



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



Université des Frères Mentouri de Constantine
Faculté des Sciences de la Technologie
Département d'Électrotechnique

N° de série :

N° d'ordre :

Thèse

Pour l'Obtention du diplôme de
DOCTORAT en Sciences

==== Option : Commande ====

Présentée par :

Mohamed Redha REZOUG

Thème

***Etude et Réalisation d'un Système
d'Orientation et de Conversion Destiné à
Optimiser le Rendement d'un Système
Photovoltaïque***

Soutenue le, 20/06/2018

Devant le Jury :

Président:	BOUZID Aissa	Professeur	Université Frères Mentouri Constantine 1
Rapporteur:	CHENNI Rachid	Professeur	Université Frères Mentouri Constantine 1
Examineur:	HEMSAS Kamel Eddine	Professeur	Université Ferhat Abbes de Sétif 1
Examineur:	MORDJAOUI Mourad	Professeur	Université 20 août 1955 de Skikda

*Je dédis ce travail à mes parents, la
cause de mes succès en signe de
reconnaissance pour leur amour et leur
affection, qu'ils n'ont jamais cessé de
me donner et prie Dieu le tout puissant
de leur donner longue vie.*

*A mes sœurs, mes frères, mes neveux,
mes collègues, mes amis et à toutes les
personnes que je chérie.*

Remerciements

Mes remerciements vont premièrement à **Dieu** tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il m'a données durant toutes ces années d'étude.

Je tiens à remercier vivement mon directeur de thèse le **Professeur CHENNI Rachid**, Vice Doyen chargé de la post-graduation, la recherche scientifique et des relations extérieures - Faculté des sciences de la technologie de l'Université Mentouri-Constantine 1, en lui exprimant mes vifs remerciements pour l'aide constante durant l'élaboration de ce travail.

Je remercie vivement le **Professeur BOUZID Aissa** Doyen de Faculté - Sciences de la technologie de l'Université Mentouri-Constantine 1, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de soutenance de la thèse.

Mes remerciements et ma gratitude s'étendent également aux membres du jury examinateurs qui m'ont honoré de leur participation : **Professeur HEMSAS Kamel Eddine**, Enseignant Chercheur, Chef de département adjoint, chargé de la post-graduation et de la recherche scientifique Université Ferhat Abbas Setif 1 et **Professeur MORDJAOUI Mourad** Vice Recteur. Université 20 août 1955 de Skikda.

Je tiens également à remercier tous ceux qui de près ou de loin ont participé à l'élaboration de ce travail.

Sommaire

Sommaire

Sommaire

Introduction générale

1	Généralités	1
2	Position du problème	2
3	Objectif de la thèse	2
4	Présentation de la thèse	3

Chapitre I

Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

I.1	Introduction	5
I.2	Les énergies renouvelables sont-elles réellement une solution durable et respectueuse de l'environnement pour remplacer les énergies fossiles ?	6
I.3	Aller vers plus de bon sens	6
I.4	Histoire de l'effet photovoltaïque	7
I.5	Convertisseur photovoltaïque	7
I.5.1	Effet photovoltaïque	8
I.5.2	Les semi-conducteurs	8
I.6	La constitution d'un module photovoltaïque	9
I.6.1	Bronchement en série	10
I.6.2	Bronchement en parallèle	11
I.7	Modules photovoltaïques	13
I.8	Réaction d'une photopile éclairée	14
I.9	Zones de fonctionnement du module photovoltaïque	15
I.10	Paramètres photovoltaïques	16
I.10.1	Courant de court-circuit	17
I.10.2	Tension de circuit ouvert	17
I.10.3	Facteur de forme (FF)	19
I.10.4	Le rendement, η	19
I.11	Protection classique d'un GPV	20
I.12	Fonctionnement à puissance maximale	21
I.13	Puissance électrique d'une cellule PV	23
I.13.1	Puissance maximale	23
I.13.2	Concept de la puissance crête (P_c) et de la température d'utilisation (TUC)	23
I.14	Influence de la température et de l'éclairement	24
I.15	Test des modules	26
I.16	Systèmes photovoltaïques	26
I.17	Avantages et inconvénients	27
I.18	Conclusion	28

Chapitre II

Concept de la modélisation de la trajectoire du soleil par les équations de temps

II.1	Introduction	29
II.2	Durée optimale d'activité d'un module photovoltaïque	29

Sommaire

II.3	Notions Astronomiques	29
II.3.1	La latitude	30
II.3.2	La longitude	30
II.3.3	Angle de déclinaison	31
II.4	Trajectoire du soleil	33
II.5	Modélisation de la trajectoire du soleil	34
II.5.1	Temps solaire local (LST) et heure locale	34
II.5.2	Meridian de temps standard local	34
II.5.3	Equation du temps	34
II.5.3.1	Angle horaire solaire	36
II.5.3.2	Angle d'élévation	36
II.5.3.3	Angle de zénith	38
II.5.3.4	Angle d'azimut	38
II.5.4	Lever et coucher du soleil	39
II.6	Algorithme et démarche de calcul	40
II.6.1	Localisation du lieu	41
II.6.2	Calcul probabiliste	41
II.7	Environnement de programmation	44
II.7.1	Pourquoi l'environnement LabVIEW ?	44
II.7.2	Démarche logarithmique sous LabVIEW	46
II.8	Résultats et interprétation	48
II.9	Synthèse globale	56
II.9.1	Sans correction	57
II.9.2	Système fixe avec une correction angulaire optimale sur un seul axe	58
II.9.3	Système fixe avec une correction angulaire optimale sur deux axes	59
II.9.4	Système de poursuite avec une correction angulaire sur l'axe vertical	60
II.9.5	Système de poursuite avec une correction angulaire sur l'axe d'inclinaison	60
II.9.6	Influence de la variation des angles d'inclinaison sur deux axes (vertical et incliné)	61
II.9.7	Effet d'un système de poursuite à deux axes sur la production énergétique	62
II.9.8	Estimation de la production énergétique et l'irradiation globale de notre approche	63
II.10	Conclusion	64

Chapitre III

Nouvelle méthodologie d'un traqueur actif à boucle ouverte

III.1	Introduction	65
III.2	Concept générale du traqueur solaire	65
III.3	Enoncé du problème et objectifs	66
III.4	Bases d'un traqueur solaire	66
III.5	Divers types de montage du traqueur	67
III.5.1	Traqueurs polaires	67
III.5.2	Traqueurs à axe horizontal	68
III.5.3	Traqueurs à deux axes	69
III.5.4	Présentation générale des types de suivis des pilotes actuels	70
III.5.5	Traqueurs passifs (traqueurs par gaz)	70
III.5.6	Traqueurs actifs	70

Sommaire

III.5.7	Traqueurs à boucle ouverte	71
III.6	Caractérisation et critères de choix d'un traqueur	71
III.7	Principe de poursuite par un traqueur à boucle ouverte	73
III.7.1	Structure générale de la conception	73
III.7.2	Méthodologie de correction	74
III.7.2.1	Configuration angulaire	74
a-	L'inclinaison β du panneau:	74
b-	Angle azimutal Ω du panneau	76
III.7.2.2	Configuration mécanique	76
a-	Calcul du moteur 1 autour de l'angle Ω	77
b-	Calcul du moteur 2 autour de l'angle β	79
III.7.2.3	Configuration électrique	80
III.7.2.4	Configuration informatisée	83
III.8	Test expérimental et interprétation	89
III.9	Conclusion	96

Chapitre IV

Poursuite solaire à deux axes par l'approche hybride

IV.1	Introduction	97
IV.2	Gains attendus	97
IV.3	Types de traqueurs par quantités de panneaux	97
IV.4	Mécanisme du traqueur	98
IV.5	Description du système de poursuite	99
IV.5.1	Partie opérative	100
IV.5.2	Partie contrôle	101
IV.6	Structure générale du dispositif	102
IV.6.1	Système embarqué Arduino Mega	103
IV.6.2	Chaînes de mesures et acquisition des données	104
IV.6.2.1	Chaîne de mesure de la tension	104
IV.6.2.2	Chaîne de mesure du courant	105
IV.6.2.3	Chaîne de mesure de la température	105
IV.6.3	Chaîne de communication	105
IV.6.4	Chaîne de localisation	106
IV.6.4.1	Repositionnement par GY271	106
IV.6.4.2	Automatisation par le capteur magnétométrique HMC5883	107
IV.6.5	Carte de puissance	112
IV.6.6	Liaisons de configuration	113
IV.6.6.1	Configuration par GPS	114
IV.6.6.2	Configuration par Smartphone	116
IV.6.6.2.1	Collaboration Android / Arduino	116
IV.6.6.2.2	Définition	116
IV.6.6.2.3	Programme App Inventor	116
IV.6.6.3	Configuration manuelle	123
IV.7	Organigramme schéma général de la carte réalisée	126
IV.8	Essai expérimental	129
IV.9	Conclusion	133

Sommaire

Chapitre V

Applications d'optimisation par MPPT

V.1	Introduction	134
V.2	Chaîne photovoltaïque et la commande MPPT	134
V.3	Classification des commandes MPPT	135
V.3.1	Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée du convertisseur statique (CS)	135
V.3.2	Classification des commandes MPPT selon les paramètres de sortie du convertisseur statique (CS)	136
V.4	Approche d'optimisation sur une Chaîne photovoltaïque par la technique MPPT	136
V.4.1	Description de la commande MPPT réalisée	138
V.4.2	Déroulement de la technique réalisée	139
V.4.3	L'étage d'adaptation back	140
V.4.4	Démarche de l'algorithme	140
V.4.5	Tests et mesures expérimentaux	141
V.5	Optimisation modifiée sur une application de pompage photovoltaïque	144
V.5.1	Généralité sur le pompage photovoltaïque	144
V.5.2	Application d'une MPPT modifiée basée sur la logique floue	144
V.5.3	L'algorithme conventionnel de Perturbation et observation modifié (MP&O)	145
V.5.4	Contrôle de logique floue (FLC) et la tension ΔV_{ref}	146
V.5.5	Description du système d'entraînement de moteur synchrone à aimant permanent solaire (PMSM)	148
V.5.6	La commande SVPWM	149
V.5.7	Résultats de la simulation	153
V.6	Conclusion	157

Conclusion générale

1	Généralités	159
2	Perspectives	160
3	Articles réalisées (voir annexe [k])	160

Annexe

Annexe A	161
Annexe B	163
Annexe C	165
Annexe D	166
Annexe E	167
Annexe F	168
Annexe G	169
Annexe H	170
Annexe I	172
Annexe J	173
Annexe K	176
Environnements et programmes	178
Références	180

Nomenclature

Abréviation

EVA	Ethylène-Vinyl-Acétate
P&O	Perturber & Observe
STC	Standard Test Conditions
FOC	Full Operational Capability
ISO 19115	Geographic information - Metadata
ISO	International Organization for Standardization
LST	Local Standard Time
LT	Local Time
LSTM	Local Standard Time Meridian
HRA	Solar hour angle, SHA (Sidereal Hour Angle)
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (graphical programming computer language for real-time instrumentation)
GPS	Global Positioning Satellite System
WGS	World Geodetic System
RTC	Real-Time Clock
TC	Time Correction
VI	Virtual Instrument
G	Un langage de programmation graphique
C	Un langage de programmation impératif
C++	Un langage de programmation compilé
Ada	Un langage de programmation orienté objet
JAVA	Un langage de programmation de scripts
Fortran	(FORMula TRANslator) est un langage de programmation utilisé principalement pour le calcul scientifique
NI	National Instruments
GPIB	General Purpose Interface Bus
IBM	International Business Machines Corporation
PC	Personal Computer
LIFA	LabVIEW Interface for Arduino
HEX	Hexadecimal
VISA	Virtual Instrument Software Architecture
USB	Universal Serial Bus
API	Application Programming Interface
PV	Photovoltaic
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
IMU	Inertial Measurement Unit
Delphi	Un langage de programmation inspiré du Pascal Objet.
TTL	Transistor-Transistor Logic
RISC	Reduced Instruction Set Computer
MCLR	Master Clear
TB	Terminal Board
RS-485	(souvent appelée EIA-485) est une norme qui définit les caractéristiques électriques de la couche physique d'une interface numérique sérielle
PIC	Programmable Interface Controller
ASM	Assembly
3D	Three Dimensional
IDE	Interactive Development Environment
ISIS	Institute for Software Integrated Systems
GPV	Générateur Photovoltaïque
TSC, CSP	Thermodynamic Solar Concentration
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
TFT	Thin Film Transistor
SDA	Serial Data Line
SCL	Serial Clock Line
DC	Direct Current
TXD	Transmit Data
RXD	Received Data
CAO	Conception Assistée par Ordinateur

OS	Operating System
MIT	Massachusetts Institute of Technology
Mac	Macintosh
QR	Quick Response, est un type de code-barres en deux dimensions (ou code matriciel) constitué de modules noirs disposés dans un carré à fond blanc.
WIFI	Wireless Fidelity (IEEE 802.11b wireless networking)
UTC	Coordinated Universal Time (zulu or Greenwich Mean Time, GMT)
GND	Ground
LCD	Liquid Crystal Display (display technology)
DMS	Degrés, Minutes, Secondes
MPPT	Maximum Power Point Tracking
AC	Alternative Current
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion (PWM: Pulse Width Modulation)
PPM	Point de Puissance Maximum
FLC	Fuzzy Logic Controller
SPMP	suivi du point maximal de puissance
CS	Convertisseur Statique
PN	La jonction
MOSFET	Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor
MP&O	modified perturbation and observation
SVPWM	Space Vector Pulse Width Modulation

Notations & Symboles

Chapitre I

P_{PV}	Puissance en sortie du GPV
V_{PV}	Tension à sortie du GPV
I_{PV}	Courant de sortie du GPV
V_{CO}	Tension du circuit ouvert
N_S	Nombre des cellules en série
N_P	Nombre des cellules en parallèle
I_{CC}	Courant du court circuit
P_{max}	Puissance maximale
V_{OP}	Tension optimale
I_{OP}	Courant optimal
I_{CC}	Courant de court-circuit
R_S	Résistance série
V_{BO}	Tension d'avalanche
R_{sh}	Résistance shunt
I_{max}	Courant maximale
K	Constante de Boltzmann estimé de $1,38.10^{-23}J/K$
T_C	Température absolue
q	Charge d'électron estimé de $1,602.10^{-23} C$
I_{ph}	Courant photonique
I_S	Courant de saturation
η	Le rendement
P_{in}	Puissance du flux lumineux incident
FF	Facteur de forme
$P_{max\ idéal}$	Puissance maximale mesurée aux bornes de la cellule PV idéale
E_m	L'irradiation
α	coefficient d'absorption du module
τ	coefficient vitrage

Chapitre II

θ	La longitude :
δ	Déclinaison
D	Nombre de jours
H	L'angle horaire
ϕ	La latitude

Nomenclature

ζ	Angle de zénith
γ	Angle d'azimut
Ed	Production d'électricité journalière
Em	Production d'électricité mensuelle
Hd	Moyenne journalière de la somme de l'irradiation globale
Hm	Somme moyenne de l'irradiation globale

Chapitre III

M1	Moteur 1
M2	Moteur 2
α	Angle d'azimut
β	Inclinaison « angle mécanique »
Ω	Azimutal « angle mécanique »
Z	Déplacement de l'axe du vérin
n	Le rang du jour
a	L'année
m	Le mois
d	Le jour

Chapitre IV

long	Longitude
Lat	Latitude
α et β	Les angles mécaniques de correction
V et I	La tension et le courant du module utilisé
M	Indice d'une matrice ou sur la matrice

Chapitre V

D	Rapport cyclique
R	Résistance d'enroulement
Ω_{ref}	Vitesse de référence
V_{ref}	Tension de référence
T	période de modulation

Introduction générale

1. Généralités

Les énergies renouvelables sont des sources d'alimentation électrique à fort potentiel mais aussi sous-exploitées dans des régions qui englobent de bonnes conditions pour l'emploi de ces méthodes de production énergétique. L'Algérie, par exemple est riche en termes d'énergies fossiles mais possède aussi un grand potentiel en termes d'énergies renouvelables comme les énergies solaires, éoliennes, hydrauliques, biomasses et géothermiques etc.

Notre pays peut être considéré comme une région à fort potentiel énergétique renouvelable par rapport aux autres pays Méditerranéens et Africains. Il possède aussi les conditions appropriées pour exploiter ce potentiel. L'Algérie pourrait exploiter beaucoup de types d'énergie renouvelable mais l'énergie solaire reste celle qui possède les plus grandes espérances de réalisation et de développement pour son fort rendement et sa disponibilité dans la région. L'Algérie est ainsi connue comme l'une des zones les plus importantes en termes d'énergie solaire. Elle court généralement une durée d'ensoleillement de deux milles à trois milles et neuf cents heures par an et possède une irradiation quotidienne de 3000 à 6000Wh/M² ce qui est l'équivalent de dix fois la consommation énergétique mondiale.

Un plan à long terme a été lancé en 2011 par le gouvernement visant à atteindre une production de 22000MW d'énergie renouvelable destinée à la commercialisation intérieure; ce qui pourrait permettre de remplacer la production des énergies fossiles. La date de mise au point du projet à été prévue pour 2030 avec une production de 12000MW toujours destinée à la commercialisation intérieure englobant 2000MW en énergie éolienne, 2800MW en énergie photovoltaïque et 7200MW en énergie thermo solaire. Malheureusement, on n'a atteint qu'une capacité énergétique photovoltaïque de 354MW six ans après le lancement du projet. D'autres projets de production de panneaux PV prometteurs sont en exécution en Algérie [1].

Malgré cela, on doit toujours rester positif et travailler sur le développement de cette technologie pour compenser les manques énergétiques et améliorer l'état économique du pays.

Les axes de recherche sont divers, les idées de développement sont nombreuses mais le but reste toujours l'optimisation car le rendement photovoltaïque souffre de plusieurs influences négatives internes et externes. C'est pour cela qu'on doit viser à sélectionner un secteur où les pertes sont élevées.

En outre, la présence quantitative de cette énergie est fortement liée à la position du soleil pendant l'année et pendant la même journée aussi. Cela est lié à l'abondance du rayonnement solaire reçue par le générateur photovoltaïque.

Pour essayer à résoudre cette issue, nous avons intervenu avec un nouveau concept. Dans cette thèse, nous visons à réaliser un système de poursuite à deux axes mécaniquement souple et robuste avec deux articulations indépendantes dans leur commande et liées par des équations astronomiques. En collaborant deux techniques fréquemment utilisées, on profite des avantages et éliminer ainsi les inconvénients ou minimiser leurs effets sur la performance des modules.

La plateforme de cette technique hybride est initialement numérique. Elle est responsable de l'exécution d'un algorithme de poursuite embarqué dans une carte Arduino, où la pré-programmation de la trajectoire est le premier pas de correction et l'intervention des capteurs sensoriels est le deuxième pas de correction. Ces corrections sont calculées pour garder la surface active du panneau perpendiculaire aux rayons solaires à la moindre fluctuation angulaire dû au déplacement du soleil.

2. Position du problème

L'énergie solaire est généralement utilisée pour alimenter les zones isolées ou désertes. Malgré la durabilité et la caractéristique écologique de l'énergie solaire, son application présente toujours l'inconvénient du faible rendement obtenu après de grandes dépenses (moins de 20% dans les meilleures conditions de fonctionnement). C'est pour cela que des systèmes d'optimisation énergétiques ont été créés. Les traqueurs, les techniques de poursuites, la conception interne des cellules photovoltaïques ainsi que d'autres sujets explorant le concept photovoltaïque présentent des axes de recherches visant à optimiser le rendement d'un panneau PV pour rendre l'énergie solaire un moyen plus bénéfique peu coûteux car les énergie fossiles sont polluantes et non-renouvelables donc l'énergie solaire reste tout de même une source qu'on doit exploiter pour différentes applications énergétiques quotidiennes tel que : l'éclairage publique, le pompage, le chargement de batteries, etc. Pour achever cela, nous devons minimiser les matériaux utilisés en employant des techniques de correction et d'optimisation informatisées qui seront moins coûteuses et encombrantes qu'une grande installation. Le rendement quantitatif de la méthode production photovoltaïque est essentiellement lié à la position du soleil durant la journée et la variation de sa trajectoire tout au long de l'année. Cela est dû à l'abondance de l'irradiation reçu par le générateur photovoltaïque. On doit donc se concentrer sur la poursuite du soleil.

3. Objectif de la thèse

Dans cette thèse, plusieurs objectifs ont été visés :

Le premier est de regrouper d'après les littératures une quantité suffisante d'informations et donner un encadrement général sur les énergies renouvelables et précisément l'énergie solaire :

conception interne, méthode de fonctionnement, influences énergétiques sur le rendement des panneaux photovoltaïques.

Le deuxième consiste à donner des détails suffisants pour pouvoir effectuer une modélisation de la trajectoire du soleil pour n'importe quel langage de programmation afin de simplifier aux lecteurs la méthodologie de calcul en utilisant les équations de temps. On vise aussi à distinguer les différents angles astronomiques par leurs définitions.

Le troisième vise à distinguer les différents traqueurs par leurs définitions et la compatibilité de chacun avec un endroit selon son intérêt et ses fonctionnalités.

Le quatrième a comme objectif de donner des nouvelles méthodologies qui améliorent les techniques populaires

Le cinquième donne une nouvelle approche et apparence pour une nouvelle technique qui est l'hybridation de deux méthodes.

Le sixième est d'utiliser d'une nouvelle gamme des composants de haute technologie afin de s'adapter à l'évolution des composants de haute gamme.

Le septième est de projeter la lumière sur l'importance de l'utilisation des systèmes embarqués tel que l'Arduino et son intérêt dans le domaine photovoltaïque.

Le huitième est d'implémenter une optimisation sur les applications les plus fréquemment utilisées comme le pompage photovoltaïque et les chargeurs solaires

Le neuvième est de familiariser avec les langages machines et toucher le maximum possible de logiciels pour faciliter leur utilisation dans le domaine photovoltaïque.

4. Présentation de la thèse

Pour le développement de ce projet, nous avons réparti le travail sur cinq chapitres.

Le chapitre I donne globalement un aperçu général des résultats statistiques de la contribution des énergies renouvelables dans la production énergétique et leurs avantages sur l'économie et l'environnement. Il discute aussi spécialement l'effet photovoltaïque et son développement en introduisant aussi les composants d'un module photovoltaïque et son branchage. On explore aussi dans ce chapitre, l'activité de ces modules en fonction des paramètres internes et externes influents sur les photopiles. On a fini ce chapitre par l'énumération des avantages et des inconvénients sur lesquels on s'est basé pour travailler sur le domaine.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la trajectoire du soleil en se basant sur la formulation des équations de temps. On a donc étudié quelques notions astronomiques employées dans le calculs d'optimisation de la durée d'ensoleillement. On a appliqué cette stratégie sur quelques centrales nationales afin de généraliser nos calculs et expérimenter leur effet sur le rendement du panneau. On a démontré l'intérêt de la technique préprogrammée et le calcul des angles d'élévation et d'azimut sur le rendement d'une installation photovoltaïque peu importe le lieu ou le temps.

Le troisième chapitre est dédié à la réalisation pratique d'un système de poursuite par la technique préprogrammée et un nouvel aspect de localisation cartographique à l'aide d'un environnement de développement Delphi 7, où on a effectué une collaboration entre un microcontrôleur et une application d'interface qui montre l'intérêt d'un système de poursuite par rapport à un système fixe.

Le quatrième chapitre est destiné à hybrider deux techniques populaires tel que : la technique de pré-programmation, la technique sensorielle. Cette réalisation pratique a éclairci l'utilisation des nouveaux composants et technologies de haute gamme (l'IMUs, GPS, les systèmes Android) qui ont comme rôle : de maintenir la précision de la correction angulaire et la géo-localisation en employant une commande par des systèmes embarqués tel que les cartes Arduino. On termine le chapitre en démontrant l'importance de cette technique hybride par des résultats expérimentaux.

Le cinquième chapitre recouvre une autre forme d'optimisation sur deux applications photovoltaïques populaires qui sont le pompage et le chargement photovoltaïque. On démontre qu'il existe beaucoup d'autres formes non-physiques telles que la poursuite. Par ces deux concepts, on projette les lumières sur un terme technique qui est «MPPT» traqueur de point de puissance maximale.

Chapitre I

Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction

La capacité de la production d'énergie renouvelable a connu sa plus forte augmentation annuelle en 2016 avec une capacité estimée de 161 gigawatts [2]. La capacité totale d'énergie renouvelable mondiale a augmenté de près de 9% par rapport à 2015 pour atteindre 2017 gigawatts à la fin de l'année [3]. Les panneaux photovoltaïques ont connu des records supplémentaires et pour la première fois ont donné plus de capacité de puissance additionnelle « nette de la capacité déclassée » que toute autre technologie de production [4]. Le panneau solaire représentait environ 47% de la capacité d'énergie renouvelable nouvellement installée en 2016 et l'énergie éolienne et l'hydroélectricité représentaient la plus grande partie du reste contribuant à environ 34% et 15,5%, respectivement [5]. Le monde ajoute désormais annuellement une capacité de production d'énergie renouvelable plutôt que d'ajouter de la capacité (nette) à l'ensemble des combustibles fossiles [6]. En 2016, les énergies renouvelables représentaient près de 62% des ajouts nets à la capacité mondiale de production d'électricité et représentaient des parts beaucoup plus importantes de la capacité ajoutée dans plusieurs pays du monde [6]. A la fin de l'année, les sources d'énergie renouvelables représentaient environ 30% de la capacité mondiale de production d'électricité, soit une quantité suffisante pour alimenter 24,5% de l'électricité mondiale ; l'hydroélectricité représentant environ 16,6% [7] (Voir la figure I.1).

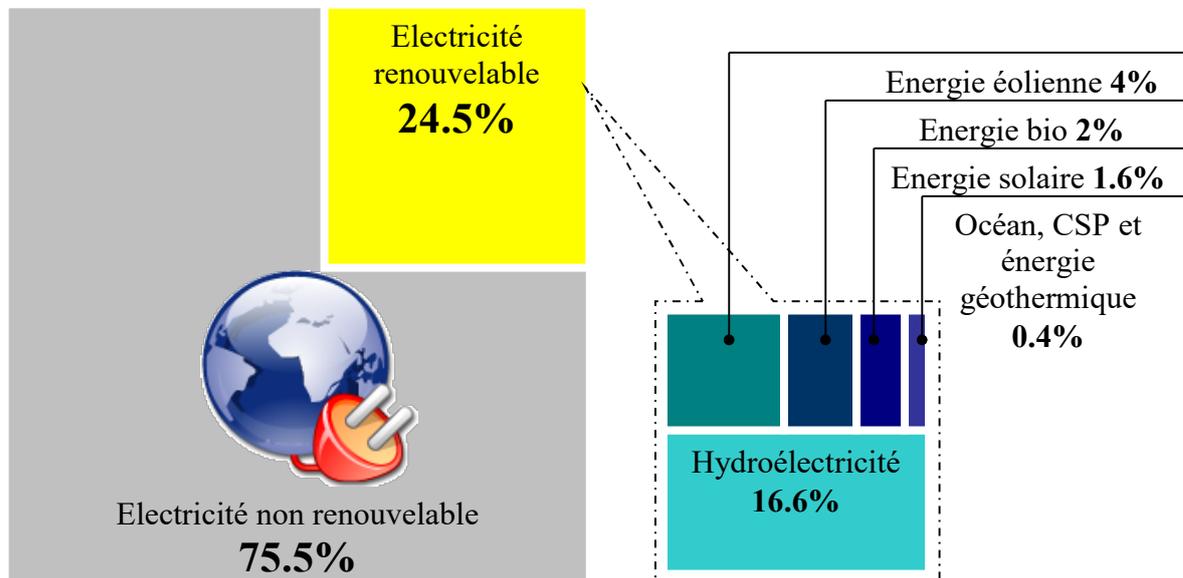


Figure I.1 Contribution des énergies renouvelables estimées dans la production globale de l'électricité, à la fin de 2016

L'énergie solaire est la ressource primordiale la mieux distribuée dans notre planète. Les générateurs photovoltaïques permettent d'exploiter cette ressource. Elle est incontestablement une solution technique et économique pour l'électrification en sites isolés, tant dans les pays en voie de

développement que dans les pays industrialisés. Jusqu'à 1976, les convertisseurs solaires photovoltaïques sont restés limités à la gamme de 1 kW; depuis, des générateurs de plus grandes puissances ont été mis en place, la taille de 100kW a été atteinte en 1980. La raison de ce succès est simple : les générateurs photovoltaïques sont les seuls générateurs électriques sur le marché qui, contrairement aux autres générateurs diesel, piles chimiques, etc. peuvent se suffire à eux mêmes et ne demandent ni entretien ni remplacement s'ils sont bien fabriqués.

Les pays du tiers Monde et particulièrement les zones rurales de certains pays qui rencontrent des problèmes tels que l'impossibilité de pratiquer des réparations et le manque de combustible et de pièces de rechange, verront dans le procédé photovoltaïque une possibilité de développement, mais ils ne peuvent s'engager à cause des coûts très importants qu'il faut investir [8].

Cependant les énergies renouvelables ne sont pas actuellement exploitées, c'est dans ce contexte que se justifie notre travail qui consiste à exploiter de façon optimale les panneaux photovoltaïques dont on dispose [9].

I.2 Les énergies renouvelables sont-elles réellement une solution durable et respectueuse de l'environnement pour remplacer les énergies fossiles ?

Même si les systèmes d'exploitation actuelles ne sont pas complètement inoffensifs à l'environnement, ils s'améliorent jours après jour grâce à l'optimisation du rendement et la minimisation des matériaux demandés surtout après l'apparition des différentes énergies renouvelables qui sont évidemment la solution tant attendue au problème de la pollution et le danger de la disparition des sources d'énergie fossiles au future [10]. Pour pouvoir finalement remplacer les énergies fossiles, il faudrait travailler sur le fusionnement et le développement des techniques de production d'énergies renouvelables. Une technique éolienne peut compenser le temps perdu dans une technique photovoltaïque.

L'association Négawatt affirme que même en remplaçant toutes les énergies fissiles et fossiles par les énergies renouvelables, on ne pourrait pas assurer l'équilibre entre les besoins énergétiques de l'humain et les précautions environnementales. Le transfert énergétique devrait aussi céder à des conditions économiques et des améliorations en termes d'efficacité de rendement en respectant la trilogie : efficacité, sobriété, la caractéristique renouvelable [11].

I.3 Aller vers plus de bon sens

Des auteurs ont proposé des méthodes de bon sens afin de participer individuellement à une évolution plus durable. En s'en passant de toute croyance, ces derniers se concentrent sur l'efficacité et la sobriété pour arrêter de consommer ce qui est produit et plutôt produire ce qui est

consommé. Le mythe du bon marché de l'énergie nucléaire va bientôt s'arrêter lorsque le monde commencera dans le future proche à adapter de nouvelles stratégies économiques pour la production énergétique comme le prévoit le rapport au court de ces dernières années. Pour cela, il faudrait déterminer la méthode de production d'énergie qu'il faudrait choisir pour préserver l'humanité. Le choix est assez difficile puisque remplacer des énergies polluantes mais efficaces avec des énergies renouvelables et protectrices de l'environnement mais ; avec un rendement pas autant satisfaisant que celui des énergies fossiles [12].

I.4 Histoire de l'effet photovoltaïque

De nos jours, l'énergie est un besoin indispensable dans notre vie qui ne cesse de croître. Au fil du temps, l'homme a créé plusieurs moyens de production d'énergie pour arriver à la méthode la plus bénéfique et affronter ses besoins. De nos jours, les combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon...) présentent 80% des sources d'énergies utilisées quotidiennement au monde entier.

Il a été découvert par le physicien français BECQUEREL. A en 1839 qu'on peut convertir la lumière en énergie électrique. Cela est appelé l'effet photovoltaïque. Un siècle après, les chercheurs ont approfondie leurs recherches dans le domaine pour passer à l'exploitation de ce phénomène. C'est dans les années quarante qu'on a commencé à utiliser ce qu'on appelle de nos jours les cellules solaires. Les scientifiques ne se sont pas arrêtés là, mais ils ont amélioré leur taille et leur performance. Le manque d'énergie dans les années soixante-dix a poussé le gouvernement à investir dans la nouvelle découverte [9].

Maintenant, cette technologie est employée à travers le monde entier, on cherche toujours à optimiser le rendement des panneaux solaires en étudiant l'énergie obtenue par plusieurs méthodes d'application. Cependant, l'énergie photovoltaïque fait face à une situation difficile. La vente a ralenti à cause de la grande marge entre le prix des matériaux utilisés pour la fabrication de ces modules et leur rendement. Le but des manufacturiers est donc d'améliorer le rendement et de réduire le coût [12].

I.5 Convertisseur photovoltaïque

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque se repose sur les matériaux semi-conducteurs qui sont connus pour leur absorption de l'énergie lumineuse. Cette énergie est ensuite automatiquement traduite en électricité. Ce principe montre donc que le rendement est directement lié aux caractéristiques des semi-conducteurs et la valeur du rayonnement solaire [12].

I.5.1 Effet photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est composée de deux couches de silicium polarisées d'une façon qu'une couche soit positive et l'autre négative. Cela est effectué respectivement en incorporant un nombre d'atomes « Bore » et d'atomes « Phosphore ». L'effet photovoltaïque est la création d'un trou positif résultant de la perte d'un électron. Cela arrive lorsqu'un photon de bon potentiel énergétique est absorbé par un semi-conducteur, ce qui cause la rupture d'une liaison de valence qui libère un électron. On conclut donc que la définition de l'effet photovoltaïque est la différence entre les deux couches en termes de potentiel. La liaison des deux couches résulte à une circulation des électrons libérés entre les couches ce qu'on appelle le courant électrique.

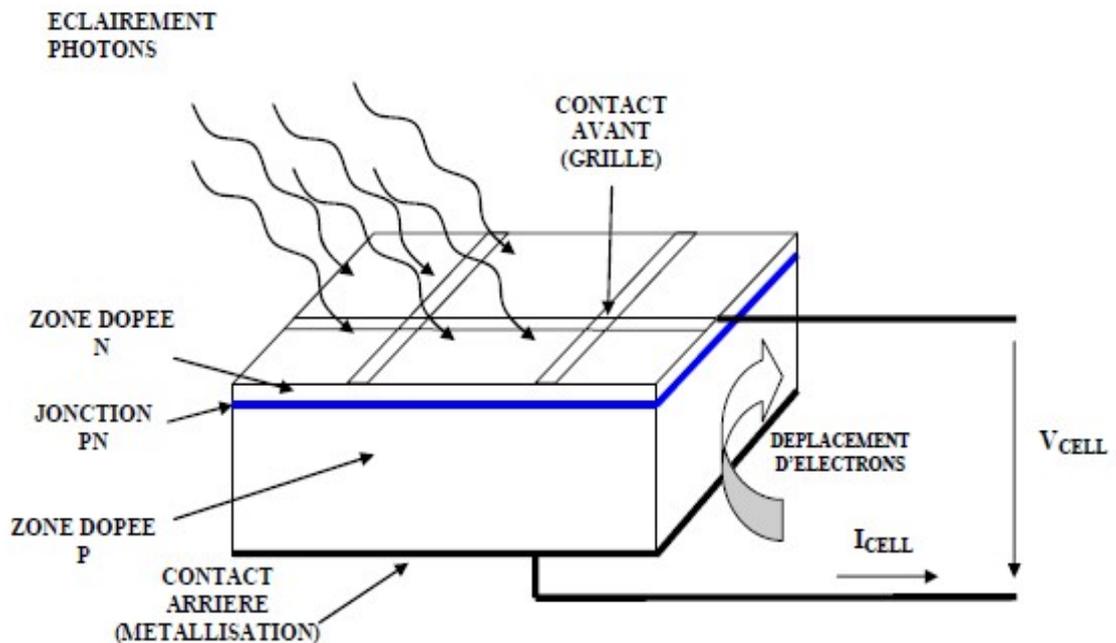


Figure I.2 Vue interne d'une cellule solaire éclairée

I.5.2 Les semi-conducteurs

Un matériau à faible concentration de charges libres est identifié comme un semi-conducteur. Il faudrait une énergie minimale chez l'électron pour atteindre les niveaux supérieurs d'énergie et ainsi quitter l'atome afin de contribuer à la conduction du courant. Un électron lié à son atome est en bande de valence et un électron libre est en bande de conduction. L'énergie initiale mentionnée précédemment est l'énergie du band gap donné en eV (électron-volt). Cette valeur varie de matériau à un autre (1,1eV pour le silicium cristallin, (1-1,8eV) pour les applications photovoltaïques et 1,7eV pour le silicium amorphe) [13].

Un spectre de rayonnement est un inversement proportionnel à la longueur d'onde ou autrement dit la distribution des photons particules de lumière en fonction de leur énergie.

Le rayonnement solaire qui arrive sur la cellule se dérive après en trois parties: une partie réfléchiée, une partie absorbée et une partie qui traverse la cellule complètement.

Comme cité précédemment, un trou électrique est causé par un électron négatif libéré des photons qui possèdent une énergie qui dépasse l'énergie du band gap. Pour séparer une charge électrique « positive et négative » et obtenir un courant électrique, un champ électrique E est introduit dans la cellule.

I.6 La constitution d'un module photovoltaïque

Les cellules dans un module photovoltaïque sont connectées par des rubans métalliques fins (cuivre étamé) du contact en avant (-) au contact en arrière (+). Elles sont en suites encapsulées entre deux films thermoplastiques transparents sous vide (EVA: Éthylène Acétate de Vinyle). Le tout est entouré d'un cadre en aluminium avec des joints périphériques afin de ne pas prévenir la dilatation. Un verre trempé est aussi ajouté en face avant des cellules pour les protéger, cela en assurant que la lumière peut toujours le traverser pour arriver aux cellules. La face arrière quant à elle est protégée par un verre ou une feuille TEDLAR [12, 14].

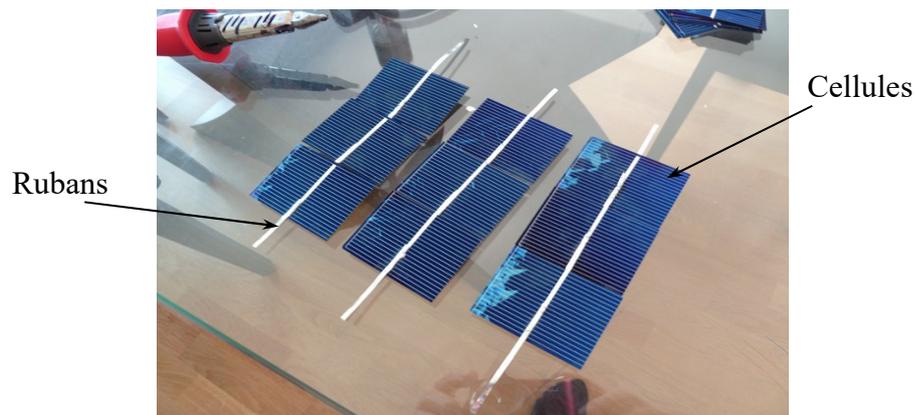


Figure I.3 Rubans métalliques des cellules

Pour la connexion, une boîte de connexion étanche est employée pour regrouper les bornes de raccordement et les diodes by-passe. Les 2 câbles unipolaires sont aussi raccordés.

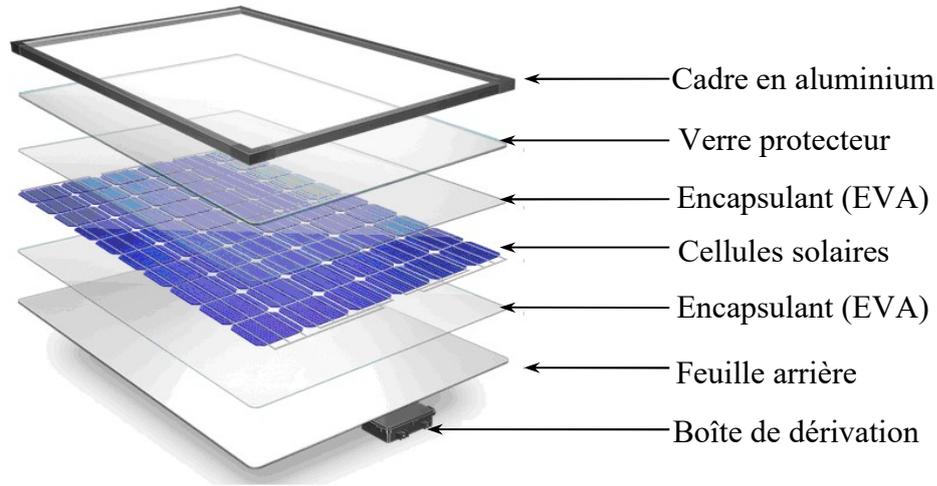


Figure I.4 Encapsulation des cellules

L'association des cellules PV dépend des besoins des applications visées, on pourrait les associer en série pour augmenter la tension et en parallèle pour augmenter l'intensité. Les deux méthodes d'association sont réalisables et remarquables dans plusieurs applications pour atteindre les niveaux de tension et d'intensité souhaités. L'équation suivante présente la puissance de sortie d'un GPV pour N_s cellules en série et N_p en parallèle.

$$P_{PV} = N_s \times V_{PV} \times N_p \times I_{PV} \quad \text{I.1}$$

Où:

P_{PV} : est la puissance en sortie du GPV.

V_{PV} : est la tension à sortie du GPV.

I_{PV} : est le courant de sortie du GPV.

I.6.1 Bronchement en série

On peut associer un nombre de cellules N_s en série afin d'augmenter la tension d'un GPV (générateur photovoltaïque). Le même courant traverse cet ensemble, la caractéristique obtenue par cette association est donc calculée à travers l'addition des tensions élémentaires de chacune des cellules, comme illustré dans la figure I.5. L'équation I.2 traduit le calcul cité précédemment:

$$V_{OC} = N_s \times V_{OC} \quad \text{I.2}$$

Où:

V_{CO} est la tension du circuit ouvert.

Les modules photovoltaïques du commerce utilisent fréquemment cette méthode pour augmenter la tension d'un générateur. Avec l'évolution technologique, le courant produit par une

cellule augmente régulièrement alors que la tension reste dans son état faible initial. La surface d'une cellule est aussi un facteur important.

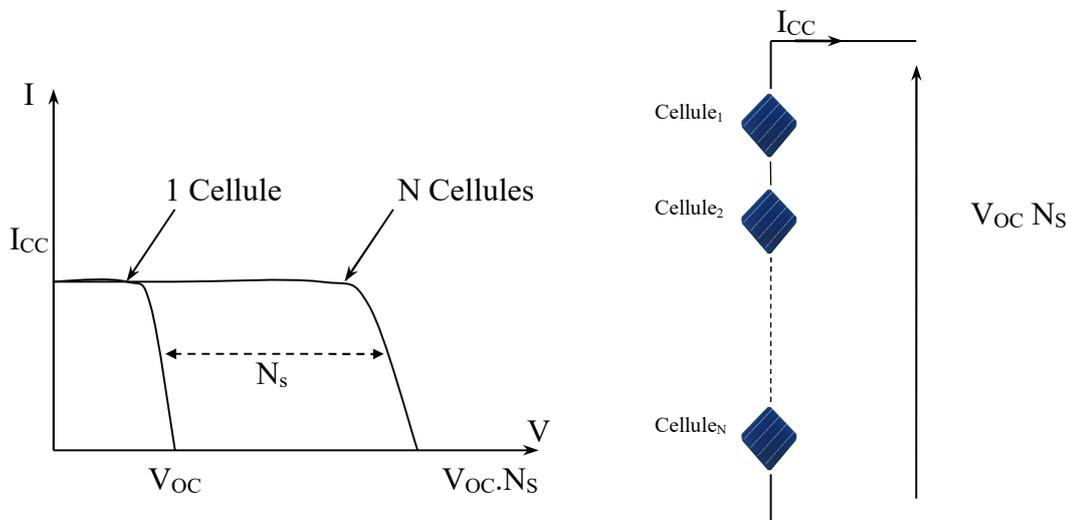


Figure I.5 Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série

En augmentant la tension d'un ensemble, une association série de cellules permet aussi d'accroître la puissance. Les panneaux photovoltaïques commerciaux emploient dans leur construction une association en série de 36 cellules de première génération pour atteindre une tension optimale proche à celle d'une batterie de 12Volts [15].

I.6.2 Bronchement en parallèle

On peut aussi associer des cellules N_p en parallèle pour accroître le courant de sortie du GPV. Puisque les cellules seront montées en parallèle, la tension et la caractéristique résultantes seront impérativement similaires dans toutes les cellules comme expliqué dans la figure I.6. Dans la mise en parallèle, on calcule la caractéristique résultante par l'addition des tensions, tout cela est exprimé dans l'équation I.3.

$$I_{CC} = N_p \times I_{CC} \quad I.3$$

Où:

I_{CC} : est le courant du court circuit

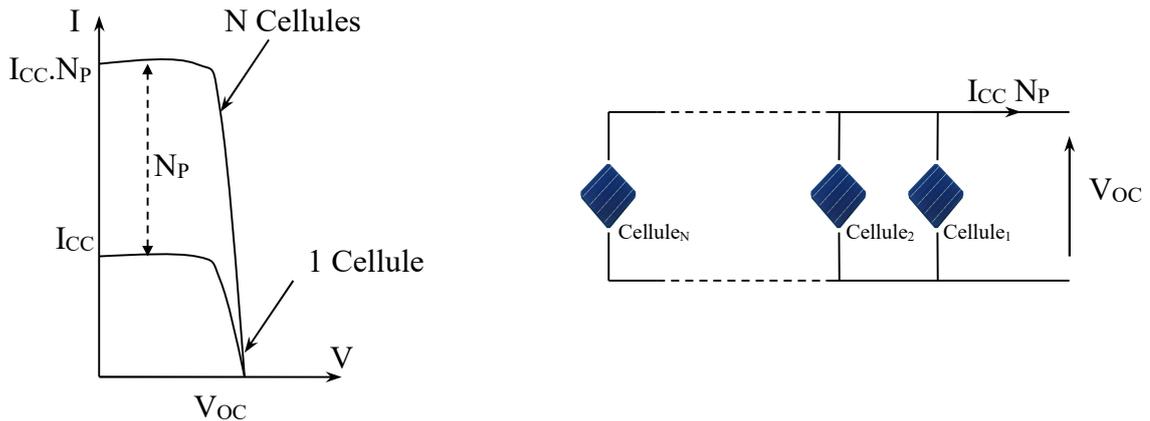


Figure I.6 Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en parallèle

Pour une amélioration plus avancée, on pourrait employer des cellules photovoltaïques ayant une plus grande surface et une meilleure performance offrant ainsi un meilleur rendement où on pourrait aussi associer plusieurs modules photovoltaïques similaires en parallèle. Pour assurer une performance optimale du générateur, il faudrait que les cellules N_p et N_s fonctionnent de la même manière. On doit donc, réviser les similarités en termes de lots de fabrication, technologie et conditions de fonctionnement (température, éclairage, inclinaison et vieillissement) [15].

La puissance du GPV serait aussi optimale si chaque cellule opérait à sa puissance maximale. Cette puissance P_{max} est définie comme le maximum d'une caractéristique $P(V)$ d'un GPV. Elle correspond à une tension optimale V_{OP} et un courant optimal I_{OP} .

Pour minimiser les dysfonctionnements, les fabricants se sont privés de commercialiser les cellules PV individuellement. Les GPV se trouvent donc sous forme de modules pré-câblés composés de plusieurs cellules et sont ainsi nommés panneaux PV. Chaque module possède ses caractéristiques électriques garanties à $\pm 10\%$ selon le lot de fabrication.

Un panneau est distingué d'un module par l'ajout d'une diode de protection. La première est montée en série pour éviter les courants inverses. La deuxième est une diode by-pass montée en parallèle qui intervient en cas de déséquilibre relatif à un ensemble de cellules pour minimiser la tension inverse située dans les bornes de ce dernier et ainsi limiter les pertes de production.

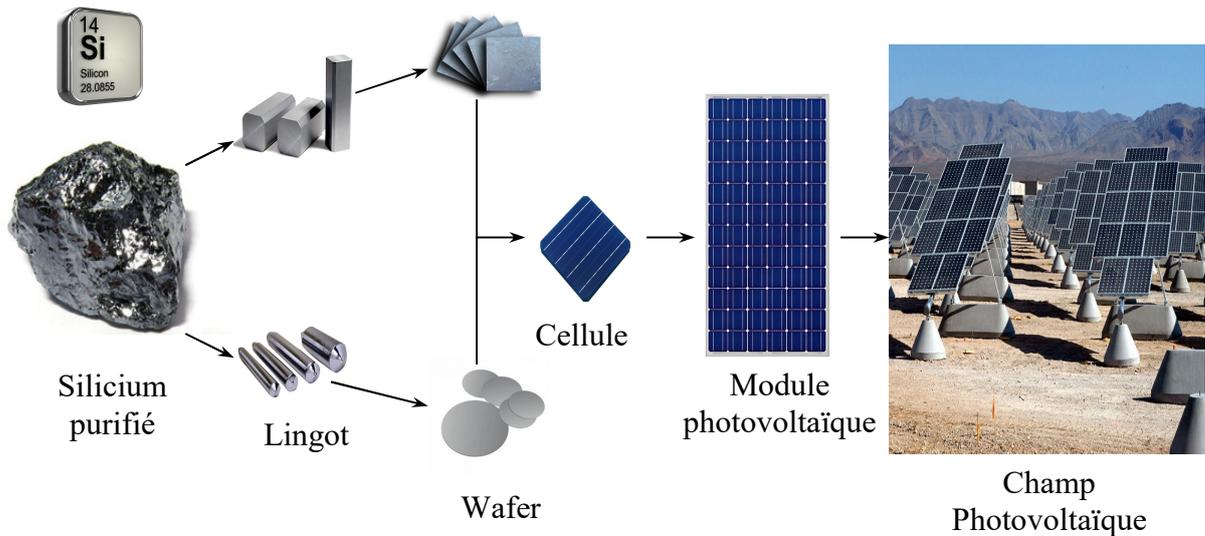


Figure I.7 Cycle de la matière brute au système photovoltaïque

I.7 Modules photovoltaïques

Un assemblage de ces cellules est nommé un module. Pour obtenir un module, on noie les cellules dans un bain de résine. Ensuite, on encapsule le tout entre deux vitres en verre trempées pour obtenir un module BIVERRE ou entre une vitre et une feuille de TEDLAR pour obtenir un module verre/TEDLAR. Cet ensemble est souvent entouré par un cadre en aluminium [13].

L'énergie convertie par un module change en fonction de la surface et la valeur du rayonnement solaire. On estime cette énergie en Watt-crête W_c . La puissance maximale pour l'ensoleillement de référence est de 1000 Watts par m^2 .

Le rendement d'un module dépend aussi du nombre de cellules liées en séries. Les modules de faible puissance par exemple donnent une puissance inférieure à 75 W_c et possèdent une tension d'usage estimée de 12 à 15 Volts.

L'amélioration du niveau de tension est l'augmentation du nombre de cellules en série et l'augmentation de la valeur de l'intensité du courant est l'augmentation du nombre de branches de cellules mises en parallèle.

La tension d'usage varie en fonction de la configuration de 24 Volts ou plus. La surface des modules est souvent compromise de 0,5 à 1 m^2 et atteint parfois 3 m^2 dans des conditions extrêmes. Un ensemble de modules interconnectés ainsi, forme un panneau et un groupe de panneau est un champ photovoltaïque.

I.8 Réaction d'une photopile éclairée

La caractéristique complète d'une photopile éclairée est illustrée par la figure I.8 dans trois quadrants. On constate que dans le 1er quadrant, la photopile fonctionne comme génératrice avec une tension et puissance positives. Dans ce cas la photopile fonctionne normalement et ne court aucun risque. On constate aussi que dans le quadrant 2, elle fonctionne comme réceptrice d'une faible impédance d'une façon similaire au fonctionnement d'une diode polarisée en direct. Cela arrive quand la tension à la borne de la cellule en question est produite par le circuit extérieur et quand sa valeur surpasse celle du V_{OC} , la photopile fonctionne comme réceptrice d'une forte impédance d'une façon similaire au fonctionnement d'une diode polarisée en inverse quand le courant traversant la cellule est venant du circuit extérieur et quand sa valeur dépasse le courant de court-circuit. Dans ce cas, dû à la résistance série R_s , la jonction n'est polarisée en inverse qu'à partir d'un point « A » où la puissance est égale à « $-I \times R_s$ ». Dans les deux cas où la cellule est en état récepteur (2^{ème} et 4^{ème} quadrants), elle doit être proscrite dû au risque affronté des réchauffements locaux (hot-spot) [14].

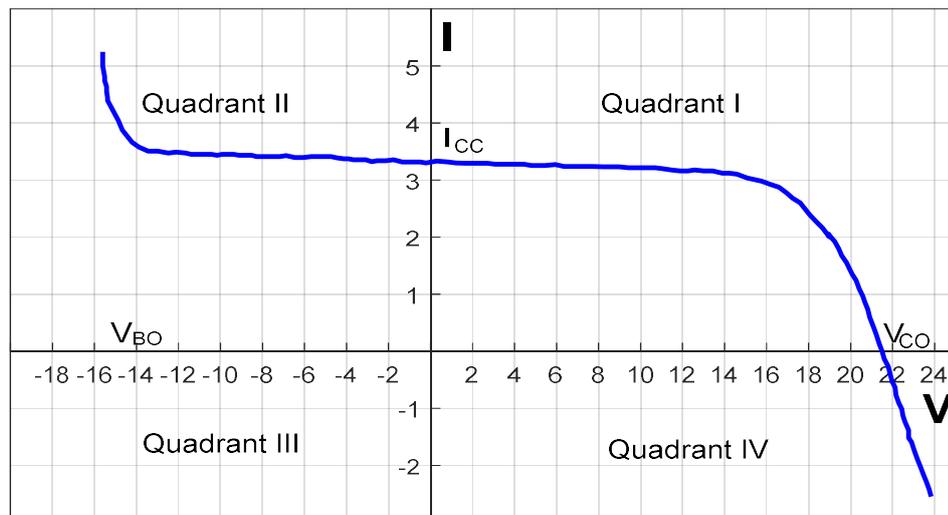


Figure I.8 Caractéristique courant-tension d'une photopile éclairée et polarisée par une source extérieure

En fonction du matériau employé, la température et l'état de vieillissement la cellule aura typiquement une tension de circuit ouvert (V_{OC}) estimée entre 0,3 Volts et 0,7 Volts. Et selon l'éclairement, les technologies et les tailles (de 5 à 8A pour le silicium cristallin), le courant de court-circuit (I_{CC}) varie différemment dans plusieurs conditions. La modélisation schématique d'une cellule PV est représentée dans la figure I.9. La modélisation dans le premier et le quatrième

quadrant est illustrée dans la figure I.9 (a). Vous pouvez constater dans la figure I.9 (b) que pour simuler la caractéristique de la cellule PV dans le deuxième quadrant, on a ajouté en parallèle une quatrième branche qui se constitue d'une diode montée en série, un générateur de tension (V_{BO} tension d'avalanche). Cela a été effectué pour réaliser une simulation du fonctionnement d'une cellule PV polarisée en inverse [3].

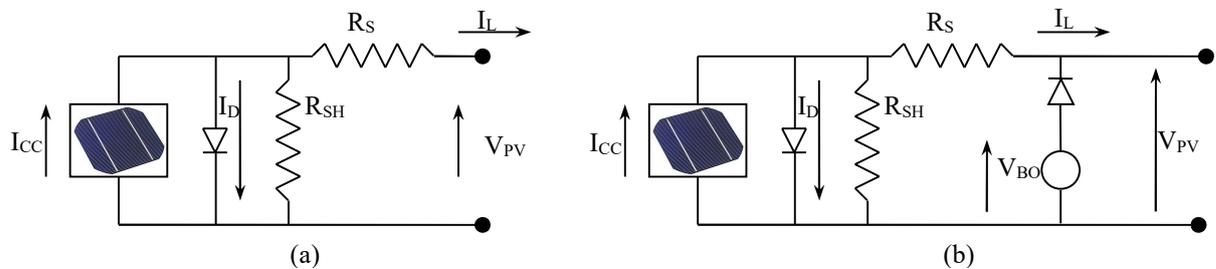


Figure I.9 Circuit équivalent complet d'une cellule PV

I.9 Zones de fonctionnement du module photovoltaïque

Trois facteurs déterminent les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque (l'éclairement, la température et les conditions de fonctionnement quand le module photovoltaïque est connecté à une charge donnée). Dans ce paragraphe, on rappelle brièvement le fonctionnement d'un générateur soumis à diverses conditions et obstacles. Cela est important pour comprendre le fonctionnement d'un générateur PV et après, appliquer des optimisations de comportement [15].

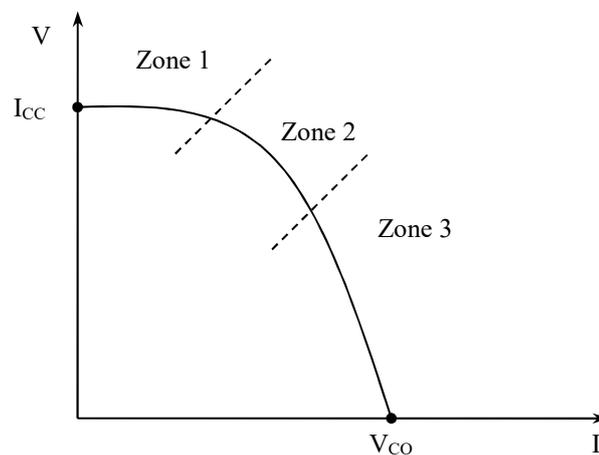


Figure I.10 Les différentes zones de la caractéristique $I(V)$

Puisque le générateur PV est composé de plusieurs cellules, sa caractéristique et celle d'une cellule élémentaire sont similaires l'une à l'autre à condition qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques des cellules qui forment le générateur en terme de température uniforme et d'irradiation.

Comme il est apparent dans la figure I.10, on peut discerner trois zones de la caractéristique $I(V)$ du générateur PV, et ces dernières sont:

1. Zone.1: Un générateur de courant I_{CC} proportionnel à l'irradiation avec une admittance interne est modélisable par $1/R_{sh}$.
2. Zone.2: Un générateur de tension V_{CO} d'impédance interne égale à la résistance série R_S
3. Zone.3: L'impédance interne du générateur varie extrêmement de R_S à R_{sh} . Cette zone renferme le point de fonctionnement de puissance maximale donnée par le générateur. Ce point est nommé point de puissance optimale et est joint au deux caractéristiques (I_{max}) et (V_{max}).

Il est possible d'extraire la puissance maximale dans les conditions données seulement en se basant sur une charge qui possède des caractéristiques passant par le point cité précédemment.

I.10 Paramètres photovoltaïques

Il est possible de caractériser une cellule PV par plusieurs paramètres qu'on peut déduire de la caractéristique $I(V)$. Ces derniers sont appelés paramètres photovoltaïques.

Pour l'expérimentation, on présente la caractéristique courant-tension $I(V)$ dans le noir (illumination = 0 Lux) puis sous une illumination moyenne d'une cellule PV à jonction PN dans la figure I.11. À travers le tracé de cette courbe, on peut accéder à pas mal de paramètres physiques caractéristiques de la cellule [16].

Le facteur de forme du composant (FF), le courant de court-circuit (I_{CC}) ainsi que la tension à circuit ouvert (V_{CO}) sont les premiers paramètres apparaissant sur la caractéristique courant-tension d'une phot cellule.

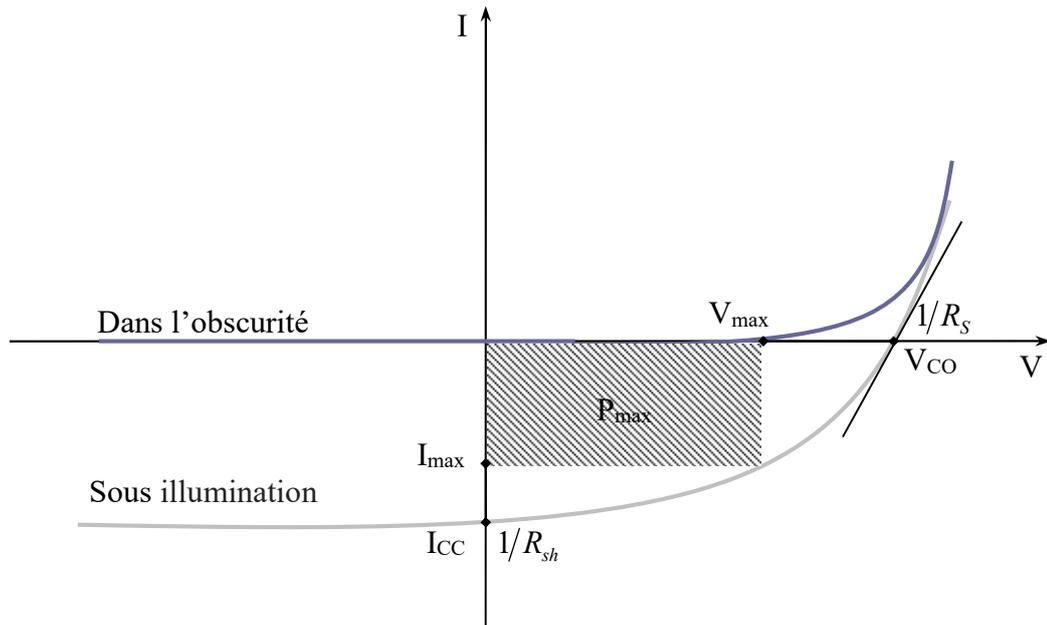


Figure I.11 Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque

I.10.1 Courant de court-circuit

Un courant de court-circuit (I_{CC}) est le courant quand la cellule n'accueille aucun potentiel (le potentiel appliqué sur la cellule est nul). Ce courant est considéré comme le plus grand courant possible fourni par la cellule. Cette valeur varie selon la mobilité des porteurs, la température, la surface active de la cellule et la longueur d'onde de rayonnement mais est linéairement dépendante de la quantité du flux lumineux [16].

I.10.2 Tension de circuit ouvert

La tension de circuit ouvert (V_{CO}) est la tension aux bornes de la cellule quand elle n'est liée à aucune charge ou quand elle est liée à une charge à résistance infinie. Cette valeur dépend principalement des matériaux de la couche active, le type de cellule (jonction Schottky, jonction PN) ainsi que la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle varie aussi de façon minime de l'éclairement de la cellule.

$$V_{CO} = \frac{KT_C}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_S} + 1\right) \quad I.4$$

Où:

KT_C/q : est la potentielle thermodynamique.

K : présente la constante de Boltzmann estimé de $1,38.10^{-23}J/K$.

T_C : présente la température absolue.

q : présente la charge d'électron estimé de $1,602.10^{-23}$ C.

I_{ph} : est le courant photonique.

I_S est le courant de saturation.

Comme indiqué dans la figure I.8, on peut observer deux régimes en suivant le degré de l'éclairement. Dans le cas où $I_{ph} \ll I_S$, on obtient un régime de flux lumineux faible comme exprimé par l'équation suivante:

$$\log\left(\frac{I_{ph}}{I_S} + 1\right) = \frac{I_{ph}}{I_S} \quad \text{I.4}$$

D'où :

$$V_{CO} \approx \frac{KT_C}{q} \times \left(\frac{I_{ph}}{I_S}\right) \quad \text{I.5}$$

Cela représente la zone de comportement linéaire de la cellule. On peut aussi reformuler la formule précédente ainsi $V_{CO} = R_0 \times I_{ph}$ En mettant $R_0 = K.T_C/q.I_S$, où:

R_0 représente la résistance interne de la diode en cas de circuit ouvert (polarisation externe nulle) et sous un flux lumineux faible.

Dans le cas où $I_{ph} \gg I_S$, on obtient un régime de flux lumineux assez intense comme exprimé par la formule suivante:

$$\frac{I_{ph}}{I_S} \gg 1 \quad \text{I.6}$$

D'où :

$$V_{CO} = \frac{KT_C}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_S}\right) \quad \text{I.7}$$

Cela est le domaine de comportement logarithmique [15, 16].

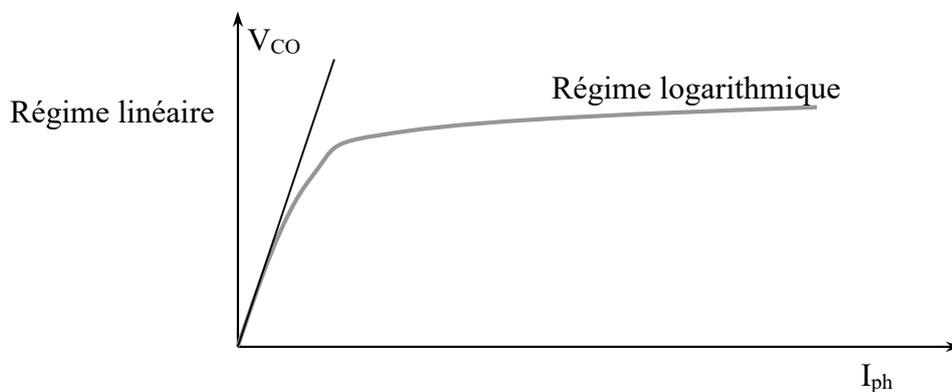


Figure I.12 Différents régimes selon la puissance d'éclairement

Il est nécessaire de connaître le fait que la tension donnée augmente de valeur avec le log d' I_{ph} conséquemment avec le log de l'illumination. Cependant, malgré le terme KT_c/q , elle baisse avec la température. Le courant de saturation I_s quand à lui dépend de la surface de la cellule et ainsi de la cellule elle même et les caractéristiques de jonction. Ce courant diffère exponentiellement avec la température ce qui compense suffisamment le terme KT_c/q . En conséquence, la tension de circuit ouvert V_{CO} diminue avec la température. Le dimensionnement des systèmes est l'élément le plus important [13].

I.10.3 Facteur de forme (FF)

Le facteur de remplissage (Fill Factor selon l'abréviation FF) est un paramètre important pour déterminer la qualité d'un générateur ou cellule PV souvent extrait de la caractéristique I(V). Ce coefficient est considéré par définition comme le rapport entre la puissance obtenue par le rectangle $I_{CC} \times V_{OC}$ ainsi que la puissance maximale possible obtenue par la cellule P_{max} [15, 16, 17]. La puissance exploitable sera grande si la valeur de facteur l'est et son augmentation dépend de lui aussi. Les cellules idéales feront donc le sujet de compromis dans la technologie pour atteindre le plus grand nombre possible de caractéristiques optimales voulues. Ce nombre peut être calculé en utilisant la formule suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{OC} \times I_{CC}} \quad I.8$$

I.10.4 Le rendement, η

Le rendement η d'une cellule ou un groupe de cellules photovoltaïques est le rendement de la conversion effectuée en puissance. Il est par définition la relation entre la puissance du flux lumineux incident « P_{in} » et la puissance maximale obtenue par la cellule. Cela est mieux expliqué par l'équation ci-dessous :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \times I_{CC} \times V_{OC}}{P_{in}} \quad I.9$$

Ce rendement de conversion est une grandeur essentielle. On pourrait augmenter sa valeur par l'augmentation de la tension à circuit ouvert, le facteur de forme et le courant de court-circuit. En déterminant la valeur de ce rendement, on peut aisément évaluer la performance des cellules.

I.11 Protection classique d'un GPV

Une bonne installation PV destinée à générer de l'énergie électrique pour des années est une installation caractérisée par une longue durée de vie avec la moindre intervention de réparations. Pour cela, il existe pas mal de méthodes de protections électriques qui peuvent être employées dans les modules commerciaux. Ces précautions assurent aussi la réduction de pannes destructrices causées généralement à l'association. La plupart des installations actuelles utilisent des méthodes de protections classiques qui emploient souvent une diode anti-retour qui est un bon moyen d'empêcher les courants de signe négatif dans le générateur PV. La possibilité de la manifestation de ce phénomène est plus probable dans les modules connectés en parallèle et durant les bascules du mode récepteur au générateur dans les charges de connexion directe (comme dans une batterie, la nuit). La figure I.13 illustre une simple protection classique [18].

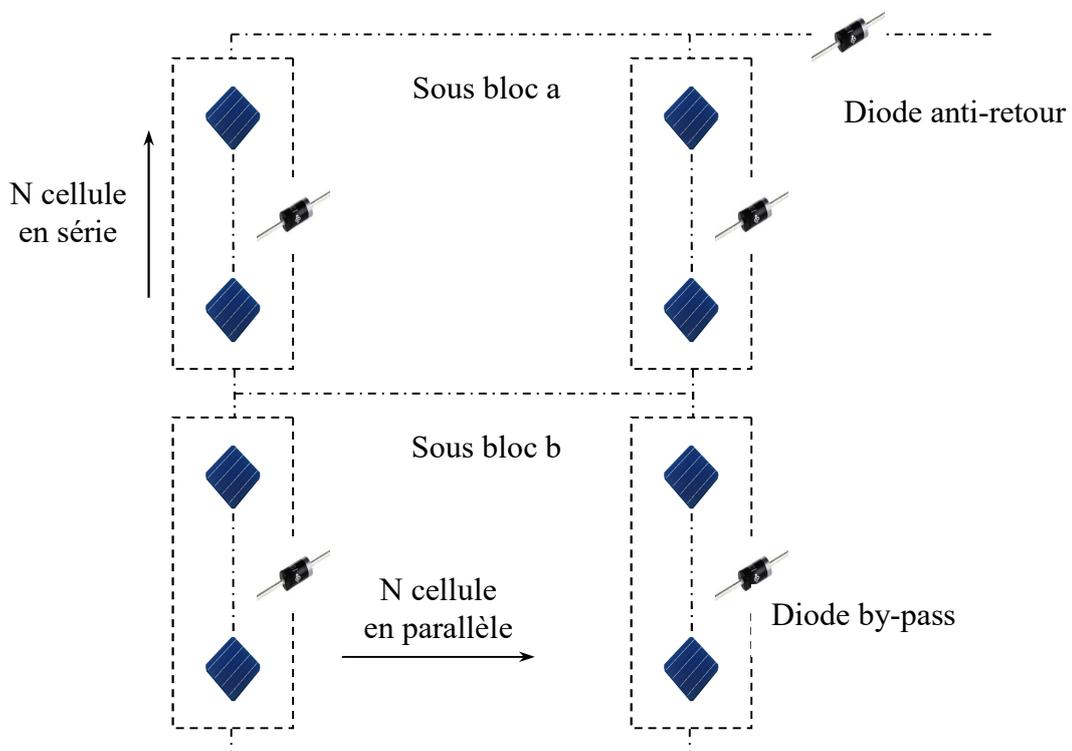


Figure I.13 Schématisation d'un module photovoltaïque élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour

Les diodes by-pass sont aussi un moyen efficace pour isoler un sous-réseau quand l'éclairement est irrégulier ; ce qui permet d'éviter la manifestation de points chauds (hot-spots) et l'élimination des cellules mal éclairées [16, 18].

La mise de conduction de ces deux types de diodes influence la caractéristique de sortie du générateur PV comme représenté par la figure I.14. Cela en résultant à l'apparition de deux valeurs maximales de puissance et en perdant une partie de la protection d'énergie.

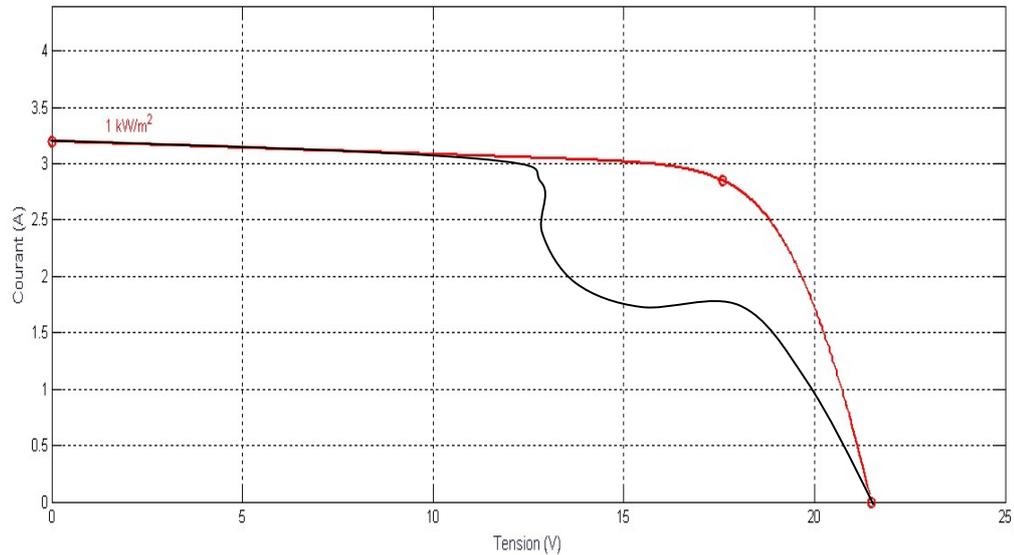
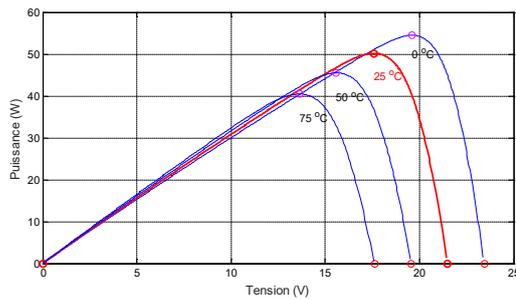


Figure I.14 Influence de la diode by-pass sur la caractéristique $I(V)$ d'un générateur PV

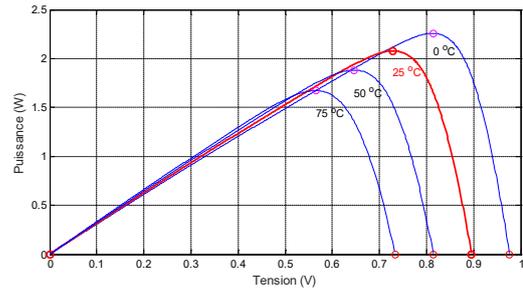
- Le trait en rouge présente la caractéristique d'un générateur PV lorsque deux sous blocs sont identiques sans effet des diodes by-pass.
- Le trait en noir présente la caractéristique d'un générateur PV lorsque l'un des deux sous blocs est isolé par la diode by-pass.

