

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES

Faculté de Génie Electrique

Département d'Électrotechnique



Thèse présentée par :

NEHARI LARBI

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat en Électrotechnique

Option : Réseaux Electrique

Intitulé de la thèse :

**Etude, simulation et réalisation d'un onduleur pour
système photovoltaïque utilisé dans traitement de l'eau
et des aliments par l'ozone**

Présenté devant le jury composé de :

Dr.TILMATINE Amar	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbés)	Président
Dr.BRAHAMI Mostefa	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbés)	Directeur de thèse
Dr.FLITTI Mohamed	MCA (Université Ain Temouchent)	Examineur
Dr.KHATIR Mohamed	Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbés)	Examineur
Dr.NASSOUR Kamel	MCA (U.D.L. Sidi Bel-Abbés)	Examineur

Soutenue en : 01/2021

Laboratoire : Intelligent control And Electrical Power Systems ICEPS

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Résumé

Les données disponibles à partir de 2013 suggèrent que 17% de la population mondiale n'a pas accès à l'électricité, 95% d'entre eux vivent dans les pays suivants l'Afrique subsaharienne et l'Asie en développement, l'Afrique subsaharienne en tête avec 80 %. Ce manque d'accès à l'électricité réduit le nombre d'installations d'assainissement de l'eau et la diminution de conservation des produits alimentaires ; la population est donc constamment exposée à un risque mortel lorsqu'il s'agit de l'eau potable parce que les sources d'eau sont souvent très polluées par des germes et des bactéries.

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 au traitement d'eau et la désinfection d'une chambre de stockage d'aliments dans un site isolé. Cela augmentera la durée de conservation des produits alimentaires et donne un meilleur résultat de traitement des eaux. Des études expérimentales ont été menées sur des eaux polluées et 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 et une commande numérique par microcontrôleur et d'autre par une carte dspace réduit fortement le coût de l'installation. Le système proposé permet un stockage à long terme avec une faible consommation d'énergie et un bon résultat de traitement des eaux.

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

Abstract

Data available from 2013 onwards suggest that 17% of the world's population has no access to electricity, 95% of whom live in the following countries Sub-Saharan Africa and developing Asia, with Sub-Saharan Africa leading the way with 80%. This lack of access to electricity reduces the number of water sanitation facilities and reduces the preservation of food products; the population is therefore constantly exposed to a deadly risk when it comes to drinking water because water sources are often heavily polluted with germs and bacteria.

The objective of the thesis is to design and implement at low cost a design including a photovoltaic system supplying an ozone generator for water treatment and disinfection of a food storage room in an isolated site. This will increase the shelf life of food products and better water treatment results. Experimental studies were conducted on polluted water and several fruits and vegetables placed in an ozone treated room and another untreated room. The inverter developed with the help of usual components such as a transistor and a digital control by microcontroller and another one by a space card reduces the cost of the installation considerably. The proposed system allows long-term storage with low energy consumption and good water treatment results.

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

ملخص

تشير البيانات المتاحة منذ عام 2013 فصاعدًا إلى أن 17٪ من سكان العالم لا يحصلون على الكهرباء ، 95٪ منهم يعيشون في البلدان التالية جنوب الصحراء الكبرى في أفريقيا وآسيا النامية ، مع أفريقيا جنوب الصحراء الكبرى بنسبة 80٪. هذا النقص في الحصول على الكهرباء يقلل من عدد مرافق الصرف الصحي للمياه ويقلل من الحفاظ على المنتجات الغذائية ؛ لذلك يتعرض السكان باستمرار لخطر مميت عندما يتعلق الأمر بمياه الشرب لأن مصادر المياه غالبًا ما تكون ملوثة بشدة بالجراثيم والبكتيريا.

الهدف من الرسالة هو تصميم وتنفيذ تصميم بتكلفة منخفضة يتضمن نظامًا ضوئيًا يزود مولد الأوزون لمعالجة المياه وتطهير غرفة تخزين الطعام في موقع معزول. سيؤدي ذلك إلى زيادة العمر الافتراضي للمنتجات الغذائية وتحسين نتائج معالجة المياه. أجريت دراسات تجريبية على المياه الملوثة ووضعت العديد من الفواكه والخضروات في غرفة معالجة بالأوزون وغرفة أخرى غير معالجة. تم تطوير العاكس بمساعدة المكونات المعتادة مثل الترانزستور والتحكم الرقمي بواسطة وحدة التحكم الدقيقة والآخر بواسطة بطاقة الفضاء ، مما يقلل من تكلفة التثبيت بشكل كبير. يسمح النظام المقترح بالتخزين طويل الأمد مع استهلاك منخفض للطاقة ونتائج جيدة لمعالجة المياه.

كلمات البحث: نظام الضوئية. العاكس، تخزين الطعام، مولد الأوزون

REMERCIEMENTS



REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier Allah Tout Puissant pour toutes les merveilles qu'il fait dans ma vie et pour m'avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail. 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.

J'adresse mes sincères remerciements et toute ma reconnaissance à mon directeur de thèse, Professeur BRAHAMI Mostefa, pour son encadrement et ses bons conseils pendant ces années de travail et pour la confiance qu'il m'a témoignée en me laissant une grande liberté dans ma recherche. En plus de sa rigueur scientifique et de son intérêt pour le sujet, il m'a apporté un soutien moral considérable.

Je remercie le Professeur Amar TILMATINE de m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail et de présider le jury de ma thèse. Mes remerciements s'adressent également aux Pr Katir Mohamed, Professeur à l'université de Sidi Bel Abbès, Dr Kamel Nassour, maître de conférences à l'université de Sidi Bel Abbès, Dr Filitti Mohamed, maître de conférences à l'université de Ain Temouchent d'avoir manifesté un grand intérêt pour le sujet en acceptant d'être membres du jury.

Je suis sincèrement reconnaissant envers Dr NEMMICH Saïd et Hallouch Omar pour leur soutien.

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.

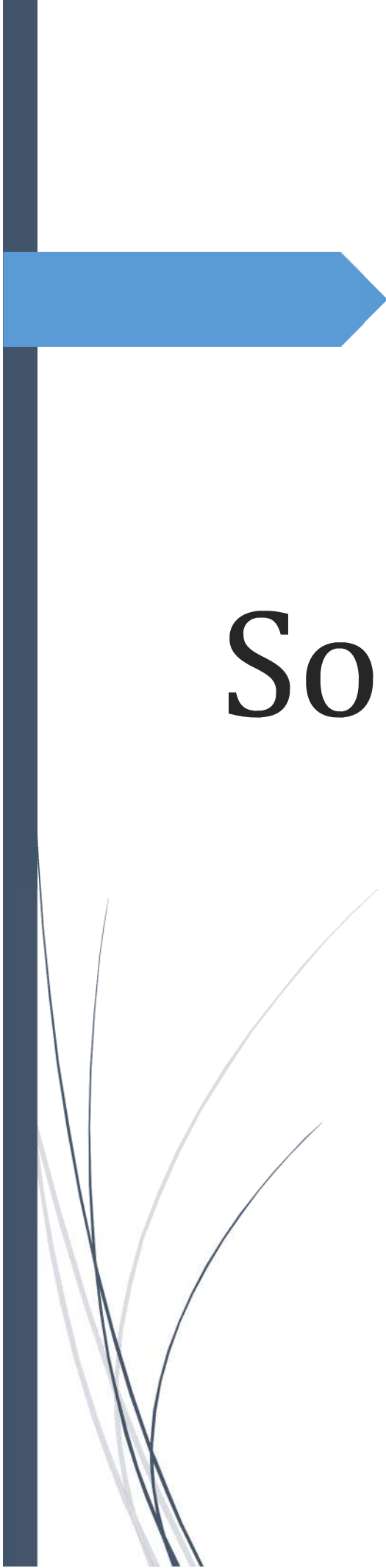
Finalement, je tiens également à remercier tous les enseignants chercheurs et les doctorants des laboratoires ICEPS, et APELEC pour leur soutien, leur disponibilité et leur sympathie.



LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

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 , → appelé l'angle solaire d'altitude minimum :
 ϕ → angle d'azimut du soleil
 β → Angle de décalage des commandes de l'onduleur

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
V_s → Tension de sortie
V_e → Tension d'entrée
 μ c → Microcontrôleur
I/O → (Input/Output) (Entrée/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_{aut} → Nombre de jours de stockage
DBD → 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

Résumé

Introduction générale

01

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

I.1.	Introduction	6
I.2.	Energie Renouvelable :	6
I.2.1.	Production D'électricité D'origine Renouvelable	6
I.2.2.	Tendance D'énergie Dans Le Monde	7
I.2.3.	Potentiel Solaire En Algerie	8
I.3.	Energie Solaire	9
I.3.1.	Rayonnement Solaire	9
I.3.2.	Spectre Du Rayonnement	10
I.3.3.	Historique De L'énergie Photovoltaïque	11
I.4.	Rappel Sur Les Propriétés Des Semi-Conducteurs	12
I.4.1.	Dopage Du Silicium	12
I.5.	Principe De Fonctionnement De La Cellule Photovoltaïque	12
I.6.	Technologie Des Cellules Photovoltaïque	13
I.6.1.	Silicium Monocristallin	13
I.6.2.	Silicium Poly-Cristallin	14
I.6.3.	Silicium Amorphe Et Cellules Organiques	14
I.6.4.	Cellules En Couches Minces A Base De CuInSe ₂	15
I.7.	Rendement D'un Panneau Photovoltaïque :	15
I.7.1.	Puissance Produite :	15
I.8.	Caractéristique Electrique D'un Module Solaire :	16
I.8.1.	Courbe Caractéristique Courant-Tension :	16
I.8.2.	Courbe Caractéristique Puissance-Tension	16
I.9.	Influence De La Temperature :	17
I.10.	Influence De L'éclairement :	18
I.11.	Regroupement Des Cellules	19
I.11.1.	Regroupement En Serie	19
I.11.2.	Regroupement En Parallele	19
I.11.3.	Regroupement (Serie Et Parallele)	20
I.12.	Système Photovoltaïque	20
I.12.1.	Différents Types De Systèmes Photovoltaïques	21
I.13.	Stockage Et Dimensionnement Des Systèmes Photovoltaïques	23
I.13.1.	Stockage De L'énergie Electrique :	23
I.13.2.	Batterie Dans Le Système Photovoltaïque :	24
I.13.3.	Durée De Vie De La Batterie	24
I.13.4.	Regulateur De Charge	24
I.14.	Conclusion	25

Chapitre II : Matériels et Méthodes

II.1.	Introduction :	26
II.2.	Matériels : Système d'énergie solaire	27
II.2.1.	Matériels : Régulateur de charge /décharge, usage et définition	27
II.2.2.	Méthode de connexion d'un régulateur de charge :	28
II.2.3.	Matériels : Système de stockage	28
II.2.3.1.	Modélisation de stockage :	32
II.2.3.2.	Différents types de batterie au plomb :	34
II.2.3.3.	Entretien des batteries :	35
II.3.	Matériels : Convertisseurs d'électronique de puissance pour systèmes PV	35
II.3.1.	Introduction :	35
II.3.2.	Origine des convertisseurs de puissance électrique	36
II.3.3.	Caractéristiques propres d'un onduleur pour systèmes photovoltaïques	36
II.3.4.	Classification	37
II.3.4.1.	Onduleurs non autonomes	37
II.3.4.2.	Onduleur autonome :	38
II.3.5.	Généralités :	39
II.3.5.1.	Différents modèles d »onduleurs : Point de vue électronique de puissance Nous distinguerons entre autres, trois types de structures.	40
II.3.5.2.	Onduleurs de tension monophasés :	40
II.3.6.	Architecture de l'onduleur :	40
II.3.6.1.	Onduleur en demi- pont :	40
II.3.6.2.	Commande symétrique	41
II.3.6.3.	Commande décalée	43
II.3.7.	Onduleur avec transformateur à point milieu [43] :	47
II.3.8.	Onduleur en pont	48
II.3.8.1.	Onduleur en pont à commande symétrique :	48
II.3.8.2.	Onduleur en pont à commande décalée :	50
II.3.8.3.	Onduleur en pont à commande MLI :	52
II.4.	Harmoniques :	53
II.4.1.	Symptômes et conséquences des harmoniques :	53
II.5.	Matériels et Méthodes : Système d'ozonation	54
II.5.1.	Générateur d'ozone :	54
II.5.1.1.	Historique sur l'ozone :	54
II.5.2.	Production d'ozone	55
II.5.3.	Inconvénients et Avantages de l'ozone	56
II.5.3.1.	Inconvénients de l'ozone	56
II.5.3.2.	Avantages de l'ozone	56
II.5.4.	Réaction de l'ozone	57
II.5.4.1.	Réaction de l'ozone avec les substances oxydables	57
II.6.	Applications De L'ozone	59
II.6.1.	Traitement des eaux	59
II.6.1.1.	Domaines d'application de traitement de l'eau par l'ozone	59
II.6.1.2.	Désinfection des eaux	59
II.6.2.	Domaine agro-alimentaire	61
II.6.3.	Domaine d'application	62
II.7.	Système de commande :	62
II.8.	Conclusion	63

CHAPITRE III : ALIMENTATION DE TRAITEMENT D'EAU PAR L'OZONE

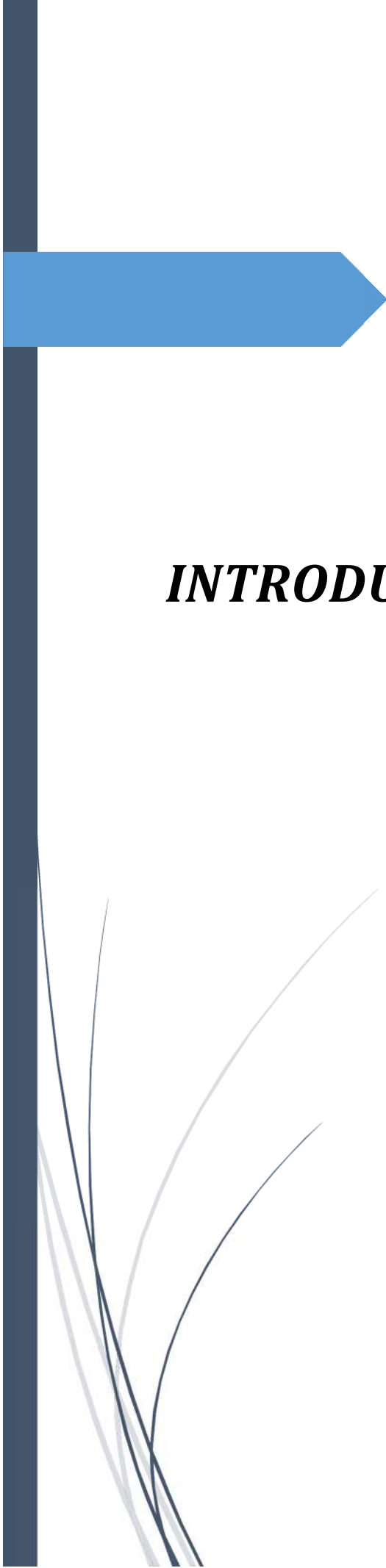
III.1.	Introduction :	64
III.2.	Description du système développé :	64
III.2.1.	Système d'énergie solaire :	65
III.2.1.1.	Description du panneau :	66
III.2.1.2.	Présentation :	66
III.2.1.3.	Principe de fonctionnement	67
III.2.1.4.	Raccordement du régulateur photovoltaïque :	67
III.2.1.5.	Raccordement de la batterie :	68
III.3.	Réalisation et raccordement de l'onduleur photovoltaïque :	69
III.3.1.	schéma Synoptique	69
III.3.2.	Description	69
III.3.3.	Description de l'onduleur proposé	70
III.3.4.	Partie commande	71
III.3.4.1.	Qu'est ce qu'un microcontrôleur	71
III.3.4.2.	Présentation générale du PIC 16F628A	72
III.3.4.3.	architecture de pic microcontrôleur	74
III.3.4.4.	Principe de génération de MLI	76
III.3.4.5.	Programmation de pic 16F628A	77
III.4.	RÉSULTAT EXPERIMENTAL	79
III.5.	PRINCIPE DE GENERATEUR D'OZONE	80
III.5.1.	MÉTHODOLOGIE DE CONCEPTION EXPÉRIMENTALE	81
III.5.2.	METHODE DE FONCTIONNEMENT DU DISPOSITIF DE TRAITEMENT D'EAU	82
III.6.	Conclusion	89

CHAPITRE IV : ÉTUDE ET REALISATION D'UNE ALIMENTATION HAUTE TENSION A HAUTE FREQUENCE POUR DBD

IV.1.	Introduction	90
IV.2.	Structure initiale de l'onduleur en pont	90
IV.2.1.	Principe de fonctionnement de l'onduleur	91
IV.2.2.	Étude des séquences de conduction	92
IV.2.3.	Étude du fonctionnement	94
IV.3.	Réalisation de l'alimentation électrique pour DBD à base du DSPICE 1104	95
IV.3.1.	Conception du banc d'essai : Description de l'onduleur	95
IV.3.2.	Bloc gérant l'étage de puissance (onduleur)	95
IV.3.3.	Bloc gérant la commande	96
IV.4.	Présentation de la carte Dspace	97
IV.4.1.	Composition de la carte DS 1104	99
IV.4.2.	Application techniques de commande symétrique	99
IV.5.	Utilisation de l'alimentation sinusoïdale et résultats obtenus	100
IV.5.1.	Présentation du générateur d'ozone à DBD surfacique utilisé :	102
IV.6.	ETUDE EXPERIMENTALE SUR LE GENERATEUR D'OZONE	104
IV.6.1.	Influence de la fréquence sur la tension de sortie en fonction de la tension d'entrée de l'onduleur :	104
IV.6.2.	Influence de la fréquence sur la concentration d'ozone en fonction de la tension d'entrée de l'onduleur :	105
IV.6.3.	Influence de la fréquence sur la concentration d'ozone ($U_e = 24V$) :	106

IV.6.4.	Relevé de la puissance en une journée	106
IV.6.5.	Présentation du système de traitement d'air	107
IV.7.	APPLICATION D'UN SYSTEME DE GENERATION D'OZONE POUR LA CONSERVATION DES ALIMENTS	108
IV.7.1.	Généralités	108
IV.7.2.	Réalisation d'un système automatique de déclenchement du générateur d'ozone	108
IV.7.3.	Simulation du système de commande du générateur DBD :	109
IV.7.4.	Principe de fonctionnement du système de commande réalisé	110
IV.8.	Résultats et discussions :	111
IV.9.	Conclusion	114
Conclusion générale		115

Référence Bibliographique



INTRODUCTION GENERALE

L'obstacle est matière à action. Marc Aurèle

INTRODUCTION GENERALE

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. 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. 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 négatif 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 importants car ces éléments fossiles sont amenés à disparaître et ne peuvent se renouveler avant des millions d'années.

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. 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.

Les énergies renouvelables 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 la 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), 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.

Les résultats de recherche relatifs aux dispositifs plasma à décharge à barrière diélectrique (DBD) et leur développement dans l'industrie en particulier, comme les écrans plasma, traitement des eaux, les ont rendus populaires ; pourtant les premières expériences sur ce type particulier de décharges datent de plus d'un siècle avec les travaux de Siemens.

L'eau non traitée ou polluée est responsable de maladies graves chez l'homme, bien souvent mortelles dans les pays en voie de développement. L'eau véhicule des virus, des bactéries, des parasites, des micro-organismes végétaux ou animaux, qui peuvent provoquer des maladies graves, voire mortelles pour l'être humain. Ces maladies liées à l'eau insalubre sont appelées maladies hydriques. L'eau polluée constitue pour les agriculteurs une source sûre et riche en nutriments, ce qui leur permet de pallier au coût des engrais et à l'irrigation, cela malgré les inconvénients que représente cette pratique dont les plus graves sont relatifs aux risques pour la santé humaine (liés aux germes pathogènes, aux métaux lourds et aux produits chimiques contenus dans ces eaux).

Les systèmes utilisés pour traiter l'eau aujourd'hui dans nos stations d'épuration présentent plusieurs aspects négatifs. Par exemple, l'utilisation du chlore n'est pas optimale. Ce désinfectant puissant laisse des traces non négligeables car il reste présent dans l'eau une fois traitée et a des impacts négatifs sur la faune et la flore aquatique, sur l'eau que nous consommons... Une eau pure met l'accent aujourd'hui sur le traitement de l'eau par l'ozone

ou système d'ozonation. Une technique encore peu répandue de par les coûts qu'elle engendre mais qui présente des avantages non négligeables sur notre environnement ainsi que sur la qualité de l'eau provenant du réseau public.

Par ailleurs, ces ménages sont confrontés au problème du stockage des fruits et légumes et de traitement des eaux dans les sites isolés. 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. 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, prévention de la décomposition fongique destruction de pesticides et de résidus de produits chimiques ainsi que le contrôle de l'entreposage ravageurs.

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, 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 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, il est décrit un système solaire photovoltaïque alimentant un générateur d'ozone utilisé à travers un convertisseur statique ce qu'on appelle onduleur pour le traitement de l'eau et le stockage des fruits et des légumes. 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 et aussi le traitement des eaux .

La charge étant alimentée 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 l'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.

Le travail de 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 et d'un système de traitement d'eau. 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.

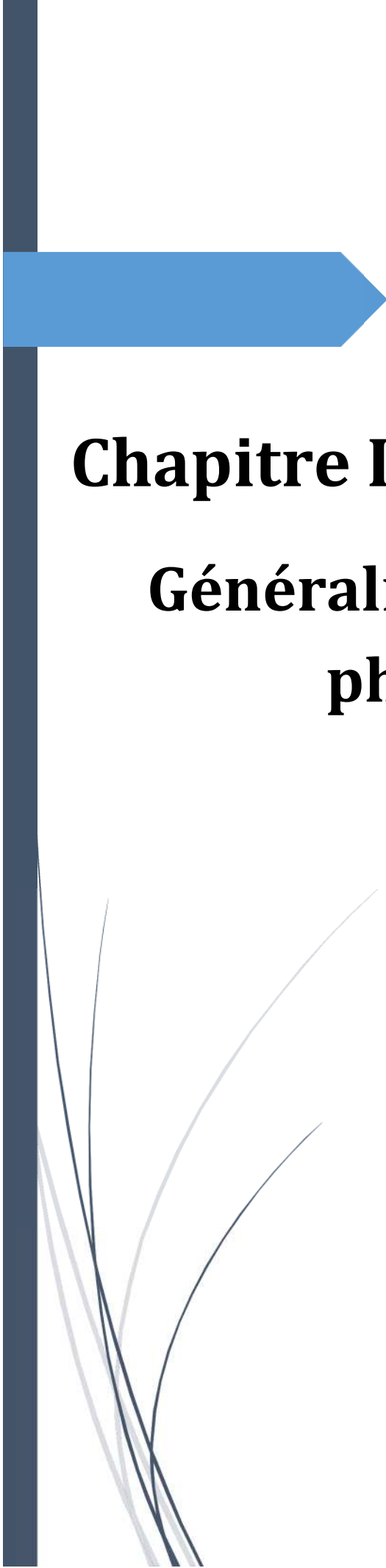
Ce chapitre ouvre les volets sur l'énergie solaire comme une opportunité majeure dans la mise en œuvre de la production énergétique. Une étude de la source photovoltaïque, ses caractéristiques et les techniques de son utilisation sont catalogués.

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 différent parties.

Le Troisième Chapitre est consacré à la réalisation d'un onduleur en demi-pont commandé par un microcontrôleur pour convertir la tension continu à une tension alternatif pour traitement d'eau par ozonation.

Le Quatrième Chapitre intitulé « Etude et réalisation d'une alimentation haute tension à haute fréquence pour DBD », 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. Par la suite nous dévoilons la réalisation économique du convertisseur continu 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 I

Généralités sur la conversion photovoltaïque

Chapitre I : GENERALITES SUR LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

I.1. Introduction

L'énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface de la terre, malgré une diminution importante à la traversée de l'atmosphère ; la quantité qui arrive au sol reste assez importante. On peut ainsi compter sur 1000 W/m^2 crête dans les zones tempérées et jusqu' à 1400 W/m^2 lorsque l'atmosphère est faiblement polluée.

On peut utiliser cette énergie gratuite grâce à une technologie appelée photovoltaïque, qui transforme l'énergie solaire en électricité à travers des modules photovoltaïques constitués de cellules solaires.

Malgré le progrès technologique, l'inconvénient de cette énergie réside dans le faible rendement et le coût d'installation élevé par rapport aux autres formes d'énergies.

Ce chapitre présente les concepts dont la connaissance est nécessaire à la compréhension du fonctionnement des cellules photovoltaïques.

I.2. Energie renouvelable :

I.2.1. Production d'électricité d'origine renouvelable

La production d'électricité renouvelable a atteint 20,8% de la production d'électricité mondiale en 2012 (4699,2 TWh). Les combustibles fossiles restent les plus utilisés pour la production de l'électricité mondiale (68,1%) comme la montre la figure I.1 [1].

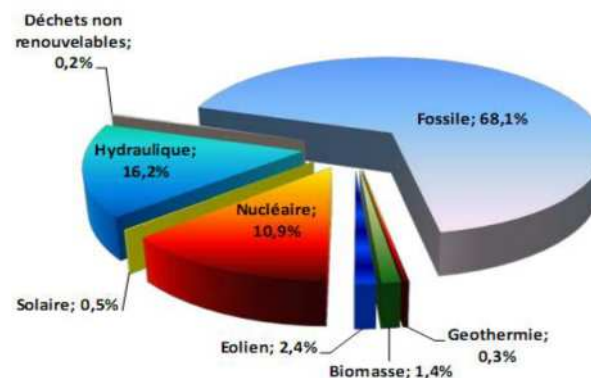


Figure I.1 : Structure de la production d'électricité dans le monde en 2012 (Source: Observ'ER, 2013) [1]

Les sources qui représentent les énergies renouvelables sont : l'hydroélectricité qui contribue de 78% en 2012, l'énergie éolienne (11,4%), la biomasse (6,9%), le solaire (2,2%), la géothermie (1,5%) et les énergies marines (0,01%), voir figure I.2 [1].

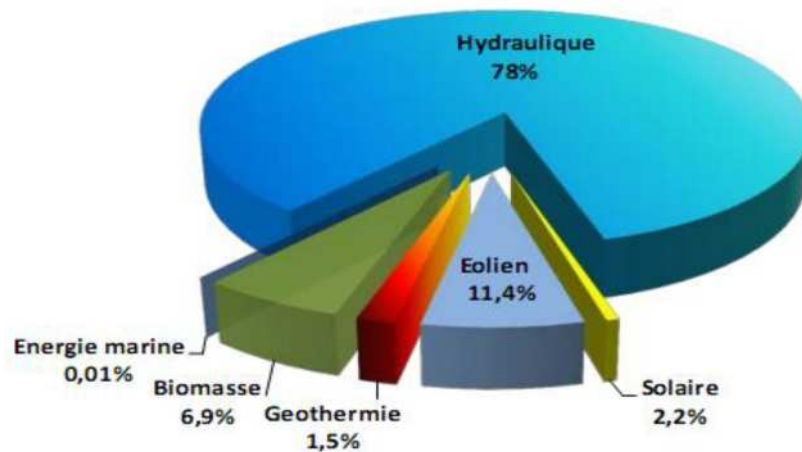


Figure I.2 : Structure de la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde en 2012

(Source : Observ'ER, 2013) [1]

I.2.2. Tendence d'énergie dans le monde

Les énergies d'origine fossile sont menacées d'épuisement à court ou moyen terme. Il est donc indispensable de mettre en place des mesures d'économie, de récupération, et de recyclage pour remédier à ce problème. Plusieurs estimations des stocks et d'épuisement d'énergie existent voir figure I.3 [1].

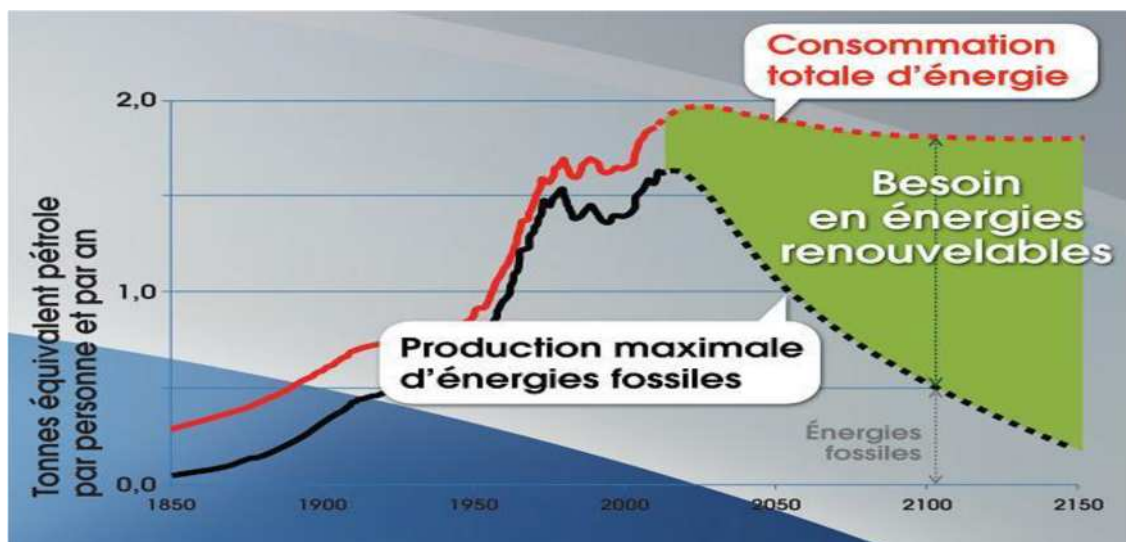


Figure I.3: Prévisions des besoins en énergies renouvelables jusqu'au 2150 (Source Aspo)[1]

La figure I.3 montre la production d'énergies fossiles par habitant et par année et la consommation d'énergie totale (fossiles + renouvelables). On remarque bien que la courbe représente la production rapportée à la population mondiale.

I.2.3. Potentiel solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays, voir tableau 1.1 et figure I.4 [2].

Tableau 1.1: Potentiel solaire des principales régions en Algérie [2].

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

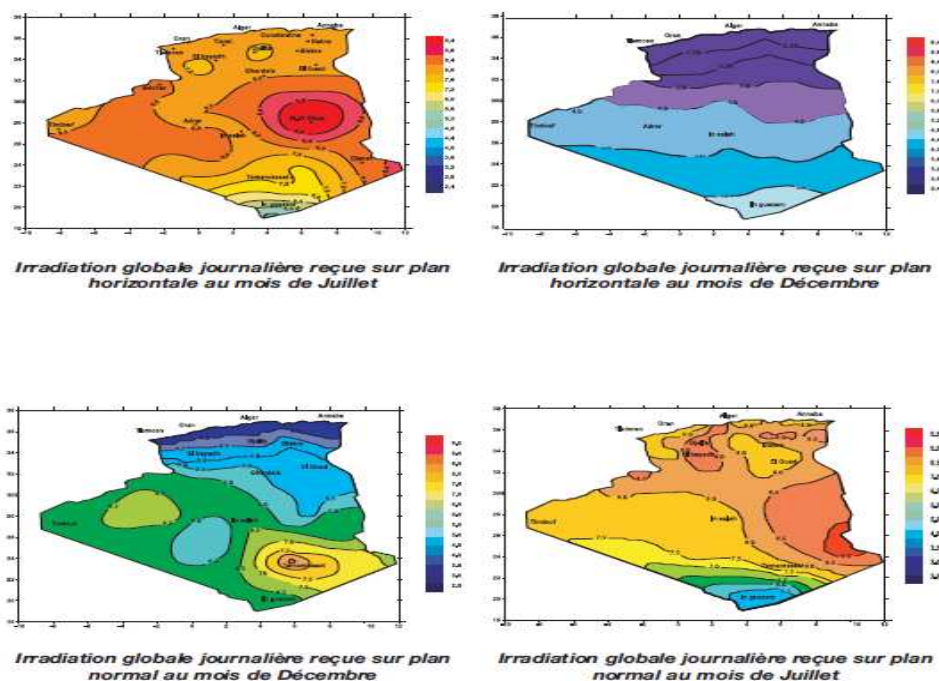


Figure I.4 : Potentiel solaire en Algérie [2].

I.3. Energie solaire :

I.3.1. Rayonnement solaire

Afin de quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol. En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature

Rayonnement direct :

La conversion du rayonnement direct E_D est une question trigonométrique. Le rayonnement direct, sur le plan horizontal, est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus [3].

Rayonnement diffus :

Il est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols [3].

Rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol :

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....) [3].

Rayonnement global :

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnement direct, diffus et réfléchi par le sol. Dans la figure (1.5) est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçus sur une surface terrestre [3].

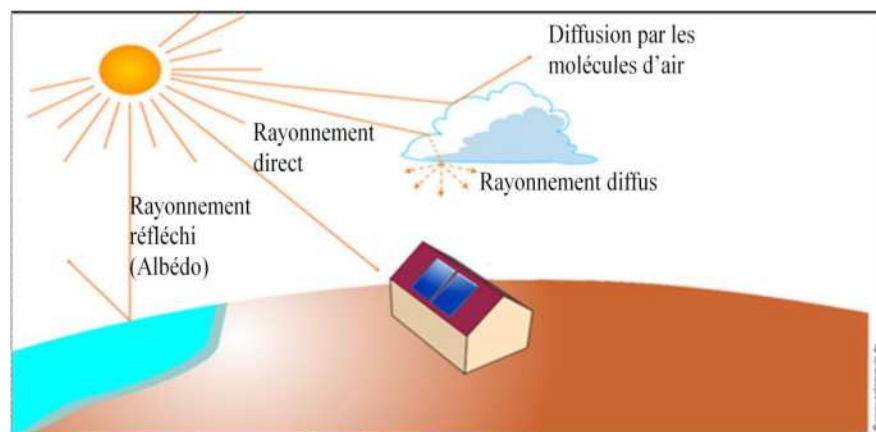


Figure 1.5 : Types de rayonnement solaire reçus au sol [3].

L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné est appelée irradiation ou éclairement (noté généralement par la lettre G), il s'exprime en watts par mètre carré (W/m^2). La valeur du rayonnement reçu par la surface du module photovoltaïque varie selon la position de ce dernier. Le rayonnement solaire atteint son intensité maximale lorsque le plan du module photovoltaïque est perpendiculaire aux rayons [3] :

Dans la figure (I.7) est illustré l'effet de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur l'intensité de l'éclairement reçu sur leurs surfaces du lever au coucher du soleil.

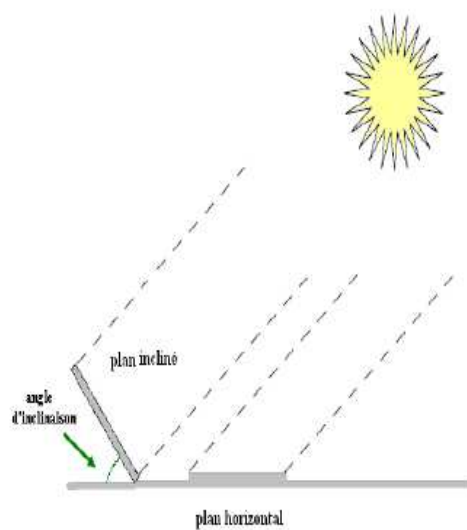


Figure I.6 : Rayonnement solaire capté par un plan horizontal et incliné [3].

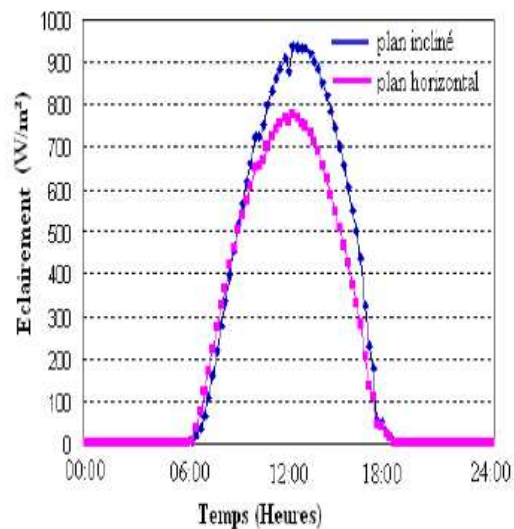


Figure I.7 : Intensité de l'ensoleillement reçu sur un plan horizontal et un plan incliné [3].

I.3.2. Spectre du rayonnement

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde, elle est donnée par la formule 1.1 :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{I. 1})$$

Où

E (J) énergie,

h (J.s) constante de Planck (= $6,62 \cdot 10^{-34}$),

c (m.s^{-1}) vitesse de la lumière ($C = 3 \cdot 10^8$),

λ (m) longueur d'onde (souvent exprimée en micromètre),

ν (Hz) fréquence.

La figure (I.8) représente la variation de la répartition spectrale énergétique. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement en [3] :

Ultraviolet UV $0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$ représente 6.4%.

Visible $0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$ représente 48.0%.

Infrarouge IR $0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$ représente 45.6%

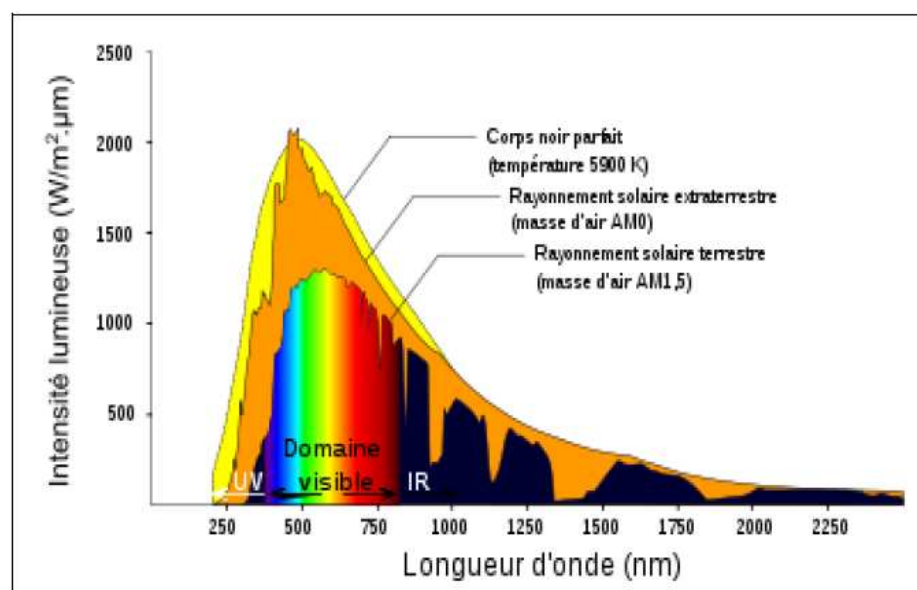


Figure I.8 : Analyse spectrale du rayonnement solaire [3].

I.3.3. Historique de l'énergie photovoltaïque

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide : C'est l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la seconde guerre mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie [4].

