

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES
Faculté de Génie Electrique
Département d'Electrotechnique

Thèse présentée par :

JBILOU Mokhtaria

Pour l'obtention du diplôme de :

DOCTORAT en SCIENCES

Filière Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques

Intitulé de la thèse :

***ETUDE, SIMULATION ET REALISATION D'UN
ONDULEUR POUR SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE***

Présenté devant le jury composé de :

Dr. ZIDI Sid Ahmed	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbés)	Président
Dr. BRAHAMI Mostefa	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbés)	Directeur de thèse
Dr. ALLAOUI Tayeb	Professeur (Université de Tiaret)	Examineur
Dr. KANSAB Abdelkader	MCA (Université Chlef)	Examineur
Dr. BOUKLI HACENE Fouad	MCA (ESSAT Tlemcen)	Examineur
Dr. NASSOUR Kamel	MCA (U.D.L. Sidi Bel-Abbés)	Examineur
Dr. TILMATINE Amar	Professeur (U.D.L Sidi Bel Abbés)	Invité

Soutenue le : 22/04/2019

RÉSUMÉ

En Algérie et comme plusieurs pays du tiers monde, de nombreux sites isolés ne sont pas encore connectés au réseau électrique conventionnel. Ils sont principalement confrontés à des problèmes de stockage de nourriture, qui constitue une contrainte réelle pour les habitants des zones rurales. L'objectif de la thèse est de concevoir et mettre en œuvre à moindre coût une conception comprenant **un système photovoltaïque** alimentant un générateur d'ozone destiné à la désinfection d'une salle de stockage d'aliments dans un site isolé. Cela augmentera la durée de conservation des produits alimentaires. Une étude expérimentale a été menée sur plusieurs fruits et légumes placés dans une salle traitée à l'ozone, et une autre salle non traitée. **L'onduleur** développé à l'aide de composants usuels tels que transistor MOSFET et une commande numérique faisant appel à une carte ARDUINO réduit fortement le coût de l'installation. Le système proposé permet un stockage à long terme avec une faible consommation d'énergie estimée à 16 W/m².

Mots-clés: Système photovoltaïque; Onduleur; Stockage alimentaire; Générateur d'ozone.

ABSTRACT

In Algeria and several third world countries, many isolated sites are not yet connected to the conventional electricity grid. They are mainly confronted with problems of food storage which is a real constraint for the inhabitants of rural areas. The aim of the thesis is to design and implement at a lower cost a system comprising a photovoltaic system feeding an ozone generator intended for the disinfection of a food storage room in an isolated site. This will increase the shelf life of food products. An experimental study was conducted on several fruits and vegetables placed in an ozone treated room, and another untreated room. The inverter developed using conventional components such as a MOSFET transistor and a digital controller using an ARDUINO board greatly reduces the cost of installation. The proposed system allows long-term storage with a low energy consumption estimated at 16 W / m².

Keywords: Photovoltaic system; Inverter; Food storage; Ozone generator

ملخص

في الجزائر وفي العديد من دول العالم الثالث، لا ترتبط العديد من المواقع المعزولة بعد بشبكة الكهرباء التقليدية. وهي تواجه في الأساس مشاكل تخزين الأغذية، وهو قيد حقيقي لسكان المناطق الريفية. الهدف من هذه الرسالة هو تصميم وتنفيذ نظام بتكلفة أقل يشتمل على نظام فلتائني ضوئي يغذي مولد الأوزون المخصص لتطهير غرفة تخزين الطعام في موقع معزول. هذا سيزيد من العمر الافتراضي للمنتجات الغذائية. أجريت دراسة تجريبية على العديد من الفواكه والخضروات وضعت في غرفة معالجة الأوزون، وغرفة أخرى غير المعالجة. العاكس الذي تم تطويره باستخدام مكونات تقليدية مثل ترانزستور MOSFET وجهاز تحكم رقمي باستخدام لوحة ARDUINO يقل بشكل كبير من تكلفة التركيب. يسمح النظام المقترح بالتخزين على المدى الطويل باستهلاك منخفض للطاقة مقداره 16 واط / م². كلمات البحث: نظام الضوئية. العاكس. تخزين الطعام. مولد الأوزون.

REMERCIEMENTS



Remerciements

*Mon expérience de thèse a été riche d'enseignements, tant sur le plan professionnel que personnel. Elle a été une étape structurante dans mon parcours professionnel. Je dois la réussite de ce projet à l'écoute, aux conseils et la bonne humeur de toutes les personnes qui m'ont soutenue pendant ces années. Cette Thèse de doctorat a été préparée au sein des laboratoires de recherche **ICEPS** et certaines expériences ont été faites au laboratoire **APELEC** de l'université de Sidi-Bel-Abbès.*

Voici venu le moment des remerciements.

*Avant tout, je remercie **ALLAH**, le tout puissant, de m'avoir donné le courage, la patience et la volonté pour accomplir ce travail.*

*Mes plus vifs remerciements s'adressent au Professeur **BRAHAMI Mostefa**, qui m'a encadré durant ces années. Je le remercie tout particulièrement, pour l'intérêt qu'il a porté à ce sujet pour la confiance qu'il m'a accordée ainsi que pour les conseils qu'il a sus me prodiguer. Grâce à l'ouverture de son esprit, il a su me laisser prendre des initiatives et avec sa compétence a contribué de façon décisive à ma formation scientifique.*

*J'adresse tous mes remerciements au Dr **ZIDI Sid Ahmed**, Professeur à l'université de Sidi-Bel-Abbès, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de cette thèse et d'évaluer ce travail.*

*Mes remerciements s'adressent également aux Dr **ALLAOUI Tayeb**, Professeur à l'université de Tiaret, Dr **KANSAB Abdelkader**, maître de conférences à l'université de Chlef, Dr **BOUKLI Hacene Fouad**, maître de conférences à l'université de Tlemcen et Dr **NASSOUR Kamel** maître de conférences à l'université de Sidi Bel Abbes, d'avoir manifesté un grand intérêt pour le sujet en acceptant d'être membres du jury.*

*Je suis très honoré à remercier grandement, l'invité, Professeur **TILMATINE Amar** d'avoir accepté de prendre part à mon jury. Je suis réellement reconnaissante pour le soutien qu'il m'a prodigué.*

*Je suis aussi sincèrement reconnaissante envers Dr **NEMMICH Said** et le **Doctorant BECHEKIR Seyf-Eddine** pour leurs soutiens.*

Mes témoignages et mes reconnaissances vont envers les personnes qui m'ont accompagné durant cette période, et qui pour certaines sont activement intervenues dans le déroulement de ces travaux de thèse.

*Finalement, je tiens également à remercier tous les professeurs et les doctorants des laboratoires **ICEPS**, et **APELEC** ainsi que pour leurs soutiens, leurs disponibilités et leurs sympathies.*



DEDICACES

Dédicaces

- *Pour l'esprit de mon père,*
- *A ma mère,*
- *A mon Mari et mes Enfants Wail, Abdelkhalek et Ikhlas*
- *A mon frère et mes sœurs,*
- *A toute ma famille et mes ami(e)s,*
- *A tous ceux qui me sont chers.*

JBILOU Mokhtaria

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABRÉVIATIONS

COP → Conférence des Parties
AEE → Agence pour les Économies d'Énergie
EnR → Energies nouvelles Renouvelables
GES → Gaz à effet de serre
PV → Photovoltaïque
UE → Union Européen
PES → pays Emergents et des sud
PN → pays du nord.
BP → British Pétroleum
Mb/j → million de barils par jour
OMS → organisation mondiale de santé
mds m³ → milliard mètre cubes
TEP → Tonne équivalent pétrole
GPL → Gaz de pétrole Liquéfié
b/j → barils par jour
EPIA → (European Photovoltaic Industry Association)
GPV → Générateur photovoltaïque
AC → Courant alternatif
DC → Courant continu
ppmv → partie par million en volume
TWh → Téra watt-heure, = 1 TWh = 1 milliard de kWh
Eg → Energie de gap
Ec → Energie de conduction
Ev → Energie de valence
CA → Courant alternatif
CC → Courant continu
Vco → Tension à vide
Icc → Courant de court circuit
CS → convertisseur statique
MPPT → Maximum power point Tracking
C → Condensateur
L → Inductance
R → Résistance
U → Tension
f → Fréquence
 α → Angle solaire d'altitude minimum :
 φ → Angle d'azimut du soleil
 β → Angle de décalage des commandes de l'onduleur(chapitre 1)

MLI → Modulation de largeur d'impulsion
U_N → Tension nominal
m → Indice de modulation
f_m → Fréquence du signal modulant
IGBT → Transistor bipolaire à gâchette isolé
THD → Distorsion harmonique totale
DF → Facteur De Distorsion
MOSFET → Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
TCI → Tracé de circuit imprimé assisté par ordinateur.
Sic → Carbure de silicium
PIC → Contrôleur d'interface périphérique
 α → Rapport cyclique(chapitre 2,3,4)
V_s → Tension de sortie
V_e → Tension d'entré
 μc → Microcontrôleur
I/O → (Input/Output) (Entré/sortie)
Ren gen → Rendement du générateur photovoltaïque
Ren acc → Rendement d'une batterie d'accumulateurs
V_{acc} → Tension nominale des accumulateurs
DM → Décharge maximale des accumulateurs
J_{r aut} → Nombre de jours de stockage
DBD → Décharge à barrière diélectrique
SPV → Système photovoltaïque
FF → Facteur de forme
M → Perte de poids
 η → Rendement
P_m → Puissance mesurée
Lu → Lumen unité de rayonnement de flux lumineux
A → Surface du module
FFT → Fast Fourier Transform (transformation de Fourier rapide)

Sommaire

Sommaire.....	1
Introduction générale.....	1
 Chapitre1 : Contraintes énergétiques et climatiques : perspective énergétiques en électricité, Généralités sur les générateurs photovoltaïques	
1.1. Introduction	4
1.2. Ressources et consommation énergétiques mondiales.....	4
1.2.1. Énergie, système énergétique et réseaux électriques:usages et définition.	5
1.2.2. Consommation énergétique mondiale.....	5
1.2.3. Impact sur l'environnement.....	6
a) Émissions de CO ₂ et réglementation. carbone	6
b) Phénomène du réchauffement climatique et les conséquences de..... l'activité énergétique.....	7
1.2.4. Electricité, système et réseau électrique.....	7
1.2.5. Réserves des énergies (non renouvelables) en Algérie.....	8
1.3.Énergies renouvelables	8
1.3.1. Généralités	8
1.3.2. Energies renouvelables, une priorité en Algérie.....	9
1.3.2.1. Potentiel des énergies renouvelables.....	9
a) Potentiel Solaire.....	9
b) Potentiel Eolien.....	9
c) Potentiel de l'Energie Géothermique.....	10
d) Potentiel Hydraulique.....	10
e) Potentiel de la Biomasse.....	10
1.3.2.2. Investissement en Algérie dans le domaine des énergies..... renouvelables.....	10
1.4. Généralités sur les générateurs photovoltaïques.....	11
1.4.1. Introduction.....	11
1.4.2. Systèmes autonomes de production d'énergie.....	12
1.4.3. Energie solaire.....	12
1.4.3.1. Spectre du rayonnement solaire	13
1.4.3.2. Durée d'insolation	14
a) Energie solaire thermique.....	14
b) Energie solaire passive.....	14
c) Energie solaire photovoltaïque.....	14
1.4.3.3. Définition et historique.....	14
1.4.3.4. Générateur photovoltaïque	15
1.4.3.5. Cellule photovoltaïque	16
1.4.4. Technologies photovoltaïques.....	17
1.4.4.1. Silicium monocristallin	17
1.4.4.2. Silicium polycristallin	17
1.4.4.3. Silicium amorphe.....	17
1.4.4.4 Nouvelles technologies photovoltaïques.....	18
1.4.5. Cycle de vie des systèmes photovoltaïques.....	18
1.4.6. Schémas équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	19
1.4.7. Module photovoltaïque.....	20

1.4.7.1. Regroupement en série.....	21
1.4.7.2 Regroupement en parallèle.....	21
1.4.7.3. Regroupement (série et parallèle).....	22
1.4.7.4 Caractéristiques d'un module.....	22
1.4.8. Panneaux solaires.....	23
1.4.8.1 Caractéristiques électriques d'un panneau PV.....	23
a) Caractéristiques $I=f(U)$	23
b) Caractéristiques $P=f(U)$	23
1.4.9. Effet d'ombrage sur l'énergie totale d'un champ PV.....	24
1.4.10. Effet de la température sur la tension en circuit ouvert.....	25
1.4.11. Effet de l'éclairement énergétique sur courant en court-circuit.....	25
1.4.12. Orientation et inclinaison des modules.....	26
1.4.13. Classification des systèmes photovoltaïques.....	26
1.4.13.1. Systèmes autonomes.....	26
1.4.13.2 Systèmes raccordés au réseau.....	27
1.4.13.3 Systèmes hybrides.....	27
1.4.14. Centrale solaire photovoltaïque.....	28
1.4.15. Avantages et Inconvénients de l'énergie PV.....	29
1.5. Conclusion.....	29

Chapitre 2 : Matériels et Méthodes

2.1. Introduction.....	30
2.2. Matériels : Système d'énergie solaire.....	30
2.2.1. Matériels : Régulateur de (charge /décharge) usage et définition.....	31
2.2.2. Matériels : Système de stockage.....	31
A. Méthode de fonctionnement d'une batterie.....	32
B. Méthodes : facteurs principales à surveiller d'une batterie... ..	33
2.2.3. Matériels : Convertisseurs d'électronique de puissance pour systèmes photovoltaïques.....	34
2.2.3.1. Introduction.....	34
2.2.3.2. Matériels : Convertisseur DC-DC (Hacheur).....	35
2.2.3.3. Hacheur Buck.....	37
2.2.3.4. Hacheur buck-boost.....	39
2.2.3.5. Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation (DC-DC)..	39
2.2.4. Matériels : Convertisseurs DC/AC (Onduleurs monophasés).....	40
2.2.4.1. Introduction.....	40
2.2.4.2. Caractéristiques propres à un onduleur pour systèmes photovoltaïques.....	40
2.2.4.3. Différents modèles des onduleurs : Point de vue électronique... de puissance.....	41
2.2.4.4. Onduleurs de tension monophasés.....	41
A. Onduleurs à interrupteurs en parallèles.....	41
a) Configuration à transistors.....	42
b) Commentaire sur les allures des graphes.....	43
B. Onduleurs à interrupteurs en série.....	43
C. Onduleurs en pont (ou en H).....	44
a) Configuration à transistors.....	46
b) Onduleur MLI à modulation de largeur d'impulsion.....	47
2.2.4.5. Harmoniques.....	49
A. Symptômes et conséquences des harmoniques.....	49

B. L'harmonique mesuré en pratique.....	49
2.2.4.6. Paramètre de performance de l'onduleur.....	50
A. Facteur de la n ^{ième} harmonique.....	50
B. Distorsion d'harmonique total THD et le facteur DF.....	50
2.2.4.7. Classification des onduleurs pour systèmes photovoltaïques.....	51
2.2.4.7.1. Onduleur pour application autonome (Stand alone.....	51
Inverter).....	
2.2.4.7.2. Onduleur pour couplage au réseau électrique (Grid.... tied	51
Inverter).....	
2.2.4.7.3. Onduleur hybride (Hybride Inverter).....	51
2.2.4.7.4. Classification selon le nombre d'étages de traitement... de	52
puissance.....	
2.3. Matériels et Méthodes : Système d'ozonation.....	53
2.3.1. Générateur d'ozone	53
2.3.2. L'Ozone.....	53
2.3.2.1. Historique de l'ozone.....	53
2.3.2.2. Généralités sur l'ozone.....	53
2.3.2.3. Avantages et Inconvénients et l'ozone.....	54
2.3.2.4. Réaction de l'ozone avec les substances oxydables.....	54
2.3.2.5. Efficacité de l'ozone.....	55
2.3.3. Système de commande.....	56
2.4. Conclusion.....	56

Chapitre 3 : Application d'un environnement de simulation à l'onduleur monophasé et au système de commande DBD

3.1. Introduction : Objectifs et méthodes de simulation.....	57
3.2. Onduleur avec transformateur.....	58
3.2.1. Partie puissance.....	58
3.2.2. Partie commande.....	59
a) Commande numérique.....	59
b) Les bonnes raisons de choisir ARDUINO.....	59
3.2.3. Simulations et interprétation.....	60
3.2.3.1. Sous environnement (Matlab Simulink)	60
3.2.3.2. Sous environnement (PROTUS ISIS)	64
A. Partie commande.....	64
B. Partie puissance.....	65
3.3. Onduleurs sans transformateurs munis de convertisseur (DC/DC)	66
3.3.1. Partie puissance.....	67
3.3.2. Partie commande.....	67
3.3.4. Simulations et interprétations.....	68
3.3.4.1. Sous environnement (Matlab Simulink)	68
3.3.4.2. Sous environnement (PROTUS ISIS)	69
3.4. Simulation du système de commande du générateur DBD.....	71
3.5. Conclusion.....	72

Chapitre 4 : Système de traitement d'aliments par l'ozone

4.1. Introduction.....	73
4.2. Description du système développé.....	73
4.2.1. Système d'énergie solaire.....	73
4.2.1.1. Description de la structure.....	74

4.2.1.2. Présentation.....	75
4.2.1.3. Raccordement du régulateur photovoltaïque.....	76
4.2.1.4. Raccordement de la batterie.....	76
4.2.1.5. Réalisation et raccordement de l'onduleur photovoltaïque.....	77
A. Réalisation de l'onduleur monophasé avec transformateur....	77
i. Bloc d'Alimentation.....	77
ii. Interrupteurs de puissance.....	77
iii. Driver IR2113.....	77
a) Conception de l'unité de commande.....	78
b) Réalisation de l'onduleur sur plaque d'essai.....	79
c) Routage du circuit électrique.....	80
i. Première étape : Insolation.....	80
ii. Deuxième étape : Révélation.....	80
iii. Troisième étape : Gravure.....	80
iv. Dernières étapes : Perçage et soudage.....	80
v. Fixation des composants de la maquette du circuit.....	81
onduleur.....	81
B. Réalisation d'un onduleur monophasé sans transformateur... muni d'un convertisseur (DC /DC)	82
C. Comparaison entre les deux topologies de l'onduleur.....	84
D. Conclusion.....	85
E. Raccordement de l'onduleur.....	85
4.2.1.6. Présentation du site d'installation du système PV.....	86
A. Évaluation de la ressource énergétique disponible sur le site..	87
B. Évaluation de la demande énergétique (profil de charge).....	89
4.2.1.7. Dimensionnement d'un système PV avec batterie.....	89
A. Estimation des besoins d'électricité (Wh/j).....	89
B. Estimation de l'ensoleillement.....	90
C. Estimation de la capacité de stockage requise (Ah).....	90
D. Estimation du champ photovoltaïque requis (Wc).....	90
4.2.2 Processus d'ozonation.....	90
4.2.2.1. Réalisation et étude du générateur d'ozone.....	90
4.2.2.2. Description du dispositif expérimental.....	91
4.2.2.3. Procédure expérimentale.....	92
4.3. Résultats et discussions.....	93
4.4. Conclusion.....	97

Conclusion Générale

98-99

Bibliographie

Annexes

INTRODUCTION GENERALE

L'obstacle est matière à action.
Marc Aurèle

Introduction générale

Depuis la maîtrise du feu par les Hominidés il y a 300 000 ans, l'énergie et sa maîtrise ont toujours été un facteur-clé du développement des sociétés [1]. La croissance spectaculaire de la population mondiale dans le courant du siècle dernier, le développement industriel et l'accélération de l'urbanisation se traduisent par une demande d'énergie en forte expansion. Notre planète comptera près de 8 milliards d'habitants en 2030, augmentation largement liée à la poussée démographique des pays émergents. On parle d'un triplement de la demande énergétique entre 1970 et 2030 [2]. Les gisements des ressources énergétiques traditionnels d'origines principalement fossiles ne peuvent être exploités que pour quelques décennies ce qui laisse présager d'une façon imminente, une situation de pénurie énergétique au niveau mondial.

De nos jours, la dépendance des énergies fossiles est d'autant plus significative. Ces énergies non renouvelables ont malheureusement un impact très violent sur notre environnement. En effet, elles se sont révélées très polluantes, donc dangereuses pour l'écosystème. Nous remarquons les conséquences de cette pollution atmosphérique tous les jours à travers le réchauffement climatique, les hivers beaucoup plus froids et les étés beaucoup plus chauds la fonte de la banquise est plus grave encore. La recherche d'une source d'énergie de remplacement est d'autant plus importante car ces éléments fossiles sont amenés à disparaître et ne peuvent se renouveler avant des millions d'années [3].

Sous l'égide de l'ONU, le sommet de Rio en 1992 et le protocole de Kyoto en 1997 ont conduit à des accords internationaux visant à stabiliser les émissions globales à l'échéance 2008 – 2012. Pour laisser une plus grande latitude aux pays en voie de développement, les pays industrialisés se sont engagés à réduire en moyenne leurs émissions de 5,2 % et pour sa part, l'Union Européenne a pris l'engagement d'une réduction moyenne de 20% d'ici 2020, par rapport à 1990 [4]. Pour plafonner à 450 ppmv la concentration du CO₂ atmosphérique et limiter à moins de 2°C le réchauffement de la planète au cours du 21ème siècle, plusieurs conférences internationales sur le climat ont été opérées citons celle de Durban en 2011, Doha fin 2012, Varsovie en 2013 COP 21 à Paris en décembre 2015, puis COP 22 à Marrakech en 2016[5].

Elles sont inépuisables, propres et peuvent être utilisées de manière autogérée (dans le même lieu où elles sont produites). Les énergies renouvelables présentent en outre l'avantage additionnel de se compléter entre elles. Par exemple, l'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité les jours dégagés (généralement avec peu de vent), tandis que dans les jours froids et venteux, avec des nuages, ce sont les aérogénérateurs qui prendront le relais et produiront la majorité de l'énergie électrique. Elles connaissent depuis le mi 1990 une vogue de développement qui semble se renforcer d'année en année. Ces énergies sont les plus anciennement utilisées par l'humanité, elles sont essentiellement tirées des cinq éléments : la terre, l'eau, l'air, le feu et le soleil.

Vu sa situation géographique, l'Algérie possède le potentiel solaire le plus élevé du bassin méditerranéen (169440 TWh / an) [6], en recevant en moyenne de 3000 heures/an de rayonnement solaire.

En outre, et malgré les efforts consentis par le gouvernement pour augmenter le taux d'électrification à travers le territoire national, certains ménages des zones rurales sont privés d'électricité. Le coût élevé des investissements nécessaires pour développer les réseaux publics ainsi que les besoins limités des zones isolées concernées continueront à entraver leur connexion

à moyen terme. C'est pourquoi les systèmes photovoltaïques installés sur des sites isolés constituent une alternative intéressante [7].

Par ailleurs, ces ménages sont confrontés au problème du stockage des fruits et légumes. Le stockage des aliments est généralement effectué dans des chambres froides à basse température (inférieure à 10 °C) dont la puissance électrique est relativement élevée (2000 W pour un volume de 20 m³), nécessitant ainsi une grande quantité d'énergie électrique. Par conséquent, en raison du coût élevé de la mise en place des équipements nécessaires pour les chambres froides, tels que la climatisation, les accessoires, etc., de la consommation électrique élevée et de la situation financière précaire des paysans, il est difficile de construire des chambres froides dans des sites isolés ayant l'énergie électrique demandée. C'est pourquoi le traitement à l'ozone des entrepôts d'aliments non climatisés pourrait constituer une solution efficace et économique pour la conservation des produits agroalimentaires.

L'un des usages importants de l'ozone en agriculture est le traitement après récolte des cultures récoltées. L'ozone peut être appliqué aux aliments sous forme de gaz ou sous forme dissoute dans l'eau. Les principaux objectifs de l'application d'ozone au stade post-récolte sont l'inactivation de la croissance bactérienne [8],[9],[10],[11],[12], prévention de la décomposition fongique [13],[14], destruction de pesticides et de résidus de produits chimiques[15],[16] ainsi que le contrôle de l'entreposage ravageurs [17],[18].

L'ozone est de plus en plus utilisé pour le stockage des fruits, des légumes, des fleurs des viandes, des poissons, des fromages, etc.... afin de renforcer la qualité de la conservation du marché, de lutter contre les agents pathogènes, les moisissures, les champignons, les levures et autres micro-organismes. Dans [19], il est indiqué que la durée de conservation des fraises peut être doublée si une dose de 2 à 3 ppm (particules par million) d'ozone est appliquée régulièrement pendant quelques heures par jour. Les fruits et les légumes tels que les pommes, les pommes de terre, les tomates et bien d'autres peuvent être désinfectés et conservés plus longtemps grâce à l'ozone. Dans [20] il est indiqué l'application de l'ozone à des concentrations réduites dans les chambres froides sur les concombres, les champignons, les pommes et les poires à différentes températures peuvent augmenter la durée de stockage.

De plus, dans [21], il est décrit un système solaire photovoltaïque alimentant un générateur d'ozone utilisé pour le traitement de l'eau. Il a été démontré que l'optimisation des angles d'orientation des panneaux photovoltaïques pouvait augmenter l'efficacité du système de traitement de l'eau à l'ozone malgré les perturbations climatiques dues principalement au passage des nuages.

L'objectif de ce travail est arbitré en deux angles : -assurer une alimentation autonome en énergie électrique photovoltaïque et augmenter la durée de stockage des aliments dans des locaux situés dans des sites isolés ne disposant pas de système de climatisation utilisant une désinfection à l'ozone.

La charge étant alimentées en courant alternatif, il est nécessaire de convertir le courant continu produit par le GPV, en courant alternatif avec les mêmes caractéristiques (tension, fréquence déphasage, ...) que le courant qui provient du réseau. Cette transformation est réalisée grâce à un dispositif appelé onduleur.

Étant monophasés ou triphasés, autonomes ou non autonomes, de tension ou de courant à deux niveaux ou multi niveaux, les onduleurs sont basés sur une structure en pont ou en demi pont, constituée le plus souvent d'interrupteurs électroniques tels que les transistors de puissance ou thyristors. Par un jeu de commutations commandées de manière appropriée

(généralement une modulation de largeur d'impulsion), on module la source afin d'obtenir un signal alternatif de fréquence désirée [1,7].

Cette thèse propose une approche basée sur l'étude et la réalisation d'un onduleur destiné à convertir la tension continue délivrée par un panneau photovoltaïque en tension alternative en utilisant une commande MLI pour assister les interrupteurs dans le processus de commutation.

L'objectif attendu est l'alimentation en énergie électrique d'un foyer dans une région isolée de la wilaya de Sidi Bel Abbés, en lui offrant le confort énergétique, qui se présente autant qu'une énergie qui sert à alimenter une chambre conservatrice des aliments grâce à l'utilisation de l'ozone. Le fonctionnement du système mixte solaire PV et ozonation est marqué par le résultat des essais sur des substances de fruits et légumes placés dans une chambre du site isolé testés durant une période bien déterminée. Ceci clarifie l'impact du profil dynamique de la consommation énergétique sur la fiabilité du système PV d'une part et le pouvoir désinfectant de l'ozone d'autre part

Le manuscrit est organisé de la manière suivante : **Le Premier Chapitre** pose les cadres à la fois contextuel, conceptuel et technique, nécessaires à l'appréhension du système énergétique émergente au monde en particulier en Algérie. Il caractérise les contraintes énergétiques et climatiques auxquelles fait face le système énergétique dominant carboné. Une densification du réseau autour du déploiement des technologies renouvelables en particulier l'énergie solaire photovoltaïque est présentée. Ce chapitre ouvre les volets sur l'énergie solaire comme une opportunité majeure dans la mise en œuvre de la production énergétique. Une étude de la source photovoltaïque, ses caractéristiques et les techniques de son utilisation sont catalogués. **Le Second Chapitre** intitulée matériels et méthodologies met l'accent sur les convertisseurs liés au système photovoltaïque et clarifie une classification des différentes topologies d'onduleurs pour systèmes photovoltaïques ainsi que les commandes qui lui sont associées. Il met en évidence le système d'ozonation ainsi que ses différentes parties. **Le Troisième Chapitre** est consacré à la simulation de deux topologies d'onduleur en présentant trois types de commandes ainsi que la simulation de la commande dédiée au système d'ozonation.

Le Quatrième Chapitre intitulé « Système de traitement d'aliments par l'ozone », détaille la description de deux systèmes : énergie solaire PV et ozonation. Nous débutons par repérer la position idéale du générateur PV et tentons de dimensionner le système PV avec batterie. En se servant du logiciel HOMER on a pu avoir le profil journalier et la distribution horaire de rayonnement solaire d'un foyer situé dans une zone éloignée au sud de la wilaya de Sidi Bel Abbes. Par la suite nous dévoilons la réalisation économique du convertisseur continue alternatif (onduleur) commandé par modulation de largeur impulsion. Sous un autre angle ce chapitre désigne la charge alimentée par le système photovoltaïque, qui se présente autant que générateur d'ozone à décharge à barrière diélectrique (DBD) de surface. Le processus d'ozonation doté d'un système de déclenchement automatique, est appliqué pour désinfecter l'air afin d'aboutir à la prolongation de la durée de conservation des produits agroalimentaires (légumes, et fruits) dans une chambre du dit site isolé.

Une Conclusion générale clôture et souligne une série d'orientations futures de développement sur la base de l'état actuel de la recherche.

CHAPITRE 1



Contraintes énergétiques et climatiques
Perspectives énergétiques en électricité

Chapitre 1 : Contraintes énergétiques et climatiques : perspectives énergétiques en électricité

1.1. Introduction :

Dans un système énergétique dominant basé sur des ressources fossiles carbonées, l'électrification reste encore aujourd'hui un symbole de l'entrée des sociétés dans la modernité. Ce système présente, à l'échelle mondiale, deux caractéristiques majeures : la raréfaction apparente des ressources énergétiques fossiles à moyen et long terme et le réchauffement climatique [1]. Pour remédier aux problèmes de l'épuisement progressif des combustibles fossiles (pétrole, gaz et charbon) et les émissions des gaz à effet de serre, la production de l'énergie électrique par des moyens propres (non polluants) est devenue une nécessité primordiale [3]. Ces moyens sont connus sous le nom d'énergies renouvelables. L'électricité renouvelable, aussi appelée électricité verte ou électricité propre, est produite uniquement à partir des sources d'énergie renouvelables : l'éolien, le solaire photovoltaïque, l'hélio thermodynamique, la géothermie, la biomasse solide et notamment le bois, le biogaz l'hydraulique, les énergies marines et les déchets. La composante essentielle de toutes ces énergies est l'énergie solaire.

Cette dernière contribue à la satisfaction des besoins mondiaux qui ne cessent d'augmenter et surtout de réduire la pollution de l'environnement par les gaz à effet de serre (GES) car elle est propre, sans bruit et non épuisable. Le flux d'énergie solaire reçu annuellement sur la surface de la terre représente environ 10000 fois la consommation d'énergie mondiale, et en fait l'une des ressources renouvelables les plus abondantes. Une partie de l'énergie peut être convertie directement en électricité par des capteurs : c'est l'énergie photovoltaïque (PV) [22].

La filière photovoltaïque est très liée aux filières de : physique générale, physique des semi-conducteurs, électronique de puissance et électrotechnique

Dans ce chapitre, on va présenter un constat sur la consommation de l'énergie dans le monde des concepts de base sur les énergies renouvelables et en particulier l'énergie solaire photovoltaïque.

1.2. Ressources et consommation énergétiques mondiales :

L'énergie caractérise la capacité à produire des actions, par exemple à engendrer du mouvement, modifier la température d'un corps ou à transformer la matière. L'énergie provient des différentes sources que l'on trouve dans la nature : le bois, le charbon, le pétrole le gaz, le vent, le rayonnement solaire, les chutes d'eau, la chaleur interne de la terre et l'uranium. Elle peut prendre différentes formes : chaleur, énergie musculaire, énergie mécanique, chimique, et énergie électrique (voir figure 1.1). Ses formes multiples peuvent se transformer l'une en l'autre [2].

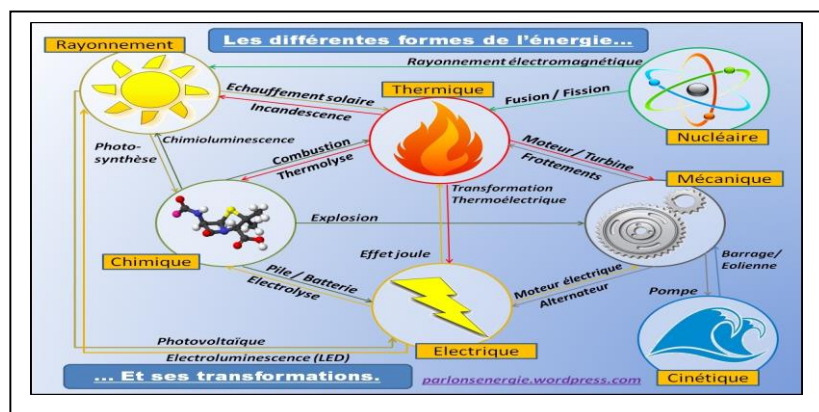


Figure 1.1. Relations entre les différentes formes d'énergie [2]

1.2.1. Énergie, système énergétique et réseaux électriques : usages et définitions

L'énergie est, au sens général, l'apport nécessaire à un système matériel pour lui faire subir une transformation (déplacement, modification de la forme ou changement de structure). Ce terme désigne la capacité qu'a un corps ou un système de produire le travail susceptible d'entraîner un mouvement, une production de chaleur ou d'ondes électromagnétiques. L'énergie est à la base de multiples activités humaines et le progrès socio-économique est difficilement concevable sans elle. En effet, la production et l'utilisation de l'énergie sont une des conditions techniques fondamentales de la production en général et de la progression des sociétés humaines. De leur importance dépend l'aptitude des divers groupements humains à produire ce qui leur est nécessaire pour vivre et pour assurer leur indépendance économique et politique.

Pour être consommées, les énergies doivent subir une transformation. Quatre stades peuvent être distingués : [1],[22]

- (i) L'énergie primaire est l'énergie telle qu'elle est fournie par la nature (le pétrole brut les schistes bitumineux, le gaz naturel, les combustibles minéraux solides la biomasse, le rayonnement solaire, l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne la géothermie, l'énergie nucléaire) ;
- (ii) L'énergie secondaire est une énergie primaire ayant subi une transformation (essence, électricité, ...etc) ;
- (iii) L'énergie finale est l'énergie qui est distribuée au consommateur via des circuits et des réseaux de distribution ;
- (iv) L'énergie utile est celle qui procure le service énergétique recherché par l'utilisateur final [22].

Il existe différentes formes d'énergie : chimique, thermique, rayonnante, électrique, nucléaire mécanique... etc. L'énergie est classée en deux catégories :

- (i) Puisées dans le sol, les énergies dites de « stock » sont issues des gisements de combustibles fossiles (charbon, gaz naturel et pétrole) et d'uranium (nucléaire) et se caractérisent par leur finitude à l'échelle humaine ;
- (ii) Les énergies dites de « flux » sont générées par des processus naturels tels que le vent (énergie éolienne), le rayonnement solaire (photovoltaïque ou thermique) l'eau (hydroélectricité), la chaleur de la terre (géothermie), les végétaux et les déchets (biomasse).

1.2.2. Consommation énergétique mondiale :

Depuis 1965, la consommation en énergie primaire commerciale dans le monde est en croissance constante. Le taux de consommation en énergie primaire commerciale est aujourd'hui de + 2 % par an en moyenne. L'augmentation de la consommation mondiale en énergie est corrélée à la hausse de la population qui croît au taux annuel moyen de +1 % : 3,7 milliards d'individus en 1970, 6 en 2000 et 8,2 prévus en 2030. Mais elle est davantage due à la croissance économique soutenue des PES (pays Emergents et des sud) et à l'amélioration relative du niveau de vie de leurs populations qui tendent à adopter des modes de consommation très énergivores, à l'image des PN (pays du nord). En effet « le centre de gravité de la demande énergétique se déplace résolument vers les économies émergentes, en particulier vers la Chine, l'Inde et le Moyen-Orient » [23].

À partir de 1997 la consommation en énergie primaire des régions du monde auxquelles appartiennent les PES – telles que l'Asie-Pacifique, le Moyen-Orient, l'Amérique du Sud et Centrale – augmente de manière plus importante et plus rapide (voir figure 1.2, figure 1.3). À l'issue de la crise financière asiatique de 1997, les pays émergents ont opéré une modification profonde de leurs politiques économiques (vastes programmes de réformes d'ordre financier institutionnel et social) [24].

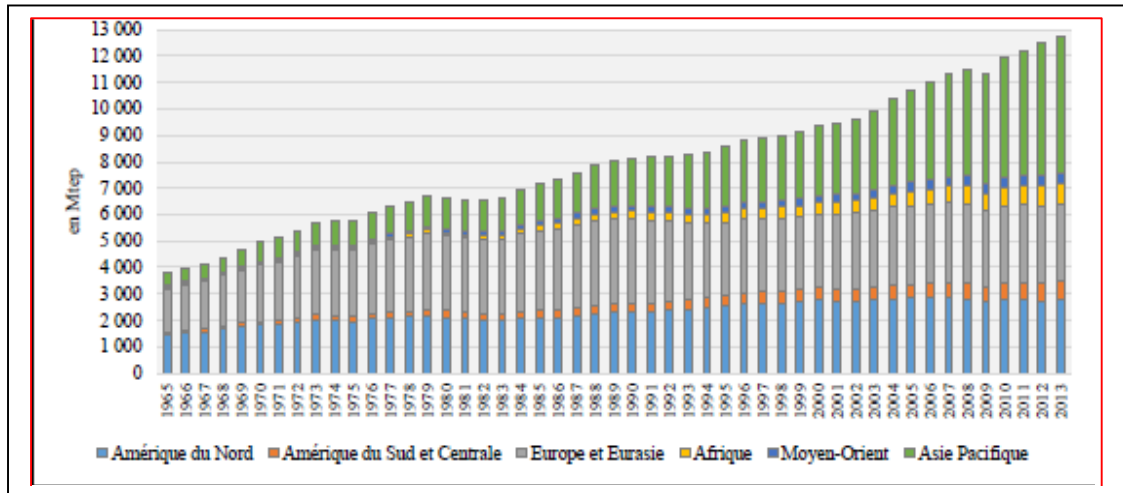


Figure 1.2 . Consommation régionale en énergie primaire commerciale entre 1965 et 2013 [22]

D’après le rapport de la *British Petroleum* en date de 2013, la Chine et l’Inde représentent à elles seules environ 90 % de la hausse de la consommation en énergie primaire commerciale enregistrée en 2012. La consommation de l’Amérique du Nord et de l’Europe et Eurasie est quant à elle restée plus ou moins équilibrée [25].

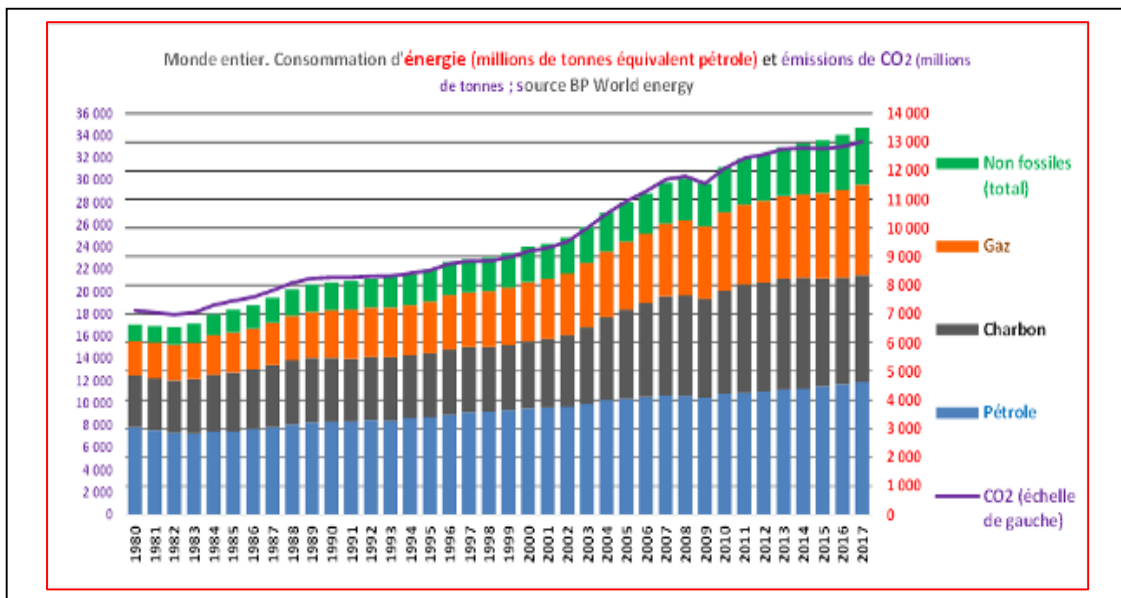


Figure 1.3. Consommation d’énergie et émission de CO2 entre 1980 et 2017 [26]

Au total, les énergies fossiles auraient encore compté pour 85,2% de la consommation mondiale d’énergie primaire en 2017 selon les dernières données de BP(British Pétroleum) (85,5% en 2016). Le pétrole reste de loin la principale source d’énergie du mix énergétique mondial (34,2%), avec une consommation de 1,7 million de barils par jour (Mb/j) en 2017 [26].

1.2.3. Impact sur l’environnement :

a) Émissions de CO₂ et réglementation carbone :

Après trois années de baisse, les émissions de CO₂ - qui représentent 78 % des émissions de gaz à effet de serre - augmentent de 2 % en 2017. La Chine et d’autres pays en développement en sont les plus gros émetteurs. Le secteur de l’énergie produit 46 % du CO₂ mondial, vient ensuite l’industrie avec 23 %, les transports avec 20,5 % et enfin le secteur du résidentiel du tertiaire, et de l’agriculture avec 10,5 %. Le rythme d’évolution des émissions de CO₂

a néanmoins été divisé par deux depuis 2000, et une tendance à la baisse se dessine sur le long terme. Malgré ces progrès, la pollution continue de tuer près de neuf millions de personnes par ans selon l’OMS, soit 16 % des décès annuels, et une tendance au réchauffement global se confirme. 2017 est en effet la troisième année la plus chaude après 2015 et 2016. Pour enrayer ce phénomène, de plus en plus de pays instaurent des marchés carbonés [1],[27].

b) **Phénomène du réchauffement climatique et les conséquences de l’activité énergétique**

Le changement climatique est considéré comme une limite à laquelle se confronte le système énergétique dominant. Le lien entre l’activité énergétique et la hausse des émissions de GES à l’origine d’un réchauffement climatique anthropique [28].

Les effets attendus du réchauffement climatique.

Le réchauffement climatique impactera de nombreux domaines tels que le climat les écosystèmes ou encore des secteurs comme l’énergie, l’alimentation ou la santé. Les scientifiques considèrent ainsi qu’une hausse de la température mondiale de 2°C par rapport au niveau préindustriel entrainera la multiplication d’événements météorologiques extrêmes (tempêtes, inondations, sécheresses...etc), mais également un bouleversement des écosystèmes, les plus fragiles surtout, avec une extinction de 20 à 30 % des espèces de la faune et de la flore. Des crises liées aux ressources alimentaires sont également annoncées car dans de nombreuses parties du monde – Asie, Afrique, les zones tropicales et subtropicales notamment – les productions agricoles diminueront, provoquant des pénuries alimentaires causes de conflits et de migrations des populations. Par ailleurs, l’augmentation du niveau de la mer (de l’ordre de 18 à 59 cm d’ici 2100) due à la fonte des glaces – la surface de l’océan Arctique couverte de glaces a diminué de moitié en trente ans – devrait provoquer l’inondation de certaines zones côtières (notamment les deltas en Afrique et en Asie) et faire disparaître des pays entiers, comme les Maldives, [28],[29],[30].

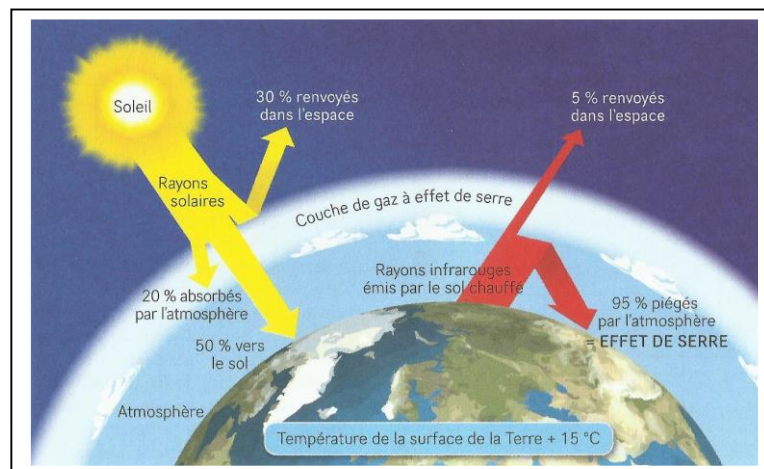


Figure 1.4. Mécanismes de l’effet de serre naturel [28]

1.2.4. Electricité, système et réseau électrique :

L’électricité constitue une énergie secondaire (ou un vecteur d’énergie), car elle est produite grâce à la transformation d’une énergie primaire au moyen d’un convertisseur énergétique. L’électricité peut être produite à partir d’une centrale thermique, hydroélectrique, nucléaire ou à partir de sources d’énergies renouvelables. Comparée à d’autres formes d’énergie elle possède une grande souplesse d’utilisation et peut être très performante dans des applications industrielles. Elle est utilisée dans tous les secteurs économiques (agriculture, industrie, tertiaire), et n’a pratiquement pas de concurrents dans des secteurs tels que les télécommunications, l’informatique ou l’éclairage [31]. L’électricité présente néanmoins des spécificités physiques qui rendent difficile l’organisation du marché :

(i): le kWh n'est pas un bien stockable économiquement ; (ii): l'électricité circule sur les réseaux en fonction des lois de Kirchhoff et suit, de façon non prévisible, le chemin de moindre résistance ; (iii): l'équilibre de l'offre et de la demande doit être instantané ; (iv): l'électricité est un bien essentiel, non substituable. Ainsi, toute interruption de fourniture peut nuire gravement la vie économique et domestique. Le nombre de convertisseurs utilisables pour obtenir de l'électricité est faible, mais les filières énergétiques de production d'électricité elles sont très diverses, les bâtiments ; intensité lumineuse d'une lampe... etc.) [32].

1.2.5. Réserves des énergies (non renouvelables) en Algérie :

À l'échelle mondiale, les capacités gazières algériennes sont très significatives. Le pays possède entre 1,3% soit 2000 Mds m³ [33] et 2,4% soit environ 4 500 Mds de m³ des réserves mondiales de gaz, et a produit en 2012, 73,4 Mds m³ de gaz naturel commercialisable soit 2,4% de la production mondiale, ce qui place l'Algérie au 9ème rang des pays producteurs de gaz certes loin derrière les « géants » (Etats-Unis, Russie, Iran), mais juste après les « grands » (Norvège, Qatar, Chine) et elle en est le premier (producteur) en Afrique [34].

Le poids de l'Algérie dans la production pétrolière mondiale est plus limité. Avec une production de 73 M TEP en 2012 soit 1,8% de la production mondiale, l'Algérie se classe au 17ème rang mondial, loin derrière les «géants» (Russie, Arabie Saoudite Etats-Unis) ou les «grands»(Iran, Chine, Canada, Mexique),et au 3ème rang en Afrique après le Nigéria et l'Angola malgré le triplement de sa production en 50 ans. La production d'hydrocarbures connaît une diversification croissante. L'exploitation du pétrole en Algérie qui représentait 95,5% de la production d'hydrocarbures en 1970 a été progressivement supplantée par le gaz au milieu des années 90 pour ne représenter que 50% de la production en 2012 [33]. En outre, les produits raffinés à forte valeur ajoutée, soient les produits pétroliers dérivés du pétrole brut, les condensats et le Gaz de pétrole Liquéfié (GPL) enregistrent un essor rapide. Leur production a augmenté de 32,5% entre 2000 et 2010 en passant de 430 000 b/j à 570 000 b/j. Il est à noter que la production des deux produits a atteint en 2017, 7980 K Tonnes en GPL et 9 219 K Tonnes en condensats [35].

1.3. Énergies renouvelables :

1.3.1. Généralités :

Une énergie est dite renouvelable quand, sur une centaine d'années, on n'en consomme pas plus que la nature n'en produit. Le caractère renouvelable ou non d'une source d'énergie dépend de la rapidité avec laquelle elle est utilisée. La source principale des énergies renouvelables facilement accessible est le soleil. En moyenne, le taux de rayonnement solaire intercepté par la surface de la terre est environ 8000 fois plus grand que la consommation d'énergie primaire. Les EnR (Énergies Renouvelables) sont au nombre de quatre (4) (voir figure 1.5) : énergie solaire, énergie éolienne, biomasse et énergie hydroélectrique. De vie d'homme, il y aura toujours du soleil, du vent (créé par les différences de températures de zones chauffées ou non par le soleil), de la biomasse végétale ou animale ou de l'eau qui coule et qui crée une énergie cinétique. Les énergies fossiles sont, quant à elles, d'origine naturelles mais se renouvellent bien trop lentement pour pouvoir être utilisées de manière illimitées par l'homme.



Figure 1.5. Sources des énergies renouvelables

1.3.2. Energies renouvelables, une priorité en Algérie [36] :

L’Algérie amorce une dynamique d’énergie verte en lançant un programme de développement des énergies renouvelables et d’efficacité énergétique. Cette vision du gouvernement algérien s’appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d’énergie et préparer l’Algérie de demain. Grâce à la combinaison des initiatives et des intelligences, l’Algérie s’engage dans une nouvelle ère énergétique durable. Le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d’origine renouvelable de l’ordre de 22 000 MW à l’horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l’option de l’exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent (voir figure 1.6).

