

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des sciences et de la Technologie
Département d'Electronique et Télécommunications



Mémoire de fin d'études
pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Domaine : **Sciences et Technologie**
Filière : **Electronique**
Spécialité : **Instrumentation**

Conception et Etude d'une Carte Programmable pour la
Commande d'un Tracker Solaire

Présenté par :

ROUABHIA Chafia

OUMADDOUR Naouel

Sous la direction de :

Abdelaziz YOUNSI

Juillet 2021

Remerciements

Nous remercions DIEU Le Tout Puissant de nous avoir donné la force et le courage afin d'accomplir ce modeste travail.

Nos plus chaleureux et sincères remerciements vont à notre encadrant Monsieur Abdelaziz YOUNSI, tout d'abord pour nous avoir permis de traiter ce sujet, ensuite pour ses qualités pédagogiques, sa vision scientifique ainsi que la patience qu'il nous a témoignées et qui ont constitué pour nous un stimulus considérable et sans lesquels ce travail n'aurait pu être mené à bon port.

Un remerciement particulier pour sa disponibilité, ses conseils avisés et sa rigueur scientifique.

Nous remercions chaleureusement les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant de l'examiner et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin nous tenons à adresser nos sincères remerciements aux Enseignants qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail (Conseil, aide ou clarification).

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

➤ *A Mes très chers parents*

Mon père, Ma mère pour votre amour, sacrifices, pensées et soutiens.

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon profond amour et l'admiration que je vous porte.

➤ *A Mes frères et mes sœurs*

Je vous remercie pour vos soutiens, et je vous souhaite des parcours pleins de succès. Aucun mot ne saurait exprimer mon immense attachement, ma reconnaissance et mon profond amour et respect.

➤ *A mon mari et mes enfants : Chahine, Razane et Line.*

➤ *A toute la Famille et la Belle Famille*

Rouabhia et Saïda

Je voudrais enfin dédier ce mémoire à toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Chafia ROUABHIA

Dédicace

Je dédie chaleureusement ce travail

A mes chers parents la lumière de ma vie

A mes chers frères et sœurs

A toute ma famille

Et pour une grande part à mon encadreur Abdelaziz Younsi

Pour ses efforts et aides

A tous les enseignants de Département d'Electronique

A toute personne qui m'a encouragé ou aidé

A tous mes amis qui sont tout près ou tout loin

Pour conclure, je dédie ce travail à

ma classe du 2 Master Electronique

Option Instrumentation

Promotion 2020/2021 chacun en son nom propre

Naoel Oumeddour.

Liste des figures

Chapitre 1 : Les systèmes photovoltaïques

Figure 1.1 : Quotidien de l'irradiation solaire globale sur un plan horizontal aux mois de Décembre et Juillet

Figure 1.2 : Répartition du rayonnement solaire

Figure 1.3 : Rayonnement direct, diffus et global

Figure 1.4 : Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque

Figure 1.5 : Principe de fonctionnement

Figure 1.6 : Schéma d'une cellule photovoltaïque élémentaire

Figure 1.7 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle

Figure 1.8 : (a) une partie d'un Module photovoltaïque (b) Représentation d'un Module photovoltaïque

Figure 1.9 : (a) Mise en série des N_s cellules photovoltaïques (b) Caractéristique résultante d'un groupement de n_s cellules PV en série

Figure 1.10 : (a) Mise en parallèle des N_p cellules photovoltaïques (b) Caractéristique résultante d'un groupement de n_p cellules PV en parallèle

Figure 1.11 : Représentation d'une cellule PV, d'un module ; PV et d'un panneau PV

Chapitre 2 : Les systèmes de poursuite solaire

Figure 2.1 : A gauche, mouvement quotidien du Soleil vue de la Terre. A droite, Trajectoires du Soleil au fil des saisons

Figure 2.2 : Coordonnées terrestres

Figure 2.3 : Coordonnées horizontales

Figure 2.4 : Coordonnées horaires (ou semi locales)

Figure 2.5 : Diagramme de comparaison entre la production électrique avec suiveur et avec un système fixe

Figure 2.6 : Représentation de la latitude (hauteur) angulaire et l'azimut

Figure 2.7 : Les types des suiveurs solaires

Figure 2.8 : Suiveur solaire passif

Figure 2.9 : Suiveur à un seul axe

Figure 2.10 : Suiveur à deux axes

Chapitre 3 : Aspects théoriques

Figure 3.1 : Solarimètre digital

Figure 3.2 : La photorésistance

Figure 3.3 : Courbe d'étalonnage de la photorésistance

Figure 3.4 : La photodiode

Figure 3.5 : Caractéristiques $I(U)$ et $I(E)$ d'une photodiode

Figure 3.6 : Le Phototransistor

Figure 3.7 : Signal analogique numérisé

Figure 3.8 : Conversion numérique analogique

Figure 3.9 : Les éléments d'un système à microprocesseur

Figure 3.10 : Broches du microprocesseur 8086

Figure 3.11 : Brochage et signaux externes du microprocesseur 8086

Figure 3.12: Architecture interne du microprocesseur 8086

Figure 3.13 : Les registres à usage général

Figure 3.14 : Les registres de base et d'index

Figure 3.15 : Les registres de segment

Figure 3.16 : Le registre IP Pointeur d'instruction

Figure 3.17 : Le registre d'état

Figure 3.18 : Les bits d'état du registre d'état du 8086

Figure 3.19 : Brochage du 8255A

Figure 3.20 : Schéma bloc du 8255A

Figure 3.21 : Format du mot de contrôle du 8255A

Figure 3.22 : Interfaçage entre le 8086 avec un seul boîtier 8255A

Figure 3.23 : Interfaçage entre deux boîtiers 8255A avec le 8086

Figure 3.24 : Schéma simplifié du principe de fonctionnement d'un moteur pas à pas

Figure 3.25 : Constitution d'un moteur pas à pas

Figure 3.26 : Principe de fonctionnement d'un moteur pas à pas

Figure 3.27 : Alimentation d'un moteur unipolaire

Figure 3.28 : Alimentation d'un moteur bipolaire

Figure 3.29 : Ordre d'alimentation des bobines (phases)

Figure 3.30 : Séquence d'alimentation enroulements du moteur en mode 1 (pas entier)

Figure 3.31 : Séquence d'alimentation des enroulements du moteur en mode 2 (couple fort)

Figure 3.32 : Séquence d'alimentation des enroulements du moteur en mode 1-2 (demi-pas)

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

Figure 4.1 : Diagramme comparatif de production électrique

Figure 4.2 : Disposition du panneau solaire vis-à-vis du Soleil: (a) Angle d'éclairement sur panneau fixe et (b) Angle d'éclairement sur panneau mobile

Figure 4.3 : Schéma synoptique de la carte du système à microprocesseur pour la commande d'un tracker solaire

Figure 4.4 : Schéma électronique complet de la carte du système à microprocesseur pour la commande d'un tracker solaire

Figure 4.5 : Interfaçage du bus de données

Figure 4.6 : Interfaçage du bus d'adresses et du bus de commande

Figure 4.7 : Circuit de conversion du courant de photodiode en Tension et amplification de tension

Figure 4.8 : Représentation des plans (P1) et (P2) isolant les photodiodes les unes des autres

Figure 4.9 : Disposition des photodiodes sur la carte de détection et de mesure de l'éclairement solaire

Figure 4.10 : Exemple de cache-soleil pouvant être utilisé pour permettre de déceler le côté où le Soleil brille.

Figure 4.11 : Différents modèles de cache-lumière

Figure 4.12 : Représentation de l'angle seuil de déclenchement des photodiodes

Figure 4.13 : Interfaçage des circuits amplificateurs (reliés aux capteurs de lumière) avec le CAN 0808

Figure 4.14: Interfaçage du convertisseur CAN 0808 avec le circuit d'E/S parallèle 8255A

Figure 4.15 : Brochage du microprocesseur 8086 avec le circuit d'E/S 8255A

Figure 4.16 : Circuit de puissance pour la commande du moteur pas à pas

Figure 4.17 : Commande des deux moteurs M1 (en Altitude ou Hauteur) et M2 (en Azimut)

Figure 4.18 : Organigramme complet relatif au contrôle de la direction d'un panneau photovoltaïque

Liste des Tableaux

Chapitre 3 : Aspects théoriques

Tableau 3.1 : Comparaison des différents types de moteurs pas à pas

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

Tableau 4.1 : Brochage du CAN 0808 avec l'ampli-op

Tableau 4.2 : Brochage du CAN 0808 et du circuit d'E/S parallèle 8255A

Tableau 4.3 : Brochage du μ P 8086 et l'interface parallèle 8255A (RD signifie que cette broche est active sur un niveau logique bas)

Tableau 4.4 : Séquences d'alimentation des bobines du moteur (Phases)

Tableau 4.5 : Interfaçage du Port B du 8255A avec le circuit de commande des moteurs

Sommaire

Remerciements	i
Dédicace	ii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	vii
Sommaire	viii
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Les systèmes photovoltaïques	3
1.1. Introduction	3
1.2 Energie solaire photovoltaïque	3
1.3 Gisement solaire en Algérie	3
1.4 Le rayonnement solaire	4
1.5 Les catégories du rayonnement solaire	5
1.5.1 Rayonnement direct	5
1.5.2 Rayonnement diffus	6
1.5.3 Rayonnement global	6
1.6 L'effet photovoltaïque.....	6
1.7 La cellule photovoltaïque	8
1.8 Types de cellules photovoltaïques PV	9
1.8.1 Cellules Multi-jonction	9
1.8.2 Cellule en silicium monocristallin	9
1.8.3 Cellules de silicium amorphe	9
1.9 Modules photovoltaïques PV	10
1.10 Association des cellules photovoltaïques PV	10
1.10.1 Associations série	10
1.10.2 Association parallèle	11
1.11 Le panneau solaire photovoltaïque	12
1.12 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques	12
1.13 Conclusion	13
Bibliographie	13
Chapitre 2 : Les systèmes de poursuite solaire	15
2.1 Introduction	15
2.2 Trajectoire solaire dans le ciel	16
2.3 Systèmes de coordonnées	16
2.3.1 Coordonnées terrestres	16
2.3.2 Coordonnées horizontales	17
2.3.3 Coordonnées horaires	17
2.4 Etat de l'art des techniques de suivi	18
2.5 Intérêt des panneaux mobiles par rapport aux panneaux fixes	18
2.6 Généralités sur les suiveurs	19
2.6.1 Définition	19
2.6.2 Principe de fonctionnement	19
2.7 Les types de suiveur solaire	20
2.7.1 Suiveur solaire passif	20

2.7.2 Suiveur solaire actif	21
2.7.2.1 Suiveur mono-axe	21
2.7.2.2 Suiveurs à double axes	21
2.8 Comparaison des suiveurs mono-axe et suiveurs double axes	21
2.9 Les avantages et inconvénients d'un suivi solaire	21
2.10 Conclusion	22
Bibliographie	22
	23
Chapitre 3 : Aspects théoriques	
3.1 Mesure de l'éclairement	24
3.1.1 Qu'est-ce que la lumière (l'éclairement)?	24
3.1.2 Le Solarimètre	24
3.1.3 Les différents types de capteurs de lumière	24
3.1.3.1 Les photorésistances (ou LDR)	24
3.1.3.1.1 Description	24
3.1.3.1.2 Courbe d'étalonnage de la photorésistance	24
3.1.3.2 Les photodiodes	25
3.1.3.2.1 Description	25
3.1.3.2.2 Caractéristique de la photodiode	25
3.1.3.3 Les Phototransistors	25
3.1.3.3.1 Description	26
3.1.3.4 Choix du type de Capteur	27
3.2. Conversions Analogique/Numérique et Numérique/Analogique	27
3.2.1 Les Convertisseurs Analogique/Numérique	27
3.2.2 Les Convertisseurs Numérique/Analogique	29
3.3 Les systèmes à microprocesseurs	29
3.3.1 Introduction	30
3.3.2 Architecture d'un système à base de microprocesseur	30
3.3.3 Le microprocesseur Intel 8086	30
3.3.3.1 Description physique du microprocesseur 8086	31
3.3.3.2 Brochage et signaux externes du 8086	31
3.3.3.3 Architecture interne du 8086	32
3.3.3.4 Les registres internes du 8086	32
3.3.3.4.1 Les registres généraux	33
3.3.3.4.2 Les registres de base et d'index	34
3.3.3.4.3 Les registres segment	35
3.3.3.4.4 Le registre pointeur d'instructions	35
3.3.3.4.5 Le registre d'état (Flag register)	37
3.3.4 Système à microprocesseur	37
3.3.4.1 Introduction	37
3.3.4.2 Interface parallèle programmable 8255A	38
3.3.4.2.1 Présentation du circuit 8255A	39
3.3.4.2.2 Programmation du 8255A	39
3.3.4.2.3 Interfaçage du 8255 avec le microprocesseur 8086 ..	39
3.4 Le moteur pas à pas	41
3.4.1 Définition	42
3.4.2 Constitution	43
3.4.3 Différents types de moteur pas à pas	43
3.4.3.1 Moteur pas à pas à aimant permanent	43
3.4.3.2 Moteur pas à pas à réluctance variable	43

3.4.3.3 Moteurs pas à pas hybrides	43
3.4.4 Principe de fonctionnement d'un moteur pas à pas	44
3.4.5 Alimentation des phases du moteur pas à pas	45
3.4.5.1 Moteur unipolaire (ou à quatre phases). Commutation unipolaire ...	45
3.4.5.2 Moteurs bipolaires	45
3.4.6 Modes de commande (ordre d'alimentation des phases)	46
3.4.6.1 Commande en mode 1 (pas entier)	46
3.4.6.2 Commande en mode 2 (couple fort)	47
3.4.6.3 Commande en mode 1-2 ou demi-pas	47
3.4.6.4 Détermination du nombre de pas par tour	48
3.4.7 Comparaison des différents types de moteurs pas à pas	48
Bibliographie	49
Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques	50
4.1 Introduction	50
4.2 Problématique du projet	50
4.3 Description du projet	52
4.4 Schéma synoptique	53
4.5 Schéma Electronique de la carte du système à microprocesseur pour la commande d'un tracker solaire	54
4.5.1 Description sommaire de la carte de commande d'un tracker solaire	55
4.5.2 Interfaçage des périphériques avec le microprocesseur	55
4.5.2.1 Interfaçage du bus de données	55
4.5.2.2 Interfaçage du bus d'adresses et du bus de commande	55
4.5.3 Description détaillée du montage à microprocesseur	58
4.5.3.1 Logique électronique de lecture et acquisition des données et des consignes	58
4.5.3.1.1 Acquisition de la tension correspondante à l'éclairement solaire	59
4.5.3.1.2 Disposition spatiale des photodiodes sur la carte d'acquisition	60
4.5.3.1.3 Conversion de la tension analogique en une tension numérique	62
4.5.3.2 Logique programmée de supervision du fonctionnement général	
4.5.3.2.1 Connexion du circuit CAN avec le circuit d'E/S parallèles	64
4.5.3.2.2 Connexion du microprocesseur avec le circuit d'E/S parallèles	65
4.5.3.3 Connexion du microprocesseur avec le circuit de commande des moteurs pas à pas	66
4.6. Partie logicielle	70
4.6.1. Introduction	70
4.6.2. Organigramme	71
4.6.3. Programme	71
Bibliographie	73
Conclusion générale	75
Résumés	76

Introduction générale

Il est devenu connu de tout le monde que l'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent urgentes la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie. A ce propos, l'une des solutions les plus prometteuses pouvant répondre à ces critères concerne les énergies renouvelables. C'est la raison pour laquelle, beaucoup de recherches scientifiques sont aujourd'hui menées partout dans le monde dans le secteur de ces sources d'énergie qui sont non seulement illimitées mais également renouvelables.

Tout comme leurs noms l'indiquent, les énergies renouvelables sont des sources d'énergie présentes en quantité illimitée sur Terre. En clair, les stocks disponibles de ces énergies ne s'épuiseront jamais à l'échelle de l'homme. Pour résumer, ces énergies peuvent être classées en cinq grandes catégories : l'énergie solaire, l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, la biomasse et la géothermie.

Bénéficiant d'une situation climatique très favorable, l'Algérie dispose d'environ 3500 heures d'ensoleillement par année. Ces opportunités sont très propices, à moyen et long terme, pour le développement d'une stratégie énergétique audacieuse et réfléchie dans ce sens pour la conception et la multiplication des installations solaires efficaces et rentables à l'échelle nationale [1]. De ce fait, notre pays est plus que jamais appelé à s'orienter vers le développement des différents composants qui ont directement trait avec le domaine de l'énergie solaire. Dans ce contexte, la conception, l'optimisation et la réalisation des systèmes photovoltaïques constituent des exemples d'axes de recherche par excellence qui peuvent aider à appréhender ces nouvelles technologies et hisser le niveau de la recherche nationale à un rang honorable sur le plan mondial.

Un élément incontournable que l'on trouve dans tous les systèmes photovoltaïques est le panneau photovoltaïque. Ce dernier a pour principale fonction la conversion directe de la quantité de lumière reçue par le panneau en une énergie électrique. A signaler que ces panneaux sont d'autant plus efficaces et efficients lorsque la lumière incidente captée est perpendiculaire au plan de la surface du panneau solaire [2]. Deux manières peuvent être envisagées afin de maximiser le rendement énergétique de ces panneaux (i) : en optimisant l'opération de conversion lumière/électricité avec l'augmentation du rendement et du degré d'absorption des cellules photovoltaïques qui tapissent toute la surface du panneau ; (ii) : ou bien encore en augmentant le taux des rayonnements solaires incidents. On utilise, pour

Introduction générale

ce faire, des systèmes d'orientation mécanique qui sont communément appelés suiveurs solaires ou traqueurs solaires.

Les suiveurs ou les traqueurs solaires sont conçus et construits pour optimiser le rendement de puissance des panneaux photovoltaïques en s'assurant qu'ils sont, à tout moment et constamment, inclinés et orientés vers le soleil pendant la journée.

Dans ce travail, nous allons concentrer nos efforts sur l'étude d'un système pour contrôler la direction des panneaux photovoltaïques vis-à-vis du soleil. A cet effet, il s'agit pour nous de concevoir et étudier une carte programmable qui permet, grâce à une commande précise et automatique de l'orientation des panneaux, d'optimiser l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques et cela dans le but de maximiser la quantité de l'éclairement absorbé par ces panneaux en suivant la trajectoire du soleil pendant la journée et tout au long des saisons.

Notre mémoire est divisé comme suit : Le premier chapitre traite des généralités sur l'énergie solaire et les systèmes photovoltaïques. Le second chapitre porte sur les systèmes de poursuite solaire et ses types ainsi que ses principes de fonctionnement. Le troisième chapitre est dédié aux aspects théoriques relatifs à notre conception et ces différents blocs. Le quatrième chapitre est consacré à la conception de la carte à proprement parler et à d'autres considérations de type pratique concernant notre carte programmable. Enfin, en fin de ce mémoire, nous finalisons ce mémoire par une conclusion générale et quelques perspectives.

[1] https://fr.wikipedia.org/wiki/Énergie_en_Algérie#searchInput

[2] Assia Zerdoudi & Rachid Chenni ; Etude de l'influence des différents paramètres sur un module photovoltaïque ; article publié le 25/06/2015 ; Science & Technology A N°41 ; Université des frères Mentouri de Constantine.

Les systèmes photovoltaïques

1.1. Introduction

L'électricité est aujourd'hui produite dans le monde à près de 80,9%, grâce à la combustion des carburants fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel) ou de carburants nucléaires. D'après les données de la *British Petroleum*, le charbon s'est accaparé 0,7% supplémentaire des parts du marché de l'énergie, alors que les statistiques publiées par le Département américain de l'énergie, publiées en 2007, montrent qu'avec des émissions de 11,36 milliards de tonnes (Gt) de dioxyde de carbone (CO₂), ce charbon est devenu en 2005 la première source de pollution devant le pétrole à 11 Gt, alors que le gaz naturel émet 5,84 Gt [1].

L'utilisation de sources propres et renouvelables connaît une croissance significative dans le monde. La quasi-totalité de la production d'électricité algérienne se base, presque exclusivement, sur le pétrole et le gaz naturel du fait de la large disponibilité des hydrocarbures et des coûts relativement de leurs exploitations comparativement aux énergies renouvelables [2, 3, 4, 5].

Dans le cadre de la politique énergétique nationale et pour répondre à la demande énergétique sur les sites isolés et loin des réseaux d'électricité et de gaz, différents textes réglementaires ont été adoptés au cours des dernières années (loi sur la maîtrise de l'énergie, loi sur la promotion des énergies renouvelables pour un développement durable, le décret sur les coûts de diversification, ... etc.) traduisant ainsi la volonté de l'état algérien de faire de ces ressources d'énergie une solution énergétique pour l'avenir du pays en encourageant les entreprises aussi bien publiques que privées à engager des investissements conséquents pour le développement de cette filière énergétique et favoriser ainsi le climat économique à ces ressources pour une contribution plus conséquente de leur part dans le bilan énergétique national.

Ce chapitre décrit les concepts de base de l'énergie solaire et de la production d'électricité grâce à l'effet photovoltaïque.

1.2 Energie solaire photovoltaïque

Le soleil produit une énorme quantité d'énergie qui quitte sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique d'un spectre allant de 0,2µm (ultra-violet) à 4µm (infrarouge)

[6]. L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux en électricité. Elle utilise des modules photovoltaïques composés de cellules solaires ou de photopiles qui réalisent cette transformation d'énergie.

Le comportement de ces générateurs photovoltaïques s'avère plus ou moins aléatoire, en fonction du site de mise en fonctionnement. Ainsi, si l'on considère des zones à climat sec et possédant un taux d'ensoleillement important dans l'année, l'éclairement solaire peut être facilement modélisable et prévisible en fonction des heures de la journée et des jours de l'année. Le fonctionnement des générateurs photovoltaïques est alors souvent proche de celui estimé. Si, au contraire, on considère des zones plus défavorables, souvent ventées et présentant un temps nuageux alternant avec des périodes d'ensoleillement sur plusieurs journées par an, l'irradiation solaire change rapidement et dans de larges proportions [6].

1.3 Gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans un lieu donné et au cours d'une période déterminée. Elle est utilisée pour simuler le fonctionnement probable d'un système énergétique solaire et donc d'effectuer son dimensionnement le plus exact possible compte tenu des demandes en énergie à satisfaire.

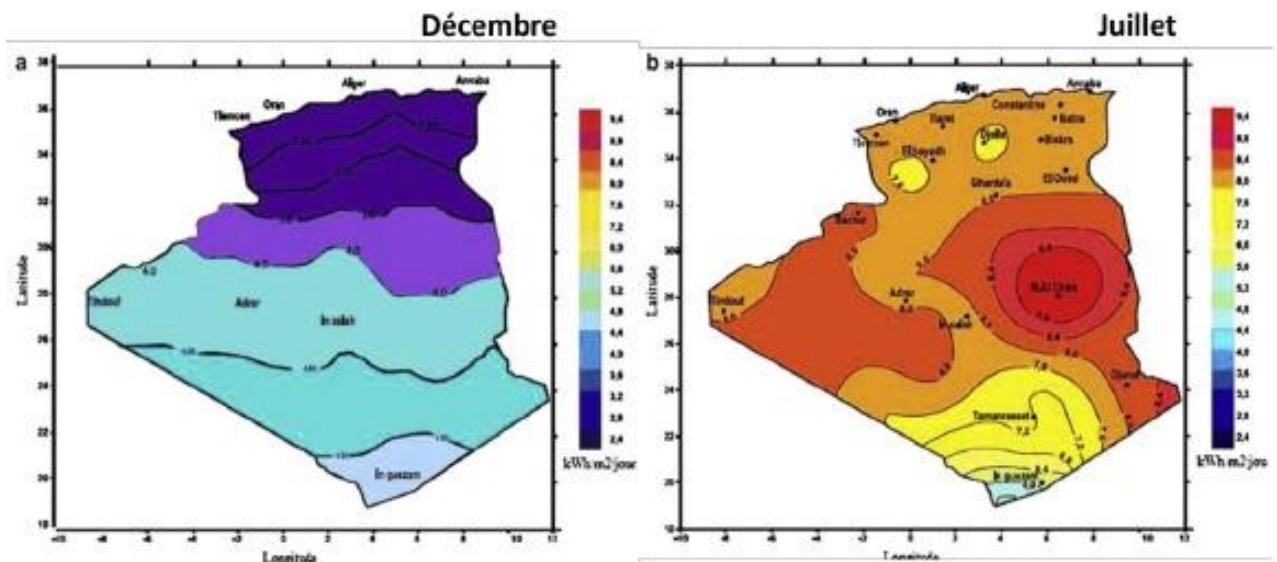


Figure 1.1 : Quotidien de l'irradiation solaire globale sur un plan horizontal aux mois de Décembre et Juillet [7].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde [7]. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (Hauts-plateaux et Sahara).

Chapitre 1 : Les systèmes photovoltaïques

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700\text{ kWh/m}^2/\text{an}$ au Nord et $2263\text{ kWh/m}^2/\text{an}$ au Sud du pays [7], [8]. La figure 1.1 montre l'irradiation solaire globale quotidienne reçue sur un plan horizontal pour les mois de décembre et juillet [7].

1.4 Le rayonnement solaire

Le noyau du Soleil est le siège de réactions thermonucléaires qui produisent surtout de l'hélium et un rayonnement sous une température de plusieurs dizaines de millions de degrés [9]. La grande partie de ce rayonnement se situe dans le domaine de la lumière visible. Le reste se situe essentiellement dans le domaine des infrarouges et une faible partie dans celui des ultraviolets. En traversant l'atmosphère, une bonne partie du rayonnement est absorbée avant de parvenir à la surface de la terre comme l'indique la figure 1.2.

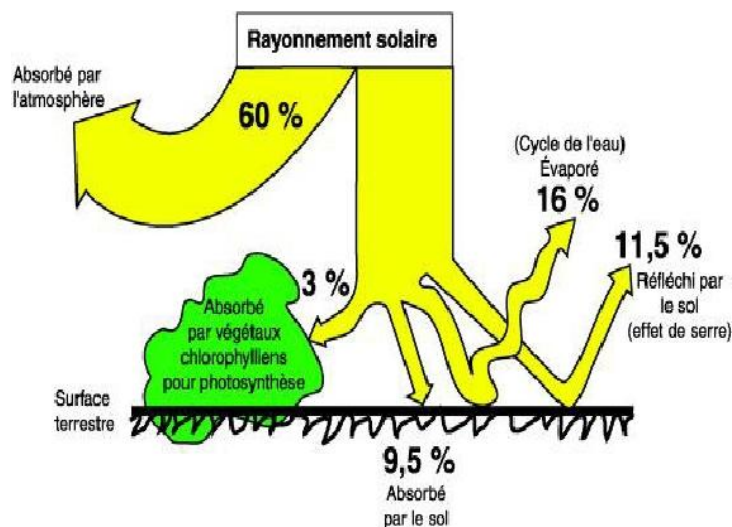


Figure 1.2 : Répartition du rayonnement solaire [9]

Le rayonnement solaire reçu au niveau du sol dépend de :

- ✓ L'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre.
- ✓ La latitude du lieu de collecte, de son degré de pollution ainsi que de son altitude.
- ✓ La période de l'année.
- ✓ L'instant considéré dans la journée.
- ✓ La nature des couches nuageuses.

1.5 Les catégories du rayonnement solaire

Il y a différents types de rayonnement solaires [9] :

1.5.1 Rayonnement direct

Provenant du Soleil et arrivant au sol après passage dans l'atmosphère selon une direction déterminée qui dépend de la position momentanée du soleil.

1.5.2 Rayonnement diffus

Lors de son passage dans l'atmosphère, une partie du rayonnement direct est diffusée. En clair, cela signifie qu'une partie de ce rayonnement est déviée dans toutes les directions. Une fraction de ce rayonnement revient donc au sol mais cette fois en provenance de l'ensemble de la voûte céleste et sans direction privilégiée. Cette fraction constitue le rayonnement diffus. Le rayonnement diffus est le résultat des processus de diffusion dans l'atmosphère. Il dépend aussi de l'albédo de la surface et augmente avec la quantité d'aérosols pour un ciel clair. Les nuages accroissent encore le rayonnement diffus ; et le degré de diffusion multiple dépend des propriétés des nuages.