I.12 Fonctionnement à puissance maximale

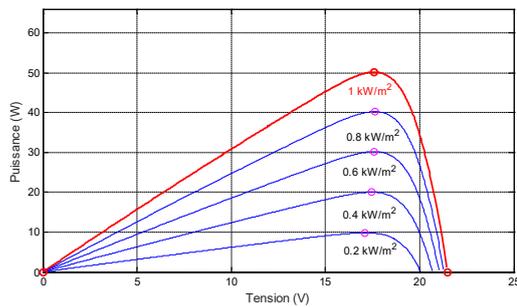
En rapports de proportionnalités près, la caractéristique électrique $P(V)$ d'un générateur photovoltaïque est bien proche de celle d'une cellule photovoltaïque. Cette relation dépend du nombre de branches de cellules dans le montage parallèle et le nombre de cellules associées en série. Cette caractéristique est non-linéaire et possède donc un point de puissance maximale (PPM) associé à une tension V_{max} et un courant I_{max} comme pour une cellule. Dans la figure I.15, on illustre l'évolution du point de puissance maximale (PPM) d'un module que nous avons utilisé comme prototype au chapitre III. Ce dernier est constitué de 24 cellules monocristallines en série et une puissance crête de 50Wc.



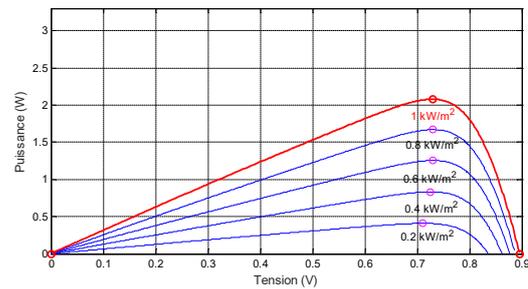
Module photovoltaïque (a)



Cellule



Module photovoltaïque (b)



Cellule

Figure I.15 Evolution du point de puissance maximale PPM d'un module photovoltaïque d'une puissance crête de 50Wc en fonction de la température (a) et de l'éclairement (b)

La détermination du point de fonctionnement optimal par un nombre de technique d'optimisation et d'amélioration est une démarche importante dans la conception d'un système électrique possédant une source et une charge. Dans une installation photovoltaïque, la recherche de ce point est une opération complexe et difficile car les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque varient fortement en fonction de la température et de l'ensoleillement. Il faudrait sélectionner un dispositif qui permettrait la performance optimale à tout moment en cherchant le point de fonctionnement optimal. Pour cela, il y a deux catégories de méthodes de maximisation de puissance.

- Méthodes indirectes : ces méthodes sont basées essentiellement sur le fusionnement des équations ou relations mathématiques et les bases de données stockées qui résument les caractéristiques des panneaux photovoltaïque dans des conditions climatiques variées afin d'arriver à chaque moment à déterminer le point de puissance maximum.
- Méthodes directes : ils cherchent le même point en employant la connaissance des valeurs de la tension et du courant des panneaux (dont l'algorithme est considéré comme une base

sur la variation de ses mesures). Le fait que ces algorithmes ne nécessitent pas une connaissance passée des caractéristiques des panneaux photovoltaïques est un avantage pour notre optimisation et une qualité qui minimise l'investissement humain dans la conception.

On peut aussi citer parmi ces méthodes: la méthode Perturber & Observe (P&O), la méthode de différenciation et l'incrément de conductance etc.

I.13 Puissance électrique d'une cellule PV

Sous des conditions normales de fonctionnement stables et constants (température, éclairage, vitesse de vent, etc.), la puissance électrique P (W) délivrée aux bornes d'une cellule solaire est un produit de deux paramètres I et V de nature continue.

I.13.1 Puissance maximale

La puissance maximale $P_{\max \text{ idéale}}$ d'une cellule solaire idéale est égale à la multiplication de la tension de circuit ouvert V_{CO} par le courant de court-circuit I_{CC} (la surface du rectangle OABC) :

$$P_{\max \text{ idéale}} = V_{CO} \times I_{CC} \quad \text{I.10}$$

$P_{\max \text{ idéale}}$ (W), Watt : Puissance maximale mesurée aux bornes de la cellule PV ;

V_{CO} (V), Volts : Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.

I_{CC} (A), Ampère : Intensité de court-circuit mesurée aux bornes de la cellule.

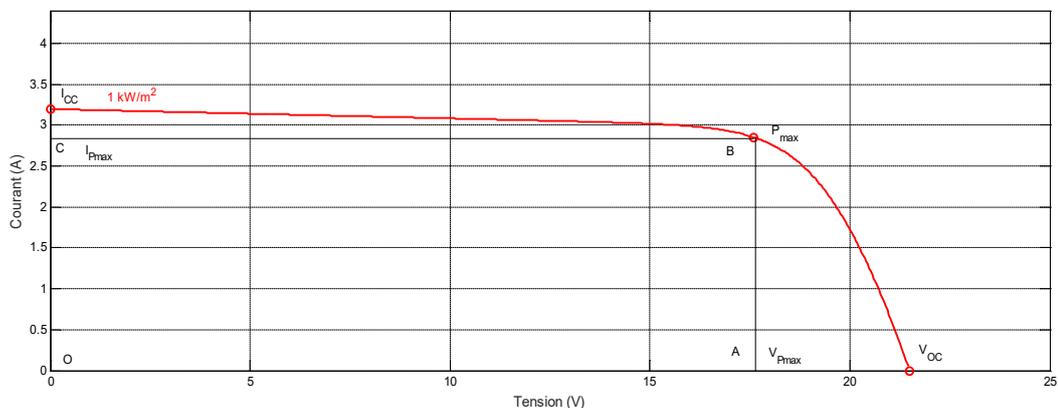


Figure I.16 Courant généré par une cellule PV en fonction de la tension aux bornes de la cellule PV - Noter le point de puissance maximum $P_{\max \text{ idéale}}$ à ($1000\text{W}/\text{m}^2$, 25C°)

I.13.2 Concept de la puissance crête (P_c) et de la température d'utilisation (TUC)

La valeur de la puissance crête d'un module PV est donnée en Watts-crête (W_c). Cette puissance est celle qui peut être fournie si le module est limité à sa charge optimale et sous un éclairage de $1000\text{W}/\text{m}^2$ (spectre AM 1.5) et la température d'une cellule est de 25C° [19]. La

température d'utilisation TUC d'une cellule est par définition la température d'une cellule dans un module sous un éclairement de 800W/m^2 à une température extérieure de 20°C , avec une inclinaison de 45° et un vent de 1m/s dans un circuit ouvert. Approximativement, la température d'une photopile varie en fonction de l'irradiation. On peut atteindre sa valeur en traversant la formule empirique suivante:

$$T_c = T_a + \frac{E_m}{800}(TUC - 20) \quad \text{I.11}$$

Où: E_m est l'irradiation exprimée en W/m^2 .

La formule suivante est plus précise:

$$T_c = T_a + \frac{E_m}{800}(TUC - 20) \times \left(1 - \frac{\eta}{\tau \times \alpha}\right) \quad \text{I.12}$$

Avec η , le rendement nominal indiqué par les fabricants n'est jamais trop loin de l'approximation du rendement mesuré d'un module. Le produit $\tau \times \alpha$ est le coefficient d'absorption d'un module (le fusionnement du coefficient d'absorption du module α et du vitrage τ). La mesure de la température d'utilisation d'une cellule est simple ; cela est dû à la forte sensibilité de la tension de circuit ouvert aux variations de température [19].

I.14 Influence de la température et de l'éclairement

La caractéristique d'un générateur et aussi d'une cellule photovoltaïque change avec une relation directe en fonction de la température et de l'éclairement.

La figure I.17 montre les variations de puissance et de courant selon la tension sous différents degrés d'éclairements et sous une température toujours constante de 25°C . On peut constater à partir de cette expérimentation qu'une courbe de puissance possède des limites maximales correspondantes aux points de puissance maximale P_{max} . Le courant de court-circuit I_{CC} change en balance avec l'irradiation quand cette dernière change pour une température quelconque. Simultanément, la tension de circuit ouvert varie V_{CO} légèrement [16].

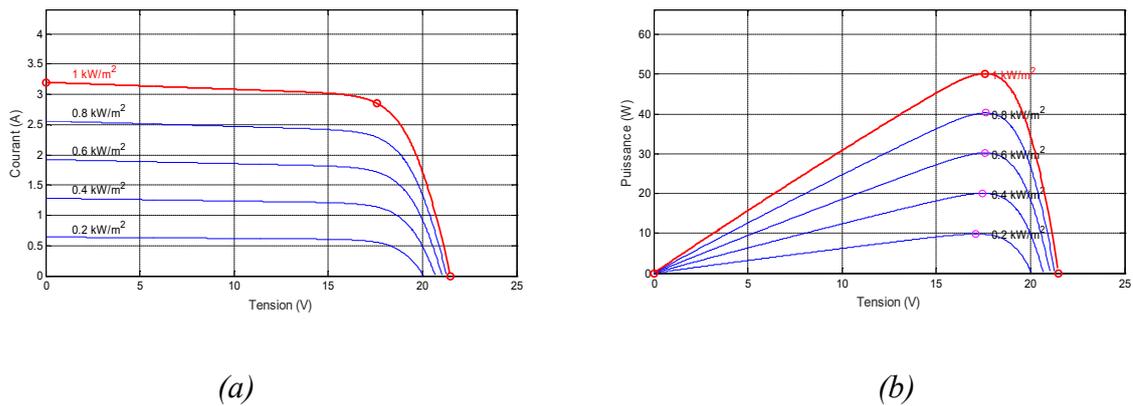


Figure I.17 Evolution de la caractéristique $I(V)$ (a) et $P(V)$ (b) en fonction de l'irradiation

La température est un paramètre fortement important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques.

Comme dans une cellule PV, la température influence aussi la performance d'un générateur. La figure I.18 représente la variation des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque selon la température sous un éclairement de $1000\text{W}\cdot\text{m}^2$

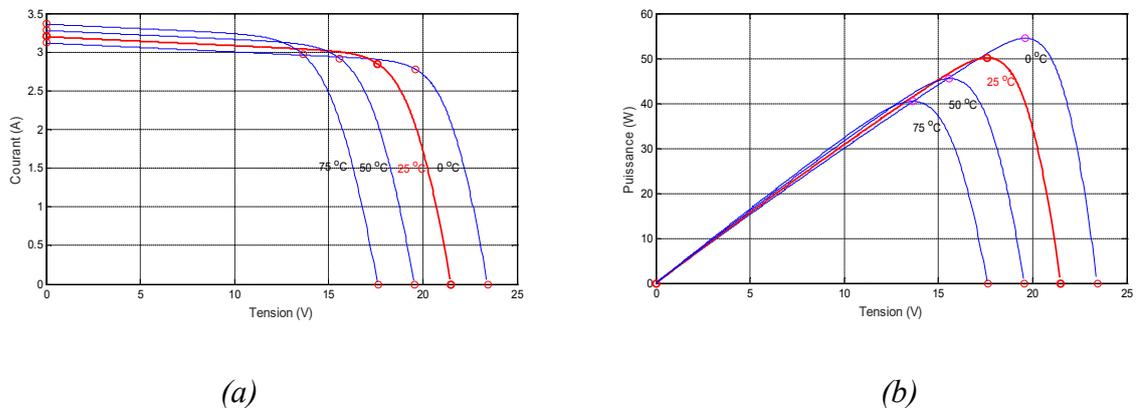


Figure I.18 Evolution de la caractéristique $I(V)$ (a) et $P(V)$ (b) pour différentes températures

En revanche, la tension à vide V_{CO} diminue avec la température si cette dernière augmente à l'irradiation constante. Plus la température est élevée plus la valeur V_{CO} diminue et plus la valeur de courant de court-circuit I_{CC} augmente. Mais l'augmentation de la valeur de ce dernier est clairement moins remarquable que la baisse de tension donc la valeur de changement d' I_{CC} causée par l'influence de la température est généralement négligée.

On déduit donc que l'éclairement et la température sont les deux paramètres influents principaux pour l'étude de la performance et des caractéristiques d'un générateur photovoltaïque. Il

est donc impérativement nécessaire de les étudier eux même avant l'installation des panneaux photovoltaïques.

I.15 Test des modules

Une étape importante pour chaque fabricant est le test des modules. Pour cela, il emploie un simulateur à flash qui peut stimuler un éclairement de 1kW/m^2 dans quelques secondes sans réchauffer ou endommager le module. Ces tests ont lieu dans les usines et cèdent à des conditions standard (STC). Les paramètres cités dans les étiquettes individuelles dont les fabricants opposent parfois sur leurs modules sont mesurés dans des conditions standard (STC) alors que le fonctionnement du module est évalué en utilisation réelle (FOC). Ces étiquettes offrent aussi une garantie de 10 ans en ce qui concerne la puissance minimum du module [20].

Les spécifications techniques obligatoires d'un module sont définies par la norme française NF EN 50380 de Juin 2003 (Spécifications particulières et information sur les plaques de constructeurs pour les modules photovoltaïques).

I.16 Systèmes photovoltaïques

Les générateurs diffèrent selon les buts d'application visés. Un champ PV est obtenu en effectuant une interconnexion des panneaux PV (en série, en parallèle ou en combinant les deux modes de connexion). On trouve aussi deux genres d'installations photovoltaïques : des installations autonomes et des installations raccordées au réseau [21].

Les installations photovoltaïques autonomes sont des installations non-raccordées au réseau électrique. Ils sont plutôt équipés de batteries qui accumulent l'électricité économisée durant l'éclairement du jour produit par les modules et stocké en cas de besoin. Ces installations sont souvent implantées dans les sites isolés ou éloignés du réseau électrique. Le dimensionnement d'une installation autonome doit être calculé selon l'énergie nécessaire demandée par les matériels électriques raccordés en prenant en considération les journées à faible éclairement.

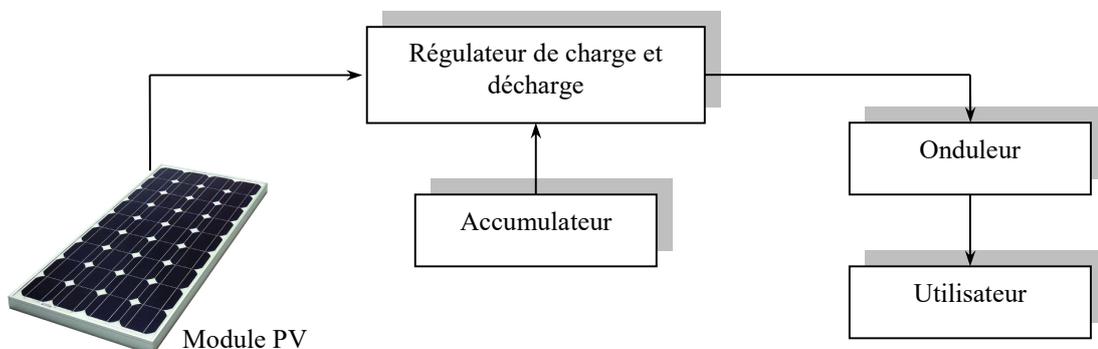


Figure I.19 Installions photovoltaïques autonomes

Il existe un autre type d'installations photovoltaïques qui nous aide à compenser le manque de l'électricité sur certaines zones surpeuplées. [15, 21] Ce dernier est raccordé à travers un onduleur et dimensionné selon la capacité de production de l'installation photovoltaïque.

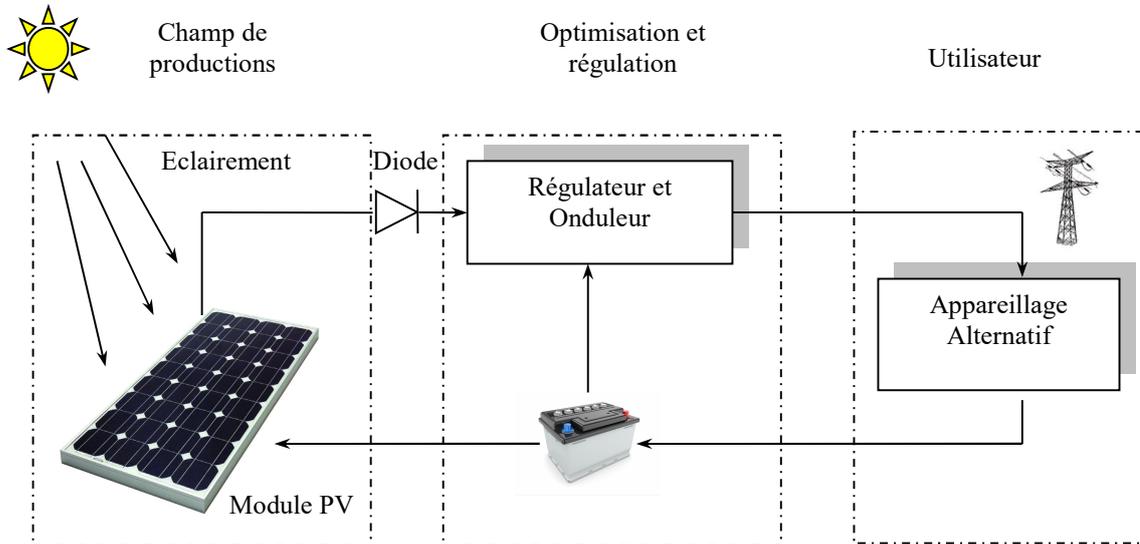


Figure I.20 Installation photovoltaïque raccordée au réseau

I.17 Avantages et inconvénients

N'importe quelle technologie a ses avantages et ses inconvénients tout comme la technologie photovoltaïque. La production d'énergie photovoltaïque a été choisie en premier lieu pour sa nature non-polluante et renouvelable, mais elle a aussi été choisie parmi les autres énergies renouvelables pour plusieurs autres raisons. D'une part, la technologie photovoltaïque est la méthode de production énergétique la plus fiable pour les zones isolées et parfois même pour les appareils spatiales car elle ne contient pas de composants mobiles.

D'une autre part, le montage de ces systèmes est simple et facile à adapter aux besoins énergétiques dû à la constitution modulaire de ces panneaux. On peut même, les dimensionner selon l'application et le rendement énergétique. De plus, les coûts de réalisation et d'installation sont minimes comparés aux entretiens réduits. L'installation ne nécessite pas de grands investissements dans le transport ou les combustibles ni une haute expérience. Enfin, cette technologie est une méthode de production d'énergie renouvelable écologique et non-polluante. Elle ne cause aussi aucune perturbation au niveau de troubles sonores au problème d'espace. Cependant, l'utilisation de la technologie photovoltaïque n'est pas aussi propagée que les énergies fossiles pour des raisons économiques. Les pays pauvres ou en cours d'évolution ne peuvent pas se permettre d'utiliser cette méthode.

D'abord, les fabrications des modules photovoltaïques demandent des moyens de constructions de haute technologie, ce qui augmente les coûts et les investissements requièrent. En termes de rendement, la quantité énergétique convertie par une photocellule silicium cristallin est de 28% ce qui est très faible pour des applications sur des zones larges ou industrielles. Ensuite, les générateurs diesel sont bien plus efficaces que les générateurs photovoltaïques si on néglige les faibles demandes énergétiques dans les sites isolés. Enfin, le fait qu'une installation photovoltaïque nécessite un stockage chimique de l'énergie rend les générateurs plus coûteux. La performance reste aussi liée à la qualité des composants. Malgré tout cela, la technologie photovoltaïque reste une technologie fiable et révolutionnaire et aussi la clé vers la survie de l'homme et de son environnement. Elle demande juste une collaboration économique entre les pays.

I.18 Conclusion

Malgré que le soleil nous fournisse une énergie lumineuse colossale, nous ne pouvons actuellement pas en profiter pleinement suite à de nombreux problèmes liés à ce type d'énergie. Citons notamment le faible rendement des cellules dues à la conversion en électricité, les investissements importants, les conditions météorologiques, les problèmes de stockage, la répartition non uniforme du rayonnement solaire tant au point de vue spatial « latitude, présence d'une côte, temporelle jour nuit, etc. ». Néanmoins, l'énergie photovoltaïque peut être très utile dans certains cas énoncés tout au long de ce chapitre. En effet, elle est de plus en plus employée et sera certainement nécessaire dans l'avenir suite à l'appauvrissement total de nos sources énergétiques traditionnelles.

C'est en vue d'améliorer les techniques en la matière et les techniques d'orientation dans lesquelles, nous avons borné l'intervalle d'activité du panneau « la durée maximale quotidienne et saisonnière » ce qui implique la programmation de la trajectoire du soleil. Ceci sera abordé au second chapitre où on a aussi démontré qu'un lieu d'installation n'est pas choisi aléatoirement en faisant une étude sur l'influence des coordonnées locales sur le rendement ; cela pour choisir un emplacement optimal.

Chapitre II

**Concept de la modélisation
de la trajectoire du soleil
par les équations de temps**

II.1 Introduction

Plusieurs théories étudiées par des auteurs dans le cadre de l'optimisation des paramètres de rendement d'un système photovoltaïque par l'orientation et la conversion montrent que les facteurs pris en compte qui influencent la performance et le rendement d'une installation ne sont pas complètement suffisants pour atteindre une optimisation souhaitée. Ce fait est dû à la négligence d'un facteur influant important qui est l'intervalle temporaire de l'activité d'un module photovoltaïque. Ce paramètre est le sujet d'étude de ce chapitre. Pour une étude d'optimisation d'une installation photovoltaïque, la détermination de la durée et le lieu d'ensoleillement sont la priorité de précéder toute étude analytique. Les calculs sont effectués pour une année pour déterminer le gain énergétique résultant de l'étude de ce facteur primordial. Ce gain est approximativement estimé de 4,5% en fonction de la saison ce qui confirme donc, l'importance de ce paramètre.

II.2 Durée optimale d'activité d'un module photovoltaïque

Généralement, on peut définir la durée d'insolation en déterminant le nombre d'heures dans une journée du lever au coucher du soleil où le soleil illumine l'entourage d'un module. Ce calcul est effectué à travers l'héliographe de Campbell-Stokes qui est la concentration des rayons solaires par une sphère de cristal sur un papier qui brûle par le déplacement de ces rayons. Donc, seul les moments d'ensoleillement sont enregistrés (les moments sont représentés par les lignes de papiers brûlés). On prend aussi en considération la météo ; on ne compte donc que les moments où le soleil est complètement visible et non-caché par les nuages [22]. En s'aidant avec le calcul de la durée d'ensoleillement par l'héliographe, il est possible de déduire la durée théorique d'un jour en fonction du mouvement astronomique du soleil en sachant qu'une durée théorique d'un jour est la durée où le soleil traverse le ciel sans prendre en considération la météo. Cette dernière doit être calculée selon la latitude de l'endroit et la déclinaison qui varie durant l'année.

L'estimation de la durée d'activité d'un panneau photovoltaïque ne peut avoir un rendement maximal, car cette durée est souvent sous estimée de ce fait, elle doit être calculée en se basant sur l'heure de lever et coucher du soleil en fonction des données astronomiques d'un endroit donné et qui constituent les fins de course du panneau photovoltaïque.

II.3 Notions Astronomiques

Après que, Nicolas Copernic l'astronome a démontré que la terre tournait autour du soleil dans une trajectoire circulaire, Johannes Kepler a ensuite découvert la véritable forme elliptique de la trajectoire autour d'un point foyer que le soleil occupe. La différence entre la première version

théorique de la trajectoire et la vraie trajectoire elliptique est graphiquement non-visible seulement si on exagère l'ellipticité de la véritable trajectoire. Mais il est important de prendre en considération cette différence puisque elle est traduite en des irrégularités horaires de passage au méridien local solaire entre les saisons et une autre irrégularité dû à l'inclinaison de 23.45° de l'axe de rotation axial de la terre selon le plan de l'elliptique (la rotation normale autour du soleil) [23].

Il est indispensable de citer quelques définitions astronomiques essentielles intervenant directement dans l'établissement des équations de calcul de la durée d'ensoleillement. N'importe quel lieu sur terre est distingué par la connaissance de deux paramètres, sa latitude et sa longitude.

II.3.1 La latitude

La latitude ϕ : est l'entité angulaire qui exprime le positionnement nord-sud d'un lieu sur terre au sud ou au nord de l'équateur. La latitude d'un emplacement est l'angle de la ligne radiale relie le lieu donné et le centre de la terre forme avec son projection sur le plan équatorial comme illustré dans la figure II.1. Le plan équatorial peut être considéré comme un plan avec une latitude de 0° et il divise la terre en deux hémisphères : Nord et sud [24, 25].

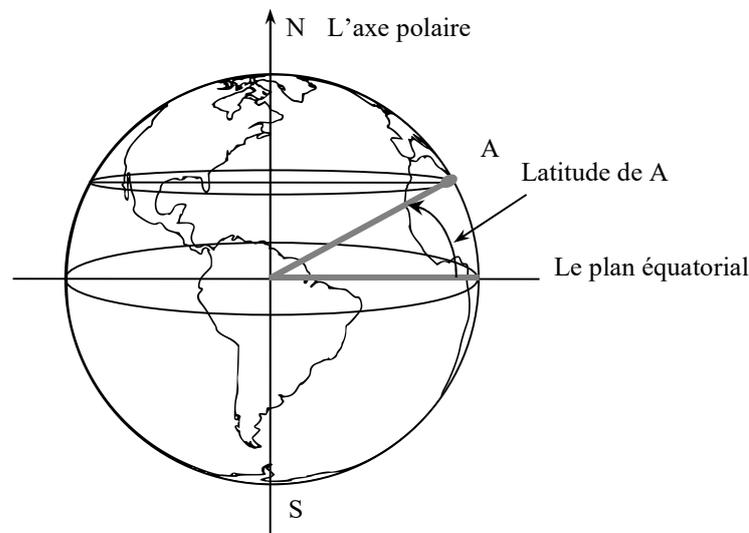


Figure II.1 Angle de la latitude

II.3.2 La longitude

La longitude θ : est l'entité angulaire qui exprime le positionnement est-ouest d'un lieu sur terre. Il y a beaucoup de demi-cercles imaginaires qui peuvent être dessinés sur le globe du pôle nord au pôle sud. Ils sont appelés méridien. La ligne qui passe par Greenwich, L'Angleterre est appelée ligne méridienne principale et, est prise comme méridien de référence par lequel la position

d'un emplacement et son fuseau horaire sur la terre est déterminée [25]. Ainsi, la longitude du méridien principal est prise comme 0° . La longitude d'un lieu est la distance angulaire du méridien qui le traverse du premier méridien qui est combien d'angle les deux plans, contenant chaque méridien et le centre de la terre, sous-tend. Cet angle peut être à l'est ou à l'ouest du méridien principal variant de 180°E à 180°W comme illustré dans la figure II.2.

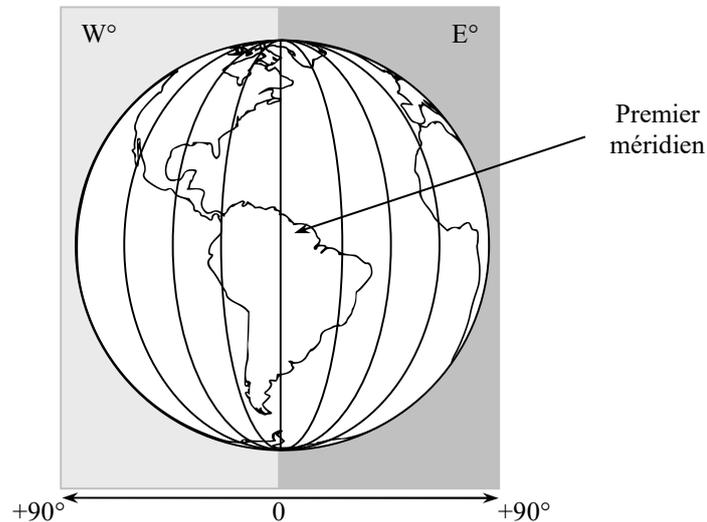


Figure II.2 Angle de longitude

II.3.3 Angle de déclinaison

C'est l'angle entre les lignes reliant le centre de la terre au soleil avec sa projection sur le plan équatorial de la terre. L'angle de déclinaison varie à cause de l'inclinaison de l'axe polaire de la terre et sa trajectoire autour du soleil. Il donne la position du soleil par rapport au plan équatorial et cela dépend du jour de l'année mais, est indépendant d'emplacement sur la terre [23].

L'inclinaison terrestre par rapport au soleil donnée par l'angle de déclinaison δ , varie d'une saison à l'autre. L'angle de déclinaison maximal est présenté, produit au solstice d'été dans l'hémisphère nord et au solstice d'hiver dans l'hémisphère d'hiver.

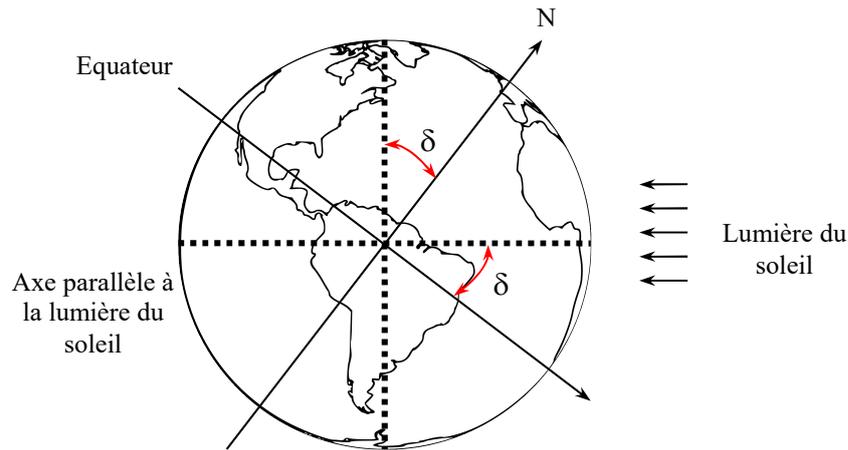


Figure II.3 Angle déclinaison

L'angle de déclinaison varie de -23.45° (Solstice de décembre) à $+23.45^\circ$ (Solstice de juin). L'angle est positif quand le soleil est au nord du plan équatorial ce qui veut dire, quand l'ensemble de l'hémisphère nord plus quelques parties de l'hémisphère sud est éclairé, sinon il devient négatif. Deux fois par an (en mars et en septembre) l'angle de déclinaison devient nul. L'angle de déclinaison est ainsi calculé à partir de l'équation suivante [23, 27]:

$$\delta = 23.45 \times \sin\left(2\pi \frac{284 + D}{365}\right) \quad \text{II.1}$$

Où D est le nombre de jours à partir du premier jour de l'année (1^{er} Janvier) jusqu'au dernier (31 décembre). Une présentation graphique peut éclaircir cette déclinaison pendant une année ainsi que la durée d'ensoleillement pendant une année.

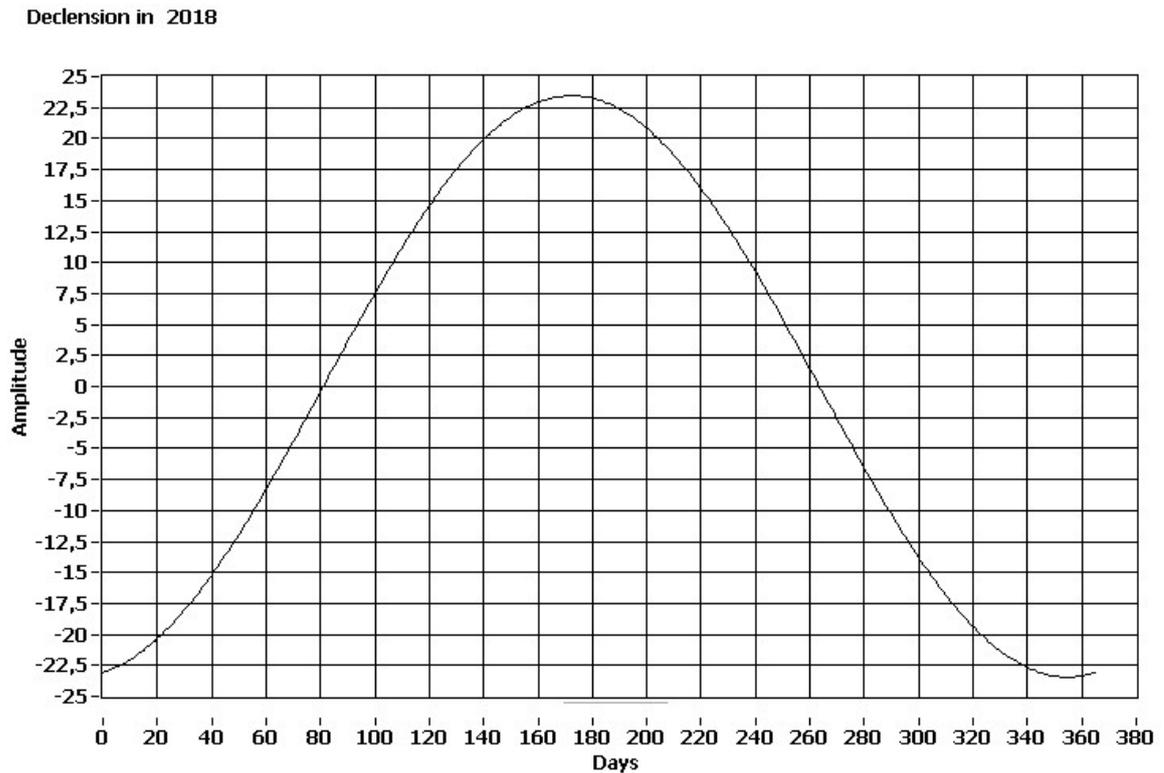


Figure II.4 Présentation graphique de la déclinaison [23]

II.4 Trajectoire du soleil

Le but primordial de ce chapitre est de calculer la position du soleil (dans le ciel) pour chaque emplacement sur la terre à tout moment du jour et de définir les périodes d'ensoleillement quotidien en fonction de l'endroit et du temps afin de profiter d'un rendement maximal de l'énergie solaire. Le lever et le coucher du soleil sont définis comme l'instant où le membre supérieur du disque du soleil vient de toucher l'horizon, cela correspond à une altitude d'environ 0° pour le soleil.

Le calcul de la position du soleil dans un algorithme utilise un certain système de coordonnées. Le temps et l'emplacement sont donnés en entrée pendant que les coordonnées du sol de référence sont données en sortie par l'algorithme. La sélection du système de coordonnées dépend de l'application utilisée [27].

Le système de coordonnées horizontales est basé essentiellement de la surveillance du déplacement du soleil ce qui l'a rendu le plus utilisé pour les (Solar Engineering Application), calculs astronomiques de routine et d'étalonnage de l'équipement de mesure du rayonnement solaire [28]. La position de tout objet céleste est donc décrite en deux angles, l'angle d'azimut et l'angle d'élévation. L'angle d'élévation est l'angle de l'objet au-dessus de l'horizon à partir du point d'observation alors que l'angle de l'azimut s'est diversifié de définitions. Par exemple, dans

ISO19115, c'est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre du nord à la projection horizontale de la ligne qui relie l'objet observé et le point d'observation.

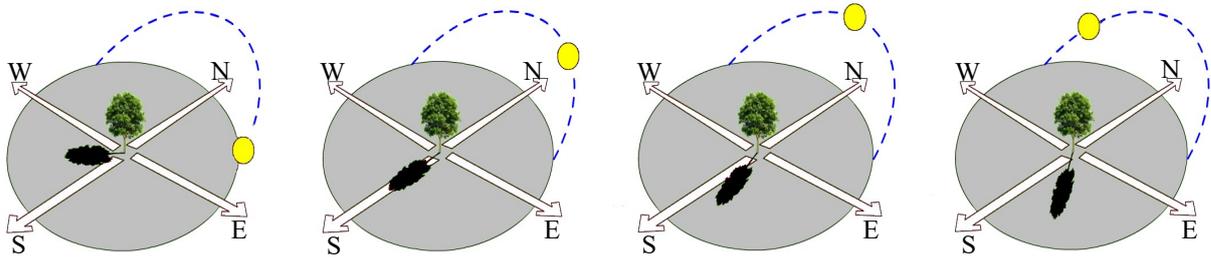


Figure II.5 Scénario de la trajectoire du soleil

II.5 Modélisation de la trajectoire du soleil

La détermination de la position du soleil en termes d'azimut et d'angles d'élévation ainsi que la durée de d'enseillement nécessite le calcul de certains paramètres. Ceux là, seront discutés en détails dans cette section.

II.5.1 Temps solaire local (LST) et heure locale

Le temps solaire local de douze heures (LST) est défini comme la position du soleil la plus haute dans le ciel. L'heure locale (LT) varie habituellement de (LST) en raison de l'excentricité de l'orbite terrestre et en raison des ajustements humains tels que les fuseaux horaires et l'heure d'été.

II.5.2 Meridien de temps standard local

Le méridien de temps standard local (LSTM) est un méridien de référence utilisé pour un fuseau horaire particulier et, est similaire à la prime méridienne qui est utilisée pour le temps moyen de Greenwich qui peut être calculé par l'équation suivante [29]:

$$LSTM = 15^\circ \times \Delta T_{GMT} \quad \text{II.2}$$

II.5.3 Equation du temps

Les lignes horaires sont les tracés de ce plan horaire qui est perpendiculaire à l'équateur sur la surface du cadran heure ; puisque le temps solaire qui est établi et mesuré par un cadran est compté sur l'équateur selon le déplacement quotidien du plan horaire du soleil. Quand la direction du plan horaire solaire change de 15° , 1 heure est passée. Le cadran solaire ne prend pas en considération la déclinaison du Soleil : donc peut importe la date de l'année, la position du plan horaire midi sera la même une heure après, ainsi la ligne horaire 1 heure de l'après-midi sera identique pour tous les jours de l'année : c'est le principe et le grand progrès apportés par les cadrans à style polaire. Donc

la durée de l'heure solaire n'est pas fixe, elle change au cours de l'année ; un jour solaire peut varier de 24 h 00 m 30s à 23 h 59 m 40s.

Malgré que la variation soit minimale à l'ordre de quelques secondes, la conséquence essentielle est que, ces variations s'accumulent pour former un plus grand écart. Et durant l'année, le moment où le soleil passe au méridien (le midi solaire) se décale graduellement de jour à l'autre par rapport au midi qui sera désigné par une horloge parfaite bien régulière. Cette horloge indique toujours le temps moyen. « L'EQUATION DU TEMPS » est la différence variable d'une année à l'autre entre le midi moyen et le midi solaire par définition [23, 29].

$$\text{TEMPS MOYEN} = \text{TEMPS VRAI} + \text{EQUATION DU TEMPS}$$

II.3

C'est une grandeur périodique d'une année sur l'autre. Elle présente un maximum de plus de 14 minutes début février et un minimum de -16 minutes début novembre; elle a aussi un maximum et un minimum intermédiaires. Elle s'annule 4 fois par an : vers le 15 avril, le 15 juin, le 1er septembre et à 24 décembre comme le montre la figure si dessous.

The annual variation of the Equation of Time

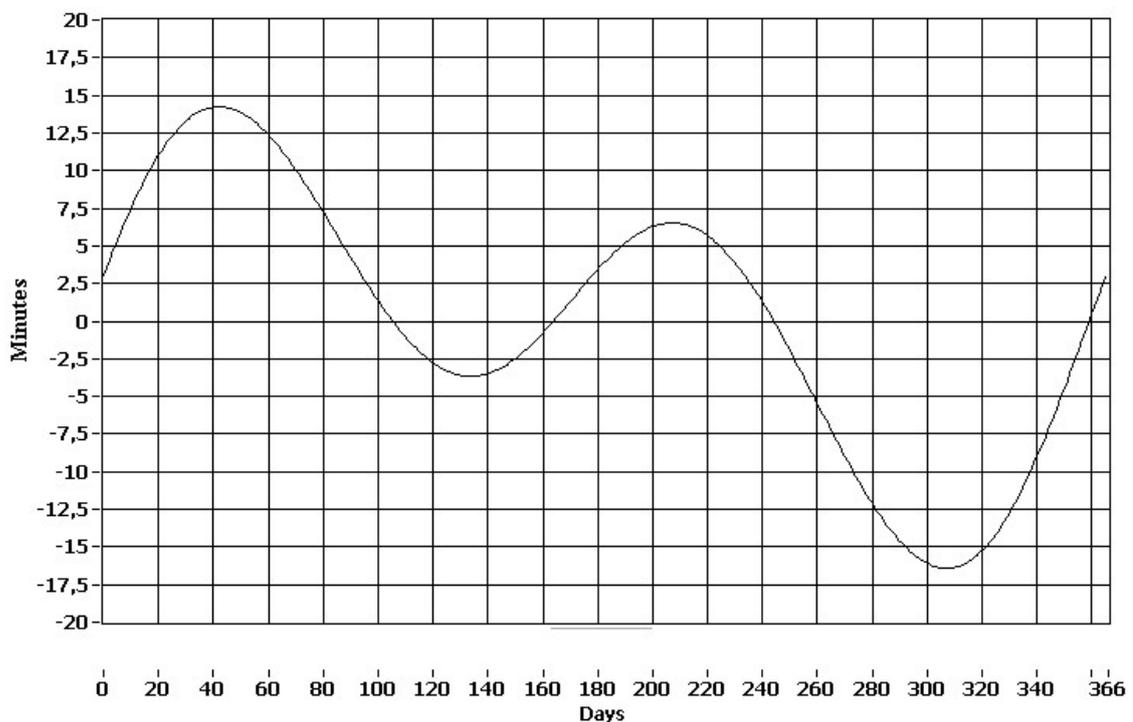


Figure II.6 Variation annuelle de l'équation de temps [23]

Il est réalisable de calculer le résultat exact de l'équation du temps à n'importe quel instant avec précision voulue par différentes formules exposées dans les ouvrages astronomiques [23, 27]. Il est aussi possible et bien suffisant d'utiliser des formules simplifiées pour les besoins de la gnomonique [27], ainsi que des tables. Mais avec la capacité des PC ou des calculettes modernes, il

est préférable d'employer des formules complexes pour atteindre le plus haut niveau de précision possible. Cela pourrait prendre du temps à rentrer et à opérer mais les valeurs calculées restent exactes à quelques secondes près.

L'équation du temps (E de Temps) (en minutes) est une équation empirique qui corrige l'excentricité de l'orbite terrestre et l'inclinaison axiale de la terre.

$$EoT = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B) \quad \text{II.4}$$

Où :

$$B = \frac{360}{365}(D - 81) \quad \text{II.5}$$

Où D est le jour de l'année (c'est-à-dire D = 1 pour le premier janvier, D = 32 le premier février, etc.). Le facteur précis de correction de temps (en minutes) explique la variation du temps solaire local (LST) dans un fuseau horaire donné en raison des variations de la longitude de l'endroit dans le fuseau horaire et intègre également l'EoT comme suit. Le chiffre 4 dans l'équation présente le nombre de minutes que la terre prend pour faire une rotation d'un degré.

$$TC = 4 \times (\text{Longitude} - LST) + EoT \quad \text{II.6}$$

Le temps solaire local (LST) peut être calculé en utilisant l'équation II.6 et l'heure locale (LT) comme suit :

$$LST = LT + \frac{TC}{60} \quad \text{II.7}$$

II.5.3.1 Angle horaire solaire

L'angle horaire solaire H ou (HRA): est par définition le mouvement angulaire solaire dans sa trajectoire d'est en ouest autour de l'axe polaire par rapport au méridien local. L'angle horaire a une valeur nulle à midi solaire, une valeur positive durant l'après-midi, négative durant le matin et s'accroît de 15° par heure (un tour complet chaque 24 heures) [23, 29].

$$HRA = 15^\circ \times (LST - 12) \quad \text{II.8}$$

II.5.3.2 Angle d'élévation

L'angle d'élévation α est la hauteur angulaire du soleil dans le ciel mesuré à partir de l'horizontale (utilisé de façon interchangeable avec l'angle d'altitude). Globalement, l'altitude et l'élévation sont également utilisées pour décrire la hauteur en mètres par rapport au niveau de la mer. L'angle d'élévation varie durant la journée. Cela dépend aussi de la latitude d'un lieu

particulier et du jour de l'année. Ultérieurement, notre algorithme va calculer cet angle d'élévation et montrer cette variation sous forme d'un tableau II.1.

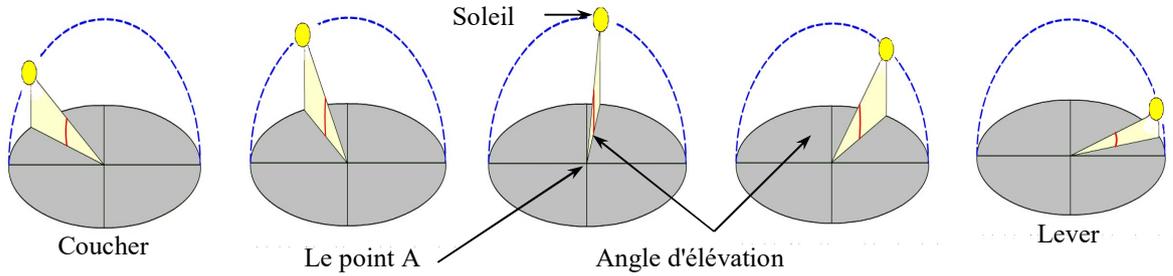


Figure II.7 Scénario de l'angle de l'élévation durant une journée

L'angle d'élévation maximale est un paramètre important dans la conception des systèmes photovoltaïques. Cet angle se produit à midi solaire et dépend de l'angle de déclinaison et de latitude [27].

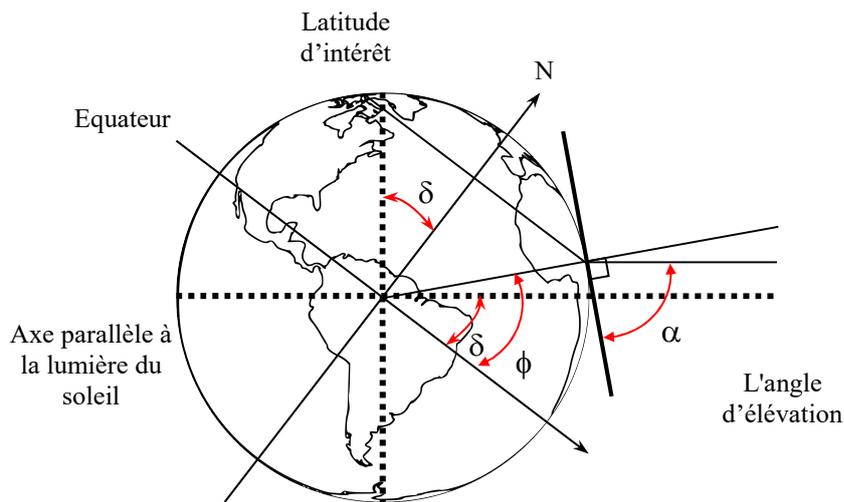


Figure II.8 Concept de l'angle d'élévation

L'angle d'élévation α peut être trouvé en suivant l'équation:

$$\alpha = \sin^{-1}(\sin \delta \times \sin \phi + \cos \delta \times \cos \phi \times \cos H) \tag{II.9}$$

Où:

H : est l'angle horaire,

δ : est l'angle de déclinaison,

ϕ : est la latitude du lieu de l'angle d'élévation au midi solaire (quand $H = 0$) est donné par :

$$\alpha = 90^\circ + \phi + \delta \text{ (Hémisphère nord)} \tag{II.10}$$

$$\alpha = 90^\circ - \phi + \delta \quad (\text{Hémisphère sud}) \quad \text{II.11}$$

II.5.3.3 Angle de zénith

L'angle de zénith est l'angle entre la ligne verticale à une place sur terre et la ligne joignant l'endroit au soleil ; comme illustré dans la figure II.9 [27, 29]. Cet angle a une relation avec l'angle d'élévation traduite par la formule qui suit :

$$\zeta = 90^\circ - \alpha \quad \text{II.12}$$

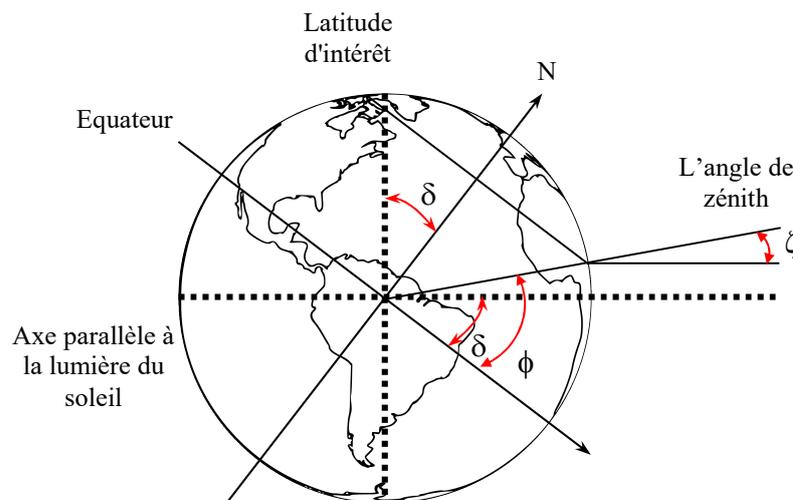


Figure II.9 Concept de l'angle zénith

L'angle d'inclinaison d'un module PV doit être égal à l'angle zénith pour une illumination maximale. L'angle du zénith au midi solaire est par définition l'angle entre la lumière solaire incidente et le lieu donné et est donné par : $(\phi - \delta)$.

II.5.3.4 Angle d'azimut

L'angle d'azimut (γ) est la distance angulaire de la projection du soleil sur le plan horizontal à un endroit donné d'une direction de référence [23, 27]. L'angle est mesuré du nord vers l'est comme illustré dans la figure II.10. Au midi solaire, le soleil est directement au sud dans l'hémisphère nord, alors qu'il est directement au nord dans l'hémisphère sud. L'angle d'azimut dépend essentiellement de la période de l'année en en autres mots, la saison et de la latitude de l'endroit. On peut trouver la valeur de l'angle d'azimut à n'importe quelle période et endroit en utilisant l'équation qui suit :

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{\sin \delta \times \cos \phi - \cos \delta \times \sin \phi \times \cos H}{\cos \alpha} \right) \quad \text{II.13}$$

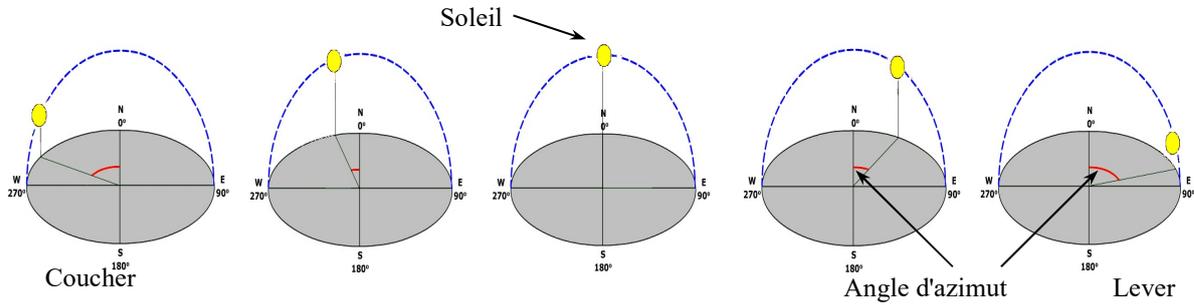


Figure II.10 L'angle d'azimut

Au lever du soleil sur l'équinoxe du printemps et d'automne, l'angle d'azimut est de 90°. Différents auteurs utilisent différentes conventions pour calculer l'angle d'azimut. Dans ce chapitre, l'angle d'azimut du nord est pris comme 0°; ici, tous les calculs sont faits en utilisant cette convention [30].

L'angle d'azimut est exactement la valeur de γ obtenue par L'équation II.6 lorsque H, l'angle horaire défini ci-dessous, est moins que zéro sinon c'est (360 - γ) quand $H > 0$.

II.5.4 Lever et coucher du soleil

Afin de calculer le lever et le coucher du soleil d'un endroit donné, la mise à zéro de l'altitude doit être appliquée et l'équation d'altitude ci-dessus est reformulée pour donner.

$$H_{lever} = 12 - \frac{1}{15^\circ} \cos^{-1} \left(\frac{-\sin \phi \times \sin \delta}{\cos \phi \times \cos \delta} \right) - \frac{TC}{60} \quad \text{II.14}$$

$$H_{coucher} = 12 + \frac{1}{15^\circ} \cos^{-1} \left(\frac{-\sin \phi \times \sin \delta}{\cos \phi \times \cos \delta} \right) - \frac{TC}{60} \quad \text{II.15}$$

La durée entre l'heure du lever et l'heure du coucher du soleil présente une illustration d'une durée complète d'ensoleillement pendant une autre présentation annuelle de la durée d'ensoleillement, confirme les résultats du calcul sous forme d'un graphe réalisé sous LabVIEW.

Day duration

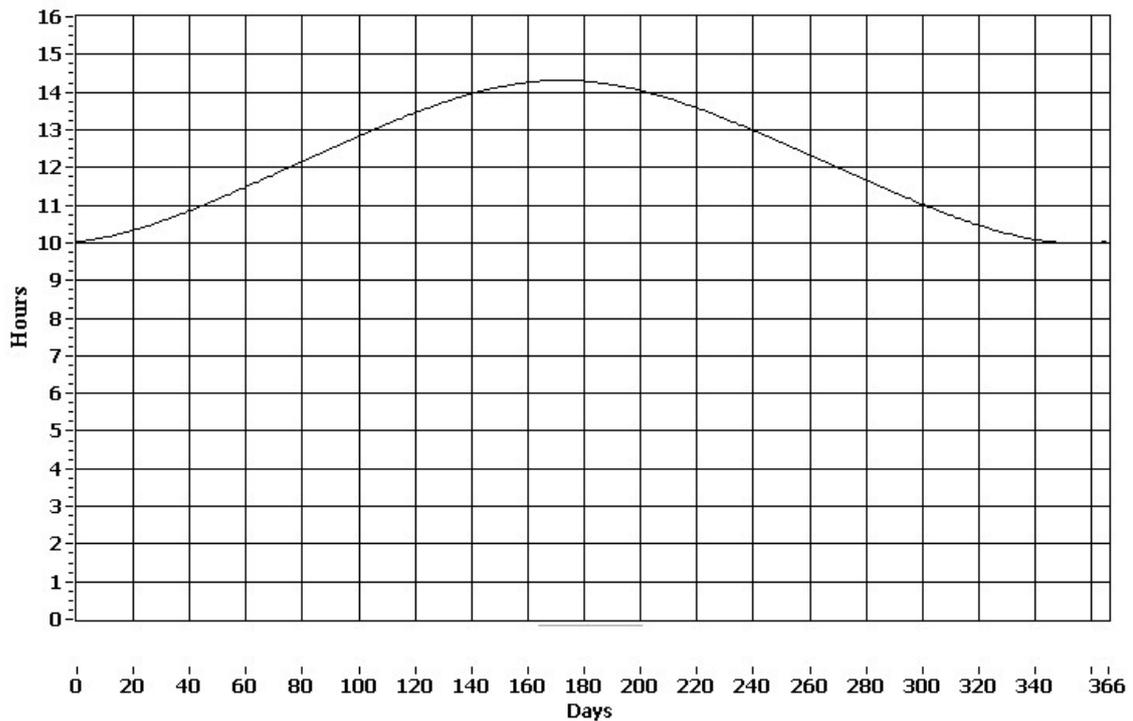


Figure II.11 Durée d'ensoleillement pendant l'année 2018 à Ain Beida [23]

Tous les calculs cités précédemment sont développés sous l'environnement LabVIEW par l'utilisation des blocs de commandes et des micros programmes. La figure ci-dessous présente le code global de la modélisation de la trajectoire du soleil sous forme de trames de commande désignées comme des sorties d'une carte Arduino (de laquelle, on va parler en détails ultérieurement) vers les deux actionnaires. Cette carte prend la relève de corriger l'écart angulaire (élévation et azimut) causé par la variation de la position du soleil quotidiennement et saisonnièrement [23, 27, 29, 30].

On peut considérer les heures du lever et du coucher du soleil comme des paramètres déterminants les points de début et de fin de l'angle d'azimut et les fins de course de la durée d'activité quotidienne du panneau photovoltaïque (démarrage et terminus). Ces deux paramètres horaires (lever et coucher de soleil) nous aident à éliminer l'utilisation des composants électroniques : les boutons poussoirs de fin de course.

II.6 Algorithme et démarche de calcul

Afin de poursuivre à tout moment la position du soleil et connaître les angles horaires du lieu d'installation des modules PV, une modélisation de la trajectoire du soleil est effectuée en employant un organigramme qui a été implanté sous forme d'un programme dans un microcontrôleur. On va détailler la conception électrique et mécanique dans le chapitre suivant.

Une démarche logique doit être franchie pour rendre le programme souple à exécuter par le microcontrôleur. Nous avons donc subdivisé cette opération en plusieurs étapes.

II.6.1 Localisation du lieu

Les grandeurs altitude, longitude et temps (année, mois, jour, heure, minute, seconde) sont considérées comme des entrées indispensables pour la modélisation du calcul des angles cités précédemment et de la trajectoire du soleil. Notre approche a simplifié la récolte de ces informations par l'utilisation des composants électroniques et des plateformes informatisées (GPS, Smartphone, réseau internet). Ces grandeurs ne présentent donc pas des obstacles au calcul des angles astronomiques. La figure qui suit présente un schéma synoptique pour ce concept.

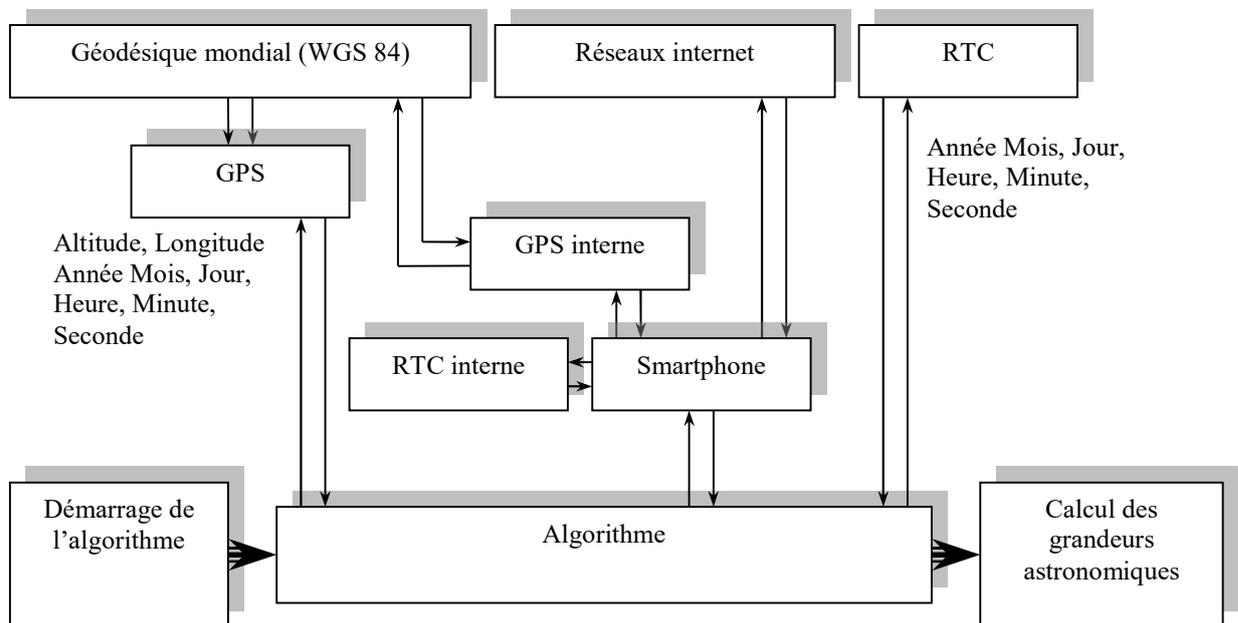


Figure II.12 Localisation de l'installation par les capteurs sensoriels

Un autre critère de choix entre ces éléments (GPS, RTC, Smartphone) qu'on va détailler dans le chapitre suivant favorise l'utilisation de l'un de ces derniers pour définir la date, l'heure locale et la différence de temps, vérifier si la latitude est à l'est donc positive ou à l'ouest alors négative, si la longitude est au nord donc positive ou au sud alors négative.

II.6.2 Calcul probabiliste

D'après les données récoltées par nos capteurs sensoriels, notre algorithme sélectionne le micro programme qui va les suivre pour calculer rapidement les angles d'élévation et azimutales ainsi que les heures du lever et du coucher de soleil avec un pas variable de calcul d'une minute à une heure.

Selon la date obtenue par l'RTC ou le GPS ou le réseau internet, on calcule la valeur de D (le nombre de jours) ainsi que sa valeur en degrés qui présente l'indice B dont on aura besoin dans le calcul de l'EoT et déduire la valeur de la déclinaison dont D est sa seule variable. L'algorithme ensuite, calcule la valeur de LSTM. En utilisant les valeurs de l'EoT, la longitude (donnée par les capteurs sensoriels) et la dernière valeur trouvée précédemment on obtient la grandeur TC. En utilisant LT et TC, on obtient la valeur de LST afin de trouver H.

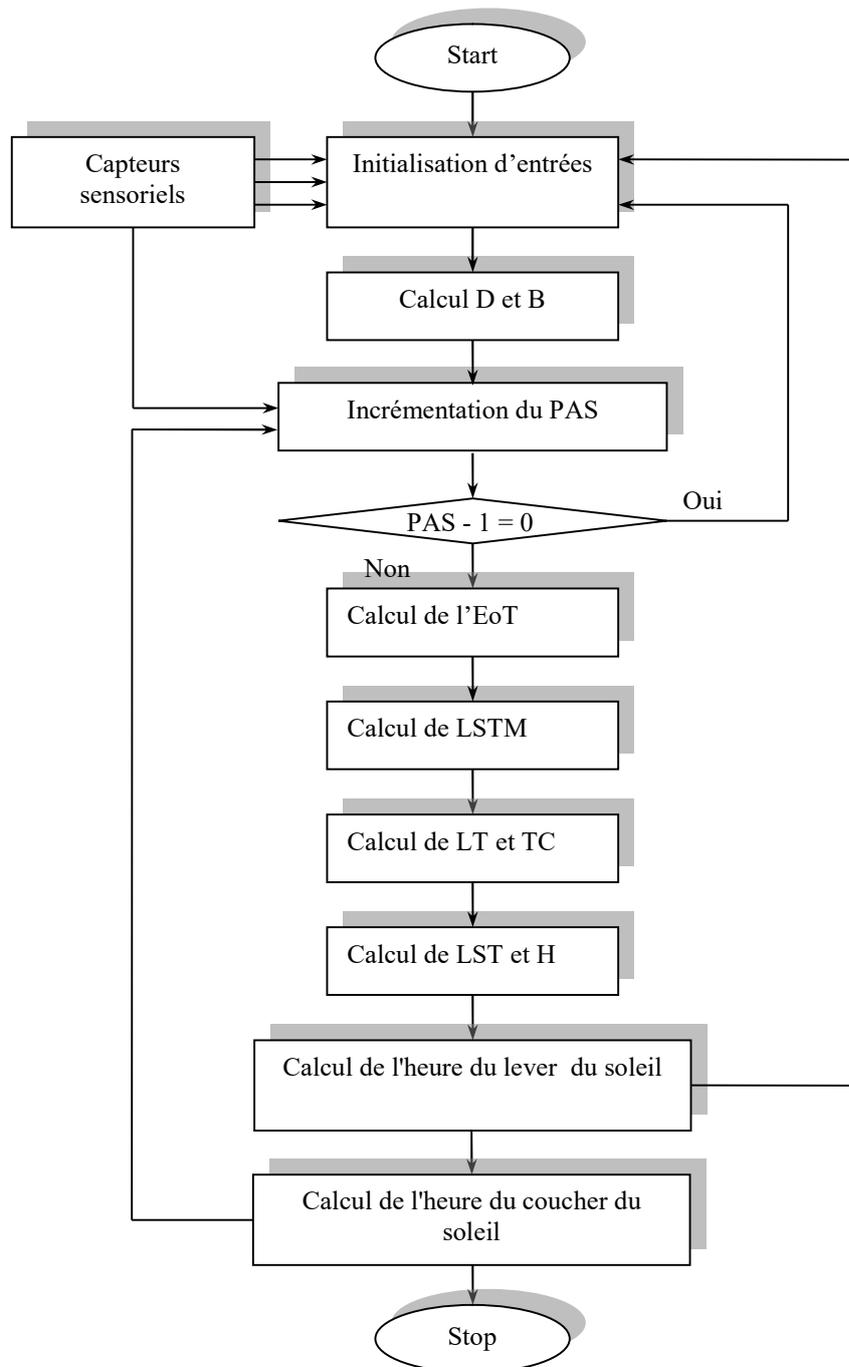


Figure II.13 Organigramme simplifiant du calcul des angles de poursuite et l'heure du lever et du coucher du soleil

Ces étapes sont effectuées afin de calculer à l'aide de la formule correspondante les valeurs de l'angle d'azimut, l'angle d'altitude et l'heure du lever et du coucher du soleil qui présentent des sorties de l'Arduino vers les actionnaires pour corriger l'écart dû au déplacement du soleil dans une trajectoire qui diffère de jour à l'autre. La figure ci-dessus montre la démarche du calcul sous forme d'un organigramme.

Pour mettre en évidence l'efficacité de notre algorithme de calcul sous Arduino, on présente les résultats obtenus sous forme de tableau II.1 en prenant le pas comme 5 minutes dans deux différents lieux et deux jours différents. Ces deux lieux qui sont respectivement Ain Beida et Constantine sont repérés à l'aide de nos capteurs sensoriels par deux grandeurs qui sont l'altitude et la longitude pour chaque lieu sont respectivement (latitude = $35^{\circ} 47' 53.278''$ N, longitude = $7^{\circ} 23' 31.824''$ E, latitude : $36^{\circ}21'54''$ N, longitude : $6^{\circ}36'52''$ E).

heure	Elévation	Azimut									
05:37:21	0°	89.64°	05:34:23	0°	89.68°	05:51:40	0°	89.58°	06:06:27	0°	89.61°
5:45:00	0.72°	90.72°	5:45:00	1.44°	91.18°	6:00:00	0.81°	91.03°	6:15:00	0.98°	90.97°
6:00:00	3.82°	93.15°	6:00:00	4.35°	93.32°	6:15:00	3.81°	93.20°	6:30:00	3.87°	93.01°
6:15:00	6.65°	95.22°	6:15:00	7.43°	95.34°	6:30:00	6.74°	95.44°	6:45:00	6.87°	95.22°
6:30:00	9.77°	97.55°	6:30:00	10.50°	97.78°	6:45:00	9.89°	97.57°	7:00:00	10.05°	97.44°
6:45:00	12.88°	99.80°	6:45:00	13.21°	100.24°	7:00:00	12.88°	99.80°	7:15:00	13.14°	99.56°
7:00:00	15.81°	102.20°	7:00:00	16.50°	102.54°	7:15:00	15.47°	102.41°	7:30:00	16.22°	102.11°
7:15:00	18.45°	104.60°	7:15:00	19.39°	104.75°	7:30:00	18.59°	104.74°	7:45:00	18.85°	104.64°
7:30:00	21.66°	107.11°	7:30:00	22.34°	107.14°	7:45:00	21.57°	107.23°	8:00:00	21.87°	106.87°
7:45:00	24.15°	109.80°	7:45:00	25.22°	110.47°	8:00:00	24.47°	110.09°	8:15:00	24.75°	109.48°
8:00:00	27.22°	112.51°	8:00:00	28.11°	112.85°	8:15:00	27.20°	112.60°	8:30:00	27.64°	112.34°
8:15:00	30.02°	115.41°	8:15:00	30.81°	115.67°	8:30:00	29.94°	115.64°	8:45:00	30.71°	115.15°
8:30:00	32.62°	118.54°	8:30:00	33.53°	118.74°	8:45:00	32.69°	118.84°	9:00:00	33.24°	118.14°
8:45:00	35.32°	121.66°	8:45:00	36.18°	121.87°	9:00:00	35.24°	122.01°	9:15:00	35.65°	121.57°
9:00:00	37.44°	125.23°	9:00:00	38.56°	125.51°	9:15:00	37.78°	125.45°	9:30:00	38.31°	124.65°
9:15:00	40.16°	128.9°	9:15:00	41.02°	129.29°	9:30:00	40.19°	129.33°	9:45:00	40.90°	128.18°
9:30:00	42.23°	132.86°	9:30:00	43.34°	133.34°	9:45:00	42.32°	133.27°	10:00:00	43.22°	132.24°
9:45:00	44.73°	137.15°	9:45:00	45.14°	137.67°	10:00:00	44.51°	137.35°	10:15:00	45.28°	137.25°
10:00:00	46.16°	141.62°	10:00:00	47.55°	142.22°	10:15:00	46.54°	142.09°	10:30:00	47.40°	141.33°
10:15:00	48.35°	146.49°	10:15:00	49.29°	147.25°	10:30:00	48.27°	146.75°	10:45:00	49.02°	146.42°
10:30:00	50.10°	151.85°	10:30:00	50.78°	152.54°	10:45:00	49.74°	152.21°	11:00:00	50.67°	151.54°
10:45:00	51.30°	157.29°	10:45:00	52.05°	158.15°	11:00:00	51.05°	157.55°	11:15:00	52.02°	157.31°
11:00:00	52.45°	163.11°	11:00:00	53.11°	164.12°	11:15:00	52.12°	163.51°	11:30:00	53.10°	163.27°
11:15:00	53.17°	169.24°	11:15:00	53.60°	170.33°	11:30:00	52.67°	169.53°	11:45:00	53.77°	169.42°
11:30:00	53.44°	175.44°	11:30:00	54.20°	176°	11:45:00	53.12°	175.72°	12:00:00	54.18°	175.87°
11:45:00	53.56°	181.69°	11:45:00	54.05°	183.21°	12:00:00	53.11°	181.87°	12:15:00	54.35°	182.24°
12:00:00	53.22°	187.95°	12:00:00	53.68°	189.46°	12:15:00	52.94°	188.24°	12:30:00	53.99°	188.34°
12:15:00	52.72°	194.11°	12:15:00	53.11°	195.56°	12:30:00	52.30°	194.32°	12:45:00	53.39°	194.72°
12:30:00	51.94°	200.21°	12:30:00	52.24°	201.67°	12:45:00	51.51°	200.22°	13:00:00	52.48°	200.89°
12:45:00	50.57°	205.85°	12:45:00	50.91°	207.26°	13:00:00	50.24°	205.94°	13:15:00	51.20°	206.47°
13:00:00	49.13°	211.21°	13:00:00	49.38°	212.47°	13:15:00	48.99°	211.21°	13:30:00	49.75°	211.86°
13:15:00	47.44°	216.31°	13:15:00	47.57°	217.48°	13:30:00	47.59°	216.24°	13:45:00	47.23°	216.65°
13:30:00	45.57°	221.21°	13:30:00	45.14°	222.36°	13:45:00	45.18°	221.07°	14:00:00	46.12°	221.57°
13:45:00	43.66°	224.19°	13:45:00	43.57°	226.48°	14:00:00	43.32°	225.43°	14:15:00	43.89°	226.11°
14:00:00	41.37°	229.41°	14:00:00	41.21°	230.57°	14:15:00	41.17°	229.43°	14:30:00	41.54°	230.27°

14:15:00	39.03°	233.32°	14:15:00	38.81°	234.47°	14:30:00	38.58°	233.22°	14:45:00	39.18°	234.14°
14:30:00	36.56°	236.78°	14:30:00	36.24°	237.84°	14:45:00	36.38°	236.67°	15:00:00	36.76°	237.54°
14:45:00	33.98°	240.18°	14:45:00	33.83°	241.10°	15:00:00	33.72°	240.21°	15:15:00	34.01°	240.91°
15:00:00	31.32°	243.37°	15:00:00	31.40°	244.29°	15:15:00	31.09°	243.25°	15:30:00	31.56°	243.87°
15:15:00	28.59°	246.39°	15:15:00	28.19°	247.25°	15:30:00	28.24°	246.33°	15:45:00	28.69°	246.75°
15:30:00	25.8°	249.21°	15:30:00	25.29°	250.10°	15:45:00	25.55°	249.11°	16:00:00	25.85°	249.54°
15:45:00	22.96°	251.90°	15:45:00	22.69°	252.78°	16:00:00	22.61°	251.89°	16:15:00	23.09°	252.18°
16:00:00	20.07°	254.44°	16:00:00	19.79°	255.14°	16:15:00	19.81°	254.33°	16:30:00	20.17°	254.61°
16:15:00	17.15°	256.85°	16:15:00	16.40°	257.59°	16:30:00	16.88°	256.95°	16:45:00	17.54°	257.18°
16:30:00	14.19°	259.16°	16:30:00	13.72°	259.74°	16:45:00	13.98°	259.32°	17:00:00	14.22°	259.50°
16:45:00	11.22°	261.62°	16:45:00	10.71°	262.10°	17:00:00	11.11°	261.55°	17:15:00	11.19°	261.83°
17:00:00	8.22°	263.91°	17:00:00	7.74°	264.25°	17:15:00	8.09°	263.80°	17:30:00	8.45°	264.07°
17:15:00	5.22°	266.17°	17:15:00	4.64°	266.77°	17:30:00	5.12°	266.13°	17:45:00	5.28°	266.23°
17:30:00	2.2°	268.41°	17:30:00	1.67°	269.07°	17:45:00	2.14°	268.51°	18:00:00	2.12°	268.58°
17:45:05	-0.833°	270.65°	17:42:03	0°	270.64°	17:59:27	0°	270.54°	18:14:10	0°	270.66°

Tableau II.1 Valeurs des angles astronomiques obtenus par l'algorithme de deux lieux avec un pas de 5 minutes

II.7 Environnement de programmation

Le choix de l'environnement de développement du programme est un choix délicat puisque notre approche exige une collaboration entre un système embarqué qui est la carte Arduino et un environnement de programmation visuel qui collabore à son tour avec des instruments sensoriels virtuels. Notre choix a été la sélection de LabVIEW [23].