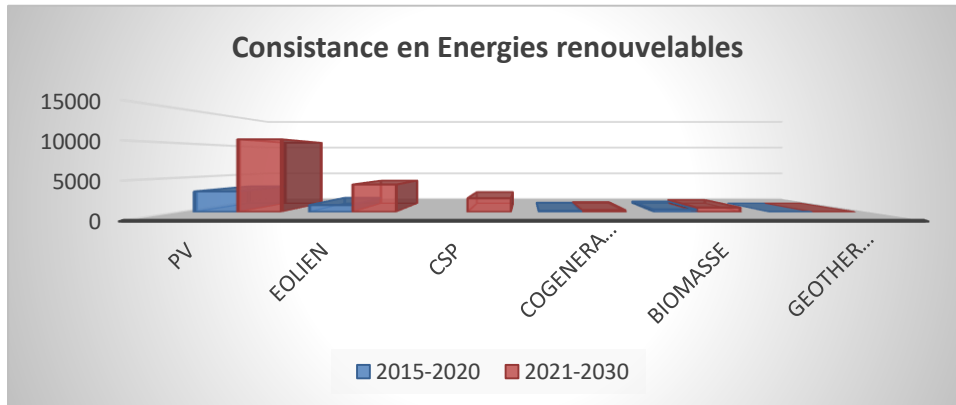


Figure 1.6. Consistance en énergie renouvelables

1.3.2.1. Potentiel des énergies renouvelables [36]:

a) Potentiel Solaire :

Vue de sa localisation 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 annuellement sur une surface horizontale de 1m² soit près de 3 KWh/m² au nord et dépasse 5,6 KWh/m² au Grand Sud (TAMENRASSET) (voir figure 1.7).

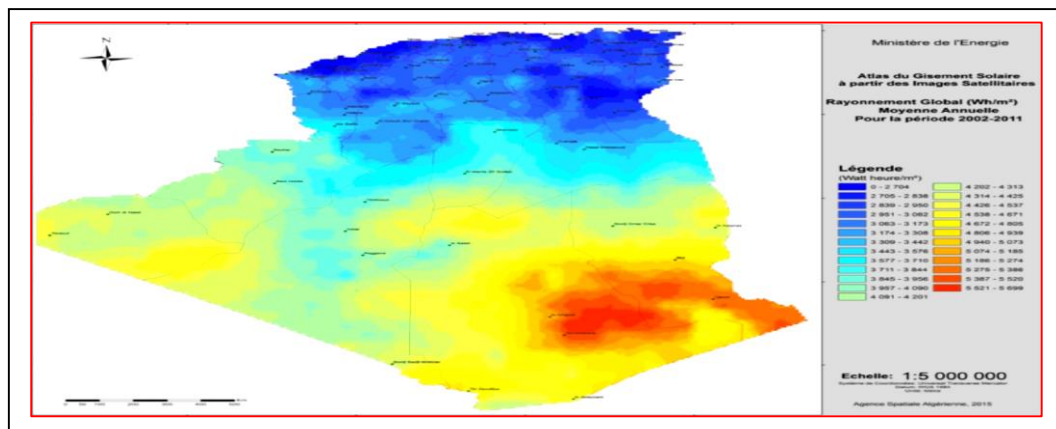


Figure 1.7. Carte de l’Irradiation globale, annuelle Moyenne (Période 2002-2011)

b) Potentiel Eolien :

Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 Km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l’Atlas tellien et l’Atlas saharien. Entre elles, s’intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise

par un climat saharien, est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-Est, avec des vitesses supérieures à 7 m/s et qui dépassent la valeur de 8 m/s dans la région de Tamanrasset. Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tebessa, Biskra, M'sila et El bayadh (6 à 7 m/s) et le Grand Sud (>8m/s) (voir figure 1.8).

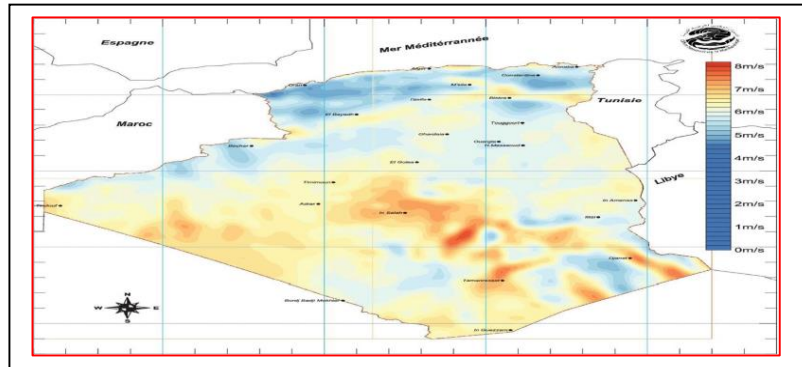


Figure 1.8. Carte du vent Annuel moyen à 50m période (2001 -2010)

c) Potentiel de l'énergie géothermique [36] :

La compilation des données géologiques, géochimiques et géophysiques a permis d'identifier plus de deux cent (200) sources chaudes qui ont été inventoriées dans la partie Nord du Pays. Un tiers environ (33%) d'entre elles ont des températures supérieures à 45°C. Il existe des sources à hautes températures pouvant atteindre 118°C à Biskra. Des études sur le gradient thermique ont permis d'identifier trois zones dont le gradient dépasse les 5°C/100m. (Zone de Relizane et Mascara, Zone de Aïne Boucif et Sidi Aïssa, Zone de Guelma et Djebel El Onk).

d) Potentiel Hydraulique

Les quantités globales tombant sur le territoire algérien sont importantes et estimées à 65 milliards de m³, mais finalement profitent peu au pays : nombre réduit de jours de précipitation, concentration sur des espaces limités, forte évaporation, évacuation rapide vers la mer. Schématiquement, les ressources de surface décroissent du nord au sud. On évalue actuellement les ressources utiles et renouvelables de l'ordre de 25 milliards de m³, dont environ 2/3 pour les ressources en surface. 103 sites de barrages ont été recensés. Plus de 50 barrages sont actuellement en exploitation [37].

e) Potentiel de la Biomasse

o Potentiel de la forêt:

Le potentiel actuel est évalué à environ 37 Millions de TEP (Tonnes Equivalent Pétrole). Le potentiel récupérable est de l'ordre de 3,7 Millions de TEP.

o Potentiel national des déchets ménagers et assimilés :

05 millions de tonnes de déchets urbains et agricoles ne sont pas recyclés. Ce potentiel représente un gisement de l'ordre de 1.33 millions de TEP/an.

1.3.2.2. Investissement en Algérie dans le domaine des énergies renouvelables [38],[36] :

Dans le cadre de la mise en œuvre du programme de développement des énergies renouvelables, et en plus des centrales réalisées sur le territoire de l'Algérie, un appel à investisseurs pour l'installation d'autres de production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelable de grande capacité, sera lancé par le secteur de l'énergie.

Une opération de prospection d'assiettes de terrains a été lancée par le Ministère de l'Energie en collaboration avec les Directions de l'Energie de Wilaya, les sociétés de Distribution et les services de GRTE, afin de déterminer la disponibilité des terrains en précisant notamment leurs superficies et leurs emplacements par rapport aux postes électriques. Dans une première phase

quinze (15) Wilayas ont été identifiées : Biskra, El-Oued, Ghardaïa, Khenchela, Laghouat Naâma, Djelfa, Tébessa, Illizi, Ouargla, Adrar, Bechar, El-Bayadh, Tamanrasset, Tindouf.

Wilaya	Nombre de Sites	Superficie Globale (ha)	Irradiation Solaire (KWh/m ² /an)
Bechar	09	3350	3-4,5
Biskra	09	1450	2-3,2
Djelfa	04	340	2,9-3,4
El-oued	08	3194	2,9-3,3
Naama	06	725	2,7-3,8
Ouargla	18	1916	2,7-4,7
Ghardaia	13	227	3,7-4,7
MENEA	09	200	
TOTAL	76	11402	

Tableau 1.1. Terrain d'assiette devant abriter les futures centrales [36]

1.4. Généralités sur les générateurs photovoltaïques :

1.4.1. Introduction :

Chaque jour, la terre reçoit sous forme d'énergie solaire l'équivalent de la consommation électrique de 5.9 milliards de personnes pendant 27 ans. La technologie photovoltaïque permet de transformer une partie de cette énergie en électricité. Cette transformation s'effectue sans bruit, sans émission de gaz : elle est donc par nature totalement propre. Par ailleurs, l'absence de mise en mouvement de pièces mécaniques lui confère un niveau de fiabilité inégalable (durée de vie moyenne d'un module estimée à plus de 30 ans) [39]. Au niveau mondial le marché des systèmes photovoltaïques, connaît depuis maintenant plus de 10 ans, un taux de croissance très élevé, de l'ordre de 30 à 40 % par an [32]. Cette croissance exceptionnelle due principalement aux systèmes photovoltaïques raccordés au réseau de distribution d'électricité, se traduit bien évidemment par des innovations technologiques et une baisse de coûts des modules photovoltaïques mais aussi à des efforts importants de recherche et de développement dans le domaine de l'électronique de puissance.

EPIA (European Photovoltaic Industry Association) prévoit l'installation de 1 800 000 MW en 2030 du parc PV, pour une production représentant 14% de la consommation mondiale d'électricité. À cette échéance, le solaire photovoltaïque permettra de fournir de l'électricité à plus de 4,5 milliards d'individus, dont 3,2 milliards dans les pays en développement où le photovoltaïque constitue un mode économique de production d'électricité dans les zones éloignées des réseaux [39].

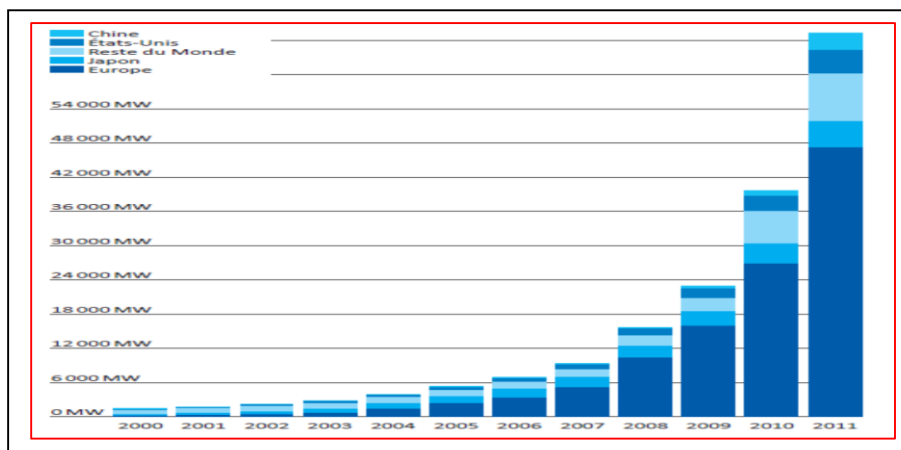


Figure 1.9. Développement de la capacité photovoltaïque mondiale (MW) [34]

1.4.2 Systèmes autonomes de production d'énergie :

Les systèmes autonomes de génération d'électricité utilisent les sources renouvelables locales. On y trouve des panneaux photovoltaïques, des éoliennes, générateur diesel, et des micros turbines [1]. L'électricité provenant des sources renouvelables est intermittente, dépendante des conditions climatiques. Ces générateurs renouvelables sont couplés à un système de stockage assurant une disponibilité en continue d'énergie. D'autre part ces générateurs renouvelables sont couplés à un système de stockage assurant une disponibilité en continue d'énergie. Généralement, le stockage est assuré par des batteries [40] (voir figure 1.10).

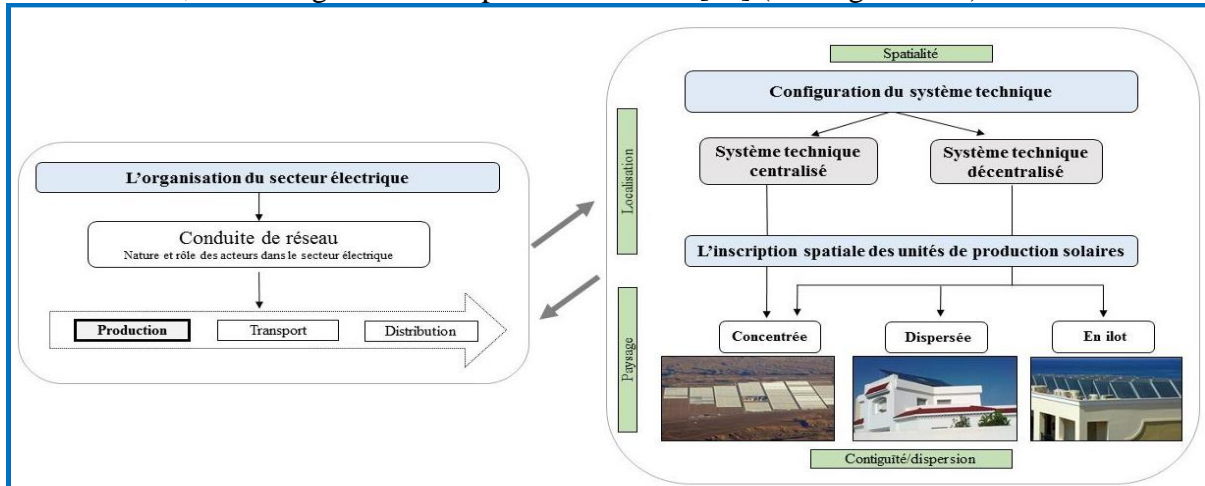


Figure 1.10. Système autonome de production d'électricité [22]

1.4.3. Energie solaire :

Le soleil est une étoile, située à environ 150 millions Km de la terre. Le soleil a un diamètre de 1139 000 Km, soit plus de 100 fois notre planète. Il est composé d'hydrogène et d'hélium. La terre décrit autour du soleil dans un plan dit "plan de l'écliptique", la terre tourne sur elle-même, selon un axe incliné de 23 270 sur le plan de l'écliptique [41].

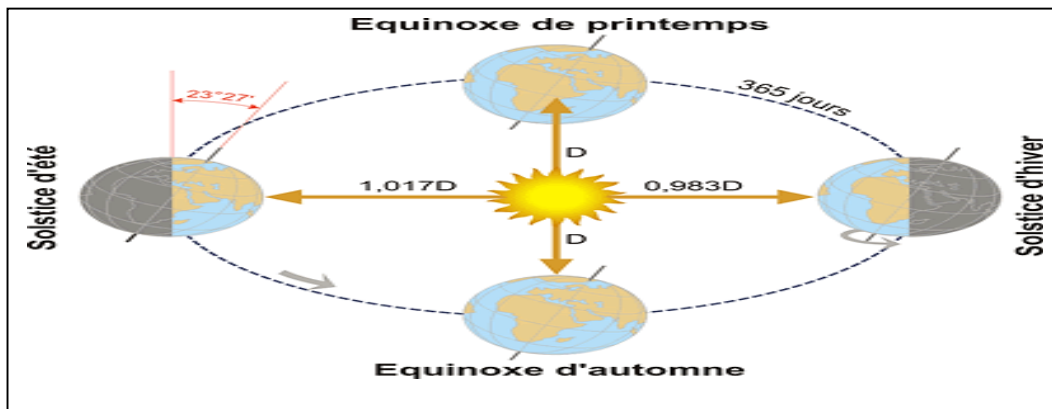


Figure 1.11. Mouvement de la terre [41].

Le **rayonnement solaire** constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante : La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2 et 4.10⁶m. Sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent. Il se présente en :

- ♦ **Rayonnement direct qui** est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, en formant des ombres concentrés par des miroirs. On peut les mesurer par un pyréliomètre.
- ♦ **Rayonnement diffus** qui est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions.
- ♦ **Rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol** ce n'est que le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- ♦ **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. Les stations météorologiques généralement mesurent le rayonnement global horizontal par un pyromètre placé horizontalement à l'endroit requis.

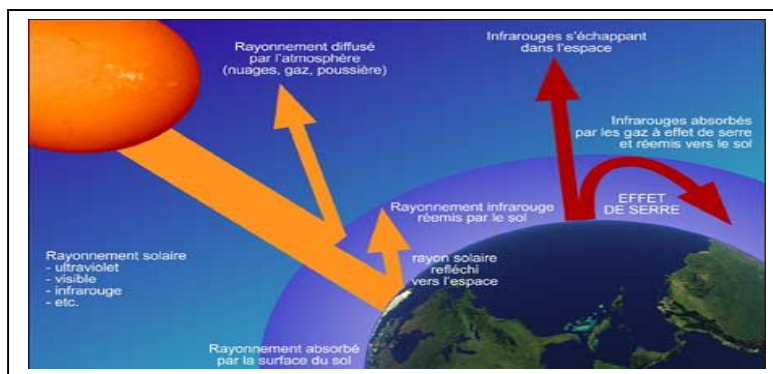


Figure 1.12. Rayonnement solaire [42]

1.4.3.1 Spectre du rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est l'ensemble du rayonnement émis par le soleil. En plus des rayons cosmiques, particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées, le soleil émet des ondes électromagnétiques dont le spectre s'étend des ondes radio aux rayons gamma en passant par la lumière visible. L'émission d'ondes électromagnétiques par le soleil est bien modélisée par un corps noir à 5800 Kelvin, donc par la loi de Planck. Le pic d'émission dans le jaune ($\lambda=570$ nm), et la répartition du rayonnement est à peu près pour moitié dans la lumière visible, pour moitié dans l'infrarouge, avec 1% d'ultraviolets [43].

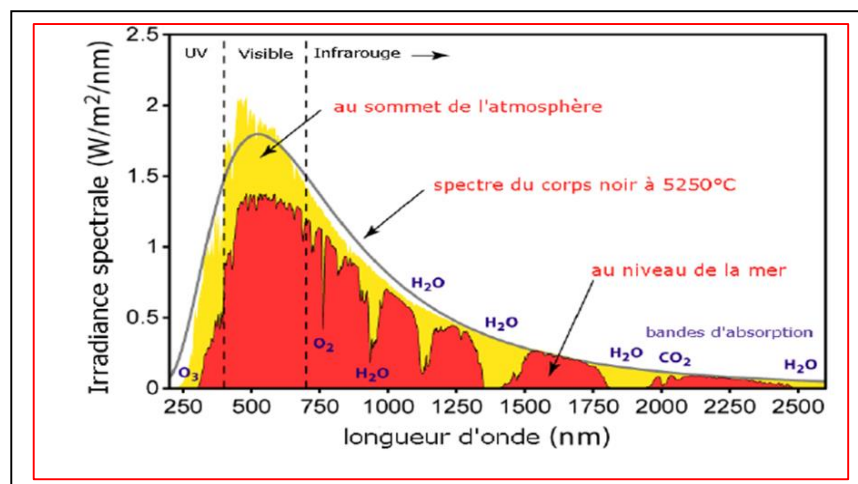


Figure 1.13. Spectre du rayonnement solaire [43]

La répartition de cet éclairement se résume dans le tableau 1.2

Région spectrale	Longueur d'onde (μm)	Eclairement énergétique (W / m^2)	Pourcentage(%)
Infrarouge	> 0,7	695	50,8
Visible	0,4 à 0,7	559	40,9
UV-A	0,32 à 0,4	86	6,3
UV-B	0,28 à 0,32	21	1,5
UV-C	< 0.28	6	0,4

Tableau 1.2. Eclairement énergétique du rayonnement solaire hors Atmosphère pour divers domaines de longueur d'onde [2]

1.4.3.2. Durée d'insolation :

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le levé et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est réalisé au moyen de l'héliographe de Campbell– Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif, du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil. L'énergie solaire est utilisée selon plusieurs procédés [44] :

a. Energie solaire thermique : Elle consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

b. Energie solaire passive : C'est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser directement la lumière pour le chauffage.

c. Energie solaire photovoltaïque : Elle consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon.

Le générateur renouvelable sélectionné pour notre étude est un champ photovoltaïque (PV). Généralement, le stockage est assuré par des batteries. Ces systèmes, appelés systèmes PV Batteries, ont actuellement une des solutions les plus utilisées. Le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur PV, en attente pour une utilisation ultérieure. La gestion de l'énergie solaire nécessite d'envisager des stockages suivant les conditions météorologiques et qui vont répondre à deux fonctions principales [45] :

- ✓ Fournir à l'installation de l'électricité lorsque le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou par mauvais temps par exemple).
- ✓ Fournir à l'installation des puissances plus importantes que celles fournies par le générateur PV.

1.4.3.3. Définition et historique :

Le mot " photovoltaïque " vient de Grec " photo " qui signifie la lumière et de " voltaïque " qui tire son origine du nom d'un physicien Italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électricité » [46].

Evénements important marquant l'histoire du photovoltaïque sont illustrés au tableau 1.3 [47]:

Année	Evénement
1839	Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque
1883	Fritts réalise des cellules solaires de grandes surfaces à base de Se
1954	Des rendements de 6% sont obtenus : Si (Bell Lab, USA) and Cu ₂ S/CdS (Air Force, USA)
1955	Hoffman électroniques (USA) propose des cellules Si à 2 % de rendement à \$1500/W
1958	Kearns et Calvin ont démontré l'effet photovoltaïque d'une cellule à base de MgP
1970	Première cellule solaire à hétéro structures GaAs en URSS
1973	Première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université Delaware, USA ; à base de Cu ₂ S
1980	Première cellule à base de Cu ₂ S/CdS délivrant un rendement > 10%
1982	Première unité de production de 1 MW (Californie, USA) avec des cellules Arco Si
1985	Les cellules à base de Si donnent un rendement > 20% sous le rayonnement solaire
1994	Des rendements > 30 % avec des cellules à concentration multi jonctions à base de GaInP/GaAs (NREL, USA)
1996	Les cellules solaires hybrides à colorants atteignent un rendement de 11%
1998	Cellules couches minces Cu(InGa) atteignent un rendement de 19%
2002	2000 MW installé en matière du photovoltaïque
2007	Cellules solaires organiques en structure tandem avec un rendement de 6,5 % (UCSB, USA)
2008	Un rendement homologué de 5,9 % sur une surface active de 2 cm ² obtenu par Heliatek , BASF et l'Institut de photovoltaïque appliquée (IAPP) de l'Université technique de Dresde (Allemagne)
2009	Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 6,1 % à base de PCDTBT et PC70BM (UCSB, USA) Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 7,4 % à base de PBDTTT-CF et PC70BM (Solarmer Energy Inc., University of California, University of Chicago, USA)

Tableau 1.3. Evénements notables dans l'histoire du photovoltaïque

1.4.3.4. Générateur photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule. A cet effet, ce phénomène peut être expliqué par le fait qu'un photon reçu du rayonnement solaire, heurte une cellule PV, son énergie peut être transférée à un électron dans le matériau semi-conducteur de la cellule. Avec cette énergie supplémentaire, l'électron peut alors

s'échapper de sa position normale dans l'atome (de la bande de valence à la bande de conduction traversant la bande interdite), créant ainsi un trou qui deviendra une partie d'un courant dans un circuit électrique. C'est ce qu'on appelle la paire électron-trou [48].

Autrement dit l'effet photovoltaïque est la production de l'énergie électrique par un système recevant du flux lumineux. Il repose sur le principe suivant :

On dope un disque de silicium positivement. Une de ces faces est ensuite dopée N, une jonction PN est ainsi réalisée. Du côté P comme du côté N, nous avons des trous et des électrons fixes. Ces charges fixes donnent naissance à un champ électrique E qui tend à repousser les charges mobiles de part et d'autre de la zone de transition. Aucun courant ne traverse la jonction. Lorsque la cellule solaire est éclairée, une partie des photons qui la frappent est réfléchiée et l'autre partie pénètre dans la jonction. Les photons absorbés possédant une énergie suffisante libèrent des partie des paire électrons – trous qui à leurs tours se déplacent sous l'action du champ électrique dans le cristal par phénomène de diffusion, ce qui provoque une différence de potentiel à ces bornes [49],[50].



Figure 1.14. Principe de fonctionnement d'un GPV [50]

1.4.3.5. Cellule photovoltaïque [51] :

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées de plusieurs couches :

- une couche de protection translucide ; une couche conductrice (k) qui sert de cathode (pôle+) (grille métallique) ; une couche avec porteurs de charge libre négative (N) ; une jonction entre (N) et (P) ; une couche avec porteurs de charge libres positive (P) (cristal semi-conducteur), une couche de contact conductrice en métal (a) qui joue le rôle de l'anode (p) ; une couverture pour la protection contre les influences externes qui sont indispensable car la cellule photovoltaïque est très fragile.

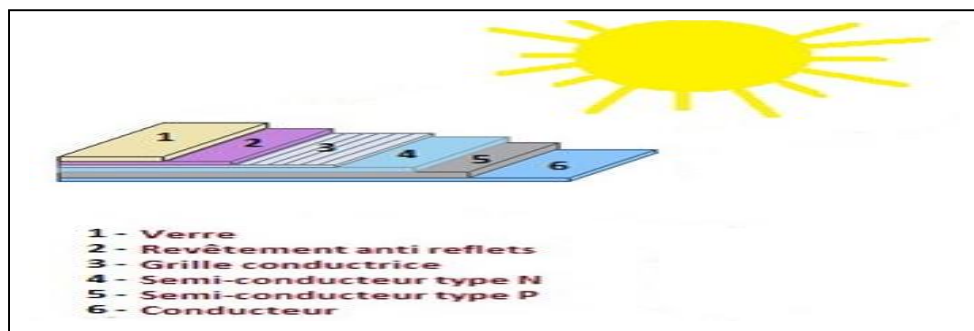


Figure 1.15. Schéma descriptif d'une cellule photovoltaïque (vue de face)

La taille de chaque cellule va de quelques centimètres carrés jusqu'à 100 cm^2 ou plus sa forme est circulaire, carrée ou dérivée des deux géométries. La structure la plus simple d'une cellule

photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homojonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction) [52].

1.4.4 Technologies photovoltaïques :

Les technologies photovoltaïques sont fondées sur un certain nombre de matériaux semi-conducteurs et ont différentes phases de maturité. Les principales technologies photovoltaïques aujourd'hui sur le marché sont à base de silicium cristallin (monocristallin, polycristallin et silicium sous forme de ruban) et en couches minces (tellure de cadmium [CdTe], silicium amorphe [a-Si] et diséléniure de cuivre-indium-gallium [CIGS]). À partir de 2009, les technologies de silicium cristallin (c-Si) représentaient 84% du marché photovoltaïque (37 % de silicium monocristallin, 2 % de silicium sous forme de ruban et 45 % de silicium polycristallin) et les couches minces correspondaient la part de marché restante soit 16 % (13 % de tellure de cadmium, 2 % de silicium amorphe et 1 % de diséléniure de cuivre-indium-gallium)[53].

1.4.4.1 Silicium monocristallin :

Le silicium cristallin est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales, Le terme « cristallin » implique que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple où il n'y a aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes [54].

1.4.4.2 Silicium poly cristallin :

Il est composé de petits grains de silicium cristallin. Les cellules à base de silicium polycristallin sont moins efficaces que les cellules à base de silicium monocristallin. Les joints de grains dans le silicium poly cristallin gênent l'écoulement des électrons et réduisent le rendement de puissance de la cellule. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium poly cristallin modèle commercial s'étend entre 10 et 14% [54].

1.4.4.3 Silicium amorphe :

Le silicium est déposé en couche mince sur une plaque de verre ou un autre support Souple. L'organisation irrégulière de ses atomes lui confère en partie une mauvaise semi-conduction. Les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre son rendement de conversion est faible (de 7 à 10 %) (voir tableau 1.4) [54].

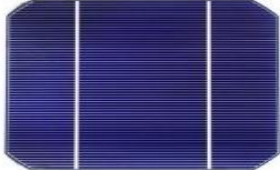
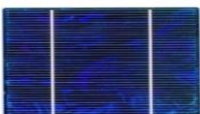

Type de cellule PV	Silicium monocristallin	Silicium poly Cristallin	Amorphe
			
Durée de vie	35 ans	35 ans	< 10 ans
Avantage	Bon rendement en soleil direct	Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin mais plus que l'amorphe)	Souplesse ;Prix moins élevé que les cristallins Bon rendement en diffus
Inconvénient	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...) prix élevé	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...) prix élevé	Mauvais rendement en plein soleil.

Tableau 1.4. Comparaison des trois technologies de cellules photovoltaïques

1.4.4 Nouvelles technologies photovoltaïques (*cellules photochimiques à colorant, cellules Photovoltaïques organiques et cellules multi jonctions à haut rendement*) :

Outre les technologies de silicium cristallin et en couches minces, un certain nombre de nouvelles technologies photovoltaïques connaissent les premières étapes de leur développement et d'autres technologies photovoltaïques sont en train d'apparaître dans des applications particulières (voir figure 1.16). Bien que ces technologies ne soient pas très répandues, leurs caractéristiques uniques les rendent adaptées à des applications particulières dans l'espace, les déserts, des bâtiments et pour des produits de consommation [37].

Les cellules solaires photochimiques à colorant sont composées d'une photo électrode (dioxyde de titane nanocristallin sensibilisé à des molécules de colorant organométalliques), d'une redox d'électrolyte (iode) et d'une électrode auxiliaire (platine). Ces cellules peuvent atteindre 11 % d'efficacité, mais il importe de tenir compte de certains aspects critiques tels que la stabilité (liée à l'encapsulation du dispositif) et la production de modules sur de grandes superficies pour que cette technologie rivalise avec d'autres technologies photovoltaïques sur le marché de l'électricité. Pour le moment, la plupart des produits sont axés sur le marché de la consommation (p. ex. les piles rechargeables pour les appareils électroniques).

Les cellules photovoltaïques organiques, parfois appelées « cellules solaires plastiques » ont été grandement améliorées au cours des dix dernières années, les meilleures cellules atteignant 8 % d'efficacité et les produits commerciaux se rapprochant du rendement de conversion de 4 %. Le carbone est un élément abondant et les coûts de fabrication devraient être faibles. Cependant, ces cellules sont susceptibles de subir une dégradation chimique, physique et mécanique lorsqu'elles sont exposées à la lumière et à l'oxygène. L'objectif de fabrication actuel est d'augmenter la stabilité et la durée de vie des produits de trois à cinq ans afin de permettre aux applications électroniques de consommation de fonctionner [53].

Les cellules solaires multijonctions à haut rendement à base d'arsénure de gallium ont été utilisées dans l'espace pendant des décennies. La caractéristique la plus intéressante de ces cellules est leur rendement de conversion élevé dont le taux peut dépasser 40 %. Cependant, cette efficacité élevée a un prix : les processus de fabrication et les conceptions des cellules sont complexes et des éléments rares sont utilisés. Le résultat final est une technologie qui peut coûter plus de 100 fois plus que les technologies de silicium cristallin et en couches minces traditionnelles.

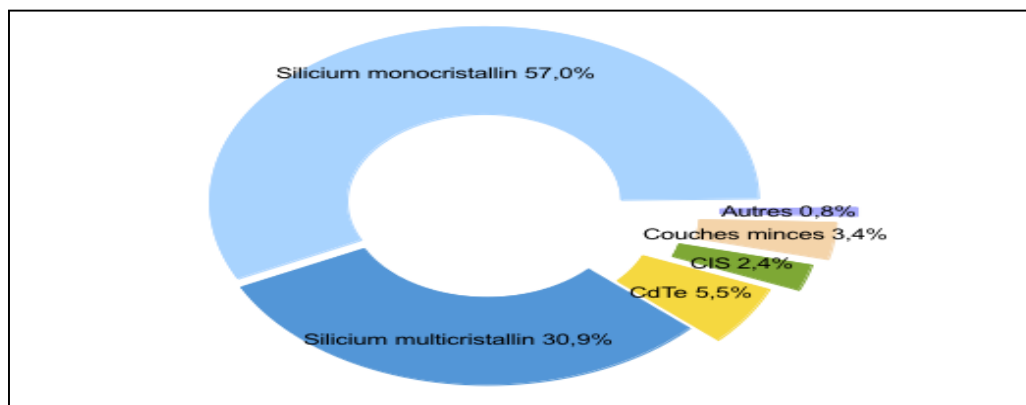


Figure 1.16. Répartition de la production des cellules photovoltaïques en 2011 [2]

1.4.5. Cycle de vie des systèmes photovoltaïques :

De l'approvisionnement en matériaux à la mise hors service du point de vue environnemental l'analyse du cycle de vie d'une technologie énergétique prend en compte les répercussions à toutes les étapes de production, du début à la fin, c'est-à-dire de la production de carburant à la mise hors service. Dans le cas de l'énergie photovoltaïque, aucun carburant ne doit être préparé, aucun déchet ne résulte de la conversion de la lumière du soleil en électricité et peu

d'entretien est requis au cours de son utilisation. Les répercussions sont donc principalement liées à la construction des installations (matières premières, fabrication de modules photovoltaïques et des autres composants du système, transport et fabrication d'installations) et, dans une certaine mesure, à la mise hors service et au recyclage à la fin de la durée de vie des systèmes photovoltaïques qui durent habituellement de 20 à 30 ans (AIE, 2009) [53].

1.4.6 Schémas équivalent d'une cellule photovoltaïque :

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électronique équivalent ci-dessous (figure 1.17). Nous pouvons considérer le cas d'une cellule idéale comprenant une source du courant et une diode en parallèle. La source du courant I_{ph} représente le photo-courant (générer) et la branche de diode le courant I_D [52].

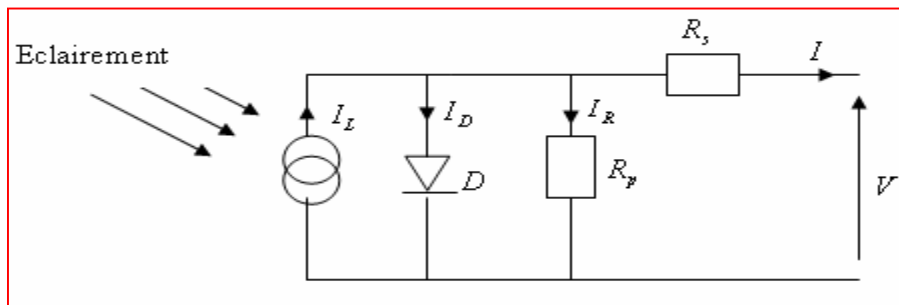


Figure 1.17 : Schéma électrique d'une cellule solaire idéale [36]

La cellule comporte une résistance série (R_s) et une résistance en dérivation ou shunt (R_p).

- La résistance série 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 est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la fonction dont celle-ci a été réalisée.

A partir de la figure (1.17) la loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I_L = I_D + I_R + I \quad (1.1)$$

Le courant de jonction I_D est donné par:

$$I_D = I_0 \left(e^{q \frac{V + R_s I}{n k T}} - 1 \right) \quad (1.2)$$

Le courant dans la résistance R_p est donné par:

$$I_R = \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (1.3)$$

A partir de l'équation (1.1), on obtient l'expression de courant I:

$$I = I_L - I_D - I_R \quad (1.4)$$

Remplaçons dans (1.4) les équations (1.2) et (1.3) l'équation caractéristique deviendra :

$$I = I_L - I_0 \left(e^{q \frac{V + R_s I}{n k T}} - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (1.5)$$

Où: I : Ccourant de cellule ; V : Tension de cellule ; R_s : Résistance série de la cellule ;

R_p : Résistance parallèle; T : Température de la cellule [°K]; q : Charge d'électron $e=1.6*10^{-19}C$; I_0 : Courant de saturation [A]; K : La constante de Boltzman ($1.3854*10^{-2} JK^{-1}$)
 V : Tension de seuil de diode (1.1V) ; n : Facteur de qualité de diode.

Si l'on suppose que la résistance parallèle est infinie ($R_p = \infty$) l'équation (1.5) devient:

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{nKT}} - 1 \right) \quad (1.6)$$

L'équation (1.6) en termes de I et V n'est pas tellement facile à résoudre comparativement à l'équation du circuit équivalent simplifié. Par conséquent une méthode numérique (Newton- Raphson) doit être appliquée.

1.4.7 . Module photovoltaïque :

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module Figure (1.18-a). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène -vynilacétate) Figure (1.18-b) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène [55].

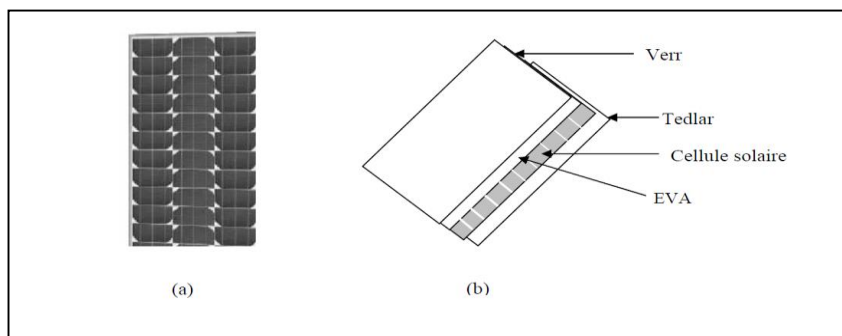


Figure 1.18. Module photovoltaïque

Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation. A l'arrière de chaque module se trouve une boîte de jonction contenant deux diodes antiparallèles Figure (1.19). Ces diodes antiparallèles permettent d'éviter qu'un module au soleil ne se décharge dans un module à l'ombre [49].



Figure 1.19 .Boîte de jonction [34].

Les boîtes de jonction assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques

- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules avec l'extérieur.

Les modules délivrent des tensions normalisées (12, 24, 48) et des puissances entre 10 et 100 WC (watt-crête : puissance obtenue pour l'ensoleillement maximal). La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, le courant de sortie, et la puissance sont proportionnels à la surface du module. Ils ont une efficacité de conversion (énergie électrique produite/énergie solaire incidente) de l'ordre de 10 à 20% [52].

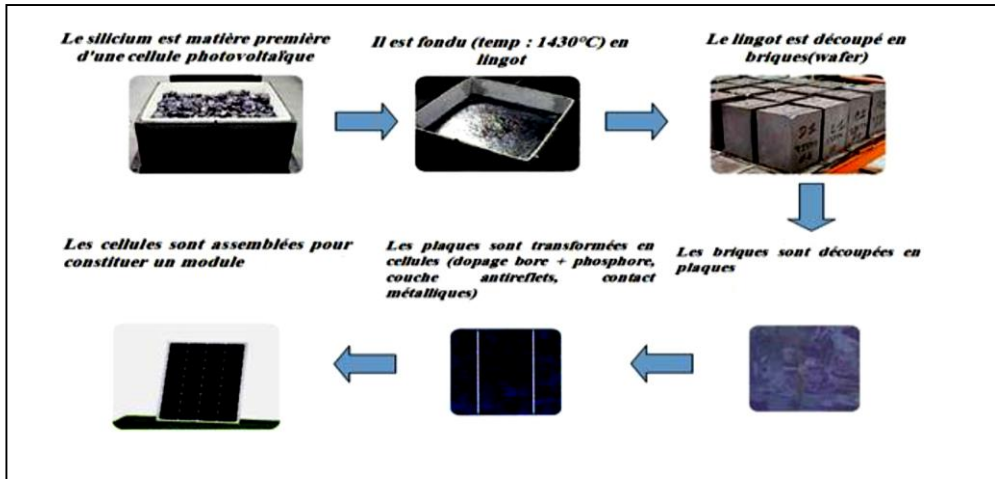


Figure 1.20. Etapes de traitement du Silicium pour la production d'un module [48]

1.4.7.1. Regroupement en série :

Une association de (Ns) cellule en série figure (1.21) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristique électriques d'une association série de (Ns) cellules [51].

$$V_{cons} = N_s \times V_{co} \tag{1.8}$$

$$I_{ccNs} = I_{cc} \tag{1.9}$$

V_{cons} : La somme des tensions en circuit ouvert de Ns cellules en série.

I_{ccNs} : Courant de court-circuit de Ns cellules en série

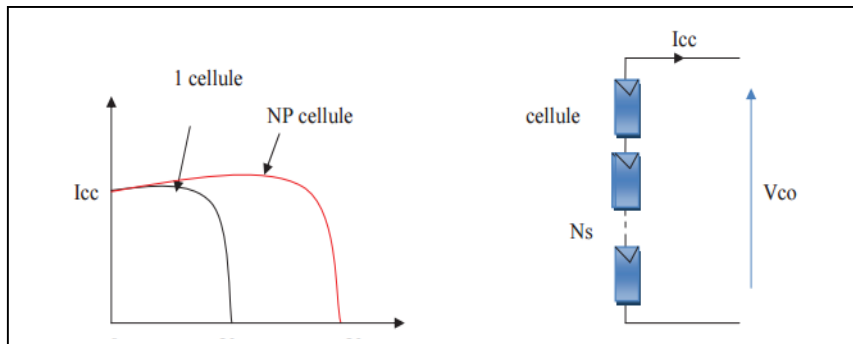


Figure 1.21. Caractéristique courant tension de Ns cellule en série

1.4.7.2 Regroupement en parallèle :

Une association parallèle de (NP) cellule figure (1.22) est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants avec [51] :

$$I_{ccNp} = N_p \times I_{sc} \quad (1.10)$$

$$V_{co} = V_{coNp} \quad (1.11)$$

I_{ccNp} : la somme des courants de court circuit de (N_p) cellule en parallèle.

V_{coNp} : tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle.

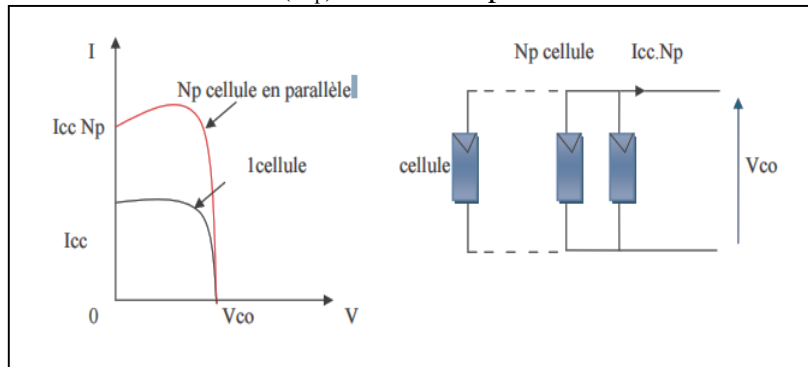


Figure 1.22. Caractéristique courant tension de (N_p) cellule en parallèle

1.4.7.3. Regroupement (série et parallèle) :

Lorsque le champ photovoltaïque comporte plusieurs branches, connectées en parallèle, chaque branche étant formée de la mise en série de plusieurs cellules figure (1.23) la conclusion ci-dessus reste applicable : seules les "mauvaises" branches sont sous-utilisées. Il suffit d'une "mauvaise" cellule dans une branche pour que les caractéristiques de toute la branche soient fortement détériorées. En pratique, les branches "saines" « maintiendront la tension de l'ensemble à un niveau tel que la branche qui comporte une "mauvaise" cellule n'arrivera pas à débiter de courant, ce qui la rendra in opérationnelle [45].

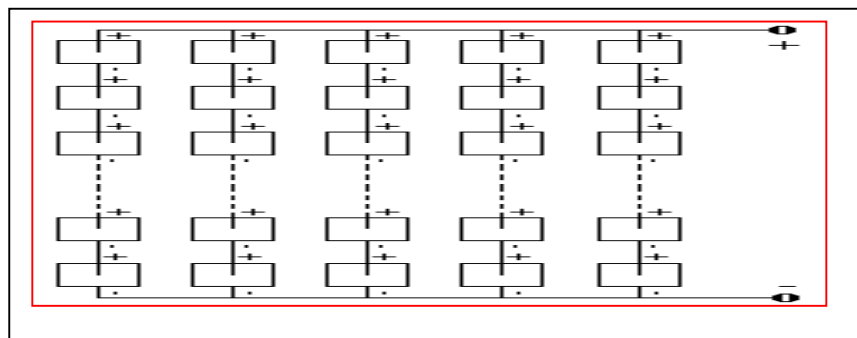


Figure 1.23. Connexion en série parallèle d'un champ photovoltaïque

1.4.7.4 Caractéristiques d'un module :

La description des paramètres d'un module est illustrée selon les caractéristiques suivantes :

- Puissance crête P_c : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans des conditions standard (25°C et un éclairement de 1000 W/m^2) [47] .
- Caractéristique $I (V)$: Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- Tension à vide V_{co} : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant pour un éclairement " plein soleil ".
- Courant de court-circuit I_{cc} : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".

- Point de fonctionnement optimum (U_m, I_m) : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein Soleil, $P_m = U_m \cdot I_m$
- Rendement maximal : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule

1.4.8. Panneaux solaires :

Afin d'obtenir des puissances de quelques KW à quelques MW, sous une tension convenable il est nécessaire d'associer les modules en série (augmenté la tension) et en Parallèle (augmenté le courant) pour former un panneau (ou champ PV) avec un angle d'inclinaison spécifique (+10°) et une orientation (vers le sud l'hémisphère nord et vers le nord l'hémisphère sud) (voir figure 1.24). La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants du panneau PV dépend[49] :

- Des besoins en électricité
- De la taille du panneau
- De l'ensoleillement du lieu d'utilisation



Figure 1.24. Panneau solaire

1.4.8.1 Caractéristiques électriques d'un panneau PV :

La puissance électrique délivrée par le module photovoltaïque est le produit de la tension et du courant qu'il génère. Ces deux grandeurs courant-tension délivrées par le module photovoltaïque dépendent des propriétés du module mais aussi de la charge aux bornes du module.

a. Caractéristiques $I=f(U)$:

La forme générale de la caractéristique courant-tension d'un module est donnée ci-dessous :

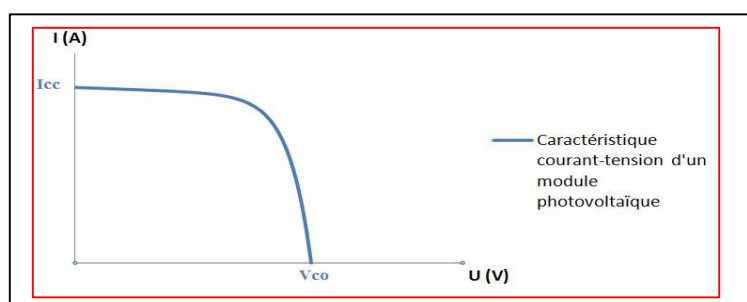


Figure 1.25. Caractéristiques $I(U)$

b. Caractéristiques $P=f(U)$:

Nous pouvons aussi tracer la caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque qui s'obtient simplement en multipliant la tension par l'intensité à partir de la caractéristique courant-tension

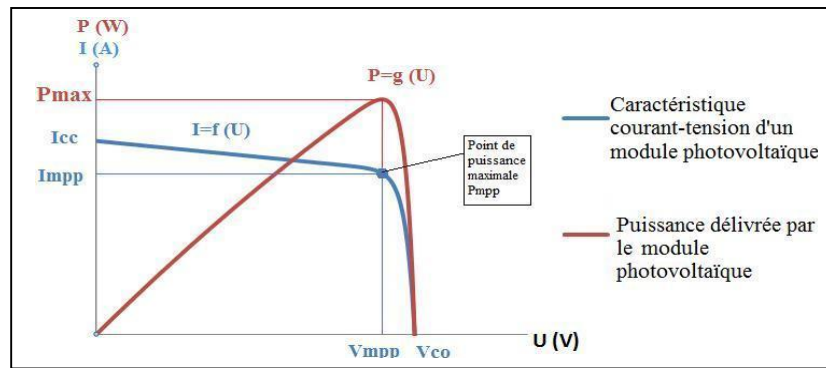


Figure 1.26 . Caractéristiques P(U) et I(U)

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce qui signifie qu'on aura besoin d'une boîte de dérivation qui regroupe le tous, Alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connexions entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie.

1.4.9. Effet d'ombrage sur l'énergie totale d'un champ photovoltaïque :

Dans la conception des projets de panneaux photovoltaïques pour produire l'électricité, l'ombre est le plus grand ennemi. Si un coin du panneau solaire est ombragé, ce problème peut perdre de l'énergie, et peut même diminuer cette énergie à la moitié. Donc, il faut calculer la distance entre les panneaux avec soin afin de s'assurer que dans les pires conditions les panneaux ne seront pas couverts les uns des autres [48].

Avant de commencer à expliquer le mode de calcul de la distance entre les rangées des panneaux solaires, devrions-nous mener des calculs basés sur le moment le plus défavorable de l'année qui est l'hiver, en particulier le 21 décembre, où l'angle d'inclinaison du soleil à la valeur la plus faible, cet angle est indiqué sur la figure 1.27 par le symbole Alpha α , appelé *l'angle solaire d'altitude minimum* :

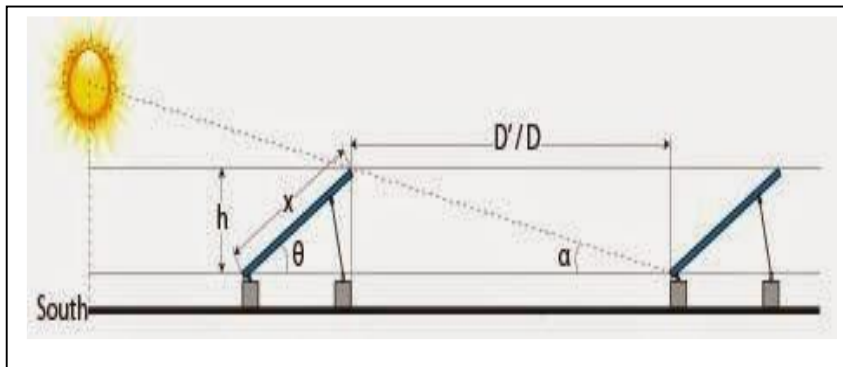


Figure 1. 27. Dessin schématique de calcul distance entre les rangées des panneaux solaires [48]

- Premièrement, on calcule la valeur h par la formule suivante :

$$h = x * \sin\theta \quad (1.12)$$

Avec x la valeur de la largeur du module, et est θ l'angle d'inclinaison.