I.4. Rappel sur les propriétés des Semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont des matériaux présentant une conductivité électrique intermédiaire entre les métaux et les isolants. Les semi-conducteurs sont primordiaux en électronique, car ils offrent la possibilité de contrôler, par divers moyens, aussi bien la quantité de courant électrique susceptible de les traverser que la direction que peut prendre ce courant [5].

Dans un semi-conducteur, un courant électrique est favorisé par deux types de porteurs : les électrons et les trous.

La propagation par l'intermédiaire d'électrons est similaire à celle d'un conducteur classique : des atomes fortement ionisés passent leurs électrons en excès le long du conducteur d'un atome à un autre, depuis une zone ionisée négativement à une autre moins négativement ionisée [5].

La propagation par l'intermédiaire de trous est différente : ici, les charges électriques voyagent d'une zone ionisée positivement à une autre ionisée moins positivement par le mouvement d'un trou créé par l'absence d'un électron dans une structure électrique quasi pleine [5].

I.4.1. Dopage du silicium

Les atomes de Si ont quatre électrons de valence, chacun étant lié à un atome Si voisin par une liaison covalente.

Dopage de type N : Si un atome ayant cinq électrons de valence (le phosphore (P), l'arsenic (As) ou l'antimoine (Sb)) est incorporé dans le réseau cristallin, alors cet atome présentera quatre liaisons covalentes et un électron libre. Cet électron faiblement lié à l'atome peut être facilement excité vers la bande de conduction. Dans ce genre de matériau, le nombre d'électrons dépasse le nombre de trous [5].

Dopage de type P : Si un atome trivalent (bore (Br)) est substitué à un atome de silicium dans le réseau cristallin, alors il manquera un électron pour l'une des quatre liaisons covalentes des atomes de silicium adjacents et l'atome trivalent peut accepter un électron pour compléter cette quatrième liaison, formant ainsi un trou. Quand le dopage est suffisant, le nombre de trous dépasse le nombre d'électrons [5].

I.5. Principe de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque (PV), aussi appelée photopile, est la juxtaposition de deux semi-conducteurs, l'un dopé P et l'autre dopé N. À la jonction des deux couches se forme un champ électrique (résultant du phénomène décrit précédemment). Ce champ électrique existe même si la cellule est dans l'obscurité. Sous un ensoleillement plus ou moins important, les photons ou grains de lumière, venant avec une énergie suffisante entrent en collision avec les atomes du Crystal (Figure I.9). Ils parviennent à faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur, créant ainsi des paires d'électrons-trous. Ceux-ci, sous l'effet de la barrière de potentiel, vont s'accumuler sur chacune des faces extérieures des zones P et N [5].

Ainsi, une différence de potentiel entre les deux faces de la cellule est créée (Figure I.10). Les grilles métalliques à l'avant et à l'arrière de la cellule PV collectent les électrons et les trous qui vont donc fournir à un circuit extérieur le courant électrique produit. Si le photon est très énergétique, il ne peut tout de même extraire qu'un seul électron. L'énergie excédentaire est perdue en chaleur [5].

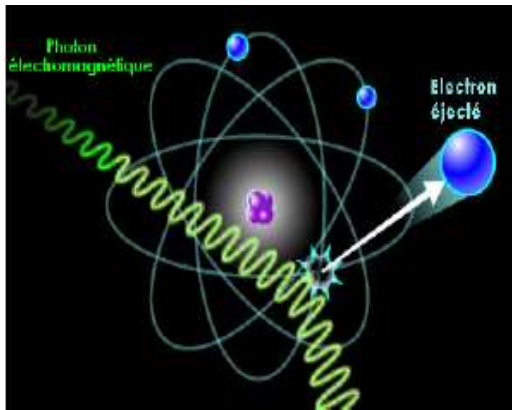


Figure I.9 : Collision entre un photon et un atome

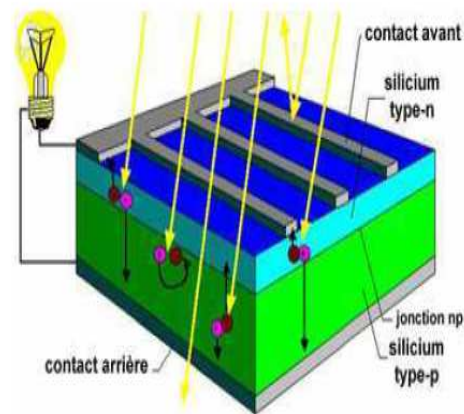


Figure I.10 : Cellule photovoltaïque

I.6. Technologie des cellules photovoltaïque

La filière silicium se répartit en 3 grandes catégories [6] :

1. Filière monocristalline
2. Filière poly-cristalline
3. Silicium amorphe

I.6.1. Silicium monocristallin

Les cellules monocristallines présentent un aspect parfaitement homogène de couleur grise sombre. La structure homogène, ne présente pas de joints de grains et correspond à la structure cristalline parfaitement ordonnée susceptible d'assurer un rendement optimum. L'obtention du Silicium se fait par tirage d'un lingot de monocristallin, ce qui lui confère des bords arrondis dont la couleur grise sombre offre un aspect visuel tout à fait reconnaissable. La différence réside essentiellement dans l'obtention du silicium brut. Le monocristallin présente un rendement énergétique élevé de l'ordre de 20%, proche du maximum théorique qui est de 30%, voir Figure I.11 [6].

I.6.2. Silicium poly-cristallin

Pour fabriquer une cellule, il n'est pas nécessaire d'avoir un silicium aussi pur et ordonné que le monocristallin. Dans le cas du Silicium poly-cristallin l'élaboration n'est pas aussi poussée car, au lieu d'effectuer un tirage de monocristallin, le silicium est versé

dans un moule où il va se refroidir et se solidifier en prenant la forme du moule. La cristallisation s'effectue alors en de nombreux cristaux qui sont visibles même après la fin du façonnage de la cellule, la Figure I.12 représente la cellule poly-cristalline.

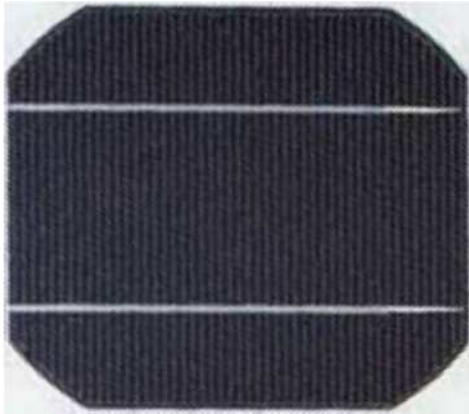


Figure I.11 : Silicium monocristallin

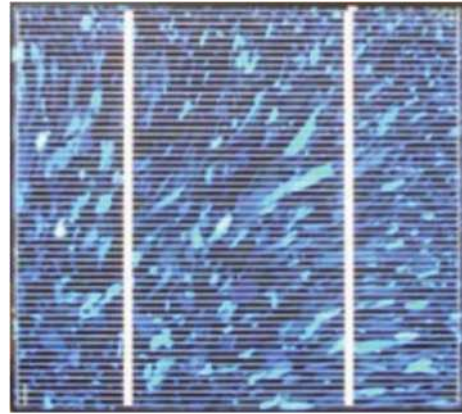


Figure I.12 : Silicium poly-cristallin

On atteint des rendements de conversion moyens ($\eta = 16\%$). La baisse de rendement photovoltaïque liée à ces imperfections se trouve en partie compensée par le meilleur remplissage sur la surface du panneau, puisque les cellules sont géométriquement à angles droit, contrairement aux cellules «mono» [6].

I.6.3. Silicium amorphe et cellules organiques

Dans les années 80, les chercheurs de l'IBM Thomas J. Watson Research Center pensaient que les rendements énergétiques sur des OPV ne pourraient jamais dépasser les 1%. Cependant, à partir de 2000, les rendements ont commencé à augmenter pour atteindre aujourd'hui les 6%. Des nouveaux moyens de modélisation des molécules et des grains permettent d'envisager à moyen terme un rendement η supérieur à 10% [6].

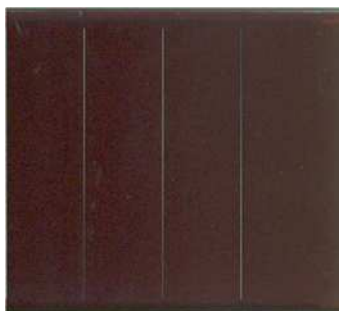


Figure I.13 : Cellules en silicium amorphe

I.6.4. Cellules en couches minces à base de $CuInSe_2$

Ces dernières années ont vu la venue de cellules photovoltaïques d'un nouveau type basées sur des matériaux autres que le silicium. Les cellules au CIGS, contrairement aux modèles classiques solaires au silicium, sont du type << hétéro-jonction >>, c'est-à-dire que les régions P et N sont constituées de matériaux différents. Elles sont connues sous diverses appellations telles que le di séléniure de cuivre/indium ($CuInSe_2$) plus communément baptise <<CIS>>. Diverses combinaisons sont aussi possibles : avec du Gallium on obtient une CIGS. On utilise également le Cadmium, le Soufre ainsi que le tellure de cadmium, CdTe. En laboratoire, les rendements de conversion rapportés de ces cellules sont de l'ordre 19,5% pour le CIGS et de 16,5% pour le CdTe. Les modules fabriqués industriellement atteignent des rendements de 11 à 13% pour le CIGS et d'environ 9% pour le CdTe [6].

I.7. Rendement d'un panneau photovoltaïque :

I.7.1. Puissance produite :

Le rendement d'un panneau solaire photovoltaïque dépend des technologies utilisées lors de sa fabrication. Les différents types de cellules PV existants sont :

- ✓ Cellule en silicium amorphe (rendement : 6 à 10%)
- ✓ Cellule en silicium monocristallin (rendement : 13 à 17%)
- ✓ Cellule en silicium poly cristallin (rendement : 11 à 15%)
- ✓ Cellule en matériaux organiques (rendement : 3.6%)

Chacune de ces technologies présente des avantages et des inconvénients. En particulier, le rendement, qui est généralement le critère de choix, dépend des conditions climatiques du lieu d'installation (dans les régions caractérisées par des températures élevées, les systèmes au silicium amorphe sont préférés à ceux au mono ou poly cristallin) [10].

Pour un panneau PV, le rendement, R exprimé en pourcent :

$$R = \frac{PEP}{PSR} \quad (I.3)$$

PEP : puissance électrique produite par le panneau PV.

PSR : puissance solaire reçue.

I.8. Caractéristique électrique d'un module solaire :

I.8.1. Courbe caractéristique courant-tension :

La courbe caractéristique d'une cellule photovoltaïque représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule photovoltaïque depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule), qui montré dans la Figure I.14 [7].

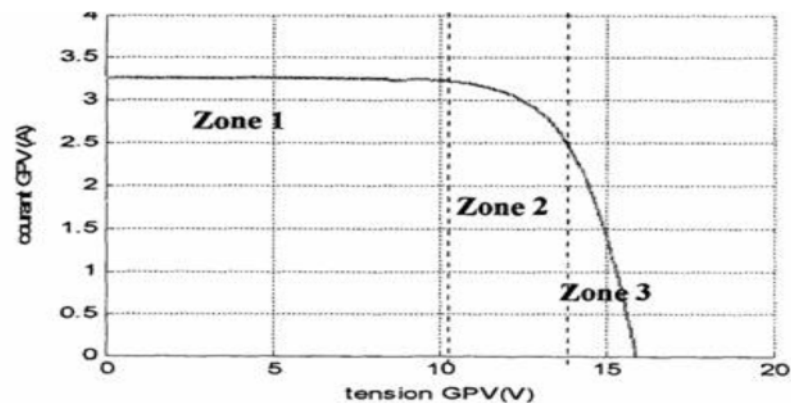


Figure I.14: Courbe caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque [7].

Zone 1 : le GPV est un générateur de courant (le courant est constant).

Zone 2 : c'est la zone de travail du GPV (puissance maximale).

Zone 3 : le GPV est un générateur de tension (la tension est presque constante).

I.8.2. Courbe caractéristique puissance-tension

Nous pouvons aussi représenter la caractéristique puissance-tension qui nous permet de bien voir l'emplacement de la puissance maximale du panneau solaire. Cette dernière ne pourra être qu'un seul point de fonctionnement, comme montré dans la Figure I.15 [7].

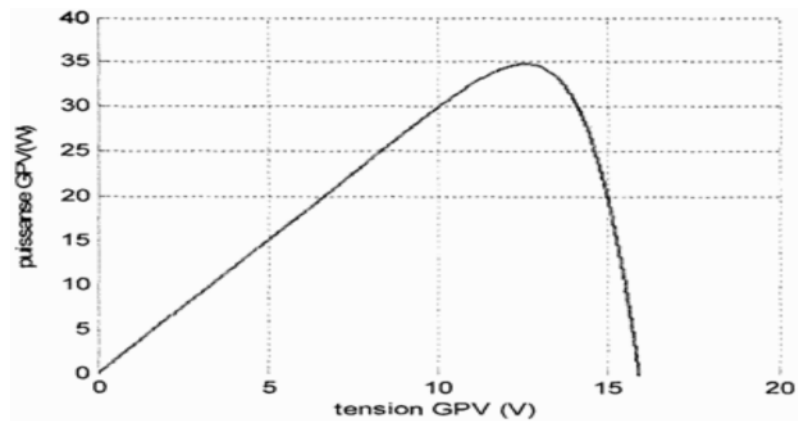


Figure I.15: Courbe caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque

I.9. Influence de la température :

L'équation de Boltzmann donne : $I_{sc} = I_0 \cdot \exp\left(\frac{q \cdot V_o}{kT}\right)$, l'expérience montre que la tension de circuit ouvert d'une cellule solaire diminue avec l'augmentation de la température de la cellule [13,14].

Nous présentons ci-dessous les caractéristiques I-V et P-V (Figure I.16 et I.17) d'un module photovoltaïque pour un niveau d'ensoleillement G donné et pour différentes températures :

Pour la figure (I.16) nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente. On constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente figure (I.17).

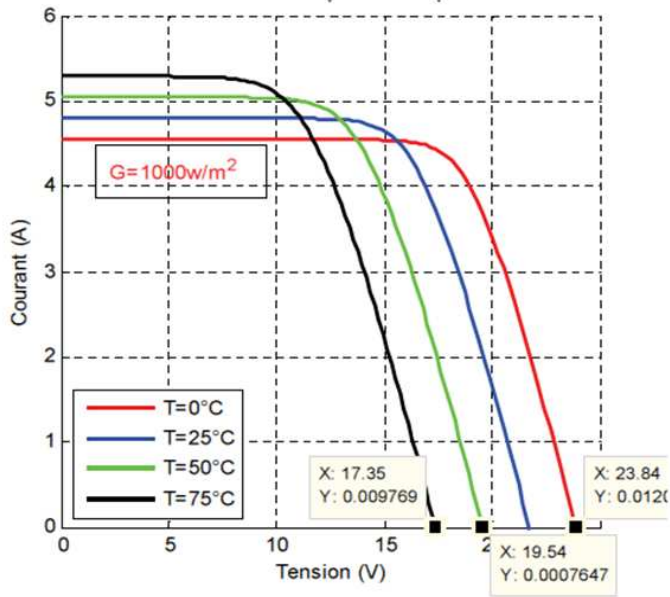


Figure I.16 : Caractéristique de $I=f(V)$ en fonction de température

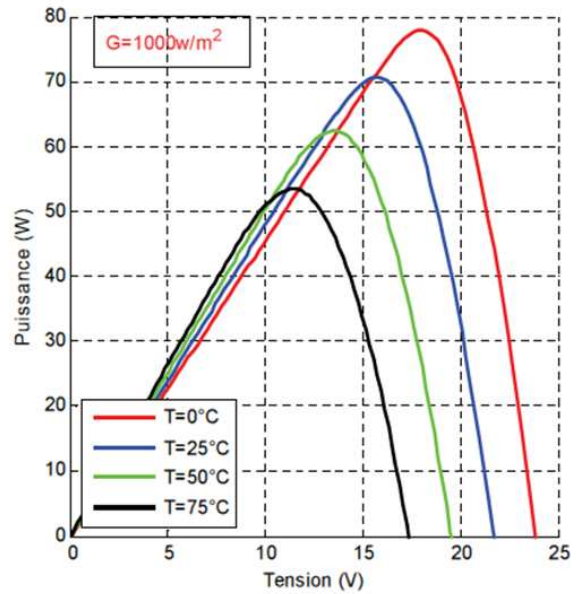


Figure I.17 : Caractéristique de $P=f(V)$ en fonction de température

I.10. Influence de l'éclairement :

Le même travail comme précédente, nous avons fixé la température pour différents éclairements figure (I.18 et I.19).

Pour la figure (I.18) on remarque que pour l'éclairement $G=1000 \text{ W/m}^2$ le courant $I_{sc}=4.8\text{A}$, et pour $G=800 \text{ W/m}^2$ le courant $I_{sc}=3.84\text{A}$. On peut voir que le courant subit une variation importante, quand l'éclairement augmente le courant de court-circuit est augmenté, mais par contre la tension varie légèrement. Cela se traduit par une augmentation de la puissance, lorsque l'éclairement est augmenté figure (I.19).

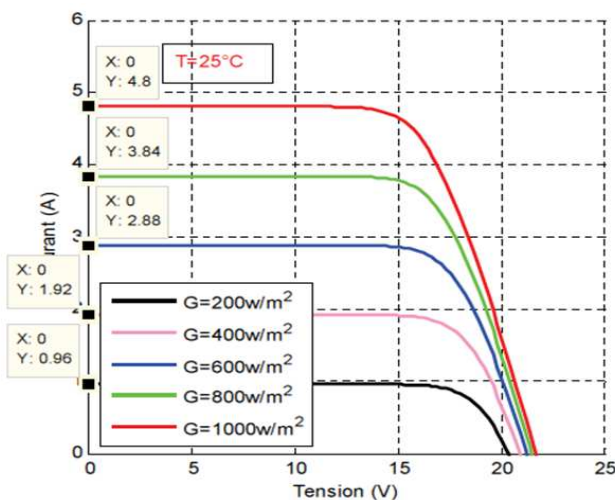


Figure I.18 : Caractéristique $I=f(v)$ en fonction de l'éclairement

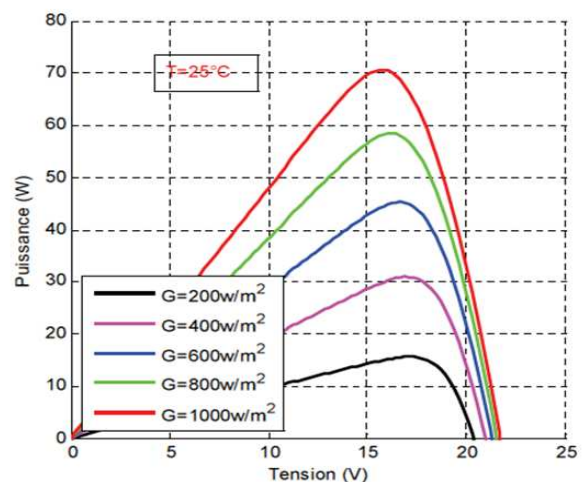


Figure I.19 : Caractéristique $P=f(V)$ en fonction de l'éclairement

I.11. Regroupement des cellules

I.11.1. Regroupement en série

Une association de (N_s) cellule en série figure (1.20) 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 (1.5) résume les caractéristique électriques d'une association série de (N_s) cellules [9].

$$V_{CONS} = N_s \times V_{co} \quad (I.5)$$

$$I_{CCNS} = I_{cc} \quad (I.6)$$

V_{CONS} : somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.

I_{CCNS} : courant de court-circuit de N_s cellules en série.

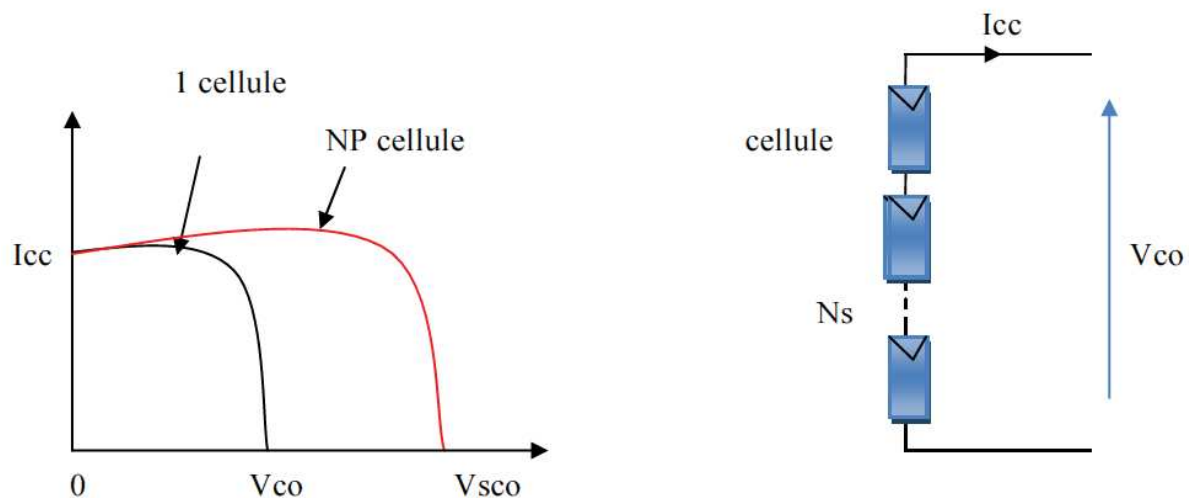


Figure I.20 : Caractéristique courant tension de N_s cellule en série

I.11.2. Regroupement en parallèle

Une association parallèle de (NP) cellule figure (I.21) 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 [12].

Avec :

$$I_{ccNP} = NP \times I_{sc} \quad (I.7)$$

$$V_{coNP} = V_{co} \quad (I.8)$$

I_{ccNP} : Somme des courants de court circuit de (NP) cellule en parallèle

V_{coNP} : Tension du circuit ouvert de (NP) cellules en parallèle

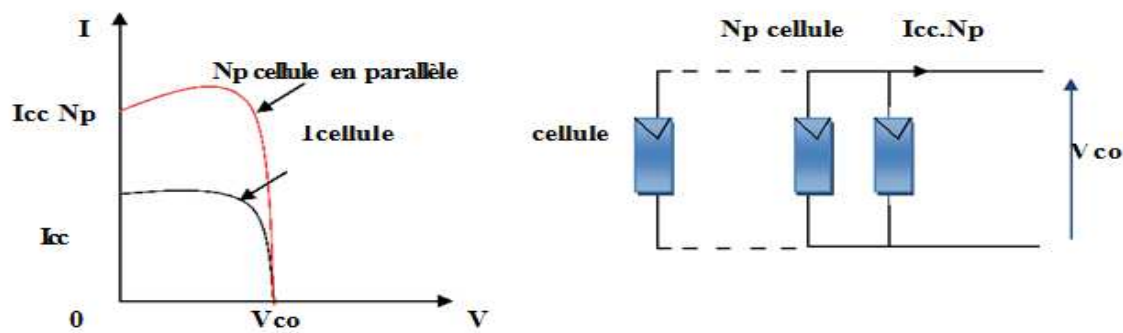


Figure I.21 : Caractéristique courant tension de (Np) cellule en parallèle

I.11.3. Regroupement (série et parallèle)

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule.

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

I.12. Système photovoltaïque

Un système photovoltaïque comporte plusieurs parties, il se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs (charge, injection dans le réseau) voire la Figure I.22. Cet ensemble, appelé aussi "Balance of System" ou BOS, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale [9].

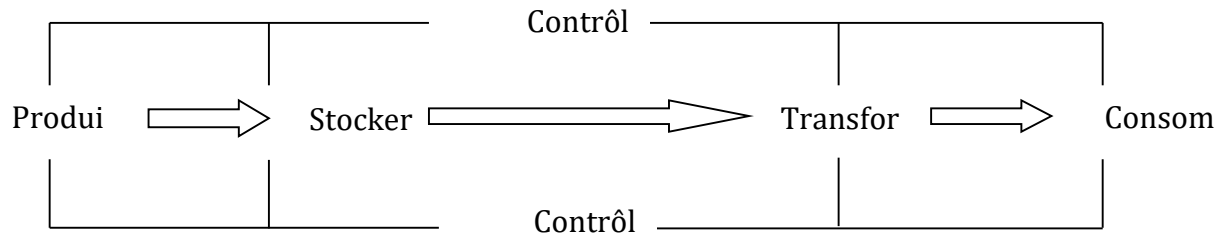


Figure I.22 : Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque [9].

I.12.1. Différents types de systèmes photovoltaïques

A. Système PV autonome

Autonomes ou « stand-alone », ces installations isolées ne sont pas connectées au réseau, mais elles doivent assurer la couverture de la demande de la charge en tout temps (Figure I.23). La puissance à la sortie du générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de charge. Aussi, l'autonomie du système est assurée par un système de stockage d'énergie. En général ces installations comprennent quatre éléments [9] :

- Un ou plusieurs modules PV.
- Le système de régulation.
- Une ou plusieurs batteries.
- L'onduleur.

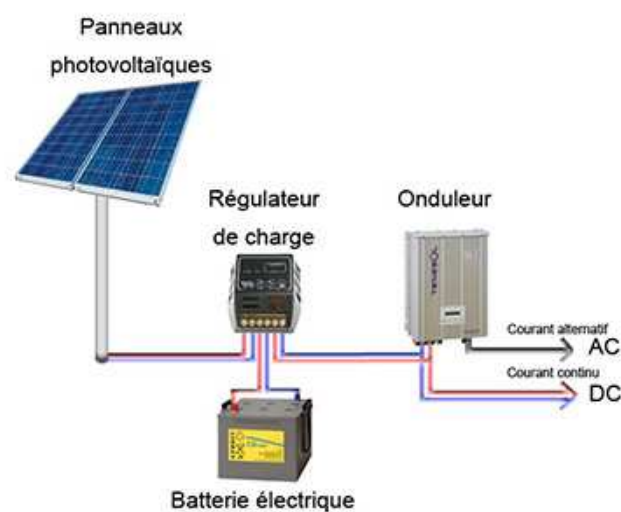


Figure I.23 : Installation photovoltaïque autonome [9].

B. Système PV connecté directement au réseau

Les systèmes photovoltaïques connectés à un réseau permettent la décentralisation de la production sur ce réseau électrique (Figure I.24). L'énergie est produite plus près des lieux de consommation et non pas seulement par de grandes centrales nucléaires, thermiques ou hydroélectriques. Au fil du temps, les systèmes PV connectés à un réseau réduiront la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution en ayant besoin d'acheminer uniquement son excédent d'énergie vers les zones en manque de production.

Cette mise en commun des productions permet aussi un sous-dimensionnement des équipements de production complémentaire. Ces transferts éliminent la nécessité d'acheter et d'entretenir une batterie d'accumulateurs. Il est toujours possible d'utiliser ceux-ci pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau [9].

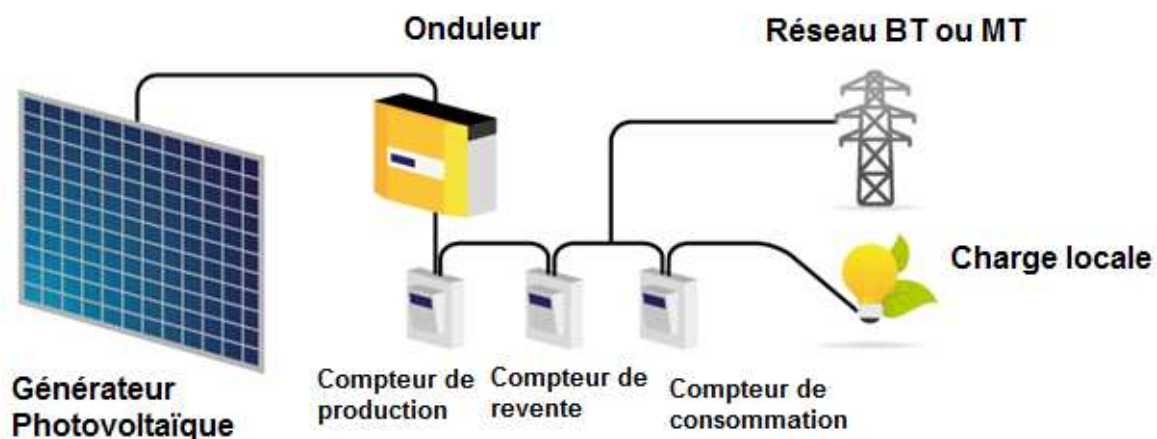


Figure I.24 : Installation photovoltaïque connectée directement au réseau [9].

C. Système hybride :

Une des limites d'un système autonome purement photovoltaïque (Figure I.25), comme on vient de le décrire est qu'il fournit une puissance donnée variable selon la saison mais que l'on ne peut pas dépasser au risque de détruire la batterie ; or les consommateurs ont des besoins qui évoluent, et pas forcément en phase avec les saisons [8].

Avoir un système hybride, c'est disposer d'une autre source d'électricité qui vient compléter l'apport photovoltaïque. Cette autre source peut être un groupe électrogène (appelé aussi génératrice). De tels systèmes ont habituellement des accumulateurs de stockage d'énergie et donc ils permettent en outre de recharger la batterie lorsqu'elle est faible. Un tel système photovoltaïque hybride fournit une grande fiabilité du système et peut représenter la solution adéquate pour les sites isolés. Il convient aussi lorsque la demande en énergie est élevée (pendant l'hiver ou tout le long de l'année) [8].

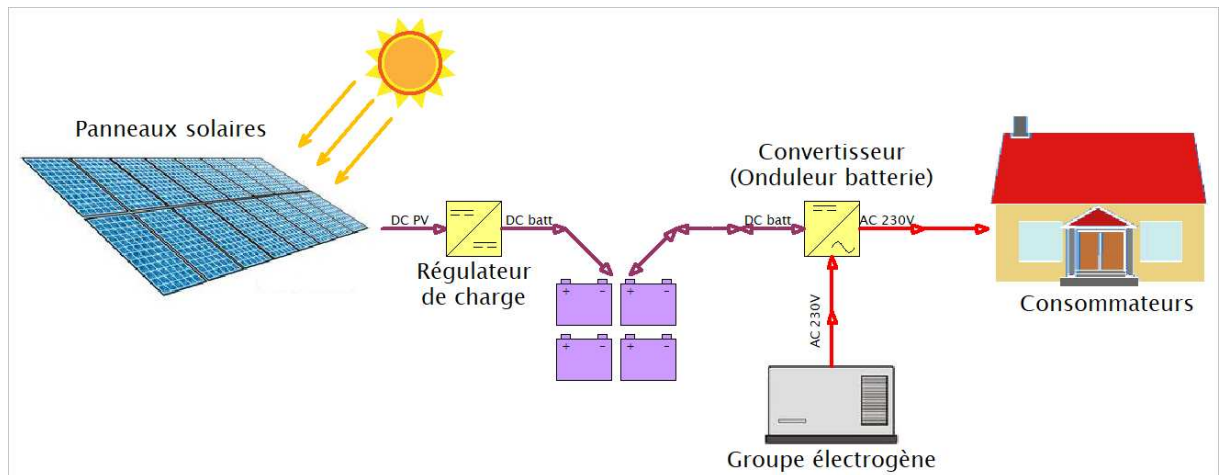


Figure I.25 : Système d'alimentation autonome hybride photovoltaïque / groupe électrogène [8].

I.13. Stockage et dimensionnement des systèmes photovoltaïques

I.13.1. Stockage de l'énergie électrique :

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. Il y a nécessité de stockage chaque fois que la demande énergétique est décalée dans le temps vis-à-vis de l'apport énergétique solaire. En effet [7] :

- La demande énergétique est fonction de la charge à alimenter, les appareils utilisés fonctionnent soit en continu, soit à la demande.
- L'apport énergétique solaire est périodique (alternance jour/nuit, été/hiver) et aléatoire (conditions météorologiques).

I.13.2. Batterie dans le système photovoltaïque :

Les systèmes photovoltaïques exigent habituellement des batteries qui peuvent être chargées pendant le jour et déchargées durant la nuit. Ces batteries doivent

fonctionner ainsi pendant des années sans marquer plus qu'une détérioration minimale de leurs rendements, tout en satisfaisant la demande, les jours où il n'y a que peu ou pas de soleil [7].

I.13.3. Durée de vie de la batterie

La durée de vie d'une batterie solaire s'évalue en nombre de cycles de charge/décharge qu'elle est capable de supporter. La durée de vie moyenne des batteries de tous types a considérablement augmentée lors des deux dernières décennies grâce à l'utilisation de nouvelles technologies de fabrication et à l'emploi de nouveaux matériaux : Les batteries lithium-ion sont de plus en plus utilisées dans la fabrication des véhicules électriques et sont montées les unes entre les autres pour ne faire qu'un afin d'assurer l'alimentation du véhicule [7].

I.13.4. Régulateur de charge

Le régulateur de charge est un élément essentiel dans l'installation photovoltaïque, dont son prix et sa consommation électrique restent faibles relativement aux autres éléments. C'est l'élément central du système photovoltaïque, il protège la batterie pour qu'elle ait une durée de vie meilleure, ce qui est important, car cette dernière est très inférieure à celle des panneaux solaires (Figure I.26).

La batterie doit être protégée contre les surcharges et les décharges excessives qui peuvent causer une perte d'électrolyte et endommager ses plaques. Ceci est le rôle du régulateur de charge qui maintient la tension de la batterie entre deux seuils et permet ainsi une plus longue durée de vie du système photovoltaïque. Ce régulateur est caractérisé par un courant maximum de charge (panneaux solaires), un courant maximum de décharge (équipements consommateurs) et par la tension nominale de fonctionnement [7].

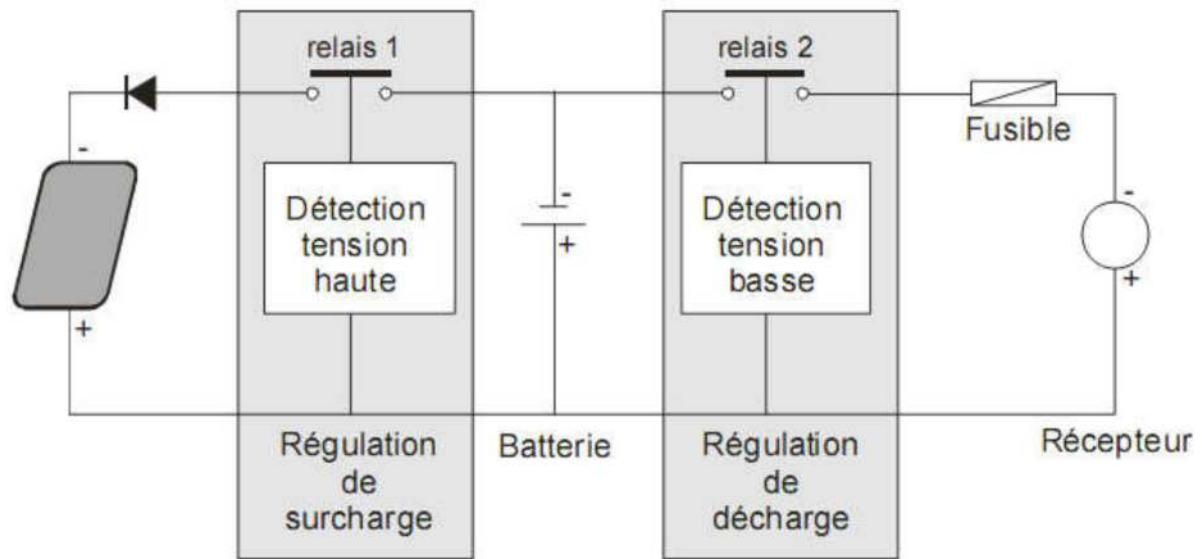


Figure I.26 : Schéma fonctionnel de régulateur de charge [7].

Le régulateur de charge assure deux fonctions principales :

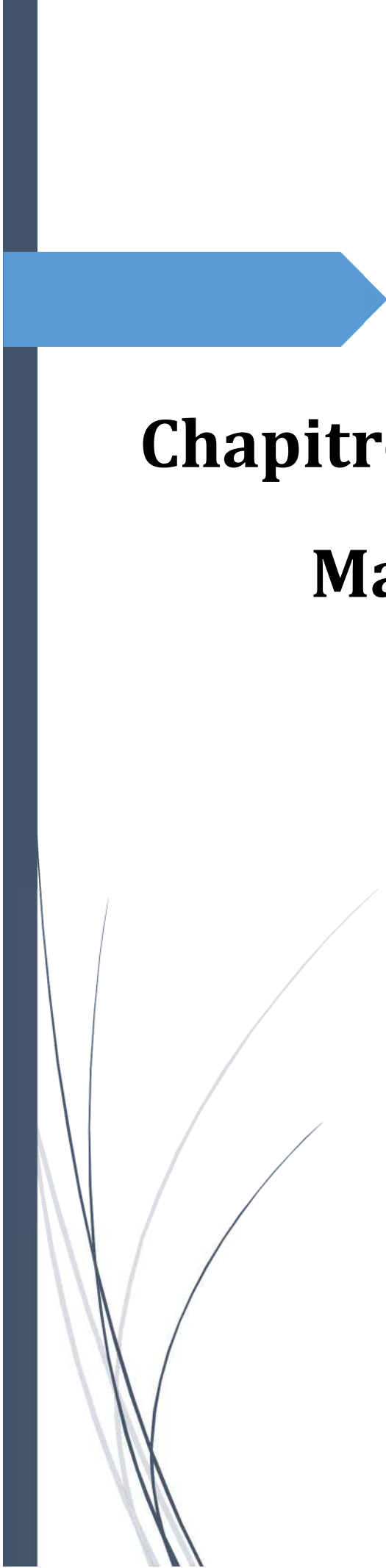
- la protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes,
- L'optimisation du transfert d'énergie du champ photovoltaïque à l'utilisation.

La tension aux bornes de la batterie est l'indication sur laquelle s'appuiera le régulateur pour assurer sa fonction. Ce dernier mesure en permanence cette tension et la compare à deux seuils de tension préétablis : seuil haut et seuil bas.

I.14. Conclusion

Dans ce chapitre, on a vu que l'énergie renouvelable est de plus en plus répondue dans la production mondiale de l'électricité. L'Algérie est parmi les pays qui puissent utiliser l'énergie solaire comme solution du futur pour remplacer l'énergie fossile. Nous avons présenté des généralités sur l'énergie solaire et les mécanismes de base du principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique ainsi que les différents types de systèmes photovoltaïques existants. On a vu aussi le système de stockage et le régulateur de charge qui représente la partie centrale du système photovoltaïque.

L'énergie produite par panneau photovoltaïque sous forme continue, doit être ondulée pour pouvoir alimenter des charges alternatives ou l'injecter au réseau de distribution alternatif, cela fera l'objet du chapitre suivant.



