

CDTA

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

مركز تنمية التكنولوجيات المتطورة الجزائر  
Centre de Développement des Technologie Avancées Alger

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Filière: Électronique  
Spécialité: Instrumentation

Réalisé par:

GHALEM Billel  
et  
KRELIL BOURORGA Fatma

Thème:

*Étude et conception d'un circuit de  
récupération de l'énergie solaire pour  
un nœud de capteur*

Encadré par :

Mme. TITRI Sabrina  
et  
Mr. KHORISSI Nasreddine

Année Universitaire 2019-2020

# Remerciements

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont été réalisés au sein de la division microélectronique et nanotechnologies (DMN) du Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA) à Alger.

Nous remercions tout d'abord **DIEU** qui nous a donné la force et le courage pour pouvoir réaliser ce travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements et reconnaissances, tout d'abord, à notre encadreur **Mme. TITRI Sabrina** d'avoir proposé ce sujet qui nous a mené vers la découverte du monde de l'expérimental et qui nous a bien accueilli pendant toute la période de notre stage, elle nous a bien dirigé afin de pouvoir réaliser ce travail de mémoire, nous n'oublions pas de la remercier pour sa disponibilité et ses conseils précieux.

De même, nous adressons notre profonde gratitude à notre promoteur **Mr. KHORISSI Nasreddine** pour son confiance, son soutien et tous ses conseils précieux.

Nous remercions également les membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre travail.

Sur un plan plus personnel, nous remercions vivement nos parents pour leurs encouragements et leur soutien pendant notre cursus, ainsi que tous les membres de nos chères familles et tous nos amis.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce travail.

# *Dédicaces*

*J'exprime mes sentiments les plus profonds et je dédie ce modeste travail*

*A mon père, ma mère, pour l'éducation qu'ils ont su me donner et qui m'a permis avec l'aide de DIEU d'arriver là où je suis.*

*A Mes belles princesses CHAIMA, FATIMA, MERIEM EL  
BATOUL, MARWA, IBTISSEM et ALAE*

*A mes chères frères REDHA et TADJEDDINE*

*A toute ma famille.*

*A ma binôme FATMA*

*A tous mes amis et tous ceux qui m'ont aidé afin de réaliser ce travail.*

**BILLEL**

# *Dédicaces*

*Au DIEU Tout-puissant, qui m'aime toujours...*

*Je dédie ce mémoire*

*A mes chers parents, ma mère et mon père pour leur patience, leur amour, leur soutien et leur encouragement*

*A mes Chères sœurs AMINA, DJAMILA et BOUTHAINA  
Chères frères ABDELKARIM et SAMIR*

*A toute ma famille.*

*A mon binôme BILLEL*

*A tous mes amis et tous ceux m'aiment et qui m'ont aidé afin de réaliser ce travail.*

**FATMA**

## ملخص

أصبح استخدام الشبكات اللاسلكية في مختلف المجالات مثل : المجال الصناعي, المجال العسكري, المراقبة... إلخ. نظرا للطبيعة الأساسية لوظائفها فإن هذه الأخيرة لها مشكل هام و هو استهلاك الطاقة, في هذا السياق نقترح دراسة و تحليل هذا العائق بتحسين سيرورة الطاقة في عقد الإستشعار باستخدام الطاقة الكهروضوئية (الشمسية) ولتوفير ذلك نحتاج إلى : لوح شمسي لذي يقوم بتحويل ضوء الشمس إلى طاقة كهربائية, دائرة (MPPT (Maximum power point tracking) و محول DC-DC من نوع BUCK الذي يتحكم في الطاقة الواردة للحمل (عقدة الإستشعار). لتنفيذ قدمنا الوحدات و الأدوات اللازمة التي تشارك بشكل خاص في دائرة إستعادة الطاقة الشمسية و بشكل عام في عقدة الإستشعار. هذه الدراسة تمت من خلال تصميم دائرة لاسترجاع الطاقة الشمسية باستخدام برنامج "Altium Designer" وكذلك باستخدام لوحة "Arduino UNO" التي سمحت التي سمحت ببرمجة سلوك كل اداة من هذه الدارة.

## Résumé

Les réseaux de capteurs sans fil ont atteint leurs applications dans divers domaines de la société tels que: le domaine industriel, le domaine militaire, la surveillance, etc. En raison de la nature essentielle de leurs fonctions, les capteurs sans fil ont une contrainte principale qui est la consommation d'énergie. Dans ce contexte, nous proposons d'étudier et d'analyser le problème de l'amélioration de l'énergie dans les nœuds de capteurs en utilisant l'énergie photovoltaïque (solaire) pour fournir la plus grande quantité d'énergie possible à l'aide : d'un panneau solaire qui convertit la lumière du soleil en énergie électrique, du circuit MPPT (Maximum power point tracking) et du convertisseur DC-DC de type Buck qui contrôlent la puissance fournie à la charge (nœuds de capteur). Pour mettre en œuvre le projet, nous avons présenté les principaux modules et composants qui interviennent particulièrement dans le circuit de récupération de l'énergie solaire et d'une manière générale dans un nœud de capteurs. Cette étude a été complétée par la conception du circuit complet de récupération d'énergie solaire à l'aide du logiciel "Altium Designer", et aussi par l'utilisation de la carte "Arduino UNO" qui nous a permis de programmer le comportement de chaque composant de ce circuit.

## Abstract

Wireless sensor networks have reached their applications in various fields of society such as: industrial field, military field, surveillance, etc. Due to the essential nature of their functions, sensors have one main constraint which is hyper power consumption. In this context, we propose to study and analyze the problem of improving the energy in sensor nodes using photovoltaic (solar) energy to provide the greatest possible amount of energy using: a solar panel that converts sunlight into electrical energy, MPPT (Maximum power point tracking) circuit and a Buck type DC-DC converter that control the power supplied to the load (sensors node). To implement the project, we presented the main modules and components that are particularly involved in the solar energy recovery circuit and generally in sensors node. This study is completed by the design of the complete solar energy recovery circuit using the "Altium Designer" software, and also by the use of the "Arduino UNO" board which allowed us to program the behavior of each component of this circuit.

## *Listes des acronymes et abréviations*

A	Ampère
AC	Alternative Current
ADC	Analog to Digital Converter
C	Coulomb
CAN	Convertisseur Analogique Numérique
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
D	Diode
DC	Direct Current
DRC	Design Rules Check
EEPROM	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory
E/S	Entrée/Sortie
F	Fusible
G	L'éclairage
GPV	Générateur photovoltaïque
GPS	Global Positioning System
HVAC	High Voltage Alternative Current
I	Courant
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
J/K	Joule/Kelvin
Khz	Kilo Hertz
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
LSTTL	Low power Schottky Transistor- Transistor Logic
MAC	Media Access Control
MCU	Microcontrôleur Unité
MLI	Modulation Large Impulsion
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Transistor

MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Traking
mw/cm <sup>2</sup>	milliwatt/centimètre carrée
P	Puissance
P&O	Perturbation et observation
PCB	Printed Circuit Board
PV	Photovoltaïque
PWM	Pulse Width Modulation
Q	Transistor MOSFET
R	Résistance
RCSF	Réseaux de Capteur Sans Fils
T	Température
us	micro seconde
USB	Universal Serial Bus
V	Tension
v	Volt
Vcc	notation en anglais pour "alimentation continue"
w/m	watt/mètre
w/m <sup>2</sup>	watt/mètre carrée
WSN	Wireless Sensor Network
°K	Degré Kelvin
°C	Degré Celsius
Ω	Ohm

# *Table des matières*

Résumé .....	i
Listes des acronymes et abréviations .....	ii
Table des matières .....	iv
Liste des figures .....	vi
Liste des tableaux .....	viii
Introduction générale .....	1

## **Chapitre I: Concepts généraux sur les réseaux de capteur sans fils**

I.1 Introduction .....	3
I.2 Les capteurs .....	3
I.3 Nœud de capteur .....	3
I.3.1 Définition .....	3
I.3.2 Architecture d'un nœud capteur .....	4
I.3.3 Fonctionnement d'un nœud capteur .....	5
I.4 Les réseaux de capteur sans fils (RCSF) .....	5
I.4.1 Définition .....	5
I.4.2 Les caractéristiques d'un RCSF .....	6
I.4.2.1 Les composants d'un RCSF .....	6
I.4.2.2 Architecture de communication .....	6
I.4.2.3 pile protocolaire .....	7
I.4.3 Les applications d'un RCSF .....	8
I.4.4 Les Contraintes de conception d'un RCSF .....	10
I.5 Conclusion .....	11

## **Chapitre II: Gestion de l'énergie dans les nœuds de capteurs**

II.1 Introduction .....	12
II.2 Budget énergétique dans les nœuds de capteur .....	12
II.2.1 L'énergie de capteur (acquisition) .....	12
II.2.2 L'énergie de traitement .....	13
II.2.3 L'énergie de communication .....	13
II.3 Autonomie énergétique dans les nœuds de capteur .....	13
II.3.1 Les différentes sources d'énergie .....	14
II.3.1.1 L'énergie thermique .....	14
II.3.1.2 L'énergie radiofréquence .....	15
II.3.1.3 L'énergie cinétique .....	15
II.3.1.4 L'énergie solaire photovoltaïque .....	15
II.4 L'énergie solaire .....	16
II.4.1 Effet photovoltaïque .....	16
II.4.2 Modélisation de la cellule photovoltaïque .....	17

II.4.3	Caractéristiques électrique d'une cellule photovoltaïque .....	18
II.4.3.1	La caractéristique courant-tension I-V .....	18
II.4.3.2	La caractéristique puissance tension P-V .....	19
II.4.3.3	Les zones de fonctionnement d'un module solaire .....	19
II.5	Conclusion .....	20

### **Chapitre III: La récupération d'énergie solaire pour un nœud de capteur**

III.1	Introduction .....	21
III.2	système de récupération d'énergie solaire .....	21
III.2.1	le panneau solaire .....	21
III.2.2	Le convertisseur DC-DC .....	22
III.2.2.1	Convertisseur BOOST .....	23
III.2.2.2	Convertisseur BUCK .....	23
III.2.2.3	Convertisseur BUCK-BOOST .....	23
III.2.3	Suivi du point de puissance maximale (Maximum power point tracking) .....	24
III.2.4	L'unité de stockage d'énergie .....	28
III.3	Présentation des éléments de la récupération de l'énergie solaire .....	29
III.3.1	La source d'énergie .....	30
III.3.2	L'unité de récupération d'énergie solaire .....	30
III.3.3	La charge .....	37
III.3.3.1	La carte ARDUINO UNO .....	37
III.3.3.2	Le nœud de capteur .....	39
III.3.3.3	Le protocole de communication "XBEE" .....	41
III.3.3.4	L'afficheur LCD .....	42
III.4	Bilan énergétique .....	43
III.4.1	Énergie consommée par la charge .....	43
III.4.2	Énergie total consommée par le système .....	44
III.5	Conclusion .....	44

### **Chapitre IV: Conception et réalisation**

IV.1	Introduction .....	45
IV.2	Méthodologie de conception de PCB .....	45
IV.2.1	Présentation de l'outil "Altium Designer" .....	46
IV.3	Conception de circuit imprimé .....	47
IV.3.1	Présentation de l'architecture PCB du circuit récupérateur d'énergie .....	47
IV.3.1.1	L'entré de panneau solaire .....	48
IV.3.1.2	Le capteur de courant "ACS712" .....	48
IV.3.1.3	Le circuit de convertisseur BUCK .....	48
IV.3.1.4	Le contrôleur "IR2104" .....	49
IV.3.1.5	Le régulateur de tension (AMS1117) .....	50
IV.3.1.6	La sortie de la carte de récupération d'énergie solaire .....	50
IV.3.2	Création de la carte .....	51
IV.3.3	Importation des composent dans PCB .....	54
IV.3.4	Placement des composants .....	55
IV.3.5	Le routage .....	56
IV.3.6	Validation du routage (Design Rule Check DRC) .....	57
IV.3.7	Création des fichiers de sortie .....	58

IV.4 La programmation .....	60
IV.4.1 Présentation de l'environnement de programmation IDE ARDUINO.....	61
IV.4.2 Injection du programme de notre projet.....	61
IV.4.2.1 Programme de mesure de la tension.....	63
IV.4.2.2 Programme de mesure du courant.....	63
IV.4.2.3 Programme de l'algorithme MPPT.....	64
IV.4.2.4 Programme du module WIFI.....	65
IV.5 Conclusion .....	66
<b>Conclusion générale</b> .....	67
<b>Bibliographie</b> .....	I
<b>Annexe</b> .....	IV

## *Liste des figures*

Figure I.1 Présentation d'un capteur .....	3
Figure I.2 Architecture d'un nœud de capteur .....	4
Figure I.3 Réseau de capteur sans fil .....	5
Figure I.4 La communication d'un RCSF .....	6
Figure I.5 Pile protocolaire .....	7
Figure I.6 Les applications d'un RCSF .....	8
Figure I.7 Les RCSF dans le domaine militaire .....	8
Figure I.8 Les RCSF dans le domaine médical .....	9
Figure I.9 Les RCSF dans le domaine environnemental .....	9
Figure I.10 Les RCSF dans le domaine industriel .....	10
Figure II.1 Consommation d'énergie dans un nœud de capteur .....	13
Figure II.2 Différentes sources d'énergie pouvant alimenter un nœud de capteur .....	14
Figure II.3 Procédé de capture et de conversion d'énergie ambiante .....	15
Figure II.4 Effet photovoltaïque .....	17
Figure II.5 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque .....	17
Figure II.6 Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque .....	18
Figure II.7 Courbe caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque .....	19
Figure II.8 Zones de fonctionnement d'un GPV $G=1000w/m^2$ , $T=25C^{\circ}$ .....	19
Figure III.1 Système de récupération d'énergie solaire .....	21
Figure III.2 Panneaux solaire .....	22
Figure III.3 Convertisseur DC-DC .....	23
Figure III.4 Schéma de principe du hacheur BOOST .....	23
Figure III.5 Structure du convertisseur BUCK .....	23
Figure III.6 Structure du convertisseur BUCK-BOOST .....	24
Figure III.7 Point de puissance maximale .....	25
Figure III.8 Connexion électrique directe entre un générateur PV et une charge .....	25
Figure III.9 Association de l'étage d'adaptation entre le générateur et la charge .....	26
Figure III.10 Caractéristique puissance - tension du générateur photovoltaïque .....	27
Figure III.11 Organigramme de l'algorithme perturber & observer .....	28

Figure III.12	Les batteries solaires et les super capacités .....	29
Figure III.13	Système de récupération d'énergie solaire pour nœud de capteur .....	30
Figure III.14	Panneau solaire 12V-50W .....	30
Figure III.15	Capteur de courant ACS712 .....	31
Figure III.16	Le transistor MOSFET "IRFZ44N" .....	31
Figure III.17	Le driver "IR2104" .....	32
Figure III.18	La diode "1N4148" .....	32
Figure III.19	Le régulateur de tension "LM2596S" .....	32
Figure III.20	Le module "LM2596S" .....	32
Figure III.21	Le régulateur de tension "AMS1117" .....	33
Figure III.22	Signal de commande de l'interrupteur .....	33
Figure III.23	Schéma équivalent du hacheur Buck à l'état ON .....	34
Figure III.24	Forme d'onde du courant de l'inductance .....	34
Figure III.25	Schéma équivalent du hacheur Buck à l'état OFF .....	35
Figure III.26	La carte ARDUINO UNO .....	38
Figure III.27	Capteur de température et humidité "DHT22" .....	39
Figure III.28	Branchement de "DHT22" avec la carte ARDUINO .....	39
Figure III.29	Capteur de gaz "MQ2" .....	39
Figure III.30	Branchement de "MQ2" avec la carte ARDUINO .....	39
Figure III.31	Capteur de lumière "TEMT6000" .....	40
Figure III.32	Branchement de "TEMT6000" avec la carte ARDUINO .....	40
Figure III.33	Capteur d'humidité de sol .....	40
Figure III.34	Branchement de capteur d'humidité de sol avec la carte ARDUINO .....	40
Figure III.35	Protocole de communication "XBEE" .....	41
Figure III.36	Le protocole des couches utilisées pour le XBEE .....	41
Figure III.37	La topologie étoile de protocole ZIGBEE .....	42
Figure III.38	Branchement de "XBEE" avec la carte ARDUINO .....	42
Figure III.39	Afficheur LCD16X2 .....	43
Figure III.40	Le dispositif I2C "PCF8574" .....	43
Figure III.41	Branchement de LCD en mode "I2C" avec la carte ARDUINO .....	43
Figure VI.1	Méthodologie conception d'un circuit imprimé .....	45
Figure VI.1	Environnement d'ALTIUM Designer .....	47
Figure VI.3	Schématique générale du circuit de la récupération d'énergie solaire .....	47
Figure VI.4	Circuit de l'entrée de panneau solaire avec les composants de protection .....	48
Figure VI.5	Circuit de capteur de courant "ACS712" .....	48
Figure VI.6	Convertisseur BUCK et les MOSFETS.....	49
Figure VI.7	LM2596 .....	49
Figure VI.8	Circuit de contrôleur IR2104 .....	50
Figure VI.9	Le circuit d'AMS1117 .....	50
Figure VI.10	Le circuit de sortie .....	51
Figure VI.11	L'outil PCB Board wizard .....	51
Figure VI.12	Définir les dimensions de la carte .....	52
Figure VI.13	La règle "Electrical→Clearance" .....	52
Figure VI.14	La règle "Routing→Width" .....	53
Figure VI.15	Le nombre des couches .....	53
Figure VI.16	La sélection des couches .....	53
Figure VI.17	Les paramètres de notre carte .....	54
Figure VI.18	Import les composent vers le PCB .....	54
Figure VI.19	La carte avec les composants non placés .....	55

Figure VI.20	Placement des composants .....	55
Figure VI.21	La carte avec les composants placés .....	56
Figure VI.22	Le routage automatique .....	56
Figure VI.23	Rapport de DRC .....	57
Figure VI.24	Le circuit imprimé en mode plan de la carte (planning mode) .....	57
Figure VI.25	Le circuit imprimé en 2 dimensions (2D) .....	57
Figure VI.26	La face supérieure du circuit imprimé en 3 dimensions (3D) .....	58
Figure VI.27	Étape 1 de fichier de sortie Gerber .....	59
Figure VI.28	Étape 2 de fichier de sortie Gerber .....	59
Figure VI.29	Étape finale de fichier de sortie Gerber .....	59
Figure VI.30	Dessin d'assemblage .....	60
Figure VI.31	Figure IV.31 Interface IDE ARDUINO .....	61
Figure VI.32	Diverses Différentes librairies utilisées .....	62
Figure VI.33	Déclaration des constants et variables .....	62
Figure VI.34	Échantillon de programme de mesure de tension .....	63
Figure VI.35	Échantillon de programme de mesure de courant .....	64
Figure VI.36	Échantillon de programme d'algorithme .....	65
Figure VI.37	Échantillons du programme de module WIFI .....	65

## *Liste des tableaux*

Tableau III.1	Comparaison entre la batterie et super capacité .....	29
Tableau III.2	Consommation d'énergie par les principaux composants du circuit de récupération d'énergie solaire .....	37
Tableau III.3	Caractéristiques de la carte Arduino .....	38
Tableau III.4	Caractéristiques de la technologie ZIGBEE .....	41
Tableau III.5	Puissance consommée par la charge .....	44
Tableau III.6	Puissance totale consommée .....	44

## **Introduction générale**

---

De nos jours l'humanité est confrontée à plusieurs problèmes liés à la santé, la sécurité alimentaire, la sécurité des personnes et des biens, la dégradation de l'environnement et les catastrophes naturelles. La surveillance de tous les paramètres susceptibles d'agir directement ou indirectement sur la sécurité et la qualité de vie des personnes est devenue une nécessité absolue.

La surveillance, la prévision et la supervision des éruptions volcaniques [1], des séismes, des tsunamis [2], de la pollution de l'environnement, sont des exemples réels et d'actualité. Pour assurer cette surveillance, il est devenu extrêmement nécessaire de mettre au point et d'installer plusieurs réseaux de capteurs sans fil fiables.

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont des réseaux constitués de dispositifs électroniques appelés nœuds de capteurs pouvant communiquer entre eux par liaison radio ou optique [3].

Ce type de réseaux présente des contraintes dont la plus importante est leur faible capacité d'énergie, puisque les nœuds de capteurs sont dotés de batteries non rechargeables dans la majorité des cas. Pour prolonger la durée de vie d'un réseau de capteur sans fil tout en assurant les trois tâches principales : capture, traitement, et communication, il faut bien conserver leur énergie. Parmi ces trois tâches, la communication est la tâche qui consomme la plus grande partie de l'énergie. Ceci a motivé notre travail à se focaliser sur une technique de récupération d'une énergie renouvelable spécialement l'énergie solaire photovoltaïque.

L'énergie solaire photovoltaïque est la première source d'énergie renouvelable exploitée sur Terre. Elle ne produit pas de gaz à effet de serre et contribue à la lutte contre le changement climatique. De plus, elle est gratuite, non polluante et peut être produite sur le lieu de consommation. Cette énergie provient de la transformation du rayonnement solaire en énergie électrique de type continu directement utilisable. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) composée de matériaux semi conducteurs d'où l'appellation «effet photovoltaïque». La connexion séries / parallèles de plusieurs cellules photovoltaïques constitue un générateur photovoltaïque dont la caractéristique courant-tension (I-V) présente un point de puissance maximale (MPP). Malheureusement ce générateur n'est pas aussi puissant que les sources d'énergie

traditionnelles. Pour compenser les problèmes associés à l'utilisation des panneaux solaires on fait appel à des circuits électroniques pour réaliser des sources plus actives et plus stables. Ces systèmes électroniques doivent être conçus et réalisés de manière à réduire leur coût et leur complexité pour les rendre facile à utiliser, à réparer ou à modifier.

L'objectif de notre travail est de développer un système de récupération d'énergie solaire simple, peu coûteux, facile à réparer et surtout durable pour être utilisé dans un réseau de capteurs sans fils. Le système en question est constitué d'un module photovoltaïque, et d'un convertisseur statique de types DC-DC. Le système est géré par la carte Arduino uno où est implémenté le programme de gestion des différents modules et composants ainsi que l'algorithme du point de puissance maximale de type Perturbation et Observation (P&O). Cette réalisation est précédée d'une simulation à l'aide du logiciel Altium Designer. Ce mémoire comporte quatre chapitres:

Dans le premier chapitre, nous allons présenter les réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures de communication, leurs principaux facteurs et contraintes qui ont une influence directe sur leur conception ainsi que leurs différentes applications.

Nous consacrons le deuxième chapitre à la présentation de l'énergie utilisée pour alimenter ce type de réseaux sans fil. Nous évoquons tout d'abord le problème de l'énergie au sein d'un réseau de capteurs, puis la compréhension de quelques aspects du système photovoltaïque : leur principe de fonctionnement et leurs caractéristiques. Nous terminons ce chapitre par la présentation des différents types de cellules solaires ainsi que l'étude de modélisation avec le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Le troisième chapitre fera l'objet de l'étude détaillée du système de récupérations de l'énergie solaire, d'une description technique du matériel associé au système et à la charge et enfin un bilan énergétique correspondant à la charge et au système global.

Dans le chapitre 4, nous présentons la conception du circuit imprimé de notre récupérateur d'énergie moyennant l'outil « Altium Designer » pour la conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil, le branchement des capteurs avec la carte « Arduino UNO » et une description de la programmation de notre réalisation.

Nous terminons notre mémoire par une conclusion générale comportant quelques perspectives de développements futurs.

# Chapitre I Concepts généraux sur les réseaux de capteur sans fil

## I.1 Introduction

Les progrès observés dans les domaines des nanotechnologies, des télécommunications, des traitements de l'information, associé au développement de nouvelles technologies ont donné naissance à de nouveaux dispositifs communicants qui améliorent grandement la qualité de vie. Parmi ces derniers, nous citons les réseaux de capteurs sans fil. En effet, réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont des réseaux ad hoc généralement constitués d'entités autonomes miniaturisées appelés nœuds capteurs pouvant communiquer entre eux par liaison radio. Ils ont suscité un grand engouement au sein de la communauté scientifique et industrielle.

Dans ce chapitre nous allons présenter les concepts de bases liés aux capteurs et nœuds de capteurs dans le but de concevoir un réseau de capteur adaptable à différentes applications.

## I.2 Les capteurs

Un capteur est un organe de prélèvement d'information autonome capable d'effectuer des mesures simples sur son environnement immédiat. Ces mesures peuvent tant concerner la température, la pression, l'accélération que la lumière ou le son.

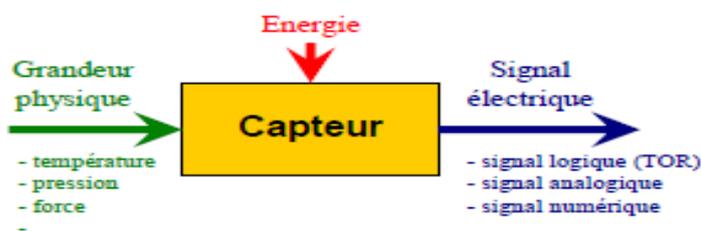


Figure I.1 Présentation d'un capteur. [4]

De nos jours, un grand nombre de capteurs ont vu le jour avec des fonctionnalités diverses et variées. Cependant, la plupart des capteurs dépendent de l'application pour lesquels ils ont été conçus (capteurs pression, aquatique, capteur sous-terrain, capteur pour agriculture, capteur pour la santé etc. . .).

## I.3 Nœud de capteur

### I.3.1 Définition

Les capteurs sont de petits dispositifs électroniques, une sorte de petits calculateurs capable de capter une information, la modifier, la stocker et la transmettre à une station de base ou à un autre capteur. [5]

### I.3.2 Architecture d'un nœud capteur

Un nœud capteur est composé de quatre unités principales, qui sont présentées dans la figure (I.2).