- Deuxièmement, on calcule la distance de l'ombre oblique D' :

$$D' = h * \operatorname{tg}\alpha \quad (1.13)$$

Aussi parce que l'ombre n'est pas seulement dans un seul sens, donc il faut tenir compte qu'il y a un autre angle d'inclinaison du soleil à l'est ou à l'ouest :

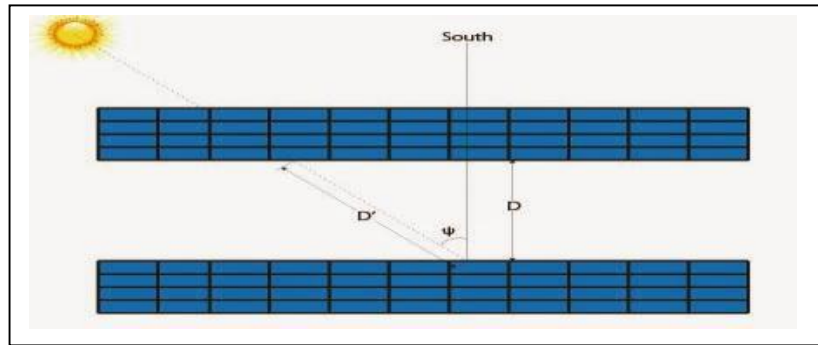


Figure 1. 28. Dessin schématique expliquant l'angle d'azimut du soleil.

Finalement, la distance entre les panneaux sera calculée par :

$$D = D' * \cos(180 - \varphi) \quad (1.14)$$

L'angle φ est appelé l'angle d'azimut du soleil

1.4.10. Effet de la température sur la tension en circuit ouvert :

Sur 100% d'énergie incidente, une très faible proportion est réfléchiée par la surface du capteur est environ 13% est extraite sous forme d'énergie électrique. En conséquence c'est plus de 85% de l'énergie incident qui devra être dissipée en chaleur. Ceci conduit sous rayonnement à une température de fonctionnement de la cellule qui peut être relativement élevée si cette énergie non convertie en électricité n'est pas évacuée. En générale elle est évacuée par conversion naturelle de l'air ambiant. La température a une influence notable sur le rendement d'une cellule photovoltaïque, nous remarquons que le courant de court-circuit varie peu avec la température tandis que la tension à vide est beaucoup plus influencée.

La tension de sortie d'un module PV est en fait une valeur variable qui est principalement affectée par la température. La relation entre la tension du module et de la température est en fait l'inverse. Comme il est précisé dans Figure (1.29), l'augmentation de la température du module provoque la diminution de la valeur de tension et vice versa. Il est important de mettre en considération les températures (froide et chaude) durant la conception d'un système (PV) [55].

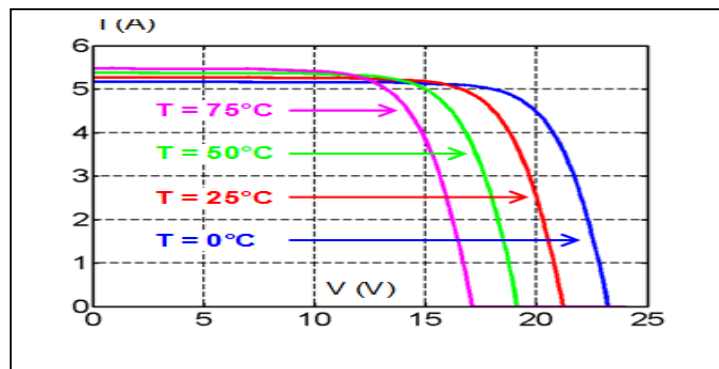


Figure 1.29 . Influence de la température sur les cellules PV [55]

1.4.11. Effet de l'éclairement énergétique sur courant en court-circuit :

La quantité de courant produit par un module photovoltaïque est directement proportionnelle à la luminosité du soleil. Des niveaux élevés de rayonnement provoquent plus d'électrons à circuler hors des cellules PV à la charge. Toutefois, le montant de la tension produite par le module PV est affecté par la valeur de l'irradiation, mais l'effet est très faible. Comme c'est indiqué dans la Figure. (1.30) la tension du module PV varie très peu avec des niveaux d'éclairement variable.

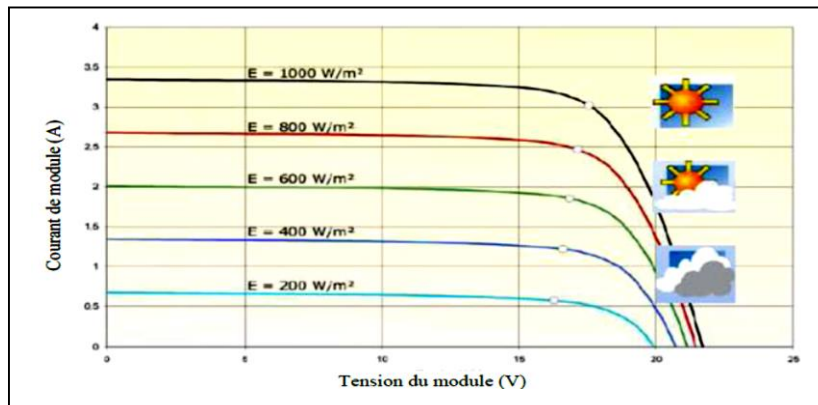


Figure 1.30. Influence de l'ensoleillement sur la cellule photovoltaïque [55]

1.4.12. Orientation et inclinaison des modules :

La position des modules photovoltaïques par rapport au soleil influe directement sur leur production énergétique. Il est très important de bien les placer pour les utiliser au maximum de leurs possibilités. Quand il est possible de choisir, l'orientation idéale d'un module photovoltaïque est très simple à déterminer : on le place vers l'équateur. Si on est dans l'hémisphère Nord, le module sera donc orienté vers le Sud, et si l'on est dans l'hémisphère Sud, il sera orienté vers le Nord. Le tableau ci-dessous donne le pourcentage approximatif de fonctionnement des modules solaires par rapport à leur orientation et à leur inclinaison. L'orientation idéale est plein sud, à 30 degrés d'inclinaison. Avec la même inclinaison mais avec un capteur orienté plein est, la puissance reçue est seulement 10% moins bonne ce qui n'est pas rédhibitoire [55].

INCLINAISON		ORIENTATION			
		0°	30°	60°	90°
EST		93 %	90 %	78 %	55 %
SUD-EST		93 %	96 %	88 %	66 %
SUD		93 %	100 %	91 %	68 %
SUD-OUEST		93 %	96 %	88 %	66 %
OUEST		93 %	90 %	78 %	55 %

Figure 1.31. Pourcentage approximatif de fonctionnement des modules solaires par rapport à leur orientation et à leur inclinaison [55]

1.4.13. Classification des systèmes photovoltaïques :

Les systèmes PV sont classés en trois types : autonomes, hybrides et reliés au réseau

1.4.13.1. Systèmes autonomes :

Ces systèmes sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau.

Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries d'accumulateurs pour stocker l'énergie. De tels systèmes sont particulièrement utiles et rentables dans les applications estivales, lorsque l'accès à un endroit est difficile ou coûteux ou lorsque les besoins en entretien doivent être réduits au minimum.



Figure 1.32. Système PV autonome [33]

1.4.13.2 Systèmes raccordés au réseau :

Une installation PV peut être connectée en parallèle avec le réseau d'électricité (voir figure 1.33). Les panneaux solaires sont connectés en série pour former des « strings », eux même reliés à un onduleur. La tâche de l'onduleur est de transformer le courant continu sortant des panneaux en courant alternatif. Chaque onduleur est choisi en fonction de la puissance des panneaux et peut accueillir un ou plusieurs strings [56]. Si la consommation locale est supérieure à la production de l'installation PV, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs.



Figure 1.33. Système PV raccordés aux réseaux [33]

1.4.13.3 Systèmes hybrides :

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée [32].

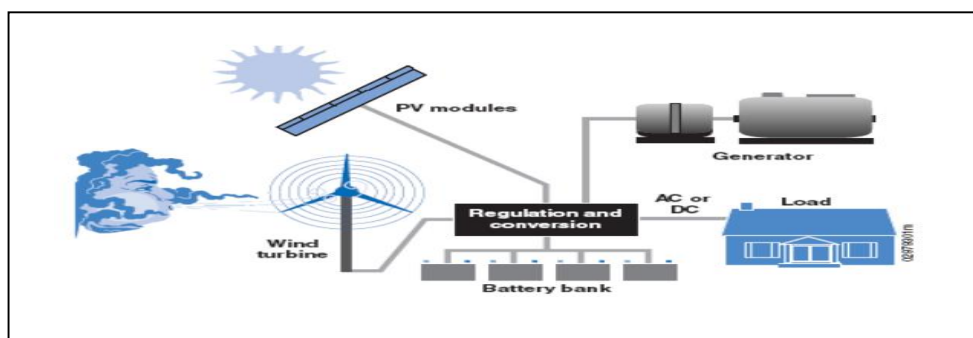


Figure 1.34. Production d'énergie électrique de différentes sources (Système hybride) [57]

1.4.14. Centrale solaire photovoltaïque :

Une centrale solaire photovoltaïque est formée par l'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. Les centrales solaires PV permettent de produire de l'électricité à grande échelle. D'une puissance allant de quelques MW à plusieurs dizaines de MW le plus souvent, Qu'il s'agisse de panneaux installés sur les bâtiments ou de centrales, la technique de production d'électricité est la même (voir figure 1.35).



Figure 1.35.a) Centrale solaire photovoltaïque (Cesta) [58]
b) Image satellitaire centrale Dhaya Sidi Bel Abbés (47 808 panneaux)

▪ Liste des grandes centrales solaires photovoltaïques :

Puissance (MWc)	Localisation	Mise en service
648	Inde	2016
579	Etat Unis	2015
550	Etat Unis	2014
540	Chine	2014
320	Chine	2013
300	France	2015
290	Etat Unis	2014
224	Inde	2014
168	Allemagne	2011
145	Allemagne	2012
100	Ukraine	2011

Tableau 1.5 . Plus grandes centrales photovoltaïques au monde [58]

▪ Liste des centrales photovoltaïques installées en Algérie :

Les centrales PV installées sur le territoire national se résument comme suit :

Puissance (MWc)	Localisation	Date de mise en service
150 (hybride)	Hassi R'mel	2011
60	(Laghouat)	2018
30	(Saïda)	10 mai 2016
24	(El Bayadh)	Novembre 2015
20	(Naâma)	2016
20	d'Ain El-Ibel (Djelfa)	2016
20	(Adrar)	2015
20	Khmag (Laghouat)	2016
15	Souk Ahras	2016

13	Tamanrasset	2015
12	Sidi Bel Abbés	18 octobre 2016
9	Tindouf	2015
6	Z.Kounta (Adrar),	2016
9	Timimoune (Adrar),	2016
5	Reggane (Adrar),	2016
5	Ain-Salah	2016
5	d'Aoulef (Adrar),	2016
3	Adrar	2015
3	(Djanet)	2015
1,1	Ghardaia	2014

Tableau 1.6. Centrales Photovoltaïques en Algérie

1.4.15. Avantages et Inconvénients de l'énergie PV:

Avantages	Inconvénients
Energie propre non polluante	Production d'énergie irrégulière
Inépuisable, peu d'entretien	N'est pas compétitive lorsqu'il s'agit de production importante d'énergie
Subventionnée par l'Etat	Durée de vie de 25 ans environ, au-delà, les rendements diminuent rapidement
Silencieuse et non dérangeantes pour les riverains voisins	Fait appel aux moyens de stockage de l'énergie qui coûtent très cher.
Entretiens réduits ,montages simples	Coût élevé
Ne comporte pas de pièces mobiles	
Appropriée aux régions isolées	

Tableau 1.7. Avantages et Inconvénients de l'énergie PV[40]

1.5. Conclusion :

Parmi les solutions à l'élévation des émissions de gaz à effet de serre (GES) et à la raréfaction des énergies de stock, plusieurs voies sont possibles :

-Le développement des technologies dites de décarbonisation peut concourir à la baisse des émissions de GES, L'utilisation de ces technologies multiplie toutefois le prix du kilowattheure par un facteur de deux ou trois.

-L'action peut également se porter sur la demande, grâce à la promotion des économies d'énergie, en particulier de l'efficacité énergétique. Cette dernière désigne les pratiques et solutions technologiques qui permettent de diminuer la consommation d'énergie tout en maintenant un niveau de performance final équivalent.

-L'insuffisance des ressources exploitées actuellement fait que le problème de l'énergie sera certainement un défi majeur des années à venir. Les ressources dites " renouvelables" présentent le choix stratégique des années à venir. L'une des solutions qui se présente est l'énergie solaire photovoltaïque.

A travers ce chapitre, nous avons présenté les principales caractéristiques et les technologies des éléments constitutifs d'un générateur PV tout en expliquant les différentes structures des systèmes solaires photovoltaïques d'une part.

D'autre part on a évoqué les facteurs agissant sur la performance du GPV. Ils peuvent être naturels tels que les conditions météorologiques (rayonnement solaire, température ambiante), ou artificiels basés sur les différentes topologies des appareils conditionneurs (convertisseurs DC/DC, convertisseurs DC/AC) qui feront l'objet du chapitre 2 comme étant les éléments constructifs du système photovoltaïque.

CHAPITRE 2



Matériels et méthodes

Chapitre 2 : Matériels et Méthodes

2.1. Introduction :

Selon des estimations de l'Union européenne, près de 1,5 milliard d'êtres humains n'ont pas accès à un réseau d'approvisionnement électrique. Le coût élevé des investissements nécessaires à l'extension des réseaux publics ainsi que les besoins limités des contrées reculées concernées continueront de faire obstacle à leur raccordement à moyen terme [2]. En Algérie et en particulier, la wilaya de sidi bel abbés, le taux d'électrification est de 98%, cela veut dire que certaines habitations, ne peuvent pas être reliés au réseau public de distribution du faite qu'il est techniquement trop complexe d'étendre le réseau jusqu'à eux ou parce que le coût d'une telle opération n'est pas justifié par rapport à d'autres solutions existantes (une densité de population trop faible donc non rentable). Pour autant, il est souvent indispensable d'avoir accès à l'électricité afin d'assurer quelques services de base tels que l'éclairage, la production de froid, ...etc. C'est pourquoi, les systèmes photovoltaïques en site isolé constituent une alternative intéressante.

Ce chapitre contribue à étudier un système photovoltaïque composé d'un générateur photovoltaïque, d'un régulateur de charge, d'un système de stockage et d'un onduleur monophasé. La charge est un générateur d'ozone, qui permet une conservation optimale des fruits et légumes, lors de leur stockage grâce au pouvoir désinfectant puissant de l'ozone.

De ce fait, une description des deux systèmes s'impose, le premier est un système PV le second représente la charge est un système d'ozonation. Figure (2.1) montre l'ensemble du système étudié concerné par le stockage des aliments dans une atmosphère traitée à l'ozone alimentée par un système **d'alimentation photovoltaïque**.

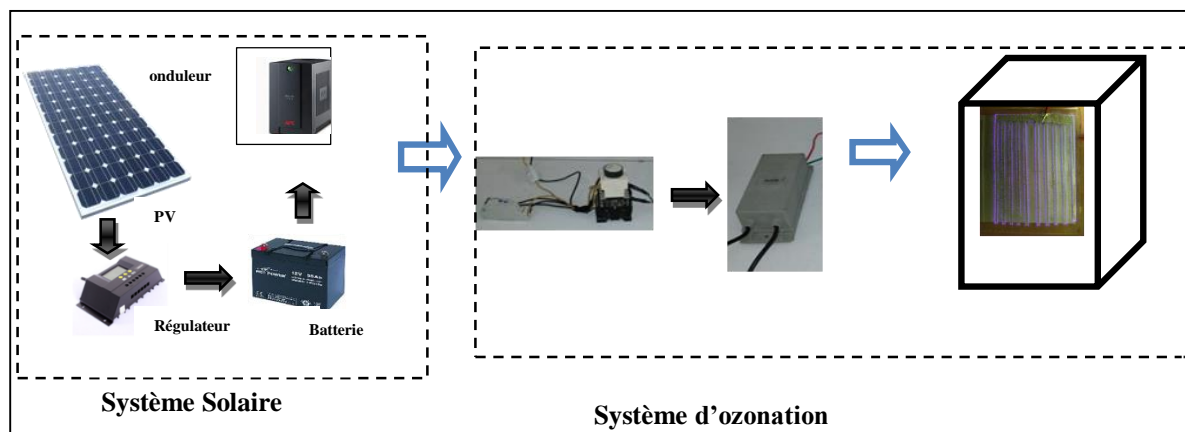


Figure 2.1. Schéma synoptique du Système photovoltaïque alimentant un système d'ozonation

2.2. Matériels : Système d'énergie solaire

Le système d'énergie solaire comprenant un générateur photovoltaïque produisant une puissance de 135 W, un régulateur de charge (12/24 V, 20 A) pour maintenir la tension du panneau à 12V, une batterie de stockage de 80 Ah utilisée pour stocker l'énergie et un onduleur monophasé (figure 2.2).

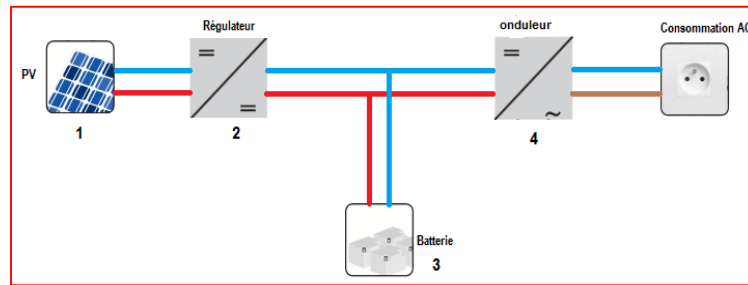


Figure. 2.2. Représentation Schématique du système photovoltaïque
1. Panneau photovoltaïque, 2. Régulateur de Charge, 3. Batterie de stockage, 4. Onduleur monophasé

2.2.1. Matériels : Régulateur de charge /décharge , usage et définition

Le régulateur de charge dans un système photovoltaïque est le composant de jonction entre le générateur solaire, la batterie de stockage et les consommateurs intervenant dans le système. Il a pour rôle de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes et assure de ce fait et le mieux possible le bon fonctionnement de la batterie ainsi que la gestion du système autonome solaire PV [59].

Donc, l'importance d'un régulateur de charge dans un système photovoltaïque autonome n'est plus à discuter. Il doit cependant être réalisé avec le plus grand soin pour répondre aux exigences de coût, de simplicité, de généralité et de fiabilité.

Comme son nom l'indique, le régulateur de charge/décharge régule les charges et les décharges de la batterie. Si la batterie était à pleine charge et que les modules continuaient de lui fournir de l'énergie, il y aurait alors surcharge et la batterie se détériorerait. De même, il est recommandé de ne pas vider entièrement une batterie. Ainsi, même s'il s'agit d'une batterie à décharge profonde, il vaut mieux ne pas descendre en dessous de 50% à 80% de décharge pour ne pas trop la dégrader. Le régulateur augmente donc sa durée de vie en lui évitant des états extrêmes.

Méthode de connexion d'un régulateur de charge :

Avant d'être raccordé, le régulateur doit être fixé à son emplacement définitif. Pour les branchements, il faut se munir de câbles électriques adaptés à sa puissance : la section du câble doit être plus ou moins grande en fonction de l'intensité pour limiter les pertes par « effet de joule »(voir figure 2.3)

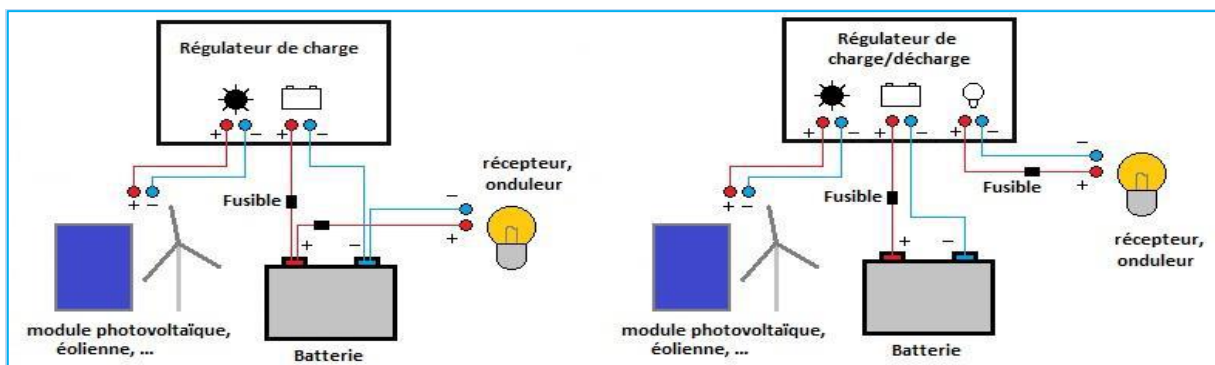


Figure. 2.3. Connexion d'un régulateur [2]

2.2.2. Matériels : Système de stockage

Dans le cas d'une unité de production non raccordée au réseau la présence d'un dispositif de stockage s'impose dans la mesure où la consommation et la production sont fortement découplées. Dans les applications existantes, ce sont quasi-systématiquement des batteries d'accumulateurs au plomb. Le dimensionnement du système de stockage est généralement et simplement lié à l'autonomie en jours recherchée. Ainsi la capacité de stockage correspond

dans le cas d'une installation photovoltaïque, à une consommation de 3 à 7 jours sans recharge voire 10 jours pour les installations nécessitant une grande marge de sécurité. Par conséquent le stockage représente une part très importante du coût total de l'installation, d'autant plus que la durée de vie des accumulateurs est bien inférieure à celle des panneaux photovoltaïques et des convertisseurs (voir figure 2.4). Pour un système raccordé au réseau, un dispositif de stockage ne semble nécessaire qu'en cas de défaillance du réseau. Dans ce cas il est dimensionné de manière à assurer un fonctionnement, éventuellement en mode dégradé pour la durée de la coupure. Cependant si ces unités de productions, qui ont un caractère aléatoire de par la nature des sources utilisées, viennent à se multiplier et à atteindre des proportions non négligeables, alors les dispositifs de stockage joueront un rôle important pour assurer la stabilité du réseau [60].

Technologie	Densité Energétique (Wh/Kg)	Densité de Puissance (W/Kg)	Temps de décharge	Durée Stockage	Auto Décharge (%/mois)	Rendement (%)	Durée de Vie (nbr.Cycle)	Coût (€/kWh)
Plomb (Pb)	25 à 45	80 à 150	15 mn. à 100 h	>1mois	40	60 à 98	300 à 1500 Cy. 80%DOD ²	50 à 200 €/kWh
Lithium-ion (Li-ion)	80 à 150	500 à 2000	45 mn. à 100 h	Plusieurs Mois	20	90 à 100	> 1500 Cy. 100%DOD	700 à 1000 €/kWh
Nickel-Cadmium Ni-Cd	20 à 60	100 à 800	15 mn. à 100h	<1mois	25	60 à 80	300 à 1500 Cy. 100% DOD	200 à 600 €/kWh
Batterie Redox	25 à 30	100 à 140	De 1s à 100h	>1mois	-	>80	1500 à 13000 Cy. 100%DOD	7 à 100 €/kWh
Batterie Métal-air	110 à 300	70 à 150	1h à 100h	-	-	50	-	50 à 200 €/kWh
Super-capacité	0.0001 à 0.005	100 à 10000	De 1s à 10s	Quelques minutes	50	80 à 100	10000 à 500000 Cy. 80%DOD ²	16000 €/kWh
Volant d'inertie	0.03 à 0.1	400 à 2000	2s à 1h	Quelques minutes	0.1	90	>10000 Cy. 80%DOD ²	1000 à 5000 €/kWh

Figure 2.4. Comparaison différentes technologies de stockage [60]

A. Méthode de fonctionnement d'une batterie :

Dans un système photovoltaïque, la ressource solaire ne pouvant être disponible à tout moment, il est indispensable de stocker de manière journalière ou saisonnière de l'énergie électrique produite par les panneaux solaires. On utilise pour cela des batteries d'accumulateurs. Les batteries les plus courantes sont de type plomb-acide à plaque plane pour les installations de faible puissance et de type plomb-acide à plaque tubulaire pour les installations de grandes puissances.

La batterie est un dispositif qui fournit (restitue) de l'énergie électrique après avoir été stockée sous forme d'énergie chimique, ce sont des générateurs électrochimiques. Elles sont constituées de deux électrodes, plaques positif (anodes) et plaques négatif (cathode) immergées dans un électrolyte. L'anode est réductrice qui sera oxydée pour générer des électrons et la cathode est oxydant qui sera réduit en captant des électrons, l'électrolyte a pour rôle d'assurer le bon déplacement des ions (électrons). Donc c'est l'accumulation et la restitution dues à la réaction d'oxydoréduction (redox), qui gère le transfert d'ions entre les électrodes [21].

Dans une batterie, l'accumulation est désignée par la charge et la restitution d'énergie par la décharge. Dans le cas des batteries au plomb le dioxyde de plomb (PbO_2) est utilisé comme matière active dans l'électrode positive et le plomb (Pb) pour l'électrode négative comme c'est indiqué à la Figure 2.5.

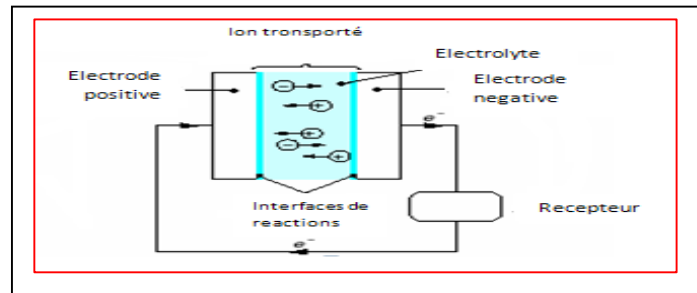


Figure 2.5. Principe de fonctionnement d'une batterie [21]

B. Méthodes : Facteurs principales à surveiller d'une batterie

Il existe des facteurs qui peuvent faire varier la capacité d'une batterie tels que :

- **Rapports de chargement et déchargement** : Si la batterie est chargée ou est déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer. Généralement, si la batterie est déchargée à un rythme plus lent, sa capacité augmentera légèrement. Si le rythme est plus rapide, la capacité sera réduite.
- **Température** : Un autre facteur qui influe sur la capacité, est la température de la batterie et celle de sa température ambiante. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie.
- **Durée de vie** : Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ses caractéristiques ne se détériorent. Par ailleurs, quel que soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles).
- **Profondeur de Décharge** : C'est le pourcentage de capacité déchargée ; par exemple si un accumulateur d'une capacité de 100Ah est déchargé de 60Ah, la profondeur de décharge est de 60%. On limite en général la profondeur de décharge à 80% de la capacité nominale. Pour les applications solaires, la profondeur de décharge ne dépasse guère 50 à 60%.
- **Rendement** : C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.
- **Taux d'autodécharge** : L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.
- **Tension d'utilisation** : C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.

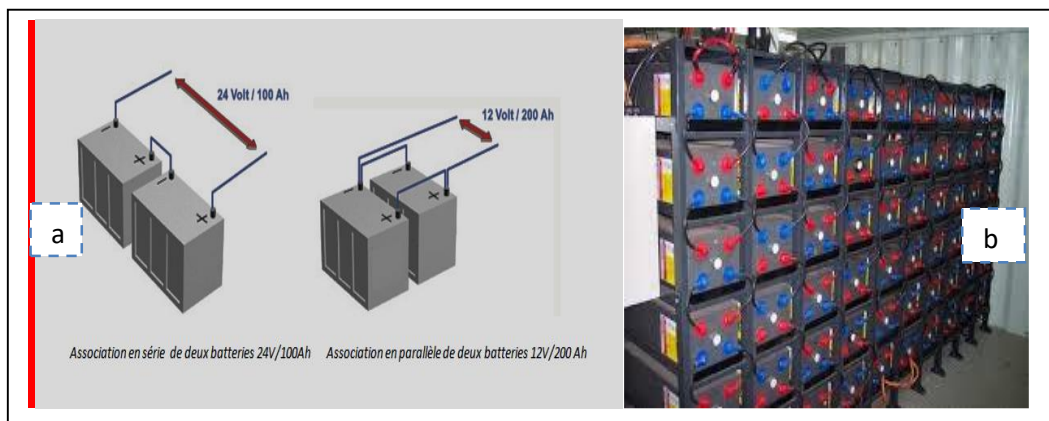


Figure 2.6 . a) Association de deux batterie 12 /100h [60]

b) Groupement de batterie [2]

Tableau 2.1 montre deux types de batterie au plomb [48] :

Type de Batterie au Plomb	Ouverte	À recombinaison de gaz	
Électrolyte	Liquide	Gélinifié	Absorbé (par le séparateur)
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • durée de vie pouvant être importante (5 à 15 ans) • technologie la moins chère 	<ul style="list-style-type: none"> • recombinaison (pas de perte en eau-pas d'entretien) • très faible taux de dégagement de gaz(sécurité) 	
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • consommation d'eau (Maintenance) • installation en locaux spécifiques (dégagements gazeux) 	<ul style="list-style-type: none"> plus faible durée de vie (Modes de défaillance spécifiques) • plus sensible à la température 	

Tableau 2. 1. Comparaisons des deux familles de batterie au plomb.

Figure 2.7 montre les différents composant d'un accumulateur acide plomb

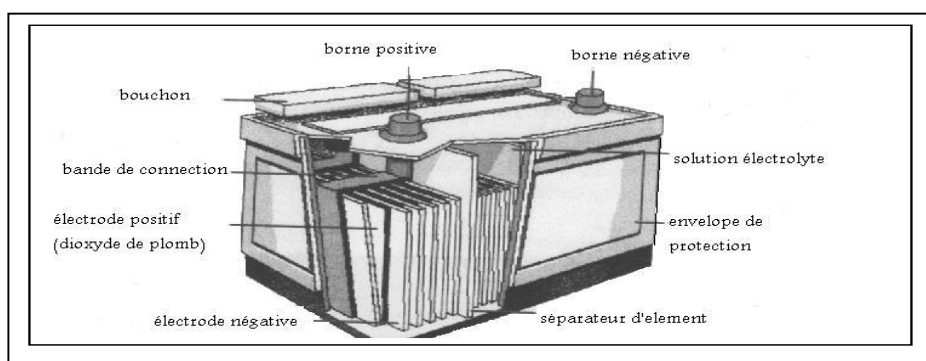


Figure 2. 7. Constitution d'un accumulateur Acide- Plomb [48].

2.2.3. Matériels : Convertisseurs d'électronique de puissance pour systèmes PV

2.2.3.1. Introduction :

Le système (PV) le plus simple n'exige aucune commande électronique au traitement de puissance, qui est constitué d'une rangée de module (PV) avec un nombre convenablement choisi de cellules et une batterie de charge. La batterie soutient l'approvisionnement lors d'insuffisance d'énergie solaire, mais elle aide également à maintenir la tension d'alimentation dans des limites bien définies. Une telle approche est si simple mais elle présente des limitations, aucune commande pour limiter la charge fournie à la batterie. De plus, aucun moyen de limitation de la décharge de la batterie n'est disponible. La puissance assurée à la charge est directement le produit courant-tension qui peut flouter sensiblement selon l'état de la charge. En outre, il n'y a aucune manière de commander la tension des panneaux (PV) pour assurer un transit de puissance maximum.

Afin de surmonter ce problème, des circuits électroniques sont utilisés pour la commande et la limitation des courants de charge des batteries. La conversion de la tension (DC - DC) et la transformation du courant continu en courant alternatif (DC-AC) [52]. Une étude détaillé est orientée vers l'onduleur, ces différentes configurations et ces multiples commandes.

2.2.3.2. Matériel : Convertisseur DC-DC (Hacheur)

Un convertisseur continu-continu est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue.

Cette conversion d'énergie s'effectue grâce à un "découpage" haute fréquence caractérisée par un rendement élevé (jusqu'à 94% pour les modules à "haut rendement").

Les convertisseurs (DC/DC) en général réalisent deux fonctions, modifier le niveau de tension (élever ou abaisser) et réguler la tension. L'électronique de conversion se trouve à l'interface entre les batteries (la source d'énergie en général) et l'ensemble des blocs constitutifs du système considéré, par exemple des circuits électroniques numériques et analogiques, comme dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source DC variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante [59].

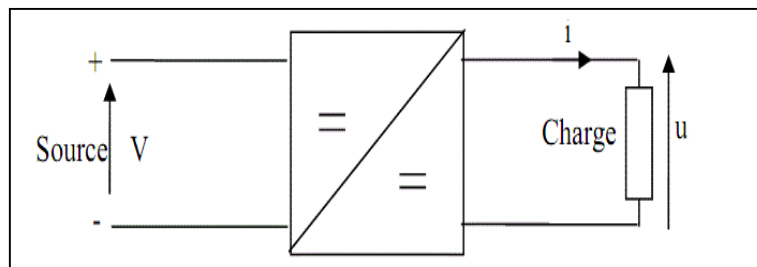


Figure 2.8. Schéma synoptique du Convertisseur DC-DC

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

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

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

- Hacheur abaisseur (ou buck).
- Hacheur élévateur (ou boost)
- Hacheur élévateur/abaisseur (buck-boost)

2.2.3.3. Hacheur Buck :

❖ Définition :

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur S peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [45].

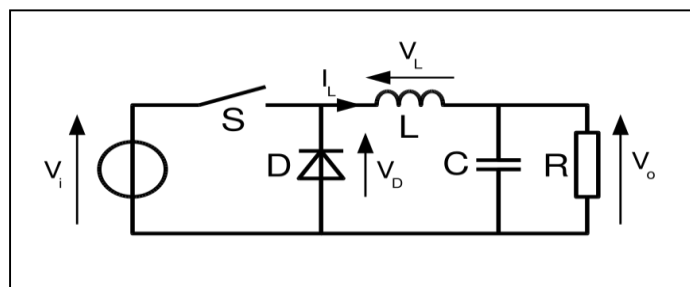


Figure 2.9. Schéma de base d'un convertisseur Buck

❖ **Méthode de Fonctionnement :**

On note α : le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur.

T_e : étant la période des impulsions.

⇒ Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , la source V_i fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance .L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage

$$fe = \frac{1}{T_e} \quad (2.1)$$

Pendant le temps $t \in [\alpha T_e, T_e]$, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle [30].

Les chronogrammes (tracés dans le cas idéal) à la figure (2.10) sont tracés dans le cas d'une conduction continue, c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro. Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle [30].

$$V_0 = \alpha \cdot V_i \quad (2.2)$$

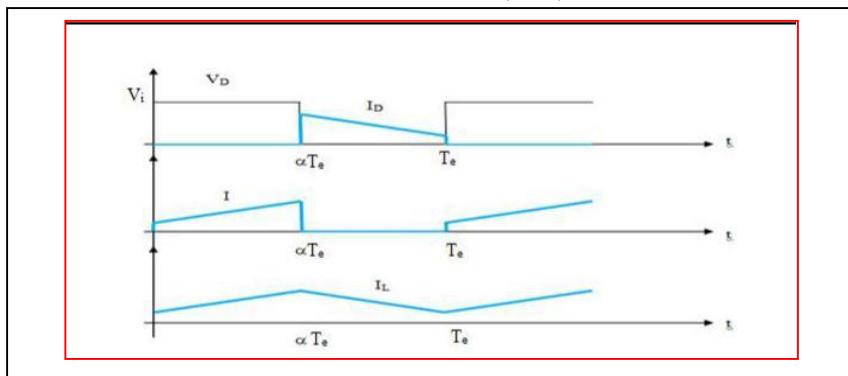


Figure 2.10. Caractéristiques (tension, courant) de convertisseur Buck [45].

❖ **Modèle mathématique équivalent [30] :**

Pour savoir le comportement réel nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. Figure (2.11) montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec le commutateur fermé, tandis que la figure (2.12) représente le convertisseur dévolteur avec le commutateur ouvert pendant $(1 - \alpha) \times T$.

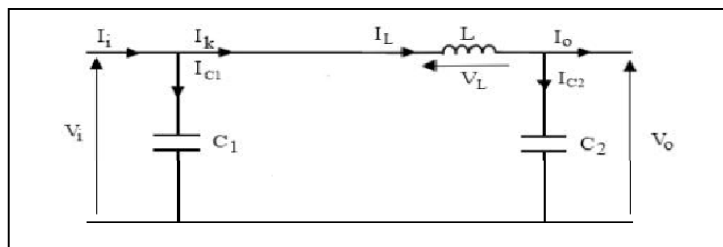


Figure 2.11. Schéma électrique d'un hacheur Buck fermé

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

$$I_{C1}(t) = C_1 \times \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (2.3)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \times \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \quad (2.4)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \quad (2.5)$$

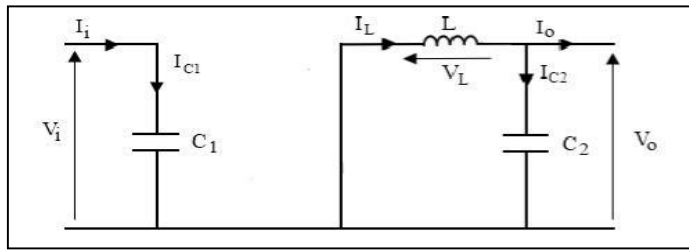


Figure 2.12. Schéma électrique d'un hacheur Buck ouvert

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{d v_i(t)}{dt} = I_i(t) \quad (2.6)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{d v_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o(t) \quad (2.7)$$

$$V_L(t) = L \frac{d I_L(t)}{dt} = - V_o(t) \quad (2.8)$$

2.2.3.4. Hacheur boost :

❖ Définition :

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

Connu aussi sous le nom de «BOOST» ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (2.13). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [46].

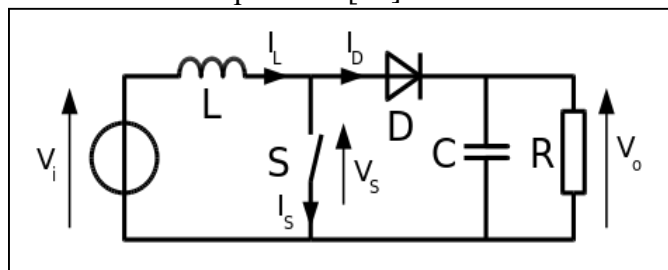


Figure 2.13. Schéma électrique d'un hacheur BOOST

❖ Méthode de fonctionnement du hacheur BOOST :

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur S:

➤ Une phase d'accumulation d'énergie : lorsque l'interrupteur S est fermé (état passant) cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.

➤ Lorsque l'interrupteur est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.é.m s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). 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 [61] (voir figure 2.14).

On arrive à :

$$V_o(1 - \alpha) = V_I \quad (2.9)$$

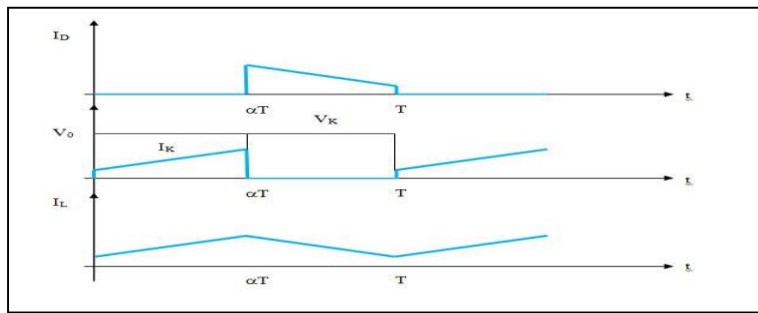


Figure 2.14. Caractéristique de la tension et du courant de convertisseur Boost

❖ **Modèle mathématique équivalent [45] :**

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. Figure (2.15) présente le circuit équivalent du BOOST lorsque K est fermé $[0, \alpha T_e]$

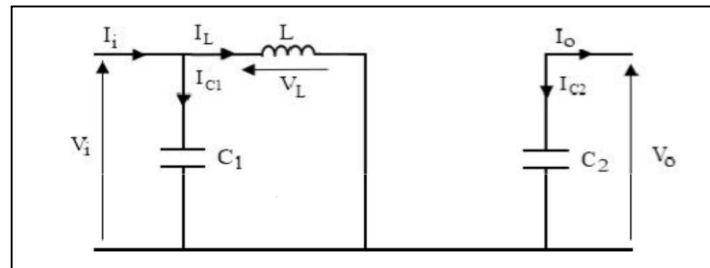


Figure 2.15. Schéma électrique d'un hacheur Boost fermé

Comme pour le circuit BUCK, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donnent les calculs suivants :

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (2.10)$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) \quad (2.11)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \quad (2.12)$$

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

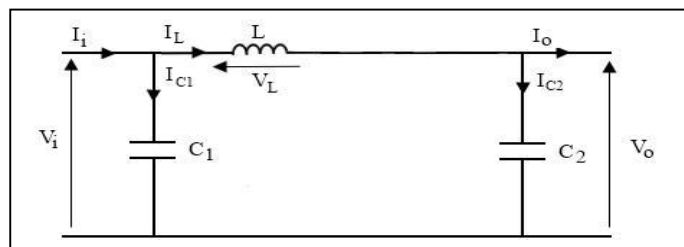


Figure 2.16. Schéma électrique d'un hacheur BOOST ouvert

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (2.13)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -I_0(t) \quad (2.14)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \quad (2.15)$$

2.2.3.5. Hacheur buck- boost :

Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Tandis que, lorsque le transistor est sur la position (*on*) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur tourne sur la position (*off*) la tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode. Dans ce cas, l'équation de la tension aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donné comme suit [62]:

$$V_S = \frac{\alpha}{1-\alpha} \times V_i \quad (2.16)$$

Le circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur, et les caractéristiques du courant et de la tension de charge sont données par la Figure (2.17 a ,b).

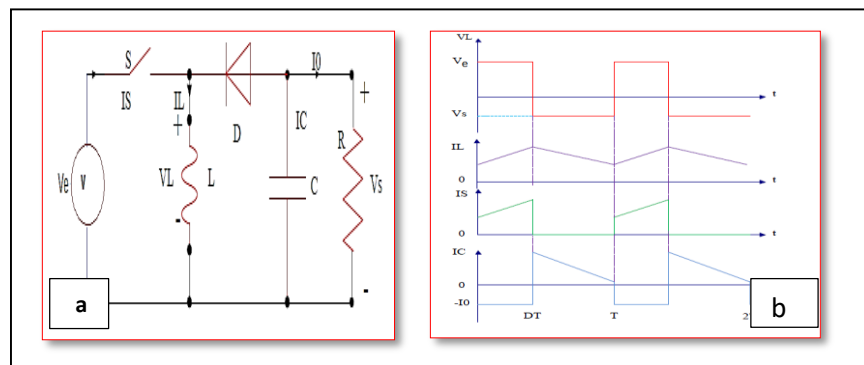


Figure 2.17. a) Circuit électrique du hacheur buck-boost[65]
b) Caractéristiques (tension ,courant) charge

2.2.3.6. Principe de fonctionnement d'un étage d'adaptation (DC-DC) :

La Figure (2.18) présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation (DC-DC) entre le (GPV) et la charge.

Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie pour stocker de l'énergie ou une charge qui ne supporte pas les fluctuations de la tension. Cet étage d'adaptation dispose d'une commande (MPPT) (Maximum Power Point Tracking) qui permet de rechercher le (PPM) que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche (MPPT) peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisie et des performances recherchées. Cependant, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé. Les commandes (MPPT) développées, sont toutes basées sur une commande extrême de type Perturbe & Observe, (P&O). Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types d'algorithmes de commandes extrêmes présentant plus ou moins de précisions. A partir de l'évaluation ou de la mesure de la puissance fournie par le générateur, ces commandes utilisent le rapport cyclique du convertisseur de puissance pour appliquer une action de contrôle adéquate sur l'étage et pour suivre l'évolution au cours du temps du (PPM).

Un grand nombre de ces commandes ont l'avantage d'être précises et d'avoir une grande rapidité de réaction mais souffrent encore d'un manque d'optimisation de leur algorithme parfois trop complexe et consommant alors trop d'énergie [63], [64].

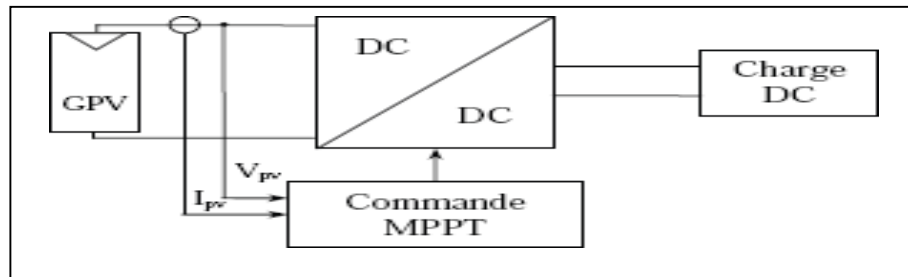


Figure 2.18. Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC-DC) Contrôlé par une commande (PPM) sur charge DC [2]

2.2.4. Matériels : Convertisseurs DC/AC (Onduleurs monophasés)

2.2.4.1. Introduction :

Un générateur photovoltaïque produit du courant électrique continu et peut donc alimenter uniquement des charges qui fonctionnent avec ce type de courant, en général avec des tensions de 12, 24 et 48V. Habituellement les charges fonctionnent en courant alternatif et si l'installation est reliée au réseau électrique, le courant distribué doit nécessairement être de ce type pour le réseau monophasé 220V / 50Hz et 380V / 50Hz pour le réseau triphasé.

A partir de cela, il est nécessaire de transformer le courant continu en sortie du générateur photovoltaïque en courant alternatif : c'est le rôle demandé à l'onduleur. Donc les onduleurs sont des convertisseurs statiques continu-alternatif permettant de fabriquer une source de tension alternative à partir d'une source de tension continue. Ils sont constitués de composants actifs et passifs performants qui admettent cependant un certain nombre de limitations qui ne sont pas sans conséquence sur la synthèse des boucles de commande.

2.2.4.2. Caractéristiques propres à un onduleur pour systèmes photovoltaïques :

Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques sont quelque peu différents des onduleurs classiques utilisés en électrotechnique, mais l'objectif de conversion DC/AC est le même. La principale caractéristique de l'onduleur PV est la recherche du meilleur point de fonctionnement du système. En effet, le générateur PV (ensemble de modules PV) a une courbe caractéristique non linéaire (figure 2.19). Pour un éclairement et une température donnés, la tension en circuit ouvert ou à forte charge est à peu près constante (assimilable à une source de tension), tandis qu'en court-circuit ou à faible charge le courant est pratiquement constant (source de courant). Le générateur n'est alors ni vraiment une source de tension ni vraiment une source de courant non plus. La tension de circuit ouvert est sensible à la température et diminue quand la température augmente. Le courant de court-circuit est quant à lui proportionnel à l'éclairement, il augmente si l'éclairement augmente [62].

Le meilleur point de fonctionnement du système se situe au milieu de la courbe. Il correspond au point où la puissance, produit de la tension et du courant maximal.

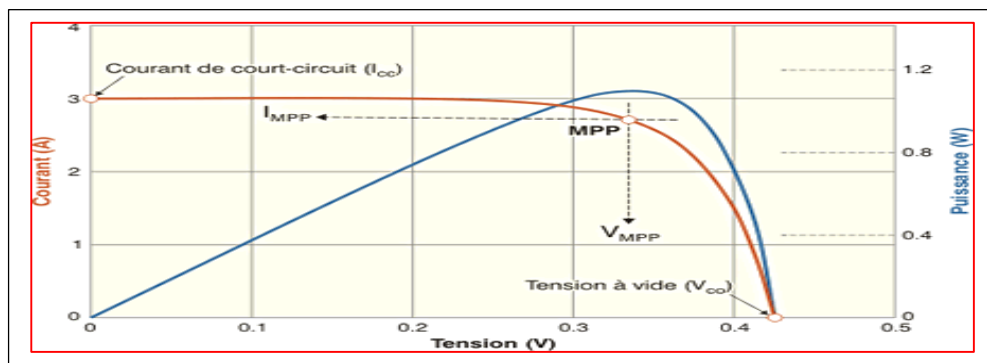


Figure 2.19. Courbes caractéristiques d'un module photovoltaïque

2.2.4.3. Différents modèles des onduleurs : Point de vue électronique de puissance

Nous distinguerons entre autres, trois structures de principe.

➤ **Les onduleurs de tension** : Un onduleur de tension est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue, sa tension V_e n'est pas affectée par les variations du courant qui la traverse, la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie. La configuration la plus générale de l'onduleur de tension monophasé est celle dont la structure est en pont complet. On considère que la tension d'alimentation V_e est constante et égale à E . Un tel circuit peut avoir deux modes de fonctionnement [66] :

- fonctionnement à deux séquences,
- fonctionnement à trois séquences.

➤ **Les onduleurs de courant** ou commutateurs de courant. Sont alimentés par une source de courant continu. L'inductance interne de la source est si grande que le courant qui la traverse ne peut être affecté par les variations de la tension à ses bornes, notamment par les brusques variations correspondantes aux commutations.

➤ **Les onduleurs à résonance** qui se partagent en deux familles : Les onduleurs série ou à résonance de tension.

2.2.4.4. Onduleurs de tension monophasés [51] :

Le fil conducteur de l'étude est surtout fondé sur l'intérêt certain que présente une onde de courant dans la charge, voisine de la sinusoïde. Dans leur présentation typologique on distingue :

A. Onduleurs à interrupteurs en parallèles [51] :

o Méthode :

Le schéma de principe représenté ci-dessous, comporte un transformateur à point milieu. Les deux enroulements primaires ont chacun $\frac{N_1}{2}$ spires, et l'enroulement secondaire relié au récepteur (par exemple une charge RL) comporte N_2 spires. Soit

$$\Rightarrow m = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.17)$$

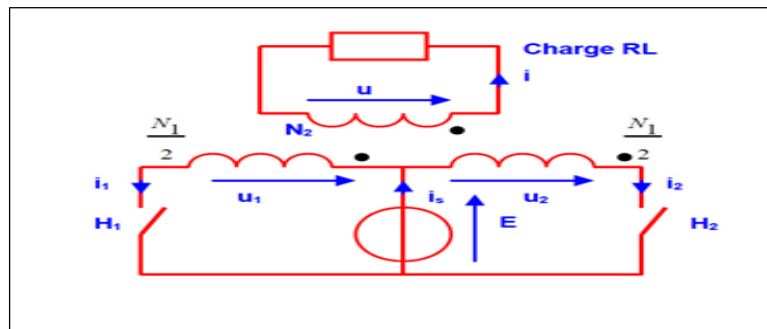


Figure 2.20 : Onduleur à interrupteurs en parallèle

❖ Méthodes de commutation :

- o **Pendant l'intervalle temporel $0 < t < T/2$ l'interrupteur H_1 est fermé.** Nous avons donc les relations :

$$\Rightarrow U_1 = U_2 = E \quad (2.18)$$

$$\Rightarrow u = 2 \frac{N_2}{N_1} U_1 = 2 \cdot m \cdot E \quad (2.19)$$

Le courant $i_1(t)$ circule et la loi d'Hopkinson impose :

$$\Rightarrow \frac{N_1}{2} i_1 - N_2 \cdot i = 0 \quad \text{d'où} \quad i_1 = 2 \cdot m \cdot i \quad (2.20)$$

Dans la charge RL, l'évolution du courant $i(t)$ suit une loi exponentielle et d'après la relation ci-dessus ; il en est de même de l'évolution du courant $i_1(t)$.