Chapitre II

Matériels et Méthodes

Chapitre II : Matériels et Méthodes

II.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 Abbès, le taux d'électrification est de 98%, cela veut dire que certaines habitations, ne peuvent pas être reliés au réseau public de distribution du fait 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 et de traitement d'eau, 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. La 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

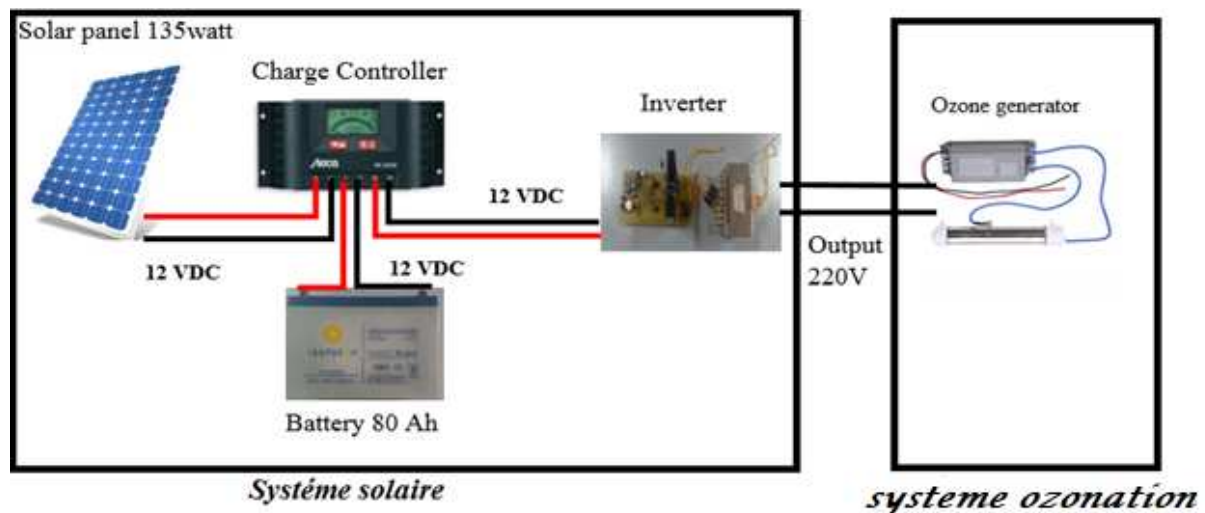


Figure II.1. Schéma synoptique du Système photovoltaïque alimentant un système d'ozonation

II.2. Matériels : Système d'énergie solaire

Le système d'énergie solaire comprenant un générateur photovoltaïque de 135 W, un régulateur de charge (12/24 V, 20 A) pour maintenir la tension du panneau à 12V, une batterie de 80 Ah utilisée pour stocker l'énergie et un onduleur monophasé (Figure II.2).

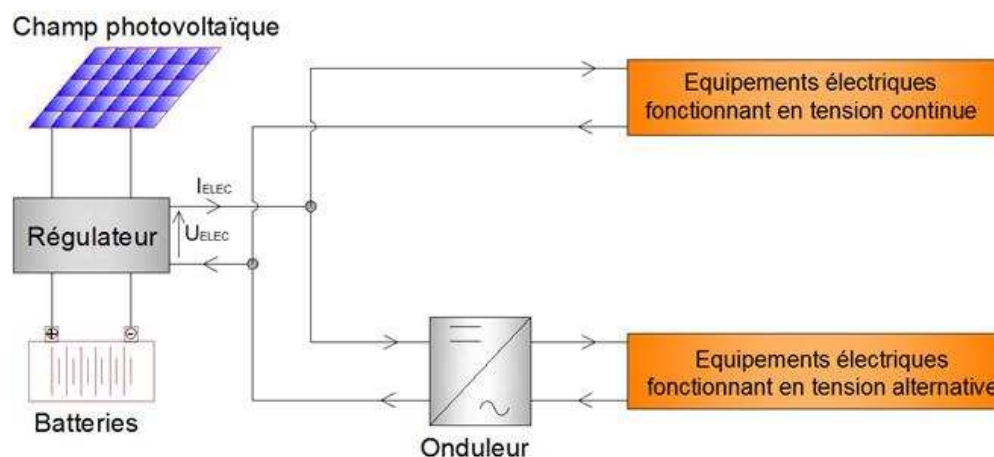


Figure II.2. Représentation Schématique du système photovoltaïque

II.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.

II.2.2. 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 II.3)

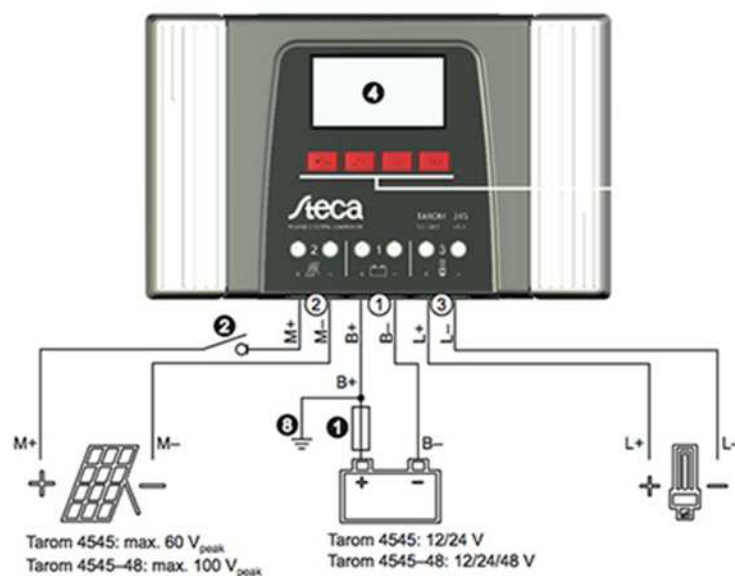


Figure II.3 Connexion d'un régulateur [2]

II.2.3. 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 le tableau 2.1). 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].

Tableau II.1. Comparaison des différentes techniques de stockage

Technologies	Densité énergétique (Wh/kg)	Densité de puissance (W/kg)	Temps de décharge	Durée de stockage	Auto décharge (%/mois)	Rendement (%)	Durée de vie (nombre de cycles)	Coût (FCFA/kWh)
Plomb-acide (Pb-ac)	25 – 45	80 - 150	15mn - 100h	>1 mois	40	60-98	300-1500	32750-131000
Lithium-ion (Li-ion)	80-150	500-2000	45mn-100h	Plusieurs mois	20	90-100	>1500	458500-655000
Nickel-cadmium (Ni-Cd)	20-60	100-800	15mn-100h	<1mois	25	60-80	300-1500	131000-393000

A. Principe de fonctionnement d'une batterie :

A la différence d'une pile, une batterie d'accumulateurs est un dispositif électrochimique qui permet la conversion réversible d'énergie électrique en énergie chimique. En charge, l'énergie électrique est convertie et stockée sous forme d'énergie chimique.

Au contraire, lorsque l'élément fonctionne en mode générateur (décharge), l'énergie chimique est convertie en énergie électrique [38]. Le fonctionnement de la batterie repose sur une double réaction chimique à chaque pôle de la batterie qui va opérer un transfert d'électrons :

* l'anode cède des électrons : cette demi-réaction est une oxydation

* la cathode les récupère : cette demi-réaction est une réduction

Durant cette réaction d'oxydo-réduction, les électrons passent d'un pôle à l'autre de la batterie grâce aux ions (Figure II.4). Un ion est un élément chimique (un atome ou une molécule) qui est électriquement chargé. S'il "manque" des électrons à un ion il est chargé positivement et vice versa.

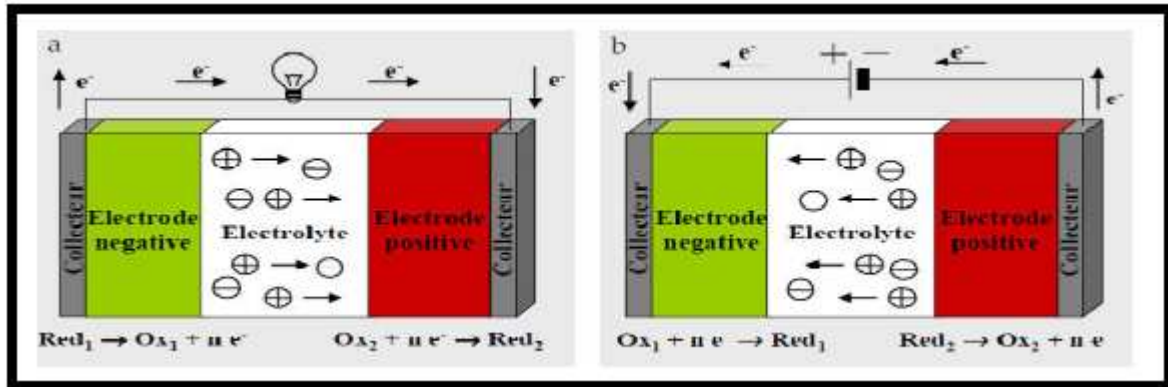


Figure II.4 Principe de fonctionnement d'un accumulateur, en décharge (a) et en charge (b)

B. Caractéristiques principales d'une batterie :

► **Capacité en Ampère heure** : Les Ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant. Pour une énergie plus élevée, il est possible d'associer plusieurs batteries, soit en série, soit en parallèle.

Théoriquement, par exemple, une batterie de 200 Ah peut fournir 200 A pendant une heure, ou 50 A pendant 4 heures, ou 4 A pendant 50 heures (Figure II.5).

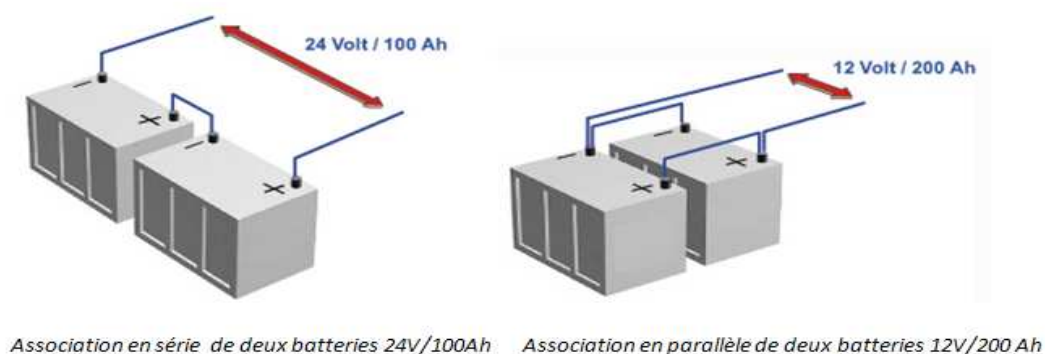


Figure II.5 Association de deux batterie 12 / 100h

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. [15][16]

- **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.

II.2.3.1. Modélisation de stockage :

a) Modèle de la charge de la batterie :

Quand la puissance du générateur PV est plus grande que la charge, les batteries sont à l'état de charge, la capacité des batteries au temps t peut être décrite par : [17]

$$C_{Bat}(t) = C_{Bat}(t-1) \cdot (1 - \sigma) + P_{pv}(t) \cdot \eta_{Bat} \quad (II-14)$$

$C_{Bat}(t)$ et $C_{Bat}(t-1)$ sont les quantités de la charge et de la décharge des batteries au temps(t) et (t-1) respectivement, σ est le taux horaire de la charge spontanée, P_{pv} est la puissance du générateur PV, η_{Bat} est le rendement de la batterie.

Pendant la charge de la batterie, le rendement est de (0.65-0.85 selon le courant chargeant), par contre pendant le processus de décharge, le rendement de batterie pris égal à 1.

b) Modèle de la décharge de la batterie : [17]

Quand la demande de charge est plus grande que la puissance produite, la capacité des batteries au temps t peut être exprimée comme suit :

$$C_{Bat}(t) = C_{Bat}(t-1) \cdot (1 - \sigma) - P_{PV}(t) \quad (II-15)$$

A tout moment, la quantité de charge des batteries est sujette aux contraintes suivantes :

Ici, la capacité maximale de la batterie prend la valeur de la capacité nominale de la batterie

($C_{Bat\ max} = C_{Bat\cdot N}$) Et la capacité minimum est déterminée par la profondeur de la charge (DOD)

$$C_{Bat\ min} = DOD \cdot C_{Bat\cdot N} \quad (II-16)$$

La valeur maximale de l'état de charge (SOC) est égale à 1, et le minimum est déterminé par le maximum de profondeur de décharge, $soc_{min} = 1 - DOD$

Selon les caractéristiques des fabricants, la durée de vie des batteries peut être prolongée au maximum si DOD prend les valeurs de 30-50%.

La capacité de stockage est une fonction de la charge demandée et de son autonomie.

Elle peut être estimée par la relation suivante : [18]

$$C_{Bat} = \frac{E_c \cdot N_a}{V_b \cdot DOD} \quad (II-17)$$

C_{Bat} : La capacité de stockage de la batterie.

E_c : Énergie consommée

N_a : Le nombre de jours d'autonomie.

V_b : La tension de la batterie

DOD : La profondeur de décharge.

c) Tension de la batterie :

Le modèle suivant, décrit la relation entre la tension, le courant et l'état de charge. Ce modèle se base sur le schéma électrique (Figure II.6)

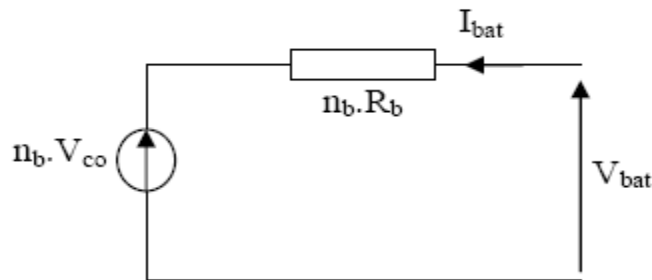


Figure II.6 : Schéma électrique de la batterie

Pour n batteries en séries, nous pouvons écrire l'équation :

$$V_{bat}(t) = n_b \cdot V_{co}(t) + n_b \cdot I_{bat}(t) \cdot R_{bat} \quad (II-18)$$

$V_{co}(t)$: La tension de circuit ouvert au temps t

d) Courant de batterie

Quand la puissance du générateur PV est plus grande que la charge, les batteries sont à l'état de charge, le courant de charge des batteries au temps t peut être décrit par : [19]

$$I_{Bat} = \frac{P_{pv}(t)}{V_{bat}(t)} \quad (II-19)$$

Quand la puissance du générateur PV ne peut pas subvenir à la demande de la charge, le courant de décharge des batteries est :

$$I_{Bat} = -\frac{P_{pv}(t)}{V_{bat}(t)} \quad (II-20)$$

e) Rendement de la Batterie :

Le rendement de la batterie se calcule par la relation suivante :

$$\eta_{Bat} = \frac{P_{fournie}}{P_{génér}} \quad (II-21)$$

En pratique, le rendement est considéré constant égale à 85%, la tension nominale est de 12V et la capacité de l'ordre de 100A/h. Donc la puissance fournie par une batterie peut s'écrire comme suit :

$$P_{fourni} = \eta_{Bat} \cdot P_{incid} \quad (II-22)$$

($P_{génér}$: Puissance du générateur)

II.2.3.2. Différents types de batterie au plomb :

A . Batterie au plomb ouvert :

Sont ainsi nommés car l'électrolyte est liquide et doit être renouvelé. C'est le type le plus ancien et le plus utilisé. Un élément plomb-acide se compose d'électrodes de plomb baignant dans l'acide sulfurique dilué [20] [21].

B. Batterie au plomb étanche :

Ils ont les mêmes caractéristiques que les plombs 'ouvert' mais sont étanches. Ils peuvent fonctionner dans toutes les positions et ne nécessitent absolument aucun entretien. On les trouve en outre dans des capacités inférieures aux batteries 'ouvert'.

Les avantages essentiels de la batterie au plomb (ouvert ou étanche) pour le photovoltaïque sont les suivants :

- ✓ Longévité
- ✓ Bon rapport qualité/ prix
- ✓ Charge possible à courant faible.

C. Méthodes de charge des batteries au plomb :

La durée de vie d'une batterie dépend pour l'essentiel du processus de charge optimal en utilisant un régulateur pour limiter la tension.

Il existe plusieurs méthodes pour charger une batterie :

- 1- Avec un courant constant
- 2- Avec une tension constante
- 3- Méthode mixte courant (courant constant puis tension constante)

II.2.3.3. Entretien des batteries :

Il n'y a que quelques règles simples à respecter :

Ne pas les surcharger

Ne pas les laisser déchargées

Combattre ou éviter la sulfatation

Avoir toujours suffisamment d'électrolyte

La durée de vie dépend principalement de la profondeur de décharge journalière.

II.3. Matériels : Convertisseurs d'électronique de puissance pour systèmes PV

II.3.1. 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 de l'onduleur.

Donc les onduleurs sont des convertisseurs statiques continu-alternatif permettant de convertir 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.

II.3.2. Origine des convertisseurs de puissance électrique

Les premiers convertisseurs de puissance électrique ont été réalisés avec des machines électriques couplées mécaniquement.

Une machine à courant alternatif d'une part (de type synchrone ou asynchrone) couplée au réseau permettait de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique à vitesse fixe.

Une machine à courant continu d'autre part dont l'excitation commandée permettait de disposer d'une tension continue variable en sortie.

Le développement des composants de puissance au milieu du 20^e siècle (électronique de puissance) a permis de développer des convertisseurs de puissance électrique sans machines tournantes.

La technologie des composants utilisés (semi-conducteurs) ne cesse d'évoluer :

- ✓ Faible coût
- ✓ Puissances commutées élevées

- ✓ Facilité de contrôle.

II.3.3. Caractéristiques propres d'un onduleur pour systèmes photovoltaïques [28]

Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques diffèrent un peu des onduleurs classiques en électrotechnique, mais l'objectif de conversion DC/AC est le même (Figure II.7). La principale caractéristique de l'onduleur PV réside dans la recherche du point de fonctionnement maximal ou MPPT en anglais « Maximum Power Point Tracking » car le générateur PV a une caractéristique courant/tension non-linéaire.

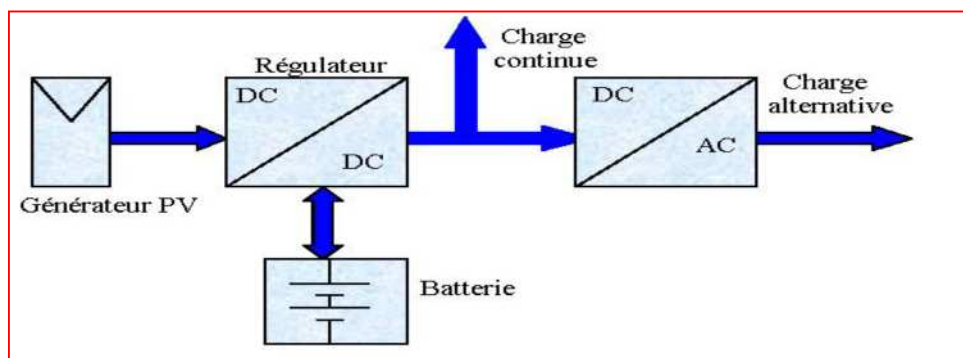


Figure II.7 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque

II.3.4. Classification

De nombreux essais de classification plus ou moins avantageux, ont été élaborés. Il existe plusieurs centaines de schémas d'onduleurs, chacun correspondant à un type d'application déterminé ou permettant des performances recherchées.

En général, les classifications sont liées aux modes de commutation des éléments semi-conducteurs constituant l'onduleur.

Un premier mode de classification qui se présente comme une nécessité, peut être fait, on dissocie grossièrement les différents onduleurs existants en :

- Onduleurs non autonomes.
- Onduleurs autonomes.

II.3.4.1. Onduleurs non autonomes

Les onduleurs sont non autonomes quand la fréquence et la tension alternative sont imposées par le réseau qu'ils alimentent. Dans ces onduleurs la commutation est naturelle. Elle est naturelle en ce sens que ce sont les tensions alternatives du réseau qui effectuent le transfert du courant d'un thyristor à l'autre (Figure II.8).

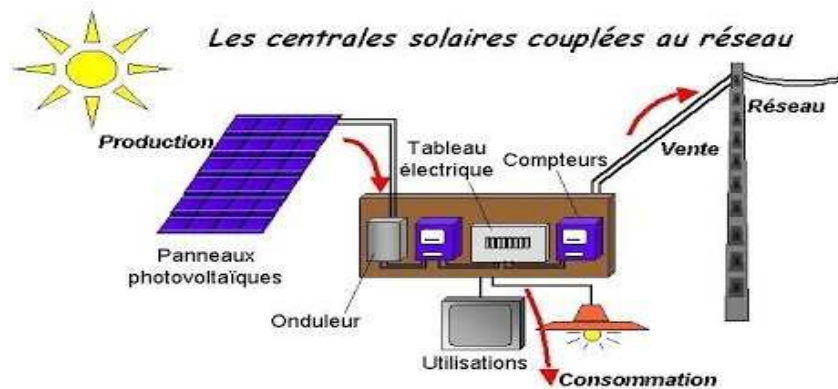


Figure II.8 : Principe de l'onduleur non autonome

II.3.4.2. Onduleur autonome :

Les onduleurs autonomes (ou oscillateurs) génèrent leur propre fréquence et leur propre tension alternative. Dans ces onduleurs la commutation est forcée.

Un onduleur autonome dépend essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté. Cela conduit à distinguer (Figure II.8) :

- ✓ Onduleur de tension alimenté par une source de tension continue.
- ✓ Onduleur de courant alimenté par une source de courant continu

La tension ou le courant de sortie d'un onduleur de tension ou de courant peut être formé d'un seul créneau par alternance. Mais grâce aux progrès sur les semi-conducteurs de puissance et sur leur commande, on utilise de plus en plus la modulation de largeur d'impulsion (chaque alternance est formée de plusieurs créneaux de largeur convenables). Cela facilite beaucoup le filtrage de la tension ou du courant de sortie.

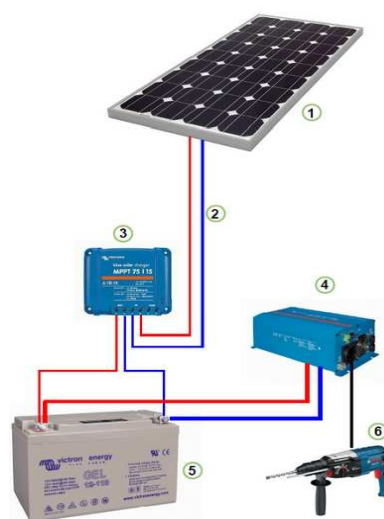


Figure II.8 Composants D'un Kit Solaire Autonome

1-Le panneau solaire

Ils produisent de l'électricité en courant continu (DC)

2-Câblage DC spécifique

Les câbles solaires sont spécialement prévus pour résister au soleil. Ils sont dotés d'une double-isolation qui les rendent durables et particulièrement résistants.

3-Régulateur de charge

Il abaisse la tension des panneaux solaires de façon à la rendre compatible avec la batterie. Il permet également de protéger la batterie contre les surcharges ainsi que les décharges profondes.

4 - Onduleur ou le convertisseur statique

Il convertit la tension de la batterie (12V) en tension 230V 50Hz, identique à la tension du réseau électrique public. Cet appareil n'est pas indispensable si vous utilisez que du 12 V.

5 - La batterie solaire

Elle stocke l'énergie fournie par le panneau solaire pour la redistribuer au besoin (pour l'éclairage la nuit par exemple). Ces batteries de technologie GEL ou AGM sont des batteries à décharge lente et sont particulièrement adaptées aux applications solaires.

6 - Vos consommateurs

Les consommateurs 230V seront connectés à la sortie de l'onduleur (ou convertisseur).

II.3.5. Généralités :

Les convertisseurs de courant continu en courant alternatif sont appelés des onduleurs. La fonction d'un onduleur est de convertir une tension continue d'entrée en une tension de sortie alternative symétrique d'amplitude et de fréquence désirée (Figure II.9). La tension de sortie variable peut être obtenue en variant la tension continue d'entrée et en maintenant le gain de l'onduleur constant [12].

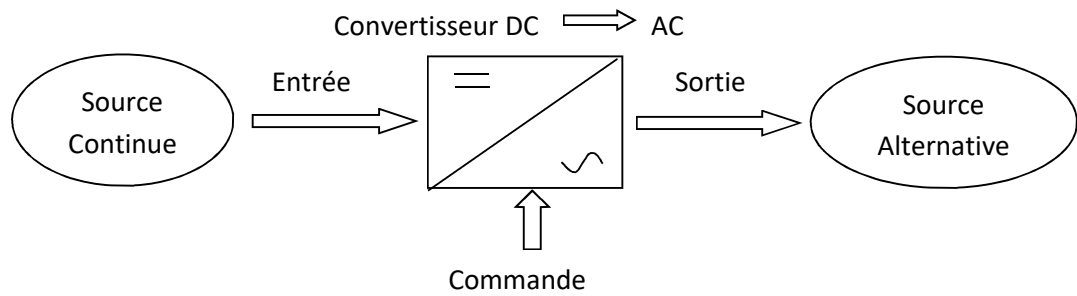


Figure II.9 Schéma de principe de l'onduleur

II.3.5.1. Différents modèles d »onduleurs : Point de vue électronique de puissance Nous distinguerons entre autres, trois types de structures.

Les onduleurs de tension : Un onduleur de tension 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. 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.

II.3.5.2. 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 :

II.3.6. Architecture de l'onduleur :

II.3.6.1. Onduleur en demi- pont :

On utilise deux interrupteurs bidirectionnels en courant (Thyristor associé à une diode en antiparallèle) et une source de tension à point milieu obtenue grâce à des condensateurs pour pouvoir réaliser un onduleur en demi pont.

L'interrupteur peut être un transistor (Mosfet ou IGBT) équipé d'une commande automatique de blocage lors de l'annulation du courant le traversant associé à une diode en antiparallèle.

II.3.6.2. Commande symétrique

Il s'agit d'actionner alternativement les interrupteurs K_1 et K_2 durant des intervalles de temps réguliers

Montage

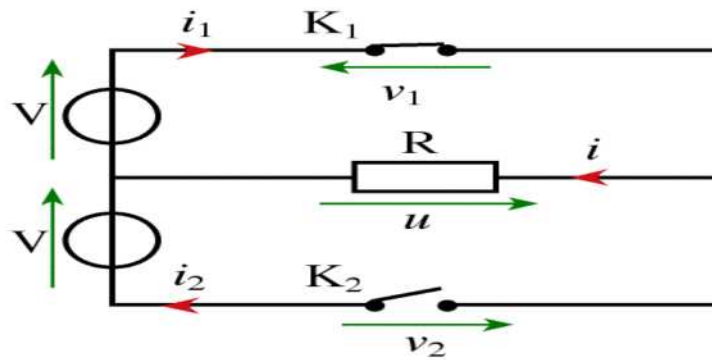


Figure II. 10 : Commande Symétrique

Chronogrammes :**Relations :**

$$i = i_1 - i_2$$

$$V - v_1 - u = 0$$

$$V + u - v_2 = 0$$

Analyse :**• de 0 à T/2**

K_1 est fermé $\rightarrow v_1 = 0$

K_2 est ouvert $\rightarrow i_2 = 0$

$$u = V$$

$$i = i_1 = V/R$$

$$v_2 = V + u = 2.V$$

• de T/2 à T

K_1 est ouvert $\rightarrow i_1 = 0$

K_2 est fermé $\rightarrow v_2 = 0$

$$\rightarrow u = -V$$

$$i = -i_2 = -V/R$$

$$v_1 = V - u = 2.V$$

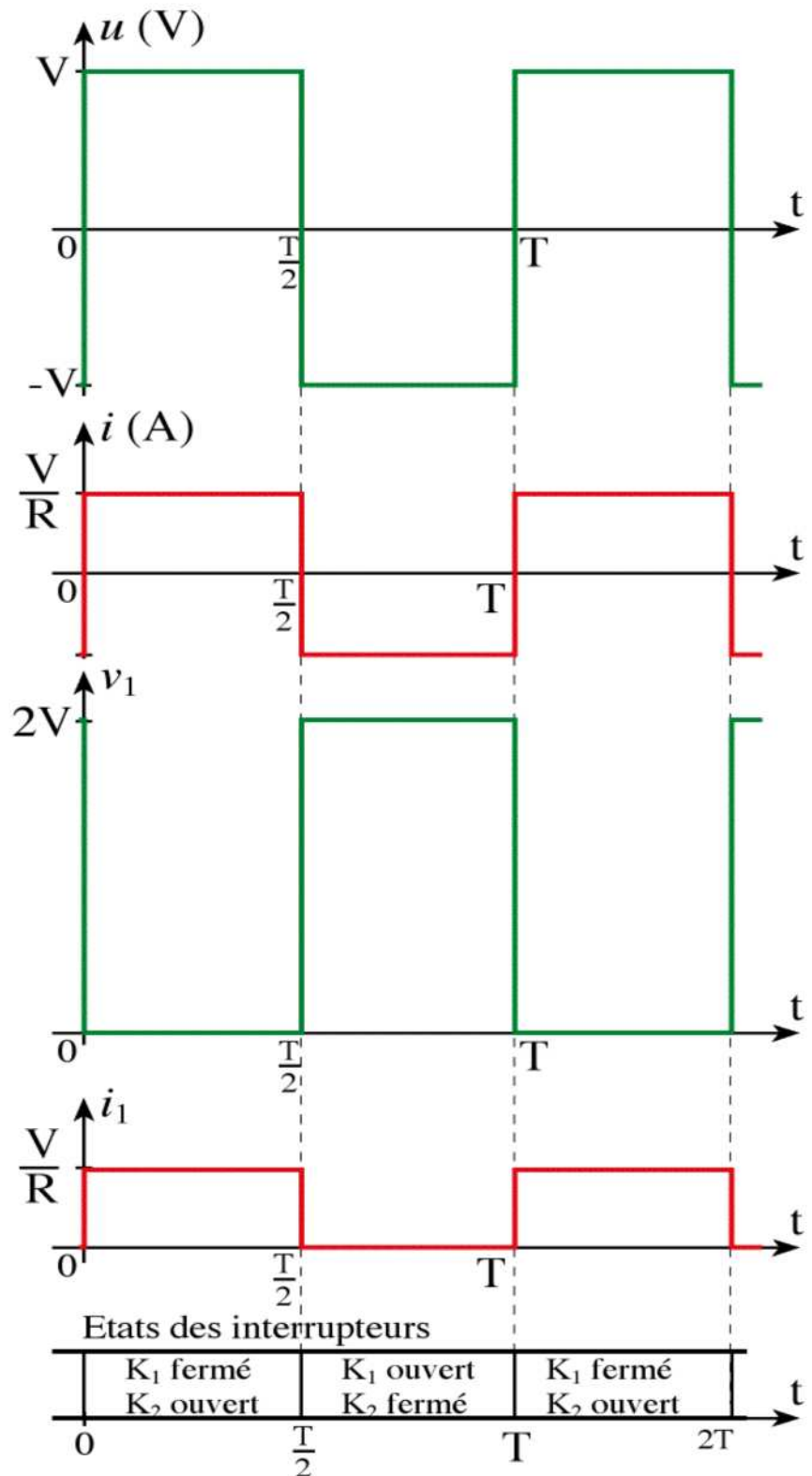


Figure II.11 : Chronogrammes d'une commande symétrique

C'est la stratégie de commande la plus simple à mettre en œuvre. Par contre la tension de sortie est très riche en harmoniques de rang faible donc de fréquence basse. Le filtrage est difficile [11].

II.3.6.3. Commande décalée

L'idéal serait d'obtenir une tension de sortie V de forme sinusoïdale.

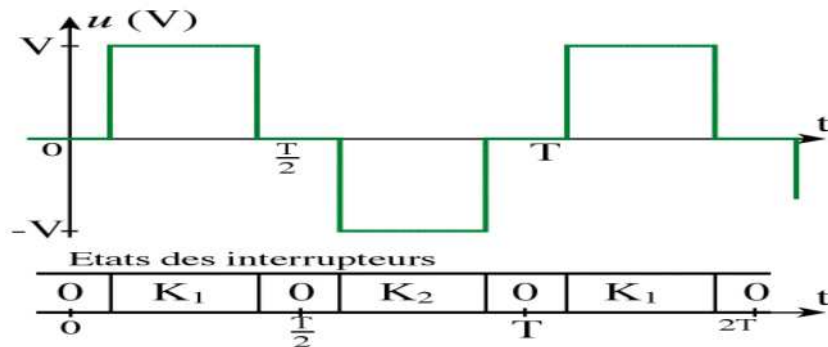


Figure II.12 : Chronogramme d'une commande décalée

La forme d'onde obtenue avec une commande décalée est plus proche d'une forme sinusoïdale que les créneaux obtenus avec la commande symétrique.

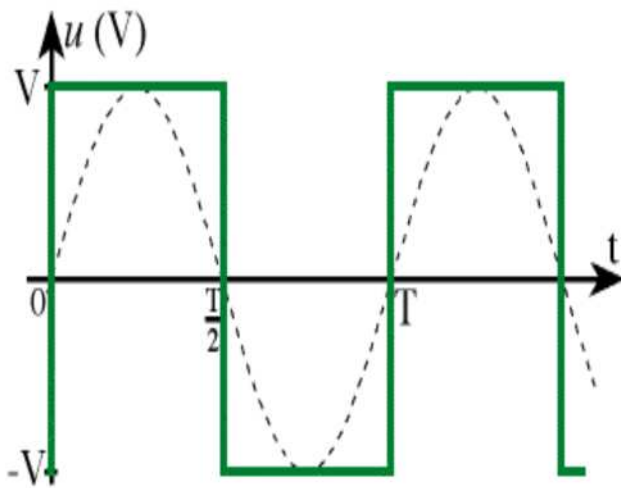


Figure II. 13.a : Commande symétrique

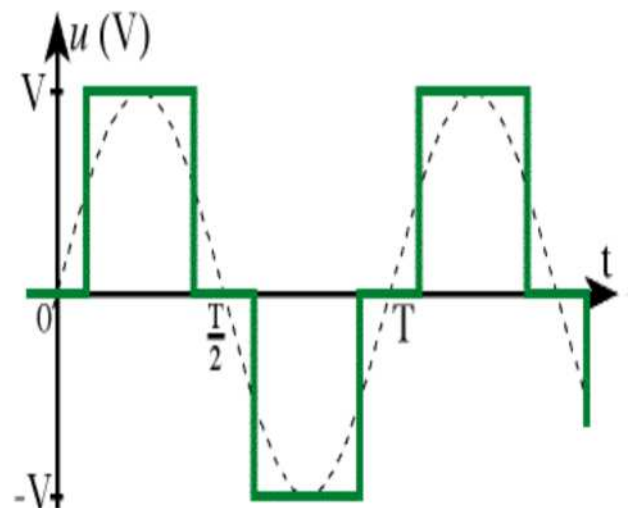


Figure II. 13.b : commande décalée

A. Si la charge est inductive

- **Analyse du problème**

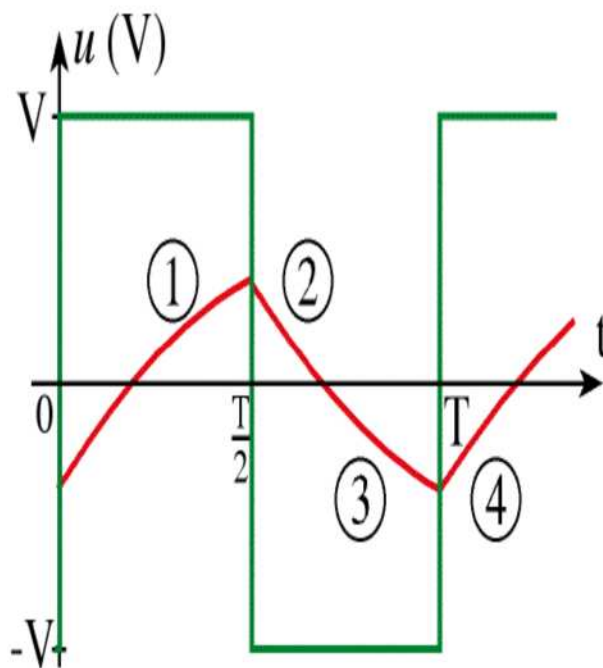
Très souvent la charge est inductive : moteur synchrone, bobinage de chauffage, dans ce cas la forme du courant est différente de celle de la tension. En effet si la tension peut changer subitement de valeur, le courant du fait de l'inductance du circuit varie progressivement.

- **Rappel**

On constatera qu'il y a un échange d'énergie entre la source et la charge dans les deux sens.

En effet, une partie de l'énergie fournie à la charge est stockée dans l'inductance puis restituée à la source : on dit qu'il y a récupération d'énergie [11].

Chronogrammes



Analyse

$$u > 0$$

$$i > 0$$

$$u < 0$$

$$i > 0$$

$$u < 0$$

$$i < 0$$

$$u > 0$$

$$i < 0$$

Sens du transfert d'énergie

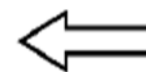
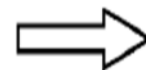
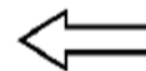
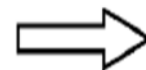
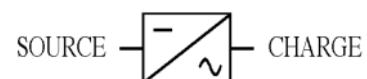


Figure II.14 : Commande symétrique (Charge inductive)

- **Conséquence**

Un interrupteur électronique étant en général unidirectionnel. pour permettre au courant de circuler dans le sens opposé à celui permis par l'interrupteur, on place une diode de façon à réaliser un montage dit **antiparallèle** (Figure II.15a, Figure II.15.b).

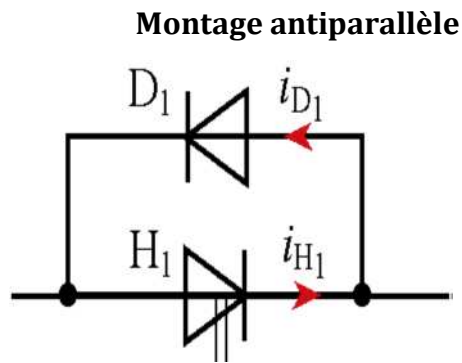


Figure II.15.a

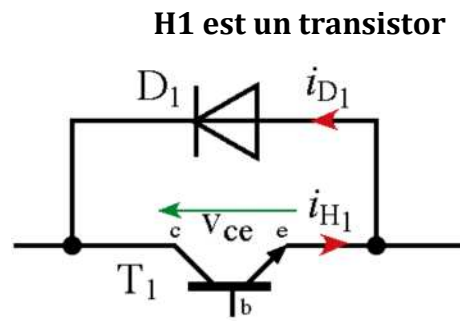
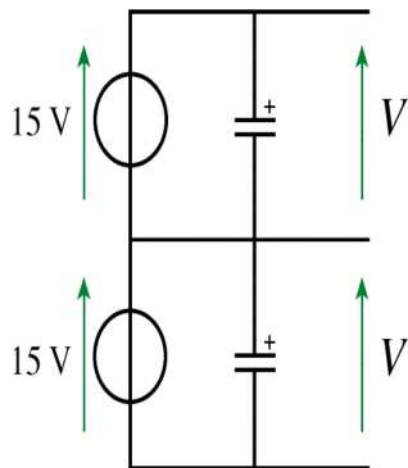


Figure II.15.b

Remarques

Il faut que la source d'énergie supporte le courant en sens inverse. Il faut donc utiliser des batteries ou des alimentations couplées en parallèle avec des condensateurs. [11].