1.5.3 Rayonnement global

Le rayonnement global est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. Le rayonnement direct doit être multiplié par le cosinus de l'angle zénithal solaire pour obtenir le rayonnement pour une surface horizontale, [figure 1.3](#).

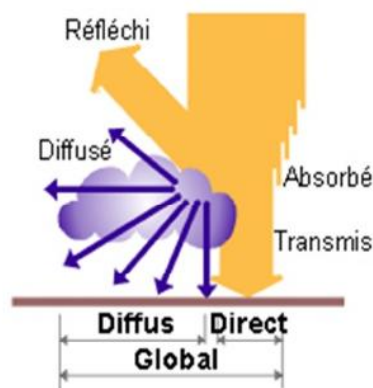


Figure 1.3 : Rayonnement direct, diffus et global

1.6 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction P-N (ou jonction N-P) [10]. Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (tout comme un aimant qui possède un champ permanent). Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède

Chapitre 1 : Les systèmes photovoltaïques

son énergie $h\nu$ à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse, [figure 1.4](#).

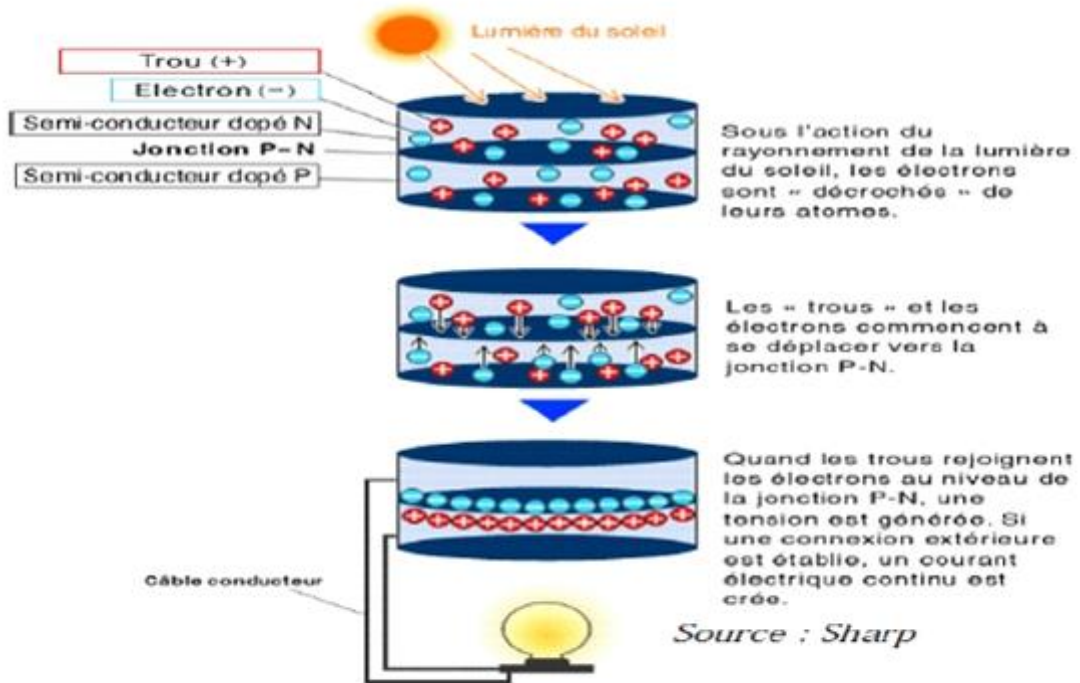


Figure 1.4 : Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque [11]

Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons pour rejoindre les trous de la face antérieure à travers un circuit extérieur créant ainsi un courant électrique continu qu'on appelle le photo-courant ; les électrons sont délivrés sous la tension créée dans la jonction PN qu'on appelle la phototension comme montrée sur la [figure 1.5](#).

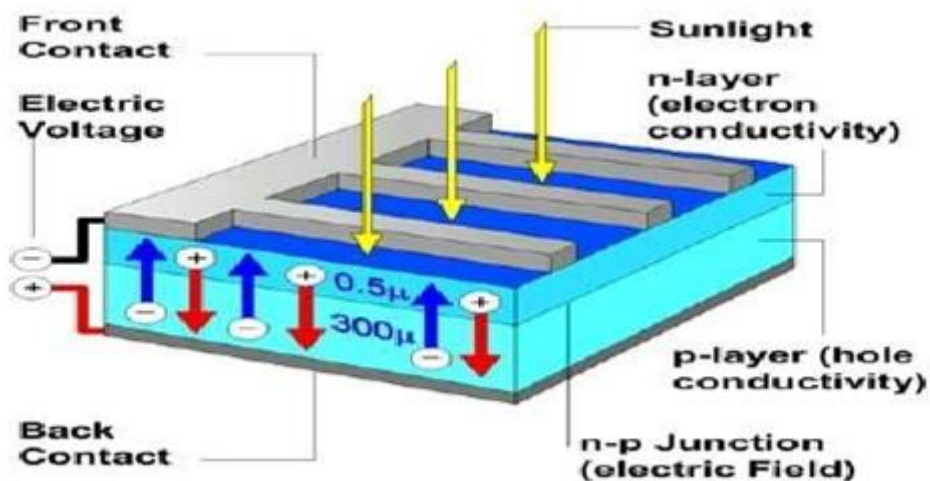


Figure 1.5 : Principe de fonctionnement [10]

1.7 La cellule photovoltaïque

Le principal composant du générateur photovoltaïque est la cellule photovoltaïque dont laquelle se produit la transformation directe du rayon solaire en courant électrique par un processus appelé l'effet photovoltaïque. Elle a été découverte par E. Becquerel en 1839 [12]. Elle est constituée de semi-conducteurs à base de silicium(Si), ou de Germanium(Ge), ou de sulfure de cadmium (CdS) ou de tellurure de cadmium (CdTe) [6].

Les matériaux et la méthodologie utilisée pour la conception de ces cellules influent sur l'énergie récupérée. Par exemple, le rendement de conversion des cellules commercialisées atteint 15 à 19% pour les cellules à silicium monocristallin, 12 à 16 % pour celle à silicium polycristallin et de 7 à 9% pour les cellules amorphe [6].

Dans la figure 1.6, un échantillon schématique d'une configuration de la cellule solaire est représenté. Elle se compose d'un abri du verre (g), un encapsulant (e) et un métal en arrière contact (m) afin de réduire les pertes par réflexion du rayonnement incident [13]. La jonction p-n de ces deux matériaux fonctionne comme une diode. Lorsque cette diode est exposée à des photons dont l'énergie $h\nu$ est supérieure à celle de l'énergie du matériau, appelée l'énergie de bande gap E_g , le nombre d'électrons libres du semi-conducteur de type p et celui de trous du semi-conducteur de type-n augmente considérablement. Si les photons incidents ont une énergie inférieure à E_g , ils ne seront pas absorbés, c'est-à-dire leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque [6]. Dans une cellule photovoltaïque, une large fraction de ces électrons et trous atteignent la jonction p-n, et un champ électrique est créé. En conséquence, un courant électrique peut être établi en connectant les matériaux de type-n et type-p à un circuit extérieur. La direction de ce courant est l'opposé de celle de la cellule lorsqu'elle fonctionne en tant que diode, autrement dit, un courant positif I traverse de n vers p [14].

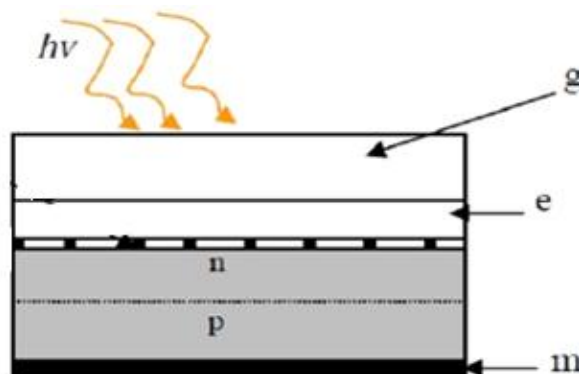


Figure 1.6 : Schéma d'une cellule photovoltaïque élémentaire

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle et représenté sur la figure 1.7. Il est constitué d'une diode caractérisant la jonction, une source de courant I_{ph} caractérisant le photo-courant, une résistance série R_s représentant les pertes par effet Joule et une résistance shunt R_{sh} caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à la résistance R_s .

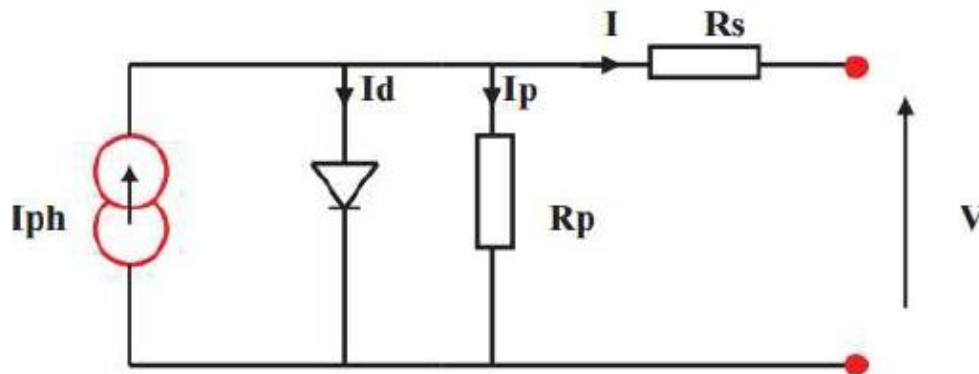


Figure 1.7 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle

1.8 Types de cellules photovoltaïques PV

Pour produire une quantité assez importante d'électricité, le panneau solaire additionne les courants électriques générés par chacune des cellules photovoltaïques. Selon le matériau de construction, il en existe de nombreux ; mais, le silicium, présent en quantité à la surface de la Terre, est le plus utilisé.

1.8.1 Cellules Multi-jonction

Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et permet ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion.

1.8.2 Cellule en silicium monocristallin

Ce type de cellule solaire offre un très bon rendement et a aussi une longue durée de vie. Malheureusement, elles sont très coûteuses. Les cellules photovoltaïques en silicium monocristallin sont formées d'un seul cristal.

1.8.3 Cellules de silicium amorphe

Ce sont des cellules à couche mince. Cela veut dire qu'elles sont fabriquées en déposant une fine couche de silicium sur un support. Ce type de cellule est plus facile à

fabriquer et moins cher que les cellules monocristallines et polycristallines. Les cellules de silicium amorphe ont un rendement plus faible.

1.9 Modules photovoltaïques PV

Pour augmenter la quantité de puissance produite, les cellules PV sont reliées entre elles pour former un module PV comme indiqué sur la [figure 1.8](#). Les cellules sont branchées en série afin d'augmenter la tension en conservant le courant. Par contre, la mise en parallèle des cellules fait augmenter le courant pour la même tension. Chaque série est protégée au moyen d'une diode by-pass (ou diode anti-retour). En effet, quand une cellule est mal éclairée, la diode by-pass permet d'éviter que l'échauffement résultant ne provoque une dégradation ou une panne [\[13\]](#).

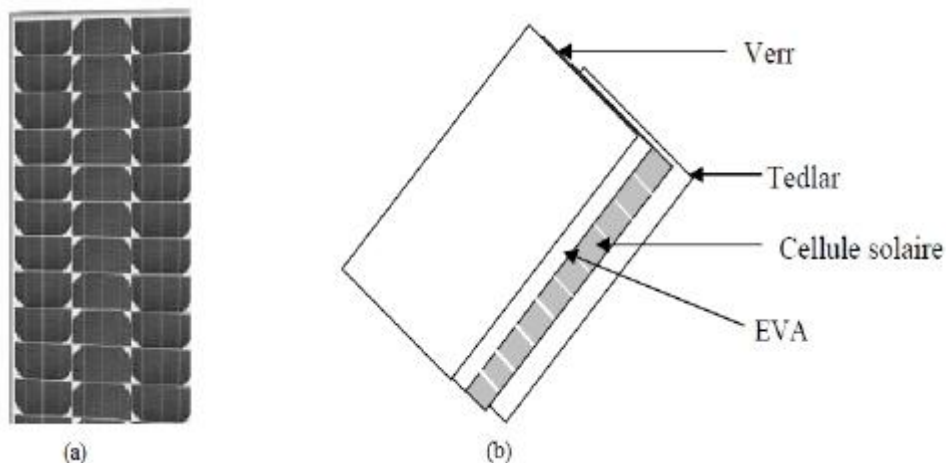


Figure 1.8 : (a) une partie d'un Module photovoltaïque,
(b) Représentation d'un Module photovoltaïque

1.10 Association des cellules photovoltaïques PV

1.10.1 Associations série

Plusieurs cellules photovoltaïques sont mises en série pour obtenir la tension désirée comme l'indique la [figure 1.9.a](#). Chaque cellule produit un courant continu dont la puissance dépend de la surface de la cellule. Les différentes cellules sont montées en série pour former des modules qui délivrent des tensions normalisées, la tension résultante est la somme des tensions de nombre des cellules associées. Quant à la puissance maximale de l'ensemble, elle est égale à la puissance maximale d'une cellule multipliée par le nombre de cellules reliées [\[6\]](#). Au cas de N_s cellules identiques montées en série, il suffit de dilater la caractéristique

d'une cellule d'un facteur N_s dans la direction de l'axe des tensions comme indiqué sur la [figure 1.9.b](#), avec maintien de l'intensité du courant constante (éléments en série).

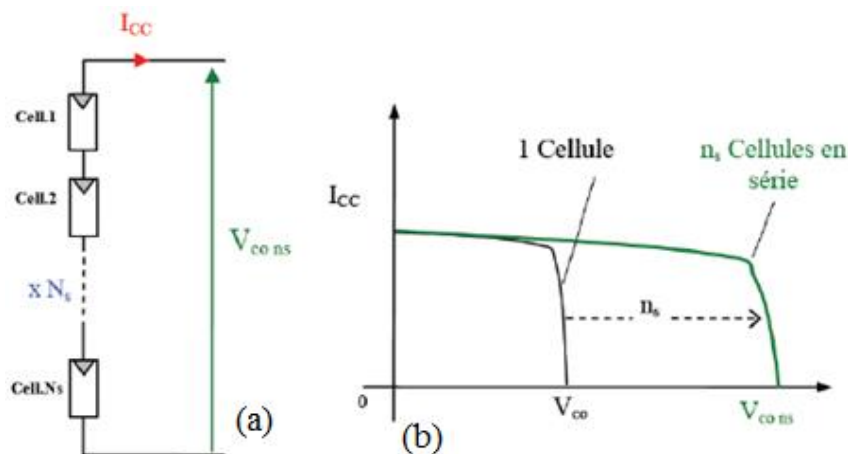


Figure 1.9 : (a) Mise en série des N_s cellules photovoltaïques
(b) Caractéristique résultante d'un groupement de n_s cellules PV en série

1.10.2 Association parallèle

La caractéristique courant-tension obtenue lors du montage en parallèle de deux cellules identiques montre que la puissance maximale de l'ensemble est égale au double de la puissance maximale correspondant à une seule cellule tandis que la tension optimale reste la même que celle pour une seule cellule. Au même moment, le courant optimal de l'ensemble est égal au double du courant optimal enregistré pour une seule cellule. Ce résultat se généralise sans difficulté au cas de N_p cellules identiques montées en parallèle, [figure 1.10.a](#). Il suffit de dilater la caractéristique d'une cellule d'un facteur N_p dans la direction de l'axe des courants, comme on le voit sur la [figure 1.10.b](#) [14].

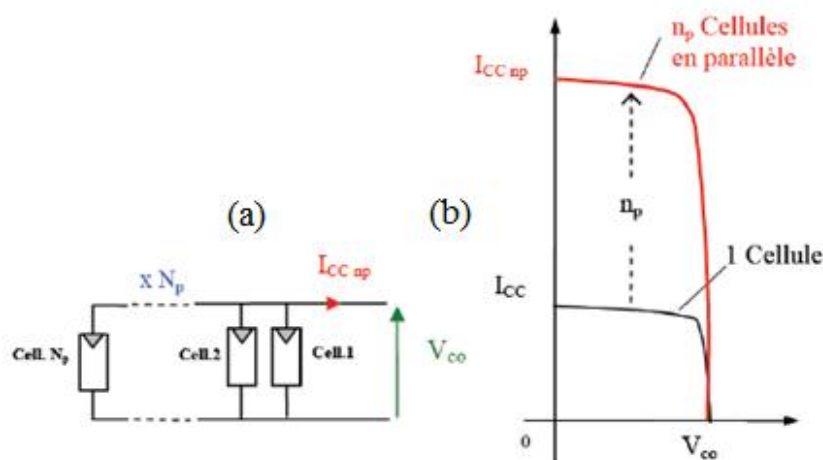


Figure 1.10 : (a) Mise en parallèle des N_p cellules photovoltaïques
(b) Caractéristique résultante d'un groupement de n_p cellules PV en parallèle

1.11 Le panneau solaire photovoltaïque

Un panneau solaire est constitué de plusieurs modules photovoltaïques reliés en série et/ou en parallèle, comme le montre la **figure 1.11**, dans le but de produire une puissance plus élevée. Plusieurs panneaux solaires forment un champ solaire **[6]**.

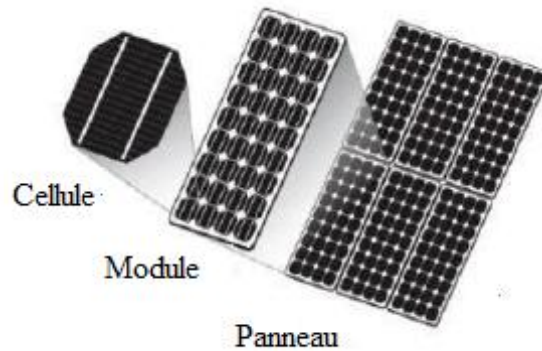


Figure. 1.11 : Représentation d'une cellule PV, d'un module PV et d'un panneau PV **[6]**

Pour maximiser la production de l'électricité générée par une installation photovoltaïque, il convient d'orienter les modules de façon optimale afin de capter un maximum du rayonnement solaire. Ainsi, on distingue en général trois types de structures :

- ✓ Les panneaux fixes
- ✓ Les panneaux orientables
- ✓ Les panneaux mobiles.

1.12 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques

Au moment de choisir un système photovoltaïque, il faut peser les avantages et les inconvénients à la lumière des contraintes, besoins et spécifications du projet.

Avantages :

- ✓ Son carburant est gratuit.
- ✓ L'énergie solaire photovoltaïque ne génère ni bruit, ni émissions nocives, ni gaz polluants.
- ✓ Les systèmes photovoltaïques sont très sûrs et d'une grande fiabilité.
- ✓ Les modules photovoltaïques sont recyclables et les matériaux utilisés pour leur production (silicium, verre, aluminium, etc.) peuvent être réutilisés.
- ✓ L'énergie solaire photovoltaïque exige peu de maintenance.

Chapitre 1 : Les systèmes photovoltaïques

- ✓ L'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité aux zones rurales les plus isolées.
- ✓ L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments.
- ✓ Le temps de retour énergétique (investissement) d'un module diminue constamment.
- ✓ L'énergie solaire photovoltaïque permet la création de milliers d'emplois.

Inconvénients :

- ✓ La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- ✓ Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%.
- ✓ Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent au 220 à 230V alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est unidirectionnelle et de faible valeur (< 30V) : elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur.
- ✓ Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batteries) est nécessaire : le coût du générateur photovoltaïque est accru.
- ✓ Limites de charge et de décharge pour des batteries : de 30% à 80% pour une durée de vie de 7 à 10 ans [15].

1.13 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, une nouvelle source de production de l'énergie électrique plus avantageuse que les sources fossiles, c'est l'énergie photovoltaïque. Les systèmes photovoltaïques permettent d'exploiter l'énergie du soleil à diverses fins. Ils sont très fiables, silencieux et rentables dans les régions éloignées. Ces systèmes peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre aux nouveaux besoins éventuels en matière d'électricité et constituent une source non polluante.

Bibliographie

- [1] Benhaddadi, G. Olivier, "Dilemmes Energétiques", Presses de l'Université du Québec UQ, 2008.
- [2] Ministère de l'Energie et des Mines, "Guide des Energies Renouvelables", <http://www.mem-algeria.org>
- [3] <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=hydrocarbure> ; Consulté le 20 juin 2021

- [4] <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=produits-petroliers> ; Consulté le 20 juin 2021
- [5] <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=activite-transport-par-canalisation> ; Consulté le 20 juin 2021
- [6] A. Lazizi, “Modélisation, contrôle et gestion énergétique d’une installation de pompage solaire”, Thèse de Doctorat, Université M’hamed Bougara Boumerdes, Algérie, 2019.
- [7] Y. Bakelli, “Contribution à l’optimisation du dimensionnement d’un système de pompage photovoltaïque autonome”, Thèse de doctorat, Université Hadj Lakhdar Batna ; Algérie, 2012.
- [8] A. Daoud, “Contrôle de la Puissance d’un Générateur Photovoltaïque pour Le Pompage Solaire”, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran, Algérie, 2013.
- [9] . A. El Ouederni, “Evaluation Du Gisement Solaire Au Golfe De Tunis : Application à La Faisabilité D’un Mini Concentrateur Solaire Parabolique”, Thèse de Doctorat, L’Ecole Nationale d’Ingenieurs de Monastir , Tunis, 2016.
- [10] Skender Ayoub, Etude et simulation des cellules solaires à triples jonctions à concentration à base des semi-conducteurs III-V ; Mémoire de Magister ; Université Mouloud Mammeri ; 2016.
- [11] <https://sites.google.com/site/panneauxphotovoltaieques64/home/iii-fonctionnement/1-l-effet-photovoltaieque>
- [12] S. E.J, Le pompage photovoltaïque : Manuel de cours à l’intention des ingénieurs et destechiciens. Institut de l’énergie des pays ayant en commun l’usage du français, Royer: Québec 1998.
- [13] M.Behadj, “Modélisation D’un Système De Captage Photovoltaïque Autonome” Centre Universitaire De Bechar Institut des Sciences Exactes, Mémoire de Magister, Algérie, 2008.
- [14] T. Tafticht, “Analyse et commande d’un système hybride photovoltaïque éolien”, Thèse de Doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, Canada, 2006.
- [15] A.Menadi Commande Par Les Techniques Intelligentes D'un Système Photovoltaïque Connecté Au Réseau ; Thèse de doctorat ; Université Mohamed Kheider ; Biskra 2016.

Les systèmes de poursuite solaire

2.1 Introduction :

L'énergie électrique produite par le système solaire photovoltaïque du flux lumineux dont l'intensité dépend des différentes positions du Soleil au cours de la journée. Afin de collecter le maximum d'énergie, on a recours à des dispositifs qu'on appelle communément systèmes de poursuite solaire (*Sun Tracking Systems*). Ces systèmes de poursuite solaire doivent être ajustés de façon à ce qu'ils soient continuellement dirigés avec précision perpendiculairement en direction du Soleil.

2.2 Trajectoire solaire dans le ciel :

Nous rappelons que l'interprétation héliocentrique peut être décrite comme suit. La course du Soleil dans le ciel suit un mouvement apparent qui est un reflet des mouvements réels de la Terre. La rotation propre de notre planète sur elle-même en une journée explique la succession des jours et des nuits alors que sa révolution autour du soleil en une année explique la succession des saisons.

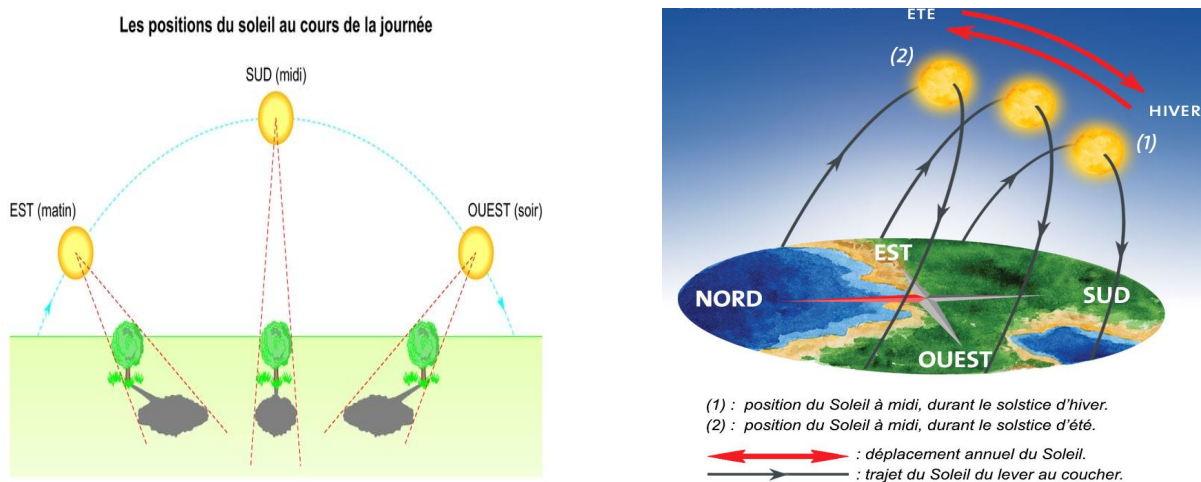


Figure 2.1 : A gauche, mouvement quotidien du Soleil vue de la Terre.

A droite, Trajectoires du Soleil au fil des saisons

L'énergie solaire que reçoit une surface est régie uniquement par des lois astronomiques et géométriques. Ces lois font intervenir la latitude du lieu, la déclinaison solaire, l'heure du jour et l'orientation de la surface réceptrice. La position du Soleil dépend

Chapitre 2 : Les systèmes de poursuite solaire

du temps solaire et du jour de l'année. Elle est exprimée par différents angles. Le rayonnement solaire dépend fortement de plusieurs paramètres tels que :

- ✓ La latitude du site (éloignement par rapport à l'équateur).
- ✓ La saison (inclinaison relative de la terre par rapport au soleil qui change au cours de l'année).
- ✓ L'heure de la journée (angle variable du soleil dans le ciel).
- ✓ Les conditions météo et atmosphériques (nébulosité, pollution, nuages...).
- ✓ ... etc.

Toutefois, d'une année sur l'autre, l'énergie solaire totale reçue reste sensiblement constante. Pour suivre le soleil, il y a deux méthodes : La première est basée sur le suivi du soleil selon un seul axe (en azimut) ; tandis que la deuxième, elle est basée sur le suivi du soleil selon deux axes (en azimut et en altitude).

2.3 Systèmes de coordonnées

2.3.1 Coordonnées terrestres

Tout point de la sphère terrestre peut être repéré par deux coordonnées, [figure 2.2](#), appelées coordonnées terrestres, à savoir [\[1\]](#) :

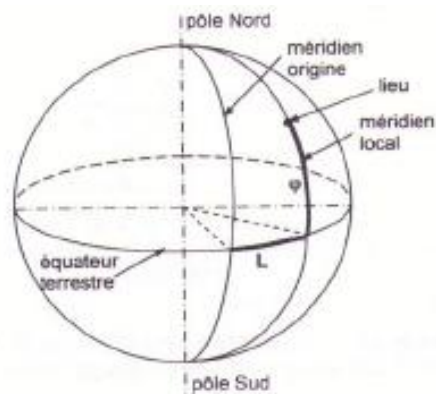


Figure 2.2 : Coordonnées terrestres

- ✓ Sa latitude φ : c'est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la terre au point considéré, sa valeur est positive dans l'hémisphère nord négative dans l'hémisphère sud.
- ✓ Sa longitude L : c'est l'angle que fait le méridien local passant par le point considéré avec le méridien origine passant par la ville de Greenwich. Sa valeur est positive à l'est et négative à l'ouest du méridien origine.

