

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

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DÉPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Études de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences et Technologies**
Filière : **Électrotechnique**
Spécialité : **ENERGIES RENOUVELABLES**

Présenté par
Aliouane Boussad
Ait moussa Djilali

Thème

Automatisation et contrôle d'un suiveur solaire

Mémoire soutenu publiquement le 30/06/2024 devant le jury composé de :

Mr Madjid SI BRAHIM

MCA, UMMTO, Président

Mr Hakim DJOUDI

MAA, UMMTO, Examineur

Mr Nabil MEZZAI

MCA, UMMTO, Encadrant

Remerciements

Le plus grand merci s'adresse au bon Dieu, le tout puissant de nous avoir accordé le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

Nous remercions nos familles et tous nos amis qui nous ont toujours encouragé et soutenu durant toutes nos études.

Nous tenons également, à exprimer nos forts remerciements à notre promoteur, monsieur MEZZAI NABIL, pour sa disponibilité à tout instant et surtout ses orientations, qu'il trouve ici le témoignage de notre haute considération et de notre profond respect. Nous remercions les membres de jury qui ont bien voulu accepter d'examiner ce mémoire et à ces égards nous leurs présentons nos profonds respects, et notre grande gratitude.

Nous rendons grâce à tous les enseignants du département d'électrotechnique, qui nous ont suivis durant notre cursus, et tous ceux qui ont contribué, à ce que ce travail prenne forme.

Nous exprimons aussi nos remerciements ou enseignants du département d'automatique.

Dédicaces

Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie, que je dédie mon travail à mes très chers, respectueux et magnifiques parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A mes frères et ma sœur aussi ma grande mère pour leurs appuis et leur encouragement.

A tous mes amis et toute ma promotion, et en particulier mon binôme Boussad.

A tous ce qui de loin ou de près n'ont pas cessé de m'apporter leur soutien, pendant mes années d'études.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.

DJILALI

Dédicaces

Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir aidé et guidé à trouver en nous la force et la volonté d'accomplir ce travail.

Je dédie ce travail à mes très chers parents, pour leurs sacrifices et encouragements durant toutes ces années d'études, pour leurs conseils et orientations dans ma vie.

A mes frères et ma famille pour leurs appuis et leur Encouragement.

A celles qui ont toujours sacrifiées pour me voir réussir, que dieu Vos gardes dans son vaste paradis, À vous mes deux chères grandes mères

A tous mes amis, en particulier, Rachid, Oussama, Said, ramdan, lamine, Abdelmalek, jiji, Walid, et ainsi à toute la promo d'électrotechnique 2023 /2024.

A mon chère binôme Djilali pour tous les moments quand n'a passé pour la réalisation de ce projet fin d'étude.

A tous ceux qui me sont chers, je qu'ils trouvent tous ici l'expression de ma reconnaissance et gratitude.

Boussad

Sommaire

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction	2
I.2 Énergies renouvelables	2
I.2.1 Définitions.....	2
I.2.2 Différents types d'énergies renouvelable	2
I.3 L'Énergie photovoltaïque	3
I.3.1 La cellule photovoltaïque	3
I.3.2 Principe de fonctionnement	4
I.3.3 Caractéristique de la cellule PV	5
I.3.3.1 Courant de court-circuit, I_{cc}	5
I.3.3.2 Tension de circuit ouvert, V_{co}	6
I.3.3.3 La courbe courant -tension	6
I.3.3.4 La courbe puissance -tension.....	7
I.3.3.5 Facteur de forme.....	8
I.3.3.6 Rendement de conversion.....	8
I.4 Influence de l'ensoleillement	8
I.5 Influence de la température	10
I.6 Association de cellule photovoltaïque	11
I.6.1 Association série	11
I.6.2 Association en parallèle	11
I.6.3 Association en série/parallèle	12
I.7. Avantages de l'énergie photovoltaïque	13
I.8 Inconvénients de l'énergie photovoltaïque	13
I.9 Conclusion	14

Chapitre II : Modélisation et simulation d'un panneau PV avec et sans défaut

II.1 Introduction.....	15
II.2 Présentation et modélisation d'un panneau solaire.....	15
II.2.1 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque PV.....	15
II.2.2 Equations de la cellule PV	16
II.3 Modélisation sous l'environnement Matlab/ Simulink	17
II.3.1 Caractéristiques des modules photovoltaïques.....	17
II.3.2 Influence de l'irradiation et de la température sur les paramètres des modules PV.....	19
II.3.2.1 Influence de l'irradiation sur les paramètres des modules PV	19
II.3.2.2 Influence de la température sur les paramètres des modules PV.....	21
II.4 Différents types de défauts dans les panneaux solaires.....	22
II.4.1 La fissuration	22
II.4.2 Jaunissement et brunissement.....	22
II.4.3 La délamination.....	23
II.4.4 Traînée d'escargot « Snail trail »	24
II.4.5 Défauts dans le système de câblage	24
II.4.5 Défauts de l'onduleur.....	25
II.4.6 Défaut d'ombrage	25
II.4.6.1 Différents types d'ombrage et leur impact sur la production	26
II.4.7 conséquences des ombrages.....	27
II.5 Modélisation d'un panneau PV avec défauts d'ombrage sous Matlab-Simulink.....	27
II.6 Solutions pour limiter l'impact des ombrages	29

II.7 Conclusion	30
-----------------------	----

Chapitre III : automatisation et contrôle d'un suiveur solaire

III.1 Introduction	31
III.2 Définitions D'un suiveur solaire	31
III.2.1 Principe de fonctionnement.....	31
III.2.2 Les type des suiveurs de solaire.....	32
III.2.2.1 Suiveurs solaire passif	32
III.2.2.2 Suiveur solaire actif	33
III.2.2.3 Suiveur solaire mono-axe	34
III.2.2.4 Suiveur solaire double axe	34
III.2.3 différents éléments de suiveur solaire	35
III.2.3.1 Axe d'azimut	35
III.2.3.2 Axe d'élévation.....	35
III.2.3.2 Axe d'élévation	35
III.2.3.3 Moteurs et mécanismes de rotation.....	35
III.2.3.4 Système de contrôle	35
III.2.3.5 Plateau et support	35
III.2.3.6 Système de réduction de vitesse	35
III.2.3.7 Système de sécurité	35
III.2.3.7 Système de sécurité	35
III.3 Système automatisé.....	36
III.3.1 Structure des systèmes automatisé.....	36
III.4 Définition d'un automate programmable	37
III.4.1. Les types des automates	38
III.5 langages de programmation d'un API	38
III.6 Critères de choix d'un API	39

III.7 Définition du GRAFCET	40
III.7.1 différents types de grafcet.....	40
III.7.2 concepts de base d'un GRAFCET.....	40
III.7.2.1 étapes.....	41
III.7.2.2 transitions.....	41
III.7.2.3 liaisons orientées.....	41
III.8 Elaboration du grafcet pour un suiveur solaire double axe.....	41
III.8.1 Cahier des charges du fonctionnement	41
III.8.1.1 Description du Système.....	41
III.8.1.2 Fonctionnement du Système.....	42
III.8.1.3 Spécifications Techniques.....	44
III.8.1.4 Schéma du grafcet.....	44
III.9 Présentation du logiciel step7	48
III.10 Structure d'un programme S7.....	49
III.11 Implantation du programme sur l'automate S7-300.....	49
III.11.1 Création du projet.....	49
III.11.2 Création de la table des mnémonique.....	52
III.12 Programme du suiveur solaire sous langage ladder.....	53
III.13 Conclusion.....	61

Liste des tableaux

Tableau II.1 : paramètres d'un panneau solaire.

Tableau III.1 : les équations des transitions.

Tableau III.2 : les équations des étapes pour activation des actions.

Tableau III.3 : Equations des mémentos.

Tableau III.4 : les abréviations utilisée dans les deux premiers comparateurs.

Tableau III.5 : les temporisations.

Tableau III.6 : les abréviations utilisée pour les actions.

Tableau III.7 : les abréviations utilisée pour les réceptivités.

Liste des figures et des tableaux

Listes des figures

Chapitre I :

Figure I.1 : Différentes énergies renouvelables.....	3
Figure I.2 : Structure basique d'une cellule solaire.....	4
Figure I.3 : le principe de fonctionnement d'une cellule solaire	5
Figure I.4 : Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque.....	6
Figure I.5 : Caractéristique P-V d'une cellule photovoltaïque.....	7
Figure I.6 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$	9
Figure I.7 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$	9
Figure I.8 : L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$	10
Figure I.9 : L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$	10
Figure I.10 : La caractéristique résultante obtenue en association en série.....	11
Figure I.11 : La caractéristique obtenue lors d'association en parallèle.....	12
Figure I.12 : La caractéristique résultante obtenue en association en parallèles/série.....	13

Chapitre II :

Figure II.1 : Modèle équivalent d'une cellule PV.....	15
Figure II.2 : Schéma bloc de simulation du module PV.....	18
Figure II.3 : Caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque pour $E_s=1000$ W/m^2 et $T=25$ °C.....	19
Figure II.4 : Caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque pour $E_s=1000$ W/m^2 et $T=25$ °C.....	19
Figure II.5 : Caractéristique courant-tension pour différents éclairagements.....	20
Figure II.6 : Caractéristique puissance-tension pour différents éclairagements.....	20
Figure II.7 : Caractéristique courant-tension pour différentes températures.....	21
Figure II.8 : Caractéristique puissance-tension pour différentes températures.....	21

Liste des figures et des tableaux

Figure II.9 : Défaut de fissuration d'un panneau PV.....	22
Figure II.10 : Jaunissement et brunissement des cellules.....	23
Figure II.11 : Défaut de la délamination.....	23
Figure II.12 : Défaut de Snail trail.....	24
Figure II.13 : Ombrage partiel.....	26
Figure II.14 : Ombrage total.....	27
Figure II.15 : Panneau PV avec défaut d'ombrage partiel à 50%.....	28
Figure II.16 : Caractéristique courant-tension pour ombrage de 50%.....	28
Figure II.17 : Caractéristique puissance-tension à 50% d'ombrage.....	29
Chapitre III :	
Figure III.1 : les types des suiveurs solaires.....	32
Figure III.2 : Suiveur solaire passif.....	33
Figure III.3 : Exemple et fonctionnement du suiveur actif.....	33
Figure III.4 : Panneaux solaires avec système de poursuite mon axiale.....	34
Figure III.5 : Panneau solaire avec système de poursuite bi-axiale.	34
Figure III.6 : structure des systèmes automatisés.....	37
Figure III.7 : Symbolisation d'un GRAFCET.	40
Figure III.8 : grafcet du suiveur solaire.....	45
Figure III.9 : fenêtre de création d'un projet.....	50
Figure III.10 : sélection d'une cpu.	50
Figure III.11 : choix du bloc et de langage de programmation.....	51
Figure III.12 : nomination du projet.	51
Figure III.13 : création du programme S7.....	52
Figure III.14 : partie de la table mnémonique.....	53

Le marché du photovoltaïque a énormément augmenté au cours de la dernière décennie, en particulier ces dernières années, grâce à une variété de facteurs incitatifs : réduction des coûts de production et politiques de soutien. Ces facteurs de stimulation rendent le retour sur investissement des systèmes photovoltaïques de plus en plus attractif. Comme tous les autres procédés industriels, un système photovoltaïque peut être soumis, au cours de son fonctionnement, à différents défauts et anomalies conduisant à une baisse de la performance du système et voire à l'indisponibilité totale du système [25]. Toutes ces conséquences défavorables réduisent clairement le rendement des systèmes photovoltaïques.

Dans la recherche des solutions à la maîtrise des systèmes photovoltaïques, il nous paraît intéressant de connaître les bénéfices d'une nouvelle technique du suiveur solaire basée sur deux axes. L'intérêt de ce travail est donc la modélisation et la simulation d'un panneau photovoltaïque sain et avec un défaut d'ombrage et d'automatiser un suiveur solaire à deux axes afin d'augmenter le rendement d'un panneau photovoltaïque.

Notre mémoire est structuré en trois principaux chapitres en plus de l'introduction générale, de la conclusion générale et des perspectives de ce travail.

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art sur les systèmes photovoltaïques et l'influence de certains paramètres sur le comportement d'un panneau photovoltaïque.

Le deuxième chapitre est dédié à la modélisation et la simulation d'une cellule photovoltaïque pour obtenir les caractéristiques courant-tension et puissance-tension pour un panneau photovoltaïque sain et avec un défaut d'ombrage.

Le dernier chapitre est consacré à l'optimisation de l'utilisation de l'énergie solaire par le biais des suiveurs solaires à deux axes. L'automate du suiveur solaire est programmé par deux langages graphiques (Grafset et Ladder) après élaboration d'un cahier des charges détaillé de notre système.

I.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque est l'un des enjeux de la politique énergétique de notre siècle, qui résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique, au moyen d'une photopile. Cette photopile, qu'on appelle aussi, cellule solaire ou cellule photovoltaïque, est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs, généralement à base de "silicium cristallin", qui reste la filière la plus avancée sur le plan technologique et industriel, car le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre, sous forme de silice non toxique.

Nous allons consacrer ce chapitre aux généralités sur les systèmes solaire.

I.2 Energies renouvelables

I.2.1 Définitions

Il existe de nombreux concepts relatifs aux énergies renouvelables, on les a trouvés dans de nombreuses sources. Mais elle peut être définie comme une énergie produite à partir de sources naturelles renouvelables et toujours disponibles, c'est-à-dire, ce sont des sources qui se renouvellent assez rapidement de telle sorte que l'utilisation actuelle n'ait pas d'impact sur la disponibilité future, dans ce sens on appelle les énergies renouvelables ou énergies vertes toutes énergies qui ne nuit pas à l'environnement, parce qu'elle fait appel à des éléments qui se recréent naturellement [1].

I.2.2 Différents types d'énergies renouvelables

Parmi les énergies renouvelables, on a :

- L'énergie solaire ;
- L'énergie éolienne ;
- La biomasse ;
- L'énergie hydraulique ;
- L'énergie géothermique.



Figure I.1 : Différentes énergies renouvelables.

I.3 Energie photovoltaïque

I.3.1 Cellule photovoltaïque

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

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche anti-reflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.

Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants, juste en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

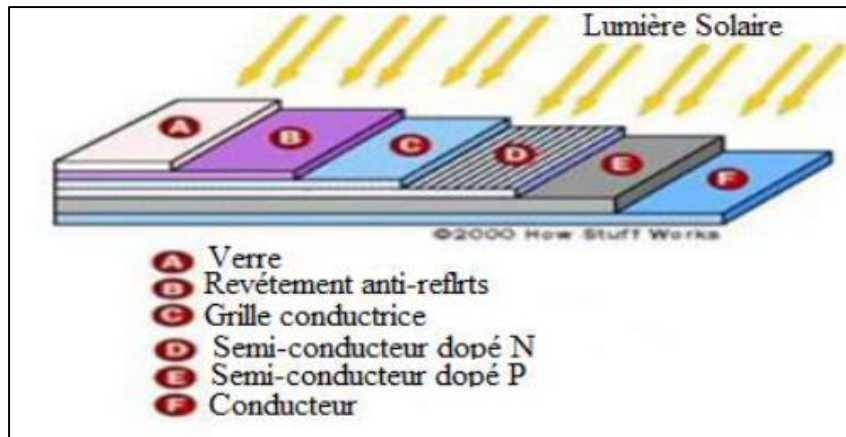


Figure I.2: Structure basique d'une cellule solaire.

Une cellule photovoltaïque est basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [2].

I.3.2 Principe de fonctionnement

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur ;
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure I.3

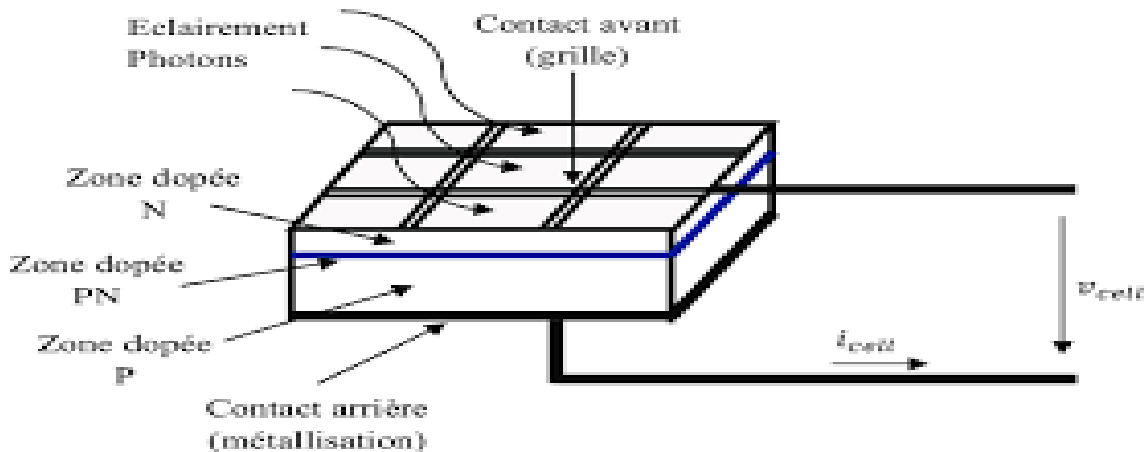


Figure I.3 : Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et dans la zone de charge d'espace.

