

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان  
Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de MASTER

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques et Réseaux électriques intelligents

Par : **BENOTMANE Sara et MOUALEK Farida**

### **Etude et simulation des systèmes photovoltaïques connectés à un microgrid**

Soutenu publiquement, le **12/06/2016**, devant le jury composé de

Président	Mr S.M.MELIANI	MCA	Univ. Tlemcen
Examineur	Mr A.MECHERNENE	MCB	Univ. Tlemcen
Examineur	Mr A.BRIKCI NIGASSA	MAA	Univ. Tlemcen
Encadrant	Mr M.C.BENHABIB	MCA	Univ. Tlemcen

Année universitaire : 2015-2016

# ***DEDICACE***

*Je dédie ce travail à :*

- *Mes chers parents ; Tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour que je vous porte, ni la profonde gratitude que je vous témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que vous n'avez jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien-être. J'espère avoir répondu aux espoirs que vous avez fondé en moi, et que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux.*

- *Mes grands-parents qui m'ont accompagnés par leurs prières et leurs douceur, puisse Dieu leurs prêter une longue vie et beaucoup de santé et de bonheur.*

- *Mon frère Ibrahim et ma sœur Abir que j'adore, que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.*

- *Mes chères tantes, Veillez percevoir à travers ce travail, l'expression de ma profonde affection et énorme respect. Avec tout l'amour que je vous porte, je vous souhaite beaucoup de bonheur dans votre vie*

- *A tous les membres de ma famille, petits et grands.*

- *Mes chères copines, Mes sincères remerciements pour tous les bons moments qu'on a partagés ensemble.*

- *A toute la promo REREI, puisse Dieu vous garder, éclairer votre route et vous aider à réaliser vos vœux les plus chers.*

- *A tous qui me sont chers.*

**MOUALEK FARIDA**

# *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire à :*

- *Mes parents ; Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux.*

- *Mes frères Mohamed et Abdallah et ma sœur Nora que j'adore, que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.*

- *Mon cher oncle Bachir, Je te suis très reconnaissante, et je ne te remercierai jamais assez pour ta gentillesse, ta générosité ainsi que ton aide précieuse.*

- *Tous les membres de ma famille, petits et grands, veuillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection.*

- *A MOUALEK Farida, la personne avec laquelle j'ai fait ce projet. Le fait de marcher tous les deux en parallèle a été essentiel pour le bon déroulement de cette thèse.*

- *Mes chères copines avec qui j'ai vécu les meilleurs moments de ma vie ; En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble, veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.*

- *A toute la promo REREI, puisse Dieu vous garder, éclairer votre route et vous aider à réaliser vos vœux les plus chers.*

- *A tous qui me sont chers.*

**BENOTMANE SARA**

# *Remerciement*

*Avant tout, nous remercions DIEU, le tout puissant, qui nous a donné la volonté, la santé et la patience durant ces longues années d'étude afin que nous puissions réaliser nos objectifs.*

*Nous tenons à témoigner tout particulièrement notre reconnaissance à Monsieur BENHABIB, qui a dirigé cette thèse. Nous lui exprimons nos vifs remerciements pour l'aide constante durant l'élaboration de ce travail. Ses conseils précieux, ses compétences techniques, ainsi que la confiance qu'il nous a témoigné nous ont permis d'accomplir notre tâche dans les meilleures conditions.*

*Nos remerciements s'adressent également à Monsieur MELIANI, Maitre de conférence à l'université de Tlemcen, pour l'honneur qu'il nous a accordé en présidant le jury de la soutenance, ainsi qu'à Monsieur BRIKCI NIGASSA maitre assistant et Monsieur MECHERNENE maitre de conférence, d'avoir accepté de faire partie du Jury.*

*Nous ne savons comment exprimer notre gratitude à Monsieur DRIS, pour son aide. Nous avons grandement apprécié sa patience, son soutien et ses conseils tout au long de nos recherches.*

# Table des matières

INTRODUCTION GNERALE.....	1
CHAPITRE I - TECHNOLOGIE PHOTOVOLTAIQUE.....	7
I.1 Introduction.....	7
I.2 Energie solaire.....	8
I.3 Rayonnement solaire.....	8
I.4 Cellule photovoltaïque.....	9
I.4.1 Principe de fonctionnement.....	9
I.4.2 Différents types de cellules photovoltaïques.....	10
I.4.3 Circuit équivalent et modèle mathématique.....	11
I.5 Simulation du module photovoltaïque.....	12
I.6 Panneau photovoltaïque.....	14
I.6.1 Caractéristiques du panneau solaire .....	18
I.7 Convertisseur .....	18
I.7.1 Hacheur.....	18
I.7.2 Onduleur.....	24
I.8 Conclusion .....	29
CHAPITRE II - ETUDE DU MICRO RESEAU.....	30
II.1 Introduction.....	31
II.2 Qu'est-ce qu'un micro-réseau ou microgrid ?.....	31
II.3 Avantages et inconvénients des micro-réseaux.....	32
II.4 Configuration d'un micro-réseau.....	33
II.5 Représentation des composants du système .....	33

II.5.1	Modèle équivalent de la ligne.....	33
II.5.2	Transformateur.....	34
II.6	Description du micro-réseau étudié.....	36
II.7	Dimensionnement de l'installation photovoltaïque.....	37
II.7.1	Choix des récepteurs.....	37
II.7.2	Calcul de la consommation journalière.....	41
II.7.3	Chiffrage de l'énergie solaire récupérable.....	43
II.7.4	Calcul de la puissance photovoltaïque.....	43
II.8	Proposition d'une solution.....	45
II.8.1	Champ photovoltaïque.....	45
II.8.2	Système hybride.....	46
II.9	Conclusion.....	48
CHAPITRE III	-SIMULATION DU SYSTEME COMPLET.....	49
III.1	Introduction.....	50
III.2	Description du système en général.....	50
III.2.1	PARTIE 1 .....	51
III.2.2	PARTIE 2 .....	53
III.2.3	PARTIE 3 .....	64
III.3	Conclusion.....	67
CONCLUSION GENERALE	.....	68
BIBLIOGRAPHIE.....		70
Annexe.....		72

# *Nomenclature*

$R_s$  : Résistance série [ $\Omega$ ]

$R_{shu}$  : Résistance shunt [ $\Omega$ ]

$I_{pv}$  : Courant délivrée par la cellule photovoltaïque [A]

$I_{ph}$  : Photo-Courant [A]

$I_d$  : Courant de la Diode [A]

$I_{sh}$  : Courant Shunt [A]

$I_{cc}$  : Courant de court circuit [A]

$I_s$  : Courant de Saturation [A]

$I_{or}$  : Courant de saturation inverse de la diode [A]

$V_d$  : Tension aux bornes de la diode [V]

$V_{th}$  : Tension thermique [V]

$V_{pv}$  : Tension aux bornes de la cellule [V]

$T_{mod}$  : Température de fonctionnement de la cellule

$T_r$  : Température référence de la cellule [300°C/K]

$T_c$  : température ambiante [°C]

$T_{ref}$  : Température de référence [qK]

$G$  : Eclairement [ $W/m^2$ ]

$G_o$  : Eclairement pour les STC [ $W/m^2$ ]

$q$ : Charge électrique élémentaire [ $1.6 \cdot 10^{-19}C$ ]

$E_g$  : Energie de seuil [1.12 eV]

$k_i$  : Coefficient de la température de  $I_{ph}$ .

$k$ : Constante de Boltzmann [ $1,381 \cdot 10^{-23}$  J/K]

$A$ : paramètre de la diode.

$N_s$  : Nombre de cellule en série.

$N_p$  : Nombre de cellule en parallèle

$M_s$  : Nombre de module en série.

$M_p$  : Nombre de module en parallèle

$P_{max}$  : Puissance maximale [w]

$V_{pm}$  : Tension à  $P_{max}$  [V]

$I_{pm}$  : Courant à  $P_{max}$  [A]

$V_{co}$  : Tension du circuit ouvert [V]

$\eta$ : Rendement

$P_{in}$ : la puissance lumineuse incidente [w]

$R$ : Résistance de l'hacheur [ $\Omega$ ]

$C$ : Capacité de l'hacheur [F]

$L$ : Inductance de l'hacheur [H]

$V_g$ : tension d'entrée de l'hacheur [V]

$v_{out}$  : tension de sortie de l'hacheur [V]

$v_L$ : Tension aux bornes de l'inductance [V]

$v_C$  : Tension aux bornes de la capacité [V]

$i_{out}$  : Courant de sortie de l'hacheur [A]

$i_c$  : Courant passant par la capacité [A]

$i_L$  : courant passant par l'inductance [A]

D : Rapport cyclique.

$\Delta i_L$  : Ondulation du courant de l'inductance [A]

$\Delta V_c$  : Ondulation de la tension de la capacité [V]

$T_s$  : période [s]

E : Energie journalière [Wh/j]

P : puissance [w]

t : durée [s]

# ***Glossaire***

PV : photovoltaïque.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

NOCT : Température nominale d'opération de la cellule [°C]

FF : Facteur de forme

DC/DC: Continu/continu

AC/DC : Continu/alternative.

P&O : perturbation et observation

IGBT : Transition bipolaire à gâchette isolée

MLI : Modulation à Largeur d'Impulsion (PWM)

PLL : Boucle à verrouillage de phase

PI : Proportionnel Intégral

BT : Basse tension.

# ***INTRODUCTION GENERALE***

## INTRODUCTION GENERALE

Actuellement, les réseaux électriques existants peuvent être décomposés en quatre niveaux : les gros producteurs centralisés (centrales thermiques à gaz ou à charbon, les centrales nucléaires ou les centrales hydrauliques), le système de transport de l'énergie, le système de distribution et les consommateurs. Ainsi :

- **La production** est généralement obtenue par des moyens de production centralisés, par exemple des centrales thermiques ou des grandes fermes éoliennes. Cela implique qu'ils sont localisés dans un lieu spécifiquement dédié à la production et se trouvent hors périmètre des consommateurs (habitations, entreprises, etc).
- **Le système de transport de l'énergie**, qui permet de transporter de grandes quantités d'énergie à haute tension et sur de longues distances.
- **Le système de distribution d'énergie** qui est chargé de délivrer l'énergie aux usagers. On distingue principalement trois types de consommateur : les consommateurs haute tension, les consommateurs moyenne tension et les consommateurs basse tension. Ainsi le réseau électrique est divisé en trois parties, à savoir :
  - un réseau haute tension (60kV) ;
  - un réseau moyenne tension (5.5 à 36kV) ;
  - un réseau basse tension (220/380V)
- **Les consommateurs** qui peuvent demander de l'énergie à tout moment, il revient alors aux gestionnaires des autres niveaux de fournir l'énergie nécessaire pour répondre aux besoins de ces consommateurs.

L'équilibre entre l'offre et la demande est un point clé des réseaux électriques car si la stabilité n'est pas respectée, il y aura des variations brutales de tension, ce qui entraînera une usure prématurée des installations. Lors des pics de consommation, les opérateurs d'énergie se chargent d'activer des moyens de production plus rapides (comme les centrales à gaz) à l'instant où la hausse du niveau de consommation apparaît. Les opérateurs énergétiques ont alors pour objectif de faire correspondre la courbe de la production avec celle de la consommation. De manière générale, plusieurs moyens de production sont utilisés pour éviter une panne complète du réseau.

En raison de la croissance de la demande en énergie, du réchauffement climatique et de la raréfaction exponentielle du pétrole, le développement de nouvelles stratégies de production en intégrant des énergies renouvelables est devenu plus qu'une nécessité pour l'avenir de notre société contemporaine. De plus, avec le développement considérable de l'informatique, des technologies de l'information, des nouvelles technologies des appareils et instruments de contrôle et de mesure, il a été possible de développer de nouveaux réseaux appelés les réseaux électriques intelligents ou smart grids. Les réseaux électriques intelligents sont des réseaux capables d'intégrer efficacement les comportements et actions de tous les utilisateurs qui y sont raccordés. Producteurs et utilisateurs sont à la fois producteurs et consommateurs, et ceci afin de constituer un système rentable et durable, présentant des pertes faibles et un niveau élevé de qualité et de sécurité d'approvisionnement. Concrètement, ces réseaux électriques intelligents se présentent comme des réseaux électriques sur lesquels on a ajouté un système numérique de communication bidirectionnelle entre fournisseur et consommateur, un système intelligent de mesure et un système de contrôle. Leur objectif est de réguler l'offre et la demande en énergie électrique ainsi que de réduire les émissions de gaz à effet de serre en intégrant des énergies renouvelables.

Un réseau électrique est un système complexe. L'analyse et le contrôle d'un tel système se révèlent extrêmement difficiles. Déployer une stratégie de contrôle globale sur le réseau électrique actuel s'avère être un véritable défi. Une solution serait de décomposer le réseau en sous-réseaux interconnectés, appelés les micro-réseaux ou microgrid.

Un micro-réseau peut être défini comme étant un système d'énergie comprenant des producteurs d'énergie distribuée, de multiples charges électriques et des systèmes de stockage. Ils peuvent être exploités en étant connectés à d'autres réseaux (ou au réseau principal) ou sans aucun apport d'énergie de l'extérieur.

Un micro-réseau est un exemple prometteur d'évolution d'architecture de réseau qui consiste à regrouper les différents producteurs et consommateurs autour d'un réseau moyenne tension. Cela permet de réaliser une minimisation immédiate des pertes liées au transport de l'énergie, une fiabilité de la fourniture et une possibilité de fournir une énergie d'une haute qualité. Les micro-réseaux sont destinés à alimenter des charges électriques et thermiques pour une petite communauté, comme un lotissement, une communauté universitaire ou publique, comme une école, un centre commercial, un site industriel, une zone d'activité ou

une région municipale. Les générateurs ou micro-sources employés dans un micro-réseau sont généralement des énergies renouvelables. Ils doivent être équipés d'interfaces de contrôles afin d'assurer la flexibilité nécessaire et le fonctionnement en tant que système unique ainsi que de maintenir la qualité de sortie de puissance et d'énergie déterminée. Cette flexibilité de contrôle permettrait au micro-réseau de se présenter comme système d'alimentation principale utilisé comme une unité unique contrôlée qui répond aux besoins locaux pour l'énergie, la fiabilité et la sécurité. Les principales différences entre une micro-source et une centrale conventionnelle sont les suivantes:

1. Les micro-sources sont de plus petite capacité par rapport aux grands générateurs de centrales électriques conventionnels.
2. La tension d'alimentation produite peut être directement introduite dans le réseau de distribution d'électricité.
3. Les micro-sources sont normalement installées à proximité des locaux des clients et cela permet de minimiser les pertes en ligne.

Le développement de micro-réseaux est très prometteur pour l'industrie de l'énergie électrique en raison de la réduction de la pollution ainsi que du réchauffement climatique, mais le problème des coûts élevés des ressources énergétiques décentralisées et des installations reste un grand désavantage.

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1\text{m}^2$  est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/ $\text{m}^2$ /an au nord et 2263 kWh/ $\text{m}^2$ /an au sud du pays [1][2][25].

Pour cela, nous avons choisi d'alimenter notre micro-réseau par des unités solaires, ou, plus précisément des panneaux photovoltaïques puisqu'elles dépendent de l'ensoleillement du lieu et de la température, donc de sa localisation géographique.

Le panneau solaire photovoltaïque est un générateur électrique de courant continu. Ce générateur est le seul convertisseur direct pour transformer la lumière en énergie électrique. Il offre la possibilité de produire de l'électricité directement à partir d'une ressource renouvelable et largement disponible. Il est constitué de cellules photovoltaïques reliées entre

elles électriquement. Chaque cellule convertit les rayons provenant du Soleil en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les cellules photovoltaïques sont des composants semi-conducteurs (généralement faites de silicium sous ses différentes formes). Une centrale solaire photovoltaïque est formée d'un ensemble de panneaux solaires photovoltaïques à base de silicium qui sont reliés entre eux en série ou en parallèle et branchés sur un ou plusieurs onduleurs. La quantité d'énergie obtenue dépend toutefois de plusieurs facteurs, à savoir la surface des modules utilisés, ainsi que leur rendement et de l'ensoleillement qui varie selon la latitude, la saison et la météo [3]. La production d'énergie par les systèmes photovoltaïques est très fluctuante et dépend énormément des conditions météorologiques. C'est pourquoi, il faudra penser à stocker cette énergie pour assurer un approvisionnement continu en énergie électrique. Dans un système photovoltaïque, on trouve aussi un convertisseur MPPT (Maximum Power Point Tracker) qui doit être utilisé afin de suivre les changements de l'ensoleillement et de la température et qui permet une conversion de puissance grâce à un algorithme de contrôle approprié d'extraire le maximum de puissance que le GPV peut fournir.

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur l'intégration des panneaux solaires dans le micro-réseau. Pour se faire, nous avons décomposé ce manuscrit de la façon suivante :

- Dans le premier chapitre, nous allons présenter des généralités sur les panneaux photovoltaïques, leur fonctionnement, leurs caractéristiques ainsi que leur modélisation. Nous allons aussi analyser le fonctionnement des convertisseurs de puissance (hacheur, onduleur).
- Dans le deuxième chapitre, nous allons étudier le micro-réseau, sa définition, sa configuration, ses avantages et ses inconvénients.
- Le troisième chapitre sera consacré à la modélisation et la simulation du micro-réseau au complet.

# ***CHAPITRE I***

# ***TECHNOLOGIE PHOTOVOLTAÏQUE***

## **I.1 Introduction**

La limitation des ressources fossiles ainsi que leur impact négatif sur l'environnement d'une part, et la croissance de la demande en énergie d'autre part, font naître un nouveau principe de production d'électricité utilisant des énergies renouvelables tel que l'énergie photovoltaïque, car étant une énergie propre et inépuisable. Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV », a été formé à partir des mots « photo » qui est un mot grec signifiant lumière et « Volta » qui est le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800 [4].

L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie lumineuse des rayons solaires (photon) en électricité. Il utilise pour se faire des modules photovoltaïques composés de cellules. Ces cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), etc. Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature [5]

Dans la plupart des systèmes photovoltaïque, on utilise une technique ou un algorithme particulier nommé « Maximum Power Point Tracking » MPPT qui permet de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique. On trouve aussi dans ces systèmes des convertisseurs (hacheur, onduleur, ...) qui sont utilisés pour charger des batteries de stockage et/ou pour transformer le courant continu en courant alternatif.

L'énergie solaire n'étant pas disponible à tout moment (par exemple la nuit, les jours nuageux) il est donc nécessaire d'équiper les systèmes photovoltaïques par de batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'énergie et de la restituer en temps voulu.

Dans ce chapitre, nous allons présenter des généralités sur les systèmes photovoltaïques. Nous commencerons tout d'abord par des définitions sur l'énergie solaire. Puis, nous détaillerons le principe de fonctionnement d'une cellule, module et panneau photovoltaïques ainsi que leurs constituants. Enfin, nous présenterons l'ensemble des éléments d'une installation photovoltaïque incluant les convertisseurs statiques.

## I.2 Energie solaire

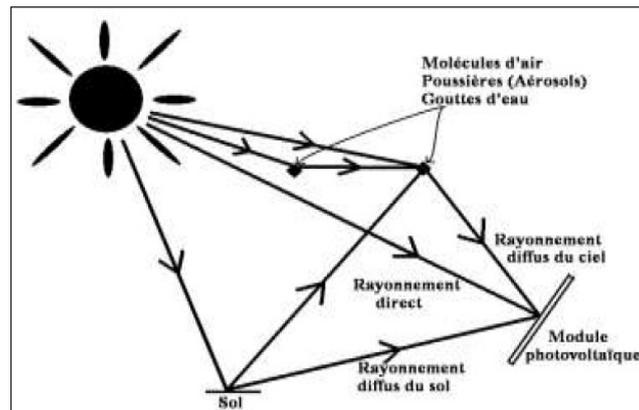
Le soleil est une étoile formé de gaz extrêmement chauds, il est constitué (par la masse), de 75% d'hydrogène, 23% d'hélium et 2% d'autres molécules. Les atomes d'hydrogène sont transformés en hélium par une réaction de fusion thermonucléaire massive. La masse est alors transformée en énergies selon la fameuse formule d'Einstein,  $E=mc^2$ . Cette réaction maintient la surface du soleil à une température approximative de 5800°K. L'énergie du soleil est transformée sous forme de rayonnement dans l'espace de manière uniforme et dans toutes les directions. Lorsqu'elle a parcouru 150 millions de kilomètres du soleil vers la terre, sa densité extraterrestre totale diminue à 1367 W/m<sup>2</sup>. Cette valeur est connue sous le nom de constante solaire. En une heure, la terre reçoit suffisamment d'énergie du soleil ( $1,2 \cdot 10^{17}$  W) pour combler ses besoins pour presque une année. Les panneaux photovoltaïques permettent de profiter de cette énergie gratuite en la transformant en énergie électrique [5] [6].

## I.3 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est une propagation d'ondes de longueur qui varie entre 0.2 et  $4 \cdot 10^{-6}$  [m]. Il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité. Il existe plusieurs types de rayonnement, à savoir [7] :

- **Le rayonnement direct** qui est un rayonnement qui est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ces rayons sont parallèles entre eux. Ils peuvent être mesurés par un pyromètre.
- **Le rayonnement diffus** qui est constitué d'une lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). Sa diffusion engendre un phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet «éclatement» des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.
- **Le rayonnement réfléchi** ou l'albédo du sol qui est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Ce rayonnement réfléchi peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- **Le rayonnement global** qui est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyromètre ou un Solari mètre sans écran. Ainsi :

Rayonnement Globale = rayonnement direct + rayonnement diffus + rayonnement réfléchi.