2.3.2 Coordonnées horizontales

La position d'un astre dans l'espace peut être repérée par ses coordonnées horizontales, [figure 2.3](#), définies sur la sphère céleste (soleil), à savoir [\[1\]](#) :

- ✓ Sa hauteur angulaire qui est l'angle que fait la direction de l'astre avec le plan horizontal (c'est-à-dire tangent au sol).
- ✓ Son azimut a correspondant à l'angle que fait le plan du méridien local avec le plan vertical passant par l'astre. L'azimut est compté négativement vers l'est, positivement vers l'ouest.

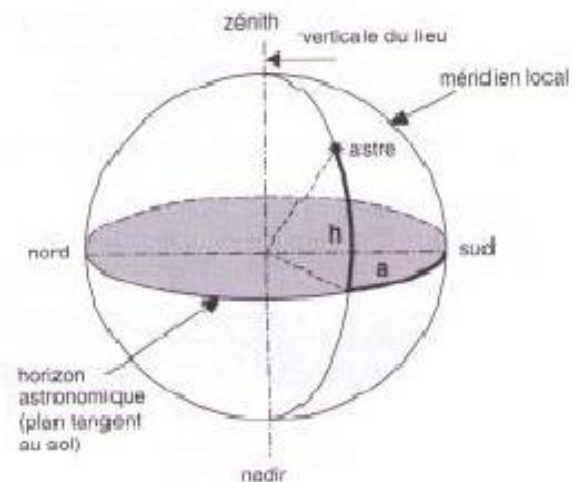
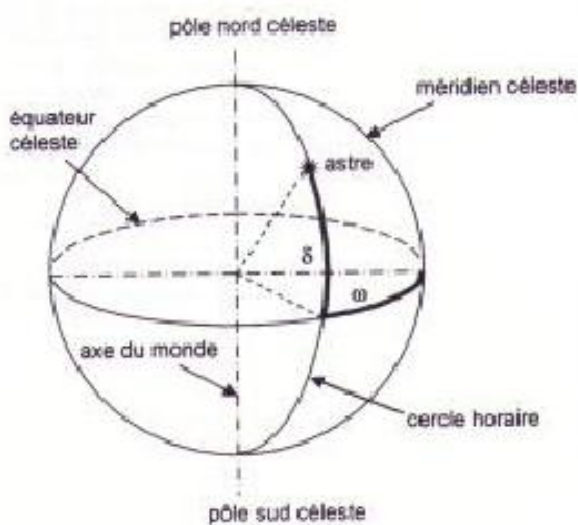


Figure 2.3 : Coordonnées horizontales **Figure 2.4** : Coordonnées horaires (ou semi locales)

2.3.3 Coordonnées horaires

On peut définir les coordonnées horaires, [figure 2.4](#), à partir de la déclinaison δ et de l'angle horaire ω [\[1\]](#) :

- ✓ L'angle horaire ω : est l'angle que fait le plan contenant le cercle horaire (passant par l'astre étudié et dont le plan contient l'axe reliant les pôles Nord et sud célestes).
- ✓ La déclinaison δ : c'est l'angle que fait le plan de l'équateur terrestre avec la direction terre soleil. L'angle δ varie tout au long de l'année de façon symétrique de $-23^{\circ}26'$ à $23^{\circ}26'$.

2.4 Etat de l'art des techniques de suivi

Les panneaux photovoltaïques classiques ne sont généralement pas équipés de suiveur solaire et lorsqu'ils sont situés à un endroit donné, ils sont implantés avec une inclinaison et une orientation fixes et bien déterminées et ce en fonction du site de l'installation et les conditions d'ensoleillement. Afin d'augmenter le rendement du panneau photovoltaïque, on l'équipe avec une structure portante pouvant se mouvoir en rotation selon deux degrés de liberté et devant être commandée par un algorithme de poursuite solaire adapté [2].

2.5 Intérêt des panneaux mobiles par rapport aux panneaux fixes

Le soleil se déplace continuellement pendant la journée. Le panneau solaire chargé de recueillir le rayonnement solaire est fixé sur le sol et orienté vers le sud. Toutefois, une position fixe du panneau provoque la perte d'une quantité considérable de l'énergie émise par le soleil ; si bien que le rendement de la production énergétique se trouve affecté, et cela à cause du fait que l'angle d'éclairement du panneau n'est pas constant tout le long de la journée. Par contre, lorsqu'on installe un système suiveur qui fait orienter le panneau solaire en le faisant pivoter en direction du soleil et en maintenant en permanence un angle d'incidence des rayons idéal, voisin de 90° , dans ces conditions, la production électrique par m^2 de panneau augmentera de façon très significative [3].

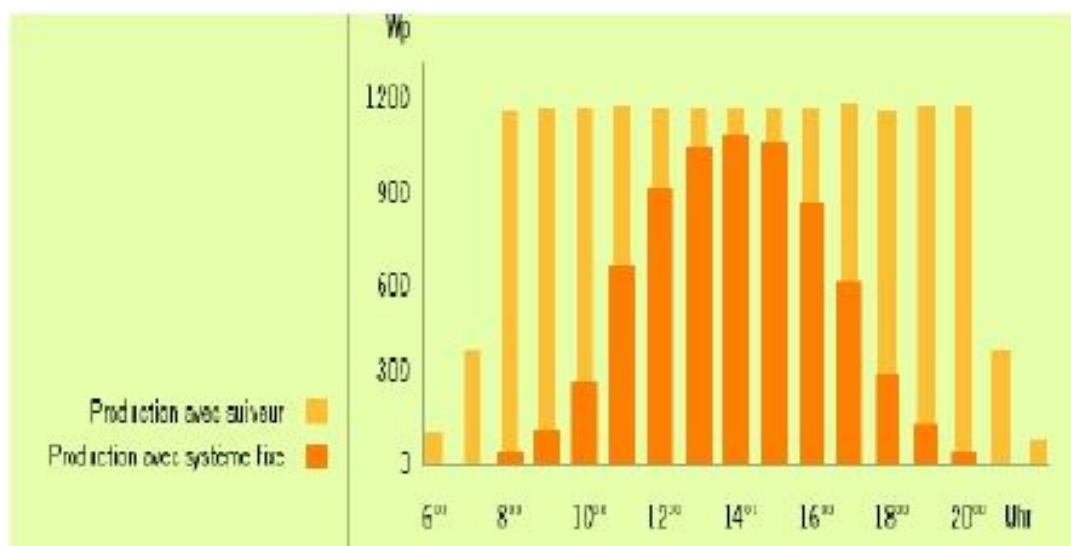


Figure 2.5 : Histogramme de comparaison entre la production électrique avec suiveur et avec un système fixe

2.6 Généralités sur les suiveurs

2.6.1 Définition

Un suiveur solaire est un dispositif permettant à un télescope héliographique (devant observer le soleil ou certains de ses effets dans l'atmosphère), ou à une installation de production d'énergie solaire de suivre le soleil selon le principe de l'héliostat. Cette structure portante motorisée oriente les panneaux solaires afin d'augmenter la productivité.

Un héliostat (de hélios, mot grec signifiant Soleil, et stat, racine de stationnaire) est un dispositif permettant de suivre la course du soleil, généralement pour orienter toute la journée les rayons solaires vers un point ou une petite surface fixe, à l'aide de miroirs.

2.6.2 Principe de fonctionnement

Le système vise à orienter en temps réel les capteurs vers le soleil, pour placer le panneau dans une position optimale par rapport à l'incidence du rayonnement solaire (perpendiculaire au rayonnement, si possible), car tout au long de la journée et de l'année (selon les saisons) la position du soleil varie constamment et d'une manière différente selon la latitude [4]. Cette adaptation en temps réel a pour effet d'augmenter de manière substantielle la captation et la production de l'énergie.

Pour un observateur situé en un lieu précis de la surface terrestre (latitude+longitude) la position du soleil dans le ciel, à un instant donné (date + heure), peut être repérée par deux coordonnées angulaires (Figure 2.6) [5].

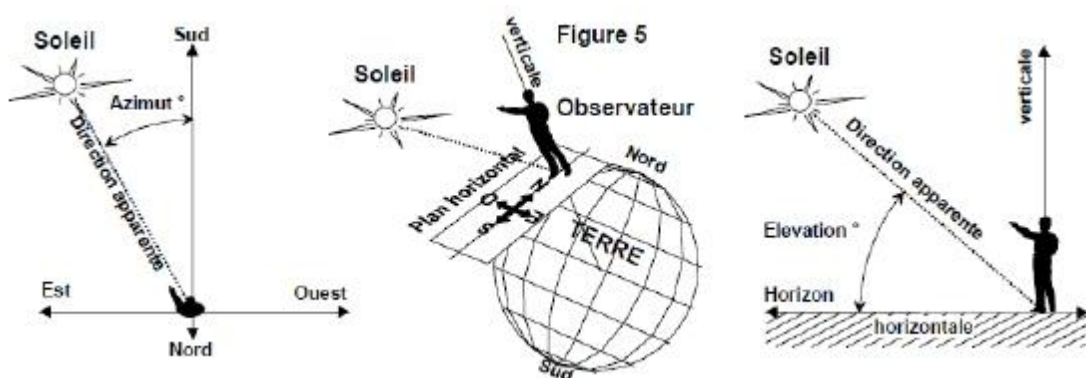


Figure 2.6 : Représentation de la latitude (hauteur) angulaire et l'azimut [4].

2.7 Les types de suiveur solaire

L'objectif d'un suiveur solaire est de pouvoir suivre le soleil tout au long des mois et de la journée pour assurer une production électrique maximum. Des suiveurs solaires peuvent être divisés en deux types principaux selon le type de la commande et de la sensibilisation ou du système de positionnement qu'ils incorporent (Figure 2.7) :

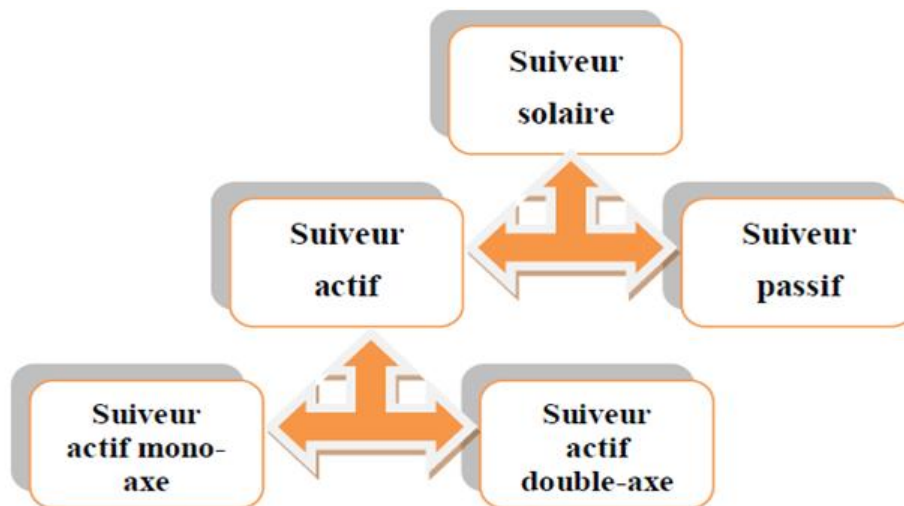


Figure 2.7 : Les types des suiveurs solaires

2.7.1 Suiveur solaire passif

Emploient le rayonnement du soleil pour chauffer un gaz qui déplace le suiveur à travers le ciel (Figure 2.8).

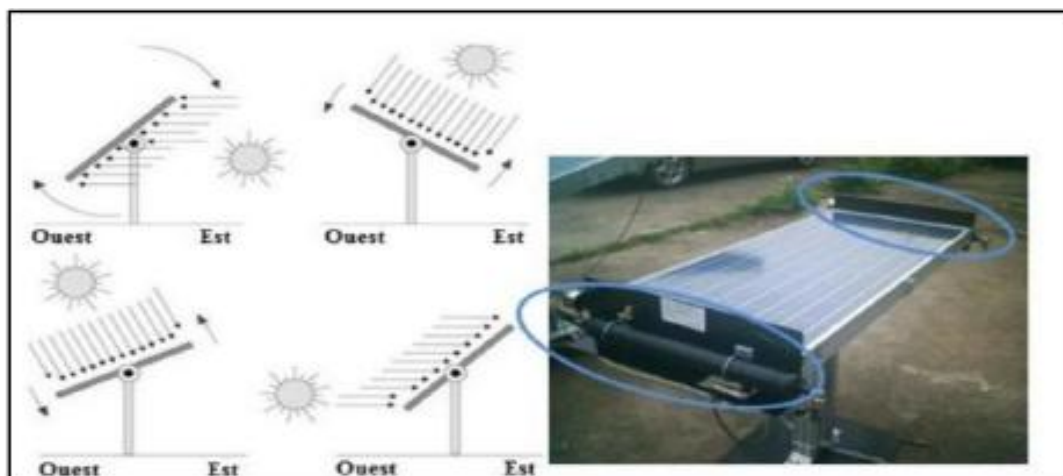


Figure 2.8 : Suiveur solaire passif [3].

2.7.2 Suiveur solaire actifs

Emploient les commandes électriques ou hydrauliques pour déplacer le suiveur. L'avantage du suiveur actif par rapport à un suiveur passif c'est qu'il représente une meilleure précision de suivi et ne nécessite aucune intervention manuelle pour les ajuster. Il existe deux types de cette famille : les suiveurs mono-axe et les suiveurs double axes.

2.7.2.1 Suiveur mono-axe

Au cours d'une journée, le panneau tourne autour d'un axe en suivant un déplacement azimutal d'Est en Ouest (Figure 2.9).

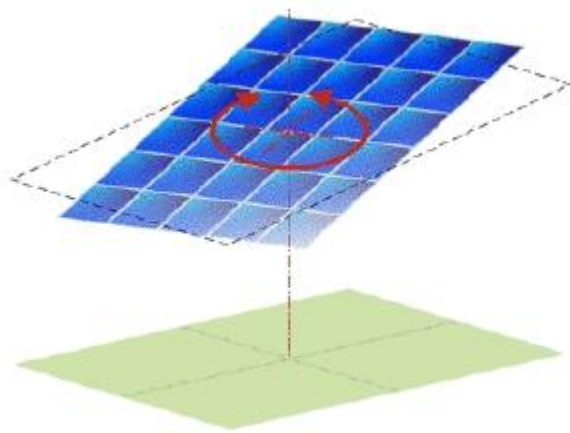


Figure 2.9 : Suiveur à un seul axe [3]

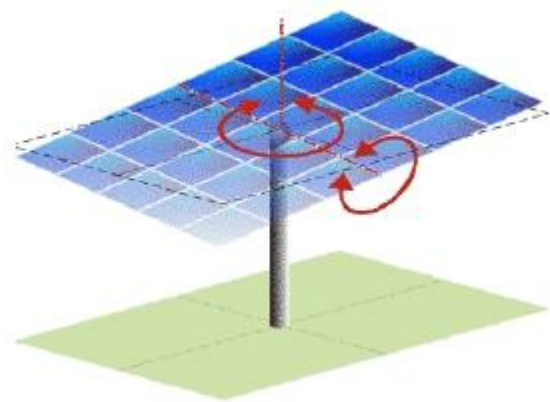


Figure 2.10: Suiveur à deux axes [3]

2.7.2.2 Suiveurs à double axes

Le panneau tourne selon un axe d'Est en Ouest et selon un axe vertical. Ce type permet de faire la modification de l'orientation et de l'inclinaison (Figure 2.10).

Par rapport aux modules solaires qui sont placés à un angle optimal, le traqueur mono-axe peut élever la production d'électricité de 27% à 30% [3]. Aussi le suiveur double axe peut ajouter en moyenne un bonus de 6 % de bonus et une amélioration variante entre 30% et 40% de la production d'énergie électrique par rapport aux modules solaires fixes.

2.8 Comparaison des suiveurs mono-axe et suiveurs double axes :

Le suiveur mono-axe est considéré comme le moyen le plus simple pour l'amélioration des performances d'une installation solaire commerciale en utilisant des dispositifs relativement simples. Les systèmes à double axes contiennent plus de pièces

mobiles que les suiveurs mono-axe. Leur conception est plus compliquée avec l'intégration des moteurs supplémentaires et de capteurs pour la poursuite du soleil. Le risque de défaillances et de dysfonctionnements est alors plus important.

L'inconvénient le plus connu au niveau des systèmes à double axe est que, par une journée nuageuse, nous pourrions les trouver en train de pointer dans le ciel à la recherche du soleil ; tandis que les suiveurs à mono-axe et grâce à leur modèle de tracking, ils seront là où ils devront être. Ce modèle permet donc d'éliminer les mouvements inutiles de suivi qui peuvent entraîner une usure supplémentaire et une perte de puissance. Néanmoins, l'on peut par programme diminuer sinon éliminer complètement ces mouvements de recherche du soleil par temps nuageux.

2.9 Les avantages et inconvénients d'un suivi solaire

Dans tous les cas, les aspects négatifs des suiveurs solaires se traduisent par des problèmes mécaniques qui entraînent inévitablement l'usure des pièces mécaniques au fil du temps qui résulte sur la fermeture pure et simple de l'installation par la suite de l'usure rapide des pièces en cas de persistance du mauvais temps.

La maintenance ordinaire est généralement simple et, dans le domaine de l'énergie photovoltaïque. La sensibilité de l'effet photovoltaïque est moindre en présence d'une poussière déposée à la surface des modules. Néanmoins, grâce à un meilleur angle d'incidence, le rendement photovoltaïque peut être amélioré. Finalement, les études de cas confirment que le domaine d'utilisation le plus rentable pour les suiveurs solaires est celui des grandes installations terrestres.

2.9 Conclusion

Le système de poursuite solaire consiste à contrôler le mouvement de rotation du panneau pour le commander par un programme afin de mettre la surface du collecteur en face du soleil pendant toute la journée. L'importance de ce système est de capter le rayonnement solaire direct. En conclusion, nous obtenons une nette amélioration du niveau de l'éclairage solaire et un meilleur rendement de l'énergie électrique tout au long de l'année en utilisant ce système.

Bibliographie

- [1] A.El Ouederni, “Evaluation Du Gisement Solaire Au Golfe De Tunis : Application à La Faisabilité D’un Mini Concentrateur Solaire Parabolique”, Thèse de Doctorat, L’Ecole Nationale d’Ingenieurs de Monastir, Tunisie, 2016.
- [2] B. Zitani, Etude et Modélisation du Comportement en Régime Transitoire d’un Capteur Solaire Plan thèse de magistère, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2007.
- [3] Bahi Kheira et Bennassar Khadidja, Simulation numérique de poursuite solaire d’un héliostat, Mémoire de Master, Ecole Supérieure en Sciences Appliquées, Tlemcen, 2019/2020.
- [4] Brahami Imen Souhila, Optimisation du fonctionnement d’un générateur photovoltaïque par guidage automatique des panneaux solaires, Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes Sidi-Bel-Abbes, 2018.
- [5] Boulahbal Amina Etude et simulation du fonctionnement du système suiveur des panneaux solaires, Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2015 /2016.

3.1 Mesure de l'éclairement

3.1.1 Qu'est-ce que la lumière (l'éclairement)?

La lumière est une grandeur physique notée E , se mesurant à l'aide d'un solarimètre qui permet de rendre compte de la luminosité plus ou moins forte d'une source lumineuse. Plus la source paraît intense, plus son éclairement E est élevé.

3.1.2 Le Solarimètre

Le Solarimètre est un instrument à affichage digital qui sert à mesurer l'intensité du rayonnement solaire, **Figure 3.1**. Il pourra également servir pour déterminer l'angle d'incidence optimal lors du positionnement d'un panneau solaire. Il conviendra aussi pour la météorologie (Luminosité du ciel) ou pour mesurer la lumière reçue au sol.



Figure 3.1 : Solarimètre Digital

3.1.3 Les différents types de capteurs de lumière

Le capteur de lumière est un circuit électronique ou un simple composant électronique (éventuellement une simple résistance) qui permet de faire le lien entre la grandeur physique (lumière) et une grandeur électrique. On distingue trois types de capteurs de lumière :

3.1.3.1 Les photorésistances (ou LDR) :

3.1.3.1.1 Description

La photorésistance est un dipôle électrique dont la résistance varie en fonction de l'éclairement E qu'elle reçoit d'une source de lumière. La partie du capteur sensible à la

Chapitre 3 : Aspects théoriques

lumière est une piste à base de sulfure de cadmium qui se présente sous la forme d'une ligne brisée, **Figure 3.2**. L'énergie lumineuse reçue provoque une augmentation des porteurs de charges libres dans ce matériau aboutissant à une diminution de la résistance électrique. Ce composant optoélectronique est également connu sous le nom LDR (*Light Dependent Resistor*) qui comme son anglais l'indique est une résistance dont la valeur est fonction du niveau de la lumière.



Figure 3.2: La Photorésistance

3.1.3.1.2 Courbe d'étalonnage de la photorésistance

La courbe d'étalonnage de la photorésistance sert à établir une relation mathématique entre la tension mesurée aux bornes de la photorésistance et la lumière reçue $R_{\text{photo}} = f(E)$ de manière à modéliser l'évolution de la tension en fonction des valeurs de l'intensité de la lumière captée par la photorésistance, **Figure 3.3**. La photorésistance est souvent utilisée dans les circuits de détection de la lumière (ou de l'obscurité).

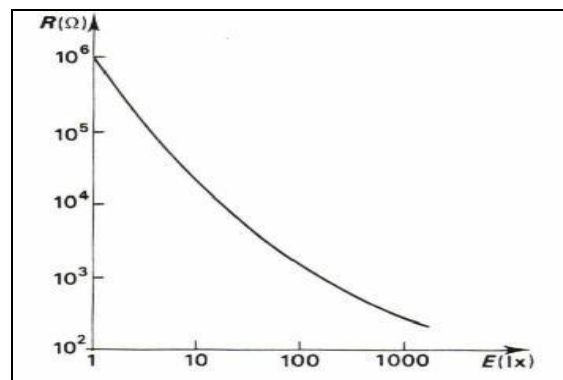


Figure 3.3 : Courbe d'étalonnage de la photorésistance

3.1.3.2 Les photodiodes

3.1.3.2.1 Description

Une photodiode est un composant semi-conducteur ayant la capacité de capter l'éclairement E reçu d'une source de lumière et de le transformer en signal électrique. La photodiode présente des caractéristiques indéniablement meilleures que celles de la photorésistance, à savoir :

- rapidité de réaction aux changements de luminosité ;
- relation linéaire entre le courant qui la traverse et l'éclairement reçu.



Figure 3.4: La Photodiode

3.1.3.2.2 Caractéristique de la photodiode

Elle dépend de l'éclairement lumineux reçu par la photodiode et du spectre de la lumière reçue (donc de la longueur d'onde λ). En polarisation inverse, la photodiode présente une très grande résistance et se comporte comme un "interrupteur ouvert". Au contraire, dans le sens direct, la photodiode possède une très faible résistance et se comporte donc comme un "interrupteur fermé". La caractéristique théorique d'une photodiode est donnée sur la figure suivante :

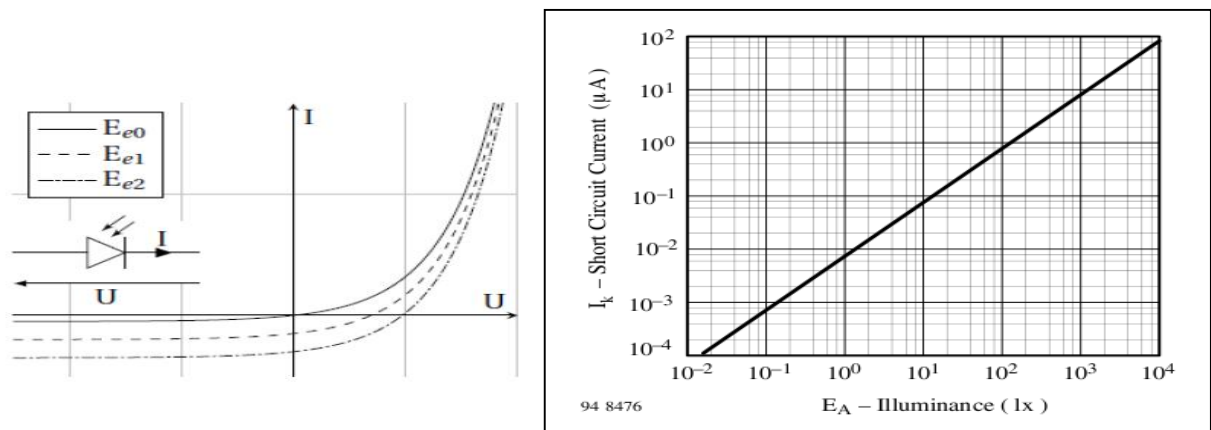


Figure 3.5 : Caractéristiques $I(U)$ et $I(E)$ d'une photodiode

La **figure 3.5** montre que le courant I dans la diode lorsqu'elle est polarisée en inverse est proportionnel à l'éclairement. Ainsi, la mesure de I est une mesure directe de la puissance lumineuse reçue par la photodiode [1].

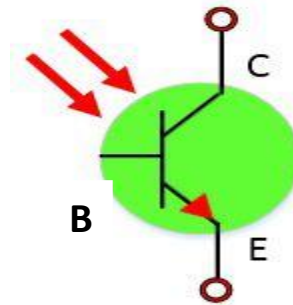
3.1.3.3 Les Phototransistors

3.1.3.3.1 Description

Un phototransistor est un transistor bipolaire dont la base est sensible au rayonnement lumineux. Lorsque la base n'est pas éclairée, le transistor est parcouru par un courant de fuite, très faible. Lorsque la base est éclairée, il apparaît un photo-courant I_{ph} dans la jonction collecteur-base qui augmente avec l'éclairement.



Un Phototransistor



Symbole du Phototransistor

Figure 3.6: Le Phototransistor

Le phototransistor possède des performances similaires à celles de la photodiode mais avec les propriétés additives suivantes :

- Grande sensibilité, amplification de courant.
- Faible temps de réponse (lente diffusion des porteurs dans la base).

3.1.3.4 Choix du type de Capteur

A la lumière de ces informations sur les différents capteurs de lumières, il ressort que la photodiode semble être le composant optoélectronique adéquat pour notre montage quant à la collecte et la mesure de la lumière (linéarité et disponibilité du composant). La photorésistance est à écarter en raison de la non-linéarité de la fonction $I(E)$.

3.2. Conversions Analogique/Numérique et Numérique/Analogique

Le domaine de l'électronique est divisé en deux branches distinctes :

Le domaine de l'analogique où les grandeurs électriques peuvent prendre une infinité de valeurs différentes de sorte que les signaux peuvent varier continûment. A ce propos, tous les signaux issus des capteurs sont analogiques et traduisent des phénomènes physiques qui varient continuellement.

Chapitre 3 : Aspects théoriques

Le domaine numérique où les grandeurs électriques prennent uniquement deux valeurs distinctes, appelées états que l'on nomme communément : état haut et état bas.

Le domaine numérique s'est beaucoup développé grâce aux progrès réalisés par la microélectronique et les innombrables horizons ouverts par les applications liés aux microprocesseurs. Le domaine numérique est maintenant prédominant. Beaucoup de signaux traités auparavant de façon analogique le sont aujourd'hui par programmation des microprocesseurs.

Les grands avantages introduits par la numérisation des signaux sont la possibilité de stockage, de transformation et de restitution des données sans qu'elles ne soient altérées. Le traitement des données par programmation introduit aussi une souplesse dans la conception des produits électroniques : un même circuit électronique à base de microprocesseurs pourra traiter des signaux différents et être orientés vers des applications diverses qui ne sont limitées que par l'imagination du concepteur. D'une application à une autre, seul le programme change ainsi que les périphériques liés à cette application. De par cette standardisation, les coûts des produits électroniques sont très largement réduits. La même carte étant utilisée pour plusieurs fonctions différentes.

L'électronique analogique nécessiterait, au mieux, un changement des composants, au pire, la conception d'une nouvelle carte pour chaque changement dans le cahier de charge d'une même application.

Néanmoins, à la base de toutes ces applications, les signaux traités sont toujours de nature analogique qui sont souvent de faible amplitude. Il faut donc les amplifier et éventuellement les extraire (filtrer) des signaux parasites. Aussi, le domaine analogique va toujours exister au moins en amont de toute chaîne de traitement. En outre, à la sortie de cette chaîne de traitement, nous avons généralement besoin d'un signal analogique pour qu'il soit possible de le percevoir par l'utilisateur humain.