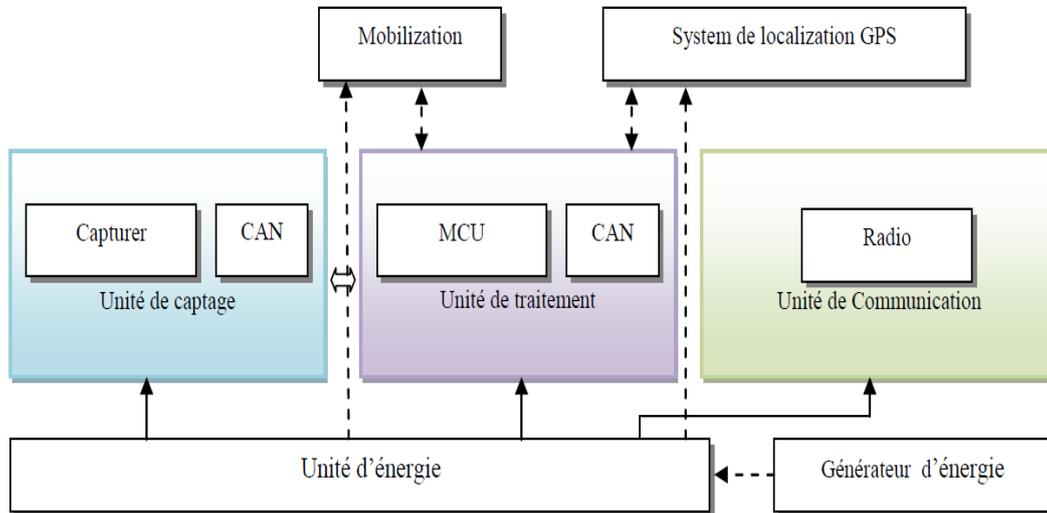


Figure I.2 Architecture d'un nœud de capteur.

- **Unité de capture (Sensing unit):** elle est composée d'un ou plusieurs capteurs, liés à un dispositif qui va obtenir des mesures analogiques sur les paramètres environnementaux et les transformer en signaux numériques. D'un convertisseur Analogique/Numérique afin de pouvoir être traité par l'unité de traitement.
- **Unité de traitement (Processing unit):** c'est l'unité principale du capteur. Elle est composée de deux interfaces : une interface pour l'unité d'acquisition et une autre pour l'unité de transmission. Elle est composée d'un microcontrôleur dédié et de la mémoire, son rôle est de contrôler le bon fonctionnement des autres unités. Cette unité est chargée aussi d'exécuter les protocoles de communications qui permettent de faire collaborer un capteur avec d'autres capteurs. Elle peut aussi analyser les données captées.
- **Unité de transmission (Transceiver unit):** responsable de la transmission et de la réception des données. Cette unité comporte deux modules : un module radiofréquence d'émission / réception permettant la communication sans fil entre les différents nœuds du réseau, et un module série permettant directement l'interfaçage entre l'utilisateur et le nœud, facilitant ainsi la reprogrammation de l'unité de traitement.

- **Unité d'énergie (Power unit):** responsable de la gestion de l'énergie et de l'alimentation de tous les composants du capteur (par exemple, en mettant en veille les composants inactifs). Elle consiste généralement en une batterie qui est limitée et irremplaçable, ce qui rend l'énergie comme principale contrainte pour un capteur. [6]

### I.3.3 Fonctionnement d'un nœud capteur

Les nœuds capteurs sont habituellement dispersés dans une zone de capture. Chacun de ces nœuds a la possibilité de collecter les données et de les router vers une ou plusieurs stations de base (sink nodes). Ce dernier est un point de collecte de données capturées. Il peut communiquer les données collectées à l'utilisateur final à travers un réseau de communication, éventuellement l'Internet. L'utilisateur peut à son tour utiliser la station de base comme passerelle, afin de transmettre ses requêtes au réseau. [7]

## I.4 Les réseaux de capteur sans fils (RCSF)

### I.4.1 Définition

Un réseau de capteurs sans fil (Wireless Sensor Network "WSN") est un ensemble de nœuds, variant de quelques dizaines d'éléments à plusieurs milliers, communiquant sans fil et capable de récolter et transmettre des données environnementales et de réagir en cas de besoin. Les RCSFs permettent le développement de plusieurs applications existantes et nouvelles telles : la surveillance environnementale (monitoring), sûreté publique, gestion d'infrastructure, domaine militaire, santé, etc. Les capteurs sont utilisés pour recueillir et surveiller les données. [8]

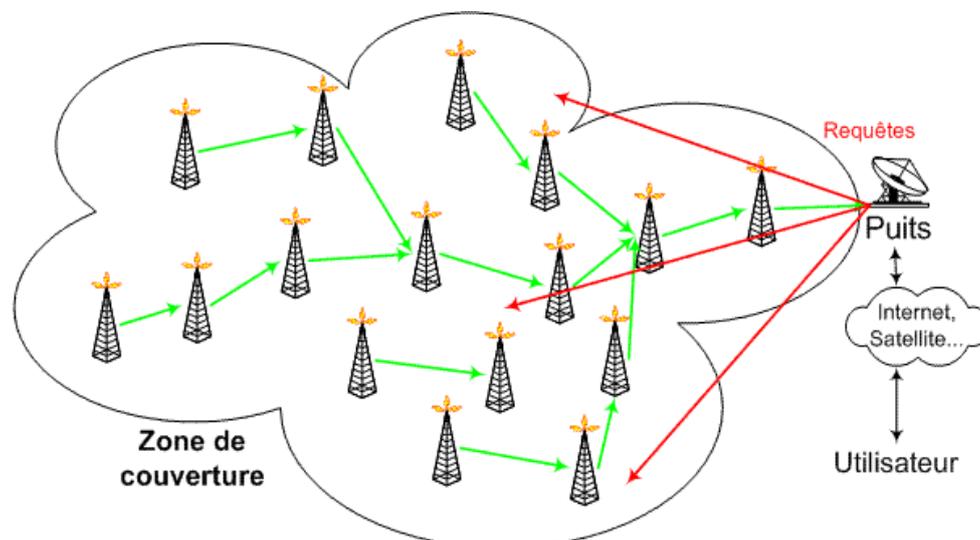


Figure I.3 Réseau de capteur sans fil. [7]

## I.4.2 Les caractéristiques d'un RCSF

Un RCSF est caractérisé par ses composants, son architecture et sa pile protocolaire.

### 1.4.2.1 Les composants d'un RCSF

Les principaux composants d'un RCSF sont comme suit :

- **Nœuds de capteurs:** un ensemble de nœud de capteurs dont le type, l'architecture et la disposition dépendent de l'application à implémenter.
- **Sink:** c'est un nœud particulier dans le réseau. Il est chargé de collecter les informations des différents nœuds du réseau. Il doit être toujours actif car l'information peut arriver à tout moment. Dans les réseaux WSN larges et dont la charge est importante, on peut trouver plusieurs sink pour assurer la bonne gestion.
- **Centre de traitement des données (station de base):** c'est un centre vers lequel les données collectées par le nœud sink sont envoyées. Le centre a pour rôle de regrouper toute des données collectées et les traiter afin d'en faire sortir des informations utiles et exploitables. L'emplacement du centre est éloigné des nœuds sink, ce qui amène à faire intégrer d'une passerelle entre le sink et le centre de traitement pour adapter le type de données au type de canal et par conséquent assurer le Transfer des données.

### I.4.2.2 Architecture de communication

Comme l'illustre la figure ci-dessous, les nœuds de capteur sont repartis au hasard dans une zone (environnement à surveillé), chacun a la possibilité de collecter les données et la transmettre vers la station de base (sink nodes) ou toutes les informations capturées sont collecté. La station de base (centre de traitement) est utilisée comme une passerelle pour transporter les données au réseau (figure I.4).

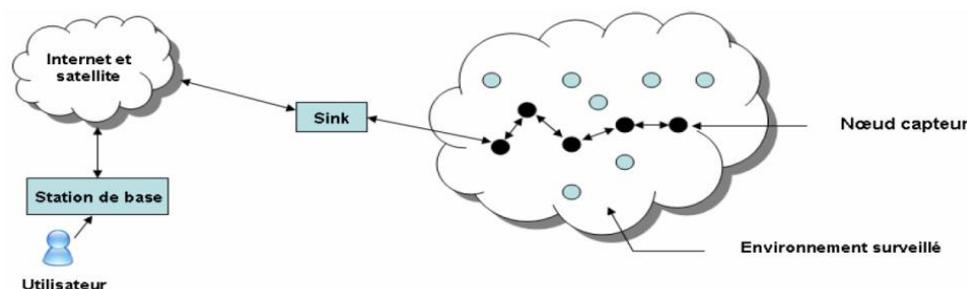


Figure I.4 La communication d'un RCSF.

### I.4.2.3 La pile protocolaire

La pile protocolaire utilisée par la station de base ainsi que tous les autres capteurs du réseau est illustrée par la figure (I.5).

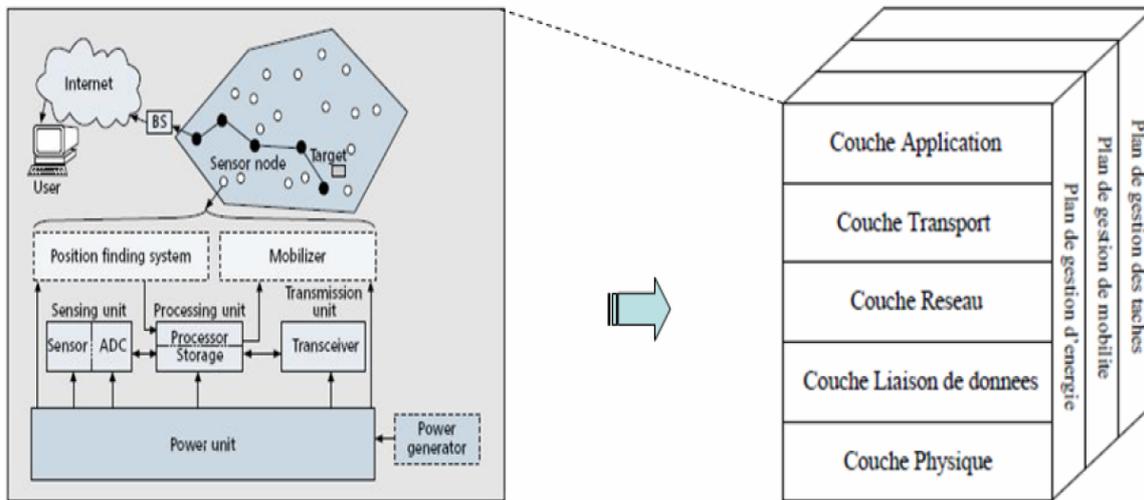


Figure I.5 Pile protocolaire. [7]

La pile protocolaire comprend de:

- **La couche application:** elle constitue l'ensemble des applications implémentées sur un réseau de capteurs. Ces applications doivent fournir des mécanismes permettant à l'utilisateur d'interagir avec le RCSF à travers différentes interfaces, et éventuellement par l'intermédiaire d'un réseau étendu.
- **La couche transport:** cette couche est chargée du transport de données, de leur découpage en paquets, du contrôle de flux, de la conservation de l'ordre des paquets et de la gestion des éventuelles erreurs de transmission.
- **La couche réseau:** son rôle est de trouver une route et une transmission fiable des données captées des nœuds capteurs vers le puits en optimisant l'utilisation de l'énergie des capteurs.
- **La couche liaison de données:** cette couche est responsable du multiplexage du flux de données, du contrôle d'accès aux média (MAC Media Acces Control), et du contrôle des erreurs.
- **La couche physique:** qui est responsable de la sélection des fréquences, la détection de signal et la modulation.

### I.4.3 Les applications d'un RCSF

De nos jours, l'évolution des technologies dans les domaines de l'électronique, de l'informatique industrielle, de l'instrumentation, des réseaux et télécommunication, a permis d'élargir les domaines d'applications liés aux réseaux de capteurs sans fils. Comme l'illustre la figure (I.6), ces derniers sont de plus en utilisés.

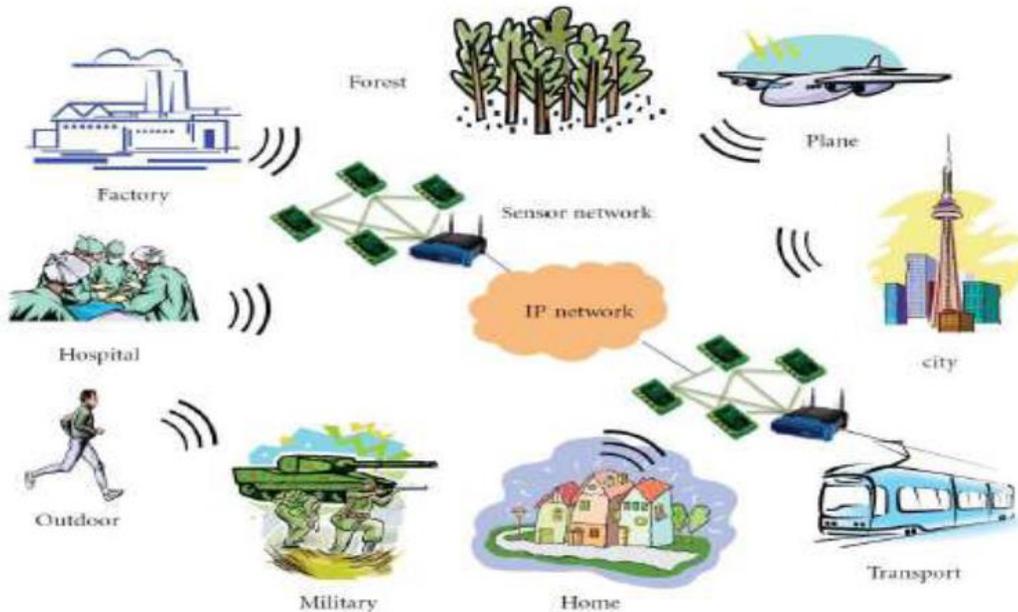


Figure I.6 Les applications d'un RCSF. [9]

Parmi les applications liées aux RCSF nous pouvons citer :

- **Domaine militaire:** comme pour de nombreuses autres technologies, le domaine militaire a été le moteur initial pour le développement des réseaux de capteurs. Le déploiement rapide, le coût réduit, l'auto organisation et la tolérance aux pannes des réseaux de capteurs sont des caractéristiques qui font de ce type de réseaux un outil appréciable dans un tel domaine. Actuellement, les RCSF peuvent être une partie intégrante dans le commandement, le contrôle, la communication, la surveillance, la reconnaissance...etc.



Figure I.7 Les RCSF dans le domaine militaire.

- **Domaine médical:** les réseaux de capteurs sont également largement répandus dans le domaine médical. Cette classe inclut des applications comme : fournir une interface d'aide pour les handicapés, collecter des informations physiologiques humaines de meilleure qualité, facilitant ainsi le diagnostic de certaines maladies, surveiller en permanence les malades et les médecins à l'intérieur de l'hôpital.

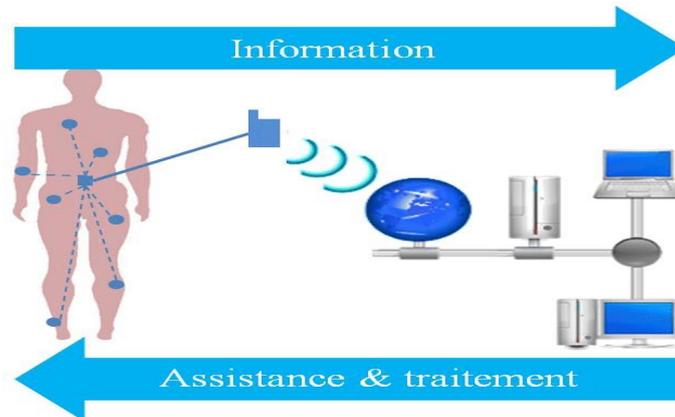


Figure I.8 Les RCSF dans le domaine médical.

- **Domaine architectural:** transformation des bâtiments en environnements intelligents capables de reconnaître des personnes, interpréter leurs actions et réagir.
- **Domaine environnemental:** dans ce domaine, les capteurs peuvent être exploités pour détecter les catastrophes naturelles (feux de forêts, tremblements de terre, etc.), détecter des émanations de produits toxiques (gaz, produits chimiques, pétrole, etc.) dans des sites industriels tels que les centrales nucléaires ou pétrolières.



Figure I.9: Les RCSF dans le domaine environnemental.

- **Domaine commercial:** parmi les domaines dans lesquels les réseaux de capteurs ont aussi prouvé leur utilité, on trouve le domaine commercial. Dans ce secteur nous

pouvons énumérer plusieurs applications comme : la surveillance de l'état du matériel, le contrôle et l'automatisation des processus d'usinage, etc.

- **L'industrie:** les industriels s'intéressent au potentiel des capteurs pour diminuer les coûts du contrôle et de la maintenance des produits, de la gestion de l'inventaire et de la télésurveillance après-vente. En particulier, l'intégration de la technologie RFID avec les réseaux de capteurs est une des directions prometteuses de recherche dans l'industrie.



Figure I.10: Les RCSF dans le domaine industriel.

- **Les domaines urbains et domotiques:** les capteurs entrent de plus en plus dans nos vies quotidiennes. Dans le milieu urbain, les capteurs sont déjà utilisés pour la localisation des bus, pour des tickets électroniques et pour la sécurité. Une des applications est la surveillance du trafic routier avec les réseaux de capteurs déployés sur les autoroutes. De plus, les maisons, les bâtiments, les bureaux équipés de capteurs intelligents permettent de construire des systèmes où l'information est omniprésente. [10]

#### I.4.4 Les Contraintes de conception d'un RCSF

La conception des RCSF, leurs protocoles et algorithmes sont guidés par plusieurs facteurs à prendre en considération lors de la conception d'un RCSF:

- **La tolérance aux pannes:** la défaillance ou le blocage de certains nœuds dans un réseau de capteurs peut être engendrés par plusieurs causes, notamment l'épuisement d'énergie, l'endommagement physique ou les interférences liées à l'environnement. Ces problèmes ne devraient pas affecter le reste du réseau. C'est le principe de la tolérance aux pannes.
- **L'extensibilité (passage à l'échelle):** l'une des caractéristiques des RCSF est qu'ils peuvent contenir des centaines voire des milliers de nœuds capteurs. Suivant l'application, ce nombre peut encore augmenter jusqu'à des millions de capteurs.

Les nouveaux schémas doivent pouvoir garantir un bon fonctionnement avec ce nombre élevé de capteurs. Ils doivent aussi exploiter la nature fortement dense des réseaux de capteurs.

- **Environnement:** les nœuds capteurs doivent être conçus d'une manière à résister aux différentes et sévères conditions de l'environnement : forte chaleur, pluie, humidité...
- **Média de transmission:** les nœuds communicants sont reliés sans fil. Ce lien peut être réalisé par radio, signal infrarouge ou un média optique.
- **Contrainte d'énergie, de stockage et de calcul:** la caractéristique la plus critique dans les réseaux de capteurs est la modestie de ses ressources énergétiques car chaque capteur du réseau possède de faibles ressources en termes d'énergie, de calcul et de stockage. Afin de prolonger la durée de vie du réseau, une minimisation des dépenses énergétiques est exigée chez chaque nœud.
- **Agrégation de données:** dans les RCSF, les données produites par les nœuds capteurs voisins sont corrélées spatialement et temporellement. Ceci peut engendrer la réception par la station de base d'information redondante. Réduire la quantité d'informations redondantes transmises par les capteurs permet de réduire la consommation d'énergie dans le réseau ainsi d'améliorer sa durée de vie. L'une des techniques utilisée pour réduire la transmission d'informations redondantes est l'agrégation des données, appelée aussi fusion des données. [5]

## I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés les concepts de base liés aux RCSF. Ces derniers ne cessent de prendre une place très appréciée au sein de la communauté de recherche scientifique et industriel vu leurs déploiement assez simple et leurs applications qui se développent chaque jour pour élargir leurs horizons, Néanmoins, ces derniers présentent un sérieux problème lié à leur alimentation.

De ce fait, dans le prochain chapitre, nous aborderons la problématique liée à la consommation énergétique dans les RCSF, en axant particulièrement notre réflexion sur l'autonomie énergétique de ces derniers en proposant des solutions adéquates.

## **Chapitre II Gestion de l'énergie dans les nœuds de capteur**

---

### **II.1 Introduction**

La consommation d'énergie est un problème crucial pour les RCSFs lorsque les capteurs sont déployés dans des zones inaccessibles ou encore déployés sur de grands espaces. Cette problématique suscite un grand engouement de la part de la communauté scientifique. En effet, les nœuds de capteur sont alimentés par une batterie à capacité limitée, ces derniers sont souvent déployés dans des zones hostiles, difficilement accessible à l'être humains, excluant ainsi toute maintenance pour un rechargement ou remplacement des batteries. De ce fait, les nœuds limités en termes d'énergie vont avoir un impact sur la durée de vie du réseau tout entier. Augmenter la durée de vie du réseau sans augmenter la capacité des batteries signifie réduire la dépense d'énergie des nœuds. Prenons pour exemple le cas des applications de surveillance exigeant que le réseau de capteurs soit opérationnel pendant une très longue durée, économiser l'énergie dans ce cas de figure est un véritable challenge. La littérature scientifique traitant sur le budget et l'efficacité énergétique dans les réseaux de capteurs est abondante.

Nous consacrons ce chapitre à la présentation de la problématique liée à la gestion et consommation de l'énergie dans les RCSFs.

### **II.2 Budget énergétique dans les nœuds de capteur**

L'énergie consommée par un nœud de capteur (i.e. RCSF) est essentiellement dû aux différentes opérations liées à l'acquisition des données (énergie de capture), le traitement des données (énergie de traitement) et principalement la communication (énergie de communication).

#### **II.2.1 L'énergie de capture (acquisition)**

Les différents capteurs existant sont généralement équipés par plusieurs capteurs tels que la température, humidité, pression, etc. Les sources de consommation d'énergie pour les différentes opérations d'acquisitions sont: l'échantillonnage, traitement de signal, conversion analogique/numérique et activation de la sonde de capture. Cette énergie consommée au moment de la mesure varie suivant la nature du capteur. En effet, pour la capture des données scalaires simples, comme la température, vibrations, humidité ou la pression, quelques octets est largement suffisante pour leur codage (2 ou 3 octets). Tandis que pour une image il est généralement représenté sur plusieurs milliers d'octets (16384

octets pour une image de taille  $128 \times 128$  codée sur 8 bits par pixel). Malgré ces variétés, l'énergie d'acquisition représente un faible pourcentage de l'énergie totale consommée. [11]

## II.2.2 L'énergie de traitement

L'énergie de traitement est subdivisée en deux : l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel. Alors que l'énergie de fuite correspond à l'énergie consommée lorsque l'unité de calcul n'effectue aucun traitement.

## II.2.3 L'énergie de communication

L'unité de communication est responsable de toutes les opérations de transmissions et réceptions de données via un support de communication radio. De ce fait, l'énergie de communication est déterminée principalement par la quantité des données à communiquer et la distance de transmission, ainsi que par les propriétés physiques du module radio. Cette énergie se décline en deux parties : l'énergie de réception et l'énergie de l'émission. Le coût de réception est fixe mais le coût en émission dépend de la puissance d'émission du signal radio, du débit binaire et de la taille des données à transmettre. Quand la puissance d'émission est élevée, le signal aura une grande portée et l'énergie consommée sera plus élevée. Il est à noter que cette partie d'énergie dépensée représente la portion la plus grande de l'énergie totale consommée par un nœud capteur comme l'illustre la figure (II.1). [12]

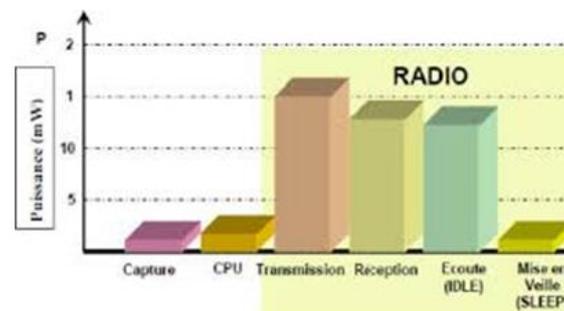


Figure II.1 Consommation d'énergie dans un nœud de capteur [13]

## II.3 Autonomie énergétique dans les nœuds de capteur

Différentes solutions sont envisageables pour alimenter un système, à savoir une alimentation filaire, une alimentation par batterie/ pile ou carrément par un système de récupération d'énergie ambiante. Ainsi, au cours des dernières décennies, les circuits électroniques conçus autour des réseaux de capteurs se sont fortement améliorés en termes de puissance et d'intégration.

Cependant, un dispositif sans fil implique inévitablement une autonomie énergétique et un système de batteries, qui sont la source d'alimentation traditionnellement employée. Seulement, ces derniers n'ont pas vu leur performance augmenter à la mesure des progrès des autres composants d'un nœud de capteur. Ce problème d'alimentation est sans doute le plus important facteur limitant le déploiement massif des réseaux de capteurs sans fil.

La solution est alors d'utiliser des énergies rechargeables. Ces réservoirs d'énergie ont besoin d'une source d'énergie primaire pour les recharger. Certaines sources d'énergie ambiantes bien connues comme le soleil ou le vent permettent de générer une énergie importante pouvant être réinjectée sur un réseau électrique national. Cependant, d'autres sources comme les vibrations, température ambiantes sont moins connues.

Dans ce qui suit, nous présenterons quelques sources d'énergie utilisables pour l'alimentation des appareils électroniques de faible puissance (.i.e. nœud de capteur).

### II.3.1 Les différentes sources d'énergie

Comme l'illustre la figure (II.2) la récupération d'énergie consiste à convertir l'énergie ambiante (source d'énergie) présente dans l'environnement en électricité dans le but de fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement du système (i.e. nœud de capteur).