○ Pendant l'intervalle temporel $\frac{T}{2} < t < T$ l'interrupteur H_2 est fermé.

L'interrupteur H_1 est évidemment ouvert, et nous avons maintenant les nouvelles relations suivantes :

$$\Rightarrow U_1 = U_2 = -E \quad (2.21)$$

$$\Rightarrow u = 2 \frac{N_2}{N_1} U_1 = -2.m.E \quad (2.22)$$

$$\Rightarrow -\frac{N_1}{2} \cdot i_2 - N_2 \cdot i = 0 \quad \text{d'où } i_2 = -2.m.i \quad (2.23)$$

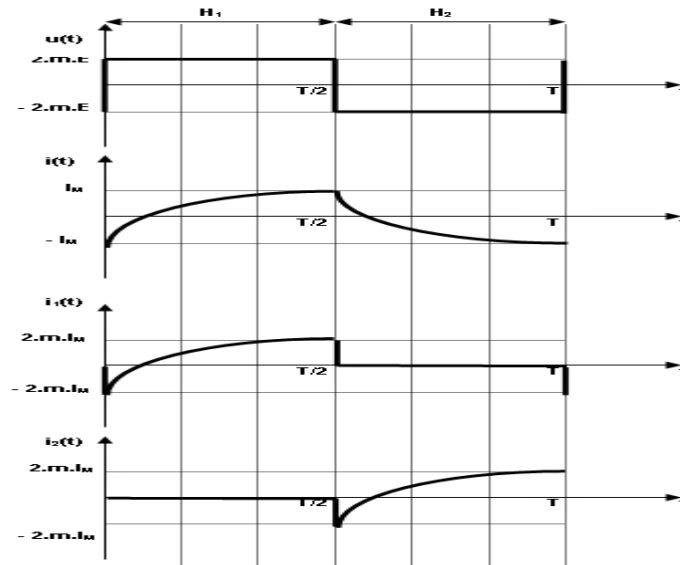


Figure 2.21 : Allures de quelques évolutions de tensions et de courant

Les interrupteurs pourront, par exemple être des transistors MOSFET ou IGBT (ou encore des thyristors) avec une diode positionnée tête-bêche aux bornes de chaque transistor.

a) Configuration à transistors :

Un onduleur à transistors se particularise par sa structure, avec notamment des diodes positionnées tête-bêche sur les interrupteurs, comme le montre la figure 2.22.

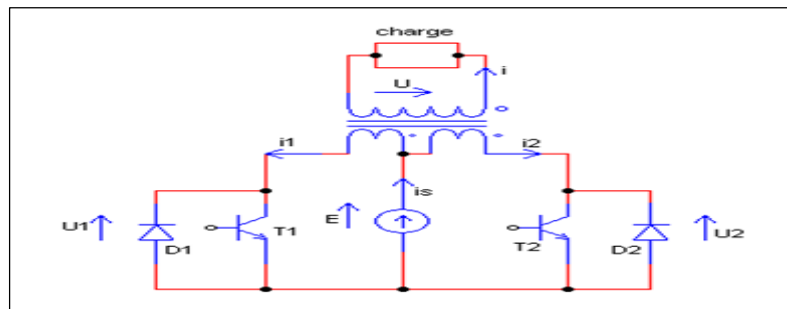


Figure 2.22 . Structure d'un onduleur à transistor avec diode

Lorsque l'un des interrupteurs est fermé, prenons par exemple le cas du transistor TR_1 nous pouvons écrire au niveau du drain la loi des nœuds en valeurs instantanées :

$$i_1 + i_{D1} = i_{TR1} \quad (2.24)$$

Remarquons alors, les deux points importants suivants :

D'une part, lorsque le transistor conduit, sa tension drain-source V_{DS} est positive de quelques volts. Cela revient à dire que la diode est sous tension inverse et est bloquée :

$$i_{D1} = 0 \quad \text{d'où} \quad i_1 = i_{T1} \quad (2.25)$$

D'autre part, lorsque la diode conduit, celle-ci se trouve sous tension directe de quelques volts.

Le transistor est alors bloqué et est sous tension inverse :

$$i_{TR1} = 0 \quad \text{d'où } i_1 = -i_{D1} \quad (2.26)$$

Traçons en concordance des temps l'évolution des grandeurs suivantes :

$U(t)$, $i(t)$, $i_1(t)$, $i_2(t)$, $i_{TR1}(t)$, $i_{D1}(t)$ et $i_s(t)$ (voir figure 2.23)

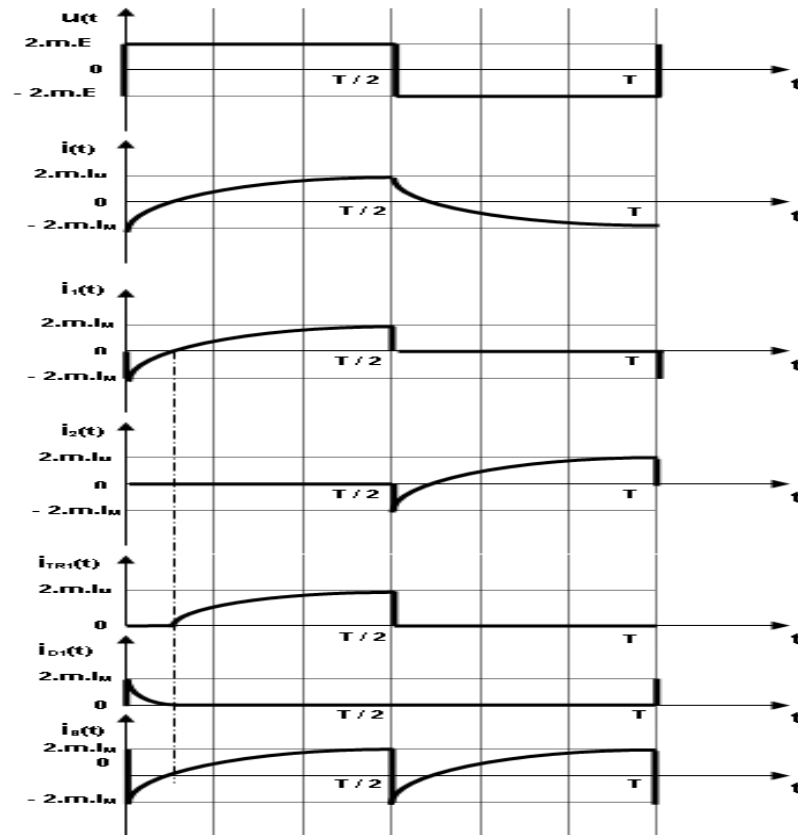


Figure 2.23 : Allures des différentes grandeurs : $u(t)$, $i(t)$, $i_1(t)$, $i_2(t)$, $i_{TR1}(t)$, $i_{D1}(t)$ et $i_s(t)$

b) Commentaire sur les allures des graphes :

➤ Lorsque le transistor TR_1 , est fermé, il ne peut pas conduire si le courant i_1 est négatif la diode D_1 conduit. Il en est de même pour le transistor TR_2 est fermé et que le courant i_2 est négatif : la diode D_2 conduit. L'énergie magnétique emmagasinée par l'inductance L lors de la conduction des transistors TR_1 et TR_2 , est restituée à la source de tension E .

➤ Le courant débité par la source de tension continue E est tantôt négatif et tantôt positif et ceci a une fréquence double de la fréquence des commutations des interrupteurs. Le courant $i_s(t)$ présente des discontinuités lors des commutations des transistors.

➤ Les diodes positionnées tête-bêche qui assurent la continuité du courant $i(t)$ dans l'inductance L : sans ces diodes de roue libre, l'énergie magnétique de l'inductance se libérera de toute façon, soit en provoquant un arc électrique entre ses spires ou celles du transformateur, soit en détruisant les transistors.

B. Onduleurs à interrupteurs en série [67] :

Figure 2.24 représente un onduleur avec une source à point milieu et deux interrupteurs en série.

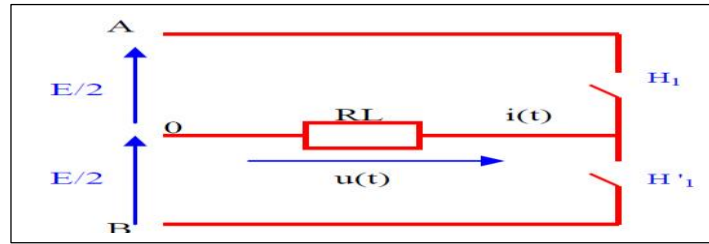


Figure 2.24 : Onduleur à interrupteur en série

❖ **Méthodes de commutation :**

Les deux interrupteurs H_1 et H'_1 ne sont jamais fermés simultanément, car dans le cas contraire il y aurait court-circuit des sources de tension. Représentons maintenant les deux graphes $u(t)$ et $i(t)$ sachant que : Dans l'intervalle temporel $[0 < t < \frac{T}{2}]$, l'interrupteur H_1 est fermé et l'interrupteur H'_1 est ouvert. Alors : $u(t) = \frac{E}{2}$ et le courant a une croissance exponentielle de la valeur minimale $(-I_M)$ à la valeur maximale I_M .

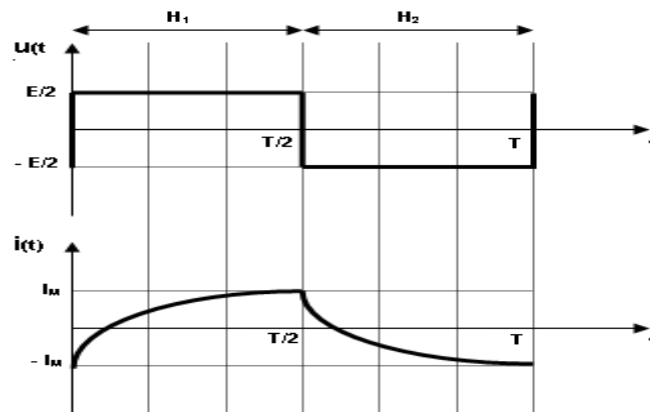


Figure 2.25. Allures des grandeurs : $u(t)$, $i(t)$

Dans l'intervalle $[\frac{T}{2} < t < T]$ l'interrupteur H'_1 est fermé. Nous obtenons : $u(t) = \frac{-E}{2}$ et le courant $i(t)$ effectue une décroissance exponentielle de la valeur I_M à la valeur $(-I_M)$.

Lorsqu'un interrupteur est fermé, il est parcouru par un courant tantôt positif et tantôt négatif : les interrupteurs seront donc bidirectionnels.

C. Onduleurs en pont (ou en H) :

Cette représentation d'onduleur (figure 2.26), utilise deux bras ($H_1-H'_1$) et ($H_2-H'_2$) à interrupteurs en série. L'onduleur en pont ne nécessite pas de source de tension d'alimentation à point milieu [68]:

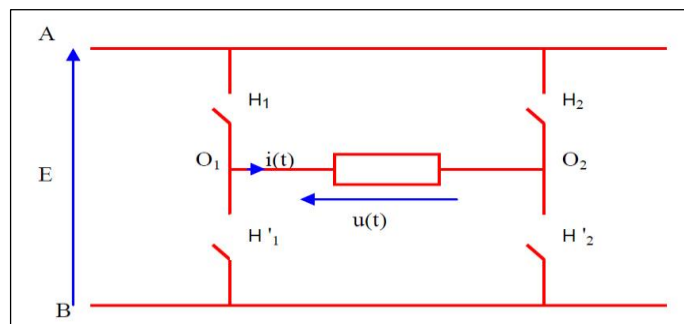


Figure 2.26. Onduleur en pont

❖ **Méthodes de commande :**

Les allures des graphes sont données dans le cas d'une charge RL. Nous allons étudier les deux modes de commande symétrique et décalée (voir figure 2.27) :

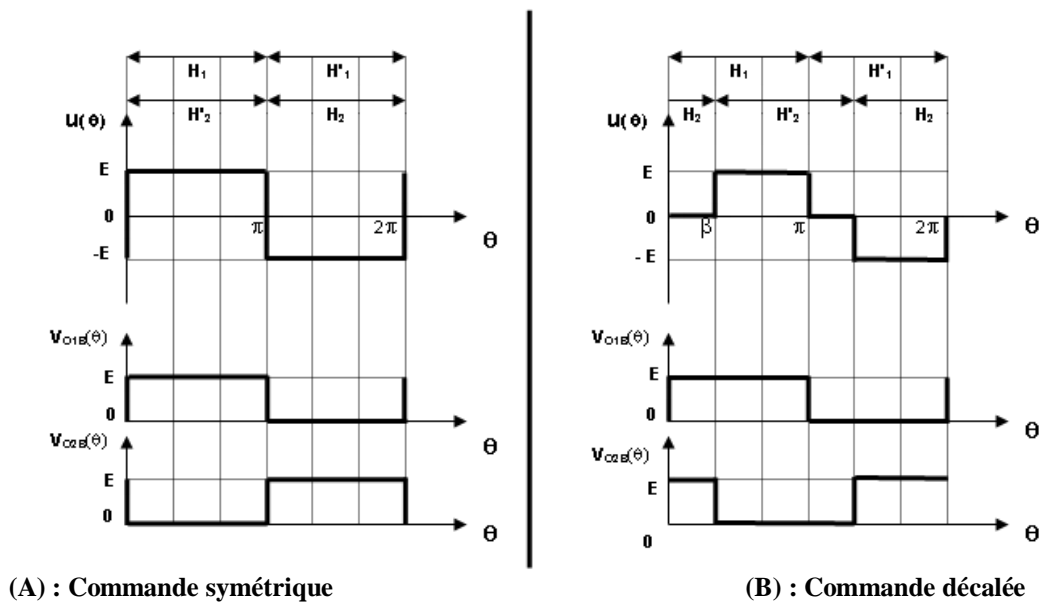


Figure 2.27. Allures des graphes des tensions

Afin de simplifier l'écriture, nous remplacerons les intervalles temporels par les intervalles angulaires, en faisant remarquer que nous passerons des premiers aux seconds en effectuant des multiplications par la pulsation [69] .

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \text{ et } \theta = \omega.t \tag{2.27}$$

$$\pi = \omega \cdot \frac{T}{2} \text{ Et } 2 \cdot \pi = \omega \cdot T \tag{2.28}$$

En commande symétrique, dans l'intervalle $[0 < \theta < \pi]$, les deux interrupteurs H_1 et H_2 sont fermés. Alors le point O_1 est au potentiel de A, et le point O_2 est au potentiel de B, donc on a :

$$U(t) = V_A - V_B = E \tag{2.29}$$

Puis, dans l'intervalle $[\pi < \theta < 2]$, Les interrupteurs H_2 et H_1' sont fermés .Le point O_1 se retrouve au potentiel de B, et le point O_2 est au potentiel de A.

$$U(t) = V_B - V_A = - E \tag{2.30}$$

On remarque que lors d'une commande symétrique, les fermetures des deux bras d'interrupteurs sont dans ce cas décalées de l'angle π , ce qui conduit à une valeur efficace U de la tension $u(t)$ égale à :

$$U = E \tag{2.31}$$

Enfin, l'onde $u(t)$ présente une symétrie par rapport à l'origine O , et sa série de Fourier est constituée par des termes en sinus de rangs impairs :

$$U(t) = \frac{4.E}{\pi} \left(\sin\theta + \frac{1}{3} \sin 3\theta + \frac{1}{5} \sin 5\theta + \frac{1}{7} \sin 7\theta + \dots + \frac{1}{K} \sin K\theta \right) \tag{2.32}$$

K étant un entier impair.

En commande décalée, les fermetures des deux bras d'interrupteurs sont décalées de l'angle $(\beta + \pi)$.

Evaluons la valeur efficace U de l'onde décalée :

$$U^2 = \frac{1}{\pi} \int_{\beta}^{\pi} E^2 d\theta = 2 \cdot E^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{\beta}{2\pi} \right) \quad (2.33)$$

Nous pouvons ainsi en réglant l'angle β , faire varier la valeur efficace de la tension rectangulaire $u(t)$:

$$U = E \cdot \sqrt{1 - \frac{\beta}{\pi}} \quad (2.34)$$

Afin d'écrire simplement la série de Fourier de l'onde $u(t)$, nous faisons effectuer à l'axe des ordonnées, une translation vers la droite d'un angle : $\alpha = \frac{\beta}{2}$

Nous obtenons ainsi l'onde $u(t)$ décalée de α et symétrique par rapport à l'origine O (voir figure 2.28)

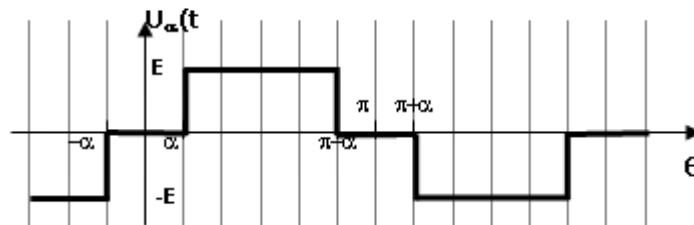


Figure 2.28. Commande décalée

La série de Fourier est maintenant constituée par des termes impairs en sinus :

$$U(t) = \frac{4 \cdot E}{\pi} \left((\cos \alpha) \cdot \sin \theta + \frac{1}{3} (\cos 3\alpha) \cdot \sin 3\theta + \frac{1}{5} (\cos 5\alpha) \cdot \sin 5\theta + \dots + \frac{1}{K} (\cos K\alpha) \cdot \sin K\theta \right) \quad (2.35)$$

Si $\alpha = 30^\circ$ tous les termes impairs multiples de trois s'annulent.

a) Configuration à transistors :

Considérons la figure 2.29:

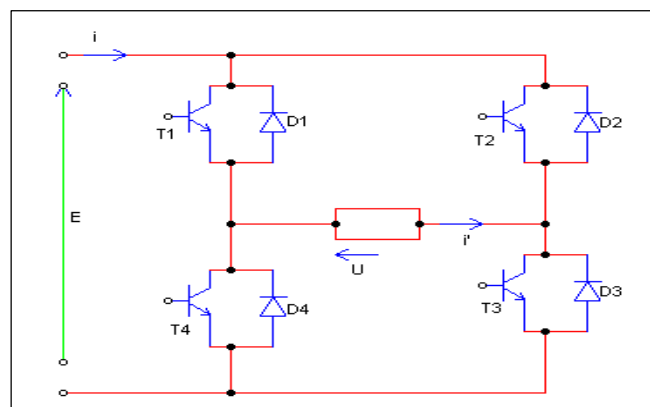


Figure 2.29. Onduleur en pont

Les deux bras sont constitués par des interrupteurs bidirectionnels, par exemple $H_1 : [Tr_1 ; D1]$. Les allures des graphes des courants et des tensions seront données dans le cas d'une charge RL, pour les deux modes de commande : **symétrique** et **décalée**[69], [70] (voir figure 2.30)

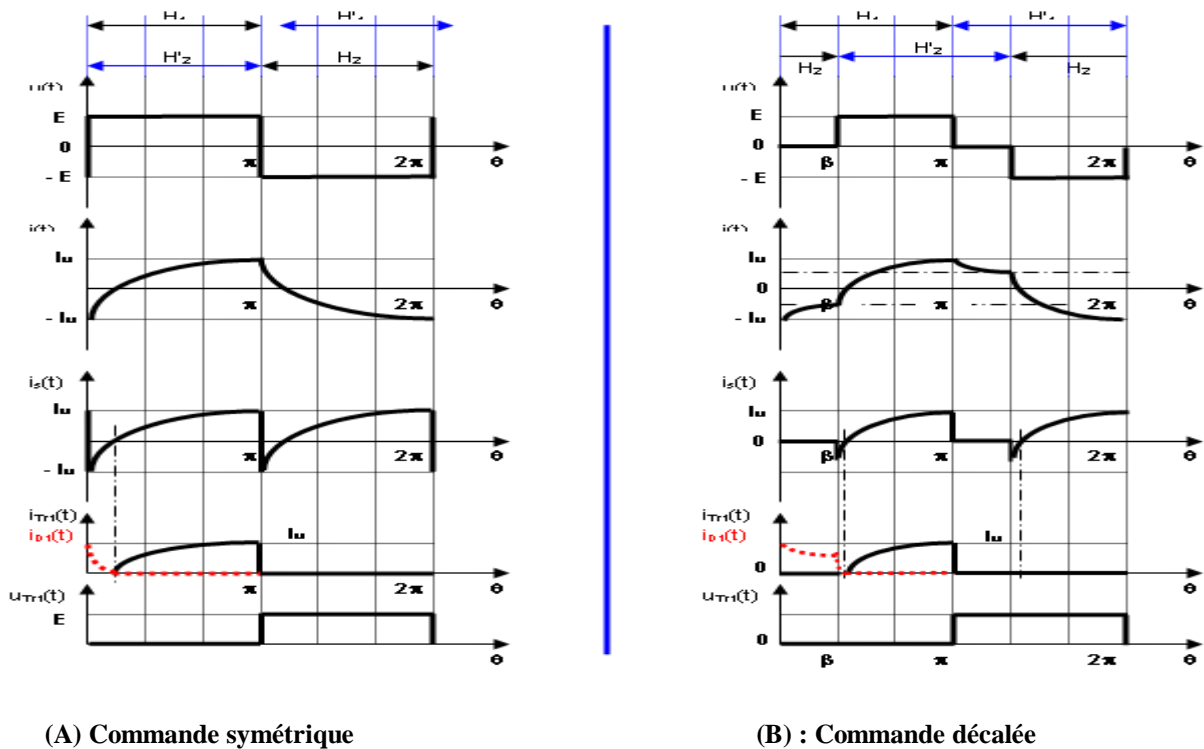


Figure 2.30. Allure des graphes (courants et tensions)

b) Méthode de commande de l'onduleur : MLI(modulation de largeur d'impulsion)

Nous avons vu que pour une valeur particulière de l'angle de décalage ($\alpha = 30$) tous les termes harmoniques de rang multiple de trois pouvaient être supprimés. Ainsi, afin d'atténuer certains harmoniques contenus dans les ondes rectangulaires, on module leur largeur : c'est la modulation de largeur d'impulsion ou MLI [67] ,[71], .

Cette technique permet d'éviter l'emploi d'un filtre encombrant et onéreux, en sortie d'onduleur.

o **Onde MLI unipolaire :**

Considérons une onde rectangulaire $e(t)$ d'amplitude E , et associons-la à d'autres ondes $e(\alpha_i)$, décalées de l'angle α_i et d'amplitude E , afin d'obtenir une onde résultante $e_u(t)$ dont l'équation de définition est [67] :

$$e_u(t) = e(t) + \sum_{i=1}^{i=k} (-1)^i \cdot e(\alpha_i) \tag{2.36}$$

Prenons un exemple avec $i = 2$, et construisons les représentations graphiques permettant la construction de l'onde MLI $e_u(t)$ en effectuant la somme algébrique :

$$e_u = e - e(\alpha_1) + e(\alpha_2) \tag{2.37}$$

o **Onde MLI bipolaire :**

L'onde bipolaire $e_b(t)$ est constituée par une somme algébrique d'ondes rectangulaires d'amplitude E , dont l'équation de définition est :

$$e_b = e + 2 \cdot \sum_{i=1}^{i=k} (-1)^i \cdot e(\alpha_i) \tag{2.38}$$

Prenons un exemple avec $i = 2$, et construisons les représentations graphiques permettant la construction de l'onde MLI $e_b(t)$ en effectuant la somme algébrique :

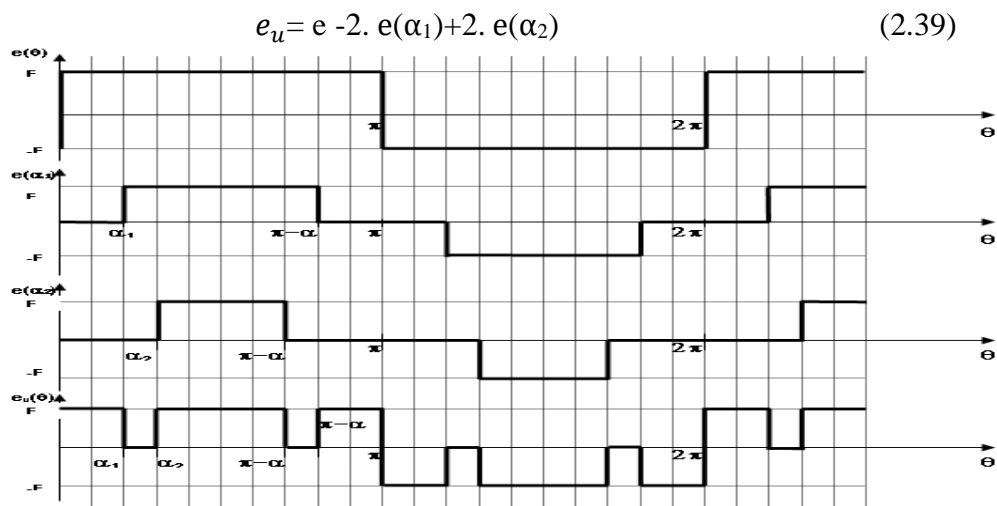


Figure 2.31 . MLI unipolaire

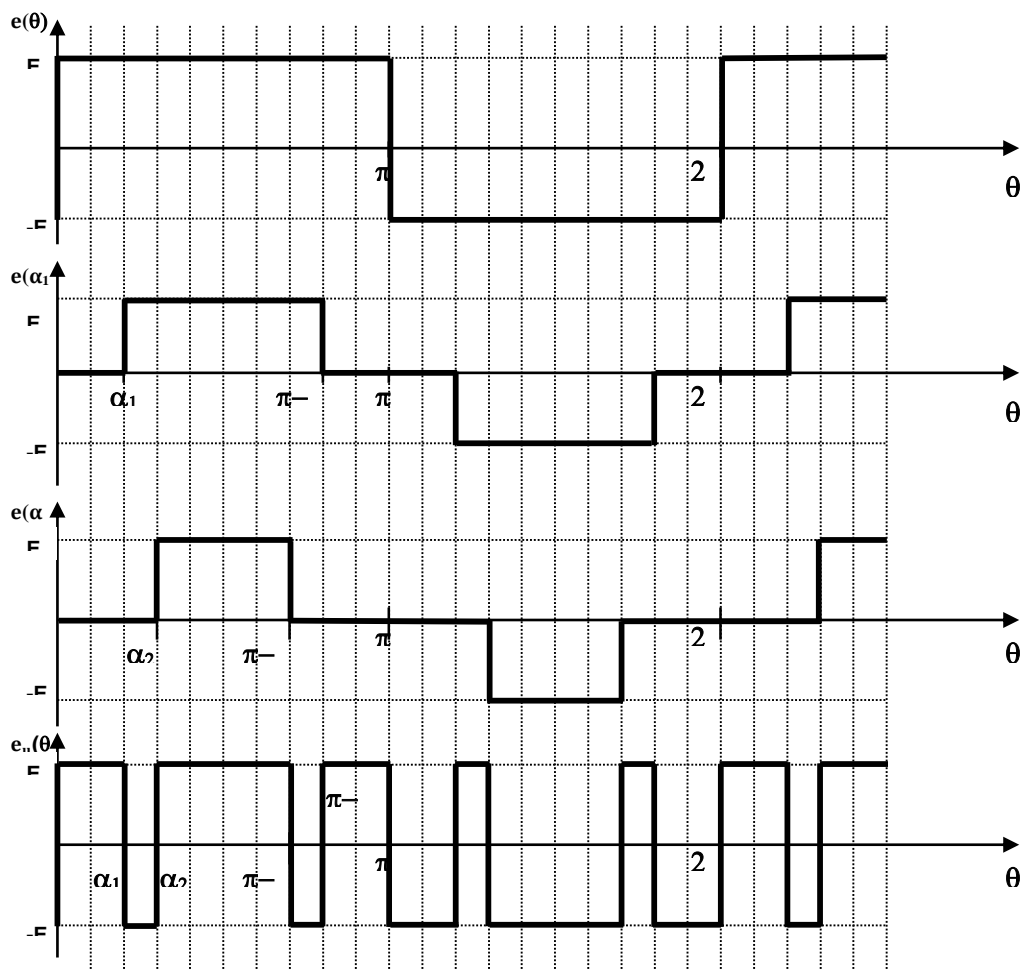


Figure 2.32 . MLI bipolaire

A partir des trois séries de Fourier, déjà écrites, des ondes partielles, nous pouvons effectuer membre à membre la somme suivante :

$$e_u = e^{-2} \cdot e(\alpha_1) + 2 \cdot e(\alpha_2) \quad (2.40)$$

$$\text{Nous obtenons : } e_b = \sum_n \left(\frac{4.E}{n.\pi} (1 - 2.\cos n\alpha_1 + 2.\cos n\alpha_2) \right) \sin n\theta = \sum_n A_n . \sin n\theta \quad (2.41)$$

Afin que cette onde MLI bipolaire $e_b(t)$ ne contienne pas, par exemple d'harmoniques impairs 3 et 5, il suffit de résoudre le système de deux équations à deux inconnues α_1 et α_2 :

On peut ainsi annuler les harmoniques 3 et 5, pour les angles : $\alpha_1 = 23,6^\circ$ et $\alpha_2 = 33,3^\circ$. Dans le cas où l'on souhaite annuler K harmoniques, il faut K changements d'état de l'onde bipolaire $e_b(t)$ aux angles $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots \alpha_K$ situés avant $\frac{\pi}{2}$: ce qui conduira à la résolution d'un système à K équations et à K inconnues.

2.2.4.5. Harmoniques :

Une charge non linéaire appelle du réseau électrique un courant déformé, lequel va modifier l'allure de la tension sinusoïdale. Les charges non linéaires génèrent des courants harmoniques qui circulent à partir de la charge vers l'alimentation en empruntant le chemin de la moindre impédance. Les courants harmoniques sont des courants dont la fréquence est un multiple entier de la fondamentale (celle de l'alimentation électrique). La superposition des courants harmoniques sur le courant fondamental provoque les formes d'onde non sinusoïdales associées aux charges non linéaires [72].

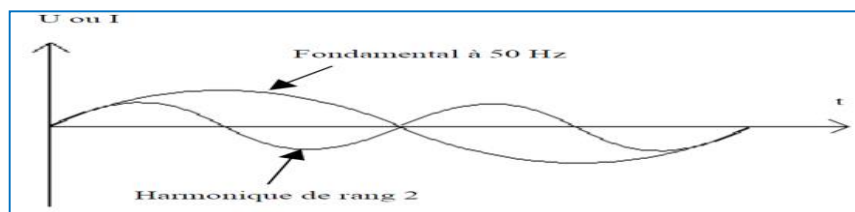


Figure 2.33. Allure d'une harmonique

Figure 2.33 montre le signal original, fondamental à 50 Hz, ainsi que son harmonique de rang 2 à 100 Hz. Ainsi la fréquence de l'harmonique de rang 3 sera égal à 3 fois la fréquence du fondamental, c'est à dire égal à 150 Hz.

A. Symptômes et conséquences des harmoniques [72]. :

La présence d'harmoniques perturbe les autres charges, même linéaires, connectées aux bornes de la même source de tension. En effet, ces charges risquent de ne plus être alimentées dans des conditions satisfaisant aux références de tension exigées.

Les autres conséquences possibles sont :

- Echauffement du câble de neutre.
- Disjonctions différentielles intempestives dues aux fréquences des harmoniques, associées aux capacités parasites du réseau.
- Valeurs des courants efficaces plus élevées que celles nécessaires pour les besoins énergétiques de la charge.
- Sur échauffement des installations (transformateur, câbles...) par effet pelliculaire
- Résonance en tension sur un système composé de condensateurs destinés à relever le facteur de déplacement.

B. L'harmonique mesuré en pratique :

Les harmoniques les plus fréquemment rencontrés dans le cas des réseaux triphasés, sont les harmoniques de rangs impairs. Au-delà du rang 50, les courants harmoniques sont négligeables et leur mesure n'est plus significative. Les harmoniques de rang 3, 5, 7, 9, 11 et 13 sont les plus surveillés.

La compensation des harmoniques jusqu'au rang 13 est impérative, une bonne compensation prendra également en compte les harmoniques jusqu'au rang 25.

2.2.4.6. Paramètre de performance de l'onduleur :

La qualité de l'énergie fournit par un onduleur est évaluée suivant les paramètres de performance suivant :

A. Facteur de la n^{ième} harmonique :

C'est la mesure de la contribution individuelle des harmoniques définie comme suit :

$$HFN = \frac{V_{\text{eff } n}}{V_{\text{eff } 1}} \quad (2.42)$$

B. Distorsion d'harmonique total THD et le facteur DF :

Le taux de distorsion, encore appelé distorsion harmonique totale est défini comme le rapport de la valeur efficace globale des harmoniques (c'est-à-dire leur somme quadratique) à la valeur efficace de la composante fondamentale [73].

$$THD = \frac{\sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots}}{F_1} \quad (2.43)$$

On va couramment jusqu'au 40^{ème} ou 50^{ème} rang d'harmoniques. Cette grandeur permet d'évaluer à l'aide d'un nombre unique la perturbation d'un courant ou d'une tension en un point d'un réseau, voire de comparer deux réseaux sujets à des harmoniques de rangs différents.

Le THD représente sensiblement l'augmentation de l'effet Joule dans les lignes et les dispositifs.

Un appareil de mesure qui n'effectue pas une analyse spectrale ne mesure pas le THD mais une valeur approchée appelée le facteur de distorsion, ou DF.

Ce facteur, inférieur à 100 %, est défini par le rapport de la valeur efficace des harmoniques à la valeur efficace du signal total.

$$DF = \frac{\sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots}}{\sqrt{F_1 + H_2^2 + H_3^2 + \dots}} \quad (2.44)$$

Lorsque la distorsion est faible, les deux valeurs THD et DF sont équivalentes. Si DF dépasse les 15 %, il est possible de corriger la mesure pour obtenir le taux de distorsion harmonique total.

$$THD = \frac{DF}{\sqrt{1 + DF^2}} \quad (2.45)$$

Un bon appareil d'analyse de réseaux donne la valeur efficace du signal puis le compare à celle du signal sans son fondamental. Mais certains appareils ne mesurent que la valeur moyenne des signaux redressés et non pas les valeurs efficaces.

La mesure peut être alors inférieure à DF, et aucune correction ne permet de retrouver THD. La distorsion de l'onde de tension est proportionnelle à l'impédance du réseau et à l'amplitude des courants harmoniques.

La précision de son calcul n'est limitée que par l'incertitude de l'impédance du réseau. Le taux de distorsion du réseau électrique est presque partout inférieur à 2% en HTB, 5% en HTA et 7% en BT. C'est la mesure de la similitude de la forme d'onde réelle avec sa composante fondamentale :

$$THD = \frac{1}{V_{\text{eff } 1}} \left[\sum_{n=2,3}^{\infty} V_{\text{eff } n}^2 \right]^{1/2} \quad (2.46)$$

2.2.4.7. Classification des onduleurs pour systèmes photovoltaïques :

Qu'ils soient monophasés ou triphasés, les topologies d'onduleurs sont classées sur la base du nombre d'étages de traitement de puissance, l'emplacement des condensateurs de découplage de puissance, s'ils emploient des transformateurs ou non et les types de l'interface réseau à savoir [2] :

2.2.4.7.1. Onduleur pour application autonome (Stand alone Inverter)

C'est un onduleur conçu pour une application autonome à distance ou hors réseau avec batteries de secours où l'onduleur est alimenté en courant continu par des batteries chargées par les modules photovoltaïques et le convertit en courant alternatif pour alimenter les charges. Il convient pour système solaire, l'électrification rurale, l'électrification des villages dans une région éloignée où le réseau électrique n'est pas disponible (voir figure 2.34).

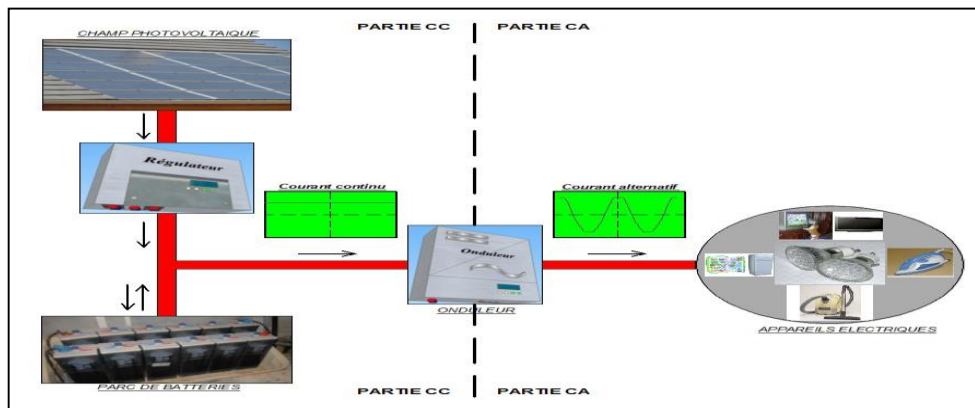


Figure. 2.34. Schéma d'installation d'un onduleur autonome [74]

2.2.4.7.2. Onduleur pour couplage au réseau électrique (Grid tied Inverter) :

Il est conçu spécifiquement pour les applications raccordées au réseau qui ne nécessitent pas de système de stockage par batteries. L'onduleur convertit le courant continu produit par le générateur PV en un courant alternatif pour alimenter les appareils électriques et la vente d'électricité excédentaire au réseau (voir figure 2.35).

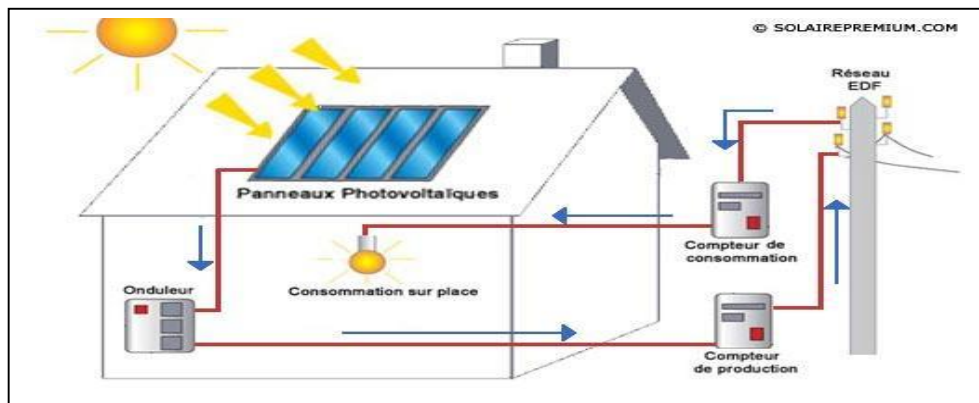


Figure 2. 35. Installation d'un onduleur couplé au réseauxans batteries de stockage [75]

2.2.4.7.3. Onduleur hybride (Hybride Inverter) :

L'onduleur hybride est conçu pour le système d'alimentation hybride qui combine le solaire avec le générateur diesel et d'autres sources d'énergie renouvelables telles que le générateur éolien, l'hydro générateur, etc.... Il peut fonctionner soit comme un onduleur autonome ou un onduleur couplé au réseau.

Exemple d'onduleurs hybrides	Images
Système hybride - Diesel série	
Système hybride PV - Diesel commuté	
Système hybride PV - Diesel parallèle	

Tableau 2.2. Système hybrides PV-Diesel

2.2.4.7.4. Classification selon le nombre d'étages de traitement de puissance [76] :

On peut distinguer trois cas d'onduleurs, (voir figure 2.36) à savoir :

- a) A un seul étage de conversion
- b) A deux étages de conversion où nous avons l'ajout d'un convertisseur DC/DC
- c) Double étage de la technologie AC-module, dans lequel chaque module est connecté à son propre convertisseur DC/DC

On trouve également sur le marché :

- Les onduleurs sans transformateurs munis de convertisseur (DC/DC)
- Les onduleurs munis d'un transformatrice basse fréquence 50 Hz (BF).
- Les onduleurs munis d'une transformatrice haute fréquence (HF).

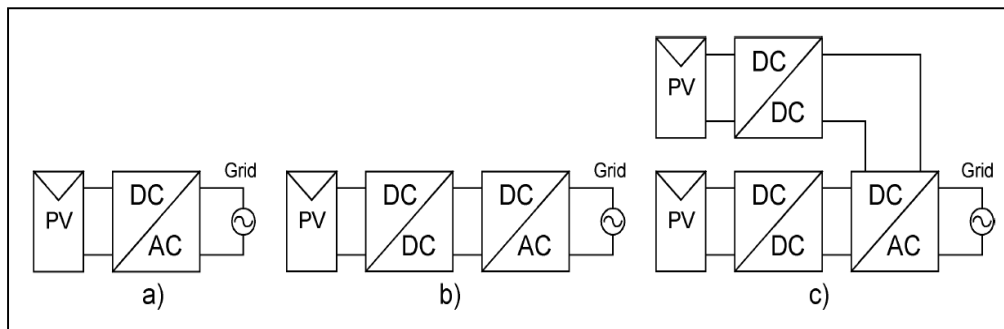


Figure 2.36. Classification selon le nombre d'étages de traitement de puissance [2]

2.3. Matériels et Méthodes : Système d'ozonation

Le système photovoltaïque étudié alimente un système d'ozonation composé de :

- Générateur d'ozone.
- Système de commande
- Transformateur HT/HF

2.3.1. Générateur d'ozone :

Un réacteur DBD surfacique de forme plane a été réalisé et optimisé (figure 2.37). La barrière diélectrique est constituée d'une plaque en plexi-glace ayant une longueur de 15 cm, une largeur de 10 cm et une épaisseur de 2 mm. Les électrodes sont une fine bande d'adhésif en aluminium collée directement sur l'extérieur. L'électrode reliée à la haute tension représentant un certain nombre de fils d'aluminium (10) collés sur la surface du diélectrique. L'électrode de masse désignant l'électrode reliée à la terre, est une bande d'aluminium de 17,5 mm × 120 mm.

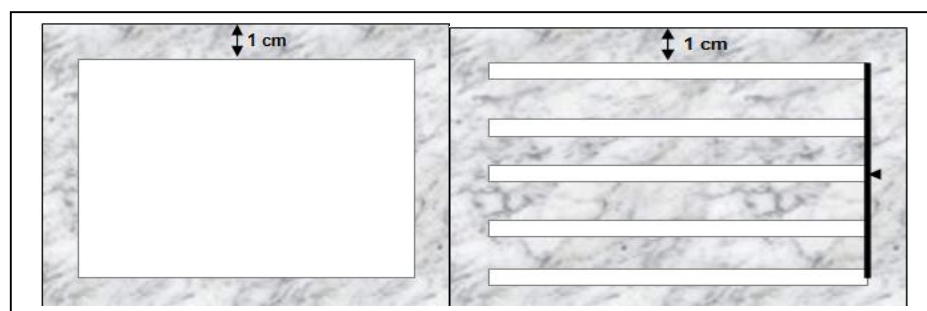


Figure 2. 37. Vue de dessous et de dessus de la cellule pour la décharge en surface.

2.3.2. L'ozone :

2.3.2.1. Historique sur l'ozone :

La molécule d'ozone a été découverte en 1789 par le chimiste Hollandais Martin van Marum en faisant passer un courant électrique à travers de l'oxygène enfermé dans une éprouvette. Sans savoir ce que révélait son travail, il définit cette odeur comme étant celle de l'électricité et l'élément créé comme de l'acide azotique. Cette étude est reprise en 1839 par le chimiste allemand Christian Friedrich Schönbein qui, en approfondissant les recherches de Van Marum, parvient à isoler la molécule). La formule de l'ozone, O_3 n'a été déterminée qu'en 1865 par Jacques-Louis Sorte, puis confirmée en 1867 par Christian Friedrich Schonbein. Autour des années 1850, on estime qu'elle est mesurée dans l'atmosphère de plus de 300 villes. C'est Werner Von Siemens qui fabriqua le tout premier générateur d'ozone. La relation entre l'ozone et les oxydes d'azote a été mise en évidence dans les années 1970 par Paul Josef Cruutzen, prix Nobel de chimie 1995. Ce sont surtout les travaux de Cierge qui à partir de 1953 ont fait avancer nos connaissances dans le domaine de la chimie de l'ozone. Ces travaux ont été consacrés en 1995 par l'attribution du prix Nobel de chimie à Paul Cruutzen, Mario Molina, et F. Sherwood Roland pour leurs travaux sur la disparition de la couche d'ozone [77].

2.3.2.2. Généralités sur l'ozone :

L'ozone est une forme allotropique de l'oxygène formée de trois atomes de cet élément. Dans son état fondamental, la molécule d'ozone présente deux liaisons oxygène d'une longueur de $1,278 \pm 0,003 \text{ \AA}$ et un angle de $116,45^\circ$. Elle possède un faible moment dipolaire de 0,53 Debye dont la fonction la plus connue est la protection contre un puissant désinfectant ayant une grande variété d'utilisation. Dans les conditions normales de température

et de pression, l'ozone est treize fois plus soluble dans l'eau que le dioxygène. Il s'agit d'un gaz bleu pâle et instable qui, à la température ambiante, se caractérise par une odeur piquante [78].

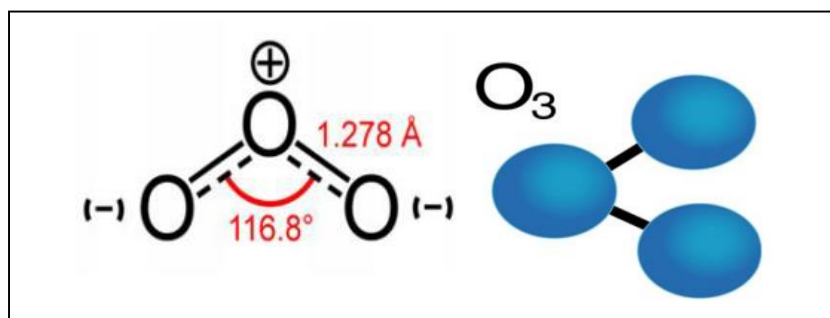


Figure 2.38. Molécule d'ozone.

2.3.2.3. Avantages et inconvénients de l'ozone [79] :

Avantages	Inconvénients
L'ozone supprime les bactéries, virus et autres contaminants organiques et inorganiques.	Investissement élevé, Système complexe
L'ozone permet de réduire de manière significative les niveaux de produits chimiques dangereux, tels que le chlore.	
L'ozone agit comme un micro flocculant, contribuant à l'élimination des minéraux tels que le fer et le manganèse.	
L'ozone ne laisse ni produits résiduels chlorés, ni goûts ni odeurs déplaisantes chimiques.	
L'ozone est généré sur site à la demande à partir d'air/oxygène et d'énergie électrique.	
Aucun stockage, ni manipulation de produits chimiques	

Tableau 2.3. Avantages et inconvénients de l'ozone

2.3.2.4. Réaction de l'ozone avec les substances oxydables :

La réaction de l'ozone est illustrée à la figure (2.39) selon les étapes suivantes :

- La molécule d'oxygène comprend deux atomes d'oxygène (O_2).
- Le haut voltage casse ces deux atomes en deux atomes d'oxygène (O_1).
- Les atomes d'oxygènes libres (O_1) s'unissent aux molécules d'oxygène (O_2).
- Le résultat est une nouvelle molécule avec 3 atomes d'oxygène : Ozone (O_3).
- La combinaison des 3 atomes d'oxygène forme l'ozone, molécule instable au contact des substances oxydables et cette combinaison libère de l'oxygène libre.
- Le résultat de cette réaction entre l'oxygène et les substances oxydables permet aux molécules organiques d'être transformées.

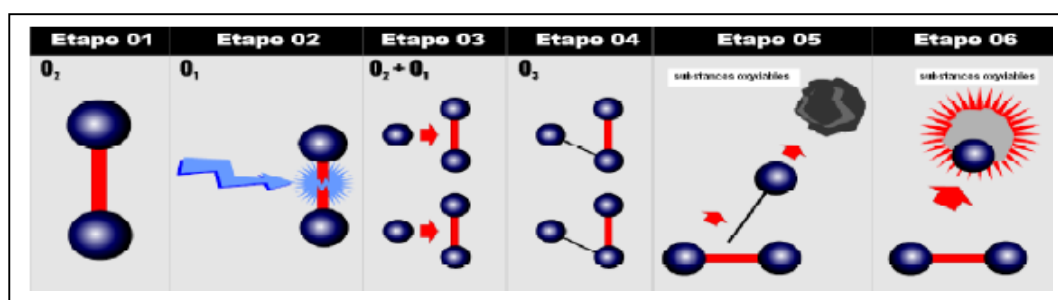
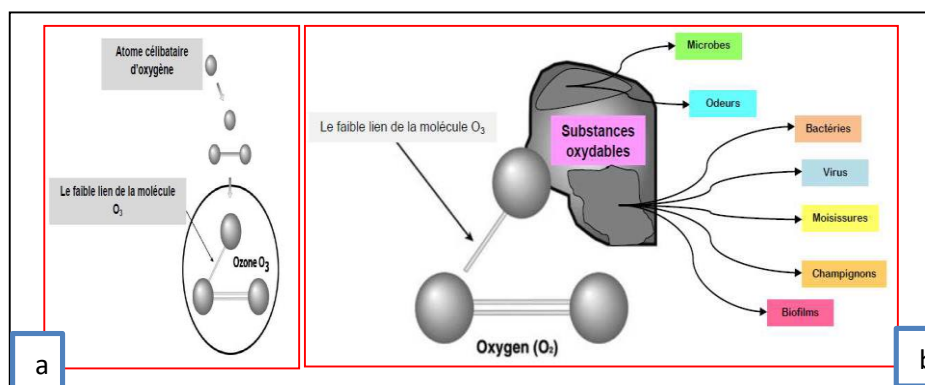


Figure 2.39 . Formation et réaction de l'ozone devant les substances oxydables [80].