En conséquence est-il indispensable de convertir, par deux fois, le signal traité par la chaîne numérique à base du microprocesseur. La première fois, il faut le convertir en amont de cette chaîne du domaine analogique vers le domaine numérique afin de permettre au microprocesseur de faire les traitements nécessaires et stockages éventuels. En aval de cette chaîne, il est aussi nécessaire de reconvertir une seconde fois ce signal du domaine numérique au domaine analogique pour qu'il soit compréhensible par l'homme.

Le passage d'un type de données à l'autre est effectué par des convertisseurs. Il existe deux catégories de convertisseurs : Convertisseurs Analogique Numérique (CAN) et Convertisseurs Numérique Analogique (CNA).

3.2.1 Les Convertisseurs Analogique/Numérique

Les convertisseurs Analogique/Numérique CAN (ou ADC en anglais, pour *Analog to Digital Converter*) transforment les tensions analogiques en signaux de type logique aptes à être traités par le microprocesseur : c'est l'opération de numérisation du signal, [figure 3.7](#).

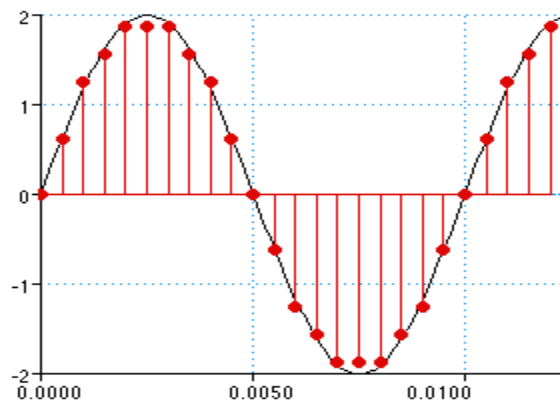


Figure 3.7 : Signal analogique numérisé [2]

3.2.2 Les Convertisseurs Numérique/Analogique

Les convertisseurs Numérique/Analogique CNA (ou DAC en anglais, pour *Digital to Analog Converter*) convertissent les signaux logiques en une tension ou un courant continus proportionnels à cette valeur numérique, [figure 3.8](#).

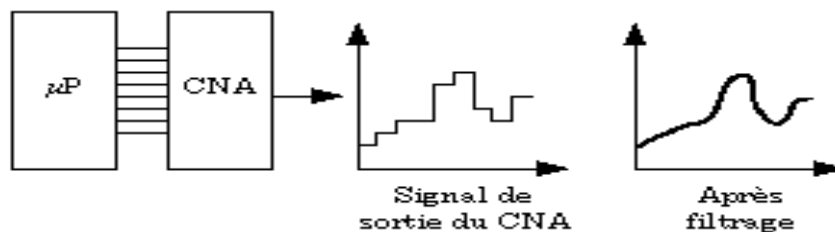


Figure 3.8 : Conversion numérique analogique [2]

La plupart des circuits CNA sont de type parallèle, cela signifie que tous les bits du mot numérique à convertir et présentés à l'entrée du CNA agissent en même temps sur les différents circuits constituant ce convertisseur. Ainsi donc, le signal analogique de sortie est

disponible en un temps plus court et il est utilisable au bout d'un certain temps, appelé temps d'établissement.

Les CNA sont utilisés dans plusieurs domaines : tels que la visualisation, la synthèse de la parole, le contrôle des processus, ..., etc. Ils jouent également un rôle important dans les convertisseurs CAN car ces derniers comportent souvent un ou plusieurs circuits CNA.

3.3 Les systèmes à microprocesseurs

3.3.1 Introduction

Le progrès constant en matière de fabrication de composants électronique à base de semi-conducteurs ont permis la réalisation de circuits intégrés de plus en plus complexes. La complexité de ces circuits (le nombre de transistors intégrés sur une seule puce de silicium double tous les dix-huit mois) ne cessant de croître, cela a abouti à la création des premiers processeurs intégrés au début des années 70. Cette révolution conjuguée avec la fusion des technologies de l'informatique et de l'électronique ont ouvert d'innombrables champs d'applications aux circuits intégrés en général et à la famille des circuits processeurs en particulier qui ont vus s'ouvrir des horizons très divers qui vont de l'industrie de l'armement et de l'aérospatial jusqu'aux télécommunications en passant par le génie biomédical, l'éducation, l'audiovisuel, la domotique, l'automobile, l'agriculture, ... et tout type d'ingénierie. Au final, pratiquement toutes les industries et toutes les économies mondiales sont devenues aujourd'hui de plus en plus dépendantes des technologies des microprocesseurs que ce soit pour le stockage, le transfert, la récupération ou le traitement des informations.

3.3.2 Architecture d'un système à base de microprocesseur

Un système à base de microprocesseur est essentiellement formé des trois organes suivants :

- Une unité CPU (Central Processing Unit)
- Une mémoire (ROM et RAM)
- Des circuits d'entrées/sorties.

Les trois modules sont interconnectés entre eux, comme le montre la [figure 3.9](#), par l'intermédiaire de trois bus : bus de données, bus d'adresses et bus de contrôle et commande. Le terme 'bus' désigne un ensemble de fils (ou lignes électriques) qui relie le microprocesseur à ces différents circuits connexes (mémoires, circuits d'entrées/sorties) d'une

Chapitre 3 : Aspects théoriques

part et autres circuits périphériques (capteurs, interrupteurs, clavier, moteurs, diodes LED, imprimantes, ...) d'autre part. Ces bus assurent en définitive la communication interne et externe du microprocesseur [3].

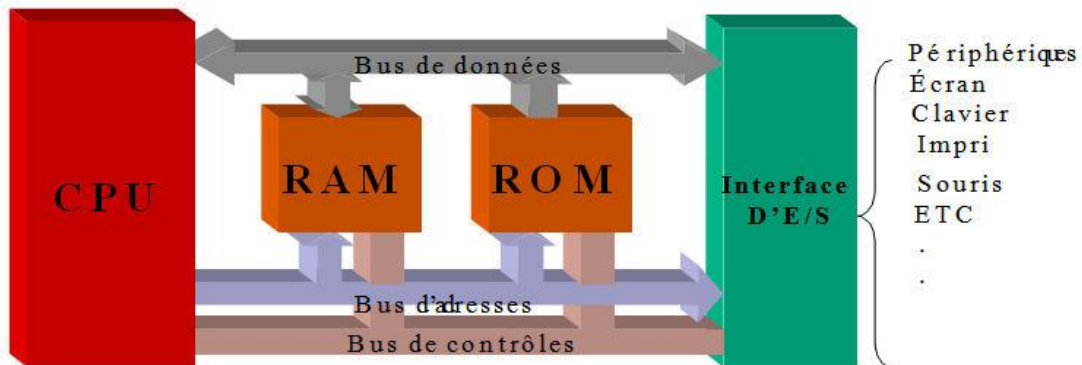


Figure 3.9 : Les éléments d'un système à microprocesseur [3]

3.3.3 Le microprocesseur Intel 8086

3.3.3.1 Description physique du microprocesseur 8086

Le microprocesseur Intel 8086 est un microprocesseur 16 bits, apparu en 1978. C'est le premier microprocesseur de la famille Intel 80x86 (8086, 80186, 80286, 80386, 80486, Pentium, ...). Il se présente sous la forme d'un boîtier DIP (*Dual In-line Package*) à 40 broches, figure 3.10.

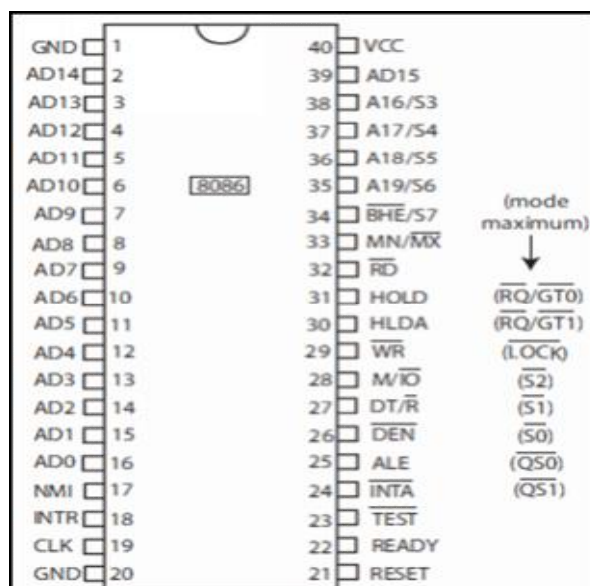


Figure 3.10 : Broches du microprocesseur 8086

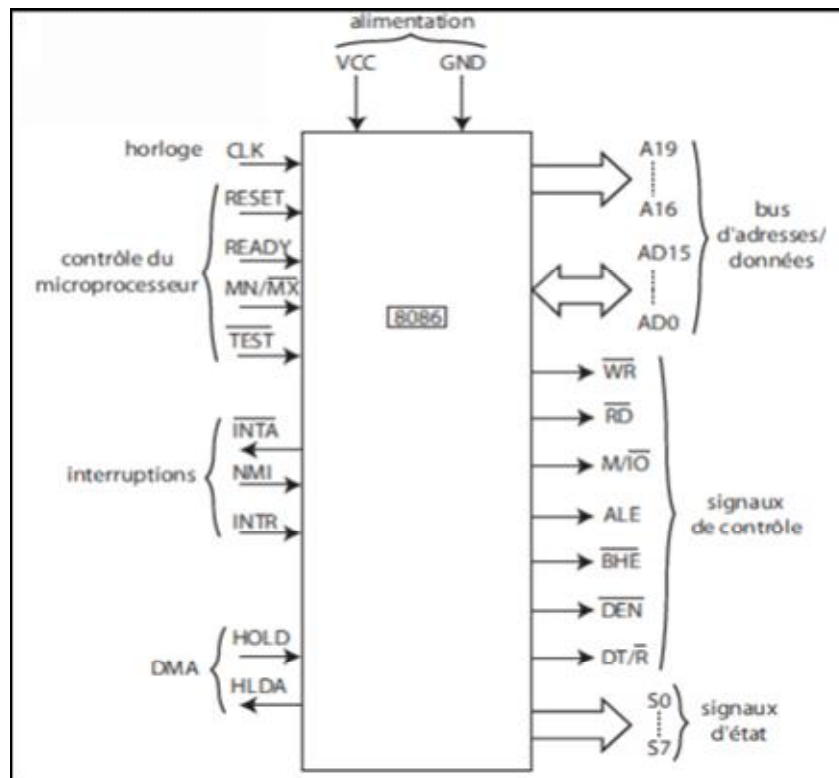


Figure 3.11 : Brochage et signaux externes du microprocesseur 8086

3.3.3.2 Brochage et signaux externes du 8086

Le 8086 est équipé d'un bus de données de 16 bits et d'un bus d'adresses de 20 bits, **figure 3.11**. Il est cadencé à des fréquences diverses selon plusieurs variantes : 5, 8 ou 10 MHz [4].

3.3.3.3 Architecture interne du 8086

Le microprocesseur est composé de deux unités internes distinctes : L'unité d'exécution (UE) et l'unité d'interfaçage avec le bus (UIB).

Le rôle de l'UIB est de récupérer les données et les instructions depuis les circuits mémoires externes pour les transmettre vers l'unité d'exécution. L'unité UIB assure donc l'interface physique entre le microprocesseur et le monde extérieur.

L'UE exécute les instructions qui lui sont transmises par l'UIB. On y trouve essentiellement l'unité de traitement arithmétique et logique (UAL) qui manipule des registres généraux de 16 bits [4]. Le schéma de la **figure 3.12** présente l'architecture interne du microprocesseur 8086. Précisons de suite que les processeurs actuels de la famille x86 traitent les informations de la même façon.

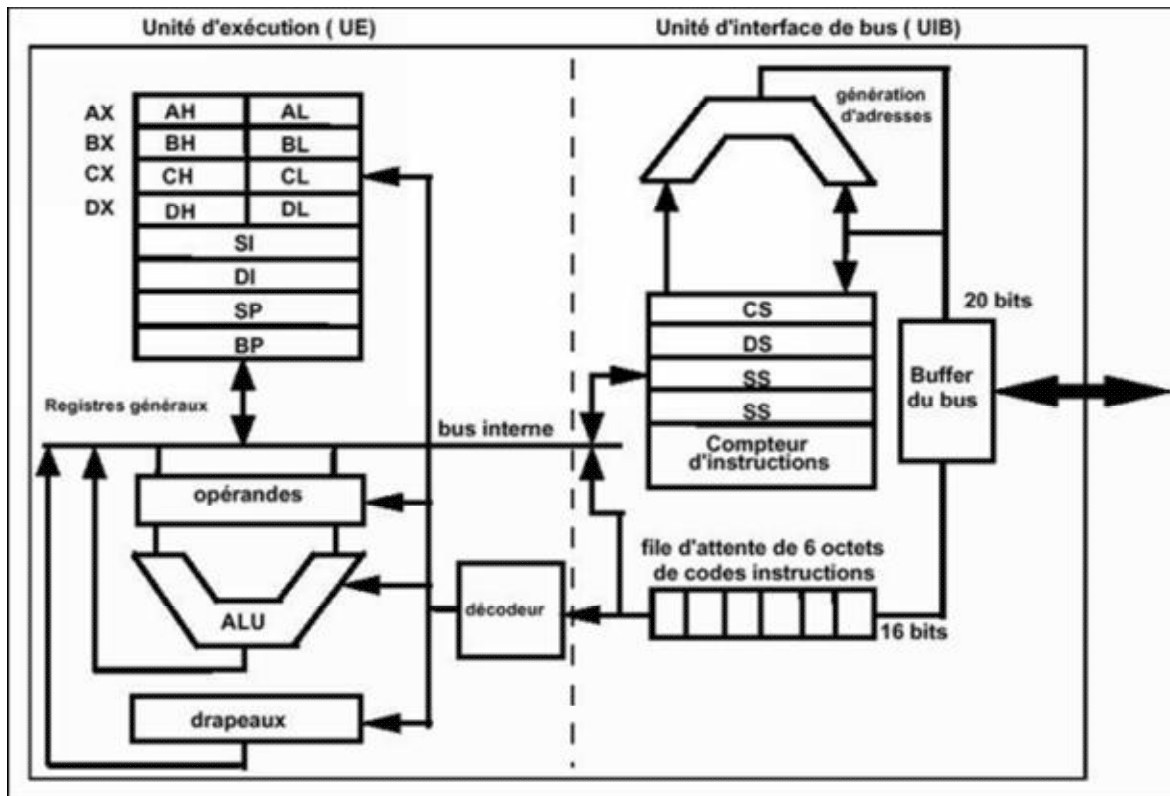


Figure 3.12: Architecture interne du microprocesseur 8086 [4]

La figure 3.12 fait apparaître un schéma détaillé de l'architecture interne du 8086. On y retrouve essentiellement dans l'UE l'unité de calcul (UAL), quatre registres généraux AX, BX, CX et DX, deux registres d'index SI et DI, deux registres de base SP et BP ainsi que le registre d'état. De l'autre côté, la BIU comprend une unité de traitement pour le calcul des adresses, un registre pointeur d'instructions IP, quatre registres segments CS, DS, SS et ES et une pile de 6 octets (file d'attente).

3.3.3.4 Les registres internes du 8086

Il y a plusieurs types de registres. Certains d'entre eux sont utilisés pour des opérations d'ordre général et sont accessibles, à tout moment, au programmeur au moyen du jeu d'instructions. Nous disons alors qu'il s'agit de registres généraux. D'autres registres ont des rôles bien plus spécifiques et ne servent qu'à un usage spécialisé [4]. Nous allons dans ce qui suit rappeler brièvement les rôles remplis par ces différents registres.

3.3.3.4.1 Les registres généraux

Les registres généraux sont utilisés pour y faire exécuter tout type d'opérations quelque soit sa nature : logique ou arithmétique. Comme le montre la [figure 3.13](#), chacun de ces registres peut être scindé en deux registres distincts de 8 bits chacun [4].

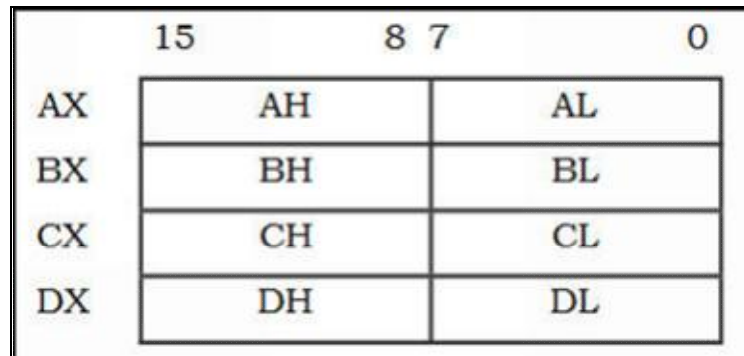


Figure 3.13 : Les registres à usage général

Le registre AX (accumulateur) : Est le registre qui est le siège à toutes les opérations arithmétiques et logiques. En outre, les opérations de traitement des chaînes de caractères se font dans ce registre, de même que les conversions en BCD du résultat d'une opération arithmétique (addition, soustraction, multiplication et la division).

Le registre BX (registre de base) : Est utilisé pour l'adressage des données situées dans une zone mémoire différente de la zone du programme.

Le registre CX (compteur) : Lors de l'exécution d'une boucle, on a souvent recours à un compteur de boucles pour compter le nombre des itérations. Le registre CX est généralement utilisé à cet effet. A noter, par ailleurs, que le registre CL sert exclusivement en tant que compteur du nombre de décalages et de rotations dans les instructions de décalage et de rotation.

Le registre DX : Est principalement utilisé pour l'extension à 32 bits des registres du 8086 afin de contenir soit le dividende soit le résultat de la multiplication dans les instructions de division ou de multiplication respectivement. En outre, le registre DX est prévu pour contenir le numéro d'un port d'entrée/sortie lors de l'adressage des interfaces d'E/S.

3.3.3.4.2 Les registres de base et d'index :

Ces registres sont plus spécialement adaptés au traitement des informations dans la mémoire. Ils sont en général munis de propriétés d'incrément et de décrémentation [4].

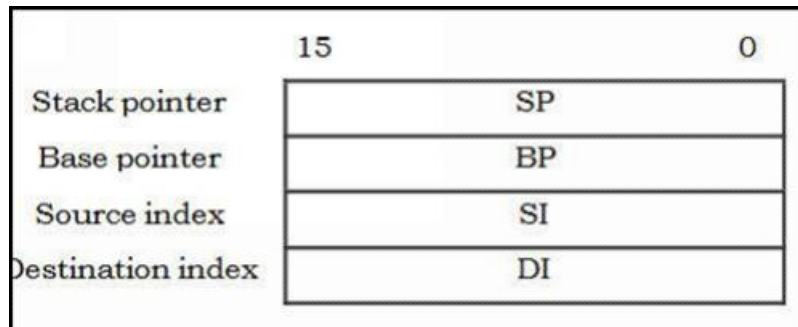


Figure 3.14 : Les registres de base et d'index

Le Pointeur de pile (Stack Pointer SP) : Ce registre permet de pointer la pile afin d'y sauver des données ou des adresses selon le principe du "Dernier en Entrée Premier en Sortie". Ces piles sont connues sous le nom de pile LIFO : *Last In First Out*, en anglais.

Le registre d'index SI (Source Index) : Permet de pointer une cellule mémoire. Il contient en général un décalage (*offset*) par rapport à une adresse de base fixe (contenue dans le registre DS). Il est également employé dans les instructions de chaîne de caractères. En effet, il est utilisé pour pointer le caractère de la chaîne "source".

Le registre d'index DI (Destination index) : Est un registre identique au registre SI à la différence près qu'il est exclusivement associé au registre ES pour pointer un caractère de la chaîne "destination" dans les instructions de chaîne de caractères.

Les pointeurs SP et BP (Stack Pointer et Base Pointer) : Pointent sur la zone pile. Ils sont combinés avec le registre SS pour calculer l'adresse effective dans la zone mémoire de la pile.

3.3.3.4.3 Les registres segment :

Au nombre de quatre, le registre CS (*Code Segment*), le registre DS (*Data Segment*), le registre SS (*Stack Segment*) et le registre ES (*Extra Segment*) sont des registres de 16 bits chacun, figure 3.15. Ces registres sont chargés de pointer séparément le début de quatre zones mémoires distinctes de 64 ko chacune (appelées segments de mémoire) destinées à contenir

Chapitre 3 : Aspects théoriques

respectivement les programmes, les données du programme, les données de la pile et enfin d'autres données supplémentaires.

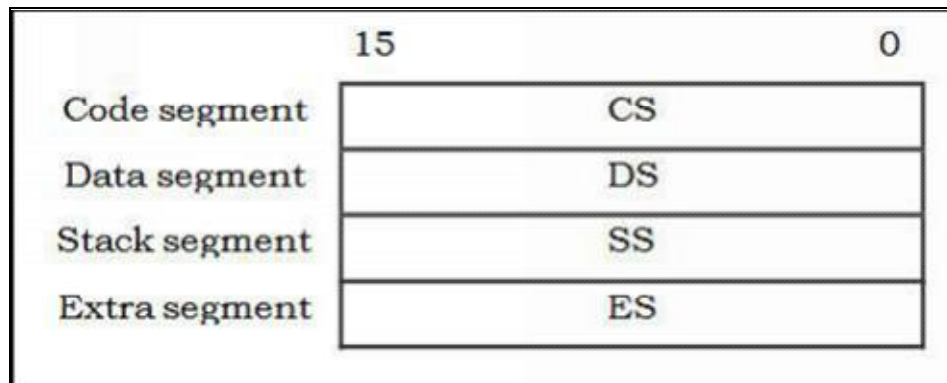


Figure 3.15 : Les registres de segment

Le registre CS (Code Segment) : Pointe le segment mémoire qui contient les codes des instructions du programme en cours. Si la taille du programme dépasse les 65 535 octets alors on peut partager le programme sur plusieurs segments (chacun ne dépassant pas les 64 ko). Ensuite, pour basculer d'une partie d'un programme à une autre, il suffit de changer la valeur du registre CS. De cette manière, on résout le problème des programmes très longs.

Le registre DS (Data Segment) : Pointe le début de la zone mémoire contenant les variables du programme. Bien entendu, si la taille des données dépasse 65 535 octets, on utilise le même artefact cité précédemment avec le changement, dans ce cas, de la valeur de DS.

Le registre ES (Extra Segment) : Est un registre des données supplémentaires. Il est utilisé par le microprocesseur lorsque l'accès aux autres registres est devenu difficile ou impossible pour modifier des données. De même, ce segment est utilisé pour le stockage des chaînes de caractères.

Le segment SS (Stack Segment) : Pointe le début de la zone segment contenant les données de la pile. La pile est une zone mémoire où l'on peut y sauvegarder les contenus (adresses ou données) des divers registres du 8086 pour pouvoir ensuite les récupérer à la fin de l'exécution d'un sous-programme (Procédure) ou d'un programme d'interruption. En général, il est conseillé de ne pas modifier le contenu de ce registre car on risque alors de perdre des

informations très importantes concernant l'historique du microprocesseur (et relatif au passage d'arguments entre le programme principal et le sous-programme).

3.3.3.4.4 Le registre pointeur d'instructions

Le **registre pointeur d'instructions** (*Instruction Pointer register IP*, en anglais) est un registre à 16 bits, **figure 3.16**. Il contient l'adresse de l'emplacement mémoire où se situe la prochaine instruction à exécuter. Le registre IP est constamment modifié en amont au cours de l'exécution d'une instruction (i), par exemple, afin qu'il soit toujours prêt pour pointer l'instruction suivante (i+1) dès que l'exécution de l'instruction (i) est achevée [4].

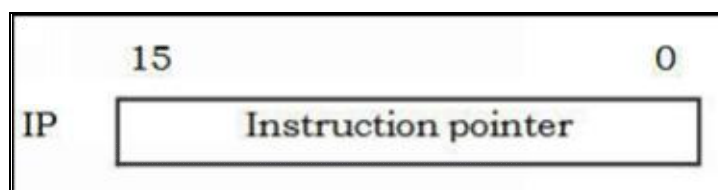


Figure 3.16 : Le registre IP Pointeur d'instruction

3.3.3.4.5 Le registre d'état (Flag register)

Le **registre d'état** (registre à 16 bits) sert à contenir l'état de certaines opérations effectuées par le processeur. Par exemple, quand le résultat d'une opération est trop grand pour être contenu dans le registre destination (celui qui doit contenir le résultat de l'opération), un bit spécifique du registre d'état (appelé le bit CF) est mis à 1 pour indiquer ce dépassement [4].

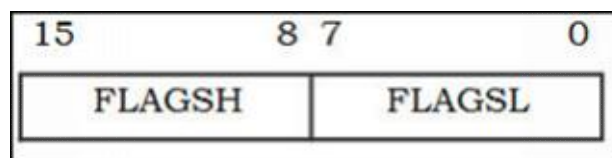


Figure 3.17 : Le registre d'état

Le registre d'état du microprocesseur 8086 contient neuf bits d'état différents. L'octet faible du registre d'état contient les cinq bits d'état du microprocesseur 8085 (le prédécesseur du 8086) auxquels les ingénieurs d'Intel ont rajouté quatre nouveaux bits d'état. La **figure 3.18** présente les neuf bits d'état du 8086 :

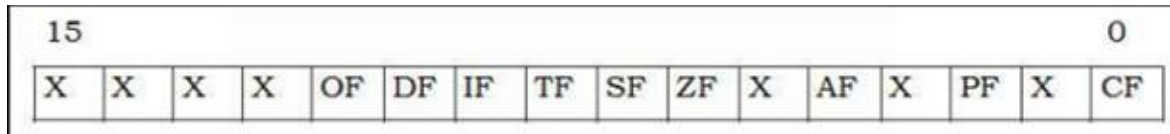


Figure 3.18 : Les bits d'état du registre d'état du 8086

- **CF (Carry Flag)** : Indicateur de dépassement de la capacité du registre.
- **PF (Parity Flag)** : Indicateur du nombre de bits égal à 1.
- **AF (Auxiliary Carry)** : Indicateur d'un dépassement du bit 3 vers le bit 4.
- **ZF (Zero Flag)** : Indicateur d'un contenu nul.
- **SF (Sign Flag)** : Indicateur du signe du résultat, positif ou négatif.
- **TF (Trap Flag)** : Bit d'état permettant au microprocesseur d'exécuter un programme en mode pas à pas.
- **IF (Interrupt Flag)** : Bit d'état utilisé pour masquer une demande d'interruption ou bien l'autoriser.
- **DF (Direction Flag)** : Incrémentation/Décrémentation du pointeur utilisé pour pointer la position d'un caractère d'une chaîne de caractères.
- **OF (Overflow Flag)** : Indicateur d'un débordement sur le bit signe.

X : bit non utilisé (non significatif).

3.3.4 Système à microprocesseur :

3.3.4.1 Introduction :

Pour être opérationnel et utile le microprocesseur a besoin de circuits connexes. En plus d'un microprocesseur, un système à microprocesseur comprend également des circuits mémoires et des circuits d'entrées-sorties. A ces circuits intégrés semi-conducteurs, il faut ajouter des périphériques d'entrées (tels qu'un clavier, des interrupteurs et des capteurs analogiques ou numériques) et des périphériques de sorties (tels qu'un afficheur, des diodes LED ou bien même ... les essuie-glaces d'un véhicule). L'ensemble de tous ces circuits sont appelés un système à microprocesseur.

Il faut préciser que les périphériques d'entrées et les périphériques de sorties sont aussi divers et innombrables que le sont les applications électroniques que l'on souhaite commander à l'aide d'un système programmable. D'où l'intérêt énormes des systèmes à microprocesseur. Aussi, avons-nous besoin de circuits d'entrées-sorties spécialisés afin

Chapitre 3 : Aspects théoriques

d'assurer l'interfaçage entre le microprocesseur d'une part, et les différents périphériques dans toute leur diversité, d'autre part.