II.7.1 Pourquoi l'environnement LabVIEW ?

L'environnement LabVIEW «Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench » en anglais est souvent considéré comme un ensemble d'instruments virtuels comme son nom l'indique ou VIs. L'apparence et le fonctionnement de ses derniers imitent souvent les instruments physiques tels que des oscilloscopes, des boussoles et des multimètres. LabVIEW intègre un ensemble complet d'outils pour acquérir, analyser, afficher et stocker des données ainsi que des outils pour décrypter le code écrit.

LabVIEW est un environnement de développement en langage « G ». Il a été créé en 1986, initialement pour Apple Macintosh, qui était à l'époque, l'un des seuls ordinateurs proposant une interface graphique native. L'histoire de LabVIEW explique un vocabulaire spécifique et détaille encore certaines actions.

LabVIEW est un environnement de développement propriétaire (par opposition à un environnement ouvert, permettant à plusieurs personnes de développer des compilateurs compatibles, comme pour C/C++, Ada, Java, Fortran, etc.) développés et vendus par la société National Instruments (NI). Le premier métier de NI est de fabriquer du matériel d'acquisition

(notamment sur le protocole GPIB au début des années 80) rapidement destiné au marché des micro-ordinateurs (IBM PC, Apple Macintosh). Ainsi, la première version de LabVIEW s'attache à offrir un environnement de développement dont le rôle est de permettre simplement à l'utilisateur de créer des instruments virtuels utilisant le matériel d'acquisition NI pour reproduire sur un micro-ordinateur le comportement d'un instrument personnalisé et personnalisable à volonté. La figure ci-dessous présente la fenêtre d'interface de l'application réalisée sous LabVIEW.

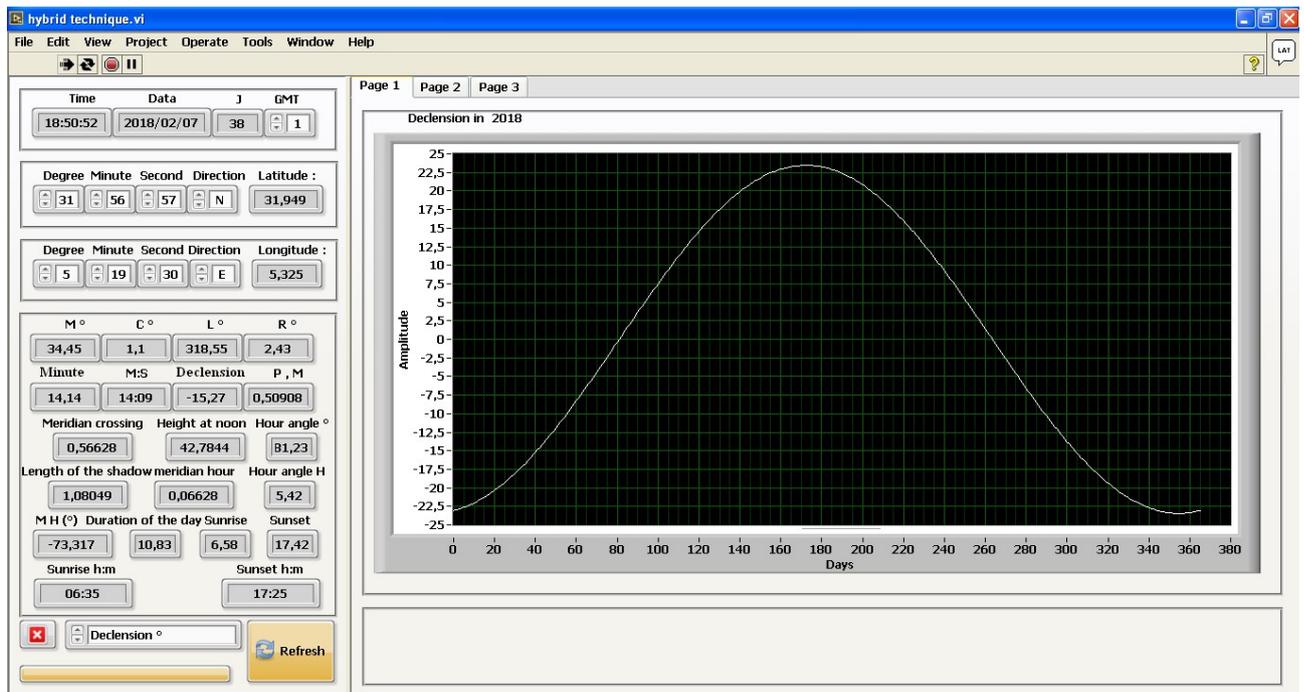


Figure II.14 Interface de l'application réalisée sous LabVIEW

On distingue deux parties sur cette fenêtre. Dans le côté gauche, toutes les données récoltées par nos capteurs sensoriels sont affichées sur « TextEdit » et sont dimensionnées par notre algorithme comme des entrées. Toutes les sorties mentionnées précédemment qui ont une relation avec le calcul des angles astronomiques et des fins de course sont aussi affichées sur « TextEdit ». Le côté droit est dédié à la visualisation graphique. Cette interface s'actualise automatiquement à chaque pas et les valeurs des données d'entrées et de sorties changent. Cette interruption se déclenche par l'RTC de l'ordinateur si on veut visualiser cette interface, sinon l'actualisation se déclenche à partir de l'RTC lié à l'Arduino.

Donc, cette application présente l'interface graphique entre l'ordinateur et l'Arduino. Elle a comme tâche de confirmer le calcul des angles de correction du panneau à partir des angles solaires et tracer les différentes valeurs récoltées par les capteurs.

II.7.2 Démarche logarithmique sous LabVIEW

Le développement de l'algorithme de calcul et la modélisation de la trajectoire du soleil selon les équations de temps sont faits sous l'environnement LabVIEW à l'aide de l'extension LIFA qui a comme tâche d'offrir un environnement de développement dont le rôle est de permettre simplement à l'utilisateur de créer des instruments virtuels maître microcontrôleurs.

La méthode est principalement dépendante du langage de machine qui convient à gérer un code HEX plus proche du noyau du microcontrôleur de l'Arduino. La figure ci-dessous montre un le bloque principal de la commande à travers l'extension LIFA sous LabVIEW.

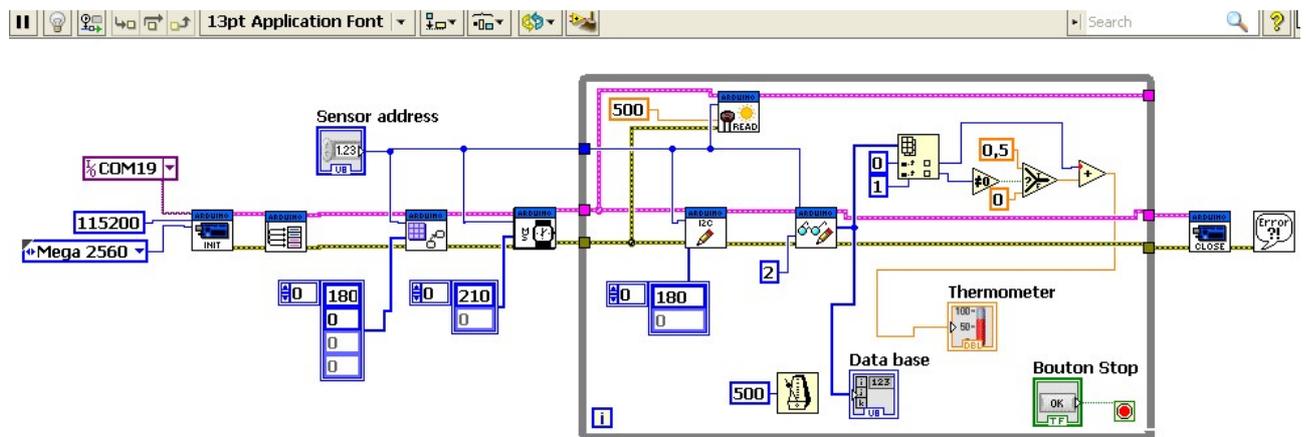


Figure II.15 Diagramme global de l'emplacement du code HEX de la modalisation de la trajectoire du soleil

Sur le plan réel, notre algorithme doit être exécuté par un microcontrôleur d'une carte Arduino. C'est pour cela, qu'il faut d'abord préparer la carte Arduino pour qu'elle soit prête à communiquer avec le programme réalisé sous LabVIEW.

Il faut installer le pilote NI-VISA pour faciliter la communication avec notre instrument. En outre, l'installation du NI-488.2 est indispensable pour l'utilisation d'un périphérique NI GPIB dans notre application. L'installation du pilote NI-488.2 doit être effectuée avant celle des nouveaux périphériques matériels GPIB NI afin que Windows puisse les détecter. Les fonctions de contrôle du port USB ne sont pas disponibles. Il faudrait donc ouvrir la session VISA et déclarer le numéro de la carte associée dans le contrôle « nom de ressource VISA ».

VISA ou « Virtual Instrument Software Architecture en anglais » est la plateforme logicielle d'application qu'on a employée pour assurer la communication avec les pilotes d'entrées et de sorties installés sur le système. On pourrait facilement réutiliser le code (les pilotes d'instruments)

dans d'autres genres d'interfaces, plateformes ou langages. VISA est donc considérée comme une API (interface d'application) qui nous aide à standardiser la communication avec les pilotes.

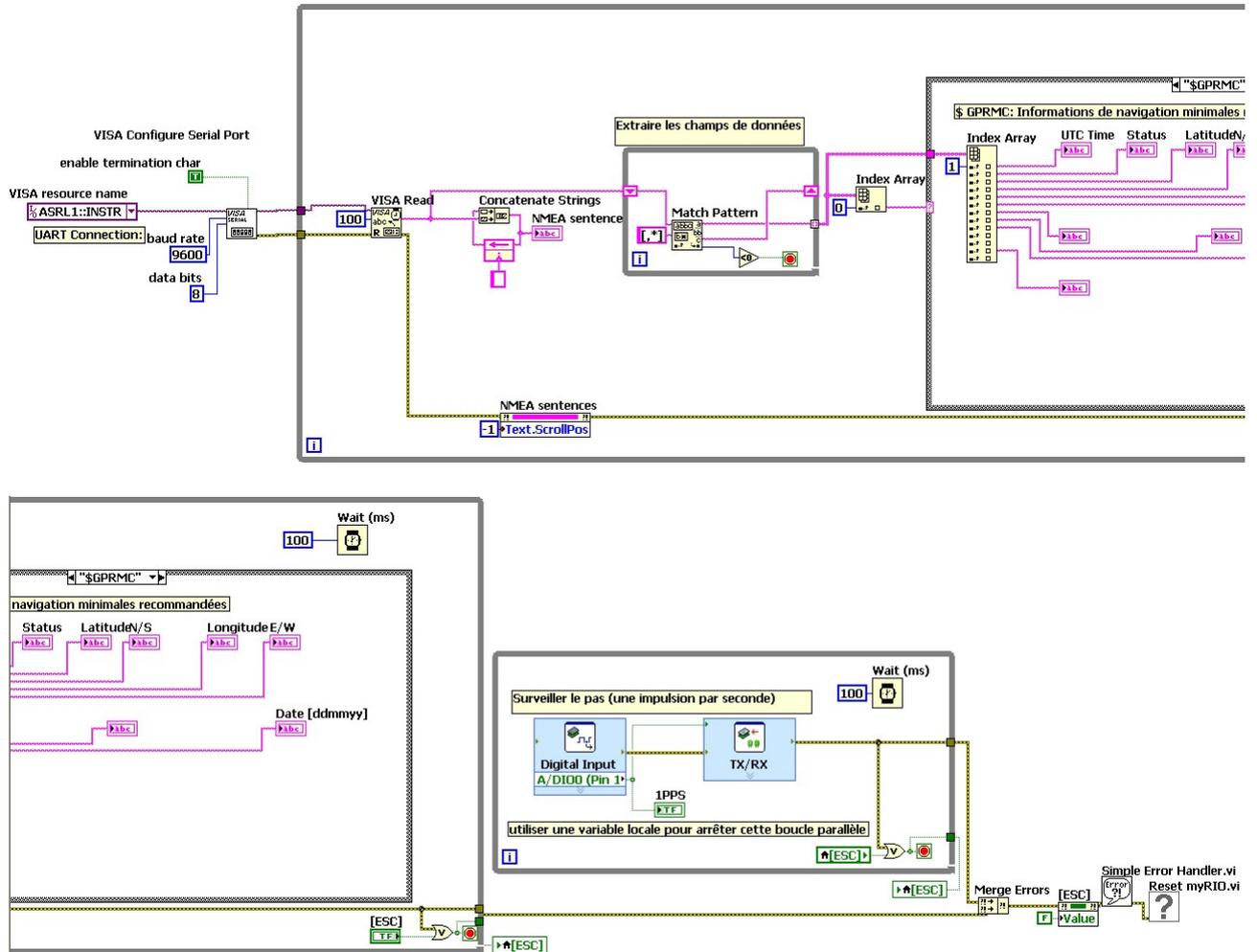


Figure II.16 Manipulation des entrées GPS par LabVIEW

Plusieurs palettes de type Commandes et Fonctions ont été associées dans le diagramme présenté sur la figure II.16 pour acquérir les entrées nécessaires qui font partie du calcul des angles astronomiques (date, heure, altitude, longitude). Dans la classe VISA, des outils ont été spécialement conçus pour la réservation des ressources matérielles.

Cette section du diagramme figure II.16 dépend principalement des équations du temps qui déterminent les angles astronomiques ainsi que l'angle du lever et du coucher du soleil, après correction ; l'algorithme met la carte Arduino en mode sommeil et ne se remet pas à calculer les angles cités précédemment jusqu'à ce que le pas s'écoule. La conversion degré \ temps des valeurs est effectuée dans ce diagramme peut importe son type à l'aide des plusieurs palettes.

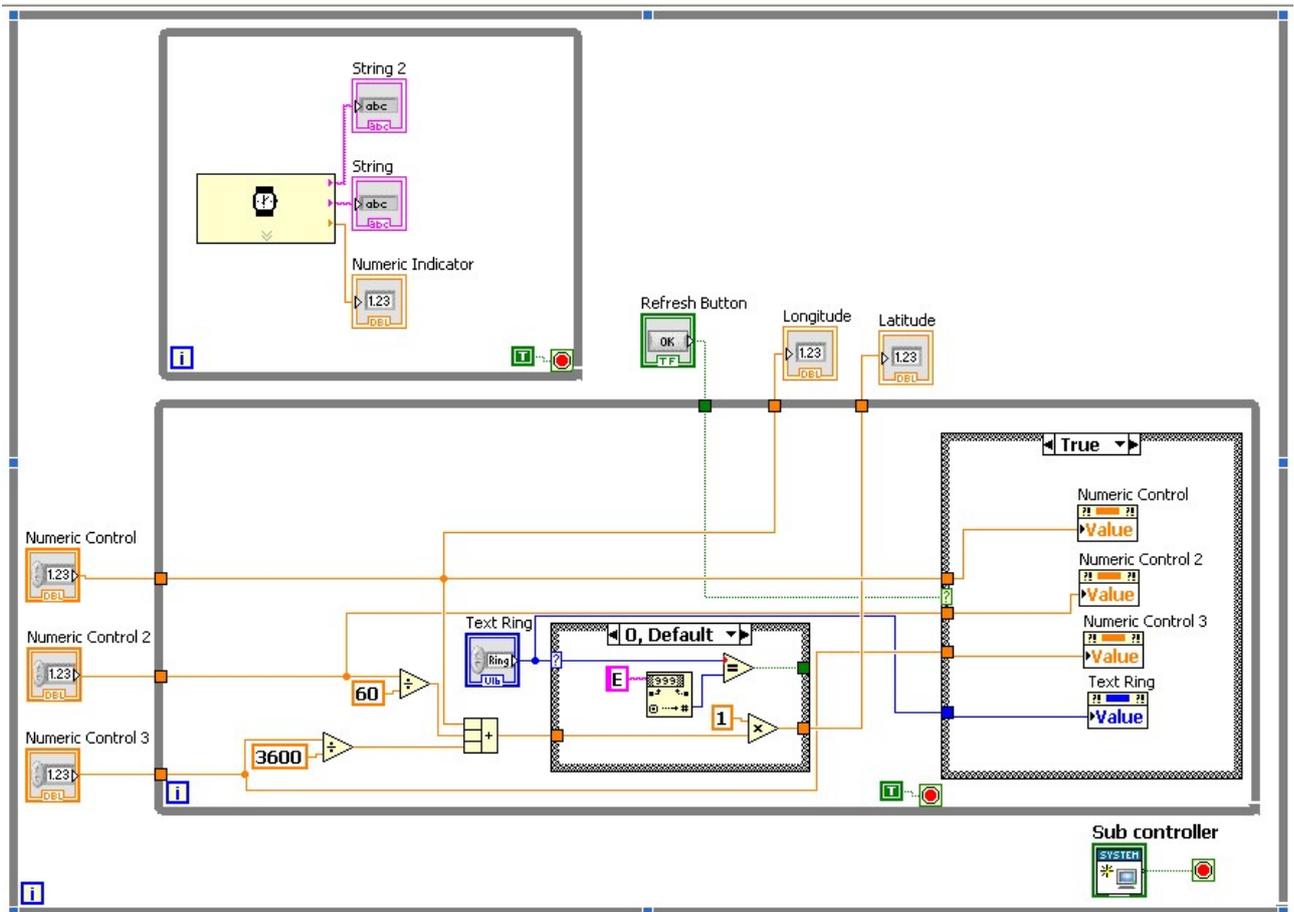


Figure II.17 Différentes conversions par les palettes de Commandes de LabVIEW

II.8 Résultats et interprétation

Pour généraliser le fonctionnement et valider l'efficacité de notre algorithme, nous l'avons testé sur cinq lieux différents du territoire national qui représentent des centrales photovoltaïques dédiées à la production électrique algérienne qui seront présentées géographiquement sur la figure II.18 où chaque lieu est repéré par ses coordonnées polaires :

1. La centrale solaire photovoltaïque de Ain El Melh (M'sila) avec une puissance de production de 20 mégawatts.
2. La station d'énergie solaire photovoltaïque de Oued El Keberit / Souk Ahras avec une puissance de production de 15 MW.
3. La centrale photovoltaïque de la Nouvelle ville de Boughezoul théoriquement avec une capacité de production de 1 MW.
4. La mini-centrale solaire d'une puissance de production de 1,1 MW à la wilaya de Ghardaïa.

5. La centrale électrique dans la région de Sedret-Leghzal (Ouest de Nâama) d'une capacité de production de 20 MW.

Le tableau II.2 qui suit, nous donne la localisation astronomique de ces centrales par nos capteurs sensoriels.

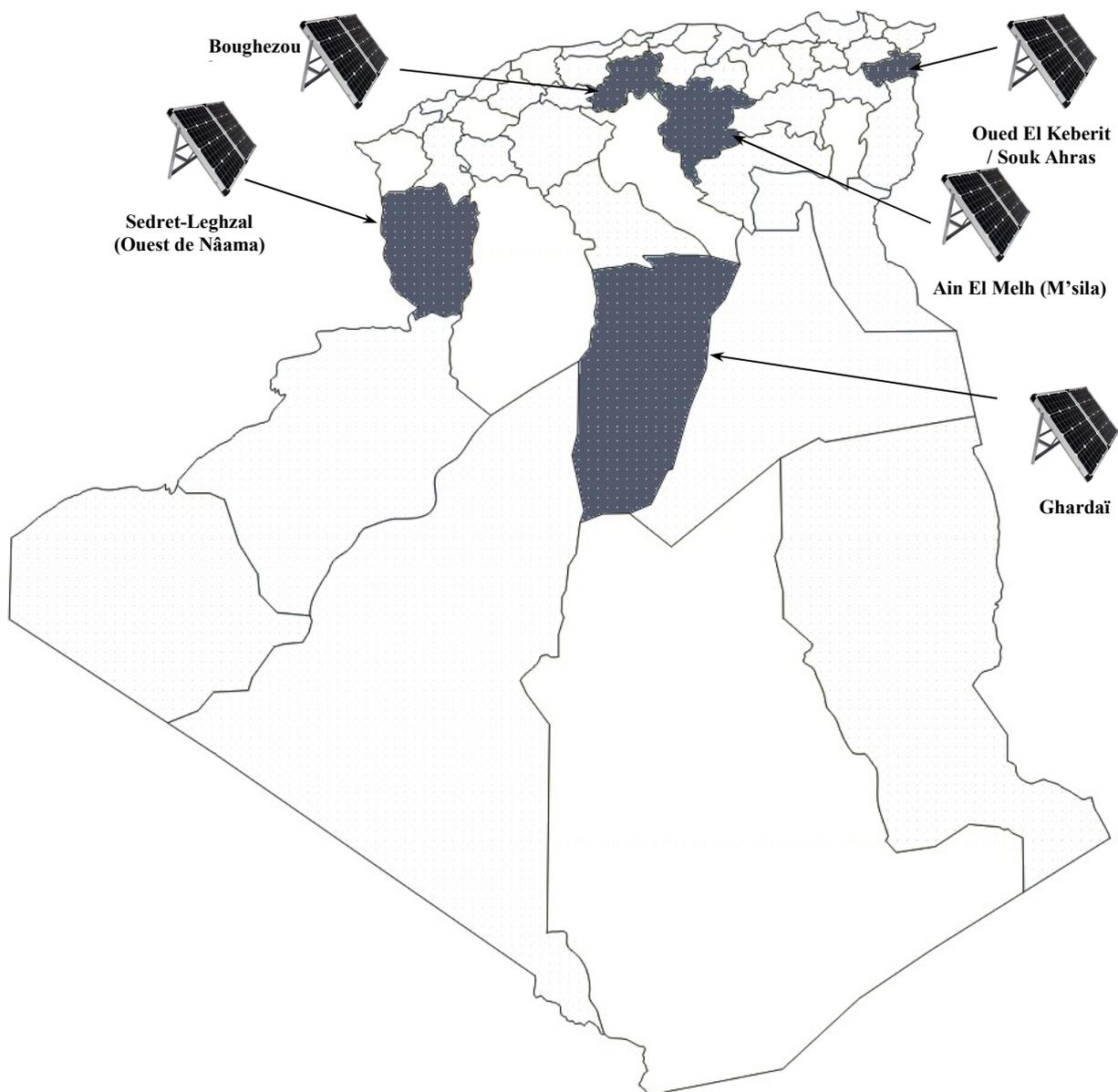


Figure II.18 Carte géographique de la localisation des cinq différentes centrales photovoltaïques à étudier en Algérie

La centrale	M'sila	Souk Ahras	Boughezoul	Ghardaïa	Nâama
L'altitude	35°18'59.879" N	36°16'10.514" N	35°45'1.922" N	32°29'24.809" N	33°26'6.221" N
longitude	4°14'0.008" E	7°56'54.203" E	2°44'17.402" E	3°40'25.828" E	0°54'20.384" W

Le tableau II.2 Localisation astronomique des cinq centrales photovoltaïques en Algérie

Les figures II.19 et II.20 concernent l'évolution des angles astronomiques « azimut et élévation » calculés par l'Arduino et affichés par l'environnement LabVIEW pendant la durée d'ensoleillement complète au début des six premiers mois de 2018 pour la ville d'Ain Beida repérée par ses coordonnées polaires citées précédemment.

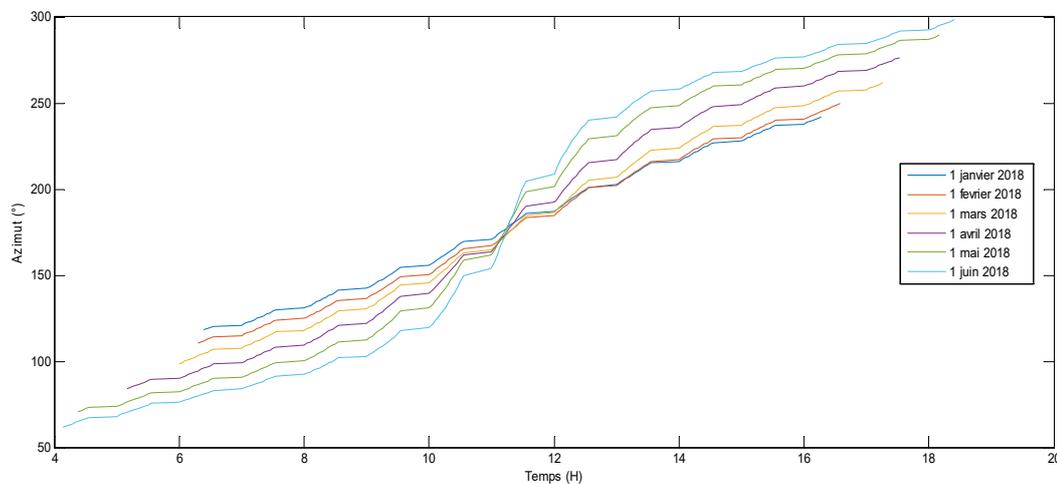


Figure II.19 Angle d'azimut en fonction du temps durant six différents mois de l'année

Cette figure nous donne l'influence de la variation saisonnière sur le rendement d'un panneau photovoltaïque au même endroit. Si on effectue une projection directe des extrémités de ces tracés sur l'axe x, on distingue la durée optimale obtenue par notre algorithme qui présente les fins de course (lever et coucher de soleil cités précédemment). On constate que le mois de Juin comme titre d'exemple comparé au cinq autres mois, offre la plus longue durée d'ensoleillement (15 :45 :31) pour un lever de soleil et un coucher de soleil respectivement égal à (04 :15 :40) et (19 :41 :11). En revanche, le mois de décembre possède la plus courte durée d'ensoleillement (09 :47 :05) pour un lever de soleil égal à (06 :40 :31) et un coucher de soleil égal à (17 :27 :36).

Si on analyse les tracés sur l'axe y qui représente l'angle azimutal, on observe que le mois de Juin possède une grande plage de modification angulaire de 61.75° à 298.35°, ce qui implique des pas de correction supplémentaires. Par contre, le mois de Décembre possède une courte plage de variation angulaire azimutale de 118.11° à 141.93°. On déduit donc que plus on s'approche du plus long jour solaire, plus la durée d'ensoleillement et la plage de variation angulaire azimutale

augmente. On doit alors augmenter le nombre de pas de correction pour atteindre un rendement optimal.

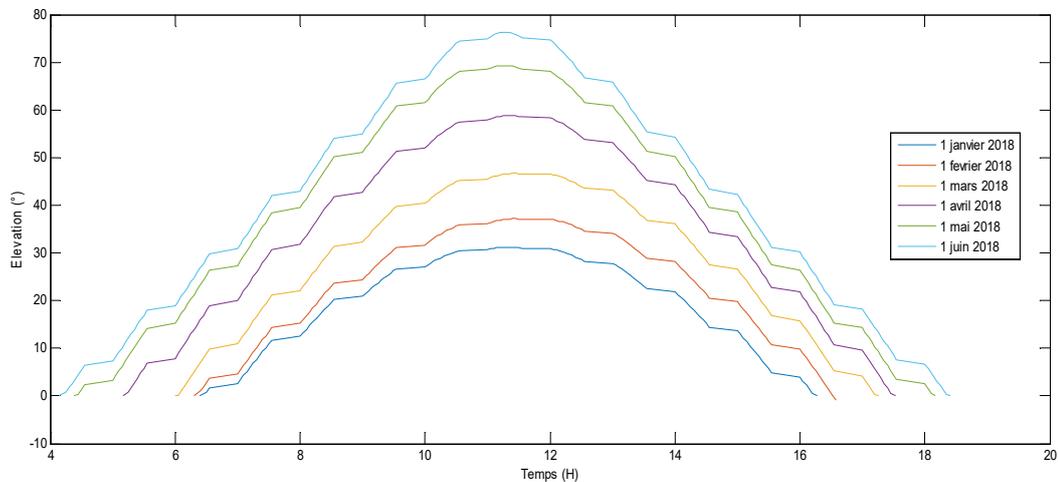


Figure II.20 Angle d'élevation en fonction du temps durant six différents mois de l'année

En se basant sur les résultats de notre organigramme cités précédemment, on a créé un programme sous LabVIEW qui va prendre en charge d'exposer les résultats graphiquement des valeurs des angles d'élevation et d'azimut pendant une durée d'ensoleillement complète. Le lever, le coucher du soleil et la durée du jour seront également affichés sur notre interface et un écran tactile qu'on va détailler dans le chapitre suivant. Pour optimiser les fonctionnalités de notre approche, on a renforcé la conception de notre système globale par un ajout d'un système de stockage qui est une carte mémoire dans laquelle, on trouve une base de données qui emmagasine les valeurs citées précédemment ainsi que les résultats obtenus par les calculs de notre algorithme. Plus de détails seront exposés dans le chapitre suivant.

Les données de sortie nous permettront de comprendre la trajectoire du soleil pour n'importe quel endroit et à n'importe quel jour. Nous serons également en mesure de calculer la variation quotidienne et saisonnière du chemin du soleil. Dans notre expérimentation, les figures ci-dessous (II.21, II.22) présentent l'allure de la trajectoire définie par les angles astronomiques (élévation et azimut) pour les cinq emplacements cités précédemment.

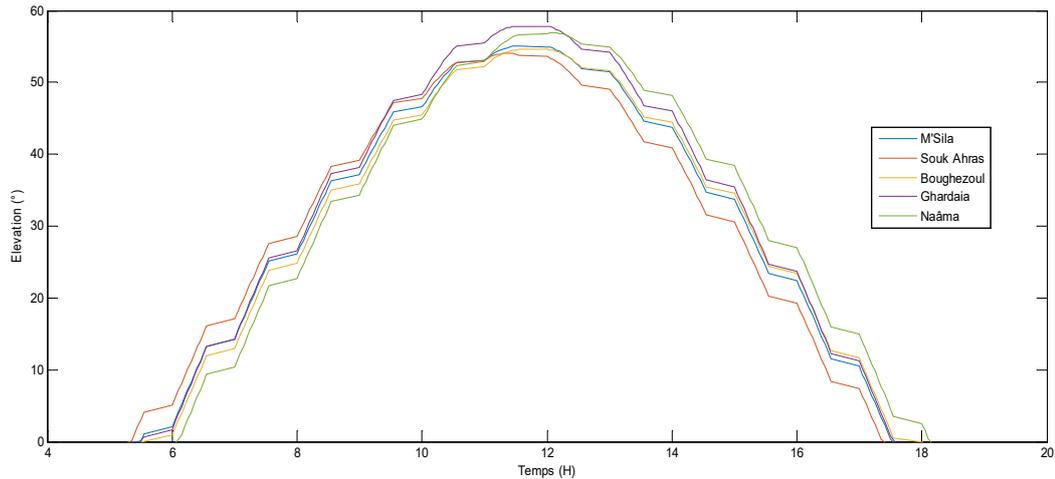


Figure II.21 Allure de l'élévation en fonction du temps pour cinq différentes centrales photovoltaïques durant la même journée 21 mars 2018

La figure (II.21) montre l'évolution de l'angle d'élévation de cinq emplacements des centrales solaires en Algérie le 21 mars 2018.

Si on effectue une comparaison selon l'axe y qui présente la variation d'angle d'élévation entre les différentes centrales, on peut remarquer que la zone de Ghardaïa possède l'angle d'élévation le plus grand, soit 58° . D'une autre part, la zone de Souk Ahras possède la valeur d'élévation la plus petite comparé à celles des autres centrales. Si on précise l'observation des valeurs des angles d'élévation au midi solaire pour les autres zones restantes avec les valeurs d'élévation maximales et minimales respectivement des zones de Ghardaïa et Souk Ahras, on constate que plus l'altitude est petite, plus l'angle de correction atteint des valeurs d'angles d'élévation plus grandes et cela au midi solaire pour n'importe quel endroit donné de cette zone.

Si on effectue une comparaison selon l'axe x qui correspond à la durée d'ensoleillement toujours sur le même tracé de la figure II.21, on remarque que le lever et le coucher du soleil de Souk Ahras commence avant les autre zones à (05 :30 - 17 :40) alors que la zone de Naâma possède le lever et le coucher de soleil le plus attardé (06 :06 - 18 :15). Si on utilise le tableau II.2 comme référence d'observation, on constate que l'ordre des heures du lever et du coucher de soleil varie selon les valeurs de longitude de l'endroit. Plus la valeur de longitude est grande, plus les heures du lever et du coucher du soleil sont avancées.

Les allures des courbes sont presque similaires entre elles en ce qui concerne leur forme générale, la durée est presque fixe (12:10:00). Toute information correspond aux cinq lieux d'installations photovoltaïques est mentionnée sur le tableau II.3.

Lieu d'installation des centrales photovoltaïques		M'Sila	Souk Ahras	Boughezoul	Ghardaia	Naâma
Entrée par GPS	Latitude	35°42'20" N	36°17'17" N	35°42' 14" N	32°31'29" N	33°31'22" N
	Longitude	4°32'30" E	7°57'11" E	2° 43' 52" E	3° 41' 11" E	0° 55' 38" W
Conversion par algorithme	Latitude	35.70583	36.288055	35.703888	32.524722	33.522777
	Longitude	4.541940	7.953055	2.731111	3.686388	-0.927222
Lever du soleil		05:46:32	05:32:02	05:50:53	05:47:52	06:07:10
Coucher du soleil		17:56:39	17:42:13	18:00:41	17:56:49	18:16:44
Durée d'ensoleillement		12:10:07	12:10:11	12:09:48	12:08:57	12:09:34
Midi solaire		11:51:36	11:37:08	11:55:47	11:52:20	12:11:57
L'angle d'azimut au lever		89.19°	89.11°	89.12°	89.2°	89.17°
L'angle d'azimut au coucher		271.21°	271.14°	271.13°	271.04°	271.07°

Tableau II.3 Informations données par notre algorithme correspondant aux cinq lieux d'installations photovoltaïques en Algérie

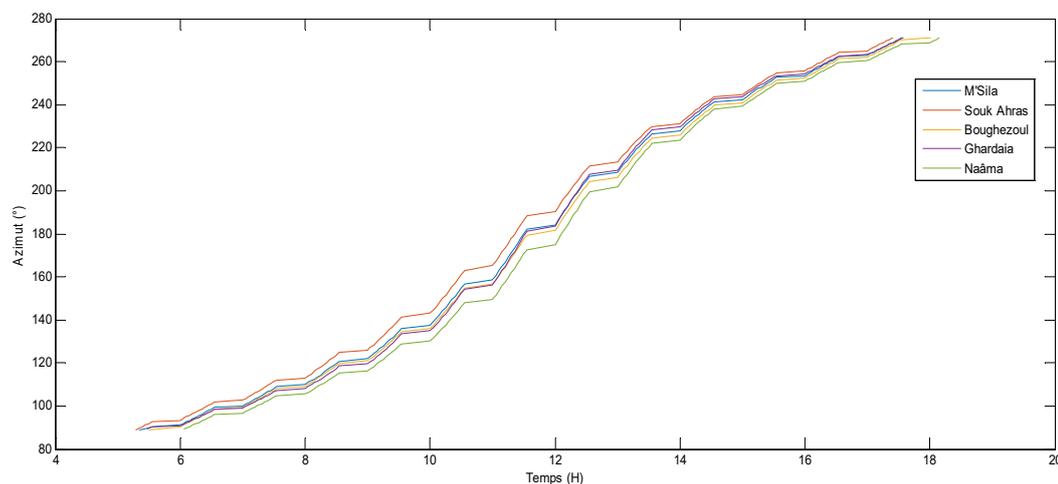
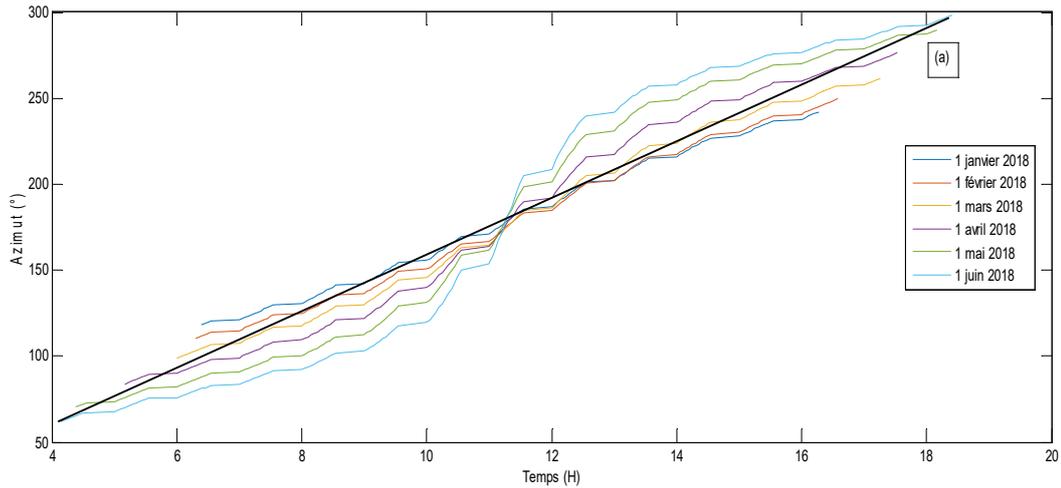


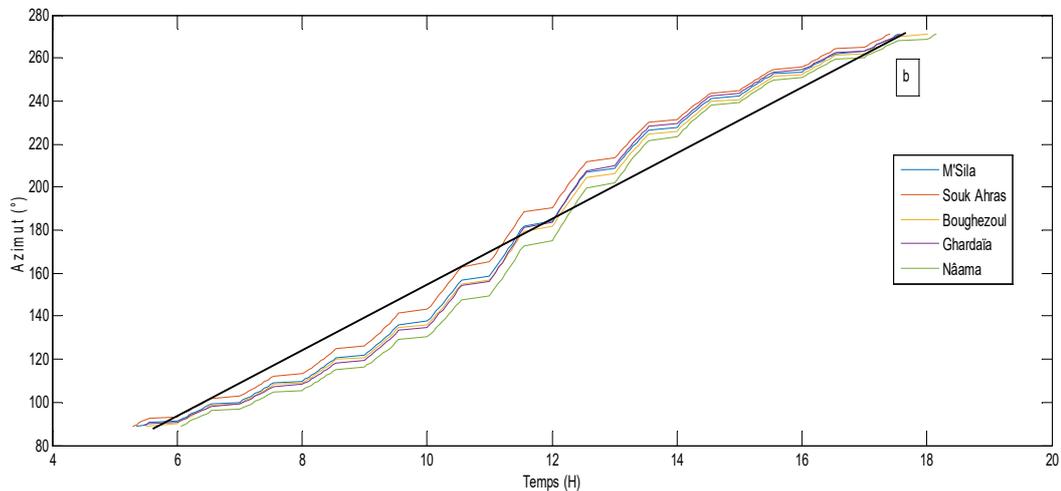
Figure II.22 Allure de l'azimut en fonction du temps pour cinq différentes centrales photovoltaïques durant la même journée 21 mars 2018

La figure II.22 donne la variation de l'angle d'azimut toujours pour les cinq lieux d'installation photovoltaïque en Algérie. Ces angles sont calculés par l'algorithme le 21 mars 2018.

Si on prend comme repère d'analyse l'axe x, on remarque que le midi solaire présente un axe de symétrie pour la durée d'ensoleillement où la première moitié de l'allure présente un tracé parabolique inférieur et la deuxième présente son image mais dans une forme parabolique supérieure. Cette variation de l'angle azimut quotidienne est croissante pendant la durée d'ensoleillement, nous aide ultérieurement (chapitre III) à mettre un plan de poursuite afin de corriger l'écart angulaire dû au déplacement du soleil.



(1)



(2)

Figure II.23 Tracé standard de l'angle d'azimut en fonction du temps par rapport à ceux de l'azimut qui correspondent à la variation de la période de l'année et l'endroit

Les lignes a et b illustrées sur l'allure (1) et (2) de la figure II.23 présentent des droites linéaires qui commencent par le lever du soleil au coucher du soleil et dont le centre présente le

midi solaire sur l'axe x. L'inclinaison de cette droite ρ présente une correction standard avec un pas stable. Si on effectue une comparaison entre ces lignes droites a et b et les tracés obtenus par notre algorithme, on pourrait constater qu'avec la variation de lieu (a) et de temps (b), il existe une déviation angulaire supplémentaire qui présente une correction améliorée qui se traduirait au rendement par des gains énergétiques.

On observe que plus on éloigne les tracés de ces lignes droites plus on peut remarquer l'existence des valeurs angulaires supplémentaires avec lesquelles, on pourrait améliorer la correction et le rendement.

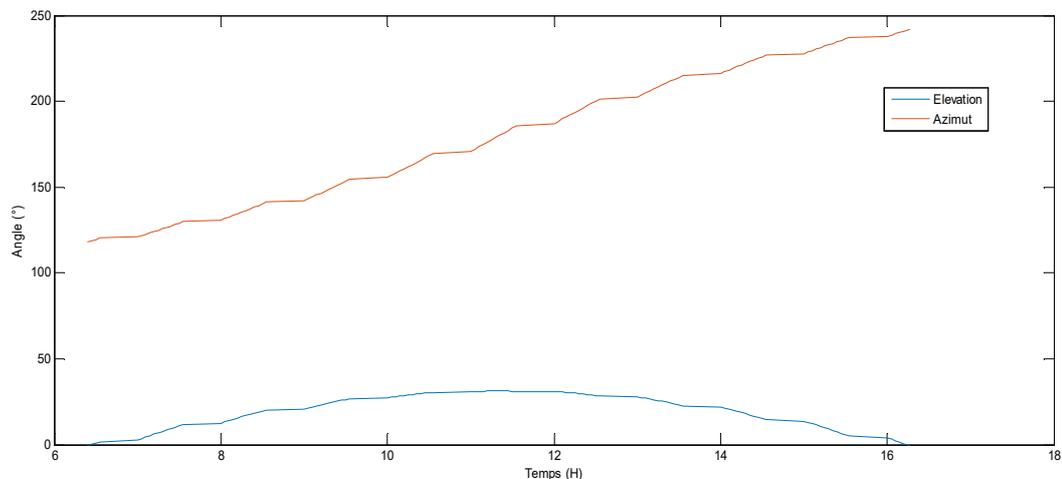


Figure II.24 Allure des angles astronomiques (élévation et azimut) en fonction du temps à Ain Beida

Cette courbe illustre la présentation graphique de deux angles astronomiques sur laquelle l'élévation est tracée en bleu et l'azimut en rouge dans la même journée d'ensoleillement (1^{er} Janvier 2018). On remarque une grande différence entre la valeur de l'angle d'azimut au lever du soleil et celle du coucher de soleil comparée à celle de l'angle d'élévation. L'influence des corrections sur l'angle azimutal est donc supérieure à celle de l'angle d'élévation. En pratique, les moteurs qui prennent en charge cette correction n'ont pas la même fréquence de fonctionnement. Cela sera expliqué dans le chapitre suivant.

L'allure des courbes de cette figure pourraient être un critère de choix pour les constructeurs des installations des systèmes de poursuite à un ou deux axes.

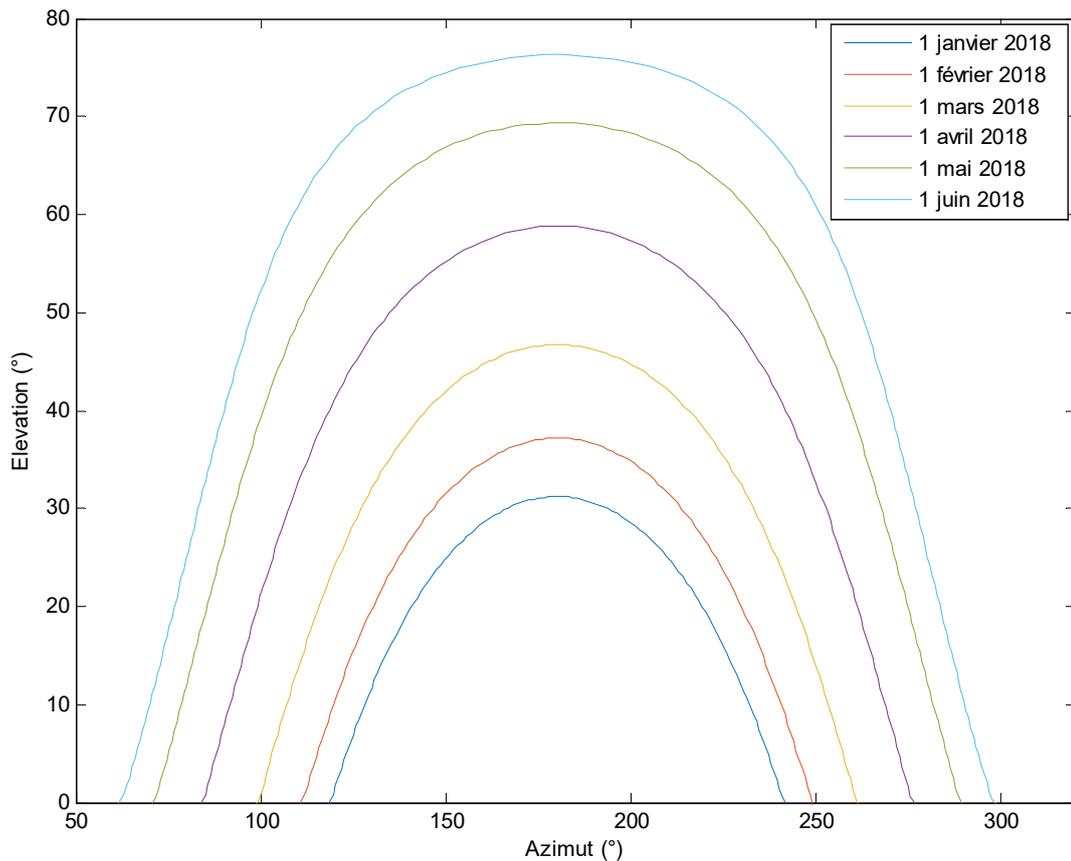


Figure II.25 Réponse de l'angle d'élévation en fonction de l'angle azimutal durant six mois

La figure présente les différentes traces des valeurs des deux angles astronomiques pour le premier jour de chaque un des six mois pour le même lieu. La longueur de chaque tracée présente la quantité angulaire de chaque jour qui sera envoyé comme pas de correction vers le système de poursuite, donc elle est considérée comme un arc d'une demie-sphère. Plus, on s'approche de la plus longue journée d'ensoleillement plus les valeurs angulaires astronomiques augmentent et plus cet arc est grand. Donc, on s'approche du plus grand arc qui présente le demi d'une circonférence (où l'angle d'élévation s'annule exceptionnellement dans les emplacements situés sur la ligne de Greenwich).

II.9 Synthèse globale

Il existe sur le net un tas de serveurs à distance destinés à programmer et optimiser le rendement des installations photovoltaïques (lieu d'installation, type des modules PV, type des traqueurs, etc.) [32]. Chaque serveur est caractérisé par sa propre méthodologie mais la majorité de ces serveurs estime cette optimisation avant l'installation des modules PV puisque le rendement

énergétique est influé par des paramètres climatiques non-manipulables. Nous avons utilisé un de ces serveurs [33] afin de tester l'efficacité de notre méthode puis la comparer aux autres.

II.9.1 Sans correction

On a employé une base de données de radiation solaire donnée par le serveur (PVGIS) à Ain Beida pour un module photovoltaïque caractérisé par le tableau II.4. La puissance nominale du système PV est de 0.1 kW (silicium cristallin) et les pertes estimées à cause de la température et des niveaux faibles de rayonnement sont de 9.8% (en employant une température ambiante locale). Le serveur utilise les grandeurs suivantes comme argument prouvant l'existence d'une optimisation :

- **Ed**: Production d'électricité journalière moyenne par le système défini (kWh).
- **Em**: Production d'électricité mensuelle moyenne par le système défini (kWh).
- **Hd**: Moyenne journalière de la somme de l'irradiation globale par mètre carré reçue par les modules du système défini (kWh/m²).
- **Hm**: Somme moyenne de l'irradiation globale par mètre carré reçue par les modules du système défini (kWh/m²).

Puissance maximum	P_{\max} 50.0 W
courant du court-circuit	I_{CC} 3.50 A
Tension du circuit ouvert	V_{OC} 22.2 V
Courant de fonctionnement optimal	I_{OP} 3.27 A
Tension de fonctionnement optimal	V_{OP} 17.5 V

Tableau II.4 Caractéristiques du module utilisé

Nous n'avons employé que deux grandeurs (Em et Hm) puis appliqué les résultats obtenus par notre algorithme comme entrées au serveur afin de donner les résultats d'Em et Hm pour une année. On a ensuite validé ces valeurs comme positives ou négatives en les comparant avec celles du serveur.

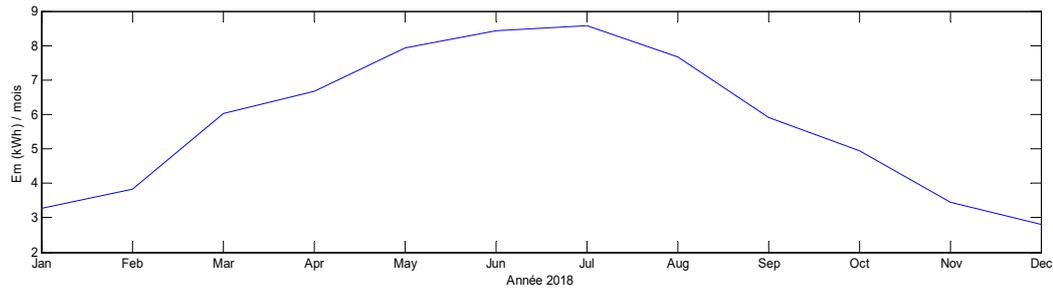


Figure II.26 Production d'électricité d'un module PV fixe: inclinaison= 0° , orientation= 0°

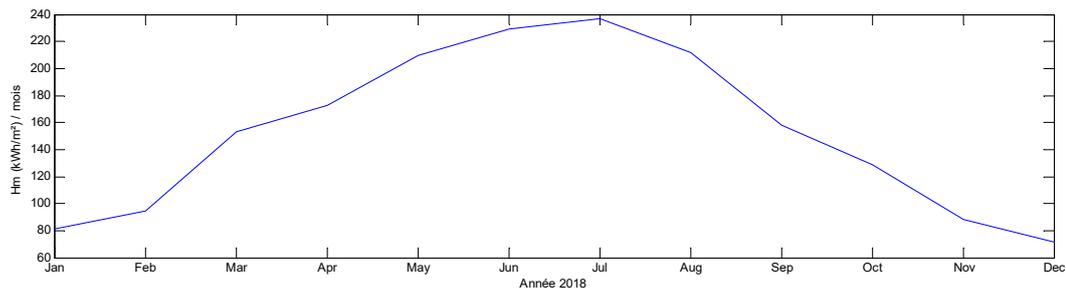


Figure II.27 Estimation de l'irradiation globale d'un module PV fixe: inclinaison= 0° , orientation= 0°

Les figures II.26 et II.27 présentent les résultats estimés d'un module PV fixe sans optimisation sur tous les axes. L'allure de la production d'électricité est considérée comme l'image de l'allure de l'irradiation. La variation de la production énergétique d'une saison à l'autre est due à la variation de la durée d'ensoleillement qui est plus longue en été.

II.9.2 Système fixe avec une correction angulaire optimale sur un seul axe

Le système a proposé une correction sur un seul angle optimal pour notre zone égale à 32° . Le système (PVGIS) a estimé une perte énergétique supplémentaire de 10.4% causée par la haute température due à la minimisation de l'inclinaison des rayons lumineux effectués par l'optimisation surtout lorsque la lumière incidente est perpendiculaire sur le panneau.

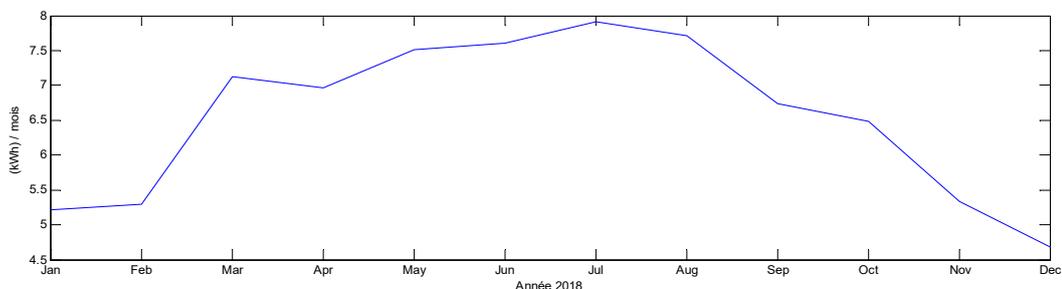


Figure II.28 Production d'électricité d'un module PV fixe: inclinaison= 32° , orientation= 0°

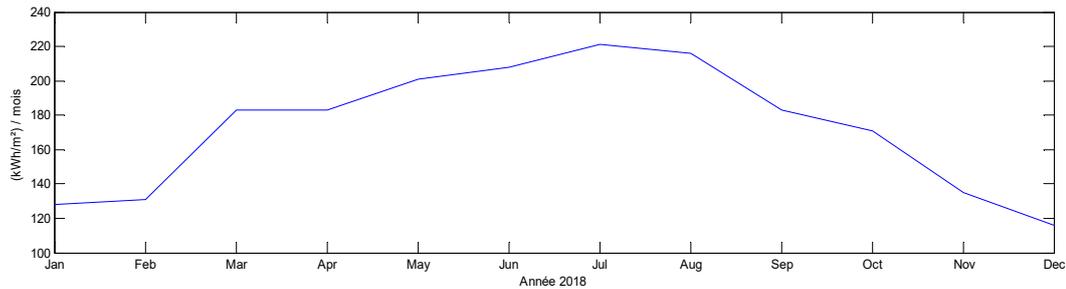


Figure II.29 Estimation de l'irradiation globale d'un module PV fixe: $\text{inclinaison}=32^\circ$, $\text{orientation}=0^\circ$

On remarque que cette optimisation primaire sur un seul axe, montre qu'il y a un gain énergétique en comparant les résultats obtenus dans la figure II.28 à ceux de la figure II.26. Cela est aussi similaire pour l'irradiation globale comme on peut constater de la comparaison de la figure II.27 avec la figure II.29.

II.9.3 Système fixe avec une correction angulaire optimale sur deux axes

Ce serveur a proposé une correction optimale sur deux axes avec des angles d'inclinaison de 32° et d'orientation de -2° puisque il y a une correction ; le système (PVGIS) a gardé l'influence de la température fixe pour toutes les expérimentations qui suivent. La figure ci-dessous montre les résultats obtenus d'Em et Hm.

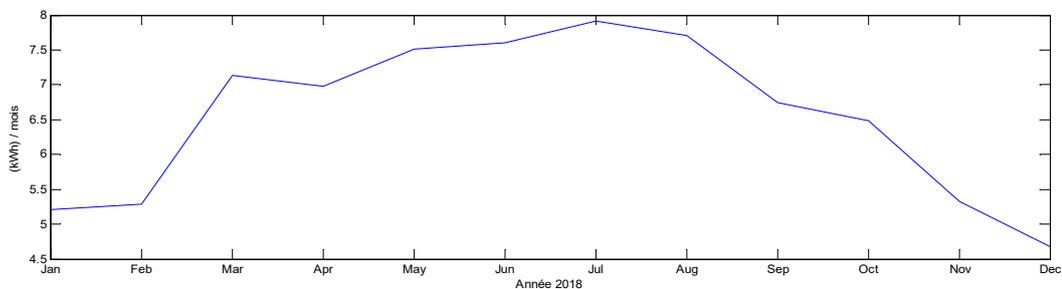


Figure II.30 Production d'électricité d'un module PV fixe: $\text{inclinaison}=32^\circ$, $\text{orientation}=-2^\circ$

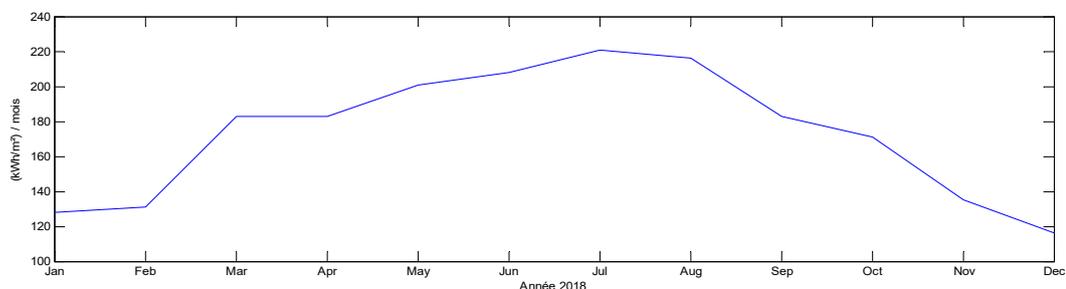


Figure II.31 Estimation de l'irradiation globale d'un module PV fixe: $\text{inclinaison}=32^\circ$, $\text{orientation}=-2^\circ$

En comparant les résultats d'une correction sur un seul axe et ceux obtenus après l'ajout d'une correction optimale de l'angle d'orientation, on a remarqué une légère différence en termes de gain énergétique supplémentaire et de quantité d'irradiation.

II.9.4 Système de poursuite avec une correction angulaire sur l'axe vertical

Pour un angle optimal, le système a fixé l'inclinaison sur 1° . La figure qui suit donne l'allure d'Em et Hm de deux systèmes au même temps : le système fixe avec deux angles d'optimisation (inclinaison et orientation) et notre système de poursuite.

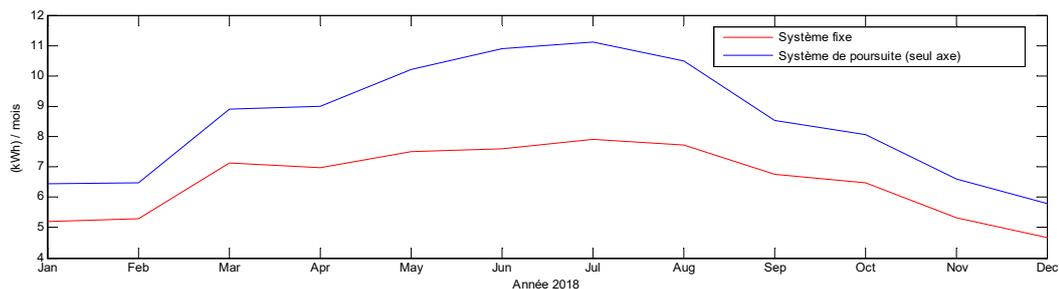


Figure II.32 Production d'électricité d'un module PV de poursuite (optimisation verticale) et d'un module PV fixe

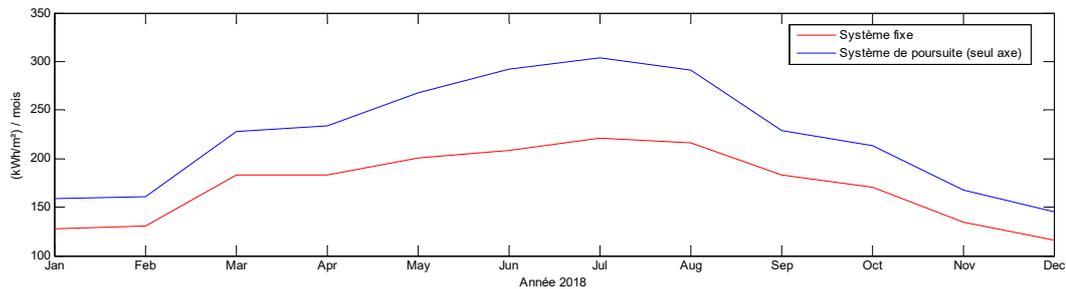


Figure II.33 Estimation de l'irradiation globale d'un module PV de poursuite (optimisation verticale) et d'un module PV fixe

A partir des allures des deux systèmes, on constate que les gains énergétiques d'un système de poursuite sont bien supérieurs à ceux d'un système fixe même chose pour l'irradiation globale peut importe, la quantité énergétique gagnée par la correction angulaire sur un système fixe. Un système doté d'un mécanisme de poursuite sur un seul axe dépasse largement le rendement de l'autre.

II.9.5 Système de poursuite avec une correction angulaire sur l'axe d'inclinaison

On a effectué une optimisation angulaire sur l'axe d'inclinaison de 0° durant une année sur un système de poursuite. On le compare toujours avec le système fixe avec des angles optimaux d'inclinaison de 32° et d'orientation de -2° .

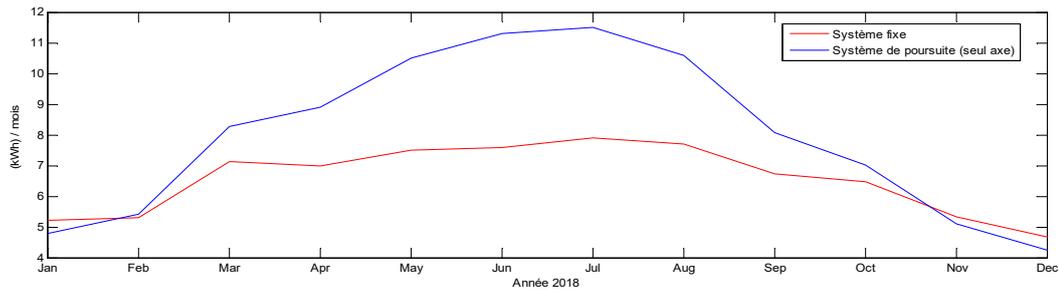


Figure II.34 Production d'électricité d'un module PV de poursuite (inclinaison optimale) et d'un module PV fixe

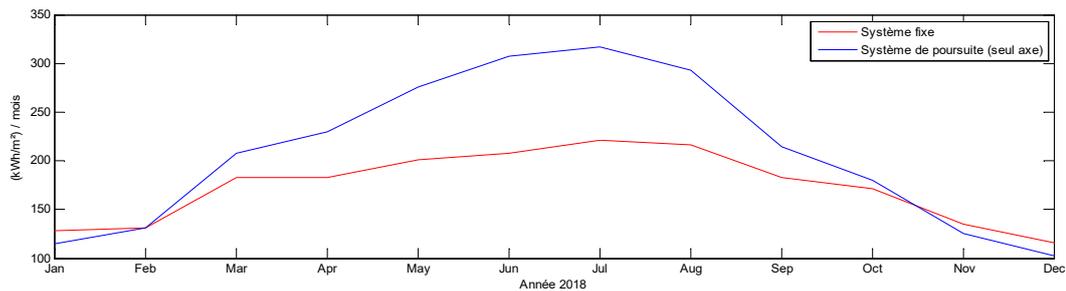


Figure II.35 Estimation de l'irradiation globale d'un module PV de poursuite (inclinaison optimale) et d'un module PV fixe

Dans les figures II.32 et II.34, lorsqu'on étudie la production d'électricité mensuelle moyenne d'un système de poursuite avec une correction angulaire de l'inclinaison, on constate qu'il surpasse largement le système fixe optimisé sur deux axes de février jusqu'à la fin d'octobre en gains énergétiques. Cette différence est plus remarquable durant l'été et surtout durant la plus longue journée d'ensoleillement. Par contre, on remarque que les gains énergétiques du système fixe optimisé sur deux axes deviennent supérieurs à ceux du système de poursuite durant la fin du mois d'octobre, novembre, décembre et février c'est à dire durant l'hiver ; lorsque la durée d'ensoleillement est la plus courte. Durant cette période, On pourrait favoriser l'utilisation d'un système fixe optimisé sur deux axes au lieu d'utiliser un système de poursuite. Cela s'applique aussi sur l'allure de l'irradiation sur les figures II.33, II.35.

II.9.6 Influence de la variation des angles d'inclinaison sur deux axes (vertical et incliné)

Sur la figure II.36 et II.37, nous avons effectué une comparaison avec un système fixe optimisé par les deux angles cités précédemment avec deux systèmes de poursuite optimisés à seul axe. Les corrections angulaires ont été sélectionnées par le système (PVGIS) d'après la base de données d'une façon qu'ils aient la même production d'électricité mensuelle moyenne mais des angles verticaux différents. La première valeur d'angle d'inclinaison a été estimée à 1° et la deuxième à 34° .

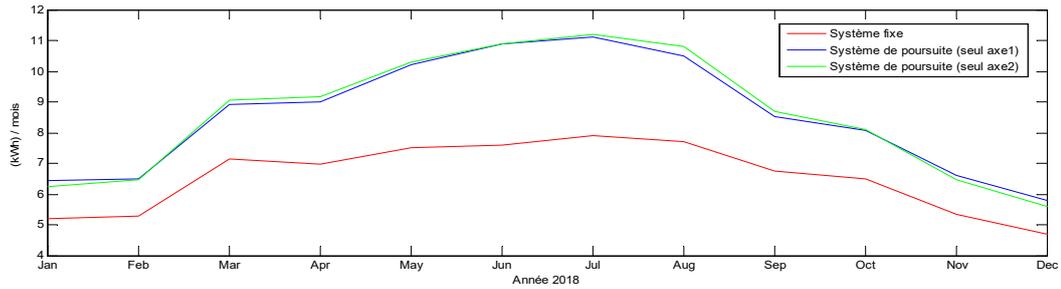


Figure II.36 Production d'électricité d'un module PV de poursuite et d'un module PV fixe

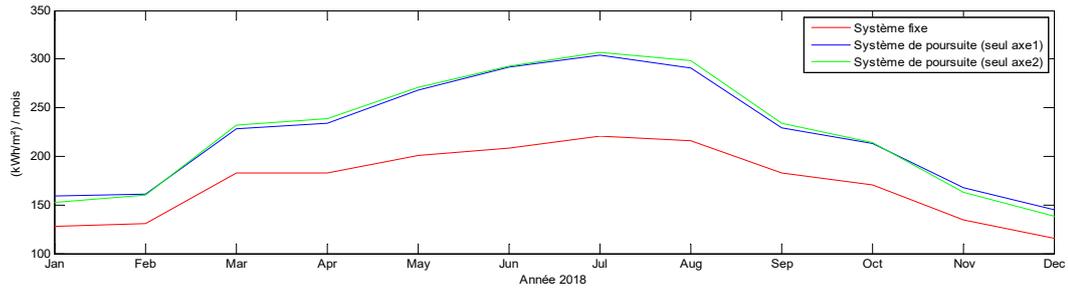


Figure II.37 Estimation de l'irradiation globale d'un module PV de poursuite et d'un module PV fixe

Cette proposition est considérée comme solution pour les installations à un seul axe déjà préparé sur un angle de rotation.

II.9.7 Effet d'un système de poursuite à deux axes sur la production énergétique

Afin de démontrer l'efficacité d'un système photovoltaïque doté de deux axes de poursuite, nous avons comparé la performance de ce système avec celle des systèmes du cas précédent. Les figures II.38 et II.39 illustrent cette comparaison.

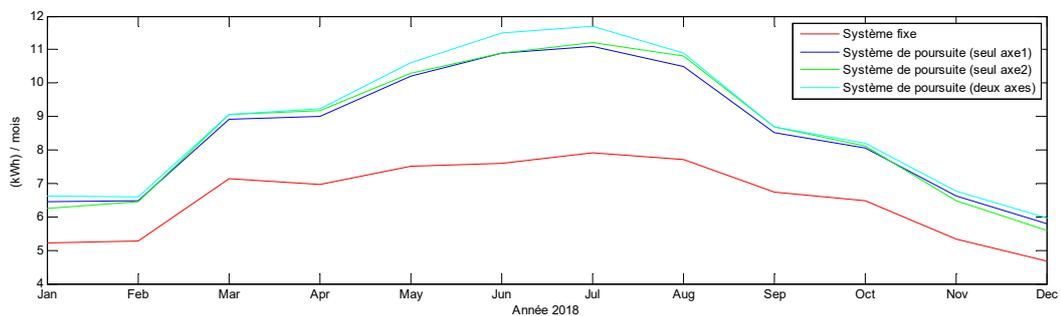


Figure II.38 Production énergétique de plusieurs gammes (PVGIS) de correction

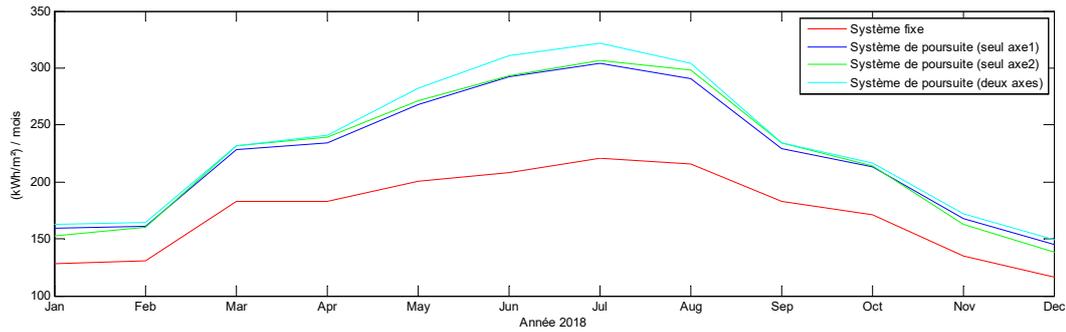


Figure II.39 Estimation de l'irradiation globale de plusieurs gammes (PVGIS) de correction

La quantité énergétique obtenue par un système à deux axes est bien supérieure à celle des autres systèmes de poursuite à un seul axe et optimisé fixe. Cette différence de gain énergétique récolté par un système à deux axes est plus remarquable durant l'été.

L'optimisation par poursuite est toujours meilleure qu'une optimisation par des angles de correction fixe.

II.9.8 Estimation de la production énergétique et l'irradiation globale de notre approche

Nous avons injecté les valeurs des angles d'élévation et d'azimut calculés par notre approche au serveur sous forme d'un fichier texte. Le système (PVGIS) nous a aidé à effectuer une estimation et une comparaison pour valider l'efficacité de la modélisation de la trajectoire et l'intérêt du calcul de l'angle d'élévation et d'azimut.

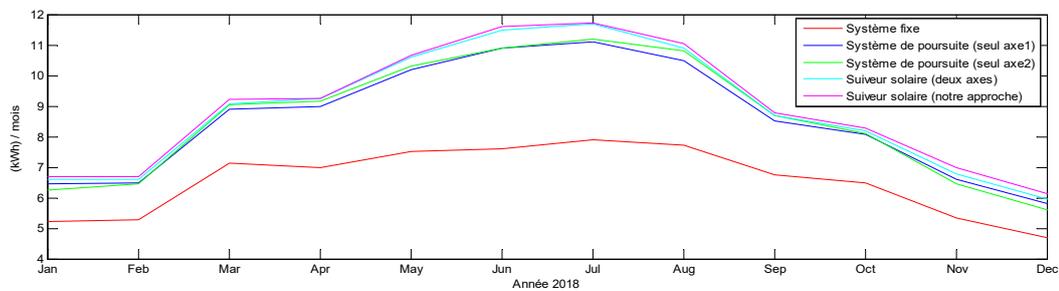


Figure II.40 Effet de notre approche sur la quantité énergétique par rapport aux autres systèmes

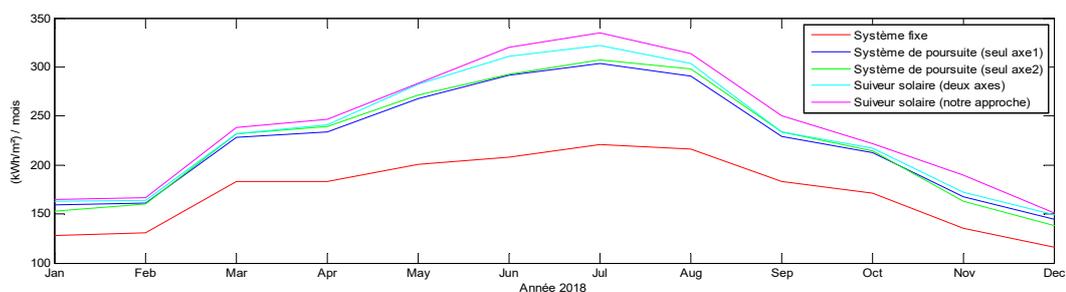


Figure II.41 Effet de notre approche sur l'irradiation par rapport aux autres systèmes

D'après les figures II.40 et II.41, le tracé violet qui représente les valeurs obtenues par notre approche prouve que nos calculs sont sur la bonne voie et meilleurs que ceux des autres systèmes. Le système de poursuite à deux axes reste toujours la meilleure solution pour augmenter le gain énergétique parmi les autres systèmes.