OU

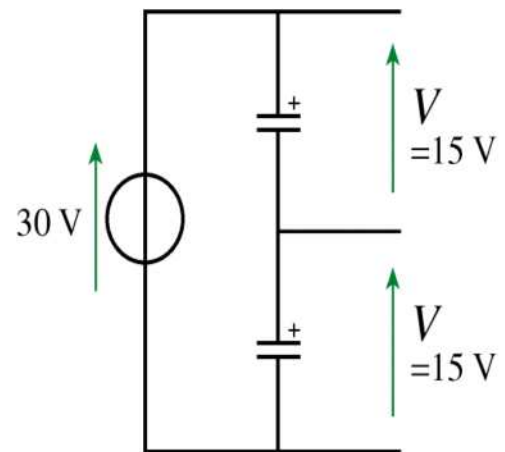
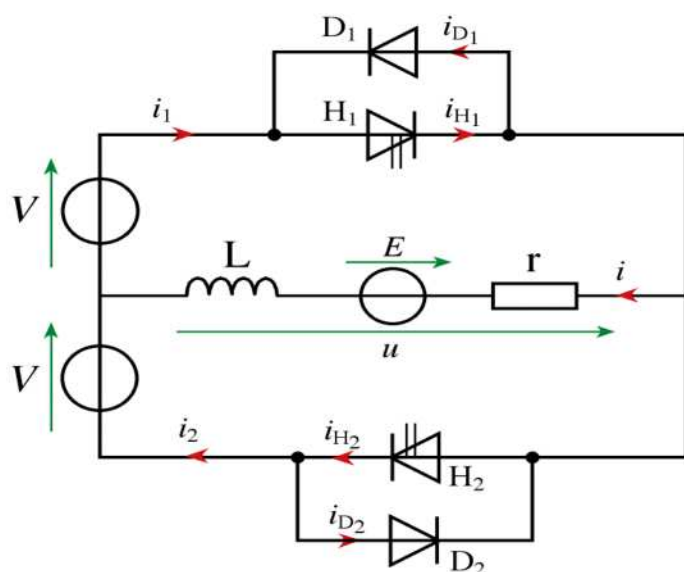


Figure II.16 : Alimentations couplées avec des condensateurs

- Etude du montage

Montage



Remarque

L'intensité i du courant dans la charge est sinusoïdale tandis que la tension est en créneaux, i étant décalée en arrière par rapport à u .

Chronogrammes

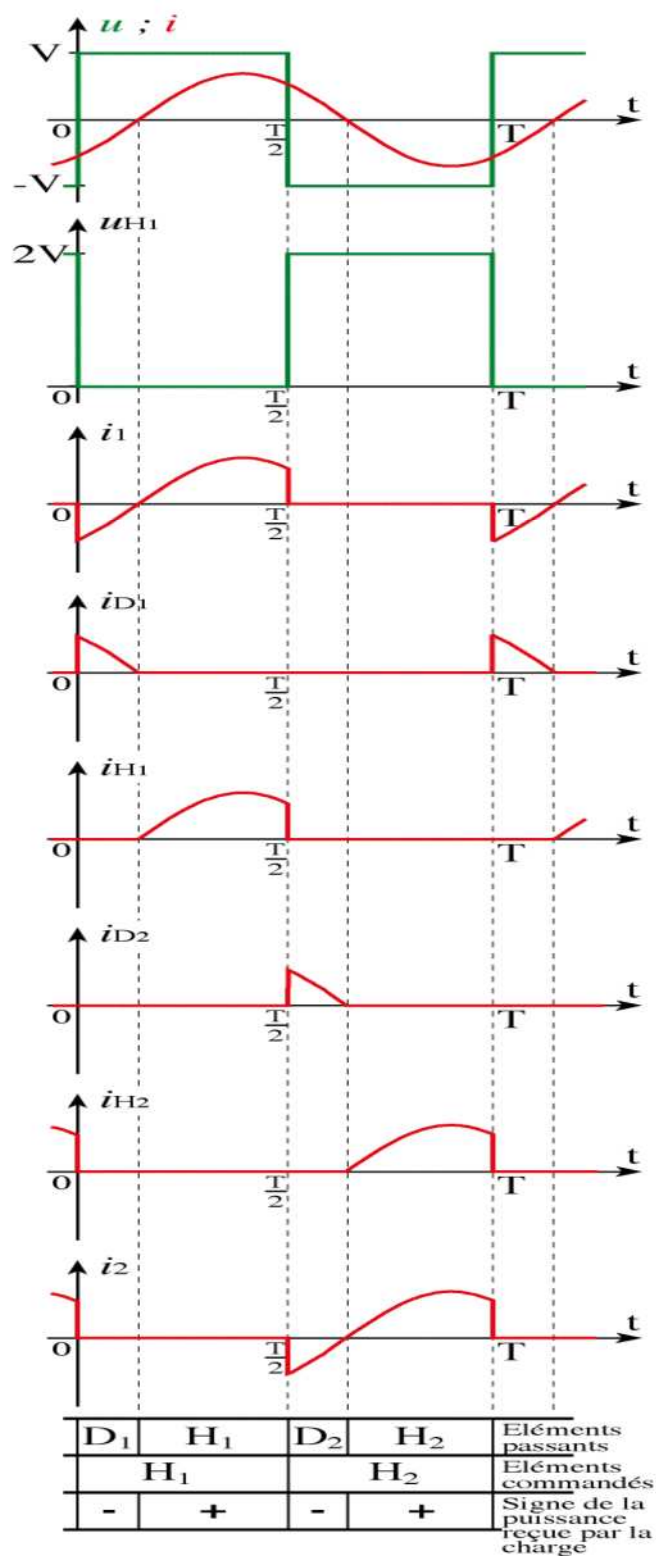


Figure II.17 : Chronogrammes demi -pont (charge inductive)

Analyse partielle

De 0 à t_1

$i < 0$; $u > 0$: C'est la diode D_1 qui conduit.

$P = u.i < 0$: il y a récupération par la source d'une partie de l'énergie fournie à la charge durant la phase précédente. D_1 est dite diode de **récupération**.

Durant ce temps l'interrupteur H_1 est déjà commandé mais comme le courant est en sens inverse il reste bloqué [11].

II.3.7. Onduleur avec transformateur à point milieu [43]

La figure (2.5) montre un montage d'un onduleur avec transformateur à point milieu utilisant des thyristors, son principe de fonctionnement est basé sur la commutation forcée. Th_1 et Th_2 , sont à l'état passant à tour de rôle, ce qui produit des impulsions de courant de sens inverse, I_1 et I_2 , dans les deux moitiés du primaire du transformateur. On obtient, au secondaire du transformateur, une tension alternative de forme rectangulaire. Le condensateur C de commutation empêche les deux thyristors de laisser passer le courant en même temps, de sorte qu'il provoque le blocage d'un thyristor lorsque l'autre s'amorce.

L'inductance de lissage L tend à garder un courant constant dans le circuit. Il en résulte que les courants I_1 et I_2 sont égaux et de forme rectangulaire.

- Si Th_1 fermé, Th_2 ouvert

$$U = 2 * \left(\frac{n_2}{n_1}\right) * E \quad (II.23)$$

- Si Th_2 fermé, Th_1 ouvert

$$U = -2 * \left(\frac{n_2}{n_1}\right) * E \quad (II.24)$$

n_1 : nombre de spire du primaire

n_2 : nombre de spire du secondaire.

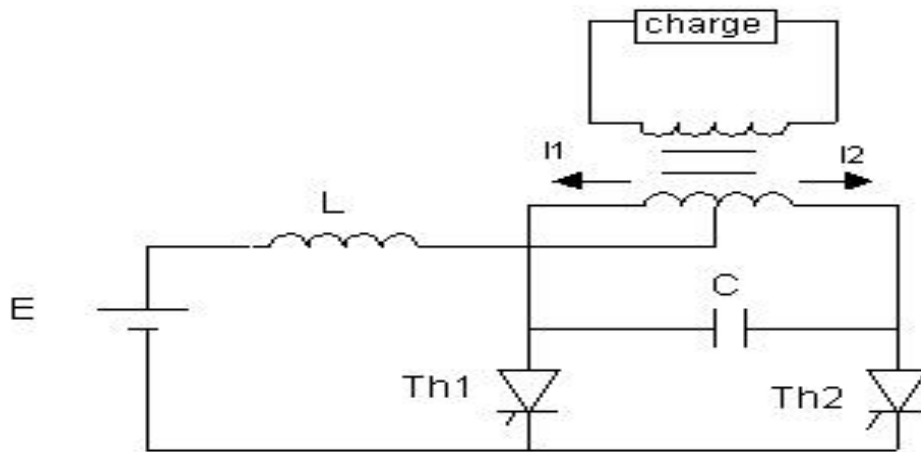


Figure II.18 : Schéma d'un onduleur avec transformateur à point milieu

II.3.8. Onduleur en pont

Un onduleur monophasé de tension en pont nécessite des interrupteurs électroniques bidirectionnels (diode en antiparallèle sur interrupteur unidirectionnel) car le courant I_s est décalé par rapport à la tension U_s . On utilise le symbole d'un interrupteur unidirectionnel en courant commandable à l'ouverture et à la fermeture.

II.3.8.1. Onduleur en pont à commande symétrique [30] :

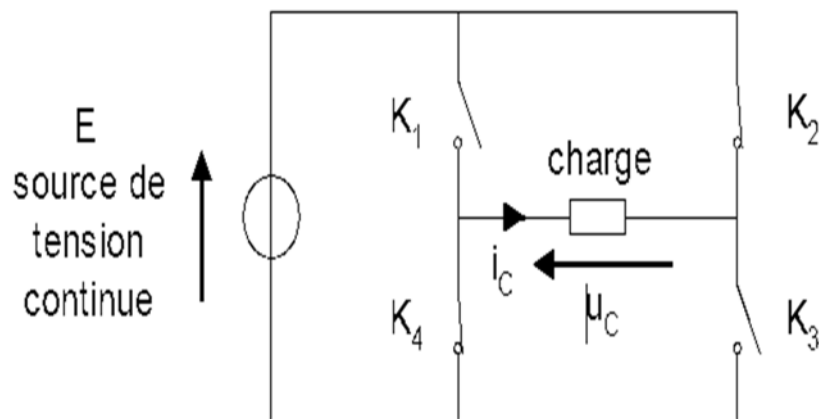


Figure II.19 : Montage d'un onduleur en pont à commande symétrique [12]

La structure électrique est identique à celle du hacheur en pont et la commande se fait avec le rapport cyclique $a = 0,5$.

Schéma :

La commande des interrupteurs (transistors) respecte l'ordre suivant :

- de 0 à $T/2$: T_1 et T_4 fermés T_2 et T_3 ouverts
- de $T/2$ à T : T_1 et T_4 ouverts T_2 et T_3 fermés

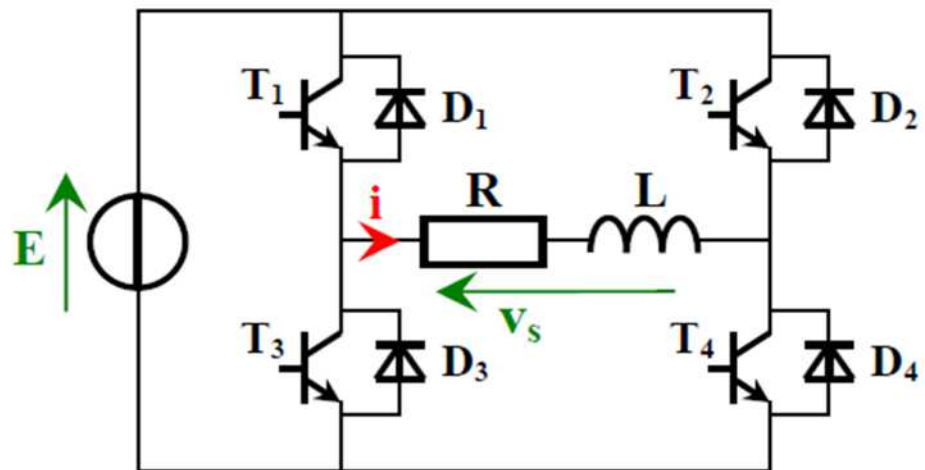


Figure II.20.a : Montage d'un onduleur en pont

Chronogrammes :

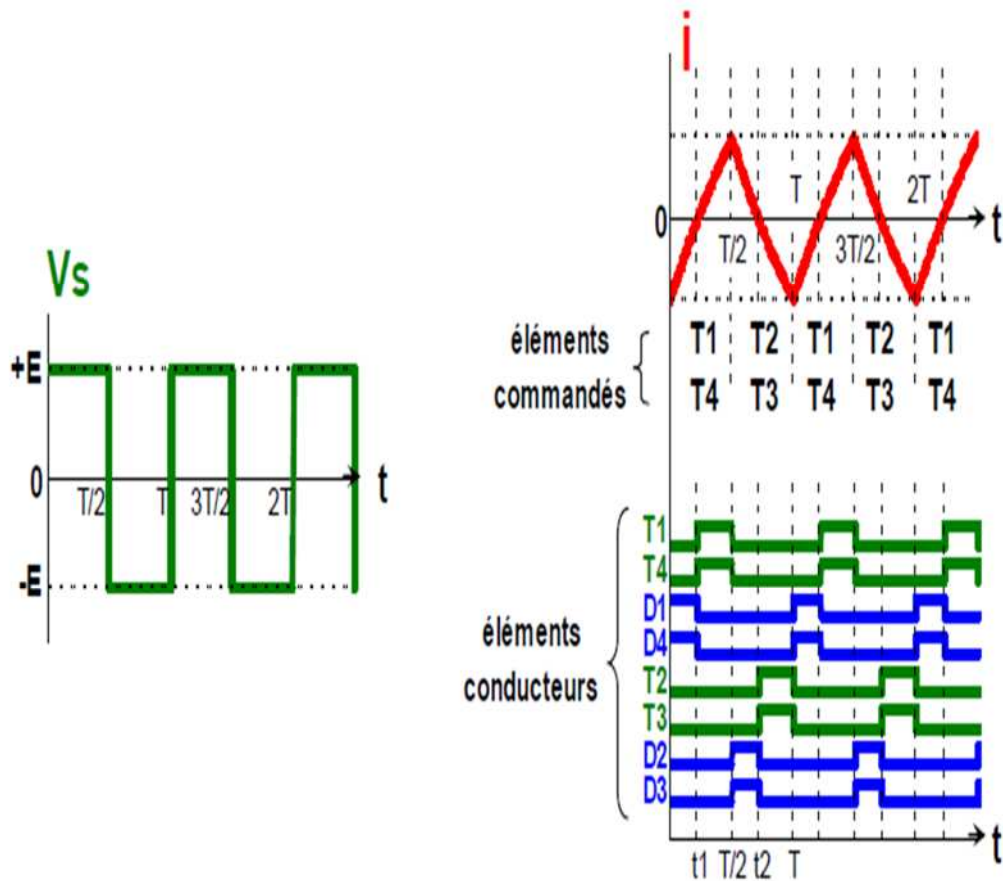


Figure II.20.b : Chronogramme

Analyse des chronogrammes pour $0 < t < T$:

de 0 à t_1 : T_1 et T_4 sont commandés,

$\Rightarrow v_s = +E$ donc i augmente mais est encore négatif

$\Rightarrow$ le courant passe donc par les diodes D_1 et D_4

C'est la **phase de récupération** (l'énergie est renvoyée vers la source).

- de t_1 à $T/2$: T_1 et T_4 sont toujours commandés,

$\Rightarrow$ le courant i est devenu positif

$\Rightarrow$ les transistors T_1 et T_4 sont conducteurs (D_1 et D_4 se bloquent).

C'est la **phase d'alimentation** (l'énergie est fournie par la source).

- de $T/2$ à t_2 : T_2 et T_3 sont commandés,

$\Rightarrow v_s = -E$ donc i diminue mais est encore positif

$\Rightarrow$ le courant passe donc par les diodes D_2 et D_3 .

C'est la **phase de récupération** (l'énergie est renvoyée vers la source).

- de t_2 à T : T_2 et T_3 sont toujours commandés,

$\Rightarrow$ le courant i est devenu négatif

$\Rightarrow$ les transistors T_2 et T_3 sont conducteurs (D_2 et D_3 se bloquent).

C'est la **phase d'alimentation** (l'énergie est fournie par la source).

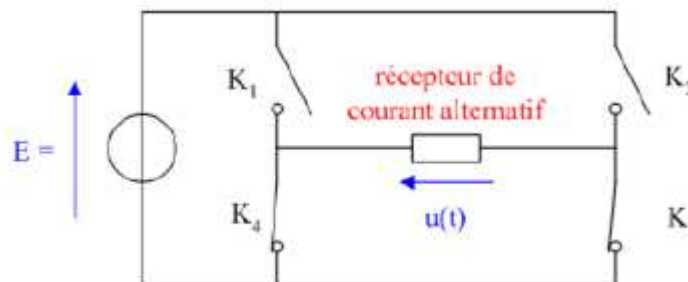
II.3.8.2. Onduleur en pont à commande décalée :

Figure II.21 : Montage d'un onduleur en pont (Commande décalée)

La structure électrique est identique à celle de l'onduleur en pont à commande symétrique.

La commande des transistors présente un **décalage de durée t_0** (chronogrammes ci-dessous) :

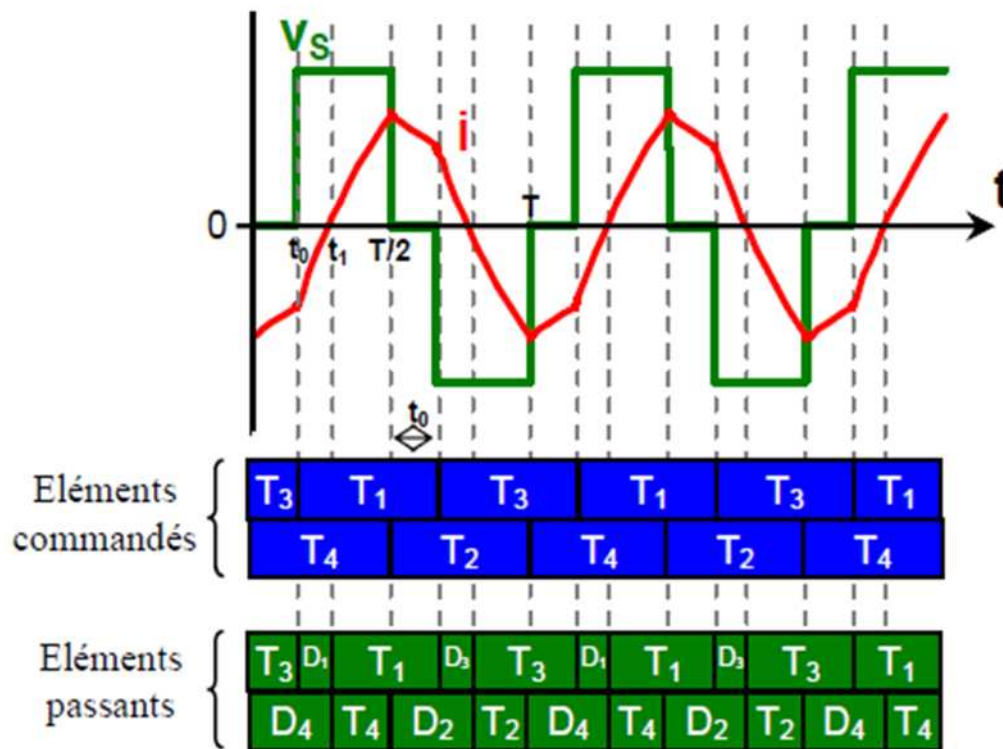


Figure II.22 : Chronogramme de courant et de tension

Analyse des chronogrammes pour $0 < t < T$:

- de 0 à t_0 : T_3 et T_4 sont commandés,

$\Rightarrow v_s = 0V$ donc i tend vers 0 mais est encore négatif

$\Rightarrow$ le courant passe donc par T_3 et D_4

C'est la **phase de roue libre** (l'énergie est dissipée dans la résistance).

- de t_0 à t_1 : T_1 et T_4 sont commandés,

$\Rightarrow v_s = +E$ donc i augmente mais est encore négatif

$\Rightarrow$ le courant passe donc par les diodes D_1 et D_4

C'est la **phase de récupération** (l'énergie est renvoyée vers la source).

- de t_1 à $T/2$: T_1 et T_4 sont toujours commandés,

$\Rightarrow$ le courant i est devenu positif

$\Rightarrow$ les transistors T_1 et T_4 sont conducteurs (D_1 et D_4 se bloquent).

C'est la **phase d'alimentation** (l'énergie est fournie par la source).

- de $T/2$ à $T/2 + t_0$: T_1 et T_2 sont commandés,

$\Rightarrow v_s = 0V$ donc i tend vers 0 mais est encore positif

$\Rightarrow$ le courant passe donc par T_1 et T_2

C'est la **phase de roue libre** (l'énergie est dissipée dans la résistance).

- de $T/2+t_0$ à $T/2+t_1$: T_3 et T_2 sont commandés,

$\Rightarrow v_s = -E$ donc i diminue mais est encore positif

$\Rightarrow$ le courant passe donc par les diodes D_2 et D_3 .

C'est la **phase de récupération** (l'énergie est renvoyée vers la source).

- de $T/2+t_2$ à T : T_3 et T_2 sont toujours commandés,

$\Rightarrow$ le courant i est devenu négatif

$\Rightarrow$ les transistors T_2 et T_3 sont conducteurs (D_2 et D_3 se bloquent).

C'est la **phase d'alimentation** (l'énergie est fournie par la source).

II.3.8.3. Onduleur en pont à commande MLI :

La structure électrique est toujours la même (pont à 4 transistors et 4 diodes).

La commande est plus complexe, il s'agit d'une commande symétrique (pas de décalage) présentant un grand nombre de commutations par période avec des ouvertures et des fermetures d'interrupteurs de durées modulées.

La tension de sortie v_s présente alors des "impulsions" de largeurs variables (**Modulation de Largeur d'Impulsion**).

Un exemple d'allure de V_s et de i est représentée ci-dessous (on remarque que le courant est presque sinusoïdal) :

Figure II.23 : Allure de V_s et de i

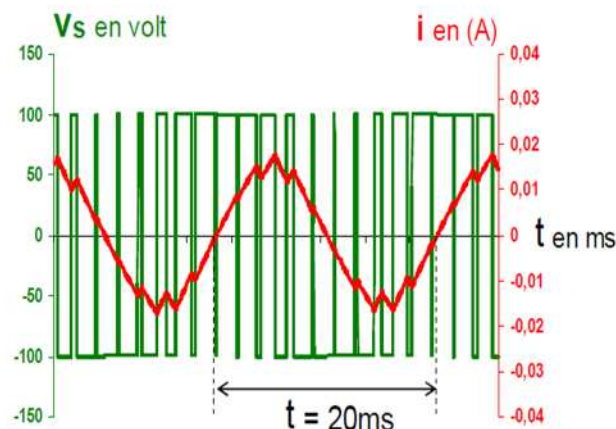


Figure II.23 : Allure de V_s et de i

Analyse globale du chronogramme :

- $V_s = +E$: T3 et T4 sont commandés

⇒ Le courant augmente exponentiellement (charge RL)

- $V_s = -E$: T1 et T2 sont commandés

⇒ Le courant diminue exponentiellement (charge RL)

C'est la durée de chaque impulsion qui va permettre au courant d'être le plus sinusoïdal possible.

II.4. 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].

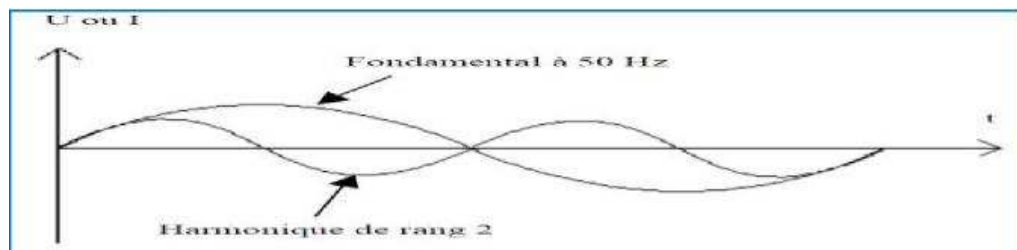


Figure II.24. Allure d'une harmonique

Figure II.24 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.

II.4.1. 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 satisfaisantes 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.

II.5. Matériels et Méthodes : Système d'ozonation

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

- Générateur d'ozone.
- Système de commande

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.

II.5.1. Générateur d'ozone :

Parmi les différentes conceptions de générateur d'ozone, nous avons opté pour celle qui est la plus souvent utilisée dans les laboratoires et dans l'industrie, à savoir une forme cylindrique. Cette forme possède l'avantage d'offrir une surface de décharge plus grande comparativement aux formes planes, par conséquent elle permet de générer plus d'ozone.

II.5.1.1. Historique sur l'ozone :

En 1785, le chercheur scientifique Martinus Van Marum a décrit l'odeur caractéristique se formant près d'une machine électrostatique et en 1801 Cruikshank, effectuant l'électrolyse de l'eau, a noté la même odeur à l'anode. Seulement en 1839 Schönbein, Professeur à l'Université de Basle et travaillant également sur l'électrolyse, a établi que cette odeur très prononcée était due à un nouveau composé chimique qu'il a appelé ozone d'après le mot grec « ozein » [14] et qui veut dire mauvaise odeur. Cela a pris encore 25 ans de conflit pour que le scientifique J.L. Soret puisse établir en 1865 que ce nouveau composé est constitué de trois atomes d'oxygène. La découverte des

propriétés bactéricides de l'ozone par Ohlmüller en 1890 a été à l'origine de sa production industrielle. L'ozone est un agent d'oxydation fort capable de participer dans beaucoup de réactions chimiques avec des substances organiques ou inorganiques.

II.5.2. Production d'ozone

L'ozone est connu pour être un oxydant très puissant mais très instable se dégradant en O_2 très rapidement. Ceci lui permet d'être préféré au chlore pour la décontamination de l'eau. La matière première pour la production d'ozone est gratuite et abondante puisque le dioxygène dans l'air est utilisé, ou d'autres mélanges gazeux composés d'oxygène et d'azote « N_2 » (moléculaire à son état Fondamental). Grâce à la décharge produite par la DBD, le dioxygène est décomposé et on obtient la formation de radicaux oxygénés. Ces derniers se lient conduisant à la formation d'ozone (O_3). La liaison entre ces trois atomes d'oxygène est faible et c'est cette propriété qui fait le caractère très oxydant de l'ozone. L'élimination des bactéries, des virus et des odeurs désagréables par l'ozone devient possible.

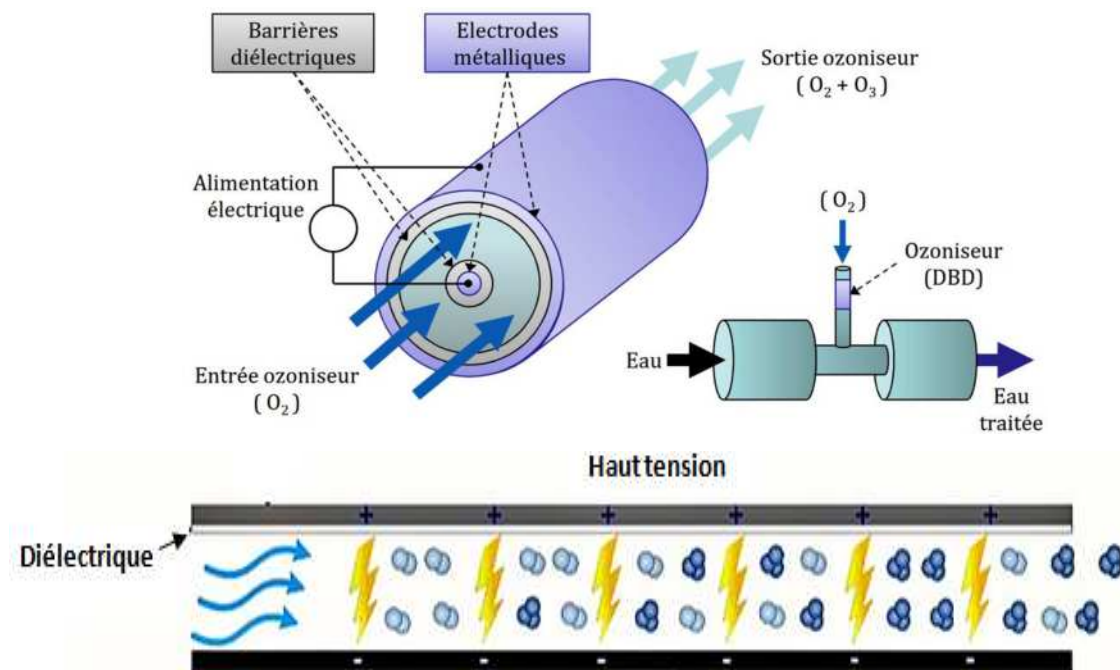


Figure II.25 : Schéma de principe d'un Ozoniseur

L'appareil de décharge est constitué de deux plaques de métal séparées par une couche d'air et un isolant électrique de constant diélectrique élevé, comme le mica ou un verre borosilicaté (Figure II.25). Une différence de potentiel élevée est appliquée entre les

deux plaques, ce qui entraîne la dissociation des molécules d'oxygène et leur recombinaison en ozone [42].

II.5.3. Inconvénients et Avantages de l'ozone

Les inconvénients de l'ozone sont compensés par une série d'avantages qui rendent l'ozone très intéressant dans nombre d'applications industrielles.

II.5.3.1. Inconvénients de l'ozone

- **Investissement plus élevé**

L'expression usine à gaz est certainement appropriée dans le cas de l'ozonisation, puisque ce gaz est produit sur place : il en résulte que le coût d'exploitation est réduit par rapport à des systèmes où l'on doit acheter le désinfectant, par contre l'installation est inévitablement plus complexe et plus coûteuse.

- **Système plus complexe**

L'ozone doit être produit, puis dissous dans l'eau, le gaz résiduel doit être extrait de l'eau, etc. Le système résultant est inévitablement plus complexe à installer et à utiliser qu'une pompe à injection de chlore, par exemple.

- **Il n'y a pas de membranes résistantes à l'ozone**

Cela pose un problème à certaines industries particulières, comme l'agro-alimentaire, qui veulent en général désinfecter l'ensemble de la chaîne de traitement.

- **Consommation en énergie plus élevée**

Puisque l'ozone est produit par décharge électrique.

II.5.3.2. Avantages de l'ozone

- ✓ Pas de dérivés dangereux, contrairement au chlore
- ✓ La courte durée de vie, le retour à l'oxygène ne laisse pas de résidu.
- ✓ Pas de stockage de produits dangereux
- ✓ Oxydation très complète
- ✓ Se décompose ou s'enlève facilement
- ✓ Efficace contre toute substance organique : la bactérie, les virus, les mycètes, les Spores, le protozoaire, les pathogènes fongiques, les ferments, les kystes, les algues.
- ✓ Propriétés pour éliminer les graisses.

- ✓ Ozone créé au point d'usage : aucun emmagasinage ou transport de produits Chimiques hasardeux exigés.
- ✓ Ne produit pas de dérivés toxiques si consommé, contrairement au chlore [16].

II.5.4. Réaction de l'ozone

II.5.4.1. Réaction de l'ozone avec les substances oxydables

L'ozone agit de la manière suivante (Figure II.26) [17] :

La molécule d'oxygène comprend 2 atomes d'oxygène (O_2).

Le haut voltage casse ces 2 atomes en 2 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.

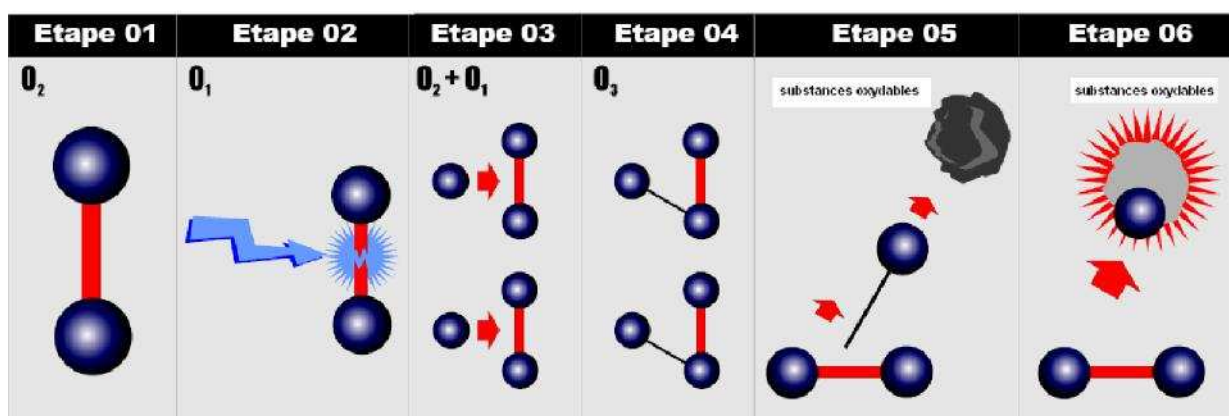


Figure II.26 principe de génération du gaz ozone

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 (la figure 2.27). 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 et manganèse...). Au cours de cette réaction d'oxydation, les molécules organiques sont transformées et dissoutes (la Figure II. 28).

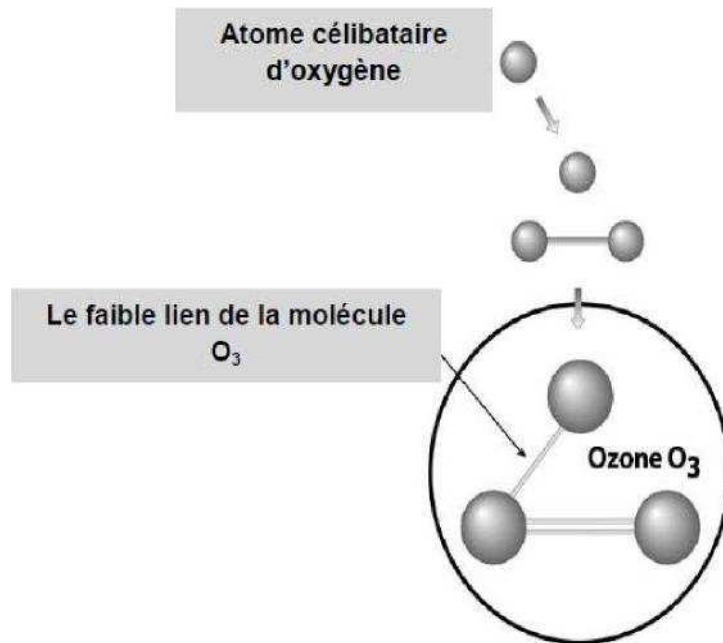


Figure II.27 : Lien de la molécule d'ozone [18].

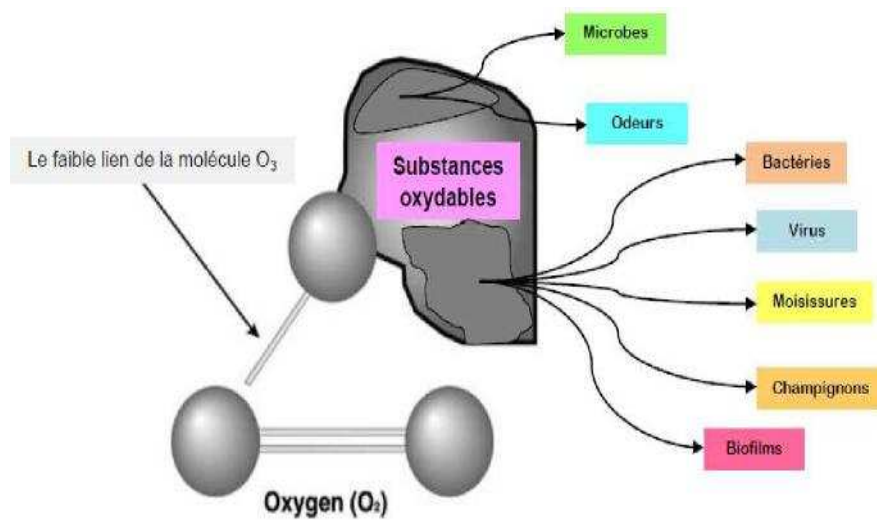


Figure II.28 : Réaction d'oxydation de l'ozone avec les substances oxydables [18].

II.6. Applications De L'ozone

II.6.1. Traitement des eaux

Il existe actuellement cinq méthodes courantes pour la désinfection de l'eau dans l'industrie :

- ✓ La chloration de l'eau
- ✓ La stérilisation par les rayons U.V
- ✓ L'ozonisation
- ✓ La microfiltration

L'ultrafiltration [19].

II.6.1.1. Domaines d'application de traitement de l'eau par l'ozone

Puisque l'ozone sert essentiellement au traitement des eaux, il est appliqué dans tous les domaines d'utilisations des eaux (la désinfection, eaux usées, domaines agroalimentaires...)

II.6.1.2. Désinfection des eaux

A. Eau potable

Il est désormais admis qu'une eau destinée à la consommation humaine est désinfectée vis-à-vis des virus et bactéries lorsqu'elle est traitée, l'ozone n'assure pas seulement une bonne désinfection. Son introduction dans la chaîne d'eau potable agit sur d'autres paramètres.

L'ozonation améliore : la clarification, l'élimination de certaines matières organiques et favorise l'élimination de nombreux micro-organismes, comme les algues. En ozonation, il s'attaque aux matières organiques résiduelles et favorise la biodégradabilité de certaines substances organiques qui seront, par la suite, éliminées lors de l'étape de filtration biologique.

Les couplages ozone-charbon actif ou ozone-peroxyde représentent aujourd'hui les procédés les plus puissants dont dispose le traiteur d'eau pour l'élimination de certains polluants et constituent une garantie vitale vis-à-vis des pollutions accidentelles [20].

B. Eaux usées

L'utilisation de l'ozone pour le traitement des eaux usées est en pleine expansion et inclue déjà la destruction et l'élimination de :

Molécules organiques complexes en vue d'une meilleure dégradation dans les traitements ultérieurs.

- ✓ Odeurs des condensats issus de l'évaporation des eaux de lavages, en vue de leur recyclage
- ✓ Couleurs des effluents de teintureries, de papeteries,...
- ✓ Tensioactifs de tout effluent de laverie industrielle.
- ✓ Odeur : stations résiduaires urbaines, effluent gazeux industriel.

En outre, le traitement final à l'ozone d'une eau résiduaire urbaine, ou combinée à des effluents industriels, permet sa réutilisation pour : le lavage, l'irrigation ou la protection incendie [20].