Les photo-porteurs auront un comportement différent suivant la région :

- Dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura une photo courant de diffusion
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons/ trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région N, les trous vers la région P. On aura une photo courant de génération [3]

I.3.3 Caractéristique de la cellule PV

I.3.3.1 Courant de court-circuit, I_{cc}

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$ dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température [4].

I.3.3.2 Tension de circuit ouvert, V_{co}

La tension à circuit-ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse [4].

I.3.3.3 Courbe courant -tension

La tension à circuit-ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse [5] :

- Le point E, est le point de fonctionnement optimal auquel la cellule fournit sa puissance maximale.
- Le point D, où la tension est égale à zéro et le courant est maximum (courant de court circuit I_{cc}).
- Le point A, où le courant est égal à zéro et la tension est maximale (tension de circuit ouvert, V_{co}).

Pratiquement la caractéristique I-V peut être divisée en trois zones :

- Une zone où la cellule est considérée comme une source de courant [D-C].
- Une zone où la cellule est considérée comme une source de tension [B-A].
- Une zone où ni la tension ni le courant sont constants, peut être une source de puissance

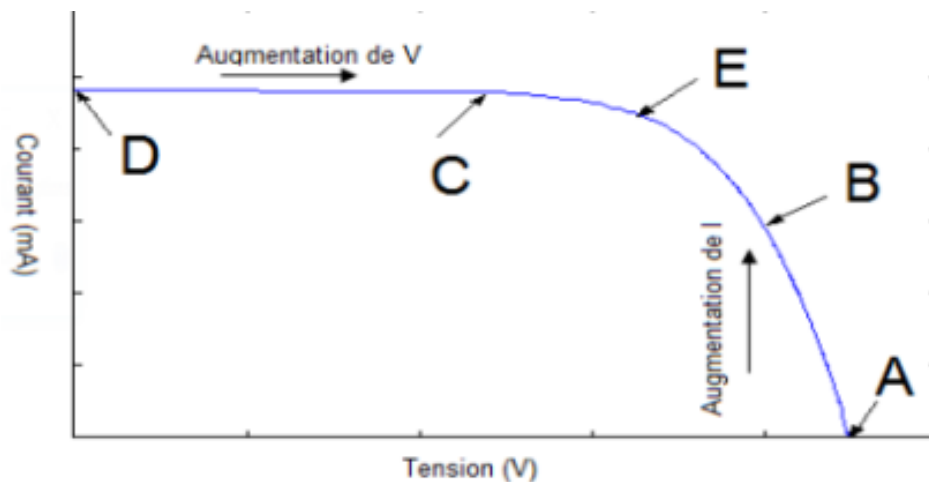


Figure I.4 : Caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque.[5]

I.3.3.4 Courbe puissance -tension

La courbe de la puissance est capable de donner la valeur de puissance maximale à des conditions d'ensoleillement et de température bien définies.

- **Puissance STC** : On appelle puissance crête, aussi nommée puissance "catalogue" la puissance délivrée par une cellule est sous conditions standard STC, notée WC (Watt crête) ou WP (Watt peak)
- **Puissance NOCT** : La puissance NOCT (Nominal Operating Cell Température TUC en français) d'un module photovoltaïque s'exprime en Watt : c'est la puissance qu'il peut fournir s'il est fermé sur sa charge optimale et soumis à une irradiance de 800W/m^2 (spectre AM 1.5) alors que la température ambiante est de 20°C , son inclinaison de 45° , ses deux faces libres, un vent de face de 1 m/s dans les conditions de circuit ouvert.
- **Normalisation** :

Les conditions standard de qualification des modules photovoltaïques sont :

- ❖ Un spectre aire masse AM1.5.
- ❖ Un éclairement de 1000W/m^2 .
- ❖ Une température de 25°C

Les constructeurs de panneaux solaires spécifient les performances de leur matériel dans les conditions normalisées citées ci-dessus (S.T.C. : Standard Test Conditions), [5]

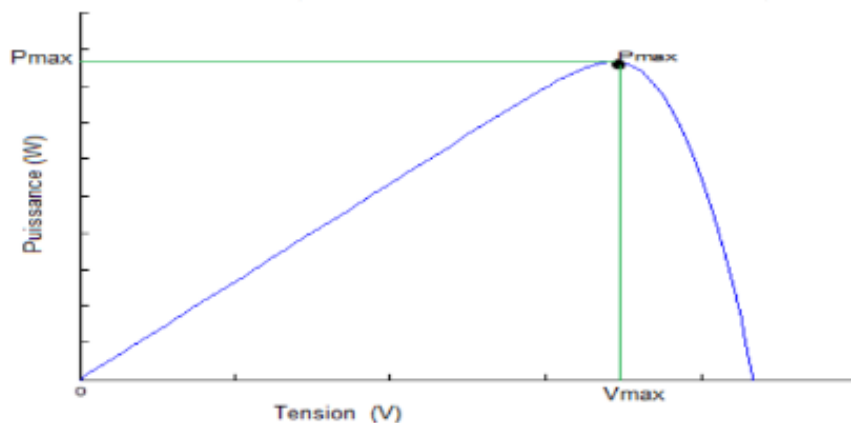


Figure I.5 : Caractéristique P-V d'une cellule photovoltaïque.

I.3.3.5 Facteur de forme, FF

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule P_{max} (I_{max} , V_{max}) et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit-ouvert V_{co} (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_s et R_{sh} . Il est défini par [6] :

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (I.1)$$

I.3.3.6 Rendement de conversion, η

Le rendement η des cellules PV, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport de la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} [2] :

$$\eta = \frac{FF \cdot V_{co} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \quad (I.2)$$

$$P_{in} = p \cdot S$$

P_{in} : Puissance incidente (W).

p : Puissance d'éclairement reçue par unité de surface W/m².

S : surface de la cellule photovoltaïque

I.4 Influence de l'ensoleillement

Les figures (I.6) et (I.7) présentent un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement et de température fixe.

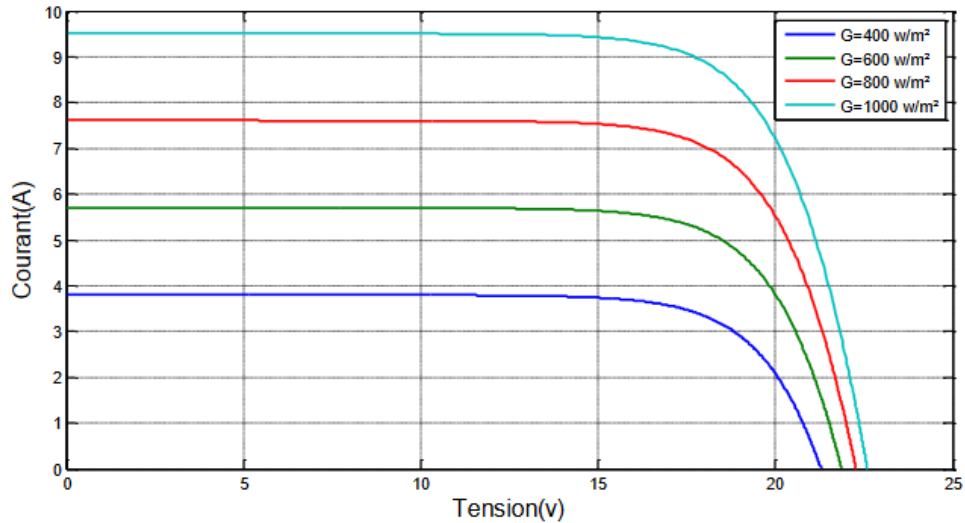


Figure I.6: Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ [9].

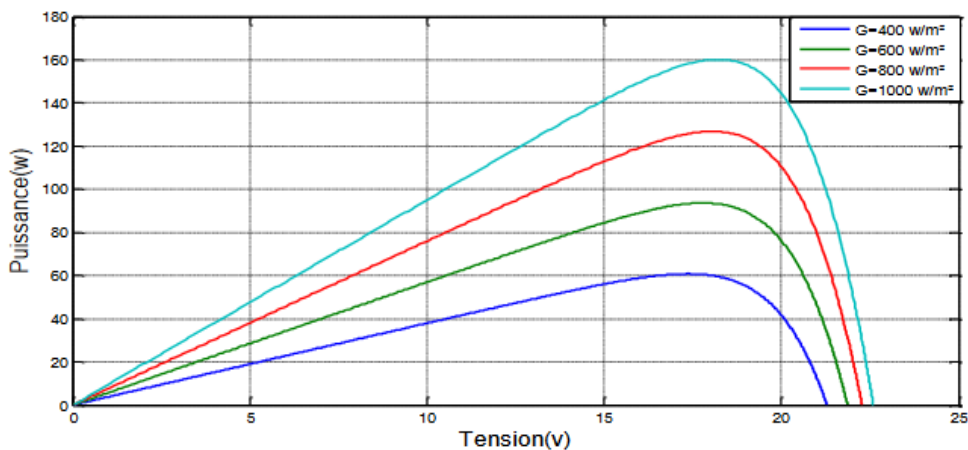


Figure I.7 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$. [9]

On remarque qu'une baisse de l'ensoleillement provoque une diminution de la création de paires électron-trou avec un courant. Il y'a une baisse du courant solaire I_{cc} proportionnelle à la variation de l'ensoleillement accompagnée d'une très légère diminution de la tension V_{co} et donc un décalage du point P_{max} du panneau solaire vers les puissances inférieures.

Il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement. Ceci implique donc que : - La puissance optimale de la cellule (P_{max}) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement. - Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

I.5 Influence de la température :

Les graphes suivants représentent des courbes $I(V)$ et $P(V)$ pour différentes températures de fonctionnement du module photovoltaïque à une irradiation constante.

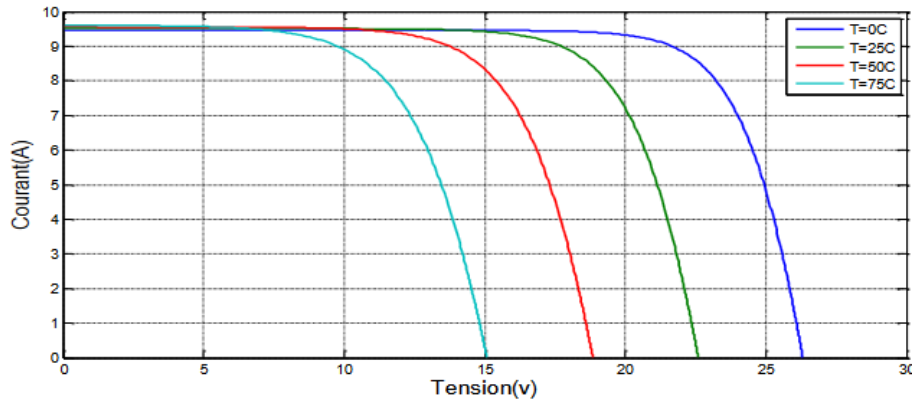


Figure I.8 : L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ [9]

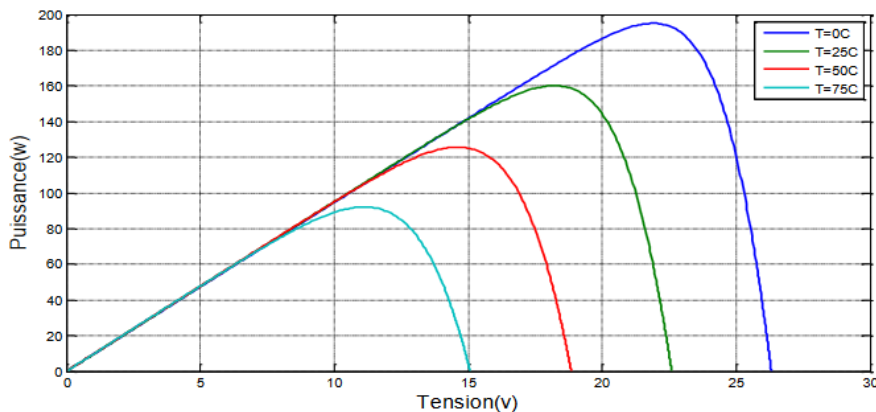


Figure I.9: Influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ [9]

Nous constatons que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant Court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente. On en déduit donc que le panneau peut fournir une tension correcte même à faible éclairage, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte. Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25 °C.

I.6 Association des cellules photovoltaïques

I.6.1 Association série

Dans un groupement de N_s cellules en série, la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, alors que le courant traversant des cellules reste le même. La (figure1.11) montre la caractéristique résultante (I_{sc} , V_{sc0}) avec [10]

$$I_{sc} = I_{cc} \quad (I.4)$$

$$\text{Et } V_{sc0} = n_s * V_{c0} \quad (I.5)$$

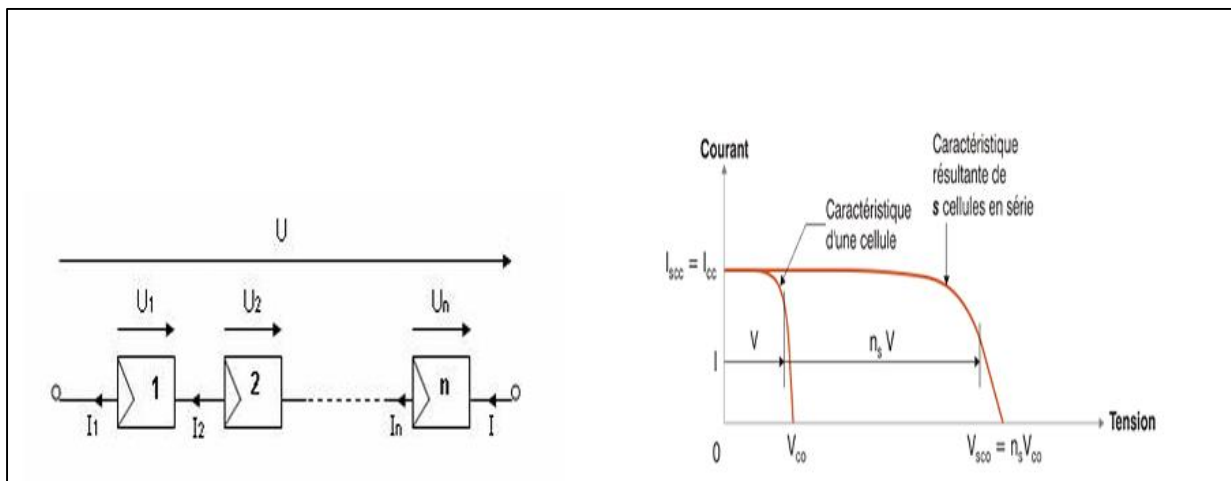


Figure I. 10 : caractéristique résultante obtenue en association en série.

I.6.2 Association en parallèle

Dans un groupement de N_p cellules en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par l'addition des courants. la (figure 1.11) montre la caractéristique résultante (I_{pcc} , V_{pco}) Avec : [7]

$$I_{pcc} = n_p * I_{cc} \quad (I.7)$$

$$\text{Et : } V_{pco} = V_{c0} \quad (I.8)$$

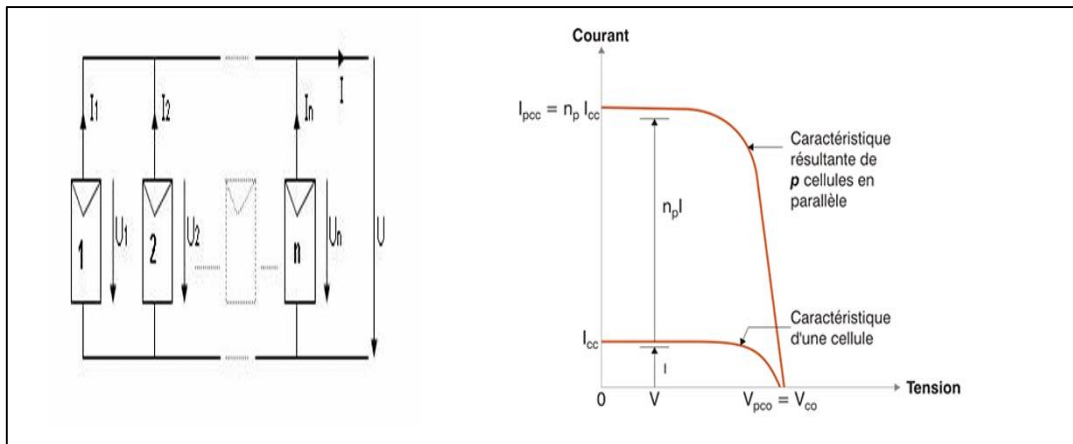


Figure (I.11) : Caractéristique obtenue lors d'association en parallèle.