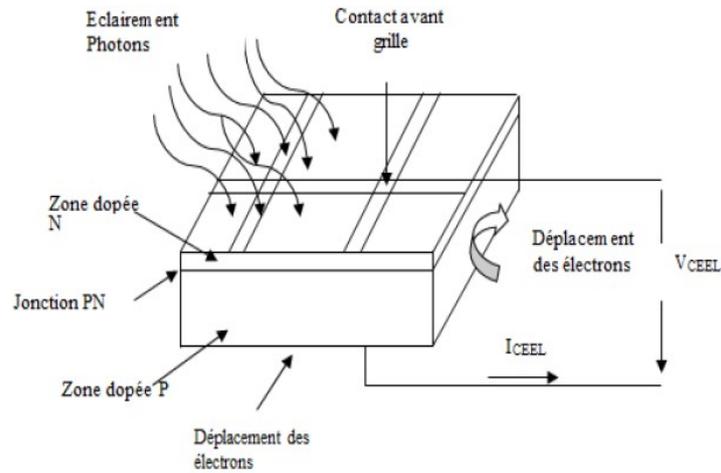
**Figure I.1 :** Composants du rayonnement solaire

#### **I.4 Cellule photovoltaïque**

La cellule photovoltaïque est le plus petit constituant de l'installation photovoltaïque. Elle est généralement constituée de silicium, un matériau semi-conducteur extrait de la silice contenue dans le sable. Son rôle est de transformer l'énergie solaire en électricité de type continu [8].

##### **I.4.1 Principe de fonctionnement**

Une cellule photovoltaïque est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons d'énergie pénétrant dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi des paires «électron-trou». Les électrons (charges négative) et les trous (charges positive), sont alors maintenus séparés par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant ainsi naissance à une différence de potentiel et un courant électrique qui circule (voir figure I.2) [9].



**Figure I.2 :** Principe de conversion photovoltaïque

### I.4.2 Différents types de cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires. Chaque type est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules, à savoir [10] :

- Les cellules au silicium monocristallin : Ces cellules offrent le meilleur rendement parmi les panneaux solaires disponibles dans le commerce : entre 13 à 15%. Il faudra donc moins de cellules pour atteindre la puissance désirée, mais comme le silicium monocristallin est aussi le plus cher, son seul avantage est finalement d'utiliser une surface réduite : il faut environ 7m<sup>2</sup> pour obtenir 1 kilowatt-crête (kWc).
- Les cellules au silicium poly cristallin (ou multi cristallin) : Ces cellules ont en général un rendement compris entre 12 et 14%. Il faut environ 8m<sup>2</sup> de cellules pour obtenir 1kWc. Ces cellules sont plus simples à fabriquer et moins chères que les cellules au silicium monocristallin. Les cellules poly cristallines sont reconnaissables aux formes irrégulières des cristaux qui apparaissent nettement à l'œil nu.
- Les cellules au silicium amorphe : Ces cellules sont à couche mince, c'est-à-dire qu'elles sont fabriquées en déposant une fine couche de silicium sur un support (ou "substrat"), par exemple du verre. L'épaisseur de silicium utilisée est beaucoup plus faible que pour les cellules mono ou poly cristallines qui sont réalisées à partir de tranches de silicium. Ce type de cellule est donc moins cher et plus facile à fabriquer. Sa faible épaisseur permet, par exemple, de les utiliser pour créer des panneaux solaires souples. Cependant ces cellules ont des rendements limités (de l'ordre de 5 à 7%, soit environ 15m<sup>2</sup> pour obtenir 1kWc) et sont donc réservées à des applications nécessitant peu de puissance. Les cellules au silicium

amorphes sont beaucoup utilisées pour l'alimentation de petits appareils solaires (montre, calculatrice...) [11].

### I.4.3 Circuit équivalent et modèle mathématique

Une cellule photovoltaïque (voir figure 3) peut être représentée par un générateur de courant  $I_{ph}$  monté en parallèle avec une diode et deux résistances parasites qui sont également introduites. Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique  $I = f(V)$  de la cellule, à savoir :

- La résistance série  $R_s$  qui est la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles ;
- La résistance shunt  $R_{sh}$  qui est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée [13].

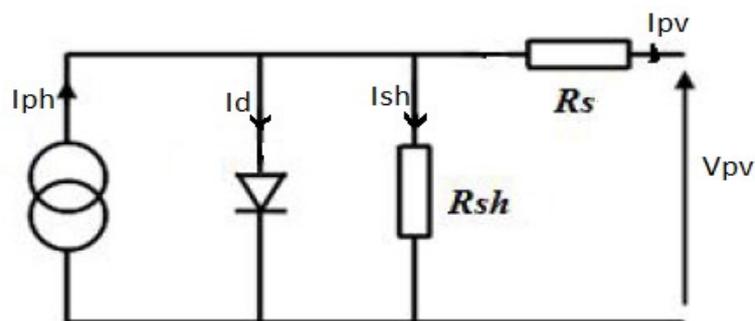


Figure I.3: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Selon la loi de Kirchhoff, le modèle mathématique d'une cellule PV idéale est donné par l'expression suivante [14] :

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

Où :

$$I_{ph} = [I_{cc} + k_i (T_{mod} - T_r)] \frac{G}{G_o} \quad (I.2)$$

$$I_d = I_s (e^{\frac{V_d}{V_{th}}} - 1) \quad (I.3)$$

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} \quad (I.4)$$

Avec :

$$T_{mod} = T_c + T_{ref} + G \left( \frac{NOCT - T_c}{800} \right) \quad (I.5)$$

$$I_s = I_{or} \left( \frac{T_{mod}}{T_r} \right)^3 e^{\frac{q.Eg}{A.k} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_{mod}} \right)} \quad (I.6)$$

$$V_d = V_{pv} + R_s I_{pv} \quad (I.7)$$

$$V_{th} = \frac{A.k.T_{mod}}{q} \quad (I.8)$$

Nous avons ainsi l'expression d' $I_{pv}$  qui sera égale à :

$$I_{pv} = [I_{cc} + k_i (T_{mod} - T_r)] \frac{G}{G_o} - I_s \left( e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_{th}}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (I.9)$$

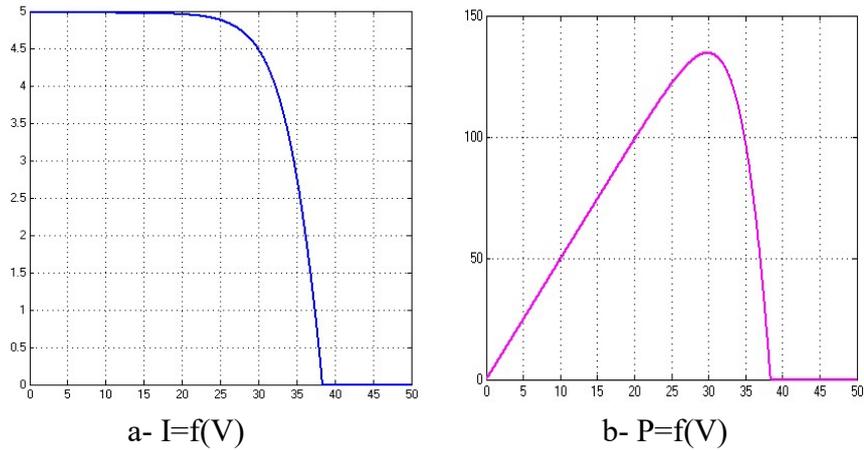
### I.5 Simulation du module photovoltaïque

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles électriquement. Pour valider notre modèle mathématique nous avons réalisé des simulations, dont le module photovoltaïque (**BP 2150S**) a été choisi. Le tableau (I.1) donne les caractéristiques de ce module qui contient 72 cellules monocristallines en série, sous les conditions standards (1000 W/m<sup>2</sup>, masse optique : AM 1.5, Température de la cellule : 25°C) :

Grandeurs	Valeurs
Puissance maximale ( $P_{max}$ )	1 50 W <sub>C</sub>
Tension à $P_{max}$ ( $V_{pm}$ )	34 V
Courant à $P_{max}$ ( $I_{pm}$ )	4.45 A
Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )	4.75A
Tension du circuit ouvert ( $V_{co}$ )	42.8 V
Coefficient de température de $I_{cc}$	+0.065 %/°C
Coefficient de température de $V_{oc}$	-160mV/°C
Coefficient de température de puissance	-0.5 %/°C
NOCT	47°C

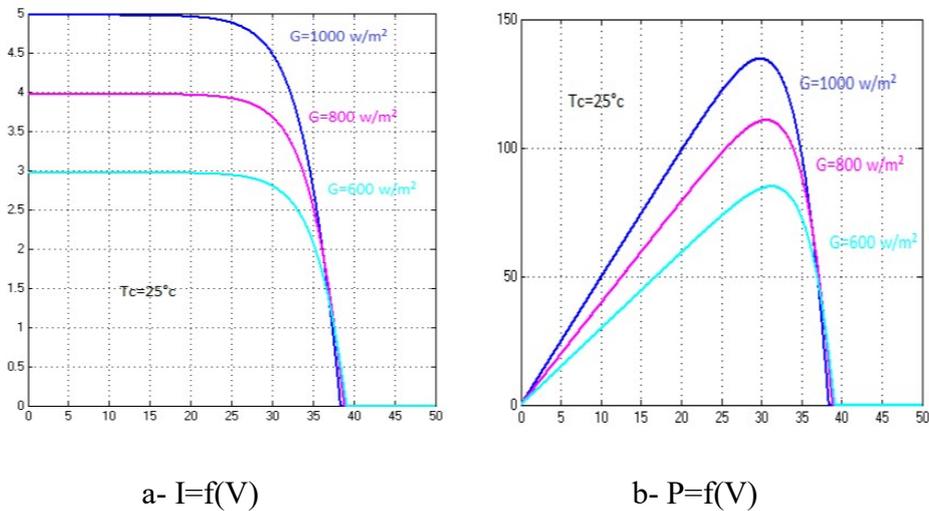
**Tableau I.1** : Caractéristique du module BP 2150S

Pour valider le comportement de notre module qui utilise l'équation (I.9), nous avons fait les simulations en utilisant Matlab-Simulink. Les résultats obtenus sont donnés par les figures suivantes :



**Figure I.4 :** Caractéristique I(V) et P(V) du module PV (BP 2150S)

Ces caractéristiques que nous avons obtenues sont pour une température de 25°C et une irradiance de 1000w/m<sup>2</sup>. Cependant lorsque nous avons une variation de l'irradiance nous avons alors une variation du courant. Ainsi, on remarque que quand l'irradiation augmente, le courant de court-circuit subit une variation importante d'après la figure (I.5-a), par contre la tension varie légèrement. Nous remarquons qu'il y a également une influence sur la puissance lors de la variation de l'irradiation d'après la figure (I.5-b).

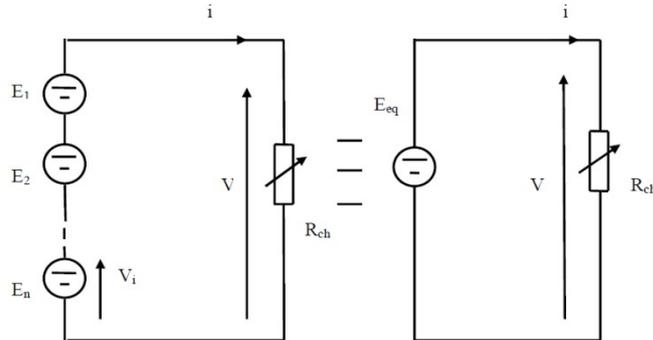


**Figure I.5 :** Caractéristique I(V) et P(V) pour différentes valeur de l'irradiation.

Par contre, si nous avons une variation de la température nous remarquons que d'après la figure (I.6.a) que la température a une grande influence sur la tension du circuit ouvert et une faible influence sur le courant.

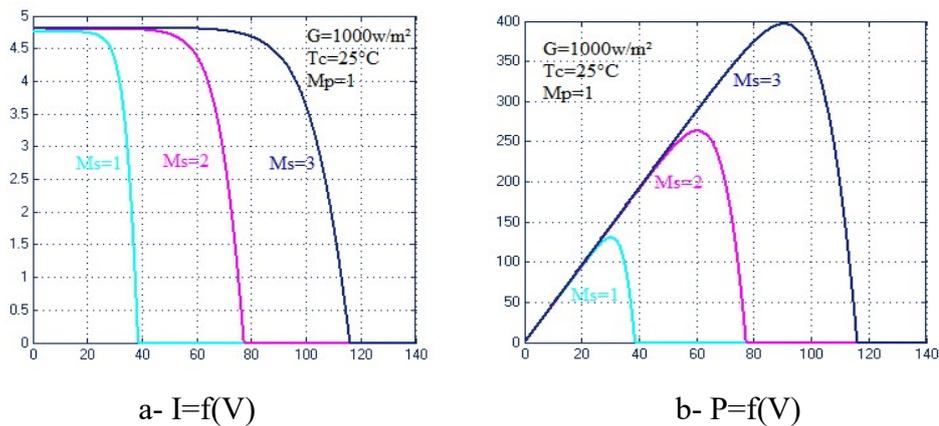


L'association des modules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les modules sont donc traversés par le même courant et la caractéristique résultante du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule.



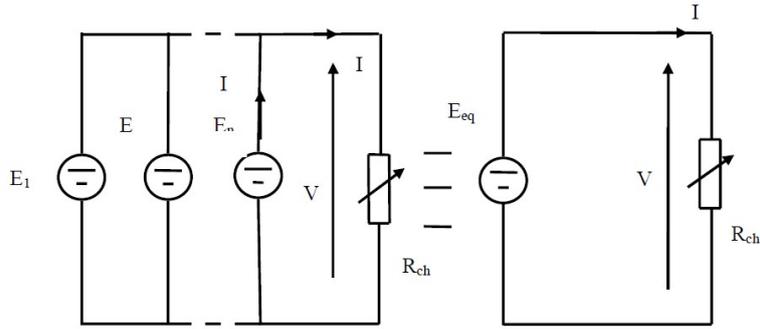
**Figure I.8 :** Association de modules solaires en série [13]

La caractéristique d'un groupement de cellules solaires en série est représentée par la figure suivante :



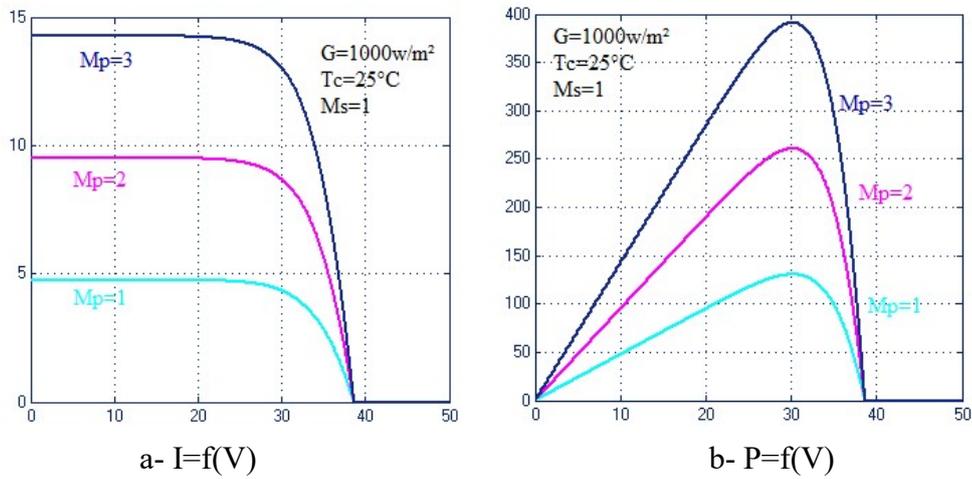
**Figure I.9 :** Caractéristiques I(V) et P(V) résultante de l'association de modules en série

Une association des modules en parallèle est aussi possible et permet d'augmenter le courant de sortie du générateur photovoltaïque. Dans un tel groupement de modules, les modules sont soumis à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants.



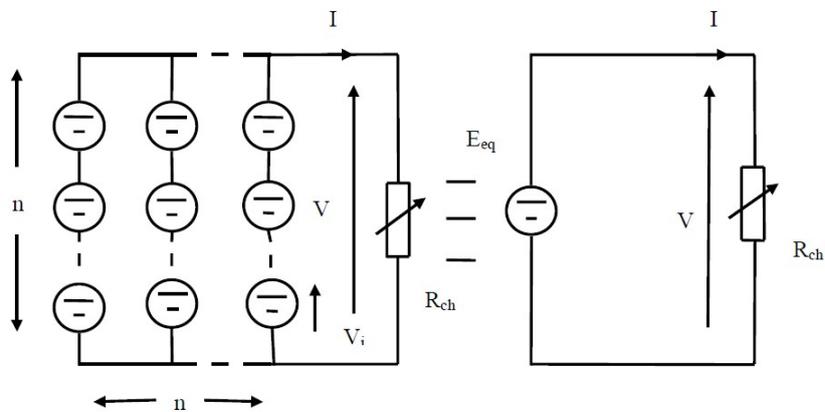
**Figure I.10 :** Association de modules solaires en parallèle [13]

La caractéristique d'un groupement de modules solaires en parallèle est représentée par la figure suivante :



**Figure I.11 :** Caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$  résultantes de l'association de modules en parallèle

Pour avoir un courant et une tension satisfaisant, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle.



**Figure I.12 :** Association mixte de modules solaires [13]

La caractéristique d'un groupement mixte de modules solaires est représentée par la figure suivante :

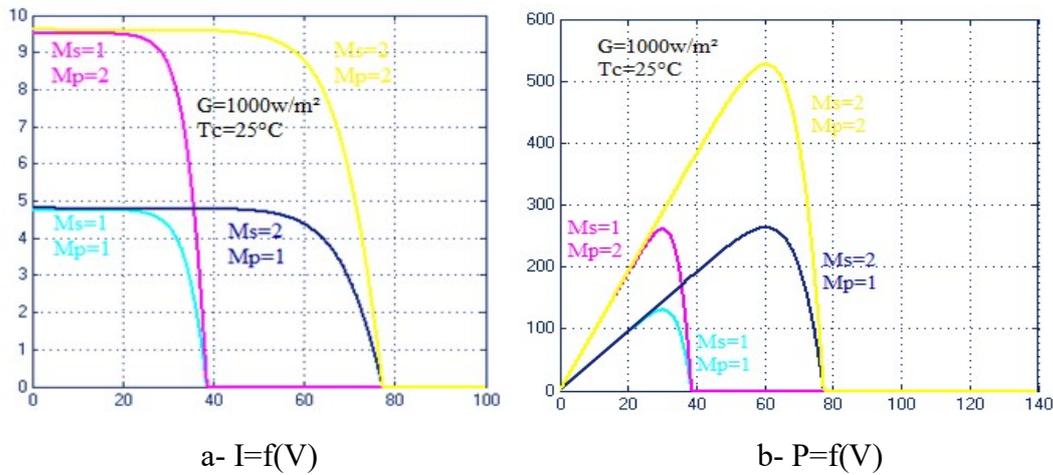


Figure I.13 : Caractéristiques I(V) et P(V) résultante de l'association mixte de modules

### I.6.1 Caractéristiques du panneau solaire

Un panneau solaire est caractérisé par les paramètres fondamentaux suivants :

**I.6.1.1 Tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  :** C'est la tension continue obtenue aux bornes d'un panneau sous un ensoleillement constant sans aucune circulation de courant. [15]

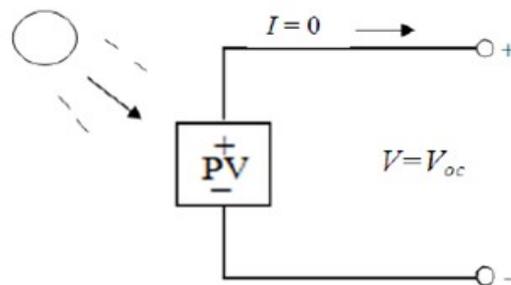


Figure I.14 : Tension de circuit ouvert [15]

**I.6.1.2 Courant de court-circuit  $I_{sc}$  :** À l'opposé, le courant présent lorsqu'il n'y a aucune tension est appelé courant de court-circuit. Il est à noter que dans cette condition aucune puissance n'est extraite du panneau. [15]

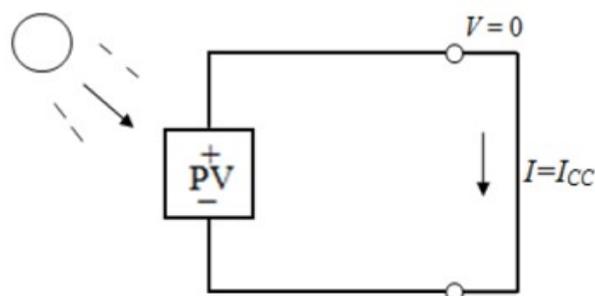


Figure I.15 : Courant de court-circuit [15]

**I.6.1.3 Facteur de forme FF :** C'est le rapport entre la puissance maximale délivrée par le module et la puissance calculée par la multiplication de la tension de circuit-ouvert et le courant de court-circuit.

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} * V_{oc}} \quad (I.10)$$

Ce facteur indique la performance du module, plus il s'approche de l'unité plus le panneau est performant [15].

**I.6.1.4 Rendement  $\eta$  :** Le rendement photovoltaïque est un facteur très important pour les composants photovoltaïques. Il se définit comme étant le taux de conversion d'énergie des cellules PV. Autrement dit, le rendement est le pourcentage de l'énergie solaire qui est convertie en électricité par l'intermédiaire d'une cellule solaire. Il caractérise ses composants et définit leur performance. De plus, Il peut être défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$ [14].

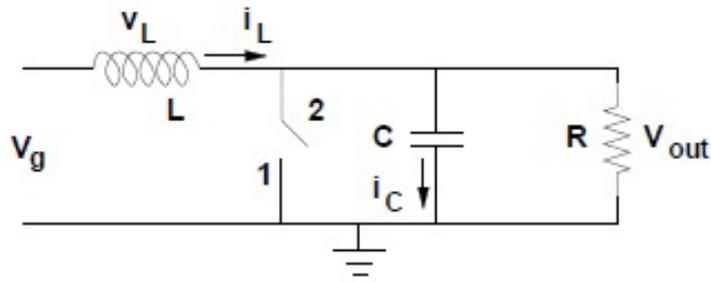
$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \quad (I.11)$$

## ***I.7 Convertisseur***

Il existe plusieurs façon de connecter un panneau solaire, soit via un hacheur si c'est une charge continue, soit via un onduleur si c'est une charge alternative. Pour notre étude, nous nous sommes intéressés à la connexion de notre panneau solaire à un réseau électrique via un hacheur puis un onduleur. Ainsi, commençons par l'étude du hacheur.