II.10 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons montré que la trajectoire du soleil dans le ciel n'est pas vraiment régulière ni fixe : le midi solaire n'est pas fixe tous les jours et varie d'un lieu à un autre. Les résultats que nous avons obtenus à partir de ces calculs montrent qu'il existe une grande plage de durée d'ensoleillement qu'on ne peut négliger si on se base sur le dispositif d'orientation dans la pré-programmation de la trajectoire du soleil.

Nous avons utilisé la manipulation du temps et du lieu pour expérimenter sur l'efficacité de notre algorithme.

L'estimation des angles astronomiques ou la négligence de l'un d'entre eux par rapport à l'autre nous éloigne de l'optimisation ce qui nous écarte donc ; d'atteindre un rendement optimal. La modélisation de la trajectoire du soleil nous permet de mieux choisir le lieu d'installation avant la mise en œuvre et éviter les pertes d'énergie. Donc, l'altitude et la longitude sont des paramètres à prendre en compte avant l'installation.

Pour obtenir la meilleure optimisation possible, il est préférable qu'un module soit orienté sur ses deux axes pour suivre le soleil. Un tel système de poursuite possède la quantité de gain énergétique la plus grande parmi les autres systèmes optimisés sur un seul axe ou optimisés par des angles fixes ; cela est le même pour tous les jours de l'année comme déduit par estimation dans la section précédente.

On a choisi d'utiliser l'environnement LabVIEW dans la modélisation de la trajectoire juste pour créer une liaison entre la simulation virtuelle et la réalisation pratique d'une carte électronique basée sur un système embarqué qui va être détaillé dans le chapitre qui suit et qui va avoir comme objectif de sélectionner le système de poursuite populaire qui est la poursuite par la technique préprogrammée. L'amélioration de ce dernier se fait par l'implémentation des résultats de la modélisation qui sera discuté avec une nouvelle méthodologie.

Chapitre III

Nouvelle méthodologie d'un traqueur actif à boucle ouverte

III.1 Introduction

Photovoltaïque (PV) est une technologie dans laquelle la lumière est convertie en énergie électrique. Une des applications PV est l'emploi des traqueurs solaires. Ces derniers sont des dispositifs qui permettent de faire orienter un panneau photovoltaïque vers le soleil. Dans ce chapitre, on va procéder à une synthèse générale des traqueurs solaires où notre choix pour l'optimisation énergétique d'un PV par traqueur est un système électromécanique d'orientation du panneau sur ses deux angles astronomiques. Ces derniers sont calculés à partir d'un algorithme qui prend en considération les deux angles solaires (élévation et azimut) cités dans le chapitre précédent. Cet algorithme est programmé sous un environnement de développement qui est le Delphi 7 et ses commandes sont validées à des actionnaires à travers un circuit programmable qui prend la relève d'exécuter la moindre correction due au déplacement du soleil.

III.2 Concept générale du traqueur solaire

La technologie photovoltaïque est surtout connue comme une méthode de production d'énergie solaire en utilisant des cellules solaires emballées dans des modules photovoltaïques souvent connectés électriquement en multiples, comme des panneaux solaires photovoltaïques afin de transformer l'énergie du soleil en électricité [33]. Les modules photovoltaïques sont particulièrement utiles dans les situations où la demande d'énergie électrique est relativement faible et peut être prise en compte en utilisant un nombre réduit de modules. Une des applications du module PV est le traqueur solaire. Celui-ci est un dispositif permettant de faire fonctionner un panneau solaire photovoltaïque ou de concentrer un réflecteur solaire ou une lentille concentrée vers le soleil qui est dédiée précisément au dispositif d'alimentation. Afin de produire une puissance maximale, le traqueur solaire est conçu avec des moteurs de sorte que le panneau solaire se déplace vers la position du soleil et il fonctionne avec des capteurs et un microcontrôleur. Les traqueurs solaires diffèrent mais, afin de produire une puissance maximale, nous utilisons des traqueurs actifs.

La demande d'électricité augmente d'une année à l'autre. Afin de s'assurer que la demande d'électricité soit entièrement prise en charge, l'énergie solaire est largement utilisée.

Les modules photovoltaïques (PV) sont des dispositifs qui convertissent proprement la lumière solaire en électricité et offrent une solution pratique au problème de sous-production d'électricité dans les zones reculées [26]. Ils sont particulièrement utiles dans les situations où la demande d'énergie électrique est relativement faible et peut être prise en compte pour l'utilisation d'un faible nombre de modules. Des feux de circulation, un réfrigérateur, une télévision et le chauffage de l'eau sont un petit exemple de tâches qu'un petit groupe de modules solaires peut

gérer. Il peut couvrir la demande d'électricité pour un meilleur confort et couvrir une situation critique en cas de problème technique avec le générateur électrique principal. Globalement, le traqueur solaire est d'une utilité incontournable et sa commercialisation doit être démocratisée.

III.3 Enoncé du problème et objectifs

Le soleil se déplace dans une trajectoire variable d'un jour à l'autre et d'une saison à l'autre de l'est à l'ouest. Pour collecter la puissance de sortie maximale, l'intensité maximale de la lumière doit être concentrée sur la surface active du panneau solaire. Le panneau solaire est placé fixe et se désactive pour se déplacer selon le mouvement du soleil, la puissance de sortie serait donc moins.

L'objectif principal de la thèse et qui est plus apparent dans ce chapitre et celui qui suit est donc de suivre le soleil, afin que le panneau solaire puisse produire une puissance maximale. Cela sera possible si le traqueur solaire suit le mouvement du soleil et ainsi produit plus de puissance de sortie. On vise aussi à ce que notre traqueur soit compatible pour l'utilisateur et qu'on puisse installer pour un faible coût. On discutera dans ce chapitre la mise en œuvre d'un système embarqué pour contrôler le mécanisme de poursuite. Le choix des moteurs appropriés pour contrôler les angles du traqueur solaire pour qu'il soit toujours face au soleil est primordial. On va aussi expérimenter pour créer une nouvelle méthode appropriée pour décider la direction de l'angle du panneau solaire.

III.4 Bases d'un traqueur solaire

Un traqueur solaire est un dispositif permettant d'orienter un réflecteur d'éclairage de jour, un panneau solaire photovoltaïque, un réflecteur solaire concentré ou une lentille concentrée vers le soleil. La position du soleil dans le ciel varie à la fois avec les saisons (élévation) et l'heure du jour lorsque le soleil se déplace dans le ciel. Les équipements fonctionnant à l'énergie solaire fonctionnent mieux lorsqu'ils sont pointés vers ou en face du soleil [34]. Un traqueur solaire peut augmenter l'efficacité d'un tel équipement sur n'importe quelle position fixe au prix d'une complexité supplémentaire du système. Il existe de nombreux types de suiveurs solaires, de coûts, de sophistication et de performances variables. Un type bien connu de traqueur solaire est l'héliostat, un miroir mobile qui reflète le soleil en mouvement vers un endroit fixe, mais de nombreuses autres approches sont également utilisées. La précision requise du traqueur solaire dépend de l'application. Les concentrateurs en particulier dans les applications de cellules solaires, exigent un degré élevé de précision pour garantir que la lumière solaire concentrée est dirigée précisément vers le dispositif alimenté, qui se trouve au (ou près) du foyer du réflecteur ou de la lentille. Généralement, les systèmes concentrateurs ne fonctionnent pas du tout sans suivi, donc au

moins, un suivi sur un seul axe est obligatoire. Les très grandes centrales électriques ou les installations de recherche de matériaux à haute température utilisant des miroirs montés au sol multiples et une cible d'absorbeur, nécessitent une très grande précision similaire à ceux utilisés pour les télescopes solaires.

Les applications non concentrées nécessitent moins de précision et beaucoup, fonctionnent sans aucun suivi. Cependant, le suivi peut considérablement améliorer la puissance totale produite par un système et celle produite pendant les périodes critiques du système (typiquement en fin d'après-midi dans les climats chauds) [23]. L'utilisation de traqueurs dans des applications non concentrées est généralement une décision d'ingénierie économique comparée au photovoltaïque, les traqueurs peuvent être peu coûteux. Cela les rend particulièrement efficaces pour les systèmes photovoltaïques utilisant des panneaux à haute efficacité (et donc coûteux). Bien que les traqueurs ne soient pas une partie nécessaire d'un système PV, leur mise en œuvre peut considérablement améliorer la puissance de sortie du système en gardant le soleil au point tout au long de la journée. L'efficacité est particulièrement améliorée dans les heures du matin et de l'après-midi où un panneau fixe sera situé bien à l'écart des rayons du soleil. Habituellement, les modules photovoltaïques sont chers et dans la plupart des cas, le coût des modules eux-mêmes l'emportera sur le coût du système de suivi. En outre, un système bien conçu qui utilise un traqueur aura besoin de moins de panneaux en raison de l'efficacité obtenue, ce qui entraîne une réduction des coûts de mise en œuvre initiale [34].

III.5 Divers types de montage du traqueur

Les traqueurs solaires peuvent être actifs ou passifs et peuvent être à axe unique ou à double axe. Les traqueurs à axe unique utilisent généralement un support polaire pour une efficacité solaire maximale. Les traqueurs à axe unique ont généralement un réglage d'élévation manuelle (inclinaison de l'axe) sur un deuxième axe qui est ajusté à intervalles réguliers tout au long de l'année. Comparé à un montage fixe, un traqueur à un seul axe augmente la production annuelle d'environ 30% et un traqueur à deux axes de 6% supplémentaires. Il existe deux types de suiveurs à deux axes polaires et azimut-altitude [35].

III.5.1 Traqueurs polaires

Les traqueurs polaires ont un axe aligné pour être approximativement parallèle à l'axe de rotation de la terre autour des pôles nord et sud - d'où le nom polaire. Le suivi sur un seul axe est souvent utilisé en combinaison avec le comptage en fonction du temps d'utilisation, étant donné qu'une forte performance de l'après-midi, est particulièrement souhaitable pour les systèmes

photovoltaïques raccordés au réseau car la production correspondra à l'heure actuelle ; temps de pointe pour la climatisation en été. Un système fixe orienté pour optimiser cette performance à durée limitée aura une production annuelle relativement faible. L'axe polaire doit être orienté vers le nord et l'angle entre cet axe et la verticale doit être égale à notre latitude.

Les traqueurs polaires simples avec un suivi d'axe unique peuvent également avoir un ajustement le long d'un second axe, l'angle de déclinaison. Il peut être réglé avec des ajustements manuels ou automatisés en fonction de notre appareil de repérage polaire [36]. Si l'on ne prévoit pas d'ajuster cet angle de déclinaison durant l'année, il est normalement réglé à zéro degré, face à notre panneau perpendiculaire à l'axe polaire, car c'est là, que se trouve le chemin moyen du soleil. Des ajustements occasionnels ou continus de la déclinaison compensent le déplacement vers le nord et le sud du trajet du soleil à travers le ciel au cours des saisons (et autour de l'écliptique) au cours de l'année [37].



Figure III.1 Traqueurs solaires polaires

III.5.2 Traqueurs à axe horizontal

Plusieurs fabricants peuvent fournir des traqueurs horizontaux à axe unique qui peuvent être orientés par des mécanismes passifs ou actifs selon le fabricant. Dans ceux-ci, un long tube horizontal est supporté sur des paliers montés sur des pylônes ou des cadres. L'axe du tube est sur une ligne Nord-Sud. Les panneaux sont montés sur le tube où ce dernier tournera sur son axe pour suivre le mouvement apparent du soleil au cours de la journée [38]. Comme ceux-ci ne s'inclinent pas vers l'équateur, ils ne sont pas particulièrement efficaces en hiver (sauf s'ils sont situés près de l'équateur) mais, ils ajoutent beaucoup de productivité au printemps et en été lorsque la trajectoire solaire est élevée. Ces appareils sont moins efficaces aux latitudes plus élevées. L'avantage principal est la robustesse inhérente de la structure du support et la simplicité du mécanisme. Puisque les panneaux sont horizontaux, ils peuvent être placés de manière compacte sur le tube d'essieu sans danger d'auto-ombrage et sont, également facilement accessibles pour le nettoyage.



Figure III.2 Traqueurs solaires à axe horizontal

III.5.3 Traqueurs à deux axes

Limitée aux traqueurs actifs, cette monture devient également populaire en tant que grande monture de télescope en raison de sa simplicité structurelle et de ses dimensions compactes. Un axe est un repère de pivotement vertical ou un support d'anneau horizontal qui permet de faire pivoter l'appareil vers un point de la boussole. L'autre, est un pivot d'élévation horizontal monté sur la plate-forme d'azimut. En utilisant des combinaisons des deux axes, n'importe quel emplacement dans l'hémisphère ascendant peut être pointé. De tels systèmes, peuvent être commandés par ordinateur en fonction de l'orientation solaire attendue ou peuvent, utiliser un capteur de suivi pour commander les commandes du moteur qui orientent les panneaux vers le soleil. Ce type de montage est également utilisé pour orienter les réflecteurs paraboliques qui montent un moteur « Stirling » pour produire de l'électricité à l'appareil [23, 37].



Figure III.3 Quelques exemples des traqueurs solaires à deux axes

III.5.4 Présentation générale des types de suivis des pilotes actuels

Les traqueurs solaires peuvent être divisés en trois types principaux selon le type d'entraînement et le système de détection ou de positionnement qu'ils incorporent. Les traqueurs passifs utilisent le rayonnement du soleil pour chauffer les gaz qui déplacent le traqueur. Les traqueurs actifs utilisent des appareillages électriques ou hydrauliques et un certain type d'engrenage ou d'actionnaires pour déplacer le traqueur. Les traqueurs à boucle ouverte n'utilisent aucune détection mais déterminent plutôt la position du soleil à travers les données préenregistrées pour un site particulier [39, 40].

III.5.5 Traqueurs passifs (Traqueurs par gaz)

Les traqueurs passifs utilisent un fluide à gaz comprimé comme moyen d'inclinaison du panneau. Une cartouche sur le côté soleil du traqueur est chauffée ce qui augmente la pression du gaz et pousse le liquide d'un côté à l'autre du traqueur. Cela affecte l'équilibre du traqueur et le fait basculer pour une optimisation maximale. Ce système est très fiable et nécessite peu de maintenance malgré le fait que la température varie d'un jour à l'autre et que le système ne peut pas prendre en compte la variable des jours à ciel couvert, ce qui entraîne un mouvement erratique du dispositif. Les suiveurs passifs sont cependant un moyen efficace et relativement peu coûteux d'augmenter la puissance de sortie d'un réseau solaire. Le traqueur commence la journée face à l'ouest, alors que le soleil se lève à l'est ; il chauffe la boîte métallique non ombragée du côté ouest, forçant le liquide à pénétrer dans la boîte métallique ombragée à l'est. Le liquide qui est forcé dans la cartouche modifie l'équilibre du traqueur et se déplace vers l'est. Pour accomplir le déplacement de l'ouest à l'est, il prend plus d'une heure. Le chauffage du liquide est contrôlé par les plaques d'ombre en aluminium. Quand une cartouche est exposée au soleil plus que l'autre, sa pression de vapeur augmente, forçant le liquide vers le côté plus froid et ombragé. Le poids de déplacement du liquide provoque la rotation du support jusqu'à ce que les supports soient également ombrés. Le support termine son cycle quotidien face à l'ouest. Il reste dans cette position pendant la nuit jusqu'à ce qu'il soit « réveillé » par le soleil levant le lendemain matin.

III.5.6 Traqueurs actifs

Les traqueurs actifs mesurent l'intensité lumineuse du soleil pour accéder où les modules solaires doivent pointer. Les capteurs de lumière sont positionnés sur le traqueur à différents endroits ou dans des supports de forme spéciale. Si le soleil n'est pas directement en face au traqueur, il y aura une différence d'intensité lumineuse sur un capteur de lumière par rapport à un

autre et cette différence peut être utilisée pour déterminer dans quelle direction le traqueur doit basculer pour faire face au soleil. [41]

III.5.7 Traqueurs à boucle ouverte

Les traqueurs en boucle ouverte déterminent la position du soleil en utilisant des algorithmes contrôlés par ordinateur ou des systèmes de chronométrage simples « Timed traqueurs » ; ceux-ci utilisent une minuterie pour déplacer le traqueur à travers le ciel. Le mouvement incrémentiel tout au long de la journée maintient les modules solaires face à la direction générale du soleil. Les traqueurs de ce type peuvent utiliser un ou deux axes en fonction de leur application et du prix que l'acheteur est prêt à payer [42]. Le principal inconvénient des systèmes temporisés est que leur mouvement ne tient pas compte de la variation saisonnière de la position du soleil. A moins que des mesures ne soient prises pour ajuster la position du traqueur de façon saisonnière, il y aura une différence notable d'efficacité selon la saison.

III.6 Caractérisation et critères de choix d'un traqueur

On peut résumer et caractériser l'affiliation des traqueurs photovoltaïques en deux grandes catégories. La première sous le nom de traqueurs actifs et la deuxième sous le nom de traqueurs passifs [40, 41]. Ces derniers doivent être équipés de systèmes de poursuite qui assurent l'orientation autour de deux axes afin de maximiser le flux lumineux solaire sur la surface active du panneau [43]. Les configurations populaires utilisées dans la poursuite solaire sont les bi-axiales (l'élévation et l'azimut) et le tilt-roll (polaire) comme illustrées sur la figure III.4. Ils produisent un gain énergétique supplémentaire par rapport aux dispositifs à inclinaison fixe [43].

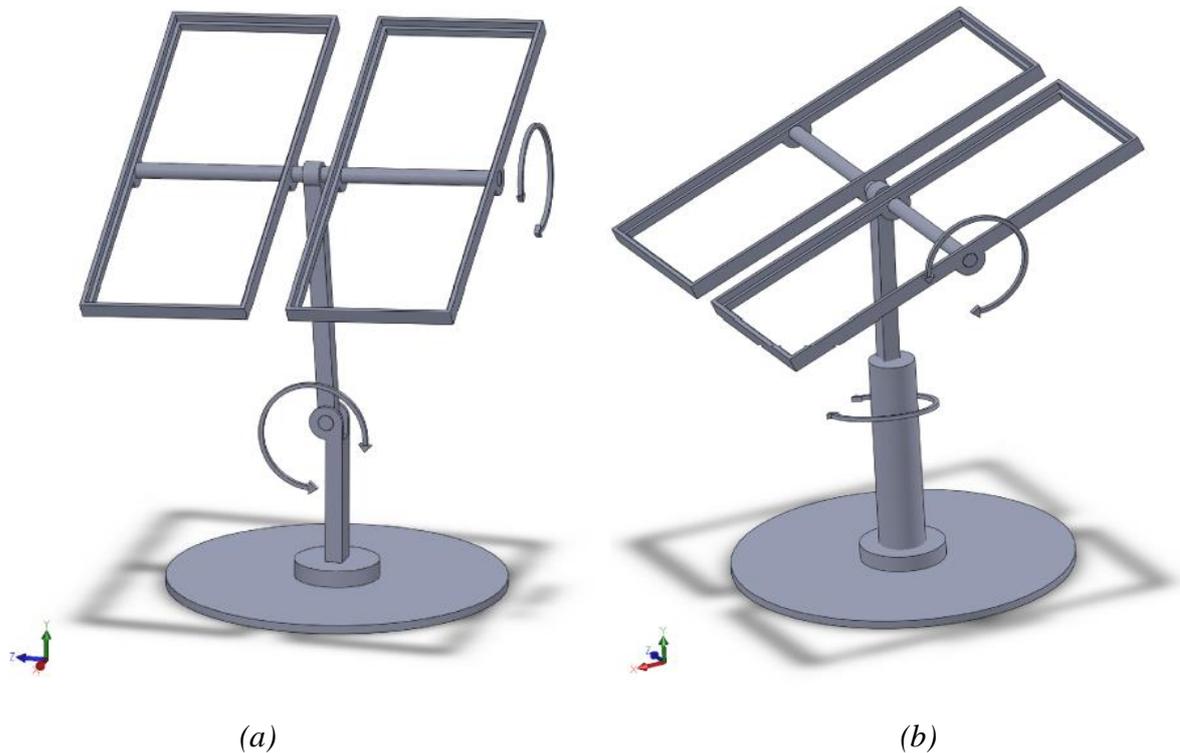


Figure III.4 Systèmes de poursuite bi-axiaux (a) azimutaux; (b) équatoriaux

La précision de la poursuite utilisant des dispositifs électriques ou électroniques rend les traqueurs actifs appréciés. Ces derniers sont subdivisés en deux systèmes : le premier qui est en boucle ouverte est basé sur des algorithmes qui utilisent des formules mathématiques (les équations de temps) afin de prévoir les pas de déplacement du soleil ; le deuxième qui est en boucle fermée utilise des capteurs selon leurs fonctions afin de capter à tout moment la position du soleil et corriger l'écart angulaire de la déviation du flux lumineux ce qui le rend un consommateur d'énergie [41].

Pour arriver à sélectionner la meilleure articulation pour une telle approche, nous avons été obligés de travailler sur les deux concepts mécaniques comme sur la figure III.4 (a, b) en employant différentes manières de contrôle, le choix était comme suit :

- Articulation (a) pour un traqueur actif (en boucle ouverte) où la base de commande est un algorithme qui utilise des formules de temps à l'aide d'un microcontrôleur de Micro chip qui collabore avec une interface d'affichage réalisée sous Delphi 7.
- Articulation (b) pour un traqueur actif (en boucle fermée) et avec une technologie de pointe où on utilise une nouvelle gamme de capteurs « IMU ». Ces derniers peuvent collaborer à l'aide de leurs fonctions avec un système embarqué qui est une carte Arduino Méga qui à

son tour est porteuse d'un algorithme préprogrammé. Cette méthode de contrôle sera détaillée dans le chapitre suivant.

Le circuit de commande, l'outillage, les éléments de base et la stratégie de correction peuvent différer mais l'objectif reste le même.

III.7 Principe de poursuite par un traqueur à boucle ouverte

La poursuite est basée sur le fait que le soleil possède une trajectoire déterminée et que chaque objet sur terre est repéré par sa longitude et sa latitude. La trajectoire solaire est modélisée sous forme d'équations mathématiques. L'introduction de ces équations dans des algorithmes de contrôle permet de calculer la position du soleil par rapport à un point fixe donné sur terre. Cette position est définie par deux angles : la déclinaison et l'azimut.

III.7.1 Structure générale de la conception

Le principe de poursuite de radiation basé sur les données astronomiques liées à la position solaire (α, δ) est d'orienter le panneau par deux angles (Ω, β). Pour avoir un angle incident de 90° , on utilise deux moteurs commandés en variations angulaires.

L'algorithme de calcul des angles est implanté dans une plateforme numérique Microcontrôleur 18F2550 [44]. La figure ci-dessous montre un schéma synoptique d'une coopération d'une implémentation numérique d'un algorithme sur ordinateur avec un microcontrôleur de Micro chip.

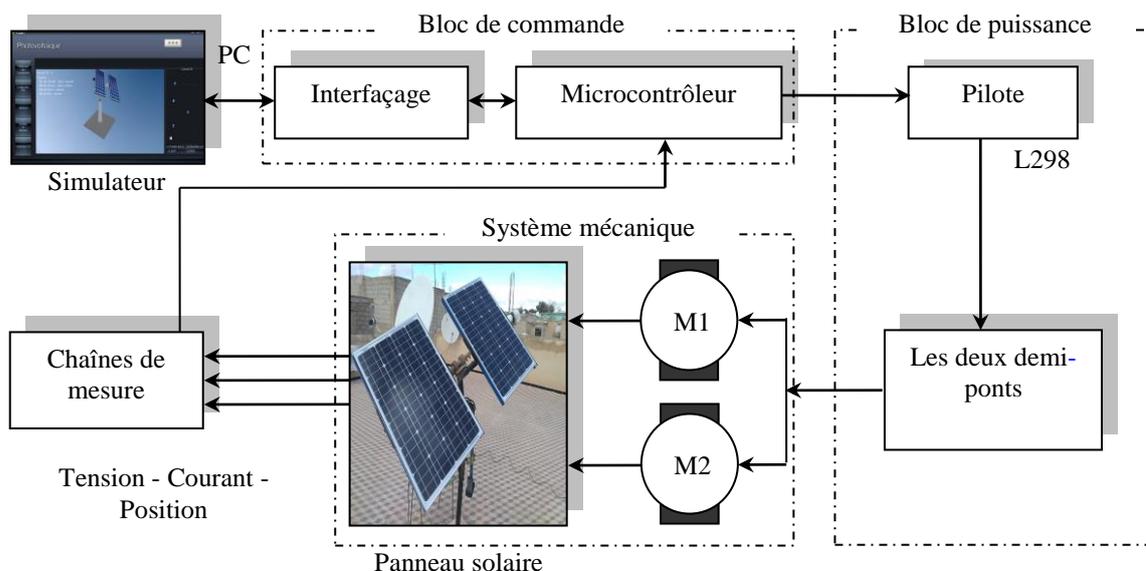


Figure III.5 Schéma synoptique global du dispositif réalisé

III.7.2 Méthodologie de correction

A partir des deux angles (déclinaison δ et azimut α) représentés dans la figure III.6, le panneau photovoltaïque sera orienté sur ses deux propres angles de correction (inclinaison β et angle azimutal Ω). Pour cela, nous avons monté un support mobile articulé en deux points qui portent chacun un moteur à courant continu similaire à un vérin de parabole comme montré sur la figure III.9 (b) : le premier moteur sert à exécuter la correction de l'angle azimutal Ω , pour le deuxième moteur, un système de conversion de mouvement circulaire en mouvement de translation est monté afin de fournir le déplacement Z assurant la correction de l'angle d'inclinaison β à l'aide du calcul de l'angle de déclinaison.

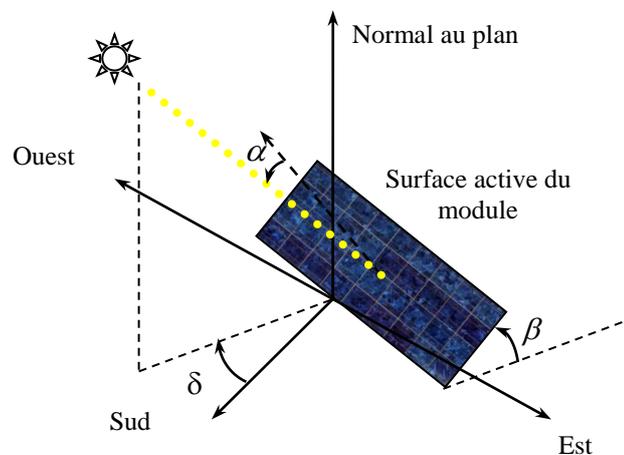


Figure III.6 Angles de correction pour un point quelconque [23]

La trajectoire solaire est modélisée sous forme d'équations mathématiques sous l'environnement Delphi 7. Leur introduction dans les algorithmes de contrôle permet de calculer la position du soleil par rapport à un point fixe donné sur terre.

III.7.2.1 Configuration angulaire

a- L'inclinaison β du panneau:

L'effet de l'inclinaison et l'orientation des capteurs peut être évalué par le facteur de transposition, noté $R(\beta, \delta)$, c'est-à-dire le rapport de l'énergie reçue par le plan considéré par rapport au plan horizontale. L'inclinaison (β) d'un panneau est l'angle compris entre le panneau PV et l'horizontale du lieu :

$$\beta = \lambda - \delta \quad \text{III.1}$$

Où :

λ : La latitude de l'endroit,

δ : La déclinaison du soleil.

L'angle de déclinaison comme représenté sur la figure III.7 est calculé par l'équation II.1 de Nicolas Copernic [23].

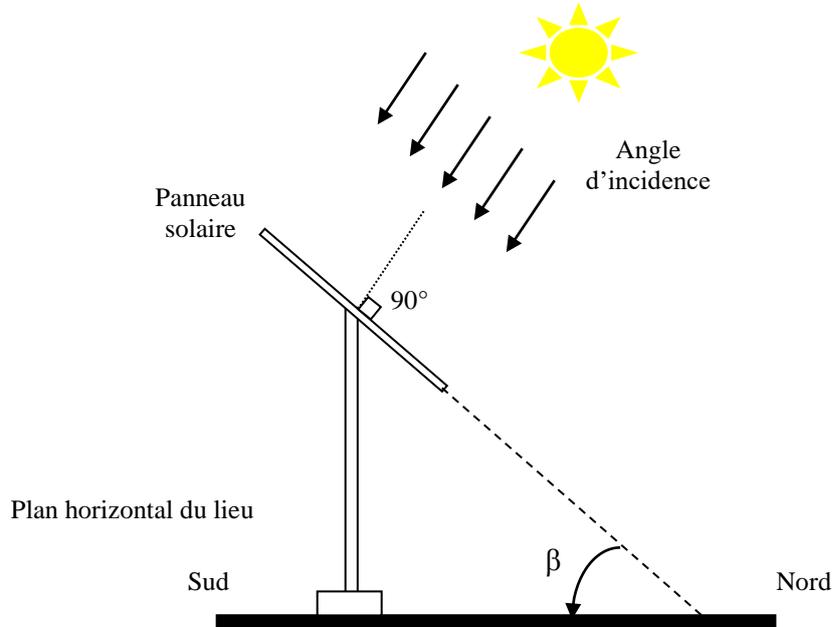


Figure III.7 Inclinaison β du panneau

Afin de présenter un calendrier plus précis, nous utiliserons l'équation III.2, pour le $d^{\text{ème}}$ jour, du $m^{\text{ème}}$ mois et de la $a^{\text{ème}}$ année, le rang n du jour dans l'année « a » est donné par [23]:

$$\begin{cases} n = n' + 58 + K & \text{si } m \geq 3 \\ n = n' - 306 & \text{si } m < 3 \end{cases} \quad \text{III.2}$$

Avec :

$$n' = \text{Floor}([30.6(M + 1)] - 122 + d) \quad \text{III.3}$$

$$\begin{cases} M = m + 12 & \text{si } m \geq 3 \\ M = m & \text{si } m < 3 \end{cases} \quad \text{III.4}$$

$$K = 1 + \text{Floor} \left[\frac{a - 4 \times \text{Floor} \left(\frac{a}{4} \right) + 2}{3} \right] \quad \text{III.5}$$

Où « Floor » est la fonction qui implémente la partie entière d'un nombre décimal.

b- Angle azimutal Ω du panneau

C'est l'angle que fait la perpendiculaire du panneau avec le vecteur résultant du soleil (la référence de la direction est le sud), il varie entre -90° et $+90^\circ$, négatif à l'est et positif à l'ouest.

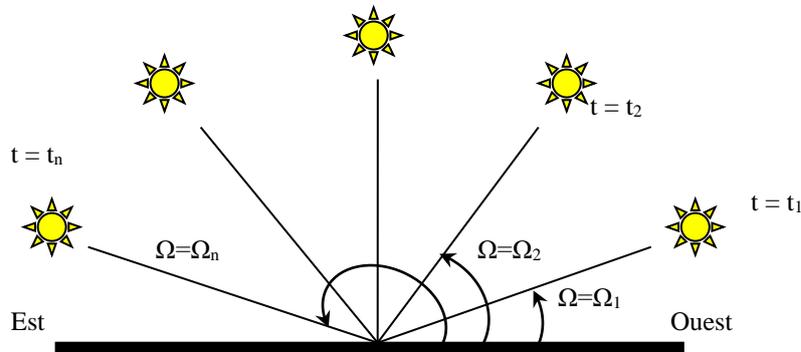


Figure III.8 Variation de l'angle d'Azimut Ω

Le lever et le coucher du soleil présentent les fins de course du moteur qui est responsable de la correction azimutale et la différence de temps entre eux est considérée comme la durée d'ensoleillement optimal [23].

III.7.2.2 Configuration mécanique

Selon le mécanisme opératif réalisé, nous avons choisi les actionneurs les mieux adaptés à l'optimisation du rendement. Leurs caractéristiques mesurées sont reportées sur le tableau qui suit :

	Calculs du moteur 1 autour de l'angle Ω	Calculs du moteur 2 autour de l'angle β
Vitesse maximale ω_{Max}	0,1207 red / s	0,015 red / s
Courant maximal I_{Max}	0,38 A	0,32 A
Moment d'inertie J	0,50 kg.m ²	0,21 kg.m ²
Temps moyen de montée t	0,4 s	0,4 s

Tableau III.1 Caractéristiques des actionneurs

Afin d'avoir un mécanisme souple et léger capable d'optimiser les pertes dues à la consommation énergétique supplémentaire demandée par les deux moteurs installés sur le support (consommation liée soit au poids, soit aux frottements), nous avons construit un dispositif mécanique à deux axes d'orientation, ce qui nous pousse à introduire deux articulations avec des roulements ; [23] la première à mouvement circulaire autour de l'axe qui supporte les modules photovoltaïques et la deuxième, à mouvement de translation apte à soulever le premier moteur ainsi que son support comme nous le montre la figure III.9.



Figure III.9 Système mécanique réalisé : (a) une réalisation de l'articulation en 3D sous SolidWorks, (b) une photo réelle de l'articulation réalisée

Le détail de la conception de l'articulation sera présenté sur l'annexe [A].

a- Calcul du moteur 1 autour de l'angle Ω

La figure III.10 montre les dimensions du système mécanique complet. La partie tournante avec l'angle Ω présente une masse (m) égale à 16,42 kg, une longueur (L) égale à 124 cm et une épaisseur moyenne (e) égale à 3,50 cm. Alors le moment d'inertie de cette partie mobile est donné par [23]:

$$J_p = \frac{m}{12} \left(e^2 + \left(\frac{L}{2} \right)^2 \right) \quad \text{III.6}$$

La présence des roulements bien lubrifiés, nous permet de supposer la négociabilité des frottements d'où, le couple électromagnétique à fournir par le moteur 1 est donné par :

$$C_{em1} = J_p \frac{d\omega_\Omega}{dt} \quad \text{III.7}$$

Où le moment d'inertie de moteur 1 est négligeable par rapport à celui du panneau. La plus grande valeur du couple à fournir est celle équivalente à une augmentation de la vitesse de 0 à sa valeur maximale $\omega_{\Omega_{\max}}$ dans une durée de temps Δt . Alors :

$$C_{em1\max} = J_p \frac{d\omega_{\Omega\max}}{\Delta t} \quad \text{III.8}$$

Cette valeur maximale de couple permet au moteur 1 d'absorber un courant maximal $I_{a1\max}$ sous une tension $V_{a1} = 12V$.

Ce courant maximal nous permet de savoir la puissance maximale du moteur 1 à choisir :

$$P_{m1} = V_{a1} \cdot I_{a1\max} \approx \omega_{\Omega\max} \cdot C_{em1\max} = J_p \frac{\omega_{\Omega\max}^2}{\Delta t} \quad \text{III.9}$$

Pour notre travail, nous avons pu trouver un moteur à courant continu qui peut faire tourner le panneau de 90° dans 13 secondes. Alors, sa vitesse maximale est :

$$\omega_{\Omega\max} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{13} = \frac{\pi}{26} \text{ rad/s} \quad \text{III.10}$$

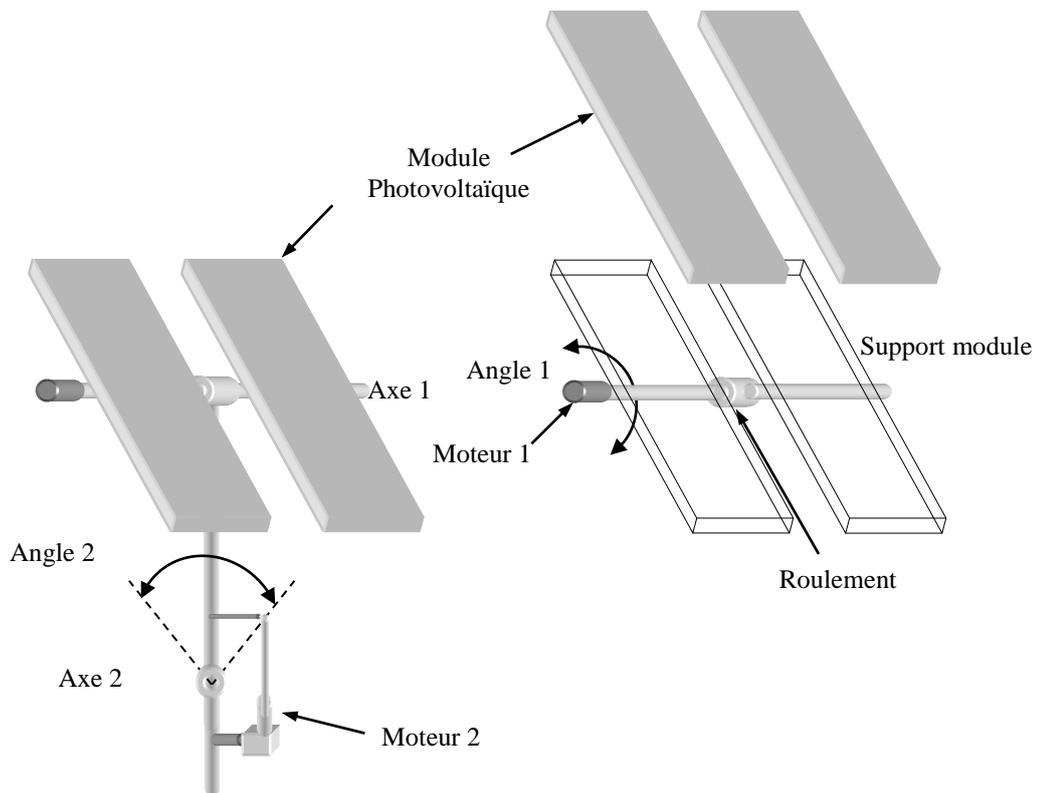


Figure III.10 Construction mécanique pour les axes de rotation

Le temps moyen de montée de la vitesse de 0 rad/s à $\pi/26 \text{ rad/s}$ a été estimé par mesure à $0,4\text{s}$. Alors, la puissance est calculée à :

$$J_p = \frac{15,42 \cdot \left(0,035^2 + \left(\frac{1,24}{2} \right)^2 \right)}{12} = 0,50 \text{ kg.m}^2 \quad \text{III.11}$$

$$P_{m1} = \frac{0,50 \cdot \left(\frac{3,142}{26} \right)^2}{0,4} = 4,56 \text{ W} \quad \text{III.12}$$

Le courant maximal à fournir par le moteur 1 devient alors :

$$I_{a1\max} = \frac{P_{m1}}{V_{a1}} = \frac{4,56}{12} = 0,38 \text{ A} \quad \text{III.13}$$

b- Calcul du moteur 2 autour de l'angle β

Le deuxième moteur destiné à l'angle d'inclinaison β est monté sur un vérin qui sert à convertir la rotation en translation (Z). Géométriquement, chaque déplacement Z est équivalent à un angle β de rotation transversal du panneau [23];

$$\sin \beta = \frac{Z}{\frac{l}{2}} \quad \text{III.14}$$

Où: l est la largeur du panneau (l = 67cm)

Selon la loi fondamentale de Newton sur la dynamique, le couple électromagnétique à fournir par le moteur 2 au système rotatif selon l'angle β sera :

$$Cm2 = \frac{\frac{d}{2} \cdot r \cdot J'_p \cdot \omega_{\beta\max}}{\left(\frac{l}{2} + h \cdot \text{tg} \beta \right) \cdot \Delta t \cdot \cos \beta} \quad \text{III.15}$$

Avec :

d : Diamètre du moteur 2 avant réduction de vitesse ($d = 2,3\text{cm}$).

r : Rapport de réduction de vitesse de l'engrenage ($r = 2$).

J'_p : Moment d'inertie pour rotation transversale donné par :

$$J'_p = m \times \frac{(e^2 + 0,5^2)}{12}.$$

Δt : Temps nécessaire pour atteindre la vitesse $\omega_{\beta\max}$ ($\Delta t = 0,4\text{s}$).

h : Hauteur du support triangulaire ($h = 44\text{cm}$).

La puissance à délivrer par le moteur 2 devient :

$$P_{m1} = V_{a1} \cdot I_{a1\max} \approx \omega_{\Omega\max} \cdot C_{em1\max} = J_p \frac{\omega_{\Omega\max}^2}{\Delta t} \quad \text{III.16}$$

Pour notre travail, nous avons pu trouver un moteur à courant continu qui peut faire tourner le panneau de $58,3^\circ$ dans 70 secondes. Alors, sa vitesse maximale est :

$$\omega_{\beta\max} = 58,3^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ \cdot 70} = 0,015 \text{ rad/s} \quad \text{III.17}$$

Le temps moyen de montée de la vitesse de 0 rad/s à $\pi/26$ rad/s a été estimé par mesure à 0,4s. Alors, la puissance est calculée à :

$$P_{m2} = \omega_{\beta\max} \cdot C_{m2} = \frac{\frac{d}{2} \cdot r \cdot J'_p \cdot \omega_{\beta\max}^2}{\left(\frac{l}{2} + h \cdot \text{tg} \beta\right) \cdot \Delta t \cdot \cos \beta} \quad \text{III.18}$$

$$J'_p = \frac{22 \cdot \left(0,035^2 + \left(\frac{0,67}{2}\right)^2\right)}{12} = 0,21 \text{ kg.m}^2 \quad \text{III.19}$$

La puissance est maximale à un certain angle β_m :

$$P_{m2} = \frac{\frac{d}{2} \cdot r \cdot J'_p \cdot \omega_{\beta\max}^2}{\left(\frac{l}{2} + h \cdot \text{tg} \beta_m\right) \cdot \Delta t \cdot \cos \beta_m} = \frac{\frac{0,023}{2} \cdot 2 \cdot 0,21 \cdot (0,015)^2}{\left(\frac{0,67}{2} + 0,44 \cdot \text{tg} \beta_m\right) \cdot 0,4 \cdot \cos \beta_m} \quad \text{III.20}$$

La puissance est maximale ($P_{m2} = 3,87\text{W}$) pour un angle $\beta = 0,2155 \text{ rad} = 12,35^\circ$. Le courant maximal à fournir par le moteur 2 devient alors :

$$I_{a2\max} = \frac{P_{m2}}{V_{a2}} = \frac{3,87}{12} = 0,32 \text{ A} \quad \text{III.21}$$

III.7.2.3 Configuration électrique

Nous avons subdivisé notre travail en deux parties principales, une partie de puissance et une partie de commande : pour la première, nous avons réalisé une carte de puissance qui actionne les deux moteurs et qui est basée sur L298 nommé le double pont en H destiné au contrôle des moteurs à courant continu alimentés par 12 Volts (source batterie). Le pilotage des moteurs se fait à l'aide de

deux demi-blocs destinés à adapter les niveaux de tensions commutées vues à la sortie du circuit de commande. Le double Pont en H est conçu d'une façon à supporter les tensions élevées et les courants importants avec une logique de commande TTL (courant faibles, basse tension, idéal donc pour un microcontrôleur). Chaque demi-bloc est chargé de commander (tout ou rien) l'un des deux moteurs dans les deux sens, afin d'assurer la poursuite et les fins de course à chaque fin de trajet. Pour la partie de commande, on peut la décomposer en deux blocs : le premier est l'interfaçage entre le PC et le microcontrôleur, le deuxième est le bloc de contrôle. Cet interfaçage est chargé d'exécuter et afficher les commandes reçues du PC à travers une liaison USB.

Dans le but d'avoir un fonctionnement optimisé et mieux contrôlé, l'intervention d'un microcontrôleur PIC18F2550 comme deuxième bloc de commande est préférable. Il s'agit d'un microcontrôleur alimenté à 5V et possédant un jeu d'instructions réduit (RISC) qui s'intègre essentiellement dans un boîtier à 28 broches. En bref, voici un résumé de ses caractéristiques annexe [B]. Ce dernier prend la relève de commande avec la validation et le traitement des différents signaux émis et reçus. L'échange d'informations entre ses pins RC₄ et RC₅ et les PINs 2 et 3 (-D et +D) du PC se fait à travers un adaptateur USB [42]. La carte électronique réalisée est montrée sur cette figure où est présentée sa face supérieure et inférieure. La face inférieure de la carte (l'auto-routage des pistes) a été réalisée en utilisant la version 5 du logiciel Eagle, voir annexe [C]. Les différentes phases de la réalisation du circuit imprimé sont données sur l'annexe [D].

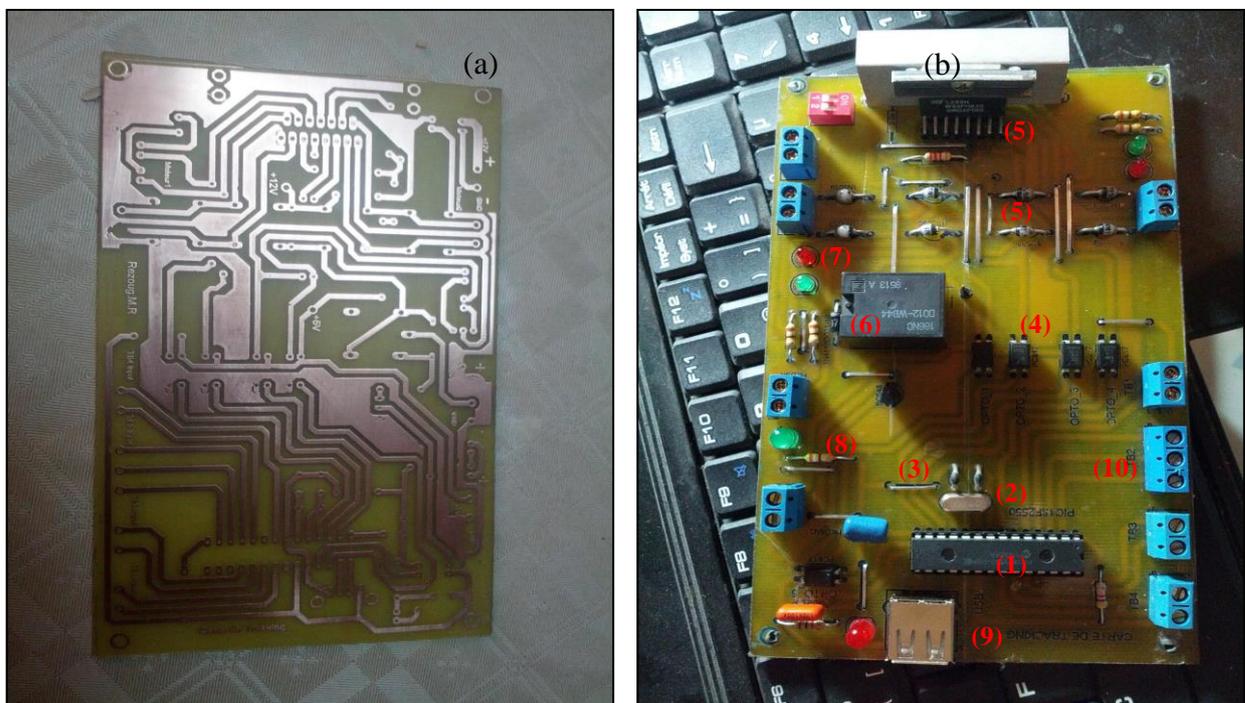


Figure III.11 Dispositif électrique d'orientation, (a) la plaque des proxys avant montage, la face inférieure, (b) la carte électronique, la face supérieure

En plus des éléments périphériques vitaux pour le fonctionnement du pic (alimentation, oscillateur, MCLR), nous avons exploité les ports de 11, 12, 13 et 18 pour exciter les commandes des deux demi-blocs. Les mesures des positions du moteur 1 et du moteur 2, de la tension et du courant sont reçues sur les broches 2 à 5 respectivement. La communication avec l'ordinateur bi-directionnellement est effectuée à travers le port USB sur « DATA+ et DATA- ». Cette conversion n'influence pas sur le cadencement de la trame envoyée ou reçue [44].

Comme il est clair sur la carte réalisée sur la figure III.11, nous avons utilisé.

1. Le microcontrôleur 18F2550 : le noyau de la carte de commande. Il forme ainsi un ensemble d'une grande facilité d'utilisation, sans bus de données ni bus d'adresses puisque seules les broches nécessaires à l'application sont accessibles.
2. Un quartz de 20 Mhz afin d'obtenir des fréquences plus précises et de synchroniser avec l'RTC du PC.
3. Deux condensateurs de 15 *pf* afin de condenser le 0V du microcontrôleur.
4. Quatre Opto-coupleurs EL817 : pour séparer les impulsions émises par le microcontrôleur par un mitage optique de la partie de puissance (L298).
5. Huit diodes 1N5004 rentrent dans la conception du bloc de puissance (le contour du L298).
6. Un relai qui allume et éteint une charge externe qui peut être une lampe d'éclairage public qui s'allume après le coucher du soleil et s'allume après son lever.
7. Quelques résistances pour diviser la tension et diminuer l'intensité du courant.
8. Des LED pour témoigner les interruptions.
9. Un USB qui sert à connecter le dispositif électrique au PC.
10. Des borniers (TB Terminal Board) connectés à notre dispositif (les capteurs, les moteurs, alimentation, etc.).

Dans le microcontrôleur, le code implanté prend la tâche d'analyser la trame série RS-485 vue à la sortie du PC et d'extraire les informations nécessaires à la commande du L298 (par conséquent les moteurs). Pour notre travail, chaque deux degrés de l'angle α , le simulateur envoie deux trames vers le microcontrôleur sous le protocole RS-485 qui porte trois informations successives: le moteur à activer, son sens de rotation et la durée équivalente à l'angle d'orientation du panneau, ainsi un signal, pour la lecture des capteurs. D'autre part, le programme implanté dans la mémoire du microcontrôleur sert à extraire de la trame reçue les informations suivantes :

- Le numéro du moteur à commander.
- Le sens de rotation.
- La temporisation.

- La requête de mesure demandée par le PC.

A partir de la valeur obtenue, le nouvel angle β est comparé avec celui d'hier, la différence sera envoyée en valeur et en signe au moteur concerné sous forme d'un sens de rotation et d'une temporisation. A la fin de l'exécution de cette rotation, notre dispositif possède un étage de mesure (les grandeurs électriques et mécaniques) qui lui permet de connaître la position des moteurs, par l'intermédiaire d'un capteur de position qui envoie la nouvelle valeur de l'angle β à l'ordinateur. Si l'heure actuelle correspond à la fin de la journée, le système de motorisation s'arrête et initialise les angles pour les préparer à une nouvelle journée ; sinon, le PC calcule aussi la différence d'angle α entre l'actuelle et la précédente pour l'injecter de la même façon au moteur concerné. Parallèlement le PC, demande des mesures du courant et de la tension pour les tracer en fonction du temps. La procédure se répète ainsi jusqu'à la fin de journée (coucher de soleil donc fin de course).

Par ailleurs, une requête de mesure du courant et de la tension est envoyée au PIC afin d'acquérir en temps réel les valeurs de ces grandeurs dans des courbes pour des raisons graphiques. La cadence de cette requête peut être réglée selon la précision demandée.

III.7.2.4 Configuration informatisée

Pour que notre dispositif fonctionne avec des pas bien déterminés selon nos variables, le simulateur a comme tâche de calculer les angles de correction du panneau à partir des angles solaires selon des formules astronomiques. Il est ainsi considéré comme maître par rapport au programme assembleur implanté dans le PIC. Le schéma synoptique suivant résume la relation entre l'environnement Delphi 7 et le microcontrôleur.

Pour l'algorithme de calcul des angles, un simulateur est développé sous Delphi 7 ; voir figure III.12 pour communiquer via la liaison série avec le PIC, par des trames de bits selon une table logique portant l'information des deux angles à envoyer aux moteurs, afin de repositionner à l'aide de commandes impulsionnelles le panneau face au rayonnement solaire.

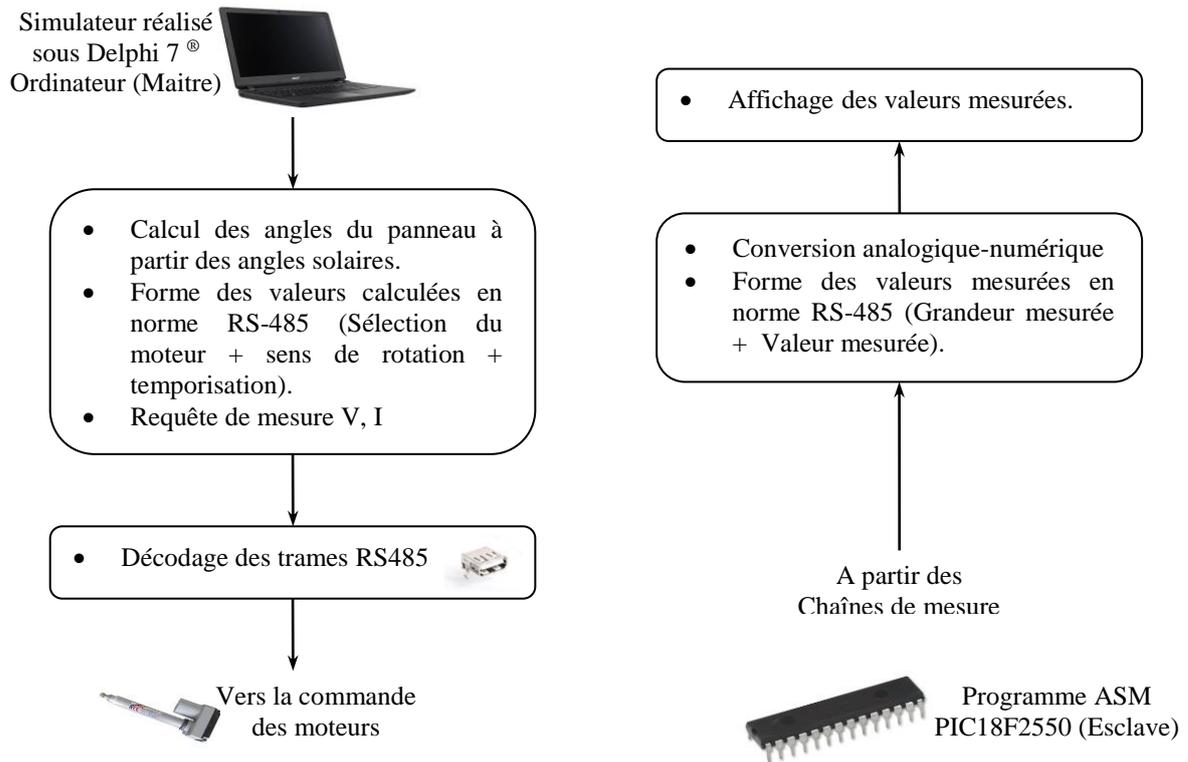


Figure III.12 Echange d'informations entre ordinateur et microcontrôleur

Le simulateur lit l'heure et la date actuelles du PC pour calculer le rang du jour j ainsi que l'heure du lever et du coucher du soleil à partir des coordonnées de l'endroit.

Comme il est connu, les grandeurs altitude et longitude rentrent directement dans la modélisation de la trajectoire du soleil. Ils sont donc considérés comme des entrées. La première configuration des traqueurs actifs (en boucle ouverte) ne dispose pas de capteurs pour récolter les valeurs d'altitude et de longitude. C'est pour cela que nous avons dû trouver une solution pour ne pas insérer les valeurs manuellement. On a donc employé une carte dans notre simulateur qui transforme les pixels en coordonnées axiales de repérage de la souris lorsqu'elle se déplace sur la carte. Ces coordonnées sont ensuite converties en données de localisation des lieux sur la carte (altitude et longitude).

La fenêtre présentée sur la Figure III.13 (a) montre l'interface de démarrage de notre simulateur. A la droite du simulateur, on a un menu fixe où on a accès à cinq fenêtres. Sur ce dernier, une légende donne l'état du dispositif c'est à dire indique, si le dispositif électrique est connecté à l'ordinateur ou pas. Le démarrage de l'algorithme de calcul commence immédiatement après le lancement du simulateur. L'algorithme de calcul extrait dès ce moment les données nécessaires (l'heure de l'RTC de l'ordinateur, la latitude, la longitude). Donc pour éviter le débogage du simulateur, on insère des données initiales aléatoirement.

Pour localiser et extraire les informations nécessaires d'un lieu d'installation, on doit premièrement télécharger une carte géographique de ce dernier. Ensuite, on repère en moins quatre points pour permettre au simulateur d'effectuer un hachage vertical et horizontal afin d'estimer les distances réelles à l'aide d'une librairie sous Delphi comme il est montré sur la Figure III.13 (b). Avec le mouvement de la souris sur la carte, on remarque la variation des valeurs de localisation (latitude et longitude). Il suffit d'effectuer un double clic sur le lieu voulu pour insérer définitivement les paramètres de localisations dans l'algorithme de calcul qui estimera ensuite le lever et coucher de soleil et la durée d'ensoleillement.

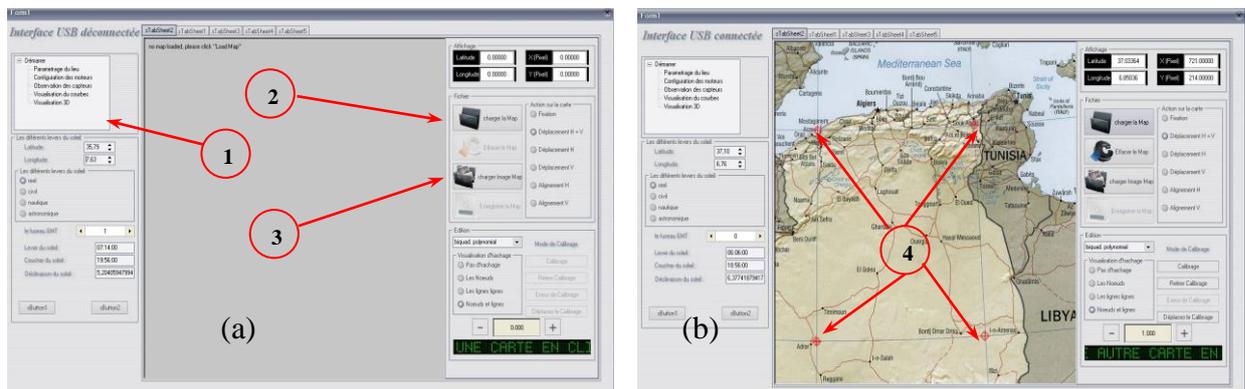


Figure III.13 Interface de démarrage du simulateur, (a) avant la connexion de la carte, (b) après la connexion de la carte.

- 1 : Présente le menu fixe.
- 2 : Présente le bouton de chargement de la photo de la carte géographique.
- 3 : Les paramètres d'ajustement de la photo de la carte géographique.
- 4 : Les quatre points de repérage du hachage.

Le simulateur dispose d'une deuxième fenêtre sur laquelle est mentionné le dimensionnement et le paramétrage des deux moteurs. Cette fenêtre est considérée comme une entrée de l'utilisation où on peut insérer la durée d'activité totale des deux moteurs ainsi que le pas désiré de la correction angulaire. Il existe des boutons pour valider ces données pour que le simulateur puisse finalement fonctionner; comme montré sur la figure III.14.

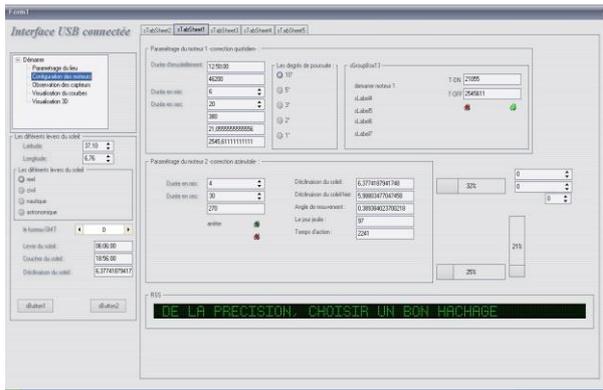


Figure III.14 Fenêtre de paramétrage des moteurs

Pour une surveillance instantanée, la fenêtre trois de notre simulateur, prend la tâche d'afficher la valeur des différentes chaînes mesurées (tension, courant, puissance, température, etc.). Pour sauvegarder les différentes valeurs récoltées par les chaînes de mesure sous forme graphique, Delphi possède des fonctionnalités faciles à manipuler (CHART dotée d'un balayage de temps) comme il est illustré sur la figure III.15.

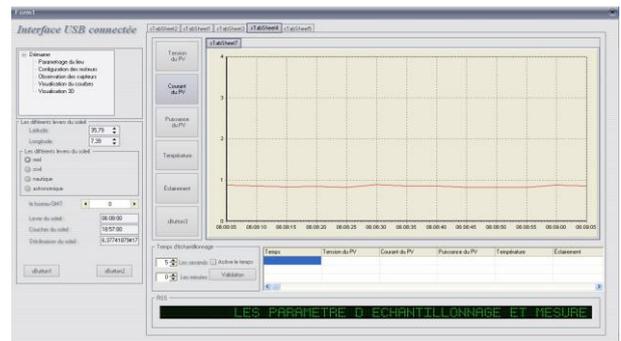
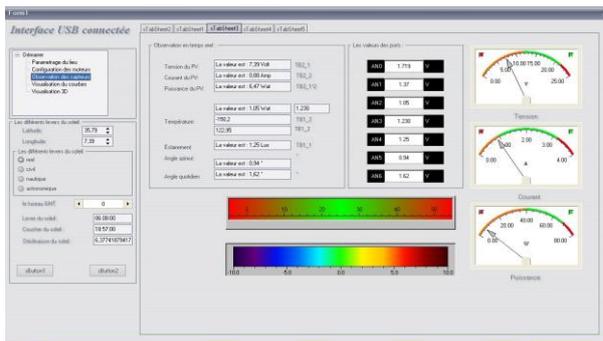


Figure III.15 Fenêtres d'affichage des résultats

A l'aide d'une librairie nommée « LGScene », nous sommes arrivés à réaliser sur la fenêtre cinq, une simulation 3D de notre panneau avec ses axes de rotation afin de surveiller ce qui se passe réellement lors de la correction. La figure III.16 présente quelques positions de notre panneau.

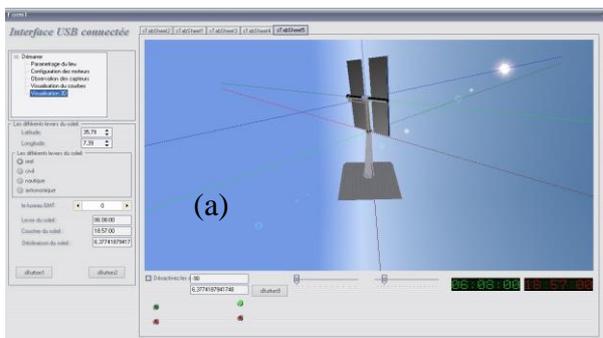


Figure III.16 Fenêtre de simulation 3D

On remarque bien que notre carte et notre simulateur sont synchronisés sur ces deux figures : (a) et (b).

Après le premier cycle, l'algorithme stocke les données insérées précédemment par l'utilisation (la durée maximale du mouvement des moteurs, données de localisation etc.) comme des repères pour la prochaine journée. Il calcule donc, la durée d'ensoleillement et l'heure du lever et du coucher du soleil, il démarre lorsque l'heure de l'RTC de l'ordinateur est égale à celle du lever et s'arrête lorsque cette dernière est égale à celle du coucher et à la fin de chaque cycle. Il garde l'historique de la fenêtre quatre qui est le fonctionnement du cycle (journée) traduit en courbes sous forme de figures portant l'extension bitmap sur la fenêtre quatre. Ces courbes peuvent être utilisées au futur pour des raisons de correction et optimisation. On a obtenu quelques graphes à partir de la Figure III.19 à la figure III.26 afin d'identifier l'efficacité de ce système préprogrammé.

Sur la figure III.17, nous avons présenté un organigramme simplificateur qui résume la démarche logarithmique du comportement du microcontrôleur avec les éléments périphériques et les différentes interruptions internes et externes.

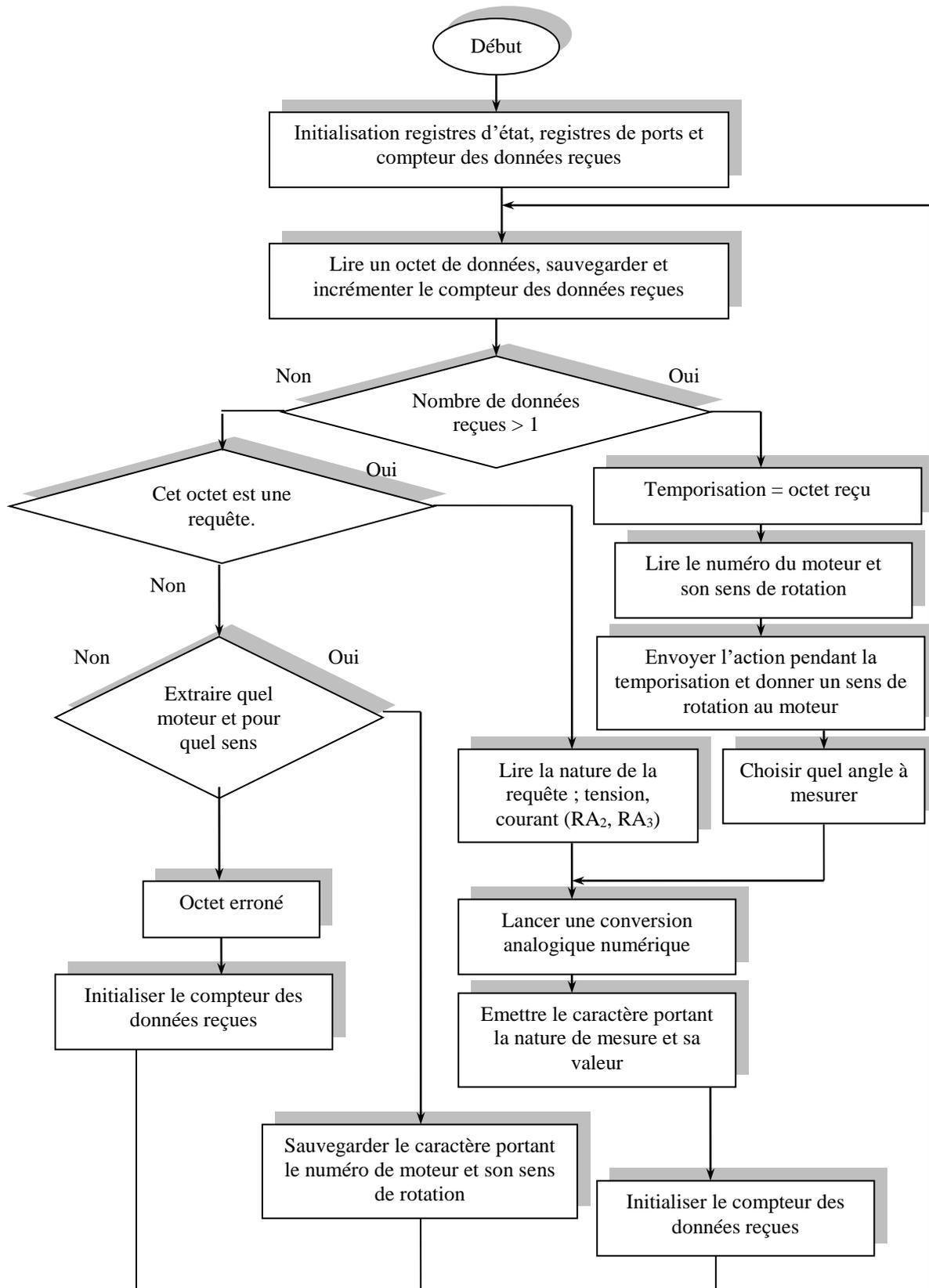


Figure III.17 Organigramme résumant le fonctionnement du microcontrôleur 18F2550

Le développement du programme matériel a été réalisé en assembleur (ASM) dans un environnement IDE de Micro ship MPLAB® [45]. Après cela, il a été compilé et converti en format

hexadécimal (HEX). Pour sa validation, nous avons procédé à une simulation virtuelle du schéma électronique global sous « PROTEUS ISIS® version 7 Professional » [46] incluant le code HEX du programme dans l'élément prédéfini PIC18F2550 proposé par ISIS comme présenté sur la figure III.18. Une fois la validation par simulation virtuelle est faite, nous injectons ce code à l'aide d'un programmeur Winpic, voir annexe [E].

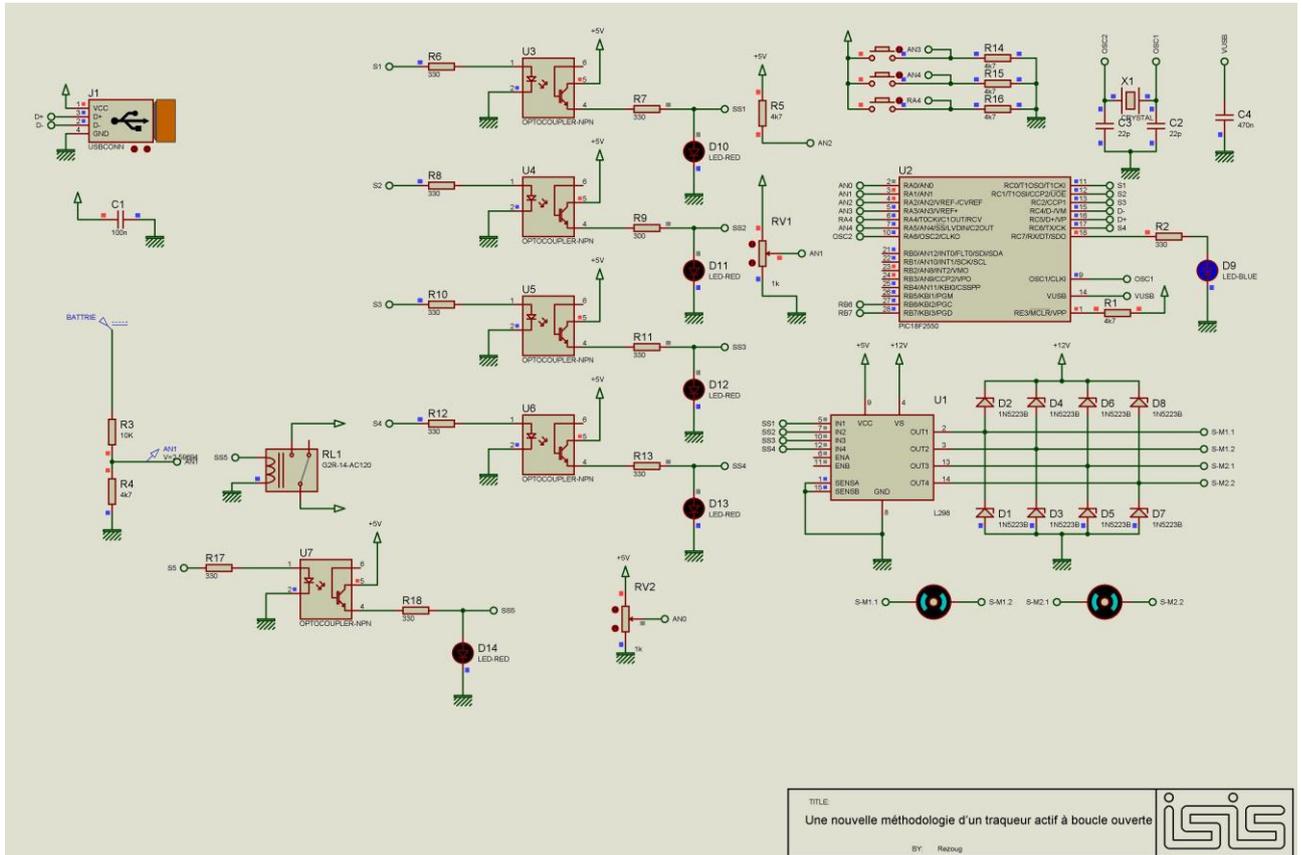


Figure III.18 Réalisation virtuelle de la carte électrique sous ISIS

III.8 Test expérimental et interprétation

Il est connu que chaque jour de l'année possède des heures différentes de lever et de coucher du soleil. C'est pour cela que nous avons équipé notre simulateur d'un algorithme qui inclut des équations de temps qui déterminent l'heure du lever et du coucher du soleil pour tous les jours ; ces extrémités sont considérées comme des interrupteurs de fin de course du simulateur pour inclure la durée dans le programme.

Avant d'entamer l'expérimentation de l'effet d'avoir un système orienté à deux axes avec une technique préprogrammée (traqueur actif à boucle ouverte) et son efficacité par rapport à un système fixe, nous avons effectué une comparaison angulaire pour préciser le meilleur angle que l'utilisateur pourrait fournir à notre système.

