comparaison	Filtre actif	Filtre passif
Action sur les courants harmoniques	Agit simultanément sur plusieurs fréquences selon sa bande passante	Nécessite un filtre pour chaque harmonique
Interaction entre filtres voisins	Pas de risque	Risque de destruction du filtre accordés à des fréquences voisins (résonances)
Influence d'une variation de fréquence	Aucun risque	Efficacité réduite (le filtre est calculé pour une fréquence exacte)
Surcharge	Pas de risque	Risque de détérioration lorsque le courant harmonique à compenser dépasse ses capacités.
Raccordement	Pas d'étude préalable	Etude au cas par cas
Surveillance de fonctionnement	Réalisée par le système de contrôle commandé	Pas de surveillance
Influence d'une augmentation de courant	Aucun risque de surcharge. Mais l'efficacité diminuée	Risque de surcharge et de détérioration

Encombrement	Faible	Important
Poids	Faible	Elevé
Coût	Coût des composants plus élevé Pas de coût d'étude de dimensionnement	Coût des composants

II.6 Avantages et inconvénients des schémas de dépollution :

Toute solution à des avantages mais également des inconvénients, ainsi nous avons jugé bon de les regrouper dans le tableau suivant :

TABLEAU II.4 AVANTAGE ET INCONVENIENT DE SCHEMAS DE DEPOLLUTION.

Principes	Avantages	Inconvénients
Renforcement de la puissance de court-circuit	Amélioration de la forme de la tension	Pas d'amélioration de la forme du courant, pas toujours réalisables.
Filtrage passif	Amélioration de la forme du courant	Risque de résonance, pas d'adaptabilité.
Filtrage actif série	Amélioration de la forme de la tension, adaptabilité aux variations de charge et du réseau électrique	Pas d'amélioration de la forme du courant.
Filtrage actif parallèle	Amélioration de la forme du courant, adaptabilité aux variations de charge et du réseau.	Réalisation difficile.

II.7 Conclusion :

Ce chapitre a fourni des définitions de la qualité de l'énergie et de ses paramètres, et énuméré diverses perturbations affectant la qualité de l'énergie et diverses solutions traditionnelles et modernes possibles. Nous avons également mis en évidence diverses normes imposées aux utilisateurs et aux revendeurs pour limiter la propagation des harmoniques. Enfin, un tableau récapitulatif répertorie les avantages et les inconvénients des solutions proposées.

Chapitre III

Dimensionnement et simulation d'un système photovoltaïque

III Introduction

Les sources photovoltaïques ont été utilisées dans de nombreux endroits ces derniers temps car elles apportent des avantages en matière de pollution de l'air.

Ces dernières années, la demande de sources d'énergie solaire a commencé à dépendre de facteurs tels que l'augmentation de l'efficacité des cellules solaires, l'évolution de la technologie de production des cellules, etc.

La qualité de l'énergie dans les systèmes photovoltaïques hors réseau pose de nombreux problèmes. Parmi ces problèmes, les harmoniques sont l'un des plus importants. Les composants harmoniques doivent être absolument éliminés.

Les harmoniques peuvent avoir un impact négatif sur les performances d'un système photovoltaïque pour un certain nombre de raisons, notamment la saturation, la commutation des redresseurs à thyristor/diode et les cyclo-convertisseurs. L'analyse, la quantification et la réduction de ces harmoniques doivent être effectuées afin de respecter la norme IEEE 519-1992. La littérature contient de nombreuses topologies de filtres et méthodes de filtrage différentes, telles que les filtres passifs, actifs et hybrides comme on l'a expliqué dans le deuxième chapitre.

L'analyse et la conception de filtres accordés simples pour les basses fréquences et de filtres passifs élevés pour les hautes fréquences pour un système PV monophasé autonome sont les principaux sujets de ce mémoire.

Après avoir examiné et cité les différents composants d'un système photovoltaïque, nous procédons à la modélisation et simulation du système.

L'objectif de ce chapitre consiste à comparer le taux de THD entre un système avant et

Après filtrage avec le LC.

III.1 L'architecture du système étudié

La configuration la plus courante pour les systèmes photovoltaïques autonomes, le système de compensation proposé contient un panneau photovoltaïque de type Sun Arth Solar Power, un convertisseur survolteur de type Boost (Hacheur), une commande MPPT (maximum power point tracking) plus précisément l'inductance incrémentale, un onduleur de tension (DC-AC) commandé par MLI, une charge non linéaire avec l'utilisation d'un filtre L et LC et LCL

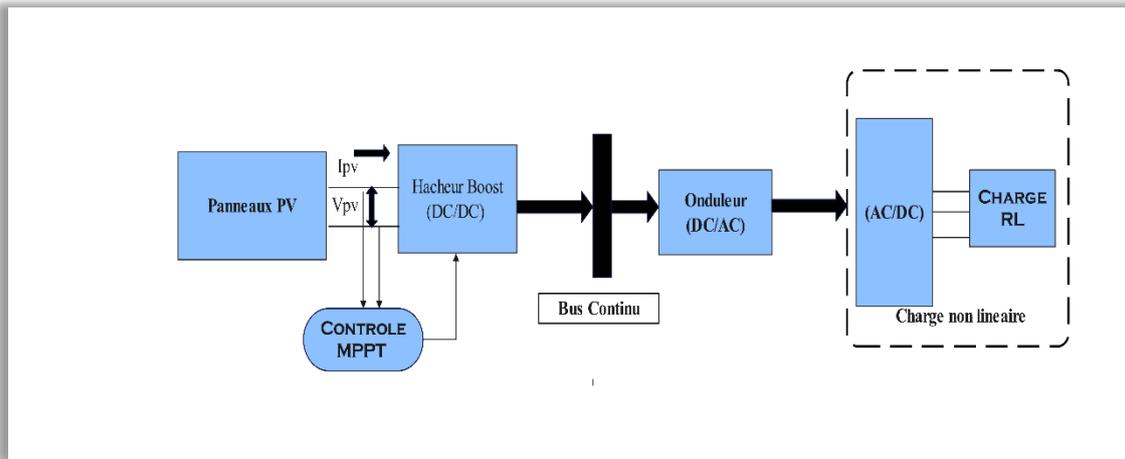


FIGURE III.1 ARCHITECTURE DE LA CHAÎNE DE PRODUCTION D'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE .

Les modèles ont été réalisés en utilisant le logiciel de simulation MATLAB et nous ont permis d'analyser les performances et la faisabilité du système de compensation des harmoniques générées par la charge non linéaire en utilisant un filtrage passif pour avoir une meilleure qualité d'énergie.

III.2 Modélisation du système étudié

III.2.1 Modèle à une diode

Les équations mathématiques utilisées pour modéliser les performances des générateurs photovoltaïques sont basées sur les caractéristiques courant-tension et puissance. Ce qui signifie que l'équation caractéristique courant-tension de ce modèle implique une exponentielle. Pour les baisses de tension dans les zones P et N, une résistance en série R_s est ajoutée. Pour le courant de fuite, une résistance parallèle R_{sh} est fournie. Nous avons choisi le modèle simplifié à cinq paramètres (I_{cc} , I_{mpp} , V_{co} , V_{mpp} , R_s), qui tient compte de l'évolution du courant et de la tension des panneaux photovoltaïques en fonction des conditions climatiques. Il existe plusieurs modèles mathématiques pour représenter le comportement d'une cellule photovoltaïque. Parmi ces modèles on trouve : le modèle idéalisé, le modèle à une diode, modèle à deux diodes. Dans notre cas, nous allons nous intéresser au modèle à une diode présenté ci-dessous .

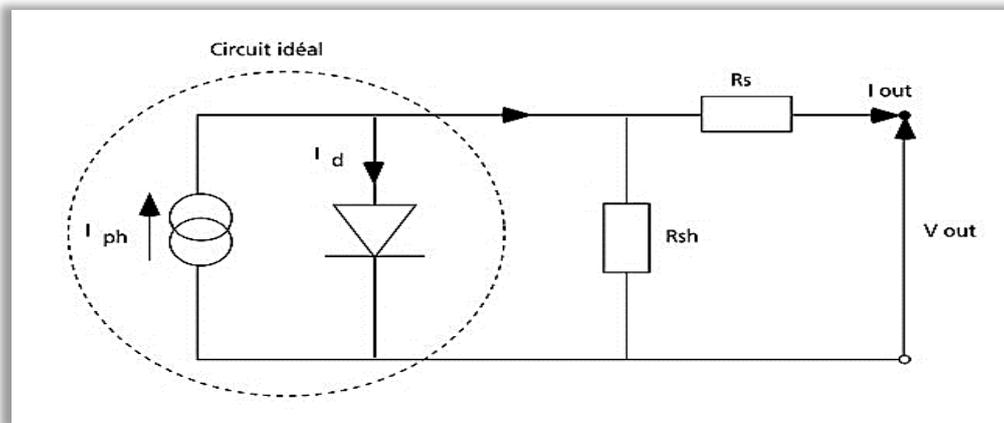


FIGURE III.2 MODELE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE A UNE DIODE .

Ce modèle comporte une diode, ce qui implique que ce modèle contient dans l'équation de la caractéristique courant-tension une exponentielle. Une résistance est ajoutée en série R_s , pour les chutes de tension dans les zones P et N, et une résistance parallèle R_{sh} pour le courant de fuite. Nous avons choisi le modèle simplifié, qui est un modèle de cinq paramètres (I_{cc} , I_{mpp} , V_{co} , V_{mpp} , R_s), qui tient compte de la variation du courant et de la tension du panneau PV en fonction des conditions climatiques. Le modèle utilisé est caractérisé par son schéma équivalent (figure III.2) :

Les caractéristiques physiques et électriques de ce panneau photovoltaïque sont données par le tableau suivant :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{rd} \quad (III.1)$$

$$I_{ph} = P1. E_s(1 + P2(E_s - E_{STC}) + P3(T_j - T_{STC})) \quad (III.2)$$

$$T_j = T_a + E_s \left[\frac{N_{oct} - 20}{800} \right] \quad (III.3)$$

$$I_D = I_{od} \cdot \left[\exp \left(\frac{q \cdot (V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{K \cdot A \cdot N_s \cdot T_j} \right) \right] \quad (III.4)$$

$$I_{od} = P4. T_j^3 \cdot \exp \left[\frac{E_g}{K \cdot T_j} \right] \quad (III.5)$$

$$I_{rd} = \frac{V_{pv}}{R_p} \quad (III.6)$$

L'équation (III.1) peut s'écrire aussi de cette manière :

$$I_{pv} = P1. E_s(1 + P2(E_s - E_{STC}) + P3(T_j - T_{STC})) - I_D = I_{od} \cdot \left[\exp \left(\frac{q \cdot (V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{K \cdot A \cdot N_s \cdot T_j} \right) \right] - I_{rd} \quad (III.7)$$

T_j : température de jonction

N_{OCT} : température nominale de fonctionnement de la cellule ou du module solaire

T_a : température ambiante

I_{od} : courant de saturation de la diode (A)

A : coefficient d'idéalité de la cellule

N_s : nombre total de cellules connectées en série et/ou en parallèles

Pour valider le modèle choisis, nous avons procédé à la simulation sous Matlab avec un panneau choisi dans power système et ses paramètres sont présentés dans le tableau suivant :

TABLEAU III.1 LES CARACTERISTIQUE DU PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE

Tension maximale (V_{ppm})	30.72V
Courant maximal (I_{mpp})	7.5A
Tension a circuit ouvert (V_{co})	37.14V
Courant de court-circuit (I_{sc})	8A
Courant de court-circuit (I_{sc})	-0.35339
Coefficient de température de (I_{sc})/%/ $^{\circ}C$)	0 .05535

III.2.2 Modélisation du hacheur

Convertisseur élévateur "boost" ou hacheur parallèle est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur supérieure. La figure (III-3) montre le schéma électrique du convertisseur élévateur. Son utilisation typique est de convertir une tension continue d'entrée en une tension de sortie élevée.

Les équations caractérisant le fonctionnement du convertisseur DC/DC sont données comme suite :

$$L \frac{dI_L}{dt} = \alpha E + V_{dc}(1 - \alpha) \tag{III.8}$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = -i_L(1 - \alpha) - \frac{V_{dc}}{R} \tag{III.9}$$

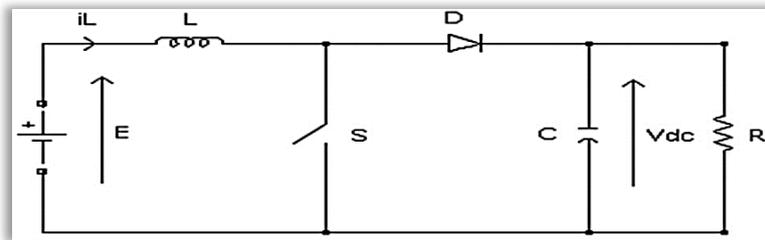


FIGURE III.3 SCHEMA DU HACHEUR

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 (III.4) présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c.-à-d. d'entre [0, Te].