### **I.7.1 Hacheur**

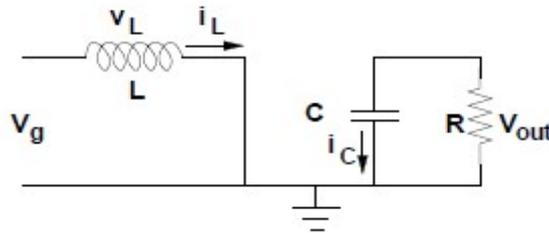
Les hacheurs sont des convertisseurs de type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé [17]. Il existe plusieurs types de convertisseur continu-continu tel que les hacheurs dévolteur, survolteur et mixte. Dans notre mémoire, nous nous sommes fixés d'étudier les hacheurs survolteur, dit aussi boost ou parallèle, qui transforme la tension continue d'une faible valeur à une tension de plus grande valeur [14]. Son schéma de principe de base est celui de la figure (I.16):



**Figure I.16 :** Schéma de principe d'un convertisseur survolteur

Ce convertisseur peut être représenté selon les temps de commutation, ainsi :

Pour un (DT) de commutation, le transistor est fermé (position 1), voir figure I.17, le courant dans l'inductance croît progressivement, et au fur et à mesure l'inductance emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période.



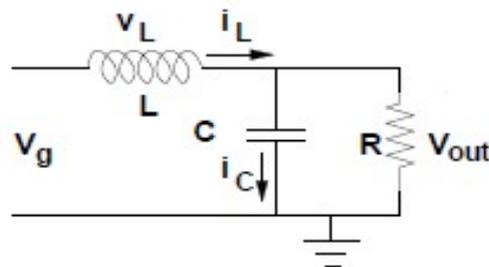
**Figure I.17 :** Hacheur survolteur en position 1

Ainsi, la tension aux bornes de l'inductance et le courant qui traverse le condensateur sont définis comme suite:

$$v_L = V_g \tag{I.12}$$

$$i_c = -i_{out} = -\frac{V_{out}}{R} \tag{I.13}$$

Ensuite, le transistor s'ouvre (position 2), voir figure I.18, et l'inductance se trouve alors en série avec le générateur. Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge R. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité.



**Figure I.18 :** Hacheur survolteur position 2

Ce qui nous donne les expressions :

$$v_L = V_g - v_{out} \quad (\text{I.14})$$

$$i_c = i_L - i_{out} = i_L - \frac{V_{out}}{R} \quad (\text{I.15})$$

Dans un convertisseur bien conçu à l'état stable, il ne devrait pas y avoir d'ondulation de courant ou de tension pendant la période de commutation. Par conséquent, nous supposons que l'ondulation de commutation est beaucoup plus petite que les composantes continues du courant et de la tension. Cela signifie que le courant et la tension sont les mêmes au début et à la fin d'une période de commutation. Ceci nous mène aux expressions suivantes :

$$\int_0^{T_s} v_L dt = 0 \quad (\text{I.16})$$

$$\int_0^{T_s} i_c dt = 0 \quad (\text{I.17})$$

Ainsi, d'après l'équation :  $\int_0^{T_s} i_c dt = 0$

On peut déterminer le courant aux bornes de l'inductance comme suite :

$$\int_0^{T_s} i_c dt = 0$$

$$\int_0^{DT_s} \frac{-V_{out}}{R} dt + \int_{DT_s}^{T_s} \left( I_L - \frac{V_{out}}{R} \right) dt = 0$$

$$- \frac{V_{out}}{R} D + \left( I_L - \frac{V_{out}}{R} \right) (1 - D) = 0$$

$$I_L = \frac{V_{out}}{R} \frac{1}{1-D} \quad (\text{I.18})$$

✓ et d'après l'équation :  $\int_0^{T_s} v_L dt = 0$

On peut déterminer le rapport cyclique comme suite :

$$\int_0^{T_s} v_L dt = 0$$

$$\int_0^{DT_s} V_g dt + (V_g - V_{out}) dt = 0$$

$$V_g D + (V_g - V_{out})(1 - D) = 0$$

$$D = 1 - \frac{V_g}{V_{out}} \quad (\text{I.19})$$

Cependant, afin que le hacheur fonctionne correctement il est nécessaire de bien le dimensionner. Ainsi, nous allons maintenant montrer comment calculer les éléments constituant d'un hacheur à savoir l'inductance et la capacité.

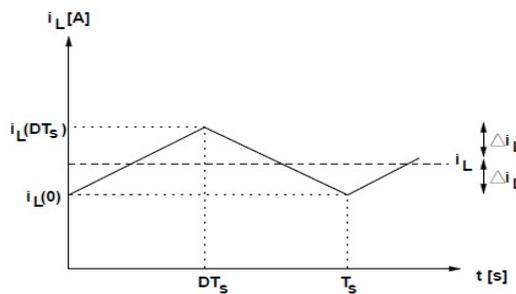
**Concernant l'inductance L :** Lorsque le MOSFET est en position 1, selon la figure I.17, nous avons  $v_L = V_g$

Sachant que :

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \quad (\text{I.20})$$

$$\text{Nous avons alors : } V_g = L \frac{di_L(t)}{dt} \rightarrow \frac{V_g}{L} = \frac{di_L(t)}{dt}$$

Sachant que l'ondulation du courant au niveau de l'inductance peut être représentée par la figure suivante :



**Figure I.19 :** Ondulation du courant de l'inductance

Nous avons ainsi d'après cette figure :

$$\int_{-\Delta i_L}^{\Delta i_L} di_L = \int_0^{DT_s} V_g \frac{1}{L} dt$$

Après un calcul simple nous obtenons :

$$L = \frac{V_g}{2\Delta i_L} DT_s \quad (\text{I.21})$$

**Concernant maintenant la capacité C :** par définition, le courant passant par celle-ci est égal à :  $i_c = C \frac{dv_C(t)}{dt}$  (I.22)

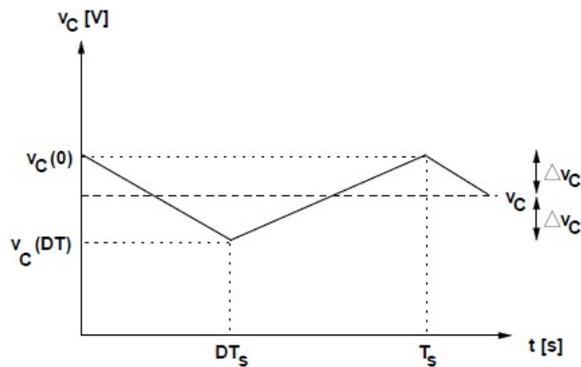
Lorsque le MOSFET est en position 1, voir figure I.17,

On a:

$$i_c = -i_{out} = \frac{V_{out}}{R}$$

Ce qui nous donne après développement :  $-\frac{V_{out}}{R} = C \frac{dv_C(t)}{dt} \rightarrow \frac{V_{out}}{RC} = \frac{dv_C(t)}{dt}$

Sachant que l'ondulation de la tension au niveau de la capacité peut être représentée par la figure suivante :



**Figure I.20** : Ondulation de la tension aux bornes de la capacité

Nous avons ainsi d'après cette figure :

$$\int_{\Delta V_C}^{-\Delta V_C} dV_L = \int_0^{DT_s} \frac{-V_{out}}{RC} dt$$

Après un calcul simple nous obtenons :

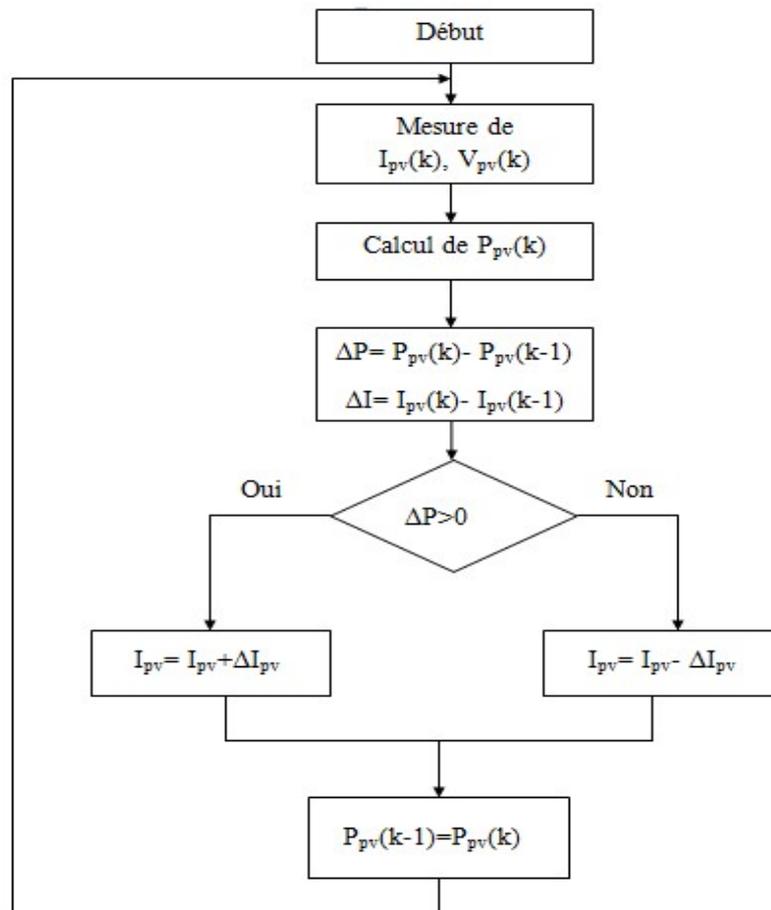
$$C = \frac{V_{out}}{2R\Delta V_C} DT_s \tag{I.23}$$

Une application numérique pour le calcul des valeurs de L et C sont donné en annexe A.

### ✓ Recherche du point de fonctionnement optimal

Le convertisseur continu-continu que nous avons dimensionné dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui permet de rechercher le point de fonctionnement optimal que peut fournir un panneau solaire. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'algorithme choisi. Pour notre étude, nous avons choisi l'algorithme perturbation et observation (P&O). Comme son nom l'indique, cette méthode se base sur la perturbation de la tension  $V_{pv}$  et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du panneau photovoltaïque. Elle est

généralement la plus utilisée, en raison de sa simplicité cotée théorique et coté implémentation. L'algorithme qui décrit le fonctionnement de la méthode P&O est illustré par la figure suivante :

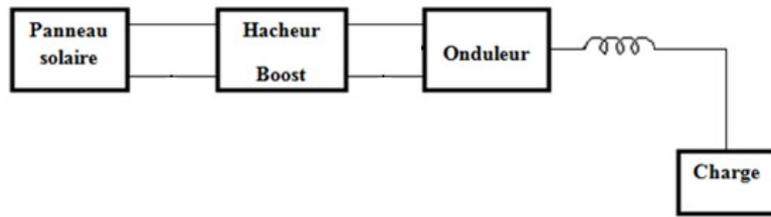


**Figure I.21** : Organigramme de la méthode P&O

Cet algorithme se base sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension du panneau solaire, en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur continu-continu, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie. En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant  $k$ , puis on la compare à la précédente ( $k-1$ ). Si la puissance augmente, on s'approche du point maximum de puissance et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Par contre, si la puissance diminue, on s'éloigne du point maximum de puissance. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique [18].

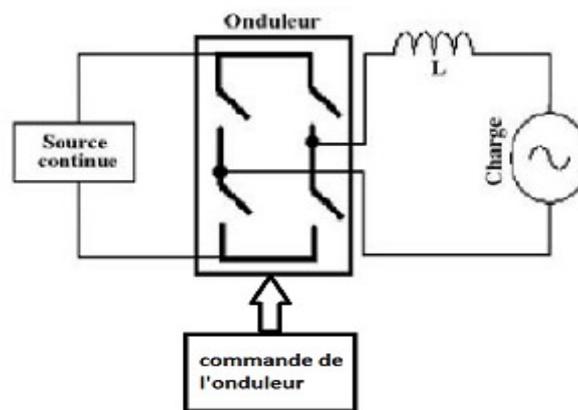
Nous avons traduit l'algorithme de la MPPT à l'aide de l'outil Matlab/Simulink de la manière suivante :





**Figure I.24 :** Structure d'un système photovoltaïque couplé à la charge.

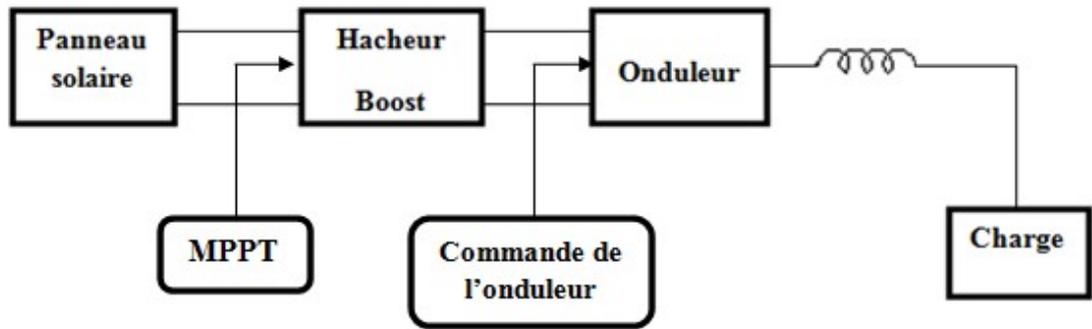
Nous allons dans cette partie nous intéresser à l'onduleur. L'onduleur, est un dispositif permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue. On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels. Les onduleurs sont des structures en pont constitués le plus souvent d'interrupteurs de type IGBT. Le schéma de base d'un onduleur monophasé est représenté dans la figure suivante :



**Figure I.25 :** Montage de base d'un onduleur photovoltaïque

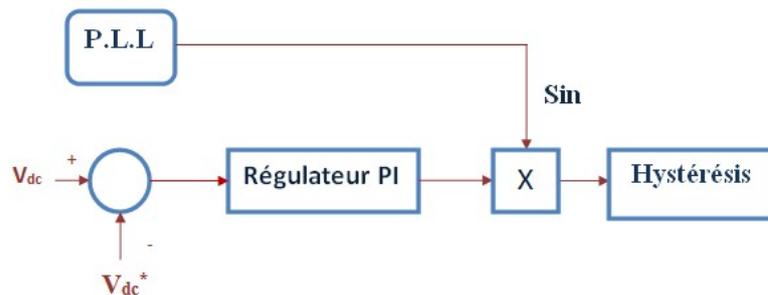
L'objectif de la commande est de générer les ondes d'ouverture et fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Il existe deux façons de commander un onduleur lorsqu'il est connecté à un hacheur :

La première est celle montrée dans la figure suivante :



**Figure I.26 :** Structure de la première commande

Dans ce système, la commande du hacheur est indépendante de celle de l'onduleur. La MPPT reçoit les informations essentielles directement de la sortie du panneau solaire pour chercher le point de fonctionnement optimal. Concernant l'onduleur la commande utilisée est donnée par la figure suivante :



**Figure I.27 :** Composants de la commande d'un onduleur

La deuxième structure est une simplification de la première. Elle est développée par Tatsuya Kitano et Mikihiro Matsui [26] qui ont fait une liaison entre la commande de l'onduleur et celle de la MPPT comme le montre la figure I.28. Contrairement à la première méthode, La MPPT reçoit les informations essentielles de la commande de l'onduleur et non pas du panneau solaire, comme le montre la figure I.29. Cela est possible car si nous traçons la courbe de la puissance en fonction du rapport cyclique  $D$  et nous traçons le courant obtenu par la commande de l'onduleur en fonction du rapport cyclique  $D$  comme le montre la figure I.31 nous remarquons que le maximum de puissance peut être déterminé de la même façon et que le courant n'est que l'image de la puissance.

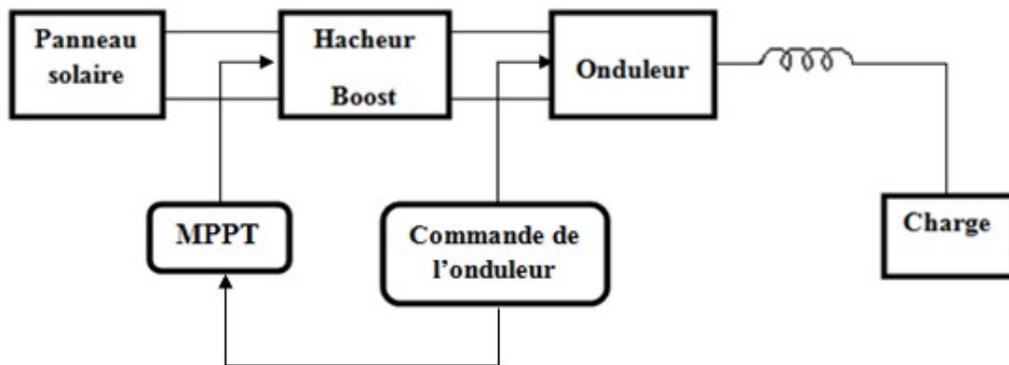


Figure I.28 : Structure de la deuxième commande

La figure suivante représente la commande détaillée de l'onduleur. Elle est composée d'une PLL, d'un régulateur et d'une hystérésis.

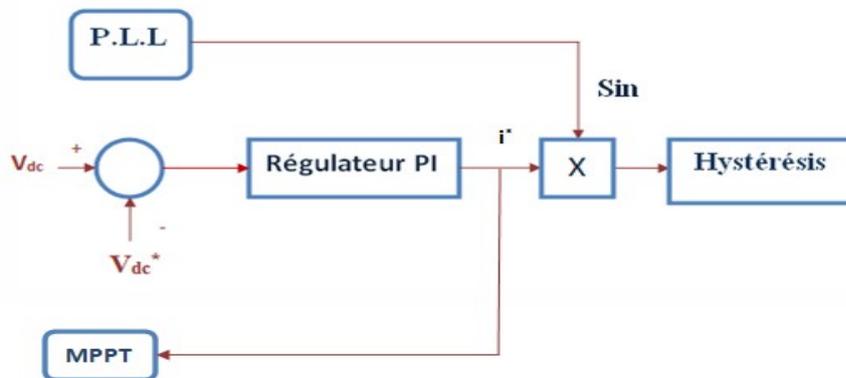


Figure I.29 : Commande d'un onduleur et du hacheur en même temps

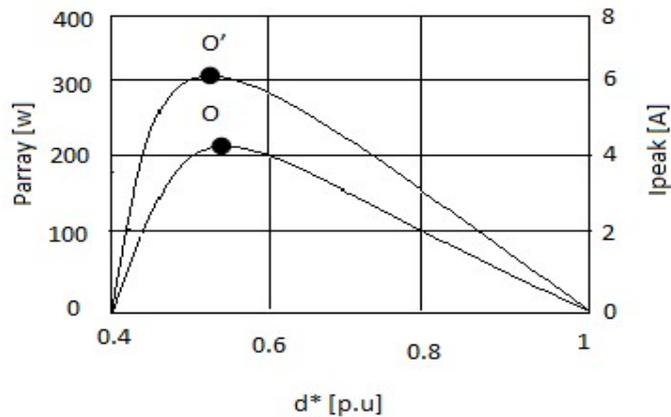
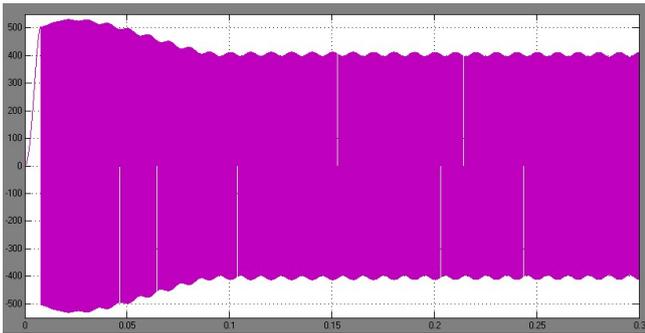
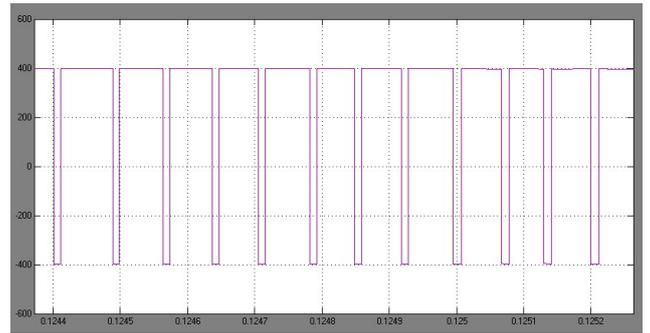


Figure I.30 :  $P_{array}$  et  $I_{peak}$  en fonction de  $d^*$

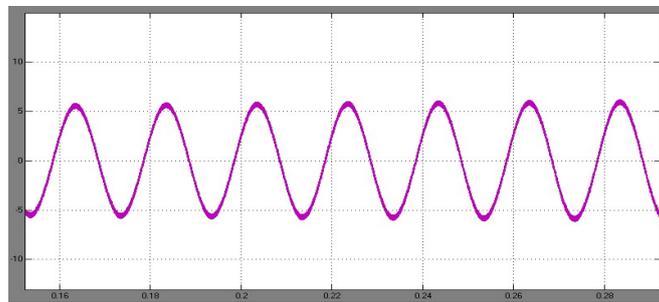
Les résultats ci-dessous sont obtenus par une simulation sous Matlab-sympower system :



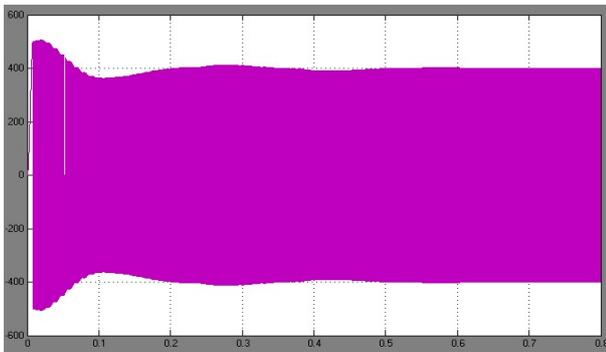
**Figure I.31 :** Tension de sortie de l'onduleur pour la première commande



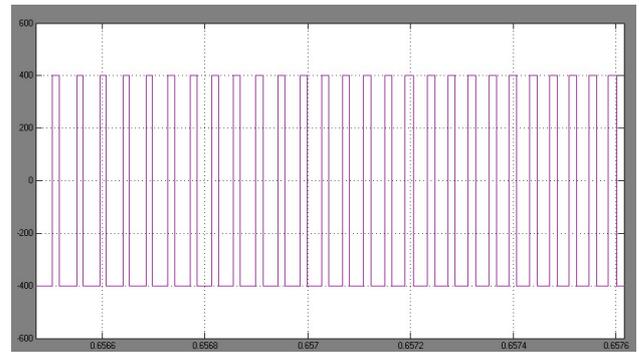
**Figure I.32 :** Zoom sur la tension de sortie pour la première commande



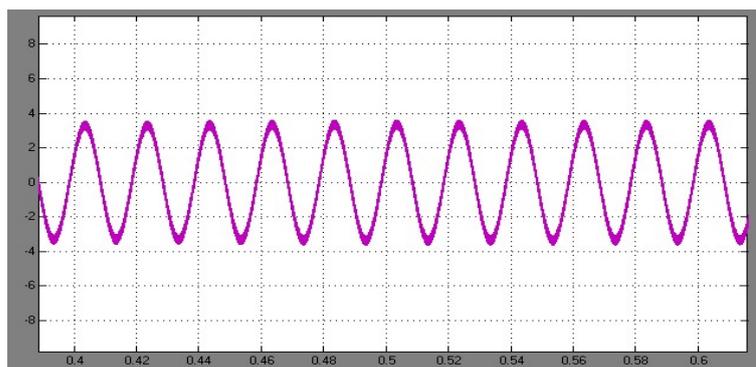
**Figure I.33 :** Courant de sortie de l'onduleur pour la première commande



**Figure I.34 :** Tension de sortie de l'onduleur pour la deuxième commande



**Figure I.35 :** Zoom sur la tension de sortie pour la deuxième commande



**Figure I.36:** courant de sortie de l'onduleur pour la deuxième commande

D'après ces résultats, on observe que la tension de sortie souhaitée se stabilise à 400 V après un régime transitoire.