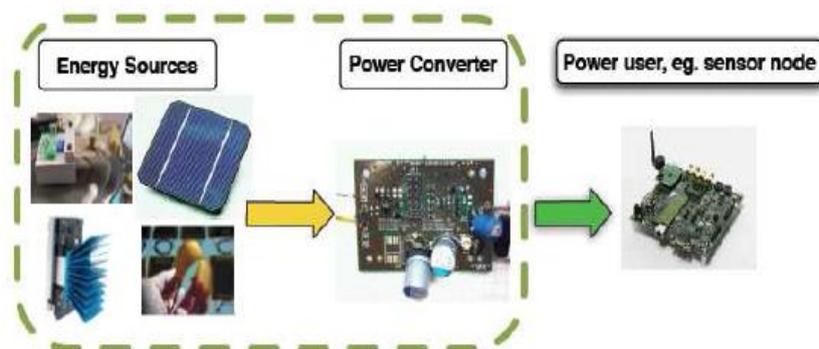


Figure II.2 Différentes sources d'énergie pouvant alimenter un nœud de capteur

#### II.3.1.1 L'énergie thermique

Les pertes d'énergie des machines ou des procédés que nous utilisons sont très souvent sous forme de perte de chaleur et génèrent donc des flux thermiques (refroidissement d'un moteur, gaz d'échappement, évacuation de la chaleur résiduelle d'une centrale électrique, etc.). Récupérer cette énergie perdue peut-être un moyen d'augmenter le rendement du procédé ou simplement une opportunité pour faire fonctionner appareils électroniques autonome.

### II.3.1.2 L'énergie radiofréquence

Il existe une grande quantité d'objets réseau électrique, téléphones sans fils, modem WiFi etc. Qui nous entourent dans l'environnement dans lequel nous vivons. Ces derniers émettent un champ électromagnétique en permanence qui peuvent être récupéré et exploité pour l'alimentation des systèmes électronique.

### II.3.1.3 L'énergie cinétique

La récupération d'énergie cinétique consiste à générer un courant électrique à partir d'une action mécanique tel qu'un mouvement, une vibration, etc. Cette source d'énergie est présente dans divers applications tel que le domaine des transports ou le domaine médical, etc.

### II.3.1.4 L'énergie solaire photovoltaïque

L'effet photovoltaïque permet de convertir un rayonnement lumineux en énergie électrique. Cette technologie peut être utilisée en extérieur, comme en intérieur où l'éclairage artificiel peut suffire à alimenter de petits systèmes électroniques.

Quel que soit l'énergie collectée, le procédé de capture et de conversion demeure sensiblement le même. Il est constitué principalement de quatre éléments comme suit :

- Un transducteur offrant la conversion d'énergie en électricité.
- Un circuit de traitement de signal.
- Un circuit de stockage.
- Une unité pour la gestion de l'alimentation qui permet d'optimiser la récupération en contrôlant la charge et décharge de l'élément de stockage.

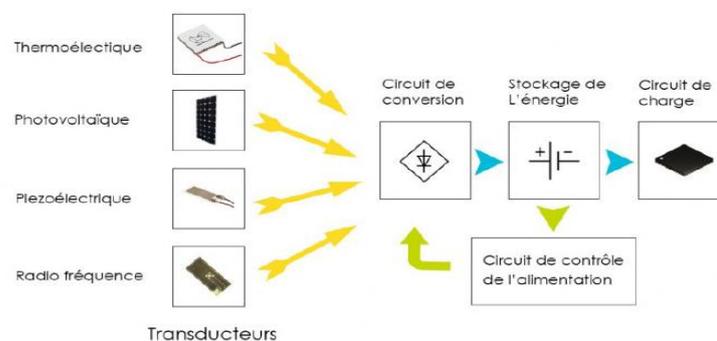


Figure II.3: Procédé de capture et de conversion d'énergie ambiante

Dans le cadre de notre projet, nous allons nous intéresser au solaire photovoltaïque dans le but d'alimenter un nœud de capteur générique et reconfigurable selon le type d'application.

## II.4 L'énergie solaire

L'énergie solaire est une énergie renouvelable inépuisable et abondante. De plus, elle est gratuite et son utilisation ne génère pas de pollution. Ses applications ont connu durant cette dernière décennie un développement considérable en raison de son potentiel significatif comme une source économique d'énergie. Les systèmes photovoltaïques sont utilisés pour capter cette énergie et la transformer en une énergie électrique utilisable et exploitable par nos systèmes et équipements.

Nous pouvons ainsi dire que l'énergie photovoltaïque est considérée comme un candidat potentiel comme source d'alimentation pour les nœuds de capteurs, puisque cette dernière est présente partout (que la source soit naturelle ou artificielle) et offre une densité d'énergie bien plus importante que n'importe quelle autre source.

### II.4.1 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est la conversion de l'énergie que transportent les photons de lumière lorsqu'ils rentrent en collision avec des matériaux semi-conducteurs convenablement traités en énergie électrique capable de créer un courant d'électrons à travers un circuit extérieur.

[14]

Comme l'illustre la figure (II.4) 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. 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. 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 donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique circule. [15]

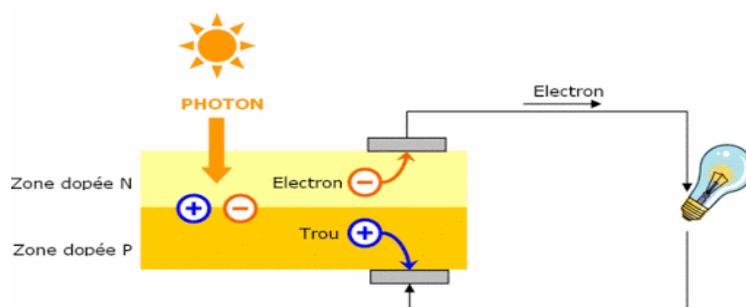


Figure II.4: Effet photovoltaïque. [16]

## II.4.2 Modélisation de la cellule photovoltaïque

Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque est représenté sur la figure (II.5). Il est formé par un générateur de courant fournissant un courant  $I_{ph}$  proportionnel à l'intensité lumineuse, une diode modélisant la jonction P-N et deux résistances, la première est en série  $R_s$  représentant les diverses résistances de contact et la résistance du semi-conducteur, la deuxième  $R_p$  résistance parallèle caractérisant le courant de fuite à la surface de la cellule dû à la non idéalité de la jonction P-N et des impuretés près de la jonction.

En pratique, la résistance parallèle  $R_p$  est très importante (de l'ordre du méga Ohm) et la résistance série  $R_s$  est très faible (de l'ordre de quelques milli-ohms).

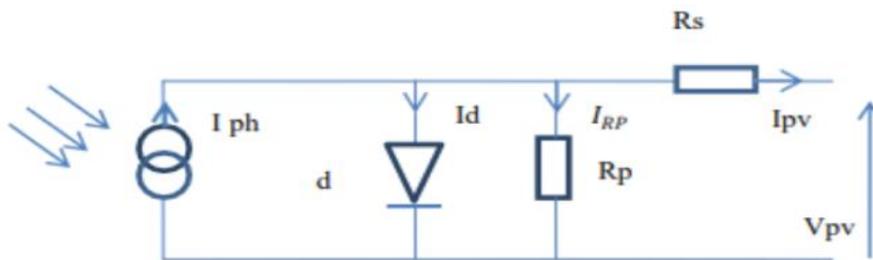


Figure II.5: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Le courant traversant la diode est donné par:

$$I_d = I_s \times \left[ e^{\frac{q \times (V_{pv} + R_s \times I_{pv})}{nKT}} - 1 \right] \quad (\text{II.1})$$

Le courant traversant la résistance parallèle:

$$I_{Rp} = \frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{R_p} \quad (\text{II.2})$$

La formule du photo-courant:

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_I \times (T - T_{ref})] \times \frac{G}{G_r} \quad (\text{II.3})$$

Le courant de sortie de la cellule PV est donné à partir de la loi des nœuds:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{Rp} \quad (\text{II.4})$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \times \left[ e^{\frac{q \times (V_{pv} + R_s \times I_{pv})}{nKT}} - 1 \right] - \left( \frac{V_{pv} + R_s \times I_{pv}}{R_p} \right) \quad (\text{II.5})$$

Où:

- $I_{ph}$ : Photo - courant (A).
- $I_s$ : Courant de saturation de la diode en inverse (A).
- $V_{pv}$ : Tension aux bornes de la cellule (V).

- $I_{pv}$ : Courant généré par la cellule (A).
- $R_s$ : Résistance série de la cellule ( $\Omega$ ).
- $R_p$ : Résistance parallèle ( $\Omega$ ).
- $n$ : Facteur de la qualité de la cellule.
- $K$ : Constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$  J / K).
- $q$ : Charge de l'électron ( $1,6 \times 10^{-19}$  C).
- $T$ : Température de fonctionnement ( $^{\circ}$ k).
- $I_{cc}$ : Courant de court-circuit (A).
- $K_T$ : Coefficient de la température.
- $T_{ref}$ : Température de référence de la cellule ( $^{\circ}$ k)  $T_{ref} = 298$ K ( $25^{\circ}$ C).
- $G_r$ : Irradiation solaire de référence  $G_r = 1000$ W / m<sup>2</sup>.
- $G$ : Irradiation solaire de fonctionnement.

## II.4.3 Caractéristiques électrique d'une cellule photovoltaïque

### II.4.3.1 La caractéristique courant-tension I-V

Comme mentionné précédemment, une cellule photovoltaïque est modélisée comme une source de courant continue qui dépend de plusieurs facteurs à savoir l'irradiation solaire et la température.

La relation complexe entre ces facteurs résulte en une caractéristique non linéaire du courant-tension de la cellule. Cette caractéristique est montrée par la figure (II.6).

Sur cette courbe, il existe un point particulier pour lequel la puissance fournie par la cellule est à sa valeur maximale, ce point est appelé Point de Puissance Maximum PPM (Maximum Power Point, MPP). Les coordonnées de ce point sont  $V_{MPP}$  et  $I_{MPP}$  pour la tension et le courant respectivement.

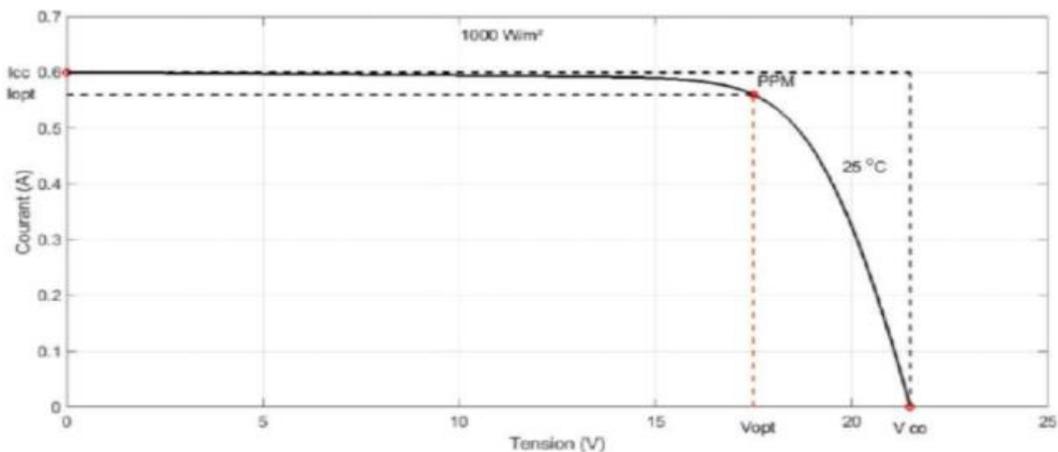


Figure II.6: Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque.

### II.4.3.2 La caractéristique puissance tension P-V

La figure (II.7) représente la caractéristique Puissance-Tension d'une cellule photovoltaïque. On remarque que la courbe présente deux parties séparées par le point de puissance maximale, la puissance chute rapidement. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance générée.

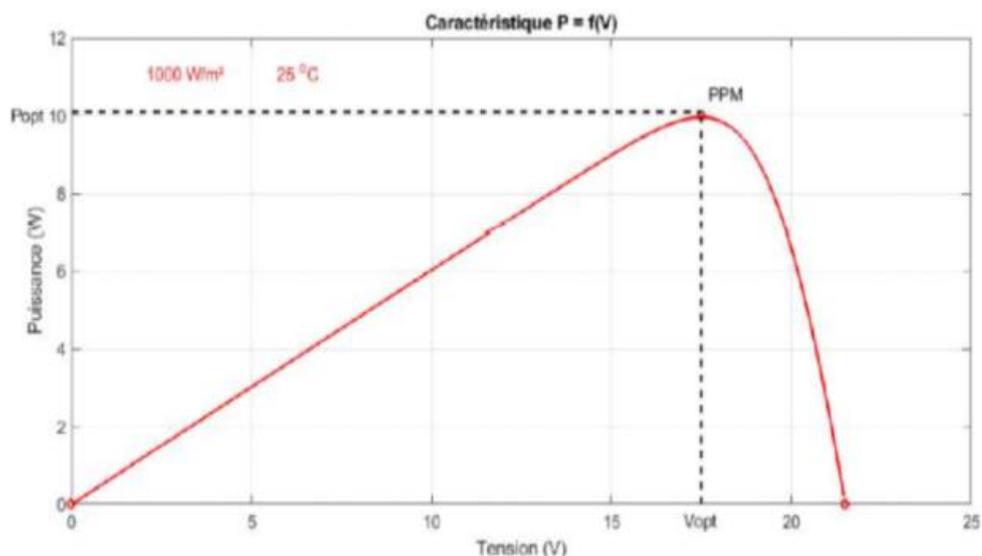


Figure II.7: Courbe caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque. [5]

### II.4.3.3 Les zones de fonctionnement d'un module solaire

La figure (II.8) représente la courbe de la caractéristique courant - tension d'un module photovoltaïque, dans les conditions standards de l'éclairement et température.

Le point de fonctionnement du module PV est l'intersection de la caractéristique I-V du module et de la caractéristique I-V de la charge.

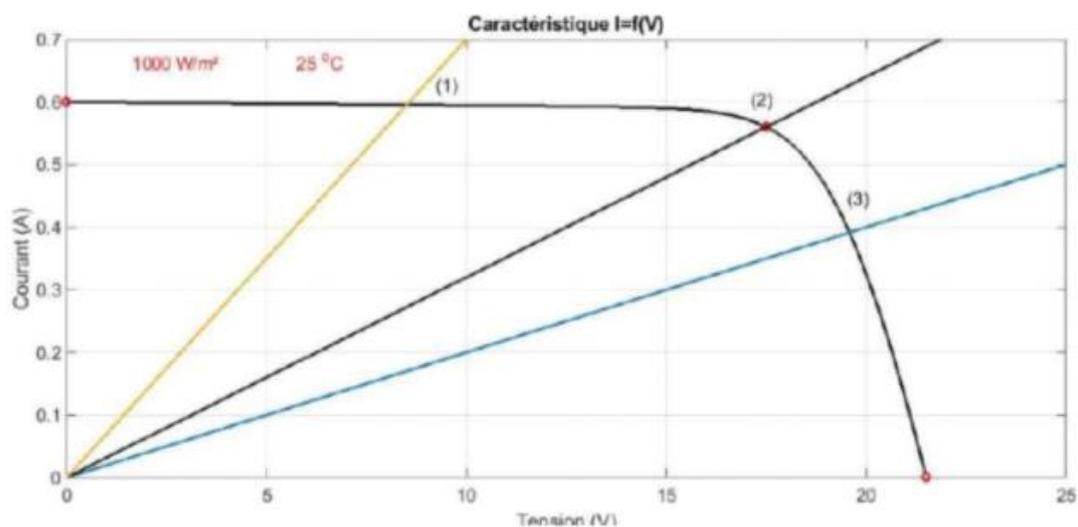


Figure II.8: Zones de fonctionnement d'un GPV à  $G=1000\text{w/m}^2$  et  $T=25\text{C}^\circ$ . [17]

- **La zone (1) :** le courant reste constant quelle que soit la variation de la tension. Dans cette zone, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- **La zone (2) :** correspond au « coude » de la caractéristique c'est la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, et elle représente la région préférée pour le fonctionnement.
- **La zone (3) :** la tension est presque constante et dans cette région, le générateur est assimilable à un générateur de tension. [18]

## **II.5 Conclusion**

Ce chapitre, traite de la problématique liée à la consommation énergétique dans les réseaux de capteurs. Afin de palier aux différents problèmes existants, plus particulièrement ceux liés l'autonomie énergétique et à la maintenance des batteries/piles dans les nœuds de capteurs, les solutions proposant comme alternative exploitation des énergies renouvelables sont présentées. Nous nous sommes de ce fait intéressées particulièrement au solaire photovoltaïque pour résoudre cette problématique.

Dans le prochain chapitre, nous présenterons l'architecture d'un récupérateur d'énergie solaire alimentant un réseau de capteur générique.

## Chapitre III La récupération d'énergie solaire

### III.1 Introduction

La récupération d'énergie solaire est toujours adaptée à l'alimentation de la charge. Dans notre cas, on utilisera cette technologie pour alimenter un nœud de capteur tout en minimisant la maintenance et les coûts de fonctionnement. Pour cela, nous proposons un système de récupération d'énergie solaire efficace, simple et compact qui contient: le circuit MPPT, le convertisseur DC-DC, l'unité de stockage d'énergie (batterie ou super condensateur) et l'unité de commande du convertisseur DC-DC.

L'objectif de ce chapitre est de montrer la technique de récupération d'énergie solaire tout en décrivant les différents modules et composants utilisés.

### III.2 Système de récupération d'énergie photovoltaïque

Le système de récupération d'énergie photovoltaïque est composé de 3 blocs (Figure III.1) :

- Le panneau solaire.
- L'unité de récupération d'énergie solaire que se compose de: circuit de MPPT (Maximum Power Point Tracking), convertisseur DC-DC, batterie rechargeable.
- La charge à alimenter.

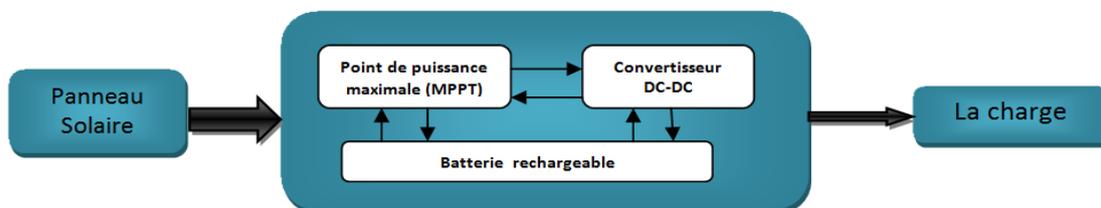


Figure III.1 Système de récupération d'énergie solaire.

#### III.2.1 Le panneau solaire

Un panneau solaire est un dispositif qui convertit une partie du rayonnement solaire en énergie thermique ou électrique, grâce à des capteurs solaires photovoltaïques.

On distingue trois types de panneaux solaires :

- Les panneaux solaires thermiques appelés capteurs solaires thermiques ou collecteurs solaires ou improprement capteurs solaires, piègent la chaleur du rayonnement solaire et la transfèrent à un fluide caloporteur. La version la plus puissante est dénommée centrale solaire thermodynamique.

- Les panneaux solaires photovoltaïques, appelés modules photovoltaïques ou improprement panneaux solaires, convertissent une partie du rayonnement solaire en électricité. Le regroupement de nombreux panneaux solaires à un même endroit est dénommée centrale solaire photovoltaïque.
- Les panneaux photovoltaïques hybrides: qui combinent les deux technologies précédentes et produisent à la fois de l'électricité et de la chaleur tout en améliorant le rendement des panneaux solaires photovoltaïques en évitant la surchauffe des modules. Cette combinaison peut être considérée comme de la cogénération.

Selon le besoin, les panneaux solaires sont disponibles avec différentes tailles et différentes valeurs d'énergie (Figure III.2)



Figure III.2 Panneaux solaire. [33]

### III.2.2 Le convertisseur DC-DC

Les convertisseurs DC-DC permettent de générer une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. Le principe du hacheur consiste à établir et interrompre périodiquement la liaison source-charge à l'aide d'un interrupteur électronique dont le fonctionnement permet d'avoir une tension de sortie continue réglable qui constitue la partie essentielle dans le dispositif de commande d'un générateur photovoltaïque. (Figure III.3)

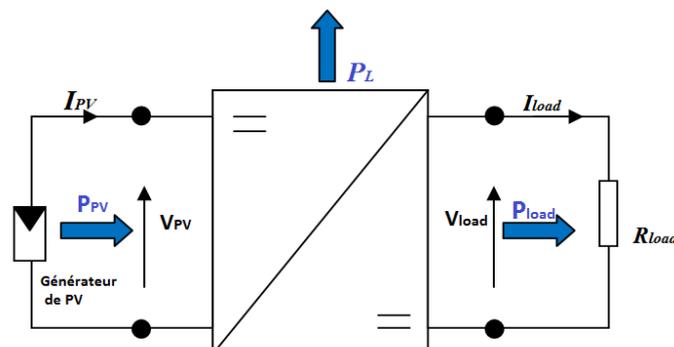


Figure III.3 Convertisseur DC-DC.

Il y a 3 types principaux de convertisseur DC-DC

### III.2.2.1 Le convertisseur BOOST

Un convertisseur BOOST ou élévateur comme son nom l'indique sert à la conversion d'une tension continue en une autre tension continue de valeur supérieure. Il se compose essentiellement d'un interrupteur à base de matériau semi-conducteur placé en parallèle avec la source de type continue, d'une diode  $D$ , une inductance et un condensateur, la figure (III.4) montre le schéma équivalent du hacheur parallèle.

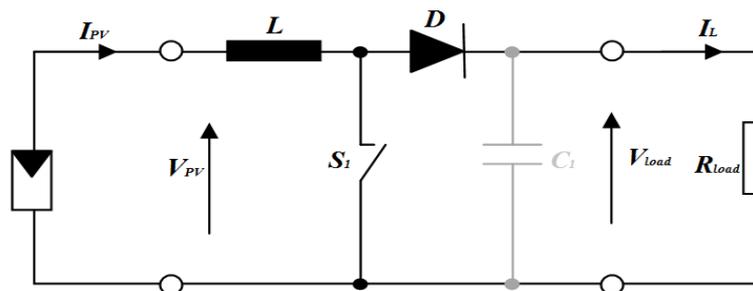


Figure III.4 Schéma de principe du hacheur BOOST

### III.2.2.2 Le convertisseur BUCK

Un convertisseur Buck sert à la conversion d'une tension continue en une autre tension continue de valeur moyenne inférieure. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est éloigné du MPP. Il est composé essentiellement d'un interrupteur à base de matériau semi-conducteur placé en série avec la source de type continue et d'une diode de roue libre pour assurer la continuité du courant en cas d'absence d'alimentation. (Figure III.5)

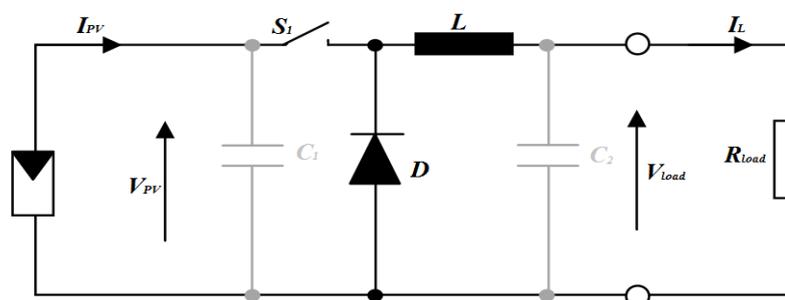


Figure III.5 Structure du convertisseur BUCK.

### III.2.2.3 Le convertisseur BUCK-BOOST

Un convertisseur BUCK-BOOST est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse.

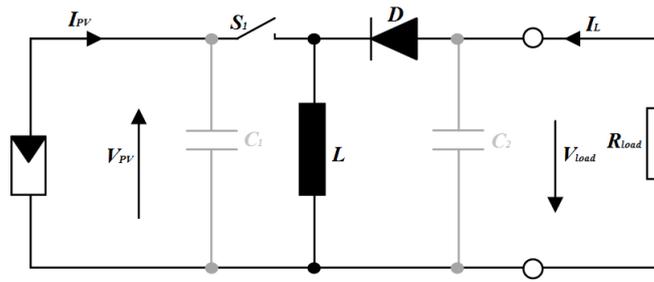


Figure III.6 Structure du convertisseur BUCK-BOOST. [15]

### III.2.3 Suivi du point de puissance maximale (Maximum power point tracking "MPPT")

Le suivi du point de puissance maximum (MPPT) est appliqué au système photovoltaïque (PV) pour récupérer la puissance de sortie maximale. La puissance de sortie de l'effet PV varie en fonction de l'irradiation solaire externe et des conditions de température ambiante. Dans les stratégies MPPT existantes, la plupart d'entre elles ne prennent en compte que les variations du niveau de rayonnement, considérant rarement l'impact des changements de température. [34]

#### a)- Fonctionnement du MPPT

Un générateur photovoltaïque sous un ensoleillement de 1000 (W / m<sup>2</sup>) et une température de 25C° a une caractéristique courant-tension de telle sorte qu'il n'y a qu'un seul point de fonctionnement que l'on appelle le point de puissance maximale. Les coordonnées de ce point sont la tension optimale V<sub>opt</sub> et le courant optimal I<sub>opt</sub> générés par le GPV. Le point de fonctionnement optimal (V<sub>opt</sub>, I<sub>opt</sub>) du générateur est défini par l'intersection de sa caractéristique électrique avec celle de la charge, seule une charge dont la caractéristique passe par le point (V<sub>opt</sub>, I<sub>opt</sub>) permet d'extraire la puissance optimale disponible dans des conditions considérées. L'impédance statique optimale de charge est donnée par la relation:

$$R_{opt} = \frac{V_{opt}}{I_{opt}} \quad (III.1)$$

Étant donné que ce point dépend totalement des conditions d'éclairement G et la température T, il en est de même de l'impédance de charge optimale. L'utilisation optimale du générateur consiste alors à ce que sa charge conserve à chaque instant les valeurs optimales R<sub>opt</sub>.

Lorsque les conditions varient, il y a donc lieu d'effectuer en permanence l'adaptation d'impédance nécessaire. [19]

### b)-Connexion directe entre le GPV et la charge

La charge DC peut être: une charge purement résistive, une charge de type source de tension ou une charge de type source de courant. Sur la Figure (III.7), les caractéristiques I-V et P-V d'un GPV sont représentées ainsi que les caractéristiques I-V des trois types de charges.