I.6.3 Association en série/parallèle

Selon l'association en série et en parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations suivantes [7]

$$I_{spcc} = n_p * I_{cc} \quad (\text{I.9})$$

Et

$$V_{spc0} = n_s * V_{c0} \quad (\text{I.10})$$

n_p : nombre de cellules en parallèle.

n_s : nombre de cellules en série

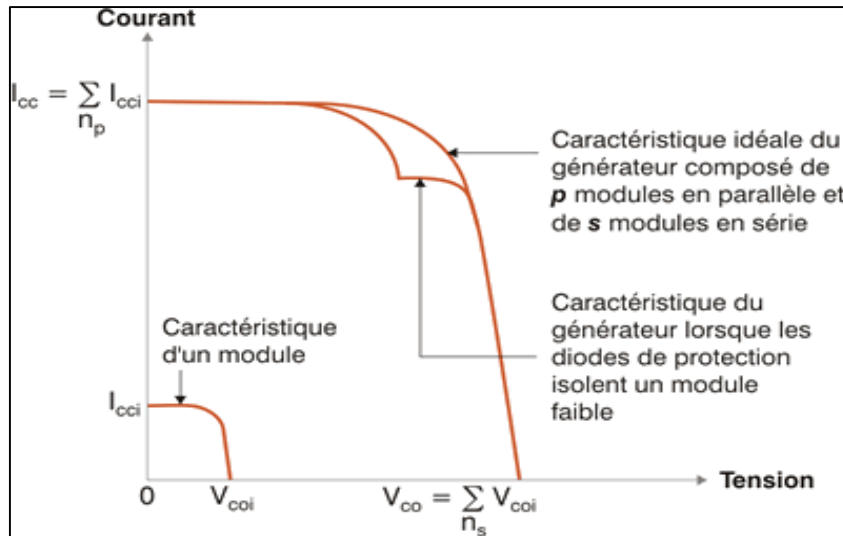


Figure I. 12 : Caractéristique résultante obtenue en association en parallèles/série.

I.7 Avantages de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages [8] :

- ✓ La production de cette électricité renouvelable est propre. Elle n'est pas toxique.
- ✓ Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- ✓ L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, dû à leur petite taille, et leur opération silencieuse.
- ✓ La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne, dans un village isolé, que dans le centre d'une grande ville.
- ✓ L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur.
- ✓ Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle).
- ✓ La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans.

I.8 Inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

- ✓ Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- ✓ Coût très élevé.
- ✓ Faible rendement de conversion.
- ✓ S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.

I.9 conclusion :

Dans ce chapitre, une généralité sur les systèmes photovoltaïques a été présenté.

D'abord nous avons discuté sur les énergies renouvelables en générale et la possibilité de convertir le rayonnement solaire en électricité, grâce à l'énergie photovoltaïque. Ensuite nous avons parlé sur la photopile. Le fonctionnement d'une cellule solaire a été défini, nous avons cité les caractéristiques de la cellule et les différents paramétrés.

Dans la deuxième partie, nous avons parlé sur la mise en série ou en parallèle des cellules PV qui engendre divers problèmes de déséquilibre qui peuvent être extrêmement préjudiciables si les cellules n'ont pas le même point de fonctionnement. Nous avons également présenté l'influence des différents paramètres extérieurs (température, l'éclairement) et nous remarquons que le courant de court-circuit évolue principalement avec l'éclairement et la tension à vide avec température.

A la fin, nous avons cité les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

II.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente une alternative intéressante et bien adaptée à des besoins limités. Malgré sa facilité de mise en œuvre, son faible impact environnemental et le peu d'entretien qu'il nécessite, un système photovoltaïque n'est plus concurrentiel lorsque la demande augmente. La performance d'un système PV dépend fortement des conditions météorologiques, telles que le rayonnement solaire et la température.

Ce chapitre a pour but de présenter la modélisation et la simulation d'un panneau photovoltaïque avec et sans défaut.

II.2 Présentation et modélisation d'un panneau photovoltaïque

II.2.1 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque PV

Un module PV se compose d'un certain nombre de cellules solaires connectées en série et en parallèle pour obtenir les niveaux de tension et de courant désirés. Une cellule de panneau solaire est essentiellement une jonction de semi-conducteur p-n. Lorsqu'il est exposé à la lumière, un courant continu est généré. Pour simplifier, le modèle à une seule diode de la figure (II.1) est utilisé dans ce document. Ce modèle offre un bon compromis entre simplicité et précision avec la structure de base. Le circuit équivalent du modèle général se compose d'un photo-courant (I_{ph}), d'une diode, d'une résistance parallèle (R_{sh}) exprimant un courant de fuite et d'une résistance série (R_s) due aux contacts entre les semi-conducteurs et les parties métalliques [12].

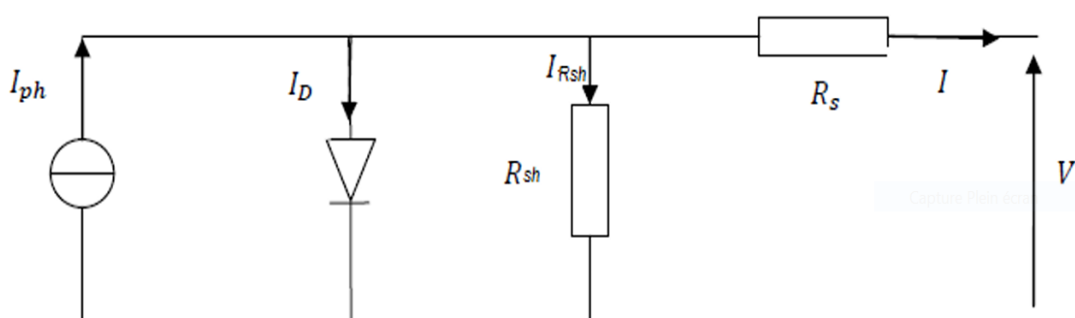


Figure II. 1 : Modèle équivalent d'une cellule PV.

II.2.2 Equations de la cellule PV

Dans la Figure (II.1.) En appliquant la loi de Kirchhoff, le courant sera obtenu par l'équation suivante

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 - I_p \quad (II.1)$$

Avec :

I_{ph} : Courant généré par la lumière ou le photocourant.

I_{sh} : Courant qui circule dans la résistance parallèle, il est donné par l'équation suivante :

$$I_{sh} = \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \quad (II.2)$$

I_0 : Courant de la diode qui est proportionnel au courant de saturation, il est donné par l'équation suivante :

$$I_0 = I_s \left[\exp \left(\frac{q.(V + I.R_s)}{K.T.c.A} \right) - 1 \right] \quad (II.3)$$

Avec :

I_s : Courant de saturation inverse en ampère (A) ;

q : Charge d'électrons ($1,6 \times 10^{-19}$ C) ;

K : Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J / K) ;

T_c : Température de la cellule en Kelvin (K) ;

A : Facteur idéal ;

R_s : Résistance série (Ω).

Nous remplaçons dans l'équation (II.1), l'équation caractéristique tension-courant d'une cellule solaire, elle est donnée comme suit

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + I.R_s)}{K.T.n.N} \right) - 1 \right] - \frac{(V + I.R_s)}{R_{sh}} \quad (II.4)$$

Le photocourant dépend principalement de l'ensoleillement et de la température de fonctionnement de la cellule, qui est décrite par l'équation suivante :

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i \cdot (T - 298)] \cdot \frac{G}{1000} \quad (\text{II.5})$$

I_{sc} : Courant de court-circuit de la cellule à (25 ° C) et (1000W / m²) ;

K_i : Coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule ;

G : Ensoleillement en watt /mètre carré (W / m²) ;

G_{ref} : Ensoleillement de référence de la cellule (1000W / m²).

D'autre part, le courant de saturation de la cellule varie avec la température de la cellule, qui est décrite comme suit :

$$I_0 = I_{rs} \left(\frac{T_c}{T_n} \right)^3 \cdot \exp \left[\frac{q \cdot E_{g0} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right)}{n \cdot K} \right] \quad (\text{II.6})$$

I_{rs} : Courant de saturation inverse de la cellule à une température de référence et un rayonnement solaire ;

E_{g0} : Energie de gap du semi-conducteur utilisée dans la cellule en électronvolt (eV) ;

n : Facteur idéal qui dépend de la technologie PV.

Le courant de saturation inverse est donné par l'équation suivante

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp \left(\frac{q \cdot V_{oc}}{N_s \cdot n \cdot K \cdot T} \right) - 1} \quad (\text{II.7})$$

Où

N_s : Nombre des cellules en série d'un module PV ;

I_{sc} : Courant de court-circuit ;

V_{oc} : Tension en circuit ouvert.

II.3 Modélisation sous l'environnement Matlab/ Simulink

II.3.1 Caractéristiques des modules photovoltaïques

Les fabricants de panneaux solaires donnent les spécifications du panneau (I_{sc} , V_{oc} , I_{pm} , V_{pm}) en conditions normales de fonctionnement (insolation de 1000W/m², température

de 25°C, 1.5 AM). Les paramètres du panneau solaire fournis par le constructeur sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau II.1 : Paramètres d'un panneau solaire [26]

Paramètres	valeurs
Puissance maximale du panneau P_m	175W
Courant au point de puissance maximale I_{pm}	4.95A
Tension au point de puissance maximale V_{pm}	35.4V
Courant de court-circuit I_{sc}	5.4A
Tension en circuit ouvert V_{oc}	44.4V
Coefficient d'incrément de la tension (k_i)	-156 mV/°C
Coefficient d'incrément de courant (k_i)	0.053 mA/°C

Dans le bloc de simulation suivant, on a utilisé le modèle simplifié à une diode :

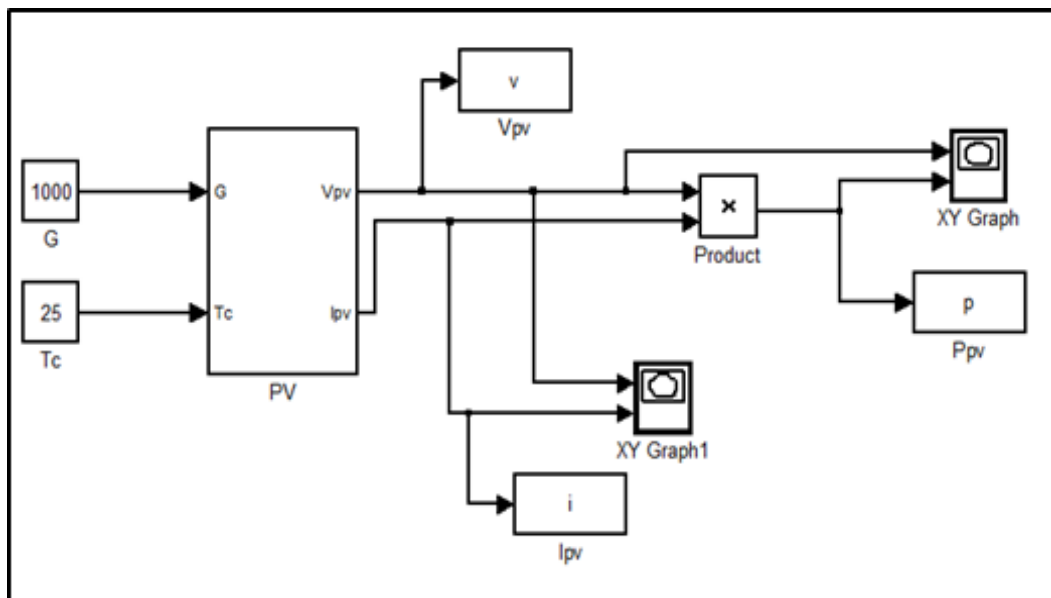


Figure II.2 : Schéma bloc de simulation du module PV.

Les caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque varient en fonction de la température et de l'irradiation. Les figures (II.3 et II.4) montrent les courbes caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'un panneau solaire dans les conditions standard (STC) de fonctionnement (pour $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$).

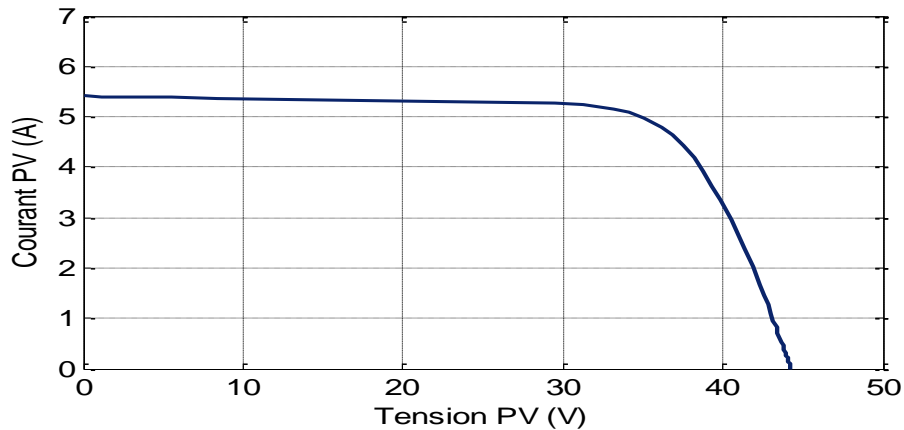


Figure II.3 : Caractéristique courant –tension d'un module photovoltaïque pour $G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$

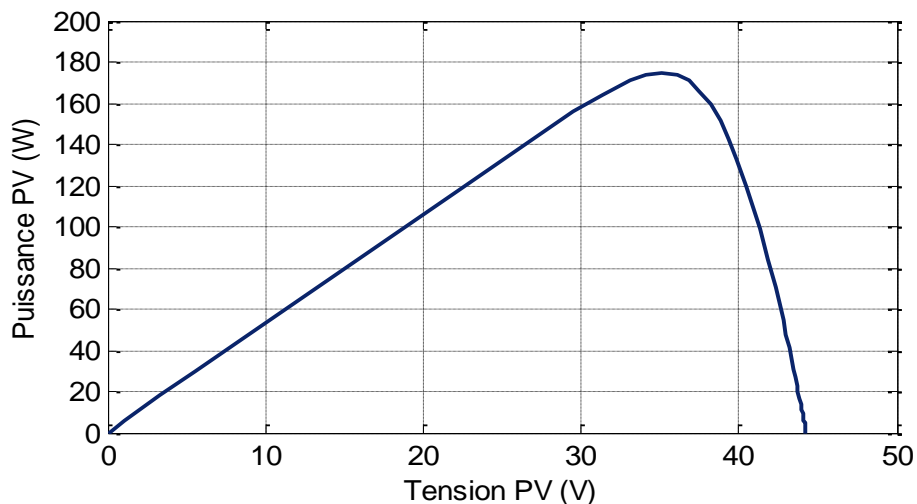


Figure II.4 : Caractéristique puissance –tension d'un module photovoltaïque pour $G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$.