### **I.8 Conclusion**

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons détaillé le monde de la conversion photovoltaïque qui connaît depuis quelques années une évolution profonde. Dans ce contexte, nous avons étudié le principe de la cellule, du module et du panneau photovoltaïque. Nous avons aussi fait la modélisation du module photovoltaïque à une diode et nous avons étudié les effets des différents changements climatiques sur les caractéristiques de la cellule photovoltaïque. Dans la deuxième partie, nous avons présenté les caractéristiques électriques des convertisseurs statiques (hacheur, onduleur) ainsi que le principe de la commande MPPT. Nous avons choisi l'algorithme MPPT de type P&O (perturbe & Observe). Pour la simulation, nous avons obtenu des résultats satisfaisants.

## ***CHAPITRE II***

### ***ETUDE DU MICRO RESEAU***

## II.1 INTRODUCTION

En raison de plusieurs problèmes que rencontrent les réseaux électriques actuels (l'augmentation de la consommation, la raréfaction du pétrole, le réchauffement climatique ainsi que la pollution environnementale, la faible efficacité énergétique, etc), une nouvelle tendance de la production a été développée, appelée la production décentralisée. Cette production utilise des sources d'énergie renouvelable (non conventionnelle) comme le biogaz, les cellules photovoltaïques, les fermes éoliennes ... qui sont considérées comme des énergies propres, c'est à dire que l'émission de CO<sub>2</sub> de ces moyens de production est quasiment nulle. Malheureusement, l'utilisation de la production décentralisée peut amener autant de problèmes qu'elle peut en résoudre. Une meilleure façon d'utiliser le potentiel énergétique de la production distribuée est d'adopter une approche permettant le contrôle local des générateurs, mais aussi des consommateurs dans un sous-réseau. Ces sous-réseaux peuvent être dénommés micro-réseau ou microgrid.

Fondamentalement, un micro-réseau est défini comme étant une partie d'un réseau électrique intelligent ou smart grid. Ce micro-réseau inclut des consommateurs, des micro-sources à base d'énergie renouvelable ainsi que des systèmes de stockage locaux. Ils peuvent être exploités en étant connectés ou sans aucun apport par d'autres réseaux. Le développement de micro-réseaux est très prometteur pour l'industrie de l'énergie électrique en raison de plusieurs avantages tels que la réduction du réchauffement climatique et de la pollution environnementale, l'amélioration de la fiabilité, de la qualité et de la puissance, la réduction des pertes et par conséquent l'augmentation du rendement...

Dans ce chapitre, nous allons présenter le micro-réseau. Premièrement, nous donnerons une définition de celui-ci ainsi que ses avantages et ses inconvénients. Puis, nous détaillerons le micro-réseau et nous ferons le dimensionnement des panneaux solaires.

## II.2 Qu'est-ce qu'un micro-réseau ou microgrid ?

Un micro-réseau est un réseau électrique de petite taille destiné à alimenter un petit nombre de consommateurs (quartier, zone industrielle ou artisanales, village, etc). Il est constitué de multiples charges interconnectées, des installations de production décentralisées qui sont généralement à base de ressources énergétiques renouvelables, des installations de stockage ainsi que des outils de supervision et de gestion de la demande. Il peut être raccordé au réseau principal comme il peut fonctionner seul. La capacité d'intégrer différents types de

générateur et de ressources d'énergie distribuées comme l'énergie renouvelable, des systèmes de stockage et des micro-turbines améliore la fiabilité et l'efficacité de l'ensemble du système.

Le principal objectif du développement des réseaux électriques est d'atteindre l'équilibre entre la production et la consommation en intégrant des systèmes de control et de stockage qui permettent de rendre le système plus stable.

De plus, les micro-réseaux sont bénéfiques pour répondre localement aux besoins électriques des clients. Ils peuvent fournir une alimentation de secours, améliorer la fiabilité locale, réduire les pertes d'alimentation et fournir un soutien à la tension locale. Du point de vue de l'environnement, les micro-réseaux permettent de réduire la pollution de l'environnement et le réchauffement climatique grâce à l'utilisation des technologies à faible émission de carbone.

### **II.3 Avantages et inconvénients des micro-réseaux:**

Parmi les avantages et inconvénients que nous pouvons rencontrer, nous avons :

#### **Avantages :**

- Isolation de toute perturbation ou panne du réseau électrique ;
- Amélioration de l'efficacité énergétique ;
- Réduction des émissions de gaz qui peut aider à lutter contre le réchauffement climatique ;
- Réduction de la distance physique et électrique entre les micro-sources et les charges ce qui contribue à la réduction des pertes ;
- Atteindre l'équilibre offre-demande ;
- Amélioration de la puissance et de la fiabilité ;
- Faire face à la pollution environnementale.

#### **Inconvénients :**

- Coûts élevés des installations ainsi que des ressources énergétiques décentralisées ;
- Difficultés techniques liés au manque d'expérience technique ;
- Absence de normes : puisque c'est un domaine relativement nouveau, les normes ne sont pas encore disponibles pour résoudre les problèmes de fonctionnement et de protection ;

- Absence de lois ou règlement standard pour réguler le fonctionnement des micro-réseaux.

#### **II.4 Configuration d'un micro-réseau :**

Les micro-réseaux peuvent être définis comme des sous réseaux de basse tension incluant des consommateurs, des générateurs décentralisés et des systèmes de stockage locaux. Les micro-réseaux sont destinés à alimenter des charges électriques pour une petite communauté tel que les cités universitaire, les sites industriels et commerciaux, les villages, etc. Les générateurs ou micro-source employés dans un micro-réseau sont généralement renouvelables. Ils englobent un large éventail de technologies telles que : les panneaux photovoltaïques, la biomasse ou encore l'énergie éolienne.

L'énergie solaire n'étant pas disponible à tout moment (par exemple la nuit, les jours nuageux) il est donc nécessaire d'équiper notre réseau par des batteries d'accumulateurs pour stocker l'énergie en surplus. Les micro-réseaux peuvent fonctionner en deux modes : autonome et raccordé au réseau.

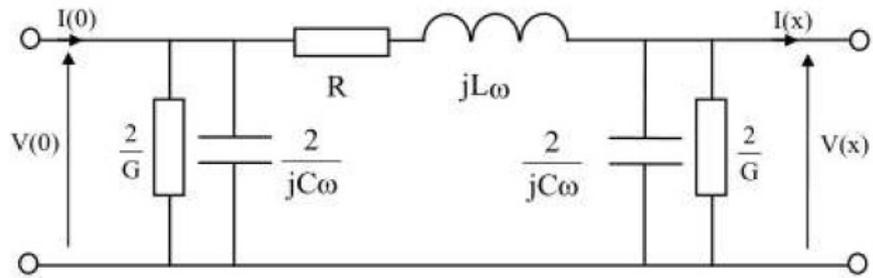
- En mode autonome, ils apparaissent comme une solution pour alimenter en énergie électrique les sites isolés.
- En mode raccordé au réseau, ils sont normalement connectés au réseau principal de distribution, mais sont capables de s'isoler de ce dernier en cas de perturbation dans le réseau principal.

#### **II.5 Représentation des composants du système :**

Dans notre étude, nous considérons un réseau comportant plusieurs éléments qui sont principalement les panneaux solaires, les lignes de transports et les transformateurs. Dans cette partie, nous allons présenter les lignes ainsi que les transformateurs vu que les panneaux solaires ont été présentés dans le chapitre précédent.

##### **II.5.1 Modèle équivalent de la ligne :**

Les câbles bas tension sont en général représentés par un circuit en  $\pi$

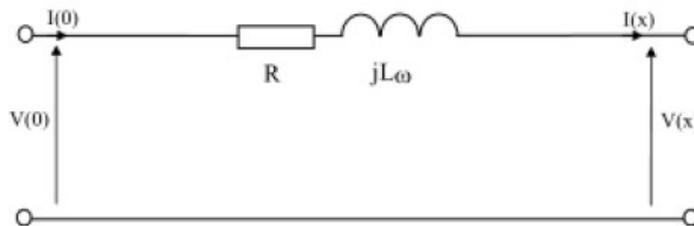


**Figure II.1** : Schéma d'une ligne en modèle  $\pi$

Avec :

$R$ ,  $L$ ,  $C$  et  $G$  étant les caractéristiques physiques des câbles électriques.

En Basse-Tension, il n'est pas nécessaire dans les modèles de ligne de tenir compte de la capacité linéique et des pertes diélectriques (Faible niveau de tension, faible champ électrique et faible contrainte diélectrique), nous pouvons simplifier le schéma précédent et aboutir au modèle classique des lignes basse tension :



**Figure II.2** : Schéma simplifié d'une ligne en modèle  $\pi$

Avec :

$R$ ,  $L$  les caractéristiques physiques des câbles électriques BT.

### **II.5.2 Transformateur :**

Le transformateur est basé sur le phénomène de l'induction électromagnétique. Il transforme des signaux de tension et de courant de fréquence donnée en signaux de même fréquence mais de valeurs efficaces différentes. L'une des particularités du transformateur est qu'il a un rendement très élevé, souvent proche de 100%. Dans les gros transformateurs, on a moins de 1% de pertes. Le transformateur joue un rôle important dans le transport et la distribution de l'énergie électrique. Il permet à l'énergie électrique d'être transportée sur de longues distances de façon économique, pour être distribuée dans les industries et les habitations.

### II.5.2.1 Couplage :

Les transformateurs sont couplés soit en triangle (D ou d), soit en étoile (Y ou y). La première lettre de l'indice de couplage est toujours en majuscule et indique le système triphasé de tension la plus élevée ; la deuxième lettre est en minuscule et indique le système de tension la plus basse.

Dans le système étoile, le neutre (point central de l'étoile) peut être sorti sur la plaque à bornes du transformateur : ceci est indiqué par la présence de la lettre N (ou n) dans l'indice de couplage. Il existe également le couplage zigzag (z), utilisé majoritairement au secondaire, il possède un neutre. Ce couplage permet, lors d'une perte d'une phase au primaire, d'avoir au secondaire une tension pratiquement identique sur les trois phases.

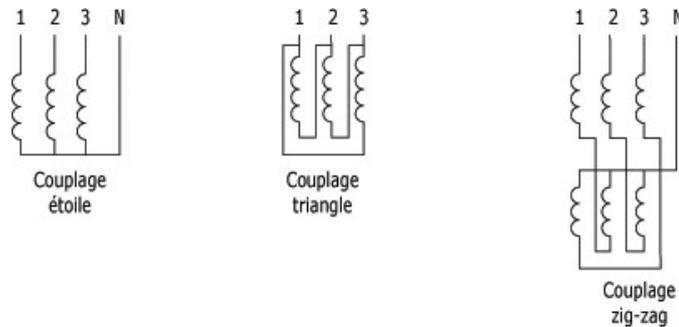


Figure II .3 : Couplage d'un transformateur

Enfin, l'indice de couplage est complété par un indice horaire qui donne, par pas de  $30^\circ$ , le déphasage horaire en  $12^{\text{ièmes}}$  de tour (comme sur une montre) entre le primaire et le secondaire du transformateur.

### II.5.2.2 Choix du couplage :

Le couplage étoile-étoile (Yy) est surtout utilisé pour les transformateurs de très haute tension, car il permet de réduire la tension aux bornes des enroulements d'un facteur  $\sqrt{3}$  et donc de réduire d'autant l'isolation.

Le couplage étoile-triangle (Yd) est utilisé pour connecter les générateurs de centrales électriques et de machines industrielles. Le courant traversant les bobines est réduit d'un facteur  $\sqrt{3}$ , ce qui est intéressant dans ces applications où le courant est particulièrement fort.

Dans les réseaux de distribution électrique, un couplage étoile au primaire et zigzag au secondaire (Yz) est le plus courant, car le couplage zigzag permet de réduire le déséquilibre de tensions entre phases. Il est très utile de lutter contre le phénomène du déséquilibre car les

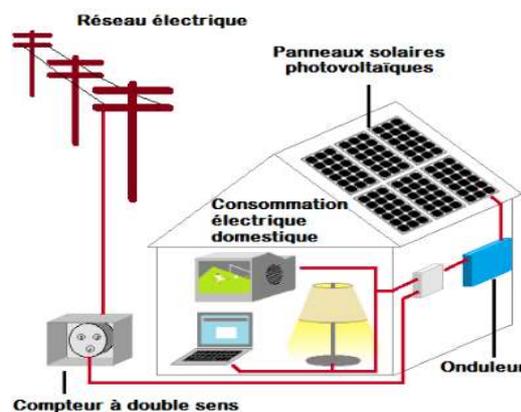
particuliers étant connectés en monophasé, la charge n'est pas toujours bien répartie entre les phases.

Puisque on a des panneaux solaires raccordés aux réseaux MT/BT et qui sont considérés comme des génératrices, donc on doit choisir le couplage triangle-étoile avec neutre car il alimente des charges monophasées.

## II.6 Description du micro-réseau étudié :

Le micro-réseau que nous allons étudier est destiné à alimenter un quartier constitué de vingt et une maisons répartis dans trois rues. Ce système photovoltaïque connecté au réseau est associé à l'habitat individuel et a pour mission de produire une énergie équivalente à celle consommée sur place. Le réseau jouera le rôle de sources supplémentaires et restituera de l'énergie la nuit, vu que l'énergie solaire n'est plus disponible et que nous n'utilisons pas de batteries pour emmagasiner le jour l'énergie.

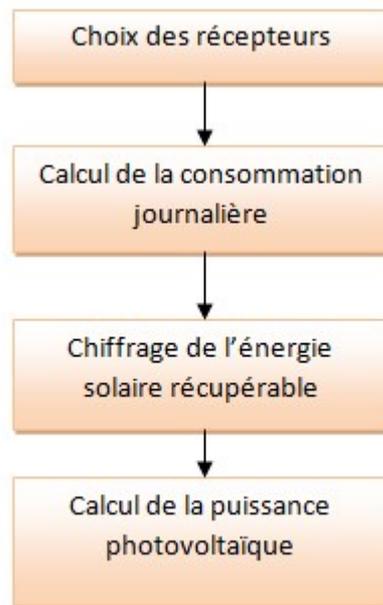
L'énorme avantage de cette solution (raccordement au réseau principale) est l'absence de batteries. Nous ne stockons plus l'énergie excédentaire mais nous l'injections directement dans le réseau principal, si nécessaire. Il y aura donc un compteur qui tourne dans un sens pour la consommation, et un autre dans l'autre sens pour la production. Il faudra tout de même convertir le courant continu des panneaux en courant alternatif au travers d'un onduleur.



**Figure II.4 :** Charge connectée à un micro- réseau étudié

La situation géographique stratégique de l'Algérie lui permet de favoriser le développement et l'utilisation des énergies solaires, vu l'importance de l'intensité du rayonnement solaire reçu et de la durée d'ensoleillement annuelle. Pour cela, il est évident que le photovoltaïque est bien adapté dans notre cas.

Pour faire l'étude du réseau proposé, nous avons suivi l'organigramme suivant :



**Figure II.5 :** Diagramme simplifié du dimensionnement d'un système photovoltaïque

## **II.7 Dimensionnement de l'installation photovoltaïque :**

Le Dimensionner, c'est fixer la taille, les caractéristiques optimales de chaque élément d'un système dont on connaît la configuration. La méthode de dimensionnement pour notre système consiste à déterminer la puissance crête que fournit l'énergie électrique nécessaire pendant le mois le moins ensoleillé (généralement décembre). Cette étape comporte peu de calculs, mais demande relativement beaucoup de réflexion car une erreur à ce stade faussera vos résultats jusqu'à la fin.

### **II.7.1 Choix des récepteurs :**

Comme nous l'avons dit précédemment, chaque maison est alimentée par ses propres panneaux, d'où la nécessité de connaître leur nombre pour savoir les besoins énergétiques de ces maisons. Pour cela, nous avons fait des courbes prévisionnelles de la consommation journalière. Ainsi :

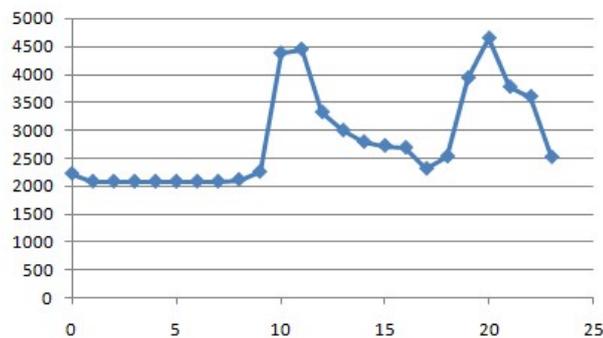
### II.7.1.1 Pour la première maison :

Nous considérons une maison individuelle de 180m<sup>2</sup> composée de quatre chambres, et occupée en permanence durant toute l'année. Elle est occupée par six personnes et contient les équipements domestiques fonctionnant sous une tension standard 220V-50Hz. Ces équipements sont indiqués dans le tableau suivant :

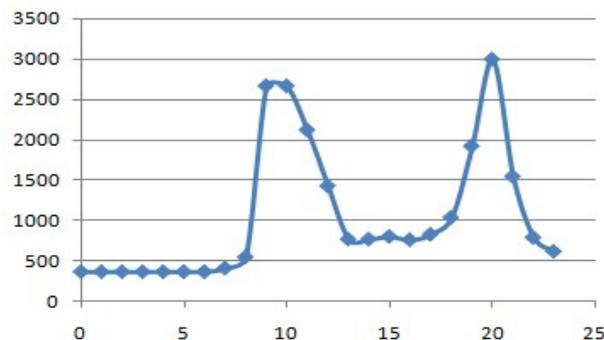
Eléments	Puissance (w)
11 lampes	11 chacune
Réfrigérateur	150
Congélateur	214
2 Télévisions	140 chacun
Machine à laver	2300
2 Climatiseurs	860 chacun
Ordinateur bureau	1360
Ordinateur portable	68
Micro-ondes	800
Mixeur, batteur	200
Fer à repasser	1830

**Tableau II.1 :** Equipements de la première maison et leurs puissances

D'après ce tableau, nous avons fait une prévision de la consommation journalière pour deux saisons, l'été et l'hiver. Cela est représenté dans les figures ci-dessous.