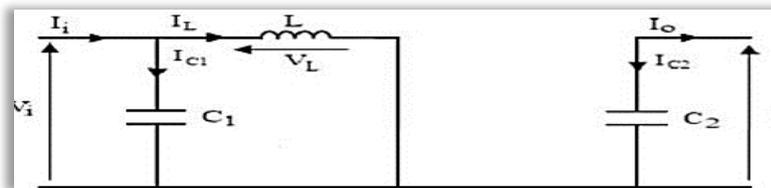


FIGURE III.4 SCHEMA ELECTRIQUE D'UN HACHEUR BOOST FERME

L'application des lois de Kirchoff sur les circuits équivalents donnent les calculs suivants :

$$I_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_l(t) \tag{III.10}$$

$$I_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -I_o(t) \tag{III.11}$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = -V_i(t) \tag{III.12}$$

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

Suivant :

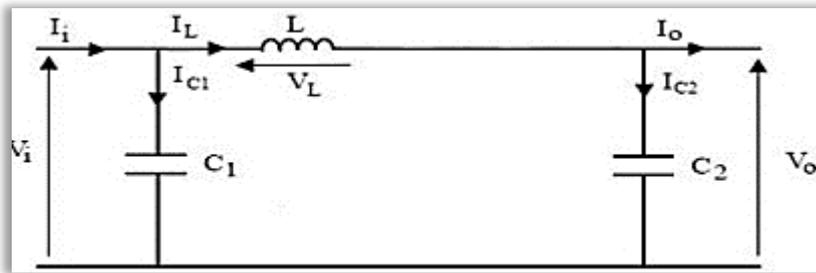


FIGURE III.5 SCHEMA ELECTRIQUE D'UN HACHEUR BOOST OUVERT

$$I_{C1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \tag{III.13}$$

$$I_{C2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = I_i(t) - I_o(t) \tag{III.14}$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = -V_i(t) - v_o(t) \tag{III.15}$$

D'où la tension de sortie du hacheur boost est :

$$V_s = (1 - \alpha)V_e \tag{III.16}$$

Hacheur sous matlab

TABLEAU III.2 CARACTERISTIQUE DU HACHEUR

L	5. 10⁻⁵ H
C	1 Mf

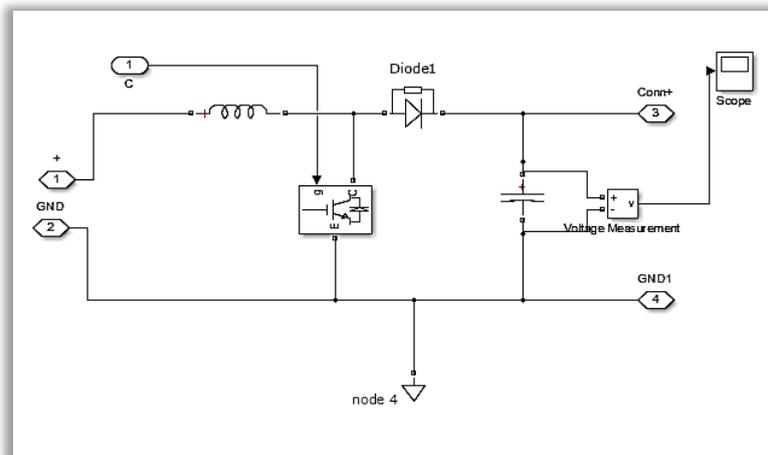


FIGURE III.6 SCHEMA DE SIMULATION DU HACHEUR BOOST

III.2.3 Onduleur

Un onduleur triphasé se compose de trois bras et chaque bras se compose de deux interrupteurs. Les commutateurs sélectionnés forment une cellule de commutation. Les actions doivent être complémentaires afin de ne jamais court-circuiter la source continue. Par conséquent, l'interrupteur doit être bidirectionnel en courant et composé d'un thyristor et d'une diode antiparallèle, ou d'un transistor avec une diode antiparallèle.

III.2.3.1 Principe de fonctionnement

Plusieurs stratégies peuvent être considérées pour la commande d'un onduleur :

- ✚ Commande pleine onde (dite 180°).
- ✚ Commande décalée.
- ✚ Commande à Modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Les différentes commandes ont le but d'obtenir l'allure sinusoïdale ou niveau de la sortie et pour chaque commande le principe de fonctionnement se change. La supériorité de la commande à base de semi-conducteur sur les autres system : automatique, mécanique, hydraulique et électrique vient de faible temps de réponse de circuit électronique.

Cette commande a pour but de générer les commandes d'ouverture/fermeture de l'interrupteur de sorte que la tension générée par l'onduleur soit la plus proche possible de la tension de référence.

III.2.4 Filtres passifs LC

Il est nécessaire d'éliminer les composantes harmoniques causées par les charges non linéaires et le convertisseur et de réduire le THD.

Le filtre LC est placé entre l'onduleur solaire et la charge non linéaire. Ce filtre est conçu pour éliminer les composantes harmoniques.

Le filtre LC élimine les harmoniques de découpage presque parfaitement et son comportement est quasiment idéal lorsqu'on travaille à vide (courant de sortie nul) et avec des signaux de fréquences voisines de la fréquence fondamentale.

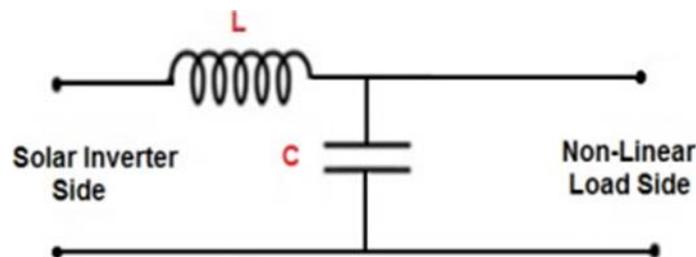


FIGURE III.7 LE FILTRE LC

- ✚ La fréquence de coupure du filtre LC passif est définie comme suit :

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (\text{III.17})$$

- ✚ La valeur du condensateur utilisé dans le filtre LC est définie comme suit :

$$C = \frac{1}{2\pi f_c L} \quad (\text{III.18})$$

Un condensateur de grande capacité est utilisé. Afin d'éviter des courants d'appel élevés dans le système solaire.

- ✚ La valeur de l'inductance L a été choisie selon l'équation (III.19) afin de maintenir le taux d'ondulation à un niveau bas.

$$L = \frac{1}{2\pi f_c C} \quad (\text{III.19})$$

III.3 Schéma de simulation globale

Dans cette simulation on a utilisé un générateur photovoltaïque de 3 panneaux de 120 W chuan un champ photovoltaïque, un hacheur boost caractérisé par ($L=5.10^{-5}H$, $C1=1\text{ mF}$.) commandé en MPPT de type P&O et un onduleur triphasé commandé en MLI, on a utilisé aussi une charge RL ($R=500\text{ Ohm}$, $l=24.10^{-6}\text{ H}$) et un filtre LC ($l=12\text{mH}$, $C=90\text{ }\mu\text{F}$) .

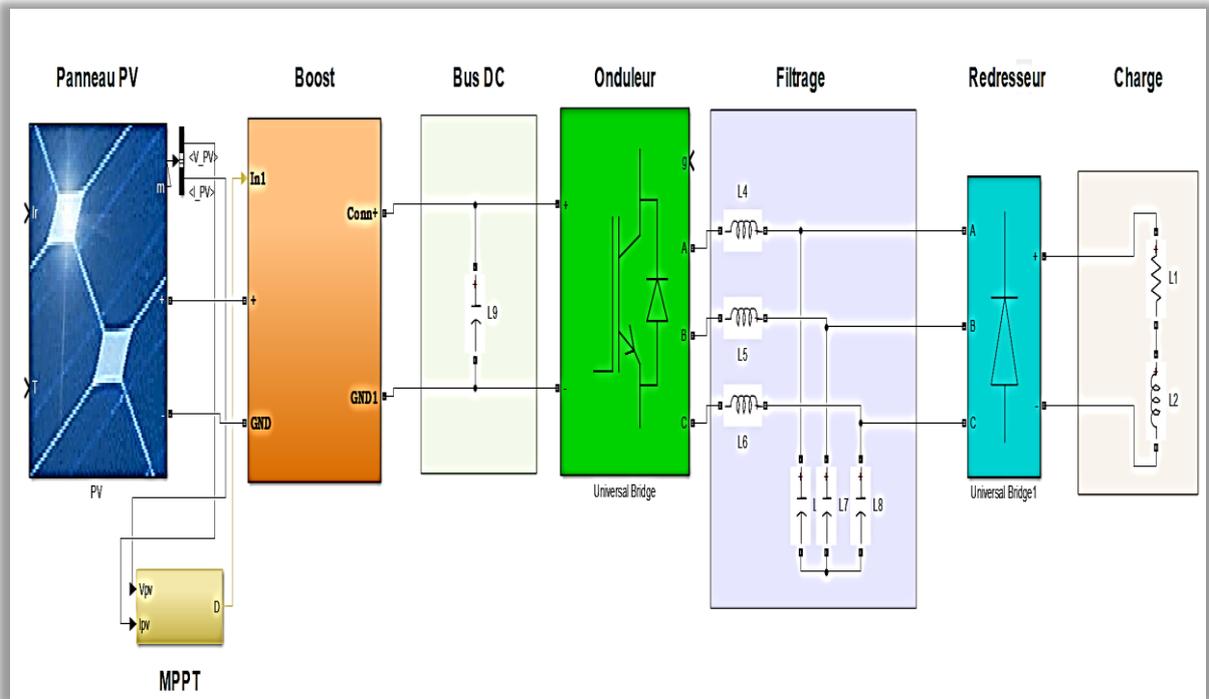


FIGURE III.8 LE SYSTEME DE SIMULATION SOUS MATLAB SIMULINK.

III.4 Résultat de simulation du réseau sans filtre

On effectue la simulation du système photovoltaïque sans l'intervention du filtre .

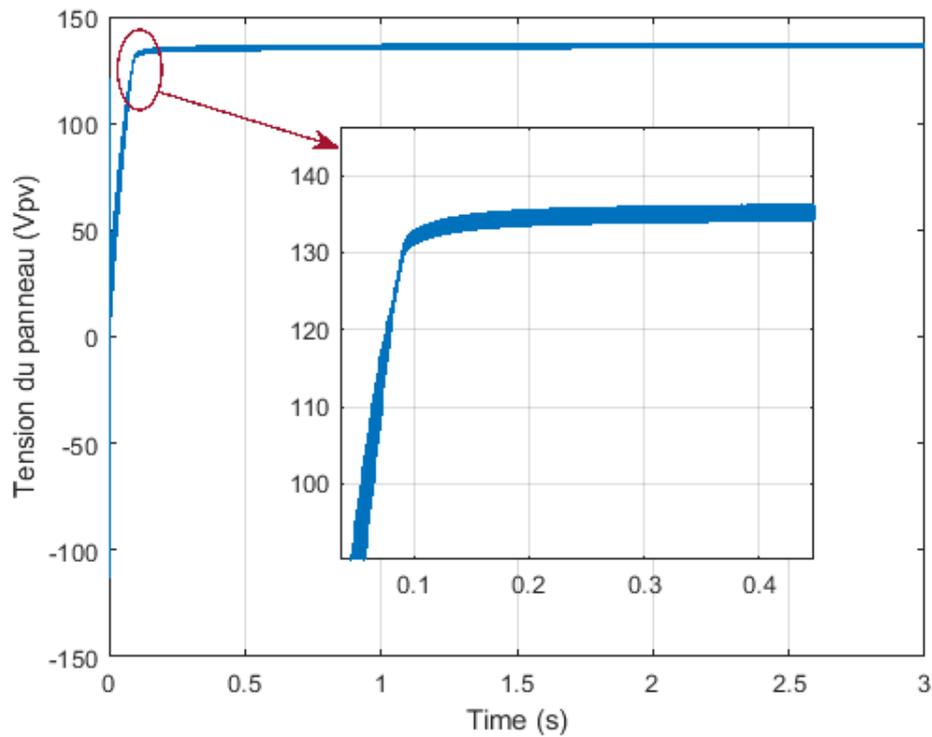


FIGURE III.9 LA TENSION DU PANNEAU VPV.

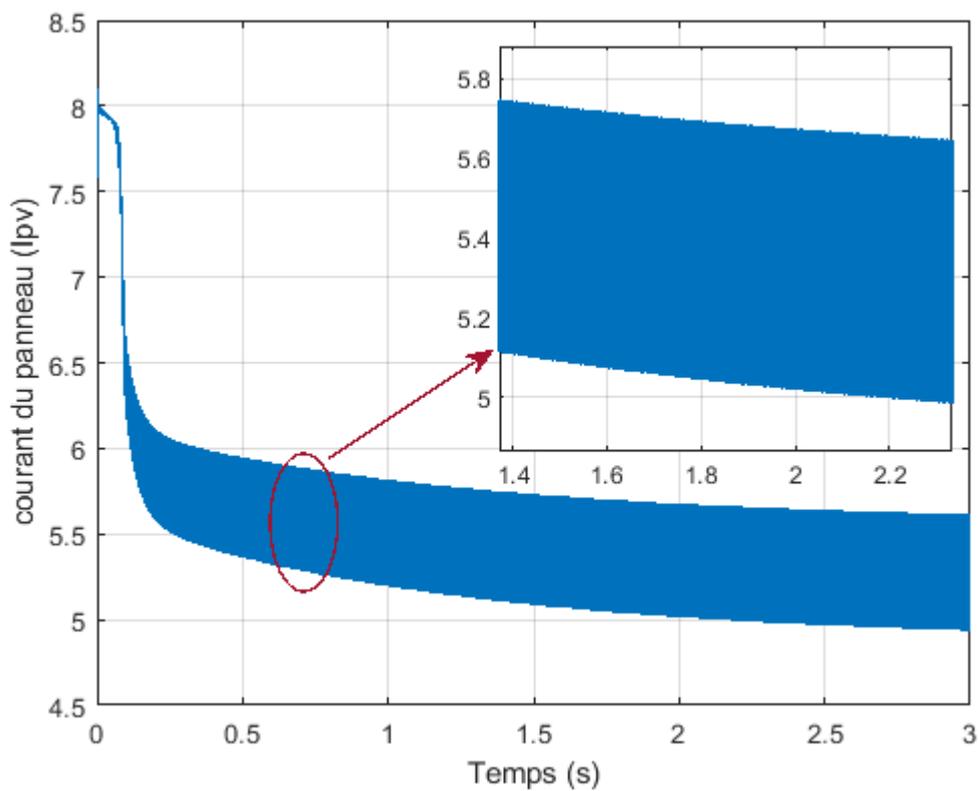


FIGURE III.10 LE COURANT DU PANNEAU IPV.