Les circuits d'entrées-sorties peuvent être spécialisés tel que le contrôleur d'écran MC 6845 de Motorola, le contrôleur de disquettes μ PD 765 de NEC, ... ; ils peuvent être également à usage général comme l'interface parallèle programmable 8255 de Intel, l'interface série asynchrone 8251 de Intel, le contrôleur programmable d'interruptions 8259 de Intel, le timer programmable 8253 de Intel, ...

Ce dernier type de circuits d'E/S, qui sont à usage général, peuvent être utilisés dans des domaines aussi divers que le transport, l'agriculture, la surveillance, ..., etc. A ce propos, nous allons passer brièvement en revue un seul de ces circuits d'entrées-sorties à usage général, l'interface parallèle programmable 8255A que nous rencontrons souvent dans les systèmes à commande programmée [5].

3.3.4.2 Interface parallèle programmable 8255A

3.3.4.2.1 Présentation du circuit 8255A

Le circuit 8255, appelé aussi PPI 8255 pour *Périphérique Programmable Interface* en anglais, est un circuit intégré programmable de 40 broches. Il permet d'interfacer divers types de périphériques avec le microprocesseur. Il dispose de trois ports d'entrées/sorties. Chaque port contient 8 lignes qui peuvent être programmées soit en entrées soit en sorties selon trois modes différents (mode zéro, mode un et mode deux).

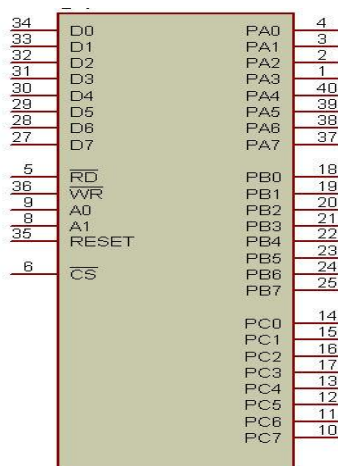


Figure 3.19 : Brochage du 8255A [5]

La figure 3.19 présente le brochage du circuit de l'interface parallèle 8255, nous y trouvons :

Chapitre 3 : Aspects théoriques

- 24 lignes (PA0-PA7 ; PB0-PB7 et PC0-PC7) programmables soit en entrées soit en sorties.
- 8 lignes D0-D7 du bus de données qui relie le 8255 au microprocesseur.
- RD, WR : Les signaux de commande de lecture et d'écriture dans les registres internes du 8255. Ils sont actifs au niveau bas.
- CS : Broche active au niveau bas, elle permet la sélection du boîtier 8255.
- A0-A1 : Permettent la sélection de l'un des quatre registres internes du 8255.
-

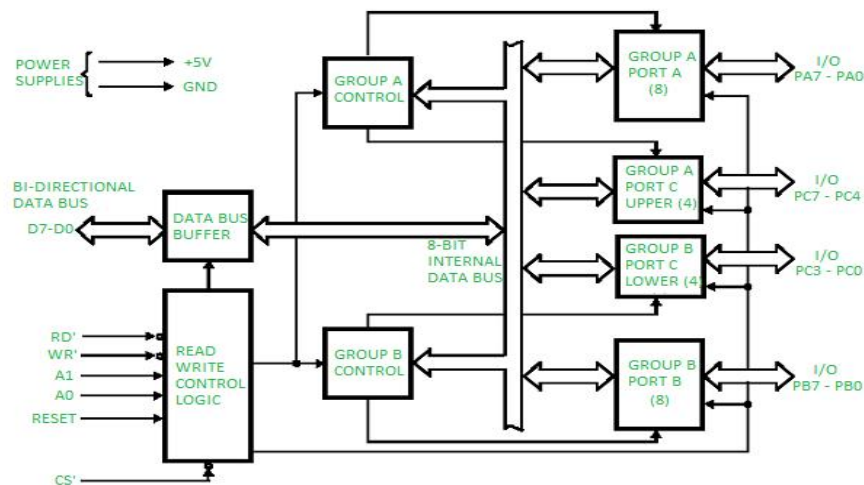


Figure 3.20 : Schéma bloc du 8255A [5]

La figure 3.20 montre le schéma bloc du 8255A. On trouve sur la partie droite de ce schéma les 24 broches d'E/S (I/O en anglais) réparties sur trois ports: Port A, Port B et Port C de 8 bits chacun. Les 8 lignes du port A et du port B sont simultanément programmables soit en entrées soit en sorties, alors que le port C est fragmenté en deux parties : Le port C Haut et le port C Bas. Chacun de ces deux demi-ports sont programmables individuellement en entrées ou en sorties [5].

3.3.4.2.2 Programmation du 8255A :

On peut programmer le 8255A selon trois modes :

- Mode 0 : Entrée/sortie de base.
- Mode 1 : Entrées et sorties échantillonnées.
- Mode 2 : Bus bidirectionnel.

Chapitre 3 : Aspects théoriques

Le format ainsi que le choix des modes se fait à partir du mot de contrôle suivant illustré dans la [figure 3.21](#).

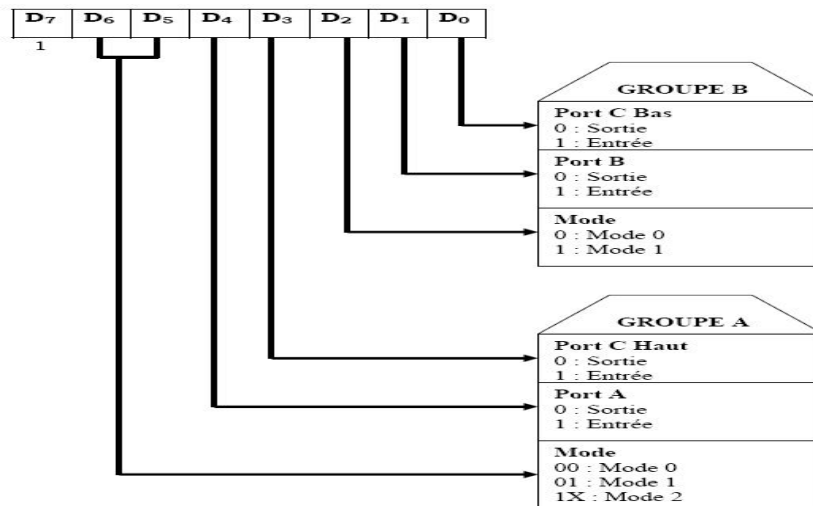


Figure 3.21 : Format du mot de contrôle du 8255A [5]

3.3.4.2.3 Interfaçage du 8255 avec le microprocesseur 8086

Lorsqu'on souhaite commander un périphérique nécessitant des ports d'un seul octet ; dans ce cas, un seul boîtier Intel 8255 sera alors requis et son interfaçage avec le microprocesseur (en mode minimum) est illustré dans la [figure 3.22](#).

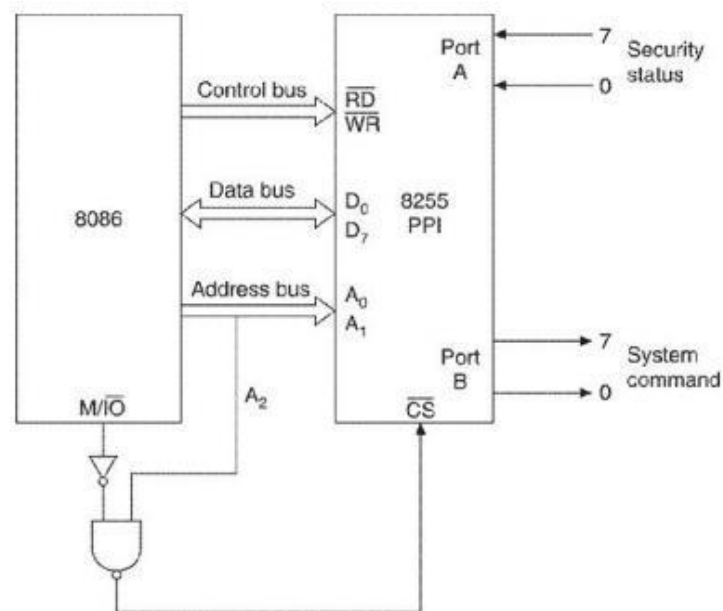


Figure 3.22 : Interfaçage entre le 8086 avec un seul boîtier 8255A [5]

Chapitre 3 : Aspects théoriques

Le périphérique à contrôler est connecté au port B, alors que le port A reçoit les consignes nécessaires à son contrôle. Un seul octet (AD0-AD7 ou bien AD8-AD15) est suffisant pour gérer ce montage.

Par contre dans le cas où l'on souhaite commander des périphériques nécessitant des données de 16 bits, l'emploi de deux boîtiers Intel 8255 devient alors nécessaire et c'est tout le bus de données de 16 bits du microprocesseur 8086 qui sera utilisé. La [figure 3.23](#) montre un exemple de cet interfaçage.

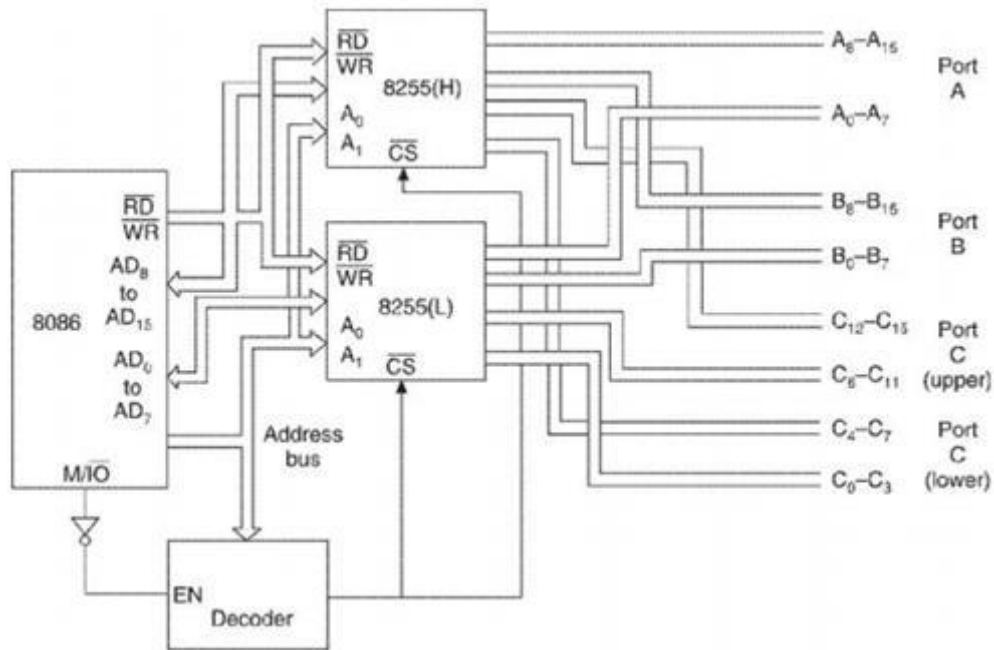


Figure 3.23 : Interfaçage entre deux boîtiers 8255A avec le 8086 [5]

Le bus de données du microprocesseur 8086 est fragmenté en deux groupes de 8 bits (AD0-AD7 et AD8-AD15). Chacun étant relié à un circuit 8255. Le décodeur d'adresses génère, quant à lui, le signal de sélection permettant d'activer simultanément les deux circuits 8255 (H) et 8255 (L). En même temps, les lignes A1 et A2 du bus d'adresses du microprocesseur (reliées aux broches A0 et A1) sont destinées à choisir un registre parmi les quatre registres internes de chaque circuit 8255.

3.4 Le moteur pas à pas

3.4.1 Définition

Un moteur pas à pas est un actionneur qui transforme une information numérique sous forme de train d'impulsions en un nombre équivalent de pas angulaires, [figure 3.24](#).

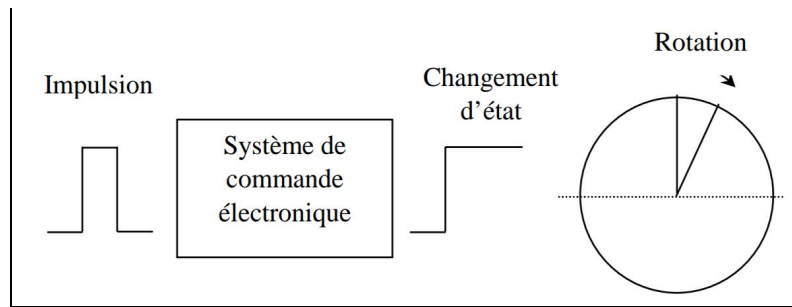


Figure 3.24 : Schéma simplifié du principe de fonctionnement d'un moteur pas à pas

3.4.2 Constitution

Les moteurs pas à pas sont constitués de deux parties : un rotor et un stator.



Figure 3.25 : Constitution d'un moteur pas à pas

On rencontre plusieurs types de moteurs pas à pas qui se différencient les uns des autres par :

- le stator : unipolaire ou bipolaire
- le rotor : à aimant permanent, à réluctance variable ou hybride.

3.4.3 Différents types de moteur pas à pas

3.4.3.1 Moteur pas à pas à aimant :

Malgré son couple élevé, il a un nombre de pas par tour limité (en général de 2 à 24). Ce nombre de pas dépend du nombre de phases et du nombre de pôles par phase.

3.4.3.2 Moteur pas à pas à réluctance variable :

Le couple fourni par ce moteur est plus faible que celui d'un moteur à aimant et il n'existe pas de couple de maintien en cas de suppression de l'alimentation.

3.4.3.3 Moteurs pas à pas hybrides :

Ce type de moteur réunit les avantages du moteur à aimant (couple élevé) et à réluctance (nombre de pas par tour élevé) en associant les deux principes.

Malgré les différences existant entre les moteurs, le résultat est l'avance d'un seul pas. En d'autres termes, la rotation de leur axe suivant un angle bien déterminé à chaque impulsion. Cet angle, qui varie selon la constitution interne du moteur, est généralement compris entre 0° et 90° . Les moteurs les plus rencontrés présentent des pas de :

- $0,9^\circ$: soit 400 pas par tour,
- $1,8^\circ$: soit 200 pas par tour,
- $3,6^\circ$: soit 100 pas par tour,
- $7,5^\circ$: soit 48 pas par tour,
- 15° : soit 24 pas par tour

3.4.4 Principe de fonctionnement d'un moteur pas à pas

Il est évident que la circulation d'un courant électrique dans un bobinage entraîne l'apparition d'un champ magnétique. Dans tous les types de moteur, on positionne le rotor en modifiant la direction d'un champ magnétique créé par les bobinages du stator.

L'alimentation de chaque bobinage du moteur par une tension particulière provoque l'apparition d'un courant qui engendre un champ magnétique de direction précise. Le changement séquentiel des tensions particulières à chaque bobinage permet de déplacer la position du champ statorique selon une résolution élémentaire appelée pas. Autrement dit, toutes les configurations des tensions aux bornes des bobinages correspondent à un déplacement de la position stable du rotor, [figure 3.26](#). Une série bien déterminée de commutation de tensions entraîne un déplacement sur un nombre correspondant de pas. La succession des configurations d'alimentation, à une fréquence donnée, impose un champ statorique tournant avec une résolution d'un micro pas, d'un demi pas ou d'un pas entier [\[6\]](#).

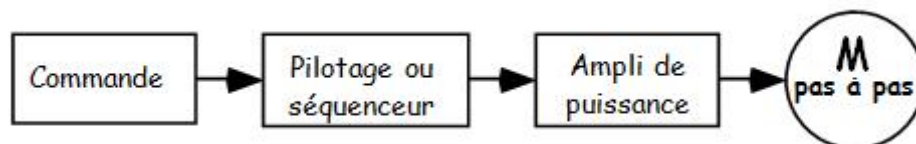


Figure 3.26: Principe de fonctionnement d'un moteur pas à pas [\[7\]](#)

3.4.5 Alimentation des phases du moteur pas à pas

Le fonctionnement des moteurs pas à pas repose sur l'alimentation successive des enroulements stator (ou phase). Pour cela, une impulsion électrique est générée par un séquenceur agissant sur une électronique de commutation (drivers ou transistors de puissance) qui distribue les polarités dans les enroulements. Une seule commutation provoque un seul pas quelle que soit la durée de l'impulsion (qui doit être supérieure à une valeur minimale).

3.4.5.1 Moteur unipolaire (ou à quatre phases). Commutation unipolaire

Les enroulements sont à point milieu, les bornes sont toujours alimentées par une polarité de même signe, [figure 3.27](#).

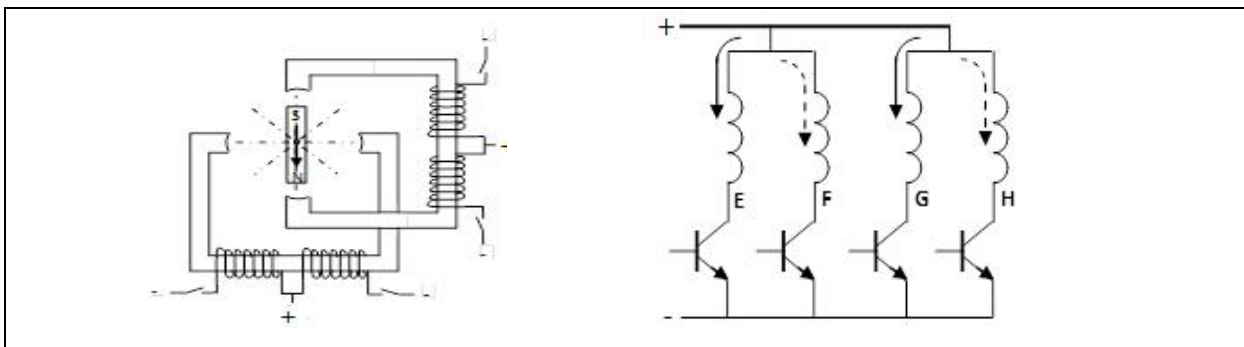


Figure 3.27 : Alimentation d'un moteur unipolaire [7]

3.4.5.2 Moteurs bipolaires

Ils ont 4 fils et sont pilotés en inversant le sens du courant dans une des deux bobines, qui sont alimentés une fois dans un sens et une fois dans l'autre sens. Ils créent une fois un pôle Nord et une autre fois un pôle Sud, d'où le nom de bipolaire, [figure 3.27](#) [7].

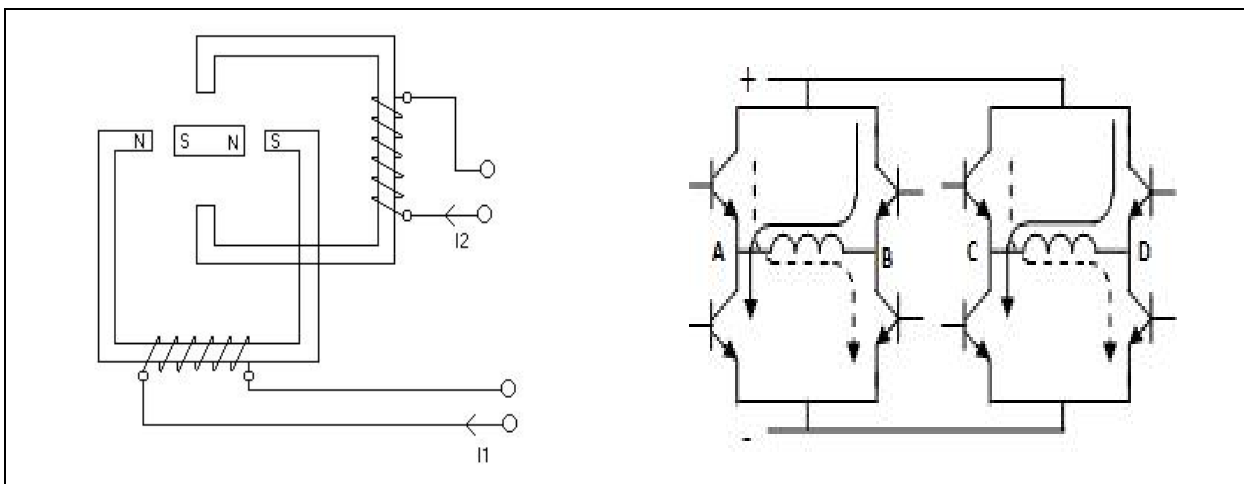


Figure 3.28 : Alimentation d'un moteur bipolaire [7]

Chapitre 3 : Aspects théoriques

Les enroulements du stator n'ont pas de point milieu. Chaque borne de chaque enroulement est alimentée par une polarité positive puis négative.

3.4.6 Modes de commande (ordre d'alimentation des phases)

Les signaux de commande d'un moteur à 2 ou 4 phases sont absolument identiques. Dans notre cas, il s'agit d'un moteur pas à pas unipolaire.

L'excitation individuelle des bobines est assurée par l'un des interrupteurs P, R, Q, S. Trois modes de commande sont possibles, **figure 3.29** :

- Commande en mode 1.
- Commande en mode 2.
- Commande en mode 1-2 ou demi-pas **[8]**.

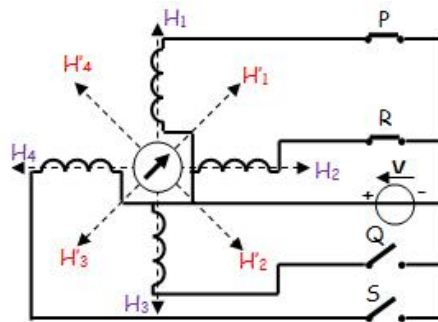


Figure 3.29 : Ordre d'alimentation des bobines (phases) **[8]**

3.4.6.1 Commande en mode 1 (pas entier)

L'excitation individuelle des bobines crée les champs suivants :

$$P \rightarrow H_1, \quad R \rightarrow H_2, \quad Q \rightarrow H_3 \quad \text{et} \quad S \rightarrow H_4.$$

Ce qui donne le cycle de commutation

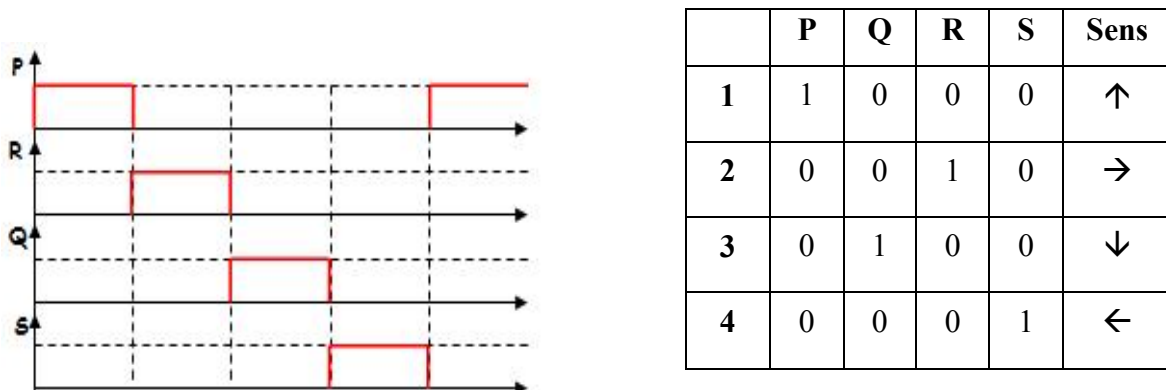


Figure 3.30 : Séquence d'alimentation enroulements du moteur en mode 1 (pas entier) **[8]**

3.4.6.2 Commande en mode 2 (couple fort)

L'excitation individuelle des bobines crée les champs suivants :

$$P \rightarrow H'1, \quad R \rightarrow H'2, \quad Q \rightarrow H'3 \quad \text{et} \quad S \rightarrow H'4.$$

Ce qui donne le cycle de commutation :



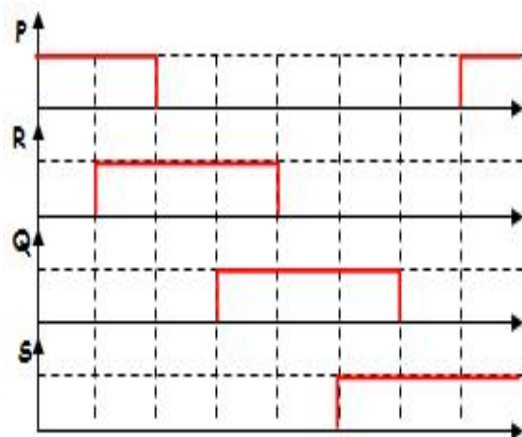
Pas	P	Q	R	S	Sens
1	1	1	0	0	↗
2	0	1	1	0	↘
3	0	0	1	1	↙
4	1	0	0	1	↖

Figure 3.31: Séquence d'alimentation des enroulements du moteur en mode 2 (couple fort) [8]

3.4.6.3 Commande en mode 1-2 ou demi-pas

La combinaison des deux modes permet de doubler le nombre de pas, le rotor s'alignant successivement face à un pôle et entre 2 pôles.

Ce qui donne le cycle de commutation :



Pas	P	Q	R	S	Sens
1	1	0	0	0	↑
2	1	1	0	0	↗
3	0	1	0	0	→
4	0	1	1	0	↘
5	0	0	1	0	↓
6	0	0	1	1	↙
7	0	0	0	1	←
8	1	0	0	1	↖

Figure 3.32 : Séquence d'alimentation des enroulements du moteur en mode 1-2 (demi-pas) [8]

3.4.6.4 Détermination du nombre de pas par tour

Le nombre de pas par tour (*résolution*) est donné par la relation [8] :

$$N_p = m \cdot p \cdot K_1 \cdot K_2$$

m: Nombre de phases au stator ;

p: Nombre de paires de pôles au rotor

K1: Type d'alimentation :

K1 = 1 si alimentation unipolaire,

K1 = 2 si alimentation bipolaire

K2 : Type de commande :

K2 = 1 si le mode 1 ou le mode 2,

K2 = 2 si le mode 1-2 (1/2 pas)

3.4.7 Comparaison des différents types de moteurs pas à pas

Nous résumons dans le **tableau 3.1** les caractéristiques principales de différents types de moteurs pas à pas :

Type de moteur pas à pas	Moteur à réluctance variable	Moteur à aimant permanent	Moteur hybride
Résolution (nbre de pas par tour)	Bonne	Assez peu élevée 100 pas/tr	La plus élevée 400 pas/tr
Couple moteur	Faible	Elevé	Le plus élevé
Sens de rotation	Il dépend de l'ordre d'alimentation des phases	Il dépend de l'ordre d'alimentation des phases, du sens de courant dans les bobines	Il dépend de l'ordre d'alimentation des phases, du sens de courant dans les bobines
Fréquence de travail	grande	Faible	Grande
Puissance	Quelques Watts	Quelques dizaines de Watts	Quelques kW

Tableau 3.1 : Comparaison des différents types de moteurs pas à pas

Bibliographie :

[1] : http://olivier.granier.free.fr/MOOC/co/caract-dipoles_1.html

[2] <http://www.bedwani.ch/electro/ch21/index.htm#C11> Consulté le 25/05/2021

[3] <https://www.technologuepro.com/microprocesseur/introduction-systemes-base-microprocesseur.htm> ; c²onsulté le 17 Mai 2021.

[3] <https://www.technologuepro.com/microprocesseur/introduction-systemes-base-microprocesseur.htm> ; consulté le 17 Mai 2021.

[4] Le microprocesseur 8086 / 8088 [en ligne]

<https://www.technologuepro.com/microprocesseur/microprocesseur-8086-8088.htm> ; consulté le 17 Mai 2021

[5] Kirshan Kant. Microprocessors and Microcontrollers: Architecture, Programming and System Design 8085, 8086, 8051, 8096. Jaypee Institute of Information Technology noida: Kindl edition, 2012, 748p

[6] :« Systèmes électromécaniques » ; Haute Ecole d'ingénierie et de Gestion Du Canton du Vaud, CD/SEM/Cours/Chap07 . M. Correvon.

[7] : <https://www.technologuepro.com/TP-miniprojet-electronique/miniprojet-5-Commande-un-moteur-pas-a-pas.pdf>

[8] : SI – Chaîne d'énergie – unité A.D.C Page 65/70 2STE

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

4.1. Introduction :

Suite à l'étude théorique, et la connaissance du mouvement du soleil pendant la journée, dans ce chapitre nous allons faire la conception d'un tracker solaire pour suivre le soleil tout au long de la journée. Ce projet fait suite à une étude antérieure qui a débuté l'année dernière dont le but principal était l'amélioration du rendement des panneaux photovoltaïques par le recours à un système de refroidissement de manière à maintenir la température des cellules photovoltaïques dans une gamme de température susceptible d'obtenir un fonctionnement optimal de la conversion photovoltaïque [1].