**Figure II.6 :** Consommation journalière de la première maison pendant l'été.



**Figure II.7 :** Consommation journalière de la première maison pendant l'hiver.

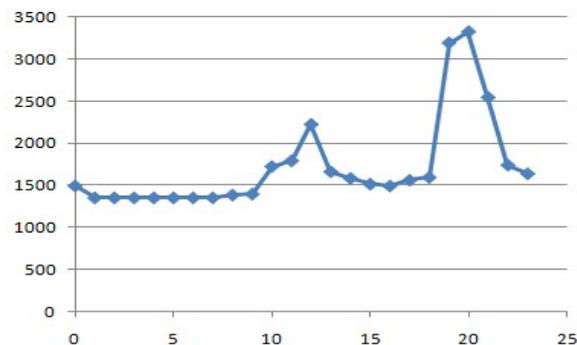
### II.7.1.2 Pour la deuxième maison :

La deuxième maison a une superficie de 100m<sup>2</sup>. Elle est composée de trois chambres et occupée par 3 personnes. Les éléments constitutifs de ce foyer sont indiqués dans le tableau suivant :

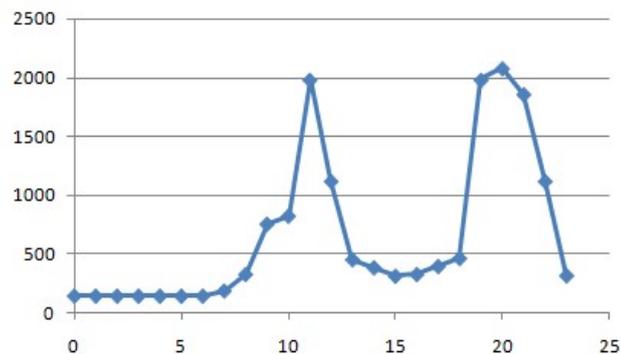
Eléments	Puissance (w)
7 lampes	11 chacune
Réfrigérateur	150
Télévision	140
Machine à laver	370
Climatiseur	1210
2 Ordinateurs portables	68 chacun
Micro-ondes	800
Friteuse	1800
Fer à repasser	1830

**Tableau II.2 :** Equipements de la deuxième maison et leurs puissances

D'après ce tableau, nous avons fait une prévision de la consommation journalière pour deux saisons, l'été et l'hiver. Cela est représenté dans les figures ci-dessous.



**Figure II.8 :** Consommation journalière de la deuxième maison pendant l'été



**Figure II.9 :** Consommation journalière de la deuxième maison pendant l'hiver

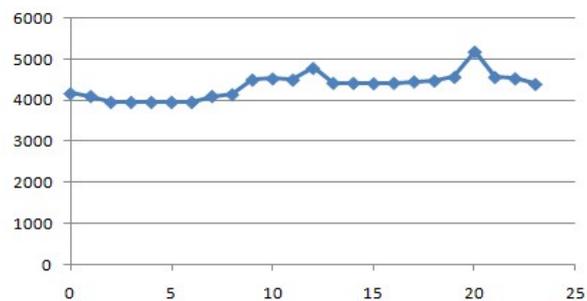
### II.7.1.3 Pour la troisième maison :

Cette maison a une superficie de 220m<sup>2</sup>. Elle est composée de deux étages. Le premier contient quatre chambres tandis que le deuxième contient trois. Les éléments constitutifs de ce foyer qui est occupé par huit personnes sont indiqués dans le tableau suivant :

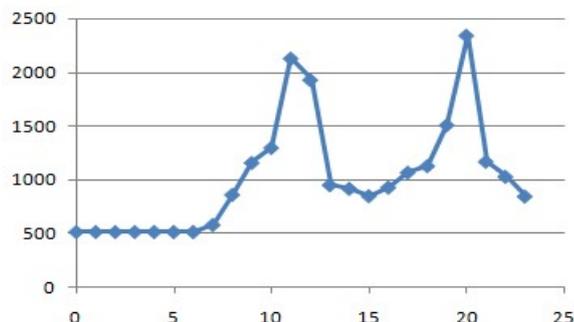
éléments	Puissance (w)
14 lampes	11 chacune
2 Réfrigérateurs	150 chacun
congélateur	214
3 Télévisions	145 chacun
2 Machines à laver	370 chacune
4 Climatiseurs	860 chacun
2 Ordinateurs portables	68 chacun
2 Micro-ondes	800 chacun
Mixeur, batteur	200 chacun
Fer à repasser	1830

**Tableau II.3 :** Equipements de la troisième maison et leurs puissances

D'après ce tableau, nous avons fait une prévision de la consommation journalière pour deux saisons, l'été et l'hiver. Cela est représenté dans les figures ci-dessous.



**Figure II.10 :** Consommation journalière de la troisième maison pendant l'été



**Figure II.11 :** Consommation journalière de la troisième maison pendant l'hiver

Les courbes de consommation journalière qu'on a estimée sur les figures précédentes montrent les variations de la consommation dans les trois différentes maisons. On remarque que la consommation est plus grande en été qu'en hiver. Ainsi, pendant la journée, la consommation est maximale vers la fin de journée puisque presque tous les appareils électriques sont en marche (toute la famille est à la maison). Il y a aussi un pique le matin. Il est dû à la machine à laver qui a une grande consommation. De telles courbes aident à connaître la puissance maximale de chaque maison, et ainsi, dimensionner les panneaux nécessaires pour notre quartier.

### II.7.2 Calcul de la consommation journalière :

Il s'agit d'estimer la consommation d'équipements supposés connus. L'objectif est d'obtenir la consommation totale moyenne par jour.

L'énergie totale moyenne nécessaire chaque jour  $E$  (Wh/j) est la somme des consommations énergétiques des divers équipements constituant le système à étudier, à savoir la télévision, les lampes d'éclairage, les appareils électroniques, etc. Elle est donnée par la loi suivante :  $E = \sum E_i$

Ainsi, la consommation de chaque équipement peut être calculée comme suite :

$$E_i = P_i \times t_i$$

*L'énergie journalière consommée d'un équipement (Wh/j) = la puissance de cet équipement (W) × la durée d'utilisation de chaque un (h)*

Les tableaux suivants nous donnent ainsi l'énergie consommée pour chaque maison.

#### Maison 1 :

Équipement	nombre	Puissance unitaire (w)	Puissance (w)	Durée d'utilisation quotidienne en été (h)	Energie en été (wh)	Durée d'utilisation quotidienne en hiver (h)	Energie en hiver (wh)
Lampes	11	11	121	3	363	5	605
Réfrigérateur	1	150	150	24	3600	24	3600
Congélateur	1	214	214	24	5136	24	5136
Télévision	2	140	280	5	1400	6	1680
Machine à laver	1	2300	2300	1	2300	1	2300
Climatiseur	2	860	1720	6	10320	0	0
Ordinateur bureau	1	1360	1360	2	2720	2	2720
PC portable	1	68	68	5	340	5	340

**Tableau II.4 :** Estimation des besoins énergétique journaliers pour la première maison

L'énergie totale consommée en été est égale à :  $E = \sum E_i = 26179$  wh et l'énergie totale consommée en hiver est égale à :  $E = \sum E_i = 16381$ wh

**Maison 2 :**

Equipement	Nombre	Puissance unitaire (w)	Puissance (w)	Durée d'utilisation quotidienne en été(h)	Energie en été (wh)	Durée d'utilisation quotidienne en hiver(h)	Energie en hiver (wh)
Lampes	7	11	77	3	231	5	385
Réfrigérateur	1	150	150	24	3600	24	3600
Télévision	1	140	140	6	840	6	840
Machine à laver	1	360	360	1	360	1	360
Climatiseur	1	2335	2335	5	11675	0	0
Ordinateur portable	2	68	136	6	816	7	952

**Tableau II.5 :** Estimation des besoins énergétique journaliers pour la deuxième maison

L'énergie totale consommée en été est égale à :  $E = \sum E_i = 17522$  wh et l'énergie totale consommée en hiver est égale à :  $E = \sum E_i = 6137$  wh.

**Maison 3 :**

Equipement	nombre	Puissance unitaire (w)	Puissance (w)	Durée d'utilisation quotidienne en été (h)	Energie En été (wh)	Durée d'utilisation quotidienne en hiver (h)	Energie en hiver (wh)
Lampes	14	11	154	4	616	7	1078
Réfrigérateur	2	150	300	24	7200	24	7200
Congélateur	1	214	214	24	5136	24	5136
Télévision	3	145	435	3	1305	5	2175
Machine à laver	2	370	740	1	740	1	740
Climatiseur	4	860	3440	5	17200	0	0
Ordinateur portable	2	68	136	3	408	4	544

**Tableau II.6 :** Estimation des besoins énergétique journaliers pour la troisième maison

L'énergie totale consommée en été est égale à :  $E = \sum E_i = 32605$  wh et l'énergie totale consommée en hiver est égale à :  $E = \sum E_i = 16873$  wh

### II.7.3 Chiffrage de l'énergie solaire récupérable :

Nedroma est située au nord-ouest de l'Algérie, à une latitude de 35° 0' 47'' nord, une longitude de 1° 47' 51'' ouest et une altitude de 356 m. Elle est caractérisée par un climat semi-aride sec et froid [23].

L'énergie solaire reçue sur le site pour une inclinaison optimale de 32° est donnée par le tableau suivant [24] :

Mois	Irradiation sur le plan avec l'inclinaison optimale (wh/m <sup>2</sup> /jour)	Température (°C)
Janvier	4530	6.9
Février	5220	7.8
Mars	6200	11.6
Avril	6320	14.3
Mai	6470	18.8
Juin	5900	24.9
Juillet	5930	29.0
Aout	7000	28.2
Septembre	6290	22.9
Octobre	6070	18.4
Novembre	4810	11.2
Décembre	4090	7.7
Année	5910	16.8

Tableau II.7 : Energie solaire reçu sur le site de NEDROMA

### II.7.4 Calcul de la puissance photovoltaïque :

Pour estimer la puissance des panneaux solaires, nous divisons la consommation par l'irradiation journalière la plus défavorable dans la position du panneau.

Pour Nedroma, en décembre, à l'inclinaison optimale de 32° par rapport à l'horizontale, la valeur globale d'irradiation journalière est de 4.09wh/m<sup>2</sup>/jour. D'ou la puissance des panneaux solaires à mettre en œuvre est égale à :

$$\text{Pour la maison 1 : } \frac{16381\text{wh}}{4.09h} = 4005\text{w}$$

$$\text{Pour la maison 2 : } \frac{6137\text{w}}{4.09h} = 1500\text{w}$$

$$\text{Pour la maison 3 : } \frac{16873\text{wh}}{4.09h} = 4125\text{w}$$

Puis, nous augmentons ce résultat d'un coefficient de pertes de 0.95 :

$$\text{Pour la maison 1 : } \frac{4005\text{w}}{0.95} = 4216\text{w}$$

$$\text{Pour la maison 2 : } \frac{1500\text{w}}{0.95} = 1597\text{w}$$

$$\text{Pour la maison 3 : } \frac{4125w}{0.95} = 4342w$$

En prenant la puissance unitaire des panneaux solaires utilisés de 150 W, donc il nous faut :

$$\frac{421}{150w} = 28 \text{ modules pour la maison 1.}$$

$$\frac{1597w}{150w} = 11 \text{ modules pour la maison 2.}$$

$$\frac{4342w}{150w} = 29 \text{ modules pour la maison 3.}$$

Sachant que le module de 150 w fait 1.26 m<sup>2</sup>, cette application demandera 39 m<sup>2</sup> pour la première maison, 14 m<sup>2</sup> pour la deuxième maison et 40 m<sup>2</sup> pour la troisième.

✚ Il nous faut ensuite voir la connexion de ces modules. Pour se faire, nous avons fait les calculs suivants :

✓ Pour la première maison, le courant est égale à  $\frac{4216}{230} = 18 \text{ A}$ . Sachant que le courant de chaque module est égale à 4.45A nous avons donc un panneau qui sera constitué de  $\frac{18}{4.45A} = 4$  module en parallèle. De plus, pour atteindre le nombre de modules nécessaire pour la consommation de cette maison, nous avons connecté  $\frac{28}{4} = 7$  ce qui correspond à 7 panneaux en série.

✓ Pour la deuxième maison, le courant est égale à  $\frac{159}{230} = 7 \text{ A}$ . Sachant que le courant de chaque module est égale à 4.45A nous avons donc un panneau qui sera constitué de  $\frac{7A}{4.45A} = 2$  module en parallèle. De plus, pour atteindre le nombre de modules nécessaire pour la consommation de cette maison, nous avons connecté  $\frac{11}{2} = 6$  ce qui correspond à 6 panneaux en série.

✓ Pour la troisième maison, le courant est égale à  $\frac{4342w}{230V} = 19A$ . Sachant que le courant de chaque module est égale à 4.45A nous avons donc un panneau qui sera constitué de  $\frac{19A}{4.45A} = 4$  module en parallèle. De plus, pour atteindre le nombre de modules nécessaire pour la consommation de cette maison, nous avons connecté  $\frac{29}{4} = 7$  ce qui correspond à 7 panneaux en série.

Pour le dimensionnement des panneaux, nous avons choisi le cas le plus défavorable, c'est-à-dire l'hiver. Il nous faut ensuite calculer l'énergie produite par ces panneaux en été pour vérifier que cette énergie est suffisante. Ainsi, pendant l'été, nous avons une irradiation

de 7000 Wh/m<sup>2</sup>/jour, d'après les calculs fait précédemment, les panneaux produisent une puissance de 4338 w, 1500 w et 4507 w pour les maisons 1, 2 et 3. Donc, l'énergie produite par ces panneaux est de :

- ✓ 4005 w x 7 h=28035 wh pour la première maison ;
- ✓ 1500 w x 7 h=10500 wh pour la deuxième maison ;
- ✓ 4125 w x 7 h=28875 wh pour la troisième maison.

En faisons la comparaison entre l'énergie consommée par la maison en été, et l'énergie produite par les panneaux, nous avons trouvé que la première maison a un surplus d'énergie, tandis que les deux autres maisons ont un manque.

### **II.8 Proposition d'une solution :**

Comme nous l'avons dit précédemment, pendant l'été, la première maison a un surplus d'énergie, tandis que les deux autres maisons ont un manque. Nous devons alors voir si l'énergie excédentaire de la première maison peut compenser le manque des deux autres maisons. Ainsi :

Nous avons pour la première maison :  $28035\text{wh} - 26179\text{wh} = 1856\text{wh}$ .

Pour la deuxième :  $10500\text{wh} - 17522\text{wh} = -7022\text{wh}$ .

Et pour la troisième :  $28875\text{wh} - 32605\text{wh} = -3730\text{wh}$ .

Nous remarquons que :  $1856\text{wh} - 7022\text{wh} - 3730\text{wh} = -8896\text{wh}$ , donc l'énergie excédante ne peut pas compenser le manque.

Vu que notre micro-réseau fonctionne en mode autonome, nous devons trouver des solutions afin de compenser le manque d'énergie. Pour résoudre ce problème il y a plusieurs solutions à savoir :

#### **II.8.1 Champ photovoltaïque :**

Vu que l'énergie produite par les panneaux installés sur les toits de chaque maison ne suffise pas, nous pouvons ajouter un petit champ pour résorber le manque de cette énergie comme le montre la figure II.12.



**Figure II.12 :** Micro-réseau associé à un petit champ photovoltaïque

Afin d'estimer le dimensionnement du champ que nous devons ajouter, nous reprenons les calculs que nous avons faits précédemment. Ainsi, nous avons besoin d'une énergie de 75264wh ((7022+3730) x7). En divisant cette consommation par l'irradiation journalière la plus défavorable (4.09wh/m<sup>2</sup>/jour). Nous déduisons la puissance des panneaux solaires à mettre en œuvre :

$$\frac{75264\text{wh}}{4.09\text{h}}=18402\text{w}$$

En introduisant à ce résultat un coefficient de pertes de 0.95 nous obtenons :

$$\frac{18402\text{w}}{0.95}=19371\text{w}$$

Sachant que la puissance unitaire des panneaux solaires utilisés est de 150 w, nous avons alors :

$$\checkmark \frac{19371\text{w}}{150\text{w}}=129 \text{ modules.}$$

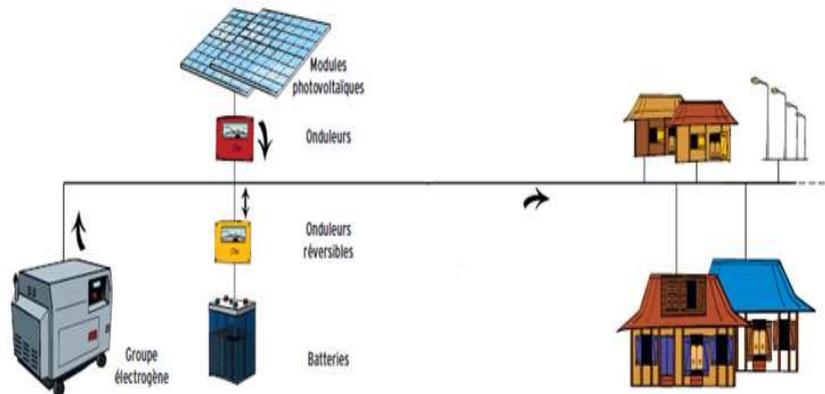
De plus, sachant que le module de 150 w fait 1.26 m<sup>2</sup>, ce champ photovoltaïque demandera environ 163 m<sup>2</sup>.

### **II.8.2 Système hybride :**

Il existe une autre solution à savoir la combinaison de plusieurs sources d'énergies renouvelables ce qui permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique. Il existe ainsi plusieurs combinaisons de systèmes hybrides, à savoir : éolien-diesel, photovoltaïque-diesel, éolien-photovoltaïque, etc. Dans notre cas, nous nous sommes intéressés par les deux dernières combinaisons.

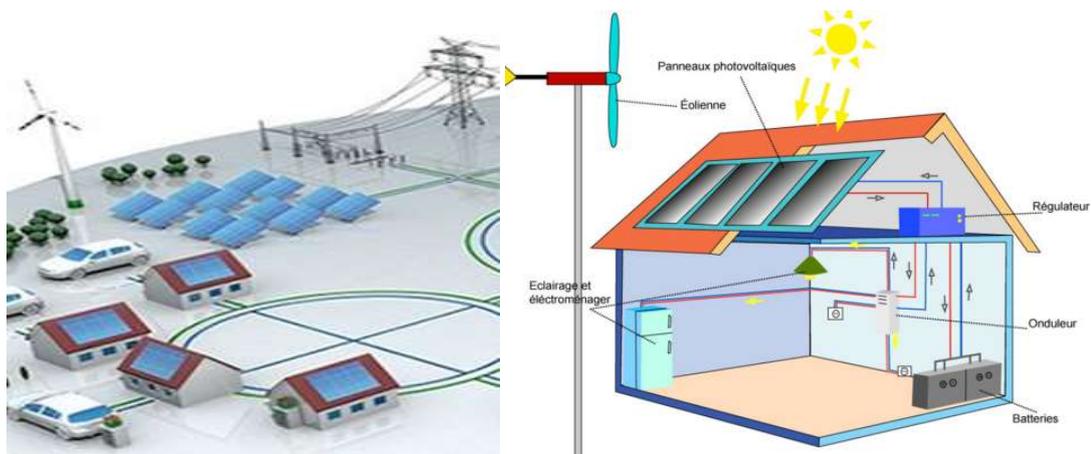
Avoir un générateur produisant du courant à la demande permet de charger complètement les batteries régulièrement et de compenser les périodes d'ensoleillement

défavorable par une plus grande utilisation de la génératrice. Le désavantage d'un tel système est que la génératrice apporte des nuisances de bruit et pollution.



**Figure II.13 :** Système hybride photovoltaïque-diesel

Dans le cas d'un système hybride avec éolienne (figure II.14), l'énergie produite par celle-ci vient compléter le manque d'énergie. Sa production étant plus aléatoire que celle des panneaux solaires, elle complètera efficacement un générateur photovoltaïque.



**Figure II.14 :** Système hybride photovoltaïque-éolien

L'avantage d'un système hybride par rapport à un système pur éolien ou pur photovoltaïque, dépend de beaucoup de facteurs fondamentaux : la forme et le type de la charge, le régime du vent, le rayonnement solaire, le coût et la disponibilité de l'énergie, le coût relatif de la machine éolienne, le champ photovoltaïque, le système de stockage électrochimique et d'autres facteurs d'efficacité. Les systèmes photovoltaïques sont actuellement économiques pour les installations de faibles puissances. Pour les systèmes d'énergie autonomes, le coût du stockage représente la plus grande contrainte du coût global du système pour les installations de grandes puissances. Minimiser le coût du stockage et

optimiser sa capacité est la raison essentielle de la combinaison des systèmes éolien et photovoltaïque.

## **II.9 CONCLUSION**

Ce chapitre a fait l'objet d'une étude et d'une analyse d'un micro-réseau ou des panneaux solaires sont branchés. Dans un premier temps, nous avons présenté brièvement le micro-réseau et sa constitution. Ensuite, nous avons fait le dimensionnement du système solaire étudié. Et pour terminer nous avons proposé des solutions afin de satisfaire la demande des consommateurs.

## ***CHAPITRE III***

# ***SIMULATION DU SYSTEME COMPLET***

### III.1 Introduction

Devant les contraintes environnementales exigées d'une part et l'augmentation du coût de la production d'électricité d'autre part, la tendance actuelle est orientée vers l'exploitation des sources à base d'énergies renouvelables. L'intégration de ces énergies renouvelable (exemple les systèmes photovoltaïque) dans les réseaux électriques peut engendrer l'apparition de micro-réseau qui peut créer plusieurs problèmes, tel que leurs contrôles, leurs gestions et le bon fonctionnement de ces énergies renouvelables dans ce type de réseau.

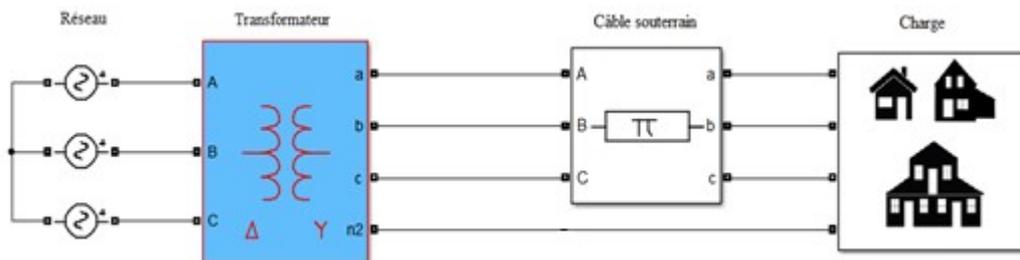
Parmi ces énergies renouvelables, nous nous sommes intéressés à l'installation des systèmes photovoltaïques à usage domestique, qui peuvent être introduite au niveau de chaque maison (qui représente une charge). Cette intégration permet de fournir une partie de l'énergie pour chaque charge et/ou peut même donner un surplus d'énergie au réseau électrique afin d'alimenter d'autre charges.