Le traqueur solaire est testé en utilisant trois configurations différentes avec des angles de déviation égaux à 2° , 5° et 8° pour déterminer le meilleur pas angulaire.

Les valeurs de courant et de tension sont prises pendant la période d'ensoleillement toutes les 30 secondes afin de calculer la puissance de sortie du panneau PV. Les résultats expérimentaux pour chaque configuration sont pris dans les mêmes conditions de rayonnement solaire pour une comparaison concernant uniquement les angles. Nous nous sommes concentrés dans notre étude comparative sur un court intervalle, ce qui montre une différence évidente. L'analyse comparative des résultats expérimentaux, comme il est observé sur la figure III.19, indique que le meilleur angle de correction qui fournit le meilleur rendement énergétique est de 2° .

N.B : Lors des essais expérimentaux, les légendes ont été notées en anglais pour la publication internationale [23].

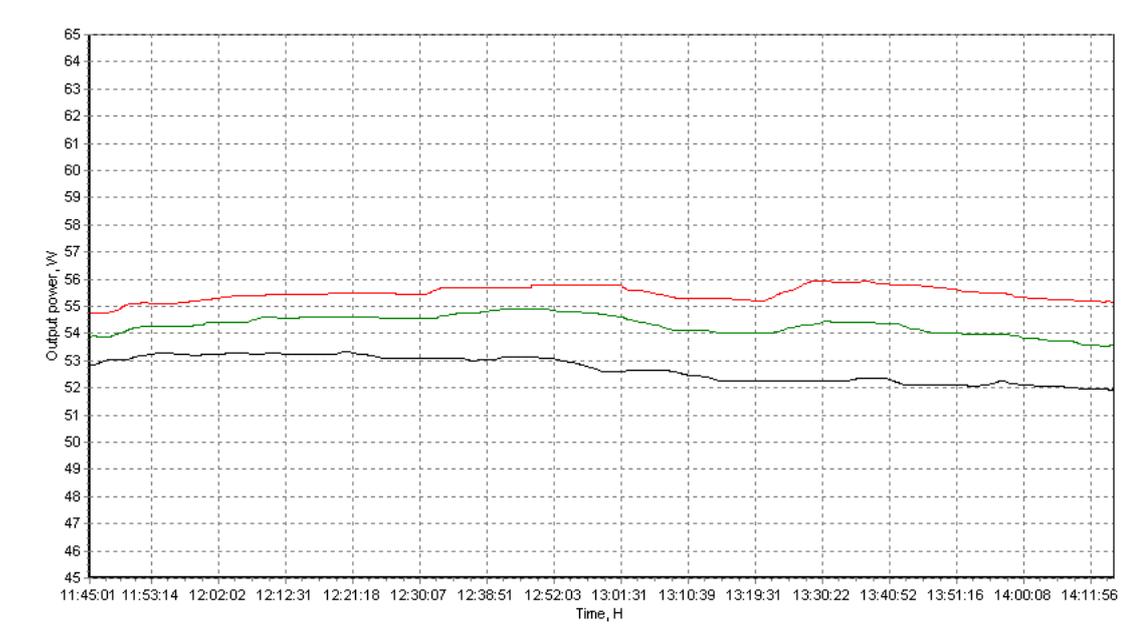


Figure III.19 Allure des résultats expérimentaux de la puissance de sortie d'un panneau à traqueur à deux axes avec différents angles de déviation.

- Courbe rouge: un angle de déviation de 2° .
- Courbe verte: un angle de déviation de 5° .
- Courbe bleue: un angle de déviation de 8° .

Pour les expériences suivantes, nous avons choisis un angle de déviation de deux degrés, ce qui donne une bonne efficacité; ceci nous donne un signal périodique passant de l'état haut pendant 2 secondes à l'état bas pendant 12 minutes. Pour prouver l'efficacité de notre système, nous avons

fait une comparaison des résultats obtenus entre un panneau fixe et un panneau ayant le système de poursuite, nous avons répété l'expérience durant différents jours comme observé dans les figures suivantes. Sachons que la comparaison se fait dans les mêmes conditions de fonctionnement.

Le meilleur angle d'inclinaison et l'orientation d'un panneau PV fixe dans la ville d'Ain Beida (Algérie) ont été proposés dans la littérature. Ain Beida est situé dans l'hémisphère nord à la latitude et la longitude de (35,79 °, 7,39 °) comme cité dans le chapitre précédent. Ainsi, le panneau fixe était placé à un angle $\beta = 35^\circ$ par rapport à l'horizontale et orienté vers le sud [23].

La multiplication de deux paramètres détectés (tension - courant) en fonction du temps pour un panneau fixe et un panneau ayant un système de poursuite, nous donne le changement de puissance pendant la journée ; cette fonction est effectuée par la carte électronique puis prise par le simulateur pour dessiner la courbe. Pour le panneau fixe, la courbe de la puissance de sortie en fonction du temps pour toutes les expériences présentées dans les figures ci-dessous, a une phase ascendante où les rayons incidents deviennent verticaux à midi et restent à une valeur maximale pendant cette phase puis diminuent quand le temps s'éloigne de ce dernier.

En revanche, le dispositif de poursuite, tel qu'illustré dans les figures ci-dessous, donne une courbe de puissance de sortie presque constante, car les rayons incidents restent verticaux tout au long de la journée sur le panneau. Nous remarquons dans les figures ci-dessous que les courbes ne commencent pas à un moment déterminé, parce que le temps du lever et du coucher du soleil varie tout au long de l'année, comme montré par les équations de temps. De plus, l'heure du coucher du soleil n'apparaît pas dans l'axe des temps en raison du principe de fonctionnement du simulateur, qui est programmé par Delphi 7. Cela ne nous permet pas d'afficher la valeur finale sur l'axe des temps.

Les résultats expérimentaux, dans toutes les expériences, indiquent que notre système réalisé à boucle ouverte a une augmentation notable de puissance de sortie par rapport à un panneau fixe. Le gain d'énergie pour chaque expérience est calculé à partir de la zone située entre les deux courbes. Notre étude indique que le gain d'énergie obtenu par notre système de poursuite solaire à deux axes par rapport à un panneau fixe était d'environ 33%, ce qui démontre la bonne efficacité du système réalisé.

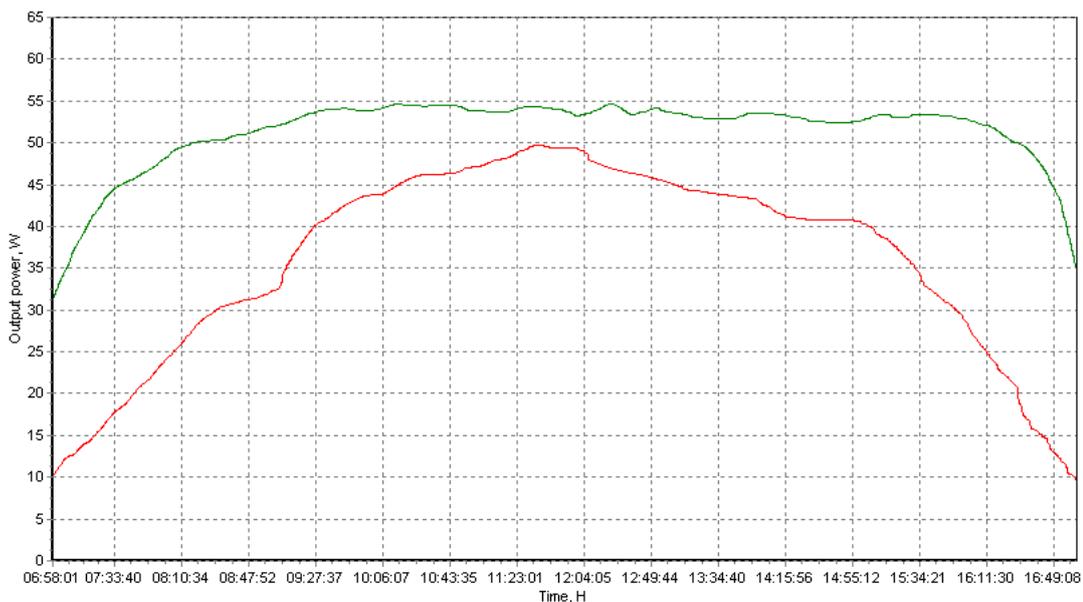


Figure III.20 Allure des résultats expérimentaux de la puissance de sortie d'un panneau à traqueur à deux axes et d'un panneau fixe au 11 janvier 2017

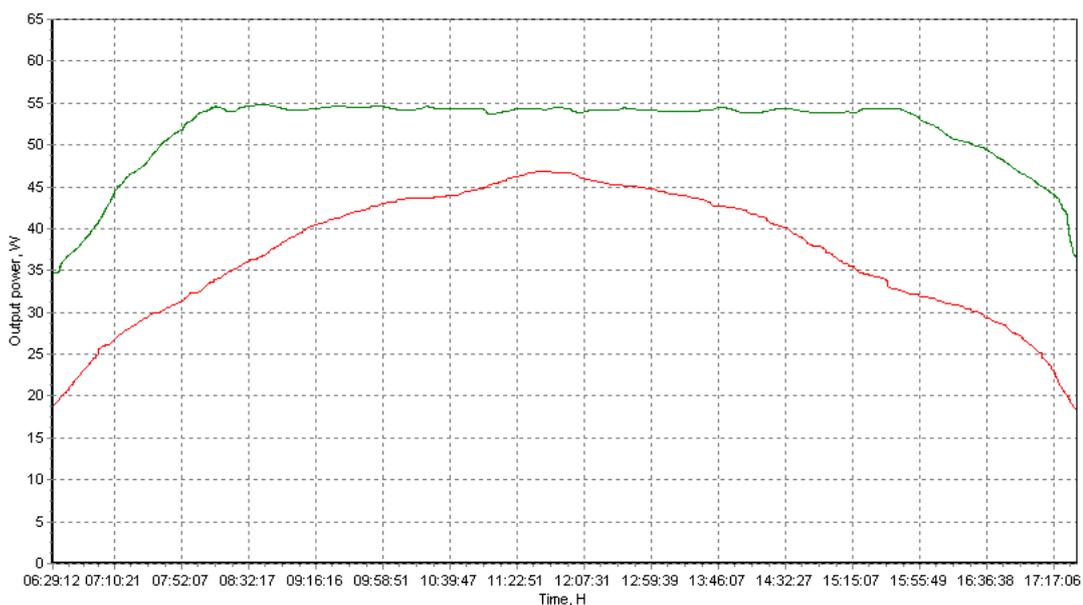


Figure III.21 Allure des résultats expérimentaux de la puissance de sortie d'un panneau à traqueur à deux axes et d'un panneau fixe au 14 février 2017

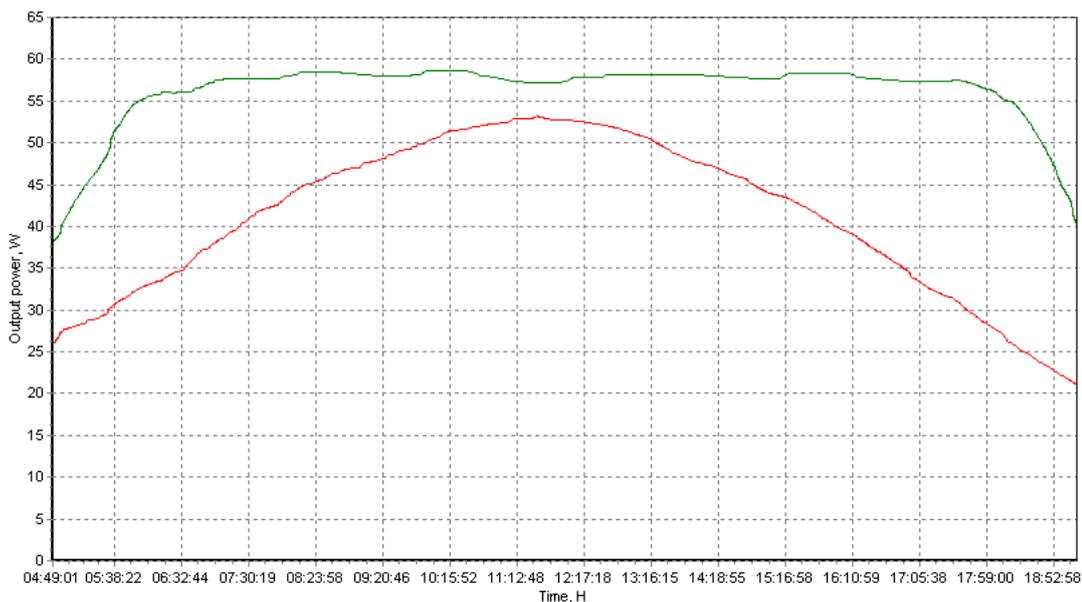


Figure III.22 Allure des résultats expérimentaux de la puissance de sortie d'un panneau à traqueur à deux axes et d'un panneau fixe au 14 juin 2017

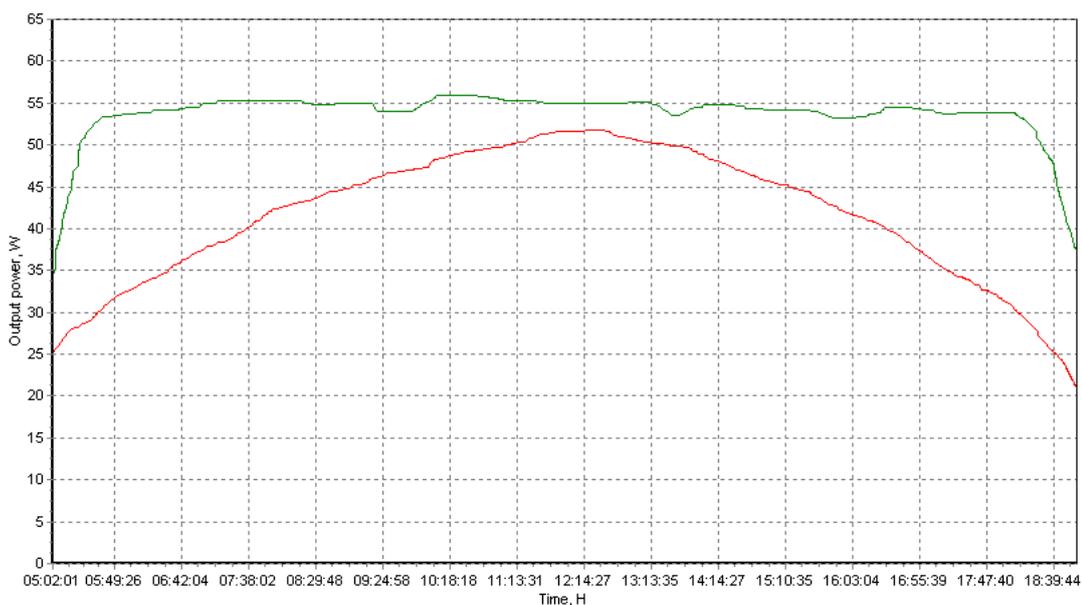


Figure III.23 Allure des résultats expérimentaux de la puissance de sortie d'un traqueur à deux axes et d'un panneau fixe au 27 juin 2017

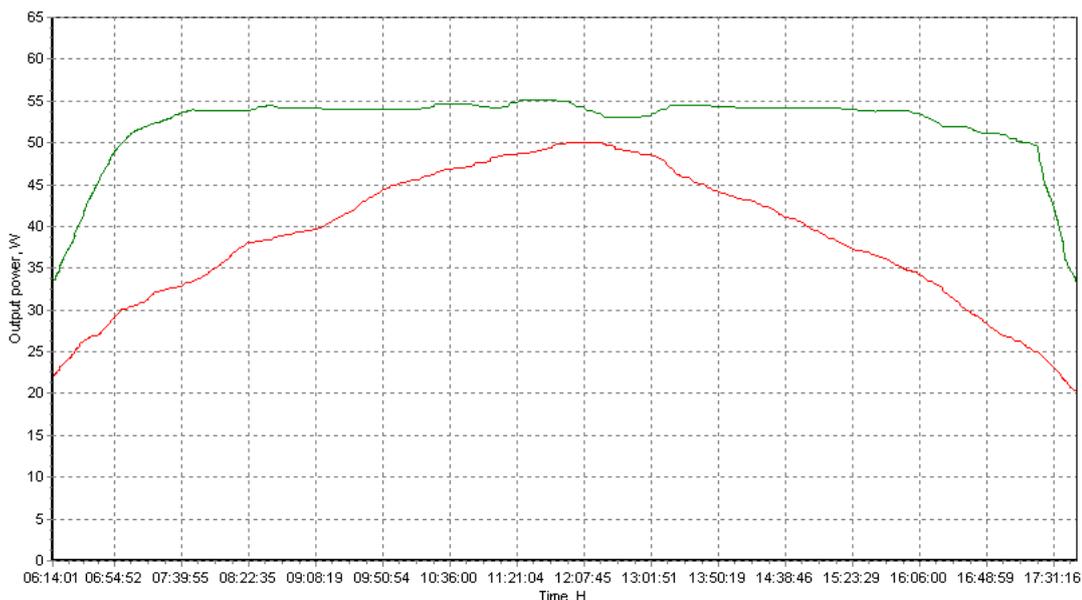


Figure III.24 Allure des résultats expérimentaux de la puissance de sortie d'un traqueur à deux axes et d'un panneau fixe au 15 octobre 2017

- Courbe verte: puissance de sortie (panneau de poursuite à deux axes).
- Courbe rouge: puissance de sortie (panneau fixe).

Le tableau suivant représente l'heure du lever et du coucher du soleil pour chaque jour et la durée de fonctionnement du simulateur.

Le jour du test	Lever du soleil	Coucher du soleil	Durée d'ensoleillement
11 Janvier 2017	06:58	17:02	9H-56m
14 Février 2017	06:29	17:31	10H-55m
14 Juin 2017	04:48	19:12	14H-34m
27 Juin 2017	04:47	19:12	14H-33m
15 Octobre 2017	06:29	17:31	11H-15m
26 mars 2017	05:46	18:14	12H-24m

Tableau III.1 Caractéristiques des courbes

Pour l'expérience suivante, nous allons déterminer le paramètre qui affecte la puissance et le courant généré par le panneau. Nous avons réalisé notre expérience lors d'une journée nuageuse comme illustré dans les figures suivantes.

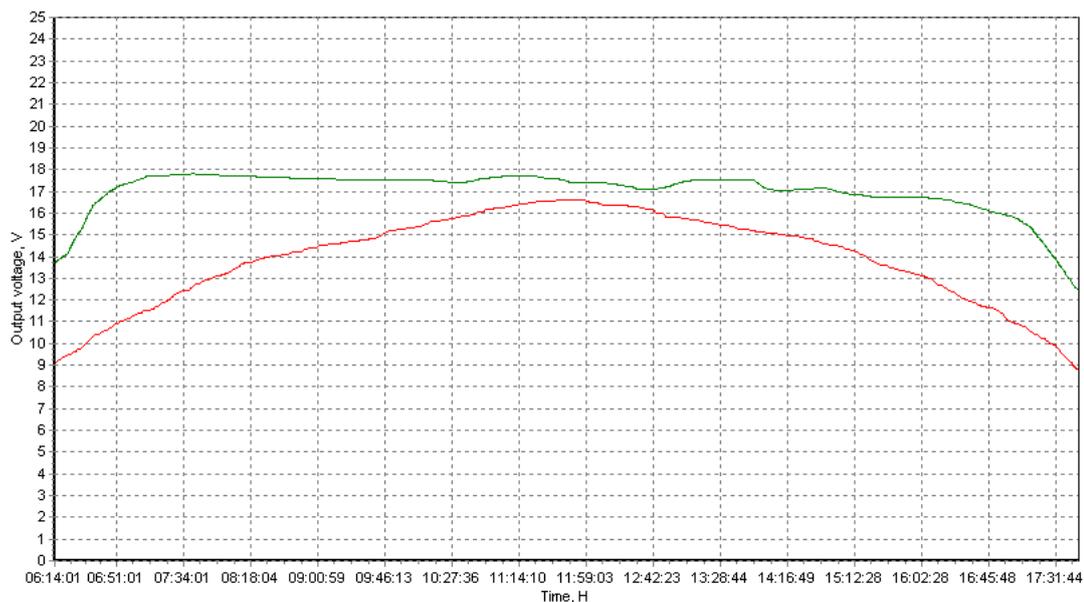


Figure III.25 Représentation temporelle de la tension générée par un traqueur à deux axes et un panneau fixe.



Figure III.26 Représentation temporelle du courant généré par un traqueur à deux axes et un panneau fixe

Lors de notre test par traqueur à deux axes, un passage de nuages est noté entre 11h52 et 15h00 comme le montre la figure III.26 ; on observe une influence négative de l'irradiation sur le courant extrait par GPV.

La comparaison entre les courbes de la tension et du courant montre que la tension est presque totalement indépendante de l'irradiation et de l'angle d'incidence. En revanche, le courant est influencé par celui-ci par conséquent, la puissance de sortie du GPV sera affectée par cette variation de l'intensité du courant.

III.9 Conclusion

Pour connaître la performance d'un système de poursuite solaire, nous avons assemblé la majorité des types de ces systèmes où on a proposé l'étude d'un système populaire qui présente la solution pour l'optimisation par poursuite basée sur un traqueur actif à boucle ouverte à deux axes d'orientation ; puis nous avons réalisé avec notre propre méthodologie une carte électrique avec son interface informatisée sous un nom un traqueur préprogramme modifié à deux axes. On a pour but de maximiser la puissance lumineuse en corrigeant la variation journalière due à l'alternance du jour et de la nuit et la déviation de l'angle d'inclinaison liée à la variation saisonnière basée sur la programmation du soleil trajectoire pour tout point défini par ses coordonnées ; sans oublier l'influence des pas de correction angulaire choisis.

Cependant, les résultats obtenus sont satisfaisants et nous pouvons déduire que le simulateur a réduit les pertes supplémentaires demandées par le mécanisme avec un mode impulsif qui a amplifié le gain énergétique du GPV avec environ 33%. De plus, notre système réalisé montre d'excellentes performances pendant des conditions nuageuses et n'est pas affecté par la lumière artificielle puisqu'elle se concentre sur des équations astronomiques précises.

Dans le chapitre qui suit, on va étudier et détailler l'adaptation d'une nouvelle approche qui démontre l'effet de la collaboration des deux grandes catégories des systèmes de poursuite où le but est toujours l'optimisation. Ce travail sera effectué sous un système embarqué. Il combine les avantages des deux techniques (les techniques préprogrammées et les techniques sensorielles).

Chapitre IV

Poursuite solaire à deux axes par l'approche hybride

IV.1 Introduction

Les traqueurs, les méthodes de recherche de la poursuite restent toujours un domaine de l'optimisation énergétique pour les fabricants, les installateurs et les chercheurs. L'apparition des composants électriques peut changer notre perspective envers de nouvelles topologies.

L'intérêt de ce chapitre est d'étudier et réaliser une nouvelle approche entre la technique préprogrammée et la technique sensorielle pour orienter un module PV directement vers le soleil tout au long de la journée et tout au long de l'année et prédire ou suivre la trajectoire du soleil sans avoir à utiliser des mécanismes de poursuite coûteux et encombrants. Le développement de l'algorithme qui modélise la trajectoire du soleil collabore avec une autre technique qui est la technique sensorielle afin de corriger la moindre erreur d'écart angulaire. Ce mélange des deux techniques entre dans un cadre qui peut être nommé la poursuite hybride. Nous allons aussi procéder aux différentes phases de programmation et de réalisation en utilisant une nouvelle génération de composants électroniques «IMU». Notre technique hybride à deux axes est caractérisée par la stratégie de commande impulsionnelle avec contrôle préprogrammé et une double correction sensorielle.

La plate-forme Arduino prend en charge le contrôle total de la commande hybride ainsi que la manipulation de tous les protocoles de communication.

IV.2 Gains attendus

Le marché du photovoltaïque connaît actuellement une croissance fulgurante de 30% par an, avec la promesse de baisser continuellement les coûts [35]. En site tempéré, l'amélioration en performance entre les installations photovoltaïques fixes correctement orientés vers le sud et les traqueurs varient entre 30 % et 45 % de sortes du traqueur. Au cours du chapitre II, nous avons montré que la trajectoire du soleil n'est pas autant régulière que ce que l'on croit souvent : midi solaire vrai n'est pas le même chaque jour à la même heure ; dans l'hémisphère nord le soleil n'indique pas obligatoirement que le sud est à son point le plus haut. Nous allons essayer d'atteindre un gain énergétique élevé par une hybridation de deux techniques de poursuite [1].

IV.3 Types de traqueurs par quantités de panneaux

Le 2016 a marqué l'apparition d'une nouvelle génération des modèles plus légers, moins que la moitié du poids ordinaire qui est caractérisé par une performance élevée et une robustesse surprenantes.

Généralement, un traqueur peut en théorie soulever des modules solaires de n'importe quels types de modules PV classique, PV concentré ou CSP (thermique : Tour ou Stirling). Mais en réalité, sur le plan pratique seuls quelques traqueurs le peuvent car les coûts impliqués sont élevés et les inconvénients (maintenance, risques supplémentaires) sont nombreux [48, 49, 50].

Le poids de l'installation photovoltaïque résulte de : sortes de panneau et de l'encapsulation des cellules solaires. La majorité des fabricants utilise des modules en verre-TEDLAR, avec plus de performance et légèreté, où le poids ne dépasse pas la moyenne de 15 kilos par module. En tenant toute la structure d'assemblage, il faut presque 12 kilos par m², ce qui ne mène à aucune surcharge par rapport aux toits pour une installation fixe et à aucun risque de destruction structurelle de l'articulation pour l'installation orientée.

Au chapitre III, nous avons donné deux structures d'articulation où nous avons étudié la première figure III.1 en appliquant une correction par une technique préprogrammée modifiée, afin de minimiser la durée de motorisation et optimiser les angles de mouvement ainsi d'éviter le mouvement transversale. Nous avons sélectionné la deuxième structure comme support de notre module, le réglage et la précision en l'absence d'un mouvement rotative non vibratoire à confirmer notre choix.

IV.4 Mécanisme du traqueur

Un traqueur photovoltaïque permet de guider la surface cellulaire du PV en fonction de la position du soleil afin que sa sortie soit dotée par une puissance énergétique supplémentaire [49, 51]. Suivant l'avancée de la journée d'est en ouest l'axe en azimute présente le mouvement correctif primaire, par contre l'axe en hauteur présente le second mouvement correctif dû à l'avancée de la journée et la saison.

Sur la figure IV.1 on peut constater que c'est impossible que la paroi du cadre touche le support vertical de tout le mécanisme puisque chaque axe à son propre pivot. Durant le chapitre II nous avons démontré que le maximum de la valeur angulaire des deux angles astronomiques élévation et azimut est bornée entre « 0° à 90° et 60° à 302° » respectivement.

Puisque l'angle de balayage de notre système sur l'axe azimutal a une grande amplitude environ 250°, l'articulation doit être installée dans un lieu bien dégagé pour éviter d'être interrompue par des obstacles lors de son mouvement. Il faut s'assurer que la longueur du support principal est assez suffisante au moins de : moitié de la longueur du panneau.

Le critère de l'installation de ce système en hauteur est lié au lieu. Une fixation en hauteur permet de passer au-dessus des obstacles pouvant faire écran entre les rayons solaires et la surface

active du panneau. Cependant, les réglages de mise au point du deuxième angle « élévation » ne cause aucun problème puisque le mouvement est une projection locale de la surface globale du module visé [23, 52].

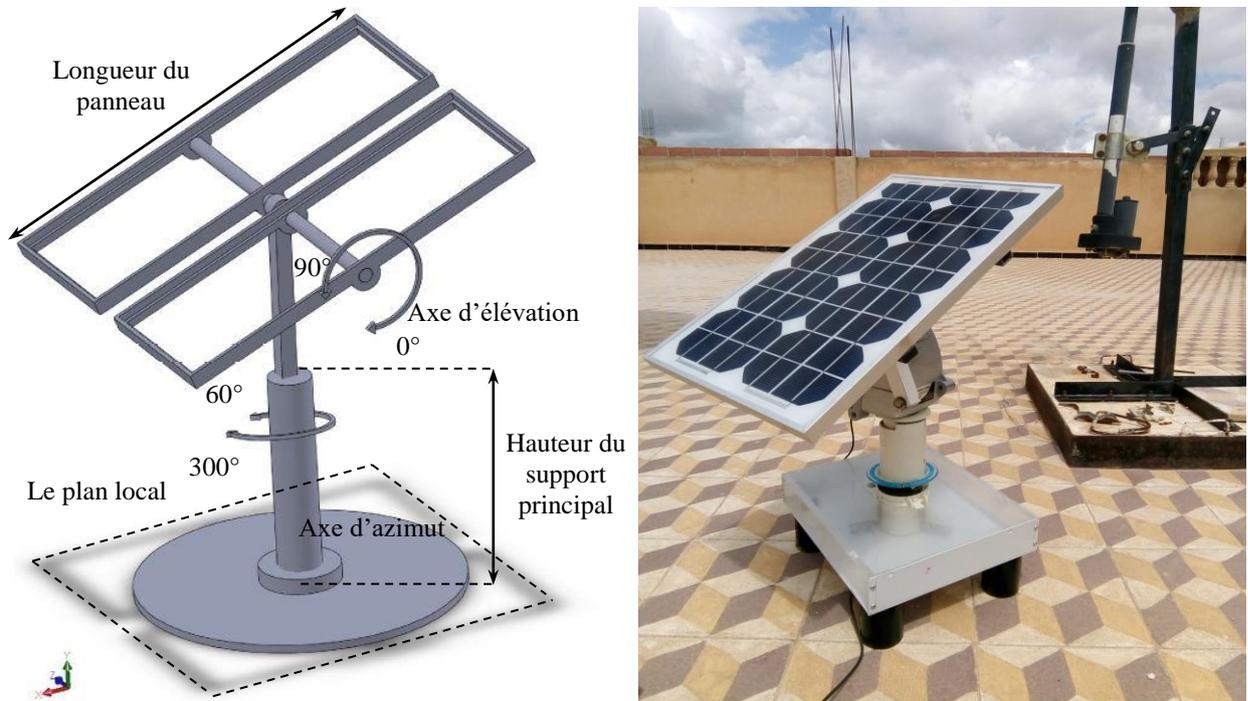


Figure IV.1 Illustration du mécanisme de poursuite

IV.5 Description du système de poursuite

Le système de poursuite réalisé corrige l'écart angulaire (l'élévation et l'azimut) dû au déplacement du soleil. Il contrôle le mouvement d'un module photovoltaïque sur deux axes [48, 49]. Le premier a une rotation de 360° , il est considéré comme un support principal de tout le mécanisme. Le deuxième possède une rotation de 90° , il est responsable de la rotation du panneau photovoltaïque.

Pour garder le rayonnement solaire orthogonal à la surface active du module PV, l'automatisation de la trajectoire du soleil est définie grâce aux équations du temps chapitre II traduites en programmes ; mais cette fois-ci la programmation est faite à l'aide de l'Arduino IDE afin de garder le contrôle total du microcontrôleur « ATmega 2560 » [53] constituant cette carte. Le système réalisé est schématisé par la figure IV.2, Il est conçu de deux parties :

- Une partie opérative constituée de deux articulations motorisées par deux rotors similaires utilisés à la parabole.

- Une partie de contrôle présentant la commande.

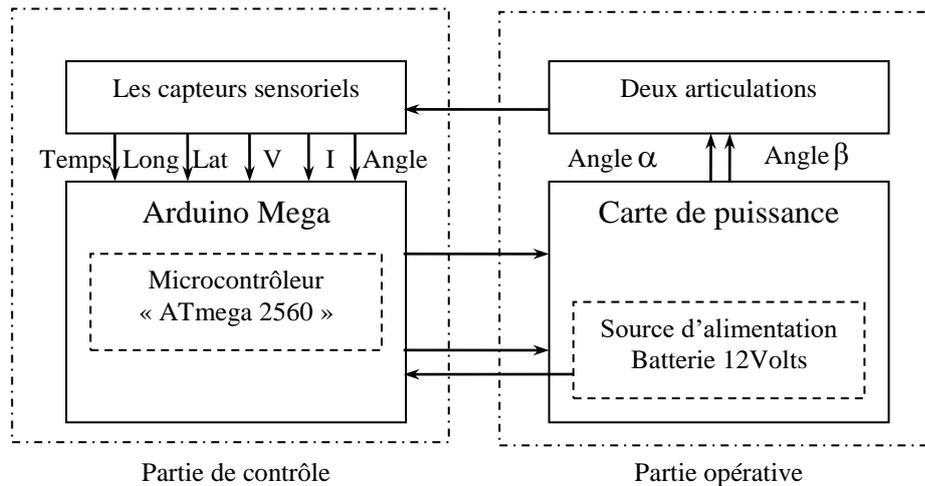


Figure IV.2 Schéma synoptique descriptif du système

IV.5.1 Partie opérative

La conception des systèmes de poursuite est généralement conçue par un axe ou par deux axes. Pour bien amplifier le gain énergétique du module PV, les traqueurs à deux axes présentent la solution idéale. Le choix des moteurs est primordial, où on a choisi des moteurs qui possèdent des encodeurs axiaux afin de savoir à tout moment l'angle exact des moteurs après chaque mouvement. La figure ci-dessous montre l'articulation et le type des moteurs.

Un moteur puissant est celui qui tourne de 360° et qui présente le support global du module. Il est responsable de la correction de l'écart azimutal.

Le poids de l'articulation ne présente aucune contrainte de mouvement sur le moteur car il est monté axialement sur ce dernier à l'aide d'un roulement ; ce dernier peut se confronter à un couple supplémentaire de 2% à partir d'un poids de 48 kilogrammes. Le deuxième moteur permet la correction angulaire de l'élévation. Ce sont des moteurs utilisés couramment dans le domaine de la domotique. Le tableau IV.1 résume les caractéristiques globales de ces deux moteurs.

Numéro du moteur	(1) Elévation	(2) azimut
Modèle	SG2100	HH120
Tension Entrée / Sortie	13 / 18 Volts DC	13 / 18 Volts DC
Consommation d'énergie	50 mA (mode veille) 200 mA (mode normal) 350 mA (Max.)	30 mA (mode veille) 190 mA (mode normal)
Vitesse de rotation	1,9° / sec (à 13V) 2,5° / sec (à 18V)	4° / sec (à 13 V)
Poids	1.3 kilogrammes	1.7 kilogrammes
Taille de l'arbre	(42mm) Petit diamètre	(54mm) Petit diamètre
Poids soulevé	17 kilogrammes	48 kilogrammes

Tableau IV.1 Caractéristiques globales des moteurs choisis

La partie opérative se compose de différents éléments à assembler ou à raccorder au dispositif ainsi que des câbles coaxiaux et une batterie d'alimentation de 12 Volts.

L'assemblage des éléments et leur ajustement influent sur la souplesse du mouvement des deux articulations. Le mât (de 20 à 30 mm) supportant le moteur azimutal doit être stable et parfaitement vertical sinon, la correction du deuxième angle sera perturbée à chaque mouvement impulsionnel.

IV.5.2 Partie contrôle

Le dispositif de commande est basé essentiellement sur la technologie multi sensorielle afin de récolter à tout moment toutes informations qui entrent directement ou indirectement dans les calculs de la trajectoire du soleil et les angles de déviation qui corrigent l'écart par l'intermédiaire des équations de temps.

L'apparition des dispositifs électroniques IMU (unité de mesure inertielle) [54] qui mesure et rapporte (la force spécifique d'un corps, le taux angulaire et parfois le champ magnétique entourant le corps) en utilisant une combinaison d'accéléromètres et de gyroscopes ou des magnétomètres comme critères de choix nous a conduit à les utiliser pour optimiser le gain énergétique par orientation du module PV. Pour une initialisation du PV quasi-parfaite un gyroscope est utilisé.

IV.6 Structure générale du dispositif

La problématique est de réaliser un système de traqueur solaire autonome, automatique et préprogrammé basé en sa conception sur un système embarqué Arduino-Mega qui est capable de réinitialiser astronomiquement les paramètres locaux d'une installation photovoltaïque par la géo-localisation et de corriger instantanément avec une nouvelle approche par les IMUs les fluctuations angulaires (azimut et élévation) causées par le déplacement du soleil à l'aide d'un algorithme préprogrammé et une commande impulsionnelle afin de minimiser la puissance consommée par les actionneurs et augmenter le flux lumineux sur la surface active du panneau. Habituellement, les IMUs sont utilisées dans le domaine d'aéronautique surtout pour les drones. Elles permettent de collaborer avec un récepteur GPS lorsque les signaux GPS sont absents comme c'est le cas dans les tunnels, les bâtiments et surtout durant les interférences électroniques.

Afin de récolter le maximum d'informations possible pour la géo-localisation d'une installation photovoltaïque, nous avons choisis un GPS de type GY-NEO6M compatible avec la carte maîtresse qui est une carte Arduino-Mega. Il peut être synchronisé avec une RTC de notre système ou fonctionner en autonome. La modélisation de la trajectoire du soleil citée précédemment exige la connaissance de quelques paramètres afin de déterminer les angles élévation et azimut. Une horloge interne actualise le GPS afin de détecter les coordonnées locales ainsi que la date et le temps nécessaires dans ce calcul.

L'unité de mesure inertielle fonctionne en détectant une accélération linéaire en utilisant l'accéléromètre interne et un taux de rotation en utilisant notre magnétomètre HMC5883L à chaque correction angulaire « élévation ou azimut ». Donc, elle est à jour avec les prochains angles et les angles actuels. Ces données sont stockées dans l'Arduino dans une EEPROM pour être comparé aux angles des encodeurs des moteurs afin de confirmer leurs valeurs et les diriger comme des pas de correction à travers un étage de puissance pour repositionner les actionneurs.

Pour accéder aux paramètres internes qui s'introduisent dans l'initialisation et la configuration du système de poursuite ou la modélisation de la trajectoire, l'utilisation d'un écran tactile donne la possibilité d'accès à plusieurs liaisons.

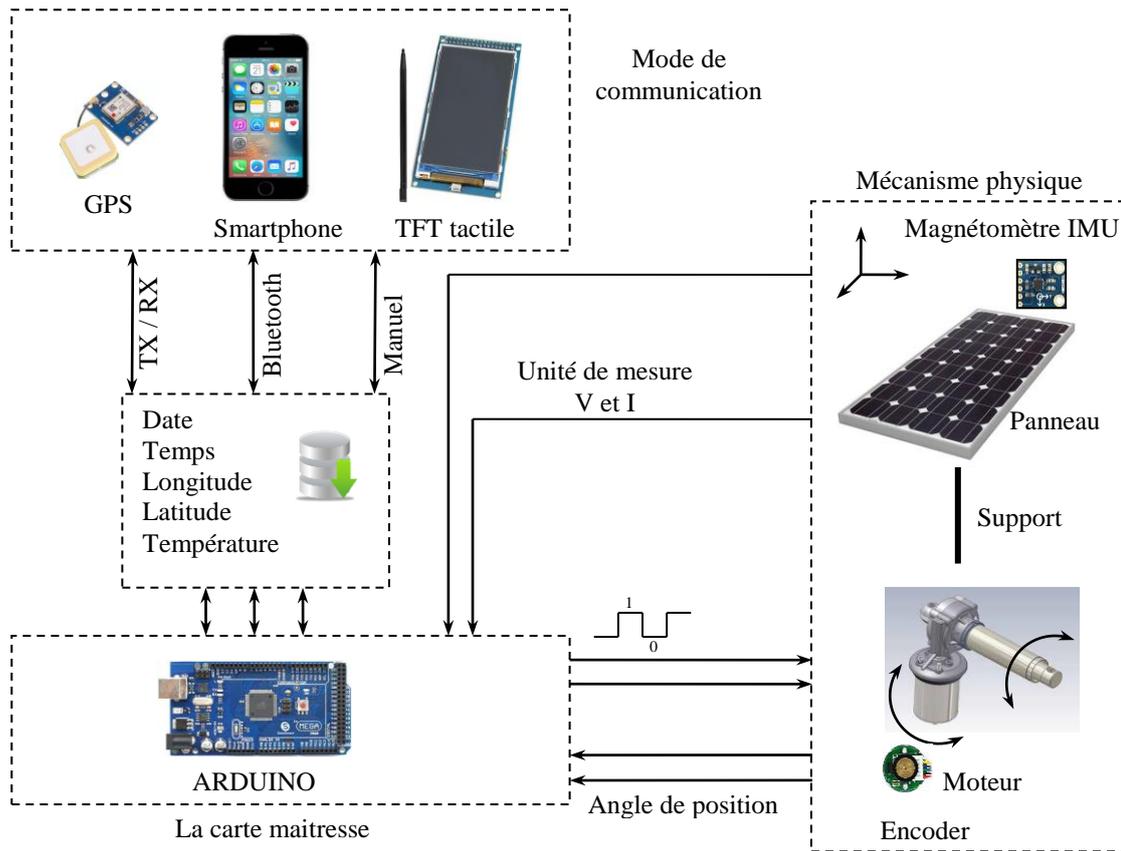


Figure IV.3 Schéma général descriptif du système

IV.6.1 Système embarqué Arduino Mega

Un module Arduino ou avec une autre désignation Genuino, est une marque qui couvre des cartes matériellement libres sur lesquelles se trouve un microcontrôleur (d'architecture Atmel comme l'Atmega328p dans notre cas). Cette plate-forme est basée sur une interface entrée/sortie simple [53].

La programmation sur Arduino se réalise sous un langage qui s'inspire à la fois du C et du C++. Le C++ intervient surtout pour la création des bibliothèques. Plusieurs champs de programmation libre ou sous licence sont désignés pour programmer l'Arduino dû à sa popularité peu importe le changement de l'environnement de développement, le principe reste fixe. Ils peuvent être résumés méthodologiquement comme suit.

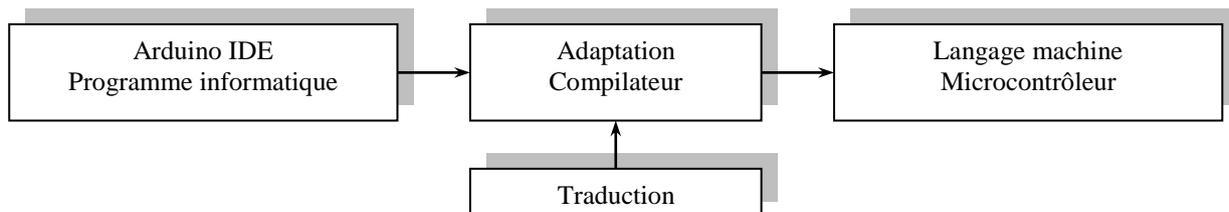


Figure IV.4 Schéma synoptique « environnement de programmation / Arduino »

Une architecture détaillée de cette carte sera présentée sur l'annexe [F].

IV.6.2 Chaînes de mesures et acquisition des données

Dans notre chaîne de mesure, les grandeurs électriques et mécaniques à acquérir à la plateforme numérique Arduino-Mega sont le courant délivré par le PV, la tension vue à sa sortie et les deux angles de rotation du panneau. Le premier passage par le microcontrôleur ATmega 2560 est destiné à une conversion numérique-analogique. L'affichage de la réponse temporelle de ces grandeurs sera effectué à l'aide d'un écran tactile TFT sur quelques fenêtres comme le montre la figure IV.5.

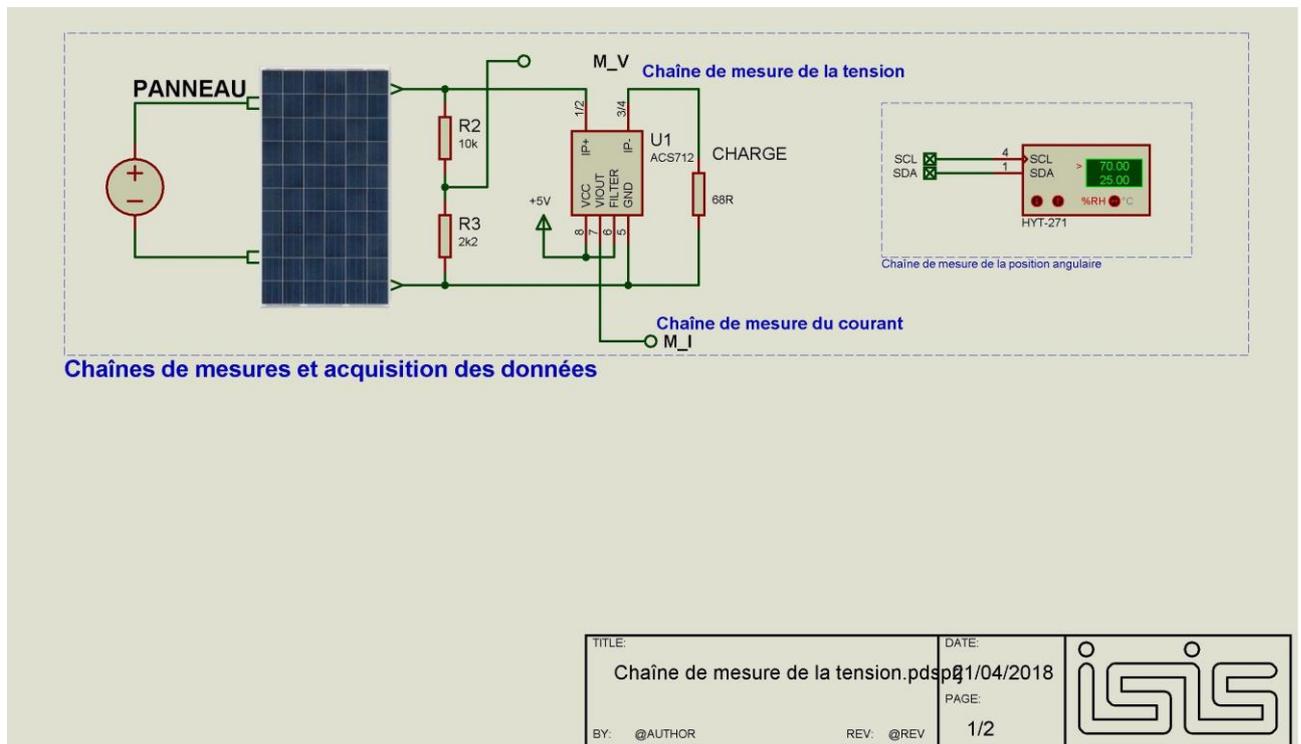


Figure IV.5 Différentes chaînes de mesures sous ISIS

IV.6.2.1 Chaîne de mesure de la tension

Le panneau possède une tension de circuit ouvert mesuré $V_{co}=+21.3$ Volts. Pour préparer une valeur analogique V_{AN0} de 0 à +5 Volts destinée au module CAN du analogique de l'Arduino, nous avons inséré un pont diviseur de tension composé de deux résistances d'un quart de watt R_1 , R_2 .

$$\frac{V_{AN0}}{R_2} = \frac{V_{CO}}{R_1 + R_2} \quad \text{IV.10}$$

Pratiquement, la résistance à monter en parallèle avec l'Arduino pour le module CAN ne doit pas dépasser 10 kΩ pour des raisons de construction interne. Pour calculer la valeur de R_2 , nous imposons une valeur pour $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$.

$$R_2 = \frac{V_{AN0} \times R_1}{V_{CO} - V_{AN0}} = \frac{5 \times 10000}{22 - 5} = 2.94 \text{ k}\Omega \approx 3 \text{ k}\Omega \quad \text{IV.11}$$

IV.6.2.2 Chaîne de mesure du courant

Pour mesurer l'intensité du courant généré par le panneau solaire, le capteur de courant 5A module ACS712 de « MicroSystems » a été employé sur la PIN analogique AN_1 de la carte Arduino-Mega. Il nous fournit une solution rentable et précise pour notre application. Le boîtier du capteur nous facilite son implémentation sur notre réalisation par des barrettes de connexion PINs mâle femelle.

IV.6.2.3 Chaîne de mesure de la température

Le GPS et le magnétomètre possèdent dans leur construction interne un module thermique. Afin de prélever à tout moment la température ambiante de notre installation ou la température de la surface active du panneau, des lignes simples doivent être exécutées sous le compilateur de l'Arduino IDE. Donc, il n'est pas nécessaire d'ajouter un module thermique pour la détection de la température.

- `Float Barometer::lireTemperature()`
- `Float Barometer::getTemperature()`
- `MPU6050_RA_TEMP_OUT_H`
- `int16_t MPU6050::getTemperature()`

IV.6.3 Chaîne de communication

L'horloge, la boussole, le magnétomètre, le TFT et GPS sont des composants à la haute gamme qui nécessitent une grande vitesse de transfert des données afin de fournir à notre système toute fluctuation sans le moindre retard. La nature interne de quelques composants exige l'utilisation d'un protocole bien spécifique qui est « le sigle d'Inter-Integrated Circuit » ou I²C un protocole de communication série qui se caractérise avec un débit élevé de transfert. Au niveau de la carte Arduino-Mega, la connexion est faite sur les deux PINs « 20 et 21 » qui correspondent respectivement aux « SDA » Serial DATA, et « SCL » Serial CLock. Pour qu'il n'y ait pas une confusion des informations lors des échanges de données, le code d'adressage du démarrage doit être respecté pour chaque composant.

IV.6.4 Chaîne de localisation

Afin d'automatiser un mouvement et accéder à une réaction de correction précise, l'électronique de nos jours nous propose des modèles divers à détection magnétique qui peuvent être gérés par un système embarqué tel que l'Arduino. Nous avons sélectionné deux modules « une boussole et un magnétométrique ».

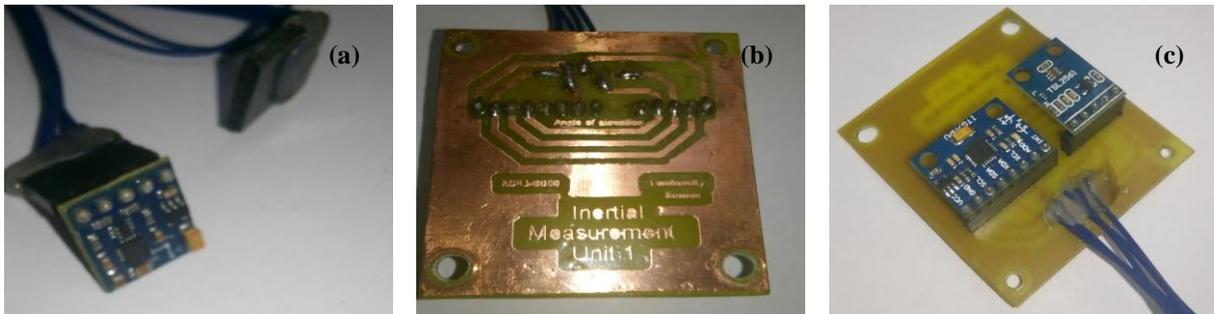
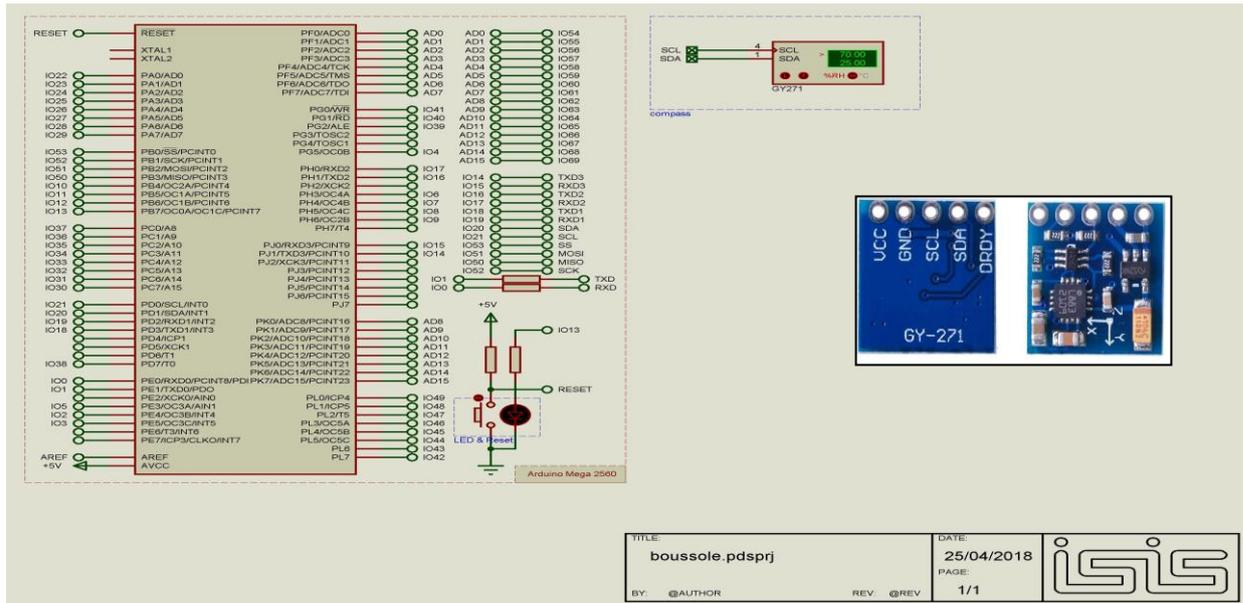


Figure IV.6 Capteurs sensoriels de la localisation angulaire

IV.6.4.1 Repositionnement par GY271

Pour initialiser et connaître la position exacte avant l'installation du panneau solaire, nous avons pensé à automatiser ce processus par une auto détection de la direction en utilisant une boussole. Notre choix a été GY271, un module de détection magnétique à faible champ qui peut être équipé d'une interface numérique ce qui le rend l'outil idéal pour l'extraction des informations de repérage à haute qualité de précision. Ce module est un capteur compact employé souvent dans les sujets de déplacements automatiques tel que les drones, les systèmes de navigation robotisés, les applications aéronautiques.

Trois niveaux de tension différentielle sont générés comme des sorties après la conversion des champs magnétiques par ce module sur les trois axes. Les valeurs de décalages entre ces tensions reflètent l'image réelle numérique de la sortie. La connaissance de ces dernières peut contribuer dans le calcul des en-têtes et la détection des champs magnétiques venant des trois directions.



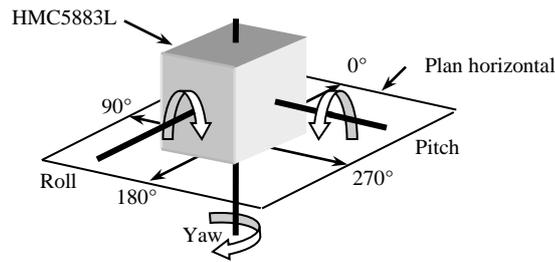


Figure IV.8 Schéma synoptique d'un corps HMC5883

Dans sa position initiale, le système de coordonnées du module magnétomètre et le système de coordonnées du panneau sont alignés les uns avec les autres. Si nous voulons faire tourner l'axe du panneau, nous effectuons les trois rotations élémentaires comme suit:

Rotation par l'angle Roll autour de l'axe X:

$$\begin{cases} X_1 = X_0 \\ Y_1 = Y_0 \times \cos(\text{roll}) - Z_0 \times \sin(\text{roll}) \\ Z_1 = Y_0 \times \sin(\text{roll}) + Z_0 \times \cos(\text{roll}) \end{cases} \quad \text{IV.2}$$

Rotation par l'angle Pitch autour de l'axe Y:

$$\begin{cases} X_2 = X_1 \times \cos(\text{pitch}) - Z_1 \times \sin(\text{pitch}) \\ Y_2 = Y_1 \\ Z_2 = -X_1 \times \sin(\text{pitch}) + Z_1 \times \cos(\text{pitch}) \end{cases} \quad \text{IV.3}$$

Rotation par l'angle Yaw autour de l'axe Z:

$$\begin{cases} X_3 = X_2 \times \cos(\text{yaw}) - Y_2 \times \sin(\text{yaw}) \\ Y_3 = X_2 \times \sin(\text{yaw}) + Y_2 \times \cos(\text{yaw}) \\ Z_3 = Z_2 \end{cases} \quad \text{IV.3}$$

La numérotation 0 sur les coordonnées X, Y et Z présente le point initial. Les numérotations 1,2 et 3 présentent respectivement trois rotations élémentaires (la première, la deuxième et la troisième).

Il est possible de revenir aux angles d'Euler [56] à partir d'une matrice de rotation. L'équation varie en correspondance avec l'ordre d'exécution des rotations élémentaires d'angles d'Euler et les angles d'Euler de Trait-Bryan qui correspondent à l'ordre Yaw-Pitch-Roll avec une correction à l'aide d'une librairie de calibrage. On intègre l'équation (IV.1) pour obtenir les angles comme suit :

$$Yaw = \tan^{-1}\left(\frac{M_{21}}{M_{11}}\right) = a \tan 2(M_{21}, M_{11}) \quad \text{IV.4}$$

$$Pitch = -\sin^{-1}(M_{31}) = -a \sin(M_{31}) \quad \text{IV.5}$$

$$Roll = \tan^{-1}\left(\frac{M_{32}}{M_{33}}\right) = a \tan 2(M_{32}, M_{33}) \quad \text{IV.6}$$

Ceci a été déduit en utilisant le fait que le module magnétomètre effectue une rotation de l'arrière vers l'avant. Les vecteurs de champ locaux se déplacent vers l'intérieur. L'utilisation de cette information ainsi que la connaissance de l'orientation de l'IMU [54] permettent la formation d'une matrice de cosinus de direction qui est utilisée pour convertir les mesures de la trame de coordonnées IMU sur le cadre de coordonnées du panneau. La figure IV.9 illustre l'orientation avec laquelle l'IMU est montée dans le module électronique.

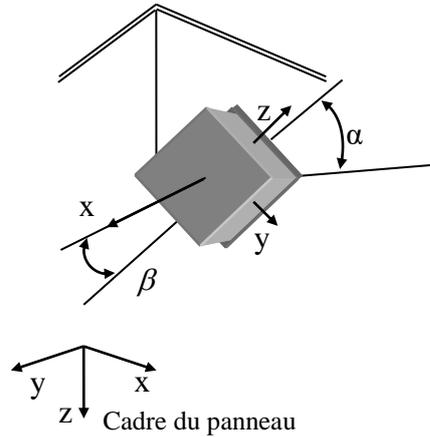


Figure IV.9 La transformation des coordonnées axiales de l'IMU par rapport aux coordonnées axiales du panneau

On peut présenter l'ordre des transformations comme suit :

- Tournez l'alpha + 90 ° autour de l'axe des abscisses pour aligner l'axe z de l'IMU avec l'axe z du support du panneau.

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad \text{IV.7}$$

Tournez le bêta + 90 ° autour de l'axe z pour aligner les cadres de coordonnées de l'IMU et du support du panneau.

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{IV.8}$$

Ainsi, la transformation complète de l'IMU en coordonnées du support du panneau est donnée par la multiplication de l'équation.

$$T = \begin{bmatrix} -\sin \beta & \sin \alpha \cdot \cos \beta & \cos \alpha \cdot \cos \beta \\ \cos \beta & \sin \alpha \cdot \sin \beta & \cos \alpha \cdot \sin \beta \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \end{bmatrix} \quad \text{IV.9}$$

La similarité de mouvement des angles de notre problématique qui est le mouvement d'un panneau PV autour de ses axes aux deux premiers angles Yaw et Pitch nous a conduit à faire une correspondance des angles azimut et élévation avec ces derniers.

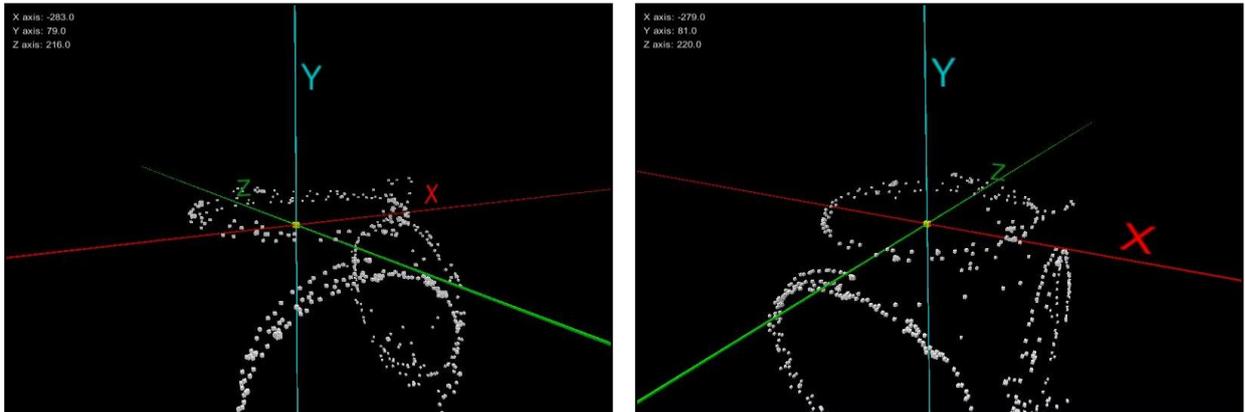


Figure IV.10 Centre du cercle avant les distorsions angulaires de l'IMU

Le schéma IV.11 montre que le centre du cercle après des distorsions de fer dur est maintenant à $Y = 100$, $X = 200$. Il y a donc une polarisation du fer dur sur l'axe X de 200 mGauss et une polarisation du fer dur sur l'axe Y de 100 mGauss. Ces distorsions déplacent le centre du cercle loin de sa position initiale mais préservent la forme originale du cercle. Les distorsions de fer mou de leur part déforment les champs magnétiques existants. Les distorsions de fer mou sont faciles à identifier dans un graphe de la sortie magnétique car elles déforment la sortie circulaire. Les distorsions de fer mou déforment le cercle et lui donnent une forme elliptique. Voici une illustration de la sortie du magnétomètre avec les deux distorsions sur l'axe X, Y et Z par ordre.

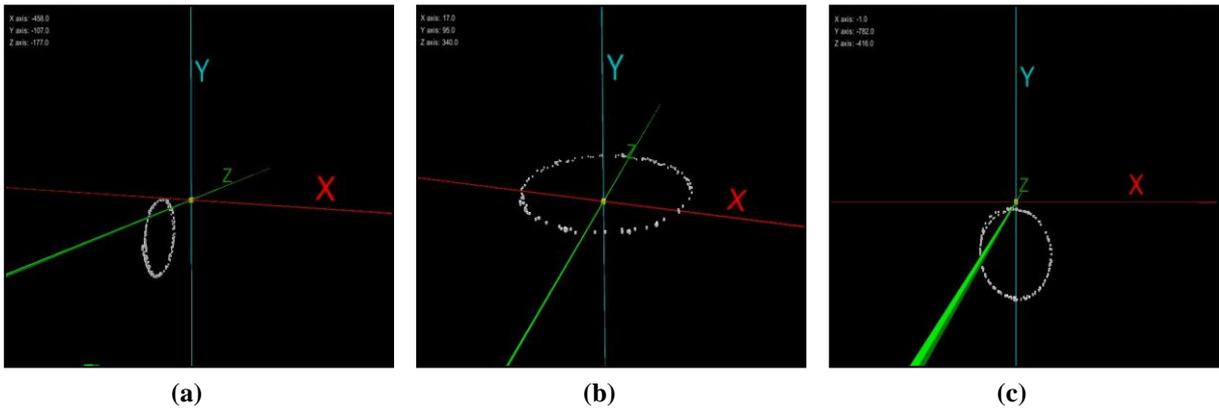


Figure IV.11 Centre du cercle avant les distorsions angulaires sur les axes X, Y, Z séparément ; (a) sur l'axe X, (b) sur l'axe Y, (c) sur l'axe Z

Après l'application d'un calibrage à l'aide de la librairie Arduino IDE, la rotation du magnétomètre sur les axes (X, Y, Z) donne les points de poursuite qui englobent la variation des angles Pitch, Roll et Yaw. La figure IV.12 résume cette réponse.

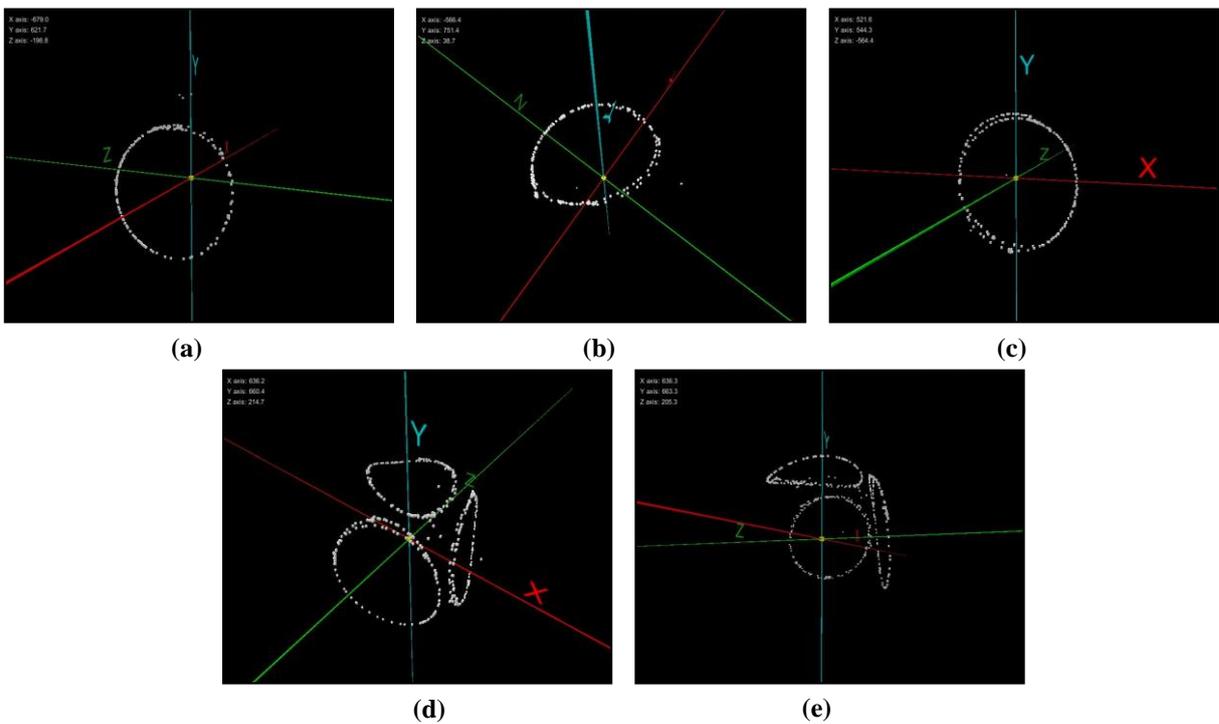


Figure IV.12 Centre du cercle après étalonnage et filtrage sur les axes X, Y, Z séparément ; (a) sur l'axe X, (b) sur l'axe Y, (c) sur l'axe Z, (d) et (e) sur le noyau XYZ

Un cercle qui ne subit aucune distorsion doit être centré sur $X=0$, $Y=0$ et son rayon doit être égal à l'amplitude du champ magnétique.

IV.6.5 Carte de puissance

Puisque les actionnaires sont des moteurs qui présentent la partie de puissance au niveau de notre dispositif, ces derniers doivent être motorisés par une carte de puissance où le circuit L293D présente le bloc de puissance.

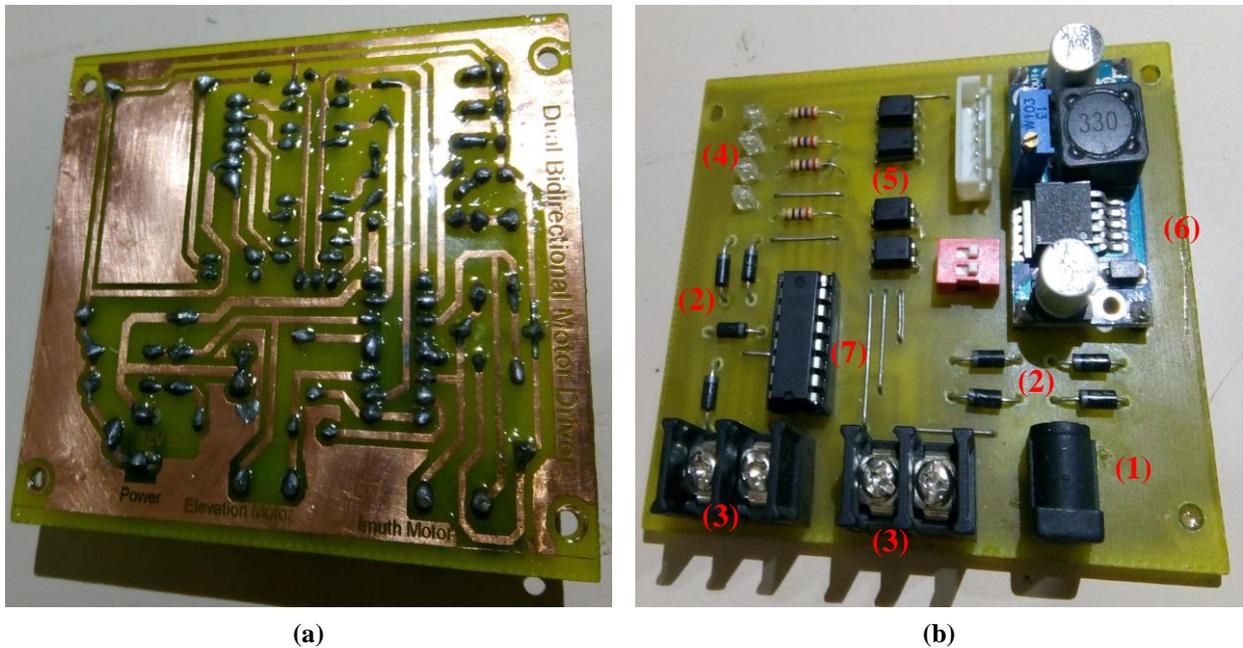


Figure IV.13 Carte de puissance, (a) la plaque époxy, la face inférieure, (b) la carte électronique, la face supérieure

Pour identifier les composants constituant la carte, nous les avons numérotés sur la figure IV.13.

- 1- Fiche Jack ; elle présente l'entrée de la source d'alimentation qui est une batterie de 12 Volts.
- 2- Huit diodes de protection.
- 3- Deux bords terminaux A et B qui présentent les sorties vers les deux moteurs.
- 4- Quatre LEDs où chaque deux d'entre eux sont liées à l'un des deux moteurs. Elles nous indiquent le sens de rotation.
- 5- Quatre optocoupleurs de type EL817 montés afin d'isoler les signaux de commande et le bloc de puissance.
- 6- Un convertisseur DC/DC stabilise la tension d'allumage lors des demandes de courant élevé par les moteurs.
- 7- Un circuit intégré L293D présente le noyau de la puissance.

Les moteurs qui entraînent le panneau photovoltaïque sont à courant continu avec une alimentation de 12 Volts. La carte Arduino délivre une tension de 5 Volts à ses sorties, ce qui ne suffit pas pour mettre les deux moteurs en marche, d'où la nécessité d'un étage d'amplification.

En plus l'inversion du sens de rotation du moteur nécessite un circuit qui inverse les pôles des moteurs. Nous avons alors pensé à utiliser un hacheur, ce qui engendre un encombrement du montage, ceci nous a conduit à choisir un circuit spécial L293D qui permet de commander les actionnaires en marche « Avant » ou marche « Arrière », grâce à un quadruple driver à courant important d' 1 ampère et une tension de 4,5 à 36 volts, qui comporte 4 sorties (OUT₁, OUT₂, OUT₃, OUT₄) qui sont au point milieu avec des transistors Darlington.

Quand une entrée ENABLE est à l'état haut, les entrées associées sont validées et les sorties suivent chacune son entrée et quand elle est à l'état bas, les sorties sont en haute impédance. En association, deux sorties constituent un pont en H.