Le faible lien de l'ozone tenu du troisième atome d'oxygène fait que la molécule soit instable et donc, très efficace comme le montre (figure 2.40 a). C'est le troisième atome d'oxygène de l'ozone qui est extrêmement réactif. Cet atome se fixe facilement à d'autres molécules. La réaction d'oxydation se produit sur une collision entre la molécule d'ozone et la molécule d'une substance oxydable (c'est-à-dire bactéries, champignons, virus, fer & manganèse...). Au cours de cette réaction d'oxydation, les molécules organiques sont transformées et dissoutes (figure 2. 40b)[81].



2.3.2.5. Efficacité de l'ozone :

L'ozone sert essentiellement pour la désinfection des bactéries, virus, germes et odeurs. Devant les bactéries, virus et germes. Les bactéries sont des créatures microscopiques, monocellulaires ayant une structure primitive.

La bactérie est recouverte d'une membrane relativement résistante, l'ozone se heurte à la paroi de la dernière, une quantité suffisante d'ozone passe à travers la membrane cellulaire et cela mène à la destruction des bactéries. Figure (2.41) montre les étapes d'oxydation des bactéries par l'ozone [78].

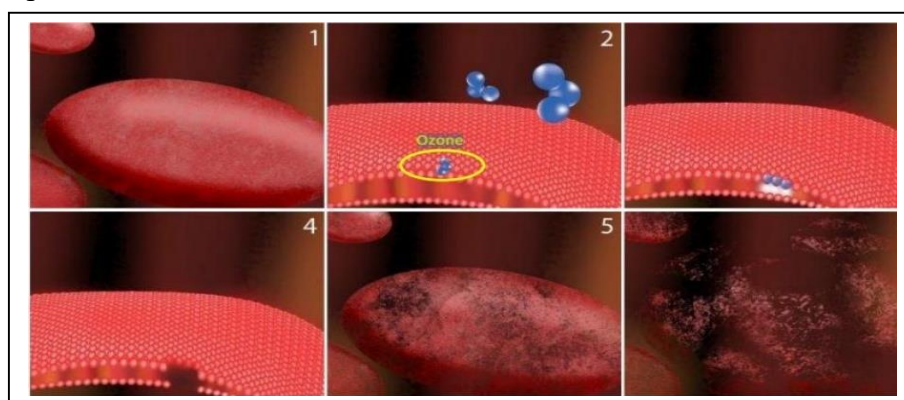


Figure 2.41. Effets de l'ozone sur les bactéries.

1. Image d'une cellule de bactéries ; 2. Gros plan d'une molécule d'ozone entrant en contact avec mur bactérien ; 3. Ozone pénétrant et créant un trou dans mur bactérien ; 4. Gros plan - Effet de l'ozone sur la paroi cellulaire ; 5. Quelques molécules d'ozone rentrent en contact avec la cellule bactérienne ; 6. Destruction de la cellule par l'ozone [78].

2.3.3. Système de commande :

Le système de commande sert à contrôler le fonctionnement du générateur d'ozone et réguler la concentration d'ozone dans la chambre de stockage. Ce système comprend :

- Un contacteur avec auxiliaires temporisés (Schneider LADR4) : Son rôle est d'établir et interrompre des courants dans les conditions normales du circuit à un temps déterminé.
- Un Minuteur (temporisateur (MCB-7 timer) : Permet le passage du courant après un temps déterminé entre 0,1 seconde à 60 heures (voir figure 2.42).

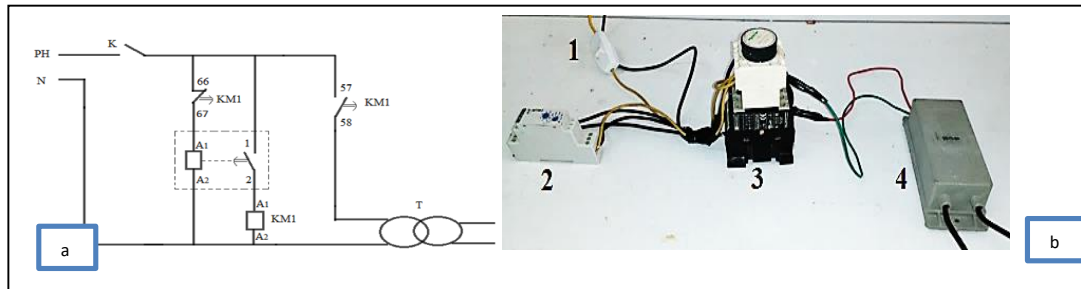


Figure.2.42 . a : Schéma électrique de commande automatique (système analogique)

b : Photographie de Système de commande automatique.

- 1 : Alimentation AC 220 V ; 2 : Interrupteur ; 3 : Minuteur ; 4 : Contacteur avec temporisateur ;
5 : Transformateur HT-HF.

2.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les éléments concevant deux systèmes, système photovoltaïque et système d'ozonation.

D'une part nous avons appréhendé le premier système photovoltaïque, ce qui a autorisé d'apparaître les convertisseurs statiques. Nous avons expliqué leurs principes de fonctionnement et leurs modèles mathématiques.

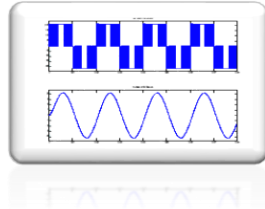
Le principe de fonctionnement de l'onduleur monophasé est développé, ce qui a permis de montrer différents techniques de commande symétrique, décalée, MLI. Dans le même contexte la classification des différents types des onduleurs est décrite :

- Selon le nombre d'étages de traitement de puissance ;
- Selon leur utilisation autonome (dans un site isolé) ou non autonome (raccordé au réseau électrique) ;
- S'ils sont munis (ou non) de transformateurs.

D'autre part, la description de la charge alimentée par ce système PV est divulguée. Il s'agit d'un générateur d'ozone accompagné d'un système de commande responsable de gérer la concentration de l'ozone qui est considéré de nos jours comme un moyen plus efficace pour désinfecter l'air.

Avant d'entamer la réalisation pratique de l'onduleur, Nous avons opté à réaliser des simulations sous environnements MATLAB et PROTUS ISIS pour deux topologies d'onduleur au chapitre 3.

CHAPITRE 3



**Application d'un environnement de
simulation à l'onduleur
Et au système de commande DBD**

Chapitre 3 : Application d'un environnement de simulation à l'onduleur Et au système de commande DBD

3.1. Introduction : Objectifs et méthodes de simulation

Le domaine de la simulation par ordinateur subit en ce moment un phénomène explosif d'innovation et d'élargissement des domaines d'application. Les capacités nouvelles du matériel et des logiciels accélèrent encore ce processus. Par ailleurs le prix du matériel ne cesse de baisser et les puissances de calcul accessibles ne cessent de croître.

La simulation est souvent utilisée pour reproduire des tests, et étendre le champ de ces tests sur le système à étudier. Elle permet d'en modifier les paramètres caractéristiques pour comparer plusieurs cas similaires. De la même manière, la structure de l'ensemble et les modèles élémentaires peuvent être modifiés. Les objectifs des études qui reposent sur la simulation sont :

- la compréhension de la structure et des rapports à l'intérieur d'un système.
- l'analyse et la prédiction du comportement du système.
- la conception et le dimensionnement de l'équipement.
- l'aide à l'expérimentation, qui peut éventuellement finir par..
 - ✓ le remplacement de l'expérimentation, souvent très coûteuse et même quelque fois impossible.
 - ✓ la validation des systèmes de contrôle.

Dans notre cas il s'agit d'une simulation pour avoir une idée sur le matériel et valider le schéma électrique à réaliser.

Au cœur du système solaire photovoltaïque, l'onduleur – véritable «gestionnaire énergétique» convertit le courant continu en un courant alternatif (CA). C'est pourquoi il nous a semblé nécessaire de faire un point sur ce petit appareil, composant indispensable pour une installation solaire photovoltaïque. Deux types de simulation ont fait l'objet de l'étude à savoir

○ La simulation du système à l'aide de MATLAB/SIMUUNK est tout à fait justifiable en raison de ses divers avantages uniques comme :

- la facilité et l'efficacité de programmation élevées,
- l'interface graphique élégante et son architecture nouvelle permettant l'adaptation à un grand nombre de cas.

○ La simulation par logiciel PROTUS ISIS intègre les microcontrôleurs (PIC, ARDUINO) dans son bibliothèque.

Ce chapitre verra

- L'implication de deux topologies d'onduleurs, onduleur avec transformateur et Onduleur sans transformateur muni d'un convertisseur DC /DC.
- Système de commande du générateur DBD

3.2. Onduleur avec transformateur :

Le schéma synoptique se présente comme suit :

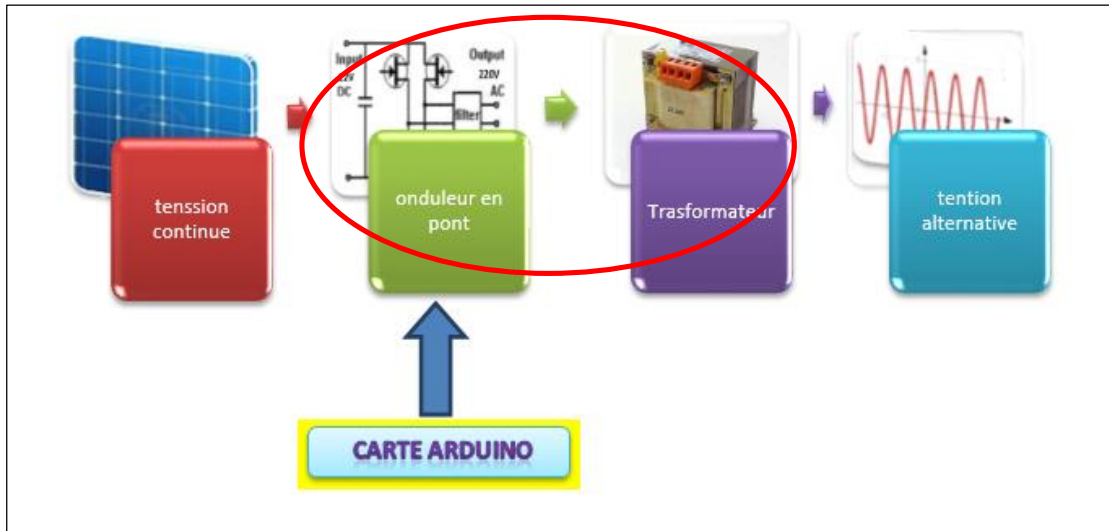


Figure 3.1. Schéma synoptique de l'onduleur avec transformateur dans un système photovoltaïque

L'onduleur est composé de deux parties distinctes : partie puissance et partie contrôle ou commande

3.2.1. Partie puissance :

La partie puissance est marquée par l'utilisation de :

- Pont complet composé de quatre (04) transistors MOSFET de canal N, chaque bras est piloté par un driver spécifique (IR2113).
- Le montage est doté d'un transformateur élévateur (12/220v).

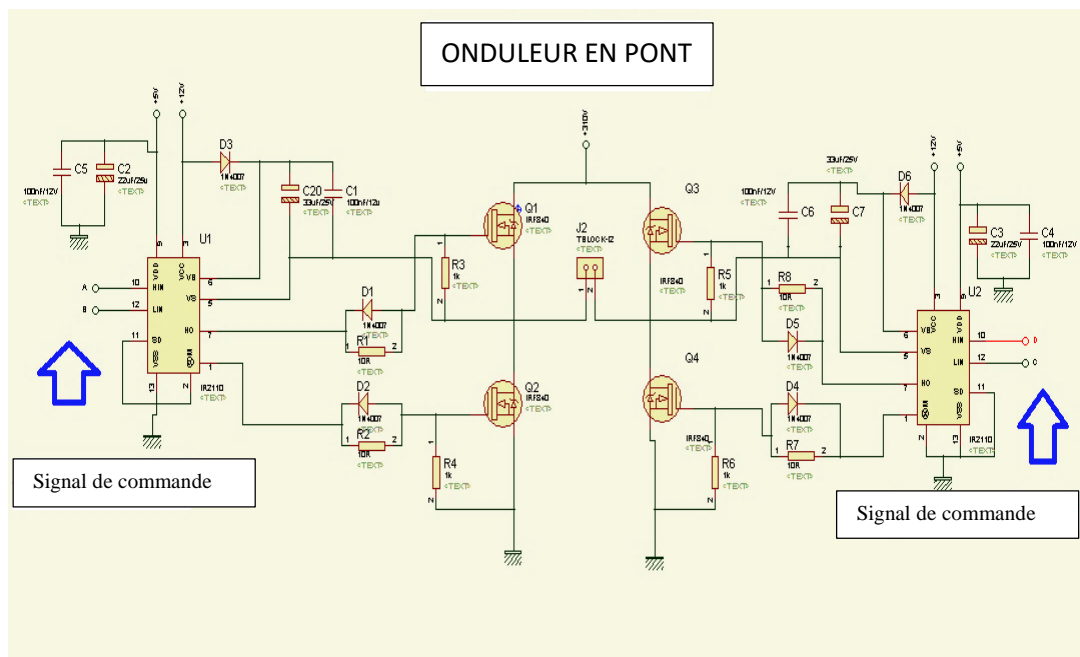


Figure 3.2 . Schéma électrique de l'onduleur [82]

3.2.2. Partie commande :

Nous rappelons que le but de la commande de l'onduleur est de permettre la production d'une tension ou un courant alternatif, à travers les ordres de commande appliqués aux divers interrupteurs de puissance.

a) Commande numérique :

La commande numérique permet la réalisation de signaux de commande de manière plus fiable avec des montages utilisant l'électronique analogique.

Pourquoi la commande numérique ?

Un système numérique possède certains avantages par rapport à un système analogique. On peut citer [83] :

- ✓ Nombre de composants réduit, donc un encombrement, coût et poids moindres.
- ✓ Une puissance de consommation du circuit de commande très faible.
- ✓ Une conception et un contrôle simples.
- ✓ Robustesse vis-à-vis les perturbations.
- ✓ Souplesse d'utilisation : les paramètres de réglage et la structure de la loi de commande sont modifiés par programmation plutôt que par modification du câblage avec un régulateur analogique.
- ✓ Possibilité d'améliorer le programme utilisé, par conséquent, optimiser les performances du convertisseur.

Dans le cas de notre étude, le cœur de la commande de l'onduleur est basé sur un microcontrôleur (carte ARDUINO voir Annexes 1)

b) Les bonnes raisons de choisir ARDUINO :

Il existe dans le commerce, une multitude de plateformes qui permet de réaliser les mêmes fonctions que la carte ARDUINO. Les raisons motivantes de son choix sont illustrées au tableau 3.1 :

Prix	Logiciel	Matériel	Compatibilité	Communauté
bon rapport qualité/prix.	Gratuit développé en Java	cartes électroniques dont les schémas sont en libre circulation sur internet	est compatible sous les plateformes les plus courantes (Windows, Linux et Mac)	On trouve les références du langage ARDUINO ainsi qu'une page complète de tutoriels sur le site ARDUINO

Tableau 3.1 : Avantages carte ARDUINO

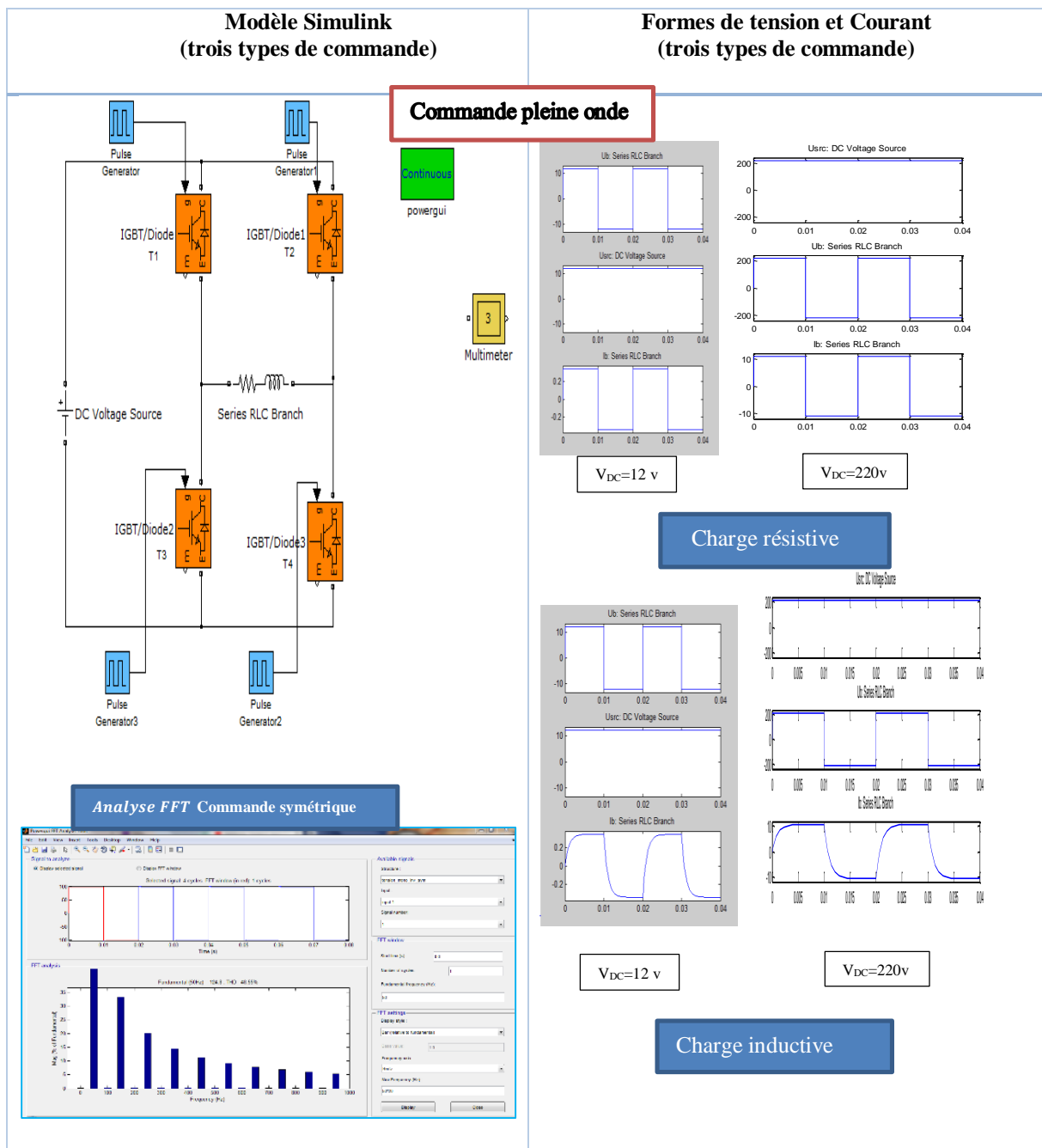
3.2.3. Simulations et interprétations :

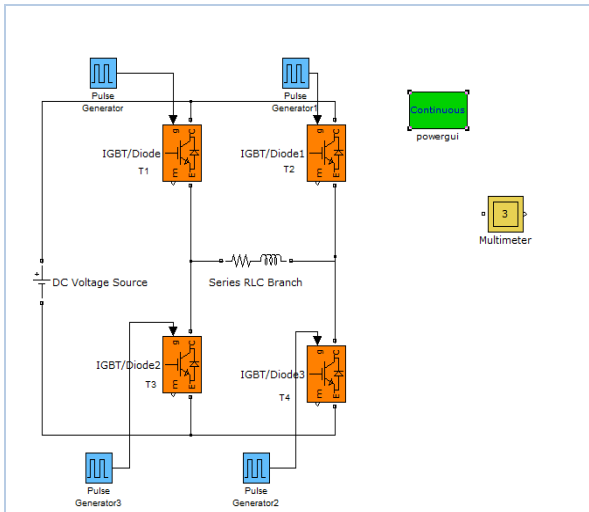
3.2.3.1. Sous environnement (Matlab Simulink)

Tableau 3.2 illustre la simulation de l'onduleur on pont (bloc Sim power system), selon trois types de commande :

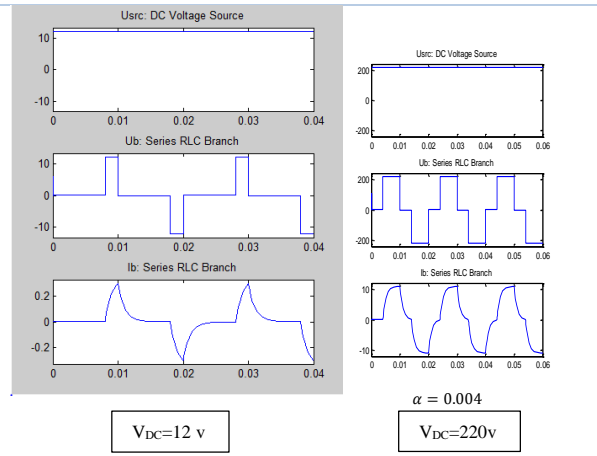
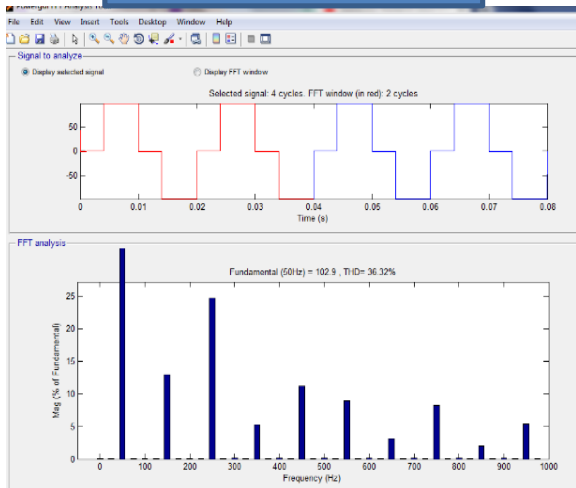
- Commande symétrique
- Commande décalée avec α (angle de retard)
- Commande MLI pour un indice de modulation $m = 0.8$

Tableau 3.3 illustre la simulation de l'onduleur on pont en Commande MLI unipolaire et bipolaire

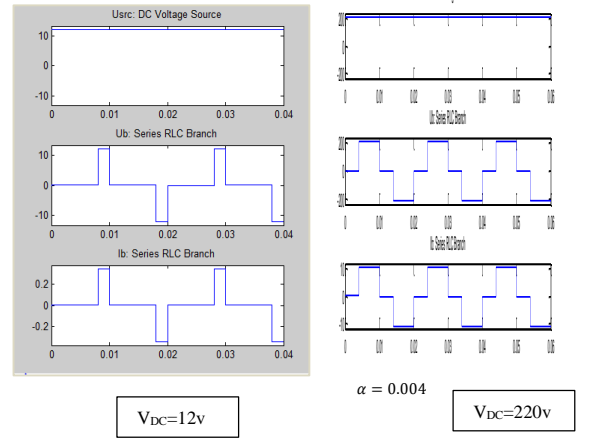




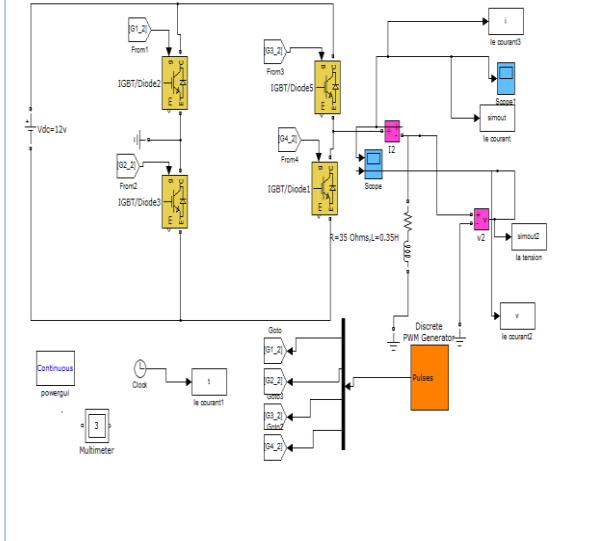
Analyse FFT Commande décalée



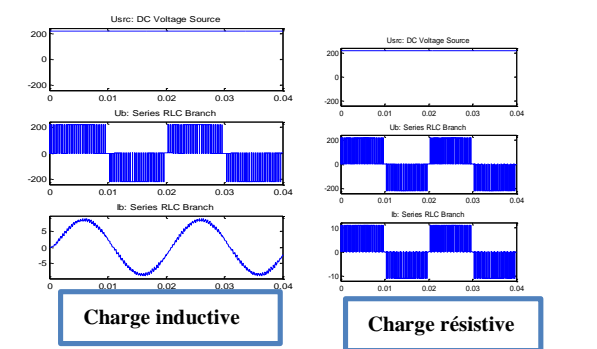
Commande décalée charge inductive



Commande décalée charge résistive

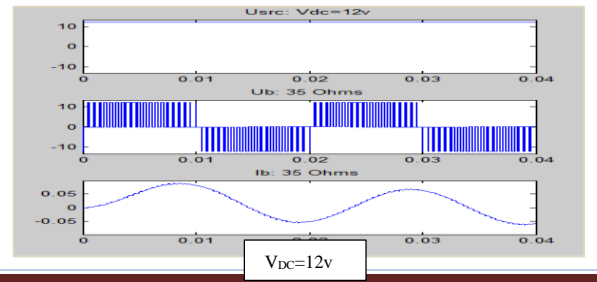


Commande MLI



Charge inductive

Charge résistive



VDC=12v

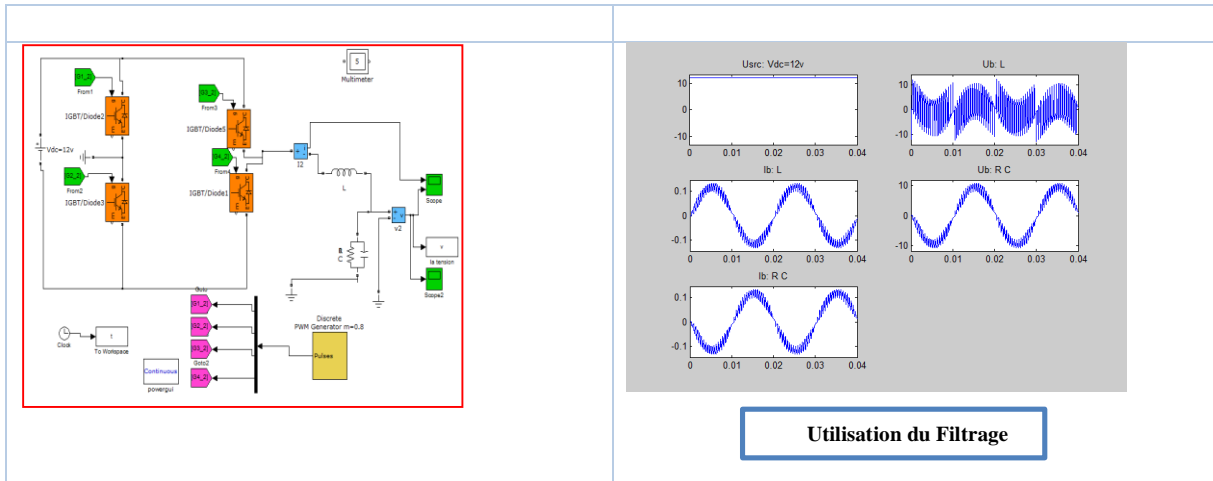


Tableau 3.2 . Simulation de l'onduleur monophasé (commandes symétrique, décalée, MLI)

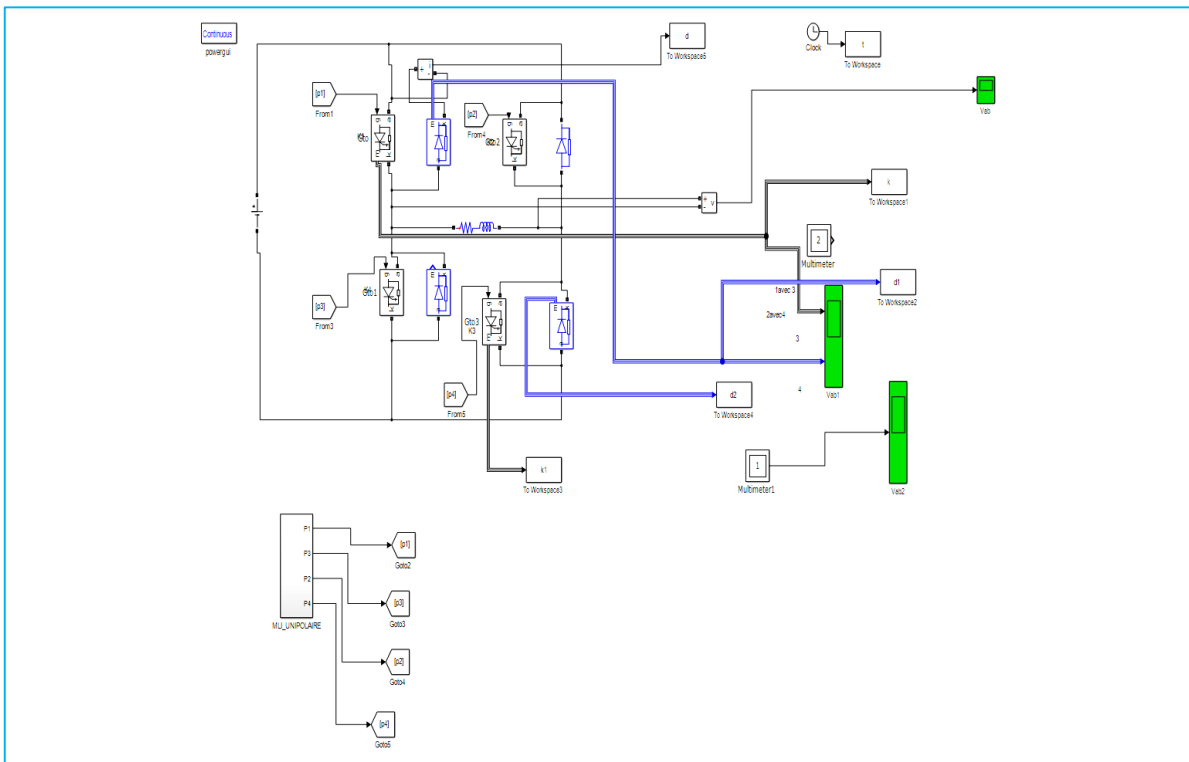


Figure3. 3. Simulation de l'onduleur monophasé commande (unipolaire ,Bipolaire)

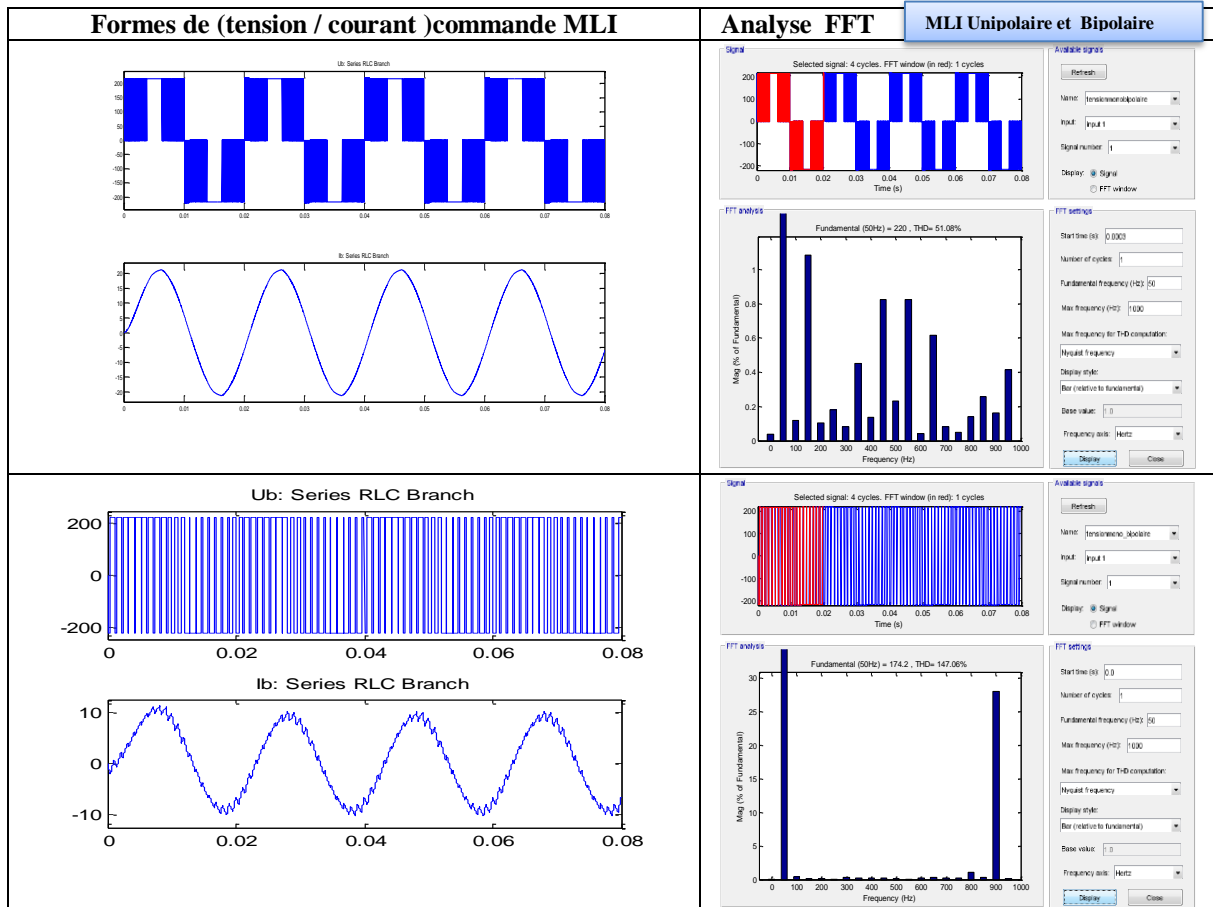


Tableau 3.3 . Résultats de simulation de l'onduleur monophasé commande MLI (bipolaire, unipolaire)

❖ **Interprétation**

1- Pour la commande symétrique

- La tension efficace de sortie ne peut être réglée sauf si la tension d'entrée varie.
- Dans l'intervalle temporel $[0 < t < 0.01]$, la tension de sortie $u(t)=V_{DC}$, le courant a une croissance exponentielle de la valeur minimale $(-I_M)$ à la valeur maximale I_M
- Dans l'intervalle $[0.01 < t < 0.02]$: la tension de sortie $u(t)=-V_{DC}$, le courant $i(t)$ effectue une décroissance exponentielle de la valeur I_M à la valeur $(-I_M)$.
- Le courant débité par la source de tension continue E est tantôt négatif et tantôt positif et ceci a une fréquence double de la fréquence des commutations des interrupteurs. Le courant $i_s(t)$ présente des discontinuités lors des commutations des transistors.
- La source de tension continue E , doit être capable de supporter les discontinuités du courant $i_s(t)$. Donc elle est parfaite, et, ne présente pas d'impédance interne de nature inductive. Les diodes de roue libre assurent la continuité du courant $i(t)$ dans l'inductance
- On remarque que lors d'une commande symétrique, les fermetures des deux bras d'interrupteurs sont dans ce cas décalées de l'angle π , ce qui conduit à une valeur efficace U de la tension $u(t)$ égale à V_{DC}

- 2-** Pour la commande décalée, la valeur efficace de la tension de sortie peut être variée. La puissance échangé avec la charge comporte une phase de plus, pendant deux intervalles de temps (nulles) .

- 3- Pour avoir un transfert d'énergie correct, il faut diminuer les harmoniques de tension et de courant de façon à les rendre sinusoïdaux on procède de la manière suivante :
- Soit utiliser un filtre mais le coût peut être important.
 - Soit modifier la commande de telle sorte que le courant ou la tension se rapproche du sinusoïdal. C'est la commande décalée ou la commande MLI.

Pour une réalisation pratique, la commande MLI est recommandée. Les harmoniques que l'on pourrait qualifier de basse fréquence sont inexistantes (ou quasi-inexistantes).

3.2.3.2. Sous environnement (PROTUS ISIS) :

A. Partie commande :

Deux pin de la carte ARDUINO ont été utilisé pour commander l'onduleur (voir programme annexe 2).

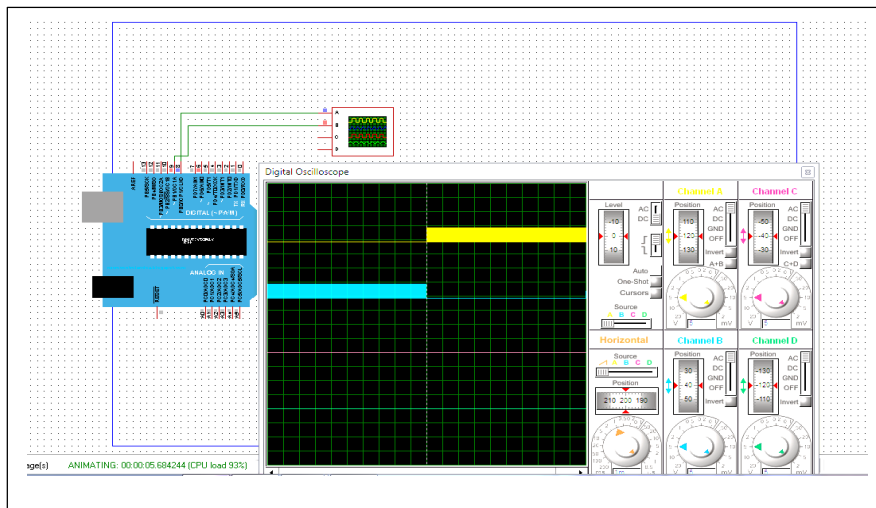


Figure 3.4. Simulation de la commande MLI par ARDUINO

- Pour commander les MOSFETS l'utilisation des drivers est indispensable, IR2113 est le type de Driver utilisé « High voltage high and low side driver »

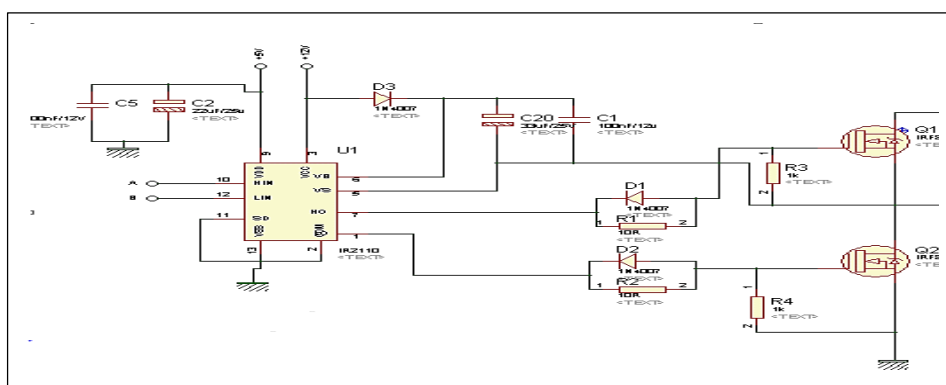


Figure 3. 5. Schéma de connexion Driver- MOSFETS

L'alimentation de la logique de commande de ces transistors est réalisée par une technique dite « bootstrap » :

L'électronique de commande des transistors MOSFETS de puissance Q_1 (du haut) est alimentée par les condensateurs C_1 (voir Figure 3.5) dont la recharge est assurée par l'alimentation 12V. Pendant le temps où le transistor Q_2 (du bas) conduit, ce condensateur étant ensuite déconnecté pour servir d'alimentation autonome lorsque le transistor Q_1 et son électronique de commande se trouvent portés au potentiel haut de la source.

Dans ce montage, les condensateurs C_2 et C_{20} assurent le filtrage des alimentations 5v et 12v.

B. Partie puissance :

La partie puissance se compose d'une alimentation continue et de deux bras, chacun contient deux transistors MOSFET , deux diodes rapides pour assurer la circulation du courant inverse (diode de roue libre).

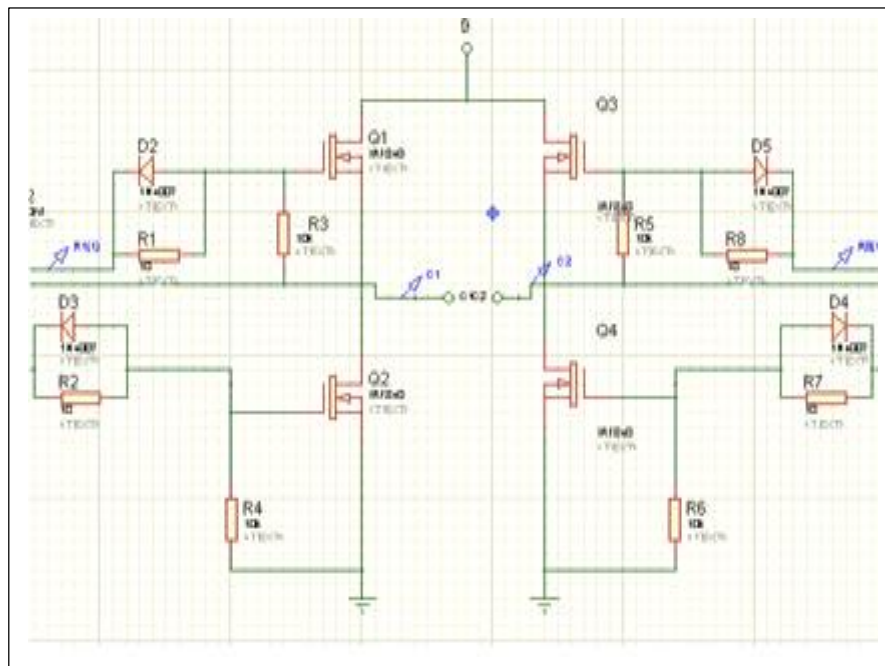


Figure 3.6. Partie puissance de l'onduleur

Une grande majorité des microcontrôleurs carte ARDUINO sont capables de générer un signal PWM. Néanmoins, ce signal ne peut être directement utilisé pour commander les N-MOSFET utilisés, car le courant débité par le microcontrôleur n'est pas suffisant pour assurer leur ouverture et fermeture.

La grille du MOSFET étant capacitive, un dispositif dédié, un « Driver de MOSFET », doit être utilisé pour exécuter cette opération. Ce dispositif est apte à fournir un courant suffisant à la grille du MOSFET pour le commander. De plus, il permet de réduire le temps de propagation et d'assurer un signal propre prévoyant un décalage du temps de montée et de descente sur le signal qui commande le MOSFET. Généralement, le driver de MOSFET fait appel à une pompe de charge interne complétée par un étage d'amorçage pour accomplir sa tâche [84].

(voir simulation figure 3.7, Figure 3.8)

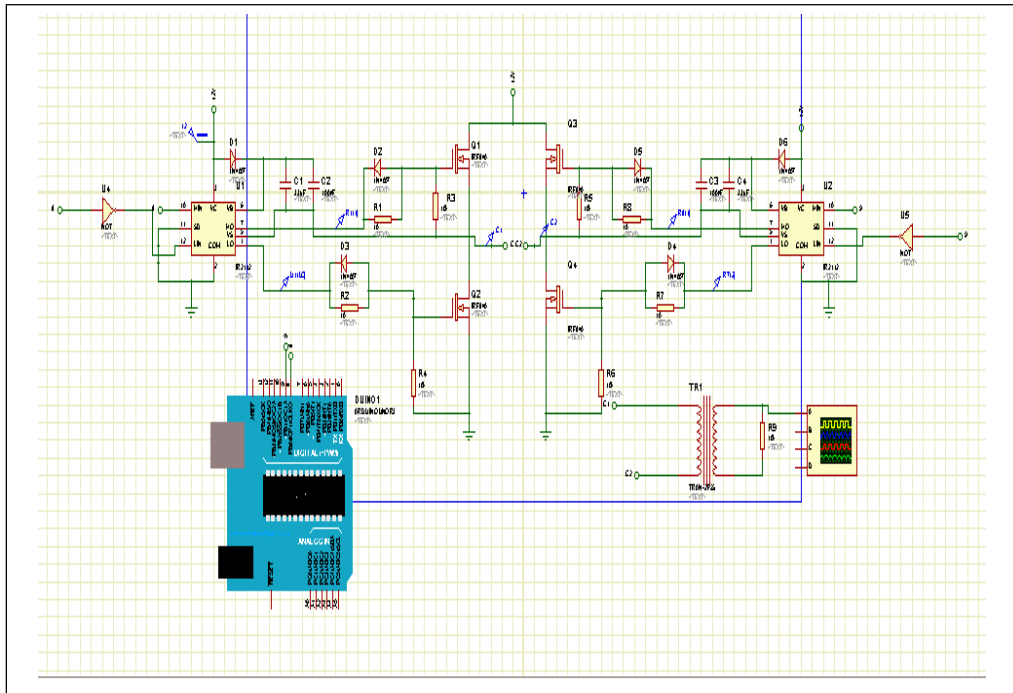


Figure 3.7 . Simulation onduleur (MLI généré par une carte ARDUINO)

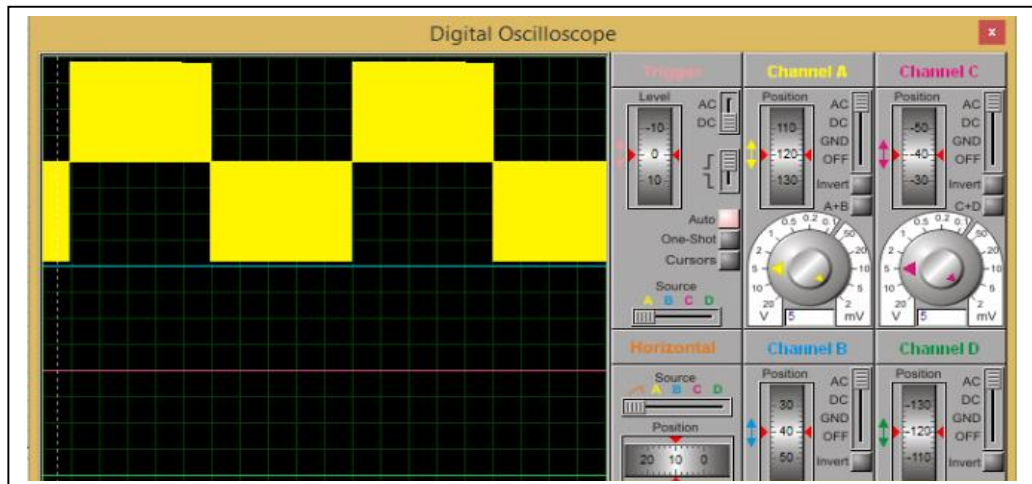


Figure 3.8. Signal de sortie (MLI généré par une carte ARDUINO)

3. 3. Onduleurs sans transformateurs muni de convertisseur (DC/DC) :

Ce convertisseur utilise des transistors (MOSFET, IGBT) comme interrupteurs de puissance il contient deux étages de conversion. Le premier est un convertisseur (CC/CC) hacheur élevateur dont les tensions continues d'entrée et de sortie sont respectivement 24V et 300V. Le deuxième étage est un convertisseur (CC/CA) aliment e à partir de la tension de sortie du hacheur. L'onduleur étant command e par MLI fournit un signal sinusoïdal (50Hz, 230V) caract ris e par une distorsion harmonique totale de tension très basse (voir schéma synoptique 3.9).

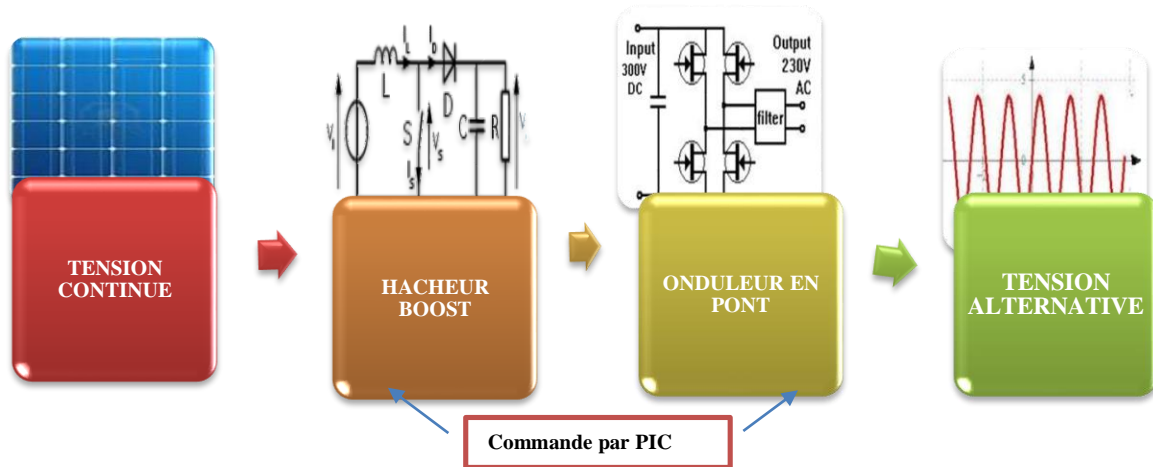


Figure 3.9 . Schéma synoptique de l'onduleur sans transformateur

3.3.1. Partie puissance de l'onduleur :

La partie puissance est encadrée par deux convertisseurs :

- Il s'agit d'un convertisseur continu -continu CC/CC (**hacheur Boost**) commandé par un PIC 16F877 via une liaison à travers un driver IR2113.
- Le deuxième convertisseur est un onduleur en pont alimenté par la tension de sortie du hacheur, commandé par un PIC 16F877 et piloté par deux drivers.
- Le montage peut être équipé d'un filtre dans le but d'améliorer l'onde de sortie.