Ainsi, dans ce chapitre nous allons présenter différent scénario de l'ensemble des éléments constituant le micro-réseau pour différentes charges (type et puissance) et l'intégration ou non des installations photovoltaïques domestiques. Puis nous montrerons les résultats de simulation de ces différents scénarios.

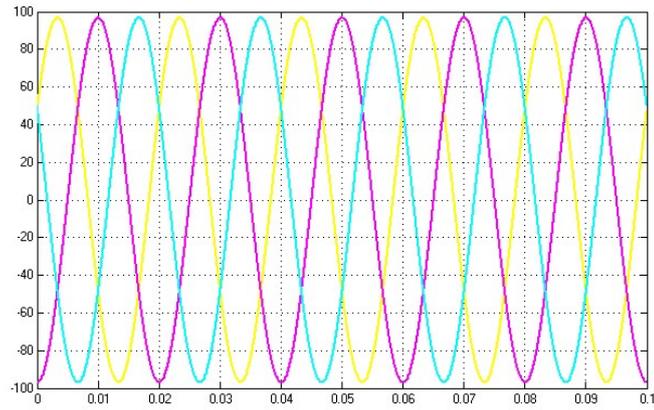
### III.2 Description du système en général

Le système que nous avons choisi de simuler est constitué de :

- ✓ 21 charges qui représentent 21 maisons,
- ✓ Un réseau triphasé d'une fréquence de 50 Hz,
- ✓ Un transformateur MT/BT,
- ✓ Des câbles.

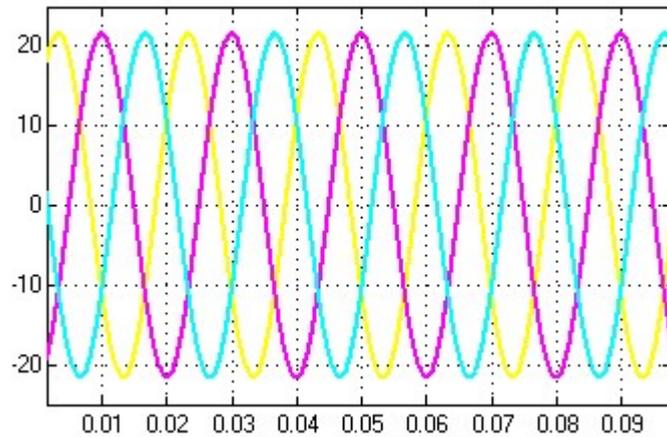


Lorsque les 21 charges consomment une puissance maximale, nous avons une absorption de courant qui est maximale, comme le montre la figure suivante :



**Figure III.1 : Courant de charge maximale**

Par contre lorsque les 21 charges consomment une puissance minimale, nous avons une absorption de courant qui est minimale, comme le montre la figure suivante :



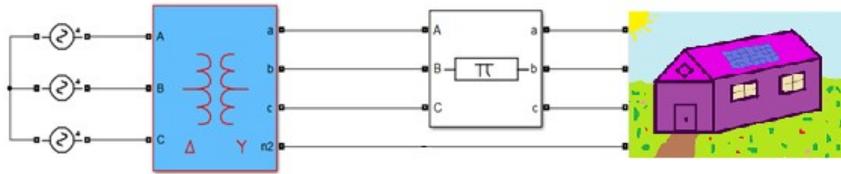
**Figure III.2 : Courant de charges minimales**

Dans cette simulation nous avons considéré de simple charge de type R et nous n'avons pas introduit de panneau solaire.

Considérons maintenant d'autres scénarios pour ce type de réseau électrique, Ainsi nous avons :

### **II.2.1 PARTIE 1 :**

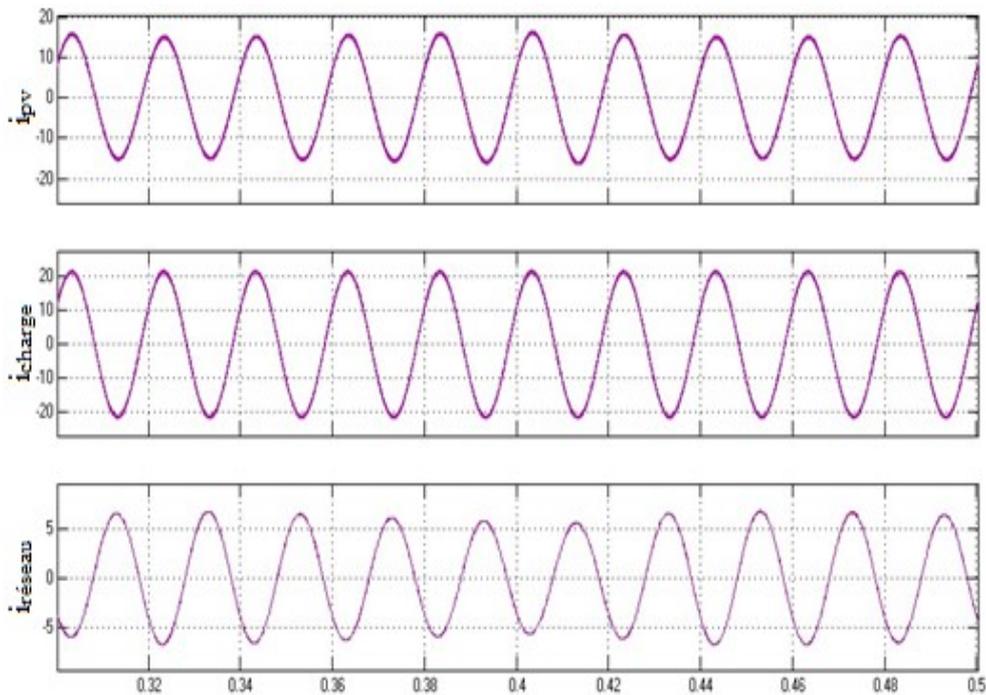
Nous considérons le réseau électrique connecté à une seul maison toujours de type R mais nous introduisons des panneaux solaire sur le toit de la maison, comme le montre la figure suivante :



**Figure III.3 :** Réseau électrique connecté à une maison

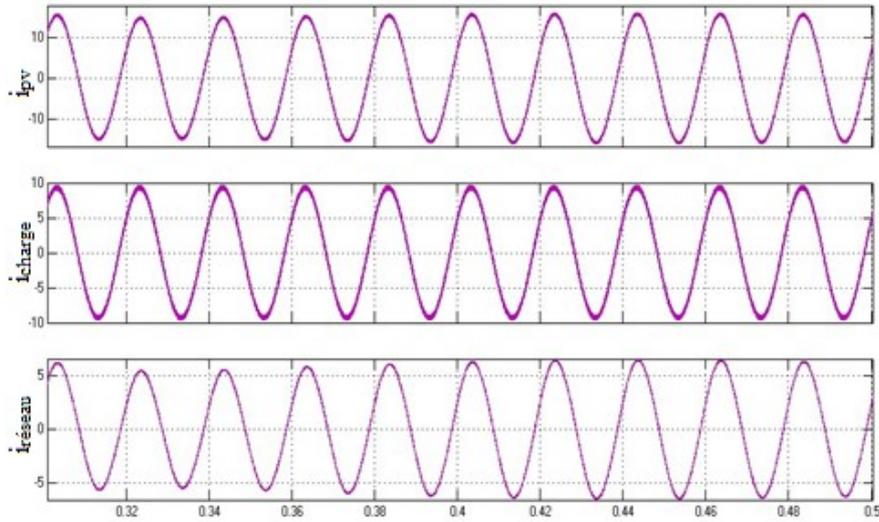
D'après les résultats de simulation obtenus sous Matlab, nous remarquons qu'il existe trois cas :

- Premier cas : Le courant du panneau photovoltaïque n'est pas suffisant pour alimenter la charge, Ainsi, le réseau électrique devra fournir la différence.



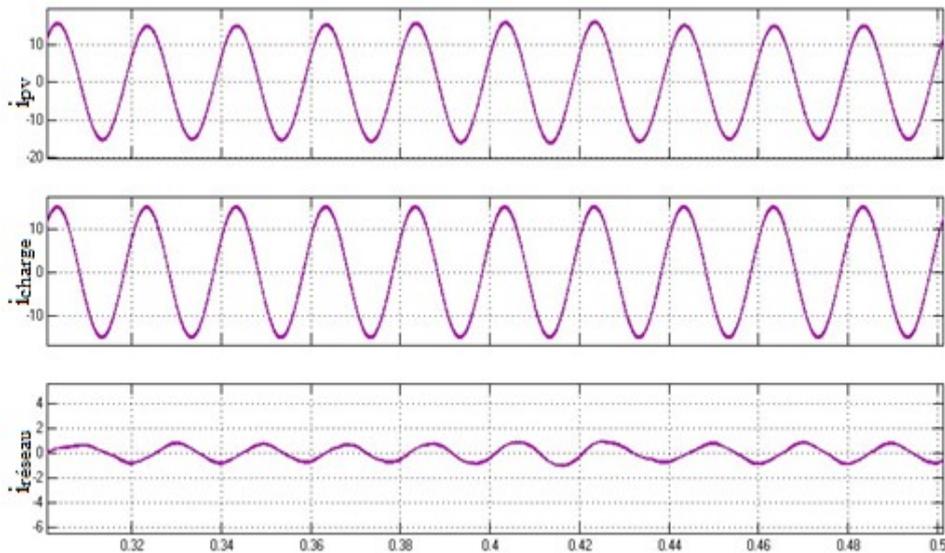
**Figure III.4 :** Courant de charge, du panneau et du réseau électrique

- Deuxième cas : Le panneau photovoltaïque fournira un surplus d'énergie. Ce surplus sera injecté dans le réseau principal.



**Figure III.5 :** Courant de charge, du panneau et du réseau

- Troisième cas : il y a plus ou moins un équilibre entre la production du panneau photovoltaïque et la charge.

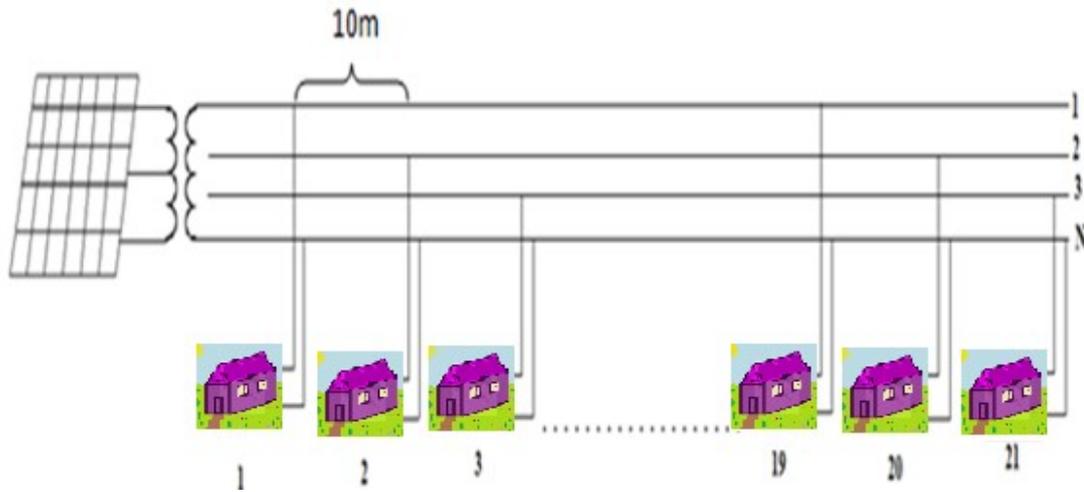


**Figure III.6 :** Courant de charge, du panneau et du réseau

### III.2.2 PARTIE 2 :

Dans cette partie, nous allons étudier un système constitué de 21 maisons alimentées par un champ photovoltaïque. Pour se faire, nous avons fait une simulation dans laquelle nous avons considéré le champ photovoltaïque comme une source triphasé vue que nous ne connaissons pas la puissance qu'il doit délivrer. De plus, nous considérons que notre micro-réseau fonctionne uniquement la journée car nous utilisons uniquement des panneaux

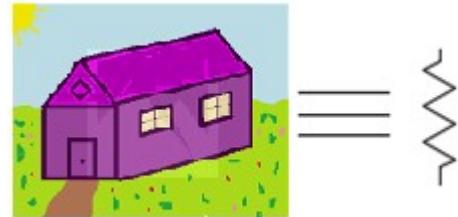
photovoltaïques et nous n'avons pas considéré des systèmes de stockage pour le faire fonctionner la nuit.



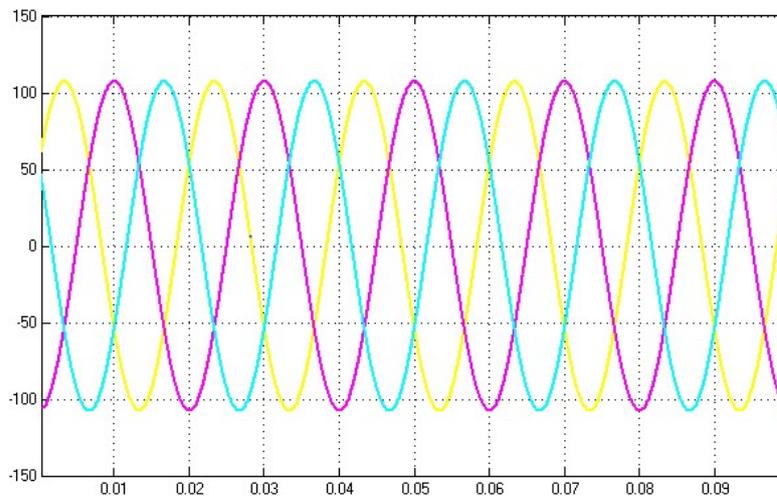
**Figure III.7 :** Micro-réseau

**Scénario 1 :**

Pour le premier scénario, la maison est représentée par une simple résistance dans laquelle nous avons introduit nos puissances.



Dans un premier temps, nous considérons que les charges absorbent une même puissance. Les résultats de simulation obtenue sont donnés par les figures ci-dessous.

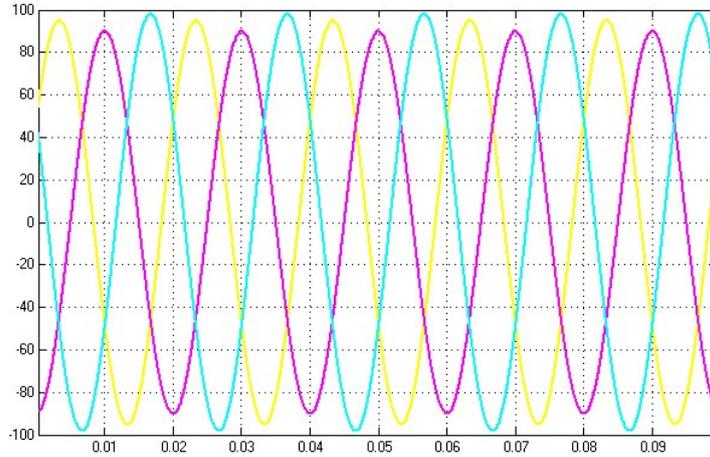


**Figure III.8 :** Courant pour des charges identiques

### CHAPITRE III : SIMULATION DU SYSTEME COMPLET

Nous remarquons que les courants sont équilibrés.

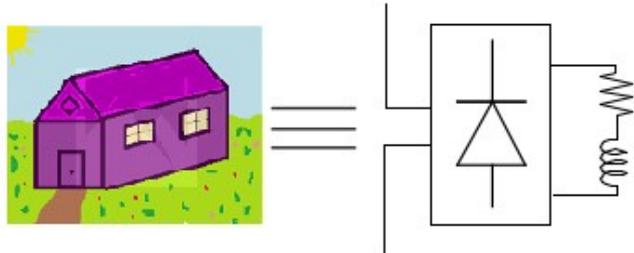
Ensuite, nous considérons que chaque charge absorbe une puissance différente. Les résultats de simulation obtenue sont donnés par les figures ci-dessous.



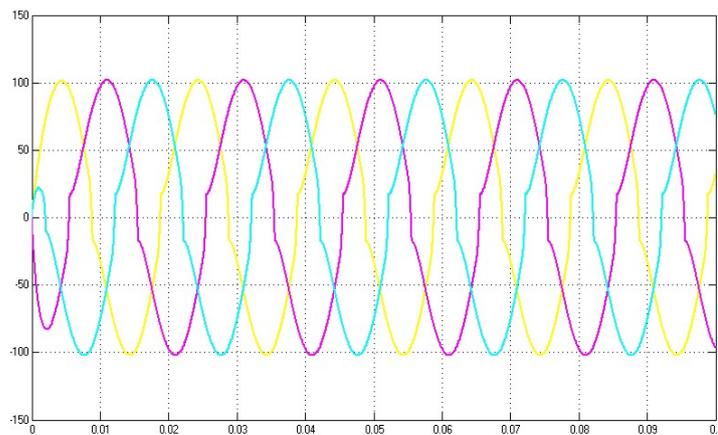
**Figure III.9 :** Courant pour des différentes charges

#### Scénario 2 :

Pour le deuxième scénario, la maison est représentée par un pont redresseur.



Dans ce cas nous avons considéré que les charges absorbent une même puissance. Les résultats de simulation obtenue sont donnés par les figures ci-dessous.

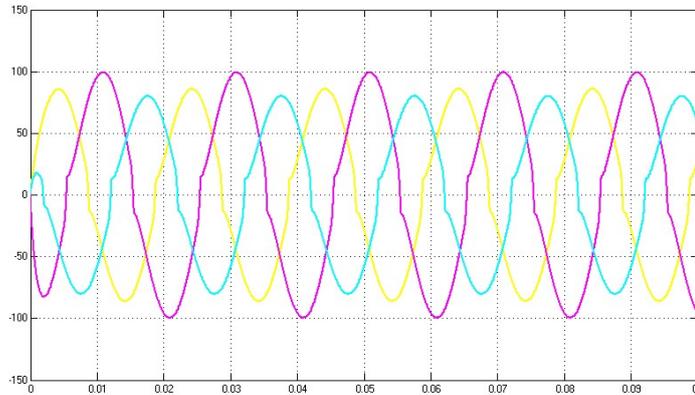


**Figure III.10 :** Courant pour des charges identiques

## CHAPITRE III : SIMULATION DU SYSTEME COMPLET

Nous remarquons que les courants sont équilibrés, mais qu'ils sont déformés à cause des charges non linéaires.

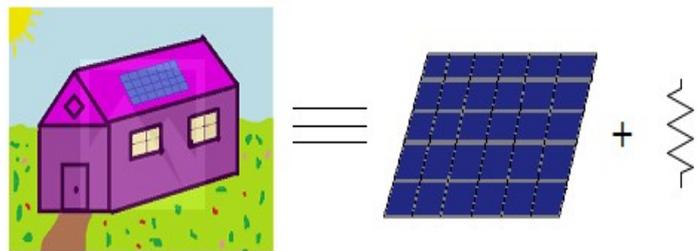
Ensuite, nous considérons que chaque charge absorbe une puissance différente. Les résultats de simulation obtenue sont donnés par les figures ci-dessous.



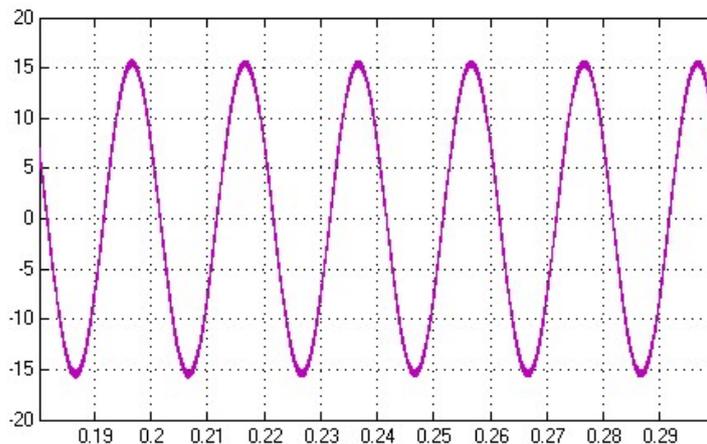
**Figure III.11 :** Courant pour des charges différentes

### Scénario 3 :

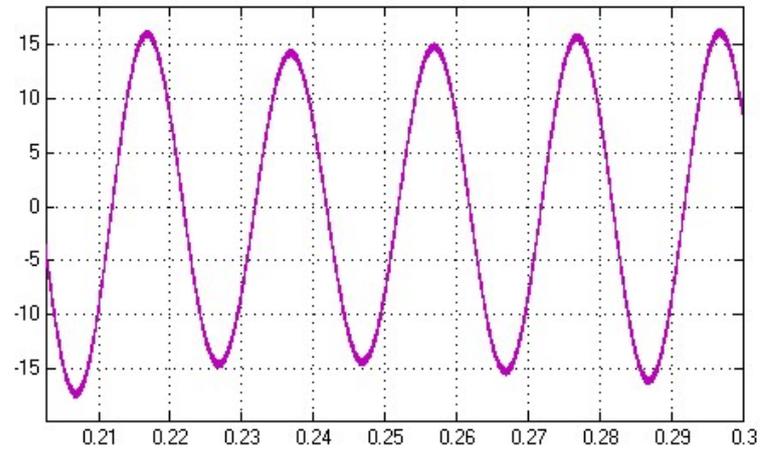
Dans ce cas, la maison est représentée par une résistance et elle reçoit son énergie d'un panneau monophasé. Si l'énergie que produit ce panneau n'est pas suffisante, le champ de panneau fournira ce manque.