II.3.2 Influence de l'irradiation et de la température sur les paramètres des modules PV

II.3.2.1 Influence de l'irradiation sur les paramètres des modules PV

La croissance du rayonnement solaire (flux lumineux) se manifeste par un mouvement de la propriété $I_{pv}=f(V_{pv})$ autour de l'axe des courants. La croissance du courant de court-

circuit est plus importante que celle de la tension à circuit ouvert, car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement, tandis que la tension à circuit ouvert est logarithmique [14]. La variation du courant (I_{pv}) et de la puissance (P_{pv}) en fonction de la tension (V_{pv}) est satisfaisante pour les niveaux d'éclairement suivants ($G=200\text{W/m}^2$, 400W/m^2 , 600W/m^2 , 800W/m^2 , 1000W/m^2 et $T=25^\circ\text{C}$):

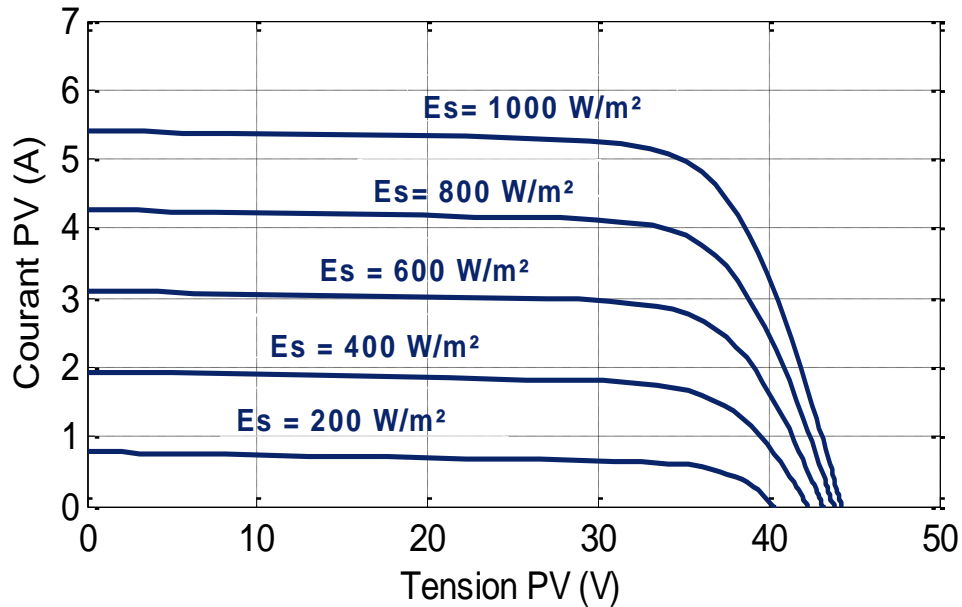


Figure II.5 : Caractéristique courant-tension pour différents éclairements

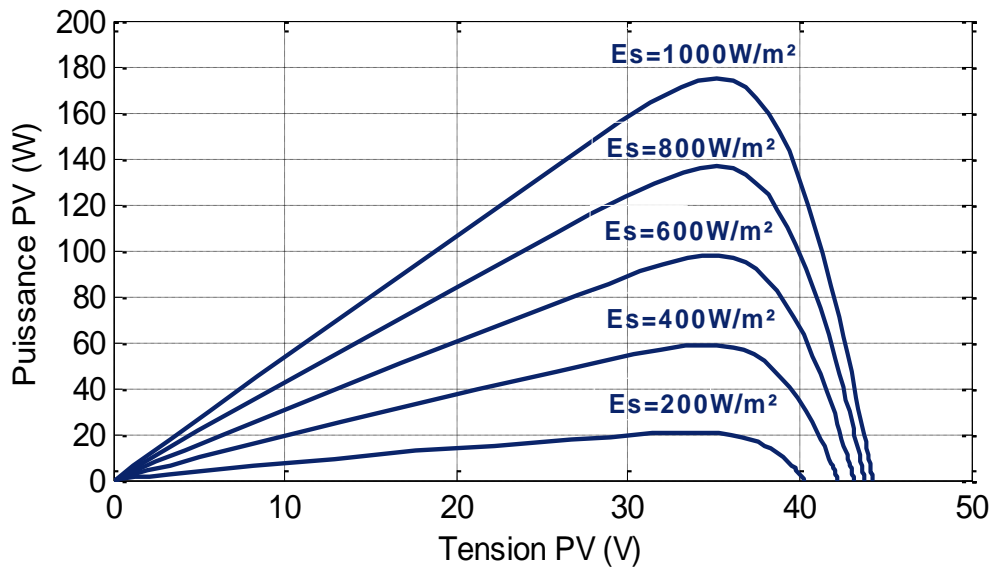


Figure II.6 : Caractéristique puissance-tension pour différents éclairements.

II.3.2.2 Influence de la température sur les paramètres des modules PV

Si la température de la cellule augmente, le photo-courant I_{ph} augmente en raison de la diminution de la largeur de la bande interdite du matériau. Le courant direct de la jonction augmente de l'ordre de 0.01% degré C° , ce qui entraîne une diminution de la tension de circuit ouvert de 2mV par cellule. La perte de puissance fournie est estimée à 0,5 % par degré pour un module [10]

La variation du courant (I_{pv}) et de la puissance (P_{pv}) en fonction de la tension (V_{pv}) pour différents niveaux de température ($T=0^\circ C$, $T=25^\circ C$, $T=50^\circ C$, $T=75^\circ C$ et $1000W/m^2$) est bien indiquée dans les figures (II.7et II.8) :

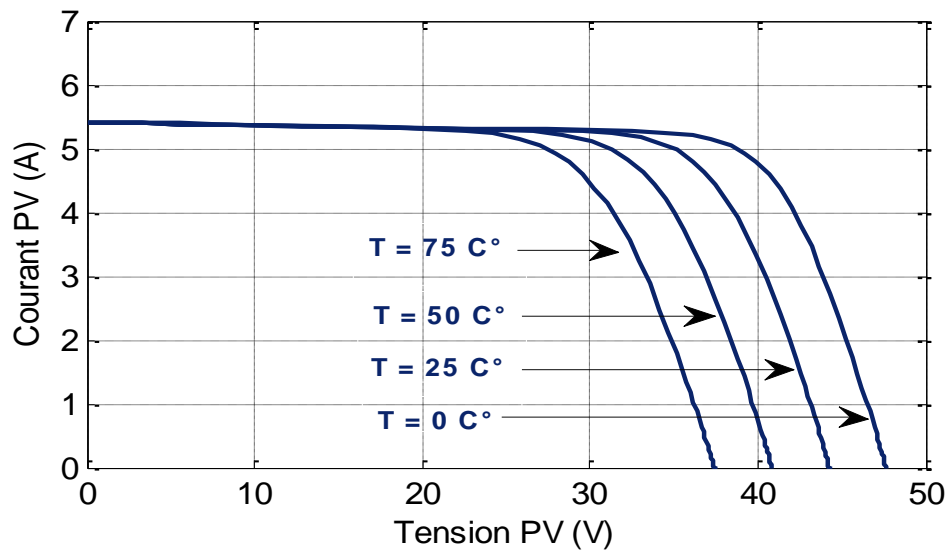


Figure II.7 : Caractéristique courant-tension pour différentes températures.

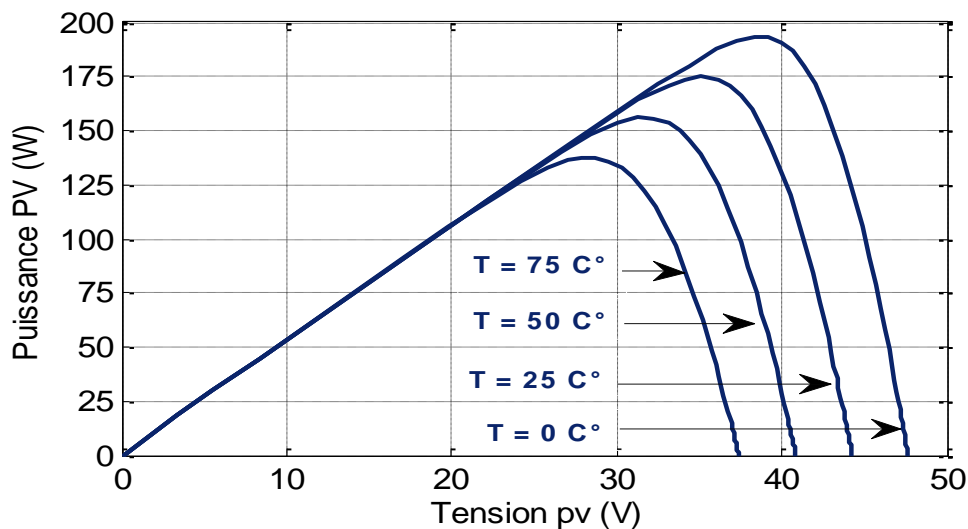


Figure II.8 : Caractéristique puissance-tension pour différentes températures.

À partir des courbes précédentes, on constate que le courant produit par la cellule I_{ph} et la puissance sont pratiquement proportionnels à l'éclairement solaire G . Un panneau solaire donne des caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ présentées sur les figures précédentes, et ces courbes mettent en évidence un point où la puissance absorbée par la charge est maximale, ce point est appelé point de puissance maximale, PPM. Cette puissance se dégrade en fonction de l'ensoleillement et de la température. La charge impose aussi une caractéristique spécifique qui diffère généralement du PPM.

II.4 Différents types de défauts dans les panneaux solaires

II.4.1 La fissuration

La fissuration des panneaux solaires se réfère à la formation de petites fissures ou de craquelures dans les panneaux solaires photovoltaïques, généralement causées par des contraintes mécaniques, thermiques ou environnementales. Ces fissures peuvent compromettre l'efficacité énergétique du panneau en réduisant sa capacité à convertir la lumière solaire en électricité [14].



Figure II.9 : Défaut de fissuration d'un panneau PV.

II.4.2 Jaunissement et brunissement

Il est généralement dû à une dégradation de l'EVA ou du matériau adhésif entre le verre et les cellules. Il s'agit d'un changement de couleur dans le matériau du blanc au jaune, et en suite du jaune au brun. Et ça implique une dégradation dans le rendement du GPV [14].



Figure II.10 : Jaunissement et brunissement des cellules.

II.4.3 Délamination

La délamination traduit la perte d'adhérence entre le polymère encapsulant et les cellules ou entre les cellules et le verre avant. Elle représente un problème majeur car elle entraîne deux effets : l'augmentation de la réflexion lumineuse et la pénétration de l'eau à l'intérieur de la structure du module. Parmi les raisons possibles pour lesquelles le délaminage de l'EVA se produit, on cite : « Températures extérieures élevées (la délamination se produit souvent dans les climats tropicaux et les panneaux semi-flexibles sont particulièrement vulnérables). » [12]

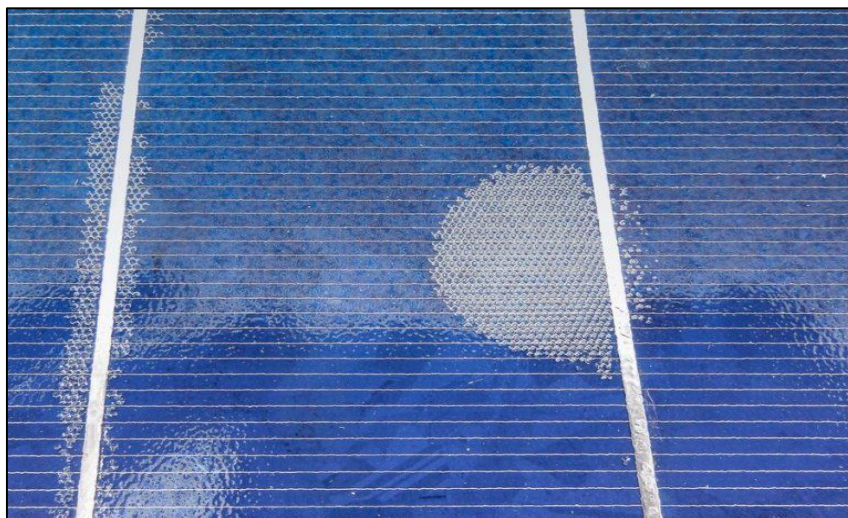


Figure II.11 : Défaut de la délamination [14].

II.4.4 Traînée d'escargot « Snail trail »

Le phénomène appelé « traînée d'escargot » se produit uniquement dans les panneaux solaires à base de silicium cristallin. Les petits dommages (fissure micro) difficiles à trouver visuellement, etc., provoquent un motif semblable à une trace d'escargot. Mais cela ne signifie pas que la production d'électricité tombe immédiatement après l'apparition de traînée d'escargot, elle n'est pas sujette à la garantie du fabricant dans les conditions actuelles.

Cependant, l'analyse de Trina Solar indique qu'il est impossible de dire que la quantité d'électricité produite ne tombera pas complètement, et nous devons observer les progrès. On dit que les microfissures qui causent l'escargot peuvent être causées en plaçant des objets lourds lors de l'installation, du transport ou de l'entreposage des panneaux solaires. À cet égard, il est difficile pour les utilisateurs d'y faire face [14].

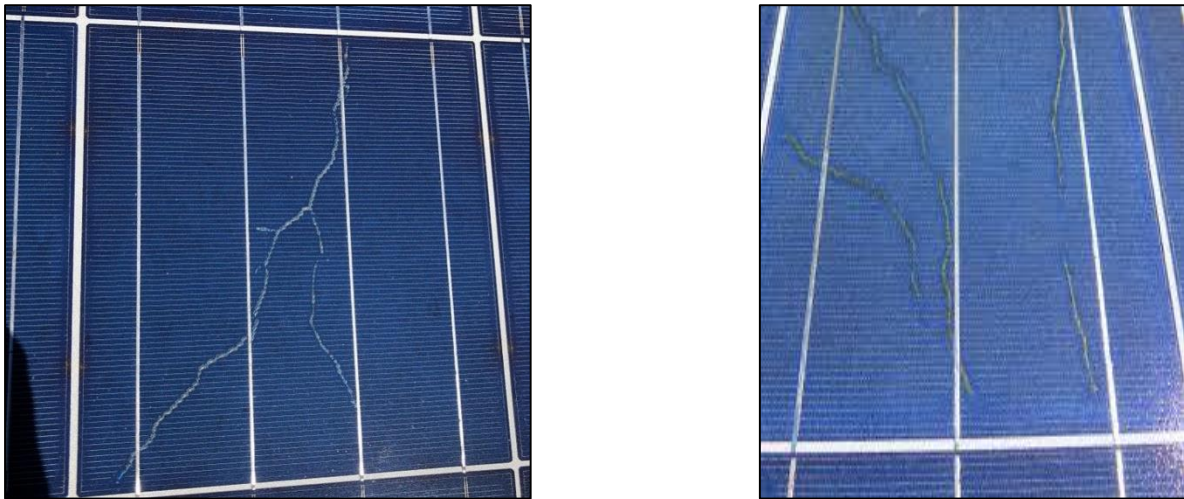


Figure II.12 : Défaut de Snail trail

II.4.5 Défauts dans le système de câblage

Au cours de son fonctionnement, une installation PV peut être éventuellement soumise à différents défauts et conditions de fonctionnement anormales et cela peut être due aux défauts de système de câblage tels que :

- Mauvais dimensionnement des câbles, cela entraîne une chute de tension.
- Connexion desserrée ou cassée, cela peut causer un arc électrique, incendie, destruction de la boîte de jonction et destruction des diodes.
- Câble mal dénudé, cela provoque un faux contact, circuit ouvert, arc électrique ouvert.
- Câble non fixé, cela traduit par un circuit ouvert.

II.4.5 Défauts de l'onduleur

Un onduleur ou convertisseur est un dispositif permettant de transformer la tension continue issue des modules photovoltaïques ou des batteries en tension alternative qui est réinjectée soit dans le réseau, soit dans un site isolé afin de couvrir ses besoins. En quelque sorte, il permet de rendre utilisable l'électricité produite par les modules ou par les batteries en respectant les caractéristiques techniques des appareils électriques ou du réseau [14].

Les défauts les plus rencontrés dans un onduleur sont les suivants :

- Dégradation à cause de la chaleur
- Faut contact, cela implique l'arrêt complète de l'onduleur.
- Surtension, ce qui provoque la déconnection de l'onduleur.
- Fusible fondu, implique l'arrêt de l'onduleur.
- Défaut d'isolement, destruction de l'onduleur.
- Onduleur surdimensionné, cela cause une perte de puissance et une diminution de performance.
- Onduleur non mis à la terre, cela implique un disjoncteur différentiel non actif.
- Afficheur de cristaux liquide endommagé ou illisible.

II.4.6 Défaut d'ombrage

***Qu'est-ce qu'une zone d'ombre sur un panneau photovoltaïque ?**

L'ombre sur les panneaux solaires se manifeste lorsque des obstacles, tels que des arbres ou des bâtiments, bloquent une partie ou la totalité des rayons solaires atteignant les panneaux. S'ils sont montés en série, cela impacte l'ensemble d'une rangée de panneaux.

Les sources d'ombrage sont variées

- Les nuages et obstacles environnementaux comme les arbres ou les feuilles des branches.
- Les bâtiments à proximité.
- L'auto-ombrage entre les panneaux disposés en rangées parallèles.

De plus, l'angle du soleil et l'heure de la journée peuvent aussi créer des zones d'ombrage [16].

II.4.6.1 Différents types d'ombrage et leur impact sur la production

❖ Ombrage partiel

L'ombrage partiel laisse passer une partie des rayons du soleil. C'est par exemple le cas lorsqu'un arbre se trouve à proximité de vos panneaux et qu'il crée une ombre sur celui-ci.

Dans ce cas, une partie des photons (particules de la lumière du soleil) peut tout de même atteindre vos panneaux. Mais cela réduit considérablement la quantité de lumière captée par les panneaux [15].



Figure II.13 : Ombrage partiel.

❖ Ombrage total

Le deuxième type d'ombrage qu'on peut observer est l'ombrage total, ou complet. C'est le cas lorsqu'un élément vient totalement recouvrir vos panneaux : une couverture, des feuilles mortes, de la saleté, etc.

Dans ce cas, aucune lumière ne peut atteindre la ou les cellules photovoltaïques recouvertes. Cela a un impact encore plus fort sur votre production d'électricité [15].



Figure II.14 : Ombrage total.

II.4.7 Conséquences des ombrages

Le fait d'avoir des ombrages partiels ou totaux sur vos panneaux solaires peut avoir des impacts importants sur votre production d'énergie. En effet, les cellules photovoltaïques sont montées en série. Par conséquent, si une cellule produit moins à cause d'un ombrage, cela engendre une baisse de production pour l'ensemble des cellules du panneau.

Si, en plus, vous avez fait le choix de vous équiper d'un onduleur central unique avec des panneaux branchés en série, alors c'est toute votre installation qui peut être impactée par la présence d'une ombre sur une cellule.

Heureusement, quelques solutions existent pour éviter ce désagrément [15].