C. Eaux des puits

La vitesse à laquelle l'ozone tue les bactéries est trois mille fois supérieure à celle du chlore, du fait que bien qu'ils soient tous deux des oxydants, le mécanisme d'action est différent. L'ozone tue la bactérie via une rupture de la membrane cellulaire, en revanche, le chlore doit s'introduire à travers la paroi cellulaire de la bactérie et diffuser dans le cytoplasme, action qui dépend en grande partie du temps de contact. L'ozone élimine les goûts et les odeurs de l'eau tels que : odeur de chlore, goûts de métaux, odeur d'œuf pourris, etc. [21].

D. Eau de piscine

La qualité de l'eau peut être éminemment améliorée et les coûts peuvent être moindres dans le long terme lorsque de l'ozone est appliquée pour le traitement de l'eau de piscine.

Parmi les avantages :

- ✓ Supprime l'irritation des yeux, de la peau et du système respiratoire
- ✓ Absence d'odeur désagréable de "chlore".
- ✓ Moins de produits chimiques à stocker.
- ✓ Moins de détérioration du bâtiment.
- ✓ Moins d'appoint en eau.

Donc avec la désinfection par l'ozone on a une incomparable clarté de l'eau [21].

II.6.2. Domaine agro-alimentaire

L'ozone est utilisé de plus en plus dans les domaines agro-alimentaires notamment le lavage des fruits et la production de glace ozonée. **II.6.2.1 Lavage de légumes, fruits, poissons, œufs et produits alimentaires**

Stériliser l'extérieur des fruits et des légumes avec de l'eau ozonisée peut éliminer les engrais et les bactéries extérieurs et d'autres pathogènes et prolonger la durée de conservation de 3 à 10 fois.

Les scientifiques recommandent aussi de nettoyer la surface de la viande, du poisson et crevettes avec de l'eau ozonisée, pour décomposer les restes d'antibiotiques et d'hormones, pour se débarrasser des bactéries et des verres. Ce processus rend la viande sûre et fraîche.

Rincer et cuire du riz avec de l'eau ozonisée peut lui enlever l'odeur de moisi et rendre le riz beaucoup plus savoureux.

II.6.2.2 Production de glace ozonée employée pour la conservation d'aliments

La conservation de la pêche par exemple avec la glace ozonée et la réfrigération basée sur la technologie de la glace liquide et de son action avec l'ozone évalue la qualité biochimique, physicochimique, sensorielle et microbiologique des sardines conservées dans la glace liquide ozonisée. Dans le but d'allonger la vie utile et augmenter le rendement de la pêche (Figure II.29). Cette technique augmente la vie utile des sardines de 15 jours pour celles traitées avec de la glace liquide ozonisée [22].



Figure II.29 Système portable de production d'eau ozonée

II.6.3. Domaine d'application

Il y a un grand intérêt pour l'utilisation de l'ozone pour traitement de l'air dans et dans les autres domaines (chambres froides, agriculture...)

A. L'ozone pour le stockage des produits agroalimentaires

Il y a dans l'industrie alimentaire un grand intérêt pour l'utilisation de l'ozone de manière à améliorer le stockage de produits alimentaires (chambres froides) tels que fruits, légumes, fleurs, viande, poisson, fromage, etc. Des nombreux projets expérimentaux ont été réalisés avec succès. Les applications les plus fréquentes de l'ozone dans l'industrie agroalimentaire sont :

- ✓ Extension de vie de stockage en marché-qualité (conservation)
- ✓ Contrôle de germes pathogènes (désinfection)
- ✓ Ralentissement du processus de maturation des fruits et des légumes

Le plus souvent, l'ozone est utilisé pour remplacer le chlore. L'ozone est un Oxydant fort, qui ne laisse aucun reste ou dérivé nuisible et il agit sur une large gamme de micro-organismes [25].

II.7. 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 :

- **Carte Arduino** : permet la commande de système avec un programme.
- **Optotriac de type MOC3041**

La carte Arduino ou un petit circuit peuvent piloter un triac de puissance pour allumer ou éteindre une charge branchée sur le réseau : ampoule, chauffage, moteur électrique, etc. Pour la sécurité électrique, il faut une isolation entre la partie commande et la partie réseau. Voir (Figure II.30).

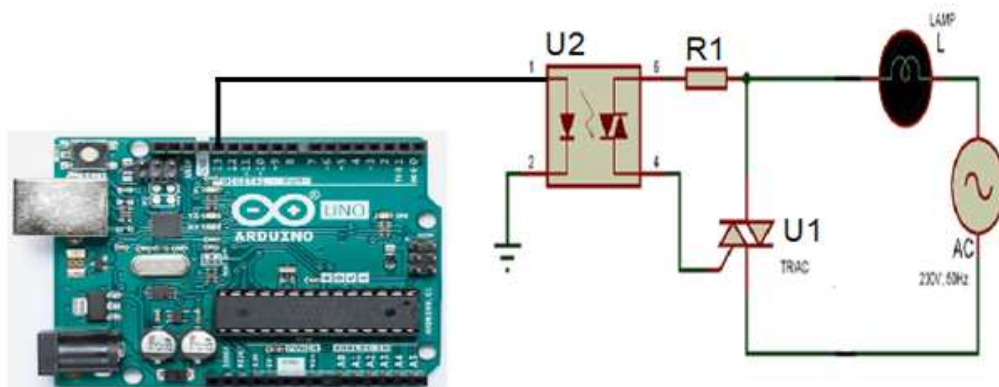


Figure II.30 : Schéma du système électrique de commande

II.8. 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)

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 et de traitement d'eau.



Chapitre III

Alimentation de traitement d'eau par l'ozone

CHAPITRE III : ALIMENTATION DE TRAITEMENT D'EAU PAR L'OZONE

III.1. Introduction :

Les données disponibles à partir de 2013 suggèrent que 17% de la population mondiale n'a pas accès à l'électricité, 95% d'entre eux vivent dans les pays suivants l'Afrique subsaharienne et l'Asie en développement, l'Afrique subsaharienne en tête avec 80 %. Ce manque d'accès à l'électricité réduit le nombre d'installations d'assainissement de l'eau ; la population est donc constamment exposée à un risque mortel lorsqu'il s'agit de l'eau potable parce que les sources d'eau sont souvent très polluées par des germes et des bactéries [34].

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 traitement d'eau d'un site isolé.

Le système photovoltaïque est composé d'un générateur photovoltaïque, d'un régulateur de charge et d'un onduleur monophasé en demi-pont. La charge est un générateur d'ozone, qui permet de traiter l'eau, lors de leur stockage grâce au puissant pouvoir désinfectant de l'ozone [35-36].

III.2. Description du système développé :

La figure (III.1) montre l'ensemble du système utilisé pour le traitement d'eau par 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.

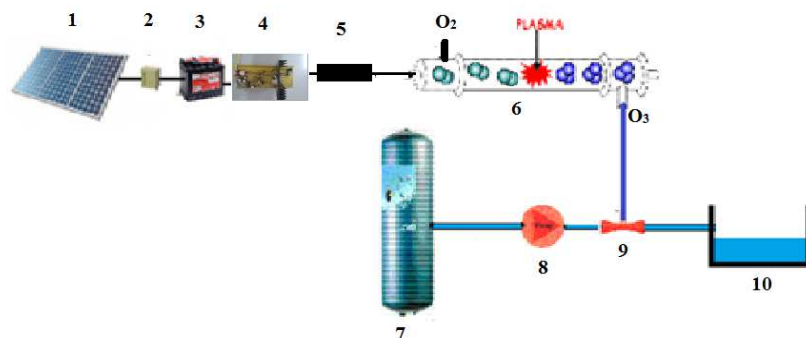


Figure III.1. Représentation schématique du montage développé

1- Panneau solaire	6- Générateur d'ozone
2- Régulateur de charge	7- Eau à traiter
3- Batterie	8- Moteur de pompage
4- Onduleur	9- Injecteur Venturi
5- Alimentation haute tension	10- Eau traitée

III.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 en fixe le panneau à $\beta = 45^\circ$ vertical afin de suivre le soleil et d'optimiser ainsi la surface exposée au soleil (Figure III.2). Les expériences ont été réalisées en fonction du temps, où chaque heure correspond à une rotation de 15° dans le sens Est-Ouest avec un panneau fixé à 45° dans le Sud à la ville de Sidi Bel Abbés, Algérie.



Figure III.2. Système photovoltaïque

III.2.1.1. Description du panneau :

Les données techniques du module sont illustrées au tableau III.1

Tableau III.1. Description du module PV

Type de module	Sun module SW 135 poly R6A STP 135-12/TB
Tension au MPP	17,7 V
Courant au MPP	7,67A
Puissance maximale P	135 W
Tension à vide U_0	21,8V
Courant de court-circuit I_{cc}	8,17A
Eclairement nominal	1000 W/m ²

III.2.1.2. Présentation :

La figure (III.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)

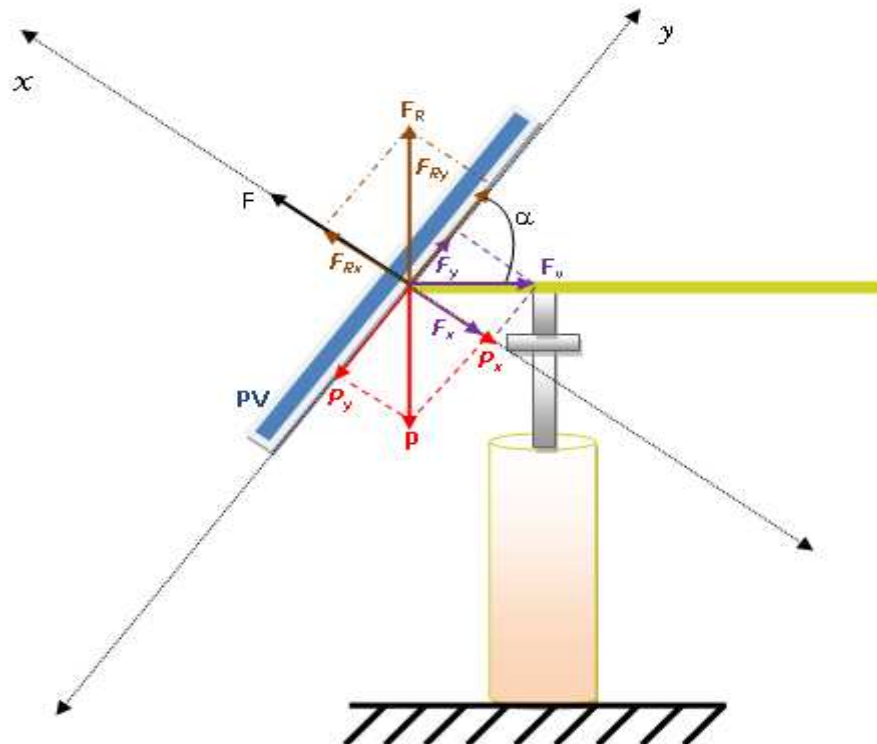


Figure III.3. Schéma cinématique d'un panneau photovoltaïque

III.2.1.3. Principe de fonctionnement

La rotation imposée manuellement 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.

III.2.1.4. 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 protège le panneau.

Le régulateur (voir figure III.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.

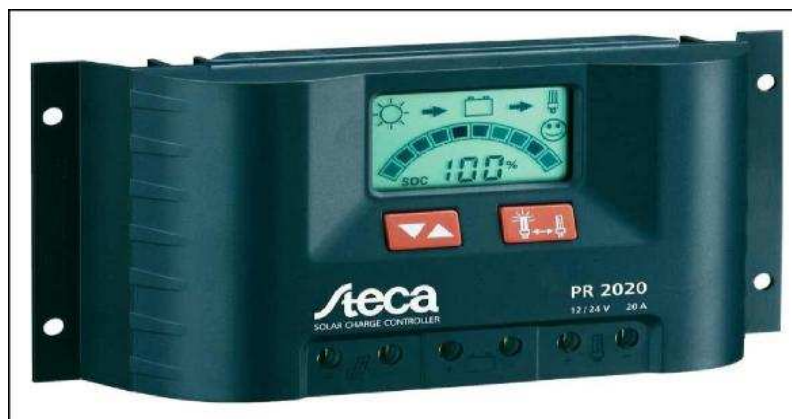


Figure III.4. Régulateur Photovoltaïque Stecca 2020 (12/24V 20A)

III.2.1.5. 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.

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 III.5)

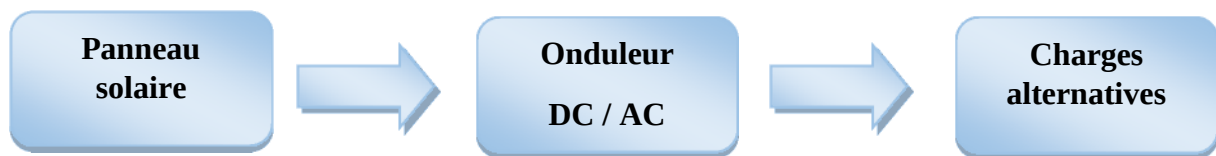


Figure III.5 : Batterie Isofoton 12V 80Ah

III.3. Réalisation et raccordement de l'onduleur photovoltaïque

L'objectif de la réalisation est d'étudier et de concevoir un onduleur solaire avec une tension d'entrée de 12VDC et une sortie à onde quasi-sinusoïdale 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. La partie commande est assurée par un Microcontrôleur.

III.3.1. schéma Synoptique



III.3.2. Description

La figure III.6 donne la structure générale du système photovoltaïque simulé, lequel se présente sous la forme de deux blocs : la partie puissance et la partie contrôle commande.

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 drivers interrupteurs de puissance.

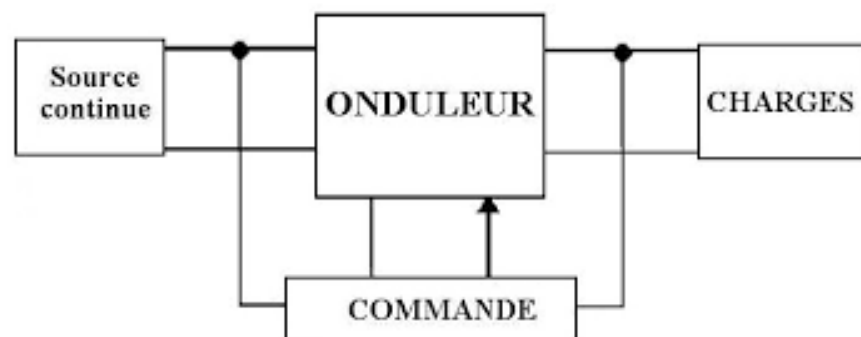


Figure III.6 Structure générale de l'onduleur

Dans notre cas, le cœur de la commande de l'onduleur est basé sur un microcontrôleur (16F628A) très puissant de la famille de Microchip. Ce microcontrôleur est responsable de la génération de l'onde sinusoïdale en temps réel.

III.3.3. Description de l'onduleur proposé

Le schéma du principe de fonctionnement de l'onduleur est présenté à la Figure III.7

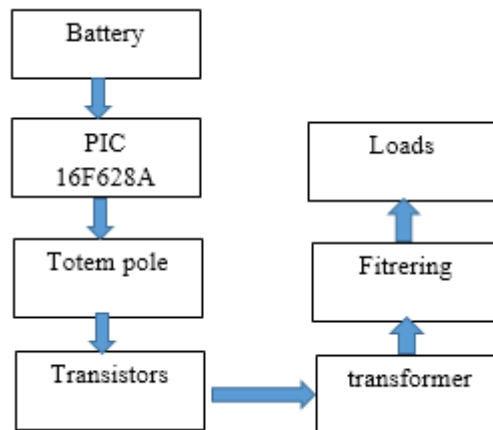


Figure III.7 Schéma du principe de fonctionnement de l'onduleur

Le circuit de base de l'onduleur monophasé en demi-pont est illustré à la figure.III.8.

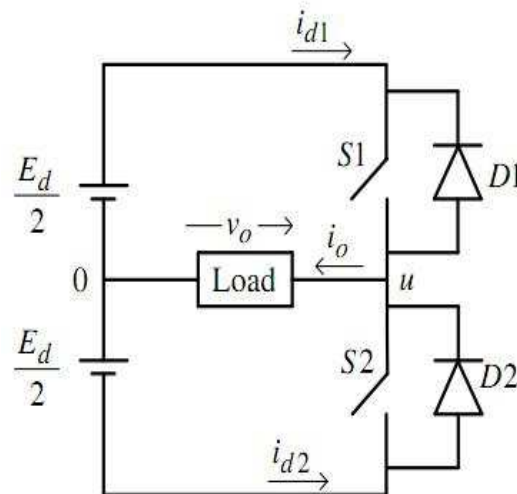


Figure III.8 Circuit de base de l'onduleur monophasé en demi-pont

La figure III.6 donne la structure générale du système photovoltaïque simulé, lequel se présente sous la forme de deux blocs : la partie puissance et la partie contrôle commande [37].

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 drivers interrupteurs de puissance [38].

III.3.4. Partie commande

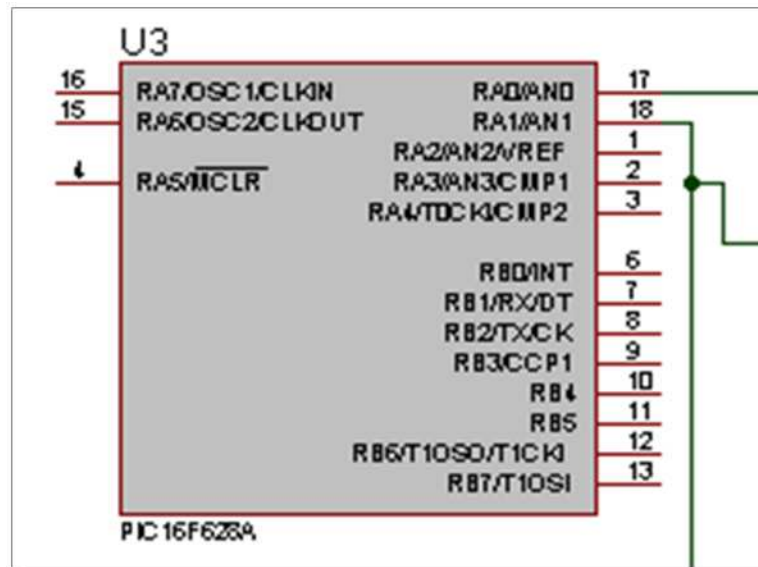


Figure III.9 Circuit de commande

Le cœur de cette partie est un pic microcontrôleur de type 16F628A (Figure III.9) qui facilite la génération des signaux de commande MLI.

III.3.4.1. Définition du microcontrôleur

C'est un ordinateur monté dans un circuit intégré. Les avancées technologiques en matière d'intégration, ont permis d'implanter sur une puce de silicium de quelques millimètres carrés la totalité des composants qui forment la structure de base d'un ordinateur. Comme tout ordinateur, on peut décomposer la structure interne d'un microprocesseur en trois parties :

- Les mémoires.
- Le processeur.
- Les périphériques.

C'est ce qu'on peut voir sur la figure (III.10).

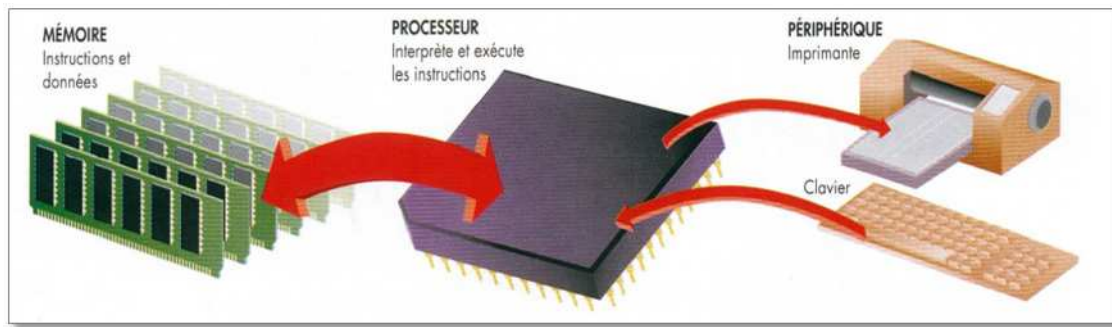


Figure III.10 Structure interne d'un microprocesseur

- Les mémoires sont chargées de stocker le programme qui sera exécuté ainsi que les données nécessaires et les résultats obtenus.
- Le processeur est le cœur du système puisqu'il est chargé d'interpréter les instructions du programme en cours d'exécution et de réaliser les opérations qu'elles contiennent. Au sein du processeur, l'unité arithmétique et logique interprète, traduit et exécute les instructions de calcul.
- Les périphériques ont pour tâche de connecter le processeur avec le monde extérieur dans les deux sens. Soit le processeur fournit des informations vers l'extérieur (périphérique de sortie), soit il en reçoit (périphérique d'entrée).

III.3.4.2. Présentation générale du PIC 16F628A

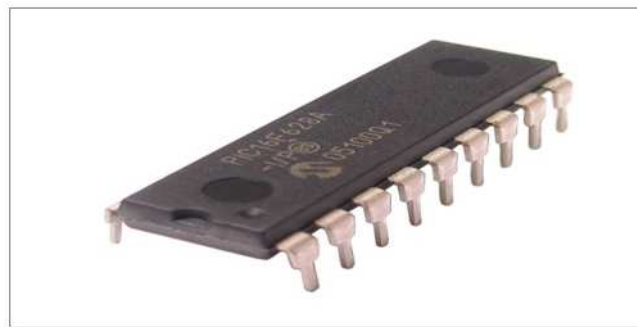


Figure III.11 Photo d'un PIC 16F628A

Le microcontrôleur PIC 16F628A est un des modèles (le plus courant et un des plus petits) de la famille des circuits microcontrôleurs de Microchip. Présenté en boîtier DIL (Dual In Line) 18 broches, il possède de nombreuses et performantes caractéristiques. Les principales sont :

- Une programmation facile en langage Basic ou en assembleur.
- Son faible coût.

- La possibilité d'être programmé in situ.
- Un oscillateur interne de 4MHz ou externe. Pour un besoin de précision ou de fréquence différente de 4MHz et jusqu'à maximum 20MHz, il faut ajouter un quartz ou un circuit RC 16 lignes d'Entrées / Sorties :
 - ✓ 8 lignes sur le port A (avec possibilité sur 4 entrées de convertir sa valeur analogique en un mot numérique).
 - ✓ 8 lignes sur le port B.
- Architecture RISC (Reduced Instructions Set Computer : jeu d'instructions réduit qui convient à de petits programmes).
- Une mémoire programme contenant 2048 instructions (codées sur 14 bits).
- Une mémoire RAM de données de 224 octets.
- Une mémoire EEPROM de 128 octets.
- Des temporisateurs et un chien de garde.
- Une interface de transmission série.

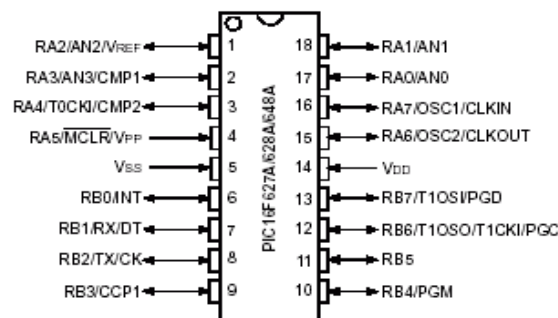


Figure III.12 : Dénomination des broches dans un boîtier DIL 18 broches

On remarquera que toutes les broches du circuit (sauf Vss, Vdd et RB5) ont plusieurs fonctions. Le choix de la fonction utilisée se fait par programmation.

On distingue en particulier :

- VDD et VSS représentent respectivement l'alimentation 5V et 0V du circuit.
- Les deux broches OSC1 et OSC2 servent à recevoir si besoin le quartz destiné à l'oscillateur.
- MCLR (Master CLeAr) active à 0 correspond à l'entrée d'Initialisation (Reset) du circuit.
- RB0 à RB7 représentent les 8 lignes du port B et RA0 à RA7 les 8 lignes du port A, pouvant toutes être définies par programmation en entrées ou en sorties.

III.3.4.3. Architecture de pic microcontrôleur

PIC16F628A possède une architecture RISC Harvard. L'architecture de Harvard est un concept plus récent que von Neumann. Il est passé sur la nécessité d'accélérer les travaux d'un microcontrôleur. Dans Harvard les noeuds de données d'architecture et les nœuds d'adresse sont séparés. Ainsi, une plus grande circulation des données est possible grâce à l'unité centrale de traitement et bien sûr une plus grande vitesse de travail. La séparation d'un programme de la mémoire de données, il est en outre possible pour obtenir des instructions de ne pas avoir être 8 bits pour les instructions qui permettent toutes les instructions pour être un mot d'instructions. Il est également typique de l'architecture de Harvard pour avoir moins d'instructions que von Neumann et d'avoir des instructions généralement exécutées en un seul cycle. Microcontrôleurs avec l'architecture de Harvard sont également appelés «microcontrôleurs RISC». Figure 3.13 présente le bloc interne du PIC16F628A.

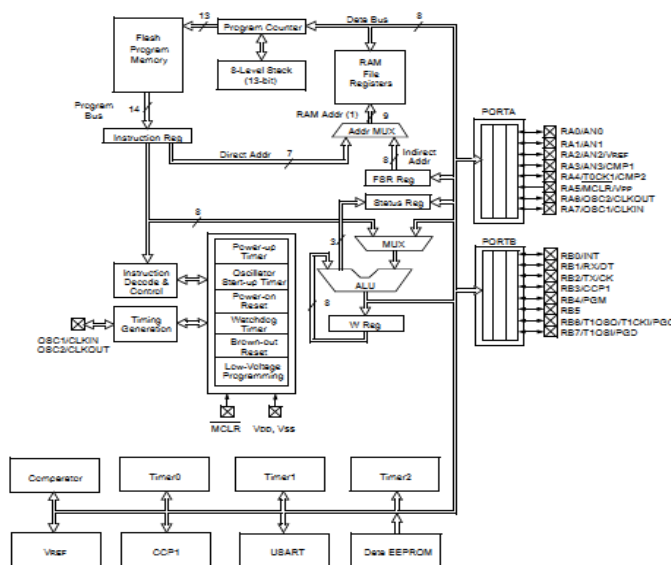


Figure III.13 : Schéma de principe interne du PIC16F628A

RISC signifie Reduced Instruction Set Computer. Microcontrôleurs avec l'architecture de Von Neumann sont appelés «microcontrôleurs CISC, qui signifie Instruction Set Computer Complex. PIC16F628A est un microcontrôleur RISC qui signifie qu'il a un ensemble réduit d'instructions, plus précise 35 des instructions. PIC16F628A convient parfaitement de nombreuses utilisations, des industries de l'automobile et les appareils ménagers de contrôle aux instruments industriels, capteurs à distance, verrouillage des portes électriques et dispositifs de sécurité. Il est également idéal pour

les cartes à puce, ainsi que pour les appareils en raison de sa faible consommation d'énergie batterie fournie.

ALGORITHME

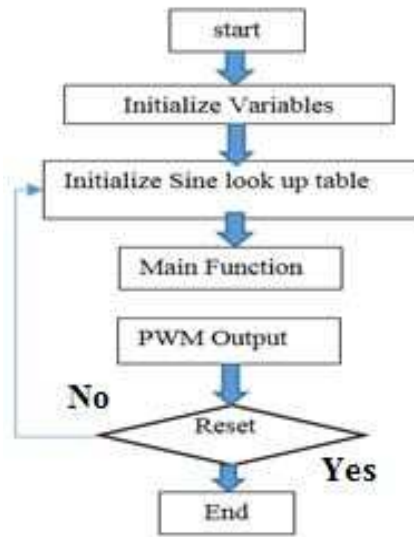


Figure III.14 Organigramme du signal PWM monophasé

La Figure.III.14 montre l'organigramme du signal PWM sinusoïdal monophasé. Dans cet organigramme "initialiser les variables" signifie initialiser la cellule de mémoire définie par l'utilisateur. Puis "Initialisation Sine Table de consultation" stocke la valeur d'échantillonnage d'onde sinusoïdale. Ces valeurs d'échantillonnage vont dans le registre PDC [39].

Le registre PTMR va générer l'onde Triangulaire. Ensuite, le signal devient signal PWM sinusoïdal avec un temps mort. Le microcontrôleur vérifie si la génération est terminée ou non. Si oui, il prend un autre échantillonnage de la table d'onde sinusoïdale, Sinon, il attend jusqu'à la fin [2]. Pour générer le signal modulé en largeur d'impulsion sinusoïdale nous divisons chaque demi-cycle d'onde sinusoïdale en 32 parties, puis nous mesurons la valeur de l'onde sinusoïdale à chaque intervalle pour calculer le cycle de service de chaque impulsion [9]. Le calcul du rapport cyclique pour générer des impulsions sont données ci-dessous :

$$\text{Fréquence porteuse } f_c = 4000 \text{ Hz} \quad (\text{III.1})$$

La plus haute valeur de PWM pour le PIC16F628A est égale à 255 (à savoir le devoir de 100%) L'intervalle d'un point à un autre point est :

$$\delta\theta = 1/180 = 5.625^\circ \quad (\text{III.2})$$

L'équation de rapport cyclique est :

$$Y = 255 \sin \omega t = 255 \sin \eta \delta\theta \quad (\text{III.3})$$

$$\eta = 0, 1, 2, 3, \dots, 31 \quad (\text{III.4})$$

III.3.4.4. Principe de génération de MLI

L'onduleur délivre plusieurs créneaux positifs et négatifs (Figure III.14), ce qui permet de diminuer l'importance du filtre et d'avoir un régulateur de tension plus rapide. En modulant les temps relatifs de conduction et de blocage, il est possible de répartir la tension au cours de la période de façon à ce que pratiquement le temps de conduction d'un interrupteur soit proportionnel à la valeur instantanée du fondamental.

C'est ce principe qui est appelé Modulation de Largeur d'Impulsion et qui est noté MLI.

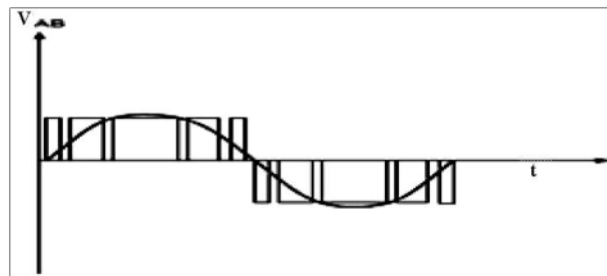


Figure III.15. Modulation de largeur d'impulsion

Dans cet onduleur, nous avons un demi-pont de puissance avec 02 transistors : Q1, Q2. La tension rectangulaire obtenue entre A et B est ensuite filtrée pour obtenir en sortie de l'appareil une tension sinusoïdale avec un faible taux de distorsion [40].

- **Circuit du driver**

Pour commander la grille de transistor, nous avons utilisé cet étage amplification basé sur deux transistors :

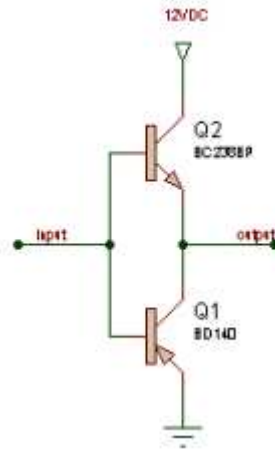


Figure III.16 : Schéma de la configuration de l'étage d'amplification

Le pilote de grille est nécessaire pour passer 12V DC à grille de transistor. Il existe différentes méthodes pour générer la tension de grille (VBS) [41-42].

III.3.4.5. Programmation de pic 16F628A

Elle nécessite l'emploi d'une carte de programmation à relier à un PC via une liaison série RS232 (COM1 ou 2 du PC). Le PC est équipé du logiciel de programmation ICPROG. La carte dispose d'un emplacement destiné à recevoir le composant à programmer.



Figure III.17. Carte de programmation

Il est impératif de faire dans l'ordre les manipulations suivantes :

1. Placer le circuit intégré PIC sur la carte de programmation.
2. Brancher la carte sur la liaison série d'un PC via le câble à connecteurs DB9.

3. Programmer avec le logiciel ICPROG.
4. Après la programmation, il faut débrancher la carte programmeur du PC.
5. Enlever le circuit intégré PIC.
6. Placer le PIC sur son montage et tester le fonctionnement attendu.

a. Application pratique du circuit

notre syteme se compose en deux partie :

- Partie commande : qui contient un bloc d'alimentation et un bloc de commande (micro controlleur)
- Partie puissance : Le schéma de raccordement du circuit de puissance est représenté sur la figure III.20. a et III.20.b respectivement

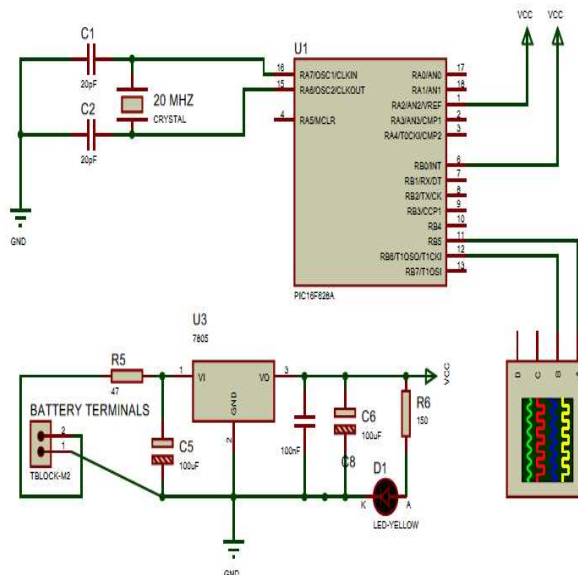


Figure III.18 Schéma de circuit de commande

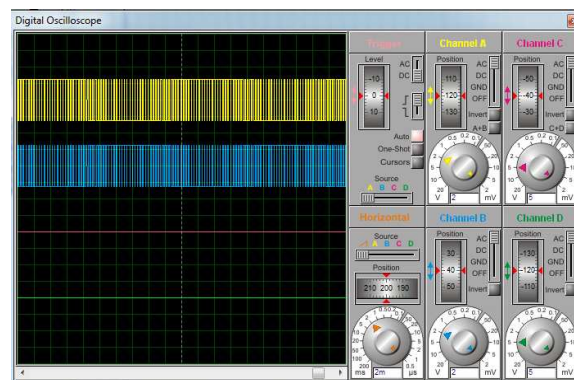


Figure III.19. Signaux de commande

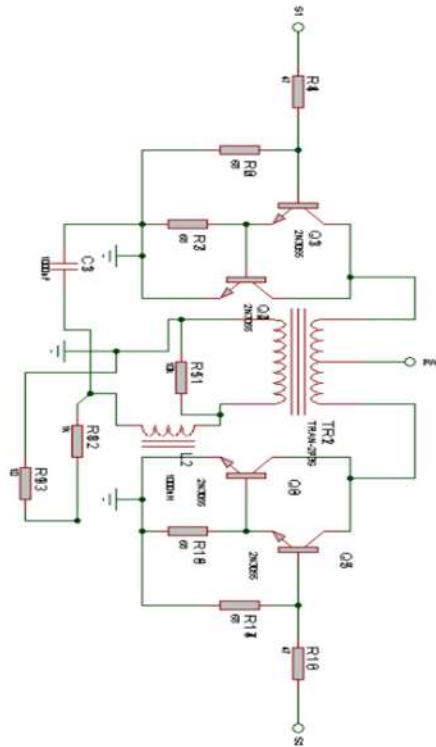


Figure III.20.a. Schéma de raccordement du circuit de puissance

Le circuit de puissance est un demi-pont. Dans notre circuit, nous utilisons deux transistors de type (2N3055) connectés en série à la jambe de demi-pont. Deux transistors sont utilisés pour augmenter le courant nominal du circuit. Total 8 n transistors sont utilisées dans notre projet. En sortie de microcontrôleur est maximale 5V qui est directement à la grille du transistor, mais transistor n'est pas actif jusqu'à 12V que la raison pour laquelle nous avons besoin de pilote de Transistor pour notre circuit.

• Réalisation de la maquette

La partie commande est branchée avec la partie puissance de circuit ça veut dire sur la même maquette pour obtenir un montage onduleur parfait.

La configuration u tracer de circuit imprime est simple, à partir de circuit électrique la reproduction du circuit imprimer est aisée par l'usage d'un logiciel TCI.

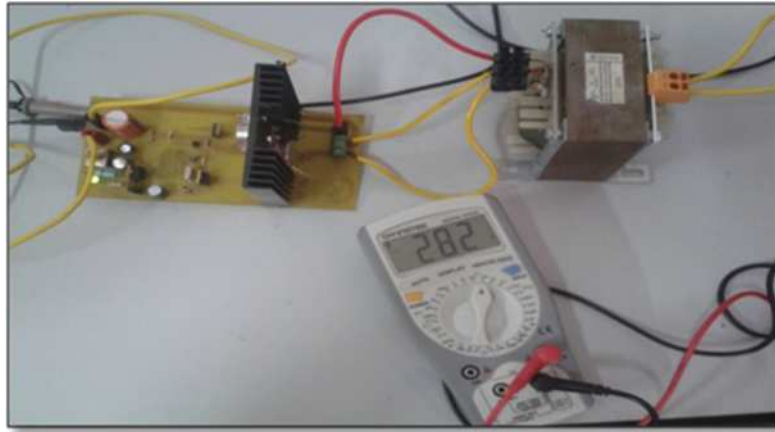


Figure III.20.b Photographie de l'onduleur réalisé

III.4. RÉSULTAT EXPERIMENTAL

La figure III.20.a illustre la configuration de l'onduleur ; la figure III.21 montre les commutateurs SPWM qui émettent des signaux de déclenchement à une fréquence de 4MHz et une amplitude de 5V, la sortie de l'onduleur est illustrée à la figure III.22 ; il s'agit d'une onde sinusoïdale d'une amplitude de 12V et d'une fréquence de 50Hz [43-44].