Les points de fonctionnement A, B, C sont les points d'intersection entre la caractéristique I-V du GPV et celles des trois types de charge. Le fonctionnement optimal s'obtient pour le PPM qui correspond à la tension optimale  $V_{opt}$  et au courant optimal  $I_{opt}$ . Pour ces trois points, les puissances fournies par le générateur sont respectivement  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $P_C$ .

Ces puissances sont toutes des valeurs de puissances inférieures à la puissance maximale disponible donc, il faut remédier à ce problème par l'ajout d'un étage d'adaptation.

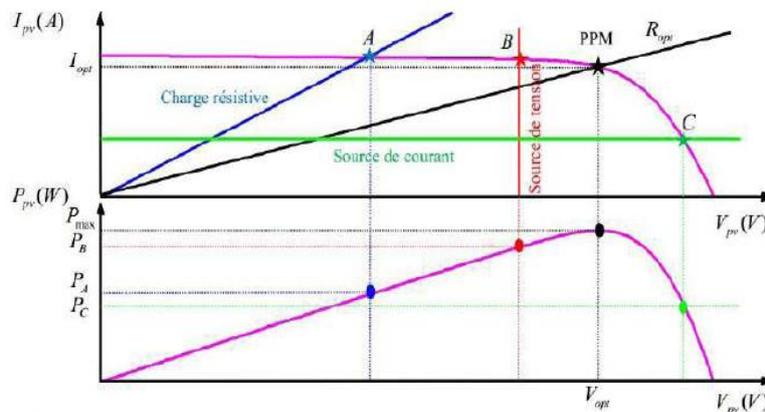


Figure III.7 Point de puissance maximale. [20]

Ainsi, pour qu'une connexion source-charge soit possible et que le transfert de puissance soit maximal il faut que la courbe des caractéristiques électriques de la charge passe par le point ( $V_{opt}$ ,  $I_{opt}$ ) du générateur mais ce n'est pas toujours possible puisque la connexion directe présente plusieurs inconvénients et n'offre aucun type de limitation ou de réglage de la tension. La puissance extraite à la sortie du GPV connectée directement à une charge est souvent éloignée au maximum.

Un autre inconvénient c'est que la connexion directe du GPV (Figure III.8) n'est pas valable pour une charge alternative car le GPV fournit un courant continu pour lequel l'utilisation d'un onduleur est nécessaire.

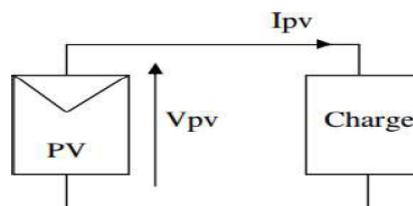


Figure III.8 Connexion électrique directe entre un générateur PV et une charge. [14]

### c)-Association de l'étage d'adaptation entre le GPV et la charge

Un GPV présente des caractéristiques  $I(V)$  non linéaires avec les PPM. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairément et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe.

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est l'introduction d'un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme le présente la figure III.9. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit plus proche de  $P_{\max}$  disponible. [21]

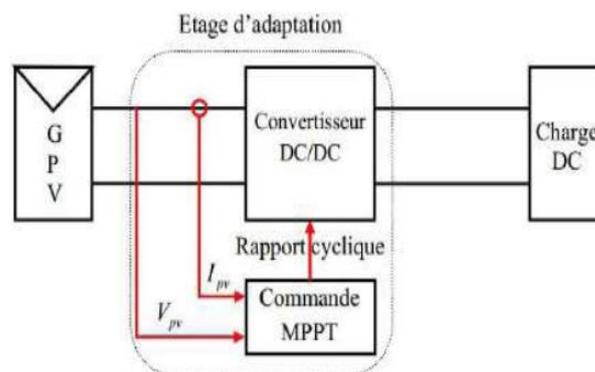


Figure III.9 Association de l'étage d'adaptation entre le générateur et la charge. [22]

L'étage d'adaptation utilisé entre un générateur photovoltaïque et une charge de type continue est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC). La structure de conversion est choisie en fonction de la charge à alimenter soit survolteur ou dévolteur commandé par la variation du rapport cyclique du convertisseur selon un algorithme de manière à extraire à chaque instant le maximum de puissance. [21]

Il existe différents algorithmes permettant de rechercher et suivre le point de puissance maximale, on distingue:

- L'algorithme de l'incrément de la conductance.
- L'algorithme à base de la mesure du courant de court circuit.
- L'algorithme à base de la mesure de la tension du circuit ouvert.
- L'algorithme perturbation et observation.

Le dernier algorithme est implémenté dans le microcontrôleur du régulateur de charge que l'on va réaliser.

#### d)-Algorithme de perturbation et observation (P&O)

La méthode P&O est une approche largement répandue dans le domaine des techniques MPPT, due à sa simplicité. Elle exige seulement des mesures sur la tension de sortie du générateur solaire et son courant de sortie. Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation sur la tension du panneau PV tout en agissant sur le rapport cyclique  $\alpha$ . En effet, suite à cette perturbation, on calcule la puissance fournie par le panneau PV à l'instant  $k$ , puis on la compare à la précédente de l'instant  $(k-1)$ . Si la puissance augmente, on s'approche du point de puissance maximale et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire, si la puissance diminue, on s'éloigne du point de puissance maximale. Alors, on doit inverser le sens de la variation du rapport cyclique comme l'illustre la figure (III.10). [22]

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance du générateur augmente, le sens de la perturbation est maintenu. Dans le cas contraire, le sens est inversé pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

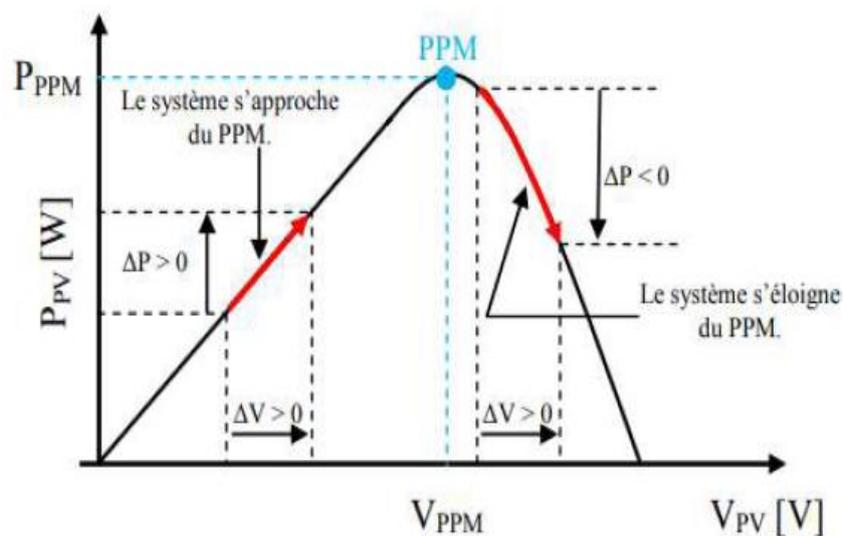


Figure III.10 Caractéristique puissance - tension du générateur photovoltaïque.

La figure (III.11) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

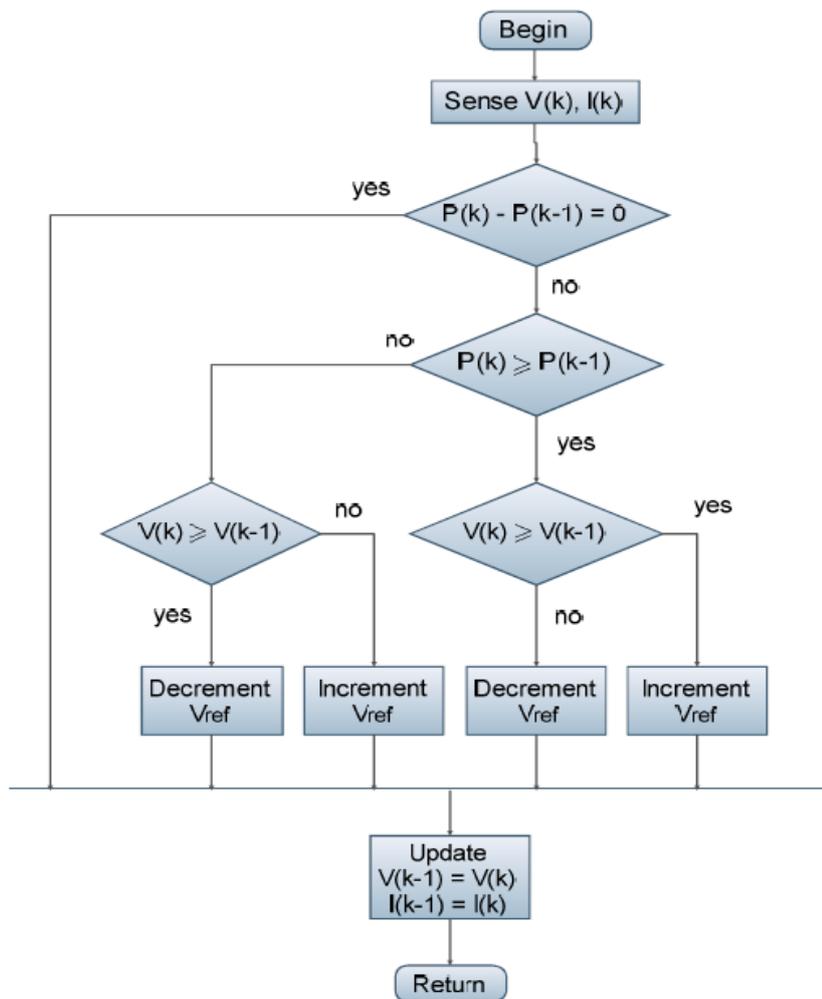


Figure III.11 Organigramme de l'algorithme perturbation et observation. [23]

### III.2.4 L'unité de stockage d'énergie

Une batterie solaire ou bien une super capacité sont le meilleur choix pour emmagasiner l'énergie (Figure III.12), elles sont destinées à stocker l'énergie électrique sous forme chimique. Elles sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques car la demande en électricité ne coïncide pas avec la production à cause du mauvais rendement du générateur. Le stockage de l'énergie se fait afin d'assurer le bon fonctionnement du système quand l'énergie solaire n'est pas suffisante ou disponible.



Figure III.12 Les batteries solaires et les super capacités.

### -Comparaison entre la batterie et super capacité

Le tableau (III.1) met en évidence les caractéristiques d'une catégorie de batterie et super capacité qui s'adaptent à notre réalisation. Vue l'importance des paramètres densité de puissance et énergie, notre choix a été porté sur une batterie de 12v comme un élément de stockage de l'énergie solaire.

Caractéristiques	Batterie	Super capacité
Temps de charge	6min	1S
Temps de décharge	3 - 5min	1S
Rendement	95 - 98%	95%
Densité de puissance (W/Kg)	<10000	10000
Densité d'énergie (Wh/Kg)	10 - 100	0 - 10
Duré de vie (Cycle)	< 5000	1000000

Tableau III.1 Comparaison entre la batterie et super capacité.

### III.3 Présentation des éléments du système de récupération d'énergie solaire

Dans ce qui suit, nous allons décrire le principe à suivre pour développer le schéma global du notre système de récupération d'énergie solaire pour alimenter un nœud de capteur.

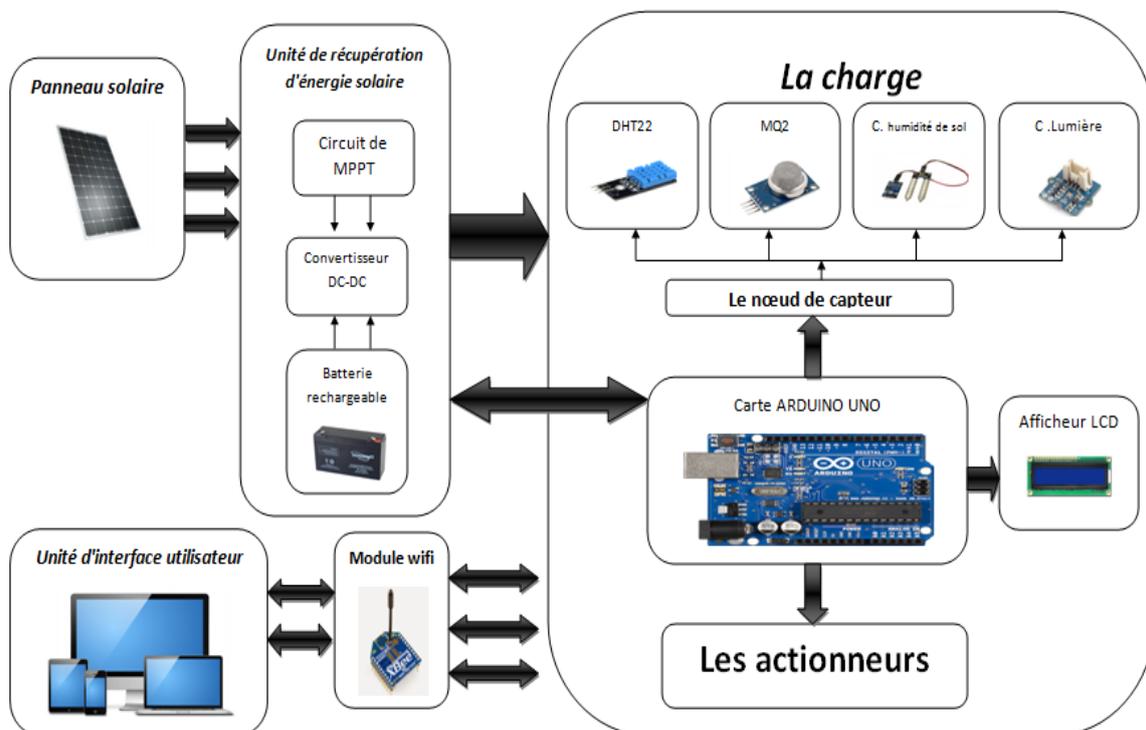


Figure III.13 Schéma fonctionnel du système de récupération d'énergie solaire.

### III.3.1 La Source d'énergie

Pour la source d'énergie nous utilisons un panneau solaire. Pour cela, nous choisissons un module PV monocristallin 12V-50W (Figure III.14), qui présente les spécifications électriques et les caractéristiques suivantes :

- Tension: 12V
- Puissance de crête: 50W
- Tension de circuit ouvert: 22.2V
- Courant de court-circuit: 3.16A
- Courant à puissance maximale: 2.78A
- Tension d'alimentation maximale: 18V
- Nombre de cellules: 36



Figure III.14 Panneau solaire 12V-50W. [35]

### III.3.2 Unité de récupération d'énergie solaire

#### -Le Capteur de courant "ACS712"

Le capteur de courant ACS712 (Figure III.15) offre un moyen de détection de courants AC et DC, ce capteur exploite l'effet Hall qui consiste à produire une tension continue proportionnelle au courant. Cette tension est engendrée quand une plaque conductrice est plongée dans un champ magnétique et parcourue par un courant.



Figure III.15 Capteur de courant ACS712. [24]

### - Choix de l'interrupteur électronique IRFZ44N

Les MOSFET de puissance conçus par des techniques de traitements avancées, ont l'avantage d'avoir une résistance de l'espace semi-conducteur Drain-source extrêmement faible. Cet avantage, combiné à la vitesse de commutation rapide et à la robustesse du dispositif, fournit aux concepteurs un composant extrêmement efficace et fiable pour des applications très variées. Notre choix a porté sur le transistor MOSFET à grille isolée de référence IRFZ44N (Figure III.16), dont le boîtier TO-220 est universellement préféré pour les applications commerciales et industrielles. Ce boîtier présente un niveau de dissipation de puissance d'environ 50 watts, une faible résistance thermique et un faible coût. Ce qui contribue à sa large acceptation dans l'industrie. En plus de sa faible résistance à l'état passant ce qui permet de réduire les pertes par conduction, le composant a été sélectionné comme commutateur pour notre système de manière à supporter la tension et le courant à la sortie du panneau solaire.



Figure III.16 Le transistor MOSFET "IRFZ44N". [25]

### - La Commande des transistors

L'IR2104 est un pilote MOSFET et IGBT (transistor bipolaire à grille isolée) avec une haute tension et haute vitesse. Les technologies exclusives HVIC et CMOS immunisées au verrouillage permettent une construction monolithique robuste. L'entrée logique est compatible avec la sortie CMOS ou TTL-LS standard

Les pilotes de sortie disposent d'un étage tampon de courant d'impulsion élevé. Le canal flottant peut être utilisé pour commander un MOSFET de puissance ou un IGBT à canal N dans la configuration côté haut qui fonctionne de 10 à 600 volts. Ce driver sera utilisé dans notre système pour assurer le contrôle et l'amplification du signal PWM du microcontrôleur pour piloter la grille du MOSFET (figure III.17).



Figure III.17 Le driver "IR2104". [26]

### -Les diodes "1N4148"

La diode 1N4148 (Figure III.18) est l'une des diodes à jonction, de type diode signal les plus utilisées dans les circuits électroniques. Son rôle, comme son nom l'indique, permet de créer facilement une jonction dans un circuit avec un temps de réponse rapide (passante dans un sens et non passante dans l'autre). On s'en sert régulièrement dans le principe de "roue libre" sur les montages à composants inductifs (moteurs, bobines) afin de protéger des composants semi conducteurs sensibles (ex: transistors).



Figure III.18 La diode "1N4148". [27]

### - Le module de régulation LM2596S

La série de régulateurs LM2596S (Figures III.19 et III.20) sont des circuits intégrés monolithiques qui fournissent toutes les fonctions actives d'un régulateur à convertisseur abaisseur (BUCK), capable de piloter une charge avec une excellente régulation de ligne et de charge. Ces composants sont disponibles avec des tensions de sortie fixes de 3.3V, 5V, 12V et une version de sortie réglable.



Figure III.19 Le régulateur de tension "LM2596S".



Figure III.20 Le module "LM2596S". [28]

### -Le régulateur de tension AMS1117

La série AMS1117 de régulateurs de tension réglables et fixes est conçue pour fournir un courant de sortie jusqu'à 1 A et pour fonctionner jusqu'à un différentiel d'entrée-sortie de 1 V. La tension de chute de l'appareil est garantie au maximum à 1,3 V, diminuant à des courants de charge inférieurs. La limite de courant est définie pour minimiser la contrainte dans des conditions de surcharge sur les circuits du régulateur et de la source d'alimentation.



Figure III.21: Le régulateur de tension "AMS1117". [29]

### - Choix du convertisseur DC-DC

Pour une meilleure optimisation de l'énergie solaire nous utiliserons le convertisseur BUCK qui présente l'avantage d'adapter la source à la charge. Pour assurer une meilleur adaptation, il est nécessaire de faire un bon choix de l'inductance  $L$  de la bobine et de la capacité  $C_2$ . Pour cela quelques développements théoriques s'avèrent nécessaires. L'interrupteur électronique  $S_1$  est commandé par le signal modulé en largeur d'impulsion (PWM) dont le chronogramme est représenté sur la figure III.22. Ce signal de forme rectangulaire a une fréquence  $f$  fixe et un rapport cyclique  $\alpha$  variable.

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T} \quad (III.2)$$

Avec :

- $T$  la période du signal
- $T_{on}$  la durée de conduction: ( $S_1$  fermé) tel que:  $T_{on} = \alpha T$  (III.3)
- $T_{off}$  la durée de blocage: ( $S_1$  ouvert) tel que:  $T_{off} = (1 - \alpha) T$  (III.4)

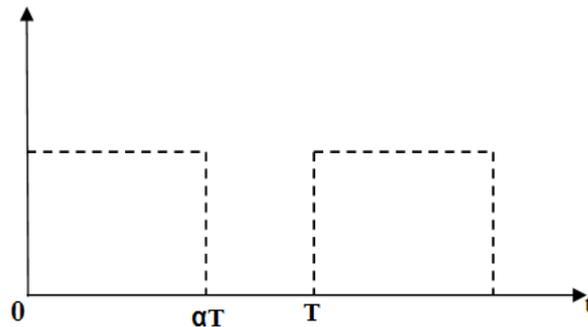


Figure III.22 Signal de commande de l'interrupteur.

A  $t=0$  l'interrupteur  $S_1$  est dans l'état passant, ce qui polarise la diode  $D$  en inverse. Le courant d'entrée recharge la bobine  $L$  par une énergie inductive. Tant que l'interrupteur est fermé, la tension à ses bornes est nul, le courant recharge en même temps le condensateur  $C_2$  et fournit le courant à la charge. (Figure III.23)

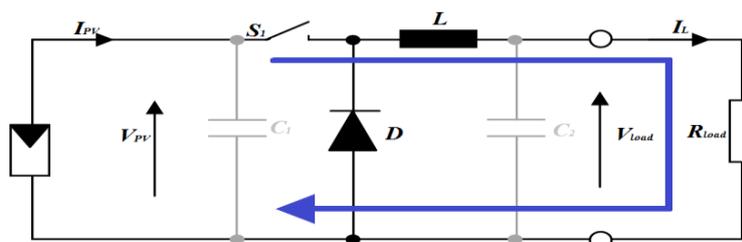


Figure III.23 Schéma équivalent du hacheur Buck à l'état ON.

En appliquant la loi des mailles durant l'intervalle  $[0, \alpha T]$  on peut écrire :

$$V_{pv}(t) = V_{s1}(t) + V_L(t) + V_{load}(t) \quad (III.5)$$

Dans le cas d'un interrupteur idéal fermé:

$$V_{s1}(t) = 0 \quad (III.6)$$

$$V_L(t) = V_{pv}(t) - V_{load}(t) \quad (III.7)$$

$$L \frac{di}{dt} = V_{pv} - V_{load} \quad (III.8)$$

$$i_L(t) = \frac{V_{pv} - V_{load}}{L} t + I_L(0) \quad (III.9)$$

À l'instant  $t = 0$  le courant de l'inductance est de valeur minimale  $I_L(0) = I_{Lmin}$ , et augmente jusqu'à atteindre la valeur  $I_{Lmax}$  à l'instant  $t = \alpha T$ , comme le montre la Figure (III.24).

$$I_{Lmax}(t) = \frac{V_{pv} - V_{load}}{L} \alpha T + I_{Lmin} \quad (III.10)$$

Détermination de l'ondulation du courant:

$$\Delta I_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} \quad (III.11)$$

On sait que:

$$T = \frac{1}{f} \quad (III.12)$$

A partir de l'équation (III.10) on aura:

$$\Delta I_L = \frac{V_{pv} - V_{load}}{Lf} \alpha \quad (III.13)$$

L'équation (III.13) montre que pour diminuer l'ondulation de courant il faut augmenter la fréquence de commutation.

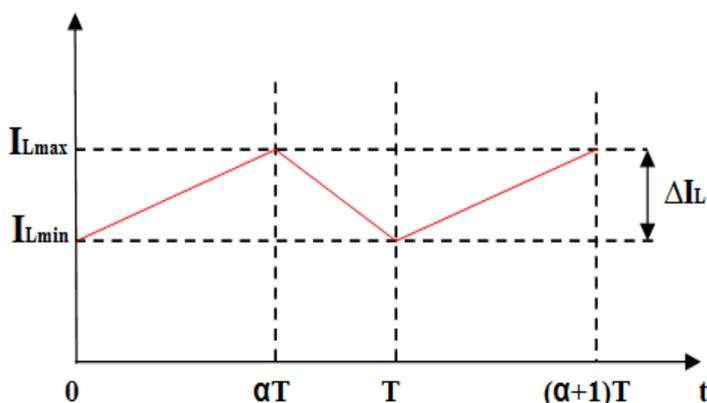


Figure III.24 Ondulation du courant de l'inductance.

A l'instant  $t = \alpha T$  l'interrupteur  $S_1$  est ouvert, la charge est déconnectée de son alimentation et le courant est maintenu grâce à l'énergie stockée dans l'inductance et circule à travers la diode de roue libre polarisée en directe (Figure III.25).

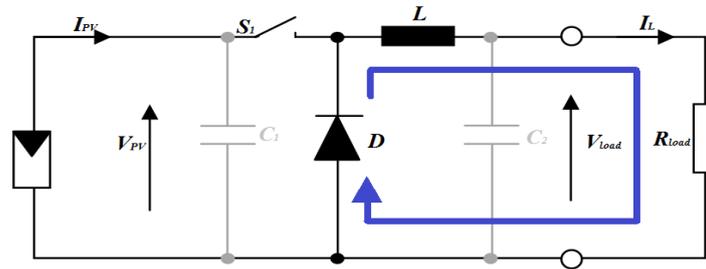


Figure III.25 Schéma équivalent du hacheur Buck à l'état OFF.