3.3.2. Partie commande de l'onduleur :

Nous rappelons que le but de la commande de l'onduleur est de permettre la production d'une tension ou un courant alternatif, à travers les ordres de commande appliqués aux divers interrupteurs de puissance. Dans notre cas, le cœur de la commande de l'onduleur est basé sur deux microcontrôleurs (**16F877**) très puissants de la famille de Micro-chip (voir annexe 3).

◦ *Etape 1 :*

L'activité de programmation est un jeu de construction, dans laquelle il suffit d'enchaîner des instructions élémentaires pour parvenir à résoudre un problème. Dans notre cas nous avons utilisé le logiciel de compilation « **Mikro C** »

◦ *Etape 2 :*

Après l'obtention d'un programme compilé, le besoin de simuler son bon déroulement devient une nécessité puisqu'il nous permet d'avoir une idée claire sur le côté matériel, de plus nous pouvons visualiser le comportement du PIC avec ses périphériques. Nous avons opté pour le logiciel « **ISIS** » qui nous permettra de charger facilement le programme compilé dans le PIC.

◦ *Etape 3 :*

Dans la phase terminale, une fois le fichier source compilé et simulé, il va falloir le transférer dans la mémoire PIC

3.3.4. Simulations et interprétations :

Avant de simuler l'onduleur sous PROTUS ISIS et l'implication de la commande numérique, on a débuté par une simulation sous environnement MATLAB SIMULINK pour chaque convertisseur (CC/CC) et (CC/CA).

3. 3.4.1. Sous environnement (Matlab Simulink)

Model Simulink (Simpower system)	Résultats de simulation (Tension/Courant)
<p style="text-align: center; background-color: #4a7ebb; color: white; padding: 5px;">Convertisseur DC/DC(Boost)</p>	<p>Tension (entré / sortie) du hacheur BOOST (24/300V)</p>
<p style="text-align: center; background-color: #4a7ebb; color: white; padding: 5px;">Schéma électrique du hacheur</p>	<p>Signal au borne de chaque composant du circuit</p>
<p style="text-align: center; background-color: #4a7ebb; color: white; padding: 5px;">Onduleur en pont commande MLI</p>	
	<p>Tension de sortie de l'onduleur (signal alternatif)</p>

Tableau 3.4 . Simulation des deux étages de conversion

❖ **Interprétation :**

A partir d'une tension d'entrée de 24V et l'utilisation de la commande appropriée, la tension de sortie au borne de la charge a atteint la valeur désirée pour alimenter le 2^{ème} étage de conversion (l'onduleur) .

Le 2^{ème} étage de conversion étant alimenté par la tension de sortie du hacheur, ce qui permet de produire un courant de charge très voisin d'une sinusoïde et de réaliser une tension $u_c(t)$ aux bornes de la charge dont la décomposition en série de Fourier ne contient pas d'harmoniques à fréquence trop basses en se basant sur la même stratégie de (commande MLI)

3. 3.4.2. Sous environnement (PROTUS ISIS) :

Les microcontrôleurs PIC ont été programmé en « Micro C » pour commander les deux convertisseurs (hacheur Boost, Onduleur en pont) (voir Annexe 4).

Figure 3.10 illustre le schéma électrique de l'onduleur monophasé commande par PIC microcontrôleur.

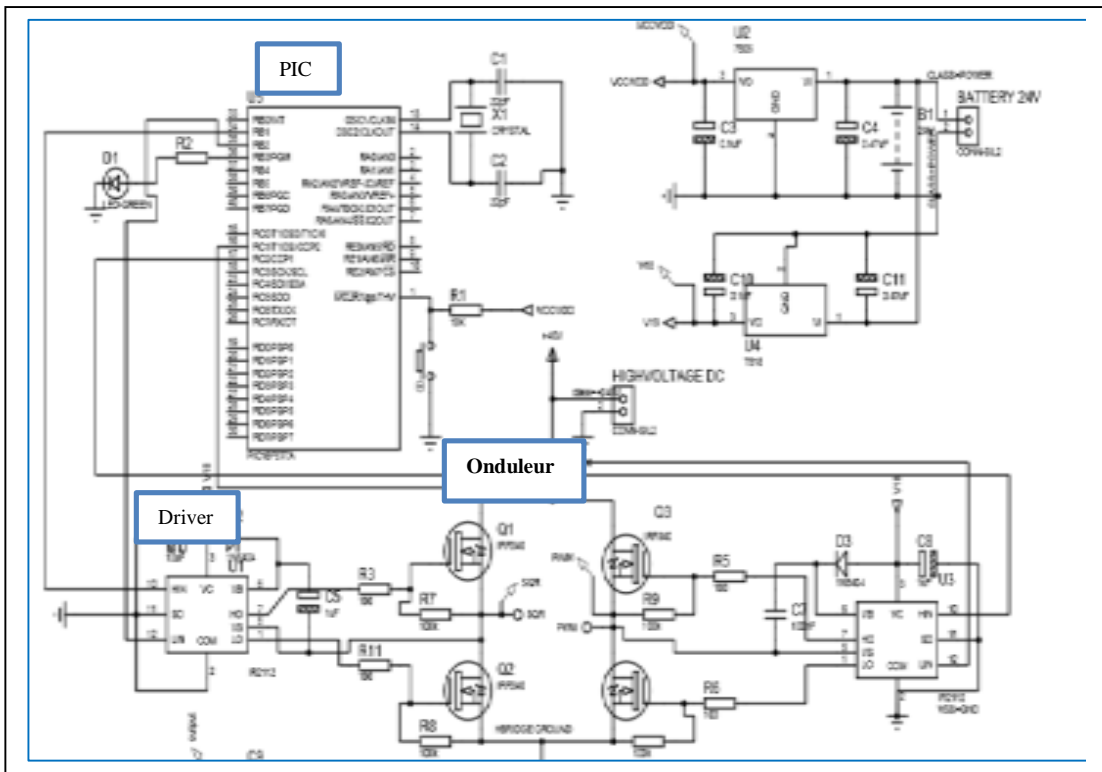
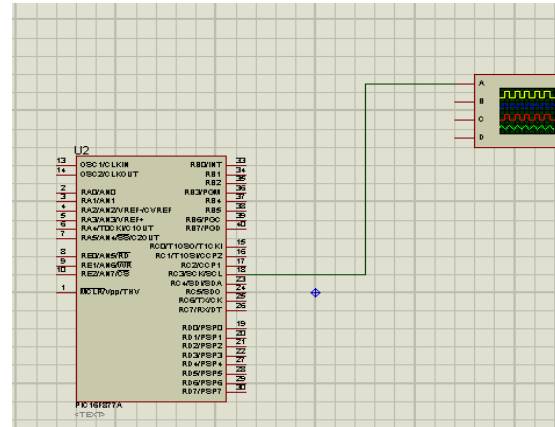
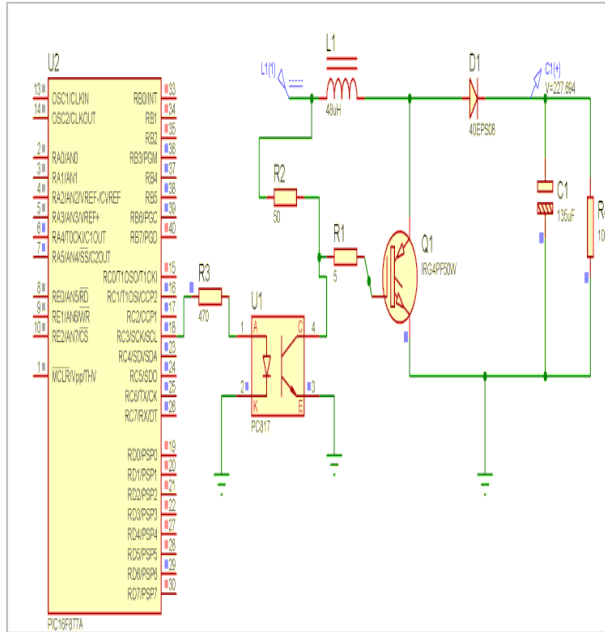


Figure 3.10 . Schéma électrique de l'onduleur (partie puissance et commande)

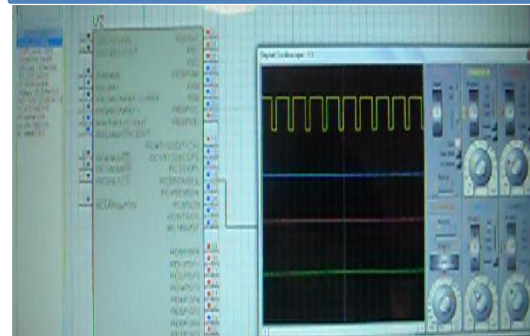
A travers deux broches du PIC , des signaux (50Hz) d'onde carrée décalé de 180 degrés sont formés pour conduire un bras du pont H de l'onduleur, les broches 16 et 17 donnent naissance à un signal de sortie de largeur d'impulsion modulé de 5KHz pour conduire l'autre côté du pont H(2eme bras).

Les broches 10 et 12 (Driver) reçoivent des entrées logiques du microcontrôleur pour conduire le MOSFET côté haut et côté inférieur respectivement. Le signal de la broche 12 est transmis à la broche 1 qui est reliée à la grille inférieure du MOSFET à travers une résistance de grille. La broche 10 est utilisée pour charger et décharger le condensateur.

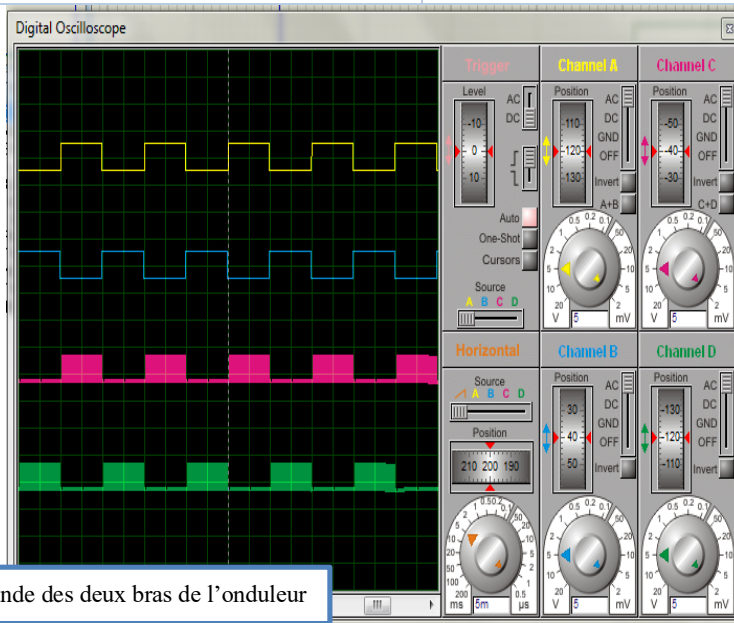
Simulation de l'onduleur à deux étages de conversion



Signal de commande PWM rapport cyclique = 0,85



Convertisseur CC/CC (Hacheur Boost)



Signaux de commande des deux bras de l'onduleur

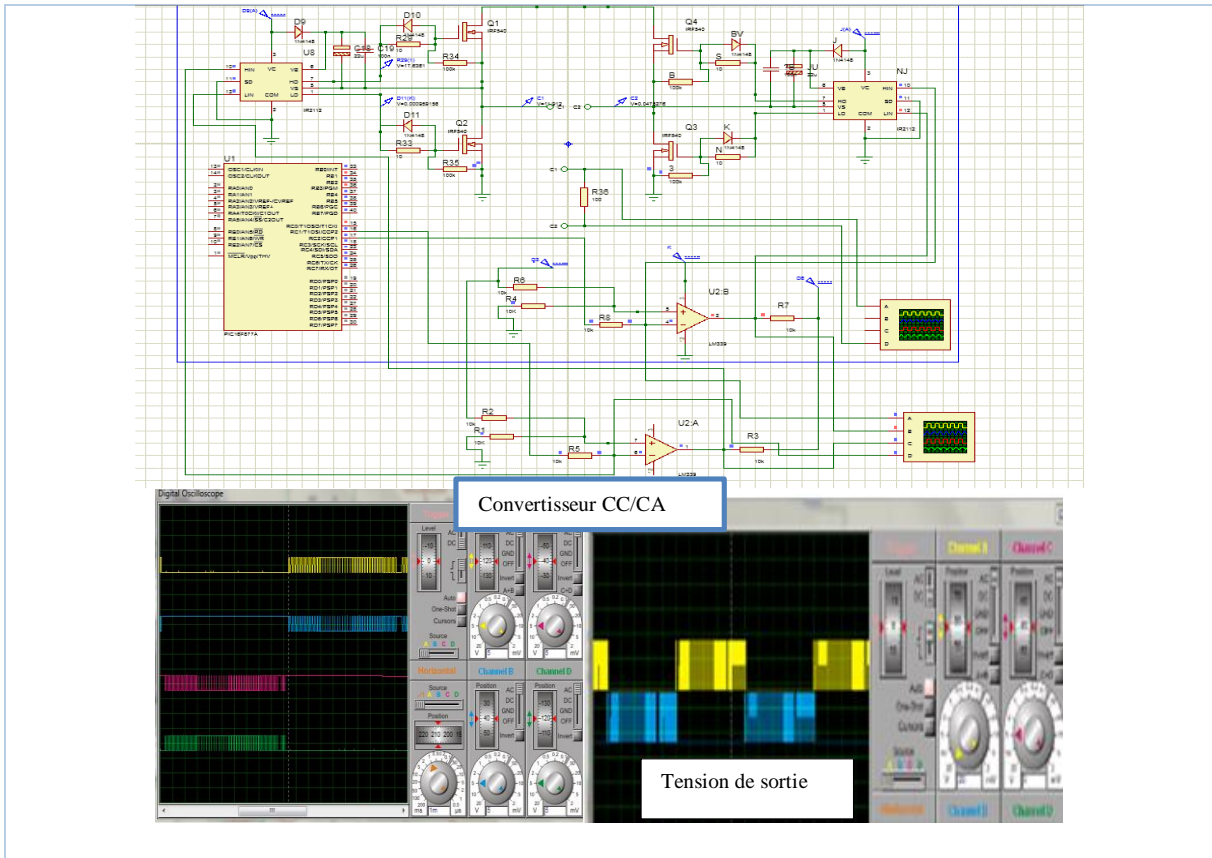


Tableau 3.5. Simulation de l'onduleur sans transformateur

3.4. Simulation du système de commande du générateur DBD :

Afin de permettre au générateur d’ozone de se réalimenter chaque 20 minute pendant 3 secondes, un système électrique automatique est utilisé composé de :

- Carte ARDUINO : qui permet la commande de système en utilisant un programme.
- OPTOTRIAC de type MOC3041 :

Un triac est un composant bidirectionnel, qui peut laisser passer le courant dans les deux sens. Ce composant possède deux électrodes principales MT1 et MT2 et une électrode de commande G qui permet de déclencher plus facilement la conduction du courant entre les deux électrodes principales A1 (MT1) et A2 (MT2). (voir figure 3.11)

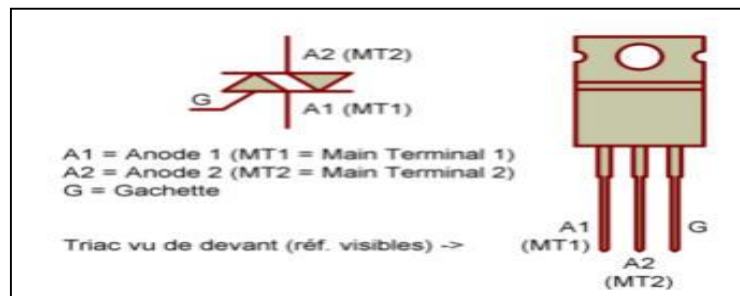


Figure 3.11. Triac présentation

❖ Principe de fonctionnement du système de commande :

La figure 3.12 regroupe une carte ARDUINO programmée pour commander le générateur d'ozone (voir annexe 5), un optotriac de type MOC3041 qui permet d'isoler la partie puissance de la partie commande, une seule résistance R_1 est ajoutée entre l'optotriac et le triac, qui sert à limiter le courant maximal de gâchette du triac. La valeur de cette résistance doit être adaptée en fonction de la sensibilité du triac, elle doit avoir une valeur plus élevée qu'avec un triac standard (courant de gâchette requis de plusieurs dizaines de mA).

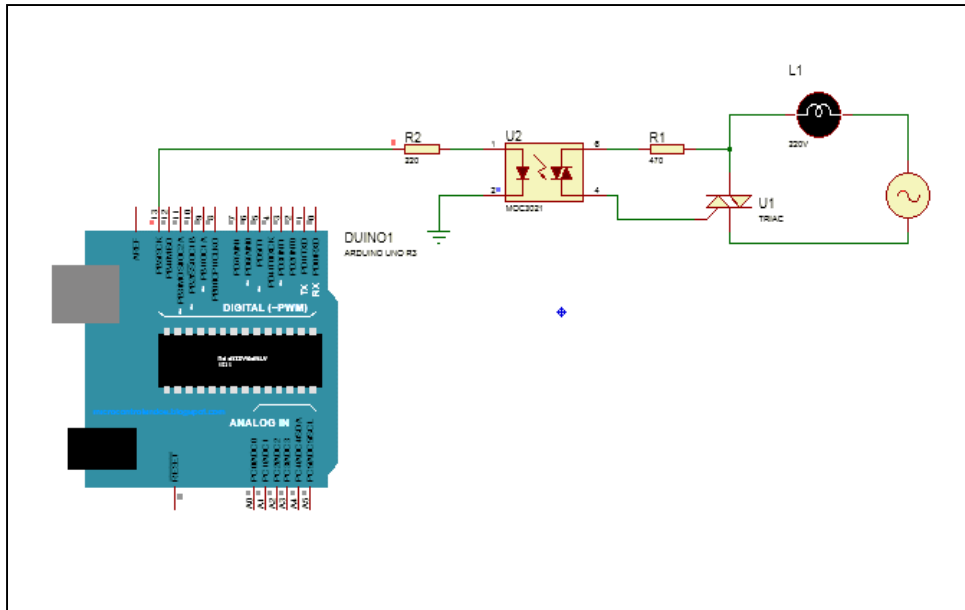


Figure 3.12. Système électrique de commande automatique (numérique)

3.5. Conclusion :

Partant du principe que l'onduleur est le cœur d'une installation photovoltaïque une importance particulière lui est accordée. Avant d'entamer la réalisation pratique au chapitre 4, et pour avoir une idée sur le matériel, la simulation s'impose.

Ce chapitre est considéré comme étant le siège des simulations utilisant deux logiciels MATLAB SIMULINK et PROTUS ISIS.

Deux topologies d'onduleur ont fait l'objet d'une représentation graphique de courant et de tension. Il s'agit de l'onduleur à un seul étage de conversion avec transformateur et de l'onduleur sans transformateur munis d'hacheur élévateur, soient deux étages de conversion.

Trois types de commande ont marqué la simulation, la pleine onde, décalée et MLI, ce qui a récolté le choix pour une commande MLI qui sera appliqué lors de la réalisation pratique de l'onduleur monophasé du système photovoltaïque destiné à alimenter un générateur d'ozone.

Afin de permettre au générateur d'ozone de se réalimenter chaque 20 minutes pendant 3 secondes, un système automatique géré par carte ARDUINO est validé par simulation sous environnement PROTUS ISIS.

CHAPITRE 4



Systeme de traitement d'aliments par l'ozone

Chapitre 4 : Système de traitement d'aliments par l'ozone

4.1. Introduction :

En Algérie et comme dans plusieurs pays du tiers-monde, il existe de nombreux sites isolés qui ne sont pas encore raccordés au réseau électrique conventionnel. Ils sont confrontés à de graves problèmes à savoir le stockage d'aliments qui représente un véritable problème économique et technique.

Ce chapitre traite la conception et la réalisation d'un système photovoltaïque consacré à l'alimentation d'un générateur d'ozone à décharge à barrière diélectrique (DBD) pour l'ozonisation d'une chambre d'un site isolé visant à augmenter le temps de conservation des produits alimentaires.

Le système photovoltaïque est composé d'un générateur photovoltaïque, d'un régulateur de charge et d'un onduleur monophasé. La charge est un générateur d'ozone, qui permet une conservation optimale des fruits et légumes, lors de leur stockage grâce au puissant pouvoir désinfectant de l'ozone.

4.2. Description du système développé :

La figure (4.1) montre l'ensemble du système utilisé pour le stockage des aliments dans une atmosphère traitée à l'ozone alimentée par un système d'alimentation photovoltaïque. Le dispositif expérimental comprend deux parties distinctes : le système d'énergie solaire et le système d'ozonation.

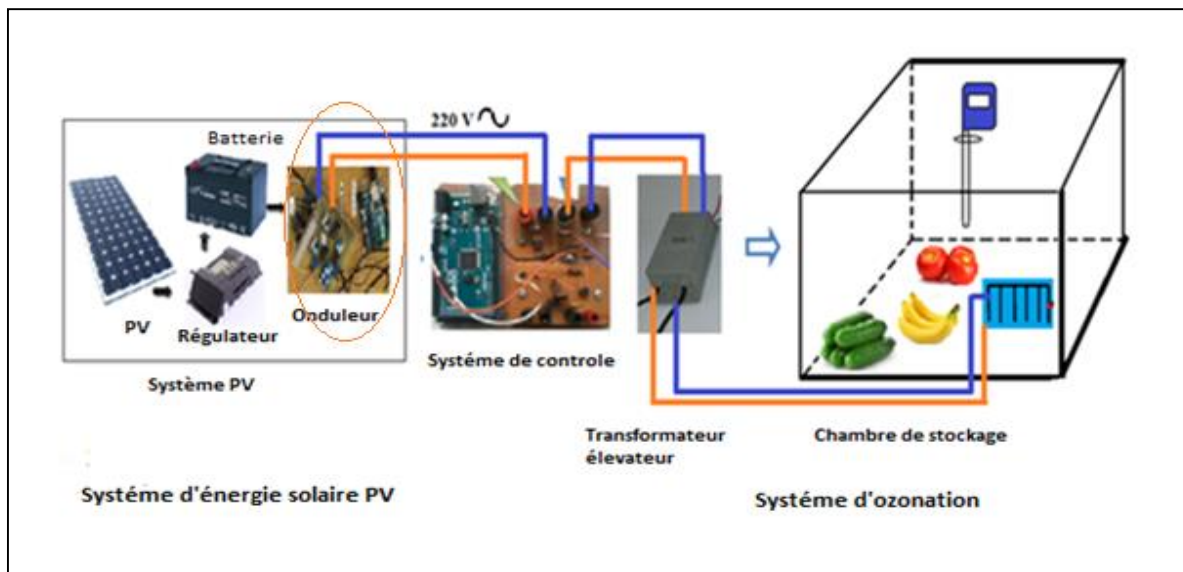


Figure 4.1. Représentation schématique du montage développé

4.2.1. Système d'énergie solaire :

Le système à énergie solaire comprend un générateur photovoltaïque produisant une puissance de 135 W, un contrôleur de charge (12/24 V, 20 A) pour maintenir la tension constante à 12 V une batterie de stockage de 80 Ah, utilisée pour stocker l'énergie et un onduleur monophasé. Dans ce travail, le système solaire photovoltaïque a été conçu pour permettre au panneau solaire de subir un mouvement de rotation horizontal et vertical afin de suivre le soleil et d'optimiser ainsi la surface exposée au soleil (Figure 4.2). Par conséquent, une position optimale du panneau peut être déterminée en fonction d'un niveau élevé de production d'énergie. Des expériences préliminaires ont permis de définir la position idéale du panneau qui devrait

être orienté vers le sud (correspondant à un angle nul est-ouest), avec une inclinaison sud-nord variant de $\beta = 40^\circ$ à $\beta = 50^\circ$ à la ville de Sidi Bel Abbés, Algérie [21].

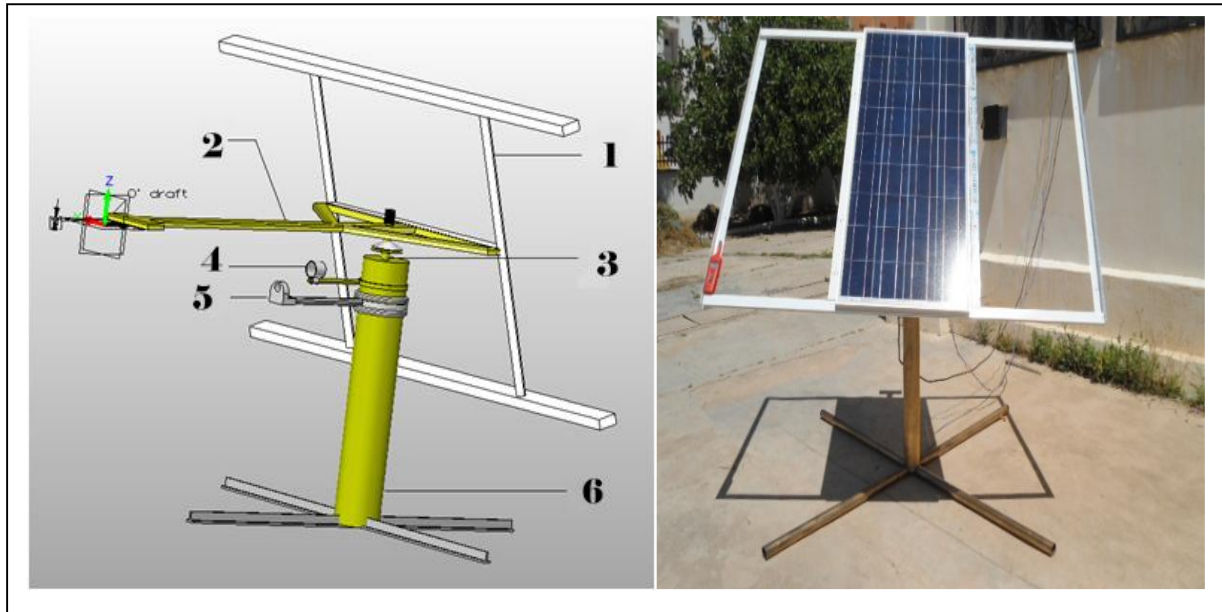


Figure 4.2. Système photovoltaïque

a) Vue générale de la structure mécanique du panneau photovoltaïque

b) Photographie du panneau PV

- 1 : Cadre supportant le panneau photovoltaïque, 2: commutateur de limite d'axe sud-nord; 3: Poulie d'orientation est-ouest; 4: moteur pour l'orientation est-ouest; 5: soutien de l'inclinaison nord-sud; 6: Cylindre supportant la structure.

4.2.1.1. Description de la structure :

Les données techniques du module sont illustrées au tableau 4.1

Type de module	<i>STP 135-12/TB</i>
Tension au MPP	17,5 V
Courant au MPP	7,71 A
Puissance maximale P	135 W
Tension à vide U_0	22,3 V
Courant de court-circuit I_{cc}	8,2 A
Facteur de forme FF	0.75
Surface des modules A	0,876 m ²
Eclairement nominal	1000 W/m ²

Tableau 4.1. Description du module PV

$$\text{Rendement} = \frac{\text{Puissance maximale}}{\text{Eclairement} \times \text{Surface du module}} \times 100 = \frac{135}{1000 \times 0.876} \times 100 = 15,41\% \quad (4.1)$$

Avec :

Mesures /calculs:

Tension à vide U_{0m} 21.4 V

Courant de court-circuit I_{cm} 7.5 A

La puissance mesurée : P_m

$$P_m = FF \times U_{0m} \times I_{cm} = 0,75 \times 21,4 \times 7,5 = 120,37W \quad (4.2)$$

Rayonnement I_M 800 Lu

Vérification du rendement (η) :

$$\eta = \frac{\text{Puissance mesurée}}{\text{Rayonnement mesuré}} = \frac{P_m}{I_m \times A} \times 100 = \frac{120,37}{0,876 \times 800} \times 100 = 17,17\% \quad (4.3)$$

4.2.1.2. Présentation :

La figure (4.3) représente le schéma cinématique simplifié du mécanisme d'entraînement de panneaux photovoltaïques mobile. Les principaux éléments de l'ensemble sont :

- Support fixe
- Panneaux photovoltaïques (PV)
- Vérin électrique (VE)
- Moteur CC (M)

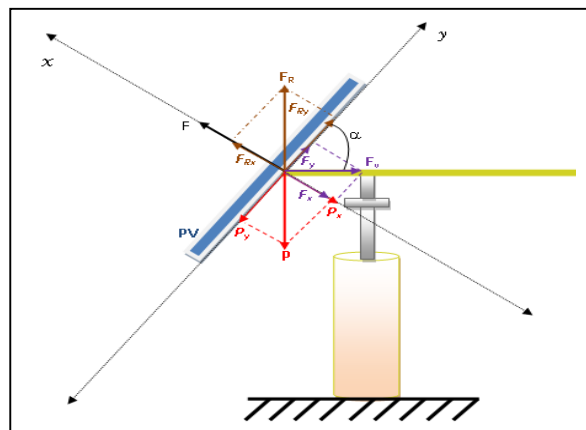


Figure 4.3. Schéma cinématique d'un panneau photovoltaïque [21]

⇒ Principe de fonctionnement

La rotation imposée par le moteur (M) est transmise par l'intermédiaire de la courroie « entre deux Poulie » à l'axe du support. La rotation de l'axe fait tourner le cadre qui lui supporte le panneau (PV). Cette action provoque la rotation est/ouest, le cadre est placé sur sa base par des paumelles qui donnent un équilibre et un mouvement libre. La tige de (VE) est raccordée avec le cadre par un boulon. Donc la translation de la tige impose le degré d'inclinaison du cadre [21].

4.2.1.3. Raccordement du régulateur photovoltaïque :

La régulation électronique est pratiquement toujours indispensable dans les systèmes solaires PV avec batterie. Pour les installations importantes, le régulateur de charge regroupe souvent plusieurs fonctions, Ses principales missions sont :

- De convertir la tension de sortie du panneau solaire (comprise entre 15V et 25V pour les systèmes 12V) en tension adaptée à la charge de la batterie (souvent 13,6V pour les batteries 12V).
- De protéger les batteries en contrôlant leur niveau de charge. Une fois les batteries pleines, le régulateur découple la recharge du parc. En même temps, il arrête la consommation d'énergie par les appareils branchés, si le niveau de charge de la batterie descend sous un certain seuil de sécurité (limite de décharge profonde).
- D'éviter les courants inverses et donc protéger le panneau.

Le régulateur (voir figure 4.4) est donc un organe de contrôle indispensable de l'installation photovoltaïque Il protège les panneaux et les batteries, assurant ainsi la longévité du système Le régulateur contient deux pôles : positive (+) et négative (-) pour le panneau et autre pour la batterie, aussi un autre pour les charges à courant continu [86].



Figure 4.4. Régulateur Photovoltaïque Steca 2020 (12/24V 20A)

4.2.1.4. Raccordement de la batterie :

La batterie est un dispositif qui fournit (restitue) de l'énergie électrique après avoir été stockée sous forme d'énergie chimique, ce sont des générateurs électrochimiques. Elles sont constituées de deux électrodes, plaques positif (anodes) et plaques négatif (cathode) immergées dans un électrolyte.

L'anode est réductrice qui sera oxydée pour générer des électrons et la cathode est oxydant qui sera réduit en captant des électrons, l'électrolyte a pour rôle d'assurer le bon déplacement des ions (électrons). Donc c'est l'accumulation et la restitution dues à la réaction d'oxydoréduction (redox), qui gère le transfert d'ions entre les électrodes. Ensuite les batteries solaires vieillissent en raison des charges et décharges : le nombre de cycles dépend principalement de la profondeur habituelle de décharge. Pour des décharges de l'ordre de 40% on peut estimer les durées de vie pour : Batterie solaire au plomb ouvert : 400 à 500 cycles [91]

A partir du régulateur on connecte la borne positive avec l'anode de la batterie et la borne négative avec la cathode de la batterie (voir figure 4.5).



Figure 4.5. a) Batterie Isofoton 12V 80Ah
b) Raccordement Batterie / Régulateur

4.2.1.5. Réalisation et raccordement de l'onduleur photovoltaïque :

Introduction :

L'objectif de ce travail est d'étudier et de concevoir un onduleur solaire avec une tension d'entrée de 12VDC et une sortie à onde quasi-sinusoidale de 220 V_{AC} à une fréquence de 50 Hz. L'amélioration apportée à l'onduleur se situe essentiellement au niveau de la commande, mais également la surveillance de la tension d'entrée et de sortie, ainsi que la température des interrupteurs électroniques, ce qui permettrait de préserver le bon fonctionnement de l'onduleur. La conception a aussi porté sur la partie électronique de puissance [88]. La partie commande est assurée par un Microcontrôleur et ARDUINO.

A. Réalisation de l'onduleur monophasé avec transformateur :

L'onduleur est composé du circuit de puissance et de commande

i. Bloc d'Alimentation :

En plus de la tension d'alimentation issue des cellules PV (12V), d'autres niveaux de tensions sont nécessaires pour la réalisation du montage, d'où la nécessité de faire appel à des régulateurs de tensions pour fournir une tension constante.

Deux régulateurs **KA78R05** et **KA 7812** sont utilisés pour abaisser la tension prise à partir de la cellule PV aux niveaux 5V et 12V [89].

ii. Interrupteurs de puissance :

Le graphe présenté à la figure (4.6), permet de choisir le type de technologie à utiliser en fonction de la puissance nominale et la fréquence de découpage auxquelles est soumis le composant.

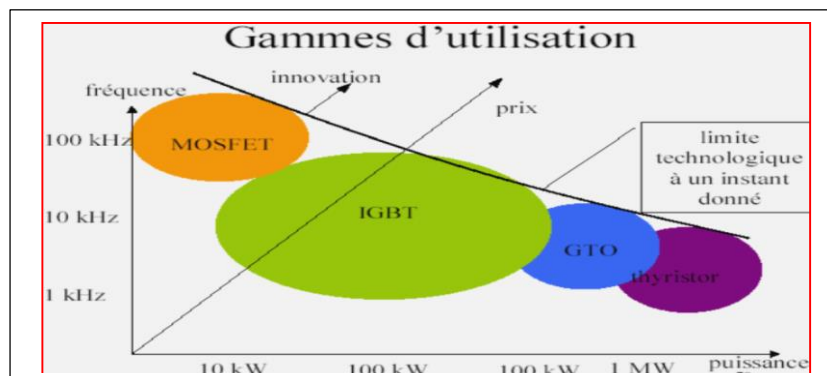


Figure 4.6. Diagramme puissance-fréquence des interrupteurs de puissance [90]

iii. Driver IR2113 :

Le driver est un circuit qui pilote tout type d'interrupteur (IGBT, MOSFET), Le pilotage consiste à provoquer et à contrôler le passage de l'état bloqué à l'état passant [91].

Le driver IR2113 a été choisi pour sa haute fréquence de commutation (100kHz), sa basse consommation de courant, son unique alimentation et sa faible impédance durant les deux états "on" et "off". Son courant de sortie élevé (650mA) est largement suffisant pour commander le MOSFET, ou IGBT

Driver	Rôle
IR2113	Pilotage : le driver consiste à piloter un transistor en fonction des ordres qu'il reçoit d'une carte ARDUINO
	Sécurité : le driver doit effectuer la sécurité rapprochée du composant qu'il pilote pour améliorer sa protection en cas de défaut (surintensité dans le composant de puissance).

Tableau 4.2. Avantages du driver

Radiateur :

La cause principale de l'endommagement des composants dans la majorité des cas c'est l'augmentation de température. Chaque MOSFET sera doté de dissipateur de chaleur.

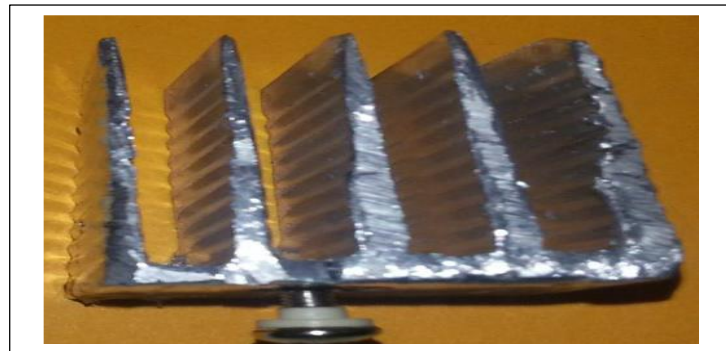


Figure 4.7. Dissipateur de chaleur en Aluminium

a) Conception de l'unité de commande :

L'unité de commande sert à effectuer la mesure des différentes grandeurs requises utilisées, faire les calculs correspondants et commander les interrupteurs. Tout ceci peut être accompli par l'utilisation d'un microcontrôleur ARDUINO UNO

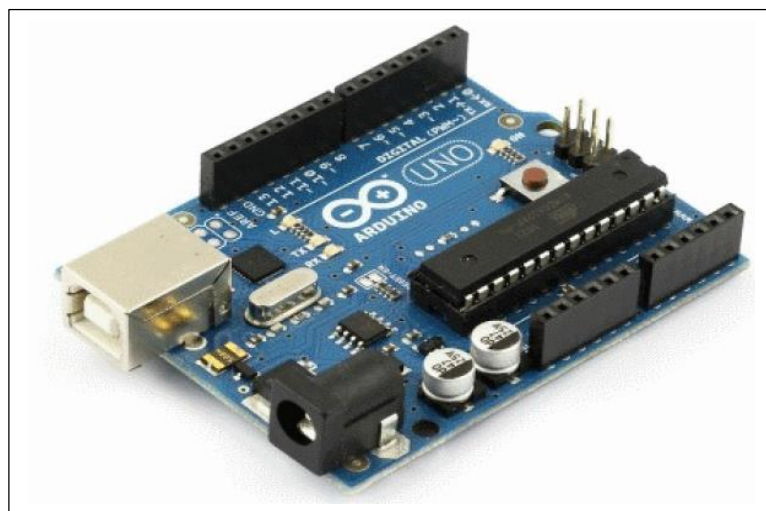


Figure 4.8. Carte ARDUINO "UNO"

b) Réalisation de l'onduleur sur plaque d'essai :

La carte ARDUINO est programmé selon les commandes (symétrique, Décalée, MLI)
 Voir (annexe 2)

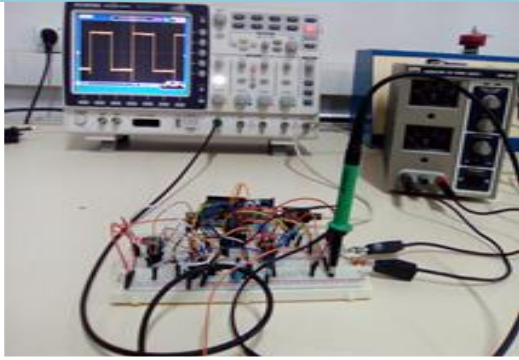
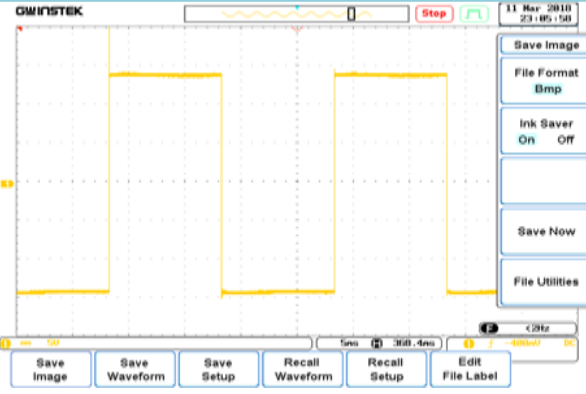
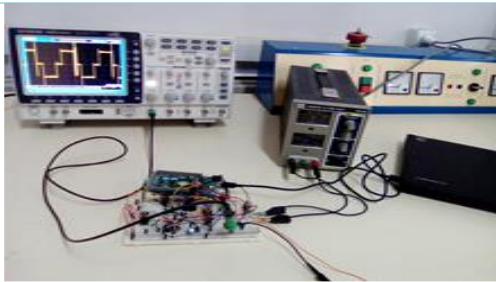
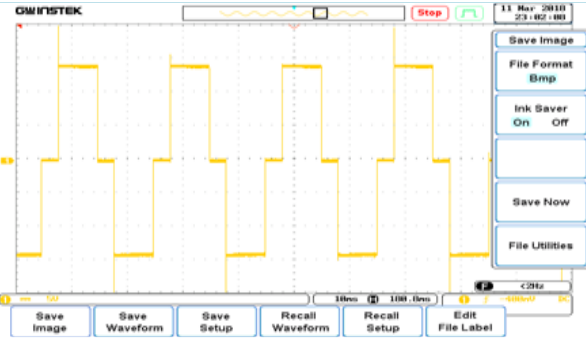
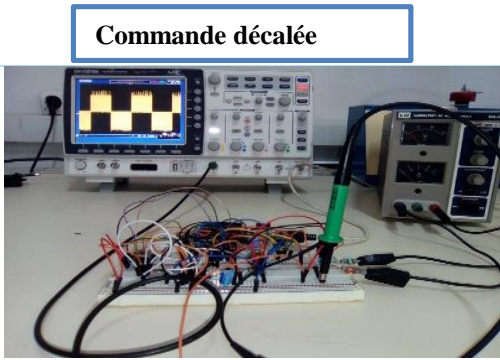
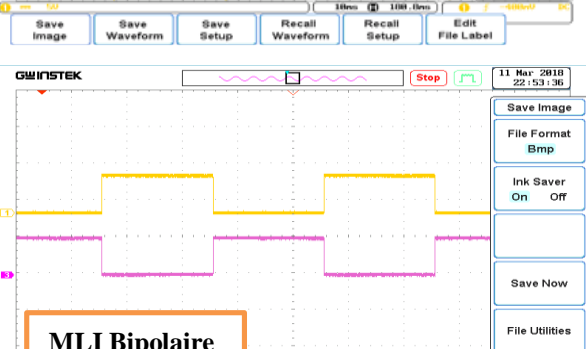
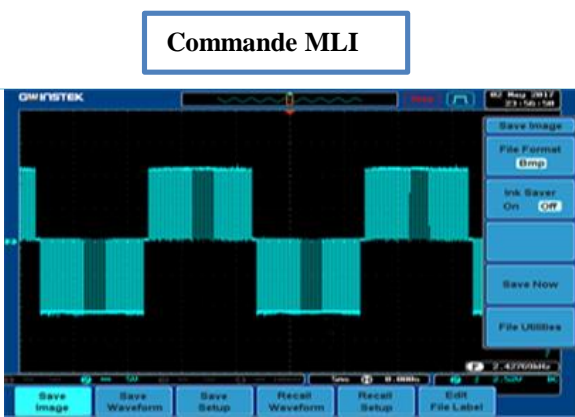
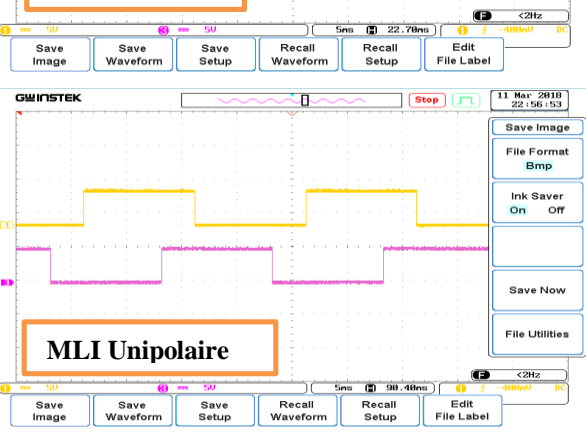
Circuit, Essais	Signaux de sortie
 <p data-bbox="252 752 667 808">Commande symétrique</p>	
 <p data-bbox="272 1133 612 1189">Commande décalée</p>	
 <p data-bbox="344 1491 612 1547">Commande MLI</p>	 <p data-bbox="826 1435 1046 1491">MLI Bipolaire</p>
 <p data-bbox="328 1906 596 1962">Tension de sortie</p>	 <p data-bbox="826 1805 1046 1861">MLI Unipolaire</p>

Tableau 4.3. Essais sur plaque d'essai de l'onduleur avec plusieurs types de commande

c) Routage du circuit électrique :

Vu les résultats obtenus, on procède à la réalisation du circuit imprimé du montage et au test réel de ce dernier. Pour cela, le logiciel « TCI » est utilisé pour le routage du circuit imprimé.

i. Première étape : Insolation

Pour réaliser l'insolation, il faut une insulteuse ultraviolette. On place le typon directement sur la vitre puis le circuit dépourvu de son film de protection là où se trouvent les pistes. On met le typon à l'envers pour chasser les bulles d'air entre le typon et le film. On veille à ce que la partie imprimée du typon est directement en contact avec le circuit (2.5 min) [92].



Figure 4.9. Insulteuse

ii. Deuxième étape : Révélation

La révélation est l'étape de développement du circuit imprimé. On plonge le circuit dans un bain de révélateur à température tiède en agitant légèrement pendant le temps qu'il faut pour que les pistes apparaissent sur le circuit, bien rincer après la révélation [92].

iii. Troisième étape : Gravure

La gravure va permettre au cuivre non protégé par la couche de résine de se dissoudre. Pour cela on plonge le circuit dans un bain de perchlore de fer à 50° pendant le temps nécessaire à la dissolution en agitant fortement (voir 4.10)[92].



Figure 4.10. Gravure du circuit

iv. Dernières étapes : Perçage et soudage

Les meilleurs résultats sont obtenus en utilisant une colonne de perçage et des forêts de 0.8mm en carbure de tungstène. Quelques trous doivent être faits en 0.9mm. Pour le soudage, un fer à souder de 25W et de la soudure de 0.5mm suffit [92].



Figure 4.11. Schéma de routage et perçage du circuit

v. Fixation des composants de la maquette du circuit onduleur :

Une fois le circuit imprimé réalisé, on procède au soudage des composants et au test du montage (voir tableau 4.4) .

Onduleur réalisé	Testes réalisés
<p data-bbox="209 1458 320 1496">ARDUINO</p> <p data-bbox="512 1480 639 1518">onduleur</p>	<p data-bbox="839 1581 1326 1619">Commande MLI des deux bras de l'onduleur</p>
	<p data-bbox="823 1951 1007 1989">Tension de sortie</p>

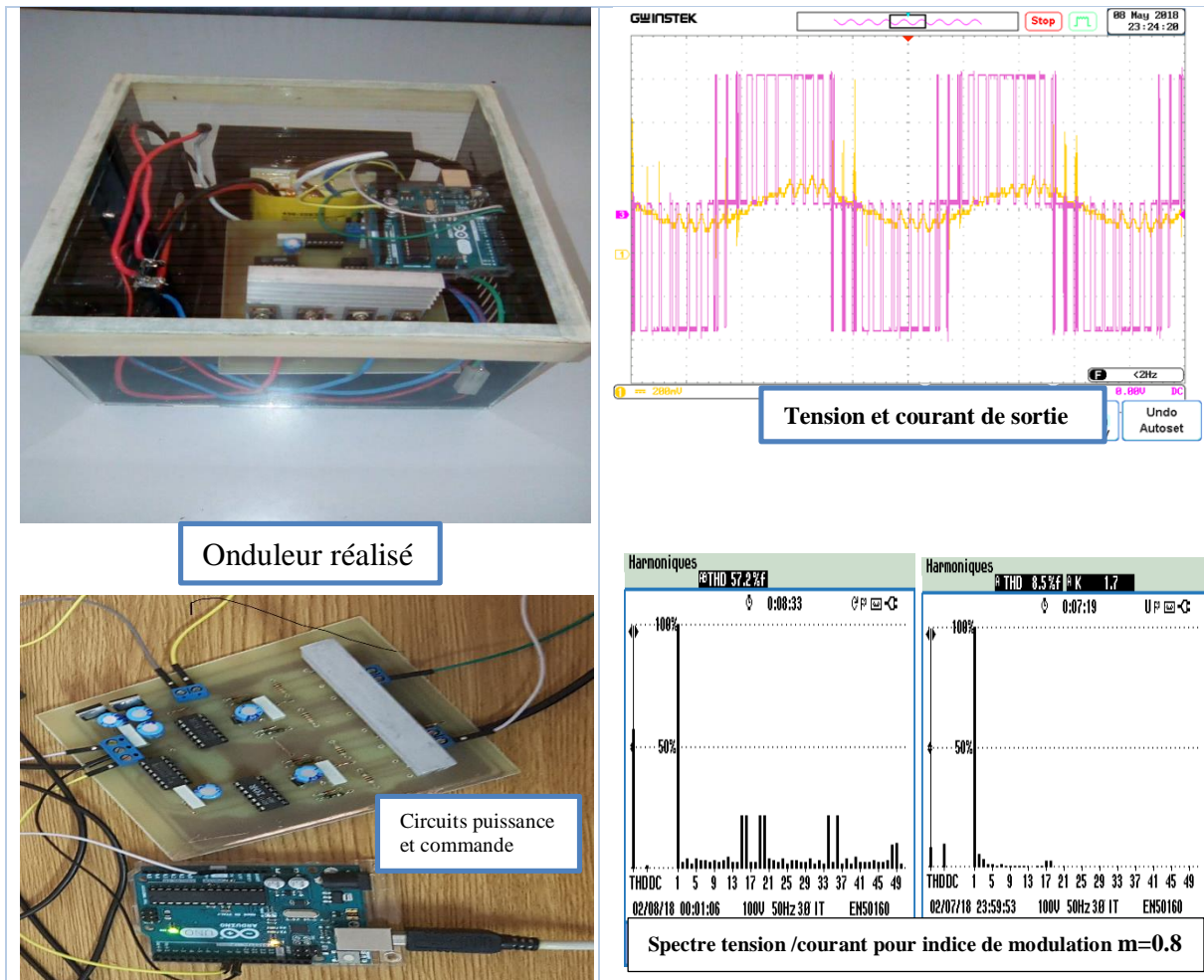


Tableau 4.4. Tests de l'onduleur réalisé

Interprétation :

-D'après ces différentes figures, nous remarquons que les résultats trouvés par simulation sont similaires aux résultats expérimentaux.