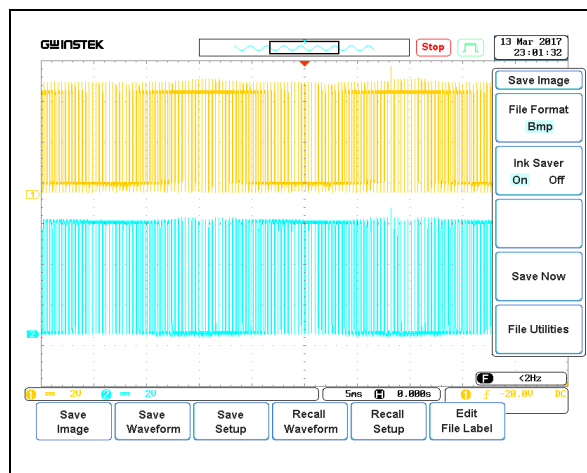


Figure III.21. forme du Signale PWM

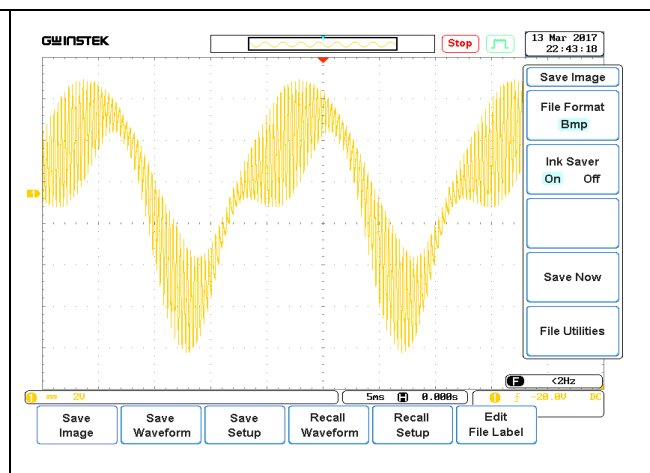


Figure III.22. Forme du courant d'onduleur

III.5. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU GENERATEUR D'OZONE

Le réacteur de surface (SDBD) est fabriqué avec le même tube de verre, où l'électrode extérieure en acier inoxydable a été remplacée par un ruban d'aluminium collé sur la surface extérieure du tube de verre, et l'électrode intérieure a été remplacée par un maillage en acier inoxydable, de 0,75 mm d'épaisseur et de 1 mm² de surface carrée, en contact avec la surface intérieure du tube de verre. Dans cette configuration, la décharge se produit sur la surface de l'électrode à mailles en contact avec le verre et

de 35 mm de diamètre extérieur, est insérée à l'intérieur du réacteur, presque en contact avec l'électrode à mailles, le gaz s'écoule dans l'espace étroit entre les deux tubes coaxiaux Fig.13 (a) et Fig.13 (b) [45-46].



Figure III.23.a Photographie du générateur d'ozone

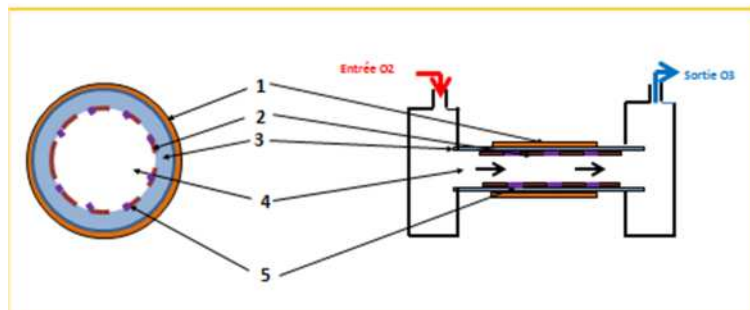


Figure III.23.b Décharge de la barrière diélectrique surfacique

- 1- Électrode mise à la terre
- 2- Electrode à maille HV
- 3- Tubes de verre
- 4- Débit de gaz
- 5- Plasma

L'alimentation électrique de haute tension utilisée dans cette étude est de type à commutation. Une tension AC 220 V est abaissée à l'aide d'un transformateur abaisseur et redressée en une tension continue d'environ 72 V. un interrupteur commandé IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) a été utilisé comme interrupteur électronique et commandé par un oscillateur pour générer un courant à haute fréquence. Un transformateur à ferrite a été utilisé pour transformer la basse tension haute fréquence en une haute tension, une tension de 1-10 kV à une fréquence de 0-30 kHz a été obtenue. Dans ce travail, la fréquence d'oscillation produisant la DBD est de 20 kHz [47].

Toutes les expériences ont été effectuées dans des conditions météorologiques stables de température (25-40° C) et d'humidité (70-80%).

III.5.1. MÉTHODOLOGIE DE LA CONCEPTION EXPÉRIMENTALE

Nous avons la production d'ozone par un système photovoltaïque par l'intermédiaire d'onduleur commandé par le microcontrôleur. Cette charge simule la quantité de traitement de l'eau. Les "Figures a,b,c,d,e,f et g" représente le résultat expérimental de différentes grandeurs électriques (la puissance de panneau (courant, tension), irradiance, la puissance de générateur (courant, tension), décoloration d'ozone) pour différents temps.

Système solaire photovoltaïque comprend deux facteurs de contrôle :

- l'angle d'orientation de l'Est du panneau
- Angle Nord-Sud de l'orientation du panneau

Les expériences ont été réalisées en tant que première fonction du temps, où chaque heure correspond à une rotation dans le sens est-ouest de 15 ° pour des valeurs différentes et un panneau fixe à 45 ° sud.

III.5.2. Méthode de fonctionnement du dispositif de traitement d'eau

Le procédé de traitement de l'eau est un circuit ouvert dans le premier cycle, l'eau « coloré » sort du réservoir (qui simule à la source d'eau souterraine) et l'eau traitée revient dans un autre réservoir de stockage. Après le remplissage de ce dernier le procédé de traitement devient un circuit fermé, la pompe aspire l'eau du réservoir de stockage avec un débit choisi, le système d'injection Venturi permet d'injecter l'ozone produit par le générateur dans le circuit d'eau. En effet, une aspiration se produit au niveau de l'injecteur Venturi, qui va permettre d'assurer le mélange de l'eau avec l'ozone, l'eau traitée revient dans le même réservoir.

- **ESSAIS PRELIMINAIRES**

Avant de connecter le système de pompage et traitement d'eau avec le générateur photovoltaïque, nous avons fait des essais préliminaires simulant un bilan de puissance pour déterminer la puissance maximale consommée par le système et voir si le générateur photovoltaïque peut alimenter ce système.

Pour cela on effectue le traitement d'eau avec différentes valeurs de débit d'eau (1, 2.5, 5 L/min).

- On fait le traitement d'un volume de 15L de l'eau infectée par un colorant alimentaire, le débit d'oxygène est fixé à 1L/min.
- On met le dispositif en marche et on prélève des échantillons d'eau avant

Traitement et chaque deux minute de traitement pendant 30 minutes en mesurant la température et la puissance avant tous prélèvements.

- Après on mesure l'absorbance de chaque échantillon de l'eau à l'aide du Spectrophotomètre UV.

La mesure de l'absorbance nous permet de calculer la décoloration de l'eau
Suivant la formule (III.5).

$$T (\%) = \frac{ABS_0 - ABS_1}{ABS_0} \times 100 \quad (III.5)$$

ABS_0 : absorbance de l'eau colorée

ABS_1 : absorbance de l'eau

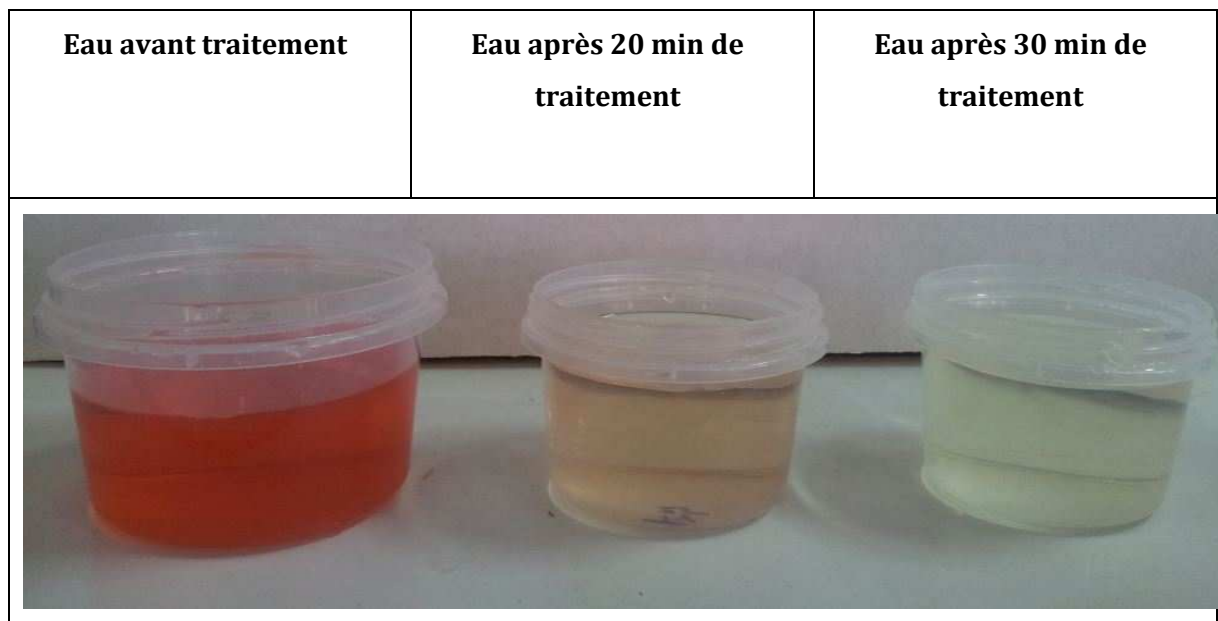
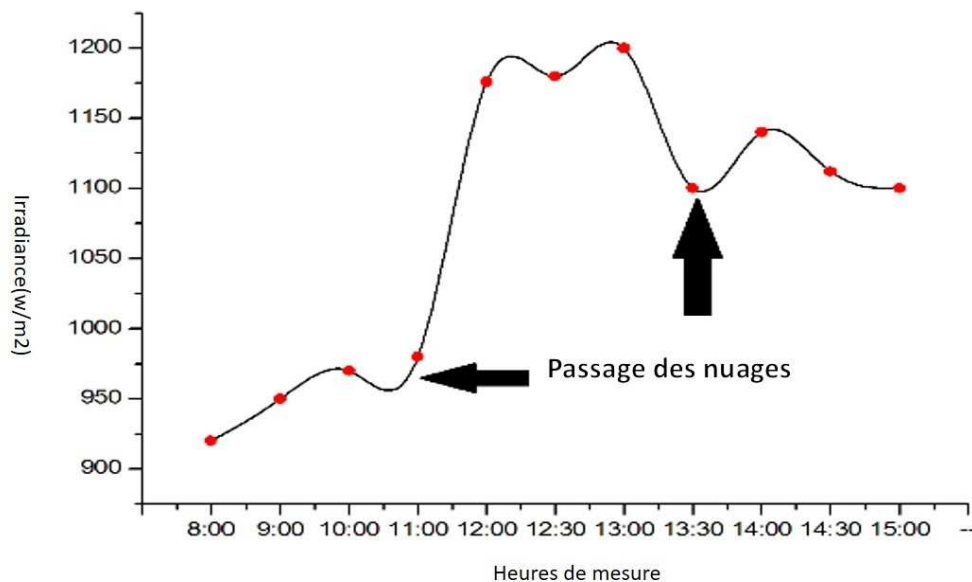


Figure III.24. Comparaison entre la couleur d'eau avant et après traitement

TABLE III.2. Résultats de la conception expérimentale

Le temps	irradiation (W/M ²)	P charges (W)	Courant de charge (A)	Décoloration (%)	Panneau (W)	Ip (A)	Vp (V)
08:00	920	28	0.12	86%	66.3	5.20	12.75
09:00	950	27	0.13	86%	69.66	5.40	12.9
10:00	970	28	0.13	87%	71.50	5.50	13.00
11:00	980	28	0.13	88%	76.18	5.86	13.00
12:00	1176	28	0.12	93%	122.29	9.48	12.9
12:30	1180	30	0.14	87%	120.44	9.41	12.8
13:00	1200	28	0.12	84%	112.14	8.90	12.6
13:30	1100	26	0.13	86%	109.62	8.70	12.6
14:00	1140	27	0.14	90%	100	8.00	12.50
14:30	1112	29	0.15	86%	88.56	7.20	12.30
15:00	1100	28	0.13	81%	84.96	6.88	12.35

**Figure III.25 (a)** Irradiation du panneau PV

1- Selon la Fig.15(a), une augmentation de l'éclairement a été observée de 8h00 à 10h00 du matin. Une diminution de l'éclairement à 11h00 et 13h00 a été observée en raison du passage des nuages.

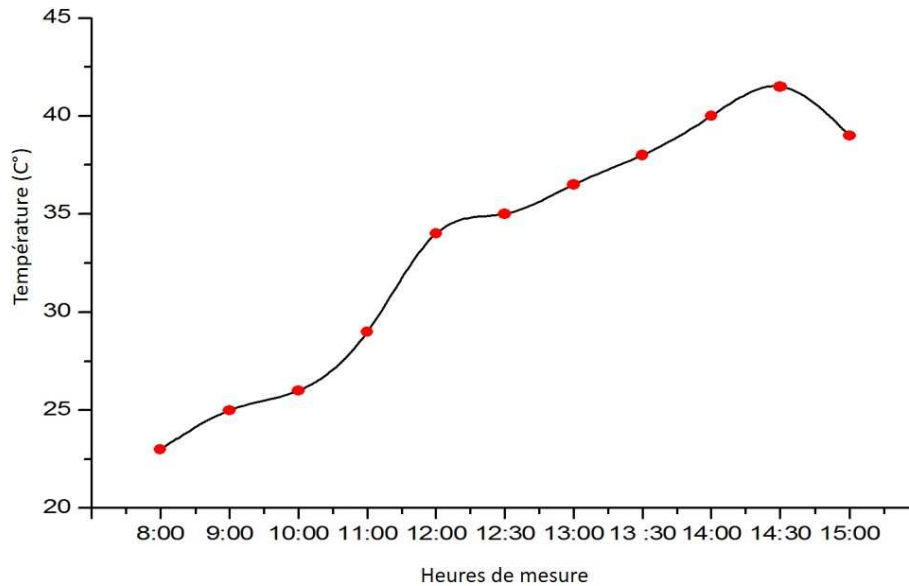


Figure III.25 (b) Température journalière

2- La figure III.25 (b) montre une augmentation de la température pendant la journée avec une température maximale de 41,5°C à 14h30, et après 15h00, la température a diminué progressivement.

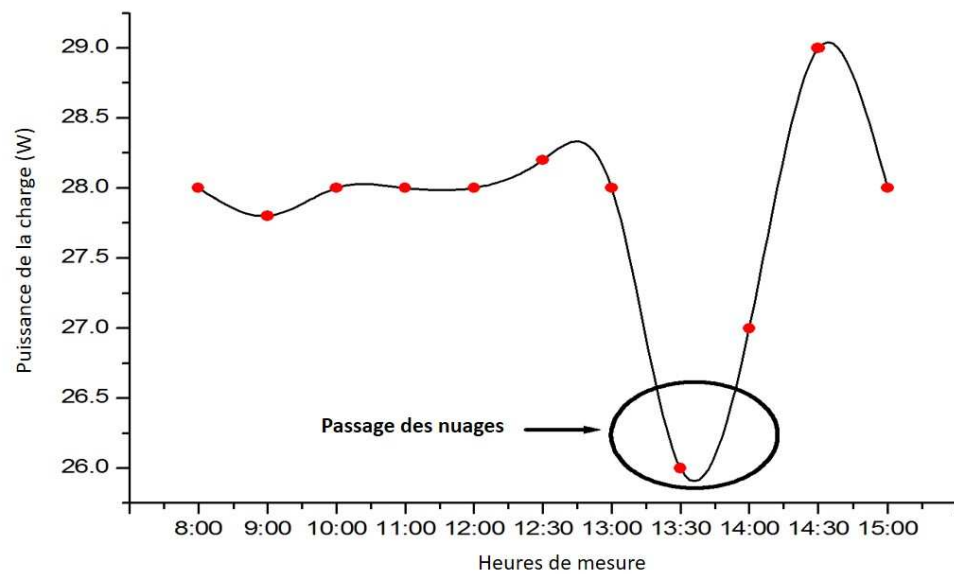


Figure III.25 (c) Puissance de charge

3- La figure III.25(c) montre une stabilité approximative de la consommation d'énergie de 8h00 à 13h00. À 13h30, une baisse de puissance s'est produite en raison d'une augmentation de la température, ce qui a eu un effet négatif sur la consommation d'énergie.

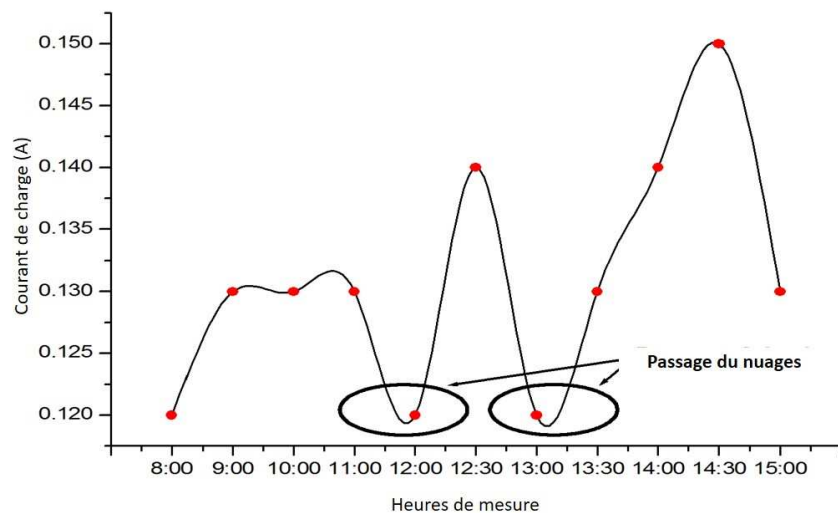


Figure III.25 (d) Courant de charge

4- L'augmentation du courant des panneaux PV entre 8h00 et 11h00 était due à une augmentation de l'irradiation. Entre 11h00 et 13h00, l'ombrage partiel (nuages), comme le montre la figure III.25 (d), a provoqué une diminution du courant.

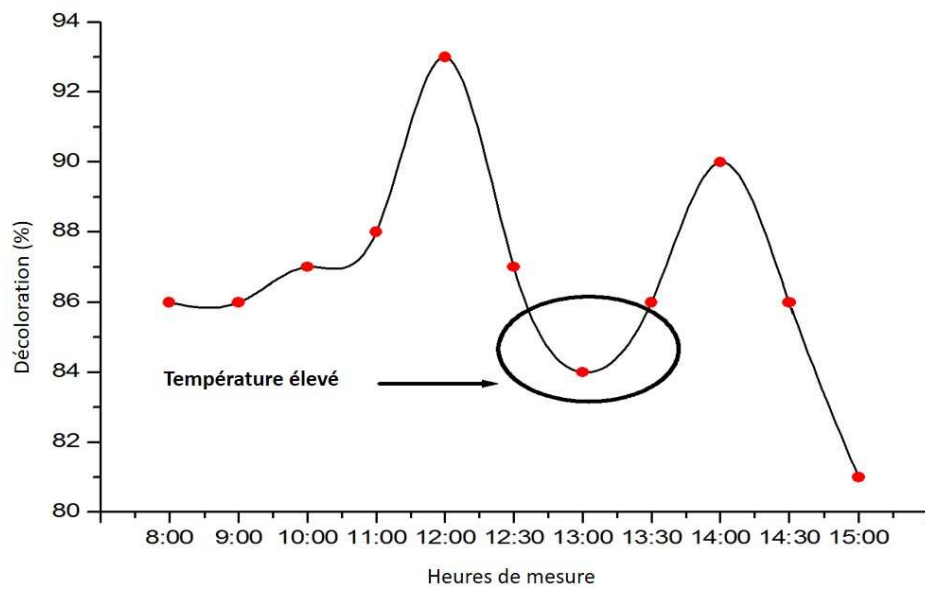


Figure III.25 Décoloration ozone

5- La figure III.25 (e) montre que la décoloration en O₃ dépend du changement de température. Une augmentation de la température diminue la production d'O₃ (à 13h00), ce qui indique que la température est inversement proportionnelle à la décoloration d'O₃.

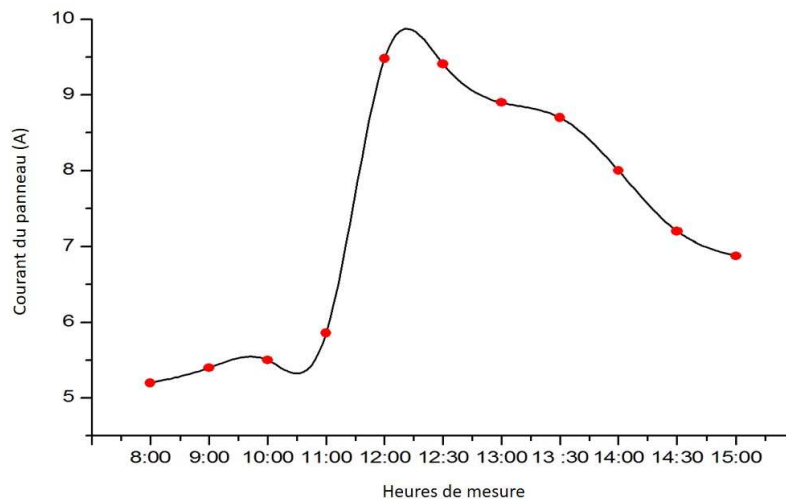


Figure III.25 (f). Courant de sortie du panneau PV

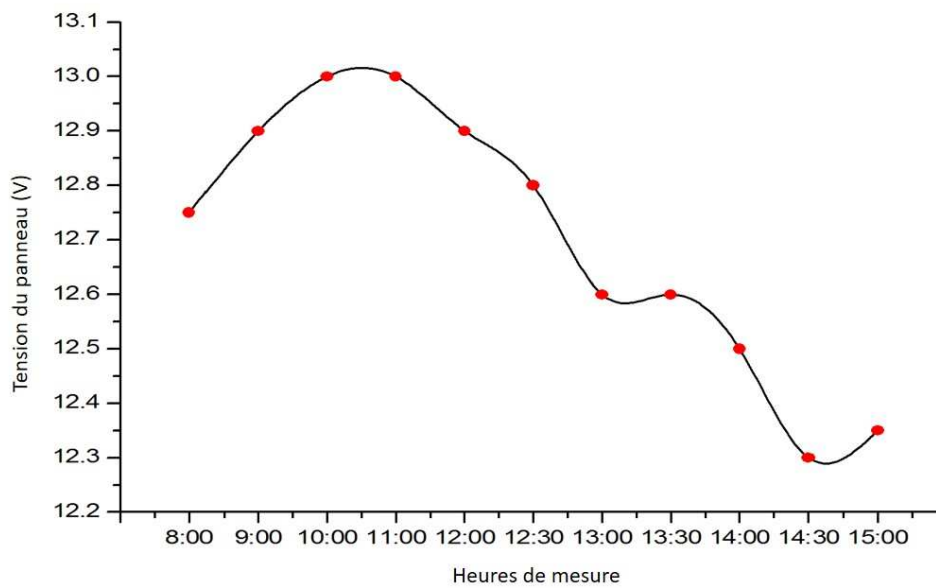


Figure III.25 (g). Tension de sortie du panneau PV

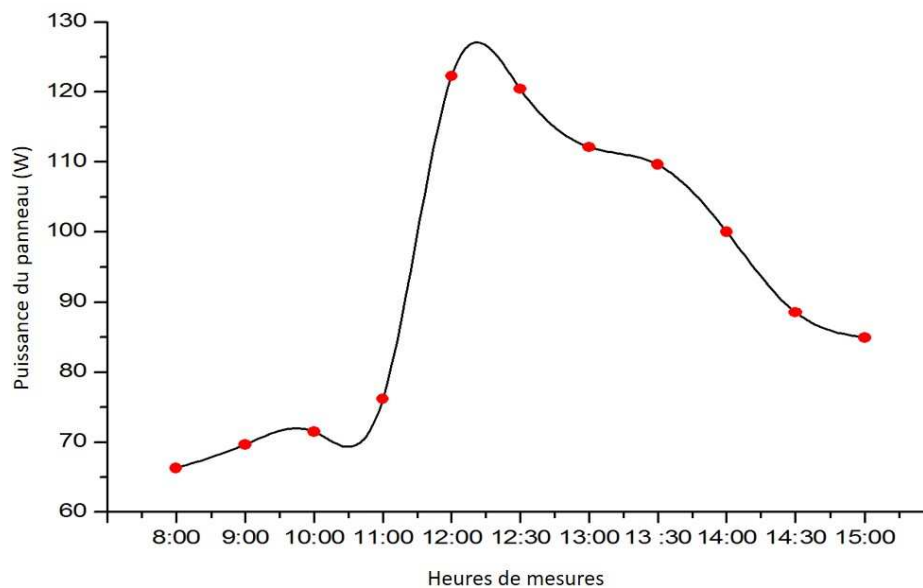


Figure III.25 (h). Puissance de sortie du panneau PV

6- Pour une irradiation de 1176 W/m^2 , le générateur d'O₃ était représenté par une charge résistive de 28 W, consommant 0,12 A de courant. Le traitement de l'eau a atteint le rapport de valeur maximale de 93 %, comme le montre la figure III.25 (f) (g) (h).

III.6. Conclusion

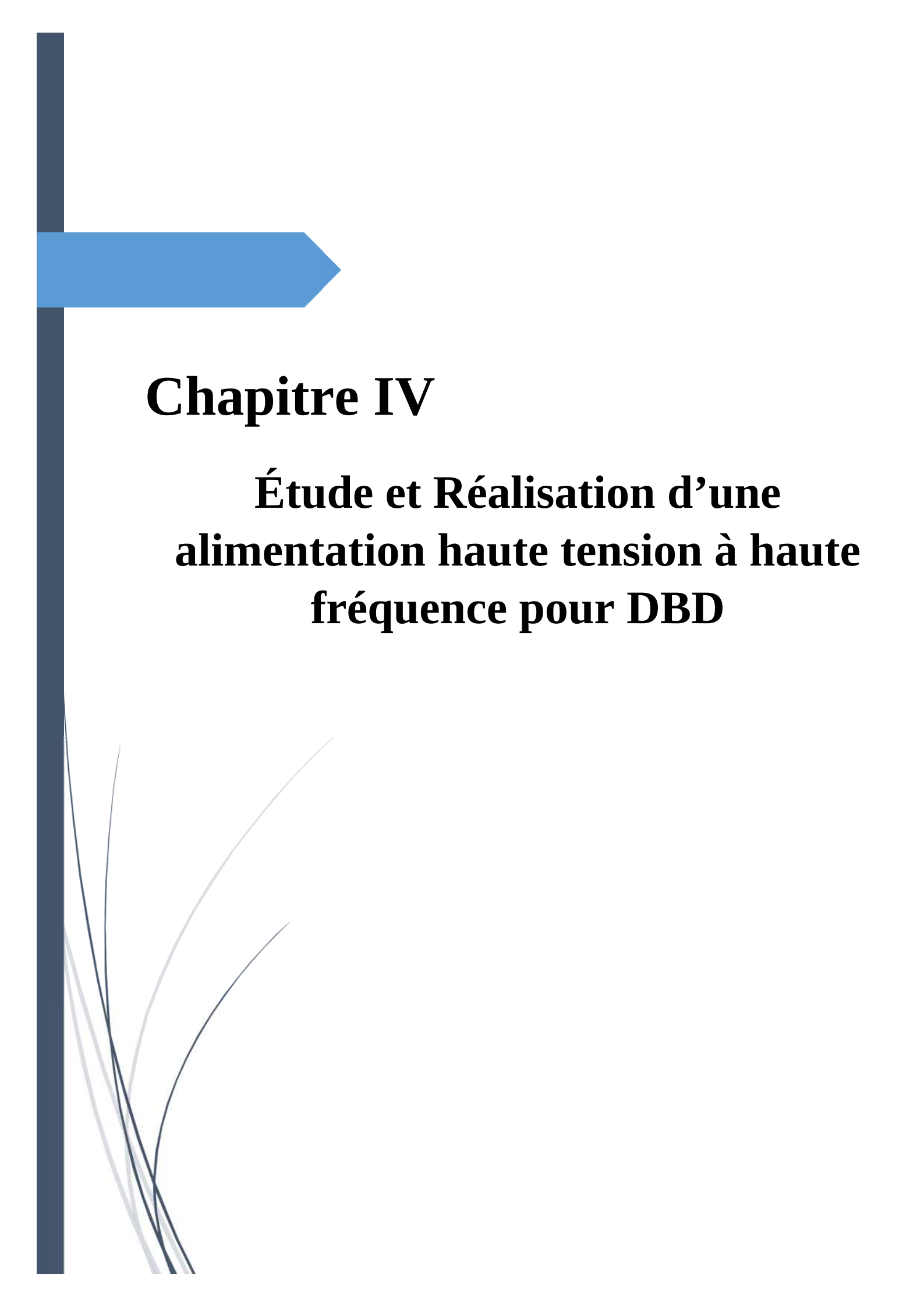
Dans cette étude, un nouveau système photovoltaïque adaptatif a été intégré pour le processus de production d'O₃.

Théoriquement, cette intégration peut être justifiée par deux techniques potentiellement prometteuses.

- Un onduleur solaire PWM simple, compact et peu coûteux a été développé. L'optimisation de la production d'O₃ par l'utilisation d'une source PV sont développées dans la simulation et valident concrètement, le générateur d'O₃ a été modélisé comme une charge électrique qui consomme la même énergie lorsqu'elle est placée sous le soleil et la température imposée par les conditions climatiques.

Malgré le nombre impressionnant de développements dans le domaine de l'énergie solaire ces dernières années, nous avons vu des études qu'il y a un problème de nuages qui provoque une insuffisance de l'énergie produite par les panneaux solaires comme dans notre cas, un panneau produisant 135W par jour ensoleillé ne pourrait produire que 66,3W (par temps nuageux) lors du passage des nuages, ce qui est suffisant pour produire de l'ozone.

L'une des raisons d'éviter d'utiliser des générateurs de surface DBD (SDBD) dans cette étude était la nature de l'électrode extérieure. Pour les générateurs SDBD, il faut utiliser un ruban métallique adhésif ou une électrode maillée comme électrode extérieure au lieu d'une électrode métallique. Par conséquent, les générateurs SDBD peuvent être fragiles et nécessiter plus de précautions lors de leur manipulation. De plus, le traitement de l'eau à grand débit nécessite encore une configuration optimisée pour une meilleure adéquation entre les molécules d'O₂ et le plasma. Cependant, le modèle SDBD devrait être utilisé fréquemment dans l'industrie pour se faire une idée plus précise de sa robustesse et de sa fiabilité. Ici, nous insistons sur le fait que l'énergie PV disponible est proportionnelle à la décoloration en O₃.



Chapitre IV

Étude et Réalisation d'une alimentation haute tension à haute fréquence pour DBD

CHAPITRE IV : ÉTUDE ET REALISATION D'UNE ALIMENTATION HAUTE TENSION A HAUTE FREQUENCE POUR DBD

IV.1. Introduction

Les alimentations électriques sont étudiées dans les laboratoires d'électronique et de génie électrique afin de caractériser leur comportement électrique et réaliser leur conception. Lorsqu'on connecte un dispositif de décharge à une alimentation électrique, ce sont donc deux mondes, qui n'ont pas les mêmes habitudes, les mêmes échelles de temps ni les mêmes préoccupations qui se rencontrent. Ce n'est pas la première fois que des études sont menées sur les décharges électriques et leur alimentations, mais il y a toujours une certaine méconnaissance du comportement électrique des plasmas par les électroniciens de puissance qui traitent et contrôlent l'énergie électrique ainsi que sa conversion en d'autres formes d'énergie afin de fournir des tensions et des courants aux différents types de charges selon les applications.

Le principe de l'alimentation proposée associe une interface de puissance et un convertisseur statique. La conception d'un convertisseur inspirée d'un onduleur monophasé en pont a été développée.

IV.2. Structure initiale de l'onduleur en pont

Les circuits de puissances des onduleurs de tension sont équipés d'éléments semi-conducteurs commandables à l'amorçage et au blocage (transistors, MOSFET, IGBT, GTO, etc.). Dans les onduleurs en pont, chaque borne du récepteur est reliée à la source de tension continue par deux interrupteurs à semi-conducteurs bidirectionnels en courant : l'un permet de la relier à la borne plus (+) de cette source, l'autre à la borne moins (-) de la source. Ces deux interrupteurs forment un bras de l'onduleur. Un onduleur monophasé en pont comporte deux bras tandis qu'un onduleur triphasé en pont possède trois bras (Figure IV.1).

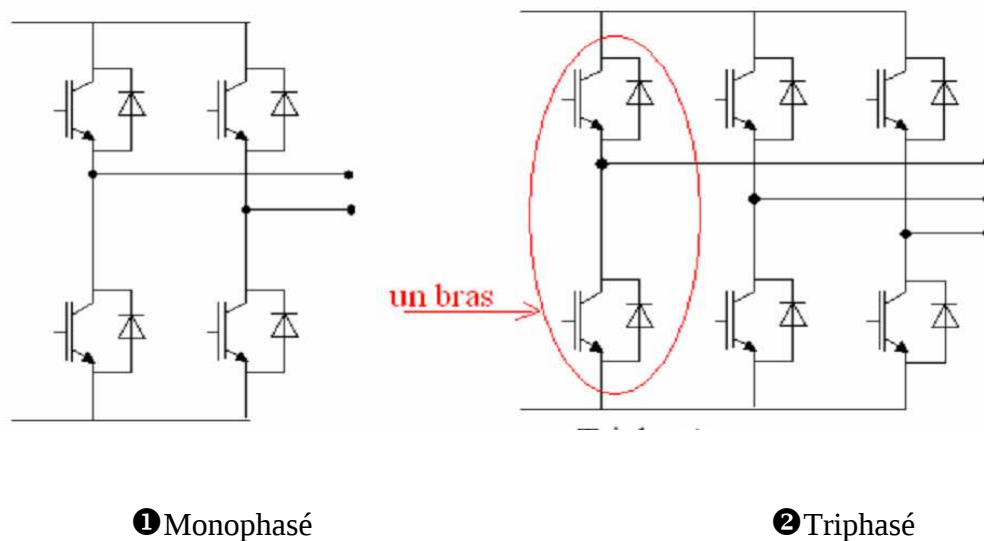


Figure IV.1 : Schéma de l'onduleur en pont

IV.2.1.Principe de fonctionnement de l'onduleur

Pour réaliser un onduleur, il faut travailler en commutation, en approchant la forme sinusoïdale par des signaux rectangulaires dont on ajuste le rapport cyclique.

L'onduleur monophasé est constitué de 8 commutateurs de courants placés en pont (Figure IV.2) :

- ➡ 4 interrupteurs à amorçage-blocage commandé à une période T, fonctionnant en simultané sur chaque diagonale du pont, mais par alternance de demi-période.
- ➡ 4 diodes de récupération si la charge peut rendre l'énergie électrique lorsqu'elle n'est plus alimentée.

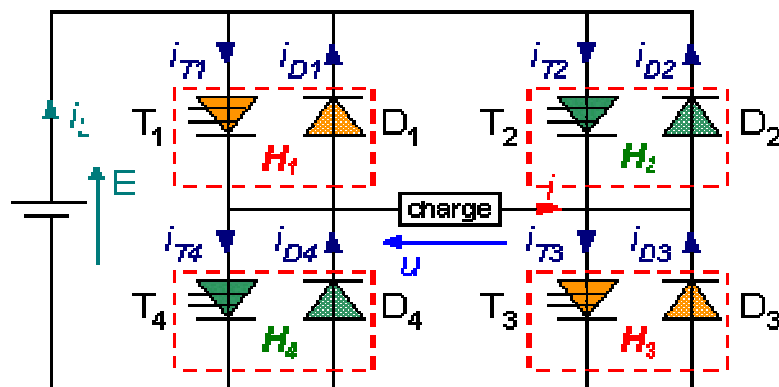


Figure IV.2 : Fonctionnement de l'onduleur

IV.2.2. Étude des séquences de conduction

L'étude porte essentiellement sur la circulation du courant. Le signe de la tension u aux bornes de la charge, ainsi que le sens de parcours de i , l'intensité du courant, indiquent de façon formelle les composants passants et non passants. Une fois ces éléments déterminés, il est indispensable de vérifier que les signes de u et i soient respectés en représentant le modèle équivalent qui convient, un interrupteur ouvert est symbolisé par un circuit ouvert, un interrupteur fermé par un fil.

Les interrupteurs commandés périodiquement et deux par deux passent de l'état bloqué à l'état passant aux instants t_1 et $(t_1 + T/2)$ où T est une période constante. Pendant la première demi-période ($0 \leq t < T/2$), la commande impose T_1 et T_3 fermé, T_2 et T_4 ouvert. Pendant la deuxième demi-période ($T/2 \leq t < T$), la commande impose T_1 et T_3 ouvert, T_2 et T_4 fermé.

Quatre phases sont présentées et se déroulent ainsi [62] :

Phase ① ($t_1 < t < T/2$) : La phase **d'alimentation** fait intervenir deux interrupteurs T_1 et T_3 . Nous commençons notre étude par cette séquence de conduction, elle est évidente, en effet l'intensité du courant est positive ainsi que la tension aux bornes de la charge. Les interrupteurs T_1 et T_3 sont fermés ce qui implique T_2 et T_4 ouverts. La circulation électrique ne peut se faire que par l'interrupteur T_1 et T_3 . Nous obtenons donc le schéma équivalent très simple suivant (Figure IV.3).

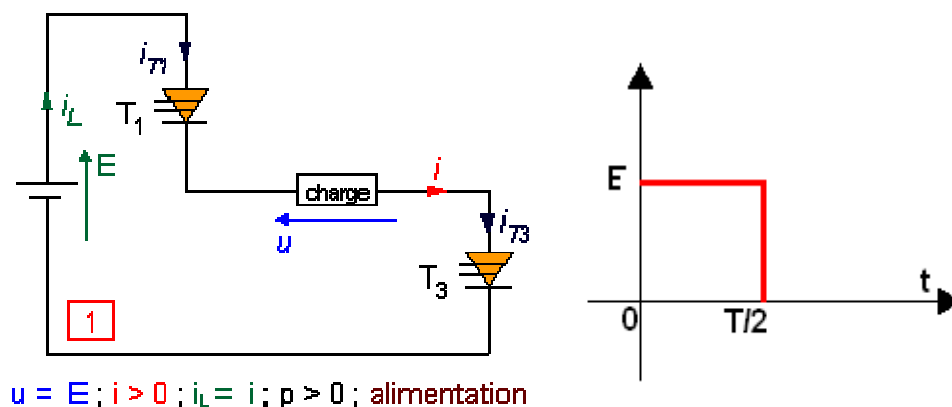
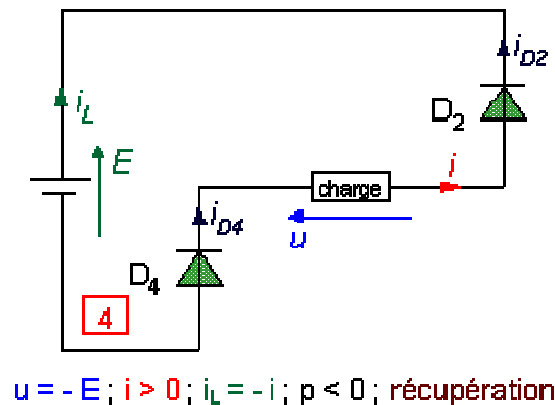


Figure IV.3 : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1^{er} demi-cycle.