Les figures (III.9) et (III.10) représentent la tension et le courant à la sortie du générateur photovoltaïque en précisant qu'on a pris 4 panneaux en série et 1 panneau en parallèle.

On remarque qu'au départ le courant prend la valeur de court-circuit ensuite il revient la valeur nominale.

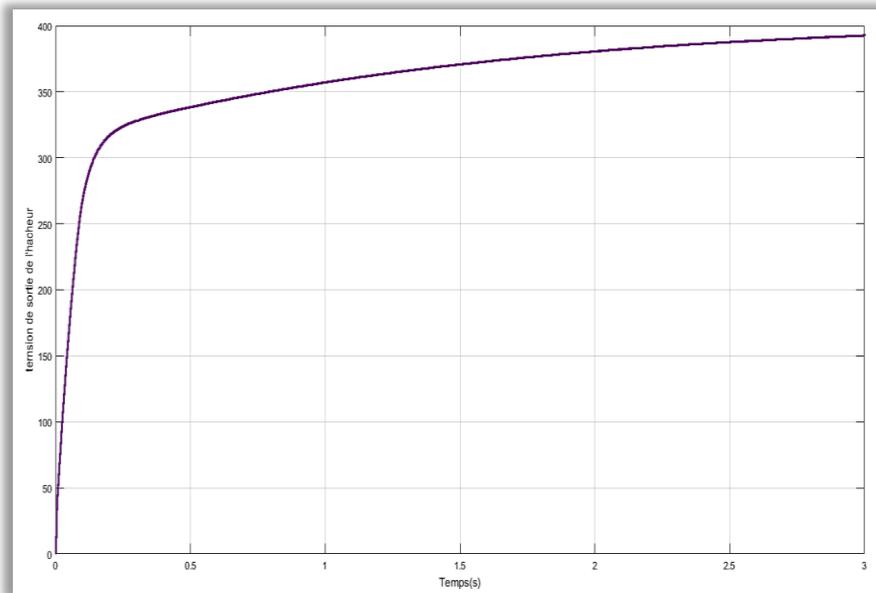


FIGURE III.11 LA TENSION A LA SORTIE DU HACHEUR BOOST.

La figure (III.11) représente la tension a la sortie du hacheur On remarque que la tension de sortie du GPV est plus faible par-rapport de tension de sortie du hacheur c.à.d. de faire fonctionner le hacheur comme un hacheur survolteur.

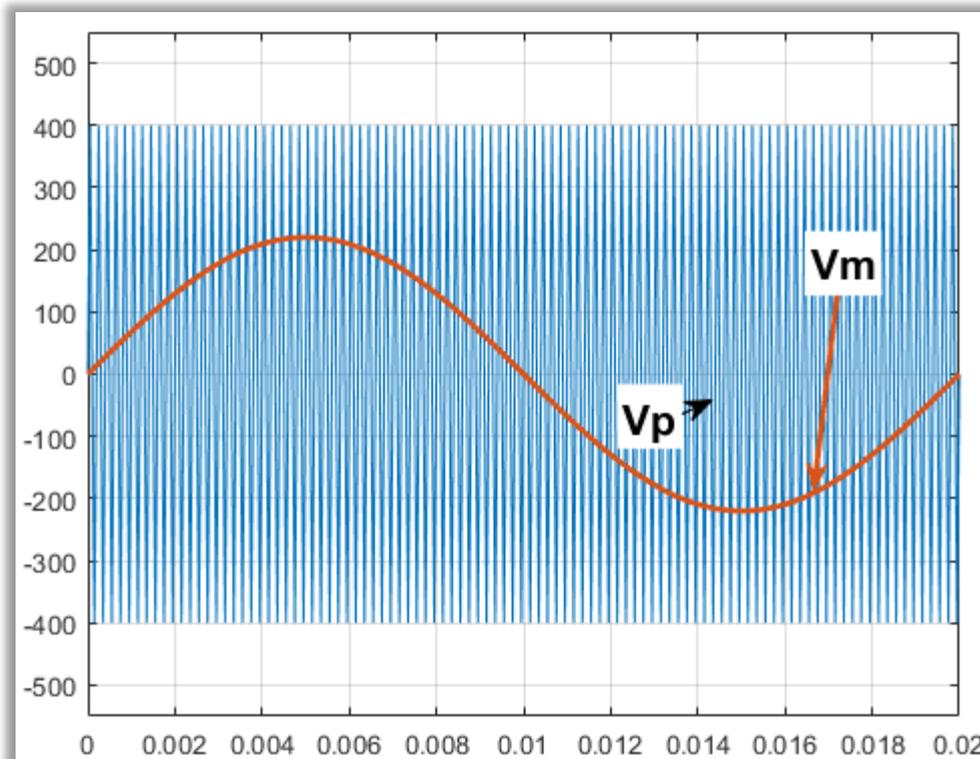


FIGURE III.12 LA TENSION DE LA MODULATRICE ET DE LA PORTEUSE

La figure (III.12) représente la tension de la modulatrice et de la porteuse de la commande MLI et on remarque qu'il a un rapport remarquable entre les tensions V_m et V_p .

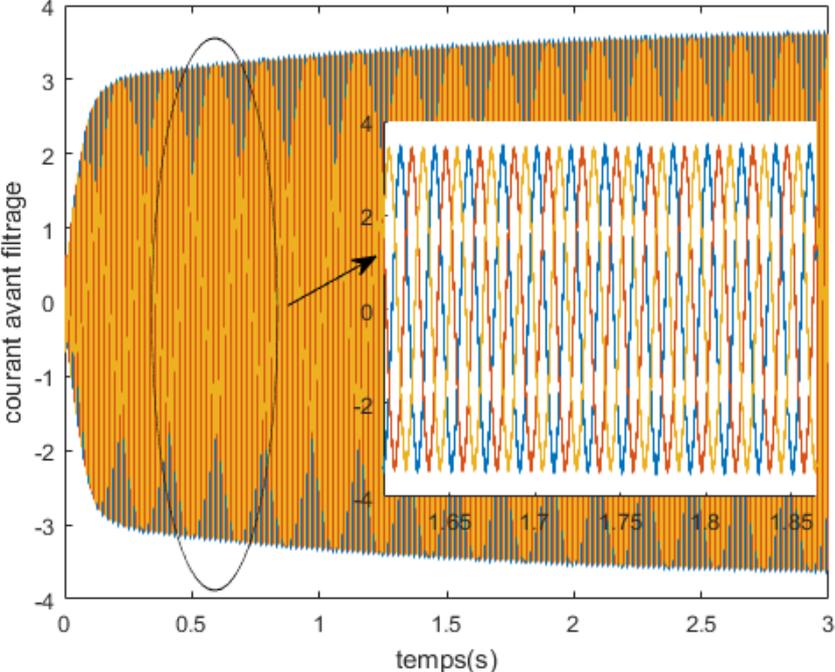


FIGURE III.13 LE COURANT OBTENU AVANT FILTRAGE

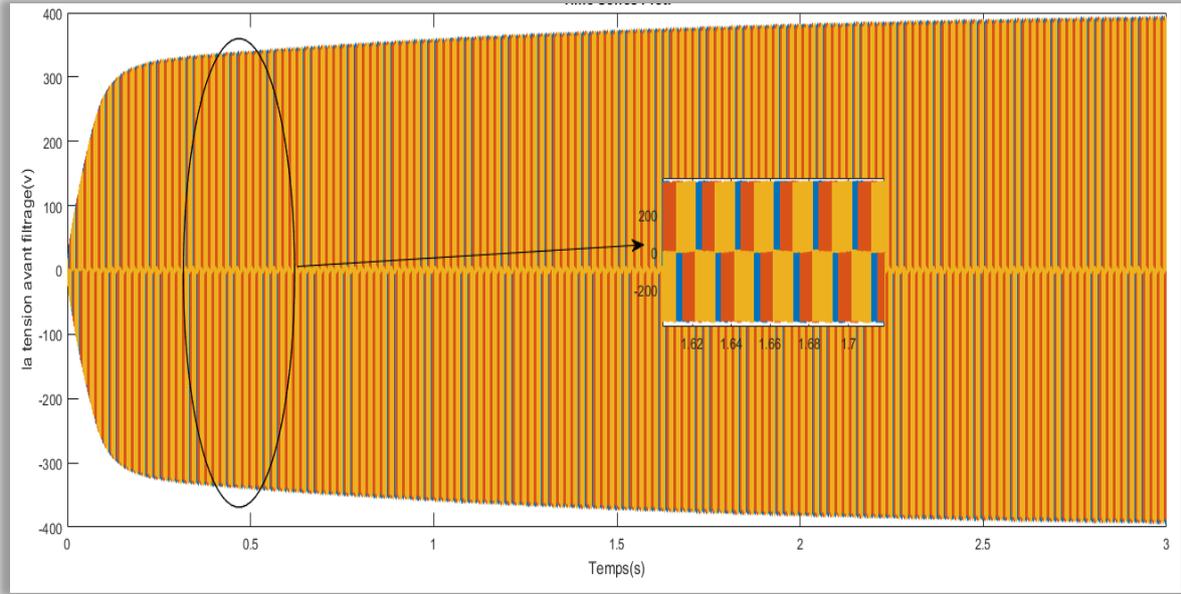


FIGURE III.14 LA TENSION OBTENU AVANT FILTRAGE.



FIGURE III.15 ANALYSE SPECTRALE DU COURANT AVANT FILTRAGE.

III.4.1 Interprétation des résultats

D'après les figures (III.13) et (III.14) on observe la forme déformée de la tension et du courant cela et du au harmonique causé par la charge non linéaire.

La mesure du THD des deux gradeurs donne pour le courant 21.18% comme le montre la figure ci-dessus.

III.5 Résultat de simulation du système avec filtre LC

Résultat de simulation du système photovoltaïque avec l'ajout filtre passifs LC.

Un filtre passif, est nécessaire entre un onduleur PWM et la charge non-linéaire imposant et réduit les composantes harmoniques du courant de sortie de l'onduleur. Des simulations ont été effectuées pour trouver les harmoniques dans le système d'énergie solaire et d'analyser leurs effets sur le système PV.

Dans cette étude, des filtres passifs LC sont utilisés pour éliminer les composants harmoniques dans les systèmes de puissance et améliorer la qualité de l'énergie du système isolé.

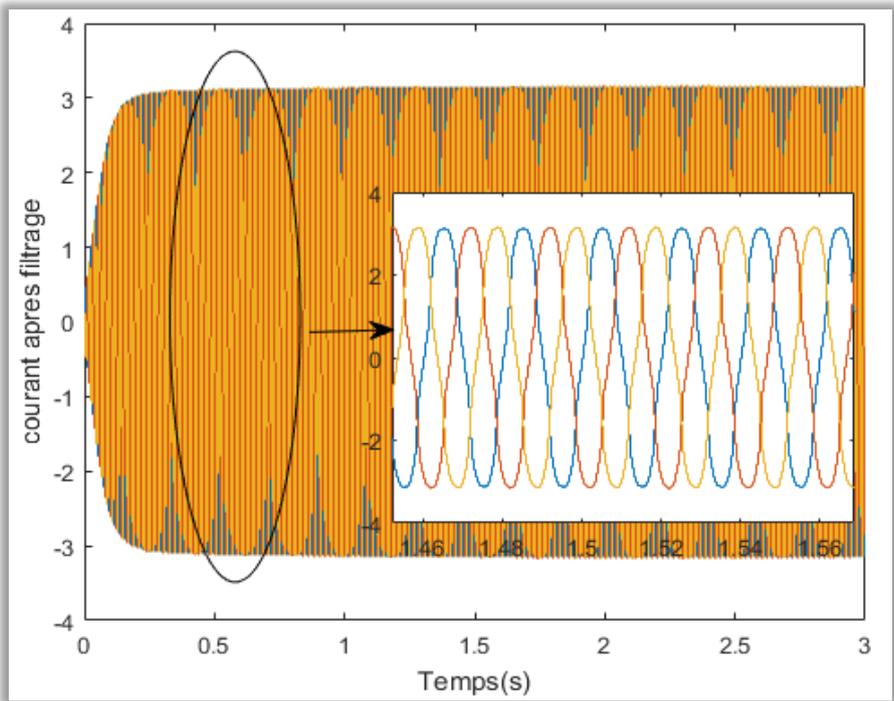


FIGURE III.16 COURANT OBTENU APRES FILTRAGE.

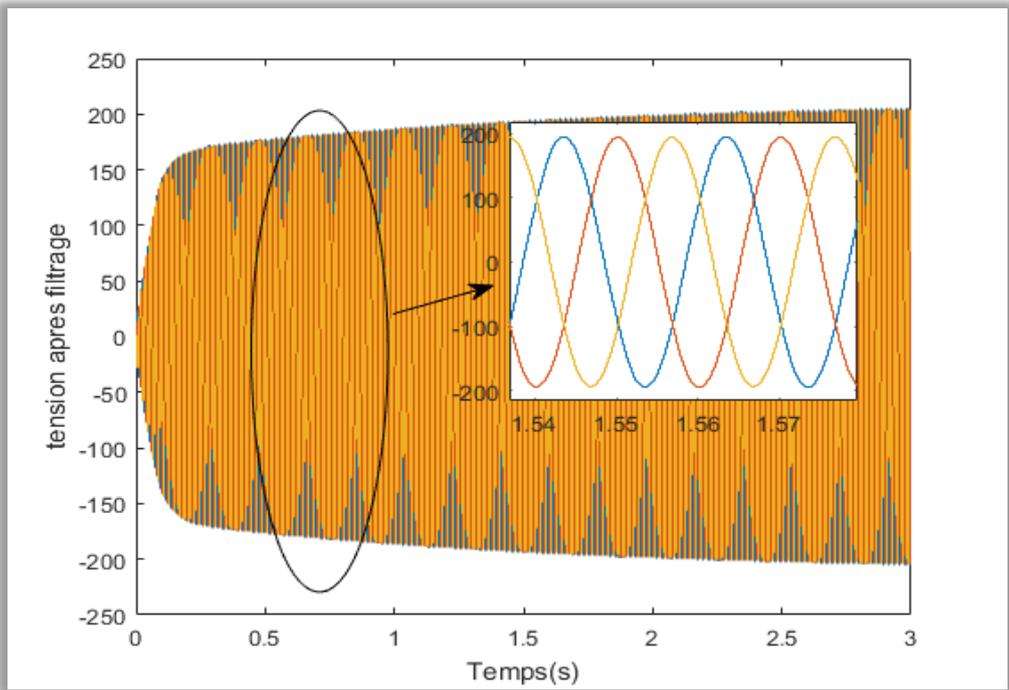


FIGURE III.17 TENSION OBTENUE APRES FILTRAGE.