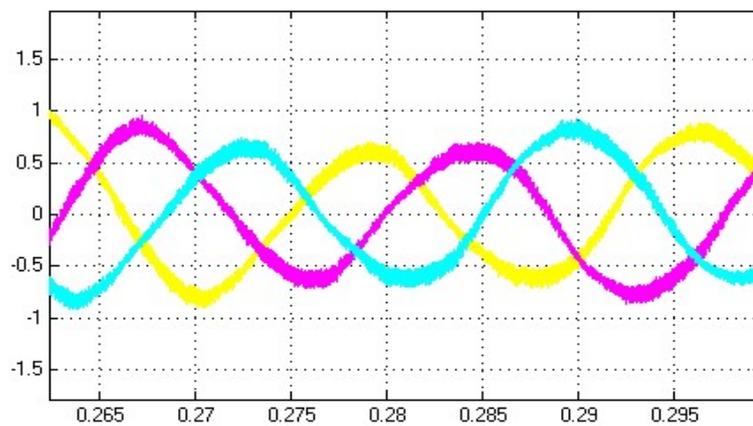
### Charge maximale :



**Figure III.12 :** Courant de la charge



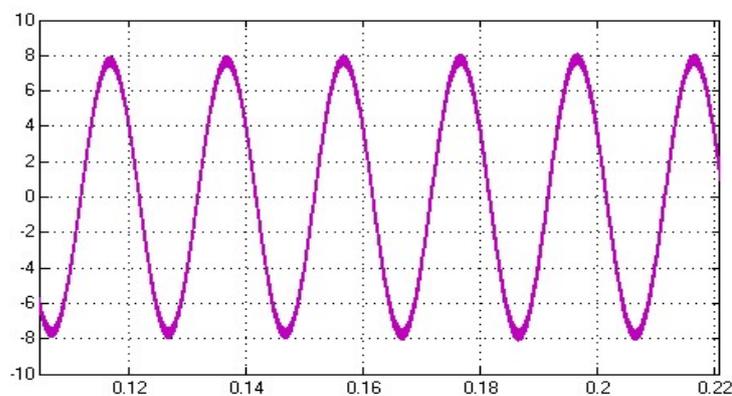
**Figure III.13 :** Courant du panneau monophasé



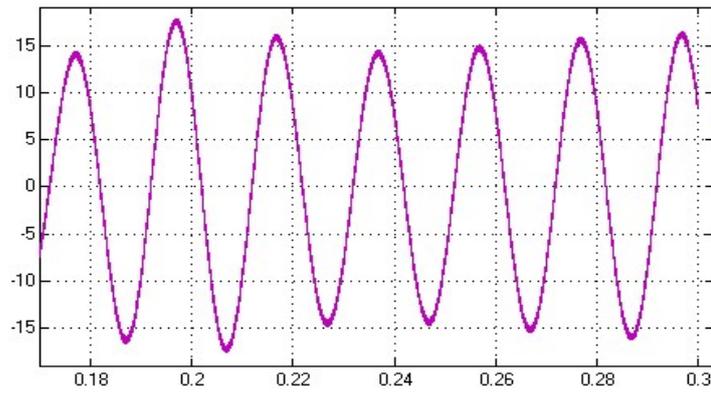
**Figure III.14 :** Courant du réseau

Nous remarquons de ces figures que le panneau solaire monophasé fournit presque la totalité de la puissance à la charge.

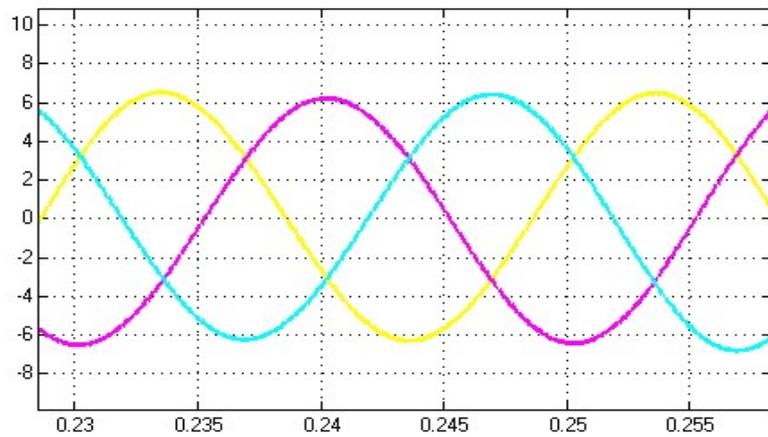
**Charge minimale :**



**Figure III.15 :** Courant de la charge



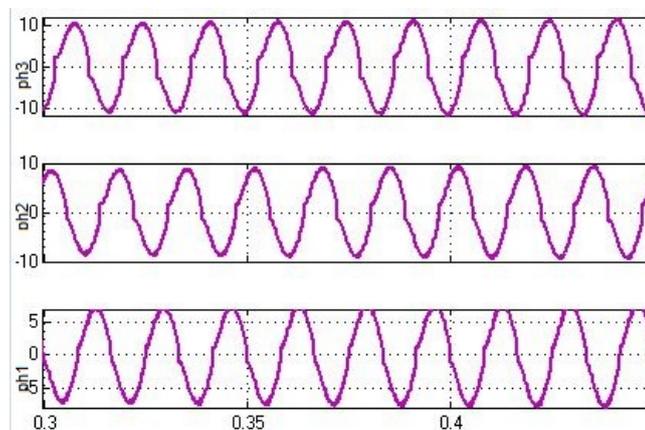
**Figure III.16 :** Courant du panneau monophasé



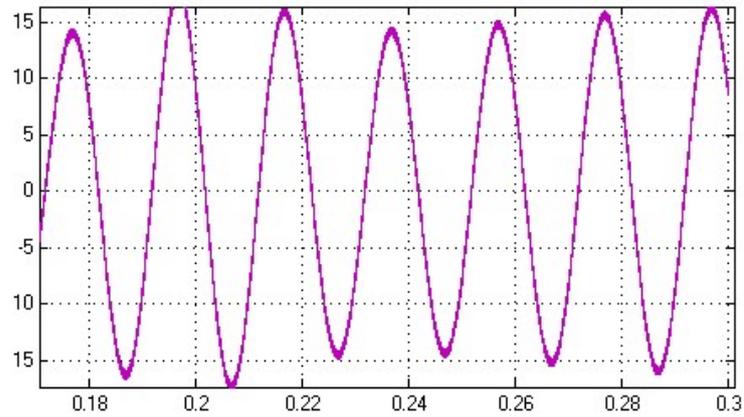
**Figure III.17 :** Courant du réseau

Nous remarquons de ces figures que le panneau solaire fournit un surplus de la puissance qui sera injecté au micro-réseau.

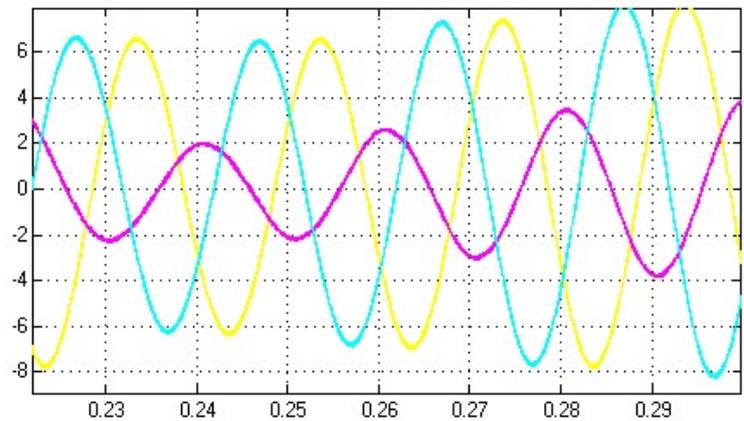
**Charge déséquilibré :**



**Figure III.18 :** Courant de la charge



**Figure III.19 :** Courant du panneau monophasé



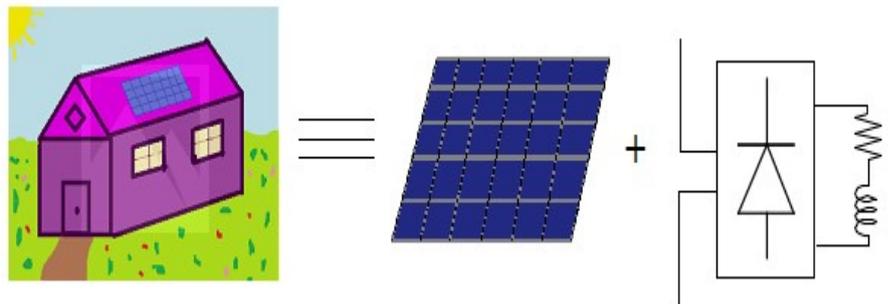
**Figure III.20 :** Courant du réseau

Nous avons dans ces figures un déséquilibre due au déséquilibre des charges ce qui engendre un déséquilibre du réseau électrique du fait que nous avons la même puissance produite par les panneaux solaires.

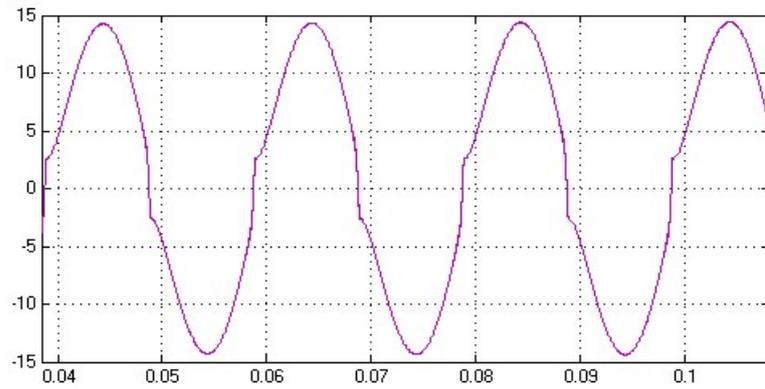
**Scénario 4 :**

Dans ce cas, la maison est représentée par un pond redresseur et elle reçoit son énergie d'un panneau monophasé.

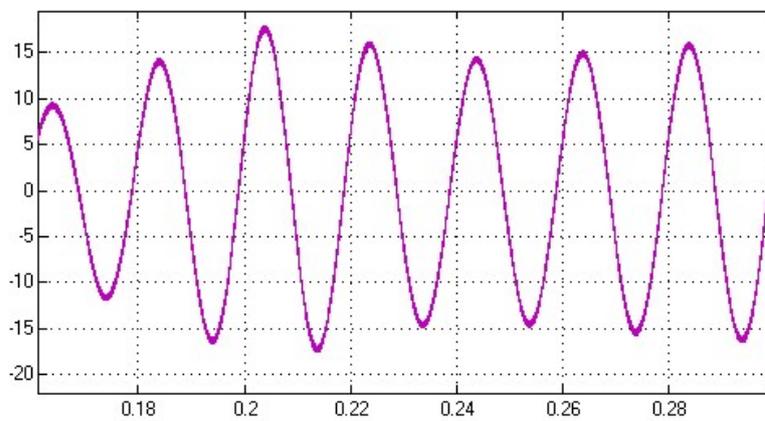
Si l'énergie que produit ce panneau n'est pas suffisante, le champ accompli ce manque.



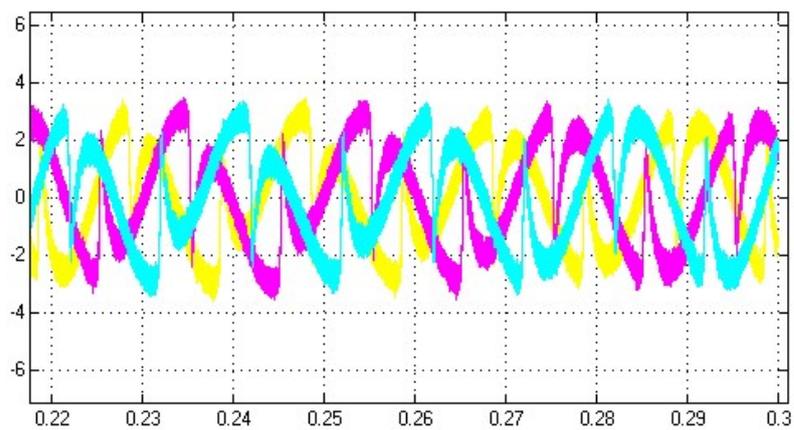
**Charge maximale :**



**Figure III.21 : Courant de la charge**

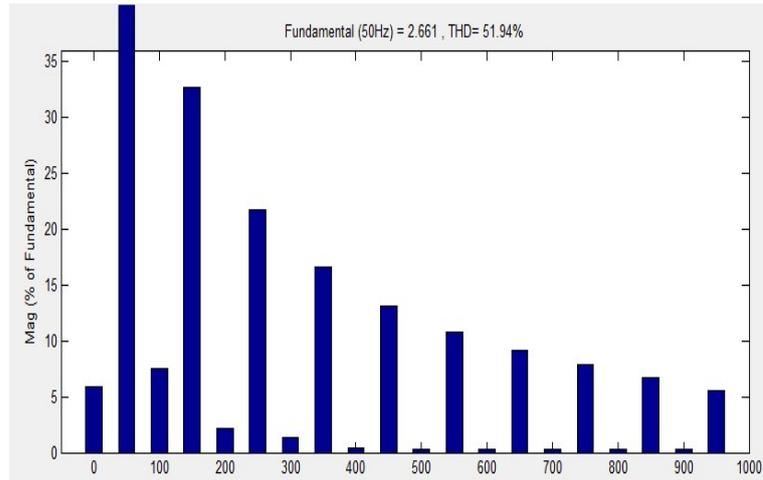


**Figure III.22 : Courant du panneau monophasé**



**Figure III.23 : Courant du réseau**

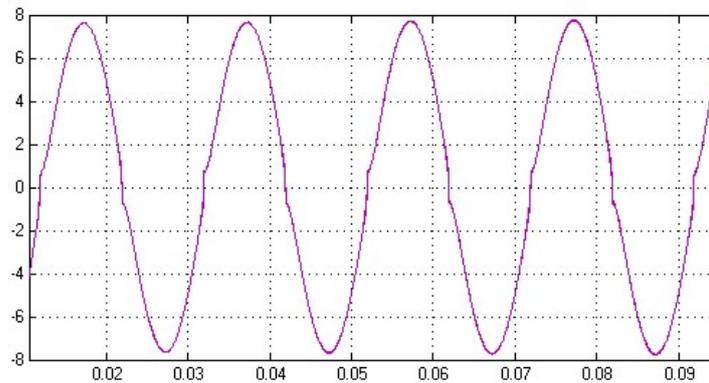
### CHAPITRE III : SIMULATION DU SYSTEME COMPLET



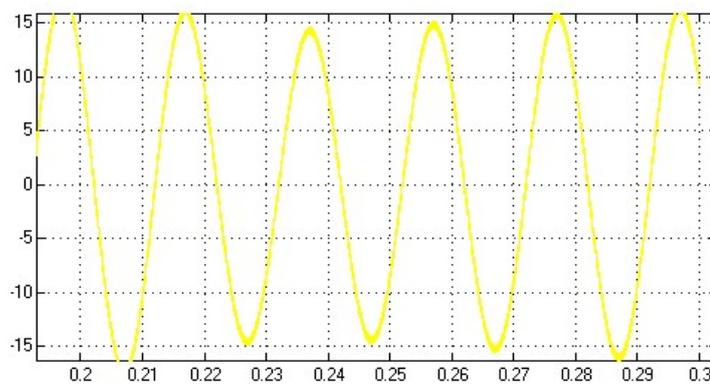
**Figure III.24 :** Le spectre harmonique du courant du réseau

Nous remarquons que les charges non linéaire engendre un taux de distorsion harmonique important d'environ 51,94 % ce qui peut poser problème car le câble est de type II ce qui peut provoquer une résonance.

#### Charge minimale :



**Figure III.25 :** Courant de la charge



**Figure III.26 :** Courant du panneau monophasé

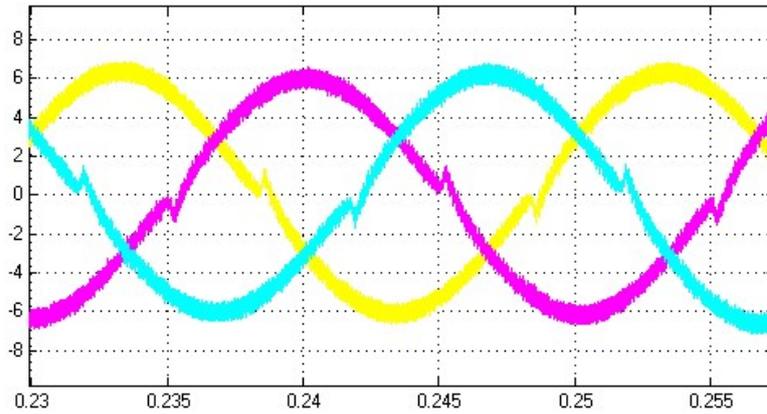


Figure III.27 : Courant du réseau

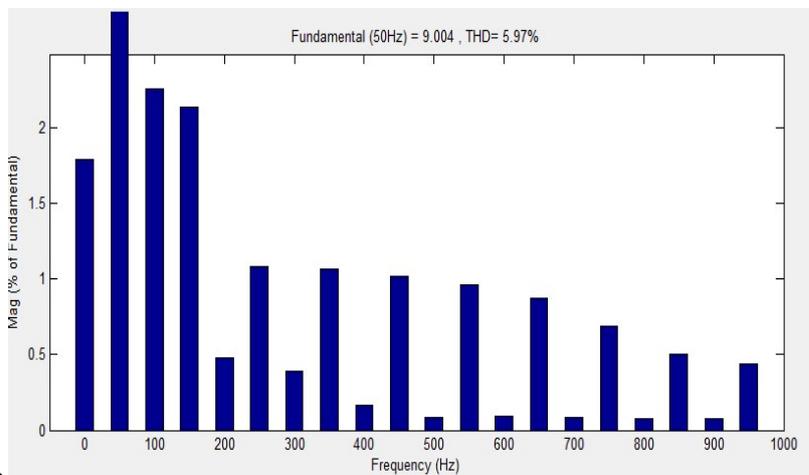


Figure III.28 : Le spectre harmonique du courant du réseau

Nous remarquons que lorsque la charge est minimale les harmoniques sont minimales

**Charge déséquilibré :**

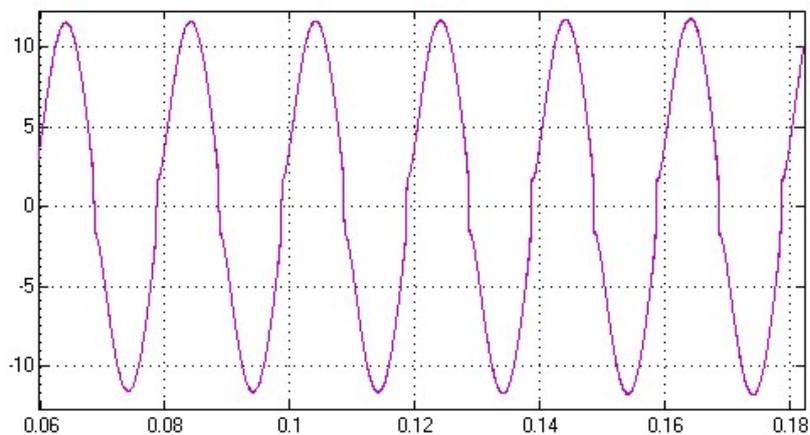
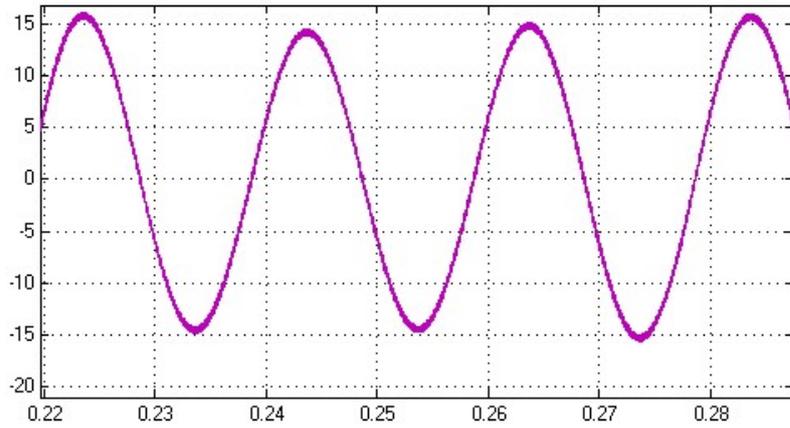
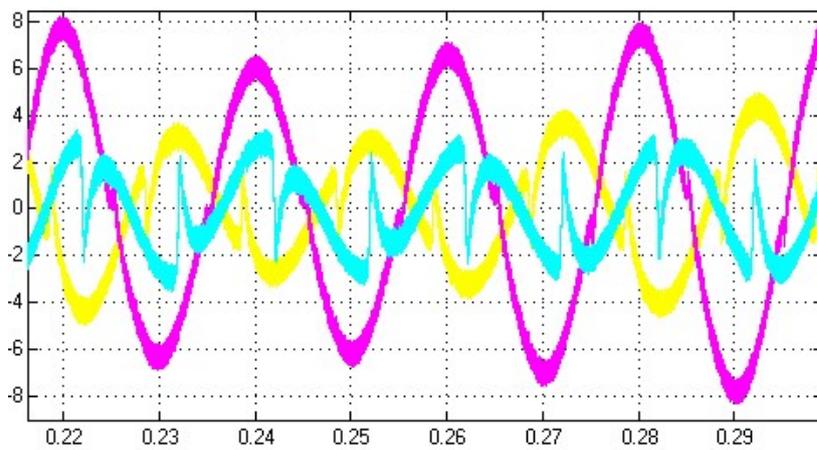


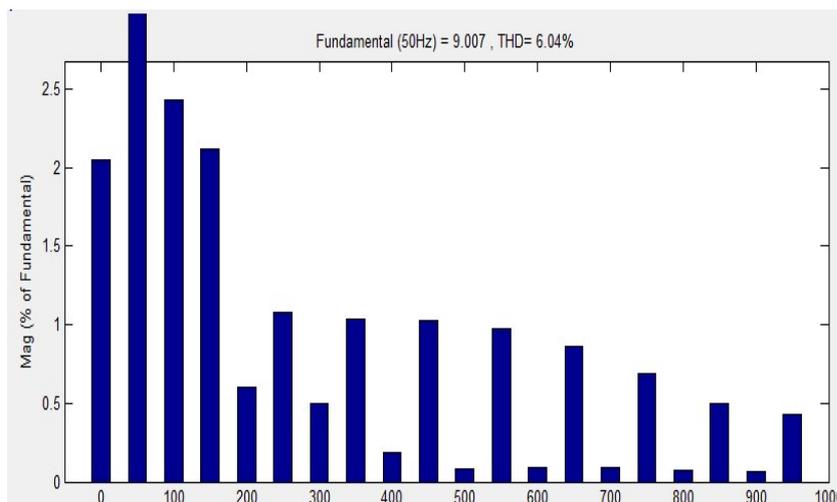
Figure III.29 : Courant de la charge



**Figure III.30 :** Courant du panneau monophasé



**Figure III.31 :** Courant du réseau



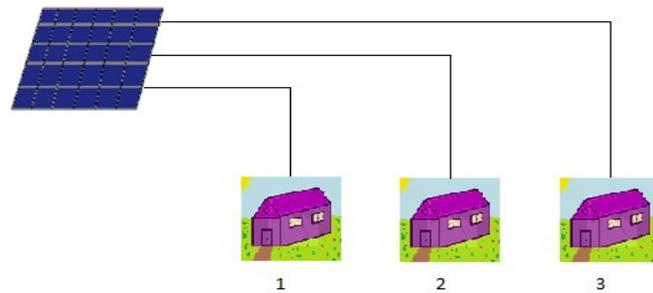
**Figure III.32 :** Le spectre harmonique du courant du réseau

Nous remarquons que deux phases du réseau électrique sont fortement perturbées.