-Avec une commande MLI, les harmoniques sont repoussées vers les fréquences d'ordre supérieur

B. Réalisation d'un onduleur monophasé sans transformateur muni d'un convertisseur (DC /DC) :

L'onduleur sans transformateur se compose de trois parties :

- ✓ Un générateur de signaux de commande MLI moyennant deux microcontrôleurs.
- ✓ Un hacheur élévateur de tension "BOOST" qui produit la tension du bus continu (variable selon la fréquence)
- ✓ Un onduleur en pont composé de quatre (04) transistors IGBT, chaque bras est piloté par un driver spécifique (IR2110).

Le bras de pont est constitué de deux transistors CT60AM 18F (Interrupteurs K1, K3, K2, K4) commandé chacun par un signal MLI piloté par un Driver (K1, K4 interrupteurs 1^{er} bras ; K2, K3 interrupteurs 2^{ème} bras).

Dans la commande des interrupteurs, il se pose le problème de l'empiétement si les interrupteurs ne se ferment pas ou ne s'ouvrent pas au moment voulu. Il se peut que la source de tension soit court-circuitée ou que la source de courant soit ouverte.

Durant la première demi période les interrupteurs K_1 et K_3 sont commandés par fermeture simultanément, k_2 et k_4 sont ouverts, lorsqu'on passe à l'autre demi période, à ce moment précis se pose le problème d'empiètement. Afin de pallier à ce problème l'utilisation des drivers est indispensable pour générer les temps de complémentation et de conduction des interrupteurs [93], [94]. La réalisation de l'onduleur comme indiquer (Voir Tableaux 4.5,4.6).

- Réalisation et test de l'onduleur sur plaque d'essai :

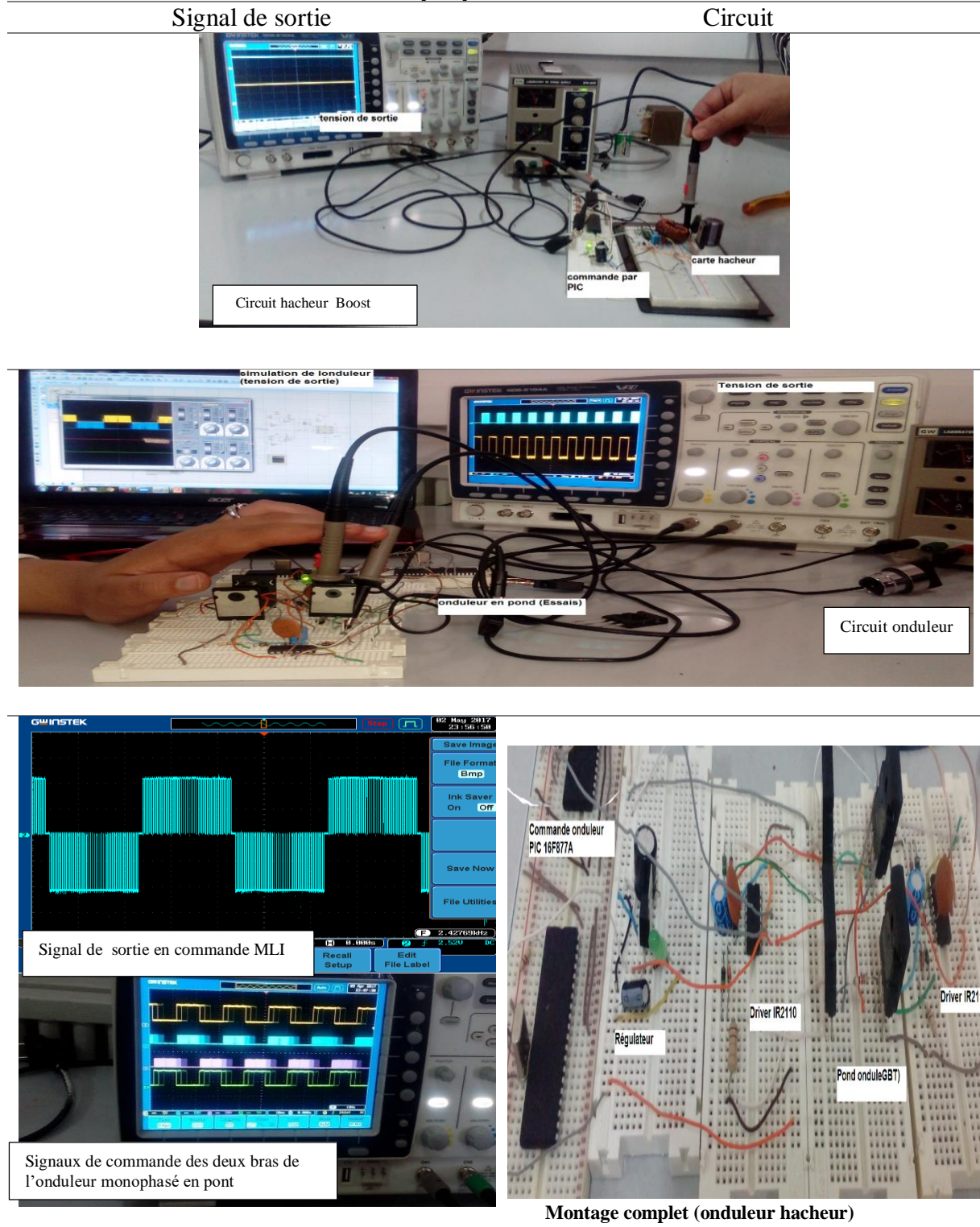


Tableau 4.5. Réalisation et test de l'onduleur sur plaque d'essai

- Réalisation et test de l'onduleur :

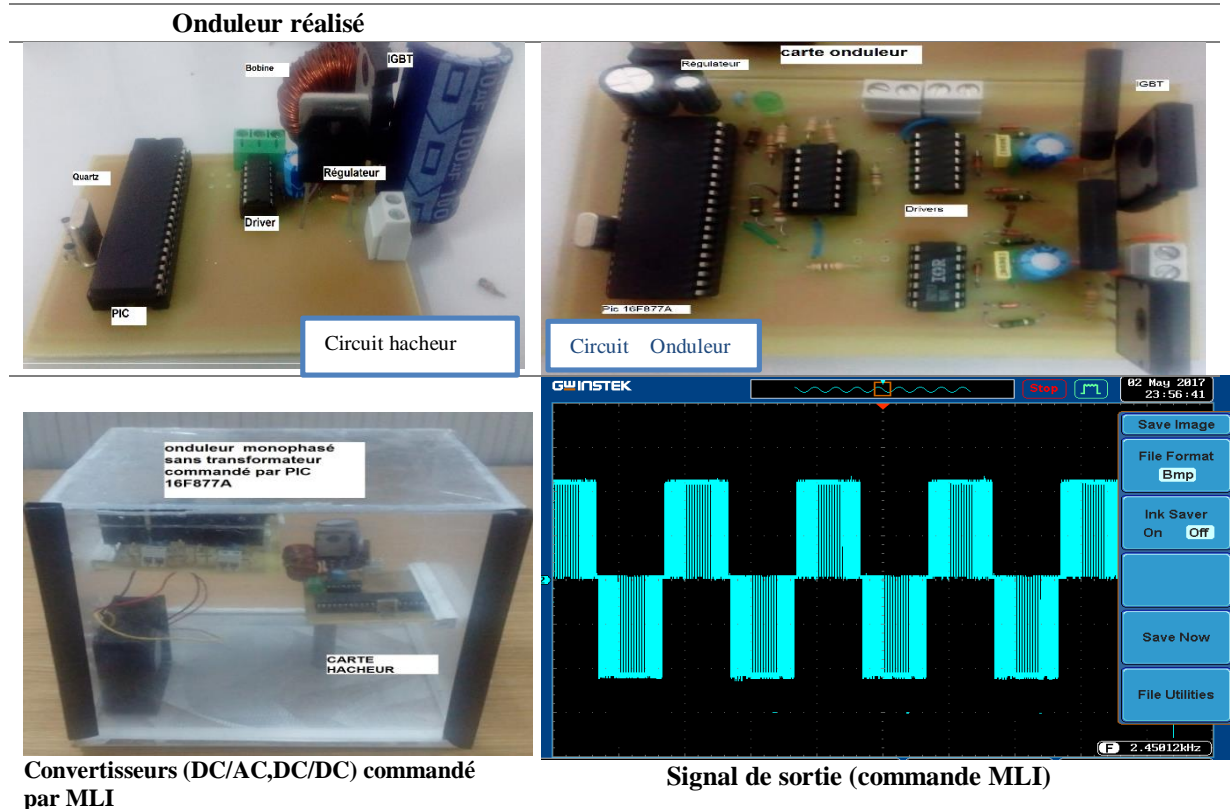


Tableau 4.6. Photo et signal de sortie de l'onduleur avec convertisseur (DC/DC)

- **Interprétation** : La tension de sortie représente le même résultat que nous avons acquis dans l'étude de la simulation.

C. Comparaison des deux topologies de l'onduleur :

Type d'onduleur	Avantages
Onduleur avec transformateur	-Isolation galvanique -Universalité des produits (membrane, couche mince...). Certains types de modules doivent impérativement être associés à des onduleurs disposant d'une isolation galvanique ; -Evite les problèmes de courant de fuite -Elimination de la composante continue en sortie -Limitation de certains courants harmoniques dans le pont -Meilleurs tenu des courants de court-circuit -Rendements allant de 94 à 96%
Onduleur sans transformateur	-Des produits plus légers, donc plus facile à installer et manipuler. -De meilleurs rendements (moins de pertes liées au transformateur). -Rendement légèrement supérieur : 95 à 98%. -Moins couteux (voir annexe 7)

Tableau 4.7. Comparaison onduleurs avec et sans transformateur

D. Conclusion :

Après avoir comparé les deux structures réalisées, il s'est avéré que :

✓ L'onduleur sans transformateur est moins couteux et plus léger mais, il peut être à l'origine de courants de fuite capacitifs par rapport à la terre (masse) et cela peut déclencher un disjoncteur différentiel trop sensible.

Ce type d'onduleur possède deux étages de conversion, cela veut dire plus de commutation et par conséquent plus d'harmoniques et de pertes.

✓ L'onduleur avec transformateur permet :

- D'assurer l'isolation électrique ("galvanique") de la partie où se trouvent les modules et de la partie "charge". Il permet au choix, soit la mise du panneau en potentiel flottant soit la mise à la terre du plus ou du moins, à travers une résistance. L'avantage de cette mise à la terre est de limiter le potentiel statique du panneau par rapport à son cadre tout en assurant une sécurité électrique en cas de contact avec le pôle opposé.
- De garantir une proscription entre l'entrée continue et la sortie 50 Hz, aucun potentiel n'est commun entre les panneaux et la charge.
- Utilise des techniques plus élaborées de mesure, surveillance et compensation des courants de fuites.

✓ Donc l'onduleur avec transformateur est recommandé pour alimenter un générateur d'ozone dans un site isolé. Cette charge sera moins exposée aux surtensions et par là, plus résistant aux surtensions.

E. Raccordement de l'onduleur :

Avant de raccorder un onduleur il faut donc s'assurer : qu'une solution en courant continu toujours plus économe ;

Que l'onduleur peut faire fonctionner la charge (un essai s'impose) ;

Que son rendement est suffisant ;

Que la charge tolère le taux de distorsion harmonique de l'onduleur ;

Que l'onduleur est protégé contre les surcharges côté DC et AC, et contre la surchauffe ;

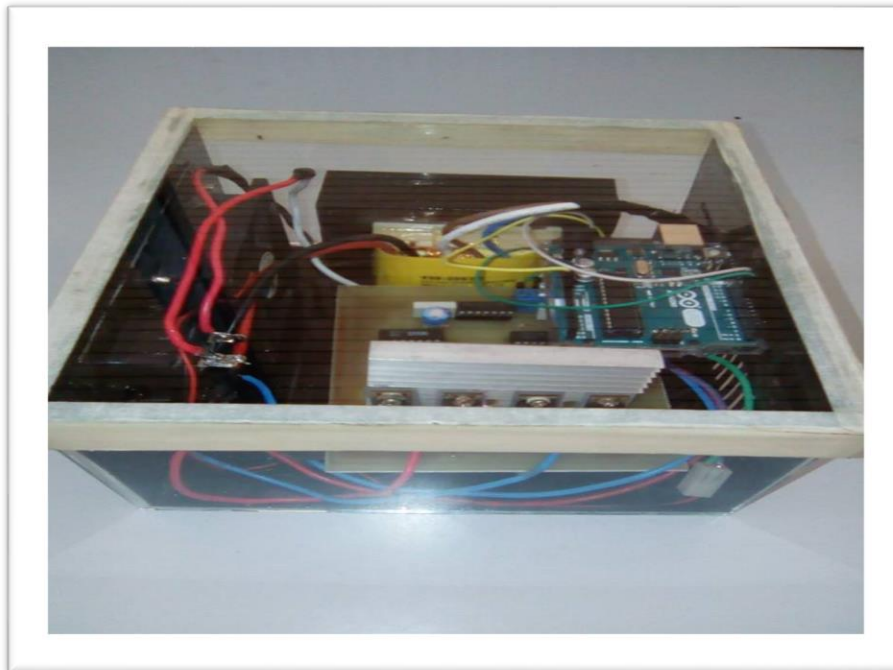


Figure 4.12. Photo de l'onduleur photovoltaïque réalisé.

4.2.1.6. Présentation du site d'installation du système PV :

Il existe une multitude de sites favorables pour la production d'énergie décentralisée sur tout le territoire national Algérien. Notre point d'intérêt étant focalisé sur la production PV. Le choix du site ne présente pas une tâche facile, chacun jouit d'un nombre d'avantages par rapport à l'autre. Notre choix est porté sur un foyer isolé **situé à SERRIR** à la commune de **MARHOUM** se trouvant à 110 km de la **ville de Sidi Bel Abbés** avec une latitude de $35^{\circ} 11' N$, et une longitude de $0^{\circ} 38' O$. Ce foyer est dépourvu du réseau électrique. La figure (4.13) représente l'endroit de ce site, ses caractéristiques géographiques se résument dans le tableau (4.8):

Commune	Longitude	Latitude	Angle optimal d'inclinaison pour le panneau PV	Orientation optimale pour le panneau PV
Marhoum (SERRIR)	$0^{\circ} 38' O$	$35^{\circ} 11' N$	45°	Sud

Tableau 4.8. Caractéristiques géographiques du site.

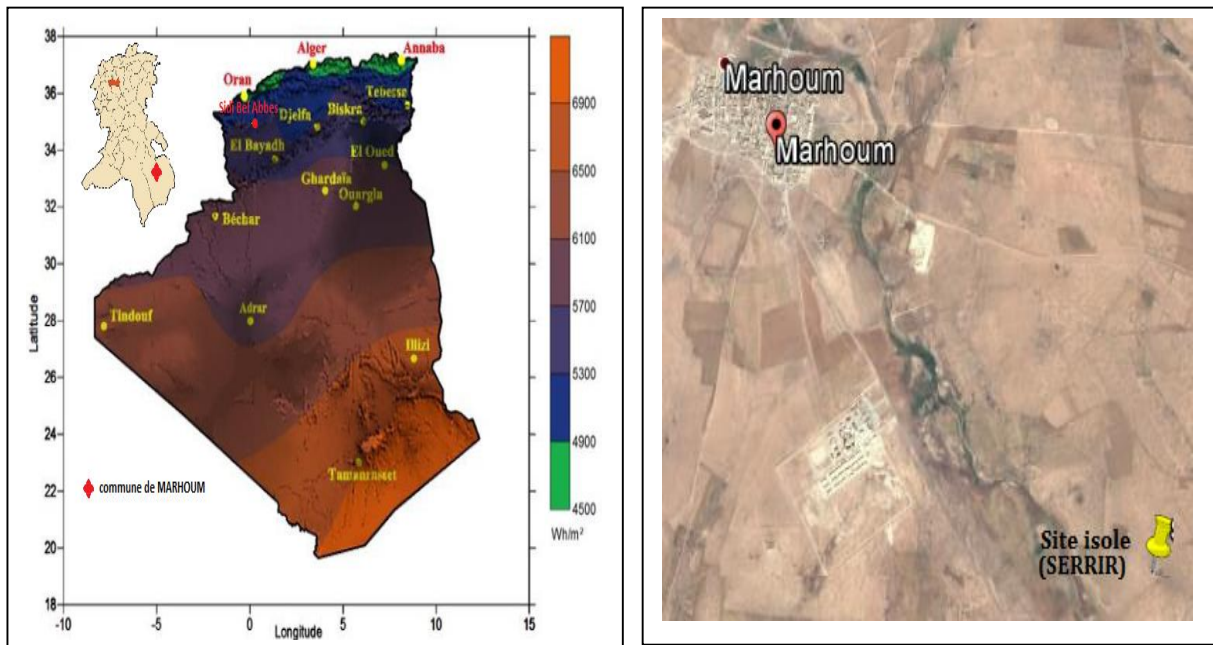


Figure 4.13 .Situation géographique du site utilisé



Figure 4.14. Photo du Site isolé utilisé (non électrifié)

Le dimensionnement du SPV (système photovoltaïque) dépend évidemment des ressources énergétiques disponibles ainsi que des contraintes d'utilisation. Ceci requiert une campagne de mesure et une analyse préalable des spécificités du site. Pour créer une base de référence pour notre travail nous avons choisi d'adopter des données disponibles et accessibles à tous. Le gisement solaire et le profil de charge sur une année utilisée pour réaliser le dimensionnement du SPV sont disponibles dans la base de données fournie avec le logiciel HOMER[95].

A. Évaluation de la ressource énergétique disponible sur le site :

Pour les données de gisement solaire, il suffit d'entrer la longitude et la latitude du lieu désiré lier le logiciel avec le site de données de gisement, et cliquer sur l'icône « Get Data Via Internet ». On peut aussi importer un fichier comprenant des données récoltées sur le site même. La dernière option est d'entrer des moyennes mensuelles de gisement solaire (kWh/m²/jour) [94]. Il est aussi possible de mettre les données à l'échelle par rapport à une moyenne annuelle (kWh/m²/jour). Il est certain que si les données sont disponibles pour toutes les heures de l'année et que le profil de consommation est aussi disponible dans ce format, les résultats seront optimaux. Dans les autres cas, lier le logiciel avec le site de données de gisement solaire est approprié. La figure (4.15) présente les données de rayonnement solaire du site d'étude.

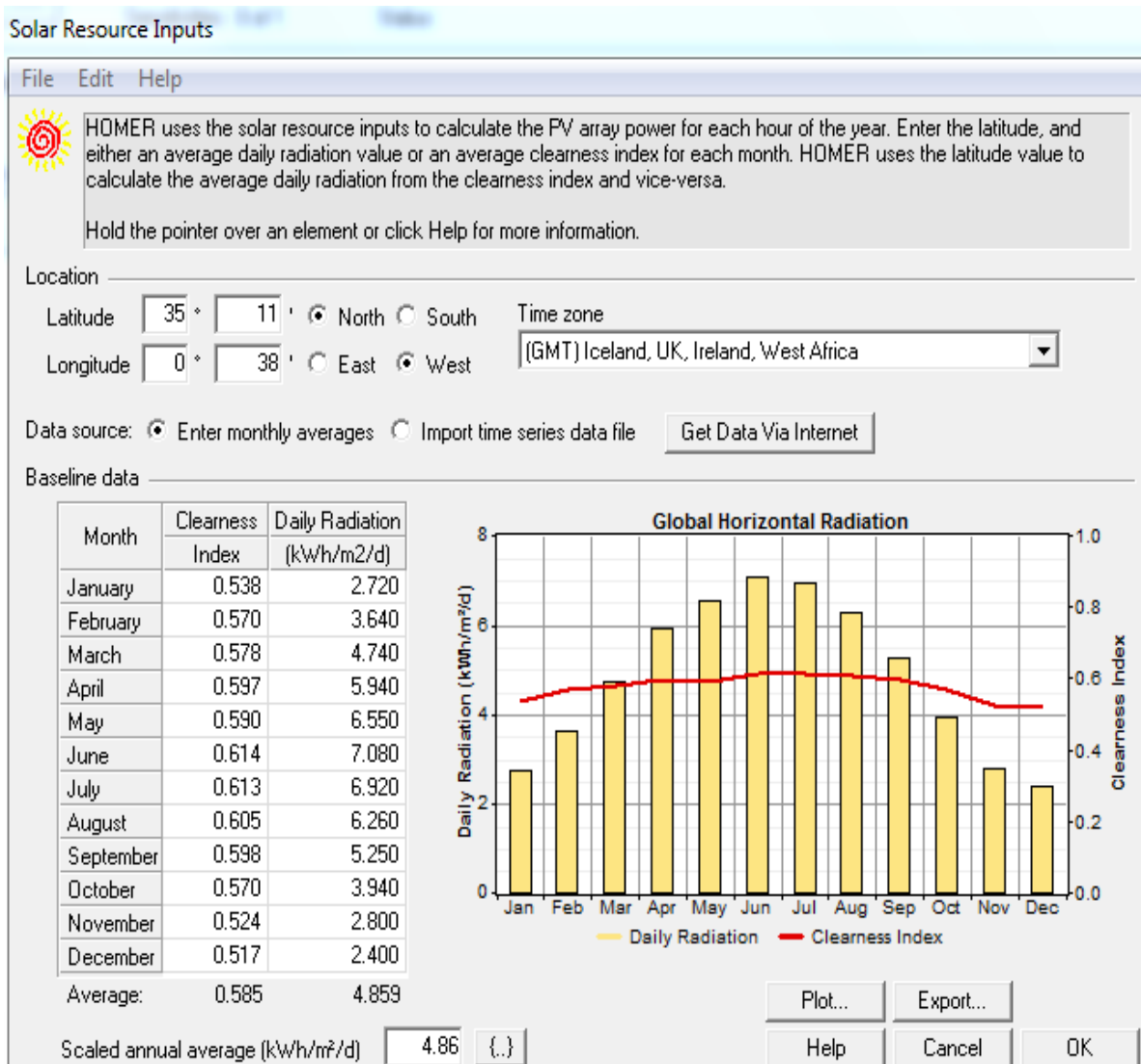


Figure 4.15. Rayonnement du Site isolé étudié

On peut observer que le rayonnement varie entre 2,4 kWh/m²/jour pour le mois de décembre et 7,08 kWh/m²/jour pour le mois de juin avec une moyenne annuelle de 4,86 kWh/m²/jour. On remarque aussi que les valeurs de rayonnement les plus élevées sont observées pendant les mois d'avril à septembre tandis que les valeurs les plus petites sont observées pendant les mois d'octobre à février.

L'indice mensuel de la clarté est défini comme le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement extra-terrestre. Les valeurs de ce dernier varient selon les endroits et les saisons. Sur la figure (4.15) on observe que l'indice mensuel de la clarté varie entre 0,517 au mois de décembre (saison des pluies) et 0,614 au mois du juin (saison sèche) et l'indice de clarté annuel est égal à 0,585. Le rayonnement solaire varie non seulement au cours de différentes saisons, mais aussi à des moments différents de la journée. On observe sur la figure (4.16) que les pics du rayonnement sont atteints autour du midi (12h00) pour tous les mois de l'année.

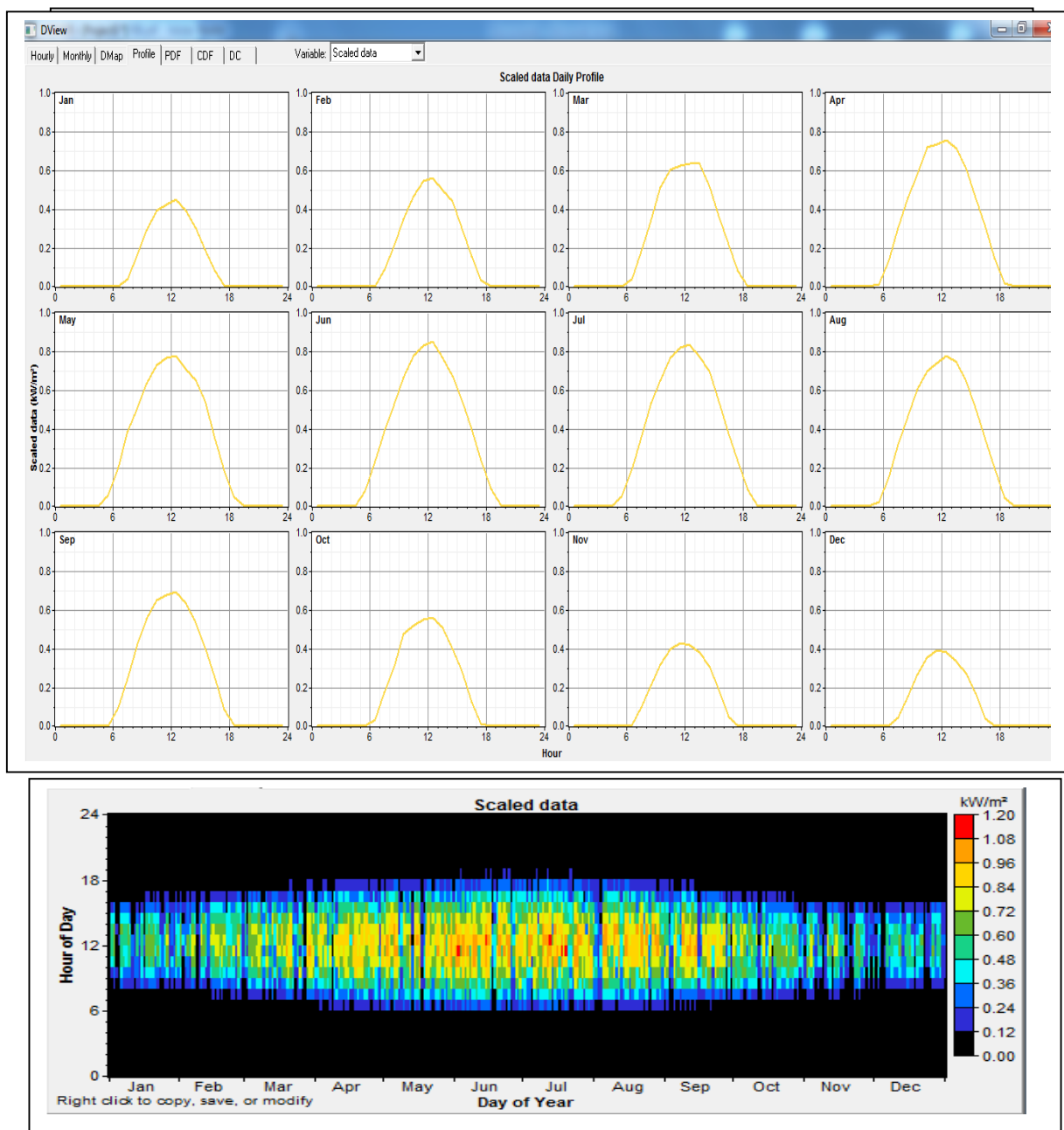


Figure 4.16. Profil journalier et distribution horaire de rayonnement solaire du site.

Pour le pré-dimensionnement, on utilise les valeurs de gisement solaire présenté dans le tableau 4.9:

Gisement solaire du mois le moins ensoleillé kWh/m ² /jour	2.4
moyenne annuelle du gisement solaire kWh/m ² /jour	4.86

Tableau 4.9. Données de gisement solaire utilisées

B. Évaluation de la demande énergétique (profil de charge) :

Le profil de charge représente un élément de base dans la conception des systèmes de production d'électricité à source d'énergie renouvelable.

Les besoins énergétiques des communautés rurales peuvent être classés en six (6) catégories [93]:

- Résidentielles (ménage et équipements d'accompagnement,).
- Agricole (pompage de l'eau et irrigation, séchage des produits agricoles,).
- Industriels (plâtrerie, laiterie,).
- Commerciales (restaurants, points de ventes,).
- Communales (Ecoles, mosquées, centres de santé,).
- Eclairage publique des rues.

Dans ce cas l'application est hors réseau (site isolé). La Chaîne de conversion photovoltaïque est destinée à alimenter un générateur d'ozone servant à augmenter la durée de stockage des aliments par ozonation.

4.2.1.7. Dimensionnement d'un système PV avec batterie :

Les étapes suivantes permettront de dimensionner un système photovoltaïque. Il faut, en premier lieu, estimer les besoins en électricité et établir la durée de la période d'ensoleillement minimale de la région où le système sera installé. Les grilles de calculs ci-après permettront ensuite de dimensionner la capacité de la batterie et la puissance du champ photovoltaïque. Afin de faciliter les calculs préliminaires, nous avons indiqué les rendements typiques des régulateurs de charge et des batteries. Ces valeurs devront être réajustées lorsque le choix des composants du système sera arrêté et qu'une meilleure estimation de l'efficacité du système et du rendement des composantes sera possible.

A. Estimation des besoins d'électricité (Wh/j)

Appareil/ Charge	CC/CA	(A) Puissance nominale (W)	(B) Heures d'utilisation journalière	Consommation électrique journalière en Wh/j A × B
	CA	8	10	80

Tableau 4.10. Consommation journalière en électricité

Les charges CA doivent tenir compte des pertes dues à l'onduleur. Ce rendement se situe entre 80 % et 95 %

$$Charge_{CA\text{ calculée}} = \frac{Charge_{CA}}{Rendement_{CC/CA}} = \frac{80}{0,95} = 84,21 \text{ Wh/j} \quad (4.4)$$

Estimation de l'onduleur = 100 W (A)

Charge journalière totale :

Charges CC + Charges CA calculée = 94,12 Wh/j

B. Estimation de l'ensoleillement

On consulte la carte d'ensoleillement de la région. On choisit toujours la période de l'année la moins ensoleillée afin d'obtenir la production d'électricité requise durant cette période. L'ensoleillement est habituellement exprimé en kWh/m²/j ou en heures de plein ensoleillement (heures.1000 W/m²).

C. Estimation de la capacité de stockage requise (Ah)

Rendement du générateur photovoltaïque :

Ren gen: 17 %

(Pertes dues à la poussière, à l'échauffement des modules, au câblage, etc.,)

Rendement d'une batterie d'accumulateurs :

Ren acc : 75%

(Typiquement de 75 % à 90 %, inclure les pertes de câblage et de vieillissement)

Tension nominale des accumulateurs : (12 V, 24 V, 48 V, etc.)

V acc : 12 Vcc

Décharge maximale des accumulateurs :

DM: 80 % (Entre 20 % et 80 % de décharge)

Nombre de jours de stockage :

Jr aut : 3 j (En général, on prévoit trois à cinq jours d'autonomie).

Pour un système dont la disponibilité est faible, il faut indiquer une autonomie plus élevée.

$$Capacité\ des\ accumulateurs\ (Ah) = \frac{Charge\ journalière \times Jr_{aut}}{V_{acc} \times Ren_{acc} \times DM} = \frac{94,12 \times 3}{12 \times 0,75 \times 0,8} = 39,21 \text{ Ah} \quad (4.5)$$

D. Estimation du champ photovoltaïque requis (Wc)

$$Puissance\ du\ champ\ Photovoltaïque\ (Wc) = \frac{Charge\ journalière}{ensoleillement \times Ren_{acc} \times Ren_{gen}} =$$

$$\frac{84,21}{4,86 \times 0,75 \times 0,17} = 135,8W \quad (4.6)$$

4.2.2 Processus d'ozonation :

Au cours de ces dernières décennies, les applications des décharges à barrières diélectriques ont été diversifiées. Un grand intérêt est aujourd'hui porté aux Décharges à Barrière Diélectrique (DBD) du fait d'un champ d'application très large : élimination de composés Organiques Volatils, traitement d'effluents gazeux au niveau des pots catalytiques. L'ozone présente une solution écologique et même économique dans plusieurs applications par rapport aux autres processus chimiques.

4.2.2.1. Réalisation et étude du générateur d'ozone :

Afin d'étudier et identifier expérimentalement la conception optimale de générateur d'ozone à DBD de surface, un schéma explicatif et une photographie de générateur d'ozone utilisé sont présentés dans la figure (4.17 a) et figure (4.17 b).

La solution retenue a été la confection d'électrode à partir d'Adhésif Aluminium, solution souvent utilisée dans les laboratoires. Parmi les différents matériaux diélectriques, nous avons opté pour le plexiglas. Il permet de stabiliser la décharge sur toute sa surface, avec limitation de courant et empêchement de l'arc électrique. En plus il résiste à la température élevée et surtout résiste à l'effet corrosif de l'ozone.

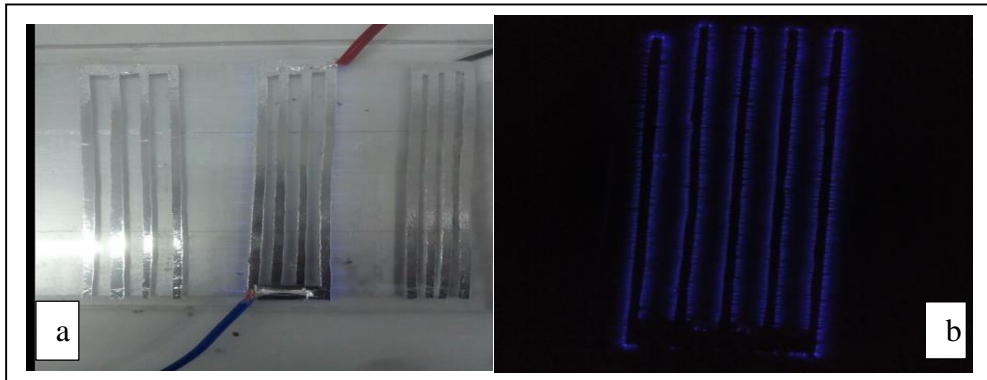


Figure 4.17. Décharge de réacteur DBD utilisé
a) Prise de jour, b) Prise de nuit

4.2.2.2 Description du dispositif expérimental :

Le schéma descriptif du dispositif utilisé est illustré sur la figure (4.18), Il est constitué de :

- Un transformateur haute tension haute fréquence alimentant le réacteur DBD surfacique.
- Une cellule DBD surfacique
- Un système automatique de déclenchement du générateur d'ozone

La haute tension appliquée entre les deux électrodes disposées de part et d'autre du diélectrique produit un plasma surfacique qui génère de l'ozone. L'ozone produit est mesuré grâce à un analyseur d'ozone portable de marque **O3 TECHNOLOGIES** qui permet de mesurer le taux d'ozone dans l'air en ppm.

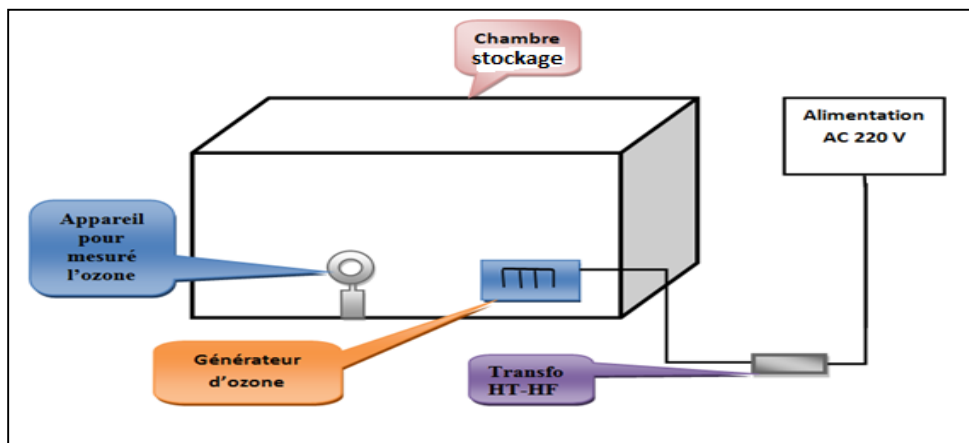


Figure 4. 18. Dispositif expérimental installé dans la chambre froide.

Le traitement à l'ozone a été réalisé à l'intérieur d'une enceinte métallique de dimensions 2x1 2x1 m³ à l'intérieur de laquelle a été placé un générateur d'ozone fixé sur la paroi supérieure. Une enceinte métallique identique sans générateur d'ozone a été utilisée comme salle de contrôle. Un moniteur d'ozone portable (O3 Technologies) a été utilisé pour mesurer la concentration d'ozone dans la salle traitée, en ppm.

La meilleure méthode pour générer de l'ozone consiste à faire passer l'oxygène (O₂) à travers un plasma produit par Diodelectric Barrier Discharge (DBD), qui le convertit en ozone. Un réacteur DBD à surface plane a été développé, comprenant une barrière diélectrique de dimensions 190 x 140 x 2 mm³ (Figure.4.19). Les électrodes sont constituées d'une bande adhésive en aluminium placée sur les côtés opposés de la plaque de bakélite. L'électrode haute tension est constituée de 10 bandes de dimensions 170 x 3 mm² tandis que l'électrode de masse est une bande d'aluminium liée à l'autre face de dimensions 170 x 120 mm²

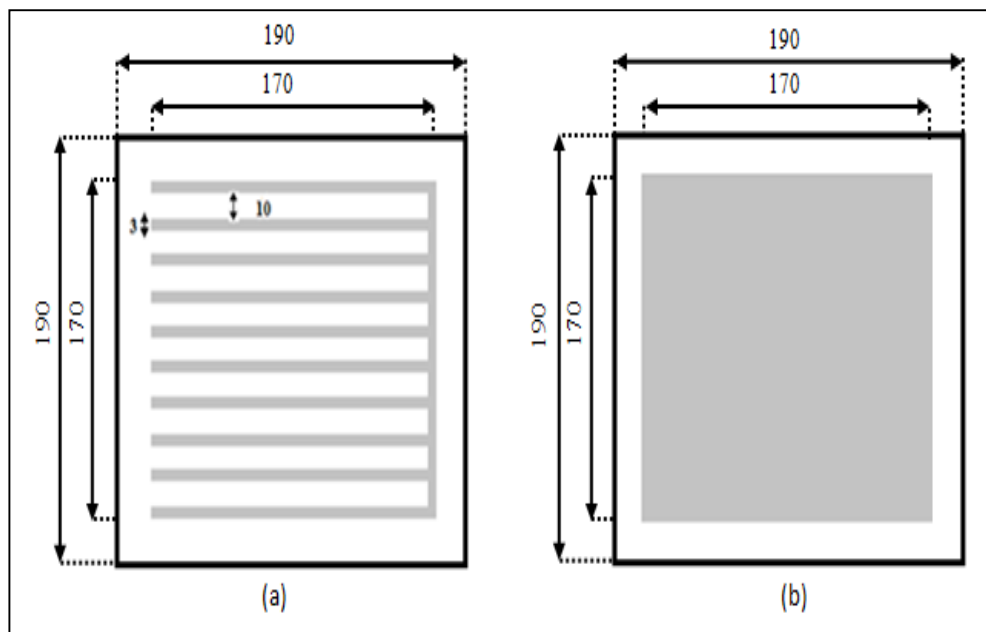


Figure 4.19. Vues inférieure (a) et supérieure (b) du générateur d'ozone plat (Dimensions en mm)

4.2.2.3. Procédure expérimentale :

Des aliments frais achetés au marché local ont été placés dans deux salles et conservés pendant 24 jours. Des photos ont été prises à intervalles réguliers pour une analyse visuelle de la qualité des aliments. De plus, des pesées de masse ont été prises pour estimer la perte de poids des aliments au fil du temps.

La perte de poids a été calculée en utilisant la formule suivante :

$$M = (m_i - m_f) / m_i \quad (4.7)$$

avec

m_i : masse initiale (1er jour)

m_f : masse finale (24ème jour)

Les concentrations typiques d'ozone généralement utilisées pour le traitement dans les entrepôts frigorifiques doivent être comprises entre 2 et 7 ppm [88]. En conséquence un système de contrôle du temps utilisant la programmation par carte ARDUINO a été développé

pour contrôler les périodes de temps On / Off du générateur d'ozone afin d'assurer une concentration continue en ozone comprise entre 2 et 7 ppm.

Pour atteindre ces concentrations, des tests préliminaires ont été effectués afin de déterminer les périodes de fonctionnement optimales du générateur d'ozone. Toutes les expériences ont été effectuées dans des conditions stables de température (15 ± 5 °C) et d'humidité ($50 \pm 10\%$) à l'intérieur de la salle d'entreposage.

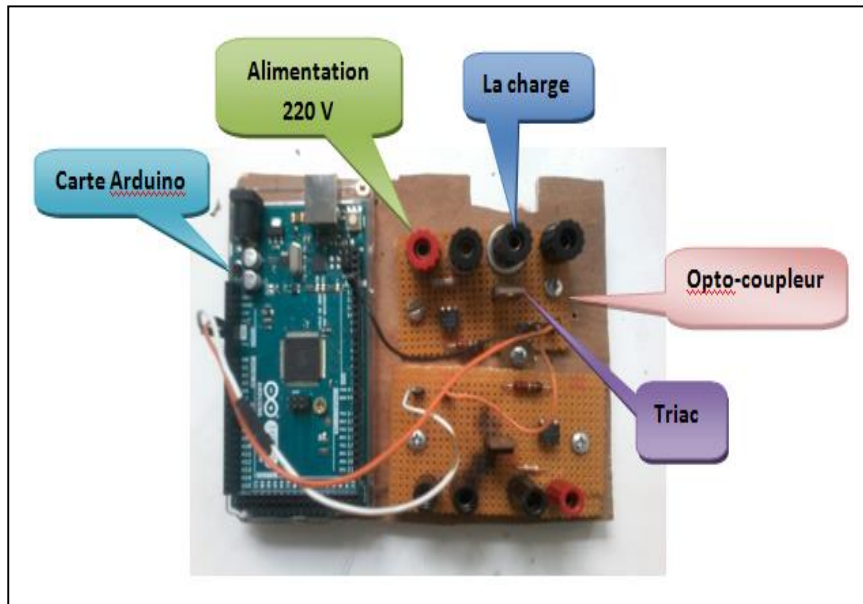


Figure 4.20. Photographie du Système électrique de commande automatique

4.3. Résultats et discussions :

Les résultats des expériences préliminaires sont illustrés aux Figure. (4.21) et figure (4.22) et représentent l'évolution de la concentration en ozone pendant le fonctionnement du générateur d'ozone (période activée) et la diminution de la concentration en période d'arrêt (période désactivée) du générateur.

Comme le montre la figure (4.21), la durée nécessaire pour atteindre une concentration d'ozone de 7 ppm est de 10 secondes. De plus, les résultats présentés dans la Figure (4.22) relatent, que la durée pendant laquelle la concentration diminue de 7 à 2 ppm en fonction des conditions d'humidité et de température est de 15 minutes.

Sur la base de ces résultats, le système de contrôle de l'heure du générateur d'ozone a été configuré pour maintenir une concentration d'ozone comprise entre 2 et 7 ppm ce qui correspond à une durée de fonctionnement de 10 secondes appliquée à des intervalles d'arrêt de 15 minutes.

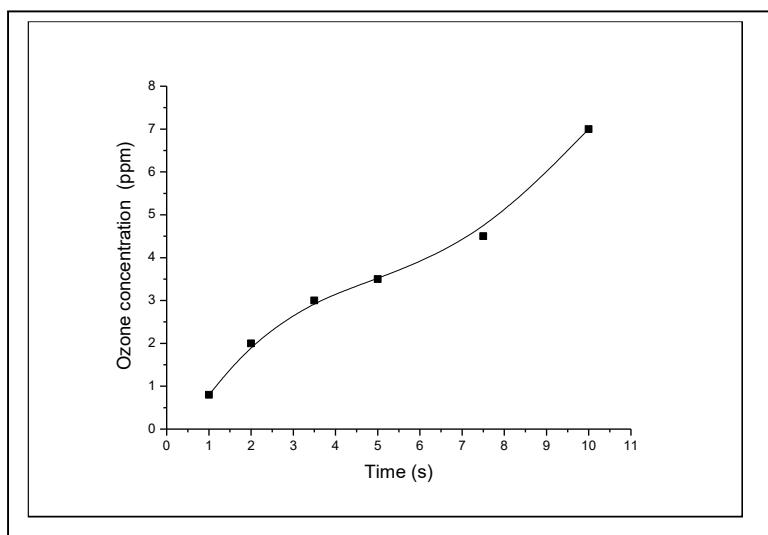


Figure 4.21. Evolution de la concentration en ozone en fonction du temps de fonctionnement du générateur d'ozone

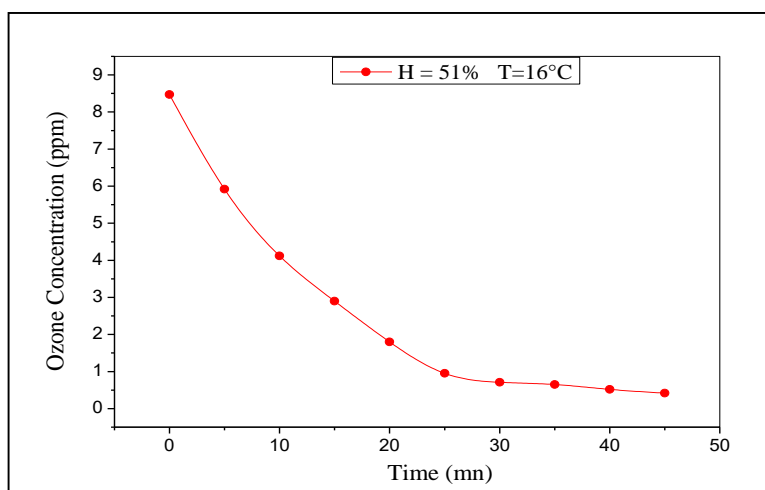


Figure 4.22. Diminution de la concentration d'ozone en fonction du temps pendant lequel le générateur d'ozone est arrêté

Six produits alimentaires ont été testés : tomate, concombre, courgette, pomme, poivron et banane. La figure (4.23) montre des photographies prises après 24 jours de stockage dans des enceintes traitées et non traitées.

- Ces résultats montrent clairement que l'aspect visuel des produits stockés dans la salle traitée à l'ozone est bien meilleur. En effet, l'ozone est un puissant oxydant recommandé par plusieurs chercheurs [96-97] pour réduire la décomposition du produit et prolonger la période de stockage en éliminant les bactéries et arrêter leur développement.

- L'ozone réagit également avec l'éthylène, gaz responsable de la maturation des fruits et des légumes, car il provoque des dégâts et augmente la décomposition [98-100]. En outre, plusieurs études [102-103] mentionnent que l'exposition des fruits et des légumes à l'ozone peut ralentir la sporulation des champignons nuisibles aux agrumes, en particulier le *Geotrichum* et *Penicillium*.

Traités	Non traités
	
	
	
	
	
	

Figure 4. 23. Comparaison entre les états des produits alimentaires traités et non traités à l'ozone après 24 jours

- De plus, la perte de masse après 24 jours de stockage a été analysée ; les résultats obtenus sont représentés sur la (Figure 4.24) qui représente la différence entre les produits traités et les produits non traités en termes de perte de masse [104] .
- Outre la durée de conservation est plus longue des produits, la perte de masse est beaucoup moins importante pour les produits stockés dans la salle traitée à l'ozone, ce qui représente donc un bénéfice non négligeable pour les utilisateurs.
- D'autre part, l'énergie consommée par le générateur d'ozone pourrait être estimée en mesurant la puissance du générateur d'ozone.

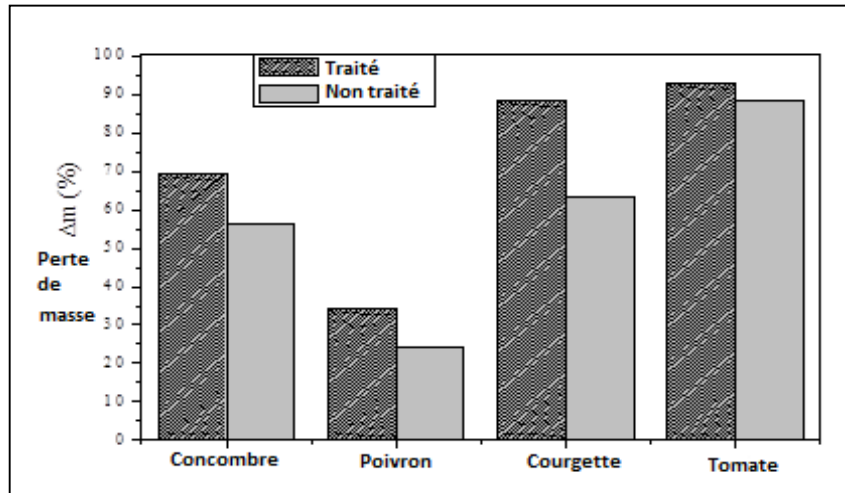


Figure 4. 24. Perte en masse des produits alimentaires après 24 jours de stockage

La figure 4.25 de Lissajous a été utilisée pour analyser la puissance consommée. L'énergie consommée au cours d'un cycle de décharge peut être exprimée comme suit :

$$P = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} v(t).i(t)dt \quad (4.8)$$

Où T : est la période de tension appliquée,

i (t) : est le courant traversant le réacteur à décharge

v (t) est la tension appliquée.

Puisque le courant traverse un condensateur de valeur C, il peut être exprimé par :

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = C \frac{dV_C}{dt} \quad (4.9)$$

Où V_C est la tension aux bornes de C et q la charge transportée dans le générateur d'ozone.

L'énergie consommée par cycle peut être calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$W = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} v(t).C.dV_C = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} v(t).dq(t) \quad (4.10)$$

Par conséquent, l'énergie consommée pendant un cycle de décharge étant égale à la surface enveloppée de Lissajous, la puissance P peut être calculée en multipliant cette surface W par la fréquence f.

$$P = W.f \quad (4.11)$$

Selon l'équation (4.11), la puissance consommée déduite de la figure de Lissajous tracée à la (Figure.4.25) est égale à 40 W, ce qui correspond à 16 W / m².