En appliquant la loi des mailles durant l'intervalle  $[\alpha T, T]$  et peut écrire:

$$V_L(t) + V_D(t) + V_{load}(t) = 0 \quad (III.14)$$

Dans le cas d'une diode  $D$  parfaite on a  $V_D(t) = 0$ :

$$V_L = -V_{load} \quad (III.15)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = -V_{load} \quad (III.16)$$

$$i_L(t) = \frac{-V_{load}}{L} t + I_{Lmax} \quad (III.17)$$

**Remarque:** l'expression (III.17) est valable sur l'intervalle  $[\alpha T, T]$ , il faut dans ce cas considérer une nouvelle origine des temps à partir de  $t = \alpha T$ . Ainsi, le courant de l'inductance atteint sa valeur minimal à l'instant  $t = T - \alpha T = (1 - \alpha)T$

$$I_{Lmin} [t = (1 - \alpha)T] = \frac{-V_{load}}{L} (1 - \alpha)T + I_{Lmax} \quad (III.18)$$

l'ondulation du courant s'écrit:

$$\Delta I_L = \frac{-V_{load}}{L_f} (1 - \alpha) \quad (III.19)$$

A partir des expressions (III.13) et (III.19) on peut écrire:

$$\frac{-V_{load}}{L_f} (1 - \alpha) = \frac{V_{pv} - V_{load}}{L_f} \alpha \quad (III.20)$$

On en déduit que:

$$V_{load} = \alpha V_{pv} \quad (III.21)$$

L'expression (III.21) nous montre que la tension de sortie varie en fonction du rapport cyclique. Lorsqu'on fait varier  $\alpha$  de 0 à 1 la tension de sortie varie linéairement de 0 à la valeur de la tension d'entrée. [15]

### Calcul de l'ondulation du courant dans la bobine

Le calcul de la valeur de l'inductance de la bobine est primordial dans la conception du hacheur Buck. Le choix d'une bonne valeur permet de limiter les ondulations du courant dans la charge. Nous supposons que le convertisseur est en mode de conduction continue, le courant dans l'inductance ne s'annule pas pendant la période de commutation, donc à partir des expressions (III.13) et (III.21) l'ondulation  $\Delta I_L$  est donnée par la relation:

$$\Delta I_L = \frac{V_{pv}(1-\alpha)}{L.f} \alpha \quad (III.22)$$

La valeur du courant de sortie est calculée à partir de la puissance du panneau solaire égale à 50W et la tension aux bornes de la batterie égale à 12Volts.

$$I_{\text{sortie}} = \frac{P}{V} \quad (III.23)$$

$$I_{\text{sortie}} = \frac{50}{12} = 4.16A \quad (III.24)$$

Pour une bonne conception, la valeur typique du courant d'ondulation est entre 30% et 40% du courant de charge. Dans notre cas l'ondulation est acceptable à 35% (0.35).

$$\Delta I_L = I_{\text{sortie}} \times 0.35 \quad (III.25)$$

$$\Delta I_L = 4.16 \times 0.35 = 1.456A \quad (III.26)$$

### Calcul de la valeur du rapport cyclique $\alpha$

La valeur de la tension d'entrée du panneau solaire est  $V_{pv}=18V$ , sa valeur de tension de sortie est  $V_{\text{load}}=12V$ .

$$\alpha = \frac{V_{\text{load}}}{V_{pv}} \quad (III.27)$$

$$\alpha = \frac{12}{18} = 0.667(66.7\%) \quad (III.28)$$

### Choix de l'inductance L

À partir de la l'expression (III.22) et pour une fréquence  $f=50kHz$ , la restriction sur L favorable à une diminution de l'ondulation du courant s'écrit:

$$L \geq \frac{V_{PV}(1-\alpha)\alpha}{\Delta I_L.f} \quad (III.29)$$

$$L \geq \frac{18(1-0.667)0.667}{1.456 \times 50000} = 5.49 \times 10^{-5} H = 54.9 \mu H \quad (III.30)$$

On choisira une inductance  $L \geq 55 \mu H$

### Choix de la capacité $C_2$ du condensateur

Le condensateur à la sortie du convertisseur est nécessaire pour minimiser les ondulations de la tension aux bornes de la charge.

La relation entre l'ondulation de courant dans la bobine et l'ondulation de la tension de sortie est donnée par l'expression III.31. [27]

$$\Delta V_c = \frac{\Delta I_L}{8.C.f} \quad (\text{III.31})$$

$$C_2 \geq \frac{\Delta I_L}{8.\Delta V_c.f} \quad (\text{III.32})$$

En tolérant une ondulation  $\Delta V_c = 20\text{mV}$

$$C_2 \geq \frac{1.456}{8 \times 0.02 \times 50000} \geq 1.82 \times 10^{-4} \text{ F} \quad (\text{III.33})$$

$$C_2 \geq 182\mu\text{F} \quad (\text{III.34})$$

On choisira une capacité  $C_2 = 220 \mu\text{F}$ .

### Consommation d'énergie par le circuit de récupération d'énergie solaire

Un bilan des puissances consommées par les principaux composants du circuit de récupération d'énergie solaire est représenté sur le tableau (III.2).

Composants	Puissance
ACS712	2.5W
IR2104	1.35W
LM2596	9W
AMS1117	5W
<b>Puissance totale</b>	<b>17.85W</b>

Tableau III.2 Consommation d'énergie par les principaux composants du circuit de récupération d'énergie solaire.

### III.3.3 La charge

#### III.3.3.1 La carte ArduinoO UNO

Une carte Arduino UNO (Figure III.2) est une petite carte électronique ( $5,33 \times 6,85 \text{ cm}^2$ ) équipée d'un microcontrôleur ATmega328. Le microcontrôleur permet à partir des événements détectés par des capteurs, de programmer et commander des actionneurs, la carte Arduino est donc une interface programmable, dont la programmation peut être réalisée en langage Arduino.



Figure III.26 La carte Arduino UNO.

La carte Arduino UNO dispose :

- de 14 broches numériques d'entrées/sorties (dont 6 peuvent être utilisées en sorties PWM "Pulse Width Modulation"(Modulation par largeur d'impulsion),
- de 6 entrées analogiques (qui peuvent également être utilisées en broches entrées/sorties numériques),
- d'un quartz 16Mhz,
- d'une connexion USB,
- d'un connecteur d'alimentation jack,
- d'un connecteur ICSP (programmation "in-circuit"),
- et d'un bouton de réinitialisation (reset). [30]

Les principales caractéristiques de la carte Arduino UNO sont résumées sur le tableau III.3

<b>Microcontrôleur</b>	ATMega328
<b>Tension de fonctionnement</b>	5V
<b>Tension d'alimentation (recommandée)</b>	7-12V
<b>Tension d'alimentation (limites)</b>	6-20V
<b>Broches E/S numérique</b>	14 (dont 6 disposent d'une sortie PWM)
<b>Broches d'entrées analogiques</b>	6 (utilisable en broches E/S numérique)
<b>Intensité max disponible par broche E/S (5V)</b>	40mA (200mA cumulé pour l'ensemble des broches)
<b>Intensité max disponible pour la sortie 3.3V</b>	50mA
<b>Intensité max disponible pour la sortie 5V</b>	Fonction de l'alimentation utilisée-500mA max si USB utilisé seul
<b>Mémoire Programme Flash</b>	32KB (ATMega328) dont 0.5KB utilisés par le boot loader
<b>Mémoire SPAM (mémoire volatile)</b>	2KB (ATMega328)
<b>Mémoire EEPROM (mémoire non volatile)</b>	1KB (ATMega328)
<b>Vitesse d'horloge</b>	16MHz

Tableau III.3 Caractéristiques de la carte Arduino. [36]

### III.3.3.2 Le nœud de capteur

Le nœud de capteur utilisé dans notre système se compose de:

#### a)- Capteur de température et humidité DHT22

Le DHT22 est un capteur numérique de base (Figure III.27) qui utilise la combinaison d'un capteur d'humidité capacitif et d'une thermistance. Il permet de mesurer efficacement la température et l'humidité de l'air ambiant. Il se connecte facilement à la carte Arduino UNO par l'intermédiaire d'un seul fil véhiculant un signal numérique (Figure III.28).



Figure III.27 Capteur de température et humidité "DHT22".

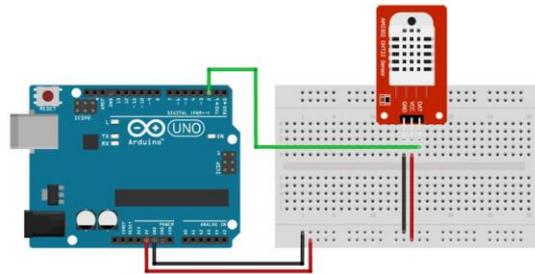


Figure III.28 Branchement de "DHT22" avec la carte Arduino. [31]

#### b)- Le Capteur de gaz(MQ2)

Le capteur de gaz MQ2 peut être utilisé pour détecter la présence de GPL, de propane et d'hydrogène, peut également être utilisé pour détecter le méthane et d'autres vapeurs combustibles, il est peu coûteux et adapté à différentes applications. Le capteur est très sensible aux gaz liquéfiés et idéal pour la détection du gaz naturel et la fumée. Le matériau de détection du MQ2 est l'oxyde d'étain ( $\text{SnO}_2$ ) qui présente une faible conductivité dans l'air pur. Le capteur et son branchement à la carte Arduino sont respectivement représentés sur les figures (III.29) et (III.30).



Figure III.29 Capteur de gaz "MQ2".

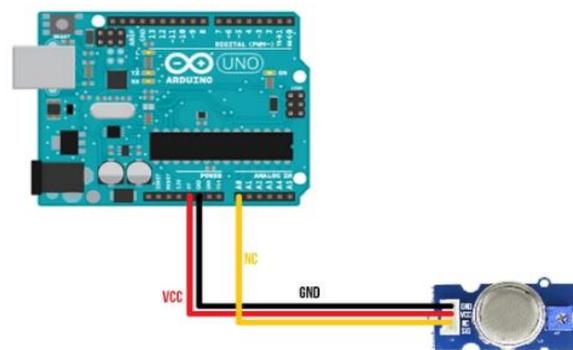


Figure III.30 Branchement de "MQ2" avec la carte Arduino. [37]

### c)- Capteur de lumière (phototransistor " TEMT6000")

Le capteur de la lumière ambiante TEMT6000X01 est un phototransistor NPN au silicium épitaxie planaire. La sortie reliée à une résistance de tirage (pull-up), délivre une tension entre 0 et 5V proportionnelle à la luminosité mesurée, elle est raccordée à l'entrée analogique du microcontrôleur Ce capteur est sensible à la lumière visible, sa bande passante est proche de celle de l'œil humain.

Le capteur et son branchement à la carte Arduino sont respectivement représentés sur les figures (III.31) et (III.32).



Figure III.31 Capteur de lumière TEMT6000.

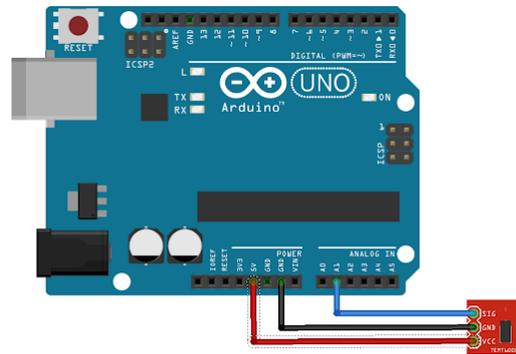


Figure III.32 Branchement de TEMT6000 avec la carte Arduino. [38]

### d)- Capteur d'humidité de sol YL-69

Le capteur d'humidité de sol YL-69 et son conditionneur de signaux est un module permettant de détecter les changements d'humidité. Il s'agit d'un hygromètre de sol avec réglage de seuil, qui permet de lire la quantité d'humidité locale présente dans le sol. Le capteur et son branchement à la carte Arduino sont respectivement représentés sur les figures (III.33) et (III.34).

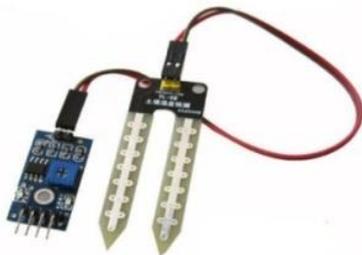


Figure III.33 Capteur d'humidité de sol.

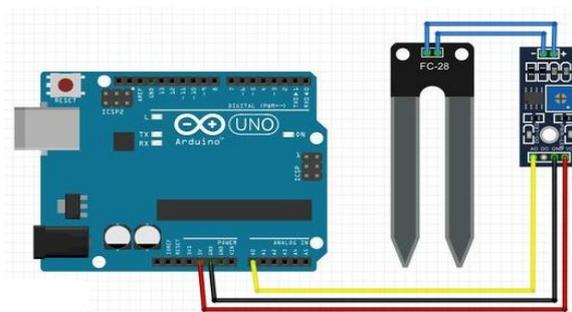


Figure III.34 Branchement du capteur d'humidité de sol avec la carte Arduino. [39]

### III.3.3.3 Le protocole de communication "XBEE"

Le XBEE (Figure III.35) est un module de communication sans fil fabriqué par l'entreprise Digi International. Il utilise un émetteur-récepteur sans fil de 2,4 GHz et peut communiquer avec un réseau de modules XBEE. Il existe plusieurs catégories de modules. Le XBEE standard a une puissance d'émission de 1mW avec une portée de 10 à 100 mètres. Le XBEE utilise le protocole de communication radio IEEE 802.15.4 pour la couche 2 du modèle OSI et le protocole ZIGBEE pour la couche 3 (Figure III.36).

Le protocole IEEE 802.15.4 permet la communication entre les modules alors que le protocole ZIGBEE crée la hiérarchie du réseau et configure d'autres paramètres comme l'association, l'authentification, l'encodage, le routage ou encore les services de la couche d'application autrement appelés les clusters.



Figure III.35 Protocole de communication "XBEE".

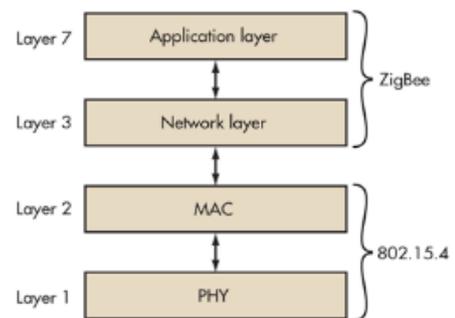


Figure III.36 Le protocole des couches utilisées pour le XBEE.

Parameter	Value
Data Rate	250kb/s, 40kb/s and 20kb/s
Topology	Star or Peer-to-Peer
Addressing	16 bit (short) or 64 bit (extend)
Multiple Access Technique	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CAMA/CA)
Frequency	868 (Europe) 915 MHz (North America) 2.4 GHz (Worldwide)
Range	100 meter
Channels	11 channels (868/915 MHz) 16 channels (2.4 GHz)

Tableau III.4 Caractéristiques de la technologie ZIGBEE.

Il existe trois types de nœuds dans un protocole ZIGBEE :

- Coordinateur : module "maître", il contrôle le réseau.
- Routeurs : ils routent les informations envoyées par les terminaux.
- Terminaux : les capteurs qui prennent les informations sur l'environnement.

Le protocole ZIGBEE crée des topologies en étoile (Figure III.37) :

- Les terminaux sont connectés à un routeur ou à un coordinateur.
- Les routeurs peuvent être connectés entre eux ou avec un coordinateur.
- Les routeurs et les coordinateurs ne peuvent pas être mis en veille. Ils doivent conserver dans leur buffer les paquets qui sont destinés aux terminaux.
- Les terminaux peuvent être mis en veille.

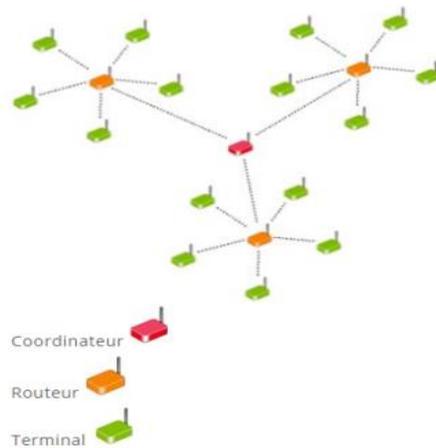


Figure III.37 La topologie étoile de protocole ZIGBEE.

Le branchement du module XBEE avec la carte Arduino est représenté sur la Figure (III.38).

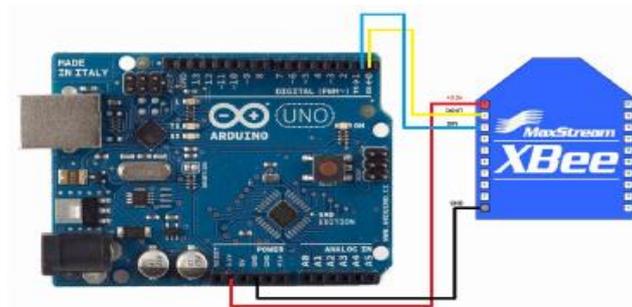


Figure III.38 Branchement de "XBEE" avec la carte Arduino. [40]

### III.3.3.4 L'Afficheur LCD

Les afficheurs à cristaux liquides (Figure III.39) utilisent la propriété de modulation de lumière des cristaux liquides. Les écrans à cristaux liquides sont composés de deux couches de polariseurs, avec des directions de polarisation perpendiculaire, prenant en sandwich deux plaques de verres entre lesquelles sont placés les cristaux liquides. Sur les plaques de verre se trouve une matrice d'électrodes pour chaque pixel.

Une tension appliquée entre les électrodes d'un pixel entraîne un changement d'orientation des molécules et donc la transparence du pixel qui peut alors laisser, ou non, passer la lumière du rétro éclairage.

L'écran utilisé est composé d'un afficheur LCD 16X2 (2 lignes de 16 caractères) et d'un module I2C. La communication avec la carte Arduino se fait, grâce au protocole I2C, sur deux lignes appelées : SCL pour horloge série et SDA pour données séries en plus des lignes alimentation et GND. Le câblage de l'écran LCD 16X2 via le bus I2C permet de diminuer le nombre de broches en utilisant le contrôleur PCF8574. Ce dernier permet de faire la conversion parallèle / I2C. Il s'agit en fait d'une extension d'un port parallèle composé de 8 bits d'entrée /sortie, chaque bit est contrôlé par le bus I2C. L'afficheur, l'interface I2C comportant le boîtier PCF8574A, et le branchement avec la carte Arduino sont respectivement représentés sur les figures (III.39), (III.40) et (III.41).

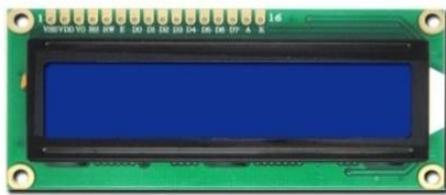


Figure III.39 Afficheur LCD 16X2. [41]



Figure III.40 le dispositif I2C "PCF8574".

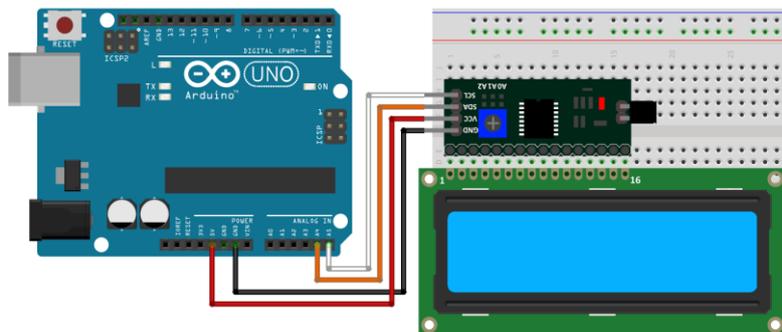


Figure III.41 Branchement du LCD en mode "I2C" avec la carte Arduino. [42]

## III.4 Bilan énergétique

### III.4.1 énergie consommée par la charge

Les paramètres électriques et énergétiques des éléments de la charge sont représentés sur le tableau (III.6).

<i>Composant</i>	<i>Symbol</i>	<i>Le voltage</i>	<i>Le courant</i>	<i>L'énergie</i>
<i>La carte ARDUINO</i>	ARDUINO UNO	5V	20mA à 50mA	100mW à 250mW
<i>Afficheur LCD</i>	LCD	[3V à 5V]	[1mA à 5mA]	[3mW à 25mW]
<i>Dispositif de "I2C"</i>	PCF8574	7V	50mA	350mW
<i>Capteur de température et humidité</i>	AM2302 (DHT22)	[3.3V à 6V]	[1mA à 1.5mA]	[3.3mW à 9mW]
<i>Capteur de GAZ</i>	MQ2	[V=5v ±0.01]	[I ≤ 150mA]	[I ≤ 750mW]
<i>Capteur de lumière</i>	TEMT6000	6V	20mA	120mW
<i>Capteur humidité de sol</i>	\	[3.3v à 5v]	I=35mA	[115.5mW à 175mW]
<i>Module WIFI</i>	XBEE	[2V à 3.6V]	I= 15mA	[30mW à 54mW]

<b><i>L'énergie totale</i></b>	<b><i>1472mW à 1733mW (1.5W à 1.8W)</i></b>
--------------------------------	---------------------------------------------

Tableau III.5 Puissance consommée par la charge.

### III.4.2 L'énergie totale consommée par le système

La puissance totale consommée par le système est illustrée sur le tableau (III.7).

<b>Circuit</b>	<b>Puissance</b>
Circuit de récupération d'énergie	17.85W
La charge	1.5W-1.8W
<b>Puissance totale</b>	<b>19.35W-19.65W</b>

Tableau III.6 Puissance totale consommée.

### III.5 Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet d'une description des différents modules et composants des principaux blocs de notre système de récupération de l'énergie solaire. Il s'agit en effet de la description de la source d'énergie, du convertisseur DC/DC commandé par un algorithme MPPT de type perturbation observation. Le convertisseur de type BUCK a fait l'objet d'une présentation assez détaillée. Nous avons présenté les caractéristiques techniques des éléments de la charge du système, à savoir : la carte Arduino UNO, le nœud de capteurs composé des capteurs de température et humidité de l'air, le capteur de l'humidité du sol, le capteur de lumière, le capteur de gaz, le protocole de communication, et le système d'affichage.

Enfin un bilan énergétique du système a été établi à partir des consommations des différents composants. La présentation des différents éléments du système et la compréhension de leurs fonctionnements nous permettra d'aborder le prochain chapitre dédié à la partie réalisation où sont présentées toutes les étapes de simulation et de programmation du système.

# Chapitre IV Conception et réalisation

## IV.1 Introduction

La phase de réalisation d'un circuit imprimé constitue en une tâche importante et nécessaire précédant la phase de production. De manière générale, cette dernière est accomplie par l'exploitation d'outil de conception spécifique (logiciels).

Le but de ce chapitre est de présenter la méthodologie adoptée pour la conception du circuit imprimé du récupérateur d'énergie alimentant le nœud de capteur générique moyennant l'outil Altium Designer aussi de présenter le programme ARDUINO mise au point pour la gestion du système.

## IV.2 Méthodologie de conception du PCB

La figure (VI.1) ci-dessous illustre la méthodologie suivie pour la conception du circuit PCB.

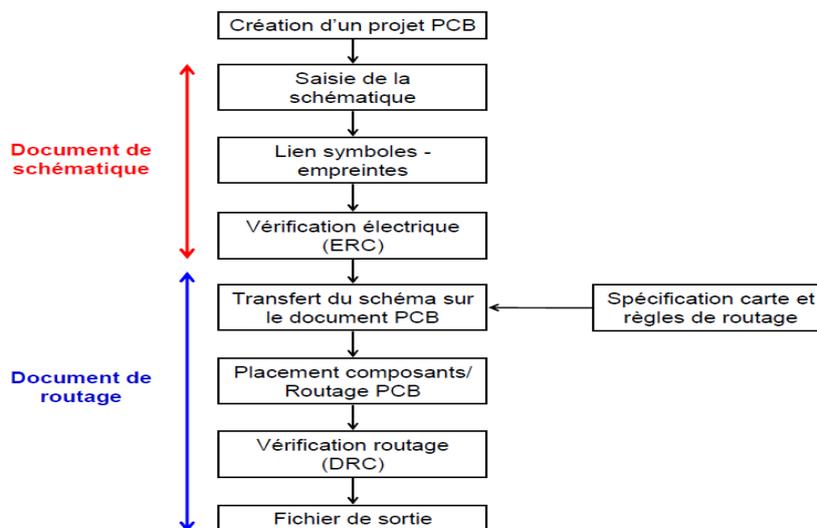


Figure IV.1 Méthodologie de conception d'un circuit imprimé.

L'élaboration d'un projet PCB contient deux documents :

- Un schématique, décrivant le schéma électrique de l'application. Les composants électriques sont représentés par des symboles et reliés par des interconnexions électriques.
- Un document PCB, décrivant le placement physique des composants sur la carte et le routage des interconnexions.

Ces deux documents sont liés. A chaque composant électronique, on associe un symbole électrique et une empreinte sur un circuit imprimé. La première phase consiste à définir le schéma électrique. On sélectionne dans une librairie les différents symboles électriques des composants, on leur attribue des empreintes et on les relie.

Après une validation électrique, le document de routage PCB, qui a été au préalable spécifié, est mis à jour en fonction de la schématique. Les empreintes des composants sont déposées aléatoirement sur la surface de routage, les interconnexions entre les circuits apparaissent sous forme de liens virtuels. Les 2 étapes qui suivent sont :

- Le placement des composants sur la carte
- Le routage des interconnexions, qui vont être matérialisées par des lignes métalliques.

A la fin de ces deux phases, une vérification de la correspondance entre le routage et la schématique et du respect des règles de routage (DRC) est appliquée afin de valider le design. Une fois le design validé, des fichiers de sortie peuvent être produits pour réaliser les différents masques servant à fabriquer la carte. Les parties qui vont suivre décrivent comment réaliser ces différentes étapes sous Altium Designer. [32]

#### **IV.2.1 Présentation de l'outil "Altium Designer"**

Altium Designer est un puissant outil de conception électronique assistée par ordinateur électronique développé par l'entreprise Altium. Ce logiciel permet de saisir des schémas électriques, les vérifier, les simuler et aller jusqu'à la conception du circuit imprimé.

La grande force du flot de conception Altium Designer réside dans les nombreux outils qu'il intègre. Ce logiciel représente une seule solution informatique pour concevoir et développer un montage électronique en allant du schéma jusqu'à la programmation des composants de ce schéma.

Ci-dessous, nous pouvons citer les principales caractéristiques flots de conception Altium Designer:

- L'outil unique permet de simplifier le travail entre l'éditeur de schématique, la simulation, la réalisation du circuit imprimé et toutes les autres fonctionnalités.
- Réaliser un prototype via le logiciel grâce aux différents outils, incluant un outil de visualisation 3D.
- Adapté pour l'avenir (prend en compte certaines nouvelles technologies et mise à jour régulière).
- Nombreuses bibliothèques de composants et mise à jour continue. [43]

La figure ci-dessous illustre les différentes fenêtres et menus de l'outil.