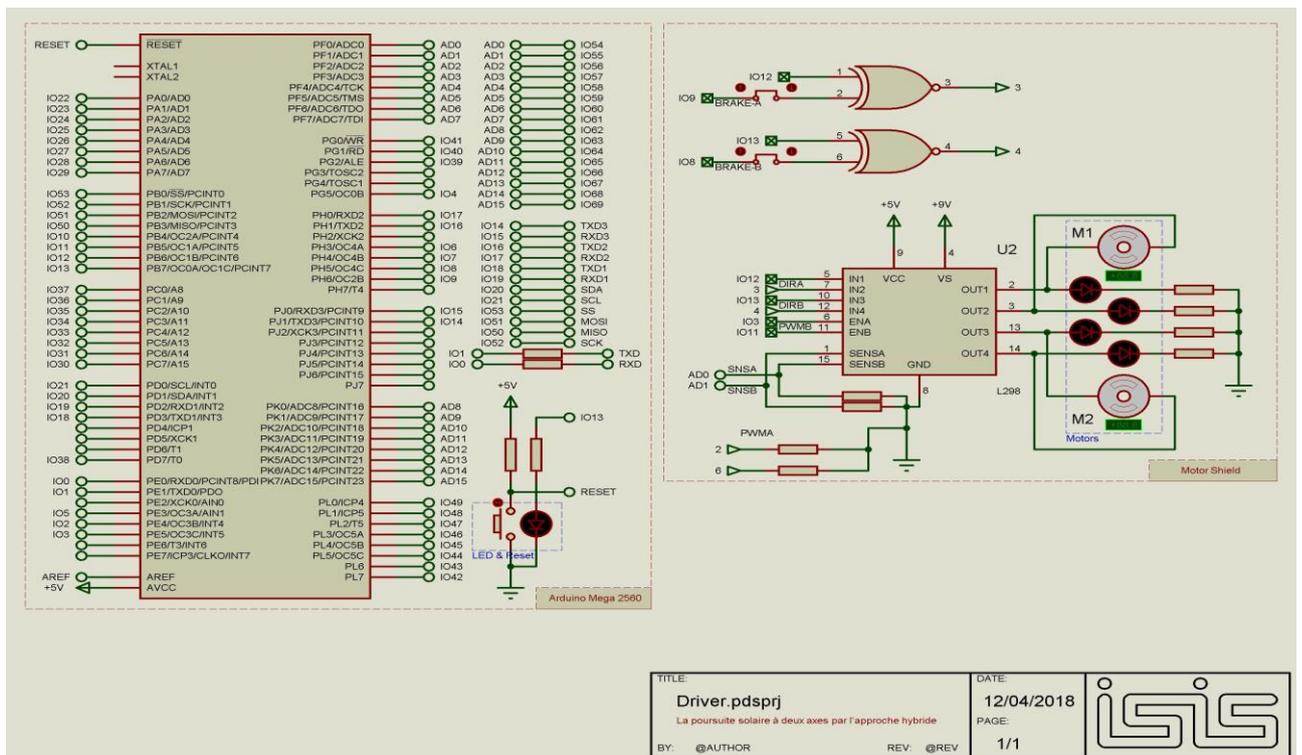


Figure IV.14 Connexions entre Arduino et la partie de puissance sous ISIS

IV.6.6 Liaisons de configuration

Pour faciliter l'accessibilité à notre système et simplifier la configuration lors de l'installation, nous l'avons équipé de plusieurs entrées pour fournir à l'utilisateur une multi-accessibilité aux paramètres internes ou externes qui rentrent dans le calcul de notre optimisation.

IV.6.6.1 Configuration par GPS

La modélisation de la trajectoire du soleil nécessite l'intervention de quelques grandeurs, le GY-NEO6M utilise la géo-localisation par le système géodésique mondial (WGS 84) [55] qui est utilisé dans la cartographie ainsi que la navigation par satellite. Les coordonnées géographiques du système photovoltaïque sont deux grandeurs (latitude et longitude) qui définissent sa position sur la surface d'installation. Les valeurs de latitude récoltées par le système qui correspondent aux zones géographiques au nord ou au sud de l'équateur ainsi que les valeurs de longitude qui correspondent à des emplacements géographiques à l'est ou à l'ouest du méridien de Greenwich sont considérées comme des entrées quelque soit la communication.

A travers deux pins de la carte Arduino (TXD₁ et RXD₁) le GPS communique avec une vitesse de 9600 Bits par seconde. Des paramètres supplémentaires résument le tableau 2.

Paramètres	Valeurs
Alimentation	3V/5V
Modèle	GPS-NEO-6M-001
Antenne	Antenne céramique
Batterie	Batterie de secours rechargeable
Signalisation lumineuse	Témoin LED
Taille de l'antenne	25mm × 25mm
Taille du modèle	5.5mm × 31.5mm
Via	2mm
Le débit en bauds	9600 bits/sec
Rendement	Compatible avec la norme NMEA0183

Tableau IV.2 Paramètres techniques du GPS

Avant de passer à la réalisation pratique, une simulation virtuelle a été menée par un CAO qui est ISIS-PROTEUS de « Institute for Software Integrated Systems » [46], qui a comme rôle de tester la communication entre la carte Arduino et le module GPS avant de l'employer dans l'expérimentation. La figure IV.15 illustre cette première liaison sous ISIS.

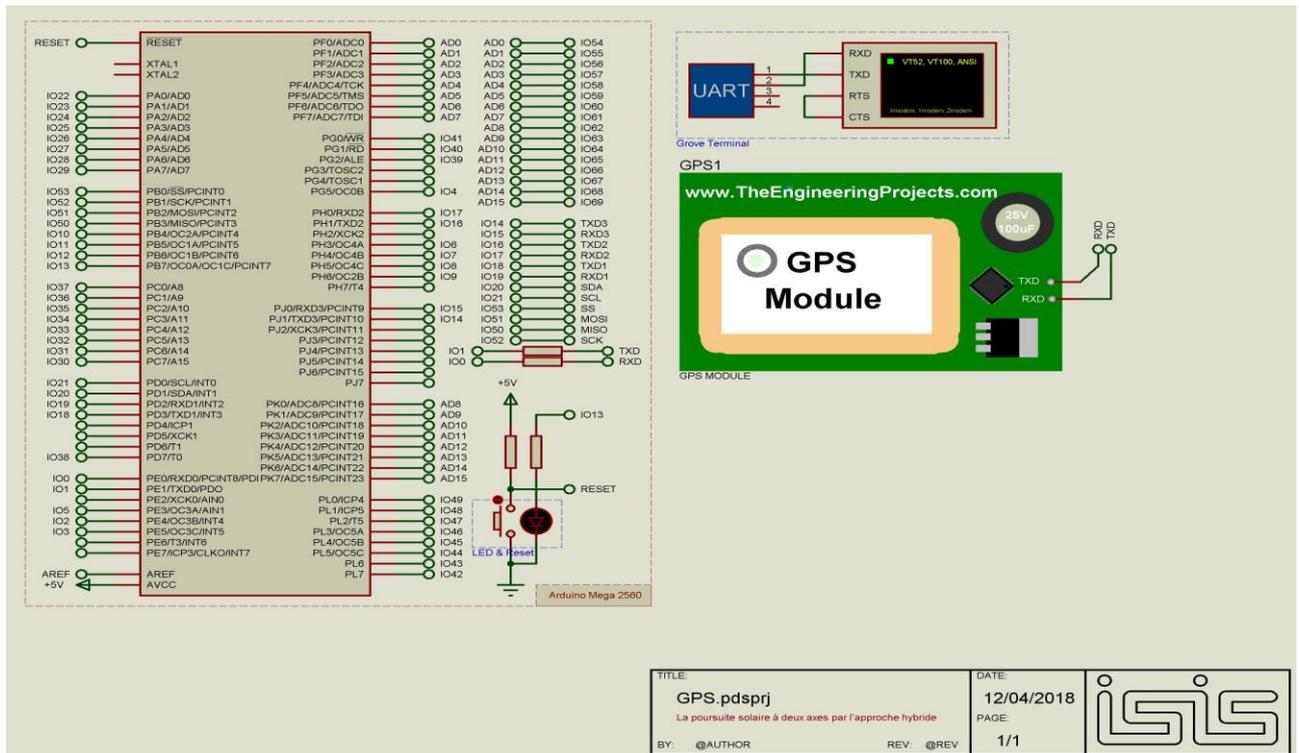


Figure IV.15 Communication GPS avec Arduino Mega sous ISIS

Pendant l'activation de GPS (manuellement ou automatique), l'interface de présentation des différentes informations sur TFT s'expose à un ralentissement d'affichage, cela est dû à un écoulement quasi-total des ressources du calcul vers ce dernier afin de donner la priorité de faire exécuter et actualiser la localisation. La figure IV.16 présente notre solution qui illustre l'utilisation d'un transistor NPN (T) et une résistance (R) d'une valeur 120 Ohm qui collabore avec une touche d'activation et un autre PIN sur Arduino afin d'inhiber toute influence sur l'interface d'affichage.

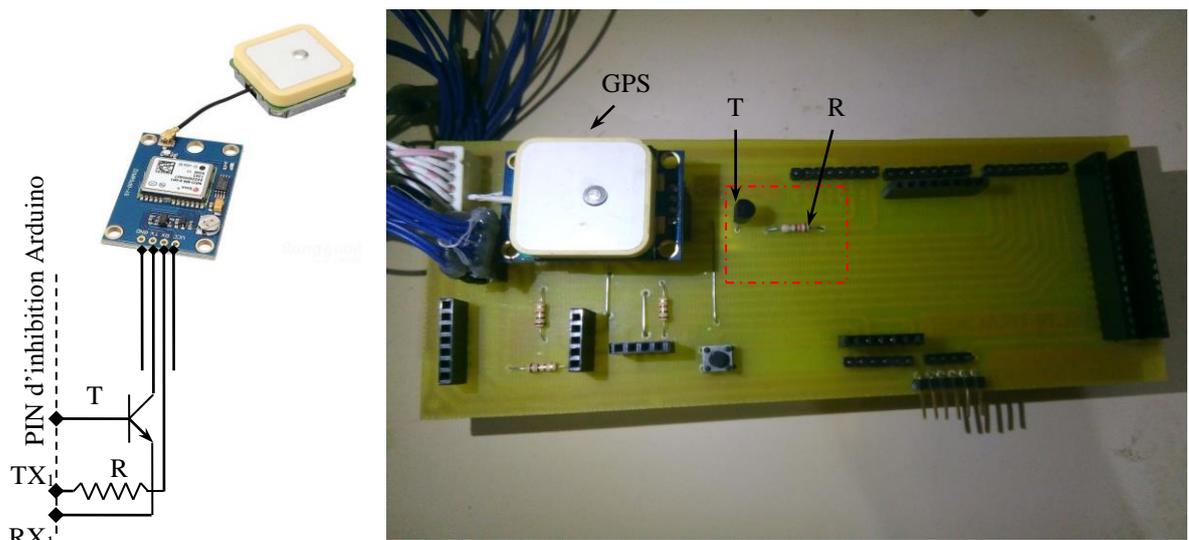


Figure IV.16 Présentation réelle et adaptation du GPS utilisée sur la carte réalisée

IV.6.6.2 Configuration par Smartphone

Les Smartphones sont devenus dernièrement un outil indispensable dû à l'intégration de plusieurs accessoires électriques qui représentent des entrées et sorties des grandeurs utilisées quotidiennement (température, humidité, irradiation, temps, localisation, les angles d'inclinaison en 3D, vitesse de déplacement, etc.).

IV.6.6.2.1 Collaboration Android / Arduino

L'Android présente un système d'exploitation pour la majorité des Smartphones et une plateforme de développement moderne des applications de type APK. Les développeurs ont réalisé des applications Android qui présentent des liaisons de contrôle et de configuration directes et indirectes entre les Smartphone et les systèmes de commandes. La nature de notre approche nous a guidé à sélectionner quelques accessoires dans le Smartphone (RTC interne, GPS, Bluetooth, carte réseau, gyroscope et boussole) et de les exploiter en réalisant une application Android qui sert à extraire les différentes données qui rentrent dans le calcul de la trajectoire du soleil ainsi que le positionnement initial du panneau avec précision. Pour une collaboration spécifique entre Smartphone et Android, la plate-forme Google App Inventor permet d'effectuer cette liaison avec la création d'une application révolutionnaire.

IV.6.6.2.2 Définition

App Inventor est un environnement de développement sur internet (en ligne) à travers un système « Cloud Google » conçu pour la création des applications Android. Cet environnement est un système opérationnel OS créé par Google. La plateforme visuelle de développement est accessible à tout utilisateur qui possède un compte Gmail. Il est similaire dans son fonctionnement aux langages de programmation simplifiés des années 80 et les projets de l'étudiante Ricarose Roque en thèse au MIT. Le projet a été guidé par le professeur Hal Abelson à MIT qui a dirigé la première implémentation du logo pour Apple II.

IV.6.6.2.3 Programme App Inventor

Les applications Android ont pris contrôle de notre vie quotidienne [57]. Il y a environ 30 milliards de dispositifs connectés prévus pour 2020, soi-disant quatre fois la population mondiale. La nouvelle génération acquiert cet usage naturellement du à leur naissance dans une période d'évolution et dominance numérique, ce qui nous oblige à introduire cet usage dans nos systèmes pédagogiques et formations pour assurer la communication avec les gouvernements qui ont déjà atteint la numérisation totale.

Le sens de l'évolution de la plateforme App Inventor est le même. L'objectif de créer un environnement de développement d'application qui ne nécessite pas la connaissance des syntaxes de programmation et en se basant seulement sur les algorithmes. La création d'une application pourrait donc être décrite comme une construction « Lego » qui se base sur des blocs d'algorithme.

L'opération de programmation est réalisée en ligne dans un navigateur et un système d'exploitation opérationnels (Mac, Windows, Linux, etc.). Toute action est sauvegardée sur des serveurs à distance.

Lors du développement, le système donne l'accès à trois fenêtres de manipulation :

- La première fenêtre concerne l'interface homme machine, elle donne l'apparence réelle de l'application sur l'appareil.
- La deuxième est concernée par la programmation par blocs, elle reflète toute action et événement désirés de l'application.
- La troisième affiche la simulation virtuelle de l'application par un terminal réel à l'aide d'un émulateur pour vérifier le fonctionnement exact du programme.

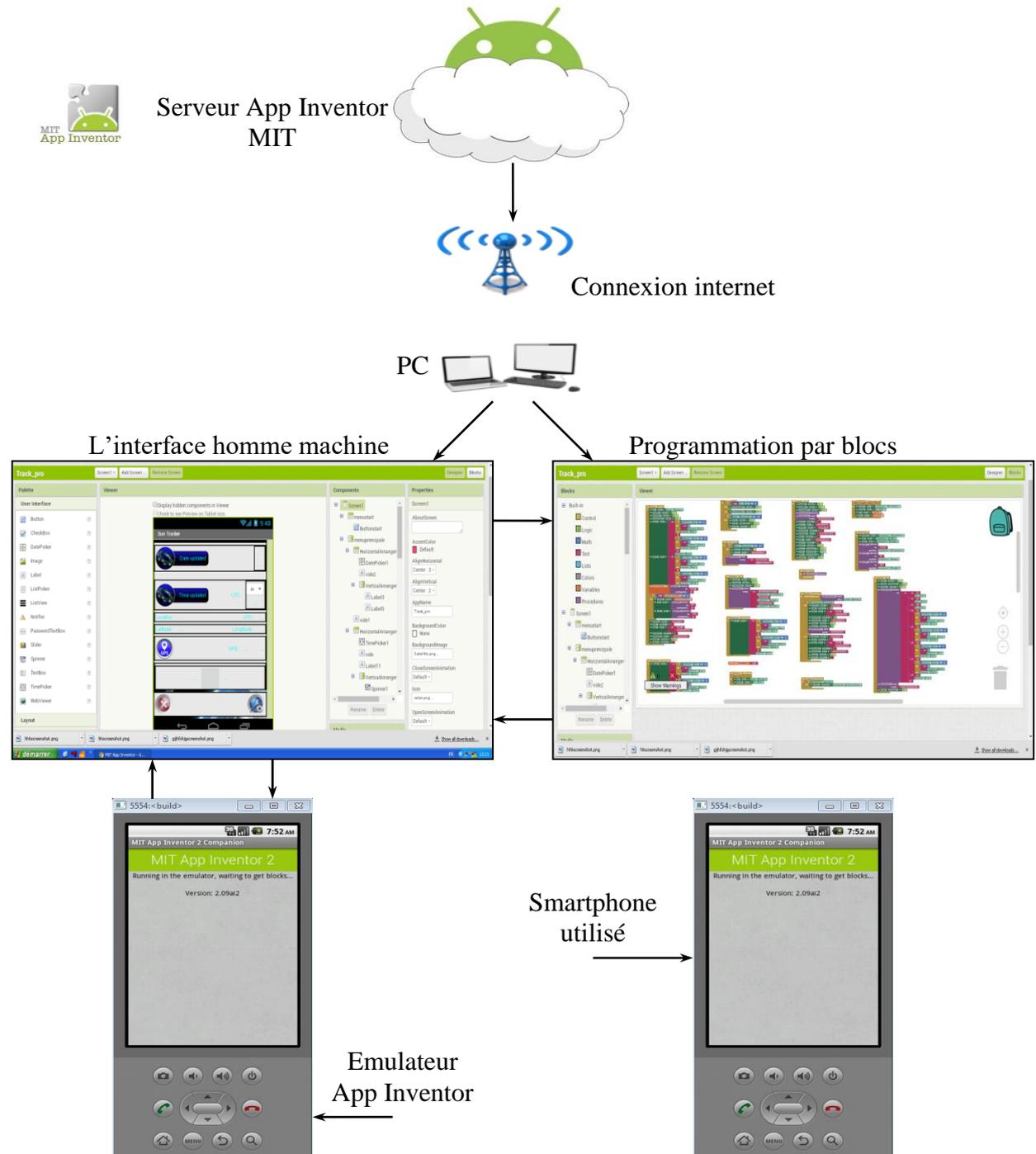


Figure IV.17 Concept d'App Inventor

La liaison USB nous aide à injecter le programme sur Android sous forme de fichier à une extension APK afin de le tester réellement sous Android vers un terminal réel (qui pourrait être un Smartphone, une tablette ou un téléviseur, etc.). L'injection peut aussi être effectuée par un code QR qui peut être identifié par la caméra du Smartphone à condition d'être connecté à un réseau WIFI.

La logique de programmation événementielle est une opération qui doit être effectuée avant la réalisation de l'application sur App Inventor. Le graphisme ne suffit pas pour la réalisation de notre application ; l'analyse est bien plus importante pour un projet de développement. Cependant l'analyse sur App Inventor est plus simple car elle cache toute la complexité affrontée dans un langage de programmation JAVA.

Même si nous avons travaillé avec des objets prédéfinis, cela n'est toujours pas considéré comme une programmation objet.

On ne fait pas de la programmation objet parce qu'on place des objets graphiques sur une interface. Pour faire simplement les entités informatiques modélisatrices d'un comportement des objets dont nous avons utilisé de la librairie d'App Inventor ne sont que de simples parties qui appartiennent à des classes de programmation JAVA.

Un objectif visé pour le critère de choix de cet environnement de programmation graphique est de favoriser l'approche événementielle du programme par une programmation objet masqué.

La figure IV.18 illustre l'allure graphique de notre application sur le Smartphone. Chaque bouton possède une action événementielle et est numéroté pour identifier l'opération liée à son événement.

- 1- Le lieu de l'injection du code demandé par le module de Bluetooth de l'Arduino, figure (a), le code d'accès par default est (1234 ou 0000) ;
- 2- Deux icônes d'application : le premier sous le nom de Track_pro est notre application créée sous App Inventor pour communiquer avec l'Arduino, le deuxième sous le nom de « MIT AI2 Com » est l'application d'App Inventor qui doit être installée sur Smartphone pour la visualisation de notre application lors de son développement sur PC, figure (b) ;
- 3- Le bouton START pour rafraichir les éléments de notre application, figure (c) ;
- 4- L'actualisation du GPS du Smartphone pour la géo-localisation, figure (d) ;
- 5- L'accès vers le RTC du Smartphone pour changer la date manuellement (jour, mois, année). La figure (g) présente le menu de cette modification ;
- 6- L'accès vers le RTC du Smartphone pour changer le temps manuellement (minute, heure). La figure (f) présente le menu de cette modification ;
- 7- L'UTC a pour rôle de changer le fuseau horaire, figure (e) ;

- 8- L'accès vers la liste de Bluetooth où on peut trouver nos modules Bluetooth de l'Arduino, figure (h) ;
- 9- La ligne de sélection qui porte le nom du module Bluetooth monté sur l'Arduino. Après cette sélection, le Bluetooth de l'Arduino et le Bluetooth du Smartphone seront connectés figure (i), sur cette fenêtre ; les légendes qui portent le nom du réseau Bluetooth, le statut de connexion, l'injection des données changent d'apparence de la couleur rouge vers la couleur verte ;
- 10- L'action de ce bouton nous permet d'injecter les données vers l'Arduino. Le changement de la légende de l'injection des données de la couleur verte vers la couleur jaune nous confirme l'émission des données ; comme illustré sur la figure (j) ;
- 11- Après l'accès au Bluetooth et à la géo-localisation par le GPS, la figure (k) nous donne le lieu de notre système.

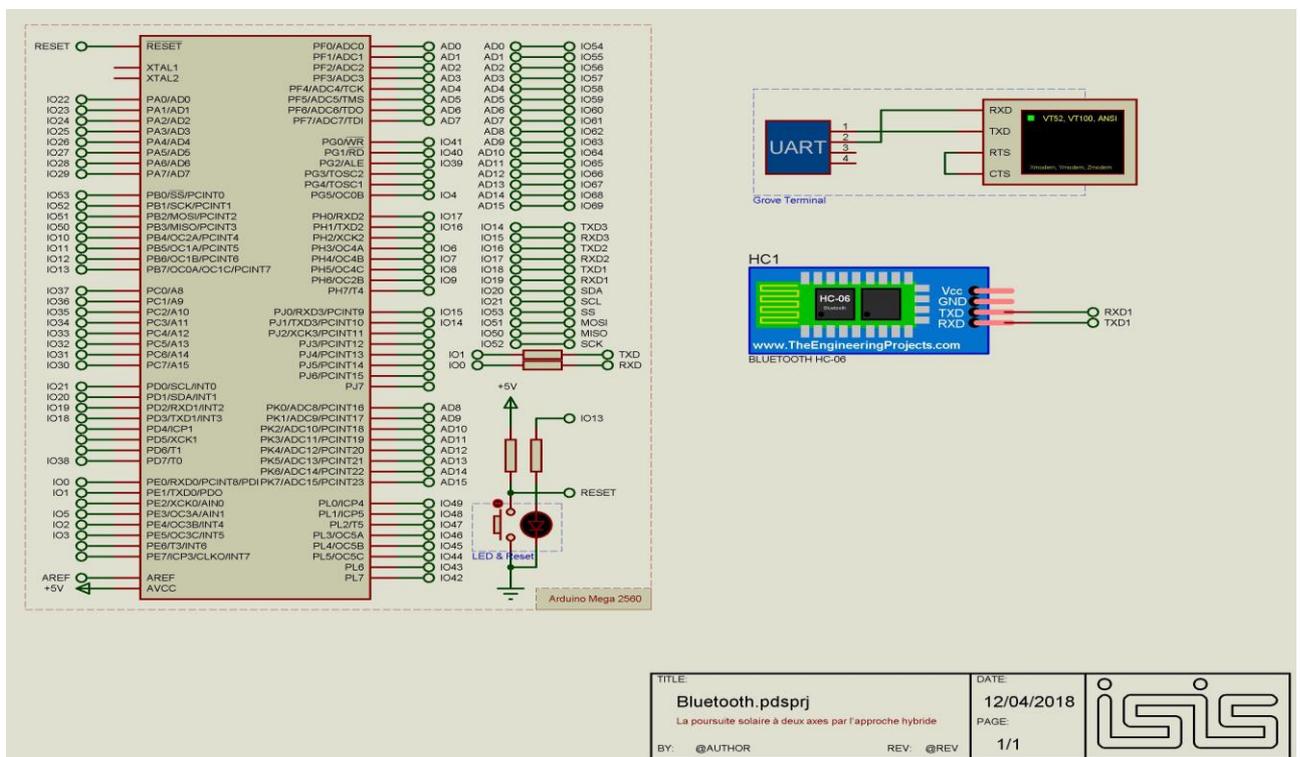
La figure IV.18 illustre l'interface de l'application qui a été développée en utilisant l'environnement App Inventor dirigé par MIT « le Massachusetts Institute of Technology » en anglais. Cet environnement est un service programme fourni par le Cloud de google.



Figure IV.18 Fenêtres et les phases de communication de notre application

Lors de la sélection de ce mode de communication par l'utilisateur, l'application prend la relève de la configuration du système. Un protocole de communication s'active entre le Bluetooth interne du Smartphone et le module Bluetooth de l'Arduino (HC-06) et un paquet d'informations est envoyé à l'Arduino portant la géo-localisation et le temps local s'il y a un signal GPS ; sinon le Smartphone importe les données en utilisant le réseau internet. Le paquet d'information est normalisé par un protocole série avec un débit 9600 bits par seconde à travers deux pins de l'Arduino qui sont respectivement (TXD et RXD).

L'Arduino Mega possède plusieurs PINs de nature (TXD et RXD). Nous avons utilisé les deux PINs (TXD₂ et RXD₂). Comme, il est illustré sur la figure IV.19.



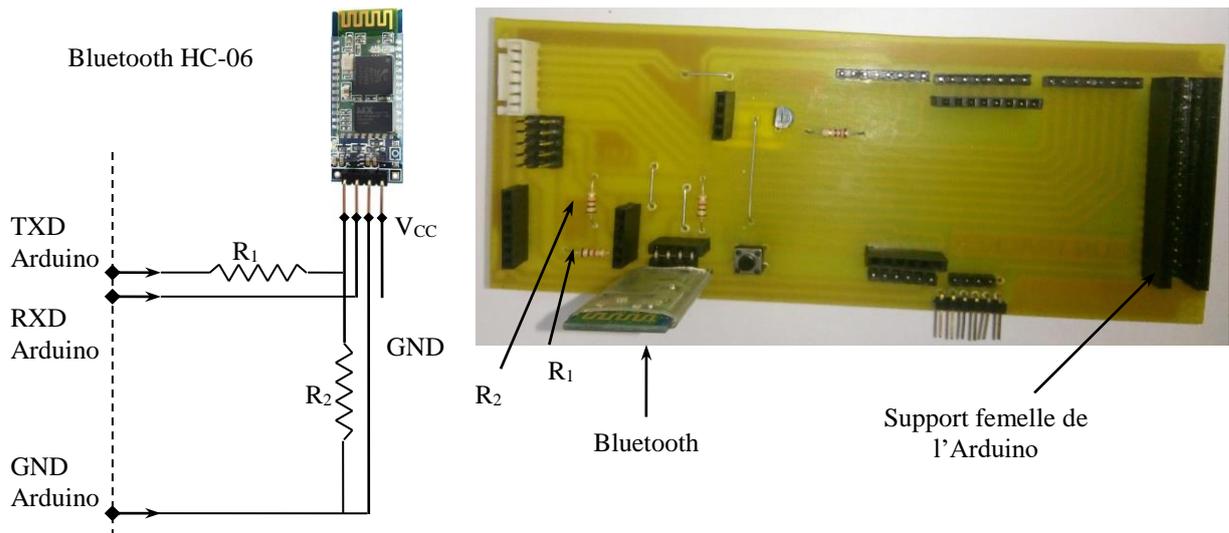


Figure IV.20 Adaptation logique entrée-sortie « TXD-RXD » de l'HC-06

IV.6.6.3 Configuration manuelle

Afin de simplifier la communication entre l'utilisateur et l'Arduino et minimiser l'utilisation des composants électroniques « les boutons poussoirs », un écran tactile de type (320×240 TFT LCD) est employé dans la constitution de notre dispositif. Il a aussi pour rôle d'afficher n'importe quelle action appliquée sur l'Arduino. Un menu multifenêtre a été réalisé pour organiser le contrôle et l'accessibilité aux différents modes de communication. Chaque fenêtre contient les grandeurs mesurées, les différentes données des entrées et des sorties et le type de communication sélectionné. La figure IV.21 et IV.22 nous montre quelques fenêtres sur l'écran tactile. Lors du démarrage ou la réinitialisation du système, un menu économique programmé sous Arduino IDE porte à sa droite un bouton de mise en veille et à sa gauche un bouton d'accès à une fenêtre principale sur laquelle ; on trouve un affichage complet de toutes les données qui correspondent aux valeurs des angles de correction, la date et l'heure actuelles, l'heure du lever et coucher du soleil , l'heure de midi solaire ainsi que le temps optimal d'ensoleillement.

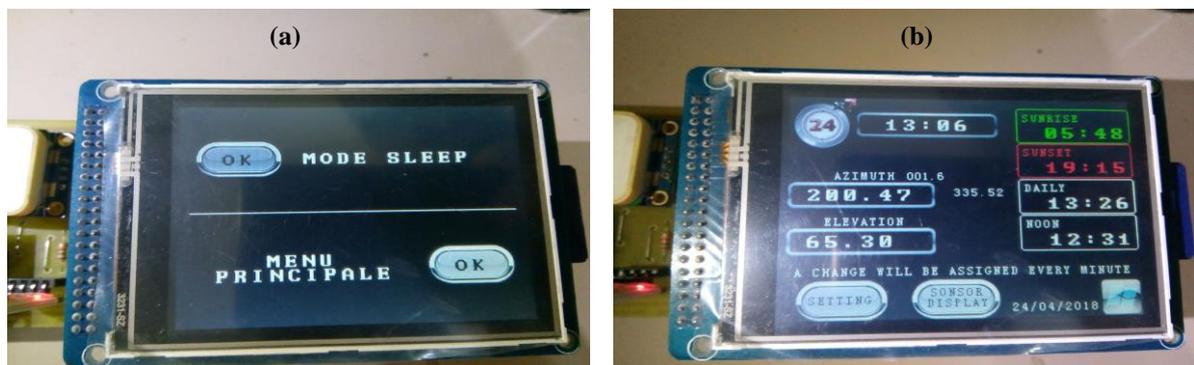


Figure IV.21 Allure du TFT ; (a) fenêtre de démarrage, (b) fenêtre principale

Sur cette fenêtre principale, on trouve trois boutons ; chaque bouton nous mène à une autre fenêtre de configuration comme illustrée sur la figure IV.22.



Figure IV.22 Différentes fenêtres programmées sur l'écran tactile

Sur les figures IV.22 (a), (b), (c) et (e), on observe deux boutons similaires : le premier à l'apparence d'une fenêtre Windows a pour rôle de revenir à la page précédente. Un autre bouton à légende « SAVE » en appuyant sur ce dernier, nous amène à la fenêtre (d) sur laquelle on trouve deux autres boutons : le premier avec une légende « YES » et le deuxième avec une légende « NO » afin de confirmer la sauvegarde ou l'annulation de la nouvelle configuration du système. La fenêtre (b) possède un bouton supplémentaire sur lequel on trouve une légende « actualisée », cette dernière collabore avec un transistor afin d'actualiser les paramètres par GPS et garder le système souple.

En exclusif : sur la figure (c) on trouve plusieurs boutons où chaque deux boutons croisés ont le rôle d'augmenter ou de baisser la valeur d'un des paramètres qui rentre ultérieurement dans le calcul des angles élévation et azimut.

Sur la fenêtre (e) nous avons programmé un menu d'auto calcul interne sur lequel, on peut varier le pas de correction.

Le but principal de cette communication tactile est d'accéder aux paramètres internes des grandeurs enregistrées précédemment comme des variables initiales sur l'EEPROM de l'Arduino et les changer selon nos besoins. Ce réglage est considéré comme un mode manuel (toutes les grandeurs sont insérées manuellement sans l'utilisation des capteurs sensoriels). Ce choix est considéré comme la troisième solution si les deux communications citées précédemment sont indisponibles. La liaison entre l'Arduino et l'écran tactile est faite par une carte d'adaptation afin de minimiser les pins de connections.

Peu importe le mode de contrôle, l'écran tactile prend la tâche d'afficher les informations qui entrent ou sortent au système. Une simulation virtuelle a été menée sous ISIS à l'aide d'une librairie nommée « Adafruit IL9341 TFT » afin de nous éclaircir la liaison tactile avec la carte Arduino.

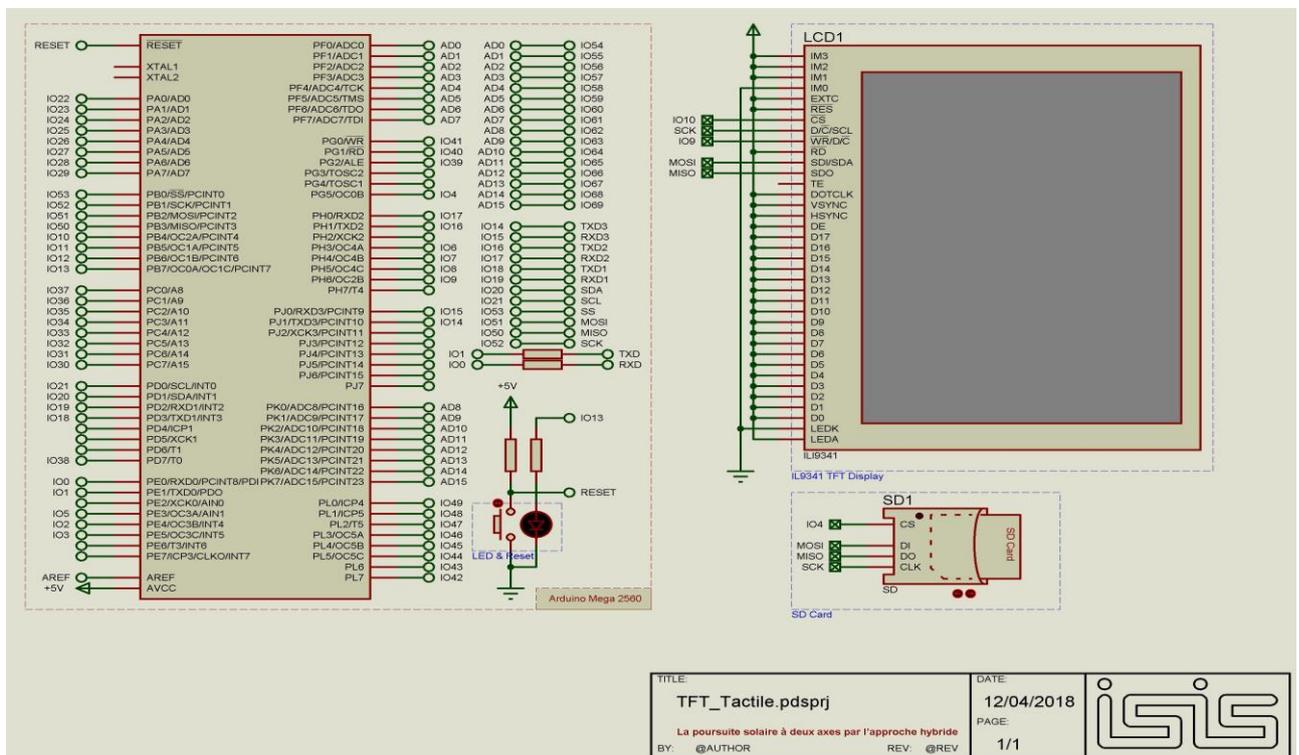


Figure IV.23 Communication manuelle à travers l'écran tactile sous ISIS

IV.7 Organigramme schéma général de la carte réalisée

Notre organigramme est une association de plusieurs représentations schématiques et des affectations fonctionnelles sous Arduino IDE : les bibliothèques nous aident à réaliser un organigramme principal qui va coopérer avec plusieurs organigrammes secondaires sous le contexte « Organigramme maître ».

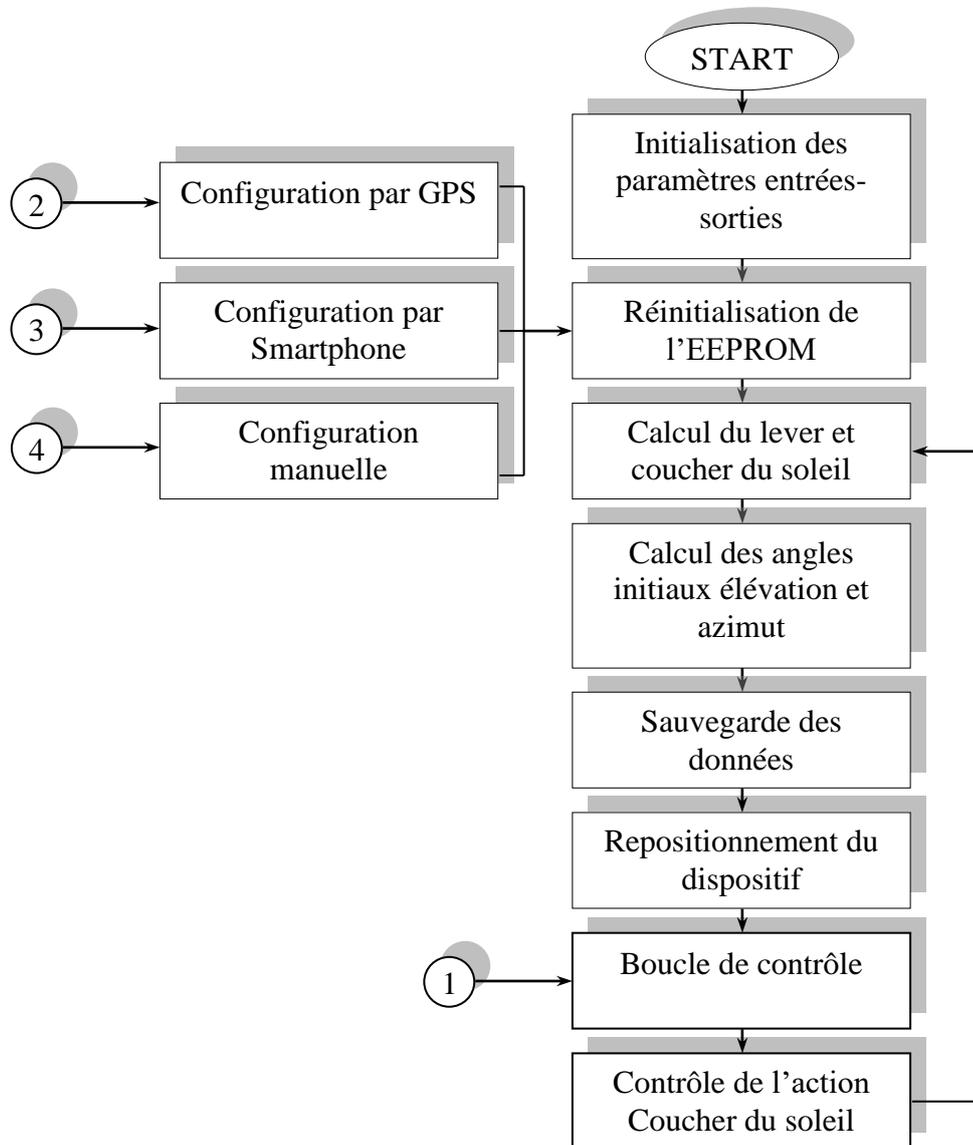


Figure IV.24 Organigramme principal

S'appuyer sur les procédures et les classes de bibliothèque de l'environnement Arduino IDE, l'organigramme suit la méthodologie des chemins des raccourcis. Les IMUs utilisés ont leurs propres processeurs, c'est pour cela qu'on ne trouve pas des difficultés au niveau de vitesse d'exécution.

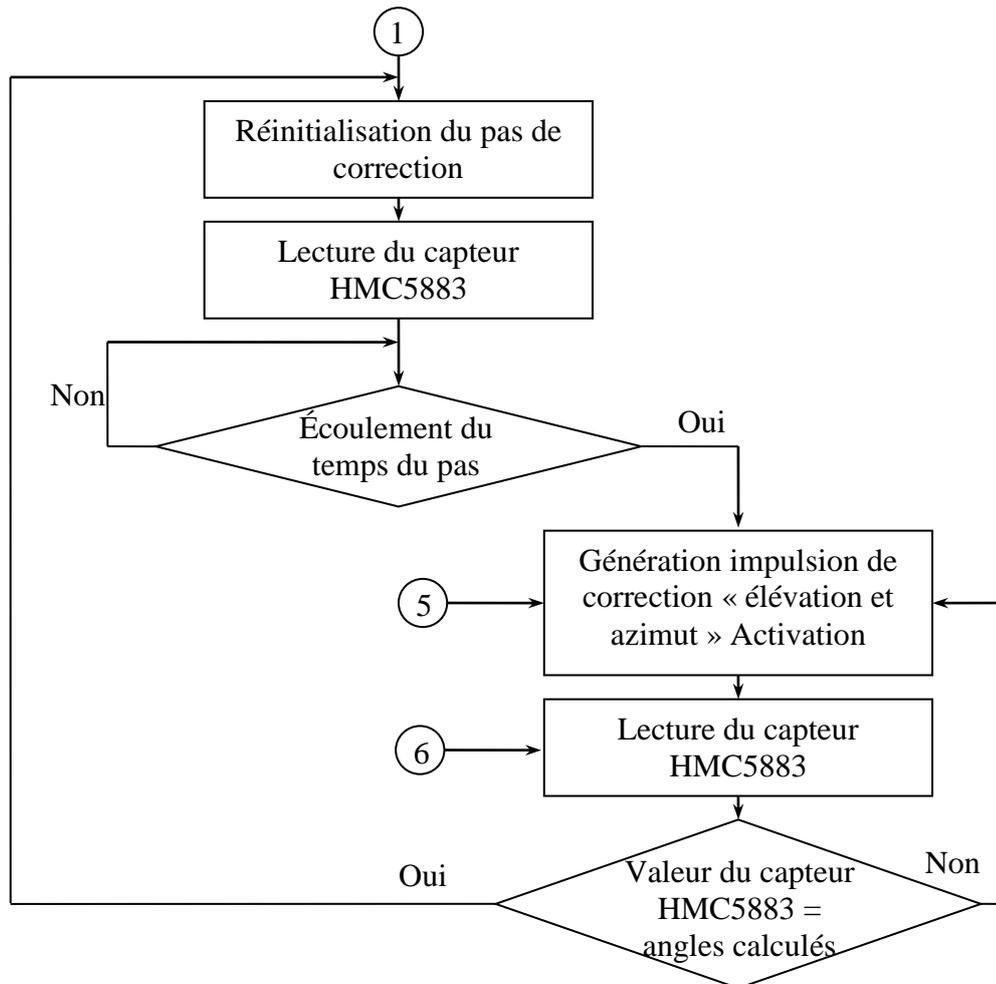


Figure IV.25 Le macro-organigramme numéro 1

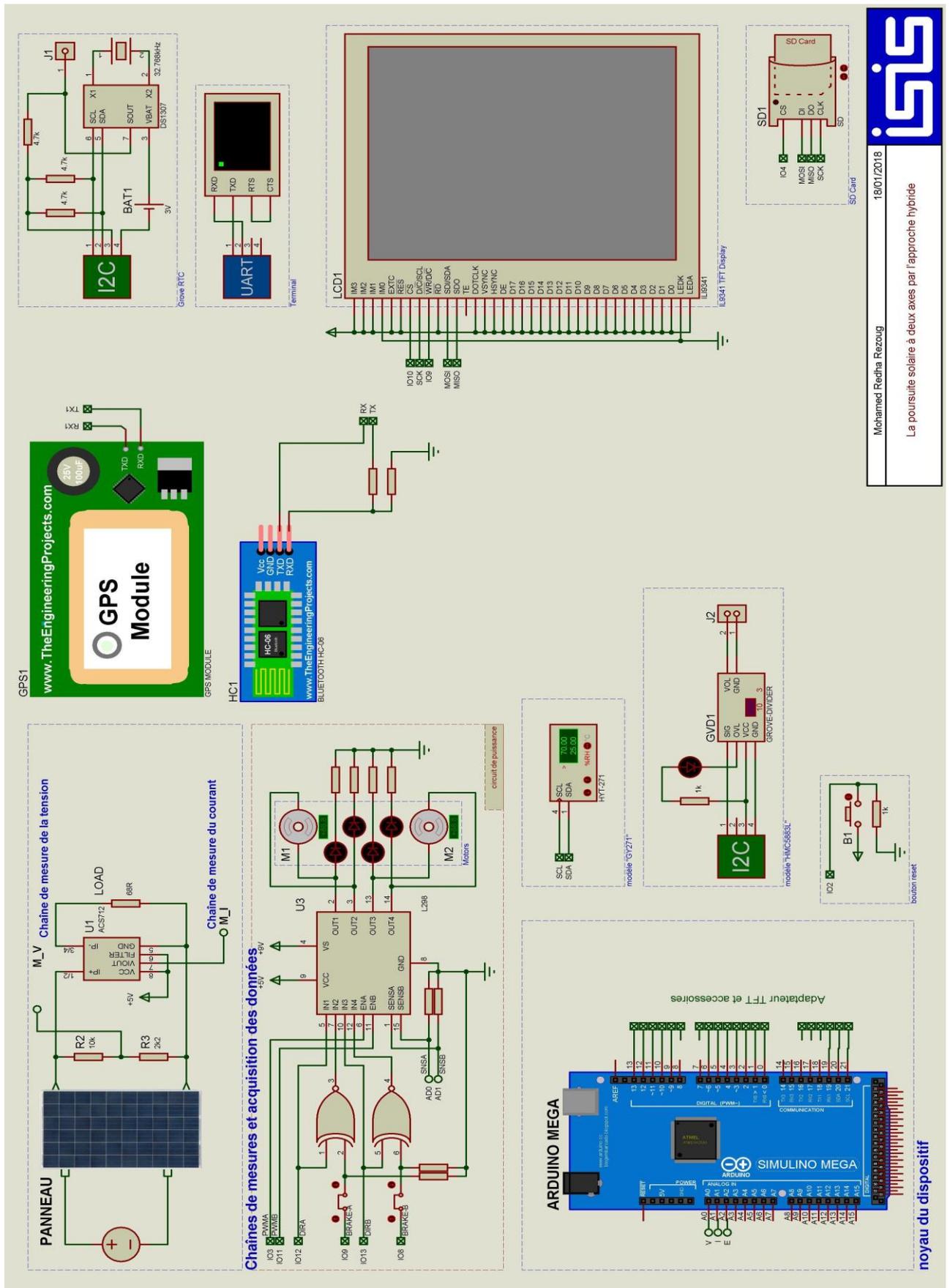
2- C'est une procédure qui englobe tout paramètre récolté par le GPS pour faire partie des calculs des angles astronomiques (élévation et azimut). Cette boucle intervient lors de la sélection d'une configuration par GPS sur l'écran TFT.

3- Cette procédure fait appel aux composants internes du Smartphone et le but reste toujours le même : l'assemblage des différentes grandeurs qui rentrent dans le calcul de la correction hybride.

4- Cette procédure concerne la commande manuelle. C'est un choix où l'utilisateur insère les paramètres si les deux premières procédures ne sont pas opérationnelles. Le travail dans cette procédure implique une conversion des degrés décimaux en DMS (degrés, minutes, secondes) ou l'inverse avec une erreur d'approximation de 0,001.

5- C'est une procédure qui comprend le sens de rotation des moteurs lors de l'envoi des impulsions d'activation.

6- C'est la procédure qui ajuste la déviation angulaire du HMC5883.



18/01/2018
 Mohamed Redha Rezoug
 La poursuite solaire à deux axes par l'approche hybride

Figure IV.26 Schéma global de la carte électronique réalisée sous ISIS Proteus

IV.8 Essai expérimental

Pour prouver l'efficacité de cette méthode hybride et l'influence de la évolution quotidienne et de la évolution azimutale du soleil sur le rendement du panneau solaire, on a procédé dans une première phase une comparaison des résultats récoltés par un module fixe par rapport à un autre module orienté par deux axes basés sur la technique hybride proposée en corrigeant la variation liée à l'élévation et l'azimut qui sont liés directement à la variation jour et nuit et la variation saisonnière et cela dans les mêmes conditions de fonctionnement. Ensuite, on a effectué une autre comparaison entre les résultats obtenus par la technique hybride et la technique proposée dans le chapitre précédent. Ces expériences ont été effectuées en une journée (15/05/2017) où l'éclairement était relativement bon, et cela à l'est de l'Algérie «Ain Beida» définie par son altitude N 35,79° et sa longitude, E 7,39°, la température a été variable durant la journée. Pour une correction quotidienne, nous avons corrigé l'erreur du déplacement solaire avec des impulsions successives chaque 5 minutes. La commande s'effectue au moyen d'un signal périodique passant de l'état bas à l'état haut. Les informations de la commande sont extraites de la base des données qui est calculée par l'Arduino et mémorisée à l'EEPROM du microcontrôleur. La correction des écarts angulaires des deux angles « élévation et azimut » est effectuée au même temps pour minimiser la durée du mouvement.

Après chaque correction de la déviation, un gain énergétique est récolté dû à la durée optimale optimisée par la nature de correction de ce système hybride qui est la minimisation du temps de mouvement nécessaire aux moteurs pour atteindre une position angulaire exacte donnée par l'IMU et confirmée par les encodeurs.

Dans la journée où les mesures ont été prises : mesures de tension et l'intensité de courant sont faites à des intervalles de temps égaux. Nous avons préféré de tracer dans un premier temps l'allure de courant et l'allure de tension séparément afin de comprendre le concept réel de cette technique hybride. Plusieurs grandeurs ont été récoltées par l'Arduino sur la carte mémoire sous un fichier texte nous a permis d'afficher des courbes expérimentales, courant, tension et puissance dans les deux situations: module fixe et système à deux axes. Les résultats sont reportés sur les figures suivantes.

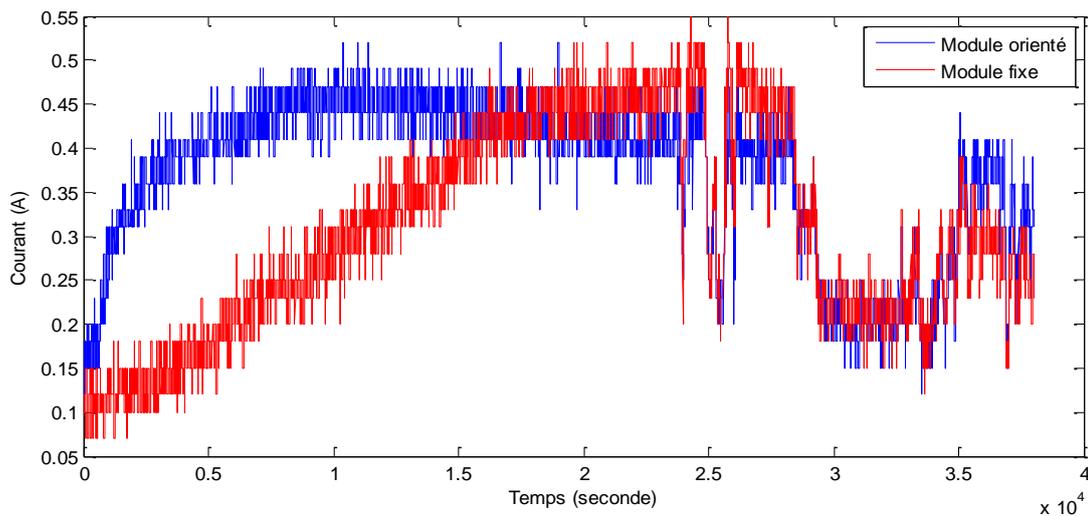


Figure IV.27 Courbes courant-temps pour un module fixe et un module orienté

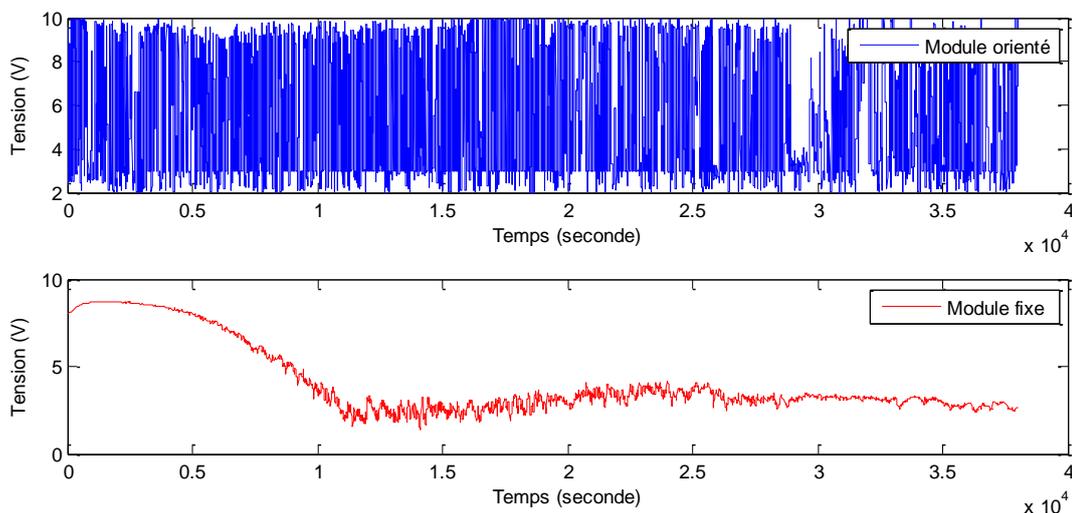


Figure IV.28 Courbes tension-temps pour un module fixe et un module orienté

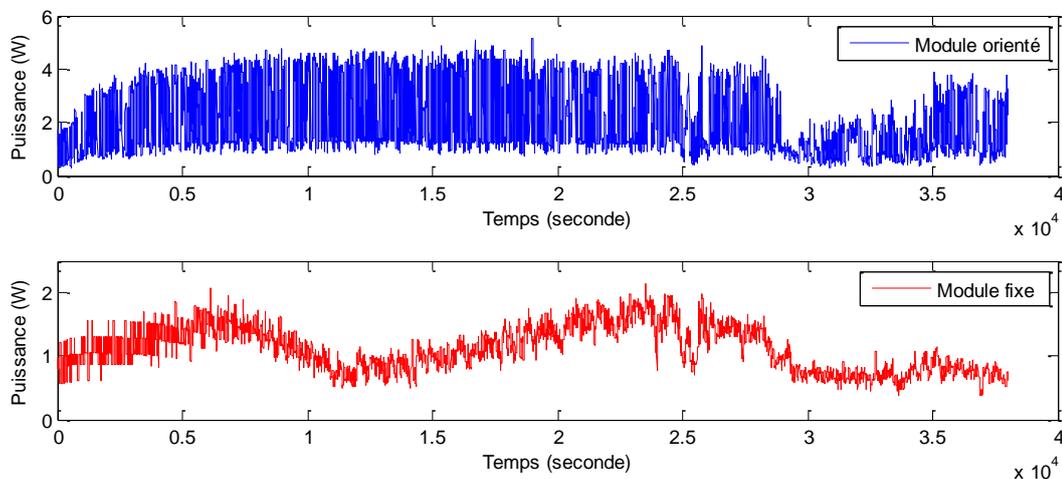


Figure IV.29 Courbes puissance-temps pour un module fixe et un module orienté

La différence de surface entre les deux tracés pour la courbe de puissance est d'environ 34 %. Elle exprime le gain énergétique obtenu dû à la correction angulaire et montre l'importance de cette technique sur le rendement d'un module photovoltaïque.

Réellement, notre dispositif est doté d'un capteur qui mesure l'intensité de la lumière. Il s'agit d'un capteur de luminosité TSL2561. Nous avons ignoré l'étude de ce dernier dans ce chapitre car il ne contribue pas au contexte de cette poursuite et rend la conception de ce système plus complexe.

La relation directe entre le flux lumineux et l'intensité de courant de sortie du panneau photovoltaïque, résume que la stabilité de flux lumineux implique la stabilité de la valeur du courant et l'augmentation ou la diminution du flux lumineux causant l'augmentation ou la diminution du courant comme le montre la figure IV.30.

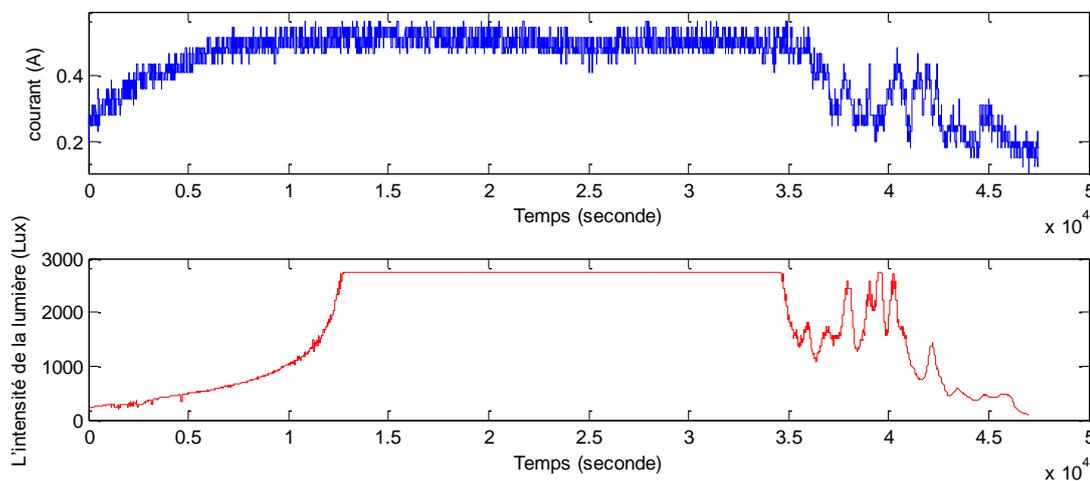


Figure IV.30 Relation entre le courant de la sortie du panneau orienté et l'intensité de la lumière

Pour prouver l'efficacité de la poursuite hybride par rapport à celle réalisée dans le chapitre III, nous avons expérimentalement prélevé les valeurs des grandeurs I et V afin de tracer la puissance délivrée par le panneau et cela sur le même graphe pour les comparer et extraire le gain énergétique récolté par la meilleure technique. On a effectué cette expérimentation pour deux jours, « 16 et 17 Mai 2017 ».

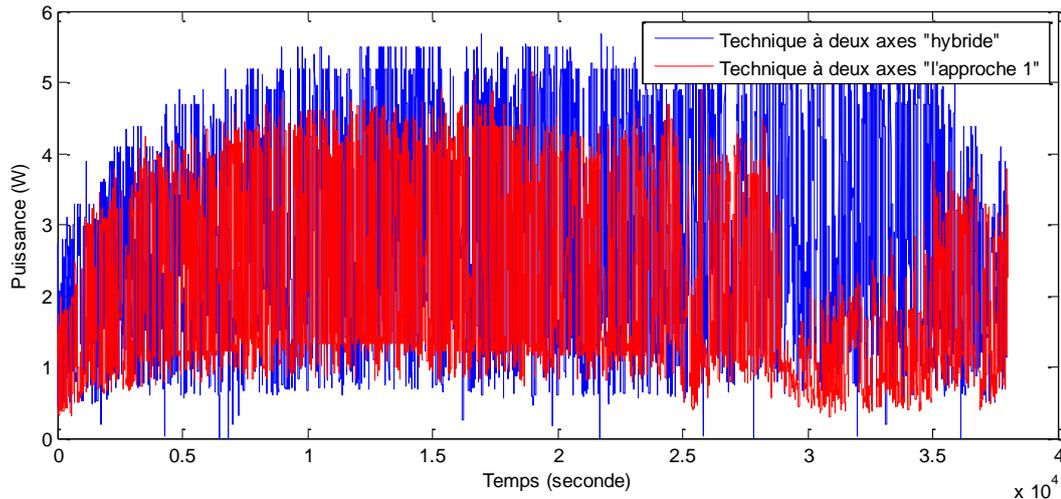


Figure IV.31 Courbes puissance-temps de la technique hybride et la technique à deux axes l'approche 1 (16/05/2017)

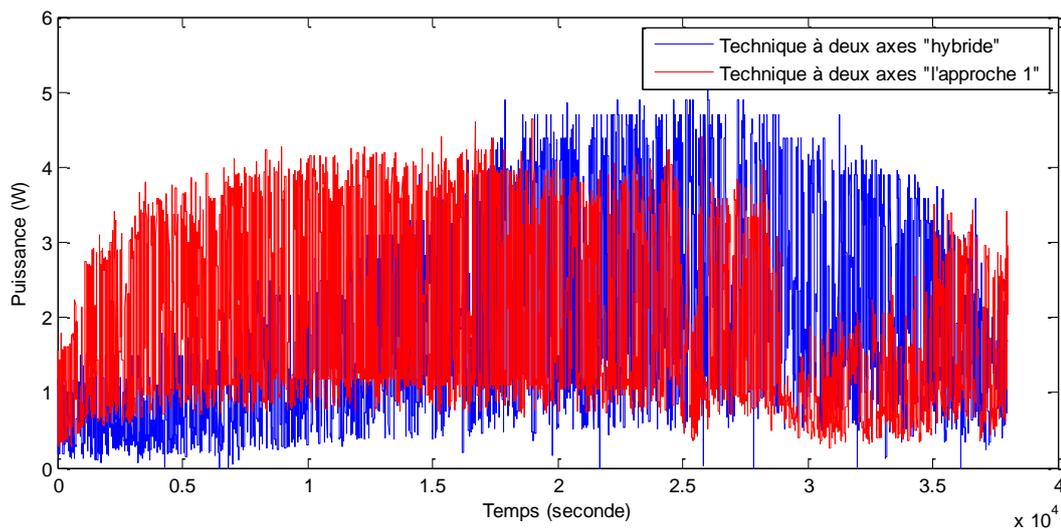


Figure IV.32 Courbes puissance-temps de la technique hybride et la technique à deux axes l'approche 1 (17/05/2017)

La base de temps pour ce test présente la durée totale de la première journée qui était nuageuse dont l'ensoleillement était entre 2000 et 3000 Lux. La différence de surface entre les valeurs des deux tracés pour la courbe de puissance est d'environ 5.5 %. Toujours, la durée optimale calculée par l'algorithme présente la base de temps pour la seconde journée. La différence de surface entre les deux tracés pour la courbe de puissance est d'environ 5.3 %.

Sur l'annexe [G] on trouve les différents typons qui correspondent à nos cartes réalisées sous Eagle [58].

NB : Puisque le panneau utilisé dans le chapitre III n'est pas le même qui est utilisé dans la technique hybride dans le chapitre IV, et pour effectuer une comparaison juste, nous avons multiplié les résultats des deux par un facteur d'égalité ce qui explique la non-compatibilité avec le tableau qui caractérise les panneaux utilisés.

IV.9 Conclusion

Le chapitre IV illustre la conception d'un dispositif autonome à contrôle astronomique d'un panneau photovoltaïque permettant une optimisation maximale du rapport orientation / gain d'énergie. Le dispositif repose sur deux concepts à la fois, la modélisation de la trajectoire solaire adoptée par un algorithme qui calcule à tous moments les angles solaires (élévation et l'azimut) et l'approbation de ces derniers par (IMU) afin de pallier à toutes fluctuations climatiques et ainsi permettre un ajustement quasi parfait par rapport à l'axe orthogonal des radiations. Le système de poursuite se base sur deux articulations contrôlées par une carte de commande à multi-liaisons comparativement au système à panneau fixe.

Des expérimentations ont démontré une meilleure performance du dispositif hybride à deux axes. Les gains énergétiques nets peuvent avoisiner les 34% par rapport à un panneau fixe et un gain d'environ 6% par rapport à un système à deux axes standards modifiés.

Actuellement, les perfectionnements et les applications des nouveaux composants ont changé notre angle de vue envers les domaines d'optimisation. L'IMUs présentent une catégorie qui ne cessent pas de croître en performance. Elles sont généralement utilisées dans les équipements afin de mesurer l'orientation, la force gravitationnelle et la vitesse. De ce fait, nous avons travaillé sur l'amélioration de la performance d'IMUs dans notre application sur les traqueurs.

Dans le chapitre qui suit, nous allons présenter deux grandes applications populaires ou on applique une optimisation nommée MPPT « en anglais Maximum Power Point Tracking ».

Chapitre V

Applications d'optimisation par MPPT

V.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre de cette thèse s'inscrit essentiellement dans la recherche d'une solution d'optimisation pour deux applications populaires. Pour illustrer nos propos, nous faisons une étude sur une chaîne PV, tout d'abord avec une charge qui est une batterie à plomb où nous avons réalisé un montage buck qui se base sur sa commande, sur le principe de la modulation de largeur d'impulsion «MLI», le contrôle se gère par un PIC16f876a qui applique une solution d'optimisation avec la technique MPPT. Cette dernière sera comme critère d'optimisation pour une autre application qui est le pompage photovoltaïque afin d'ajuster la taille du pas par rapport à la position du PPM en utilisant un bloc FLC adapté à l'algorithme P&O. Cela nous permettra d'améliorer la vitesse de poursuite et éliminer l'oscillation en régime permanent.

V.2 Chaîne photovoltaïque et la commande MPPT

Pour éclaircir la signification générale d'une chaîne PV c'est tout simplement une relation d'ensemble entre source système d'adaptation et une charge (batterie, pompe, éclairage, injection réseau etc.). Cependant la non-linéarité de l'énergie délivrée par la source due à la nature de la cellule photovoltaïque qui, à son tour soumise à une équation complexe relie des grandeurs non contrôlables telles-que radiation solaire, la température et la résistance totale du circuit.

Selon les applications, on peut résumer qu'il y a un degré d'optimisation de production désirée avec un ou plusieurs convertisseurs statiques entre le GPV et la charge afin d'assurer entre eux une adaptation de niveaux de tensions et introduire une isolation galvanique.

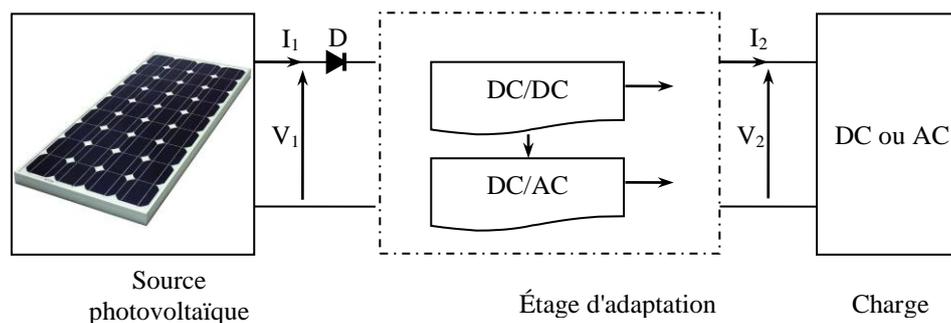


Figure V.1 Liaison d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation

L'étage d'adaptation permet de fixer le point de fonctionnement du GPV séparément de celui de la charge permettant une extraction de la puissance optimale. Si plusieurs boucles de contrôle en entrée et en sortie de ce dernier sont disponibles, l'ensemble peut fonctionner idéalement. Elles garantissent à tout moment une extraction optimale de la puissance produite par le GPV à son entrée. Selon le mode le plus approprié de chaque application, il utilise des boucles des contrôles

particuliers qui permettent un fonctionnement optimal à la sortie. Les techniques utilisées de ce type de contrôle sont souvent nommées par une des ces abréviations SPMP (suivi du point maximal de puissance), un tracker PPM, régulateur PPM ou MPPT en anglais.

V.3 Classification des commandes MPPT

Nous pouvons spécifier un classement des commandes MPPT suivant le type d'application électronique. Il est recommandé de les classer en deux catégories principales d'après le type de recherche qu'elles réalisent selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT. La figure I.14 caractérise l'évolution du point de puissance maximale PPM du module photovoltaïque utilisé. Bien qu'il existe un grand nombre de travaux scientifiques qui présentent des commandes MPPT plus ou moins complexes, nous nous intéresserons qu'à quelques-unes présentant les mieux adoptées [59].

V.3.1 Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée du convertisseur statique (CS)

Certaines commandes MPPT effectuent une recherche du PPM selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV ; différents types d'algorithmes peuvent être retrouvés, basés sur des commandes nommées extrémales [59, 60] et d'autres appelées incrément de conductance. Toutes ces commandes sont avantageuses de part leurs précisions et leur rapidité de réaction.

Dans d'autres travaux, la supposition du courant comme image proportionnelle à P_{max} , nous permet de nous rapprocher le plus possible du courant optimal I_{OP} en agissant sur sa régulation. Une des variantes [61] de ce type de commande calcule le courant de référence dérivé directement du I_{CC} du GPV en le court-circuitant périodiquement pour d'obtenir un courant de référence qui doit être au voisinage au courant optimal souhaité. Ce type de commande ayant besoin uniquement d'un capteur s'avère plus facile à mettre en œuvre et un peu moins coûteuse que les commandes extrémales, par contre leur précision est faible notamment à cause du procédé d'estimation de I_{CC} qui ne peut pas se faire trop souvent. L'échelle temporelle de réaction est en effet de l'ordre de la minute, de plus, à chaque fois que la mesure du courant est faite, cela entraîne un arrêt obligatoire du transfert de puissance et donc des pertes énergétiques supplémentaires. Ces commandes sont dédiées à des systèmes peu coûteux et peu précis, devant fonctionner dans des zones géographiques où la météo garantit très peu de changements climatiques.

Dans [62, 63], les auteurs utilisent la jonction PN d'une diode pour générer la référence de tension du point de fonctionnement du GPV. En effet, la commande se base sur la caractéristique physique en température d'une jonction PN d'une diode proche de celle d'une cellule solaire. Ce système de commande dimensionne une compensation tenant compte des variations de la

température ambiante du GPV. Par contre, les auteurs ne discutent pas l'effet d'une variation d'éclairement sur le fonctionnement de la commande dont la précision est de plus, très relative.

D'après la littérature [63, 64] les auteurs déduisent la tension optimale V_{OP} à partir de la tension de circuit ouvert du GPV en effectuant des estimations approximativement précises. Pour ce faire, une fraction constante de la tension en circuit ouvert est utilisée comme référence pour la tension du GPV. D'autres se servent de méthodes assistées par ordinateur pour calculer la puissance fournie par le GPV à partir de la tension de celui-ci [65], notamment les MPPT inspirées des réseaux de neurones qui font appel à des systèmes à mémoires informatiques importantes ayant stocké tous les cas possibles.

V.3.2 Classification des commandes MPPT selon les paramètres de sortie du convertisseur statique (CS)

Sur d'autres travaux, il existe également des algorithmes basés sur les paramètres de sortie des CS, par exemple sur [66] l'algorithme MPPT maximise le courant de charge d'une batterie, dans [67] l'auteur a étudié la réalisation d'une commande MPPT avec un seul des paramètres de sortie ; soit la tension du CS soit son courant (avec une batterie comme charge). Le courant de sortie de l'étage onduleur est aussi utilisé pour faire la recherche du point de puissance maximale comme sur [59]. Dans tous ces systèmes, l'approximation de P_{max} est faite à travers le rendement du convertisseur. Plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Ils sont en général non précis et utilisés pour la majorité dans l'application spatiale.

V.4 Approche d'optimisation sur une Chaîne photovoltaïque par la technique MPPT

La présence d'une batterie sur une chaîne photovoltaïque comme charge présente la plus grande préoccupation pour les chercheurs au niveau de l'optimisation par des algorithmes divers en utilisant la commande MPPT ; ce but est considéré comme notre premier axe de recherche dans le chapitre V. Afin d'obtenir une dérivée temporelle constante du V_{PV} , sa variation effectuée doit être similaire à celle introduite sur le rapport cyclique du CS. Les changements de ce dernier modifient son point de fonctionnement de telle sorte que la tension d'entrée du GPV puisse varier. Notre CS est une structure de type abaisseur (buck), la tension d'entrée du CS peut s'exprimer comme suit :

$$V_{IN} = V_B(1 - D) \quad V.1$$

Où V_B est la tension de la batterie supposée constante. Supposons que la transition d'un point de fonctionnement P_1 à un point de fonctionnement générique P est effectuée par un incrément du rapport cyclique D de la manière suivante [59]:

$$D_p(t) = D_1 + n.t \quad \text{V.2}$$

Où n est une constante positive. Ainsi, l'expression de $V_p(t)$ est :

$$V_p = V_B(1 - D_p) = V_B(1 - D_1 - n) \quad \text{V.3}$$

D'un autre côté, pour le point P_1 :

$$V_1 = V_B(1 - D_1) \quad \text{V.4}$$

A partir de (3) et (4), nous pouvons écrire :

$$V_p(t) = V_B(1 - D_1 - n.t) + V_1 - V_B.n.t \quad \text{V.5}$$

On remarque qu'une transition impliquant un décrement de D , c'est à dire une pente négative sur (2), implique un changement de signe de n sur (5). Ainsi, l'équation (5) donne un décrement linéaire en fonction du temps de V_{PV} . De manière similaire, un décrement du rapport cyclique donne lieu à un incrément temporel de V_{PV} noté $V_p(t)$. De plus, la dérivée de la puissance fournie par le GPV par rapport à D peut s'exprimer :

$$\frac{dP}{dD} = \frac{dP}{dV_{IN}} \cdot \frac{dV_{IN}}{dD} \quad \text{V.6}$$

La dérivée de l'expression (1) par rapport au rapport cyclique dans le cas particulier d'une batterie permet de simplifier l'équation (6) comme suit :

$$\frac{dP}{dD} = -V_B \frac{dP}{dV_{IN}} \quad \text{V.7}$$

Ainsi, la seconde dérivée peut s'exprimer comme suit:

$$\frac{d^2 P}{dD^2} = -V_B \frac{d^2 P}{dV_{IN}^2} \cdot \frac{dV_{IN}}{dD} = V_B^2 \frac{d^2 P}{dV_{IN}^2} \quad \text{V.8}$$

Au PPM, $\frac{dP}{dV_{IN}} = 0$ cela peut se traduire également par :

$$\frac{dP}{dD} = 0 \quad \text{V.9}$$

Au PPM, $\frac{d^2 P}{dV_{IN}^2} < 0$ ceci implique :

$$\frac{d^2 P}{dD^2} < 0 \quad \text{V.10}$$

A partir des expressions (9) et (10), nous pouvons déduire que la puissance fournie par le GPV est une fonction concave par rapport à D . Ainsi, notre algorithme de recherche peut être appliqué directement sur D du CS qui va alors contrôler la puissance fournie du GPV. La recherche du PPM est caractérisée par une trajectoire sur la caractéristique $V(I)$ du GPV avec une tension de GPV variant triangulairement par rapport au temps avec des pentes de valeurs respectives $-V_B$ et $+V_B$, pour un mouvement de gauche à droite, et de droite à gauche [68].