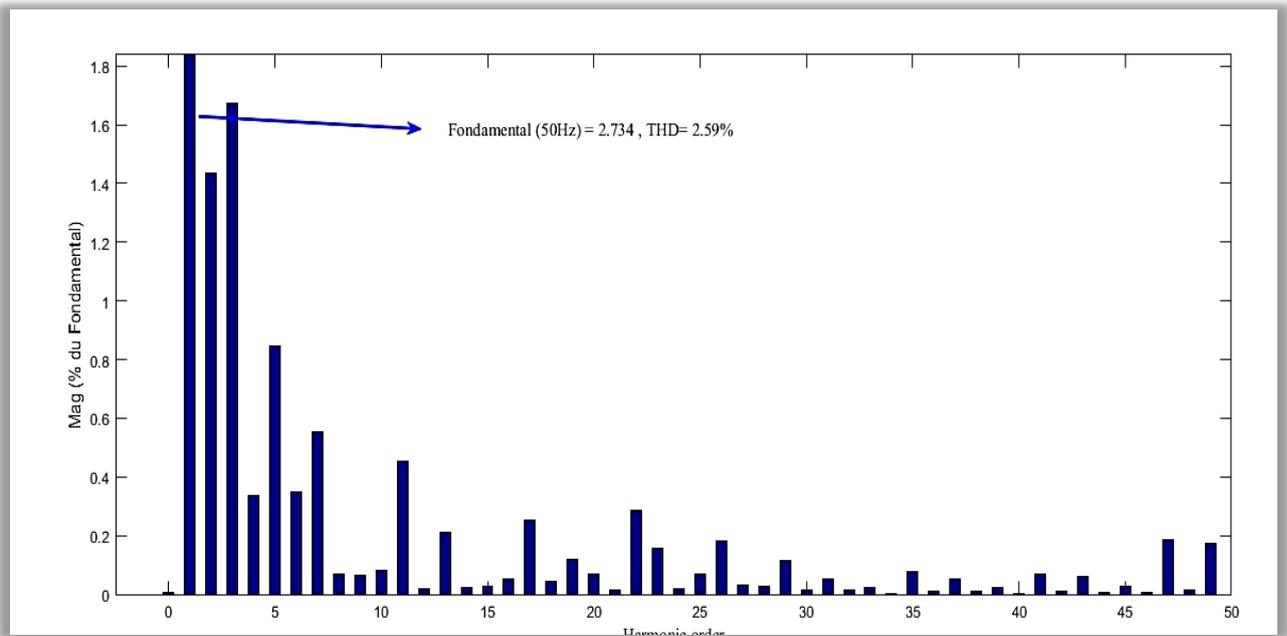


FIGURE III.18 ANALYSE SPECTRALE DU COURANT APRES FILTRAGE.

III.5.1 Interprétation des résultats

D'après les deux figures (III.15) et (III.16), On observe que l'ajout du filtre améliore bien la forme du courant et de la tension fournie.

Le courant et la tension fournie sont sinusoïdaux et équilibrés.

On remarque d'après la figure (III.17) l'influence du filtre sur l'amélioration du courant obtenu. Le THD est bien amélioré pour le courant il a diminué jusqu'à 2.59%, ce qui signifie que le filtre LC a éliminé et réduit toutes les harmoniques de hautes fréquences car c'est un filtre passe-bas.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la simulation du système photovoltaïque autonome avec l'illustration des différentes opérations que subissent la tension et le courant produite par le générateur PV afin de satisfaire le besoin de la charge.

Le problème des harmoniques a été présenté, l'analyse spectrale du courant est montrée, l'effet de la perturbation harmonique et les résultats de simulation ont montré l'efficacité de l'ajout d'un filtre à la sortie de l'onduleur pour améliorer la qualité de la tension et du courant.

Les filtres passifs LC présentent de nombreux avantages dans les systèmes hors réseau, tels que l'augmentation de la durée de vie des dispositifs du système PV autonome, l'augmentation de la qualité de l'énergie transférée à la charge et l'amélioration du facteur de puissance du système solaire.

Les filtres LC réduisent également de nombreuses harmoniques causées par les convertisseurs non contrôlés et l'onduleur solaire. Par conséquent, la valeur THDi dans le système solaire PV tombe en dessous des valeurs limites exprimées par les normes comme le montre les résultats de notre simulation.

Les filtres passifs LC sont généralement utilisés pour interconnecter l'onduleur solaire et la charge non linéaire de manière à filtrer les harmoniques produites par l'onduleur solaire et la charge non linéaire. En conséquence, on a observé que les filtres LC à supprimer les composantes harmoniques de la charge non linéaire .

Chapitre IV

Analyse Technico-économique du système photovoltaïque à l'aide du logiciel Homer Po

IV Introduction

L'installation photovoltaïque est un assemblage des panneaux photovoltaïques eux même composés d'un ensemble des cellules photovoltaïques reliées entre elles. Lorsque ces cellules sont exposées aux rayonnements du soleil, elles produisent de l'électricité, Tout système photovoltaïque peut se composer d'un module photovoltaïque à lui seul ne peut pas grand-chose en termes de réponse à un besoin défini il doit donc être associé à un système complet. Pour problème de coût d'installation, Nombreux des logiciels existent maintenant pour modéliser, optimiser ou dimensionner les différents systèmes conçus à partir de l'énergie renouvelable.

Le défi majeur aujourd'hui c'est de fournir une énergie électrique économiquement efficace et bénéficiaire pour cela nous allons dimensionner notre installation photovoltaïque relié à des batteries dans un site isolé situé à la willaya de Bejaia au nord de l'algerien qui es une région caractérisée avec un gisement solaire intéressant et des températures qui permet le fonctionnement des panneaux photovoltaïque d'une façon à avoir une puissance électrique satisfaisante pour le besoin journalier d'une maison situé dans l'emplacement désiré par le logiciel économique Homer Pro.

Le dimensionnement des différents composants du système de production d'énergie PV doit être maîtrisé car il conditionne le coût et la performance de notre système. Pour qu'un système soit efficace, il doit être soigneusement dimensionné et exploité. Les conditions météorologiques (ensoleillement, température) à l'endroit où le système d'énergie photovoltaïque doit être installé ont un impact significatif sur la production d'énergie solaire.

Pour optimiser cette installation on va faire appel au logiciel Homer Pro, Le logiciel sera utilisé pour une meilleure évaluation des couts économiques, Nous allons dans ce chapitre représenter ce logiciel et les résultats de simulation de l'ensemble de notre système qui se fera sur cet outil afin de nous proposer un choix optimal économique et énergétique.

IV.1 Présentation du Logiciel HOMER Pro

Un logiciel appelé HOMER a été créé pour les petits systèmes de production d'énergie. Il peut être utilisé pour simuler à la fois des systèmes à base de combustibles fossiles et des systèmes à base d'énergies renouvelables.

Il permet de simuler et optimiser des systèmes d'énergie renouvelable et des systèmes d'énergie fossile. Sa capacité à simuler des systèmes photovoltaïques, qui combinent différentes sources d'énergie, qu'elles soient renouvelables ou fossiles, est l'un de ses principaux avantages.

Peter Lilienthal, le créateur du logiciel HOMER® original, a créé la première version en 1992 pour le NREL (le laboratoire national américain des énergies renouvelables).

De nombreuses améliorations dans plus de 40 nouvelles versions Ce logiciel est conçu pour des systèmes énergétiques de petites puissances. Afin de simuler ces derniers avec des énergies renouvelables et avec des énergies fossiles .

Ce didacticiel de conception des architectures autonome de production électrique avec un cout économique le plus optimal HOMER est un véritable moyen de modélisation pour la sélection

et l'analyse des groupes électrogènes, des systèmes de cogénération, des éoliennes, des systèmes photovoltaïques, des systèmes hydrauliques, des batteries, des piles à combustible, et de nombreux autres.

Il est caractérisé par une durée de simulation horaire. La période de la configuration est d'un an. Cela permet de répondre aux changements de facteurs comme la consommation d'électricité, la production d'énergie solaire ou éolienne. [35]

Homer Pro peut modéliser des systèmes connectés au réseau et hors réseau. Une fois que l'optimiseur a trouvé une liste de systèmes candidats, l'utilisateur peut être plus précis sur les tailles à prendre en compte, puis itérer le modèle pour mieux représenter une conception préliminaire réaliste.

IV.2 Les paramètres pour le choix de logiciel – HOMER

TABLEAU IV.1 PARAMETRES POUR LE CHOIX DE LOGICIEL – HOMER PRO

Paramètre	Oui / non / en parti	Explication
Langue	Oui	En anglais
Accessibilité à tous	Oui	Gratuit, téléchargement disponible en ligne, aide et tutoriel, fichiers d'exemple disponibles en ligne.
Plusieurs technologies disponibles	Oui	Éolien, diesel et photovoltaïque.
Systèmes hors réseau	Oui	...
Simulation de systèmes dans plusieurs pays	Oui	Partout à travers le monde selon des lieux prédéterminés.
Évaluation des coûts	Oui	...
Optimisation des systèmes	Oui	...

IV.3 Fonctionnement

Ce logiciel nous permet d'exécuter des simulations pour optimiser les systèmes et enfin d'effectuer une analyse de sensibilité sur ces systèmes optimisés. La solution obtenue par HOMER est la plus rentable parmi diverse combinaison de systèmes d'énergie renouvelable, d'énergie fossile ou de systèmes autonome. La Figure « IV.1 » montre un modèle conceptuel du logiciel HOMER PRO.

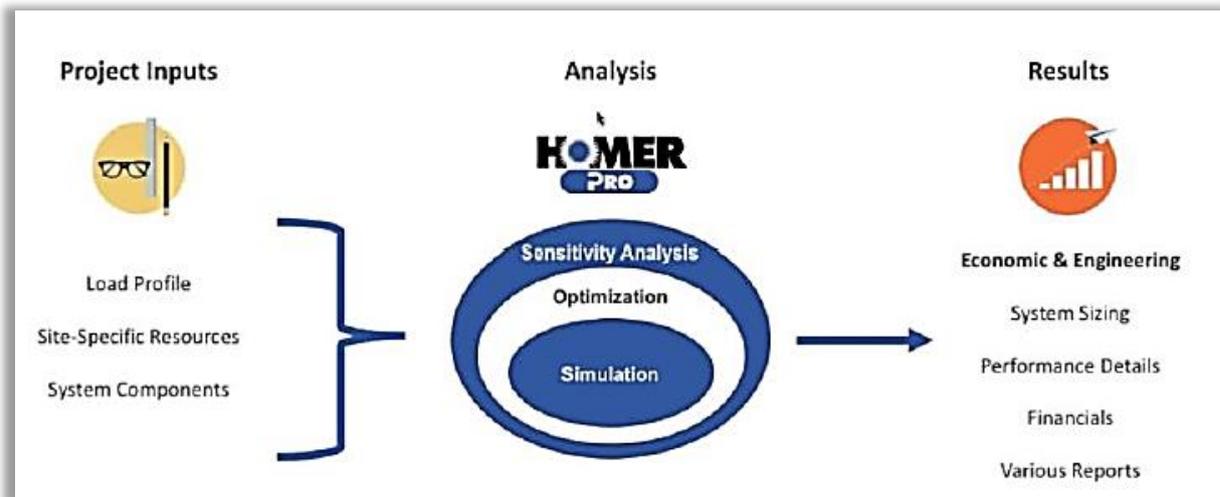


FIGURE IV.1 MODELE CONCEPTUEL DU LOGICIEL HOMER.

Le logiciel nous permet aussi d'effectuer des simulations à l'aide divers systèmes de production d'énergie .tel que des Panneaux Photovoltaïques, des Eoliennes, des centrales Hydroélectrique fluviaux, de la biomasse, etc... Groupes électrogènes (diesel, essence, biogaz, carburants alternatifs et personnalisés, motorisés), Réseau Electric micro turbine, □Micro Turbines, □Piles à Combustible. Nous proposons également une large gamme de dispositifs de stockage ou de récupération d'énergie tels que des bancs de batteries, des volants d'inertie, des batteries à flux et de l'hydrogène. Nous pouvons aussi entrer différents types de profile de demande d'énergie, tels que : la consommation quotidienne variant selon les saisons, les charges différées pour le pompage et le refroidissement de l'eau, les charges thermiques et les mesures d'efficacité énergétique. Les taches principales de l'application peuvent être résumées comme suit : simulation, optimisation et analyse de sensibilité. [36]

IV.4 Architecture globale du programme

L'étape initiale est l'insertions de lieu d'implantations du projet ensuite le téléchargement des données météorologiques correspondantes au site géographique choisis comme le l'éclairement et l'irradiation solaire et les profils de températures à partir de l'accès que ce logiciel nous offre qui est relié à une base de données de prévisions mondiales sur 22 ans de des ressources d'énergies de la NASA.