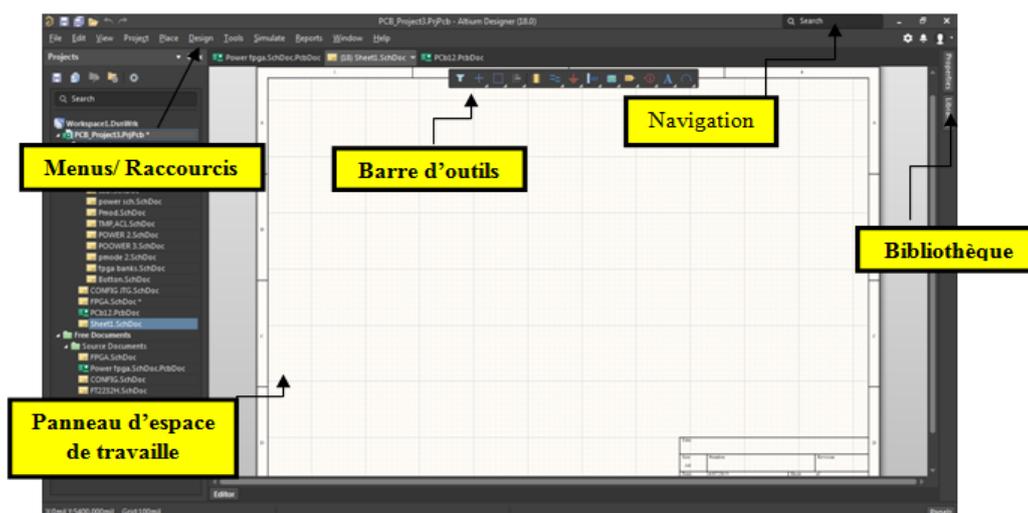


Figure IV.2 Environnement d'Altium Designer.

## IV.3 Conception du circuit imprimé

### IV.3.1 Présentation de l'architecture PCB du circuit récupérateur d'énergie

La figure (IV.2) illustre le schématique du circuit de récupération d'énergie solaire. [44]

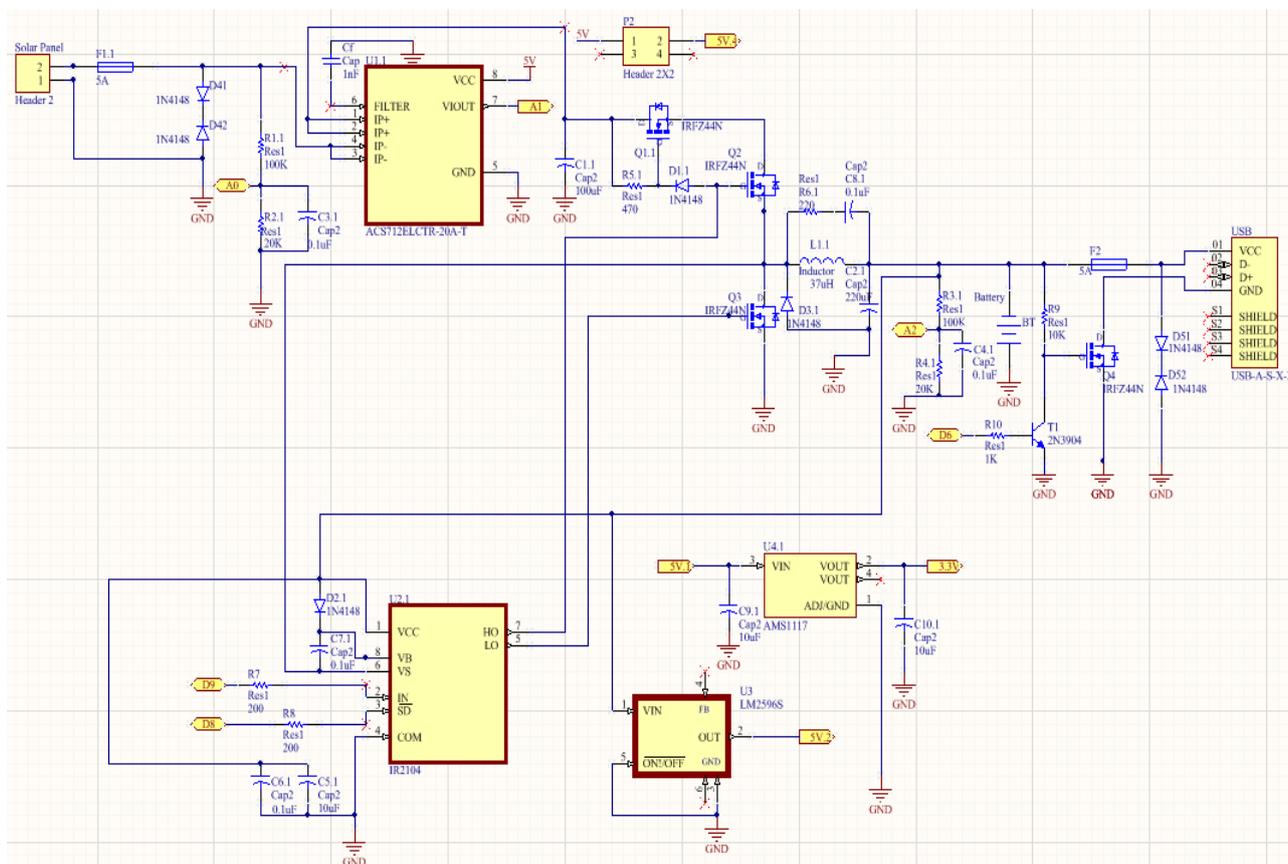


Figure IV.3 Schématique générale du circuit de récupération d'énergie solaire.

Ce dernier est composé des blocs suivants :

#### IV.3.1.1 Circuit du panneau solaire

La figure ci-dessous illustre le schématique du circuit où le panneau solaire va se greffer.

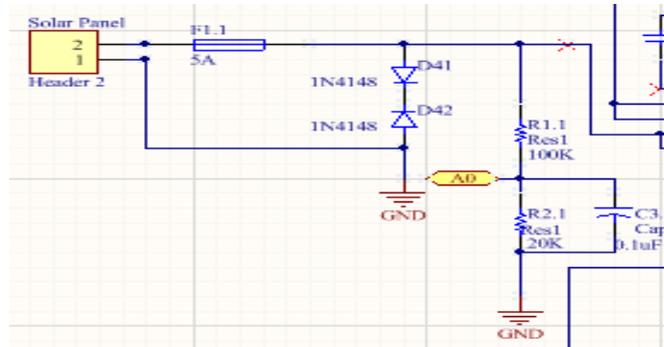


Figure IV.4 Circuit de l'entrée de panneau solaire avec les composants de protection.

Le composant "Header 2" représente le connecteur d'alimentation d'entrée du panneau solaire, le fusible "F1" est un fusible de sécurité et les deux diodes (D41 et D42) sont utilisées pour la protection contre les surtensions du panneau solaire.

Le diviseur de tension (R1.1 et R2.1) pour mesurer la tension de panneau solaire et le condensateur céramiques C3.1 est utilisé pour le filtrage et la suppression des hautes fréquences.

#### IV.3.1.2 Le capteur de courant "ACS712"

Le capteur de courant ACS712 (figure IV.5) détecte le courant du panneau solaire et alimente la broche analogique du nœud de capteur.

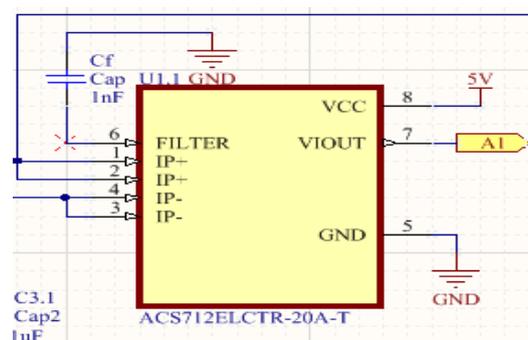


Figure IV.5 Circuit de capteur de courant "ACS712".

#### IV.3.1.3 Le circuit de convertisseur BUCK

Le circuit de convertisseur abaisseur est représenté dans la figure (IV.6).

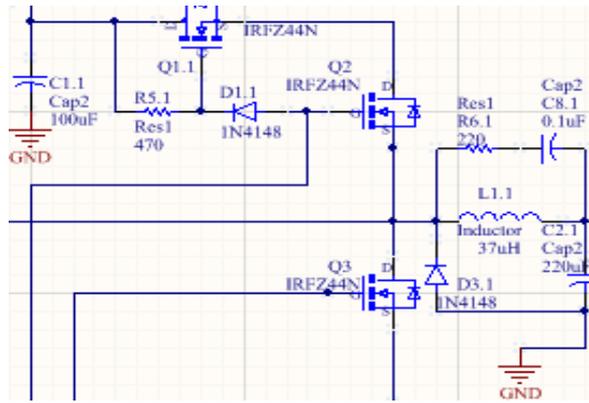


Figure IV.6 Convertisseur BUCK et les MOSFETS.

Le convertisseur abaisseur est composé des commutateurs MOSFET synchrones Q2 et Q3 et de l'inductance L1 des dispositifs de stockage d'énergie et des condensateurs C1.1 et C2.1. L'inductance lisse le courant de commutation et avec C2.1, elle lisse la tension de sortie. Les condensateurs C8.1 et R6.1 sont un réseau d'amortissement, utilisé pour réduire l'ondulation de la tension d'inductance générée par le courant de commutation dans l'inductance. Le LM2596 représente un régulateur de tension pour le convertisseur BUCK et aussi pour la tension d'entrée de panneau solaire.

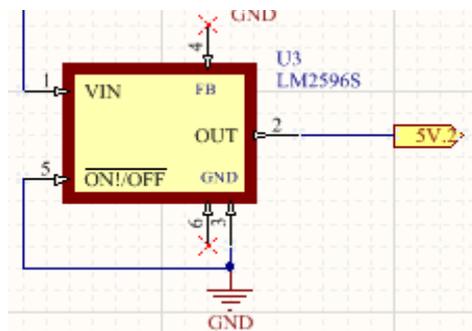


Figure IV.7 LM2596.

#### IV.3.1.4 Le contrôleur IR2104

L'IR2104 est un pilote de porte MOSFET demi-pont. Il pilote les MOSFET côté haut et bas en utilisant le signal PWM de l'ARDUINO (broche D9). L'IR2104 peut également être arrêté avec le signal de commande (bas sur la broche D8) de l'ARDUINO sur la broche 3.

D2.1 et C7.1 font partie du circuit d'amorçage qui génère la tension de commande de grille côté haut pour Q1 et Q2. Le logiciel garde une trace du cycle de service PWM et ne permet jamais à 100% ou toujours activé. Il plafonne le cycle de service PWM à 99,9% pour maintenir la pompe de charge en fonctionnement.

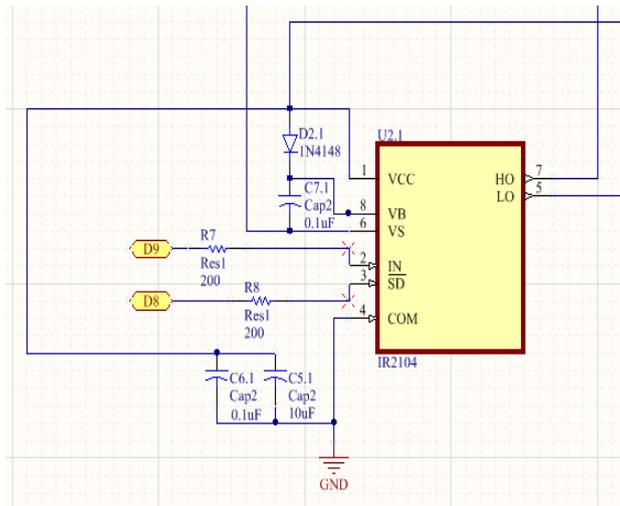


Figure IV.8 Circuit de contrôleur IR2104.

#### IV.3.1.5 Le régulateur de tension AMS1117

Le régulateur de tension AMS1117 est utilisé pour passer de 5V à 3,3V permettant d'alimenter le circuit de protocole de communication "XBEE" (figure IV.9).

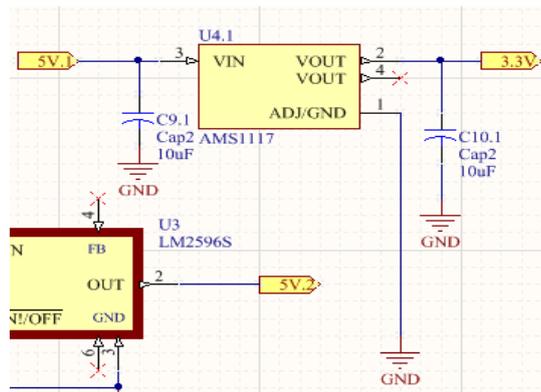


Figure IV.9 Le circuit d'AMS1117.

#### IV.3.1.6 La sortie la carte de récupération d'énergie solaire

Le circuit diviseur de tension (R3.1 et R4.1) est utilisé pour mesurer la tension de la batterie. La sortie du diviseur fournit le signal de tension à la broche analogique 2. Le condensateur céramique C4.1 est utilisé pour supprimer la haute fréquence. Le MOSFET Q4 est utilisé pour contrôler la charge. Le pilote de ce MOSFET est composé d'un transistor T1 et de résistances R9, R10. Les diodes D5.1 et D5.2 sont utilisées pour la protection contre les surtensions du panneau solaire et du côté charge, le fusible F2 est utilisé pour la sécurité et USB représente la sortie de notre carte de récupération d'énergie solaire et l'entrée de nœud de capteur qu'on va l'alimenter (figure IV.10).

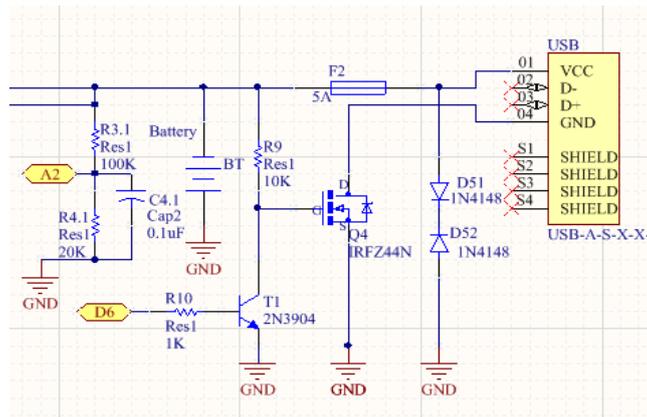


Figure IV.10 Le circuit de sortie.

### IV.3.2 Création de la carte

Pour l'élaboration de notre carte, nous avons commencé par la création du document PCB dans lequel les empreintes de tous les composants constituant la carte du récupérateur d'énergie seront importées.

Nous avons exploité les ressources de l'outil PCB Board Wizard illustré ci dessous (Figure IV.11) pour la création de la carte et la définition de ses paramètres.



Figure IV.11 L'outil PCB Board wizard.

Les différentes étapes sont comme suit :

#### 1. Délimiter le format et les dimensions de la carte

En cliquant sur le menu "Disign→Edit board shape". Comme la plupart des cartes électronique, le format de notre carte est rectangulaire. Les dimensions de la carte sont de 105.664mm pour la longueur et de 60.833mm pour le vertical.

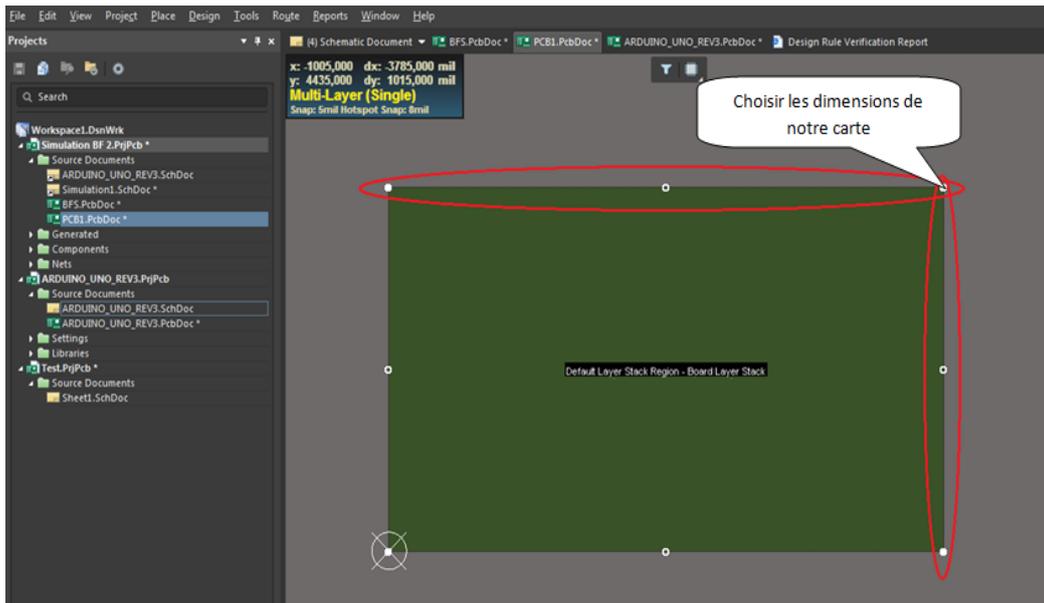


Figure IV.12 Définir les dimensions de la carte.

## 2. Définir les règles de dessin en cliquant sur le menu "Design→Rules"

Cette étape permettra de modifier la distance minimale entre les différents objets (pistes, via, etc). Pour notre carte, nous avons choisi une distance de 0.254mm.

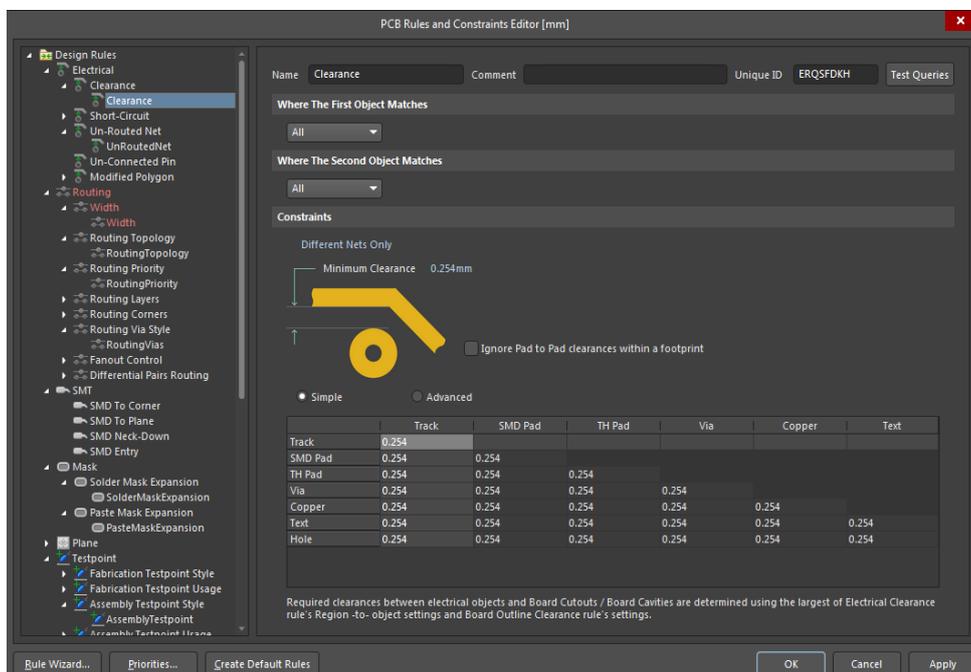


Figure IV.13 La règle "Electrical→Clearance"

Cette étape permettra de modifier la largeur des pistes sur le circuit imprimé.

**Routing→Width:** pour notre cas on a choisi **0.3mm**.

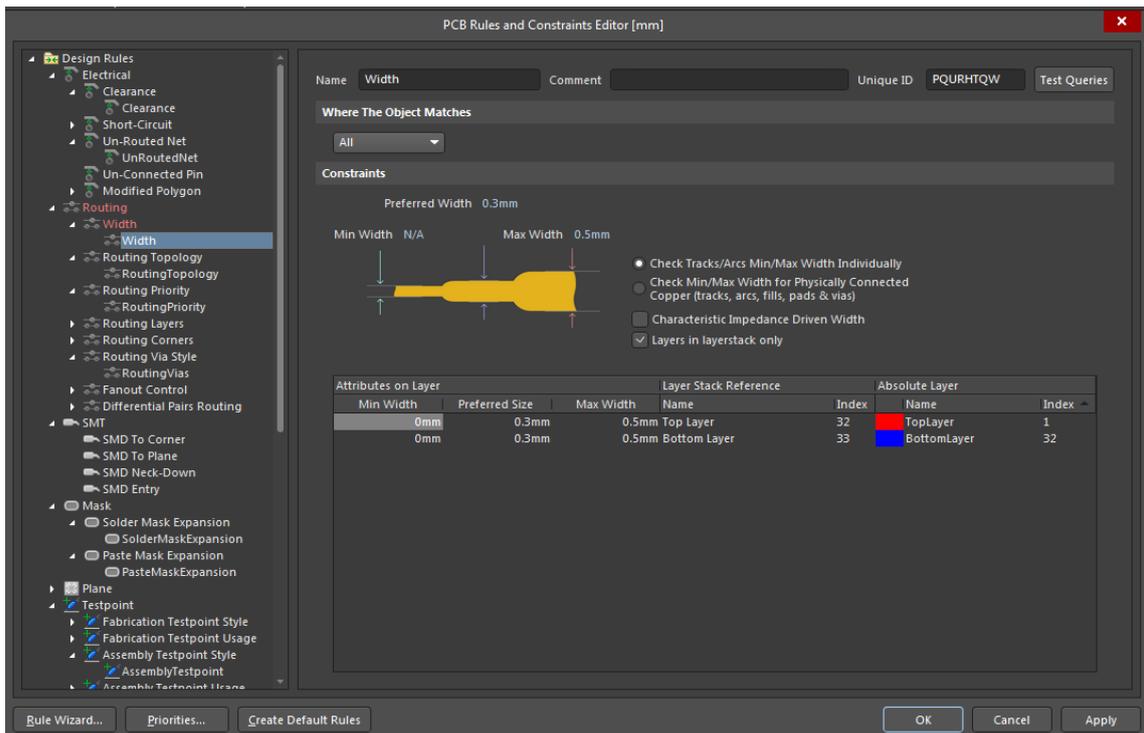


Figure IV.14 La règle "Routing→Width".

### 3. Définir le nombre des couches de la carte

Le nombre des couches total sélectionnée pour la réalisation de notre carte est au nombre de deux.



Figure IV.15 Le nombre des couches.

Pour le choix des couche, on va à l'icone des propriétés, ensuit "Layer" après on choisi la couche (la sélection des couches est sera pendant le placement des composants c'est à dire on choisit la couche après on place les composants de cette couche ensuit on sélectionne la deuxième couche et placer leur composants).

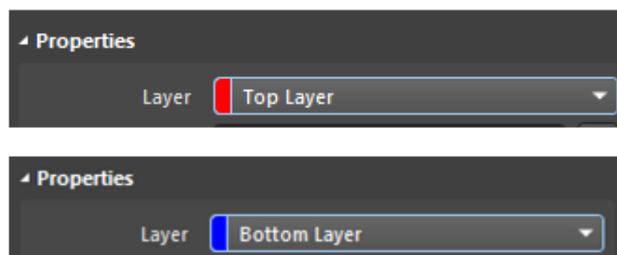


Figure IV.16 La sélection des couches.

La figure ci-dessous résume tous les paramètres que nous avons choisis pour la création du PCB.

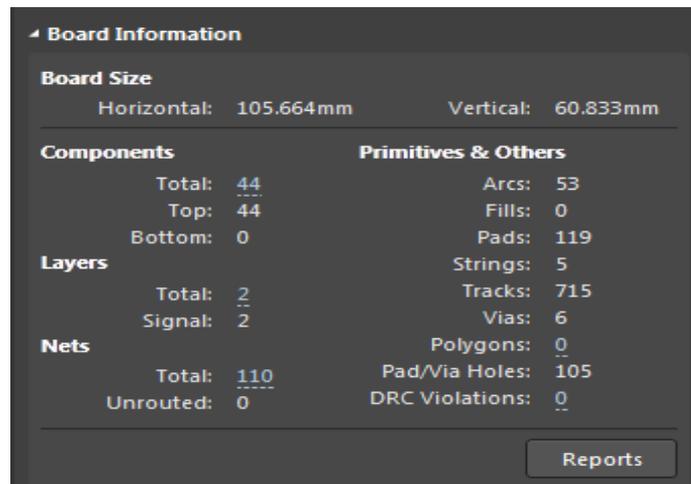


Figure IV.17 Les paramètres de notre carte.

### IV.3.3 Importation des composants dans le PCB

Après vérification du schématique et la compilation de ce dernier, tous les composants constituant la carte et leurs interconnexions sont importés à partir des documents schématiques vers le document PCB. (Figure IV.18).



Figure IV.18 Import les composent vers le PCB.

Une fois que l'outil vérifie la disponibilité des empreintes de chaque composant constituant la carte, ces derniers apparaissent dans le plan de travail, ou ils sont prêts à être placés.

Après validation (l'outil vérifie la disponibilité des empreintes des composants), les composants apparaissent dans le plan de travail et ils sont prêts à être placés.

Les connexions sont matérialisées par des fils très ns reliés directement entre les pins des composants (figure IV.19).

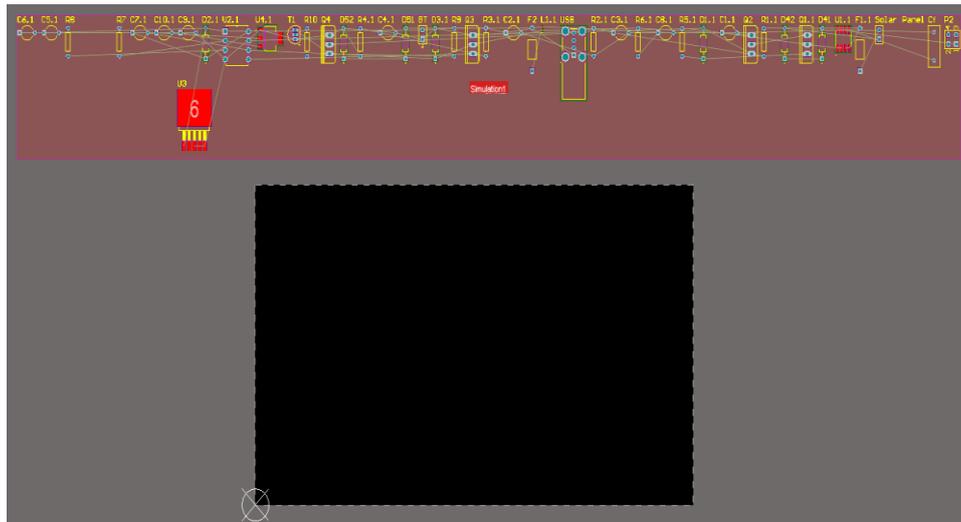


Figure IV.19 La carte avec les composants non placés.