Cette étude sera scindée en deux parties distinctes mais complémentaires. D'abord, nous étudions toute la partie matérielle relative à la carte électronique qui sera constituée de plusieurs fonctions électroniques (acquisition du signal, amplification, contrôle programmé, électronique de puissance, ...). La seconde partie électronique traitera tous les aspects de programmation et de simulation du système en entier au moyen d'un logiciel de simulation. Dans ce contexte, nous expliquerons les différentes étapes de conception que nous avons suivies dans le but de réaliser ce tracker solaire à deux axes, à savoir : l'étude de la problématique, la proposition d'une solution matérielle et logicielle, le choix des solutions et des composants les mieux adaptés de chaque partie constituant ce montage et nous terminerons finalement ce chapitre avec les résultats des tests de simulation.

4.2. Problématique du projet :

La conception de la carte de commande chargée de la poursuite du Soleil, étant destinée à être utilisée sur un panneau solaire qui sera implanté dans une région de notre pays (qui se trouve dans l'hémisphère nord de la Terre), implique que ce panneau photovoltaïque soit fixe par rapport au sol et orienté vers le Sud. Par conséquent, son rendement énergétique ne sera pas constant durant toute la journée. Au début et en fin de journée, l'angle que font les rayons du Soleil avec le plan du panneau photovoltaïque est inadéquat. Ceci engendre une diminution incontournable sur le rendement de la production électrique. Ce constat est parfaitement visible sur la courbe de la figure 4.1, où l'on remarque une diminution de près de

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

75% du rendement de la production électrique dans la matinée (6h – 9h du matin) et en fin d'après-midi (17h – 19h) lorsqu'on utilise un panneau à orientation fixe [2].

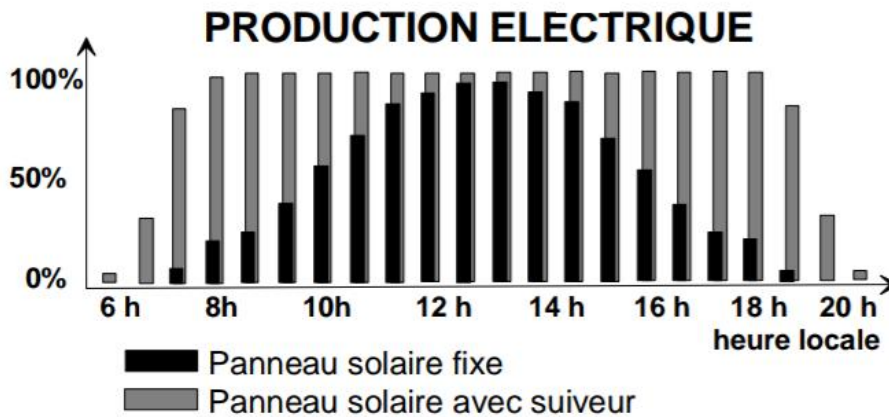


Figure 4.1 : Histogramme comparatif de la production électrique [2]

Cet histogramme montre le gain de production électrique obtenu en passant d'une installation fixe à une installation équipée d'un suiveur de trajectoire solaire pour une journée ensoleillée d'été.

Par contre, lorsqu'on place un système de poursuite solaire sur le panneau solaire en le faisant pivoter en direction du soleil et en maintenant en permanence un angle d'incidence des rayons idéal, voisin de 90° , (comme cela est illustré dans la figure 4.2), ceci contribue à augmenter considérablement le rendement de la production électrique par m^2 du panneau pivotant pendant toutes les périodes de la journée. Ce rendement est pratiquement doublé entre 9h-10h et 16h-17h et même triplé et quadruplé entre 6h-9h et 17h-21h. Le système de suivi solaire arrive même à améliorer le rendement électrique de près de 10% au moment où le Soleil est au zénith, au milieu de la journée, figure 4.1.

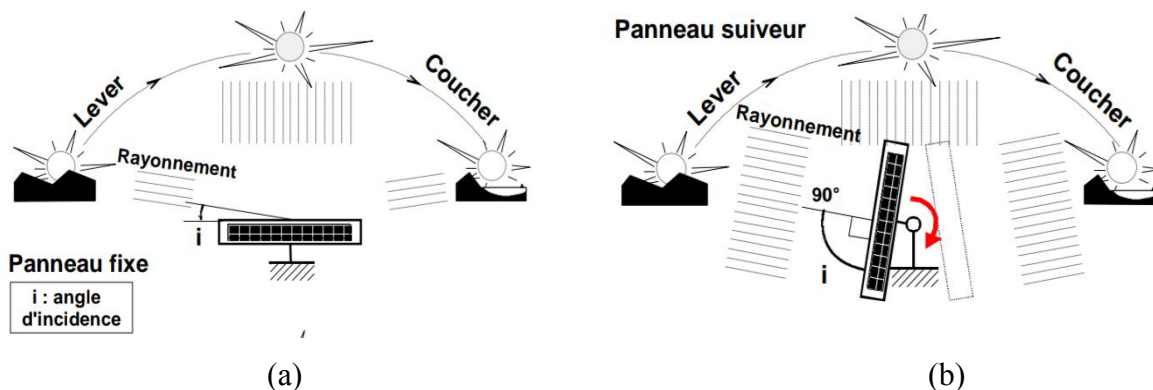


Figure 4.2 : Disposition du panneau solaire vis-à-vis du Soleil : (a) Angle d'éclairement sur panneau fixe et (b) Angle d'éclairement sur panneau mobile [2]

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

Pour être objectif et significativement clair, il faut noter que la technologie avec un suiveur solaire n'est raisonnable, en termes énergétique, que si la commande des mouvements de suivi ne gaspille pas la majeure partie du surplus de l'énergie photovoltaïque produite. Néanmoins, d'un point de vue économique, le surcoût financier lié à la conception du système suiveur, la fabrication, l'installation et la maintenance, peut être rapidement amorti s'il y a possibilité de la revente de la surproduction d'énergie électrique.

4.3. Description du projet :

L'objectif principal de notre projet consiste à développer une carte programmable pour la commande d'un tracker solaire dans le but d'atteindre une efficacité photovoltaïque la plus élevée possible. Pour ce faire, quatre capteurs de lumière (des photodiodes, en l'occurrence) sont disposés dans un coin sur la surface d'un panneau solaire. Un système électronique programmable à base d'un circuit à microprocesseur est chargé d'orienter, en temps réel, ces capteurs en direction du soleil pour placer le panneau dans la meilleure position possible par rapport à l'incidence du rayonnement solaire (le panneau doit être perpendiculaire au rayonnement). En effet, il faut se rappeler que la position du soleil varie constamment et d'une manière différente ... tout au long de la journée et de l'année, selon l'altitude (hauteur ou Elévation) et l'azimut (d'Est en Ouest à mesure de l'avancée de la journée, en hauteur selon la nature de la saison : été, hiver, printemps et automne).

Le principe de ce montage repose sur une idée simple qui consiste à convertir le courant engendré dans la photodiode suite à son éclairage par les rayons solaires (c'est le circuit de lecture et d'acquisition). En fait, il y a quatre photodiodes qui sont situées dans des emplacements diamétralement opposés pour détecter la position exacte du soleil. Une photodiode placée du côté de l'Est, une autre placée du côté de l'Ouest, une autre placée du côté du Nord et la dernière est placée du côté du Sud. Chaque courant électrique produit par ces photodiodes est ensuite transformé en une tension (circuit transimpédance à base d'un ampli-op). Ces tensions sont elles-mêmes amplifiées (circuit d'amplification à base d'un ampli-op). Les tensions analogiques, suffisamment amplifiées, sont alors converties en quatre grandeurs numériques (circuit de conversion Analogique/Numérique) par l'intermédiaire d'un circuit intégré spécialisé : le circuit ADC 0808. Cette conversion est accomplie dans le but de pouvoir faire appel au microprocesseur pour opérer des comparaisons, deux à deux, entre les tensions. En fonction des résultats de ces deux comparaisons, le microprocesseur agit sur le sens de rotation de deux moteurs pas à pas soit vers l'Est soit vers l'Ouest (axe Est-Ouest),

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

d'une part ; soit vers le Nord soit vers le Sud (axe Nord-Sud), d'autre part. Le sens de l'orientation du panneau est toujours dirigé du côté de la photodiode la plus éclairée.

Afin de pouvoir gérer efficacement les nombreux périphériques qui sont reliés au microprocesseur, nous faisons appel au fameux circuit d'Entrées-Sorties parallèles, le 8255A de Intel, qui assurera l'interfaçage entre le microprocesseur d'un côté et les différents périphériques (photodiodes, divers interrupteurs et les deux moteurs) de l'autre côté.

Le choix du microprocesseur (le 8086 de Intel) est arrêté en raison de son universalité, sa compatibilité avec la famille des microprocesseurs les plus récents de la famille Intel et, en dernier ressort, parce que c'est le microprocesseur le plus utilisé dans les applications (si on fait abstraction des microcontrôleurs qui sont très spécialisés) parmi les différents types de microprocesseurs.

4.4. Schéma synoptique :

La Figure 4.3 montre le schéma synoptique de la carte du système à microprocesseur destiné à commander l'orientation d'un panneau photovoltaïque au moyen de deux moteurs pas à pas. Le premier moteur M1 assure le déplacement dans la direction Nord-Sud (Hauteur) et le second M2 assurant le déplacement dans la direction Est-Ouest (Azimut). Ce montage est constitué de :

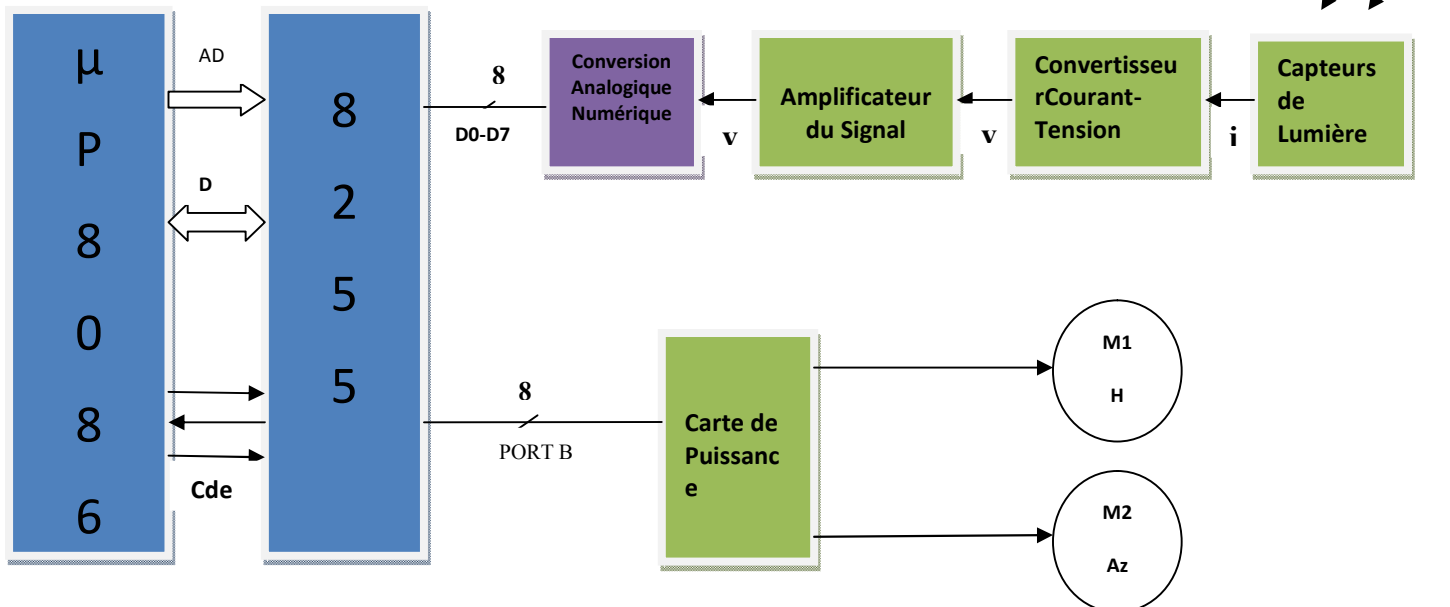


Figure 4.3 : Schéma synoptique de la carte du système à microprocesseur pour la commande d'un tracker solaire

- Un microprocesseur 8086,
- Un circuit d'Entrées-Sorties parallèles 8255A,

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

- Un convertisseur Analogique/Numérique ADC 0808,
- Un circuit électronique de puissance (carte de puissance) destiné à la commande de deux moteurs pas à pas : en Altitude ou hauteur (M-H) et en azimut (M-Az),
- Un circuit de lecture de l'intensité de l'éclairement constitué de quatre photodiodes (capteurs de lumière), des circuits transimpédance (convertisseur courant-tension) et des circuits amplificateurs (amplificateur de signal),

4.5. Schéma Electronique de la carte du système à microprocesseur pour la commande d'un tracker solaire :

La figure 4.4 montre le schéma électronique complet de la carte électronique appelée à contrôler automatiquement la position d'un panneau solaire en azimut et en altitude de manière à suivre constamment le Soleil d'une part et à disposer le panneau de manière à ce que son plan soit perpendiculaire aux rayons solaires incidents.

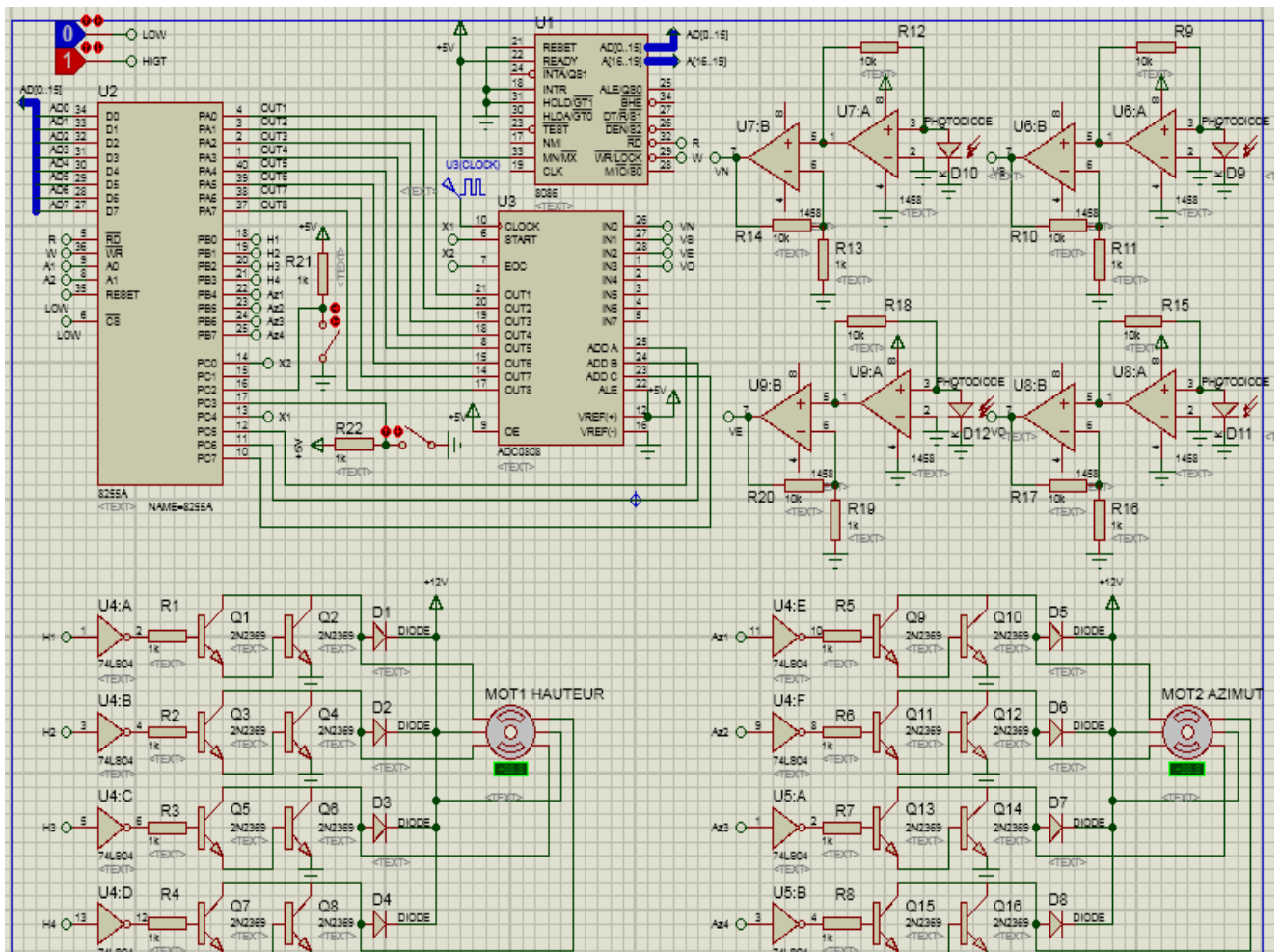


Figure 4.4 : Schéma électronique complet de la carte du système à microprocesseur pour la commande d'un tracker solaire

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

4.5.1. Description sommaire de la carte de commande d'un tracker solaire :

La **figure** 4.4 montre le schéma électronique complet du montage de la carte de notre système à microprocesseur destinée à commander la rotation d'un panneau photovoltaïque selon deux axes (axe Est-Ouest et axe Nord-Sud) de deux moteurs pas à pas (représentés dans la partie inférieure de la figure) en fonction de l'éclairement reçu sur ce panneau. La détection et la mesure de cette intensité de la lumière sont assurées par quatre photodiodes (les photodiodes sont des composants optoélectroniques transducteurs lumière-courant) qui sont représentés à droite dans la partie supérieure du schéma. Le contrôle automatique de l'orientation du panneau est confié à un système à microprocesseur (à base du microprocesseur 8086 de Intel) représenté à gauche dans la partie supérieure du schéma. Ce dernier s'occupe de l'acquisition et de la comparaison deux à deux des tensions (représentant les différentes intensités d'éclairement enregistrés par quatre endroits spatialement bien réparties) et in fine la commande du sens de rotation des deux moteurs supportant le panneau solaire et cela en fonction des résultats de ces comparaisons. Signalons enfin la présence de deux interrupteurs pour la gestion et le contrôle du fonctionnement de la carte. Le premier interrupteur est utilisé pour marche et l'arrêt de la carte de commande, le second interrupteur est utilisé pour informer le microprocesseur une fois par semaine (le jeudi) pour entreprendre le réglage de la position du panneau selon l'axe Nord-Sud.

4.5.2. Interfaçage des périphériques avec le microprocesseur :

Afin de rendre accessible et aisée la lecture de ce schéma électronique, nous avons décidé d'explicitier la circulation des informations, à travers le bus d'adresses, le bus de données et le bus de commande, entre le microprocesseur et les différents périphériques.

4.5.2.1. Interfaçage du bus de données :

Le bus de données dans une carte à microprocesseur est un bus bidirectionnel. En d'autres termes, cela signifie que les données (de 8 ou 16 bits) circulent dans le sens microprocesseur - périphériques ; lorsque ces derniers sont des périphériques de sorties tels que les circuits d'affichage, les moteurs, ... D'autre part, lorsque nous sommes en présence de périphériques d'entrées (capteurs, interrupteurs, ...), les données circulent dans le sens contraire, soit du périphérique vers le microprocesseur.

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

Nous représentons dans la **figure 4.5** le branchement du microprocesseur avec les différents périphériques à travers les lignes de données. Tout d'abord, nous constatons que le microprocesseur utilise la moitié de son bus de données seulement et ce à cause du fait que les données traitées sont des données de 8 bits. Les capteurs de lumière sont des périphériques d'entrées. Ils récupèrent les tensions analogiques correspondantes à l'intensité des éclairagements solaires et les envoient au microprocesseur sur 8 lignes de données via le circuit de conversion analogique-numérique. Pour ce faire, Le CAN convertit chaque tension analogique en une tension numérique sur 8 bits. Celle-ci est transférée vers le port A (du circuit parallèle 8255A) que nous nous configurons comme port d'entrée. Après traitement de ces informations, le microprocesseur envoie les résultats de ses traitements vers les moteurs pas à pas (périphériques de sortie) à travers 8 lignes de données. Ces résultats sont déposés dans le port B du circuit 8255A qui scinde ces 8 lignes en deux groupes de 4 lignes chacun avant de les envoyer séparément au circuit de puissance qui contient les deux moteurs.

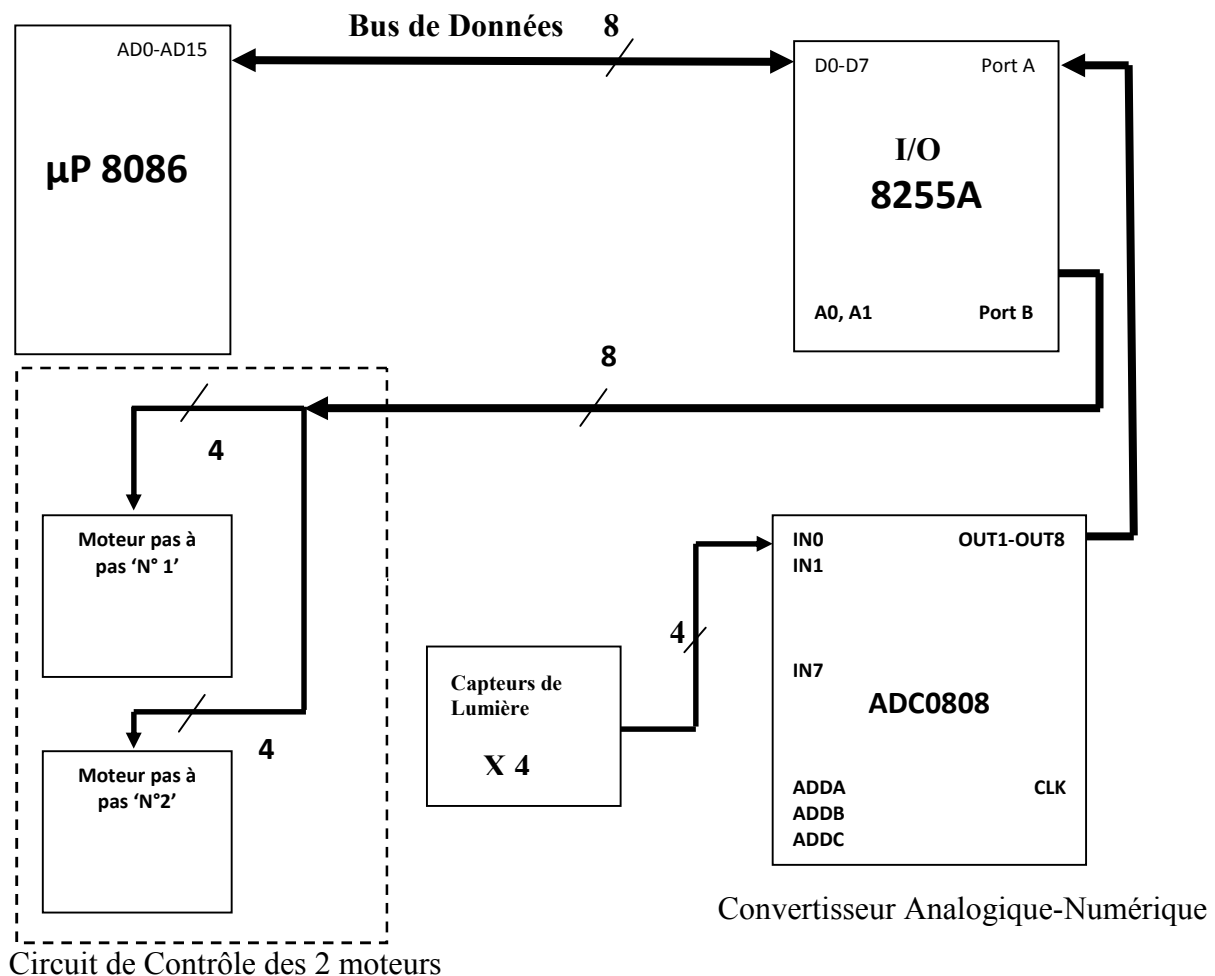


Figure 4.5 : Interfaçage du bus de données

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

4.5.2.2. Interfaçage du bus d'adresses et du bus de commande :

Seul le circuit d'entrées-sorties 8255A est adressable par le microprocesseur qui peut lire ou écrire dans l'un de ses quatre registres internes (3 ports de données + 1 registre de commande) au moyen de deux lignes d'adresses A1 et A2 du microprocesseur qui doivent être respectivement reliées aux broches A0 et A1 du 8255A, **figure 4.6**. A noter que le bus d'adresses est unidirectionnel.

En ce qui concerne les signaux de commande pour la lecture des données et l'envoi des ordres de commande, le microprocesseur utilise les lignes du port C pour cet usage. Aussi, les lignes du port C haut (PC7-PC4) sont programmées en sortie et les lignes du port C bas (PC3-PC0) sont programmées en entrées.

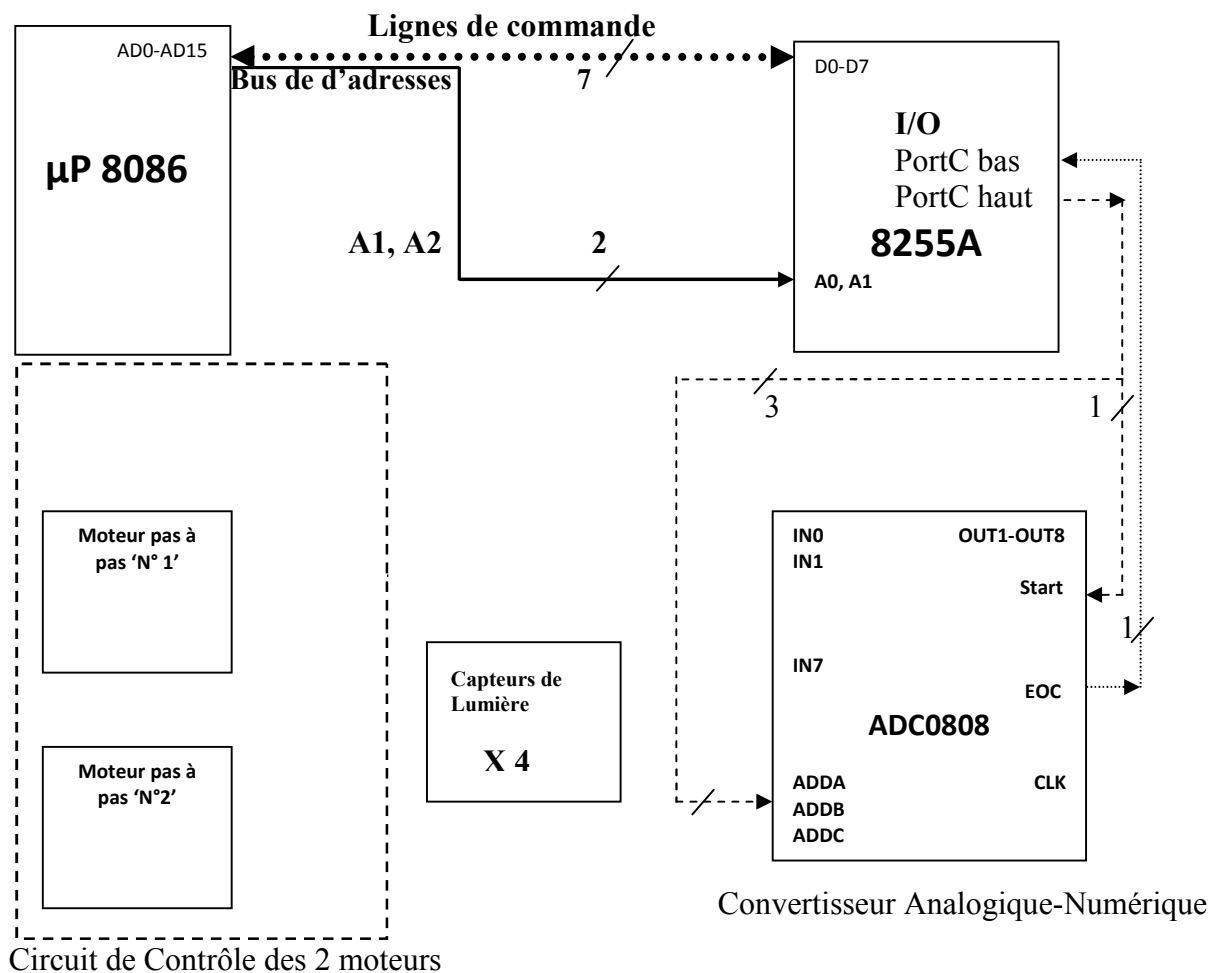


Figure 4.6 : Interfaçage du bus d'adresses et du bus de commande

Lorsque le microprocesseur veut connaître la position du Soleil dans la journée (le Soleil se déplace quotidiennement de l'Est vers l'Ouest), il lit les enregistrements des éclairissements des photodiodes situées respectivement du côté Est et du côté Ouest. Pour cela, il

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

sélectionne tour à tour les entrées IN2 et IN3 du circuit CAN (qui sont reliées respectivement aux photodiodes Est et Ouest) au moyen des lignes PC7, PC6 et PC5 (ces lignes sont reliées aux broches de sélection des adresses ADDA, ADDB et ADDC) avant d'envoyer au moment opportun l'ordre de début de la conversion (signal 'Start') de la tension analogique en une tension numérique via la ligne PC4. Ensuite, le microprocesseur attend la fin de la conversion en scrutant la ligne PC0, programmée en entrée (broche EOC : End Of Conversion).