II.5 Modélisation d'un panneau PV avec défaut d'ombrage sous Matlab-Simulink

Dans ces essais nous avons modélisé notre panneau PV avec défaut d'ombrage partiel à 50%. La (figure II.15) représente l'image d'un panneau PV à un ombrage de 50% installé au niveau de laboratoire LTII à l'université de Bejaïa :



Figure II.15:panneau PV avec défaut d'ombrage partiel à 50%.

Dont les valeurs de l'éclairement et de la température sont respectivement ($E=500W/m^2$, $T=22^\circ C$) :

Les figures (II .16 et II .17) représentent respectivement le courant en fonction de la tension et la puissance en fonction de la tension pour un panneau PV avec un défaut d'ombrage de 50%, pour un ensoleillement de ($E=500W/m^2$) et une température de ($T=22^\circ C$)

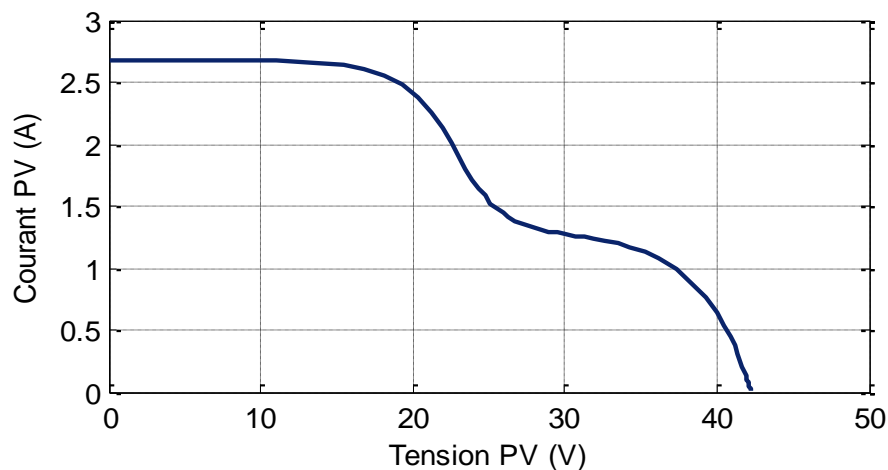


Figure II.16 : caractéristique courant tension pour un ombrage de 50%.

La courbe montre clairement l'impact de l'ombrage partiel sur le module PV. Les chutes abruptes dans le courant sont des indicateurs de la présence d'ombrage sur différentes parties du module. L'ombrage partiel entraîne une diminution du courant généré à des tensions spécifiques.

Les plateaux dans la courbe montrent que malgré l'ombrage, certaines parties du module continuent à produire de l'énergie.

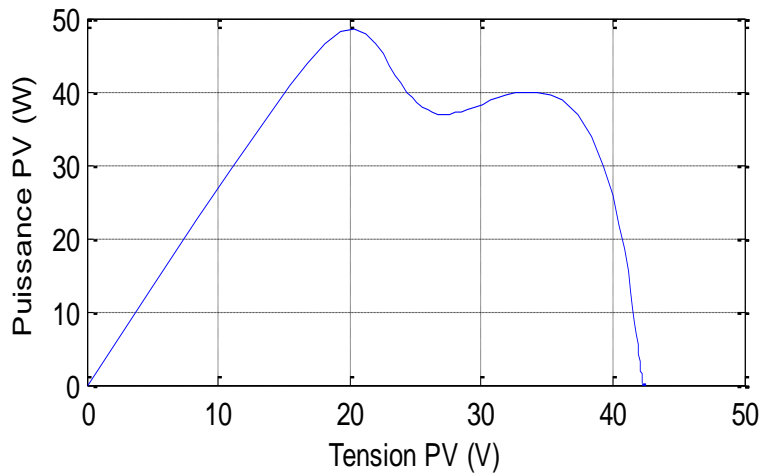


Figure II.17: Caractéristique puissance tension a 50% d'ombrage.

La courbe indique que pour maximiser la production d'énergie du module PV ombragé à 50%, le système doit fonctionner autour du premier MPP (environ 20V).

Le deuxième MPP pourrait être utilisé si le premier n'est pas accessible, mais il offre moins de puissance.

En résumé, la courbe montre l'impact significatif de l'ombrage partiel sur les performances d'un module photovoltaïque, mettant en évidence plusieurs points de puissance maximale à différentes tensions. Cela souligne l'importance d'un système de suivi du point de puissance maximale (MPPT) capable de s'adapter aux variations de l'ombrage.

I.6. Solutions pour limiter l'impact des ombrages

Il est vrai que les panneaux solaires nécessitent une exposition directe au soleil pour leur bon fonctionnement et de manière optimale. Cependant, cela ne signifie pas qu'ils cessent complètement de produire de l'électricité en présence d'ombre. En effet, grâce à l'innovation technologique et aux avancées dans le domaine des énergies renouvelables, les panneaux solaires modernes sont conçus pour minimiser l'impact de l'ombre. De plus, pour limiter l'effet de l'ombre sur les panneaux solaires, plusieurs solutions peuvent être mises en œuvre :

- **L'emplacement de l'installation solaire** : En choisissant judicieusement l'emplacement de l'installation, il est possible de prévenir les obstacles et la création

d'ombrages. Différentes zones d'implantation sont possibles comme des ombrières de parking, un carport, le toit ou même un abri de jardin.

- **L'utilisation de technologies innovantes** : Certains onduleurs classiques disposent d'un logiciel qui permet de gérer les ombres partielles. Il est aussi possible d'utiliser des panneaux photovoltaïques spécialisés qui minimisent les effets de l'ombre.
- **Le fonctionnement en parallèle** : Dans un système où les panneaux solaires sont connectés en parallèle, chaque panneau fonctionne indépendamment des autres. Ainsi, même si une partie du système est à l'ombre, les panneaux exposés au soleil continuent de produire de l'électricité.
- **L'utilisation de micro-onduleurs ou d'optimiseurs de puissance** : Les micro-onduleurs sont des dispositifs qui peuvent être installés sur chaque panneau solaire. Ces dispositifs permettent à chaque panneau de fonctionner indépendamment. Ainsi, si un panneau est ombragé, les autres continuent de produire de l'électricité de manière optimale.
- **L'orientation des panneaux** : Orienter les panneaux de manière à minimiser l'ombrage, tout en maximisant leur exposition au soleil, et dans ce cas on peut utiliser la technologie du suiveur solaire dont nous allons parler dans le troisième chapitre [16].

I.7 Conclusion :

Ce chapitre présente une étude détaillée d'un panneau photovoltaïque (PV) avec une diode sous diverses conditions de fonctionnement, en utilisant l'environnement MATLAB-Simulink. Les simulations analysent l'impact de la variation de l'éclairement et de la température, ainsi que l'effet de l'ombrage à 50% sur les performances du module PV.

En conclusion, l'étude démontre l'importance de contrôler les conditions d'éclairement et de température pour optimiser les performances d'un panneau PV. L'ombrage partiel est particulièrement préjudiciable, soulignant la nécessité de stratégies d'atténuation telles que les optimiseurs de puissance pour maintenir une performance efficace.

III.1 Introduction :

L'énergie solaire peut être utilisée autant que possible, grâce au suiveur de soleil, c'est la meilleure exploitation d'une richesse solaire. Aujourd'hui les suiveurs sont de plus en plus couramment utilisés grâce à la technologie moderne.

L'automatisation des suiveurs solaires émerge comme une innovation révolutionnaire. Ces systèmes sophistiqués intègrent des technologies de pointe pour ajuster automatiquement l'orientation des panneaux solaires en fonction de la position du soleil, maximisant ainsi leur rendement énergétique. En éliminant la nécessité d'une intervention humaine constante, l'automatisation des suiveurs solaires représente un pas de géant vers une exploitation plus efficace et rentable de l'énergie solaire,

Dans cette partie du travail, nous allons étudier et simplifier la commande du suiveur solaire à deux axes. Notre objectif dans ce chapitre est de créer un Grafcet du suiveur solaire selon à deux axes, et traduire en langage LADDER.

III.2 Définitions d'un suiveur solaire

Les suiveurs solaires s'orientent vers le soleil pour exploiter davantage la lumière du soleil. Les trackers solaires sont positionnés et fixés aux panneaux solaires. Selon le type de trackers obtenus et installés, la plage d'installation variera. [17]

L'idée est de pouvoir incliner les panneaux solaires dans le sens où le soleil se déplace tout au long de la journée et, par conséquent, tout au long de l'année au fur et à mesure que les saisons et le temps changent. La fonctionnalité est simple : plus les panneaux PV sont orientés directement vers le soleil, plus la puissance peut être générée.

En effet, un suiveur solaire à deux axes peut augmenter le rendement d'un panneau PV jusqu'à 40% de plus qu'un panneau fixe [17]

III.2.1 Principe de fonctionnement

Le tracker suit le soleil dans sa course toute la journée et pendant toute l'année, ce système fonctionne dépendamment au déplacement de panneau selon la position du soleil varie constamment selon les saisons, aussi, cette orientation permet de mettre le panneau dans la position verticale au rayonnement solaire. Pour Cela le système fait l'orientation du capteur qui fait tourner le panneau vers le soleil. Connaissant le changement de position du soleil, il est nécessaire de le prendre en considération pour augmenter la production d'énergie. Il est

mieux d'utiliser un suiveur avec deux axes (d'est en ouest) pour l'avance de la journée et l'autre axe pour les saisons (nord et sud), mais il existe des suiveurs mono axe [18].

III.2.2 Types de suiveurs solaires

Les trackers solaires classent l'énergie solaire selon deux critères :

- stratégie de contrôle (positionnement).
- le degré de liberté du suiveur

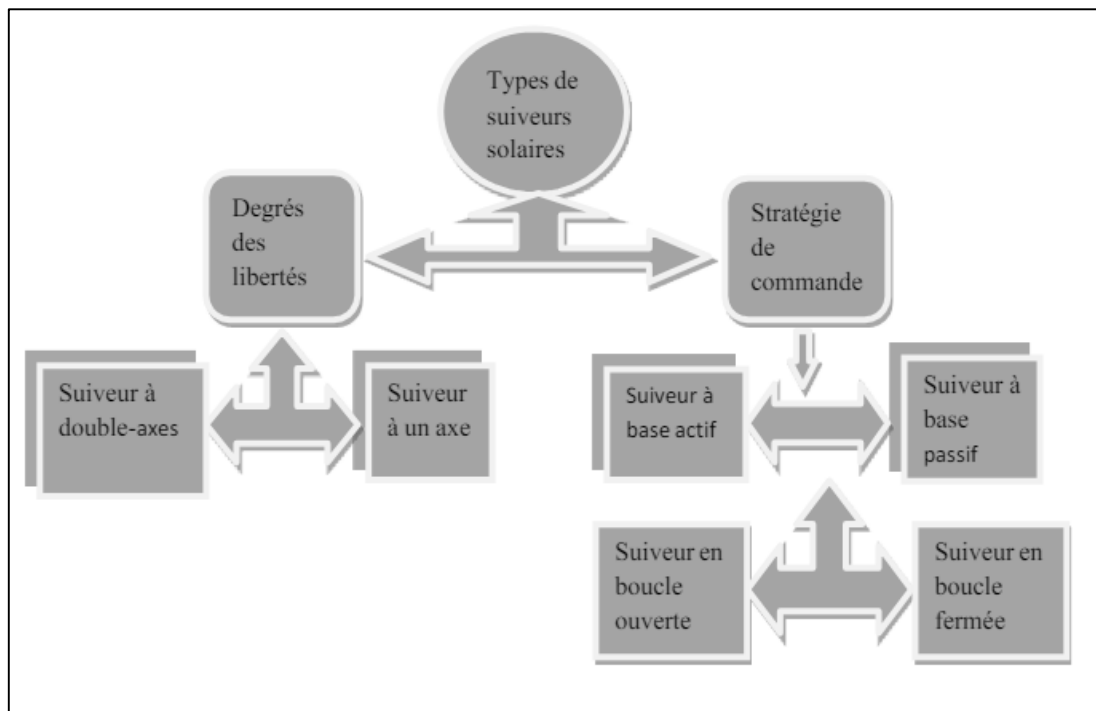


Figure III.1 : les types des suiveurs solaires [18].

III.2.2.1 Suiveurs solaire passif :

Ce type contient deux tubes de cuivre remplis de liquides chimiques installés sur les côtés Est et Ouest du panneau photovoltaïque. Leur exposition au soleil entraîne l'évaporation des liquides. Le liquide évaporé occupe un volume interne plus important ce qui entraîne le mouvement du liquide.

Ainsi, le mouvement photovoltaïque est contrôlé par celui-ci pour équilibrer et ajuster.

Ce type de suiveur ne consomme pas d'énergie pour le repositionnement du panneau [18]

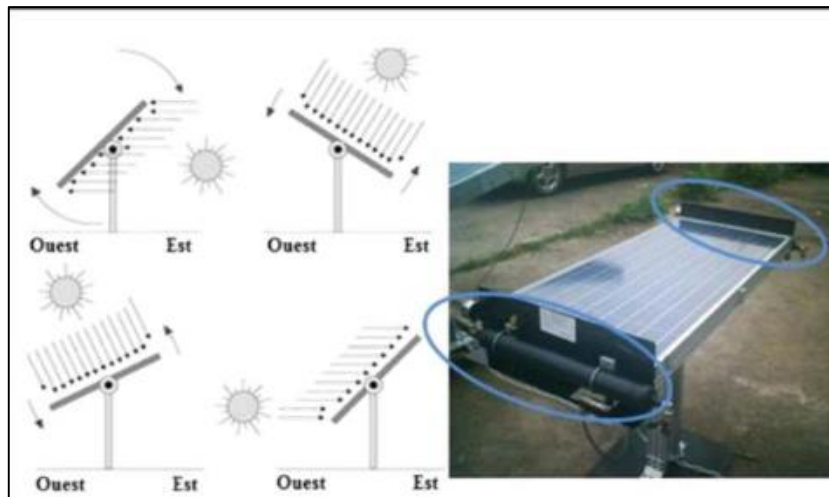


Figure III.2 : Suiveur solaire passif.

III.2.2.2 Suiveur solaire actif :

Un suiveur actif utilise le principe de la détection de lumière, suivant la trajectoire solaire en cherchant à optimiser au maximum l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur leur surface. Il existe deux types dans cette famille : les suiveurs mono-axe et à deux axes.

L'avantage de suiveur actif par rapport au suiveur passif, c'est qu'il présente une meilleure précision de suivi et ne nécessite aucune intervention manuelle pour les ajuster [19].

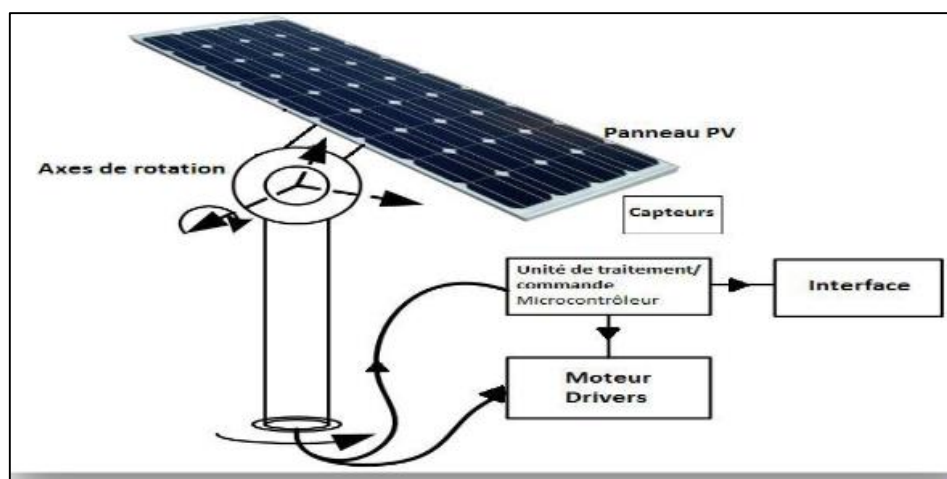


Figure III.3 : Exemple et fonctionnement du suiveur actif.

III.2.2.3 Suiveur solaire à un seul axe

Un suiveur solaire à un seul axe utilise un support de panneau PV incliné et un moteur électrique pour déplacer le panneau sur une trajectoire approximative par rapport à la position du soleil. L'axe de rotation peut être horizontal ou vertical pour une amélioration de la production de 27% à 32% par rapport à un panneau fixe [17].



Figure III.4 : Panneaux solaires avec système de poursuite à un seul axe [22].

III.2.2.4 Suiveur solaire à deux axes

Pour suivre le soleil dans deux directions qui sont l'élévation et l'azimut, un prototype de suivi à deux axes est développé pour capturer le maximum de rayons solaires en suivant le mouvement du soleil dans quatre directions différentes, ce qui donne un rendement supérieur que les suiveurs mono-axial avec un pourcentage de croisement de 30% à 40% par rapport à la production du module fixe [17].



Figure (III.5) : Panneau solaire avec système de poursuite bi-axiale.