### IV.3.4 Placement des composants

La phase de placement des différents composants constitue une étape cruciale, où le concepteur doit prendre en considération la surface disponible au niveau de la carte ainsi que les considérations stratégiques sur les catégories des composants.

Il est à noter que la phase de conception du PCB est à 90% de placement et de 10% de routage. De ce fait, placer les composants avec précision rend le routage plus facile, et donne à la carte de meilleures performances.

Le nombre de composants à placer sur la carte est de quarante-quatre (44) composants, les figures ci-dessous illustrent leur placement.

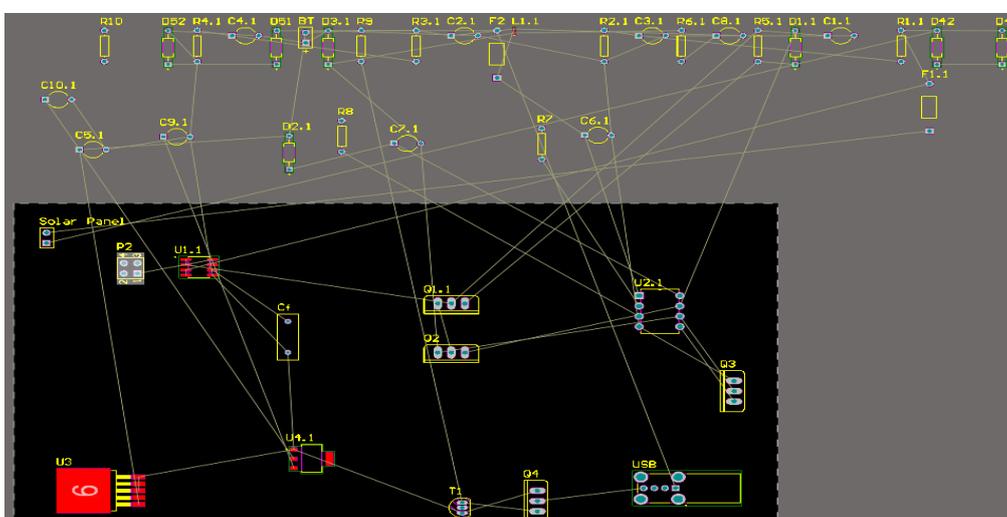


Figure IV.20: Placement des composants.

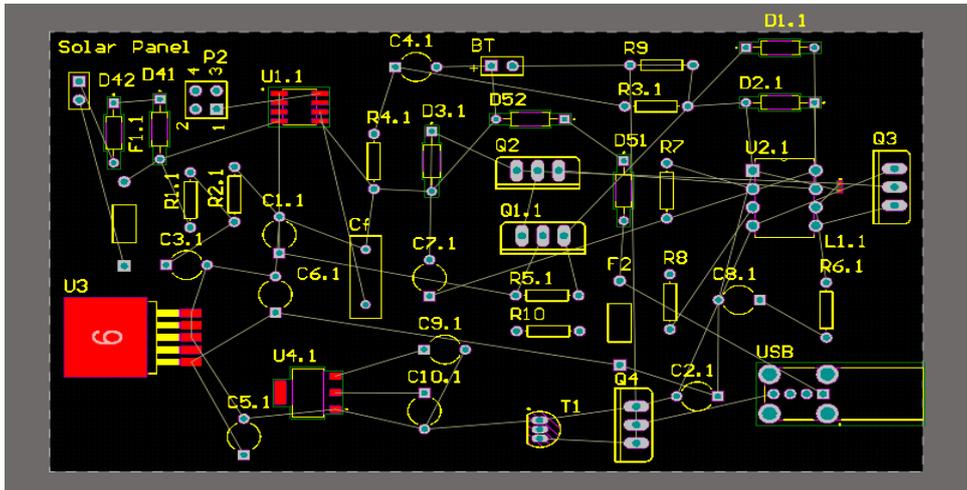


Figure IV.21 La carte avec les composants placés.

### IV.3.5 Le routage

Cette opération consiste à chercher le meilleur passage pour une piste circulant parmi les autres pistes. Néanmoins, certaines solutions posent des problèmes de passage pour d'autres pistes, ce qui oblige à recommencer un autre routage, ou même de déplacer un composant. Parmi les difficultés de routage de PCB les plus courantes se trouvent le routage PMODE comportant un nombre élevé de broches tels que l'afficheur 7 segments. Pour cela, dans le cadre de notre travail, nous avons commencé le routage automatique directement afin éviter tous les problèmes de routage manuelle, qui est très compliqué. Pour lancer le routage automatique, nous avons cliqué sur "Route→Auto route→All", une fois on clique sur "All", nous obtenons le message ci-dessous.

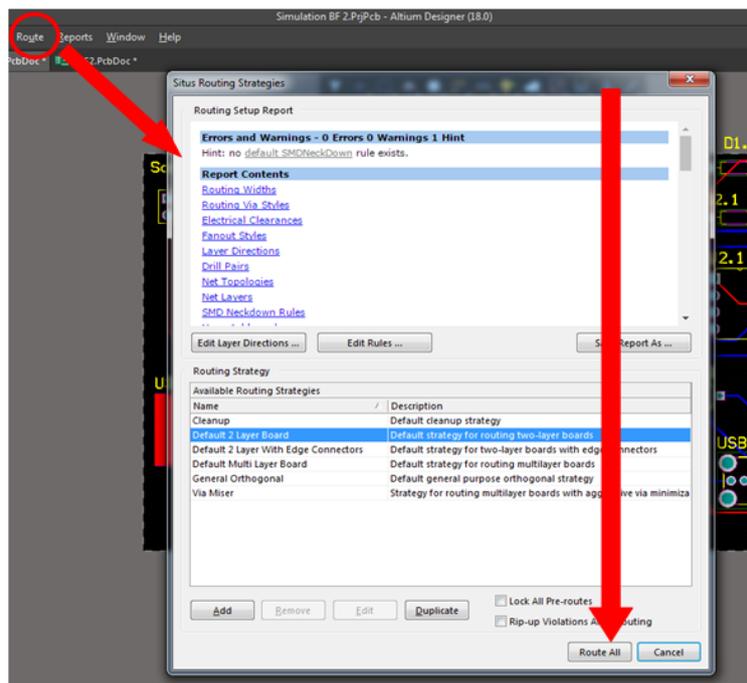


Figure IV.22: Le routage automatique.

### IV.3.6 Validation du routage (Design Rule Check DRC)

Lorsque l'étape de routage est finalisée, il faudra s'assurer que les règles de dessin ont été respectées. Généralement, le routeur automatique indique les violations de règles de design. Cette validation s'appelle Design Rule Check (DRC), accessible en cliquant sur l'icône Tool/Design Rule Check. Au début du routage l'outil nous a affiché 120 erreurs. Ces dernières ont été prises en considération et résolu pour obtenir le résultat suivant (figure IV.23).



Figure IV.23 Rapport de DRC.

Les figures IV.24 et IV.25 montrent la carte en fin de routage en mode plan de la carte et en deux dimensions (2D).

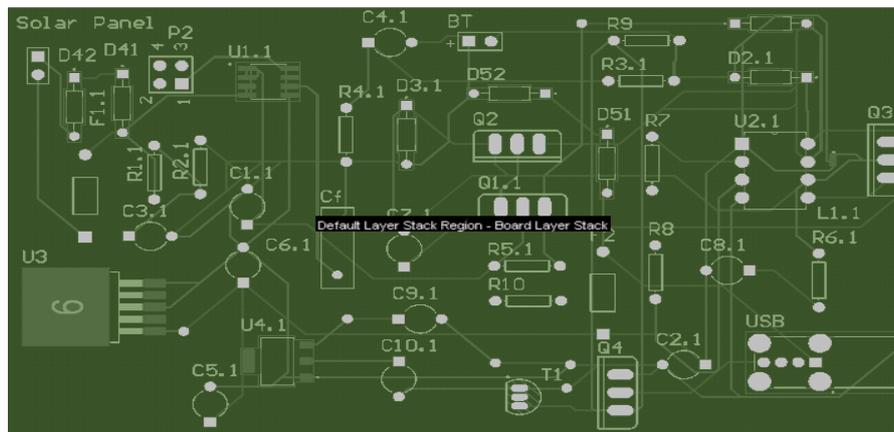


Figure IV.24 Le circuit imprimé en mode plan de la carte (planning mode).

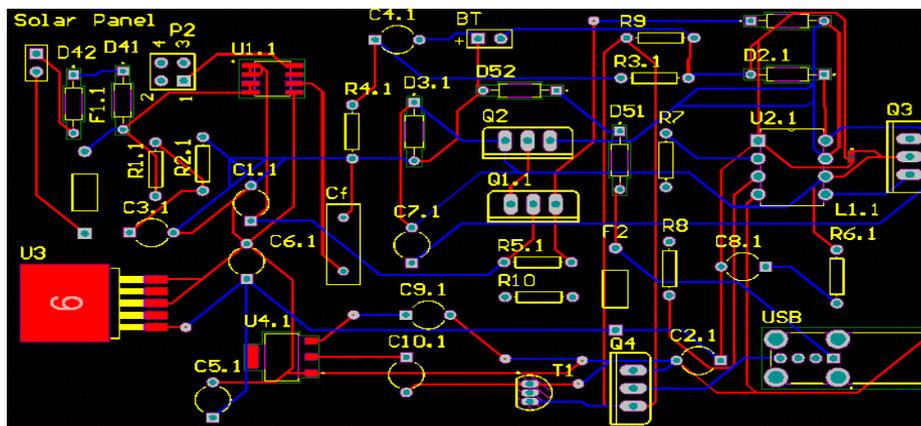


Figure IV.25 Le circuit imprimé en 2 dimensions (2D).

La figure ci-dessous illustre une image 3D.

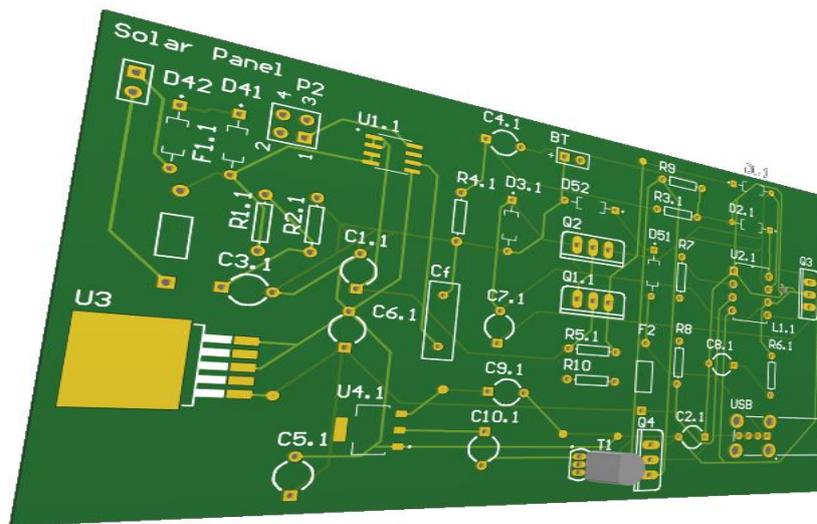


Figure IV.26 La face supérieure du circuit imprimé en 3 dimensions (3D).

### IV.3.7 Création du fichier de sortie

Altium propose différents fichiers de sortie standards tels que les fichiers Gerber. Créer un fichier de sortie standard est très utile lorsque le designer du PCB envoie son design au fabricant car cela assure la compatibilité des formats. Le fabricant pourra vérifier le design avec ces propres outils et apporter des modifications. Néanmoins, la fabrication consiste à transférer l'image de chaque couche du PCB sur des masques. Une manière simple d'assurer ce transfert est de créer une image à l'échelle du PCB.

#### ➤ Le fichier Gerber

Le format gerber est très utilisé dans l'industrie des circuits imprimés. Il contient la description des diverses couches de connexions électriques (les pistes, les vias). Nous avons besoin d'un fichier image Gerber pour chacune des couches de conducteur, des couches de masque de soudure et des couches de légende. Nous suggérons que même si les images masque de soudure « solder mask » sont les mêmes pour les deux côtés, vous soumettez quand même un fichier. Bien que nous puissions accepter ces fichiers dans de nombreux formats. Le format gerber est très utilisé dans l'industrie des circuits imprimés. Il contient la description des diverses couches de connexions électriques (les pistes, les vias). [32]

Pour arriver à ce fichier, nous devons cliquer sur : " File→Fabrication outputs→Gerber file", puis régler tous les paramètres, après exécution, nous récupérerons les résultats illustrés ci-dessous.

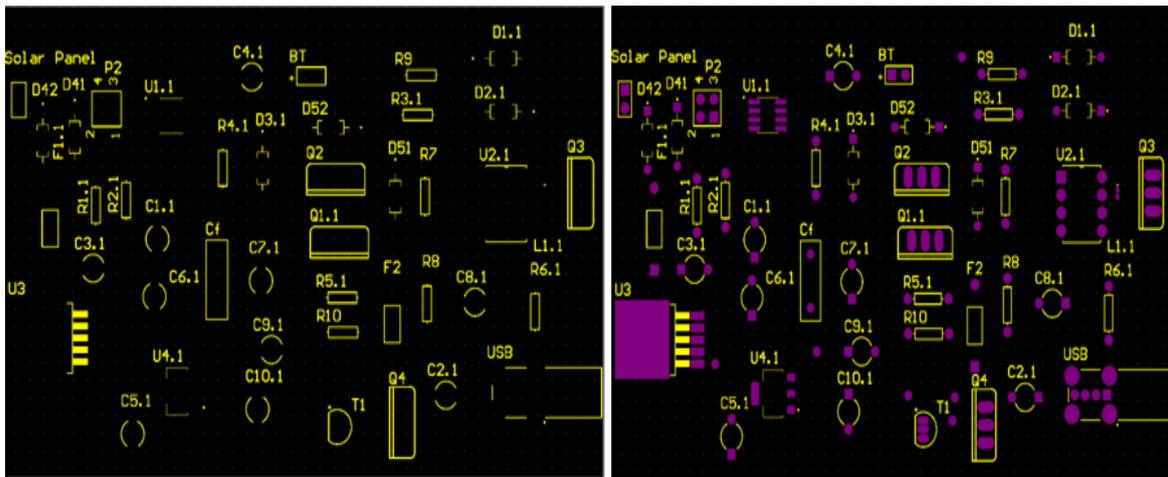


Figure IV.27 Étape 1 de fichier de sortie Gerber.

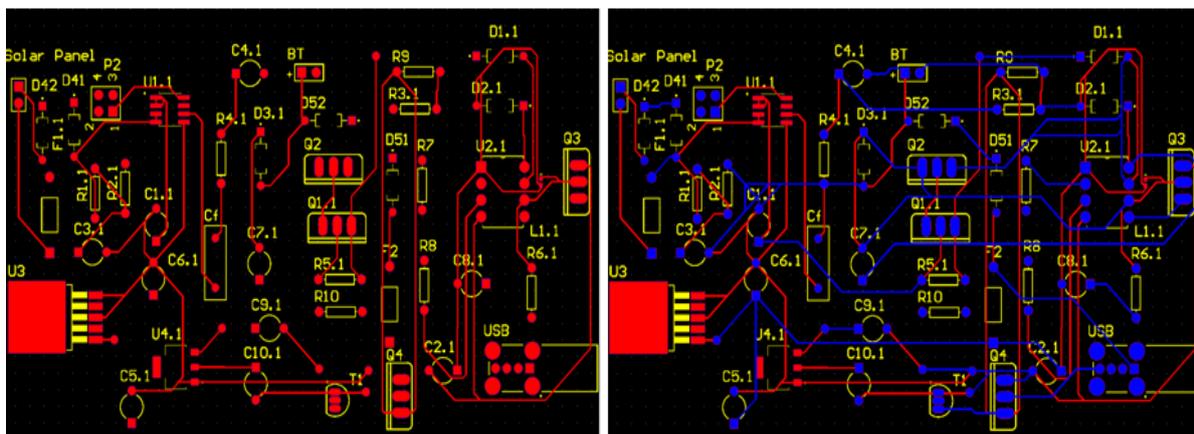


Figure IV.28 Étape 2 de fichier de sortie Gerber.

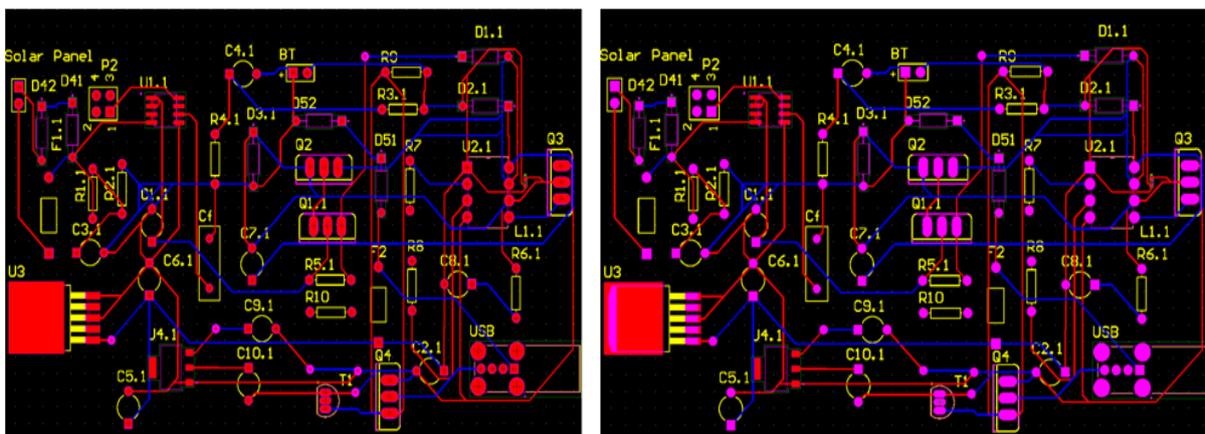


Figure IV.29 Étape finale de fichier de sortie Gerber.

### ➤ Le dessin d'assemblage

Ce fichier comporte un dessin qui indique la disposition des composants sur le circuit imprimé (File→ Assembly outputs →Assembly drawings), voire la figure (IV.30).

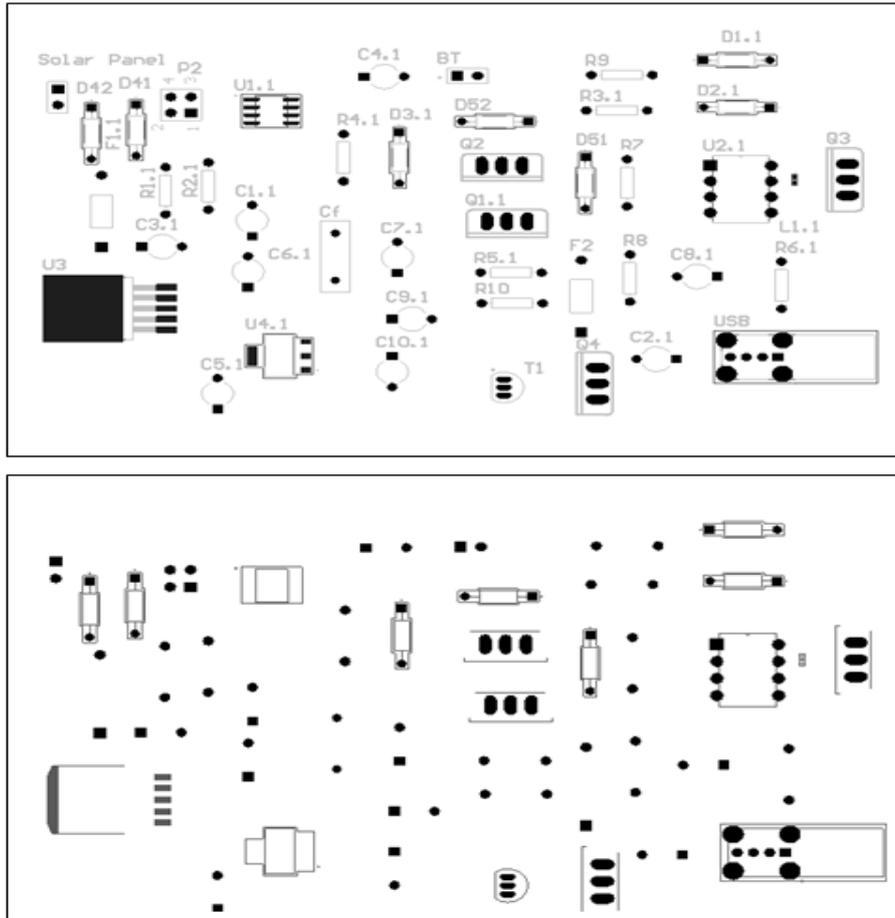


Figure IV.30 Dessin d'assemblage.

#### IV.4 La programmation

Pour la programmation de notre système, nous avons utilisé le logiciel de programmation de la carte Arduino, qui sert d'éditeur de code (langage C). Ce dernier présente plusieurs caractéristiques, parmi lesquels nous pouvons citer :

- Multiplateforme : tourne sous Windows, Macintosh et Linux ;
- Un environnement de programmation clair et simple ;
- Logiciel et matériel open source et extensible ;
- De nombreuses bibliothèques disponibles avec diverses fonctions implémentées ;
- Existence de «shield» (boucliers en français) : ce sont des cartes supplémentaires qui se connectent sur le module Arduino pour augmenter ses fonctionnalités.

Une fois que le programme validé selon les spécifications requises, il sera tapé, transféré et mémorisé dans la carte à travers de la liaison USB.

## IV.4.1 Présentation de l'environnement de programmation IDE

### ARDUINO

L'interface d'IDE "Integrated Development Environment" Arduino est une interface libre et gratuite et simple d'utilisation. Elle offre une interface minimale pour développer un programme sur les cartes Arduino. Comme l'illustre la figure IV.31, l'environnement est doté d'un éditeur de code avec coloration syntaxique et d'une barre d'outils rapide. On y trouve aussi une barre de menus classique qui est utilisée pour accéder aux fonctions avancées de l'IDE. Enfin, une console affichant les résultats de la compilation du code source, des opérations sur la carte, ...etc.

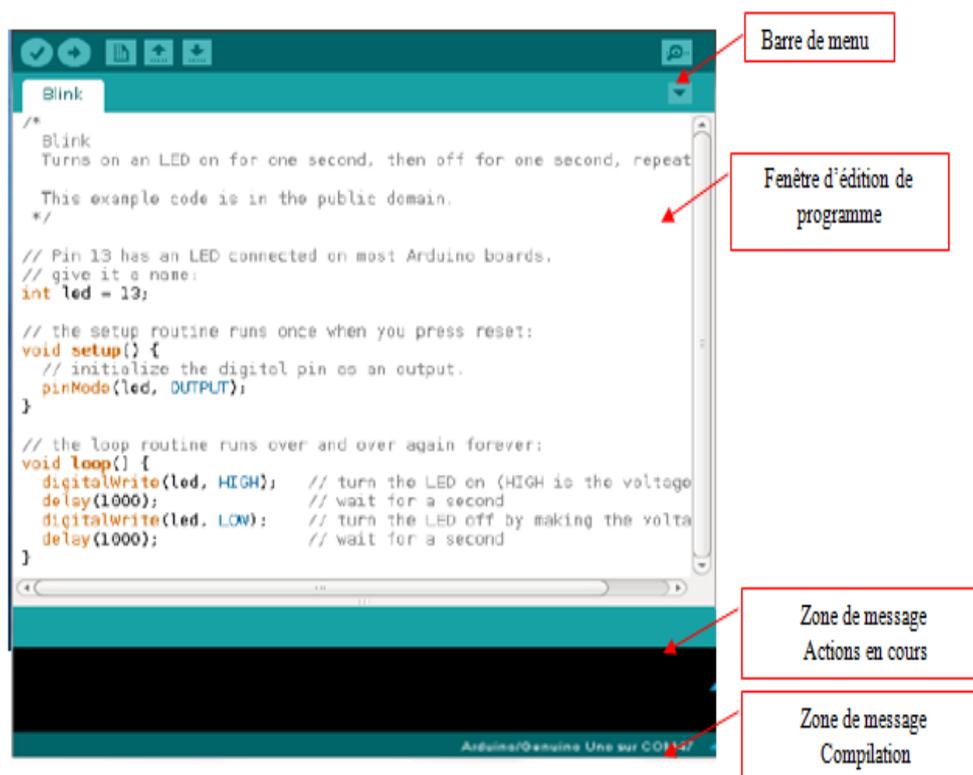


Figure IV.31 Interface IDE ARDUINO.

## IV.4.2 Injection du programme de notre projet

La figure ci-dessous illustre des captures d'écran du programme de gestion du programme de notre projet sous IDE ARDUINO. Le programme comporte trois principales parties:

- La déclaration des variables.
- La partie initialisation et configuration des entrées/sorties : la fonction `setup()`.
- La partie principale qui s'exécute en boucle : la fonction `loop()`.

La figure (IV.32) illustre une capture des différentes bibliothèques utilisées.



```
MPPT3$  
// ARDUINO MPPT SOLAR CHARGE CONTROLLER  
  
#include "TimerOne.h"           // utilisation de la bibliothèque Timer1  
#include <Wire.h>  
#include <SoftwareSerial.h>     // utilisation de la bibliothèque Software Serial
```

Figure IV.32 Diverses Différentes bibliothèques utilisées.