Nous avons profité de la disponibilité des autres entrées du Port C-bas pour relier deux interrupteurs (les interrupteurs ne sont pas représentés dans ces schémas synoptiques). Le premier est un interrupteur général chargé de la mise sous tension de la carte en entier; tandis que le second interrupteur est chargé de gérer le moteur pas à pas selon l'altitude. En effet, dans la mesure où la trajectoire du Soleil est pratiquement invariable entre deux jours successifs, le programme que nous avons écrit fera le contrôle de l'altitude du Soleil une fois par semaine uniquement et cela tous les jeudis. Aussi, un interrupteur appelé "Jeudi" est actionné tous les jeudis pour prévenir le microprocesseur d'ajuster l'orientation du panneau solaire selon l'axe Nord-Sud.

4.5.3. Description détaillée du montage à microprocesseur :

Comme nous l'avons expliqué plus haut, la carte de contrôle de l'orientation du panneau solaire en fonction de la position du Soleil est constituée de trois parties distinctes et complémentaires : une première partie (Logique électronique de lecture et acquisition des données et des consignes) dont la fonction est la récupération des données enregistrées par des capteurs de lumière ; une deuxième partie construite autour du microprocesseur dont la fonction est le traitement de ces informations et la production d'ordres adéquats en direction de la troisième partie de ce montage (carte de puissance) dont la fonction est la génération de courants suffisamment forts pour faire tourner les moteurs et orienter le panneau solaire dans la direction optimale.

4.5.3.1. Logique électronique de lecture et acquisition des données et des consignes :

La logique électronique qui gère la lecture et l'acquisition des données est constituée de quatre fonctions électroniques successives :

- La lecture de l'intensité de l'éclairement solaire par des composants optoélectroniques (photodiodes) ;
- Un circuit de transimpédance chargé de convertir le courant de la photodiode en

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

une tension électrique ;

- Un circuit amplificateur de tension auquel est assignée la tâche d'amplifier suffisamment la tension pour qu'elle soit par la suite utilisable ;
- Un circuit de conversion dont le rôle est de convertir la tension analogique mesurée en une tension numérique pouvant être traitée par le microprocesseur.

En dehors de ce signal "opto-électrique" enregistrées par les périphériques d'entrées, deux autres signaux d'entrées sont prévus dans cette carte et qui seront également traités par le microprocesseur. Il s'agit :

- d'un signal de mise en marche de la carte en entier. Ce signal est produit par l'action d'un opérateur sur un interrupteur On/Off au début de chaque journée ou bien au milieu de la journée lorsque des opérations d'entretien du montage électronique ou du nettoyage du panneau solaire s'avèrent nécessaires.
- Un autre signal produit par un second interrupteur, suite à l'action d'un opérateur sur cet interrupteur, qui signifie que le microprocesseur doit faire les ajustements nécessaires pour orienter chaque jeudi le panneau solaire selon l'axe Nord-Sud.

4.5.3.1.1 Acquisition de la tension correspondante à l'éclairement solaire :

L'acquisition de la tension correspondante à l'éclairement de la photodiode par les rayons solaire est représentée dans la figure 4.7. Elle est constituée de deux parties. : Le circuit de droite est le circuit transducteur. Il permet de transformer l'intensité de la lumière en une intensité de courant et cela grâce au composant optoélectronique : la photodiode.

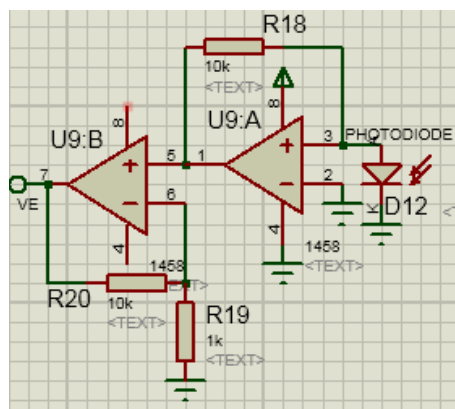


Figure 4.7 : Circuit de conversion du courant de photodiode en Tension et amplification de tension

Le courant de photodiode ainsi généré est directement proportionnel à l'intensité de l'éclairement solaire. Ensuite, le courant de la photodiode parcourt la résistance R18 et permet

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

de recueillir une tension à la sortie de l'amplificateur opérationnel (circuit U9:A) monté circuit classique de transimpédance.

Le circuit de gauche (sur la figure 4.7) est un circuit d'amplification classique monté autour d'un circuit ampli-op (circuit U9:B). Il permet d'amplifier la tension présente à son entrée V_{ph} (tension qui est proportionnelle au courant de photodiode). La tension de sortie V_E peut ainsi s'exprimer :

$$V_E = V_{ph} \frac{R19+R20}{R19}$$

A noter que la tension V_E (E comme Est) correspond à la tension qui traduit le niveau de l'éclairement de la photodiode Est. De même, il existe trois autres tensions V_O (O comme Ouest) ; V_N (N comme Nord) et V_S (S comme Sud).

4.5.3.1.2 Disposition spatiale des photodiodes sur la carte d'acquisition :

Dans le but d'obtenir quatre tensions électriques relatives à l'exposition des quatre photodiodes à la lumière, la technique adoptée dans notre projet consiste à placer les quatre photodiodes dans les quatre quadrants définis par les plans (P1) et (P2) qui se coupent au niveau de l'axe (Δ) comme cela est représenté dans la figure 4.8.

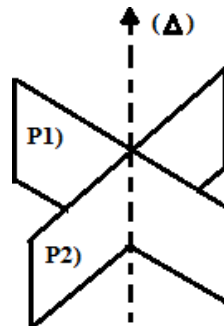


Figure 4.8 : Représentation des plans (P1) et (P2) isolant les photodiodes les unes des autres

En résumé, nous obtenons quatre volumes parallélépipédiques adjacents délimitant chacun un volume bien défini. Nous plaçons ensuite les quatre photodiodes à la base de ces volumes sur le plan horizontal de la carte perpendiculairement à l'axe (Δ), voir figure 4.9. Ainsi, lorsque le soleil se trouve sur la verticale de cette carte (carte perpendiculaire aux rayons solaires incidents), les quatre photodiodes seront éclairées de la même manière. Autrement dit, les quatre photodiodes généreront un courant maximal.

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

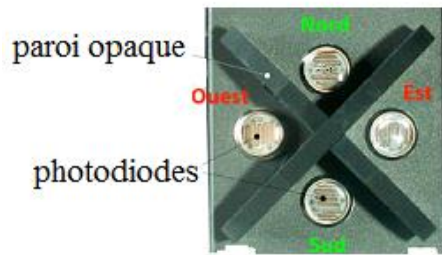


Figure 4.9 : Disposition des photodiodes sur la carte de détection et de mesure de l'éclairement solaire

Si, au contraire, le Soleil se trouve du côté d'un seul des quatre points cardinaux (Est, Ouest, Nord ou Sud), seule la photodiode qui sera du côté du Soleil produira un courant. Les autres diodes étant dans l'ombre produiront des courants beaucoup plus faibles. Cela est nettement visible sur le cache-Soleil représenté dans la figure 4.10 où l'on constate très clairement l'effet que produit le cache-soleil de couleur verte vis-à-vis de l'éclairement ou non des photodiodes. Ainsi, seule la photodiode qui sera placée au premier plan sera éclairée.

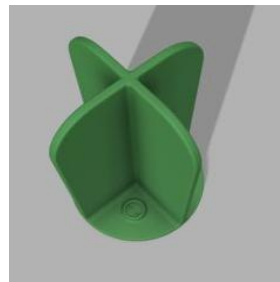


Figure 4.10 : Exemple de cache-soleil pouvant être utilisé pour permettre de déceler le côté où le Soleil brille.

La figure 4.11 montre différents modèles de cache-soleil pouvant être utilisés pour la détection des rayons solaires incidents et perpendiculaires par rapport à la carte d'acquisition et de mesure de l'éclairement solaire.

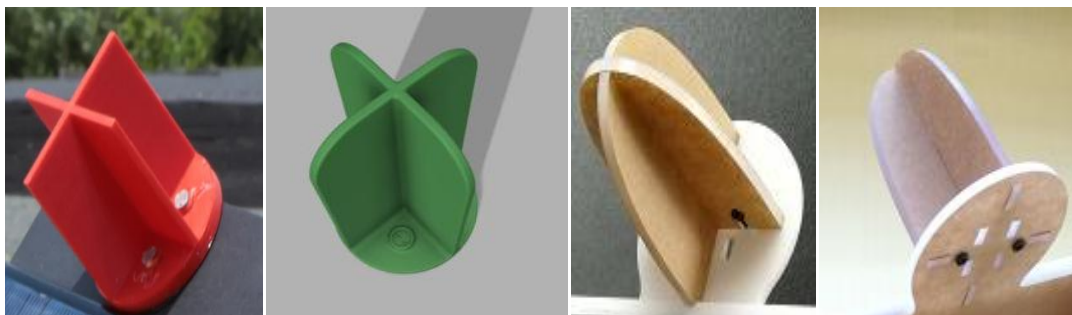


Figure 4.11: Différents modèles de cache-lumière

En définitive, il est donc indispensable de prendre en considération d'un paramètre important lors de la disposition des photodiodes sur la carte d'acquisition, il s'agit de l'angle « ϵ » qui traduit l'ombre solaire. En effet « ϵ » est l'angle seuil de déclenchement ou encore le

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

seuil de l'ombre solaire. L'angle « ϵ » est fonction de la hauteur «H» de la paroi opaque et de la distance «d» qui la sépare du capteur comme il est représenté sur la [figure 4.12](#).

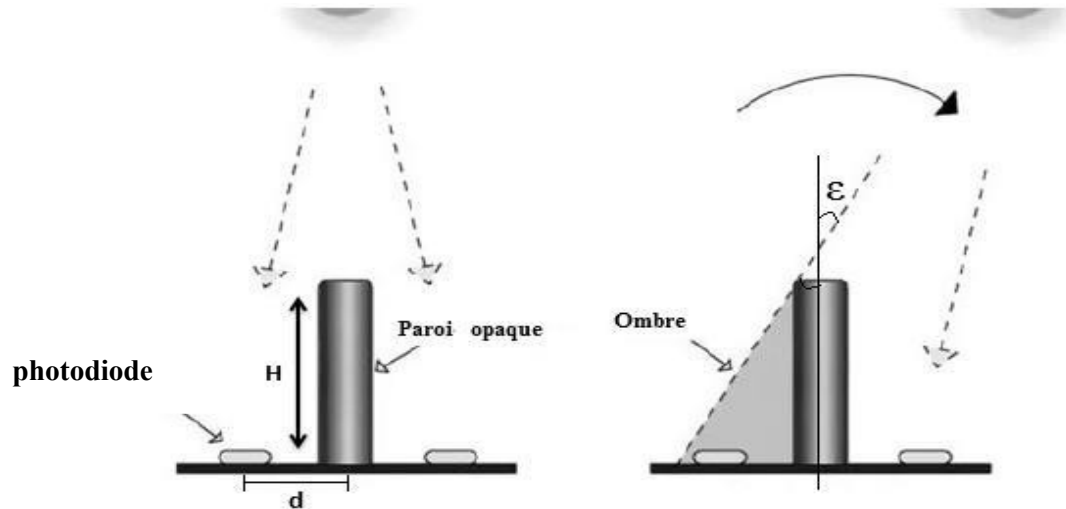


Figure 4.12 : Représentation de l'angle seuil de déclenchement des photodiodes

L'angle de seuil est

défini par l'expression suivante :

$$H = \frac{d}{\tan(\epsilon)}$$

Où : H : Hauteur de la paroi en (cm) ; D : Distance entre la paroi et le capteur de lumière 'Photodiode' en (cm) et ϵ : Angle de l'ombre solaire en ($^{\circ}$).

4.5.3.1.3 Conversion de la tension analogique en une tension numérique :

La tension à la sortie de l'amplificateur étant de type analogique, elle ne peut pas être directement traitée par le microprocesseur. Aussi, faudrait-il faire appel à un circuit convertisseur analogique-numérique ADC 0808 pour convertir cette tension dans un format numérique adapté pour le microprocesseur.

A la sortie du convertisseur analogique-numérique (OUT1-OUT7), nous obtenons ainsi une valeur binaire sur 8 bits équivalente à l'amplitude du signal analogique injecté sur l'une des quatre entrées IN0, IN1, IN2 ou IN3, [Figure 4.13](#). Notons que le convertisseur analogique-numérique ADC 0808 dispose de huit entrées analogiques distinctes dont la sélection de l'une d'entre elles est assurée par trois broches d'adresses : ADDA, ADDB,

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

ADDC qui sont reliées au microprocesseur. Ainsi, c'est le microprocesseur qui détermine quelle tension d'entrée (ou pour être exact, quelle mesure de quelle photodiode) il va traiter.

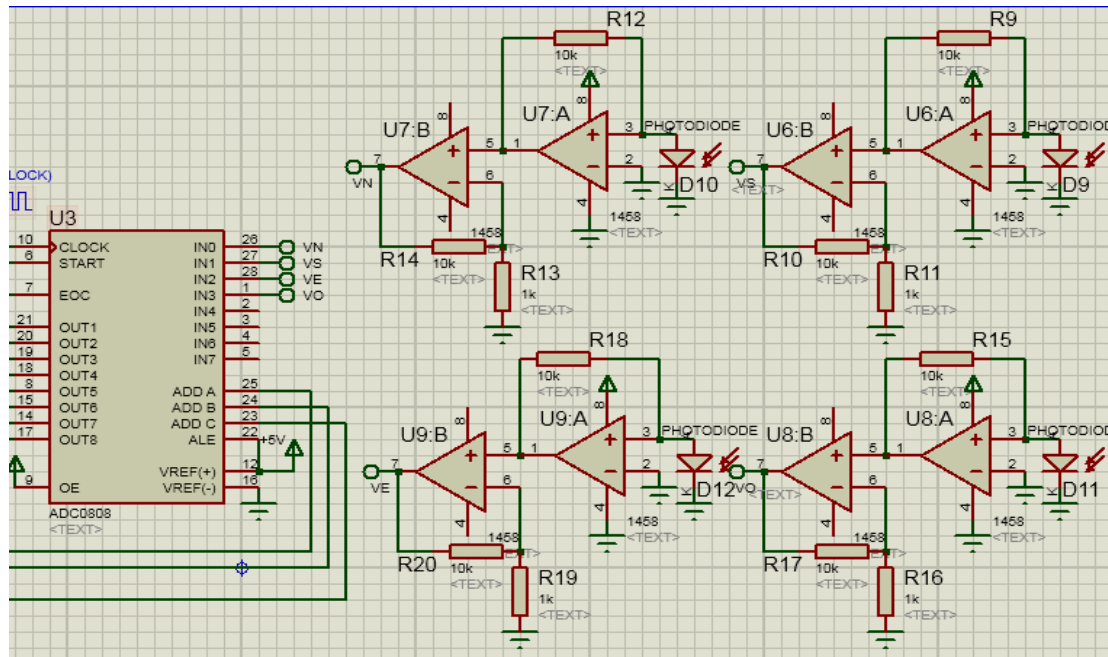


Figure 4.13 : Interfaçage des circuits amplificateurs (reliés aux capteurs de lumière) avec le CAN 0808

Le temps moyen de conversion typique de l'amplitude d'une tension continue en un signal binaire qui sera disponible sur les sorties OUT1-OUT7 est approximativement de 100µs. La fréquence du signal d'horloge CLOCK peut varier de 0 à 1280 kHz, la fréquence typique généralement utilisée est de 640 kHz [3]. Afin d'éviter toute erreur dans le branchement des circuits, nous présentons ci-dessous un tableau qui regroupe le brochage du circuit amplificateur et le circuit ADC 0808 ainsi que leurs connexions.

Broches de l'ADC 0808 [N° de la broche]	Broches de l'ampli-op [N° de la broche]	Observations
IN0 [26], IN1 [27], IN2 [28], IN3 [1] : entrées analogiques	V _N , V _S , V _E , V _O respectivement	IN0, ..., IN3 : entrées à relier à V _N , V _S , V _E , V _O pour l'acquisition des tensions
ADD A [25], ADD B [24] et ADD C [23]	Vers 8255A	Ces broches à relier à 8255A pour la sélection d'une entrée analogique IN0-IN3
VREF(-) [16]	Vers la masse	Cette broche est à relier à la masse
VREF(+) [12], OE [9], ALE [22]	Vers l'alimentation	Ces broches à relier au + 5V

Tableau 4.1 : Brochage du CAN 0808 avec l'ampli-op

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

4.5.3.2. Logique programmée de supervision du fonctionnement général :

L'ensemble des signaux qui 'arrivent' des périphériques d'entrées et qui sont fournis à la carte de commande et de suivi solaire ainsi que tous ceux qui 'sortent' de cette carte pour commander les périphériques de sortie sont tous contrôlés et gérés par programme par le microprocesseur. Deux circuits sont à la base de cette partie programmable : le microprocesseur et le circuit parallèle 8255A à travers lequel transitent tous les signaux d'entrées et de sorties.

4.5.3.2.1 Connexion du circuit CAN avec le circuit d'E/S parallèles

L'interface parallèle 8255A dispose de trois ports d'entrées-sorties (Port A, Port B, Port C) qui peuvent être programmés indépendamment l'un de l'autre [4]. Dans notre montage, le port A est programmé en entrée afin de récupérer l'information binaire (la valeur de la tension écrite sur 8 bits) depuis la sortie du circuit CAN, figure 4.14.

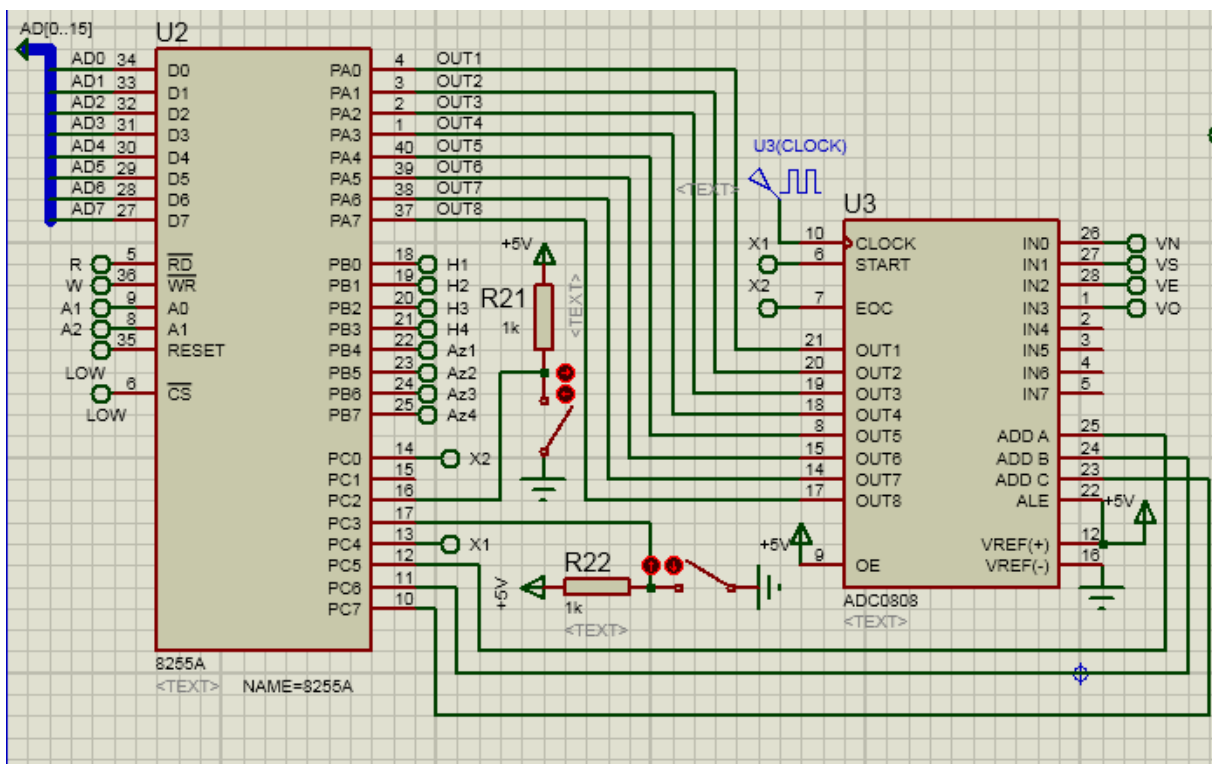


Figure 4.14: Interfaçage du convertisseur CAN 0808 avec le circuit d'E/S parallèle 8255A

Par contre, le port B est programmé en sortie dans le but d'envoyer les signaux de commande vers les moteurs. Le port C est divisé en deux groupes de signaux : le port C haut est configuré en sortie afin de véhiculer les signaux de sélection des entrées analogiques (pour

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

sélectionner une tension parmi les quatre tensions mesurées sur les photodiodes). En outre, le port C haut dispose d'une quatrième ligne pour la commande et le déclenchement de l'opération de conversion. Le port C bas est programmé en entrée : on utilise une de ses lignes pour surveiller la fin de la conversion. En effet, au bout d'une centaine de millisecondes (voir paragraphe précédent), le CAN achève l'opération de conversion et informe le microprocesseur de cet événement par la mise à l'état haut de cette ligne du port C.

Deux autres lignes de ce port C bas sont utilisées pour la gestion de la carte. Il s'agit d'un interrupteur de marche/arrêt général et d'un deuxième interrupteur chargé d'informer le microprocesseur du jour de la semaine (en l'occurrence, le jeudi) afin qu'il fasse les ajustements nécessaires quant à l'orientation du panneau solaire selon l'axe Nord-Sud.

Nous présentons maintenant dans le tableau ci-dessous les brochages des circuits intégrés ADC 0808 et PPI 8255A ainsi que leurs connexions.

Broches de l'ADC 0808 [N° de la broche]	Broches du PPI8255A [N° de la broche]	Observations
ADD A	PC5	Pour la sélection d'une entrée analogique (Tension)
ADD B	PC6	
ADD C	PC7	
OUT1 [21]	PA0 [4]	Sortie OUT1 et PA0 reliées ensemble
OUT2 [20]	PA1 [3]	Sortie OUT2 et PA1 reliées ensemble
OUT3 [19]	PA2 [2]	Sortie OUT3 et PA2 reliées ensemble
OUT4 [18]	PA3 [1]	Sortie OUT4 et PA3 reliées ensemble
OUT5 [8]	PA4 [40]	Sortie OUT5 et PA4 reliées ensemble
OUT6 [15]	PA5 [39]	Sortie OUT6 et PA5 reliées ensemble
OUT7 [14]	PA6 [38]	Sortie OUT7 et PA6 reliées ensemble
OUT8 [17]	PA7 [37]	Sortie OUT8 et PA7 reliées ensemble

Tableau 4.2 : Brochage du CAN 0808 et du circuit d'E/S parallèle 8255A

4.5.3.2 Connexion du microprocesseur avec le circuit d'E/S parallèles

Le microprocesseur 8086 est employé pour gérer le contrôle de l'orientation des panneaux solaires. Etant donné que le système à microprocesseur est de configuration simple (monoprocasseur), le microprocesseur doit être configuré dans le mode minimum (broche MN/MX portée au niveau haut), [figure 4.15](#).

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

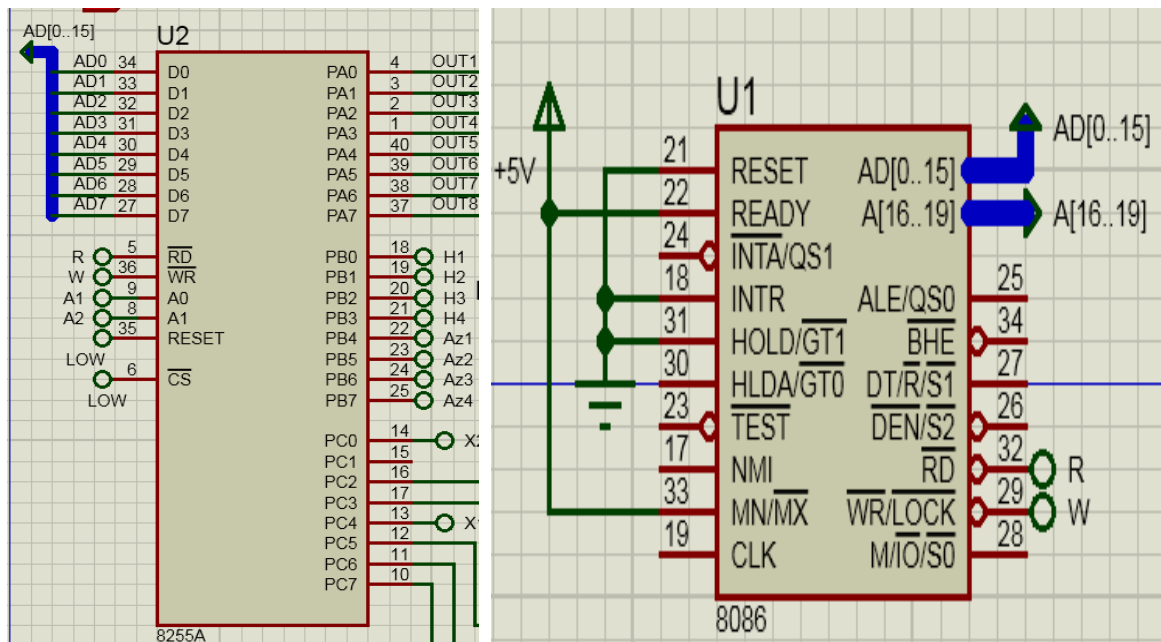


Figure 4.15 : Brochage du microprocesseur 8086 avec le circuit d'E/S 8255A

Parallèlement, les lignes multiplexées AD1 et AD2 du microprocesseur (fonctionnant en tant que lignes d'adresses) sont reliées aux broches A0 et A1 du 8255A afin de sélectionner l'un de ses quatre registres internes à savoir : le Port A, le Port B, le Port C ou le registre de commande.

Quant au bus de données du microprocesseur, il est relié à la sortie du 8255A via les lignes de données (D0, ..., D7). A travers ces lignes de données, la valeur numérique de la tension mesurée est transmise vers le microprocesseur. Notons que ce même bus sert, à un autre moment du programme, pour transmettre des ordres vers les moteurs via le Port B de l'interface parallèle 8255A.

Maintenant, nous présentons dans le tableau 4.3 qui regroupe le brochage du circuit microprocesseur Intel 8086 avec le circuit d'E/S 8255A ainsi que leurs diverses connexions.