III.2.3 Différents éléments de suiveur solaire

La structure physique d'un suiveur solaire à deux axes est composée de plusieurs éléments clés.

III.2.3.1 Axe d'azimut

- Tourne autour du zénith (point directement au-dessus de l'observateur) avec un angle de rotation égal à l'angle d'azimut. Cet axe est parallèle à la surface de la Terre et tourne avec un angle de rotation égal à l'angle d'altitude.

III.2.3.2 Axe d'élévation

- Tourne avec un angle de rotation égal à l'angle d'élévation. L'angle d'élévation est défini par l'angle entre le plan horizontal et le rayon solaire.

III.2.3.3 Moteurs et mécanismes de rotation :

- Les moteurs sont utilisés pour tourner les axes de rotation. Les moteurs sont contrôlés par des algorithmes astronomiques pour déterminer la position du soleil en fonction de la latitude, la date et le temps.

III.2.3.4 Système de contrôle

- Le système de contrôle utilise des données astronomiques pour déterminer la position du soleil et ajuster les axes de rotation en conséquence. Cela permet de maximiser l'efficacité de la surface solaire en fonction des variations saisonnières et de la couverture nuageuse.

III.2.3.5 Plateau et support

- Le plateau est le support où le panneau solaire est fixé. Il est conçu pour être rigide et résistant aux forces de rotation et aux conditions climatiques.

III.2.3.6 Système de réduction de vitesse

- Les étages de réduction de vitesse sont utilisés pour réduire la vitesse des moteurs et des axes de rotation, ce qui permet une rotation plus précise et plus lente.

III.2.3.7 Système de sécurité

- Le système de sécurité est conçu pour protéger les composants du suiveur solaire contre les conditions climatiques extrêmes et les erreurs de fonctionnement

III.3 Système automatisé :

Un système automatisé est un ensemble d'éléments qui effectue des actions sans intervention de l'utilisateur [20]

III.3.1 Structure des systèmes automatisés :

Un système automatisé est constitué de deux parties, la partie commande et la partie opérative.

➤ **La partie opérative [26] :**

Elle regroupe l'ensemble des opérateurs techniques (actionneurs et effecteurs) qui assurent et contrôlent la production des effets utiles pour lesquels le système automatisé (SA) a été conçu. Elle agit directement sur la matière d'œuvre pour lui apporter sa valeur ajoutée, en fonction des ordres fournis par la PC.

Elle nécessite une source d'énergie puissante pour alimenter les actionneurs. Celle-ci est, d'une part, répartie et transformée par des actionneurs, et d'autre part, utilisée pour effectuer directement l'opération par des effecteurs.

➤ **La partie commande [26] :**

La PC est l'ensemble des moyens de traitement de l'information qui assure la commande et la coordination des tâches (de la succession des actions de la PO), à la place de l'opérateur et à partir de programmes préétablis. Elle adresse des ordres à la partie opérative. Elle mémorise le savoir-faire des opérateurs pour obtenir la suite des actions à effectuer sur la matière d'œuvre afin d'élaborer la valeur ajoutée. Elle exploite un ensemble d'informations prélevées sur la PO pour élaborer la succession des ordres nécessaires pour obtenir les actions souhaitées.

Elle nécessite une source d'énergie faible pour alimenter les systèmes de commande (API).

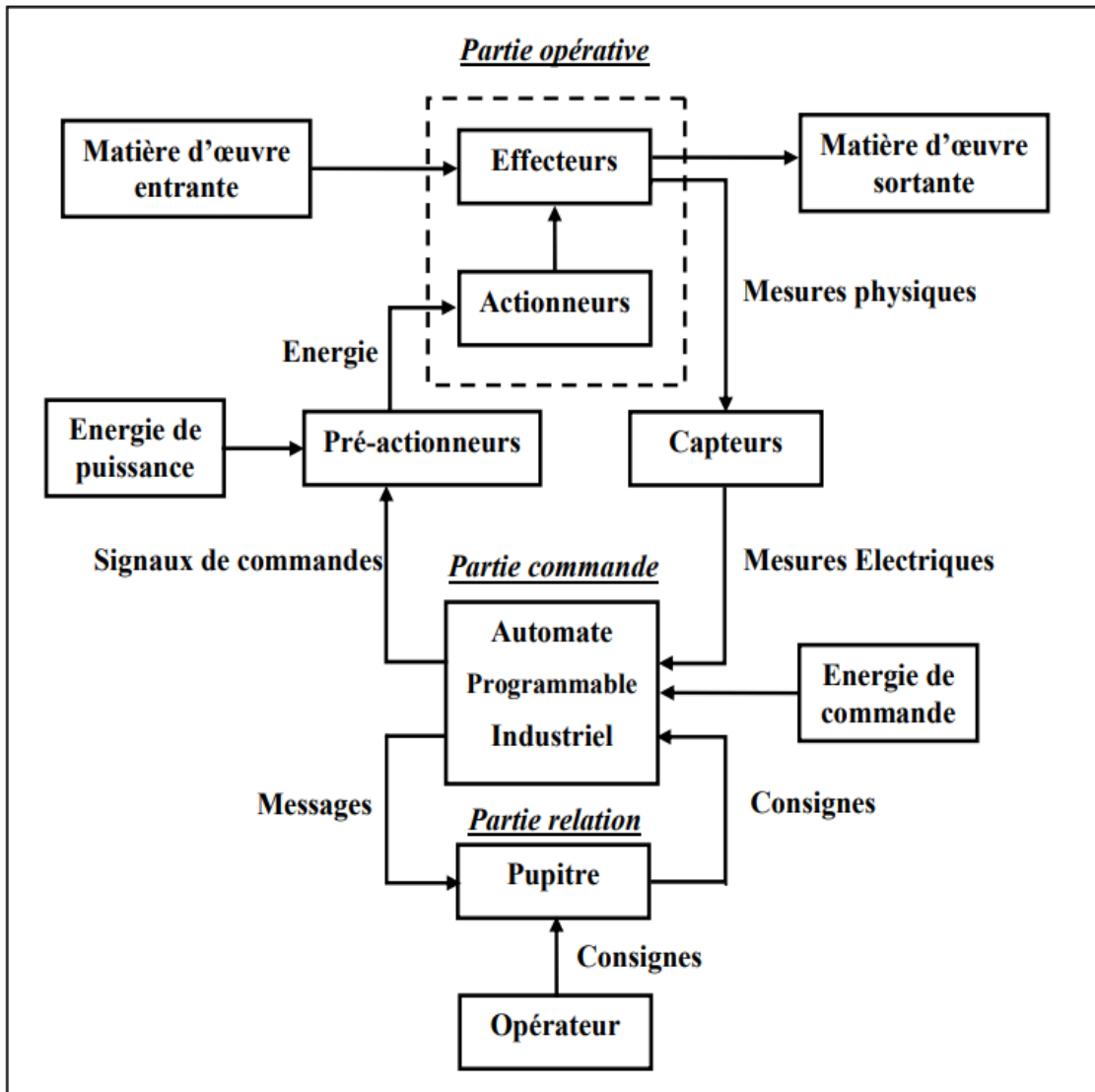


Figure III.6 : Structure des systèmes automatisés [4].

III.4 Définition d'un automate programmable

Les API (automate programmable industriel) ou en anglais PLC (programmable logic Controller) sont apparus à la fin des années soixante, à la demande d'industrie automobile américaine (GM). Il existe sur le marché de nombreuses marques d'automates Siemens, Omron, Allen Bradley, Cegetel, Jetter, Schneider, etc. L'API est un appareil électronique programmable (par un automaticien, non informaticien) similaire à un ordinateur servant à commander des procédés industriels en élaborant des actions (pour les pré-actionneurs) selon un programme à partir des informations fournies par les capteurs [20].

III.4.1 Types des automates

Les automates peuvent être de type compact ou modulaire

a. Automate de type compact

Il intègre le processeur, l'alimentation, les entrées et les sorties. Selon les modèles et les fabricants, il pourra réaliser certaines fonctions supplémentaires (comptage rapide, E/S analogiques ...) et recevoir des extensions en nombre limité. Ces automates sont de fonctionnement simple et ils sont généralement destinés à la commande des petits automatismes (micro automate) [21].

b. Automate de type modulaire

Le processeur, l'alimentation et les interfaces d'entrées / sorties résident dans des unités séparées (modules) et sont fixés sur un ou plusieurs racks contenant le "fond de panier" (bus plus connecteurs). Ces automates sont intégrés dans les automatismes complexes où de puissance, ils ont une grande capacité de traitement et une flexibilité [21].

III.5 Langages de programmation d'un API

La norme **IEC 1131-3 (International Electrotechnical Commission)** définit cinq langages qui peuvent être utilisés pour la programmation des automates programmables industriels. Actuellement les API disposent en tout une partie de langages de programmation suivants [23] :

❖ Langages textuels

Ils sont de deux types : le langage **ST** (Structured Text, « texte structure ») et le langage **IL** (Instruction List, « liste d'instructions »).

➤ Langage liste d'instructions «IL» (Instruction List)

Ce langage est très proche du langage assembleur, on travaille au plus près du processeur en utilisant l'unité arithmétique et logique, ses registres et ses accumulateurs. Ce langage textuel est de bas niveau.

➤ **Langage texte structuré «ST » (Structured Text)**

Ce langage structuré ressemble au langage C utilisé pour les ordinateurs. Ce langage est un langage textuel de haut niveau. Il permet la programmation de tout type d'algorithme plus ou moins complexe.

❖ **Langages graphiques**

➤ **Langage à contacts LD (Ladder Diagram)**

Le langage Ladder est un langage de programmation graphique facile à comprendre et à prendre en main. C'est sans doute le langage de programmation d'automatisme le plus couramment utilisé pour la programmation d'automates. Le langage Ladder est composé d'une séquence de contacts (interrupteurs qui sont soit fermés, soit ouverts) et de bobines qui permettent de traduire les états logiques d'un système.

➤ **Le GRAFCET (Graphe Fonctionnel de Commande par Etapes et Transitions) ou SFC (Séquentiel Fonction Chart)**

Grafcet est un langage graphique utilisé pour décrire des opérations séquentielles. Le procédé est représenté comme une suite connue d'étapes, reliées entre elles par des transitions. Une condition booléenne est attachée à chaque transition. Un ensemble d'actions est attaché à chaque étape. [23].

➤ **Schéma par blocs (FBD: Function Block Diagramm) [26]**

Le Functional Block Diagram (FBD) est un langage graphique. Il permet la construction de procédures complexes à partir de fonctions existantes de la librairie standard ou de la section des fonctions ou des blocs fonctionnels.

III.6. Critères de choix d'un API

Certains critères nous permettent de faire un bon choix d'un automate après avoir élaboré un cahier des charges, qui sont :

- La nature des entrées et des sorties (numérique, analogique) ;
- La nature de traitement (temporisation, comptage...) ;
- La fiabilité et la robustesse ;
- L'immunité aux parasites et aux bruits ;
- Le service après-vente et la durée de garantie ;
- La formation et la documentation [20].

III.7. Définition du GRAFCET

Le GRAFCET (graph fonctionnel de commande par étapes et transitions) est un outil d'analyse et de description des comportements d'un automate, en particulier les systèmes séquentiels et qui permettent la représentation graphique du cahier des charges d'un automatisme [24].

III.7.1 Différents types de GRAFCET

Il y a deux types de représentation de GRAFCET

- La représentation fonctionnelle ou de niveau 1 qui donne une interprétation de la solution retenue pour un problème posé en précisant la coordination des tâches opératives. Elle permet une compréhension globale du système.
- La présentation technologique ou de niveau 2 qui donne une interprétation en tenant compte des choix technologiques relatifs à la partie de commande de l'automatisme, le type et la désignation de la représentation [20].

III.7.2 Concepts de base d'un GRAFCET

Le langage GRAFCET est défini par un ensemble constitué :

- D'éléments graphiques : Etapes, transitions, liaisons orientées.
- D'une interprétation : Réceptivités associées aux transitions et actions associées aux étapes.

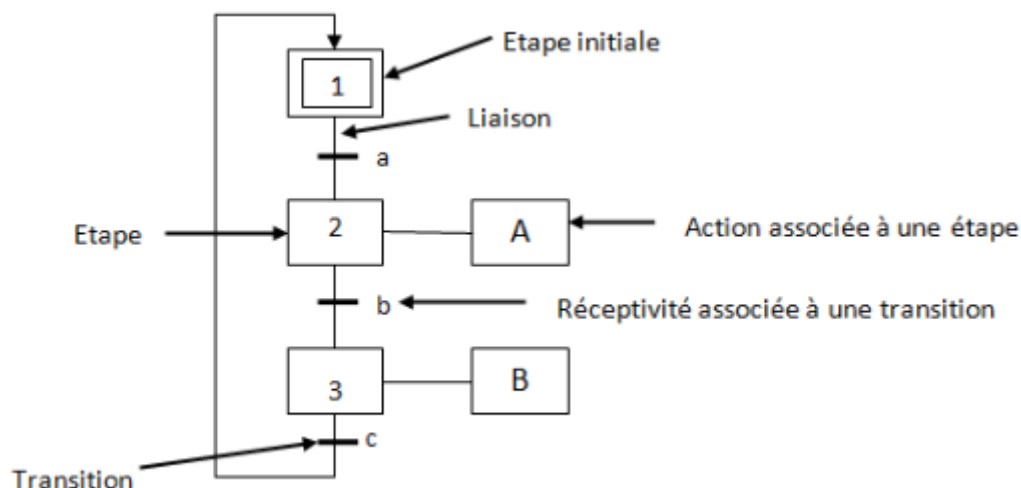


Figure III.7 : Symbolisation d'un GRAFCET. [20]

III.7.2.1 Etapes

Une étape est associée à des actions, elle caractérise une situation donnée. Elle peut être active ou inactive. L'étape est représentée par un carré repéré numériquement. Les actions associées sont marquées en clair dans un rectangle à droite du carré représentant l'étape. La situation initiale d'un système automatisé est indiquée par une étape dite étape initiale et représentée par un carré double [24].

III.7.2.2 Transitions

Une transition indique la possibilité d'évolution qui existe entre deux étapes et donc la succession de deux activités dans la partie opérative. Lors de son franchissement, elle va permettre l'évolution du système. A chaque transition est associée une condition logique appelée réceptivité qui exprime la condition nécessaire pour passer d'une étape à une autre [20].

III.7.2.3 Liaisons orientées

Elles sont des simples traits verticaux qui relient les étapes aux transitions et les transitions aux étapes. Elles sont normalement orientées de haut vers le bas. Une flèche est nécessaire dans le cas contraire [20].

III.8 Elaboration du grafcet pour un suiveur solaire à deux axes

III.8.1 Cahier des charges du fonctionnement

III.8.1.1 Description du Système :

- ❖ **Capteurs de Lumière de comparaison :**
 - **CE (Capteur Est) :** Détecte la lumière venant de l'est.
 - **CO (Capteur Ouest) :** Détecte la lumière venant de l'ouest.
 - **CN (Capteur Nord) :** Détecte la lumière venant du nord.
 - **CS (Capteur Sud) :** Détecte la lumière venant du sud.
- ❖ **Capteurs de trajectoire de fin de course**
 - **PE (Capteur position Est) :** Détecte la fin de course est.
 - **PO (Capteur position Ouest) :** Détecte la fin de course ouest.
 - **PN (Capteur position Nord) :** Détecte la fin de course nord.
 - **PS (Capteur position Sud) :** Détecte la fin de course sud.

❖ Moteurs

- **Moteur 1 (M1)** : Contrôle l'axe horizontal (est-ouest).
- **Moteur 2 (M2)** : Contrôle l'axe vertical (nord-sud).

❖ Comparateurs

- **Comparateur 1** : Compare les signaux des capteurs CE et CO.
- **Comparateur 2** : Compare les signaux des capteurs CN et CS.
- **Comparateur 3** : Vérifie si les signaux de tous les capteurs sont égaux à 0 ou à 1.

❖ Temporisation

- Une temporisation est mise en place avant l'utilisation du comparateur 3 pour stabiliser les lectures des capteurs.

III.8.1.2 Fonctionnement du système**❖ Comparaison et Commande****• Comparateur 1 (CE vs CO) :**

- Si $CE > CO$, alors M1 doit tourner vers l'est.
- Si $CE < CO$, alors M1 doit tourner vers l'ouest.
- Si $CE = CO$, M1 reste immobile.

• Comparateur 2 (CN vs CS) :

- Si $CN > CS$, alors M2 doit monter.
- Si $CN < CS$, alors M2 doit descendre.
- Si $CN = CS$, M2 reste immobile.

• Comparateur 3 (Condition d'arrêt) :

- Si $(CE = 0, CO = 0, CN = 0, CS = 0)$, le système doit se déplacer vers CE.
- Si $(CE = 1, CO = 1, CN = 1, CS = 1)$, il y aura une répétition de boucle pour continuer l'alignement.

❖ GRAFCET du Système

Le GRAFCET pour ce système peut être décrit en plusieurs étapes et transitions :

❖ Étapes**• Initialisation :**

- Lecture des valeurs initiales des capteurs CE, CO, CN, CS.