La figure IV.33 nous montre une partie de la déclaration des fonctions et variables utilisées.



```
MPPT3$ //Définition des fonctions  
#define SOL_AMPS_CHAN 1  
#define SOL_VOLTS_CHAN 0  
#define BAT_VOLTS_CHAN 2  
#define AVG_NUM 8  
#define SOL_AMPS_SCALE 0.026393581  
#define SOL_VOLTS_SCALE 0.029296875  
#define BAT_VOLTS_SCALE 0.029296875  
#define PWM_PIN 9  
#define PWM_ENABLE_PIN 8  
#define PWM_FULL 1023  
#define PWM_MAX 100  
#define PWM_MIN 60  
#define PWM_START 90  
#define PWM_INC 1  
#define TURN_ON_MOSFETS digitalWrite (PWM_ENABLE_PIN, HIGH)  
#define TURN_OFF_MOSFETS digitalWrite (PWM_ENABLE_PIN, LOW)  
#define ONE_SECOND 50000  
#define LOW_SOL_WATTS 5,00  
#define MIN_SOL_WATTS 1,00  
#define MIN_BAT_VOLTS 11.00  
#define MAX_BAT_VOLTS 14.10  
#define BATT FLOAT 13.60  
  
MPPT3$ //Déclaration des variables  
int temp=0;  
float sum =0;  
float AMPS_SCALE =0;  
float amps=0;  
int temp1=0;  
float sum1=0;  
float VOLTS_SCALE =0;  
float volt=0;  
int led = 13;  
int received = 0;  
int i;  
float sol_amps;  
float sol_volts;  
float bat_volts;  
float sol_watts;  
float old_sol_watts = 0;  
unsigned int secondes = 0;  
unsigned int prev_seconds = 0;  
unsigned int interrupt_counter = 0;  
unsigned int rappel=0;  
float charger state=0;
```

Figure VI.33 Déclaration des constants et variables.

Les figures IV.34 à IV.37 illustrent quant à elles, la boucle principale du programme qui prend en charge les calculs et le basculement des états de charges suivant les mesures de la tension et du courant émanant du panneau solaire, ainsi que la lecture de la tension aux bornes de la batterie, tout en commandant l'état du MOSFET et la programmation de module wifi.

#### IV.4.2.1 Programme de mesure de la tension

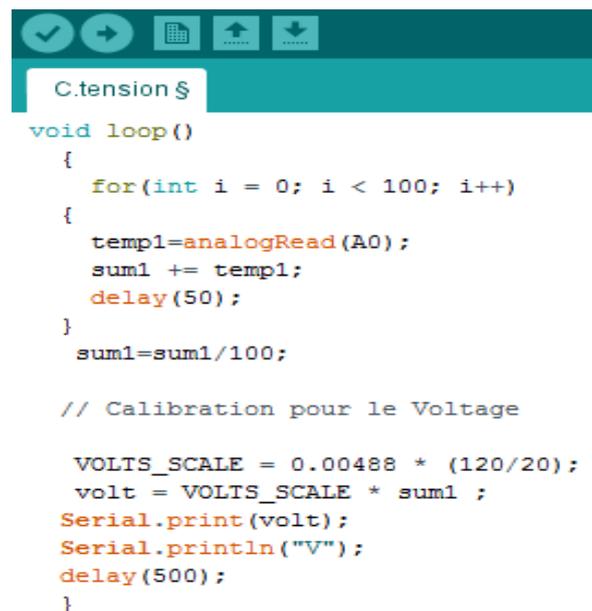
Les entrées analogiques de la carte ARDUINO peuvent être utilisées pour mesurer la tension continue entre 0 et 5 V. La tension convertit en un nombre compris entre 0 et 1023 (0 pour 0V et 1023 pour 5V) donc pour chaque incrément on a 0.0049V (5/1024). Cette plage peut être augmentée en utilisant deux résistances pour créer un diviseur de tension. Le diviseur de tension diminue la tension mesurée dans la plage des entrées analogiques Arduino. Nous pouvons l'utiliser pour mesurer les tensions du panneau solaire et de la batterie.

Pour un circuit diviseur de tension: ( $R1 = 100k\Omega$  et  $R2 = 20k\Omega$ )

$$V_{out} = \frac{R2}{R1 + R2} \times V_{in} \quad (IV.1)$$

$$V_{in} = \frac{R1 + R2}{R2 \times V_{out}} \quad (IV.2)$$

$$V_{in} = \text{nombre ADC} \times 0.0049 \times \left(\frac{120}{20}\right) \quad (IV.3)$$



```
C.tension $
void loop()
{
  for(int i = 0; i < 100; i++)
  {
    temp1=analogRead(A0);
    sum1 += temp1;
    delay(50);
  }
  sum1=sum1/100;

  // Calibration pour le Voltage

  VOLTS_SCALE = 0.00488 * (120/20);
  volt = VOLTS_SCALE * sum1 ;
  Serial.print(volt);
  Serial.println("V");
  delay(500);
}
```

Figure VI.34 Échantillon de programme de mesure de tension.

#### IV.4.2.2 Programme de mesure du courant

Selon la fiche technique d'un module ACS 712 (5A), la sensibilité est de 185 mV / A, l'alimentation est de 5 V et la tension de détection moyenne est de 2,5 V en l'absence de courant.

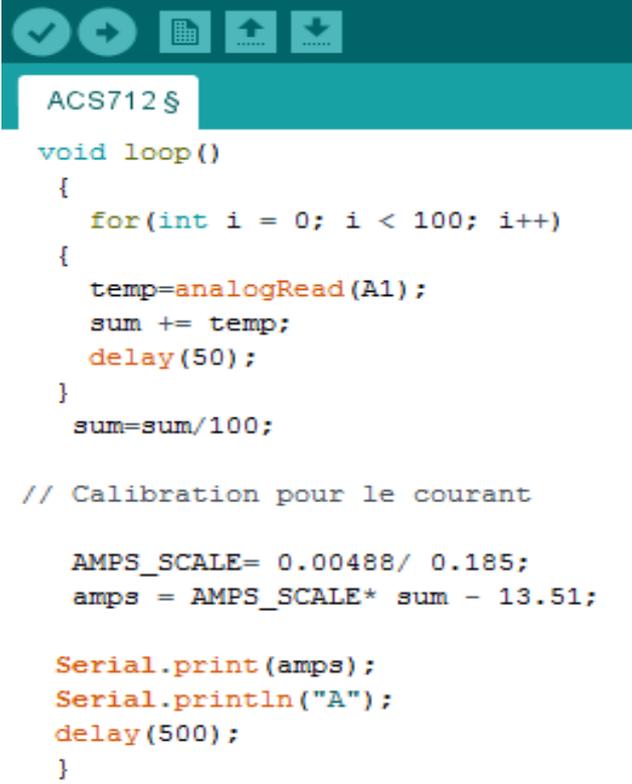
Étalonnage:

$$\text{Valeur} = \left(\frac{5}{1024}\right) \times \text{valeur de lecture analogique} \quad (IV.4)$$

Si vous n'obtenez pas 5V de la broche ARDUINO 5V alors:

$$\text{Valeur} = \left(\frac{V_{\text{mesuré}}}{1024}\right) \times \text{valeur de lecture analogique} \quad (\text{IV.5})$$

$$\text{Courant en ampères} = \frac{\text{valeur} - 2,5}{0,185} \quad (\text{IV.6})$$



```
ACS712 §
void loop()
{
  for(int i = 0; i < 100; i++)
  {
    temp=analogRead(A1);
    sum += temp;
    delay(50);
  }
  sum=sum/100;

  // Calibration pour le courant

  AMPS_SCALE= 0.00488/ 0.185;
  amps = AMPS_SCALE* sum - 13.51;

  Serial.print(amps);
  Serial.println("A");
  delay(500);
}
```

Figure VI.35 Échantillon de programme de mesure de courant.

#### IV.4.2.3 Programme de l'algorithme MPPT

Le programme commence par une initialisation où il y aura une affectation des valeurs aux éléments pour le démarrage (l'état du driver de MOSFET, les délais d'activation de l'interruption du Timer1, et quelques variables globales...etc).

Le principe de l'algorithme utilisé consiste à mesurer le courant et la tension du panneau pour déduire la valeur de la puissance et faire varier la tension et le courant en variant le rapport cyclique qui commande l'interrupteur du convertisseur Buck. Si la puissance mesurée à l'instant « K+1 » est supérieure à celle mesurée à l'instant « K », on diminue jusqu'à ce que la batterie soit totalement chargée et que sa tension soit équivalente à la tension maximale.

```

mppt4
void run_charger(void) {
  static int off_count = OFF_NUM;
  switch (charger_state) {
  case on:
    if (sol_watts < MIN_SOL_WATTS) {
      charger_state = off;
      off_count = OFF_NUM;
      TURN_OFF;
    }
    else if (bat_volts > MAX_BAT_VOLTS) {
      charger_state = bat_float;
    }
    else if (sol_watts < LOW_SOL_WATTS) {
      pwm = PWM_MAX; //go to on state
      set_pwm_duty();
    }
    else {
      pwm = ((bat_volts * 10) / (sol_volts / 10)) + 5;
      charger_state = bulk;
    }
    break;
  case bulk:
    if (sol_watts < MIN_SOL_WATTS) {

```

```

void loop()
{
  read_data();
  run_charger();
  if ((seconds - prev_seconds) > 0)
  {
    prev_seconds = seconds;
    read_data();
    run_charger();
  }
}
..

```

Figure VI.36 Échantillon de programme d'algorithme.

#### IV.4.2.4 Programme du module WIFI

Ce dernier est utilisé afin d'établir un protocole de communication entre la carte de récupération d'énergie solaire que nous avons conçu, et la carte ARDUINO qui constitue le nœud de capteur à l'alimenter.

```

XBEE $
void wifi_data_log()
{
  // thingspeak needs 15 sec delay between updates
  static int lastlogged;
  static int seconds;
  if ( seconds - lastlogged < 16 )
    return;
  lastlogged = seconds;
  // convert to string
  char buf[16];
  float sol_volts;
  String strTemp = dtostrf( sol_volts, 4, 1, buf);

  Serial.println(strTemp);}

```

Figure VI.37 Échantillons du programme de module WIFI.

## **IV.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la démarche adoptée pour la conception de la carte de récupération d'énergie solaire en utilisant l'outil de conception ALTIUM Designer, depuis le schéma électrique jusqu'au routage en passant par le placement des composants sur la carte. La conception d'une telle carte nécessite un respect strict des règles de conception. Pour cela, nous avons essayé de prendre le maximum de ces règles et de les appliquer. Le résultat est un ensemble de fichiers qui peuvent être exploités en vue de la fabrication finale. Aussi on a vu la partie programmation sous ARDUINO de l'algorithme qui implémente les différents scénarios pour une gestion régulière de notre système.

## Conclusion générale

---

Notre travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de l'équipe TDCSD division Microélectronique et Nanotechnologies du CDTA. Il consiste à réaliser la carte électronique du circuit de récupération de l'énergie solaire pour alimenter un nœud de capteurs. Plusieurs travaux ont été réalisés dans ce domaine pour résoudre le problème de transfert d'énergie du générateur photovoltaïque à la charge du nœud de capteurs.

Avant d'aborder la problématique de conversion d'énergie, nous avons commencé par présenter quelques généralités sur les réseaux de capteurs sans fil (RCSF). Cette étude nous a permis de bien comprendre leur structure et leurs caractéristiques, les types de protocoles existants ainsi que leurs domaines d'applications. Les réseaux de capteurs sans fil ne cessent de prendre une place très appréciée au sein de la communauté scientifique, et dans plusieurs domaines vu leurs déploiements et leurs applications qui ne cessent de se développer chaque jour. Après avoir présenté les différentes formes d'énergies renouvelables et plus particulièrement l'énergie solaire, on s'est étalé sur l'énergie photovoltaïque en rappelant le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant leur rendement. Nous avons décrit l'architecture d'un système récupérateur d'énergie solaire alimentant un réseau de capteurs générique. Le panneau solaire étant le premier organe de la chaîne d'optimisation du système de récupération d'énergie, il doit être choisi de manière à apporter une efficacité énergétique significative et une autonomie totale.

Le contrôleur MPPT est aussi un élément très important de la chaîne puisqu'il doit adapter le générateur PV à la charge tout en optimisant la puissance. L'algorithme « perturb and observe » paraît naturellement le plus simple dans sa mise en œuvre puisqu'il s'agit de faire varier la tension de la source dans un sens ou dans l'autre de manière à maximiser la puissance tout en conservant au mieux l'intensité du courant. La structure de base du convertisseur DC-DC de type Buck a été utilisée, On retrouve cette structure sur plusieurs plateformes mobiles. Toute fois, il est important de faire le bon choix des composants sans oublier le calcul de quelques éléments en particulier les valeurs de l'inductance de la bobine du convertisseur et de la capacité de filtrage, de manière à minimiser les ondulations de courant et de tension.

Enfin, nous avons détaillé les étapes de conception de la carte du circuit de récupération de l'énergie solaire en utilisant le simulateur "Altium Designer", comme nous avons élaboré les programmes "Arduino" qui permettent de gérer tous les blocs et modules de notre système.

Comme perspective, il est intéressant de réaliser un seul module compact regroupant l'ensemble des blocs pour en faire un véritable nœud de capteur.

Nous espérons que ce modeste travail puisse servir comme référence pour d'autres travaux dans le domaine de la conception et la réalisation des nœuds de micro capteurs totalement autonome.

# Bibliographie

---

- [1] R. Lopes Pereira, J. Trindade, F. Gonçalves, L. Suresh, D. Barbosa, et T. Vazão, « A wireless sensor network for monitoring volcano-seismic signals », *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 14, no 12, p. 3123- 3142, décembre. 2014.
- [2] K. Casey, A. Lim, et G. Dozier, « A Sensor Network Architecture for Tsunami Detection and Response », *Int. J. Distrib. Sens. Netw*, vol. 4, no 1, p. 27-42, janvier. 2008.
- [3] K. Shahzad et B. Oelmann, « A comparative study of in-sensor processing vs. raw data transmission using ZigBee, BLE and Wi-Fi for data intensive monitoring applications », in *2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS)*, p. 519-524, 2014.
- [4] Mme.KHMISSI, cours « capteur », Master1 instrumentation, Département d'électronique, Faculté de Technologie, Université Saad Dahleb de Blida, 2019.
- [5] KAZI TANI Chahrazad et BENHADDOUCHE Wiam, Implémentation et test d'un protocole de prévention de l'attaque Clone dans un réseau de capteurs sans fil, mémoire de master, Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen, 2013-2014.
- [6] HAMLILI Boubakeur, BENAHMED Khelifa, GASBAOUI Ibrahim, La gestion d'énergie dans le réseau de capteurs sans fil, Journées portes ouvertes sur la Faculté des Sciences Exactes JFSE, Université Tahri Mohammed de Béchar, 2017.
- [7] MERABET Siham et ZIANI Djamilia, Étude et simulation des techniques de minimisation de la consommation d'énergie dans les RCSF, mémoire de master, Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen, juin 2013.
- [8] Erik Persson, Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks, Master thesis, Uppsala University Sweden,30 Juin 2019.
- [9] YOUNES Yacine, Minimisation d'énergie dans un réseau de capteurs, mémoire de Magister, Université MOULOUD MAMMERI de TIZI-OUZOU, 26 septembre 2012.
- [10] CHELLAL Yacine Les réseaux de capteurs sans fils, Rapport des réseaux avancés, École Nationale Supérieure d'Informatique Alger, page 12, 04 avril 2016.
- [11] L. MEKKAOUI, «Compression d'images dans les réseaux de capteurs sans fil», Thèse de doctorat en sciences, Spécialité Automatique, Traitement du Signal et Génie Informatique, Université de Lorraine, 26 Novembre 2012.

- [12] W.HEINZELMAN, A. CHANDRAKASAN, H. BALAKRISHNAN, «Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Micro sensor Networks», International Conference of scientific systems, vol. 8, pp. 8020, Hawaii, January 2000.
- [13] Ouanteur Celia et Bedredin Sabrina «Stratégie MIMO coopérative pour l'économie d'énergie dans les réseaux de capteur sans fil », Conférence de Évaluation des performances et qualité de service, Université Abderrahmane/Mira de Bejaia, 2013
- [14] Alain Bilbao Learreta « Réalisation de commandes MPPT Numérique » rapport de stage université RoviraVirgili de l'Espagne, 2006
- [15] M.Boukli-Hacene Omar « Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique » mémoire de magister université Abou Bakr Belkaid Telemcen ,2011.
- [16] Anas el Atmis « Conception et réalisation d'un régulateur solaire sous Labview à base de microcontrôleur » Pour l'obtention du diplôme de Master, Systèmes Microélectroniques de Télécommunications et de l'informatique Industrielle, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès Maroc, 17 Juin 2014
- [17] : MAMOUNI Rania ZEMMITE Seddik «Etude et réalisation d'un chargeur solaire par Arduino » Pour l'obtention du diplôme de Master, Electrotechnique Industrielle Université de Kasdi Merbah de Ouergla, 2018.
- [18] S.Zaamta Mémoire de magister en électrotechnique « Réalisation d'un régulateur solaire à base de microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection de la batterie» université Oum el Bouaghi, 2008.
- [19] Belboula Abdelkader « Commande MPPT avancée d'un système de conversion d'énergie solaire: photovoltaïque et thermoélectrique » PFE pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechnique université Hassiba Ben Bouali de Chlef. 21 septembre 2014.
- [20] Belkaid Abdelhakim «Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome » thèse de doctorat université Ferhat Abbas Setif 1 ,2015.
- [21] Angel Cid Pastor « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques » doctorat de l'institut national des sciences appliquées de toulouse, 29 septembre 2006.
- [22] A. Chermitti,O. Boukli-Hacene and S. Mouhadjer, "Design of a Library of Components for Autonomous Photovoltaic System under Matlab/Simulink", International Journal of Computer Publications, Vol. 53, N°14, page 16, 2012.
- [23] M.R. Sourov, U.T. Ahmed and M.G. Rabbani, „A High Performance Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Power System Using DC-DC Boost Converter“, IOSR, Journal of Engineering, Vol. 2, N°12, pp. 12 – 20, 2012.
- [24] ACS712 Current Sensor datasheet.
- [25] IRFZ44N datasheet.
- [26] IR2104 datasheet.

[27] Mamouni Rania et Zemmite Seddik, "Etude et réalisation d'un chargeur solaire par Arduino", université Kasdi Mmerbah Ouargla, 24/06/2018.

[28] LM2596 datasheet.

[29] AMS1117 datasheet.

[30] C. Fréou et A. Grimault, "Découvert des cartes Arduino", documents de présentation des cartes Arduino, 2016

[31] Lady Ada , « DHT11, DHT22 and AM2302 Sensors », adafruit learning system mise à jour du 2019-01-12.

[32] Alexandre Boyer, « Guide de démarrage de logiciel Altium Designer », Travaux Pratiques Compatibilité Électromagnétique (TP CEM), Institut national des sciences appliquées Toulouse France, Décembre 2011

## **Sites internet :**

[33] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Panneau\\_solaire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Panneau_solaire)

[34] <https://www.mdpi.com/2079-9292/7/12/355>

[35] <https://www.solaris-store.com/190-panneau-solaire-back-contact-jiawei-jw-s-70w.html>

[36] [https://www.researchgate.net/figure/Constitution-de-la-carte-Arduino-Mega-2560\\_fig1\\_326398814](https://www.researchgate.net/figure/Constitution-de-la-carte-Arduino-Mega-2560_fig1_326398814)

[37] <http://www.hwsensor.com/MQ2>. TECHNICAL DATA MQ-2 GAS SENSOR,

[38] <http://www.vishay.com>. TEMT6000X01, Vishay Semiconductors,

[39] <http://www.tunisia-stor.com/219-capteur-d-humidite-du-sol.html>

[40] <https://www.supinfo.com/articles/single/1622-module-xbee-avec-arduino>

[41] <https://www.aranacorp.com/fr/gerez-un-ecran-lcd-16x2-avec-arduino/>

[42] <https://www.pinterest.fr/pin/331647960054617084/> Arduino - Display LCD 1602 / 2004 via I2C

[43] <http://www.elektronique.fr/logiciels/altium-designer.php/>

[44] <https://www.instructables.com/ARDUINO-SOLAR-CHARGE-CONTROLLER-Version-30/>

# Annexe

---

## Annexe A: Caractéristiques des composants utilisés

### ❖ ACS712

- Chemin du signal analogique à faible bruit.
- La bande passante de l'appareil est définie via la nouvelle broche FILTER.
- Temps de montée en sortie de 5  $\mu$ s en réponse au courant d'entrée échelonnée.
- Bande passante de 50 kHz.
- Erreur de sortie totale 1,5% à TA = 25 ° C et 4% de -40 ° C à 85 ° C.
- Boîtier SOIC8 à faible encombrement et profil bas.
- Résistance interne du conducteur 1,2m $\Omega$ .
- Tension d'isolement minimale de 2,1kV RMS des broches 1-4 aux broches 5-8.
- 5,0 V, fonctionnement à alimentation unique.
- Sensibilité de sortie de 66 à 185 mV / A.
- Tension de sortie proportionnelle aux courants AC ou DC.
- Réglé en usine pour plus de précision.
- Tension de décalage de sortie extrêmement stable.
- Hystérésis magnétique presque nulle.
- Sortie ratio métrique de la tension d'alimentation.

### ❖ IR2104

- V<sub>OFFSET</sub> 600V max.
- I<sub>O</sub>+/- 130 mA / 270 mA
- V<sub>OUT</sub> 10 - 20V
- Deadtime (typ.) 520 ns

### ❖ LM2596S

- Efficacité de Conversion: jusqu'à 92%
- Fréquence de commutation: 150KHz
- Redresseur: Rectification Non synchrone
- Propriétés du Module: module abaisseur Non isolé (BUCK)
- Protection contre les courts-circuits: limitation du courant, depuis la récupération
- Température de fonctionnement: qualité industrielle (-40 à + 85 °C) (puissance de sortie 10W ou moins)
- Élévation de température à pleine charge: 40 °C
- Régulation de charge:  $\pm$  0.5%
- Régulation de tension:  $\pm$  2.5%
- Spécification: Tension d'entrée: 3-35V
- Tension de sortie: 1.23-30V (réglable)
- Courant de sortie: le courant nominal est 2A, maximum 3A (un dissipateur thermique supplémentaire est requis)

## ❖ AMS1117

- Faible chute de tension
- Régulation de charge: 0,2% typic al
- Optimisé pour la basse tension
- Limitation thermique sur puce
- Paquets SOT-89 standard

## ❖ DHT22

- Alimentation: 3,3 à 6 Vcc
- Consommation maxi: 1,5 mA
- Consommation au repos: 50  $\mu$ A
- Plage de mesure:
  - température: -40 à +80 °C
  - humidité: 0 à 100 % RH
- Précision:
  - température:  $\pm 0,5$  °C
  - humidité:  $\pm 2$  % RH
- Dimensions: 25 x 15 x 9 mm

## ❖ MQ2

- Alimentation: 4,5 V à 5 V CC
- Haute sensibilité au propane, à la fumée, au GPL et au butane
- Large gamme de haute sensibilité aux gaz combustibles
- Longue durée de vie et faible coût
- Sortie analogique et numérique disponible
- Indicateur visuel (LED) embarqué pour l'indication alarme
- Conception compacte et facilement montrable
- Interface d'en-tête simple à 4 broches
- Le circuit d'entraînement est simple.
- Type de capteur: Semi-conducteur
- Concentration: 300-10000ppm (gaz combustible)
- Tension d'alimentation: 5v.

## ❖ TEMT6000

- Type d'emballage: montage en surface
- Formulaire d'emballage: 1206
- Dimensions (L x l x H en mm): 4 x 2 x 1,05
- Qualifié AEC-Q101
- Haute sensibilité photo
- Adapté à la réactivité de l'œil humain
- Angle de demi-sensibilité:  $\pm 60$  °
- Durée de vie au sol: 168 h, MSL 3

### ❖ YL-69

- Surveillance d'évaluation du sol
- Utile pour rappeler de mettre de l'eau dans les plantes d'intérieur
- Alimentation électrique: de 3,3 à 5V
- Courant: 35 mA

### ❖ XBEE

- TX Peak Current: 45 mA (3.3 V)
- RX Current: 50 mA (3.3 V)
- Power-down Current: < 10  $\mu$ A

### ❖ LCD 16X2

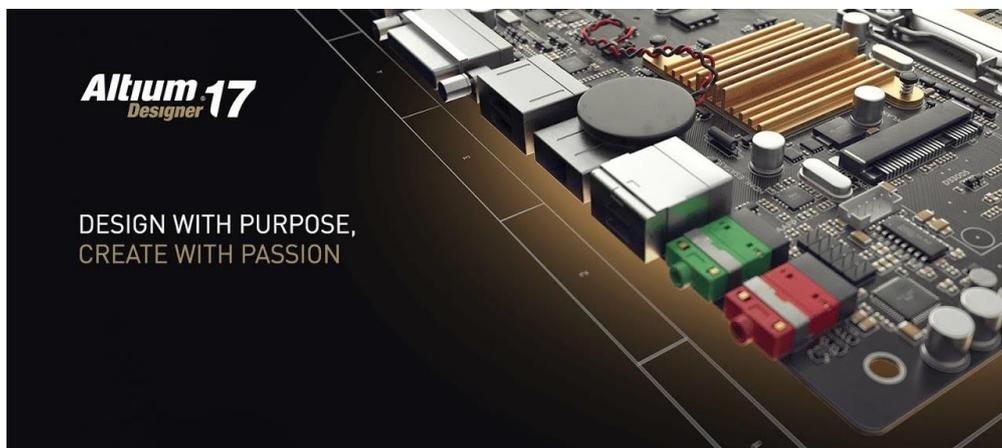
- 5 x 8 dots with cursor
- Built-in controller (KS 0066 or Equivalent)
- + 5V power supply (Also available for + 3V)
- 1/16 duty cycle
- B/L to be driven by pin 1, pin 2 or pin 15, pin 16 or A.K (LED)
- N.V. optional for + 3V power supply

### ❖ PCF8574

- Tension d'alimentation (Min) 2,5V
- Tension d'alimentation (Max) 6V
- Faible consommation de courant de veille de 10 $\mu$ A max.
- Extension I2C vers port parallèle.
- Sortie d'interruption de vidange ouverte.
- Compatible avec la plupart des microcontrôleurs.
- Sorties verrouillées avec capacité d'entraînement à courant élevé pour piloter directement les LED.

## Annexe B: logiciels utilisés

### ❖ Altium Designer pour la simulation



❖ **Arduino pour la programmation**