Définir la nature de la charge à alimenter que ce soit résidentielle comme notre cas ou industrielle avec la définition de la consommation journalière on choisit les équipements de notre système à analyser avec le cout d'opérations et de remplacement et maintenance pour chaque composant (panneaux photovoltaïques, éoliennes, groupe électrogène, batteries ...),

Le capital et le remplacement en cas de la maintenance ou réparation, le cout d'entretien et d'exploitation, la durée de vie et l'efficacité.

L'illustration ci-dessous montre l'architecture du logiciel. Elle a été largement utilisée dans des études de cas antérieures sur les systèmes d'énergie renouvelable dans la littérature scientifique. En outre, la combinaison de systèmes parallèles utilisant à la fois des sources d'énergie conventionnelles et renouvelables.

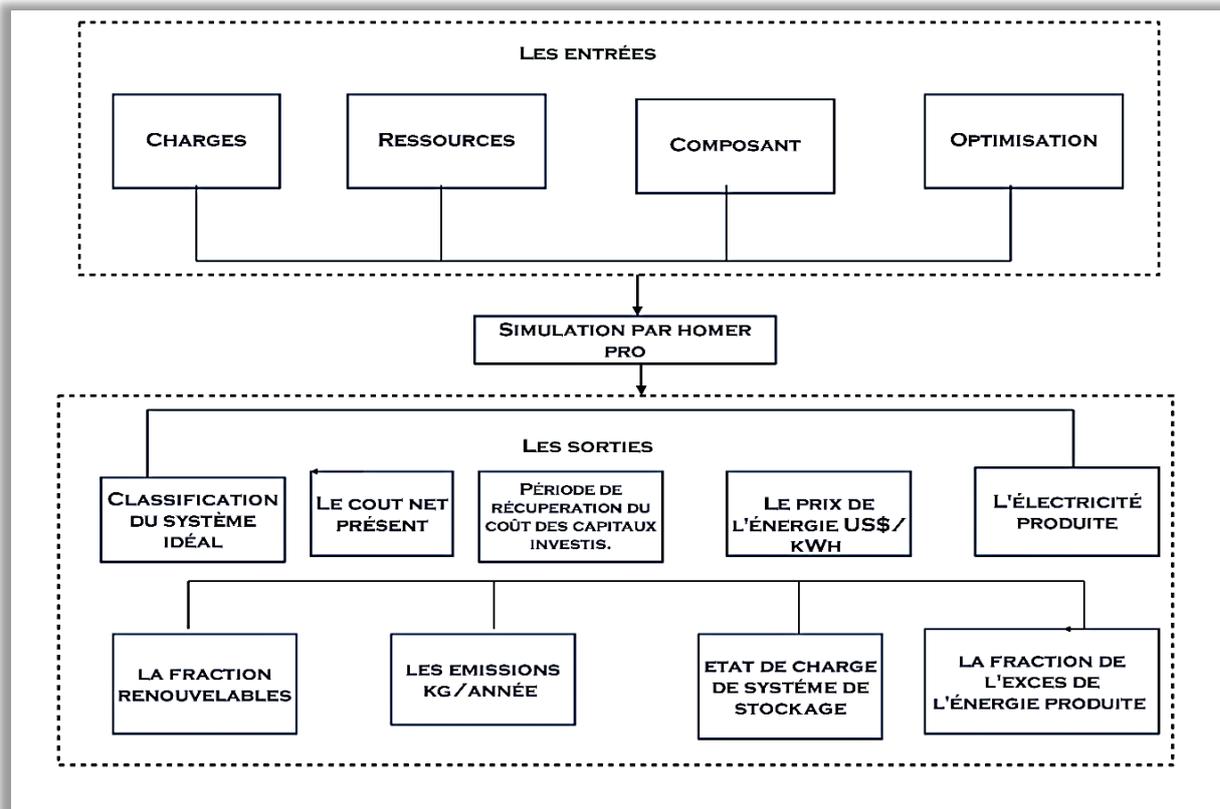


FIGURE IV.2. ARCHITECTURE DE LOGICIEL HOMER PRO.

IV.5 L'objectif principal de HOMER Pro

- ✓ Prise en compte des charges contrôlables (ballon d'eau chaude, etc.) et des profils de charge horaires
- ✓ Simulation horaire d'un système de production multi-sources. Homer permet de simuler le comportement d'une grande variété d'équipements de production (PV, éolien, hydroélectricité, biomasse, diesel, huile végétale) et de stockage (électrochimique, volant d'inertie, pile à combustible).

L'analyse de la sensibilité à divers paramètres d'entrée, tels que le prix des hydrocarbures, la durée de vie des modules, le gisement solaire et la charge, permet à l'utilisateur d'obtenir l'architecture et la configuration les plus rentables.

Il s'agit d'un outil permettant de prendre des décisions concernant la taille d'un mini-réseau, la réfrigération, charge thermique, mesures d'efficacité énergétique. Les principales tâches de l'application peuvent être résumées par : simulation, optimisation et analyse de sensibilité [36].

L'objectif de HOMER est d'identifier l'ensemble de composants le moins coûteux qui peut répondre de manière fiable à la charge électrique. Il existe des milliers ou des dizaines de milliers de combinaisons possibles de pièces d'équipement.

Le programme doit simuler un système électrique pendant une année entière pour chaque cas examiné par HOMER. Contrairement à HOMER Optimiser, l'approche de recherche de grille modifiée demande à l'utilisateur d'entrer chaque option de recherche qui pourrait être applicable. Tout ce qui est nécessaire est un emplacement, la connaissance de la charge

électrique qui doit être satisfaite, et quelques estimations de coûts pour divers composants potentiels (tels que le prix par kW pour les panneaux solaires photovoltaïques). Tous les composants de HOMER ont des coûts par défaut, mais ce ne sont que des points de départ. [36]

IV.6 La méthode de dimensionnement

La procédure générale de dimensionnement et de simulation peut être résumée en quelques étapes :

- ✚ Évaluation des besoins énergétique (consommation d'énergie) ;
- ✚ Pré dimensionnement manuel des équipements ;
- ✚ Identifier les équipements nécessaires au système (panneaux solaires, convertisseur, batteries...)
- ✚ Entrer les données requises dans le logiciel.
- ✚ Le besoin énergétique estimé.
- ✚ Profil de fluctuation du système PV.
- ✚ Dans le cas d'un équipement (prix de l'équipement et de coût d'exploitation et de maintenance)
- ✚ Lancer le calcul avec HOMER Pro ;
- ✚ Ajustez itérativement les résultats de HOMER Pro pour arriver à la meilleure solution pour ce système.
- ✚ Facultativement, effectuer une analyse de sensibilité,
- ✚ Valider le système [24].

IV.7 Démarche générale du projet

IV.7.1 la localisation géographique du lieu choisi

Pour notre étude le lieu se situe au nord de la wilaya de Bejaia, Algérie, comme le montre la figure (IV. 3).



FIGURE IV.3 LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DE LIEU D'ETUDE.

IV.7.2 L'identification des équipements utilisés dans Homer Pro

Cette étape est très rapide. Elle consiste à identifier les équipements nécessaires au système que l'on souhaite modéliser. Dans ce cas, il s'agit d'un système photovoltaïque autonome avec un système de stockage d'énergie qui alimente une charge AC. D'abord, le logiciel affiche un message pour sélectionner une charge (Ad lad). Entrons le type de charge et grâce au menu, nous trouvons le reste de l'équipement requis dans la fenêtre (inclus), montrant les générateurs PV, les onduleurs et les batteries. Un schéma de notre système est présenté dans la figure suivante :

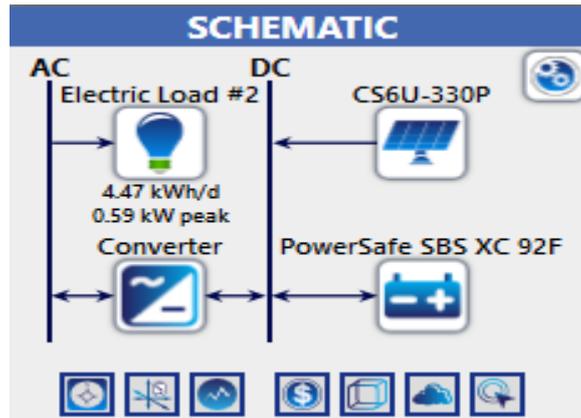


FIGURE IV.4 SCHEMA DE L'INSTALLATION

IV.7.2.1 Caractéristiques du panneau photovoltaïque

Les caractéristiques d'un panneau photovoltaïques de type MAX POWER CS6U-330P d'une puissance de 330Wc sont présentées dans le tableau ci-dessous. Le coût économique est à 200,00 \$ équivalent à 26998,00DA.



FIGURE IV.5 LE PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE CHOISI

Ce panneau photovoltaïque est utilisé dans des isolés (habitations non raccordées au réseau électrique, pompes, communications, etc.). Ce panneau solaire a les caractéristiques suivantes :

TABLEAU IV.2 CARACTERISTIQUES DU PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE.

Symbole	PARAMETERS	Valeurs
P_{pv}	Puissance Photovoltaïque	330 W

I_{mpp}	Courant maximale	8.88 A
V_{mpp}	Tension maximale	37.2V
I_{sc}	Courant de court-circuit	9.45A
V_{oc}	Tension a circuit ouvert	45.6V
α_{sc}	Coefficient de température du courant de court-circuit	0.053%/°C
B_{oc}	Coefficient de température de tension de court-circuit	-0.3 %/°C

IV.7.2.2 Le choix de la batterie

La batterie choisie est de type acide plombe de 12V et 101 Ah (PowerSafe SBS XC)



FIGURE IV.6 BATTERIES POWER SAFE SBS XC.

Les cellules plomb-acide étanches et les monoblocs de la gamme EnerSys® PowerSafe® SBS® XC sont conçus pour résister aux rigueurs des applications d'énergie renouvelable et aux conditions erratiques du réseau.

La technologie des plaques minces en plomb pur (TPPL) d'EnerSys est avantageuse pour le PowerSafe SBS XC. Le PowerSafe SBS XC est le choix idéal pour les conditions d'exploitation difficiles dans des environnements de réseau instables avec un risque élevé de fonctionnement à charge partielle incontrôlée, grâce à ses performances de charge rapide et de cyclage rapide. Il est également résistant aux décharges profondes. [37]

IV.7.3 Application sur le logiciel Homer pro

IV.7.3.1 Choix de lieu d'implémentation de l'installation

Comme on a mentionnée précédemment, les emplacements géographiques sont entrés pour fournir des données météorologiques appropriées, ou des systèmes autonomes sont étudiés, comme indiqué dans le diagramme suivant :



FIGURE IV.7 VISUALISATION DU LIEU PAR HOMER PRO.

IV.7.3.2 Choix du profil de charge

On sélectionne ensuite l'équipement dont nous avons besoin pour notre architecture en fonction des performances et des besoins de chaque équipement, comme indiqué dans le schéma suivant :

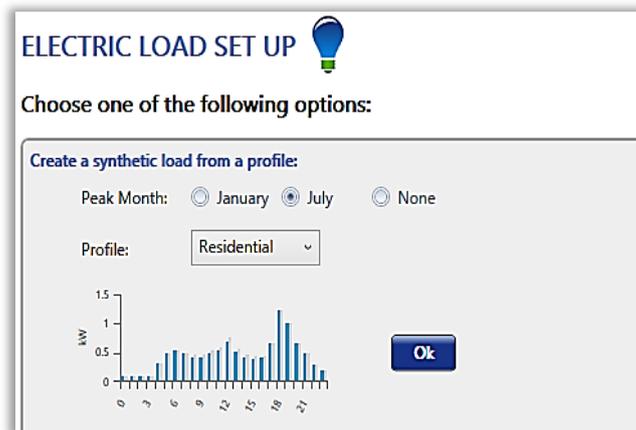


FIGURE IV.8 CHOIX DE LA CHARGE QUI CONVIENT A UNE HABITATION.

La prochaine étape fournira des données sur l'approvisionnement en ressource de rayonnement solaire ainsi que sur les températures relatives aux dépôts dans la région de Bejaia, l'importation de ces données se fait par internet à l'aide d'un appareil Homer pro connecté à la connexion satellite du laboratoire du campus de TARGA OUZEMOUR où se déroulent les recherches. On a utilisé le logiciel Homer Pro pour enregistrer les données météorologiques.

Pour tirer le meilleur parti de l'énergie photovoltaïque et d'une bonne conception des panneaux solaires, il est important d'évaluer le potentiel de disponibilité de l'énergie solaire à un endroit particulier à tout moment de la journée ou de l'année. Cependant, dans la plupart des cas, les mesures locales de l'insolation et du flux n'existent pas, il faut donc s'appuyer sur certaines méthodes d'approximation pour prédire les propriétés du rayonnement solaire. Par conséquent, différents modèles existants ont été développés par différents chercheurs pour estimer le rayonnement solaire à différents endroits. Ces modèles sont basés sur une variété de paramètres géographiques et météorologiques disponibles tels que les heures d'ensoleillement relative, la température et l'humidité relative, les heures d'ensoleillement, l'altitude, les

précipitations et la vitesse du vent. Plusieurs chercheurs ont cherché une formule fiable pour estimer l'irradiance globale à partir des mesures de durée d'ensoleillement [38].

Les irradiations mensuelles enregistrées par l'agence spatiale américaine sur les 22 ans, comme le montre la figure (IV.9) (juillet 1983 au juin 2005).