V.4.1 Description de la commande MPPT réalisée

La figure ci-dessous illustre le dispositif global réalisé, elle montre un GPV avec son étage d'adaptation constitué d'un convertisseur buck. Nous devons inclure la diode anti-retour D_1 , pour empêcher la batterie de se décharger pendant la nuit à travers la diode parasite D_p du MOSFET (IRFZ44N); il est nécessaire de placer un condensateur de filtrage C_1 entre le GPV et le convertisseur afin d'assurer une continuité de courant par le GPV, d'une valeur de $150 \mu\text{F}$, un bon compromis entre un filtrage correct et une réponse dynamique rapide. Par l'intermédiaire des unités de mesure, le microcontrôleur PIC16F876a reçoit les valeurs de la caractéristique réelle du GPV et délivre des signaux de contrôle à l'aide d'un algorithme implanté dans sa mémoire, à un comparateur dont la sortie est une image de la tension de référence qui sera utilisée pour la commande MLI par laquelle, le convertisseur buck génère une commande impulsionnelle. En effet, plusieurs fonctions sont intégrées dans l'algorithme tels que la multiplication des signaux captés (I_{PV} , V_{PV}), la variation de la température et de l'éclairement, la gestion du temps et le déclenchement des interruptions afin de délivrer une commande traduite en un rapport cyclique D nécessaire au fonctionnement de l'étage d'adaptation [59].

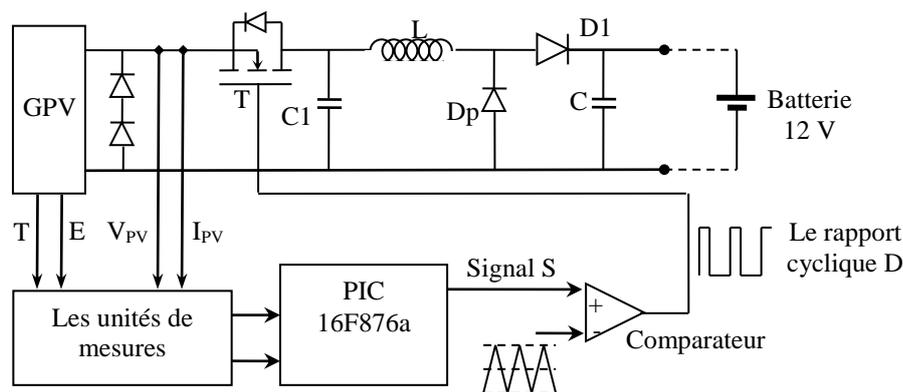


Figure V.2 Schéma global du dispositif réalisé

La précision de notre technique est liée à la complexité de la table de vérité employée d'où la nécessité d'utiliser un microcontrôleur qui a une forte capacité de calculs selon la fluctuation des

paramètres électriques du panneau. Notre choix a été tel que la commande peut présenter les meilleures performances en termes de précision et de rapidité de recouvrement du PPM.

V.4.2 Déroulement de la technique réalisée

La figure V.3 représente le principe général de notre commande MPPT sous forme d'un schéma bloc. La numérisation de la commande MPPT est essentielle pour répondre à de nouvelles améliorations de précisions nécessaires et devenant difficiles à mettre au point en analogique. Notre commande est implantée au microcontrôleur PIC16F876a qui présente un bon compromis entre son prix, sa disponibilité, la simplicité de sa programmation et sa faible consommation (13 MHz pour une fréquence d'horloge de 20 Mhz). Ses caractéristiques peuvent être résumées sur l'annexe [H].

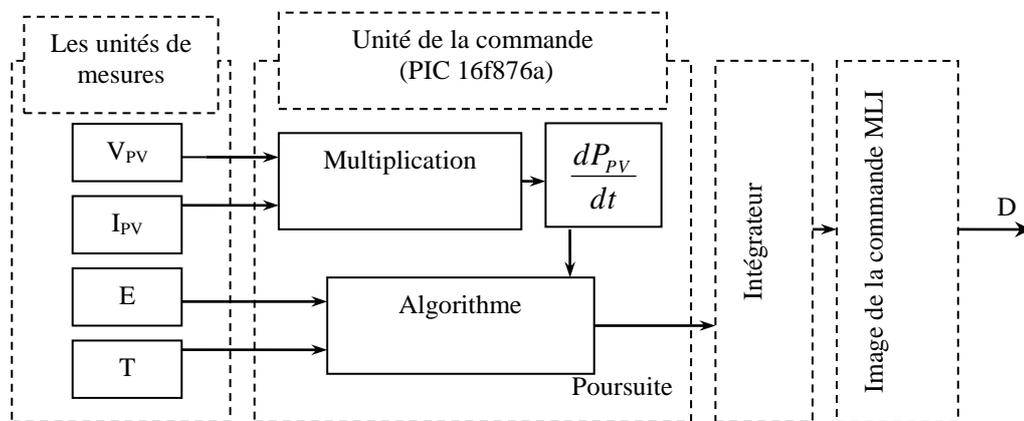


Figure V.3 Schéma synoptique de la commande réalisée [59]

En permanence, il est nécessaire de connaître la tension V_{PV} et le courant I_{PV} aux bornes du GPV à l'aide des unités de mesure ; les valeurs de ces derniers récupérés respectivement par les PINs 2 et 3 du PIC. La multiplication de ces acquisitions permet d'avoir la puissance (P_{PV}) à des intervalles de temps considérablement réduits. Cet avantage de temps permet d'identifier au mieux tout changement de conditions de fonctionnement du GPV.

La valeur de la puissance obtenue est comparée à l'échantillon de puissance déterminée précédemment (P_{PV-1}). Ces deux valeurs permettent ainsi de constituer la fonction «dérivée de puissance» permettant de reconnaître en permanence si la puissance délivrée par le GPV s'approche ou s'éloigne du PPM. Une dérivée de puissance positive (de P_1 vers P_2) implique que le point de fonctionnement s'approche du PPM ; donc le sens de recherche est maintenu. Lorsque le signe de la dérivée est négatif (de P_2 vers P_3), cela signifie que le PPM est dépassée. Dans ce cas, on inverse le sens de recherche pour converger à nouveau vers le PPM.

C'est le retard d'inhibition ou délai : temps de transfert des ordres d'incrément ou de décrément du rapport cyclique ; ce retard permet de ne tenir compte des ordres qu'après un temps

fixé préalablement (au moins quatre fois plus grand que la plus grande constante de temps du CS) et garantit ainsi que le régime transitoire du CS n'affecte pas l'opération de recherche du PPM et que l'inversion de sens de poursuite ne changera pas tant que le délai ne soit pas écoulé.

V.4.3 L'étage d'adaptation buck

Considérons la structure donnée sur la figure V.4 correspond à un convertisseur DC-DC abaisseur (buck) ; ce genre de convertisseur est utilisé comme étage d'adaptation entre source et charge quand la tension de cette dernière est inférieure à celle du PV. L'adaptation peut être effectuée en agissant sur la valeur du rapport cyclique. Si le fonctionnement du buck est en conduction continue avec un rendement de 100%, dans ce cas, la relation liée entre les grandeurs d'entrées correspond aux grandeurs I_{PV} et V_{PV} du PV par contre ses grandeurs de sa sortie ne dépendent que du rapport cyclique. Le convertisseur peut donc fonctionner selon deux modes qui dépendent de la période de commutation et de la capacité de stockage d'énergie. Le premier mode est dit continu où, le courant dans celle-ci ne s'annule pas dû au transfert partiel de l'énergie emmagasinée dans l'inductance L. on peut donner une relation entre l'entrée et la sortie comme suit:

$$\begin{cases} V_0 = \alpha \times V_s \\ I_s = \alpha \times I_L \end{cases} \quad \text{V.11}$$

Contrairement au premier mode, le courant du mode discontinu s'annule puisque il y' aura un transfert total de l'énergie emmagasinée dans l'inductance L. on obtient:

$$V_0 = \frac{\alpha^2 \times V_L^2}{\alpha^2 \times V_L + 2\pi \times L \times F_s \times I_L} \quad \text{V.12}$$

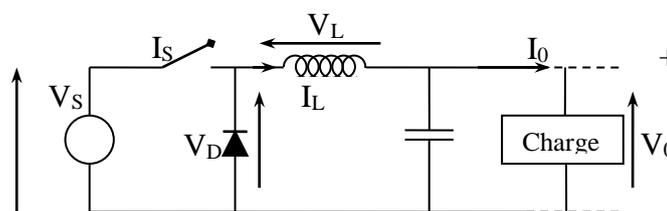


Figure V.4 Structure du convertisseur buck

V.4.4 Démarche de l'algorithme

Le processus de la gestion démarre avec un rapport cyclique initial après un certain délai qui permet au système d'aboutir à son régime permanent. Les unités de mesures commencent à prélever les premiers échantillons du courant et de tension aux bornes du GPV à partir desquelles est

calculée la puissance correspondante. Ensuite le rapport cyclique change et le processus commence. L'algorithme fait évoluer les valeurs des tensions et des courants du GPV vers le PPM par une variation positive ou négative linéaire du rapport cyclique $D = D \pm 1$ au cours du temps.

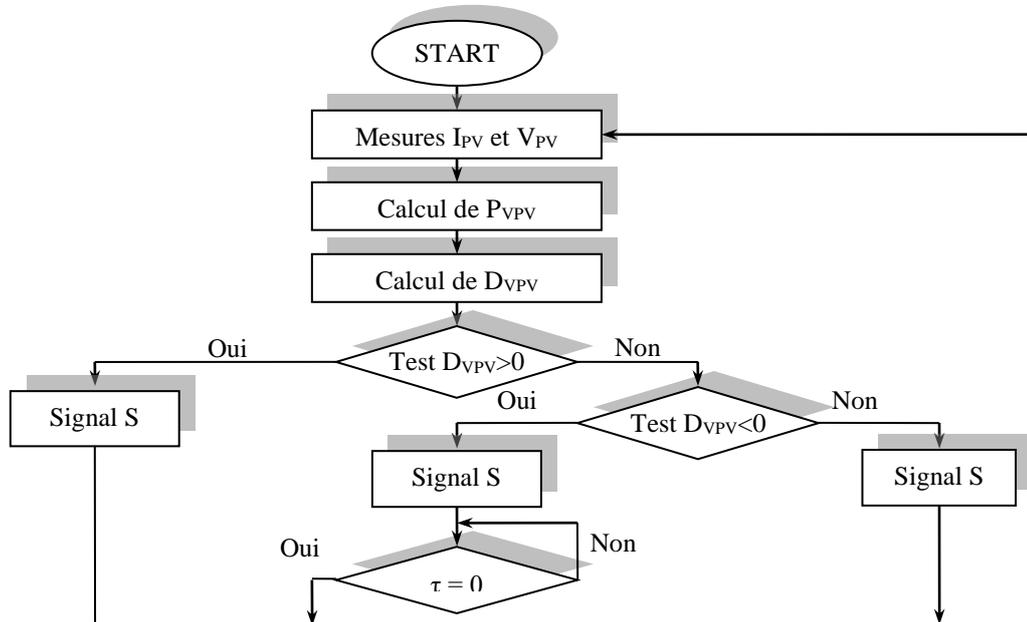


Figure V.5 Organigramme général

A la sortie du microcontrôleur, est émit un signal de correction symbolisé (S). Chaque fois que le sens de recherche est inversé, une interruption est déclenchée au niveau du PIC activant un TIMER d'inhibition (τ). Ainsi, pour pouvoir changer la valeur de ce signal, il faut remplir deux conditions : détecter une dérivée de puissance négative et attendre l'écoulement du délai accompli par la variable (τ). Le principe de l'algorithme de notre commande peut être résumé comme suit :

- Le signal S est maintenu lorsque la dérivée de puissance est positive.
- Le signal S est inversé lorsque la dérivée de puissance est négative et que l'autorisation de changement est accordée.
- Chaque inversion du signal S implique une initialisation du délai.

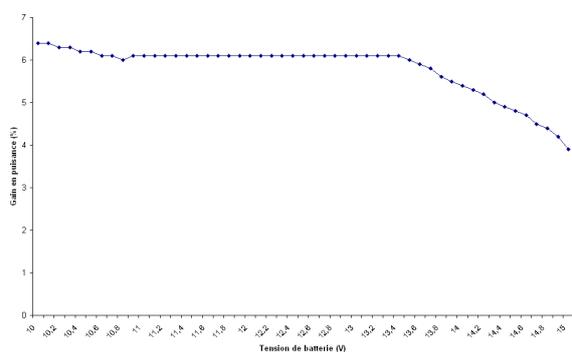
V.4.5 Tests et mesures expérimentaux

Afin de valider le fonctionnement en MPPT du dispositif réalisé figure V.7, des mesures ont été réalisées sur notre chaîne photovoltaïque sans et puis avec la commande MPPT. La réalisation pratique de la carte est donnée à l'annexe [I].

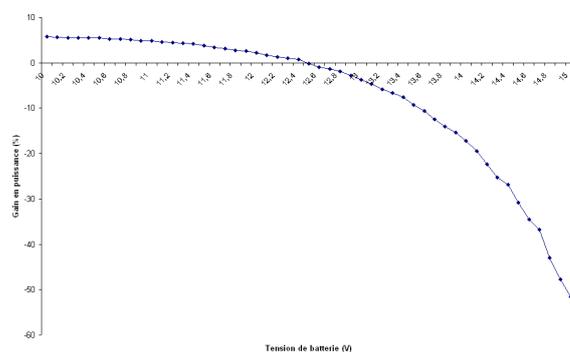


Figure V.6 Carte électrique réalisée

L'expérimentation a été accomplie sur quelques jours. Plusieurs échantillons de tension et de courant ont été pris à différents intervalles de temps. Les puissances correspondantes sont ensuite calculées et les résultats obtenus sont rapportés sur un tableau voir l'annexe [J]. Sur les figures ci-dessous, les gains en puissance ainsi obtenus grâce à ce dispositif sont présentés et l'effet de MPPT est nettement clair [59].



(a) sans influence de la température



(b) avec influence de la température

Figure V.7 Gain énergétique en présence de MPPT

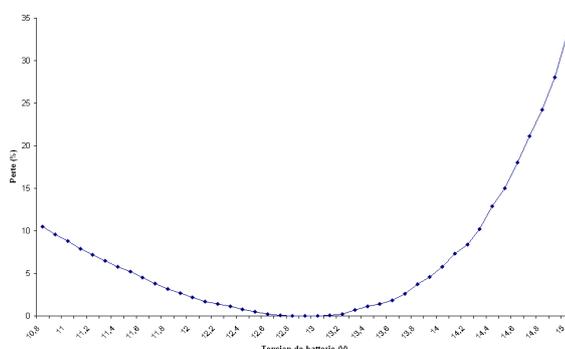
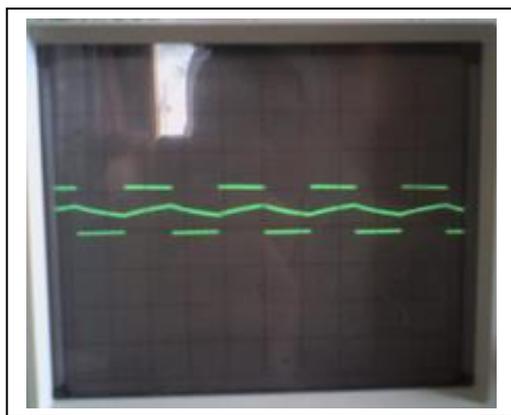


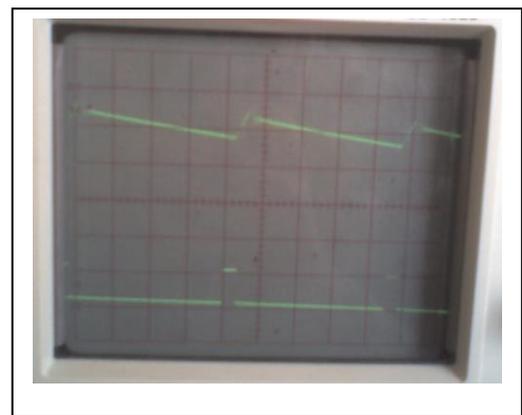
Figure V.8 Perte par rapport au maximum de puissance en connexion directe du panneau sur la batterie

Le paramètre température a un impact direct sur les performances de PV comme le montre la figure V.7 (b). Quand le contrôle par MPPT est absent, la dégradation est remarquable si le niveau de charge de la batterie dépasse 80% du panneau. Quand il y a une augmentation de la température, la tension de circuit-ouvert cause une diminution sensible cependant le courant de court-circuit augmente légèrement. Ce convertisseur maintient ces deux paramètres presque fixes et élimine l'influence de la température comme indiqué à la figure V.7 (a). Lorsque la charge de la batterie dépasse 90%, le gain énergétique commence à diminuer et cela correspond au modèle de batterie utilisée.

Alternativement, l'efficacité du suivi de puissance maximum montre qu'elle est supérieure à $V_{\text{reference}}$ et proche du point de fonctionnement optimal qui est de 12 volts comme signalé sur la figure V.8 Malheureusement, la valeur de la tension correspondante au point de fonctionnement optimal n'est pas toujours connue et en outre elle varie en fonction de la température ambiante et l'intensité d'éclairement en tant que paramètres variables.



$T_{\text{on}} = T_{\text{off}}$



5V / div y et 1ms / div x avec une multiplication par 10x en abscisse

Figure V.9 Réponse du système avant et au moment de la correction par MPPT

A titre d'illustration pratique, les photos présentées par la figure V.9 au moment où le PPM de l'échantillon 11:38 est atteinte, contiennent les signaux inhérents qui sont respectivement le courant de sortie du hacheur adaptateur et le signal MLI à la sortie du pin RC_2 du PIC16f876a.

En effet, la présence de l'étage de conversion peut dégrader l'efficacité d'une commande quelles qu'en soient ses performances, si cet étage fonctionne avec un gain de transfert faible. Les résultats de la technique utilisée ont montré qu'en faisant varier le rapport cyclique du convertisseur statique, la commande MLI peut faire varier le point de fonctionnement du GPV jusqu'à l'amener

au PPM qui permet au GPV de produire le maximum d'énergie tout en répondant aux autres points positifs notamment simplicité, robustesse et coût minime.

V.5 Optimisation modifiée sur une application de pompage photovoltaïque

Comme deuxième axe visé durant le reste de ce chapitre, c'est de travailler sur une autre application photovoltaïque pas moins importante que la précédente où la pompe est située comme charge sur la Chaîne PV à la place de la batterie dans tout ce qui suit ; on va présenter une amélioration de la technique MPPT avec l'algorithme P&O par la logique floue (FLC) est développé pour un système d'entraînement de moteur synchrone à aimant permanent (PMSM) afin d'augmenter l'efficacité du système sans le stockage d'énergie par l'utilisation de convertisseur DC/DC.

V.5.1 Généralité sur le pompage photovoltaïque

Parmi les majeurs inconvénients des installations des systèmes de pompage photovoltaïques est le fait qu'elle soit coûteuse. Le coût des GPV fait déjà entre les 30 % et 60 % du coût d'investissement [69, 70]. Les différents développements effectués sur la conception de ces systèmes sont principalement concentrés sur la matière de construction interne de la cellule, la technologie employée dans la conception du moteur d'entraînement et sa nature, le type de la pompe sans oublier les techniques de contrôle entre la charge et la source. Au cours des dernières années, les moteurs à courant continu utilisés sur une chaîne de pompage photovoltaïque ont été remplacés par les moteurs PMSMs dû à leur robustesse, leur coût et leur excellente adaptation à ces types d'installation.

V.5.2 Application d'une MPPT modifiée basée sur la logique floue

Dans les littératures [71, 72, 73] les auteurs ont déduit que la méthode P&O est la technique la plus couramment utilisée dans la pratique, en raison de la facilité de mise en œuvre d'un dispositif à faible coût. La méthode P&O a une performance de poursuite PPM élevée par rapport aux autres techniques mais, il perd cette caractéristique lors des changements rapides d'irradiation et de température. Lorsque les conditions météorologiques changent lentement ou constamment, l'algorithme oscille également autour ou près du PPM gaspillant une quantité de l'énergie disponible [70, 74]. Un système d'entraînement à vitesse variable est constitué d'un ensemble d'éléments en interaction tels que: les panneaux photovoltaïques, l'onduleur de tension, le moteur synchrone à aimants permanents et la pompe centrifugeuse. Le moteur PMSM, le modèle PV et l'algorithme P&O seront expliqués en détails et seront analysés en termes de performances dans différentes conditions de fonctionnement comme la variation d'irradiation et de température. Les

résultats seront obtenus en utilisant MATLAB / SimPowerSystem blocs. Pour améliorer le système d'entraînement à la fois en réponse dynamique et en régime permanent, un pas variable de tension de référence avec algorithme P&O peut être mise en œuvre en utilisant un contrôleur à logique floue.

Sous Matlab / Simulink, on a utilisé l'équation I_{PV} pour définir les caractéristiques électriques PV du modèle de module (Appolo-solar-energy ASEC-205 G6M), ainsi que pour simuler les caractéristiques I-V et P-V pour divers niveaux d'éclairement à température fixe de 25°C qui ont déjà été modélisés dans le chapitre I en respectant les trois facteurs de la norme STC (irradiation, masse de l'air, température de cellule) [70].

V.5.3 L'algorithme conventionnel de Perturbation et observation modifié (MP&O)

L'algorithme (P&O) est caractérisé par une structure simple facile à implémenter. Il est donc considéré comme l'algorithme MPPT le plus utilisé pour de nombreuses techniques. Il est basé essentiellement sur le fait que sur la courbe de puissance-tension dP/dV atteint zéro en haut de la courbe. L'incrémementation ou la décrémementation périodique des valeurs de la tension ou du courant de sortie du GPV et la comparaison de la puissance de sortie correspondante de ce dernier $P(n+1)$ avec celle de la perturbation précédente $P(n)$ est le principe de fonctionnement de technique P&O. Si la perturbation de la tension aux bornes entraîne une augmentation de la puissance ($dP/dV > 0$), la perturbation doit être maintenue dans la même direction. Sinon, elle sera déplacée dans la direction inverse. Ce processus est répété jusqu'à ce que la puissance maximale atteint le point $dP/dV = 0$.

On favorise la technique P&O pour ses avantages, mais on ne doit pas négliger son inconvénient qui est son oscillation continue autour de la puissance même lorsque il atteint le MPP ; ce qui entraîne des pertes énergétiques supplémentaires. Cela peut être remédié en employant soit une correction par contrôle direct du rapport cyclique où la puissance mesurée à chaque cycle MLI [75], ou un contrôle de tension de référence où une tension de référence est utilisée comme paramètre de perturbation et un régulateur PI est nécessaire pour ajuster le rapport cyclique [76]. Afin de surmonter la limitation qui existe dans les implémentations de l'algorithme de P&O conventionnel, on utilise une technique MPPT basée sur l'algorithme conventionnel de P&O modifié, dans lequel nous avons implémenté un bloc de contrôleur de logique floue pour fournir une taille de pas variable. L'organigramme de l'algorithme P&O modifié proposé est illustré sur la figure V.10.

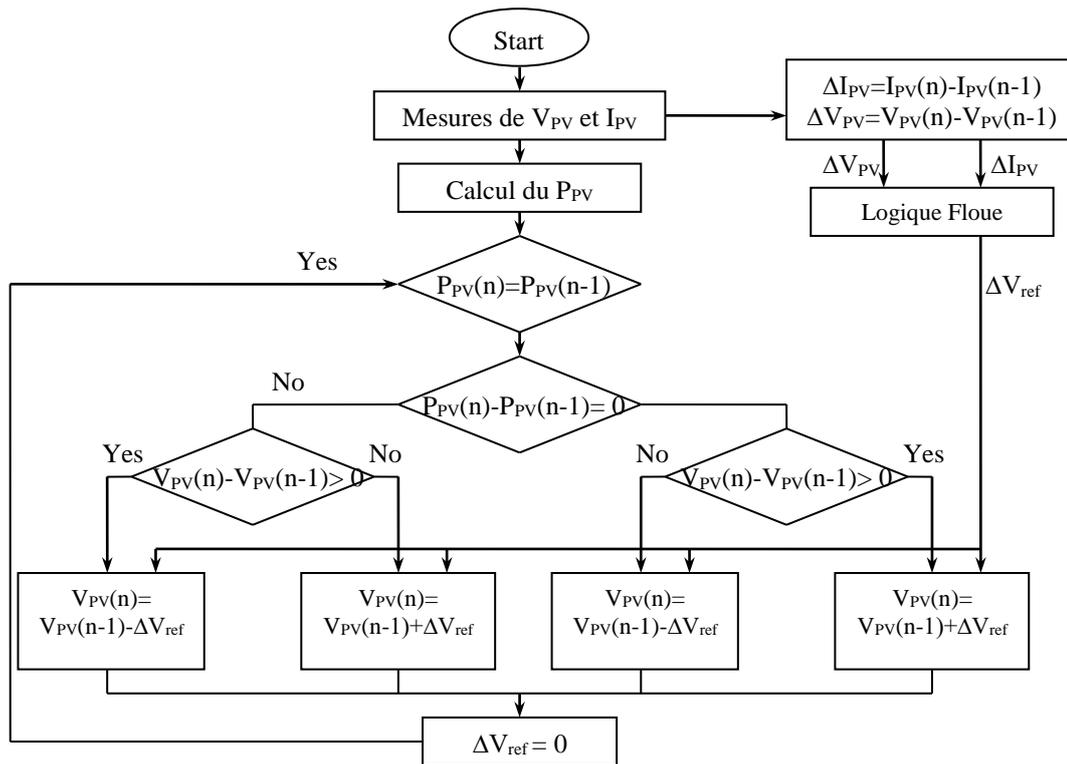


Figure V.10 Organigramme de l'algorithme P&O modifié [70]

Les valeurs modifiées de la tension ΔV_{PV} ainsi que celles du courant ΔI_{PV} du générateur photovoltaïque présentent les entrées du contrôleur de logique floue. En fonction de l'irradiation solaire et de la température existantes, le contrôleur ajuste la taille du pas ΔV_{ref} de l'algorithme P&O. Afin de réduire le coût et la complexité de la mise en œuvre du FLC, il partage les mêmes capteurs avec le P&O qui mesurent les tensions et les courants du générateur photovoltaïque.

On considère le rapport cyclique comme élément de perturbation et de contrôle de l'algorithme proposé, donc le rapport cyclique est perturbé en ajoutant ou en soustrayant la taille de pas en fonction de la variation de la puissance de sortie PV. Ce pas est calculé par le bloc FLC adapté donc il a comme rôle d'ajuster la valeur de la taille de pas en fonction de la position du point de fonctionnement. La valeur du pas varie proportionnellement avec la distance entre le point de fonctionnement et le MPP.

Ce processus se poursuit jusqu'à ce que le MPP soit atteint dont le FLC définit la valeur du pas comme nul. Donc, cela assure une réponse dynamique rapide et élimine les oscillations autour du MPP lorsqu'un régime permanent est atteint.

V.5.4 Contrôle de logique floue (FLC) et la tension ΔV_{ref}

Le contrôleur de logique floue proposé est basé sur une connaissance préalable du système. Il est utilisé pour modifier et contrôler la taille de pas. On peut structurer un schéma fonctionnel d'un

bloc FLC par une collaboration entre quatre sections, fuzzification, moteur d'inférence, défuzzification et base de règles. Les valeurs modifiées de la tension ΔV_{PV} du générateur photovoltaïque et celles du courant ΔI_{PV} présentent les entrées et ΔV_{ref} présente la sortie qui est l'image de la taille du pas dont nous allons envoyer à l'algorithme P&O comme présenté sur la figure V.11.

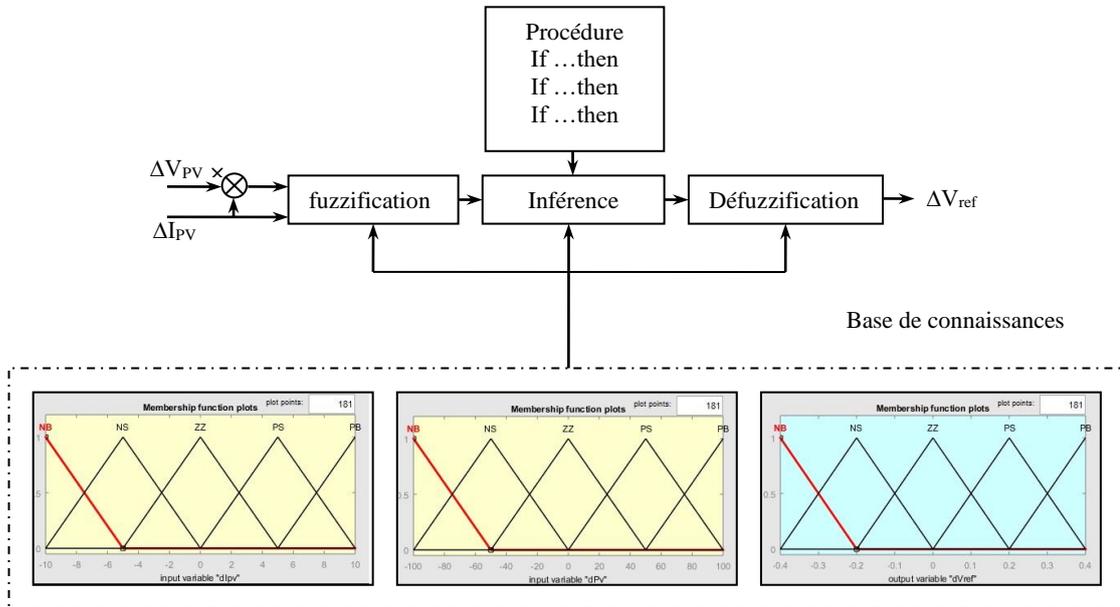


Figure V.11 Diagramme général d'un contrôleur à logique floue

Les variables d'entrée, ΔV_{PV} , ΔI_{PV} et de sortie ΔV_{ref} qui est l'image de la taille du pas variable de logique floue proposée peuvent être calculées par les équations suivantes.

$$P_{PV}(k) = V_{PV}(k) \times I_{PV}(k) \tag{V.13}$$

$$\Delta V_{PV}(k) = G_V (V_{PV}(k) - V_{PV}(k-1)) \tag{V.14}$$

$$\Delta I_{PV}(k) = G_I (I_{PV}(k) - I_{PV}(k-1)) \tag{V.15}$$

En se basant sur les équations V.14 et V.15 et en utilisant les facteurs de mise à l'échelle G_V et G_I , les valeurs de variation ΔV_{PV} de la tension de sortie du générateur PV et la variation du courant de sortie ΔI_{PV} du générateur PV peuvent être normalisées avant le processus de fuzzification pour but, de simplifier le calcul du contrôle. Les portées des deux grandeurs ΔV_{PV} et ΔI_{PV} seront comprises entre -1 et +1. Dans ce modèle, la fonction d'appartenance des variables d'entrée et sortie utilisées ont la même forme comme illustré sur la figure V.11. Toutes les fonctions d'appartenance (ΔV_{PV} , ΔI_{PV} , ΔV_{ref}) sont exprimées avec une fonction triangulaire. Cinq

termes linguistiques sont définis, NB (grand négatif), NS (petit négatif), ZZ (zéro), PS (petit positif) et PB (grand positif) [70].

Toutes les informations des paramètres contrôlés sont disponibles dans la base des règles FLC qui est une collection de lois de vérification (IF THEN). Nous avons deux entrées et que chacune possède 5 fonctions d'appartenance, cela conduit à une constitution de 25 règles dans les règles d'inférence floue du FLC, comme donné dans le tableau V.1. Le rôle de ces dernières est de déterminer la taille de pas variable afin de l'envoyer à l'algorithme P&O dans le but de suivre le point de puissance maximale et cesser l'itération une fois, ce point atteint.

ΔI_{PV}	ΔV_{PV}				
	NB	NS	ZZ	PS	PB
NB	NB	NS	NS	ZZ	ZZ
NS	NS	ZZ	ZZ	ZZ	PS
ZZ	ZZ	ZZ	ZZ	PS	PS
PS	ZZ	PS	PS	PS	PB
PB	PS	PS	PB	PB	PB

Tableau V.1 base de règles floue

Car une sortie de contrôleur flou est toujours un ensemble flou, elle doit être filtrée par un processus de défuzzification pour calculer la sortie nette du contrôle flou proposé. Plusieurs techniques de défuzzification ont été suggérées par les auteurs dans lesquelles la méthode de défuzzification du centre de gravité (COG) ou centroïde [77] est la plus utilisée où le défibreur détermine le centre de gravité pour utiliser sa valeur comme sortie de FLC.

V.5.5 Description du système d'entraînement de moteur synchrone à aimant permanent solaire (PMSM)

Une seule source composée de trois panneaux parallèles est suffisante pour alimenter le PMSM et augmenter son efficacité. La loi de tension de Kirchhoff peut être utilisée de manière à exprimer l'équation de tension PMSM, comme indiqué par l'équation:

$$V_d(t) = Ri_d(t) + \frac{d\psi_d(t)}{dt} - \omega_e \psi_q(t) \quad (V.16)$$

$$V_q(t) = Ri_q(t) + \frac{d\psi_q(t)}{dt} - \omega_e \psi_d(t) \quad (V.17.)$$

Où R est la résistance d'enroulement du stator, ω_e est la fréquence du rotor électrique et respectivement, ψ_d et ψ_q sont les flux de liaison des deux axes (axe d et axe q) lorsque:

$$T_e = \frac{2}{3} p [\psi_d i_d - \psi_q i_q]. \quad (\text{V.18})$$

Le signe p montre le nombre de paires de pôles. En se basant sur l'approche des auteurs [78], la méthode de placement des pôles peut concevoir les paramètres du contrôleur PI. Sur la figure V.12, une représentation schématique globale du PMSM commandée par une commande vectorielle alimentée par un inverseur est montrée. La tension V_{ref} désirée sera créée en fonction de la puissance générée par trois panneaux PV pour consommer toute la puissance générée par le panneau.

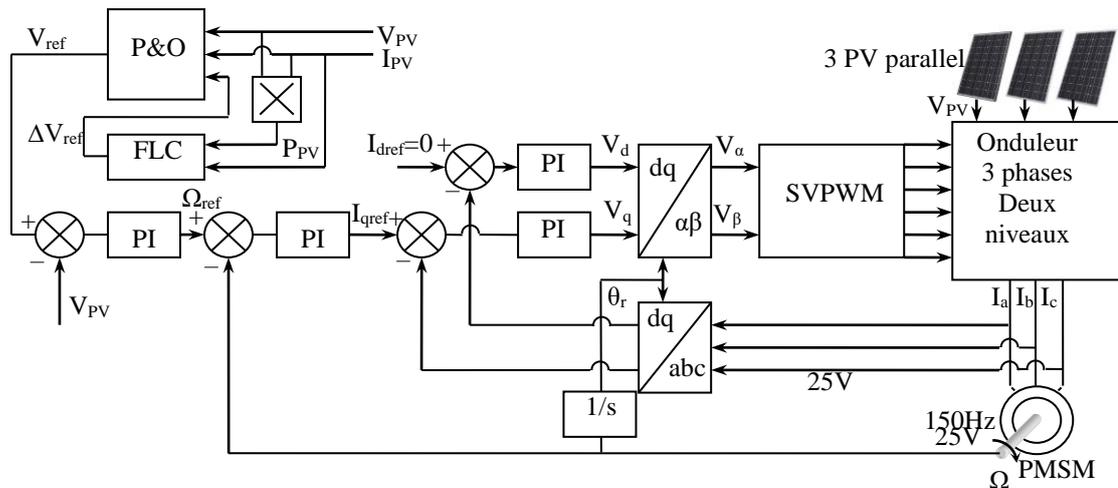


Figure V.12 Schéma global du moteur synchrone à aimants permanents (PMSM) commandé

En effet, après avoir comparé la tension mesurée V_{PV} et la valeur V_{ref} souhaitée, le contrôleur PI est ajouté dans la boucle externe de manière à générer la vitesse Ω_{ref} souhaitée. Ce dernier signal de vitesse est également comparé à celui mesuré en tant que boucle interne. Ce signal d'erreur sera envoyé au régulateur PI qui génère un courant de stator transversal en tant que référence. Comme les aimants produisent un flux constant, le courant I_d doit être contrôlé à un courant nul. [70].

V.5.6 La commande SVPWM

La commande SVPWM est utilisée dans les commandes modernes des moteurs électriques pour obtenir des formes d'ondes arbitraires. Elle sera étudiée sur un onduleur triphasé. Le principe de la MLI vectorielle consiste à reconstruire le vecteur de tension V_{ref} à partir de huit vecteurs de tension. Chacun de ces vecteurs correspond à une combinaison des états des interrupteurs d'un onduleur de tension triphasée [79].

Un vecteur de tension de référence \bar{V}_{ref} est calculé globalement et approximé sur une période de modulation T par un vecteur de tension moyen V_{moy} . Ce dernier est élaboré par l'application des vecteurs tensions adjacents et des vecteurs nuls V_0 et V_7 . Une analyse combinatoire de tous les états possibles des interrupteurs permet de calculer le vecteur de tension $(V_{s\alpha}, V_{s\beta})$. Les huit vecteurs de tension redéfinis par la combinaison des interrupteurs sont représentés dans le plan (α, β) par la figure V.13 [80].

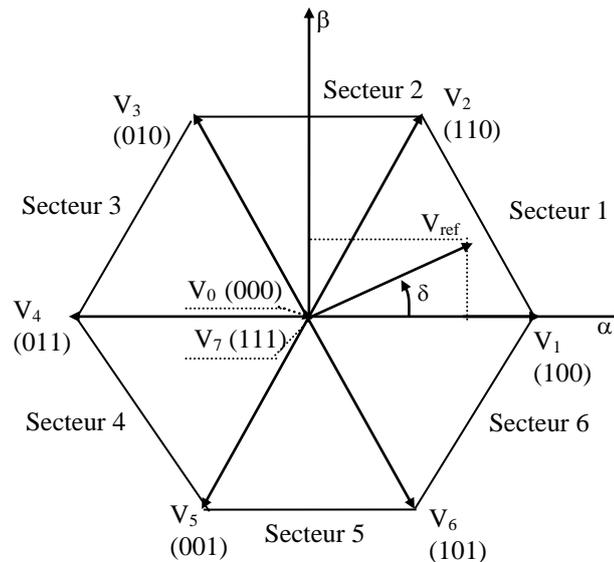


Figure V.13 Représentation des vecteurs de tension d'état de l'onduleur et de référence dans le repère stationnaire

Dans la suite, le vecteur de référence \bar{V}_{ref} est approximé sur la période de modulation T , par la génération d'un vecteur moyen élaboré par l'application des vecteurs de commande adjacents de l'onduleur et des vecteurs nuls. En utilisant les huit vecteurs disponibles, la figure V.14 représente le cas où le vecteur de référence se trouve dans le secteur 1. Le temps d'application des vecteurs adjacents est donné comme suit:

$$\begin{cases} T = T_1 + T_2 + T_0 \\ \bar{V}_{ref} = \frac{T_1}{T} \bar{V}_1 + \frac{T_2}{T} \bar{V}_2 \end{cases} \quad (V.19)$$

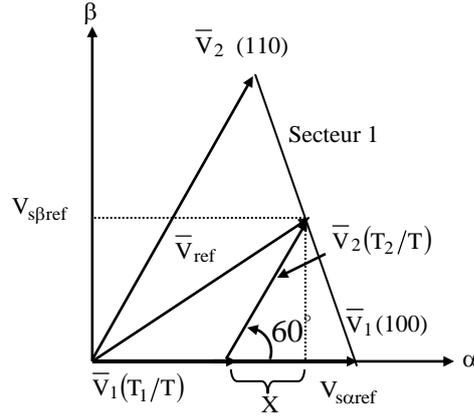


Figure V.14 Projection du vecteur de référence (secteur1)

La détermination des périodes T_1 et T_2 est donnée par une simple projection figure V.14:

$$\begin{cases} V_{s\alpha ref} = \frac{T_1}{T} |\bar{V}_1| + X \\ V_{s\beta ref} = \frac{T_2}{T} |\bar{V}_2| \cos(30^\circ) \\ X = \frac{V_{s\beta ref}}{\text{tg}(60^\circ)} \end{cases} \quad (V.20)$$

Les périodes d'application de chaque vecteur adjacent sont données par [70, 72]:

$$\begin{cases} T_1 = \frac{T}{2E} (\sqrt{6}V_{s\alpha ref} - \sqrt{2}V_{s\beta ref}) \\ T_2 = \sqrt{2} \frac{T}{E} V_{s\beta ref} \end{cases} \quad (V.21)$$

Pour le reste de la période on applique le vecteur nul. En effectuant le même calcul pour chaque secteur le temps d'application des vecteurs peut être lié aux variables suivantes:

$$\begin{cases} X = \frac{T}{E} \sqrt{2} V_{s\beta ref} \\ Y = \frac{T}{E} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} V_{s\beta ref} + \frac{\sqrt{6}}{2} V_{s\alpha ref} \right) \\ Z = \frac{T}{E} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} V_{s\beta ref} - \frac{\sqrt{6}}{2} V_{s\alpha ref} \right) \end{cases} \quad (V.22)$$

Dans l'exemple précédent pour le secteur 1, $T_1 = -Z$ et $T_2 = X$, la détermination du secteur (i) est basée sur l'argument de la tension de référence tel que:

$$\delta = \arg \begin{pmatrix} V_{\alpha ref} \\ V_{\beta ref} \end{pmatrix}. \quad (V.23)$$

Où

$$(i-1)\frac{\pi}{3} \leq \delta \leq i\frac{\pi}{3}$$

Les durées d'application des vecteurs adjacents en fonction du secteur sont données par le tableau suivant:

secteur	1	2	3	4	5	6
T_i	-Z	Y	X	Z	-Y	-X
T_{i+1}	X	Z	-Y	-X	-Z	Y

Tableau V.2 Durées d'application des vecteurs adjacents

Si le vecteur de référence dépasse les limites de l'hexagone, la somme des durées d'applications des vecteurs adjacents est supérieure à la période de modulation qui produira des erreurs. Pour éviter ceci, il est nécessaire de limiter le vecteur de référence à l'intérieur de l'hexagone par l'algorithme ci-dessous (saturation) [81]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{if } T_i + T_{i+1} \geq T \\ \text{then} \\ \quad T_i = T_{isat} = \frac{T}{T_i + T_{i+1}} T \\ \quad T_{i+1} = T_{(i+1)sat} = \frac{T}{T_i + T_{i+1}} T \\ \text{else} \\ \quad T_i = T_i \\ \quad T_{i+1} = T_{i+1} \\ \text{end} \end{array} \right.$$

Les trois rapports cycliques nécessaires sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{aon} = \frac{T - T_i - T_{i+1}}{2} \\ T_{bon} = T_{aon} + T_i \\ T_{con} = T_{bon} + T_{i+1} \end{array} \right.$$

La détermination des signaux de commande (S_a , S_b , S_c) en fonction de T_{xon} est donnée par le tableau suivant:

Secteur	1	2	3	4	5	6
Phase S _a	T _{aon}	T _{bon}	T _{con}	T _{con}	T _{bon}	T _{aon}
Phase S _b	T _{bon}	T _{aon}	T _{aon}	T _{bon}	T _{con}	T _{con}
Phase S _c	T _{con}	T _{con}	T _{bon}	T _{aon}	T _{aon}	T _{bon}

Tableau V.3 Signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur

V.5.7 Résultats de la simulation

La simulation a été effectuée à l'aide de blocs MATLAB / Sim-Power-Systems comme précisé sur la figure V.15. Le bloc P&O modifié nécessite les V_{PV} et I_{PV} du générateur PV pour estimer la tension de référence représentée sur la figure V.15. Le V_{ref} est comparé au V_{PV} et réglé par un régulateur PI pour définir la vitesse de référence du moteur de la pompe. L'étape d'échantillonnage temporel des modèles des deux blocs (blocs de contrôle et blocs de puissance) est prise comme 5.14 µs [70].

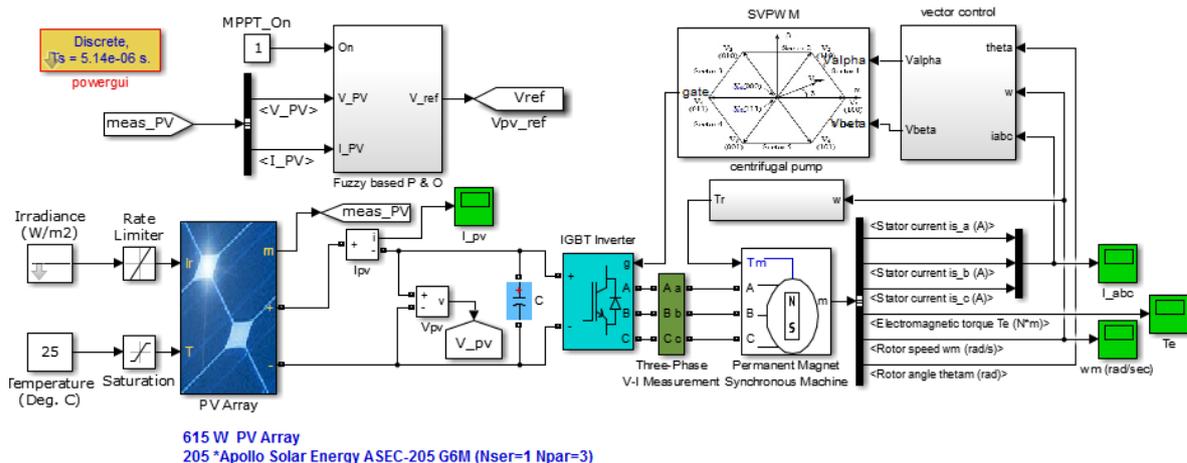


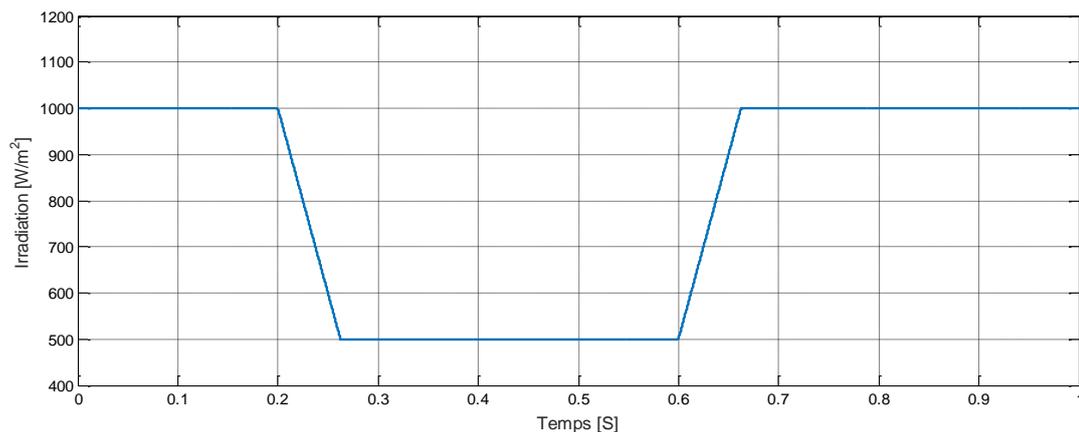
Figure V.15 Diagramme synoptique des systèmes d'entraînement solaire [70]

Ce qui a été étudié ultérieurement, une étude comparative sur le P&O conventionnelle et le P&O basée sur la logique floue est faite pour montrer la performance des deux techniques dans des conditions similaires. L'étude comparative prend en compte deux caractéristiques importantes: la vitesse de poursuite du point de puissance maximale et l'oscillation en régime permanent. Pour montrer la pratique de l'algorithme P&O suggéré basé sur FLC, cet algorithme a été testé avec deux étapes de tension de référence: 0,01 et 0,05 sous deux changements d'irradiation. L'irradiation a été changée de 1000 à 500 W / m² à 0,2 s, puis augmentée à 1000 W / m² à 0,6 s comme le montre la figure V.16 (a).

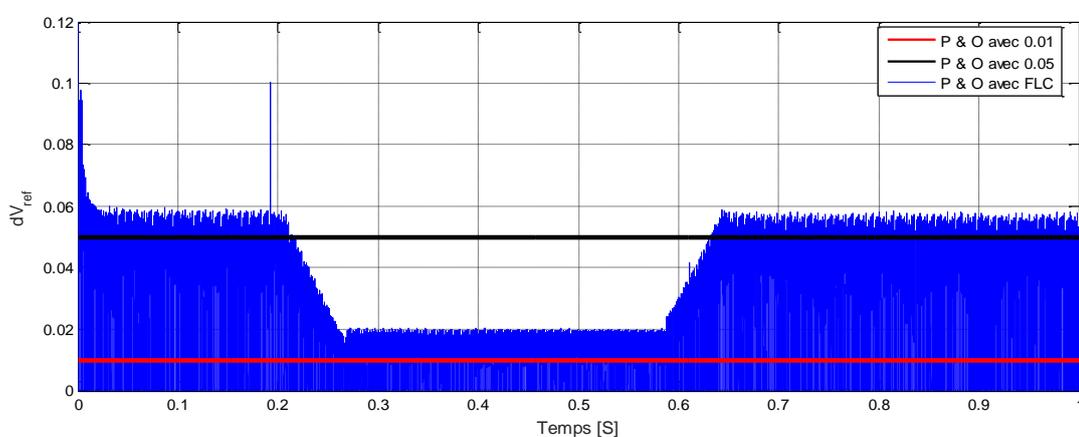
Comparé au P&O avec un pas fixe de 0.01, le P&O avec un pas fixe de 0.05 montre une bonne performance dynamique. Il peut converger plus rapidement vers le régime permanent mais l'oscillation est beaucoup plus élevée. La performance dynamique de l'algorithme P&O peut être encore améliorée avec une taille de pas plus grande.

La figure V.16 (b) représente la variation de la taille du pas de référence de tension à 0,2 s et 0,6 s. La figure V.16 (c) montre que l'oscillation en régime permanent a été totalement éliminée dans le cas de P&O FLC et lorsque la puissance de sortie du générateur PV est supérieure à 615 W. En outre, la P&O FLC offre une réponse dynamique plus rapide que le P&O de 0,01 et 0,05.

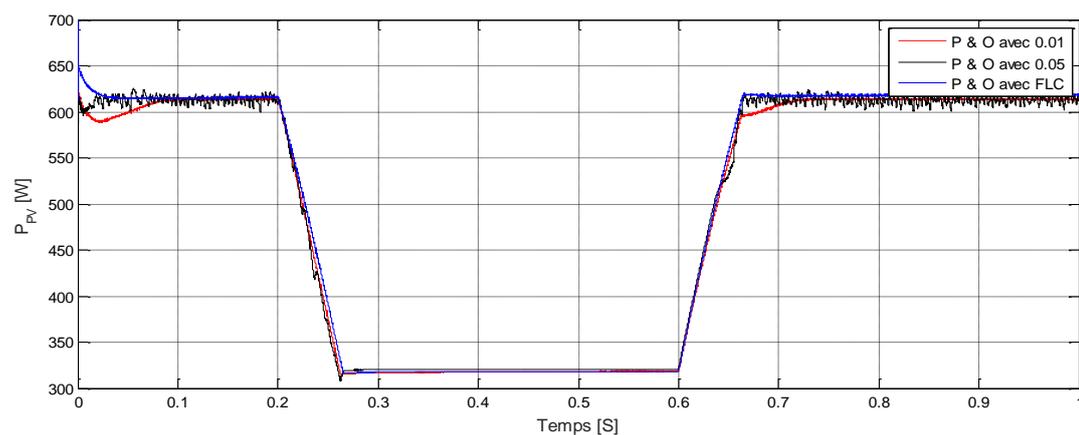
Dans la seconde partie, les résultats de la simulation ont été obtenus pour montrer les performances de l'algorithme P&O basé sur la logique floue dans différentes conditions telles que des changements rapides d'irradiation. Les résultats du système d'entraînement du moteur de pompage solaire sont obtenus pour fonctionner à 25°C et 1000 W / m². Ils sont donnés sur la figure V.17 (a-d) La caractéristique de puissance du générateur photovoltaïque est représentée sur la figure V.17 (a) avec un point de puissance maximal déterminé comme 615 W. La tension et le courant du générateur PV sont modifiés comme indiqué sur la figure V.17 (b) Il faut savoir que la tension du générateur PV est ajustée au MPP d'environ 26 V. Les courants du stator triphasé sont donnés sur la figure V.17 (c). La vitesse du moteur est modifiée ; comme illustré sur la figure V.17 (d) qui est limitée à la vitesse maximale disponible d'environ 3000 tr / min. Comme deuxième travail, l'irradiation est ajustée à 500 W / m². Les résultats sont donnés sur la figure V.17 (e-h) pour cette condition ajustée. Dans ce cas, l'PPM du générateur PV est obtenue à environ 315 W, comme présenté sur la figure V.17 (e). Le courant du générateur photovoltaïque est réduit de 24 A à 12 A, comme illustré à la figure V.17 (f). En fonction de cette diminution du courant, les courants du stator et la vitesse du moteur sont réduits comme indiqué sur la figure V.17 (g-h). La vitesse du moteur est réduite de 2980 tr / min à 2250 tr / min. Les résultats montrent que le moteur fonctionne au point de puissance maximale.



(a)

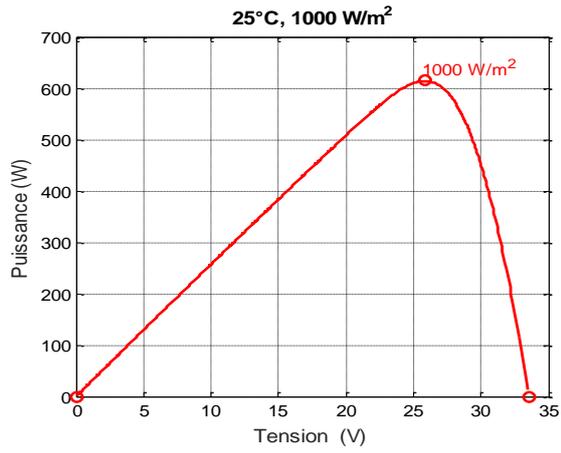


(b)

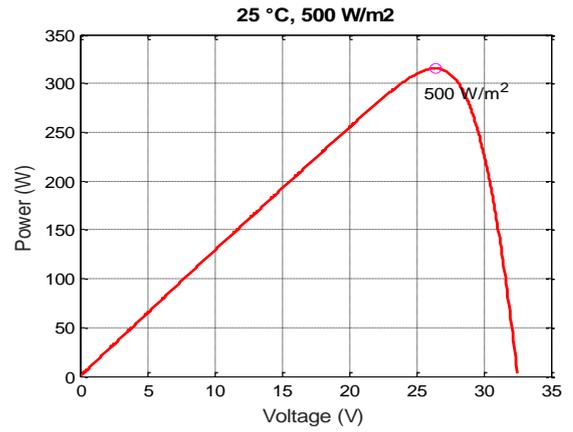


(c)

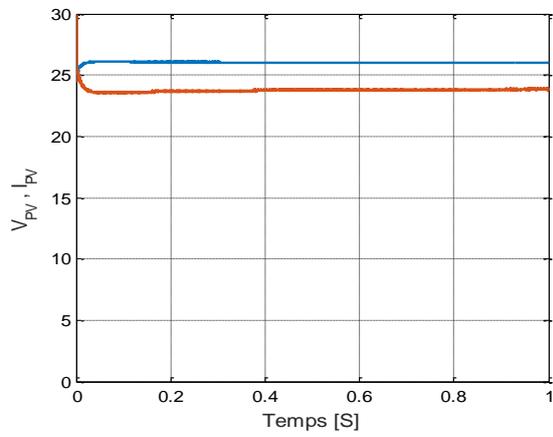
Figure V.16 Comparaison de la réponse en régime permanent et en réponse dynamique P&O proposée par le contrôleur à logique floue (FLC) avec l'algorithme P&O avec une tension de référence de 0,05 et 0,01. (a) Les changements d'irradiation; (b) pas variable d'une tension de référence; (c) Puissance de sortie du générateur photovoltaïque [70]



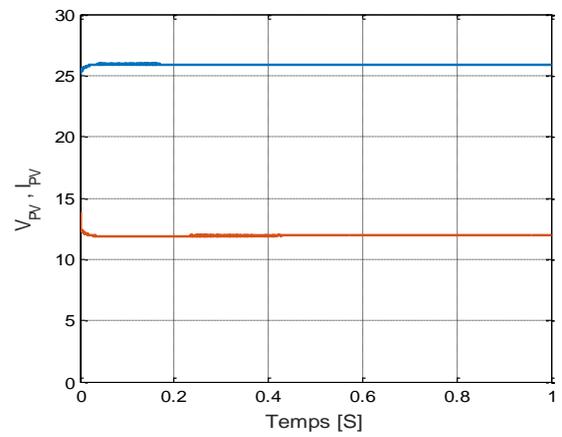
(a)



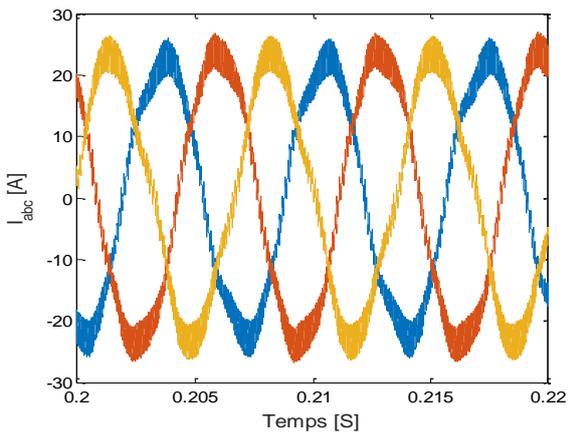
(e)



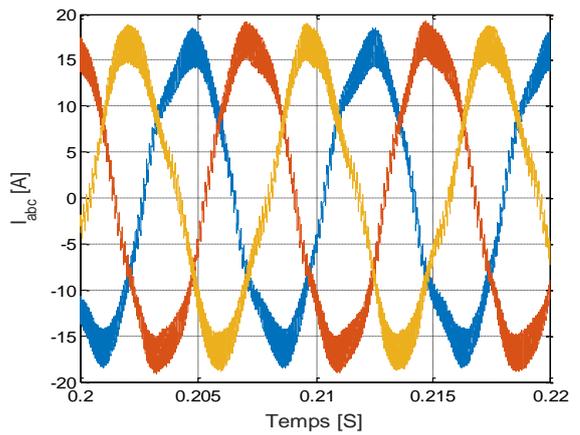
(b)



(f)



(c)



(g)

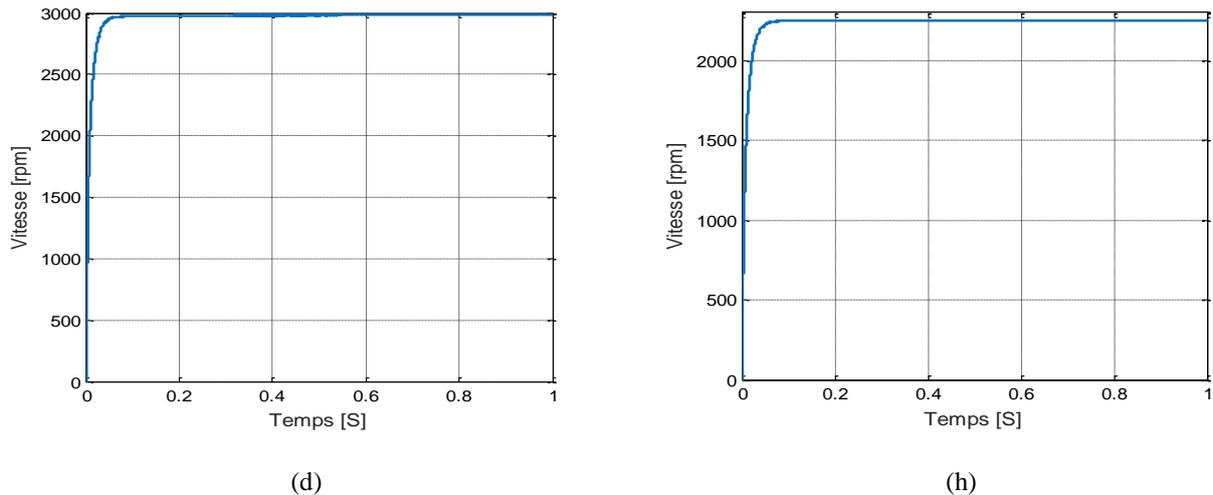


Figure V.17 Résultats de simulation d'un algorithme P & O basé sur FLC. Fonctionnant à 25°C et 1000 W / m²; (a) Courbe P-V du champ PV, (b) Courant et tension du champ PV, (c) Courants du stator, (d) Vitesse du moteur, fonctionnant à 25°C et 500 W / m²; (e) la courbe P-V du générateur PV, (f) les paramètres (I, V) du générateur PV, (g) les courants du stator, (h) la vitesse du moteur

V.6 Conclusion

Généralement, pour compenser les pertes et améliorer la performance, il est impératif d'effectuer une optimisation sur chaque élément contribuant à la conception d'une chaîne photovoltaïque : soit en termes de programmation en implémentant des algorithmes de correction ou en question de matériels en manipulant les matériaux utilisés ainsi que les types de charge ou en contexte relationnelle entre la source et la charge.

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons rappelé les principaux modes de recherche du PPM présentés dans la littérature en signalant systématiquement leurs avantages et leurs limites. Les résultats de la technique utilisée ont montré qu'en faisant varier le rapport cyclique du convertisseur statique, la commande PWM peut faire varier le point de fonctionnement du GPV jusqu'à l'amener au PPM qui permet au GPV de produire le maximum d'énergie tout en répondant aux autres points positifs notamment simplicité, robustesse et coût minime. Le choix du type de microcontrôleur a cependant été fait en vue d'une amélioration future du programme en insérant différentes fonctions de supervisions de l'ensemble du régulateur solaire. Il est ainsi surdimensionné pour la fonction MPPT seule.

Dans la seconde partie de ce chapitre, un algorithme P&O basé sur FLC proposé a été présenté pour un système solaire. Ce système comprend un générateur photovoltaïque, un onduleur cc/ca à deux niveaux et une charge de pompe immergée pilotée par PMSM. La nature d'alimentation de PMSM ne nécessite pas l'utilisation d'un convertisseur élévateur dû à sa

construction qui n'exige pas une tension de fonctionnement entre phases supérieures à 20 V. L'association de trois panneaux en parallèle de modèle Appolo-solar-energy ASEC-205 G6M assure l'alimentation. Pour le contrôle de la vitesse du PMSM, un contrôle vectoriel est implémenté. Ainsi, le système solaire qui a une fiabilité de structure simple et un rendement élevé est obtenu.

Conclusion générale

1. Généralités

Impérativement, afin de minimiser les pertes et améliorer la performance d'une chaîne photovoltaïque, Il faut effectuer une optimisation sur chaque élément faisant partie de la conception d'une installation photovoltaïque pour bénéficier au maximum de l'énergie solaire et exploiter totalement la durée d'ensoleillement quotidienne. Cette optimisation est subdivisée globalement en quatre critères d'amélioration : le choix de matériaux constituant les cellules photovoltaïques, la conception mécanique de l'installation des panneaux, la nature de la charge ainsi que les algorithmes d'adaptation implémentés qui relient entre charge et source.

Puisque notre spécialité ne nous permet pas de s'approfondir dans la connaissance des effets des matériaux sur le rendement, on se contente de rénover au maximum les composants électriques et mécaniques rentrant dans la conception et améliorer le contrôle algorithmique.

En ce qui concerne la programmation, on a implémenté des algorithmes de correction fonctionnant à l'aide des équations de temps pour calculer à tout moment la durée d'ensoleillement et les angles d'incidence du rayonnement solaire pour atteindre un rendement optimal pour n'importe quel période et quelque soit l'endroit. Donc, grâce à la collaboration entre les programmes de localisation et les algorithmes de calcul, on peut orienter le panneau vers les points de puissance maximale et bénéficier de l'énergie solaire au maximum. Cela en faisant la relation entre les données de localisation (altitude et longitude) et les grandeurs des équations de temps (durée d'ensoleillement, lever et coucher de soleil, angle de l'élévation et d'azimut). Les données de localisation sont obtenues à l'aide de composants de haute gamme (GPS, RTC, Smartphone) et d'applications de géo-localisation réalisée par App Inventor. Grace au support informatique, on peut prédire la performance et le rendement d'un panneau avant l'installation pour sélectionner le lieu optimal pour un champ photovoltaïque sans devoir passer à l'expérimentation réelle.

En termes de caractéristiques mécaniques et matériels d'articulation employés, nous avons cherché à étudier les facteurs extérieurs influents (éclairage et température) sur les différentes dispositions des panneaux photovoltaïques (fixe ou orienté). En passant par des essais expérimentaux, nous avons cherché en premier lieu à comparer un système fixe à un système de poursuite préprogrammé modifié à deux axes et basé sur la géo-localisation à travers une application. On a ensuite développé une nouvelle technique qui inclut dans le processus de localisation des capteurs sensoriels et des composants à haute gamme ainsi que la pré-programmation. Cette dernière est une technique hybride obtenue par le fusionnement des deux grandes techniques sensorielles et préprogrammées. Pour démontrer l'efficacité de notre approche,

nous l'avons comparée avec le système de poursuite préprogrammée modifié à deux axes et elle a prouvé ses avantages.

Malgré qu'en effectuant une poursuite physique par orientation des panneaux vers le plus grand flux lumineux, nous évitons la réflexion des rayons solaires sur les surfaces actives des panneaux ; cela n'est toujours pas suffisant pour une optimisation complète car il existe toujours des facteurs climatiques non-manipulables qui influent le rendement. C'est pour cela que des techniques d'optimisation MPPT ont été implémentées.

En ce qui concerne les types de charge, il existe beaucoup d'application où l'effet de l'optimisation par réalisation ou programmation est apparent, juste en changeant le type de charge. La méthodologie de l'optimisation change complètement. Pour une Chaîne dotée d'une charge comme batterie, nous nous sommes contentés d'une optimisation par la commande PWM au niveau de l'étage d'adaptation où les résultats expérimentaux étaient satisfaisants. Puisque les panneaux photovoltaïques sont toujours couteux surtout lorsque la charge est une pompe standard, nous avons utilisé une pompe immergée pilotée par PMSM et réduit le nombre de panneaux nécessaires en utilisant des algorithmes de poursuite P&O basés sur l'FLC. Les résultats obtenus par simulation ont été suffisants pour valider cette correction.

Presque 75% du travail effectué pour finaliser, cette thèse est basée sur l'expérimentation réelle en utilisant des microcontrôleurs de Microchip ou Atmel pour fournir un contexte relationnel entre la programmation virtuelle et l'application pratique.

2. Perspectives

La diversité des langages utilisés dans le présent travail afin de résoudre nos problématiques nous a poussés à s'approfondir dans la programmation. Cela ne signifie pas que nous sommes indécis à propos des logiciels employés mais, nous a permis d'interagir avec différents types d'environnements de programmation et d'apprendre à s'adapter avec eux.

Nous souhaitons vivement intégrer tous les éléments étudiés dans cette recherche dans un seul circuit gérant au même temps toutes les différentes fonctions citées dans cette thèse ou de réaliser une PLC capable de distinguer les paramètres d'entrée (source) et les paramètres de sortie (charge) par la sélection d'un algorithme convenable.

Nous espérons que cette thèse sera un objet de nouvelle étude bénéfique pour nos étudiants et collègues chercheurs.

3. Articles réalisés (voir annexe [k])

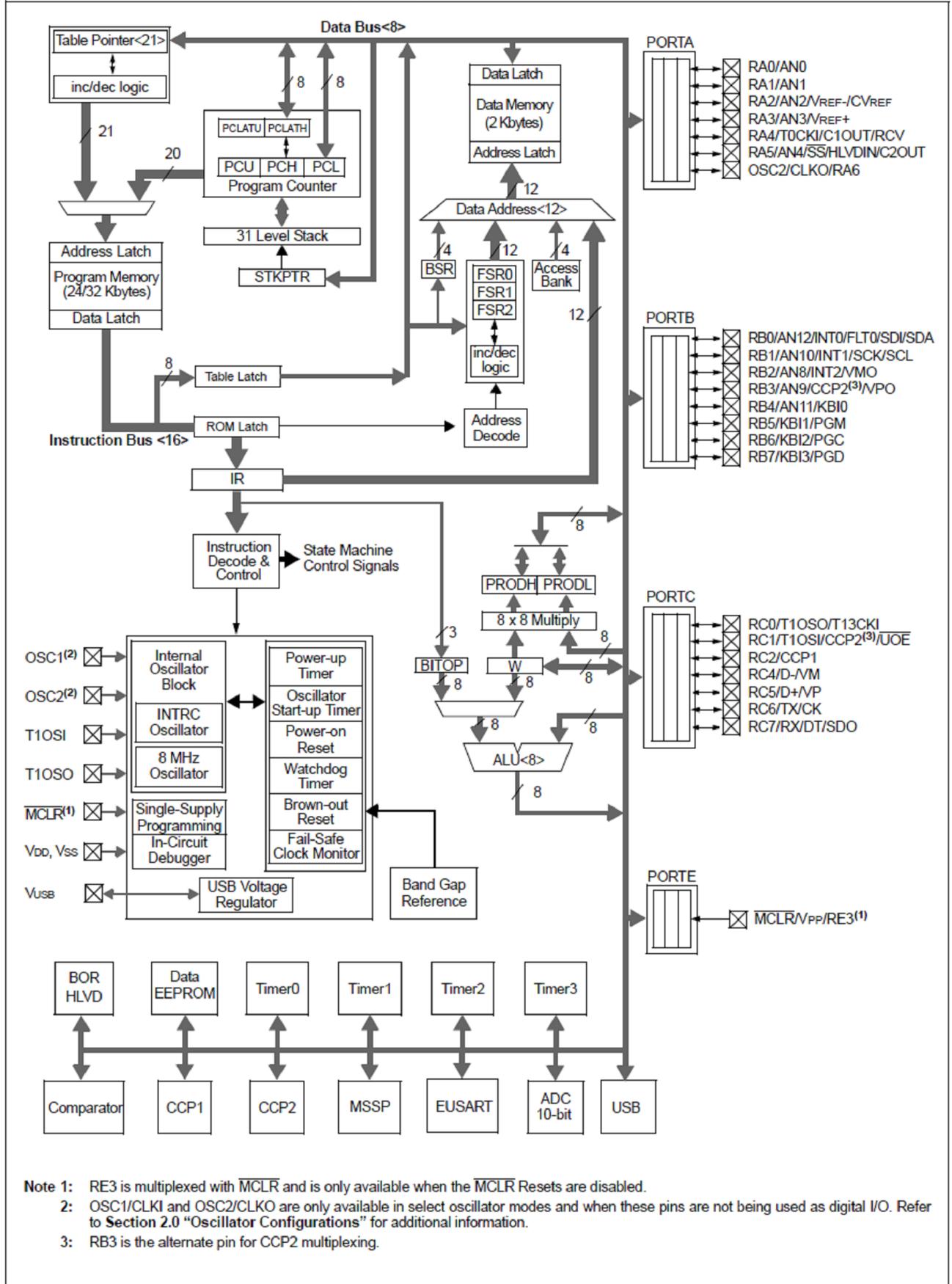
Annexes



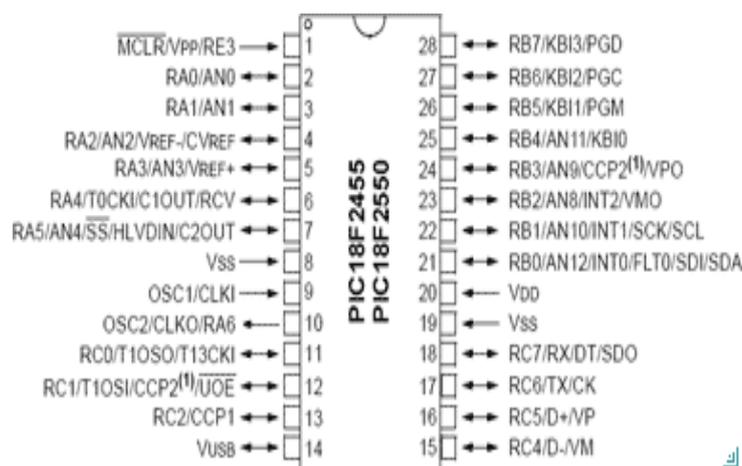


Les différentes phases pour la construction mécanique du support articulé du panneau photovoltaïque concernant le chapitre III.