Phase ② ($T/2 < t < t_2$) : la phase de **récupération** fait intervenir deux diodes **D₂** et **D₄**.

La tension aux bornes de la charge est négative, les interrupteurs **T₂** et **T₄** sont fermés ce qui implique **T₁** et **T₃** ouverts. L'intensité du courant est toujours positive, en examinant le schéma, nous constatons qu'il ne peut circuler que dans les diodes **D₂** et **D₄**.



Phase ③ ($t_2 < t < T$) : La phase **d'alimentation** fait intervenir deux interrupteurs **T₂** et **T₄**.

Cette séquence de conduction est évidente, en effet l'intensité du courant est négative ainsi que la tension aux bornes de la charge. Les interrupteurs **T₂** et **T₄** sont fermés ce qui implique **T₁** et **T₃** ouverts. La circulation électrique ne peut se faire que par les interrupteurs **T₂** et **T₄**. Nous obtenons donc le schéma équivalent simple suivant (Figure IV.4) :

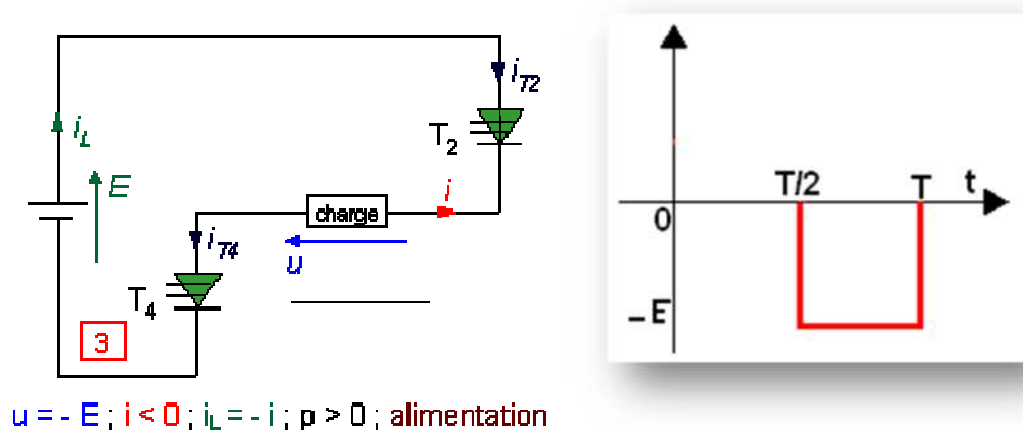


Figure IV.4 : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 2^{ème} demi-cycle.

Phase ④ ($0 < t < t_1$) : La phase **de récupération** fait intervenir deux diodes **D₁** et **D₃**.

La tension aux bornes de la charge est positive, Les interrupteurs T_1 et T_3 sont fermés ce qui implique T_2 et T_4 ouverts. L'intensité du courant est toujours négative, en examinant le schéma, nous constatons qu'il ne peut circuler que dans les diodes D_1 et D_3 .

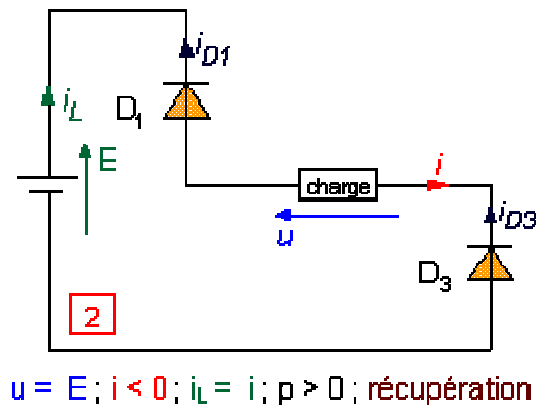


Figure IV. Phase de récupération

Le signal résultant sur une période complète est représenté par la Figure IV.5. L'allure de la tension est symétrique dont la valeur moyenne est nulle.

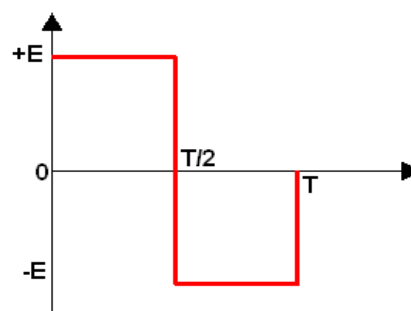


Figure IV.5 : Signal complet de l'onduleur

IV.2.3.Étude du fonctionnement

Les diodes évitent une discontinuité dans la conduction de courant et prennent donc le relais des interrupteurs, quand ceux-ci bien qu'étant commandés à la fermeture, ne peuvent pas conduire car ils sont unidirectionnels [62]. De plus, il faut remarquer que la charge fournit de la puissance à l'alimentation quand les diodes sont passantes. Il s'agit de **phases de récupération**. Ces phases de récupération nécessitent d'utiliser des alimentations en tension réversible en courant. Les phases ❶ et ❸, dites de charge, correspondent à une consommation d'énergie, déchargeant la batterie. La charge y est donc réceptrice. Les phases ❷ et ❹, dites de récupération, correspondent à une fourniture d'énergie électrique par la charge à la batterie. La charge y est donc génératrice.

IV.3. Réalisation de l'alimentation électrique pour DBD à base du DSPACE 1104

À présent, nous introduisons l'alimentation destinée à notre DBD qui se caractérise par des formes d'onde (courant et tension) alternatives, à cause du comportement capacitif inhérent à ce type de décharge.

Avec une alimentation en tension continue (batterie), au bout d'un certain temps, les capacités (barrières diélectriques) seraient chargées au potentiel imposé, empêchant le passage de courant. Avec une alimentation en courant continu, les diélectriques se chargeraient de plus en plus, conduisant à des tensions pouvant endommager les interrupteurs de l'alimentation ; ceci oblige à imposer un courant moyen nul [51].

IV.3.1. Conception du banc d'essai : Description de l'onduleur

Grâce à l'utilisation de composants électroniques de haute performance, l'onduleur est d'utilisation universelle et se caractérise par une très grande sécurité de fonctionnement, un rendement optimal et une capacité de communication vers d'autres systèmes au moyen d'interfaces intégrées. La commande de l'onduleur est conçue sur la base d'une technique moderne à microcontrôleur.

Les principaux composants de la chaîne de l'onduleur sont :

- I. Bloc gérant la commande,
- II. Bloc gérant l'étage de puissance (onduleur).

IV.3.2. Bloc gérant l'étage de puissance (onduleur)

L'onduleur de tension est constitué de trois bras utilisant deux interrupteurs du type IGBT, bidirectionnels en courant et commandés à l'amorçage et au blocage. Les drivers de type SKHI22 commandant chaque bras de l'onduleur sont alimentés avec une tension continue de 15 V. Les signaux de commande des drivers (les ordres de commutation) sont de type C-MOS (0-15 V). En cas d'un problème d'alimentation ou de signaux de commande, les drivers sont bloqués et un signal d'erreur est généré.



Figure IV.6 Onduleur de tension SEMIKRON

Les modules de puissance SKM50GB123D qui contiennent les interrupteurs IGBT sont protégés contre des surtensions grâce à une résistance de "grille". L'objectif de la résistance de grille R_g est de limiter la vitesse d'établissement du courant, évitant ainsi les surtensions induites par l'inductance parasites (câbles). Le choix d'une valeur importante de R_g a pour effet la protection des IGBT contre les surtensions à l'ouverture dans le cas d'un court-circuit, en contrepartie cela augmente les pertes de commutation. Le driver SKHI22 est capable de détecter un court-circuit en un temps ne dépassant pas $4 \mu s$. L'IGBT peut supporter un courant de court-circuit de 10 fois la valeur de courant maximal ($10 \times 50 A$), avec une tension de (1200 V), pendant $10 \mu s$. Avec l'objectif d'éviter un court-circuit direct au moment d'une ouverture et d'une fermeture des IGBT complémentaires d'un même bras de l'onduleur, un "temps mort" est géré par les drivers de commande. Pendant le temps mort, les signaux de commande de driver n'exercent aucune commande sur l'état des IGBT. L'onduleur du montage didactique SEMIKRON possède un temps mort de $T_{dt} = 6 \mu s$.

IV.3.3.Bloc gérant la commande

I. Circuit de commande

Le circuit de commande ne fait pas partie du circuit puissance (onduleur).

Le diagramme de la **figure IV.7** illustre le schéma fonctionnel du système de gestion et pilotage de l'alimentation. La génération des signaux de commande est réalisée par la carte Dspace 1104. Ces signaux sont envoyés aux interrupteurs de puissance du convertisseur, avec une isolation galvanique assurée par les opto-coupleurs.

IV.4. Présentation de la carte Dspace [52] [53] [54]

DSPACE, développée par une société allemande, est une carte de prototypage rapide de loi de commande, sa puissance de calcul et ses E/S sont primordiales pour les applications. Utilisée avec le Real-Time Interface (RTI), cette carte est entièrement programmable à partir de l'environnement de Matlab Simulink. On peut configurer toutes les E/S graphiquement en utilisant la RTI. C'est une façon simple et rapide d'implémenter les fonctions de commande.



Figure IV.7 Carte d'acquisition de la carte DSPACE 1104

La carte est dotée d'un panneau de connexion qui comporte des périphériques des E/S qui permettent la communication avec le système physique.

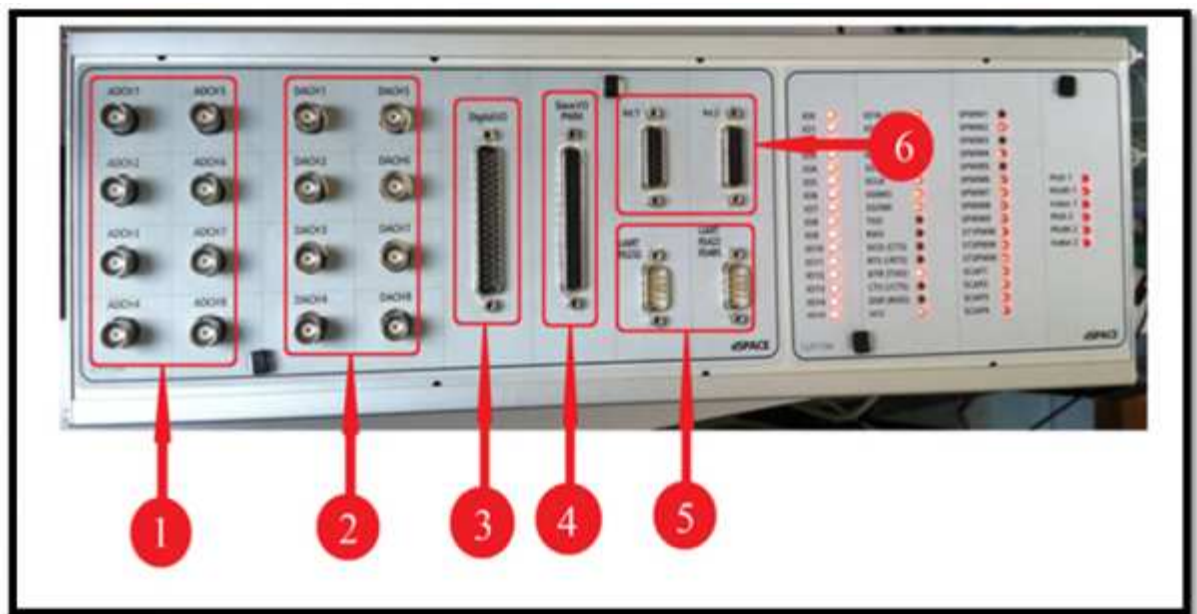


Figure IV.8 Constitution de l'interface série de dsPACE 1104

- (1) 8 convertisseurs analogiques numériques (CAN), 4 en 16 bits, 4 en 12 bits : utilisés pour la récupération de données analogiques à partir d'un système puis leur conversion au numérique et leur affichage sur PC.
- (2) 8 convertisseurs numériques-analogiques (CNA) de 16 bits pouvant délivrer une tension $\pm 10V$, utilisés pour la conversion de données numériques introduites à partir du PC en données analogiques, puis leur injection à un système externe.
- (3) Entrée/sortie numérique utilisée lorsque nous avons à faire à un langage de programmation.
- (4) Entrée/sortie du DSP esclave chargé de générer les signaux MLI pour la commande de l'onduleur.
- (5) Les ports séries (RS 232, RS 422 et RS 485) : utilisés pour assurer une communication série entre la dsPACE 1104 et les différents appareils électroniques (automate, appareil de mesure, etc.). Ils assurent également la communication entre deux cartes dsPACE.
- (6) 2 codeurs incrémentaux pour la récupération de données à partir de capteurs (capteurs de position).

Elle se compose également de 20 entrées/sorties numériques (de 3 timers (32 bits)) pouvant fonctionner de manière indépendante comme le montre la figure IV.9 :

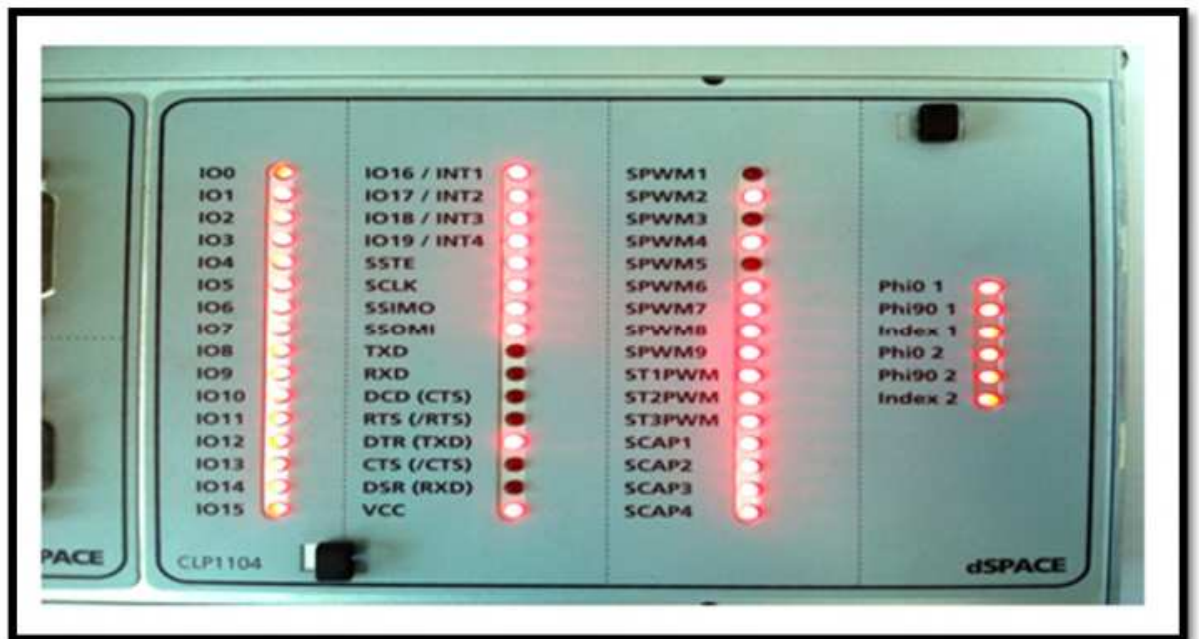


Figure IV.9 Différentes entrées/sorties de la dsPACE 1104

La carte dSPACE1104 nommée également DS1104, peut être installée pratiquement sur tous les PC, possédant une prise PCI libre.

IV.4.1.Composition de la carte DS 1104

La carte DS 1104 est composée de :

- Un processeur maître Motorola MPC8240.
- Un sous ensemble du processeur DSP esclave TMS320F240 de Texas Instruments.
- Une mémoire SDRAM de 32 Mo, une mémoire Flash de 8Mo et un port-dual RAM.
- Une interface série.
- Un bus PCI, qui permet la connexion entre la carte et le connecteur d E/S.
- Un générateur MLI fonctionnant en monophasé et en triphasé.
- 20 E/S numériques.
- Interface d'encodeurs incrémentaux.
- Huit ADC et huit DAC.

IV.4.2.Application techniques de commande symétrique

Cette commande se résume à commander les interrupteurs K1 et K3 à la fermeture pendant une demi-période puis de commander K2 et K4 durant la deuxième demi-période. (Nous sous-entendons que les interrupteurs non commandés à la fermeture sont en fait commandés à l'ouverture).

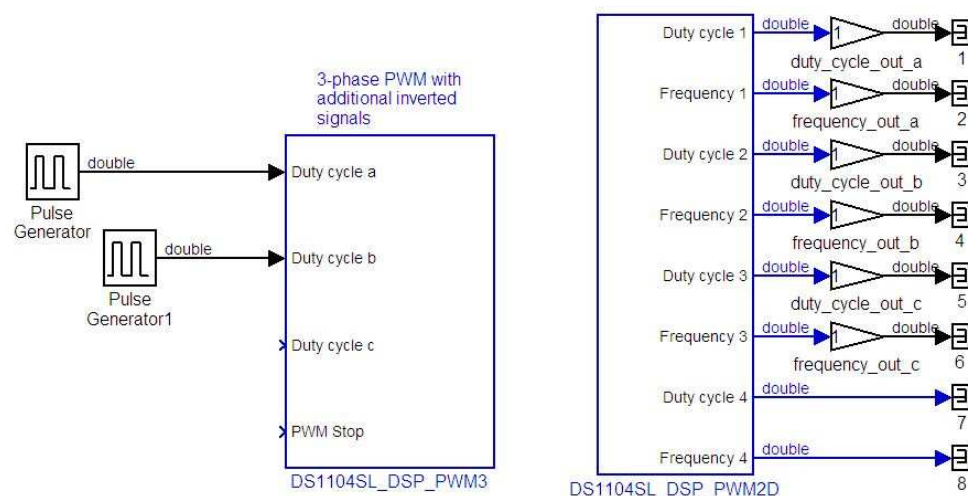


Figure IV.10 Schéma bloc de la commande carré

Résultats pratiques de l'implémentation de la commande symétrique :

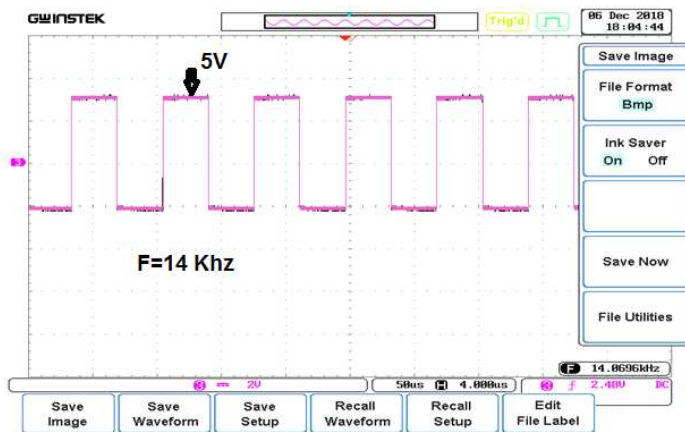


Figure IV.11. Signal de commande de l'onduleur

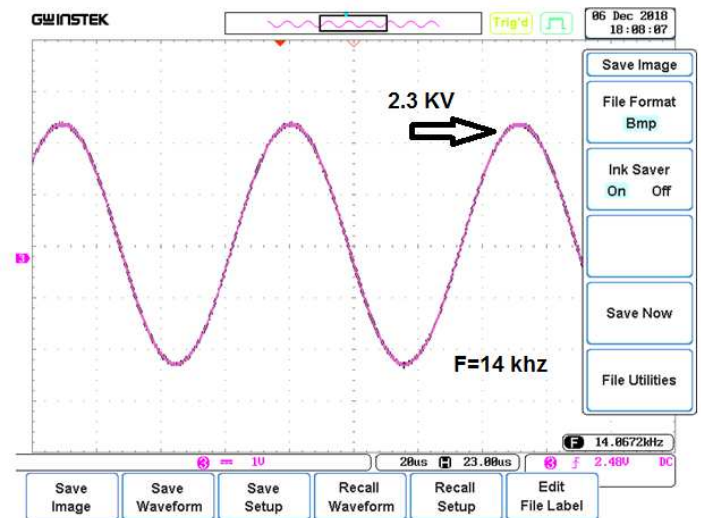


Figure IV.12. Tension à la sortie de l'onduleur

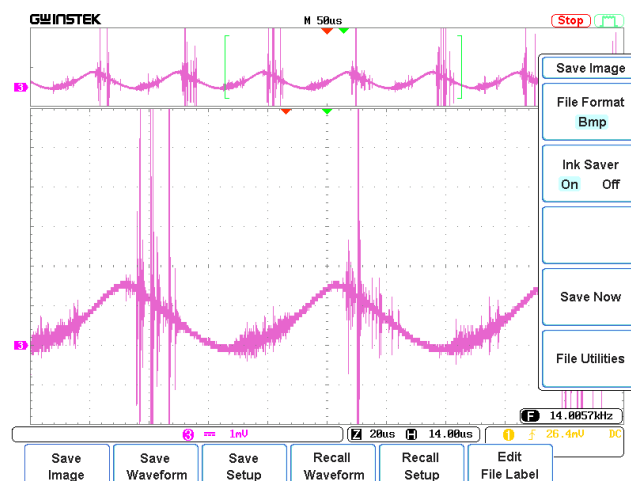


Figure IV.13. Allure du courant de décharge

IV.5. Utilisation de l'alimentation sinusoïdale et résultats obtenus

Le système d'alimentation électrique d'une décharge à barrière diélectrique est un des éléments clé pour le contrôle et la stabilité de la décharge. Un soin particulier doit être apporté à son développement et sa construction afin d'éviter les problèmes de claquage,

L'alimentation utilisée au cours de cette étude comprend trois éléments principaux (figure IV.14) : un panneau photovoltaïque comme source d'énergie, un onduleur haute fréquence (développée au sein du laboratoire) et un transformateur élévateur [55].

Le bloc gérant la commande de l'onduleur fournit le signal carré d'entrée de l'onduleur et permet le réglage de la fréquence. L'onduleur délivre une tension carrée dont l'amplitude maximale vaut **24 V**. Ce signal alimente le primaire du transformateur élévateur à circuit magnétique ferrite. L'amplitude maximale que peut atteindre la tension de sortie est **3.5 kV**. Vu la caractéristique capacitive de la décharge DBD, le rôle principal du diélectrique est de constituer d'une certaine façon une capacité en série avec l'espace de gaz. Cette capacité, associée en série avec la bobine du transformateur élévateur de tension, constituent un circuit oscillant série dont la fréquence d'oscillation f_0 se calcule d'après la formule $LC\omega^2 = 1$ [56-60].

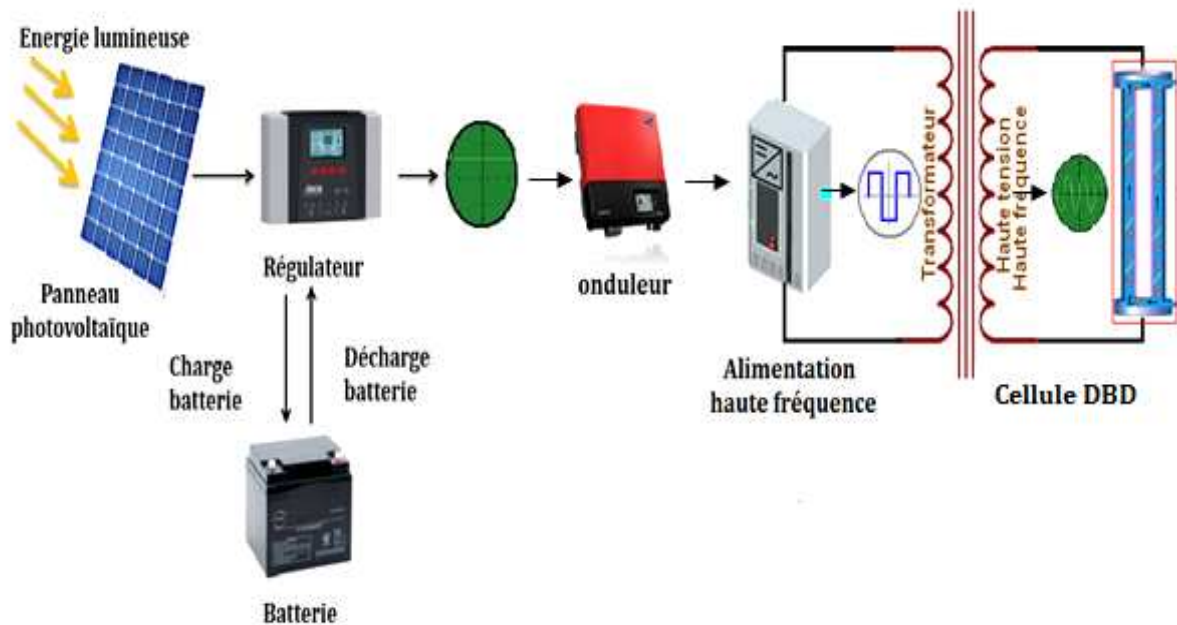


Figure IV.14 Dispositif expérimental.

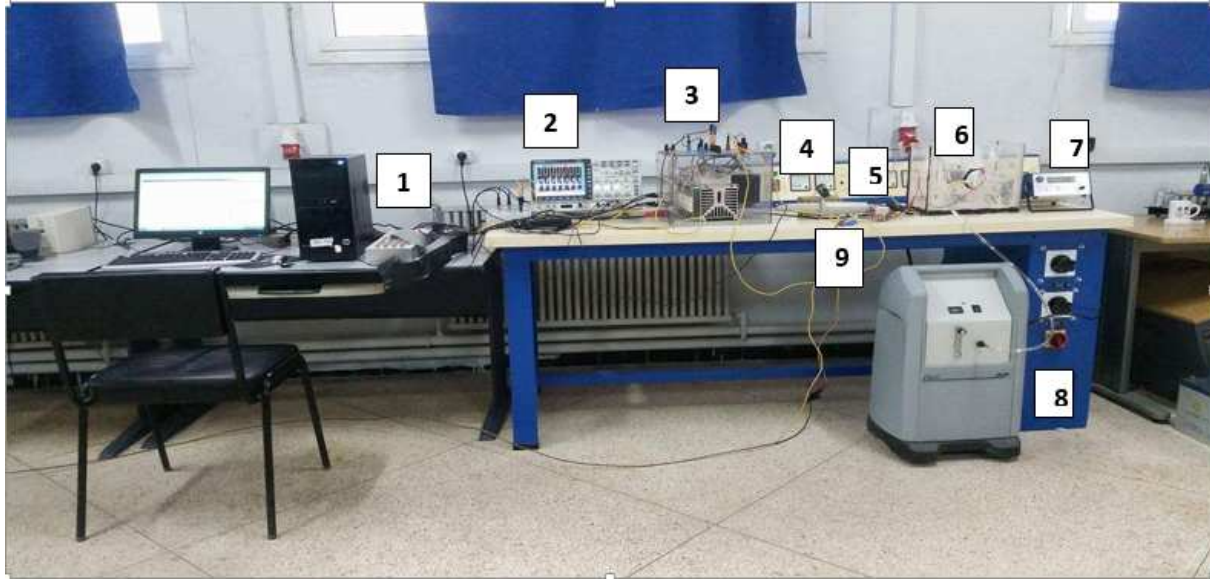


Figure IV.15 : Photo du dispositif expérimental

- 1) Dspace 1104
- 2) oscilloscope
- 3) Onduleur
- 4) Transformateur HT à noyau ferrite
- 5) Capteur de courant
- 6) Générateur d'ozone
- 7) Moniteur d'ozone 106-H
- 8) Générateur d'oxygène
- 9) Sonde HV

IV.5.1.Présentation du générateur d'ozone à DBD surfacique utilisé :

Le générateur d'ozone utilisé dans cette étude, est un réacteur à décharge à barrière diélectrique de la forme cylindrique dont l'électrode haute tension interne est une bande adhésif en aluminium insérée et collée à l'intérieur d'un tube en verre ; celui-ci, agissant comme une barrière diélectrique d'une épaisseur de 2,5 mm. L'électrode cylindrique reliée à la terre est un tube en acier inoxydable de 250mm de longueur et une électrode en grille métallique qui est inséré dans l'espace de décharge, en contact avec le tube de verre et l'électrode reliée à la terre, où le plasma est généré. (Figure IV.16 et IV.17)

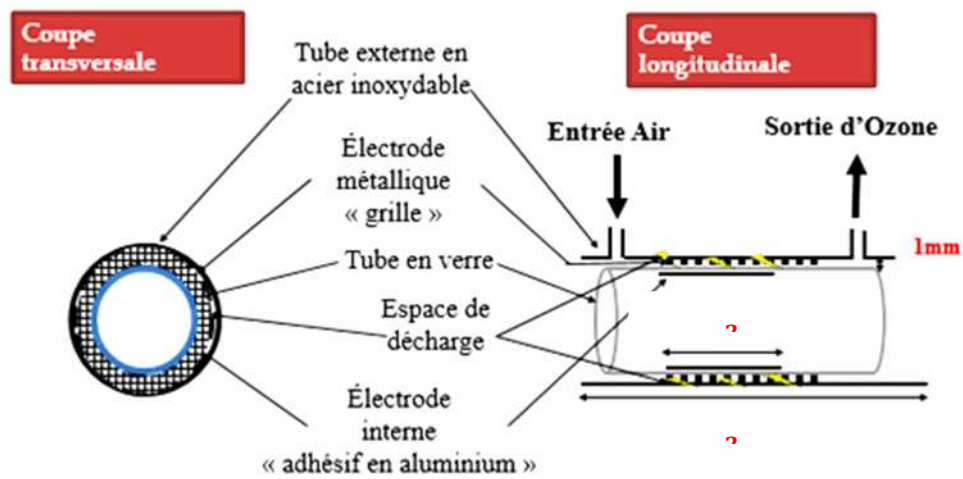


Figure IV.16 : Représentation schématique d'un générateur d'ozone à DBD surfacique.

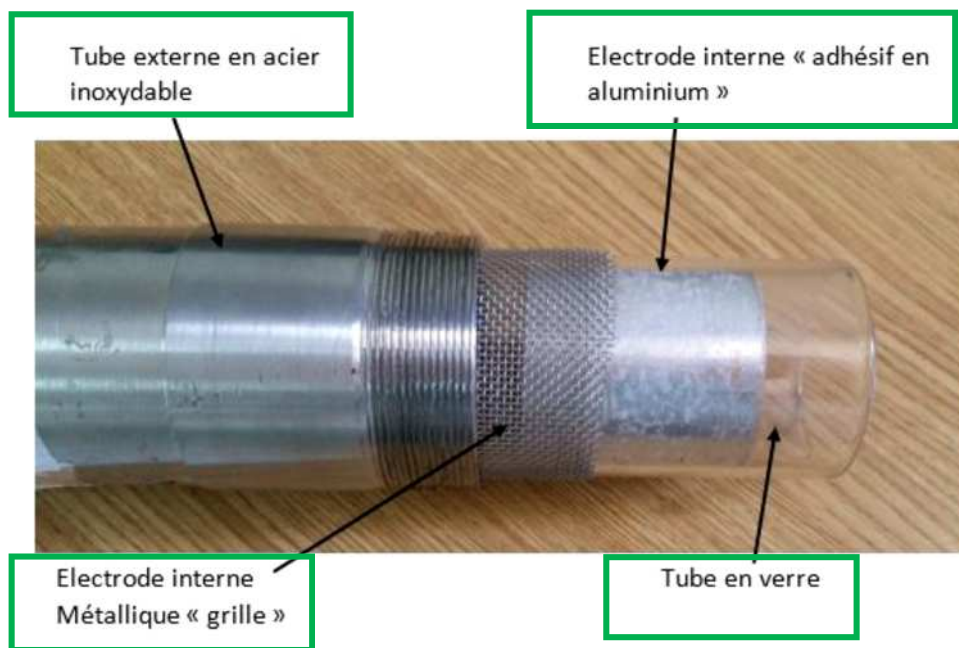


Figure IV.17 : Photographie du générateur d'ozone utilisé

IV.6. ETUDE EXPERIMENTALE SUR LE GENERATEUR D'OZONE

IV.6.1. Influence de la fréquence sur la tension de sortie en fonction de la tension d'entrée de l'onduleur :

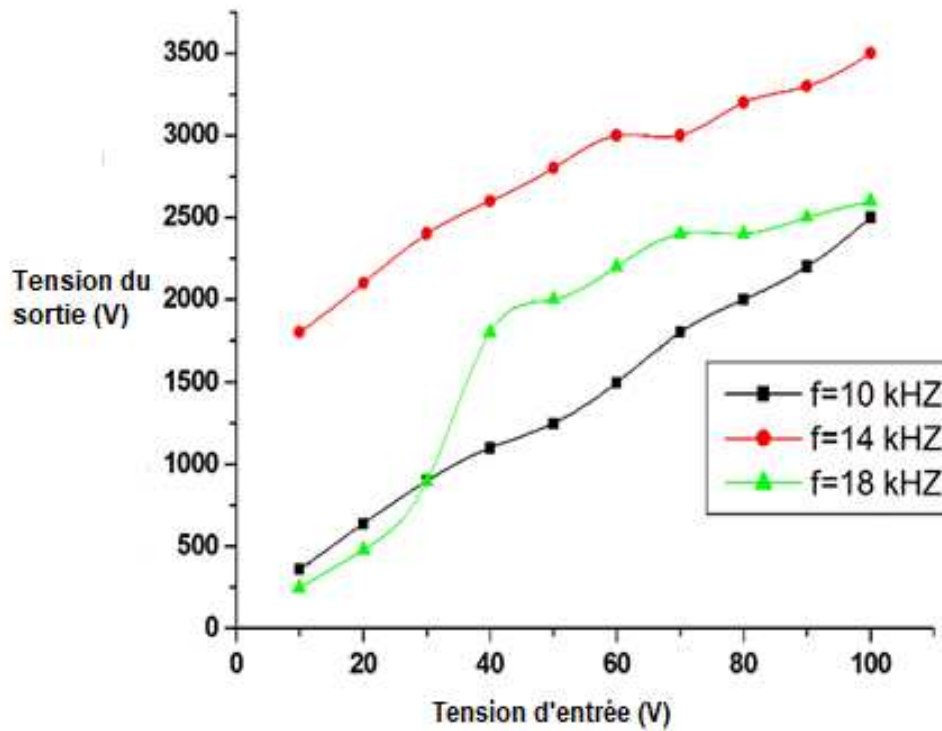


Figure IV.18 Variation de la tension de sortie alimentant le générateur d'ozone en fonction de la tension d'entrée de l'onduleur, pour différentes valeurs de la fréquence

Comme le montrent les résultats obtenus, représentés sur la figure IV.18, représentant la variation de la tension de sortie en fonction de la tension d'entrée, nous constatons que la tension de sortie augmente presque linéairement avec la tension d'entrée, quelle que soit la valeur de la fréquence. Il est donc recommandé de régler la fréquence à $f = 14 \text{ kHz}$, qui représente la fréquence de résonance donnant la valeur maximale de la tension du générateur d'ozone.

IV.6.2. Influence de la fréquence sur la concentration d'ozone en fonction de la tension d'entrée de l'onduleur :

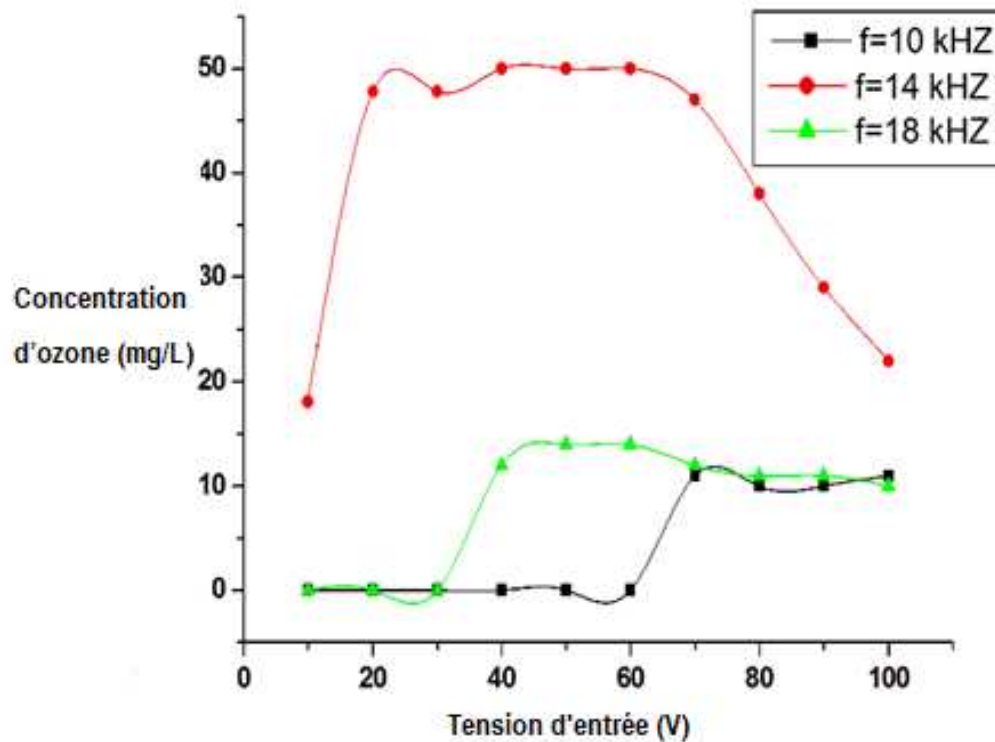


Figure IV.19 : Variation de la concentration d'ozone en fonction de la tension d'entrée de l'onduleur U_e pour différentes valeurs de la fréquence

Ces résultats ont été confirmés par ceux représentés sur la Figure IV.19 montrant la variation de la concentration d'ozone en fonction de la tension d'entrée, pour plusieurs valeurs de la fréquence. En effet, le générateur d'ozone délivre la plus forte concentration d'ozone $CO_3 = 50 \text{ mg/l}$ à une fréquence $f = 14 \text{ kHz}$ pour une tension d'entrée $U_e = 24 \text{ V}$. Nous avons donc opté pour ces valeurs dans l'étude expérimentale.

De plus, nous avons tracé la variation de la concentration d'ozone en fonction de la fréquence pour une tension constante $U_e = 24 \text{ V}$, comme le montre la figure IV.20. Nous voyons que $f = 14 \text{ kHz}$ est en effet la fréquence de résonance optimale donnant la concentration maximale d'ozone.