❖ Comparaison Horizontale (Comparateur 1) :

- Comparateur 1 analyse CE et CO.
- Transition vers les étapes de contrôle du moteur M1.

- ❖ **Contrôle M1 :**
 - Si $CE > CO$: M1 tourne vers l'est.
 - Si $CE < CO$: M1 tourne vers l'ouest.
 - Si $CE = CO$: M1 reste immobile.
- ❖ **Comparaison Verticale (Comparateur 2) :**
 - Comparateur 2 analyse CN et CS.
 - Transition vers les étapes de contrôle du moteur M2.
- ❖ **Contrôle M2 :**
 - Si $CN > CS$: M2 monte.
 - Si $CN < CS$: M2 descend.
 - Si $CN = CS$: M2 reste immobile.
- ❖ **Vérification de l'état d'arrêt (Comparateur 3) :**
 - Temporisation pour stabiliser les lectures.
 - Comparateur 3 vérifie les conditions d'arrêt.
- ❖ **Condition d'arrêt ($CE=0, CO=0, CN=0, CS=0$) :**
 - Si $CE = 0$, et $CO = 0$, et $CN = 0$, et $CS = 0$, M1 doit se déplacer vers CE.
- ❖ **Répétition de la boucle ($CE=1, CO=1, CN=1, CS=1$) :**
 - Si $CE = 1$, ou $CO = 1$, ou $CN = 1$, ou $CS = 1$, le système continue à vérifier les capteurs et répète le cycle de comparaison et de contrôle.
- ❖ **Transitions**
 - Transition de l'initialisation à la comparaison horizontale.
 - Transition basée sur les résultats de la comparaison horizontale pour le contrôle du moteur M1.
 - Transition de la comparaison horizontale à la comparaison verticale.
 - Transition basée sur les résultats de la comparaison verticale pour le contrôle du moteur M2.
 - Transition de la comparaison verticale à la vérification de l'état d'arrêt.
 - Transition basée sur la vérification de l'état d'arrêt pour l'arrêt du système.
 - Transition basée sur les conditions de $CE=0, CO=0, CN=0, CS=0$ pour déplacer M1 vers CE.
 - Transition basée sur les conditions de $CE=1, CO=1, CN=1, CS=1$ pour répéter le cycle.

III.8.1.3 Spécifications Techniques

❖ Capteurs

Sensibilité : Ajustable en fonction de l'intensité lumineuse.

Plage de détection : Adaptée aux conditions d'ensoleillement.

❖ Moteurs

Type : Moteurs à courant continu.

Tension de fonctionnement : Spécifiée en fonction des moteurs utilisés.

Contrôle de la vitesse : Via PWM (Modulation de largeur d'impulsion).

❖ Comparateurs

Type : Comparateurs analogiques/digitaux.

Précision : Adaptée pour des petites différences de luminosité.

❖ Temporisation

Type : Temporisateur programmable.

Durée : Ajustable pour stabilisation des lectures.

III.8.1.4 Schéma du Grafset

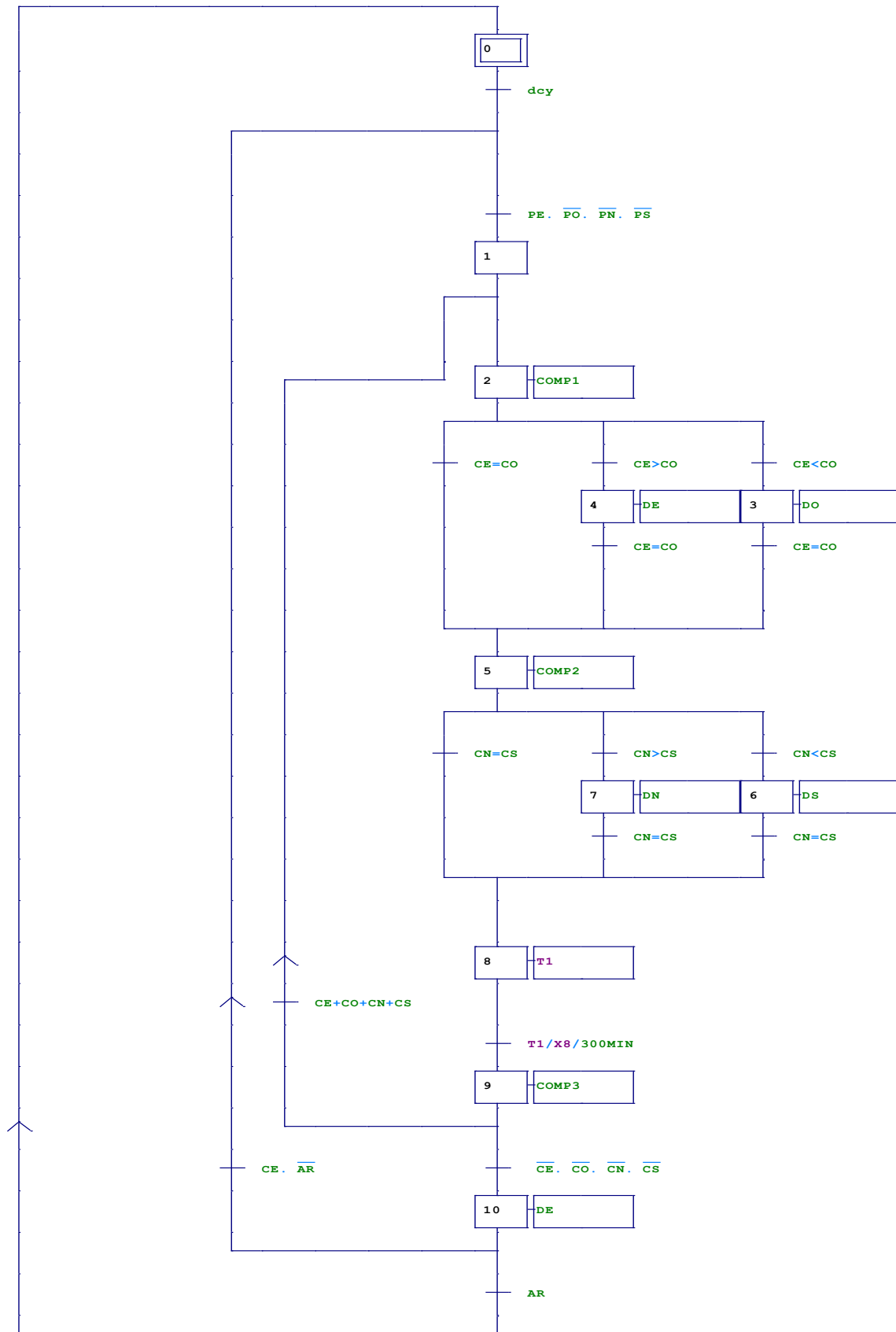


Figure III.8 : Grafset du suiveur solaire

Le tableau suivant présente les équations des transitions du Grafcet élaboré :

Tableau III.1 : Les équations des transitions.

$T_1 = D_{cy} \cdot X_0$
$T_2 = P_E \cdot \bar{P}_O \cdot \bar{P}_N \cdot \bar{P}_S \cdot X_1$
$T_3 = F_3 \cdot X_2$
$T_4 = F_1 \cdot X_3$
$T_5 = F_2 \cdot X_2$
$T_6 = F_1 \cdot X_4$
$T_7 = F_1 \cdot X_2$
$T_8 = G_2 \cdot X_5$
$T_9 = G_1 \cdot X_6$
$T_{10} = G_3 \cdot X_5$
$T_{11} = G_1 \cdot X_7$
$T_{12} = G_1 \cdot X_5$
$T_{13} = T_1 / X_8 / 30min \cdot X_8$
$T_{14} = (C_E \cdot C_O \cdot C_N \cdot C_S) \cdot X_9$
$T_{15} = (\bar{C}_E + \bar{C}_O + \bar{C}_N + \bar{C}_S) \cdot X_9$
$T_{16} = C_E \cdot \bar{A}_r \cdot X_{10}$
$T_{17} = A_r \cdot X_{10}$

Le tableau suivant présente les équations des étapes du Grafcet élaboré :

Tableau III.2 : Les équations d'étapes pour activation des actions.

$X_0 = T_{17} + T_{16} + \bar{T}_1 \cdot X_0$
$X_1 = T_1 + \bar{T}_2 \cdot X_1$
$X_2 = T_2 + T_{14} + (\bar{T}_3 \cdot \bar{T}_5 \cdot \bar{T}_7) \cdot X_2$
$X_3 = T_3 + \bar{T}_4 \cdot X_3$
$X_4 = T_5 + \bar{T}_6 \cdot X_4$
$X_5 = T_4 + T_6 + T_7 + \bar{T}_8 \cdot \bar{T}_{10} \cdot \bar{T}_{12} \cdot X_5$
$X_6 = T_8 + \bar{T}_9 \cdot X_6$
$X_7 = T_{10} + \bar{T}_{11} \cdot X_7$
$X_8 = T_9 + T_{11} + T_{12} + \bar{T}_{13} \cdot X_8$
$X_9 = T_{13} + (\bar{T}_{14} \cdot \bar{T}_{15}) \cdot X_9$
$X_{10} = T_{14} + T_{15} + (\bar{T}_{16} \cdot \bar{T}_{17}) \cdot X_{10}$

Le tableau (III.3) présente les équations des étapes du Grafcet élaboré :

Tableau III.3 : Equations des mémentos.

$M_0 = [(A_r \cdot M_{10}) + (C_E \cdot \overline{A_r} \cdot M_{10}) + (\overline{D_{CY}} \cdot M_0)] + \overline{init}$
$M_1 = [(D_{CY} \cdot M_0) + ((\overline{P_E} + P_O + P_N + P_S) \cdot M_1)]. \overline{init}$
$M_2 = [(P_E \cdot \overline{P_O} \cdot \overline{P_N} \cdot \overline{P_S} \cdot M_1) + (C_E \cdot C_O \cdot C_N \cdot C_S \cdot M_9) + (\overline{F_3} \cdot M_2)(\overline{F_2} \cdot M_2) \cdot (\overline{F_1} \cdot M_2)]. \overline{init}$
$M_3 = [(F_3 \cdot M_2) + (\overline{F_1} \cdot M_3)]. \overline{init}$
$M_4 = [(F_2 \cdot M_2) + (\overline{F_1} \cdot M_4)]. \overline{init}$
$M_5 = [(F_1 \cdot M_3) + (F_1 \cdot M_4) + (F_1 \cdot M_2) + (\overline{G_2} \cdot M_5) \cdot (\overline{G_3} \cdot M_5) \cdot (\overline{G_1} \cdot M_5)]. \overline{init}$
$M_6 = [(G_2 \cdot M_2) + (\overline{G_1} \cdot M_6)]. \overline{init}$
$M_7 = (G_3 \cdot M_5) + (\overline{G_1} \cdot M_7). \overline{init}$
$M_8 = (G_1 \cdot M_6) + (G_2 \cdot M_7) + (G_2 \cdot M_5) + (\overline{T} \cdot M_8). \overline{init}$
$M_9 = [(T \cdot M_8) \cdot ((\overline{C_E} + \overline{C_O} + \overline{C_N} + \overline{C_S}) \cdot M_9) \cdot ((C_E \cdot C_O \cdot C_N \cdot C_S) \cdot M_9)]. \overline{init}$
$M_{10} = [(C_E \cdot C_O \cdot C_N \cdot C_S \cdot M_9) + ((\overline{C_E} + \overline{C_O} + \overline{C_N} + \overline{C_S}) \cdot M_9) + (((\overline{C_E} + A_r) \cdot M_{10}) \cdot (\overline{A_r} \cdot M_{10}))]. \overline{init}$

Tableau III.4 : les abréviations utilisées dans les deux premiers comparateurs

$C_E = C_O$	F_1
$C_E > C_O$	F_2
$C_E < C_O$	F_3
$C_N = C_S$	G_1
$C_S > C_N$	G_2
$C_S < C_N$	G_3

Tableau III.5 : Temporisations.

T1	Temporisation pour capter la prochaine position du soleil
----	---

Tableau III.6 : Abréviations utilisées pour les actions

DE	Déplacement vers l'Est
DO	Déplacement vers l'Ouest
DS	Déplacement vers le Sud
DN	Déplacement vers le Nord

Tableau III.7 : Abréviations utilisées pour les réceptivités.

DCY	Départ cycle
PO	Capteur position Ouest
PE	Capteur position Est
PN	Capteur position Nord
PS	Capteur position Sud
CO	Capteur de trajectoire Ouest
CE	Capteur de trajectoire Est
CS	Capteur de trajectoire Sud
CN	Capteur de trajectoire Nord
AR	Bouton d'arrêt du système

III.9 Présentation du logiciel step7

Le logiciel step7 est l'outil de programmation des systèmes d'automatisation SIMATIC S7-300, S7-400. Il permet de programmer individuellement un automate (en différents langages), ainsi une utilisation simple et confortable de ses systèmes performants.

Le STEP7 offre les fonctions suivantes pour l'automatisation d'une installation

- Configuration et paramétrage du matériel ;
- La création des programmes ;
- Test de mise en service et maintenance de l'installation d'automatisation ;
- Fonctions de diagnostic et d'exploitation lors des perturbations dans l'installation

Le programme peut être représenté et programmé en trois langages différents :

- Logigramme «LOG » :
- Liste d'instruction « LIST » ;
- Schéma à contacts « CONT ». [20]

III.10 Structure d'un programme S7

Le logiciel de programmation STEP7 permet d'organiser et subdiviser le programme en différents blocs :

- OBI : bloc d'organisation,
- FB1 : bloc fonctionnel ;
- DBI : bloc de données ;
- FB : bloc de fonction.

III.11 Implantation du programme sur l'automate S7-300

La mise en place d'une solution d'automatisation avec STEP7 nécessite la réalisation des tâches fondamentales suivantes :

- Création du projet ;
- Configuration matérielle ;
- Définition des mnémoniques ;
- Création du programme.

III.11.1. Création du projet

Avant de passer à la configuration matérielle et à la programmation, il est nécessaire de créer un projet dans lequel sont structurés et ordonnés les données et programmes créés.

La création d'un projet peut se faire par deux manières, soit avec ou sans l'assistant STEP7.

➤ Création du projet avec l'assistant

- Lancer SIMATIC manager par un double clic sur son icône ;

Une fenêtre apparaît et nous permet la création d'un projet et qui est la suivante :

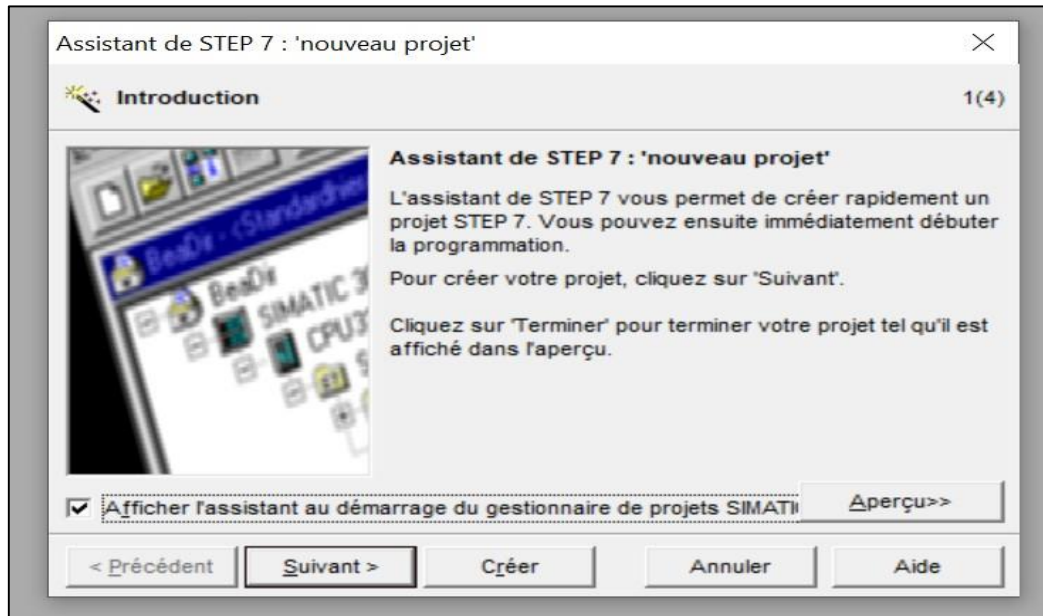


Figure (III.9) : Fenêtre de création d'un projet.