### III.2.3 PARTIE 3

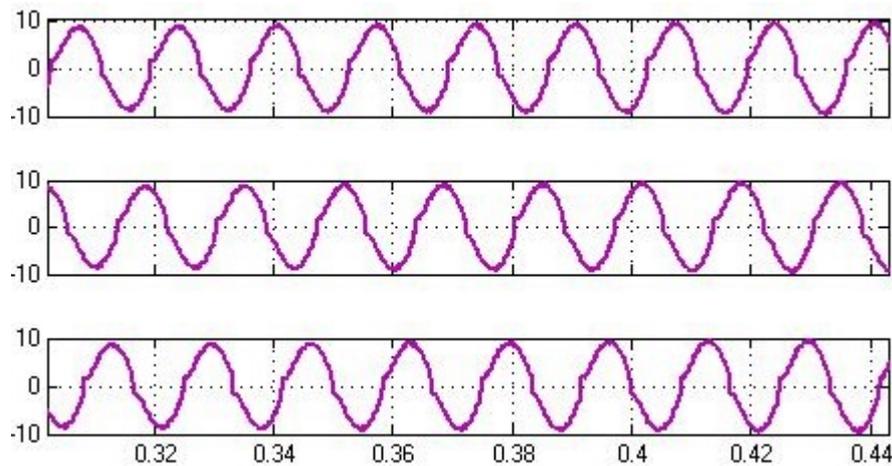
Dans cette partie, nous allons étudier l'une des solutions proposées pour atteindre l'équilibre production-consommation. Cette proposition consiste à alimenter chaque trois maison par un panneau triphasé.

**Remarque importante :** Nous voulions simuler pour 21 maisons cependant du faite des limitations de nos PC nous n'avons pu faire la simulation que de trois maisons avec panneaux solaire (modèle complet).



**Figure III.33 :** Alimentation des trois maisons avec un panneau triphasé

Pour la première simulation, nous avons alimenté nos maisons seulement avec le panneau triphasé. D'après les résultats de simulation de la figure III.34, nous remarquons que le courant dans chacune des trois phases est égal à 10A.



**Figure III.34 :** Courant pour des charges identiques

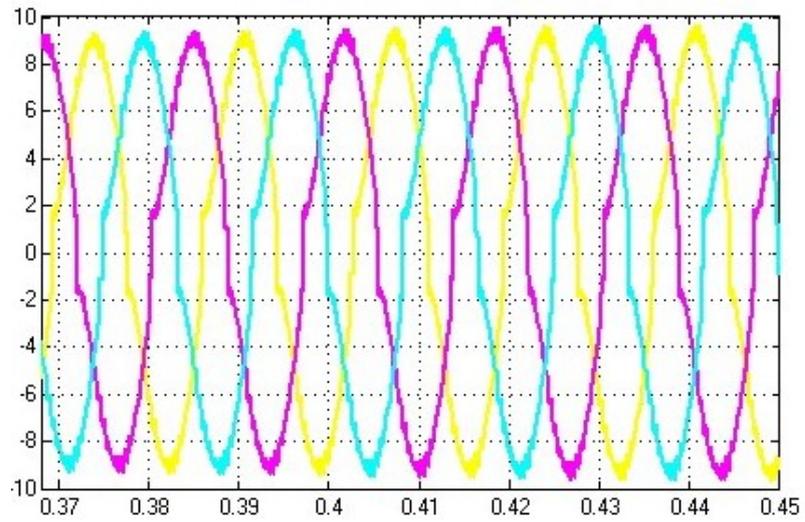


Figure III.35 : Courant a la sortie du panneau solaire triphasé

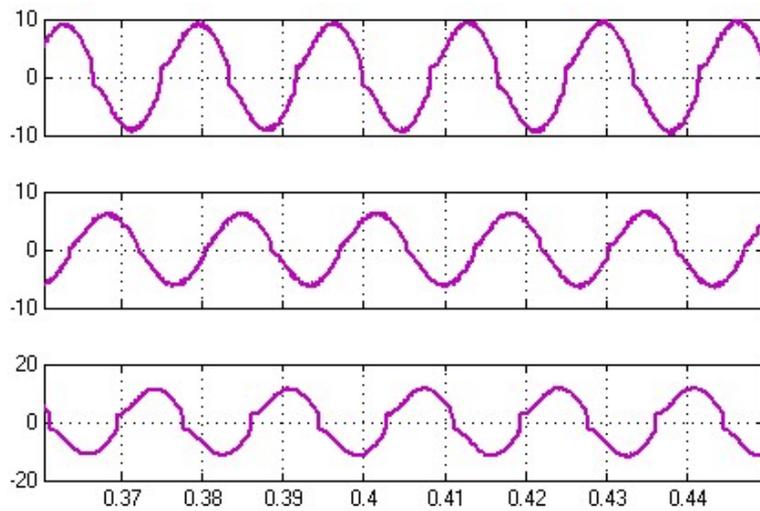


Figure III.36 : Courant pour des charges différentes

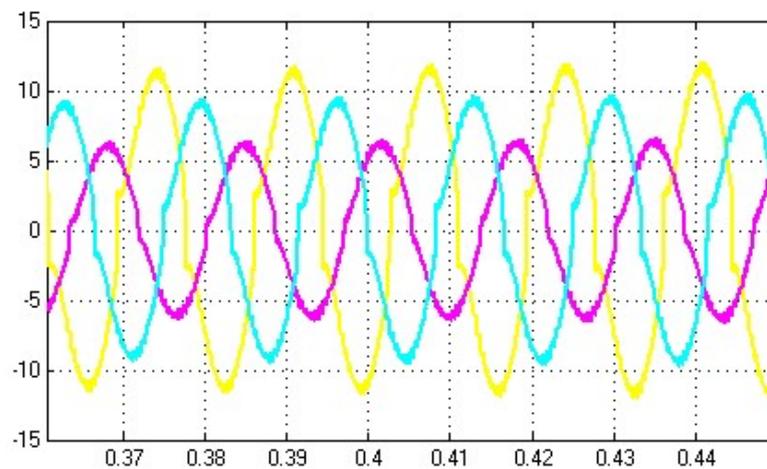
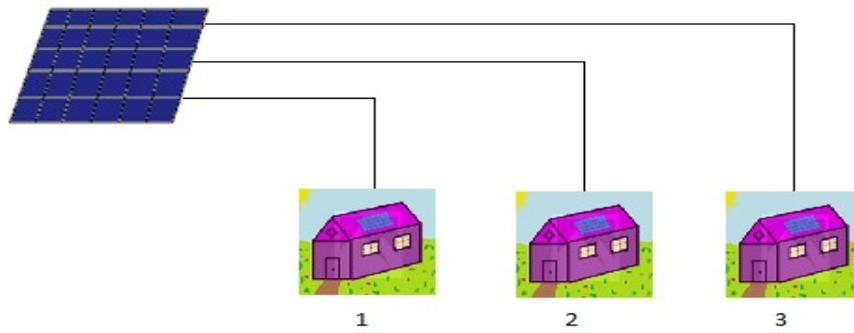


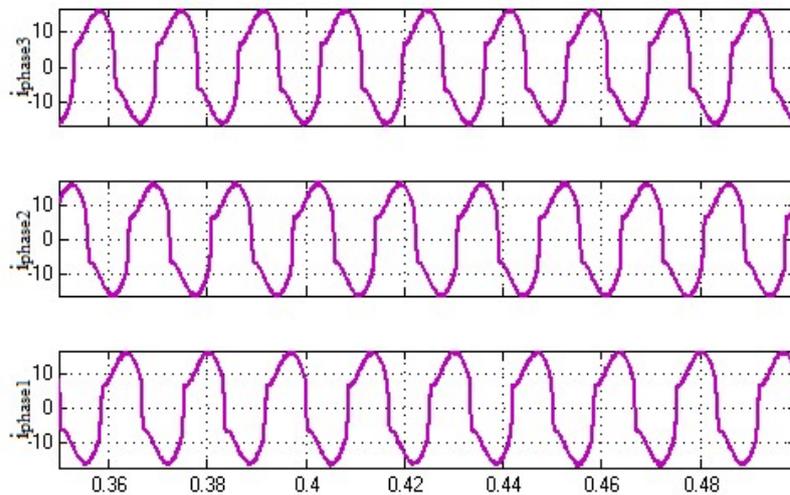
Figure III.37 : Courant a la sortie du panneau solaire triphasé

### CHAPITRE III : SIMULATION DU SYSTEME COMPLET

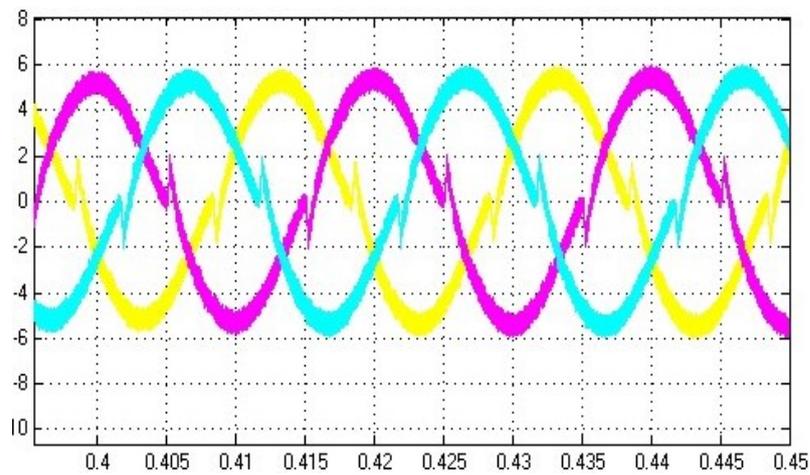
Pour la deuxième simulation, les maisons sont alimentées par des panneaux monophasés et le manque d'énergie est accompli par le panneau triphasé.



Résultats de simulation du panneau monophasé raccordé au panneau triphasé :



**Figure III.38 :** Courant pour des charges identiques



**Figure III.39 :** Courant a la sortie du panneau solaire triphasé

## CHAPITRE III : SIMULATION DU SYSTEME COMPLET

Nous remarquons que la différence entre les charges et le panneau solaire monophasé est fourni par le panneau solaire triphasé.

**Remarque importante :** l'alimentation des charges par les panneaux solaires ce fait que pendant la journée car du faite qu'il n'y a pas dans notre micro-réseaux de système de stockage ou d'autres source tel que les éoliennes alors il est nécessaire de connecter pendant la nuit au réseau électrique ce qui implique que pendant cette période nous n'avons plus de micro réseau.

### III. 4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, la simulation du panneau solaire alimentant différentes charges est présentée. Les modèles de simulation sont construits pour les différentes composantes du système photovoltaïque. D'après les résultats obtenus par simulation, on remarque que le courant dans les trois phases du réseau électrique dépend des caractéristiques des charges et des micro-sources dans notre cas des panneaux solaires. De plus, notre micro-réseau ne peut fonctionner correctement que lorsqu'il est raccordé a un réseau auxiliaire qui accomplit le manque d'énergie consommée par les différentes charges car des fois les panneaux solaires ne peuvent fournir toute la puissance nécessaire aux charges.

## ***CONCLUSION GENERALE***

## CONCLUSION GENERALE

Au cours de notre travail nous nous sommes intéressés à l'intégration des panneaux solaires dans un micro-réseau. Au début nous avons donné des généralités sur les systèmes photovoltaïques. L'étude bibliographique sur ces générateurs photovoltaïques « GPV » nous a permis de bien comprendre son fonctionnement et son application dans la production de l'électricité. Le GPV utilisé pour le développement du modèle mathématique été un panneau solaire de type **BP 2150S**. Cette étude à permis de déterminer les caractéristiques I-V et P-V de ce panneau et de les valider par simulation. Nous avons ensuite fait l'étude d'un hacheur survolteur qui est connecté à ce GPV, ce qui nous a permis d'augmenter la tension de sortie du panneau PV jusqu'à l'obtention d'une tension suffisante pour alimenter un onduleur qui est connecté à notre micro-réseau. Sa commande est assurée par un algorithme de recherche du point de puissance maximale (MPPT) de type P&O. Cet algorithme permet d'extraire la puissance maximale délivrée par le GPV. Après avoir obtenu une tension continue suffisante à la sortie du hacheur nous avons étudié et modélisé un onduleur de tension permettant de convertir cette tension continue à une tension alternative conforme à celle du réseau électrique. Les résultats de simulation nous ont permis de validé le système complet GPV-Hacheur survolteur-Onduleur.

Dans la deuxième partie, nous avons étudié le micro-réseau et ses composantes, à savoir les sources et charges qui y sont connectés, afin de pouvoir dimensionner chaque partie. La simulation du micro-réseau a été effectuée en détails et en plusieurs étapes pour bien illustrer le fonctionnement de l'ensemble du système raccordé aux différentes charges avec ou sans GPV et cela en présentant plusieurs scénarios.

# ***BIBLIOGRAPHIE***

- [1] [www.sonegaz.dz](http://www.sonegaz.dz)
- [2] **MINISTERE DE L'ENERGIE ET DES MINES**, "Guide des Énergies Renouvelables", Édition 2007, BRAHIMI (MEM)
- [3] **NAKOUL Zakia**, «Optimisation d'une centrale solaire a base d'un générateur PV [Application Aux Sites Tlemcen Et Bouzaréah] »
- [4] **DR. BELAID LALOUNI SOFIA**, Cours Energie Solaire Photovoltaïque
- [5] **ANTONIO LUQUE AND STEVEN HEGEDUS**, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", John Wiley & Sons Ltd, 2003
- [6] **F. KININGER**, "Photovoltaic Systems Technology", University of Kassel, 2003
- [7] **MR. BENSALAH BELQASSIM ET MR. FILALI MOHAMMED**, Etude et réalisation d'un circuit de commande avec MPPT d'un hacheur pour système photovoltaïque
- [8] **B. RAMDANE, B. DABOUZ**, Contribution à l'étude et la commande d'un moteur asynchrone alimenté par un système solaire. Application au pompage photovoltaïque. ENP 203
- [9] **I.BENDJAMAA**, Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque
- [10] **M.L.LOUAZANE**, Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque
- [11] <http://energie-developpement.blogspot.com/2012/01/cellules-photovoltaique-technologies.html>
- [12] <http://www.bati-depot.fr/solaire/photovoltaique/cellule-photovoltaique/cellule-photovoltaique.html>
- [13] **HANANOU FATIHA ROUABAH AICHA**, Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque
- [14] **BETAOUAF DJAWED et OULD EL HAIBA MOHAMED KABER**, Commande robuste d'un système photovoltaïque a usage domestique
- [15] **AYACH KHEDIDJA**, Modélisation et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Couplé à un Réseau Électrique
- [16] Power Supply for the AAU Cubesat
- [17] **N. ABOUCHABANA**, Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT

- [18] **Ali CHERMITTI, Omar BOUKLI-HACENE, Samir MOUHADJER**, Design of a Library of Components for Autonomous Photovoltaic System under Matlab/Simulink
- [19] **J. XU**, Filtrage active shunt des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité
- [20] **S. CHOWDHURY, S.P. CHOWDHURY AND P. Crossley**, Microgrids and Active Distribution Networks
- [21] **GUEZZEN AMINA ET AOUANE ABDERREZAK**, Etude et Simulation de Deux Eoliennes Petite et Moyenne Puissance
- [22] **ANNE LABOURET, MICHEL VILLOZ**, Energie solaire photovoltaïque.
- [23] <http://fr.db-city.com/Alg%C3%A9rie--Tlemcen--Nedroma--Nedroma>
- [24] <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>
- [25] [http://www.mem-algeria.org/fr/enr/c\\_pot.htm](http://www.mem-algeria.org/fr/enr/c_pot.htm)
- [26] **Tatsuya Kitano et Mikihiro Matsui**, Power sensor less MPPT control scheme utilizing power balance at dc link "System desingn to ensure stability and response"

# Annexe

## Détermination des paramètres du convertisseur survolteur

Pour une tension d'entrée ( $V_g = 39\text{v}$ ) et une tension de sortie ( $V_{out} = 400\text{v}$ ), et à partir des équations précédentes, on obtient :

$$D = 1 - \frac{V_g}{V_{out}} = 1 - \frac{39}{400} = 0.9$$

La résistance équivalente peut être exprimée comme suite :

$$P_{out} = \frac{V_{out}^2}{R} \rightarrow R = \frac{V_{out}^2}{P_{out}} = \frac{400^2}{2400} = 66.7 \Omega$$

$$I_L = \frac{V_{out}}{R} \cdot \frac{1}{1-D} = \frac{400}{66.7} \cdot \frac{1}{1-0.9} = 60\text{A}$$

$$\Delta i_L = 10\% I_L = 0.1 * 60 = 6. \text{ A}$$

$$L = \frac{V_g}{2\Delta i_L} DT_s = \frac{39}{2*6} * 0.9 * 0.0001 = 293 \mu\text{H}$$

$$\Delta V_C = 0.01 * V_{out} = 0.01 * 400 = 4\text{V}$$

$$C = \frac{V_{out}}{2R\Delta V_C} DT_s = \frac{400}{2*66.7*4} * 0.9 * 0.0001 = 67.5\mu\text{F}$$

$T_s$  : la période de l'inductance et de la capacité  $\rightarrow T_s = 0.0001\text{s}$

## Résumé

Les micro-réseaux sont une solution innovante aux problèmes du réchauffement climatique et de la pollution environnementale. Ces systèmes comprennent : des producteurs d'énergie, de multiples charges électriques ainsi que des systèmes de stockage. Ce mémoire met en œuvre par simulation l'utilisation de l'énergie solaire extraite des panneaux photovoltaïques raccordés au réseau électrique via des convertisseurs. La première partie est consacrée aux panneaux photovoltaïques, leurs fonctionnements, leurs caractéristiques et leur modélisation, en prenant en compte la synthèse du convertisseur élévateur et sa commande MPPT (P&O). Plusieurs problématiques seront considérées comme l'extraction de l'énergie maximale à l'aide d'algorithmes performants, la conversion de la tension continue produite par les panneaux solaires en une tension alternative et leurs intégrations au micro-réseau. Les résultats obtenus sous Matlab/Simulink montrent le fonctionnement du système photovoltaïque à son point de puissance maximale (PPM) dans un micro-réseau selon différents types de charges.

**Mots clés:** micro-réseau, panneau solaire, hacheur survolteur.

## Abstract

Micro grids are an innovative solution to the problems of global warming and environmental pollution. These systems include: power generators, multiple electrical loads and storage systems. This memory implements simulation using solar energy extracted from the PV grid connected via converters. The first part is devoted to solar panels, how they work, their characteristics and modeling, taking into account the synthesis of boost converter and MPPT control (P & O). Several issues will be considered like extracting the maximum energy with efficient algorithms, converting the DC voltage produced by the solar panels into an alternative voltage and its integrations to the microgrid. The results obtained with Matlab / Simulink show the operation of the photovoltaic system at its maximum power point (MPP) in a microgrid according to different types of loads.

**Keywords:** microgrid, solar panels, boost.

## ملخص

تعتبر الشبكات المصغرة حل مطور لمشاكل الإحتباس الحراري و التلوث البيئي. هذه الأنظمة تضم : منتجي الطاقة، متعددة الأحمال الكهربائية بالإضافة الى أنظمة التخزين. هذه المذكرة تستعمل عن طريق التحاكي إستعمال الطاقة الشمسية الملتقطة من الألواح الشمسية المربوطة مع الشبكة الكهربائية بواسطة محولات . الشطر الأول مخصص للألواح الشمسية، استخداماتها، خصائصها وتصميماتها بالأخذ بعين الإعتبار تركيب المحول التصاعدي و الامر المتحكم فيه . **MPPT** عدة إشكاليات تعتبر بمثابة استخراج الطاقة القصوى بمساعدة خوارزمية فعالة تحويل التوتر المستمر الناتج عن الألواح الشمسية إلى توتر متناوب و إدماجها في الشبكات المصغرة. النتائج المتحصل عليها بواسطة برنامج ماتلاب تبين مبدأ عمل النظام الضوئي عند ذروة الطاقة في الشبكة المصغرة حسب مختلف أنواع الأحمال.

**الكلمات المفتاحية:** الشبكات المصغرة، الألواح الشمسية، المحول التصاعدي.