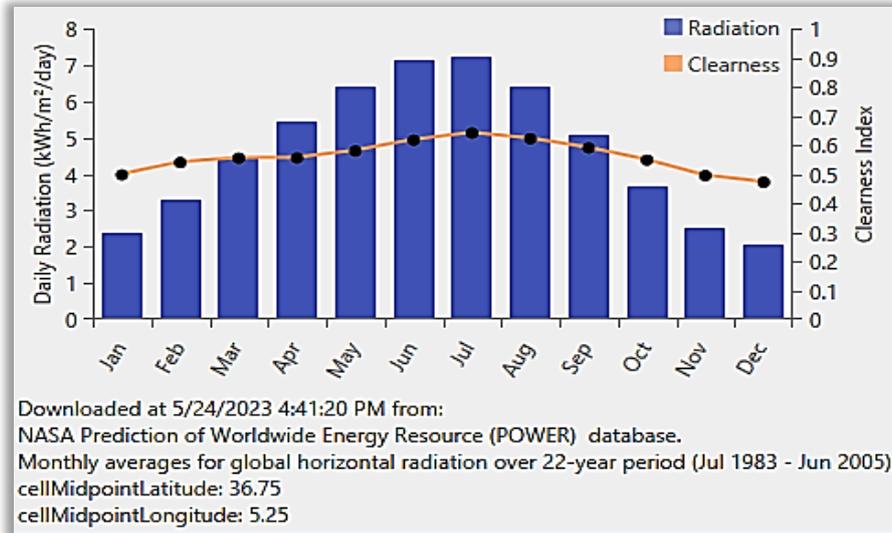


FIGURE IV.9 IRRADIATION SOLAIRE DU SITE.

Les valeurs d'irradiation solaire durant une année sont enregistrées dans le tableau suivant :

Tableau IV.2 irradiation solaire mensuel .

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avr.	Mai	Juin	Aou	Sep	Oct.	Nov.	De
Irradiation (KWh/m/J)	2.38	3.31	4.44	5.46	6.41	7.12	6.38	5.08	3.66	2.51	2.6

Toutes les valeurs ont été récemment enregistrées par satellite par NASA le 11 MAI 2023. le graphique ci-dessous montre l'histogramme de la température quotidienne pour le 24 mai 2023 et les estimations de température mois par mois de janvier 1984 à décembre 2013 sur le côté gauche du graphique.

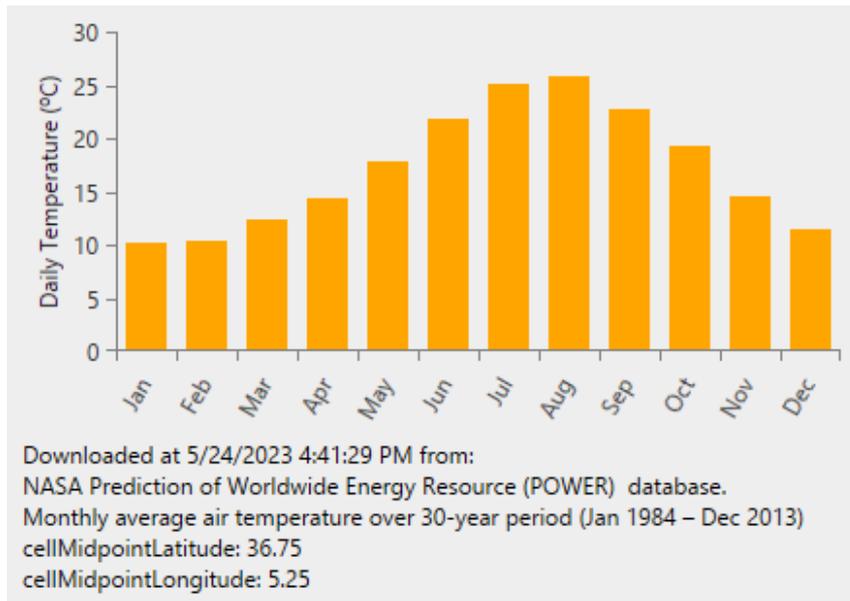


FIGURE IV.10 LES TEMPERATURES MENSUELLES ENREGISTREES .

TABLEAU IV.3 TEMPERATURES MENSUELLES.

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avr.	Mai	Jui	Juil.	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
Température C°	10.15	10.37	12.28	14.33	17.87	21	25.1	25.7	19	14.5	11

Les détails de la charge sont des entrées de la simulation faite par le logiciel.

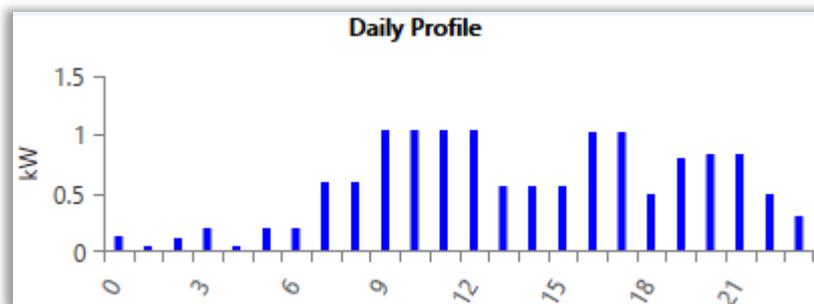


Figure IV.11 Profil journalier du besoin de la charge.

IV.7.3.3 Insertion des équipements

Pour choisir les équipements qui seront inclus dans le système à modéliser. Il suffit de cocher les éléments à utiliser selon des plusieurs choix illustrés à la Figure « IV.12»

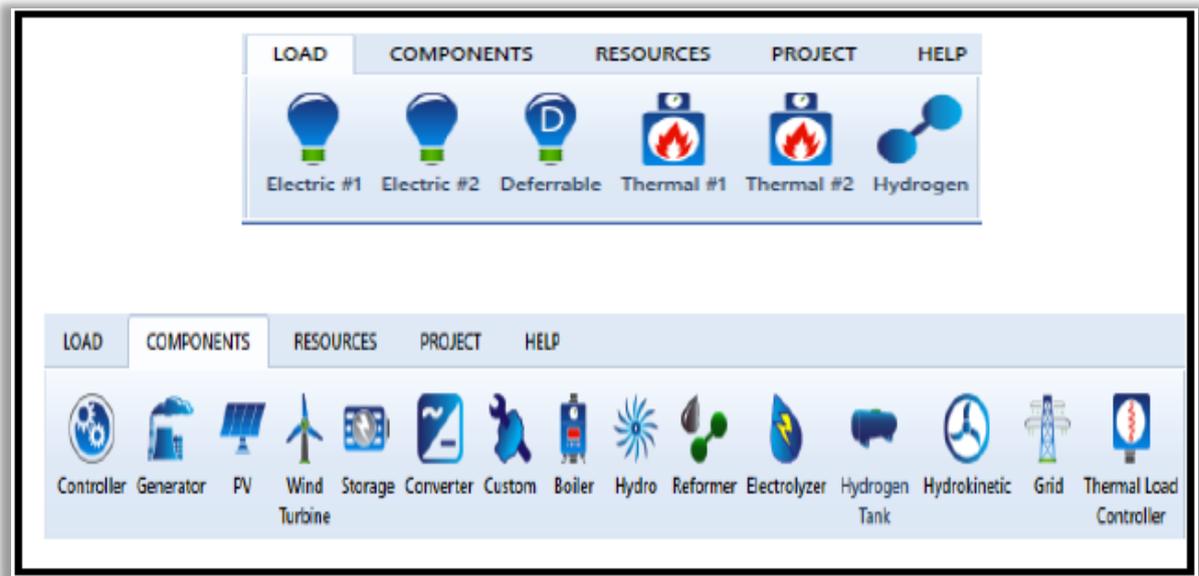


FIGURE IV.11 LES EQUIPEMENTS A CHOISIR SUR HOMER PO.

Une fois sélectionnés, les divers équipements apparaissent dans la partie 1 de définition du système (schéma de système) comme à la Figure « IV.13», et les ressources nécessaires aux équipements sélectionnés apparaissent, elles dans la partie 2 de définition des ressources comme à la Figure « IV.14».



Figure IV.13 le schéma de système et les ressources.

a) Choix du panneau

Construisons ensuite l'architecture globale en commençant par le module photovoltaïque choisit, Le prix des modules photovoltaïques dépend de plusieurs facteurs tels que la taille, la technologie et la marque. Des panneaux photovoltaïques ont été sélectionnés pour ces études. Le module photovoltaïque à un cout en capital de 350 \$ et un coût de remplacement de 150.00 \$ est supposé. La durée de vie de l'installation photovoltaïque est supposée être de 25 ans. Les coûts d'exploitation et d'entretien sont estimés à 55\$ par année.

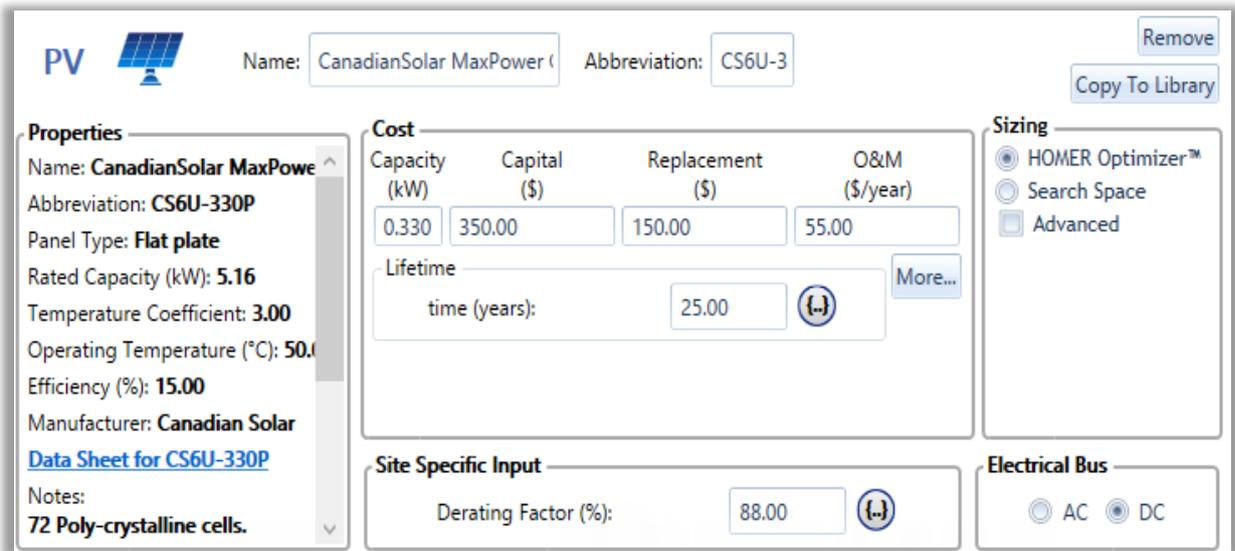


FIGURE IV.12 CARACTERISTIQUE DU PANNEAU SOUS HOMER PRO.

b) Choix de la batterie

On aura aussi Une batteries acide-plomb, de tension 12V, capacité de 101Ah, un coût de 246.55 \$ et d’une durée de vie estimée de 25 ans.

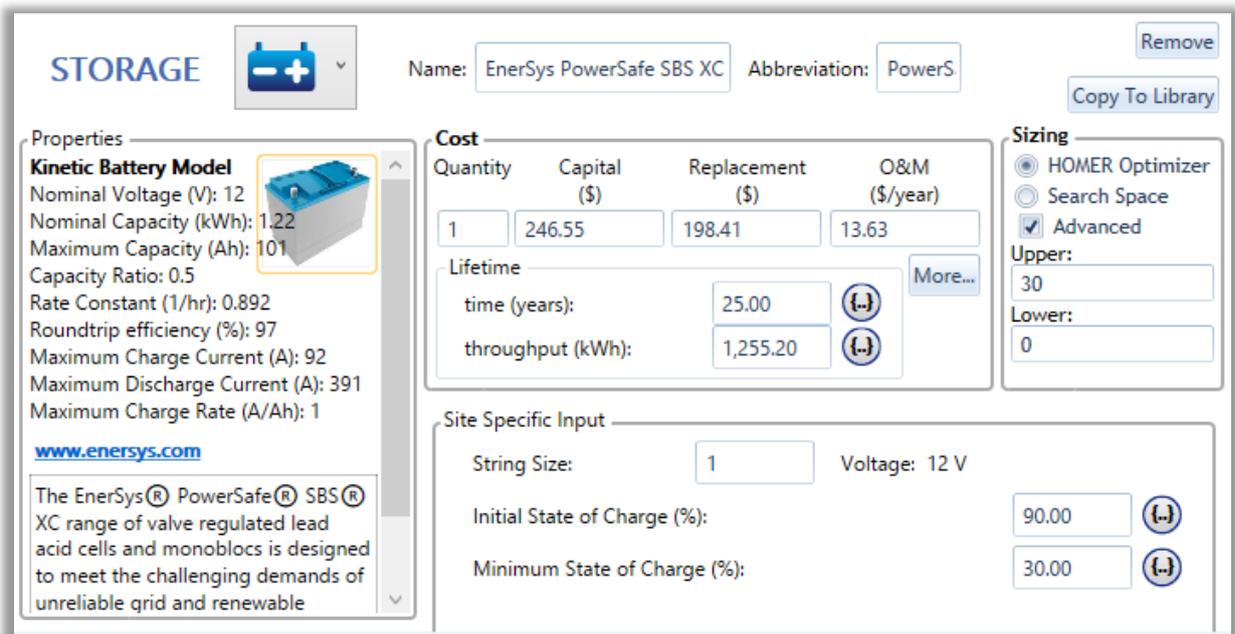


FIGURE IV.13 CARACTERISTIQUES DE LA BATTERIE SOUS HOMER PRO.

c) Choix du convertisseur

Des convertisseurs ont été ajoutés à l’ensemble du système de profilés, avec une durée de vie estimée à 20 ans et un rendement de 95%. Une efficacité de 95% est supposée pour toutes les tailles d’onduleurs. Le prix estimé de l’onduleur est de 400\$.