4.5.3.3. Connexion du microprocesseur avec le circuit

de commande des moteurs pas à pas :

La troisième partie de cette carte de commande renferme le circuit de puissance qui, comme son nom l'indique, a pour objectif la production d'un courant assez fort pour permettre aux moteurs de faire tourner le panneau solaire en direction du Soleil et cela sous le contrôle, en temps réel, du microprocesseur.

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

Broches du 8086 [N° de labroche]	Broches du 8255A [N° de la broche]	Observations
<u>RD</u> [32]	<u>RD</u> [5]	<u>RD</u> (du 8086) et <u>RD</u> (du 8255) sont reliés ensemble : Lecture des ports du 8255.
<u>WR/LOCK</u> [29]	<u>WR</u> [36]	<u>WR</u> (du 8086) et <u>WR</u> (du 8255) sont reliés ensemble : Ecriture dans les ports du 8255
AD [0..15]	<u>CS</u> [25]	Broches à relier à la masse. Le 8255 est toujours activé.
	A0 [9] et A1 [8]	A0 et A1 (8255) à relier à AD1 et AD2 du 8086 : Adressage et sélection des registres internes du 8255
AD [0..15]	D0-D7 [27-34]	Bus de données AD (0..7) du 8086 à relier à D0-D7 (8255A)
RESET [21]	RESET [6]	Ces broches à relier à la masse. Le 8086 ne doit pas être réinitialisé (Reset actif à l'état haut) qu'en cas de besoin

Tableau 4.3 : Brochage du μP 8086 et l'interface parallèle 8255A
(RD signifie que cette broche est active sur un niveau logique bas)

Comme nous l'avons déjà expliqué dans le paragraphe § 4.3, notre carte de commande construite autour d'un système à microprocesseur est prévue pour suivre de très près la trajectoire du Soleil et ce, quel que soit le moment de la journée ou de la saison. Pour cela, deux moteurs pas à pas (de type unipolaire à aimant permanent) ont été prévus pour assurer la rotation du panneau solaire et son positionnement de manière à ce qu'il soit constamment en face du Soleil (le plan du panneau doit être toujours perpendiculaire aux rayons du Soleil).

Le premier moteur assure la rotation du panneau selon l'altitude (axe Nord-Sud) tandis que le second moteur supervise la rotation du panneau selon l'azimut (axe Est-Ouest).

Pour fournir la puissance nécessaire, nous avons prévu de recourir à une structure Darlington pour chaque bobine (phase) du moteur pas à pas, **figure 4. 16**. Il s'agit d'un montage de deux transistors bipolaires. Les sorties des paires de Transistors Darlington alimentent directement les bobines des moteurs. Des diodes roue libre sont prévues pour

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

protéger tous les composants électroniques contre les forts courants induits dans les moteur lorsque les tensions dans les bobines s'annulent. La commande des transistors Darlington en commutation (saturé/bloqué) est assuré par le microprocesseur via le port B du 8255. Par ailleurs et afin d'augmenter les courants et renforcer les tensions délivrés par ce port, un circuit Buffer (circuit inverseur U4 : le 74LS04) a été placé entre le port B du circuit 8255A et les entrées des transistors Darlington. Notons que la structure décrite ci-dessous a été prévue pour chacune des bobines des deux moteurs (chaque moteur dispose de quatre bobines).

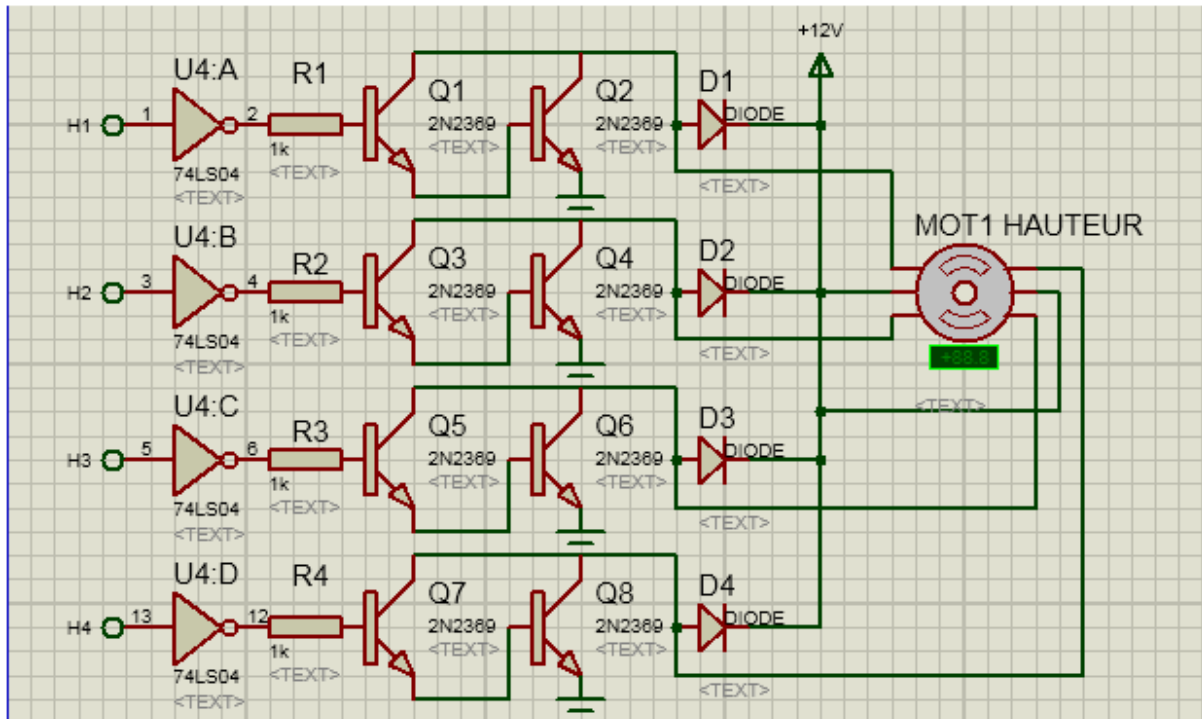


Figure 4.16 : Circuit de puissance pour la commande du moteur pas à pas

Pour tourner, le moteur dispose de quatre bobines qu'il faut exciter de manière précise. Ainsi, pour le faire tourner d'un pas une seule bobine sur quatre est alimentée. Sinon, lorsque nous alimentons deux bobines adjacentes, le moteur tourne d'un demi-pas. Une extrémité de chaque bobine sont reliées au même point d'alimentation (+ 12 V) de sorte que pour exciter une bobine, nous portons l'autre extrémité libre de la bobine à la masse. Les extrémités libres des quatre bobines sont reliées au collecteur d'un transistor. Pour faire tourner le moteur, l'idée consiste simplement à saturer le transistor de manière à porter son collecteur à un potentiel très faible (proche de 0 Volt) ce qui permet le passage d'un courant dans la bobine et la création d'un champ magnétique qui fait tourner le stator du moteur. Par contre, lorsque le transistor est bloqué, le courant dans le collecteur s'annule isolant ainsi la bobine qui se retrouve désexcitée. Le blocage et la saturation d'un transistor sont assurées par les tensions

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

envoyées par le microprocesseur selon des séquences bien déterminées, comme il est illustré dans le tableau 4.4. En résumé, lorsque nous portons les entrées H1, H2, H3 et H4 (qui sont reliées aux lignes PB0, PB1, PB2 et PB3 du port B du circuit 8255A) respectivement aux niveaux logiques '1', '1', '0', '0' qui correspondent à la phase 3, les transistors Q2 et Q4 se bloquent tandis que les transistors Q6 et Q8 se saturent. Suite à cela, les bobines reliées aux transistors Q6 et Q8 sont parcourues par des courants tandis que les bobines reliées aux transistors Q2 et Q4 sont désexcitées.

	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
Borne H1	0	0	1	1
Borne H2	0	1	1	0
Borne H3	1	1	0	0
Borne H4	1	0	0	1

Tableau 4.4 : Séquences d'alimentation des bobines du moteur (Phases)

En définitive, le microprocesseur génère en sortie deux fois quatre signaux (PB0, PB1, PB2 et PB3 d'un côté et PB4, PB5, PB6 et PB7 de l'autre côté) pour piloter chaque moteur pas à pas afin de suivre le soleil selon deux axes de rotation perpendiculaires, **figure 4.17**. Les lignes (PB0, PB1, PB2 et PB3 assurent la rotation du moteur de poursuite du soleil selon l'élévation (axe Nord – Sud) ; tandis que les lignes PB4, PB5, PB6 et PB7 gèrent la rotation du moteur de poursuite du soleil selon l'azimut (axe Est – Ouest).

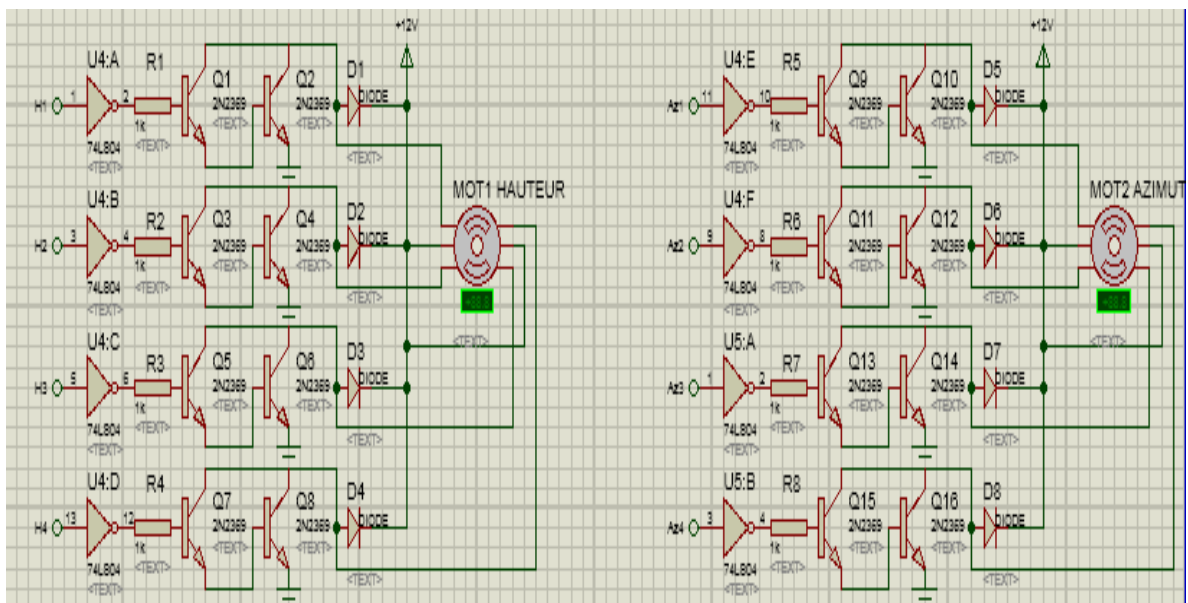


Figure 4.17 : Commande des deux moteurs M1 (en Altitude ou Hauteur) et M2 (en Azimut)

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

Maintenant nous présentons dans le tableau ci-dessous le branchement du circuit d'interface parallèle 8255A avec les composants du circuit de puissance de commande des moteurs.

Lignes du Port B du 8255A	Circuit de puissance	Observations
PB0	U 4 : A Inverseur	Le 8086 commande la marche et l'arrêt de M1 via la ligne PB0 du 8255
PB1	U 4 : B Inverseur	Le 8086 commande la marche et l'arrêt de M1 via la ligne PB1 du 8255
PB2	U 4 : C Inverseur	Le 8086 commande la marche et l'arrêt de M1 via la ligne PB2 du 8255
PB3	U 4 : D Inverseur	Le 8086 commande la marche et l'arrêt de M1 via la ligne PB3 du 8255
PB4	U 4 : E Inverseur	Le 8086 commande la marche et l'arrêt de M2 via la ligne PB4 du 8255
PB5	U 4 : F Inverseur	Le 8086 commande la marche et l'arrêt de M2 via la ligne PB5 du 8255
PB6	U 5 : A Inverseur	Le 8086 commande la marche et l'arrêt de M2 via la ligne PB6 du 8255
PB7	U 5 : B Inverseur	Le 8086 commande la marche et l'arrêt de M2 via la ligne PB7 du 8255

Tableau 4.5 : Interfaçage du Port B du 8255A avec le circuit de commande des moteurs

4.6 Partie logicielle

4.6.1 Introduction

Un cahier des charges a été développé pour équiper le panneau photovoltaïque par un suiveur de trajectoire solaire pour commander l'inclinaison des panneaux solaires en temps réel afin de maintenir un angle d'incidence des rayons solaire perpendiculaire tout au long de la journée. Une fois la conception du système de microprocesseur terminée, l'étape suivante a consisté à traduire ce cahier des charges en un organigramme pour faciliter l'écriture du programme en langage assembleur d'une part, et rendre la lecture ultérieure de ce programme facile pour quiconque souhaiterait la réadaptation du programme ou sa maintenance.

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

4.6.2 Organigramme :

On différencie d'abord entre le mode jour et le mode nuit via les tensions des capteurs de lumière Photodiode (EST, OUEST, NORD et SUD). Si la tension délivrée est inférieure à ξ (epsilon : tension seuil en V) aucun changement n'est porté à la position du panneau, le système est en mode arrêt.

Si on prend, par exemple, le cas où la tension de la photodiode placée du côté Ouest est supérieure à la tension générée par la photodiode située du côté Est ($V_{ph\ Ouest} > V_{ph\ Est}$), cela signifie que le capteur de lumière situé à l'Ouest est plus exposée au rayonnement solaire alors que l'autre capteur est ombragé, le panneau s'oriente alors vers la source de la lumière en direction de l'Ouest. On suit le même raisonnement dans le cas inverse. Pour résumer, on peut distinguer les 7 cas suivants :

* $V_{Ph\ Ouest} , V_{Ph\ Est}, V_{Ph\ Nord}, V_{Ph\ Sud} < \xi$: Mode nuit, Système en veille.

* $V_{Ph\ Ouest} > V_{Ph\ Est}$; Mode jour : Rotation du panneau PV vers l'Ouest.

* $V_{Ph\ Ouest} < V_{Ph\ Est}$; Mode jour : Rotation du panneau PV vers l'Est.

* $V_{Ph\ Ouest} = V_{Ph\ Est}$ Condition d'arrêt : Panneau est dans une position optimale.

* $V_{Ph\ Nord} > V_{Ph\ Sud}$; rotation du panneau PV vers le Nord.

* $V_{Ph\ Nord} < V_{Ph\ Sud}$; rotation du panneau PV vers le Sud.

* $V_{Ph\ Nord} = V_{Ph\ Sud}$; Condition d'arrêt, Panneau est dans une position optimale.

La **figure 4.18** ci-dessous présente l'organigramme qui gère le contrôle des deux moteurs en fonction du jour et de la nuit, du moment de la journée et du moment e la saison.

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

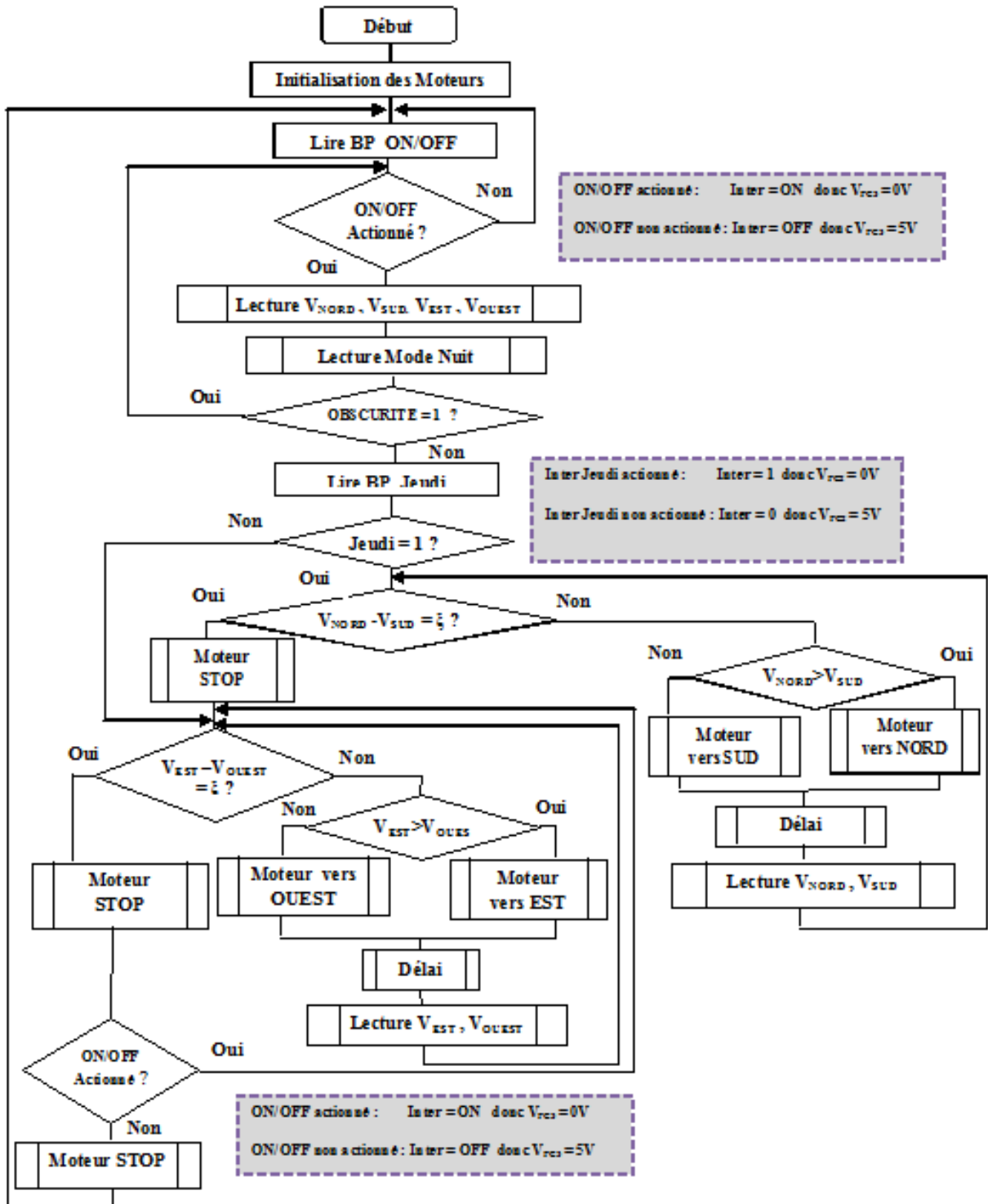


Figure 4.18 : Organigramme complet relatif au contrôle de la direction bi-axiale d'un panneau photovoltaïque

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

4.6.3 Programme :

Dans la dernière étape, nous traduisons l'organigramme de la [figure 4.18](#) en langage assembleur, compréhensible par le microprocesseur 8086 ou tout autre microprocesseur postérieur au 8086, en raison de la compatibilité ascendante garantie par le fabricant Intel pour tous ces processeurs fabriqués après le microprocesseur 8086. Les lignes ci-dessous présente une partie de ce programme.

```
=====
Masq_OnOff      EQU    8
Masq_Jeudi      EQU    4
arretmoteur     EQU    0
Epsilon         EQU    5
PORTA           EQU    100
PORTB           EQU    102
PORTC           EQU    104
RegCde          EQU    106
MotCde EQU      91h
=====
ORG 0
Programme      SEGMENT
Assume CS: Programme, DS: Programme
START:
    MOV SP, 4000H
    MOV AX, CS
    MOV DS, AX

    MOV AL, MotCde          ; MotCde =1001 0001 b : PA : E - PB: S - PCh : S - PCb : E
    MOV DX, RegCde
    OUT DX, AL

; Initialiser Moteurs à l'arrêt au départ

Debut:
    MOV AL, arretmoteur
    MOV DX, PORTB
    OUT DX, AL

    CALL TRACKER

...

...

Repete:  MOV BX,0FFFFh
BACK:    DEC BX
        JNZ BACK
        DEC AX
        JNZ Repete

    RET
DELAI_2s ENDP
=====
JMP Debut

phase_Horaire DB 03h, 06h, 0Ch, 09h, 03h, 06h, 0Ch, 09h
phase_AntiHoraire DB 09h, 0Ch, 06h, 03h, 09h, 0Ch, 06h, 03h
Obscurite DB 0
Tension_Nord DB ?
Tension_Sud DB ?
Tension_Est DB ?
Tension_Ouest DB ?
Programme ENDS
END START
=====
```

Chapitre 4 : Conception et Considérations pratiques

Bibilographie :

[1] : AMIRI Imad Eddine & MEDJALDI Amar ; Conception d'un système de régulation de la température des panneaux photovoltaïques à base d'un système à microprocesseur ; Master électronique ; Université 8 Mai 1945 – Guelma ; Algérie 2020

[2] : Suiveur de trajectoire pour panneau solaire ;

<http://www.gecif.net> › [genie_electrique](#) › [sujets_bac](#)

[3] <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/929603/TI1/ADC0808.html> ; Consulté le: 10 juin 2021.

[4] <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/126971/AMD/8255A.html> ; Consulté le 15 Juin 2021.

Conclusion générale

Conclusion générale

La réalisation de ce projet de fin d'études entre dans le cadre de la préparation du diplôme Master en Electronique, option : Instrumentation. Il fait suite à une autre étude, entamée l'année dernière, par un binôme d'étudiants concernant une contribution à l'amélioration du rendement énergétique des panneaux photovoltaïques par l'action, par programme, sur un système de refroidissement de manière à maintenir la température des cellules photovoltaïques dans une gamme de température susceptible d'obtenir un fonctionnement optimal de la conversion photovoltaïque.

Ce présent travail est consacré à la conception et à l'étude d'une carte programmable pour la commande d'un système tracker solaire bi-axial à base d'un système à microprocesseur 8086. Nous avons conçu pour ce projet une carte programmable qui permet de commander deux moteurs pas à pas dans le but de poursuivre la trajectoire du Soleil tout au long de la journée et tout au long de l'année, et ce en fonction de la quantité de lumière recueillie par quatre photodiodes judicieusement disposées.

Cette étude n'a pas été une opération très simple, mais cela nous a permis d'apprendre beaucoup de choses. Ainsi, ce projet nous a été bénéfique sous plusieurs aspects. Il nous a permis d'améliorer nos connaissances notamment dans le domaine de l'énergie photovoltaïque. Ceci nous a encouragés à travailler studieusement afin d'atteindre les objectifs fixés pour ce projet.

C'est vrai que notre projet n'a pas été testé en grandeur nature et qu'il est resté au stade de la simulation. Toutefois, notre rêve et notre objectif est, et reste toujours, de poursuivre ce désir de voir un jour ce projet mené jusqu'au bout et assister réellement à une poursuite réelle du soleil par un panneau solaire de type commercial.

Résumé :

L'augmentation de la demande mondiale en énergie électrique est souvent associée à l'accroissement de la population mondiale, l'augmentation de son niveau de vie et la diversification de ses outils et besoins domestiques professionnels et de loisirs. Par ailleurs, l'exploitation irraisonnable des sources d'énergies fossiles existantes a engendré l'émission, de plus en plus accrue, des gaz toxiques entraînant ainsi non seulement la pollution de l'environnement et la dégradation irrémédiable du système écologique mais surtout une nuisance dangereusement mortelle pour la santé de tous les êtres vivants. A ce propos, des recommandations et des lois sont entrain de voir le jour rendant ces agissements contraires aux intérêts de l'humanité et imposant, en conséquence, des amendes très sévères contre les pays et les entreprises incriminés.

Dans cet ordre d'idées, l'épuisement inexorable et irréversible des ressources fossiles associé à la nouvelle politique mondiale de protection de l'environnement ont beaucoup incité les gouvernements à encourager les chercheurs à explorer de nouvelles sources d'énergies qui soient compatibles avec ces nouvelles réglementations. A cet égard, de nombreux axes de recherche dans ce domaine des énergies renouvelables, telles que l'énergie éolienne, l'énergie géothermique, l'énergie solaire, ..., etc. se sont multipliés afin de répondre aux besoins vitaux des développements économiques des pays avec, dans l'esprit, la garantie du respect de la Nature. Parmi ces sources d'énergie renouvelables, l'énergie solaire présente un avantage certain et avéré sur les autres formes d'énergie non polluantes en raison de ses caractéristiques inhérentes et relatives à la sécurité d'approvisionnement et de protection de l'environnement.

L'Algérie, à l'instar des autres pays, a décidé ces dernières années d'adopter le développement de l'énergie photovoltaïque (PV) comme étant l'un des axes majeurs et stratégiques dans le domaine de l'approvisionnement en énergie et ce, eu égard à la position géographique exceptionnelle de l'Algérie qui dispose de l'un des gisements solaires les plus élevés au monde avec 3 500 heures d'ensoleillement par an.

Dans cette optique, nous avons décidé d'aborder l'une des thématiques associées à ce type d'énergie. En effet, l'un des problèmes rencontrés avec l'énergie photovoltaïque est la relative faiblesse des rendements obtenus avec les cellules photovoltaïques. Afin d'augmenter ce rendement, et ce indépendamment du type de la cellule PV employée, il importe donc de maximiser l'éclairement reçu par le panneau solaire en veillant pour cela à s'assurer que les rayons solaires incidents soient constamment perpendiculaires au panneau solaire.

A cet effet, nous nous sommes intéressés dans ce Projet de Fin d'Etudes à la conception d'une carte électronique programmable afin de piloter l'orientation du panneau PV de manière à ce que l'éclairement reçu par ce panneau solaire soit le maximum possible. A cet égard, un microprocesseur lit régulièrement le taux d'éclairement des quatre photodiodes, disposées spatialement de façon très précise, et commande ensuite la rotation de deux moteurs pas à pas (qui soutiennent ces panneaux) pour tourner selon deux axes de rotation perpendiculaires de manière à ce que la surface du panneau solaire suit minutieusement la trajectoire du Soleil afin de récolter le maximum d'énergie.

Mots Clés : Photovoltaïque, Suiveur solaire, Tracker solaire, Photodiode, Microprocesseur, Moteur pas à pas.

ملخص:

في الواقع، تأتي غالبية الطاقة المستخدمة اليوم بشكل رئيسي من مصادر الطاقة الملوثة أو الخطرة، والتي للأسف تضر بالبيئة، وبسبب الزيادة في عدد سكان العالم وكذلك الطلب المتزايد في البلدان الناشئة، يستمر الطلب العالمي على الطاقة بزيادة حادة.

هذه الطاقة ليست ملوثة فحسب، بل قابلة للنضوب قبل كل شيء، ولهذا السبب أصبح استخدام الطاقات النظيفة (وتسمى أيضاً الطاقات المتجددة) أمراً ضرورياً.

من بين مصادر الطاقة المتجددة، تتمتع الطاقة الشمسية بميزة نظراً لخصائصها فيما يتعلق بأمن الإمداد وحماية البيئة. الدافع وراء هذا الاختيار هو أن كمية الطاقة الشمسية التي تتلقاها الأرض كل يوم تبلغ خمسة أضعاف إجمالي استهلاك الطاقة النووية والفحم والخشب وزيت الوقود والغاز... ..

تتمتع الجزائر، نظراً لموقعها الجغرافي، بواحد من أعلى الحقول الشمسية في العالم، مع 3500 ساعة من أشعة الشمس سنوياً، ولهذا السبب فهي مدعوة أكثر من أي وقت مضى للتوجه نحو التطور في مجال الطاقة الشمسية.

لذلك، كان مشروع نهاية الدراسة هذا سبباً للتوسع في عالم الطاقات المتجددة بهدف دراسة وتصميم بطاقة إلكترونية تتواصل بين مستشعرات الضوء والمعالج الدقيق الذي سيتحكم في " اتجاه اللوحة الكهروضوئية من خلال لغة برمجة واستخدام محركين خطوة بخطوة لزيادة كفاءة الألواح الشمسية.

الكلمات الرئيسية: الألواح الشمسية، تعقب الطاقة الشمسية، الثنائي الضوئي، المعالج الدقيق، محرك خطوة بخطوة.