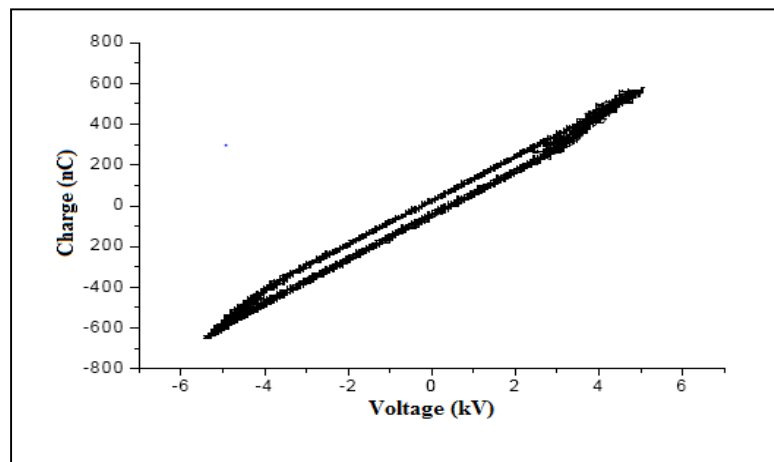


Figure 4.25.. Courbe de Lissajous du générateur d'ozone

4.4. Conclusion :

- Bien que plusieurs études aient été développées sur la conservation des aliments contenant de l'ozone au cours des dernières années, nous avons constaté un manque d'études sur l'utilisation de ce procédé dans des sites isolés non alimentés en énergie électrique conventionnelle.
- Les résultats confirment l'action de désinfection de l'ozone dans les salles de stockage des aliments en prolongeant la durée de conservation des fruits et légumes, en utilisant un système **solaire photovoltaïque** qui représente la meilleure solution dans les sites isolés.
- **L'onduleur** développé à l'aide de composants usuels tels que transistor MOSFET et une commande numérique faisant appel à une carte ARDUINO réduit fortement le coût de l'installation.
- En effet, les expériences menées ont prouvé qu'un système de production d'ozone alimenté par un système solaire photovoltaïque pour le stockage des produits alimentaires, offrait une solution rentable et bien adaptée aux sites isolés.

CONCLUSION GENERALE

L'imagination est plus importante que la connaissance.
Albert Einstein

Conclusion générale

Au terme de cette thèse, et pour la clarté du propos, nous proposons de faire état des conclusions de cette recherche en distinguant : (1) les contributions théoriques et méthodologiques, (2) les systèmes expérimentaux de la thèse et enfin, (3) les perspectives de la recherche.

1. Contributions théoriques et méthodologiques

Cette thèse a montré l'intérêt de la prise en compte des recherches sur la décarbonisation du système énergétique dominant, nécessitant un déploiement spatial des énergies renouvelables de grande envergure et des mutations profondes du système sociotechnique éminent incluant des évolutions majeures des technologies, des politiques publiques des comportements, etc...

L'Algérie arrive en tête du classement des pays africains ayant le meilleur taux d'électrification mais malgré les efforts déployés par le gouvernement, certains foyers se trouvant dans les zones éparses sont toujours privés d'électricité. S'approvisionner en énergie électrique issue des panneaux photovoltaïques présente une solution prometteuse et un meilleur ressort pour les zones éloignées.

Ces foyers isolés, sont confrontés également au problème de la conservation des aliments, fruits et légumes. C'est dans cet ordre d'idée que notre travail est axé sur le phénomène de désinfection de l'air qui contient naturellement des bactéries et des virus.

L'objectif principal de cette étude est de réaliser un système automatique de génération d'ozone par un réacteur à décharge à barrière diélectrique commandé par une carte ARDUINO et l'utiliser dans une chambre pour la conservation des produits alimentaires. Ce générateur est alimenté par un système photovoltaïque.

2. Systèmes expérimentaux de la thèse

Le système utilisé est l'analyse expérimentale du stockage des aliments dans une atmosphère traitée à l'ozone alimentée par un système d'alimentation photovoltaïque. Le dispositif expérimental comprend deux parties distinctes : le système d'énergie solaire et le système d'ozonation.

Le système à énergie solaire PV comprend un générateur photovoltaïque produisant une puissance de 135 W, un contrôleur de charge pour maintenir la tension constante, une batterie de stockage de 80 Ah et un onduleur monophasé.

Au terme de cette analyse générale et parmi les différentes topologies d'onduleur existantes, deux modèles ont fait l'objet d'étude, le premier en pont sans transformateur avec convertisseur continu-continu, le deuxième est un onduleur en pont avec transformateur commandés respectivement par Microcontrôleur PIC, Microcontrôleur ARDUINO.

Dans ce cadre et pour avoir une idée sur le matériel, la simulation sous l'environnement MATLAB SIMULINK et PROTUS ISIS s'est imposé pour les deux types d'onduleurs.

La réalisation pratique a montré l'efficacité des deux topologies d'onduleurs commandés par modulation largeur impulsion. Les résultats obtenus par simulation et ceux recueillis sur banc d'essais ont permis de corroborer les propriétés du système. Cette réalisation est menée dans le but de respecter les exigences du cahier de charge en matière de compatibilité électromagnétique et de concevoir un onduleur avec un faible taux de distorsion harmonique et un minimum de coût.

Sous l'angle d'une comparaison des deux réalisations précédentes, il s'est avéré que chaque type présente certains avantages par rapport à l'autre. Sachant que la charge à alimenter est un générateur d'ozone et par mesure sécuritaire liée à la protection de tous les appareils qui se trouvent en aval, l'onduleur en pont avec transformateur est adopté pour être intégré dans la chaîne de conversion photovoltaïque. Ce dispositif réalise l'isolation galvanique de manière naturelle (par construction), il utilise des techniques plus élaborées de mesure surveillance et compensation des courants de fuites. Aucun potentiel n'est commun entre le panneau et la charge.

Pour autant, il se structure dans un contexte, le deuxième système, d'ozonation qui représente la charge alimentée par le système photovoltaïque composé d'une cellule DBD surfacique un transformateur haute tension, haute fréquence et un système automatique de déclenchement du générateur d'ozone.

Six produits alimentaires (fruits, légumes) ont été testés dans une simple chambre à une concentration d'ozone entre 2 et 7 ppm (la concentration d'ozone recommandée pour la conservation d'aliments) pour une durée bien déterminée (24 jours). Il en dérive l'efficacité de l'ozone produit par DBD surfacique qui permet une conservation des légumes et fruits lors de leur stockage en éliminant les bactéries et en figeant leurs développements.

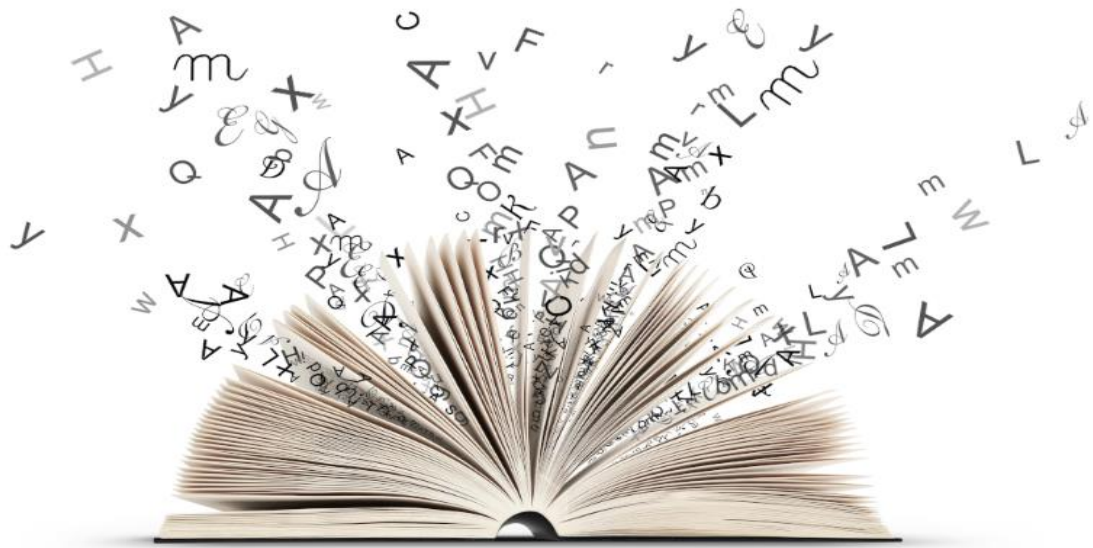
Les résultats obtenus ont montré que l'application d'ozone dans une simple chambre située dans un site isolé de la wilaya de Sidi Bel Abbés est dotée de l'énergie électrique renouvelable issu d'un panneau PV permet de dévoiler le comportement de l'ozone à prolonger la durée de conservation des produits agroalimentaires (légumes et fruits). L'onduleur développé à l'aide de composants usuels tels que transistor MOSFET et une commande numérique faisant appel à une carte ARDUINO réduit fortement le coût de l'installation.

3. Perspectives de la recherche

Au niveau du générateur PV, nous suggérons le développement d'un suiveur solaire à un seul axe à placer sur le générateur PV. Ceci permettra d'augmenter le rendement du générateur.

Pour un site isolé, il faut prévoir au moins deux sources d'énergies (solaire-éolienne) (solaire groupe diesel). Il est recommandé de réaliser des études en ajoutant d'autres composants tels que : une pile à combustible et un électrolyseur.

Pour l'onduleur sans transformateur avec convertisseur (CC /CC), il est recommandé d'appliquer un système de commande monobloc pour commander l'hacheur élévateur ainsi que l'onduleur monophasé avec des mesures de protection plus adaptées. Une modélisation des deux étages avec de nouvelles lois de commande non linéaire est vivement préconisée.



BIBLIOGRAPHIE



Références bibliographiques

- [1] **Kévin Duruisseau**, « Transition énergétique et géographie : le photovoltaïque au sol dans le sud de la France », Thèse de doctorat, novembre 2016.
- [2] **Mechouma Rabiaa**, « Contribution à l'étude des onduleurs dans les systèmes photovoltaïques : Applications pour les charges commerciales », Thèse de doctorat, université Batna, 14 Mars 2015.
- [3] **Alain Bidart et Laurent Dubois**, « Les énergies fossiles et renouvelables », Dossier pédagogique réalisé par la Fondation Polaire Internationale, Mai 2003.
- [4] **Bati Ernest Boya Bi, Prosper Gbaha, Magloire, Paul Ekoun Koffi, Kamenan Blaise Koua**, « Modélisation Des Composants D'un Système Hybride -Panneaux Photovoltaïque – Stockage D'énergie Via L'hydrogène –Batteries, European Scientific Journal , édition Vol.14, No.3 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431, January 2018.
- [5] **Le service de l'observation et des statistiques (SOS)**, « Chiffres clés de l'énergie » Édition 2016, février 2017.
- [6] **Mutua Joshua Bernard**, «Microcontroller Based Power Inverter» , Project report submitted in partial fulfillment of the requirement for degree , Bachelor of Science in electrical and electronic engineering, University of Nairobi ,2014.
- [7] **Bey, M., Hamidat, A., Benyoucef, B., Nacer, T**, « Study of the use of grid connected photovoltaic system in agriculture: Case of Algerian dairy farms », Renewable and Sustainable Energy Reviews, 63, 333-345, 2016.
- [8] **Korsaga, E., Koalaga, Z., Bonkougou., Zougmoré, F**, «. Comparison and determination of appropriate storage devices for an autonomous photovoltaic system in the Sahelian zone», International Journal of Technology Innovation, Physics, Energy and Environment, 4(1, 3), ISSN: 2428-8500, 2018.
- [9] **Sharma, R.R., Demirci, A., Beuchat Larry.R., Fett, William. F**, «Inactivation of Escherichia coli O157:H7 on Inoculated Alfalfa Seeds with Ozonated Water and Heat Treatment », Journal of Food Protection, 65(3), 447-451, 2002.
- [10] **Achen, M., Yousef , A.E**, « Efficacy of Ozone Against Escherichia coli O157:H7 on Apples », Journal of Food science, 66(9),1380-1384, 2001.
- [11] **Kim, JG., Yousef, A.E**, « Inactivation Kinetics of Foodborne Spoilage and Pathogenic Bacteria by Ozone», Journal of Food science, 65(3), 521-528, 2000.

- [12] **Kim, J.G., Yousef, A.E.**, « Use Of Ozone To Inactivate Microorganisms On Lettuce» Journal of Food Safety, 19(1), 17-34, 1999.
- [13] **Roya, Amiri Qandashtani., Esmail, Ataye Salehi**, «The effects clo₂ & o₃ with map on microbial load reduction of mung bean sprouts », Carpathian Journal Of Food Science And Technology, 8 (4) , 121-127, 2016.
- [14] **Palou, L., Crisosto,C.H ., Smilanick,J. L., Adaskaveg, J., Zoffoli,J.P.**, « Effects of continuous 0.3 ppm ozone exposure on decay development and physiological responses of peaches and table grapes in cold storage »,Postharvest Biology and Technology, 24(1),39-48,2002.
- [15] **Pérez, A.G., Sanz, C., Ríos, J. J., Olías, R., Olías, J, M.**, «Effects of Ozone Treatment on Postharvest Strawberry Quality », Journal Of Arcicultural And Food Chimestry, 44(4) , 1652-1656, 2002.
- [16] **Hwang,E.S.,Cash,J.N.,Zabik,M.J.**.Postharvest, « Treatments for the Reduction of Mancozeb in Fresh Apples »,Journal Of Agricultural And Food Chimestry,49(6),3127-3132,2001.
- [17] **Ong,K.C.,Cash J.N., Zabik, M.J.,Siddiq M.,A.L.Jones**, «Chlorine and ozone washes for pesticide removal from apples and processed apple sauce », Journal of Food Chemistry, 55(2),153-160,1999.
- [18] **Mendez,F., Maier,D.E., Mason,L.J., Woloshuk, C.P.**, «Penetration of ozone into columns of stored grains and effects on chemical composition and processing performance », Journal of Stored Products Research, 39(1), 33-44, 2003.
- [19] **Kells,S.A., Mason,L.J., Maier,D.E., Woloshuk,C.P.**, «Efficacy and fumigation characteristics of ozone in stored maize », Journal of Stored Products Research, 37(4), 371-382, 2001.
- [20] **Ewell, A.W.**, «Present use and future prospects of ozone in food storage», Journal of Food Science, 3(1-2), 101-108, 1938.
- [21] **Brahmi, M.N., Hadjri, S., Nemmiche, S., Brahmi,M., Tilmatine,A.** « Experimental investigation of a PV solar generator for supplying water treatment process”. International Journal of Environmental Studies, 72(1), 207–221, 2015.
- [22] **Benalouache Nadia**, « L'énergie solaire pour la production d'électricité au Maghreb : transition énergétique et jeux d'échelles », Thèse , Marseille Université , Juin 2017.
- [23] **Travaux des auditeurs**, « La conquête des marchés dans le secteur de l'énergie », Institut national des hautes études de la sécurité et de la justice, Juin 2014.
- [24] **Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible**, « Situation Mondiale De L'Energie Mémento de l'Hydrogène Fiche 2.1 », Révision octobre 2017.
- [25] **Commissariat général au développement durable**, « Chiffres clés de l'énergie », Février 2014.

- [26] **Laurent Horvath** , « Energies, Economie, Pétrole », La Revue Mondiale Mars 2018.
- [27] **Nouvelle édition d'un Monde d'Énergie by ENGIE**, « L'essentiel du contexte énergétique mondial », Avril 2018.
- [28] **Camille Cany**, « Interactions entre énergie nucléaire et énergies renouvelables variables dans la transition énergétique en France adaptations du parc électrique flexibilité », Université Paris-Saclay, Mars 2017.
- [29] **Pierre**, « Les énergies renouvelables, des énergies du future ? », FAISTACOM communiqué de presse en ligne, posted on 4 décembre 2015.
- [30] **L'OMPE** (Organisation national pour la protection de l'Environnementale) « Le réchauffement climatique »,2017.
- [31] **Boris Bersenef**, «Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur », thèse de doctorat, Université De Grenoble, Décembre 2010.
- [32] **Jane A. Peterson, Seth Dunn**, «Hydrogen Futures: Toward a Sustainable Energy System » World watch Paper 157, August 2001.
- [33] **D.Amina Mekhelfi**, « Evolution des exportations gazières de l'Algérie et son impact au sein de l'Opec (1970 à 2012) », Université Kasdi Merbah – Ouargla, revue 04/ 2013.
- [34] **BP** , « Statistical Review of World Energy», June 2013.
- [35] **Ministère de l'énergie**, «Bilan Energétique national année 2017 ,Sonatrach des réalisations et des engagements » Edition 2018.
- [36] **Ministère de l'énergie en Algérie**, « Energies Nouvelles, Renouvelables et Maitrise de l'Energie ».
- [37] **Nabil Mansouri**, « Algérie : les 150 MW d'énergies renouvelables seront produits avec des capacités nationales », journal électronique Maghreb Emergent ,31 juillet 2018.
- [38] **Algérie presse service**, <http://www.aps.dz/economie/73800-energies-renouvelables-l-algerie-possede-24-centrales-de-plus-de-354-megawatts>, 09 février 2018.
- [39] **Abdallah Jelali**, « Interconnexion d'un système photovoltaïque sur le réseau électrique », Mémoire présenté à l'université trois Rivière Québec, comme exigence partielle de maitrise en Génie Electrique, Aout 2012.
- [40] **Séverine Busquet**, « Etude D'un Système Autonome De Production D'énergie Couplant un Champ Photovoltaïque, Un Electrolyseur et une pile à Combustible : Réalisation D'un Banc D'essai Et Modélisation », Ecole des Mines ,2003.
- [41] **Missoum Mohammed**, « Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie », Mémoire de Magister université Chlef, 2011.
- [42] **Technologie Du Future , Electricite Ecologie** , « Le rayonnement infrarouge de la Terre : nouvelle source d'énergie renouvelable ? », 24 décembre 2015.
- [43] **S.Petibon**, «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » thèse université de Toulouse, 2009.

- [44] **Mustafa Belarbi**, « Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour un site autonome », Thèse de doctorat, Université Des Sciences Et De La Technologie D'Oran Mohamed Boudiaf, Septembre 2015.
- [45] **Belhadj Mohamed**, « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome » Mémoire de Magister, université Bechar, 2008.
- [46] **J. Fadat**, « Chaîne de Conversion d'Énergie Photovoltaïque, Commande MPPT », Revue 3EI, N°43, ESIEE-Amiens, France, 2005.
- [47] **Smaïl Semaoui**, « Etude de l'électrification d'un village avec de l'énergie solaire photovoltaïque », Université de Ouargla, juin 2004.
- [48] **Saad Saoud Merwan**, « Optimisation de la gestion de l'énergie photovoltaïque utilisée dans une zone agricole », thèse de doctorat Université Annaba, 2017.
- [49] **Nakoul Zakia**, « Optimisation d'une centrale solaire à base d'un générateur PV » Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, 2010.
- [50] Production d'énergie électrique : Énergie Solaire Photovoltaïque, Énergie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes, juin 2007
- [51] **Thomas Mambrini**, « Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies », Thèse de doctorat Université Paris sud, 2014.
- [52] **L.Abbassen**, « Étude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque » mémoire de magister, Université Tizi Ouzou, 2011.
- [53] « Évaluation de la performance environnementale des technologies solaires photovoltaïques, Environnement Canada », en partenariat avec Canmet Énergie de Ressources naturelles, Canada.
- [54] **Daoud Amine**, « Contrôle de la puissance d'un générateur photovoltaïque pompage solaire », thèse de doctorat université d'Oran, 2013.
- [55] **Hasni Hadjèr**, « Caractérisation Automatisée d'une cellule solaire », mémoire de master Université de Biskra, 2014.
- [56] **Stéphane VIGHETTI**, « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion », thèse de doctorat, université de Grenoble, 2010.
- [57] **Jacques Duval**, « Systèmes D'énergie Hybrides Solaires PV », Énergie Solaire Photovoltaïque et son Stockage, ASPROM Paris, 2010.
- [58] **Stéphane Hiscock, France Bleu Gironde et France Bleu**, « La plus grande centrale photovoltaïque d'Europe inaugurée à Cestas », Climat – environnement 1^{er} décembre 2015.
- [59] **Souad Zaamta**, « Réalisation d'un régulateur solaire à base de microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des accumulateurs » Mémoire de Magister de Oum El Bouaghi.
- [60] **Reynaud Jean-François**, « Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques », Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2011.

- [61] **Zameer Ahmad, S.N. Singh**, «Single phase transformer less inverter topology with reduced leakage current for grid connected photovoltaic system», *Electric Power Systems Research*, 154 (2018) 193–203.
- [62] **M.Jbilou,I.S. Bousmaha, M. Brahami**, « Simulation and realization of DC/DC Boost controlled by microcontroller» *International Renewable Conference on Materials* May,Tetouan, Marocco, 2015.
- [63] **H.N. Zainudin, S. Mekhilef**, « Comparison, Study of Maximum Power Point Tracker Techniques for PV Systems ». *Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'10)*, Cairo University, Egypt, December 19-21, 2010.
- [64] **Rabia Bibi , Asfandyar Ali , Tanvir Ahmad**, «Modeling of Multi Junction Solar Cell and MPPT Methods» *International Journal of Engineering Works*, Vol. 6, Issue 01, PP. 6-11, January 2019.
- [65] **S.Chithra1, V.Devi Maheswaran**, «Design and Realization of Maximum Boost Z- Source Inverter for Solar Power Applications», *Conference Paper*, January 2013.
- [66] **Stefan Laurentiu Capitaneanu**, « Optimisation de la fonction MLI d'un onduleur de tension deux-niveaux», *Institut national polytechnique de Toulouse* , 2002.
- [67] **Berrezek Farid**, « Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone », *Mémoire de Magister université Annaba*, 2006.
- [68] **P. Jeanty**, « Onduleurs pour systèmes photovoltaïques autonomes et couplés au réseau de distribution », *Rapport de stage université de la réunion*, 2007-2008.
- [69] **F. Forest, P. Lienart**, « Evolution des principes de la commutation assistée dans les Onduleurs de tension », *Présentation d'un onduleur haute fréquence à commutations douces* », *Revue Phys. Appl.* 24 195-205, (1989).
- [70] **This Minh Chaule**, « Couplage Onduleurs Photovoltaïques et Réseau, aspects contrôle/commande et rejet de perturbations », *Thèse de Doctorat université de Grenoble*, 2006.
- [71] **Boudjerda, Nasserline**, « Réduction des perturbations conduites dans les convertisseurs de l'électronique de puissance par une commande en MLI aléatoire », *thèse doctorat Université Sétif*, 2018.
- [72] **Dehini Rachid, Ryma Berbaoui**, « The harmonics currents identification faces to the voltage disturbance», *Rev. Roum. Sci. Techn.– Électrotechn. et Énerg.* Vol. 62, 4, pp. 346–351, Bucarest, 2017.
- [73] **Mohammad Sharifzadeh ; Hani Vahedi ; Ramon Portillo ; Leopoldo Garcia Franquelo ; Kamal Al-Haddad** « Selective Harmonic Mitigation Based Self-Elimination of Triplen Harmonics for Single-Phase Five-Level Inverters», *volume 34 issue1*,mars 2018.
- [74] **PV autonome , GUIDEnR Photovoltaïque, l'information photovoltaïque, 2012.**
- [75] **Les économies d'énergie**, Bobigny sur Bionne, 19 Janvier 2017.
- [76] **Violaine Didier**, « Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances » , *Août 2007*.

- [77] **Cédric Larricq-Fourcade Dit Leride**, « Etude de la pulvérisation assistée en air d'une nappe liquide et influence d'un vent ionique sur les instabilités hydrodynamiques », Thèse de doctorat , L'école nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace, Décembre 2006.
- [78] **Djemeli Ahmed**, « Optimisation de génération d'ozone par décharge à barrière », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Novembre 2005.
- [79] **Allégraud. K**, « Décharge à barrière diélectrique de surface : Physique et procédé », Thèse de Doctorat de l'École Polytechnique, 2008.
- [80] **Kamel Nassour**, « Optimisation du procédé de génération d'ozone par décharge à barrière diélectrique mixte surfacique-volumique » pour le traitement d'eau » thèse de doctorat UDL Sidi Bel Abbes, décembre 2016.
- [81] **Nemmich, S., A. Tilmatine, Z. Dey, N. Hammadi, K. Nassour, and S. Messal**. « Optimal Sizing of a DBD Ozone Generator Using Response Surface Modeling Ozone», *Science & Engineering* 37:3–8. 2015.
- [82] **Tarik Ouahidi**, « Conception et simulation d'une source d'alimentation constituée d'un régulateur et d'un onduleur monophasé de puissance kva » comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise en technologie des systèmes, Université de Québec, 2002.
- [83] **Zine El Abidine Kherroubi**, «Real time implementation of space vector pulse width modulation for three level neutral point clamped (NPC) inverter using Arduino DUE board», *IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)* , 30-31 Oct. 2017.
- [84] **M. Jbilou, IS.Bousemaha, Z.Dey, M Brahami** «Improving the functioning of a transformer less inverter equipping a photovoltaic generator», *Conference: International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, Ouarzazate Maroco, October 2014.
- [85] **R .Monique, Fayçal Chabni, Rachid Taleb**, « Three level solar inverter for stand-alone power systems: Simulation and practical realization», *Journal of Advanced Research in Science and Technology*, ISSN: 2352-9989, 2017.
- [86] « Quel régulateur choisir pour son panneau solaire ? », *Posted on 4 août 2016 by admin*.
- [87] Batterie solaire : capacité et durée de vie, *Ecolodis Scholar*, 2017.
- [88] **M. Adouane, M. Haddadi, A. Melek, M. Hadjiat**, « Etude et conception d'un onduleur monophasé autonome géré par microcontrôleur PIC 16F876A », *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 12 N°4 (2009) 543 – 550.
- [89] **Soumya Shubhra Nag, Santanu Mishra**, «Current-Fed Switched Inverter », *IEEE Transactions on Industrial Electronics* , India ,Volume: 61, Issue: 9 , Sept. 2014.
- [90] **M.Jbilou** ,S Bechkir ,F.Z.Boudjela ,M.Brahami « Evolution the operation of an inverter equipping a photovoltaic generator under constraint electromagnetic compatibility» *Deuxième journée doctorale de Génie Electrique, JDGE* 2018.
- [91] **AbdelHamid Loukriz**, «Experimental realization of a single-phase five level inverter for PV applications », *Department of Electrical, Engineering, high school, polytechnic ENP Alger, Algeria, Conference: 27-30 June 2016*.

- [92] **M.Jbilou**, « Etude et Réalisation d'un Onduleur d'un système Photovoltaïque »Mémoire de Magister, Université Djillali Liabés, Algérie, 2013.
- [93] **Jean-Luc Fock, Sui Too**, « Caractérisation et Modélisation de composants IGBT et diode PiN dans leur environnement thermique sévère lié aux applications aéronautiques »Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, 10 avril 2010.
- [94] **M.Jbilou, IS.Bousmaha, M.Brahami** «Realization and comparison two topologies of single-phase inverter for a photovoltaic system», 3^{ed} International renewable and sustainable energy conference, IRSEC 10-13 December 2015 Marrakech and Ouarzazate, Morocco.
- [95] **Gourbi Abdelkader**, « Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque hybride de production d'énergie électrique », thèse de doctorat ,université Sidi Bel Abbés ,2017.
- [96] **Liew,C.L.,Prange,R. K**, «Effect of ozone and storage temperature on postharvest diseases and physiology of carrots (*Daucus carota* L.) », Journal of the American Society for Horticultural Science,119(3),563- 567 ,1994.
- [97] **S.Arig,P., Zahavi,T., Zutkhi,Y., Yannai,S., Lisker,N., BenAri,R**, «Ozone for control of post-harvest decay of table grapes caused by *Rhizopus stolonifer*», Physiological and Molecular Plant Pathology, 48(6), 403-415,1996.
- [98] **Skog, L.J., Chu, C.L**, «Ozone technology for shelf life extension of fruits and vegetables», In: IV International Conference on Postharvest Science, 553, 431-432, 2000.
- [99] **Suslow,T.V**, «Ozone Applications for postharvest disinfection of edible horticultural crops» UCANR Publications, 2004.
- [100] **Tayyari, Farinaz., Khazaei,Javad., AJAEI, Peyman, Jouki, Mohammad**, « Effects Of Modified Atmosphere Packaging Systems, Low Temperature And Storage Time On The Quality Of Fresh Minimally Processed Pomegranate Arils», Carpathian Journal of Food Science & Technology, 9(1) ,16-26, 2017.
- [101] **Smilanick, Joseph L**, «Use of ozone in storage and packing facilities», In Washington tree fruit postharvest conference. 1-10, 2003.
- [102] **Tuffi, R., Lovino, R., Canese, S., Cafiero,L.M.,Vitali,F**, « Effects of exposure to gaseous ozone and negative air ions on control of epiphytic flora and the development of *Botrytis cinerea* and *Penicillium expansum* during cold storage of strawberries and tomatoes», Italian Journal of Food Science, 24(2),102-114, 2012.
- [103] **Montesano, D ,Somma, A, Ferrara, L**, « Ozone in post-harvest treatment of fruits and vegetables», Naples Univ , From the journal Italus Hortus (Italy), 2004.
- [104] **M. Jbilou, MN. Brahmi, S Nemnich, M. Brahmi, A. Tilmatine**, « Ozone food storage supplied by photovoltaic energy», Carpathian Journal of Food Science And Technology», vol 10(4), pp129-126,2018.

ANNEXES



1.3. Entrées/ Sorties de la carte ARDUINO UNO :

La carte ARDUINO UNO est dotée de : 6 entrées analogiques, 14 entrées/sorties numériques dont 6 peuvent assurer une sortie PWM, chacune des entrées/sorties de la carte ne peut pas délivrer plus de 20 mA.

➤ Entrées analogiques :

Les entrées analogiques permettent de mesurer une tension variable (entre 0 et 5 V) qui peut provenir de capteurs ou d'interfaces divers (potentiomètres, etc.)

➤ Entrées/sorties numériques :

Reçoivent ou envoient des signaux « 0 » ou « 1 » traduits par 0 ou 5 V. On décide du comportement de ces connecteurs (entrée ou sortie) en général dans l'initialisation du programme mais il peut être aussi changé dans le corps du programme.

1.4. Environnement de l'ARDUINO C :

C'est un logiciel de programmation par code (noté IDE en anglais), qui contient une cinquantaine de commandes différentes. Cet écrit en Java. L'IDE permet d'écrire, de modifier un programme et de le convertir en une série d'instructions compréhensibles pour la carte.

Figure 2 représente l'interface visuelle du logiciel à l'ouverture :

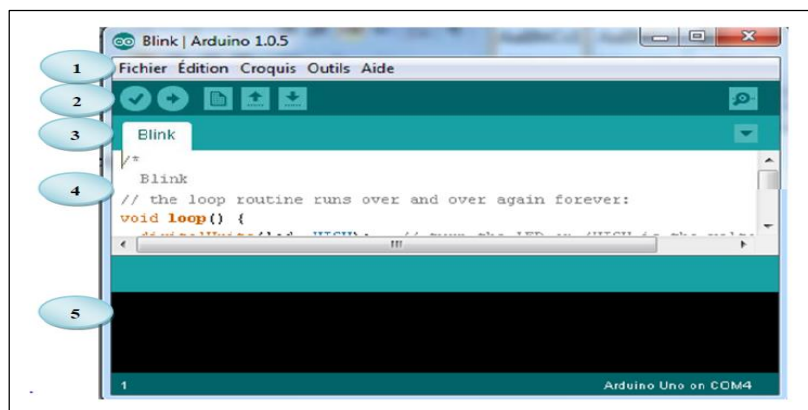


Figure1.4.Interface de l'ARDUINO C

L'interface visuelle du logiciel comporte les cinq éléments suivants :

1. une barre de menu ;
2. une barre d'actions ;
3. un ou plusieurs onglets correspondant aux sketches ;
4. zone d'écriture du programme ;
5. zone des messages d'erreur ou succès envoyés par le programme

Annexe 2 : Programmes ARDUINO**a. Commande MLI :**

```

// Mega Code
// Uses A0 & A1 (PORT F)
#include "TimerOne.h"
#define period 50 // 50 Hz
#define LED 13 // Test output for analyser
Int MLI=6 ;
Byte index = 0 ; // Index into sin table
Boolean flipflop = true ; // Output pin toggle
uint8_t _sin [] = { // Calculated for 50Hz at 200 pulses per half wave.
0, 0, 0, 1, 1, 1, 2, 2, 3, 3, 3, 4, 4, 5, 5, 5, 6, 6, 6, 7,
7, 8, 8, 8, 9, 9, 9,10,10,10,11,11,12,12,12,13,13,13,14,14,
14,15,15,15,15,16,16,16,17,17,17,17,18,18,18,19,19,19,19,19,
20,20,20,20,21,21,21,21,21,22,22,22,22,22,22,23,23,23,23,23,
23,23,24,24,24,24,24,24,24,24,24,24,24,24,24,24,24,24,24,24,
25,24,24,24,24,24,24,24,24,24,24,24,24,24,24,24,24,24,23,
23,23,23,23,23,22,22,22,22,22,22,21,21,21,21,21,20,20,20,
20,19,19,19,19,19,18,18,18,17,17,17,17,16,16,16,15,15,15,15,
14,14,14,13,13,13,12,12,12,11,11,10,10,10, 9, 9, 9, 8, 8, 8,
7, 7, 6, 6, 6, 5, 5, 5, 4, 4, 3, 3, 3, 2, 2, 1, 1, 1, 0, 0
};
Void setup () {
PinMode (MLI, OUTPUT) ;
PinMode (LED, OUTPUT) ;
// Pin mode, and set low.
DDRB= 0B0000011 ; // Set as output
PORTB = 0B0000000 ; // Set low
Timer1.initialize () ;
Timer1.attachInterrupt (pwm, period) ;
}
Void loop ()
{
DigitalWrite (MLI, HIGH) ;
Delay(10) ;
DigitalWrite (MLI, LOW) ;
Delay(10) ;
}
Void pwm () {
If (flipflop) {
PORTB = 0B0000001 ; //digitalWrite (A0, HIGH) ;
}
Else {
PORTB = 0B0000010 ; //digitalWrite (A1, HIGH) ;
}
Byte duty_cycle = _sin [index++] ;
If (duty_cycle > 3) {
DelayMicroseconds (duty_cycle) ;
}
PORTB = 0B0000000 ; //digitalWrite (A0, LOW) ; & digitalWrite (A1, LOW) ;
If (index > sizeof (_sin)) {
Index = 0 ; // Reset index
Flipflop = !flipflop ; // Flip to other pin for next half cycle
DigitalWrite (LED, flipflop) ; // Test output used as analysé trigger
}
}

```

}

b. *Commande symétrique :*

/*

Blink

Turns on an LED on for one second, then off for one second, repeatedly.

Most Arduinos have an on-board LED you can control. On the Uno and

Leonardo, it is attached to digital pin 13. If you're unsure what

Pin the on-board LED is connected to on your Arduino model, check

The documentation at <http://arduino.cc>

This example code is in the public domain.

Modified 8 May 2014

By Scott Fitzgerald

*/

// The setup function runs once when you press reset or power the board

Void setup () {

// Initialize digital pin 13 as an output.

PinMode (13, OUTPUT) ;

PinMode (12, OUTPUT) ;

}

// The loop function runs over and over again forever

Void loop () {

DigitalWrite (13, HIGH) ;

DigitalWrite (12, LOW) ;

Delay(10) ;

DigitalWrite (13, LOW) ; // turn the LED off by making the voltage LOW

DigitalWrite (12, HIGH) ;

Delay(10) ; // wait for a second

}

c. *Commande décalée*

/*

Blink

Turns on an LED on for one second, then off for one second, repeatedly.

Most Arduinos have an on-board LED you can control. On the Uno and

Leonardo, it is attached to digital pin 13. If you're unsure what

Pin the on-board LED is connected to on your Arduino model, check

The documentation at <http://arduino.cc>

This example code is in the public domain.

Modified 8 May 2014

By Scott Fitzgerald

*/

// The setup function runs once when you press reset or power the board

Void setup () {

// Initialize digital pin 13 as an output.

PinMode (13, OUTPUT) ;

PinMode (12, OUTPUT) ;

PinMode (11, OUTPUT) ;

PinMode (10, OUTPUT) ;

}

Annexes

```
// The loop function runs over and over again forever
Void loop () {
  DigitalWrite (13, LOW) ;
  DigitalWrite (12, HIGH) ;
  DigitalWrite (11, HIGH) ;
  DigitalWrite (10, LOW) ;
  Delay(3) ;
  DigitalWrite (13, HIGH) ;
  DigitalWrite (12, LOW) ;
  DigitalWrite (11, HIGH) ;
  DigitalWrite (10, LOW) ;
  Delay(7) ;
  DigitalWrite (13, HIGH) ;
  DigitalWrite (12, LOW) ;
  DigitalWrite (11, LOW) ;
  DigitalWrite (10, HIGH) ;
  Delay(3) ;
  DigitalWrite (13, LOW) ;
  DigitalWrite (12, HIGH) ;
  DigitalWrite (11, LOW) ;
  DigitalWrite (10, HIGH) ;
  Delay(7) ;
}
```

Annexe 3

3. Microcontrôleur PIC

3.1. Identification d'un Pic :

Pour identifier un PIC, on utilise simplement son numéro :

16 : indique la catégorie du PIC, c'est un Mid-range.

L : indique qu'il fonctionne avec une plage de tension beaucoup plus tolérante.

C : indique que la mémoire programme est un EPROM ou une EEPROM.

CR ou F : indique le type de mémoire ; CR(ROM) ou F (FLASH).

XX : représente la fréquence d'horloge maximale que le PIC peut recevoir.

Une dernière indication qu'on le trouve est le type de boîtier.

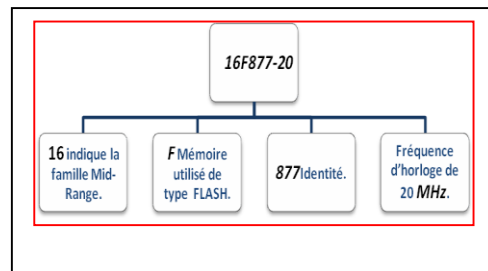


Figure 3.1. Description de la configuration du PIC 16F877A

3.2. Caractéristiques principales d'un microcontrôleur:

On cite :

- * De nombreux périphériques d'E/S
- * Une mémoire de programme
- * Une mémoire vive (en général de type SRAM)
- * Eventuellement une mémoire EEPROM destinée à la sauvegarde par programme de données à la coupure de l'alimentation
- * Un processeur 8 ou 16 bits
- * Faible consommation électrique
- Les tailles mémoire sont en général réduites, de l'ordre de :
- * 16 ko pour la mémoire programme
- * Quelques octets à 16 ko pour la RAM

La puissance de calcul est aussi limitée :

- * 0.012 MIPS pour les Basic Stamp
- * 1 à 5 MIPS pour les PIC

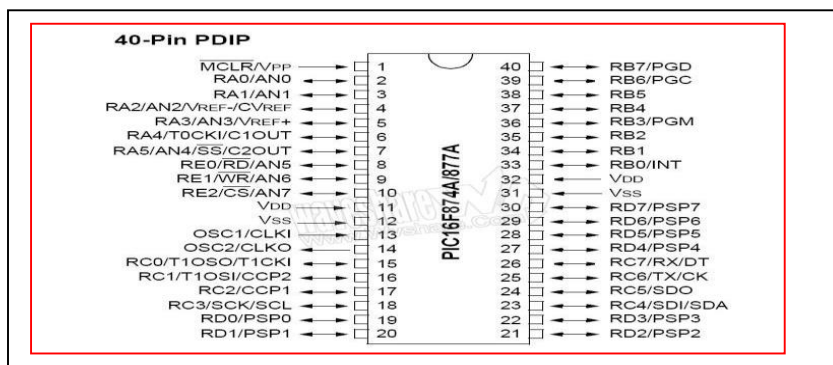


Figure 3.2. Schéma du PIC

3.3. Principales Caractéristiques du PIC 16F877:

Le PIC 16F877 est caractérisé par :

- * Une Fréquence de fonctionnement élevée, jusqu'à 20 MHz
- * Une mémoire vive de 368 octets.
- * Une mémoire EEPROM pour sauver des paramètres de 256 octets
- * Une mémoire morte de type FLASH de 8 K mots (1mot = 14 bits), elle est réinscriptible à volonté
- * Chien de garde WDT
- * 33 Entrées et sorties
- * Chaque sortie peut sortir un courant maximum de 25 mA
- * Trois(3) Temporisateurs: TIMER0 (8 bits avec pré diviseur), TIMER1 (16 bits avec prediviseur avec possibilité d'utiliser une horloge externe réseau RC ou QUARTZ) et TIMER2 (8 bits avec prediviseur et post diviseur)
- * Deux(2) entrées de captures et de comparaison avec PWM (Modulation de largeur d'impulsions)
- * Convertisseur analogique numérique 10 bits avec 8 entrées multiplexées maximum
- * Une interface de communication série asynchrone et synchrone (USART/SCI)
- * Une interface de communication série synchrone (SSP/SPI et I2 C)
- * Une tension d'alimentation entre 2 et 5.5 V

3.4. Mémoires du PIC 16F877A :

Le PIC 16F877 dispose de trois types de mémoires :

Mémoire FLASH :

C'est dans celle-ci que le programme du PIC est stocké. Après compilation du fichier source, le compilateur génère un fichier « .hex », Celui-ci est transféré ensuite dans la mémoire programme du PIC à l'aide du programmeur. La capacité de cette mémoire est de 8K mots. Cette mémoire n'est pas reliée au bus de données (DATA Bus), elle sert à stocker le programme du PIC, mais pas les variables du programme. L'avantage de cette mémoire c'est qu'on peut l'effacer et la réécrire facilement.

Mémoire RAM :

Fait partie de la zone d'adressage des données. Elle comprend tous les registres spéciaux permettant de contrôler le cœur du PIC ainsi que ses périphériques. Les variables des programmes pourront être stockées dans des cases mémoires à usage commun.

Mémoire EEPROM :

L'EEPROM est une mémoire de stockage de données. Sur le PIC 16F877, il y a 256 octets d'EEPROM disponibles. Le nombre de cycles d'effacement / écriture sur la mémoire EEPROM est limité d'ordre du million pour le PIC, mais cette limite pourrait être atteinte plus vite pour le stockage des variables modifiées plusieurs milliers de fois par seconde.

3.5. Ports d'entrée/sortie :

Le μ c 16F877 contient les 5 ports suivants :

- Port A : 6 pin I/O numérotés de RA0 à RA5
- Port B : 8 pin I/O numérotés de RB0 à RB7
- Port C : 8 pin I/O numérotés de RC0 à RC7
- Port D : 8 pin I/O numérotés de RD0 à RD7
- Port E : 3 pins I/O numérotés de RE0 à RE2

Tous ces ports se trouvent dans la banque 0, mais tous leurs registres se trouvent dans la banque 1, pour déterminer les modes des ports (I/O), il faut sélectionner leurs Registres TRISX :

- le positionnement d'un bit à « 1 » place la pin en entrée.
- Le positionnement de ce bit à « 0 » place la pin en sortie.

Annexe 4 : Programmes du PIC (Onduleur en pont)

a. Commande de l'onduleur :

- * Il s'agit d'un code destiné à Produire le PWM pour l'onduleur(PIC16F87A)

```

int duty=50; //initialise variable
void main() {
TRISB=0x00; //set port B output
TRISC=0x00; //set port B output
PORTB=0; //initialise port B
PWM1_start(); //initialise PWM1
PWM2_start(); //initialise PWM2
PWM1_init(5000); // frequence pwm1 5khz
PWM2_init(5000); // frequence pwm2 5khz
RB3_bit=1; // switch on led indique power on
while(1){ // endless loop
RB2_bit=1; //output high pulse for square wave1 half cycle
while(duty<100){
pwm1_set_Duty(duty*2.55); //set duty cycle for pwm1 first quarter
delay_us(22);
duty+=2;
}
while(duty>50){
pwm1_set_Duty(duty*2.55); //set duty cycle for pwm1 second quarter
delay_us(22);
duty-=2;
}
pwm1_set_Duty(0); //set duty cycle for pwm1 to zero for rest of cycle
RB2_bit=0; //set low pulse for square wave1 second half cycle
delay_us(140);
RB1_bit=1; // output high pulse for square wave2
while(duty<100){
pwm2_set_Duty(duty*2.55); //set duty cycle for pwm2 third quarter
delay_us(22);
duty+=2;
}
while(duty>50){
pwm2_set_Duty(duty*2.55); //set duty cycle for pwm2 fourth quarter
delay_us(22);
duty-=2;
}
pwm2_set_Duty(0); //set duty cycle for pwm2 to zero
RB1_bit=0; //output low pulse for square wave2
delay_us(130);
}
}

```

b. Commande du convertisseur hacheur Boost :

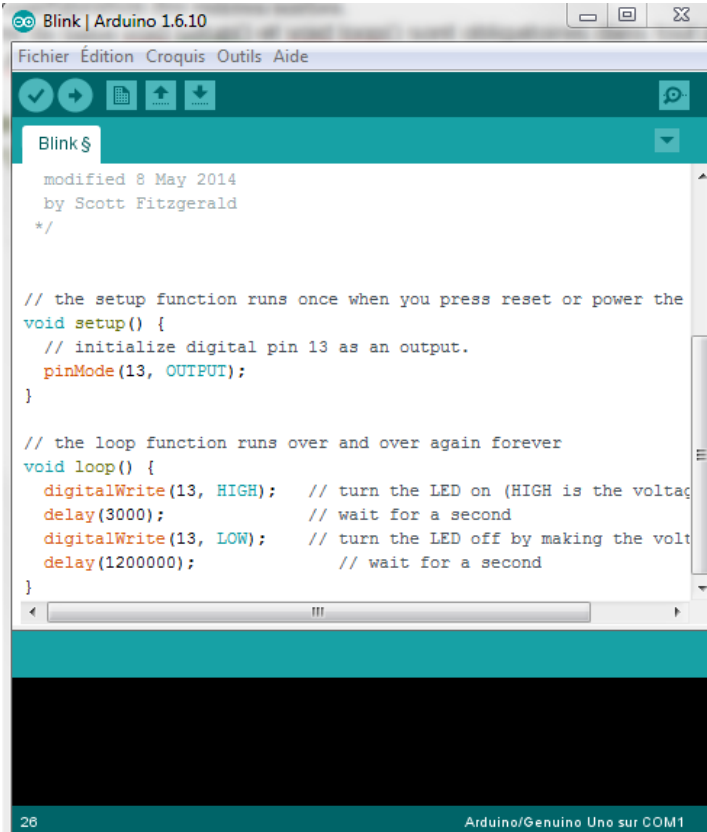
```
void main() {  
//configuration des ports  
trisa=0x0F; // mise de 4 pin du port A comme entrée  
trisb=0x00; // mie du port B comme sortie  
trisc=0x00; // mie du port C comme sortie  
trisd=0x00; // mie du port D comme sortie  
//generation des impultions a travers le port C  
while(1) { // boocle infinie  
portc.f3=1; // mise a 1 de la pin RC3(pour indiqué que le PIC est operationnel)  
portc.f1=1; // mise a 1 de la pin RC1  
delay_us(30); // la Pin C1 est mise a 1 pendant 30us  
portc.f1=0; // mise a 0 de la pin RC1  
delay_us(10); // la Pin C1 est mise a 0 pendant 10us  
}  
}
```

Annexe 5.

Programme de commande du générateur d'ozone par ARDUINO

Le programme utilisé pour commande le générateur d'ozone par l'Arduino est représenté ci dessous. Ce programme comprend les parties suivantes

- Partie 1 : le commentaire (entre /* et */) expliquant à quoi sert ce code, sa date de modification et l'auteur.
- Partie 2 : la configuration des entrées et sorties, la fonction s'exécute une seule fois lors de la mise sous tension de la carte ou lorsqu'on presse le bouton reset de la carte (bouton rouge). La fonction pinMode permet d'initialiser le pin 13 et le déclare comme sortie (celui qui sera utilisée). Le pin 13 correspond à la LED "L" sur la carte.
- Partie 3 : la fonction loop s'exécute ensuite en boucle toutes les fonctions comprises dans son accolade :
 - allume (HIGH) le générateur : `digitalWrite(13, HIGH);`
 - pendant une durée de 3000 millisecondes : `delay(1000);`
 - éteint (LOW) le générateur : `digitalWrite(13, LOW);`
 - pendant une durée de 1000 millisecondes : `delay(1200000);` '20 min = 1200000 ms'



```
Blink | Arduino 1.6.10
Fichier Édition Croquis Outils Aide
Blink $
modified 8 May 2014
by Scott Fitzgerald
*/

// the setup function runs once when you press reset or power the
void setup() {
  // initialize digital pin 13 as an output.
  pinMode(13, OUTPUT);
}

// the loop function runs over and over again forever
void loop() {
  digitalWrite(13, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage)
  delay(3000);           // wait for a second
  digitalWrite(13, LOW); // turn the LED off by making the voltage LOW
  delay(1200000);        // wait for a second
}

26 Arduino/Genuino Uno sur COM1
```


Annexe 6.**Cahier de charge et coût du circuit onduleur en pont avec transformateur**

composants	Nombre	Prix unitaire (DA)	Montant (DA)
Capacité (22nF)	8	5	40
Capacité (100nF)	8	20	160
CT60AM IGBT	4	750	3000
1N4007diode	12	20	240
Driver	4	400	1600
ARDUINO UNO	1	2000	2000
Résistance (10K)	8	20	160
Résistance (10Ω)	8	10	80
La plaque	1	500	500
Support de refroidissement	6	20	120
Régulateur	4	100	400
IRF740 MOSFET	4	100	400
Inverseur	2	300	600

❖ Cout Total = 9300 DA+ prix du transformateur

Annexe 7.**Cahier de charge et coût du circuit onduleur en pont sans transformateur**

Composants	Nombre	Pris unitaire(DA	Montant (DA)
Inductance (28mH)	1	300	30
capacité (22pfF)	4	5	20
CT60AM IGBT	1	750	750
40HFL diode	1	750	750
Driver	3	400	1200
Résistance	6	5	300
PIC	2	900	1800
Circuit imprimé	2	500	1000
Support de refroidissement	6	20	120
Bouton poussoirs	2	50	100
Quartz	2	50	100
régulateur	4	100	400
Capacité 100uF	4	20	80
Capacité	1	50	50
IRF740 Mosfet	4	100	400
Circuit imprimé	2	1000	2000
Bobine	1	500	500

Cout Total = 9870 DA