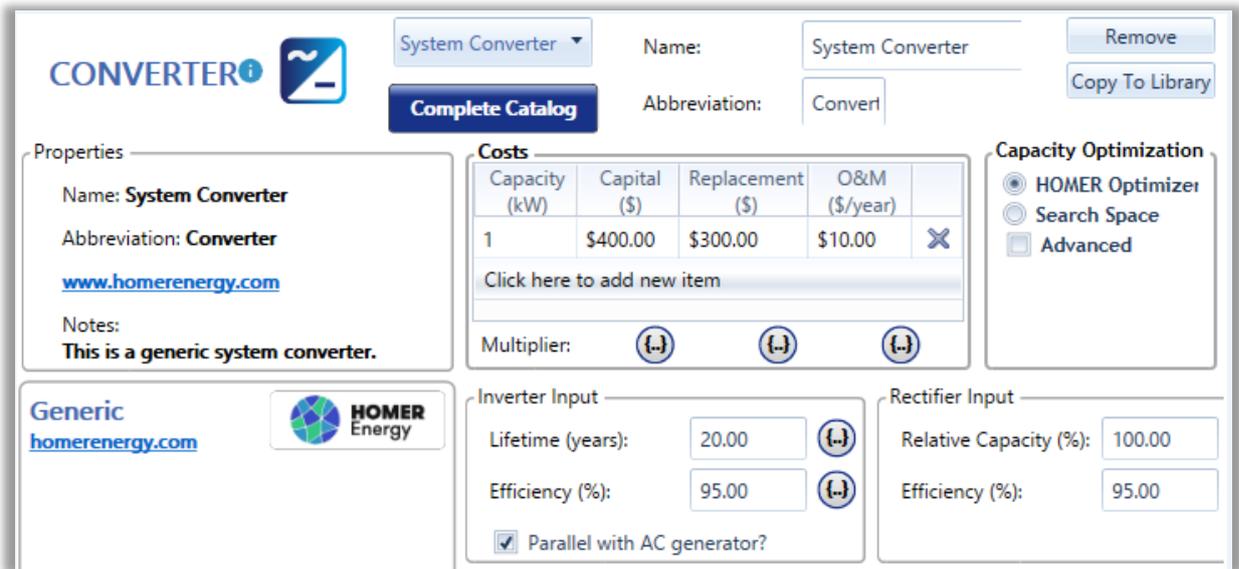


FIGURE IV.14 CARACTERISTIQUES DU SYSTEME DE CONVERSION AVEC HOMER PRO.

IV.8 Discussion des résultats obtenus

Après avoir entré les différents paramètres qui caractérisent l’installation. Après avoir cliqué sur « calculer » une fenêtre apparaît résumant les résultats de dimensionnement. Comme le montre la figure (IV-17) :

The screenshot shows the 'RESULTS' window with the following table of optimization results:

RESULTS												
Optimization Results												Calculation Report
Left Double Click on a particular system to see its detailed Simulation Results.												Compare Economics
Export...												Column Choices...
Architecture							Cost			System		
CS6U-330P (kW)	PowerSafe SBS XC 92F	Converter (kW)	Efficiency1	Dispatch	NPC (\$)	COE (\$)	Operating cost (\$/yr)	Initial capital (\$)	Ren Frac (%)	Total Fuel (L/yr)		
2.15	16	0.860	1.00	CC	\$14,172	\$0.672	\$587.99	\$6,570	100	0		
2.15	16	0.860	1.00	LF	\$14,172	\$0.672	\$587.99	\$6,570	100	0		
2.15	16	0.860	0	LF	\$14,172	\$0.672	\$587.99	\$6,570	100	0		
2.15	16	0.860	0	CC	\$14,172	\$0.672	\$587.99	\$6,570	100	0		
2.15	16	0.867	0	LF	\$14,185	\$0.673	\$588.58	\$6,576	100	0		
2.15	16	0.867	1.00	LF	\$14,185	\$0.673	\$588.58	\$6,576	100	0		
2.15	16	0.867	0	CC	\$14,185	\$0.673	\$588.58	\$6,576	100	0		
2.15	16	0.867	1.00	CC	\$14,185	\$0.673	\$588.58	\$6,576	100	0		
2.15	16	0.888	0	CC	\$14,188	\$0.673	\$588.38	\$6,582	100	0		
2.15	16	0.888	0	LF	\$14,188	\$0.673	\$588.38	\$6,582	100	0		

FIGURE IV.15 RESULTATS DE DIMENSIONNEMENT PAR LE LOGICIEL HOMER.

Le meilleur résultat est proposé par Homer Pro. Ce dernier a le cout actuel net (NPC) le plus bas de \$14.172 (Figure (IV-17)) et un COE est de 0.860 \$.

Homer Pro peut proposer plusieurs configurations possibles du système, mais toujours on choisit la première configuration qui est la plus économique. Dans ce cas Homer a proposé la configuration unique représentée sur la figure (IV.18) :

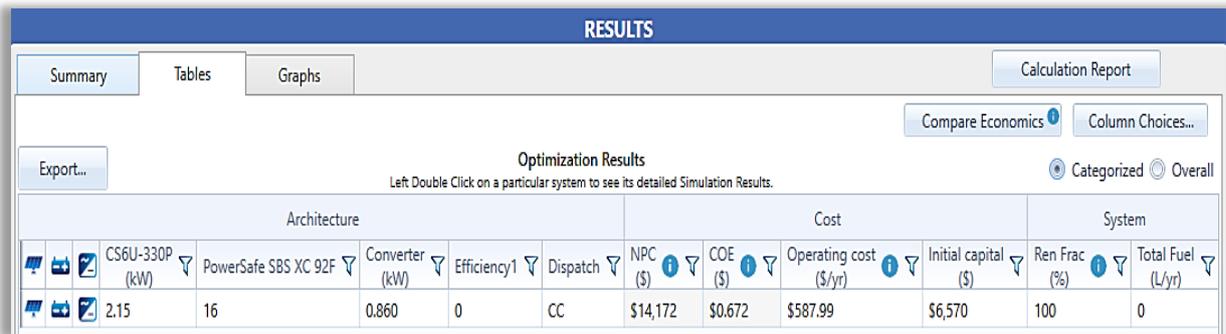


FIGURE IV.16 LE RESULTAT OPTIMAL POUR LE L'INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE PAR HOMER PRO.

Par conséquent, le logiciel HOMER suggère le premier résultat comme le choix optimal, affichant le meilleur en premier, tout en offrant des performances de dimensionnement globalement acceptables, a un cout initial de 6750 \$, le logiciel nous offrait une meilleure architecture pour l'argent.

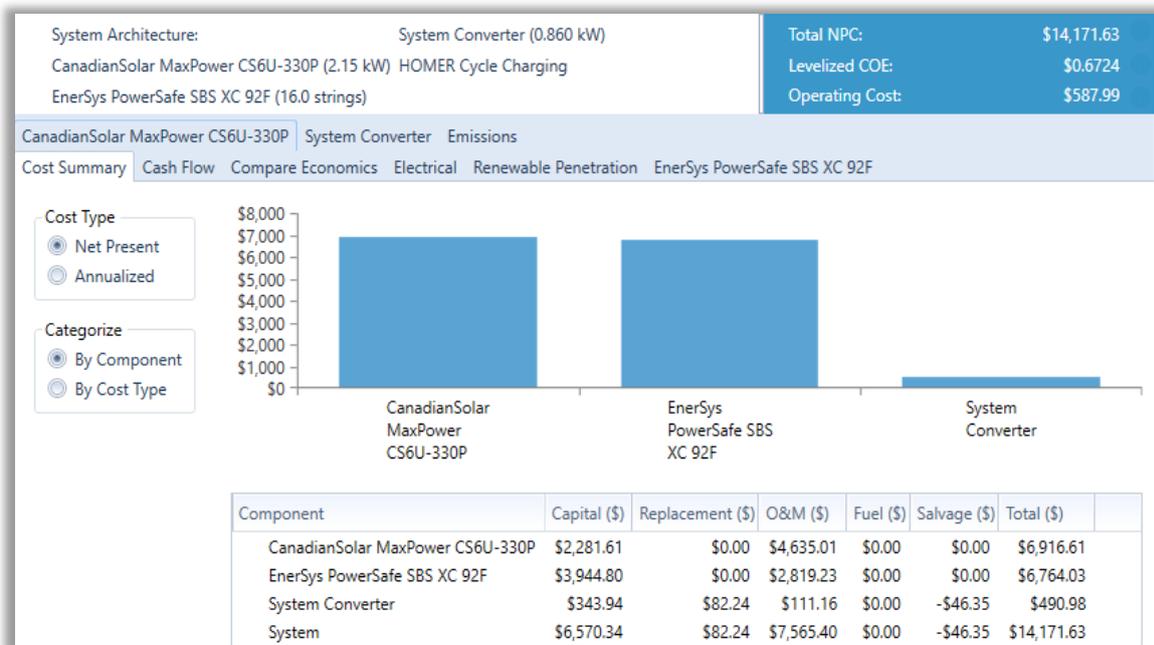


FIGURE IV.17 DETAIL DES COUTS D'OPERATION POUR LE SYSTEME AUTONOME.

Le cout économique initial qui est estimé à 6570 \$ avec des composants suivants :

- ✚ Un panneau qui coûte 350 \$ de puissance 1 kW
- ✚ Avec une batterie de prix 246.55 \$ et durée de vie de 25 ans
- ✚ Un système de convertisseurs de puissance 1 kW de prix 400 \$ de 10 ans de durée de vie.

Le tableau suivant montre le coût total de l'architecture avec les différents composants utilisés durée d'une année.

TABLEAU IV.4 RESUME DES FLUX DE TRESORERIE POUR LE SYSTEME AUTONOME.

Composant	Cout initial (\$)	Cout de remplacement (\$)	Cout d'opération et entretien par année (\$)	Cout de sauvetage (\$)	Total (\$)
Panneau photovoltaïque	2281.61	0	4635.01	0	6916.61
Convertisseur	343.94	82	111.16	46.35	490.98
Les batteries	3944.80	0	2819.23	0	6764.03
Total	6750	82	7565.40	46.35	14171.63

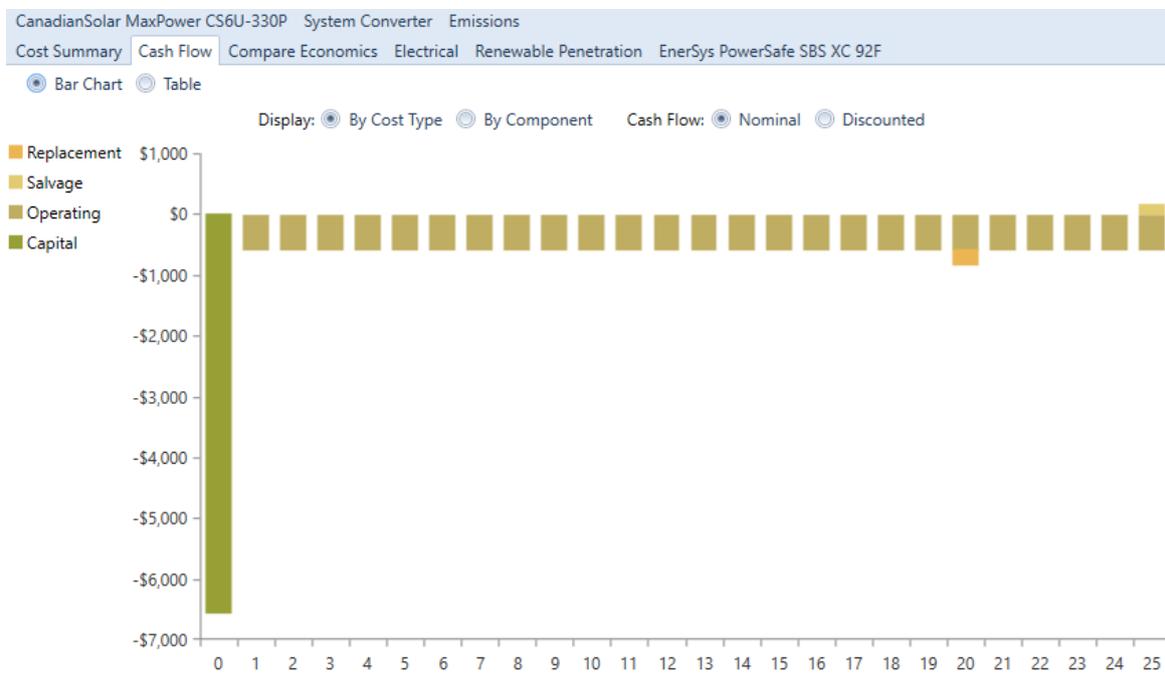


FIGURE IV.18 RESUME DES OPERATIONS ET DES REMPLACEMENTS PENDANT TOUTE LA DUREE DE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME.

On remarque un cout de remplacement est pratiquement nul du a la durée de vie des équipements.



FIGURE IV.19 PRODUCTION ELECTRIQUE MOYENNE MENSUELLE DU SYSTEME PV.

La production de l'énergie électrique mensuelle moyenne fournie par le système est également calculée par le logiciel et illustré à la figure (IV -21). La production d'électricité maximale en juillet par ce système est 0.61 MKW.

IV.8.1 Les résultats obtenus sur le type de batterie

La figure (IV.22) montre l'état de charge de la batterie pour 24 heures et un an.

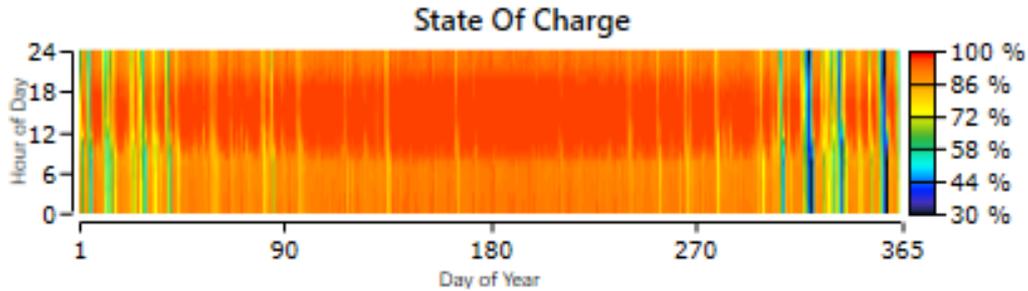


FIGURE IV.20 L'ETAT DE CHARGE DU PARC BATTERIES DU SYSTEME PV.