IV.6.3. Influence de la fréquence sur la concentration d'ozone ($U_e = 24V$) :

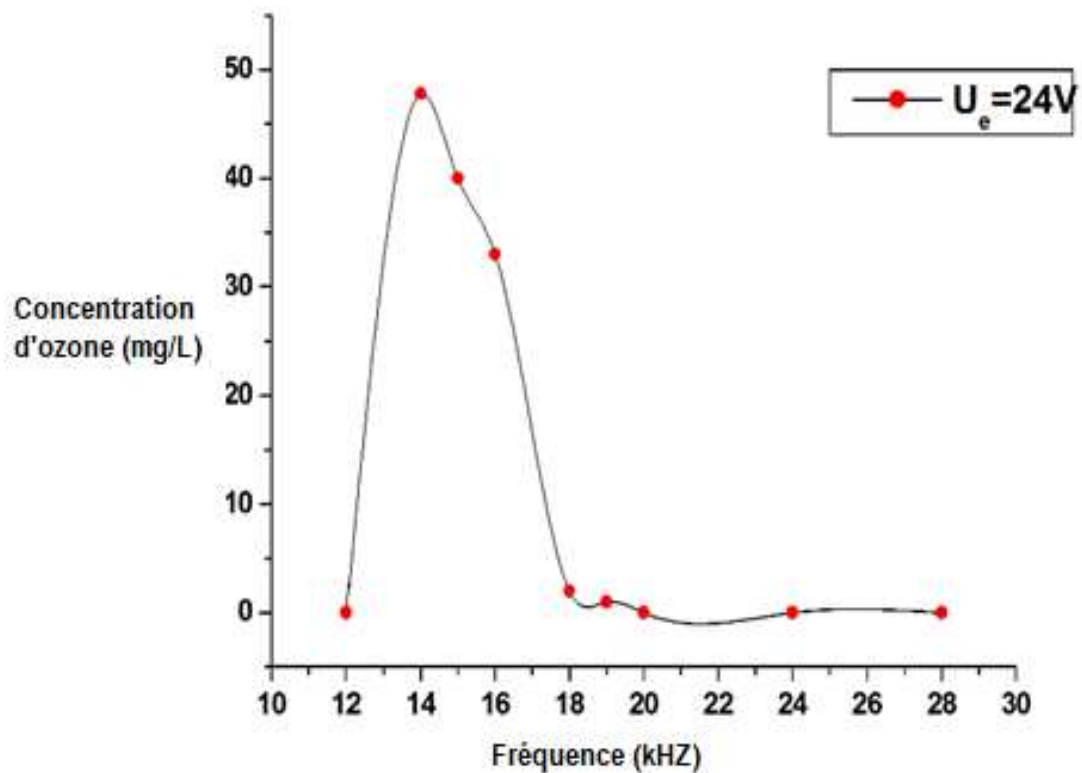


Figure IV.20 Variation de la concentration d'ozone en fonction de la fréquence ($U_e = 24V$)

IV.6.4. Relevé de la puissance en une journée

En outre, le système développé comprenant l'onduleur et le générateur d'ozone, a été alimenté par un panneau photovoltaïque pour son application de désinfection des espaces de stockage d'aliments afin de prolonger leur durée de conservation. Ce système a été étudié et testé pendant une journée nuageuse, subdivisée en 3 tranches horaires en fonction de la direction des rayons du soleil.

La figure IV. 21 représente la variation de la puissance générée par le PV dans les trois intervalles de temps pendant une journée nuageuse avec une température moyenne de 18 °C. Pour chaque intervalle de temps, l'angle d'inclinaison β a été modifié de manière à ce que la surface du panneau soit perpendiculaire aux rayons du soleil.

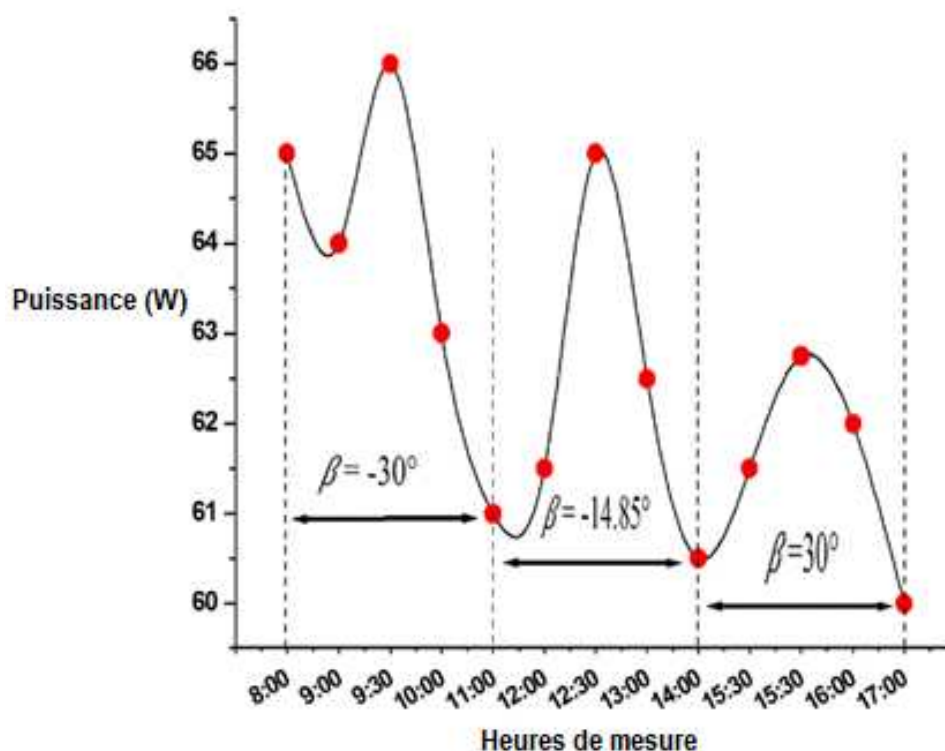


Figure IV.21. Variation quotidienne de la puissance générée par le système PV par temps nuageux avec ajustement de l'angle d'inclinaison β

Selon les résultats présentés à la figure IV.21, la puissance moyenne générée par le système PV reste supérieure à 60 W, ce qui est suffisant pour alimenter le générateur d'ozone utilisé pour la désinfection de l'air dans les locaux de stockage des aliments. Les fluctuations de puissance sont dues aux déplacements intermittents des nuages qui couvrent une partie plus ou moins importante de la surface du panneau PV, cela affecte ses performances.

IV.6.5. Présentation du système de traitement d'air

Le système "Onduleur-générateur d'ozone" est utilisé pour le traitement de l'air dans une enceinte de conservation d'aliments. Le dispositif expérimental utilisé, décrit à la figure IV.22, est une enceinte en verre à l'intérieur de laquelle les produits alimentaires sont placés. Un système d'alimentation, comprenant le générateur d'ozone et le dispositif d'énergie photovoltaïque illustré à la figure 3, est utilisé pour injecter de l'ozone dans l'enceinte par un tuyau en PVC fixé sur la paroi supérieure afin de diffuser l'ozone dans toute l'enceinte.

L'ozone est principalement utilisé pour la désinfection de l'air et de l'eau, afin d'éliminer les bactéries et les virus. Néanmoins, la concentration ne doit pas dépasser une limite maximale

qui produira l'effet inverse. La quantité d'ozone recommandée dans l'industrie alimentaire devrait être comprise entre 2 et 7 ppm pour une conservation efficace d'aliments. Il est à noter qu'une deuxième chambre similaire non traitée a été utilisée comme enceinte de contrôle.

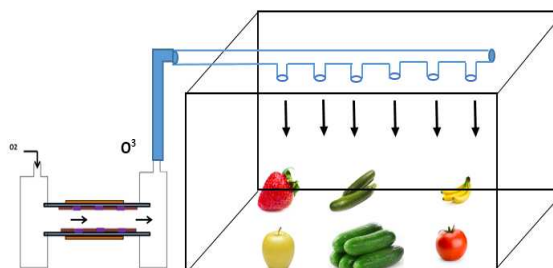


Figure IV.22 Schéma descriptif du dispositif expérimental

Des aliments frais achetés au le marché local ont été placés dans les deux enceintes et conservés pendant une période de 25 jours. Des photos ont été prises à intervalles réguliers pour une analyse visuelle de la qualité des aliments. Toutes les expériences ont été réalisées dans des conditions climatiques stables de température (20 ± 8 °C) et d'humidité (50 ± 15 %).

IV.7. APPLICATION D'UN SYSTEME DE GENERATION D'OZONE POUR LA CONSERVATION DES ALIMENTS

IV.7.1.Généralités

L'expression « durée de vie » ou « durée de conservation » correspond à la période au cours de laquelle un produit conserve un certain niveau de qualité sous des conditions d'entreposage spécifique.

L'ozone est le plus puissant oxydant et désinfectant pour l'épuration de l'air. Son principal avantage : il ne produit aucun dérivé indésirable et se transforme en oxygène, son inconvénient : sa courte durée de vie. L'objectif rechercher est la réalisation d'une cellule de décharge à barrière diélectrique pour la production d'ozone utilisé dans la désinfection de l'air nécessaire à la prolongation de la durée de conservation des produits agroalimentaires tels que : pomme, pomme de terre, salade, tomate, concombre, fraise....

IV.7.2. Réalisation d'un système automatique de déclenchement du générateur d'ozone

Afin de garder l'ozone en quantité uniforme (entre 2 et 7 ppm), il est recommandé de munir le système de désinfection d'un minuteur qui réenclenche la DBD pendant des

durées brèves de quelques secondes. Ces durées ont été déterminées par deux expériences.

- Nous avons varié le temps de fonctionnement du générateur d'ozone en mesurant la concentration d'ozone qui nous a permis de déterminer le temps nécessaire pour obtenir une concentration d'ozone (7 ppm).
- Après avoir atteint la concentration d'ozone de 7 ppm, nous avons mesuré le temps de d'arrêt du générateur d'ozone pour avoir une concentration minimale d'ozone de 2ppm

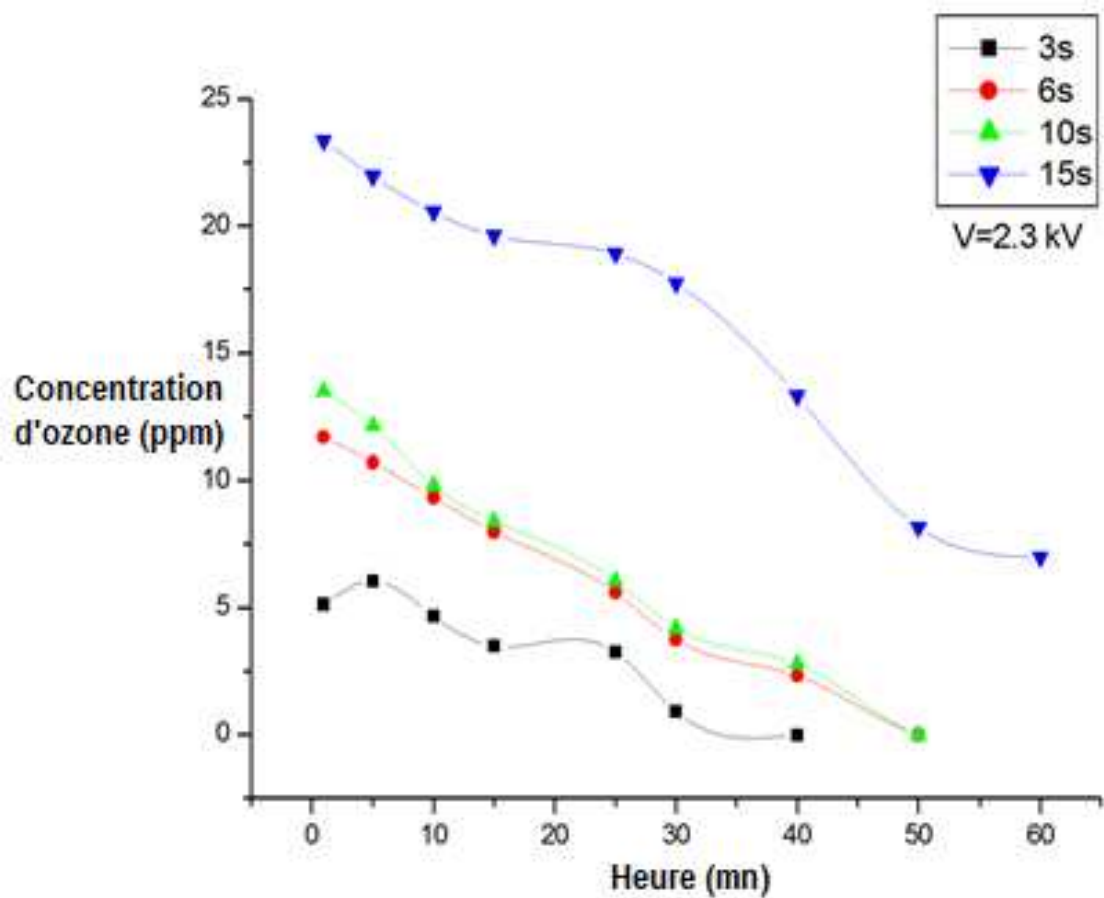


Figure IV.23 Évolution de la concentration d'ozone en fonction du temps pendant la période d'arrêt Δt_{Off} , pour différentes valeurs de la période de fonctionnement Δt_{ON}

IV.7.3.Simulation du système de commande du générateur DBD :

Afin de permettre au générateur d'ozone de se réalimenter chaque 40 minute pendant 15 secondes, un système électrique automatique est utilisé et composé de :

- Carte ARDUINO : qui permet la commande du système à l'aide d'un programme.

- OPTOTRIAC de type MOC3041 :

➤ **Présentation de Triac OPTOTRIAC**

Un triac est, un composant bidirectionnel, qui laisse passer le courant dans les deux sens (figure IV.24). Il possède trois électrodes : deux électrodes principales appelées A1 et A2 ou MT1 et MT2 (pour Main Terminal 1 et Main Terminal 2, Main Terminal signifiant ici Terminaison principale), et une électrode de commande G (pour Gâchette) qui permet d'amorcer plus facilement la conduction du courant entre les deux électrodes principales A1 (MT1) et A2 (MT2). Les appellations A1 et A2 seront utilisées pour désigner les deux électrodes principales dans la suite du texte.

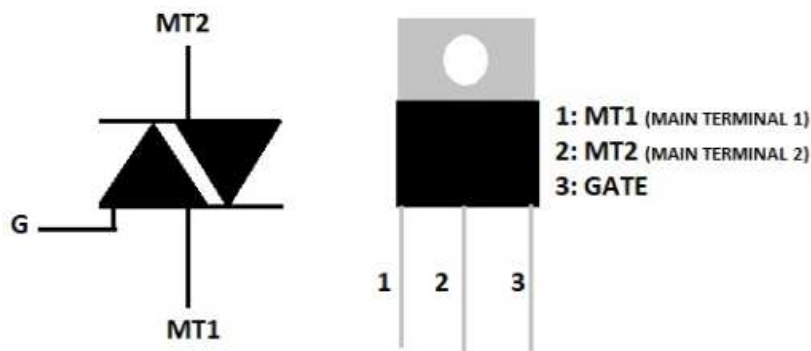


Figure IV.24 Présentation de Triac

IV.7.4. Principe de fonctionnement du système de commande réalisé

Le montage de la figure IV.25 est le plus simple que l'on peut concevoir avec un optotriac de type MOC3041.. Une résistance est insérée entre l'optotriac et le triac, et permet de limiter le courant maximal de gâchette du triac. La valeur de cette résistance doit être adaptée en fonction de la sensibilité du triac : avec un triac sensible (courant de gâchette requis de quelques mA), elle doit avoir une valeur plus élevée qu'avec un triac standard (courant de gâchette requis de plusieurs dizaines de mA). Généralement, une valeur comprise entre 220 ohms et 470 ohms est employée pour un triac de type 6 A ou 8 A / 400 V ou 600 V.

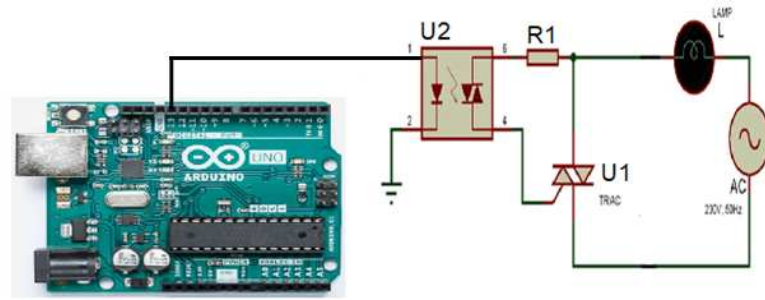


Figure IV.25 Schéma du Système électrique automatique de commande.

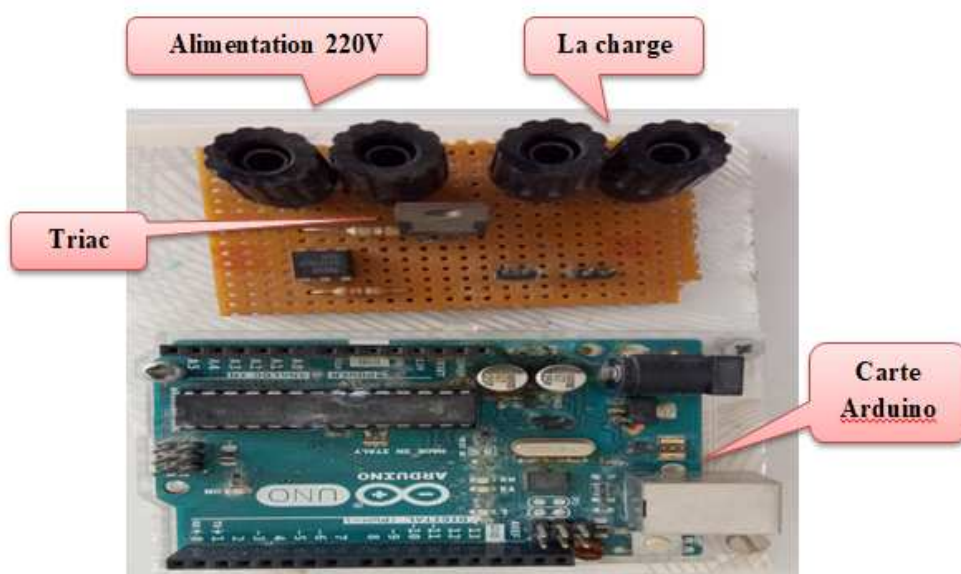


Figure IV.26 Photographie de notre Système électrique de commande automatique.

Le programme de la commande du générateur d'ozone par l'Arduino est représenté à la figure IV.26. et 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 utilisé). Le pin 13 correspond à la LED "L" sur la carte.

IV.8. Résultats et discussions :

La première étape consiste à déterminer les durées de fonctionnement du système pour garantir une concentration d'ozone adéquate comprise entre 2 et 7 ppm. Le

générateur fonctionne pendant une période déterminée Δt_{ON} jusqu'à une concentration de 7 ppm, puis il est éteint pendant une période Δt_{OFF} jusqu'à une concentration de 2 ppm. Dès que la concentration atteint 2 ppm, le générateur est redémarré. Cette régulation est effectuée automatiquement à l'aide d'un système de commande basé sur Arduino.

La figure IV.23 représente l'évolution de la baisse de la concentration d'ozone en fonction du temps lorsque le générateur est éteint pendant la période Δt_{OFF} , chaque courbe correspondant à un temps de fonctionnement Δt_{ON} du générateur d'ozone.

Comme le montre la figure 13, le temps nécessaire pour atteindre une concentration d'ozone de 7 ppm est de 15 secondes. De plus, le temps pendant lequel la concentration diminue de 7 à 2 ppm, en fonction des conditions expérimentales de température et d'humidité, est approximativement égal à 40 minutes.

Les résultats de la conservation des aliments ont été comparés avec une autre enceinte témoin à air non traité, dans laquelle des aliments similaires ont été placés. Les résultats ont été exprimés en termes de nombre de jours de conservation en prenant quotidiennement des photos. Les résultats obtenus sont illustrés par les images de la figure. IV.24.



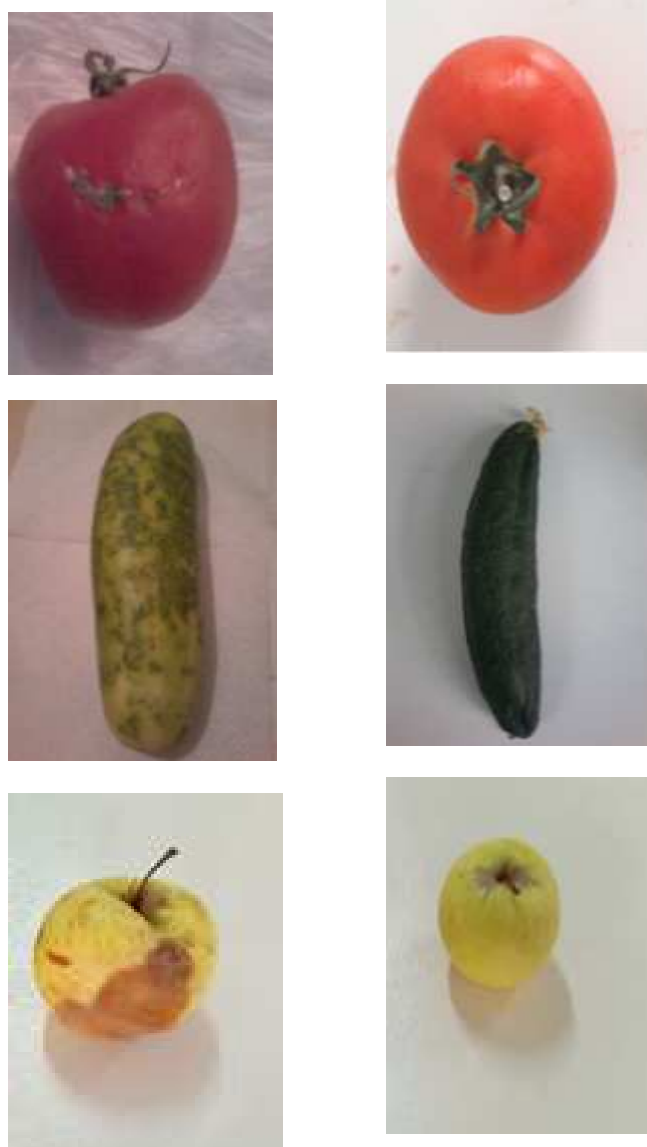


Figure IV.27. Photographies prises après une période de stockage de 25 jours À gauche : non traitée ; À droite : traité à l'ozone

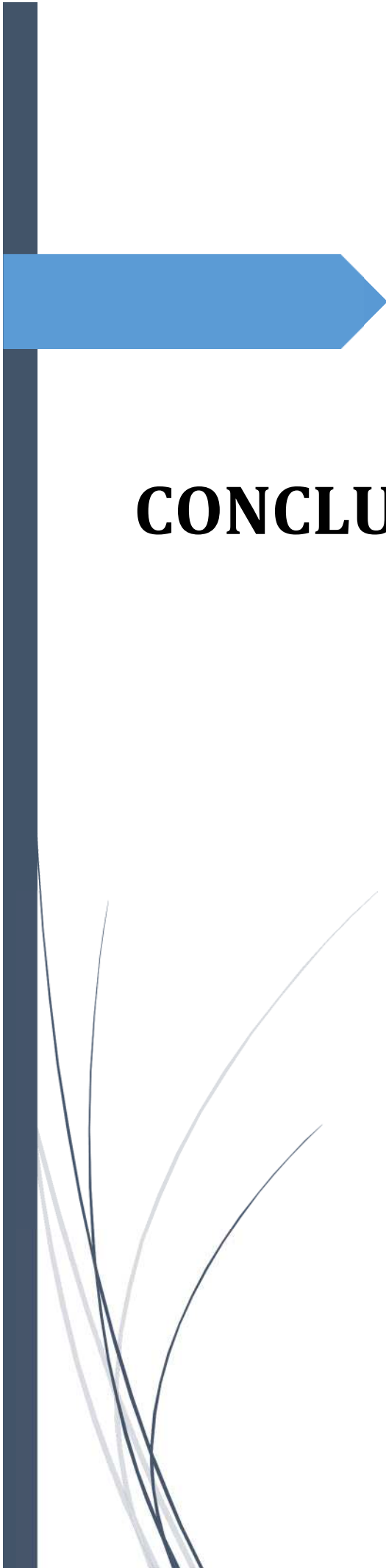
Cinq produits alimentaires ont été testés : courgette, banane, tomate, concombre, pomme, La figure IV.27 montre des photographies prises après 25 jours de stockage dans des enceintes traitées et non traitées.

Ces résultats montrent clairement que l'aspect visuel des produits stockés dans l'enceinte traitée à l'ozone est bien meilleur. En effet, l'ozone est un puissant oxydant recommandé par plusieurs chercheurs pour réduire la décomposition du produit et prolonger la période de stockage en éliminant les bactéries et arrêtant 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. En outre, plusieurs études mentionnent que l'exposition des fruits et légumes à l'ozone peut ralentir la sporulation des champignons nuisibles aux agrumes, en particulier le *Geotrichum* et *Penicillium*.

IV.9. Conclusion

L'ozone est une solution efficace pour la désinfection de l'air. Un système comprenant un panneau photovoltaïque alimentant une source d'énergie et un générateur d'ozone a été développé et utilisé pour la désinfection des produits alimentaires stockés dans une enceinte traitée à l'ozone. De plus, une estimation de l'énergie produite par le panneau PV a été réalisée dans des conditions nuageuses. Les résultats obtenus ont montré qu'un tel système utilisant une alimentation électrique à haute fréquence peut être envisagé dans les espaces de stockage situés dans des régions isolées. En effet, des résultats encourageants d'allongement de la durée de stockage ont été obtenus.



CONCLUSION GENERALE

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

Conclusion générale

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.

La décharge à barrière diélectrique est simple et représente un bon moyen pour obtenir un plasma hors équilibre « froid » afin de générer de nombreuses applications. Parmi ces applications, nous avons utilisé la DBD en tant que générateur d'ozone.

Les générateurs d'ozone sont de plus en plus utilisés dans différents domaines de l'industrie pour l'élimination des virus, bactéries et microorganismes dans l'eau. Actuellement, le moyen le plus efficace de production de l'ozone est la décharge à barrière diélectrique, qui nécessite des tensions de l'ordre de plusieurs kV et des fréquences de quelques dizaines de kHz.

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

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

Le système utilisé est l'analyse expérimentale du traitement d'eau et de stockage des aliments dans une atmosphère traitée à l'ozone alimentée par un système d'alimentation photovoltaïque. Les deux dispositifs expérimentaux 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 deux onduleur le premier en demi pont et le 2 eme en pont complet.

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.

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 une transformatrice 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.



Références

Bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Kévin Duruisseau**, « Transition énergétique et géographie : le photovoltaïque au sol dans le sud de la France », Thèse de doctorat, Soutenue le 18-11-2016 à Aix-Marseille.
- [2] **Sonelgaz**, ' Rapports d'activités 2009, 2014 et 2015', <http://www.sonelgaz.dz>
- [3] **Daoud Omar et Khiloun Oud** «Eude des cellules solaires » Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme des études universitaires (D.E.U.A) en électrotechnique 2006.
- [4] **Lecheheb et Kelali** «Régulation d'un système photovoltaïque à batterie » Mémoire de magister, département d'électrotechnique, USTO, 2001.
- [5] **Antonio Luque and Steven Hegedus**, « Handbook of Photovoltaic Science and Engineering », John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [6] **Z. Bendjellouli** «Contribution à la modélisation d'une cellule solaire», Mémoire de magister université de Béchar, 2009.
- [7] **Pierre Petit**, «Optimisation du transfert d'énergie dans les systèmes photovoltaïques», thèse de doctorat, l'Université de Metz Lorraine France, juillet 2011.
- [8] **D. Zerga, F. Benyarou et B. Benyoucef**« Optimisation du rendement d'une cellule solaire NP au silicium monocristallin »Revue .Energies. Renouvelables : physique Energétique (1998 pp.95-100)
- [9] **Jacques Duval**, « Systèmes D'énergie Hybrides Solaires PV », Energie Solaire Photovoltaïque et son Stockage, ASPROM Paris, 2010.
- [10] **Loïc Bailly**« Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface ». Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, France, 2010.
- [11] **Gourbi Abdelkader**, « Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque hybride de production d'énergie électrique », thèse de doctorat, université Sidi Bel Abbés , 2017.
- [12] **Benchikh Elhoucine Hanane**, « Simulation numérique de modèle de collecteur Hybride Photovoltaïque/Photothermique», Mémoire de magister, Université de Constantine, Algérie, 2009.

- [13] **Meziani Zahra**, « modélisation de modules photovoltaïques », Mémoire de magister, Université de Batna, Algérie, 2012.
- [14] **Alain Bidart et Laurent Dubois**, « Les énergies fossiles et pédagogique réalisé par la Fondation Polaire Internationale», Mai 2003.
- [15] **Ministère de l'Énergie et des Mines**, « Guide des énergies renouvelables », Édition 2007.
- [16] **Korsaga, E., Koalaga, Z., Bonkougou., Zougmore, 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
- [17] **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.
- [18] **David Linden, Thomas B. Reddy**, «Hand Book of Batteries», McGraw-Hill, 3eme Edition, 1995
- [19] **James P. Dunlop**, «Batteries and Charge Control in Stand-Alone Photovoltaic Systems Fundamentals Application», National Laboratories, Florida Solar Energy Center, USA, 1997.
- [20] **Dekkiche Abdelillah**, «Modèle de batterie générique et estimation de l'état de charge», mémoire de master, Université du Québec, 2008.
- [21] **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.
- [22] **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 (10 novembre 2014)
- [23] **E. L. Owen**, «History origin of the inverter», IEEE Ind. Appl. Mag., vol. 2, no. 1, pp. 64–66, 1996, doi: 10.1109/2943.476602.
- [24] **N. P. Lyer**, «Power Electronic Converters. 2018.
- [25] **E. R. C. da Silva and M. E. Elbuluk**, « Fundamentals of Power Electronics», vol. 59. 2013.

- [26] **M. H.rashid**, *Power Electronics Handbook*. 2011.
- [27] **F. L. Luo and H. Ye**, *Multilevel DC/AC Inverters*. 2017.
- [28] **E. roberto cabral da silva Euzeli cipriano dos santos**, *Advanced Power Electronics Converters PWM converters processing AV voltages*.
- [29] **M.Jbilou**, « Etude et Réalisation d'un Onduleur d'un système Photovoltaïque »Mémoire de Magister, Université Djillali Liabés, Algérie, 2013.
- [30] **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.
- [31] **S. N.Manias**, «*Power Electronics and Drive Systems*»2017.
- [32] **Larbi Nehari, M.N, Brahmi, I. S. Bousmaha, M. Brahmi** « Study and realization of a single-phase inverter based micro controller for Photovoltaic system », Conference: International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Ouarzazate Maroc, October 2014.
- [33] **S. Guy, L. Francis, and D. Philippe**, « *Électronique de Puissance: Structures, Commandes, Application*», 10 eme. 2015.
- [34] **Larbi Nehari, M.N, Brahmi, I. S. Bousmaha, M. Brahmi** « Study and realization of a single-phase inverter based micro controller for Photovoltaic system », Conference: International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Ouarzazate Maroc, October 2014.
- [35] **M. Jbilou, IS.Bousmaha, Z.Dey, M Brahmi** «Improving the functioning of a transformer less inverter equipping a photovoltaic generator», Conference: International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Ouarzazate Maroc, October 2014.
- [36] **Larbi Nehari, M.N, Brahmi, I. S. Bousmaha, M. Brahmi** «Design and Implementation of Single Phase Solar Inverter based on microcontroller 16F628A », Conférence: Internationale en genie électrique (ICEE), Boumerdes, Algeria December 2015.
- [37] **M. Bollen**, *Book Review: Power Electronics-Converters, Applications and Design*, vol. 33, no. 1. 1996.
- [38] **M.Jbilou, IS.Bousmaha, M.Brahmi** «Realization and comparison two topologies of single-phase inverter for a photovoltaic system», 3ed International

renewable and sustainable energy conference, IRSEC 10-13 December 2015 Marrakech and Ouarzazate, Morocco

- [39] **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.
- [40] **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
- [41] **L.Nehari ,S Bechkir ,F.Z.Boudjela ,M.Brahami** « Design of ozone generator using a full bridge solaire inverter with high frequency transformer» Deuxième journée doctorale de Génie Electrique, JDGE 2018
- [42] **Dehini Rachid, Ryma Berbaoui**,« The harmonics currents identification faces to the voltagedisturbance», *Rev. Roum. Sci. Techn.– Électrotechn. et Énerg.* Vol. 62, 4, pp. 346–351, Bucarest,2017.
- [43] **Djemeli Ahmed**, « Optimisation de génération d’ozone par décharge à barrière », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Novembre 2005.
- [44] **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.
- [45] **Larbi Nehari. M. Brahami** «station de traitement d’eau par l’ozone alimentée par une central solaire», 2^{eme} salon national des produits de la recherche , tenu au palais des expositions , pins maritimes-SAFEX-ALGER de 02 au 04 juillet 2018.
- [46] **Nehari, Larbi, Mostefa Brahami, and Abdelkader Slimane** «Integrating a new adaptive PV system for ozone production process.» *Electrical Engineering* 101.2 (2019): 647-657.
- [47] **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

- [48] **Kamel, Nassour, Brahami Mostéfa, Tilmatine Amar, and Nemmich Said.** «Experimental study of a dual discharge ozone generator for water treatment», In 2018 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), pp. 1-8. IEEE, 2018.
- [49] **Suslow, T.V.** «Ozone Applications for postharvest disinfection of edible horticultural crops» UCANR Publications, 2004.
- [50] **S.Arigo, 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.
- [51] **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.
- [52] **Smilanick, Joseph L.** «Use of ozone in storage and packing facilities», In Washington tree fruit postharvest conference. 1-10, 2003.
- [53] **Montesano, D, Somma, A, Ferrara, L.** « Ozone in post-harvest treatment of fruits and vegetables», Naples University, from the journal *Italus Hortus* (Italy), 2004.
- [54] **World Health Organization.** (2006). Meeting the MDG drinking water and sanitation target: the urban and rural challenge of the decade. Retrieved from http://www.who.int/water_sanitation_health/monitoring/jmpfinal.pdf
- [55] **Ikehata, K., N. Jodeiri Naghashkar, and M. Gamal El-Din.** 2006. «Degradation of Aqueous Pharmaceuticals by Ozonation and Advanced Oxidation Processes: A Review.» *Ozone: Science & Engineering* 28 (6):353-414. doi:10.1080/01919510600985937.
- [56] **L. Nehari, M. Brahami, I S Bousmaha, F Z. Boudjella, A. Tilmatine,** « adaptation of a photovoltaic powered ozone generation system for food storage », *Carpathian Journal of Food Science And Technology*, 2019 11(4), 64-71
- [57] **N. Bouregbaa, Y. Benmimoun, B. Meddahb, A. Tilmatine & A. Ould mounnad,** « Ozonation of wastewater in Algeria by dielectric barrier discharge, » *Science & Engineering: The Journal of the International Ozone Association* Vol.52, 2014.

- [58] **Jodzis S, Smolinski T and Sowka P**, «Ozone Synthesis under Surface Discharges in Oxygen: Application of a Concentric Actuator» IEEE Trans. Plasma Sci.391055–60, 2011.
- [59] **J Jolibois,K. Takashima , A.Mizuno** , «Application of a non-thermal surface plasma discharge in wet condition for gas exhaust treatment: NOx removal.» Journal of Electrostatics, Vol 70, pp 300- 308, 2012.
- [60] **Chang, J.S**, «Recent Development of Plasma Pollution Control Technology: A Critical Review,» A Critical Review. Science and Technology of Advanced Materials 2:571–6. Doi: 10.1016/S1468-6996(01)00139-5, 2001.
- [61] **M.N. Brahami, S.Hadjeri, S.Nemmiche, M.Brahami & A.Tilmatine**, «Experimental investigation of a PV solar generator for supplying water treatment process» Pages 207-221 | published online: 18 Dec 2014.
- [62] **Larbi Nehari, Dey Zouaoui .M.N, Brahami, M. Brahami** «Solar tracking systems for GPV simulation and practical approach», The Second International Conference on Power Electronics and their Applications,ICPEA 2015 DJELFA, Algeria from 29 to 30 Mars 2015.
- [63] **L.Nehari . M. Brahami**«Principales and Practical Approach Of A Solar Tracker For GPV System».La première Conférence internationales sur les Réseaux Électriques Intelligents (CIREI'2019) – ENPO MA 17 – 18 mars 2019 .
- [64] **Tayyari, Farinaz, Khazaei, Javad, AJAEI, Peyman, Jouki, Mohammad.** (2017). «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.
- [65] **M. Jbilou, MN. Brahami, S Nemmich, M. Brahami, A. Tilmatine**, « Ozone food storage supplied by photovoltaic energy», Carpathian Journal of Food Science And Technology», vol 10(4), pp129-126,2018.
- [66] **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

- [67] **Alonso, J. M., Rico-Secades, M., Corominas, E., Cardesín, J., & Garcia, J** (2002, October) « Low-power high-voltage high-frequency power supply for ozone generation » In Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No. 02CH37344) (Vol. 1, pp. 257-264).
- [68] **Alonso, J. M., Valdés, M., Calleja, A. J., Ribas, J., & Losada, J** (2003) « High frequency testing and modeling of silent discharge ozone generators » OZONE SCIENCE & ENGINEERING, 25(5), 363-376.
- [69] **Amjad, M., Salam, Z., Facta, M., & Ishaque, K** (2012) «A simple and effective method to estimate the model parameters of dielectric barrier discharge ozone chamber» IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 61(6), 1676-1683.
- [70] **Amjad, M., Salam, Z., Facta, M., & Mekhilef, S** (2013) « Analysis and implementation of transformer less LCL resonant power supply for ozone generation» IEEE transactions on power electronics, 28(2), 650-660.
- [71] **Williamson, J. M., Trump, D. D., Bletzinger, P., & Ganguly, B. N** (2006) « Comparison of high-voltage ac and pulsed operation of a surface dielectric barrier discharge» Journal of Physics D: Applied Physics, 39(20), 4400.
- [72] **Trunec,D, Zajíčková,L, Buršíková,V, Studnička,F, St'ahel, P,Prysiashnyi,V,& Franta, D** «Deposition of hard thin films from HMDSO in atmospheric pressure dielectric barrier discharge» Journal of Physics D: Applied Physics, 43(22), 225403,(2010).
- [73] **Kogelschatz, U** «Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications» Plasma chemistry and plasma processing, 23(1), 1-46,(2003).
- [74] **Fang, Z., Qiu, Y., Sun, Y., Wang, H., & Edmund, K** « Experimental study on discharge characteristics and ozone generation of dielectric barrier discharge in a cylinder–cylinder reactor and a wire–cylinder reactor» Journal of Electrostatics, 66(7-8), 421-426,(2008).
- [75] **Saint, F. P., Lacoste, D. A., Laux, C., Mericam-Bourdet, N., Kirkpatrick, M., & Odic, E** « Efficiency of ozone generation by dbd and nrp discharges» In 18th International Colloquium on Plasma Processes (CIP 2011), (p. 3p),(2011, July).

- [76] Drews, J., Kusano, Y., Leipold, F., Bardenshtein, A., & Krebs, N.** «Ozone production in a dielectric barrier discharge with ultrasonic irradiation» *Ozone: Science & Engineering*, 33(6), 483-488, (2011)