FIGURE 1-1: PIC18F2455/2550 (28-PIN) BLOCK DIAGRAM



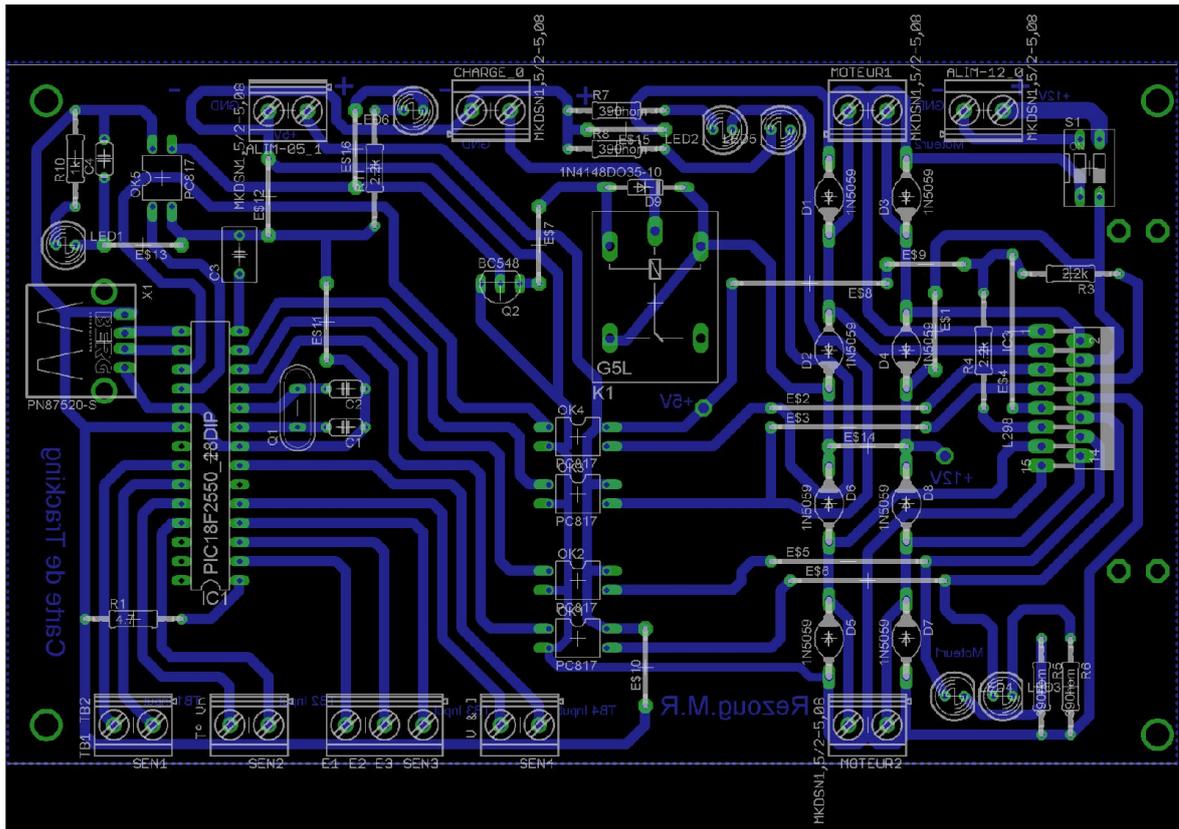
Architecture interne du PIC18F2550



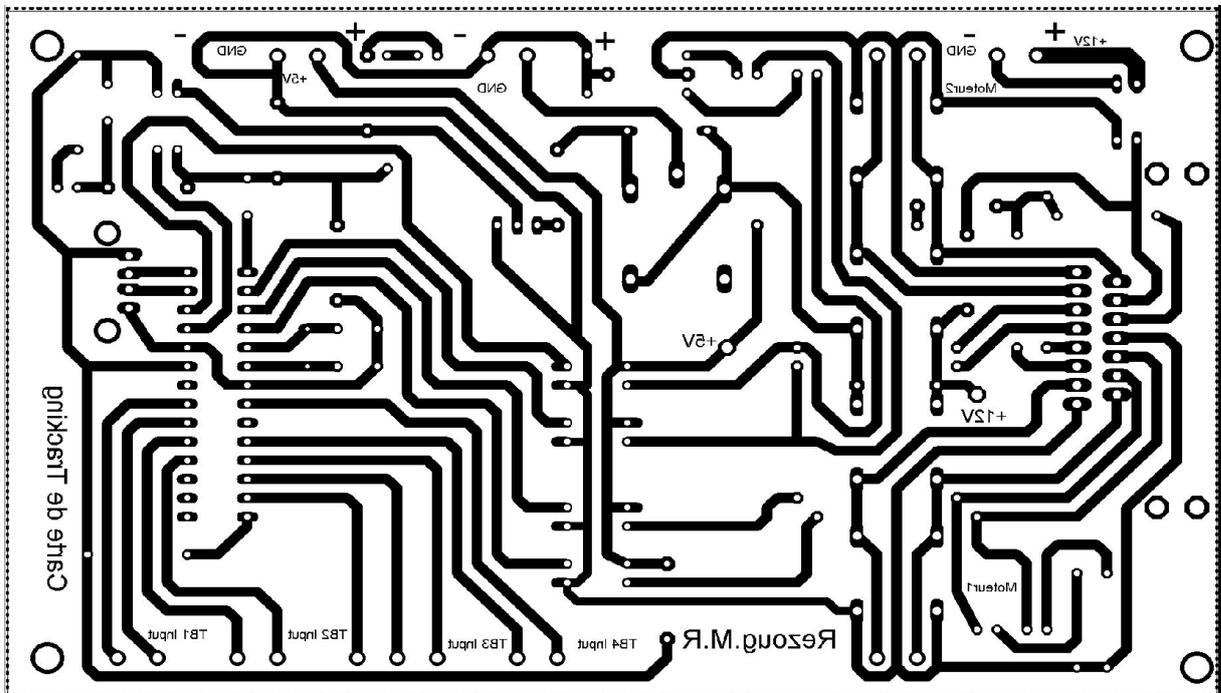
Boîtier PIC18F2550

Fabricant:	Microchip
Catégorie du produit:	Microcontrôleurs 8 bits - MCU
Package/Boîte:	SPDIP-28
Fréquence de l'horloge max.:	48 MHz
Taille de la mémoire du programme:	32 kB
Taille de la RAM de données:	2 kB
Résolution CAN:	10 bit
Nombre d'E/S:	24 I/O
Tension d'alimentation de fonctionnement:	2 V to 5.5 V
Température de fonctionnement min:	- 40 C
Température de fonctionnement max.:	+ 85 C
Taille de la ROM de données:	256 B
Type de Rom de données:	EEPROM
Nombre d'horloges/de compteurs:	4 Timer
Tension d'alimentation - Max.:	5.5 V
Poids de l'unité:	2,200 g

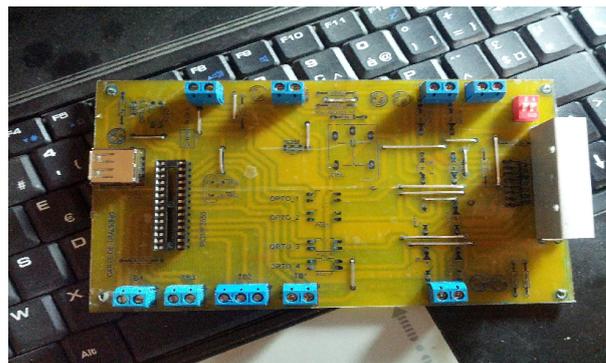
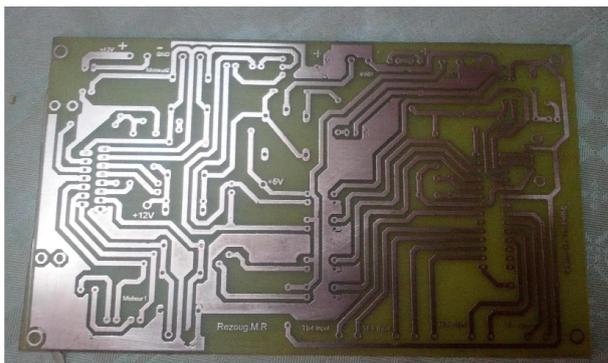
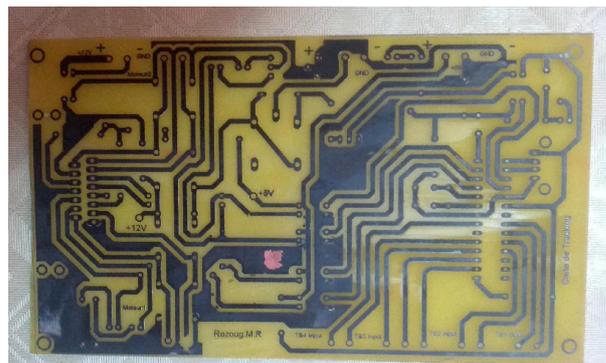
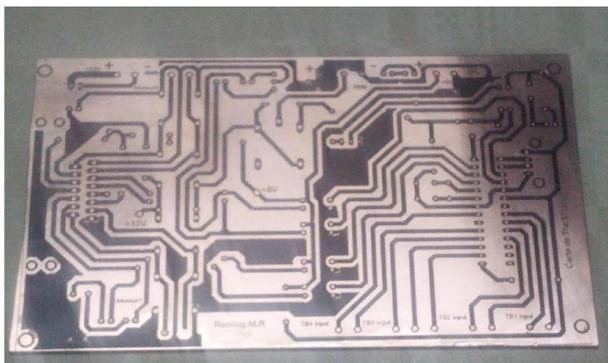
Caractéristique du PIC18F2550



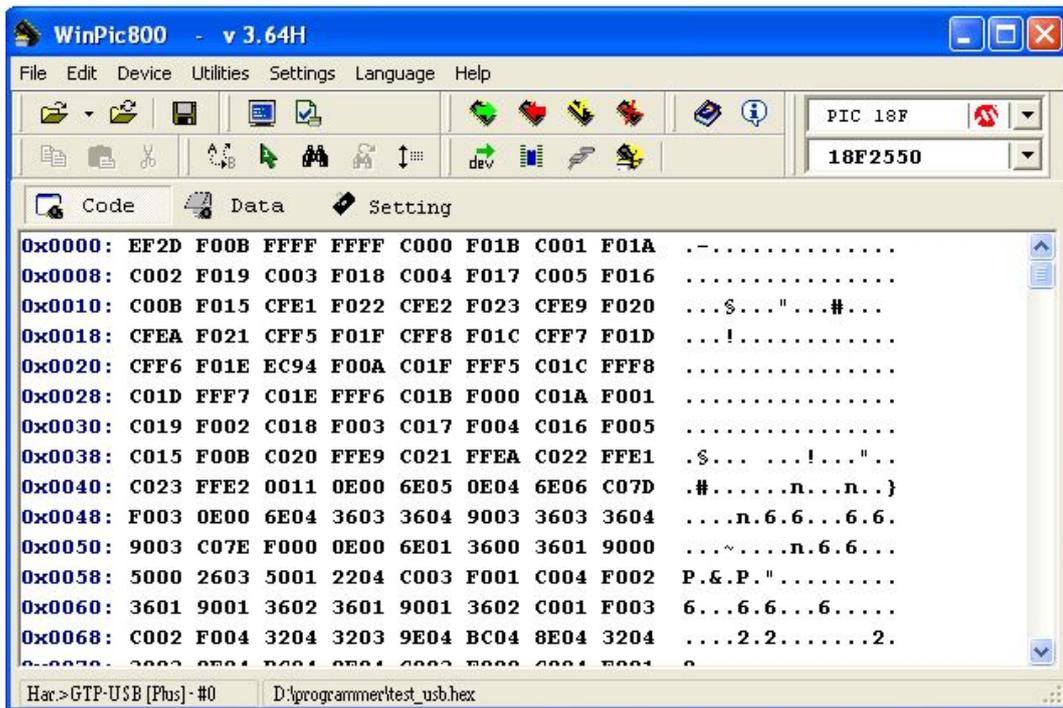
L'emplacement des composants sur la carte réalisée sous Eagle pour un dimensionnement de 16cm x 9.2cm



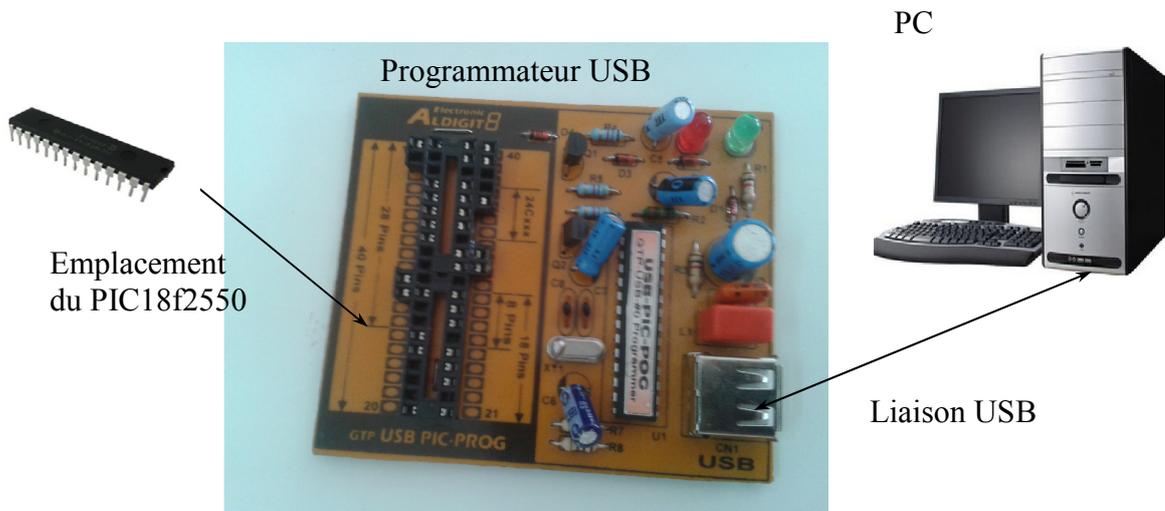
Le typon réalisé sous Eagle



Les phases de la réalisation du circuit imprimé de la carte réalisée de poursuite chapitre III



L'interface du Winpic lord de l'injection du code hexadécimal



Transfert des données vers le microcontrôleur

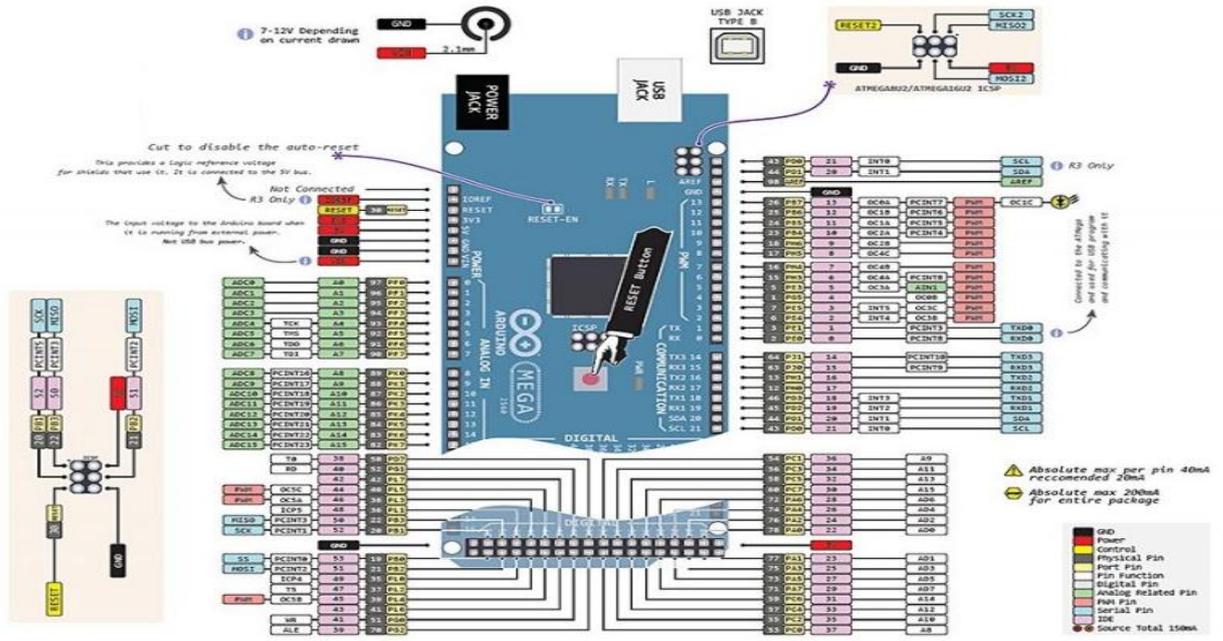
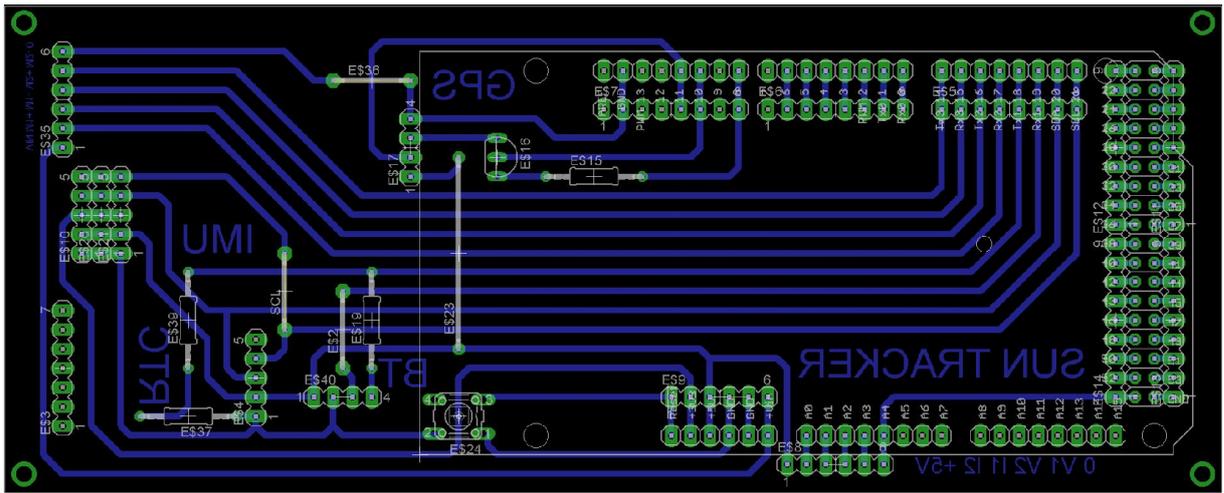


Schéma descriptif d'une carte Arduino Mega

Spécifications techniques de la carte Arduino Mega 2560 Rev3

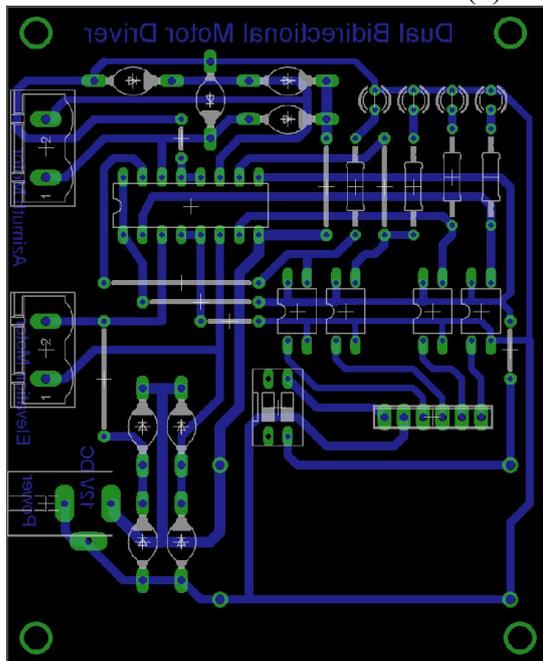
- Microcontrôleur : ATmega2560.
- Tension de fonctionnement : 5 V.
- Gamme de tension d'entrée (recommandée) : 7-12 V.
- Gamme de tensions d'entrée (limite) : 6-20 V.
- Pins digitaux I/O : 54.
- Pins digitaux I/O PWM : 14.
- Pins d'entrée analogique : 16.
- Courant direct par pin I/O : 40 mA.
- Courant direct pour les pins 3,3 V : 50 mA.
- Mémoire flash : 256 KB.
- Mémoire Flash du Bootloader : 8 KB.
- SRAM : 8 KB.
- EEPROM : 4 KB.
- Fréquence d'horloge de l'oscillateur à quartz : 16 MHz.
- Dimensions : 101,52 x 53,3 mm.
- Poids : 37 g.



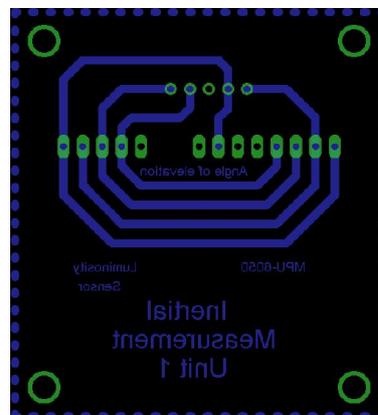
(a) 16mm × 6.4mm



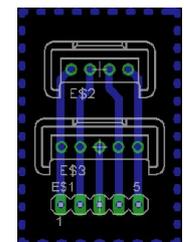
(b) 10mm × 6.4mm



(c) 8.7mm × 7.1mm



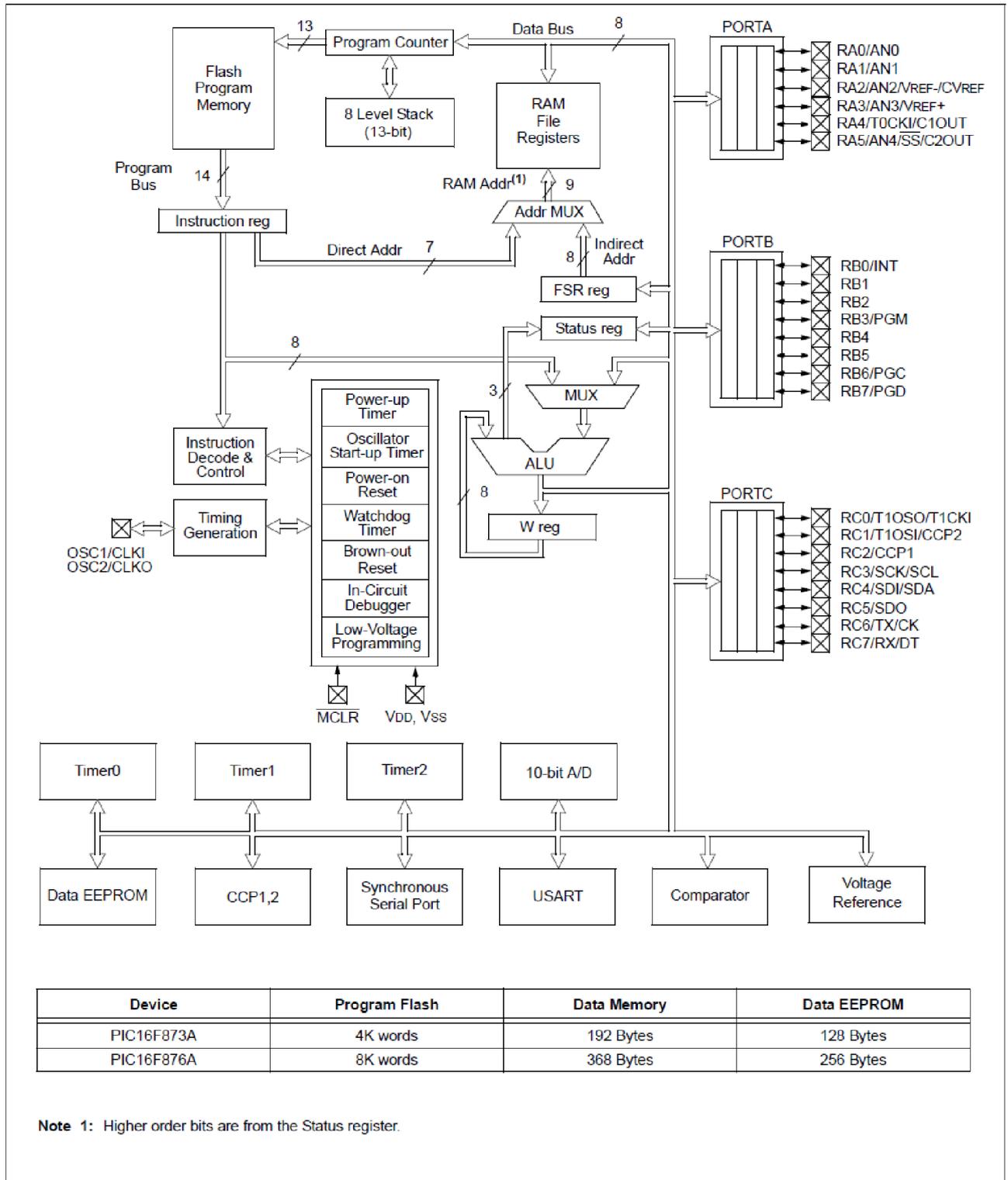
(d) 5.4mm × 4.9mm



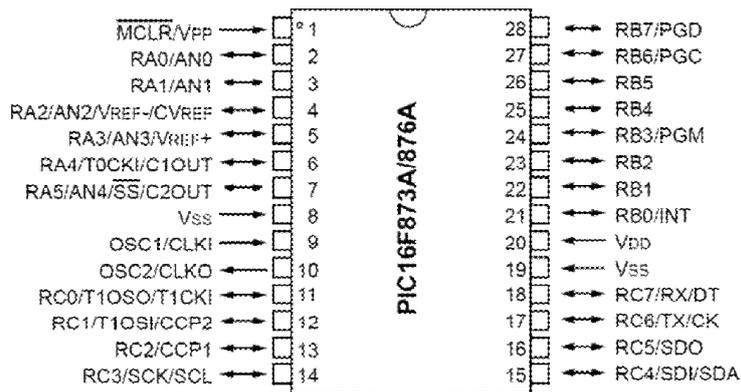
(e) 3mm × 2mm

Les différents circuits bord sous Eagle : (a) support principal (b) adaptateur TFT (c) carte de puissance (d) support l'IMUs (e) support boussole

FIGURE 1-1: PIC16F873A/876A BLOCK DIAGRAM



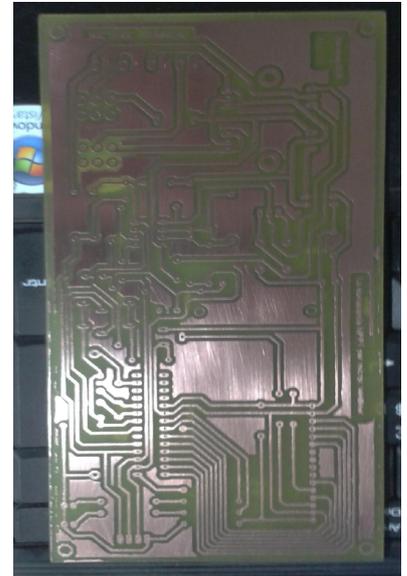
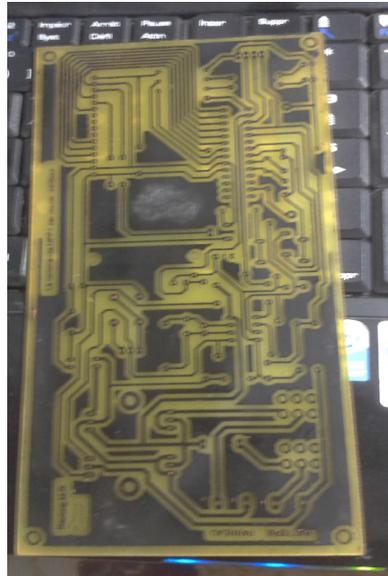
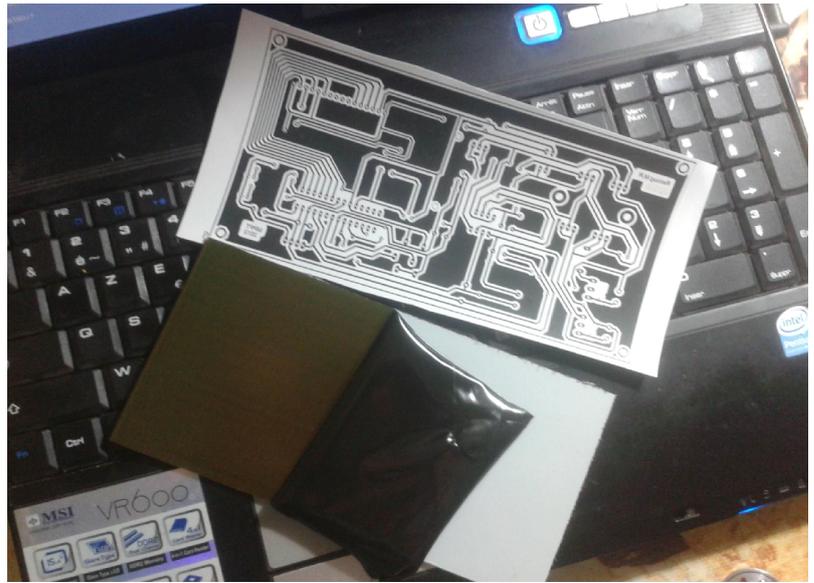
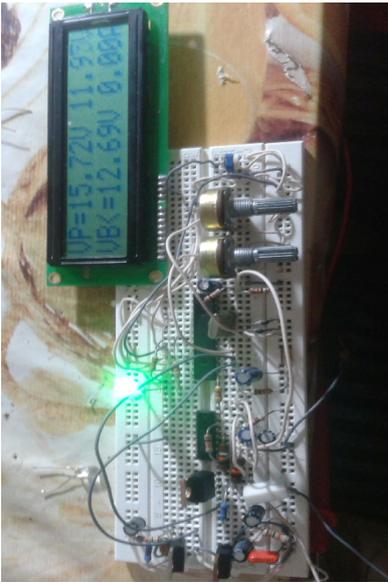
Architecture interne du PIC16F876a



Boîtier PIC18F2550

Caractéristiques du 16F876a

- Fonctionne à 20 Mhz maximum.
- 35 instructions (composant RISC).
- 8Ko de mémoire Flash pour le programme.
- 368 octets de RAM.
- 256 octets de d'EEProm
- 2 compteurs/ timers de 8 bits (timer0 et timer2)
- 1 compteurs/ timers de 16 bits (timer1)
- 1 Watchdog
- 13 sources d'interruption
- 22 entrées/sorties configurables individuellement, dont 5 analogiques, Mode SLEEP.
- 2 comparateurs(+ 1 generateur de Vref pour la version 16F876A)
- possibilité de debugage ou de bootloader



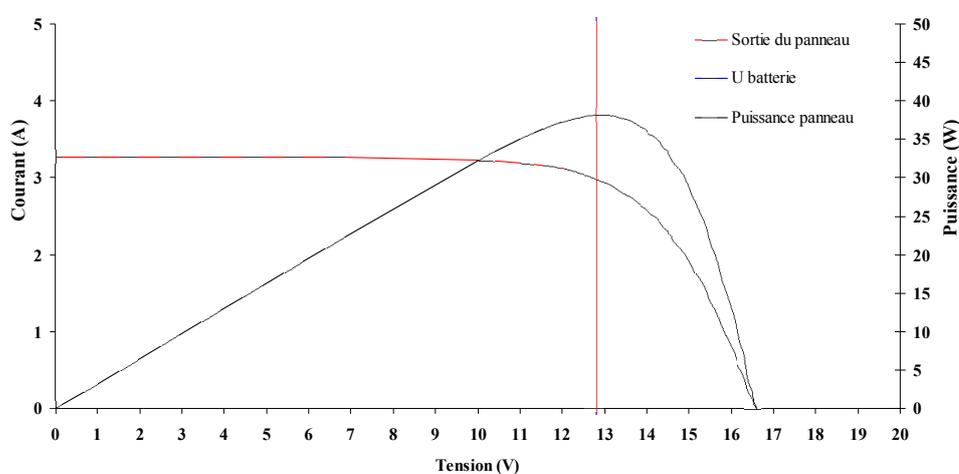
Les phases de la réalisation du circuit imprimé de la carte réalisée pour le montage back qui se base à sa commande sur le principe de la modulation de largeur d'impulsion «MLI» chapitre V

Tension de batterie (V)	Puissance transmise (W)				
	Connexion directe du panneau sur la batterie	Avec MPPT			
		Sans influence de la Température		Avec influence de la Température	
		Sans convertisseur	Avec convertisseur	Sans convertisseur	Avec convertisseur
10	/	31,4	33,4	32,2	34,1
10.1	/	31,7	33,7	32,6	34,4
10.2	/	32	34	32,7	34,7
10.3	/	32,3	34,4	33,2	35
10.4	/	32,7	34,7	33,4	35,3
10.5	/	33	35	33,7	35,6
10.6	/	33,3	35,3	34	35,8
10.7	/	33,6	35,6	34,3	36
10.8	34.5	33,9	35,9	34,5	36,3
10.9	34.8	34,2	36,3	34,8	36,5
11	35.1	34,5	36,6	35,1	36,8
11.1	35.4	34,8	36,9	35,4	37
11.2	35.6	35,1	37,2	35,6	37,2
11.3	35.9	35,4	37,5	35,9	37,4
11.4	36.1	35,7	37,8	36,1	37,6
11.5	36.3	36	38,2	36,3	37,7
11.6	36.5	36,3	38,5	36,6	37,8
11.7	36.8	36,5	38,8	36,8	37,9
11.8	37	36,9	39,1	37	38
11.9	37.2	37,2	39,4	37,2	38,1
12.0	37.4	37,5	39,7	37,4	38,2
12.1	37.5	37,8	40,1	37,5	38,2
12.2	37.7	38,1	40,4	37,7	38,2
12.3	37.8	38,4	40,7	37,8	38,1
12.4	37.9	38,7	41	37,9	38,1
12.5	38	39	41,3	38	37,9
12.6	38.1	39,2	41,6	38,1	37,8
12.7	38.1	39,5	42	38,1	37,6
12.8	38.2	39,8	42,3	38,2	38,2
12.9	38.2	40,1	42,8	38,2	38,2
13	38.2	40,4	42,9	38,2	38,2
13.1	38.1	40,7	43,2	38,1	38,1
13.2	38.1	41	43,5	38,1	38,1
13.3	37.9	41,3	43,9	37,9	37,9
13.4	37.8	41,6	44,2	37,8	37,8
13.5	37.6	41,9	44,4	37,6	37,6
13.6	37.5	42,2	44,7	37,5	37,5
13.7	37.2	42,5	45	37,2	37,2
13.8	36.8	42,8	45,2	36,8	36,8
13.9	36.5	43,1	45,5	36,5	36,5
14	36.1	43,4	45,8	36,1	36,1
14.1	35.6	43,7	46	35,6	35,6

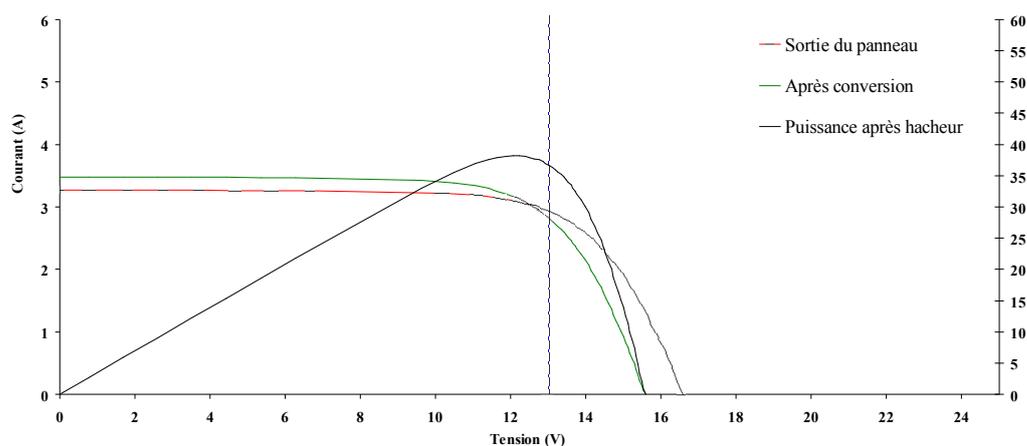
14,2	35.2	44	46,4	35,2	35,2
14,3	34.6	44,3	46,5	34,6	34,6
14,4	33.8	44,5	46,7	33,8	33,8
14,5	33.2	44,8	46,9	33,2	33,2
14,6	32.4	45	47,1	32,4	32,4
14,7	31.5	45,3	47,3	31,5	31,5
14,8	30.7	45,5	47,5	30,7	30,7
14,9	29.8	45,8	47,7	29,8	29,8
15	28.7	46	47,8	28,7	28,7

Tableau de la variabilité de la puissance

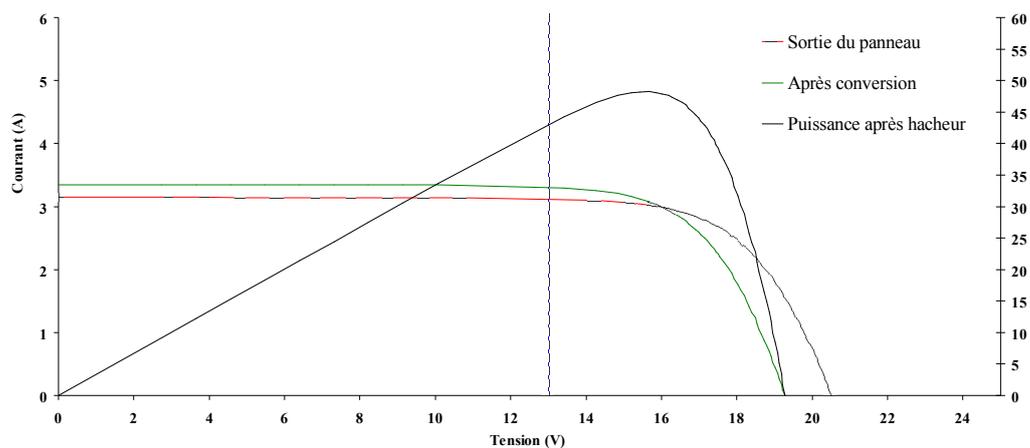
Ces mesures ont été prises avec un rapport de transformation égale à 0.94.



Caractéristique tension et puissance en fonction du courant (Connexion directe du panneau sur la batterie, sans convertisseur adaptateur)



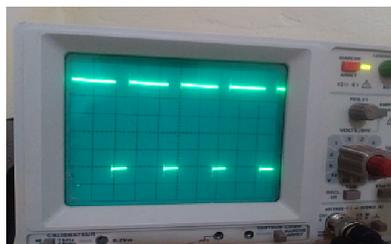
Caractéristique tension et puissance en fonction du courant sans l'influence de la température avec MPPT



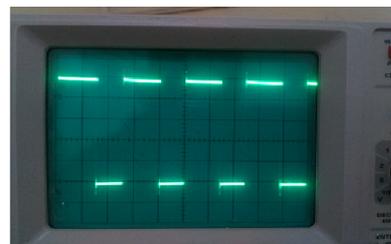
Caractéristique tension et puissance en fonction du courant sous l'influence de la température avec MPPT



D=80%



D=90%



D=50%

Quelques valeurs du rapport cyclique D sur oscilloscope généré par le dispositif

5V/div axe y et 1ms / div axe x : avec une multiplication de 10x comme échelle.

Identification des publications :

Intitulé de la Revue: American Journal of Applied Sciences
 ISSN/EISSN: ISSN: 1546-9239 (Print) / ISSN: 1554-3641 (Online)
 Url de la revue / article: <http://thescipub.com/journals/ajas/> / <http://thescipub.com/abstract/10.3844/ofsp.11966>
 Catégorisation de la revue : catégorie (A), H index 32
 Pérennité de la revue : depuis 2004
 Rezoug Mohamed Redha and Chenni Rachid
 A Real-Time Optimization Approach to the Efficiency of a Photovoltaic System by a Hybrid Tracking Technique using LabVIEW
 American Journal of Applied Sciences, Vol. 15, 2018, no. 5, 267-277
 DOI: <https://10.3844/ajassp.2018.267.277>

Intitulé de la Revue: Contemporary Engineering Sciences
 ISSN/EISSN: ISSN: 1313-6569 (Print) / ISSN: 1314-7641 (Online)
 Url de la revue / article: <http://www.m-hikari.com/> / <http://www.m-hikari.com/ces/ces2018/ces21-24-2018/8237.html>
 Catégorisation de la revue : catégorie (A), H index 8, Impact Factor : 0,258
 Pérennité de la revue : depuis 2008
 M R Rezoug, Rachid Chenni, Djamel Taibi
 Study and analysis of anti-islanding protection for grid-connected photovoltaic central of Ghardaia
 Contemporary Engineering Sciences, Vol. 11, 2018, no. 22, 1069-1084
 DOI: <https://doi.org/10.12988/ces.2018.8237>

Intitulé de la Revue: International Journal of Engineering Sciences & Research Technology
 ISSN/EISSN: ISSN: 2277-9655 (Online)
 Url de la revue / article: <http://www.ijesrt.com/> / <https://zenodo.org/record/1207029#.WwBo0dR97Dc>
 Catégorisation de la revue : catégorie (A), M index, Impact Factor : 5.164
 Pérennité de la revue : depuis 2012
 Rezoug* et al.
 The optimal angles of a dual-axis tracking system by preprogrammed method using a microcontroller
 INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES & RESEARCH TECHNOLOGY, 7(3), March, 2018, 710-726.
 DOI: [10.5281/zenodo.1207029](https://doi.org/10.5281/zenodo.1207029)

Intitulé de la Revue: Energies
 ISSN/EISSN: ISSN: 1996-1073 (Print) / ISSN: 1996-1073 (Online)
 Url de la revue / article: <http://www.mdpi.com/journal/energies/> / <http://www.mdpi.com/1996-1073/11/2/462>
 Catégorisation de la revue : catégorie (A), H index 48, Impact Factor : 2.262
 Pérennité de la revue : depuis 2008
 Mohamed Redha Rezoug^{1,*}, Rachid Chenni² and Djamel Taibi¹
 Fuzzy Logic-Based Perturb and Observe Algorithm with Variable Step of a Reference Voltage for Solar Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System Fed by Direct-Connected Photovoltaic Array
 Energies 2018, 11, 462.
<https://doi.org/10.3390/en11020462>

Intitulé de la Revue: AIP Conference Proceedings
 ISSN/EISSN: ISSN: 0094-243X (Online)
 Url de la revue / article: <https://aip.scitation.org/> / <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4976252>
 Catégorisation de la revue : catégorie (A), H index 47, Impact Factor : 1.568
 Pérennité de la revue : depuis 1983
 M. R. Rezoug^{1,a)} and R. Chenni^{2,b)}
 Performance optimization of a photovoltaic chain conversion by the PWM control
 AIP Conference Proceedings 1814, 020033 (2017)
<https://doi.org/10.1063/1.4976252>

Intitulé de la Revue: AIP Conference Proceedings
 ISSN/EISSN: ISSN: 0094-243X (Online)
 Url de la revue / article: <https://aip.scitation.org/> / <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4959442>
 Catégorisation de la revue : catégorie (A), H index 47, Impact Factor : 1.568
 Pérennité de la revue : depuis 1983
 M. R. Rezoug^{1, a)} and A. Krama^{2, b)}
 Control device for automatic orientation of a solar panel based on a microcontroller (PIC16f628a)
 AIP Conference Proceedings 1758, 030046 (2016);
<https://doi.org/10.1063/1.4959442>

Intitulé de la Revue: Revue des Energies Renouvelables
 ISSN/EISSN: ISSN: 1112-2242 (Online)
 Url de la revue / article: <https://www.cder.dz/vlib/revue.php> / https://www.cder.dz/vlib/revue/pdf/v014_n1_texte_14.pdf
 Catégorisation de la revue : B

Pérennité de la revue : depuis 1979

M.R. Rezoug et al.

Calcul de la durée optimale d'activité d'un module photovoltaïque en fonction de l'endroit

Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°1 (2011) 163 – 169

https://www.cder.dz/vlib/revue/pdf/v014_n1_texte_14.pdf

Intitulé de la Revue: Revue des Energies Renouvelables

ISSN/EISSN: ISSN: ISSN: 1112-2242 (Online)

Url de la revue / article: <https://www.cder.dz/vlib/revue.php/> https://www.cder.dz/vlib/revue/pdf/v012_n2_texte_12.pdf

Catégorisation de la revue : B

Pérennité de la revue : depuis 1979

M.R. Rezoug et al.

Optimisation du rendement d'un système photovoltaïque par poursuite du soleil

Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°2 (2009) 299 – 306

https://www.cder.dz/vlib/revue/pdf/v012_n2_texte_12.pdf

Intitulé de la Revue: conférence internationale

Url de la revue / article: www.univ-bejaia.dz

M.R. Rezoug et al.

Dispositif de commande et orientation automatique d'un panneau solaire basé sur un microcontrôleur (PIC16f84a)

CONFERENCE INTERNATIONALE SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES ICER'07, Bejaïa, les 25,26 et 27 novembre 2007



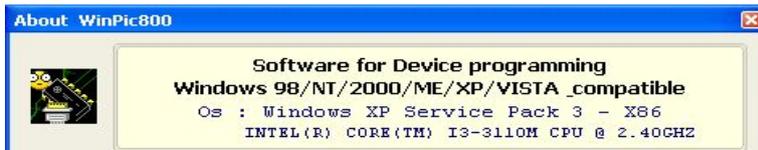
SolidWorks

Pour le design d'articulation en 3D.



MikroC

Pour la programmation des microcontrôleurs 16F876a et 18f2550.



WinPic800

Pour l'injection de code hexadécimal vers les microcontrôleurs.



EAGLE

Pour schématiser les circuits imprimés.



ISIS Proteus

Pour effectuer la réalisation virtuelle de nos cartes électriques.



ARDUINO IDE

Pour programmer la carte Arduino Mega.



LabVIEW

Pour programmer la carte Arduino Mega et créer l'interface graphique.



Delphi

Pour créer l'interface graphique.



MATLAB

Pour afficher les résultats de simulation.



PC

Les caractéristiques de l'ordinateur sur lequel ces logiciels et ces environnements de programmations sont installés ainsi que le type du système d'exploitation gérant.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] <https://www.algerie-eco.com>.
- [2] Ibid.; Zheng Xin, « Sinopec to harvest more heat from earth », China Daily, 15 February 2017, http://europe.chinadaily.com.cn/business/2017-02/15/content_28202201.htm.
- [3] « Malaysia' first geothermal power plant to open in Tawau », The Star, 8 August 2016, <http://www.thestar.com.my/metro/community/2016/08/08/steaming-up-some-extra-energymalaysias-first-geothermal-power-plant-to-open-in-tawau/>; Eric Bagang, « Sabah home to Malaysia' s first geothermal power plant » New Sabah Times, 6 August 2016, <http://www.newsabahtimes.com.my/nstweb/fullstory/8452>.
- [4] Linda Archibald, « M'sia boldly explores geothermal », The Malaysian Reserve, 14 October 2016, <http://themalaysianreserve.com/new/story/m%E2%80%99sia-boldly-explores-geothermal>.
- [5] Mannvit, « Velika Ciglena geothermal power plant contract », press release (Kopavogur, Iceland: 23 December 2015), <http://www.mannvit.com/news/velika-ciglena-geothermalpower-plant-contract>; Joseph Bonafin, Turboden, « The Velika Ciglena Geothermal Project – Turboden 16 MW Binary Plant », presentation at the Iceland Geothermal Conference, Reykjavik, 28 April 2016, http://www.geothermalconference.is/files/presentations/joseph-bonafin---igc-2016_atti.pdf
- [6] REPORT CITATION REN21. 2017. Renewables 2017 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat). ISBN 978-3-9818107-6-9.
- [7] IFC, op. cit. note 8, p. 33. GOGLA, op. cit. note 23.
- [8] Most recent data are from 2014. International Energy Agency (IEA), « Chapter 2 Extract: Energy Access », in World Energy Outlook 2016 (Paris: 2016), pp. 92-93, http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/energymodel/documentation/WEO2016_Chapter02_acces.pdf.
- [9] Cedric Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion » Thèse de Doctorat, LAAS - Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes [Toulouse], décembre 2008.
- [10] Angel Cid Pastor « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », Thèse de Doctorat, L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE TOULOUSE, 29 septembre 2006.
- [11] Rémi Laronde, « Fiabilité et durabilité d'un système complexe dédié aux énergies renouvelables Application a un système photovoltaïque ». Thèse de Doctorat, ECOLE DOCTORALE SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET MATHEMATIQUES, Le 30 septembre 2011.
- [12] Yaël Thiaux, « Optimisation des profils de consommation pour minimiser les coûts économique et énergétique sur cycle de vie des systèmes photovoltaïques autonomes et hybrides. Evaluation du potentiel de la technologie Li-ion », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure de Cachan, juillet 2010.
- [13] Brahim Moudjed, « Caractérisation expérimentale et théorique des écoulements entraînés par ultrasons. Perspectives d'utilisation dans les procédés de solidification du Silicium Photovoltaïque ». Thèse de Doctorat, MECANIQUE DES FLUIDES, ÉCOLE DOCTORALE : MECANIQUE - ENERGETIQUE - GENIE CIVIL – ACOUSTIQUE. Le 02 décembre 2013.
- [14] Stéphane Vighetti, Yves Lembeye, Jean-Paul Ferrieux, Jean Barbaroux, « Module photovoltaïque et ombrages : étude et intégration d'une structure d'équilibrage ». EPF 2010, Saint-Nazaire, France, 2010.
- [15] F Lasnier, T.G Ang, « Photovoltaic Engineering Handbook », IOP Publishing Ltd. 1980. ISBN 0-85274-311-4.

- [16] Lagrange D, Cid A, Marcoul P, Medale D, Rastoul J.L and Alonso, C. « Système de mesure pour le banc de test solaire », LAAS-CNRS report Num. 03215, 24p, Mai 2003 (in French).
- [17] Hristiyan Kanchev, « Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable : Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain » Thèse de Doctorat. L'ECOLE CENTRALE DE LILLE ET L'UNIVERSITE TECHNIQUE DE SOFIA, le 24 janvier 2014.
- [18] H.E DEMNI, « Conception en génie électrique à l'aide d'éléments caractérisés », Thèse de doctorat en Génie Electrique, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE (INPT, France), octobre 2004.
- [19] Alice Defresne, « Amélioration de la passivation de cellules solaires de silicium à hétérojonction grâce à l'implantation ionique et aux recuits thermiques », Thèse de Doctorat, UNIVERSITE PARIS-SACLAY PREPAREE A L'UNIVERSITE PARIS-SUD, le 7 décembre 2016.
- [20] Tahar Tafticht, « Analyse et Commande d'un Système Hybride Photovoltaïque Eolien », Thèse de Doctorat, L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES, décembre 2006.
- [21] Peng Li, « Formalisme pour la Supervision des Systèmes Hybrides Multi-Sources de Générateurs d'Energie Répartie : Application à la Gestion d'un Micro Réseau », Thèse de Doctorat, ECOLE CENTRALE DE LILLE, le 19 juin 2009.
- [22] Clarence Semassou, « Aide a la Decision pour le Choix de Sites et Systemes Energetiques Adaptes aux Besoins du Benin », Thèse de Doctorat, L'UNIVERSITE BORDEAUX 1, le 15 décembre 2011.
- [23] Rezoug M.R, Chenni R, «The Optimal Angles of a Dual-Axis Tracking System by Pre-programmed Method Using a Microcontroller», INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES & RESEARCH TECHNOLOGY, 7(3), 710-726, March, 2018.
- [24] Erees Q.B Macabebe and E. Ernest van Dyk, «Parameter extraction from dark current–voltage characteristics of solar cells», South African Journal of Science 104, September/October 2008.
- [25] D Ciobanu and C Jaliu, «Step tracking program for concentrator solar collectors», 7th International Conference on Advanced Concepts in Mechanical Engineering, Series: Materials Science and Engineering 147 (2016) 012149.
- [26] Nelson A.Kelly, Thomas L.Gibson, «Increasing the solar photovoltaic energy capture on sunny and cloudy days», Solar Energy, 85 (2011) 111–125.
- [27] Arslan A.Rizvi, Khaled Addoweesh, Abdelrehman El-Leathy, Hany Al-Ansary, «Sun Position Algorithm for Sun Tracking Applications», Industrial Electronics Society, IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE, 26 February 2015.
- [28] Mahinda Vilathgamuwa, Dulika Nayanasingi, Shantha Gamini, «Power Electronics for Photovoltaic Power Systems», MORGAN&CLAYPOOL PUBLISHERSPUBLISHERS, Series Editor: Jerry Hudgins, University of Nebraska-Lincoln.
- [29] I Reda and A Andreas, «Solar position algorithm for solar radiation applications», Solar energy, vol. 76, pp. 577-589, 2004.
- [30] Y Rizal, S.H Wibowo, and Feriyadi, «Application of Solar Position Algorithm for Sun-Tracking System», Energy Procedia, vol. 32, pp. 160-165, 2013.
- [31] F Spertino, J Ahmad, A Ciocia, P. Di Leo, «Techniques and Experimental Results for Performance Analysis of Photovoltaic Modules Installed in Buildings», Energy Procedia 111 (2017) 944 – 953.
- [32] http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html
- [33] R Grena, «Five new algorithms for the computation of sun position from 2010 to 2110», Solar Energy, vol. 86, pp. 1323-1337, 5 2012.

- [34] K.K Chong, C.W. Wong, F.L Siaw, T.K Yew, S.S Ng, M.S Liang, et al., «Integration of an On-Axis General Sun-Tracking Formula in the Algorithm of an Open-Loop Sun-Tracking System», *Sensors*, vol. 9, pp. 7849-7865, 2009.
- [35] Muhammad Jamilu Ya'u, «A Review on Solar Tracking Systems and Their Classifications», *Journal of Energy, Environmental & Chemical Engineering* 2017; 2(3): 46-50.
- [36] Abdulrahim A.T, Diso I.S and Abdulraheem A.S, «Design Analysis of Solar Bi-focal Collector», *Journal of Mechanical Engineering Research*, 4 (4): 136-141, (2012).
- [37] Abdallah S, Nijmeh S, «Two axes sun tracking system with PLC control». *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, No. 11-12, (July 2004):1931-1939.
- [38] Bipin Krishna, Kaustav sinha, «Tracking of Sun for Solar Panels and Real Time Monitoring Using LabVIEW», *Journal of Automation and Control Engineering* Vol. 1, No. 4, December 2013.
- [39] Rustu Eke, Ali Senturk, «Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV system», *Solar Energy* 86 (2012) 2665–2672.
- [40] M.R Rezoug et al, «Optimisation du rendement d'un système photovoltaïque par poursuite du soleil», *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 12 N°2 (2009) 299 – 306.
- [41] C Alexandru, I.N Tatu, «Optimal Design of the Solar Tracker Used for a Photovoltaic String», *Journal of Renewable and Sustainable Energy* , vol. 5, pp. 1-16, 2013.
- [42] T.C Cheng, W.C Hung, and T.H Fang, «Two-Axis Solar Heat Collection Tracker System for Solar Thermal Applications», *International Journal of Photoenergy*, vol.2013, October. 2013.
- [43] V Radu, L Mihai, «Torques on Rotational Axes of PV Azimuthal Sun Tracking Systems», *Springer Proceedings in Energy*, vol.10, pp. 461-470, 2014.
- [44] <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC18F2550>.
- [45] <http://www.microchip.com/search/searchapp/searchhome.aspx?id=2&q=ide>.
- [46] <http://www.elektronique.fr/logiciels/proteus.php>.
- [47] I Sefa, M Demitras and I Colak, «Application of One-Axis Sun Tracking System», *Energy conversion and Management*, vol.50, pp. 2709-2718, 2009.
- [48] B.J Huang, F.S Sun, «Feasibility Study of One Axis Three Position Tracking Solar PV With a Low Concentration Ratio Reflector», *Energy Conversion and management*, Vol.48, no 4, pp. 1273-1280, 2007.
- [49] S Fabienne, G Alberto, T José-Luis and P Ramón, «Optical Losses Due to Tracking Error Estimation for a Low Concentrating Solar Collector», *Energy Conversion and Management*, vol.92, pp. 194-206, 2015.
- [50] R Yougeshwarsingh, O Vishwamitra, «Improving the Dual Axis Solar Tracking System Efficiency via Drive Power Consumption Optimization», *Applied Solar Energy*, vol.50, pp. 74-80, 2014.
- [51] Y Saban, R Hasan, D Osman, D Furkan, A Oguzhan and K Muharrem, «Design of Two Axes Sun Tracking Controller With Analytically Solar Radiation Calculations», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.43, pp. 997-1005, 2015.
- [52] M.R Rezoug and A Krama, «Control device for automatic orientation of a solar panel based on a microcontroller (PIC16f628a) », *AIP Conference Proceedings* 1758, 030046 (2016).
- [53] <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATMEGA2560>.
- [54] Haiyang Chao, Calvin Coopmans, Long Di, YangQuan Chen, «A comparative evaluation of low-cost IMUs for Unmanned Autonomous Systems», *Conference: Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, 2010 IEEE.
- [55] [https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_\(GPS.G6-HW-09005\).pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_(GPS.G6-HW-09005).pdf).
- [56] «Calculation of Azimuth, Elevation and Polarization for non-horizontal aligned Antennas Algorithm Description», *Technical Document TD-1205-a*, Version 2.2, 08.07.2015 (with update in page 8 of 06.09.2016).

- [57] <http://ai2.appinventor.mit.edu/>.
- [58] <https://www.autodesk.com/products/eagle/overview>.
- [59] M.R. Rezoug, and R Chenni, «Performance optimization of a photovoltaic chain conversion by the PWM control», AIP Conference Proceedings 1814, 020033 (2017).
- [60] C Cabal, C Alonso, Cid-Pastor A, Estibals B, Segulier, Leyva R, Schweitz G, and Alzieu J, «Adaptive digital MPPT control for photovoltaic applications», Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on, Jun, 2007, pp. 2414-2419.
- [61] T.Y Kim, H.G Ahn, S.K Park, and Y.K Lee, «A novel maximum power point tracking control for photovoltaic power system under rapidly changing solar radiation», International Symposium on Industrial Electronics Proceedings, IEEE. ISIE 2001. Volume 2, 12-16, Jun, 2001 pp. 1011-1014.
- [62] T Noguchi, S Togashi, and R Nakamoto, «Short-current Pulse-based Maximum-Power-Point Tracking Method for Multiple Photovoltaic-and-Converter Module System», IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol. 49. No 1, Feb, 2002, pp. 217 – 223.
- [63] M. A. S Masoum, H Dehbonei and E.F Fuchs, «Theoretical and experimental analyses of photovoltaic systems with voltage-and current-based maximum power-point tracking», IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 17, No. 4, Dec, 2002. pp. 514-522.
- [64] K Kobayashi, H Matsuo, and Y Sekine, «An Excellent operating point tracker of the solar-cell power supply system», IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol. 53, No. 2, Apr, 2006. pp. 495-499.
- [65] N Gokmen, E Karatepe, F Ugranli, and S Silvestre, «Voltage band based global MPPT controller for photovoltaic systems», Solar Energy 98, 2013, pp. 322-334.
- [66] C. R. Sullivan, and P. J. Powers, «A high efficiency maximum power point tracker for photovoltaic arrays in a solar-powered race vehicle», 24th annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1993, PESC'93 Record, 20-24, Jun, 1993, pp 574-580.
- [67] D Shmilovitz, «On the control of photovoltaic maximum power point tracker via output parameters», IEE Proceedings Electric Power Applications, Vol. 152, No. 2, Mar, 2005, pp. 239-248.
- [68] R Leyva, I Queinnec, C Alonso, Cid-Pastor A, Lagrange D, and Martinez-Salamero L, «MPPT of photovoltaic systems using extremum seeking control», IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 42, No, 1, Jan, 2006, pp. 249-258.
- [69] M Sarvi, and I Soltani, «Voltage and Current Based MPPT of Fuel Cells for Fuel Consumption Optimization and Mismatching Compensation», TSEST Transaction on Electrical and Electronic Circuits and Systems, Vol. 3(4), Jul, 2013, pp. 17-21.
- [70] Mohamed Redha Rezoug, Rachid Chenni and Djamel Taibi, «Fuzzy Logic-Based Perturb and Observe Algorithm with Variable Step of a Reference Voltage for Solar Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System Fed by Direct-Connected Photovoltaic Array», Energies 2018, 11, 462.
- [71] Cabal C , Alonso C, Cid-Pastor A, Estibals B, Segulier L, Leyva R, Schweitz G, Alzieu J, «Adaptive digital MPPT control for photovoltaic applications», In proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vigo, Spain, 4–7 June 2007; pp. 2414–2419.
- [72] Liu X, Lopes L.A, «An improved perturbation and observation maximum power point tracking algorithm for PV arrays», In Proceedings of the 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 20–25 June 2004; pp. 2005–2010.
- [73] Emilio M, Giovanni P, Giovanni S, «Two-steps algorithm improving the P&O steady state MPPT efficiency», Appl. Energy 2014, 113, 414–421, doi:10.1016/j.apenergy.2013.07.022.

- [74] Piegari L, Rizzo R, Spina I, Tricoli P, «Optimized Adaptive Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Control for Photovoltaic Generation», *Energies* 2015, 8, 3418–3436, doi:10.3390/en8053418.
- [75] Sahin, A.Z, Rehman S, «Economical Feasibility of Utilizing Photovoltaics for Water Pumping in Saudi Arabia», *Int. J. Photoenergy* 2012, 2012, 9, doi:10.1155/2012/542416.
- [76] Walker, G. Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model. *J. Electr. Electron. Eng.* 2001, 21, 49–56.
- [77] Tan C.W, Green T.C, Hernandez-Aramburo C.A, «Analysis of perturb and observe maximum power point tracking algorithm for photovoltaic applications», In *Proceedings of the IEEE 2nd International Power and Energy Conference, Johor Bahru, Malaysia, 1–3 December 2008*.
- [78] Wang Q.G,Zhang, Z, Astrom K.J, Cheka L.S, «Guaranteed dominant pole placement with PID controllers» *J. Process Control* 2009, 19, 349–352.
- [79] Hohm D, Ropp M.E, «Comparative study of maximum power point tracking algorithms. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 2003, 11, 47–62.
- [80] Musa S, Mohd-Radzi M.A, Hizam H, Abdul-Wahab N.I, Hoon Y, Mohd-Zainuri M.A.A, «Modified synchronous reference frame based shunt active power filter with fuzzy logic control pulse width modulation inverter», *Energies* 2017, 10.
- [81] Benlarbi K, Mokrani L, Nait-Said M.S, «A fuzzy global efficiency optimization of a photovoltaic water pumping system», *Solar Energy* 2004, 77, 203–216, doi:10.1016/j.solener.2004.03.025.

Résumé

Le coût des installations photovoltaïques est considéré comme le plus élevé parmi ceux des autres installations d'énergies renouvelables en termes de matières premières ou de matériels. Mais l'utilisation des systèmes solaires restent favorables dus à la facilité de leur installation et leur adaptation à n'importe quelle surface ; ce qui a mis les chercheurs à travailler sur l'optimisation de tout ce qui concerne ces systèmes photovoltaïques. Dans cette thèse, nous avons étudié l'optimisation sur trois cadres : le premier concerne l'optimisation par poursuite en s'appuyant sur une articulation à deux axes commandés par une technique hybride avancée qui englobe deux grandes catégories (la poursuite préprogrammée et sensorielle). La carte Arduino Méga a été considérée comme le noyau de notre dispositif et manipulée n'importe quelle action rentrant dans la correction de l'écart angulaire dû au déplacement du soleil. Cela en collaboration avec des capteurs sensoriels de haute gamme : les IMUs à double repères, les Smartphones, etc. Le deuxième est de réaliser un dispositif qui rentre dans l'optimisation au niveau d'une chaîne photovoltaïque où la charge est une batterie. Elle est basée sur la technique MLI qui contrôle un CS afin d'accéder à tout moment à la puissance optimale désirée. Le troisième est un autre genre d'optimisation où la charge est une pompe immergée et où l'alimentation est composée d'un nombre minimal de panneaux. Cette optimisation est effectuée par un algorithme P&O mais la version conventionnelle de ce dernier, pose un problème de choix des valeurs de pas et de tension de référence, ce qui cause un compromis entre la stabilité en régime permanent et la réponse dynamique. Pour remédier à cela, on ajuste le pas de tension de référence selon l'emplacement du point de puissance maximale à l'aide d'un bloc de contrôleur de logique floue adapté à l'algorithme P&O. La simulation de cette optimisation a été réalisée sous MATLAB / SimPowerSystems.

Abstract

The cost of photovoltaic installations is considered to be the highest among those of other renewable energy installations in terms of raw materials or materials. However, the use of solar systems remains favorable due to the ease of their installation and their adaptation to any surface; which has put researchers to work on the optimization of everything revolving around photovoltaic systems. In this thesis, we studied optimization on three frameworks: the first concerns an optimization by tracking based on a two-axis articulation controlled by an advanced hybrid technique that encloses two major categories (pre-programmed and sensory tracking). The Arduino Mega board was considered as the core of our device and manipulated any action in the correction of the angular deviation due to the displacement of the sun. This in collaboration with high technology sensors: dual three dimension axis IMUs, Smartphones, etc. The second is to realize a device that contributes in the optimization of a photovoltaic chain where the load is a battery. It is based on the PWM technique that controls a SC in order to access at any time the desired optimal power. The third is another type of optimization where the load is a submerged pump and the power supply is composed of a minimum number of panels. This optimization is performed by a P&O algorithm; but, the conventional version of the latter poses a problem of choice when it comes to the values of the step size and the reference voltage which causes a compromise between the stability in the steady-state and the dynamic response. To remedy that, the reference voltage step is adjusted according to the location of the maximum power point using a fuzzy logic controller block adapted to the P&O algorithm. The simulation of this optimization was performed under MATLAB / SimPowerSystems.

ملخص

تعتبر تكلفة المنشآت الكهروضوئية هي الأعلى بين منشآت الطاقة المتجددة الأخرى من حيث المواد الخام أو المواد الأولية. لكن استخدام الأنظمة الكهروضوئية لا يزال مفضلاً نظراً لسهولة تركيبها وتكيفها مع أي سطح. مما جعل الباحثين يعملون على تحسين كل ما يتعلق بهذه الأنظمة. في هذه الأطروحة، لقد قمنا بدراسة تحسينية الاستفادة المثلى من الجهد الأقصى في ثلاثة مجالات : يتعلق الأمر الأول بالتحسين في تعقب حركة الشمس استناداً إلى مفصلين ممتحورين على معلم ثنائي البعد يتحكم فيهما تقنية هجينة متقدمة تشتمل على فئتين رئيسيتين (التتبع بالبرمجة المسبقة والتتبع الحسي). يعتبر لوحة Arduino Mega جوهر الجهاز لدينا، تسيير أي إجراء يدخل في تصحيح الانحراف الزاوي الناتج عن حركة الشمس وهذا بالتعاون مع أجهزة الاستشعار الحسية المتطورة: وحدات IMU ذات معالم مزدوجة ، والهواتف الذكية ، إلخ. والثاني هو صناعة جهاز الذي يدخل في التحسين في مستوى سلسلة النظام كهر وضوئي حيث تمثل البطارية المستهلك الطاقة الناتج عن نظام كهروضوئي . يعتمد هذا في التحسين على تقنية PWM التي تتحكم في المبدلات الاستاتيكية من أجل الوصول إلى القوة المثلى المطلوبة في أي وقت. أما النوع الثالث فهو نوع آخر من التحسينات، حيث يكون المستهلك في سلسلة النظام كهر وضوئي هو عبارة عن مضخة مغمورة باستعمال أقل عدد ممكن من الألواح. يتم تنفيذ هذا التحسين بواسطة الخوارزمية P&O ولكن يطرح النسخة التقليدية من هذا الأخير مشكلة عدم اختيار القيم وإشارة الجهد الذي يؤدي إلى حل وسط بين النظام المستقرة والاستجابة الديناميكية. لتصحيح هذا الإشكال، نقوم بتعديل مرجع الجهد اعتماداً على الموقع من نقطة الطاقة القصوى باستخدام تحكم المنطق الضبابي وتكييفه وفقاً لخوارزمية P&O. تم تنفيذ محاكاة هذا التحسين تحت MATLAB/SimPowerSystems.

Résumé

Le coût des installations photovoltaïques est considéré comme le plus élevé parmi ceux des autres installations d'énergies renouvelables en termes de matières premières ou de matériels. Mais l'utilisation des systèmes solaires restent favorables dus à la facilité de leur installation et leur adaptation à n'importe quelle surface ; ce qui a mis les chercheurs à travailler sur l'optimisation de tout ce qui concerne ces systèmes photovoltaïques. Dans cette thèse, nous avons étudié l'optimisation sur trois cadres : le premier concerne l'optimisation par poursuite en s'appuyant sur une articulation à deux axes commandés par une technique hybride avancée qui englobe deux grandes catégories (la poursuite préprogrammée et sensorielle). La carte Arduino Mega a été considérée comme le noyau de notre dispositif et manipulée n'importe quelle action rentrant dans la correction de l'écart angulaire dû au déplacement du soleil. Cela en collaboration avec des capteurs sensoriels de haute gamme : les IMUs à double repères, les Smartphones, etc. Le deuxième est de réaliser un dispositif qui rentre dans l'optimisation au niveau d'une chaîne photovoltaïque où la charge est une batterie. Elle est basée sur la technique MLI qui contrôle un CS afin d'accéder à tout moment à la puissance optimale désirée. Le troisième est un autre genre d'optimisation où la charge est une pompe immergée et où l'alimentation est composée d'un nombre minimal de panneaux. Cette optimisation est effectuée par un algorithme P&O mais la version conventionnelle de ce dernier, pose un problème de choix des valeurs de pas et de tension de référence, ce qui cause un compromis entre la stabilité en régime permanent et la réponse dynamique. Pour remédier à cela, on ajuste le pas de tension de référence selon l'emplacement du point de puissance maximale à l'aide d'un bloc de contrôleur de logique floue adapté à l'algorithme P&O. La simulation de cette optimisation a été réalisée sous MATLAB / SimPowerSystems.

Abstract

The cost of photovoltaic installations is considered to be the highest among those of other renewable energy installations in terms of raw materials or materials. However, the use of solar systems remains favorable due to the ease of their installation and their adaptation to any surface; which has put researchers to work on the optimization of everything revolving around photovoltaic systems. In this thesis, we studied optimization on three frameworks: the first concerns an optimization by tracking based on a two-axis articulation controlled by an advanced hybrid technique that encloses two major categories (pre-programmed and sensory tracking). The Arduino Mega board was considered as the core of our device and manipulated any action in the correction of the angular deviation due to the displacement of the sun. This in collaboration with high technology sensors: dual three dimension axis IMUs, Smartphones, etc. The second is to realize a device that contributes in the optimization of a photovoltaic chain where the load is a battery. It is based on the PWM technique that controls a SC in order to access at any time the desired optimal power. The third is another type of optimization where the load is a submerged pump and the power supply is composed of a minimum number of panels. This optimization is performed by a P&O algorithm; but, the conventional version of the latter poses a problem of choice when it comes to the values of the step size and the reference voltage which causes a compromise between the stability in the steady-state and the dynamic response. To remedy that, the reference voltage step is adjusted according to the location of the maximum power point using a fuzzy logic controller block adapted to the P&O algorithm. The simulation of this optimization was performed under MATLAB / SimPowerSystems.

ملخص

تعتبر تكلفة المنشآت الكهروضوئية هي الأعلى بين منشآت الطاقة المتجددة الأخرى من حيث المواد الخام أو المواد الأولية. لكن استخدام الأنظمة الكهروضوئية لا يزال مفضلاً نظراً لسهولة تركيبها وتكيفها مع أي سطح. مما جعل الباحثين يعملون على تحسين كل ما يتعلق بهذه الأنظمة. في هذه الأطروحة، لقد قمنا بدراسة تحسينية الاستفادة المثلى من الجهد الأقصى في ثلاثة مجالات : يتعلق الأمر الأول بالتحسين في تعقب حركة الشمس استناداً إلى مفصلين متحركين على معلم ثنائي البعد يتحكم فيهما تقنية هجينة متقدمة تشتمل على فئتين رئيسيتين (التتبع بالبرمجة المسبقة والتتبع الحسي). يعتبر لوحة Arduino Mega جوهر الجهاز لدينا، تسير أي إجراء يدخل في تصحيح الانحراف الزاوي الناتج عن حركة الشمس وهذا بالتعاون مع أجهزة الاستشعار الحسية المتطورة: وحدات IMU ذات معالم مزدوجة ، والهواتف الذكية ، إلخ. والثاني هو صناعة جهاز الذي يدخل في التحسين في مستوى سلسلة النظام كهر وضوئي حيث تمثل البطارية المستهلك الطاقة الناتج عن نظام كهروضوئي . يعتمد هذا في التحسين على تقنية PWM التي تتحكم في المبدلات الاستاتيكية من أجل الوصول إلى القوة المثلى المطلوبة في أي وقت. أما النوع الثالث فهو نوع آخر من التحسينات، حيث يكون المستهلك في سلسلة النظام كهر وضوئي هو عبارة عن مضخة مغمورة باستعمال أقل عدد ممكن من الألواح. يتم تنفيذ هذا التحسين بواسطة الخوارزمية P&O ولكن يطرح النسخة التقليدية من هذا الأخير مشكلة عدم اختيار القيم وإشارة الجهد الذي يؤدي إلى حل وسط بين النظام المستقرة والاستجابة الديناميكية. لتصحيح هذا الإشكال، نقوم بتعديل مرجع الجهد اعتماداً على الموقع من نقطة الطاقة القصوى باستخدام تحكم المنطق الضبابي وتكييفه وفقاً لخوارزمية P&O. تم تنفيذ محاكاة هذا التحسين تحت MATLAB/SimPowerSystems.