La batterie est importante pour le stockage d'électricité, mais aussi pour la régénération et la production de l'électricité en cas de surconsommation. Le manque de production d'énergie dépend fortement des conditions météorologiques. La banque de la batterie est également analysée. La capacité de la batterie est de 101 Ah et une tension nominale de 12V. Par conséquent, 16 batteries sont utilisées. L'état de charge de la batterie au cours de l'année est présenté dans la figure (IV.22). Pendant cette période, il varie entre 30% et 90%.

Il a été observé que le cycle de charge-décharge est relativement mineur et cela augmente la durée de vie de la batterie. Une batterie à cycle profond est généralement sélectionnée puisqu'elle est spécifiquement conçue pour une application à cycle profond et à une durée de vie plus longue.

Ces batteries sont idéales pour les applications de stockage d'énergie renouvelable, elles peuvent conserver la majeure partie de leur capacité consommée avant de devoir être rechargée. Nous recommandé d'utiliser 50% de la capacité totale pour une décharge maximale normale et de laisser 30% pour les urgences. Il n'est pas recommandé d'utiliser au moins 20% pour prolonger la durée de vie.

IV.8.2 La puissance générée par le panneau photovoltaïque économique proposé

TABLEAU IV.5 : LA PUISSANCE GENEREE PAR LE PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE ECONOMIQUE.

Quantité	Valeur	Unité
Puissance max de sortie	0	KW
Puissance min de sortie	4.36	KW
Pénétration PV	30.1	%
Heurs d'opération	4.372	Hrs/yr
Cout actualisé	0.109	\$/KWh

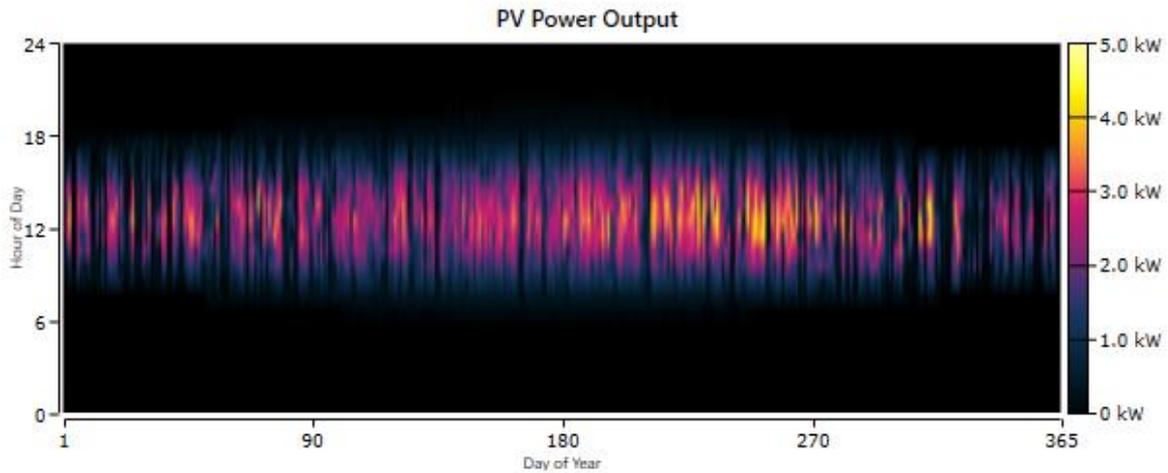


FIGURE IV.21 LA PUISSANCE PRODUITE PAR LE CHAMP PV.

On remarque que la production d'énergie commence après le lever du soleil en été et printemps, le lever est entre 6h et 7h30. En hiver et en Automne le lever à partir de 7h00, la production donc varie selon la saison. Une faible production entre 7h et 8h30 de 1.8 kW à 2 kW, après elle augmente entre 9h30 et 16h00 jusqu'à à atteindre 3 kW a 4 KW. On constate aussi une baisse de production au mois d'Octobre jusqu'au mois de Décembre, Janvier et Février. Ceci est dû à la nature intermittente de l'énergie solaire disponible.

IV.9 Conclusion

Les installations photovoltaïques doivent être dimensionnées pour qu'elles puissent fournir de l'énergie dans les conditions les plus défavorables, ce qui nous permet d'aboutir à une meilleure optimisation des installations photovoltaïques. Dans ce chapitre nous avons présenté le plan de la maison à étudier, ainsi que sa consommation électrique, ensuite on a détaillé les trois méthodes de dimensionnement pour la taille du générateur photovoltaïque, puis on a décrit et dimensionné les autres éléments de l'installation PV tout en réalisant un schéma de câblage, et en fin on a présenté et appliqué sur le logiciel HOMER notre système, vu que ce logiciel facilite la conception d'un système d'énergie électrique pour les applications autonomes grâce à son calcul de beaucoup de facteurs .

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail effectué dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la recherche des solutions appropriés pour la dépollution du réseau électrique a base des filtres passif pour compensation des perturbations en tension (distorsion de tension, creux de tension et surtension), et des harmoniques en courant générées par la charge non linéaire, et l'amélioration de qualité d'énergie.

Dans la partie initiale, nous avons donné une description générale sur l'énergie solaire photovoltaïque, ensuite des généralités sur les systèmes photovoltaïques, principe de fonctionnement des cellules et leurs types.

Le second chapitre a été consacré à établir une vue générale sur les perturbations causées par les charges non linéaires, leurs origines, leurs effets nuisibles sur le réseau électrique ainsi que les différentes solutions pour les atténuer ou les éliminer, notamment filtrage passif et filtrage actif.

Dans le troisième chapitre, on a étudié la modélisation et la simulation du système photovoltaïque. Pour cela, on a étudié d'abord la modélisation du générateur PV, du hacheur booste et l'onduleur commandé par la MLI, ensuite on a simulé notre système PV avec et sans filtrage passif (LC) pour avoir les taux du THD, et au final on a comparé les résultats obtenus.

Une étude économique optimisé coté investissement a été faite dans le dernier chapitre, afin d'analyser les possibilités existantes proposé par le logiciel Homer pro. L'application a été faite en tenant compte des conditions météorologiques de Bejaia. Et les simulations ont été réalisés sous le logiciel Matlab /Simulink et l'étude économique a été réalisée avec le logiciel Homer pro.

Cette étude sous a permet de tirer quelques conclusions :

Les résultats de simulations étaient satisfaisants et ont montré l'intérêt du système de filtrage.

Le filtre LC est plus efficace que le filtre L.

En perspectives de ce travail, il sera intéressant :

- ✚ Implantation des algorithmes de MPPT pour maximiser la puissance de sortie d'un système photovoltaïque défaillant.
- ✚ Utiliser le logiciel Psys pour simuler les performances d'un système photovoltaïque.
- ✚ Reproduire le travail avec un système connecté au réseau.

Références Bibliographiques

les références bibliographiques :

- [1] N.Touil et S.ghenbazi, «Modélisation et Simulation d'un système Photovoltaïque », Mémoire de Master, Université Echahid Hama Lakhdar d'El-Oued,2015.
- [2] M. Yousef, «Etude de raccordement d'un système photovoltaïque au réseau Électrique », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2015 .
- [3] A. Zerga : 'Optimisation du rendement d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin de type n+p', Mémoire de Magistère Tlemcen-1998.
- [4] S. Gustav, énergie renouvelable, Ndangane, 2007.
- [5] Benjamaa ibrahim, « modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque » 2012. Université abou-bakr belkaid – Tlemcen .
- [6] P. Cumunel, Braun. J-P, Labourait. A, 'cellules solaires', édition dunod Paris 2001.
- [7] S.MOUSSANE, S.KACIRI, « Gestion d'énergie d'un système photovoltaïque avec batteries » Mémoire de Master de l'université de Bejaia, 2013/2014.
- [8]. S. Makhloof, contribution à l'optimisation des photovoltaïques par des commandes intelligente. *Thèse de doctorat en science université de Batna*, 2013.
- [9] MEDDOUR. Youcef, YAZI .Zoubir, «Etude de raccordement d'un système photovoltaïque au réseau électrique ». Mémoire Master, l'université d'Ouargla ,2015.
- [10] : J. Labbe , « l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour Système photovoltaïque isolés », thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 21 décembre 2006.
- [11] Théorie. In seatronic , ENERGIE & informatique. [En ligne]. Disponible sur : <http://blog.seatronic.fr/fiches-pratiques/energie/stockage/batterie/theorie/>
- [12] Y.Berkas, T.Boujerda Mémoire de Master en Électromécanique « *Modélisation et simulation d'un système . De pompage photovoltaïque* » Mémoire de Master 2020 Jijel .
- [13] : J. Labbe , « l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour Système photovoltaïque isolés », thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 21 décembre 2006.
- [14] : F. Djaloud , «Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque», Mémoire de Master, université d'Ourgla, promotion 2012.
- [15] Stockage de l'énergie. In WIKIPEDIA. L'encyclopédie libre [en ligne] .2021 disponible sur

<http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Accueil>

[16] Z. ROUMILA, « Commande d'un système d'énergie hybride (photovoltaïque-éolien-diesel) » Thèse de Doctorat de l'Université de Bejaia, 2009 .

[17] M. ZEBBOUDJ ,T. LARFAOUI . « Gestion d'un système multi-sources (photovoltaïque-éolien) avec stockage par batteries » mémoire master, université de Bejaïa, 2020 .

[18] K. Sobaihi, « Etude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction » Mémoire de Magister, Ecole Nationale

Polytechnique Alger 2003.

[19] G. Desquilbet, C. Foucher, P. Fauquembergues, « Statistical analyses of voltage dips », Notes EDF, 96NR00 102, 1995.

[20] N . MIDOUNE , R. HIKAM, « Etude par simulation des effets des harmoniques et de la puissance réactive sur le réseau électrique», Mémoire de master présentée à la faculté de sciences appliquées, département de génie électrique, Université KASDI MERBAH Ouargla MAI 2016.

[21] Véronique Beauvois, « Qualité de la tension, qualité de l'électricité », cours Université de Liège, Novembre 2008.

[22] T. DEFLANDRE Et P. MAURS " Les Harmoniques Sur Les Réseaux Electriques ", Direction Des Etudes Et Recherche En France -Edition EYROLLES, 1998 .

[23] S. Kerrouche. "Développement et implémentation d'un système de filtrage actif de puissance à base d'onduleur triphasé", mémoire de magister, 2009, université de Sétif .

[24] IEEE Standard 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", 1993.

[25] T. Youssef, «Commande aléatoire du convertisseur Buck-Boost triphasé à prélèvement sinusoïdal du courant », Thèse de Doctorat, Université de Clermont-Ferrand, 2006 .

[26] H .Djehloud . "Filtrage actif de puissance." Thèse de doctorat, Université Mentouri-(Constantine), 2007.

[27] BOUCIF A. « Filtrage actif d'un réseau électrique », mémoire de master en commande Electrique, département génie électrique Université Mohamed Khider Biskra, 2014.

[28] S. BEAULIEU, « Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique », Thèse de doctorat présenté à l'université du QUEBEC A Chicoutimi Mai 2007.

[29] M. KARA « Dimensionnement et analyse du coût d'un système hybride de production d'énergie renouvelable pour des sites isolés en Algérie » Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif 1, 2014 .

[30] A. Omeiri. "Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant". Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar (Annaba),2007.

- [31] M. Alali. "Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension". Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, France.2002.
- [32] K. Djazia. "Etude des filtres actifs pour réseaux déséquilibrés et distordus" Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbes Sétif 1. 2015.
- [33] A. SOUFI « Couverture optimisée des besoins électriques d'origine renouvelable d'une exploitation agricole situé en zone montagneuse » Thèse de Doctorat, Université Abou_Bekr Belkaid de Tlemcen, 2019.
- [34] N. Fiorina, « Harmoniques en amont des redresseurs des ASI », Cahier Technique n° 160.
- [35] A. Omeiri. "Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant". Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar (Annaba), 2007.
- [36] M. Oussama. "Étude des harmoniques et techniques de commandes du filtre actif", thèse de magister en électrotechnique option : commande électrique, université de Batna.
- [37] S.MOUSSANE, S.KACIRI, « Gestion d'énergie d'un système photovoltaïque avec batteries » Mémoire de Master de l'université de Bejaia, 2013/2014 .
- [38] Filtres passe-haut, passe-bas, passe-bande, notch dans la synthèse sonore - Audiofanzine article.
- [39] L. Zellouma, "Contribution à l'étude du filtrage des harmoniques des réseaux de distribution à l'aide du filtre actif ", thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2010.
- [40] ZELLOUMA Laid, " Filtrage Actif Parallèle Des Harmoniques Du Courant Générés Par Un Pont Redresseur Triphasé Non Commandé ", Mémoire Magistère Université ANNABA, 2006.
- [41] ANALYSE TECHNICO-ÉCONOMIQUE D'UN SYSTÈME HYBRIDE ÉOLIEN-PHOTOVOLTAÏQUE EN COMPARAISON AVEC LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUE ET ÉOLIEN SEULS Joséanne Bélanger-Gravel Mémoire de maîtrise (2011).
- [42] MÉMOIRE Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique Filière : Électrotechnique Spécialité : Électrotechnique Industrielle Par : Melouah Abou El Kacem Mohammed Sayah Sujet : Dimensionnement d'un système hybride par les méthodes de prévision et HOMER PRO .
- [43] <https://docplayer.fr/13116031-Analyse-du-logiciel-homer.html>