- On clique sur suivant et une fenêtre apparaît et nous permet de choisir la CPU qui nous convient et qui est représentée dans la figure suivante :

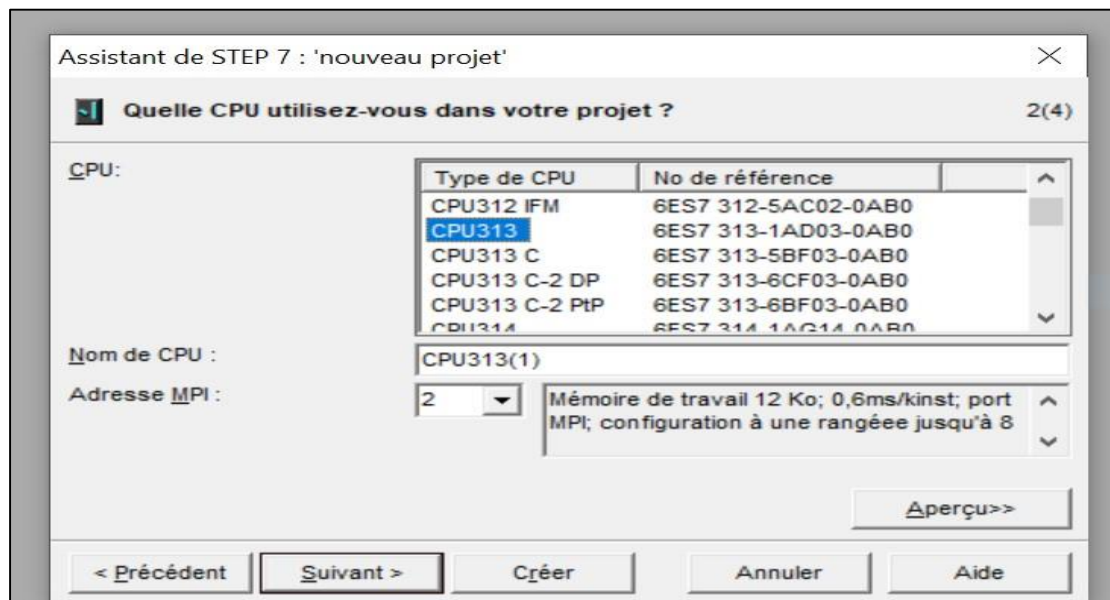


Figure (III.10) : sélection d'une cpu.

- L'adresse MPI est réglée par défaut sur 2 et après validation de la CPU on clique sur suivant. Une fenêtre apparaît et permet de choisir le bloc d'organisation et le langage de programmation comme est représenté dans la figure ci-dessous :

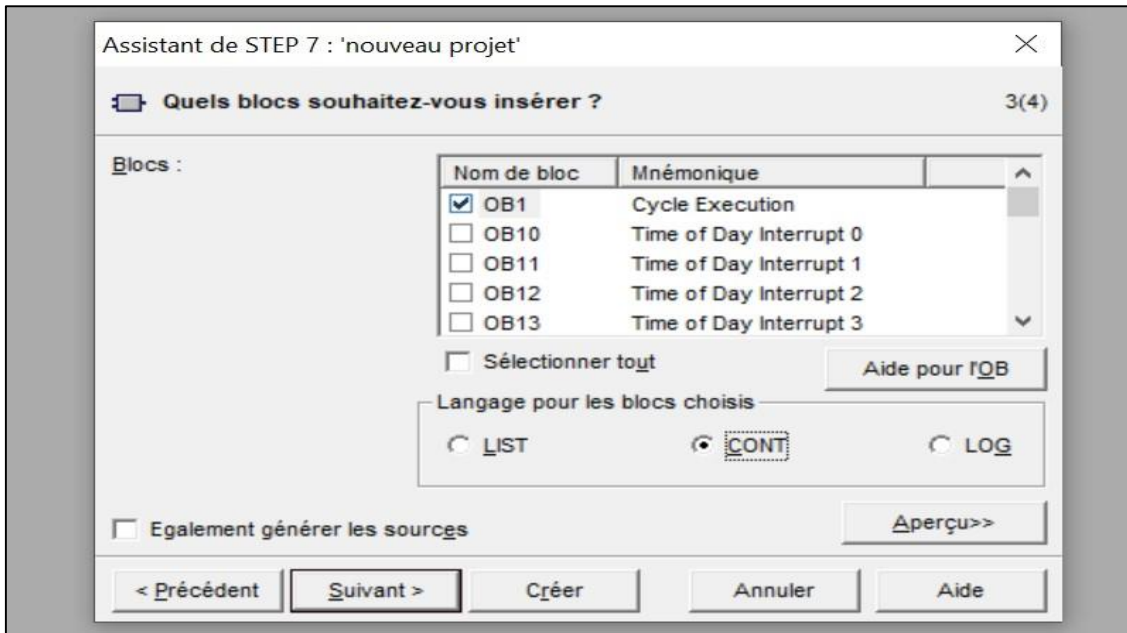


Figure (III.11) : Choix du bloc et de langage de programmation.

- Arrivant à la dernière étape de création d'un projet après un clic sur suivant, une fenêtre apparaît et permet de nommer le projet. La figure suivante le montre :

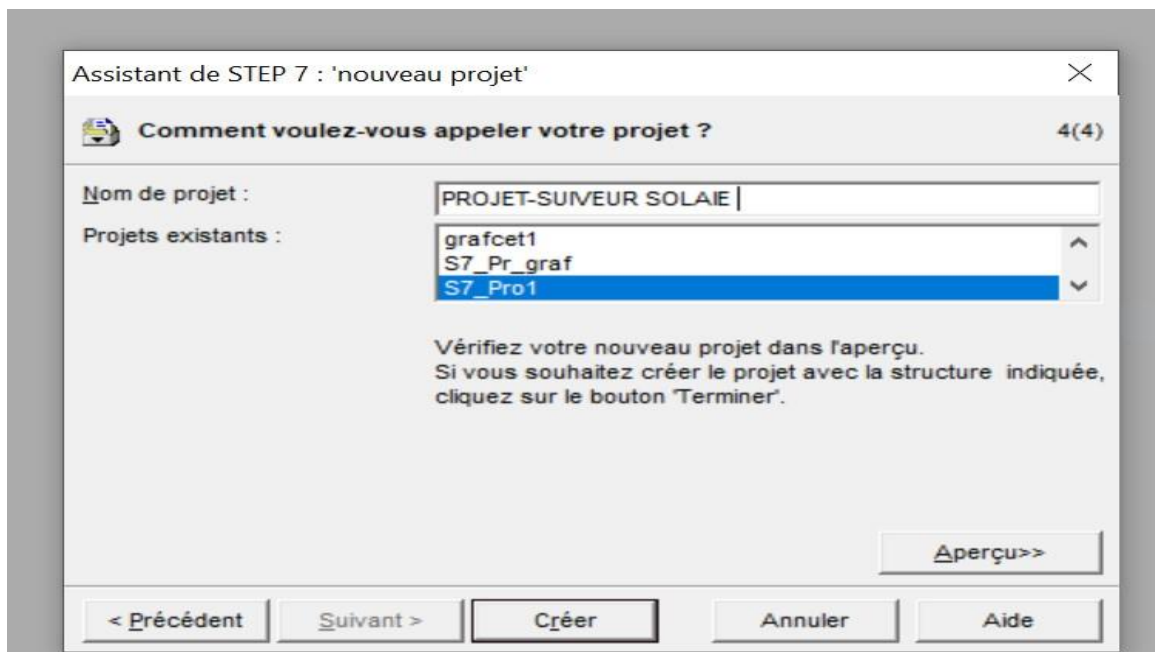


Figure (III.12) : nomination du projet.

Après cela un dossier « programme S7 » est automatiquement inséré dans le projet comme indiqué dans la figure suivante :

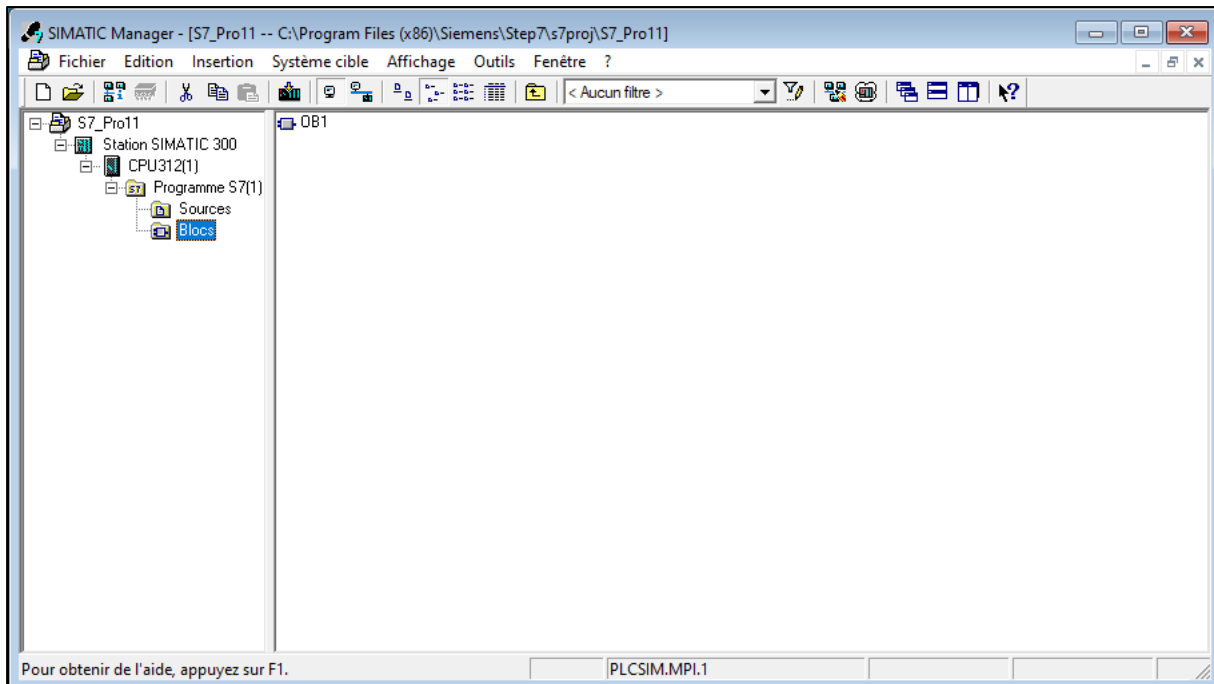


Figure III.13 : Création du programme S7

III. 11.2 créations de la table des mnémoniques

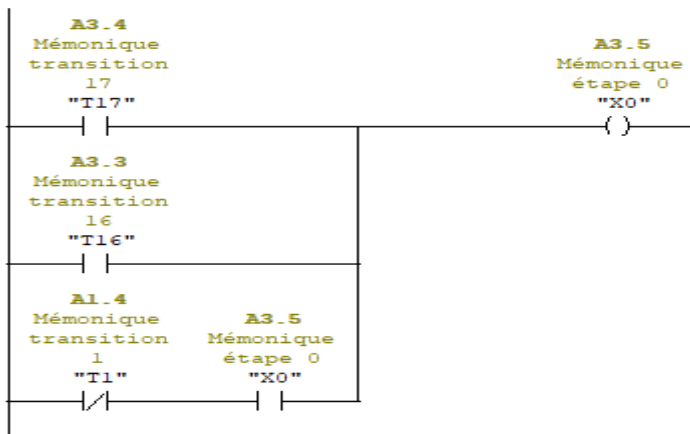
Dans tout programme il faut définir la liste des variables qui vont être utilisées dans le programme. Pour cela, la table des mnémoniques est créée. Cette dernière est destinée à rendre le programme utilisateur très lisible et compréhensible ainsi elle aide dans sa manipulation en gérant facilement les grands nombres de variables.

Etat	Mnémonique /	Opérande	Type de do	Commentaire
1	Ar	E 1.4	BOOL	ARRET DE SYSTÈME
2	CE	ED 10	REAL	capteur EST
3	CN	ED 18	REAL	capteur NORD
4	CO	ED 14	REAL	capteur OUEST
5	CS	ED 22	DWORD	capteur SUD
6	dcy	E 1.0	BOOL	départ cycle
7	DE	A 1.1	BOOL	déplacement EST
8	DN	A 1.2	BOOL	déplacement
9	DO	A 1.0	BOOL	déplacement
10	DS	A 1.3	BOOL	déplacement
11	M0	M 1.0	BOOL	mémontos 0
12	M1	M 1.1	BOOL	mémontos 1
13	M10	M 2.2	BOOL	mémontos 10
14	M2	M 1.2	BOOL	mémontos 2
15	M3	M 1.3	BOOL	mémontos 3
16	M4	M 1.4	BOOL	mémontos 4
17	M5	M 1.5	BOOL	mémontos 5
18	M6	M 1.6	BOOL	mémontos 6
19	M7	M 1.7	BOOL	mémontos 7
20	M8	M 2.0	BOOL	mémontos 8
21	M9	M 2.1	BOOL	mémontos 9
22	PE	E 1.1	BOOL	position
23	PN	E 1.3	BOOL	position
24	PO	E 1.2	BOOL	position
25	T1	A 1.4	BOOL	Mémorique transition 1
26	T10	A 2.5	BOOL	Mémorique transition 10
27	T11	A 2.6	BOOL	Mémorique transition 11
28	T12	A 2.7	BOOL	Mémorique transition 12
29	T13	A 3.0	BOOL	Mémorique transition 13
30	T14	A 3.1	BOOL	Mémorique transition 14
31	T15	A 3.2	BOOL	Mémorique transition 15
32	T16	A 3.3	BOOL	Mémorique transition 16
33	T17	A 3.4	BOOL	Mémorique transition 17
34	T2	A 1.5	BOOL	Mémorique transition 2
35	T3	A 1.6	BOOL	Mémorique transition 3
36	T4	A 1.7	BOOL	Mémorique transition 4
37	T5	A 2.0	BOOL	Mémorique transition 5
38	T6	A 2.1	BOOL	Mémorique transition 6
39	T7	A 2.2	BOOL	Mémorique transition 7

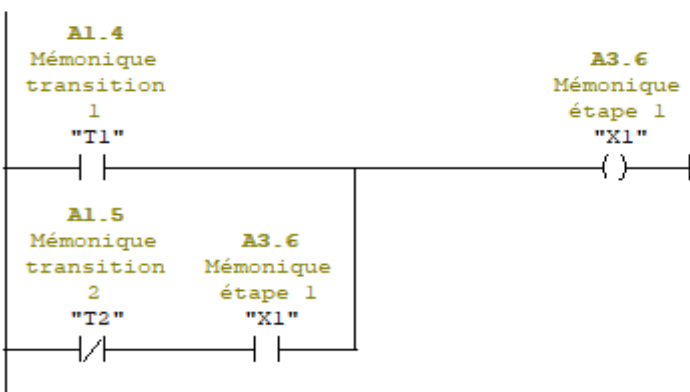
Figure III.14 : partie de la table mnémonique

III.12. Programme du suiveur solaire sous le langage Ladder

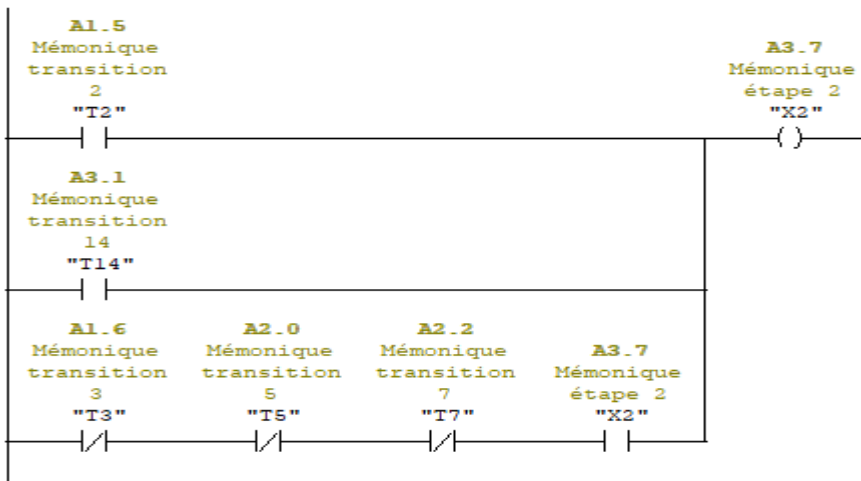
Réseau 1 : étape initiale



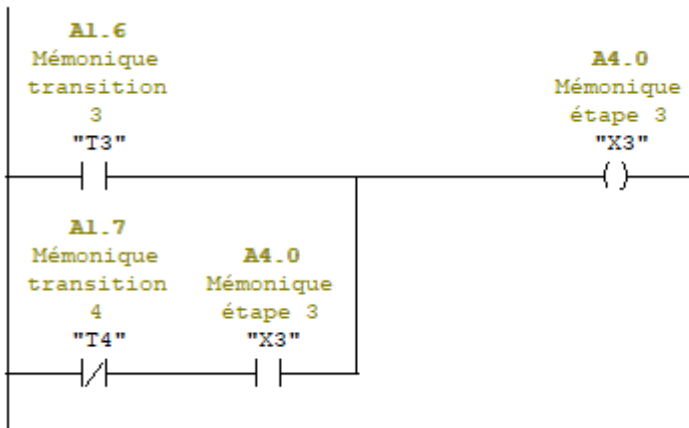
Réseau 2 : étape 1



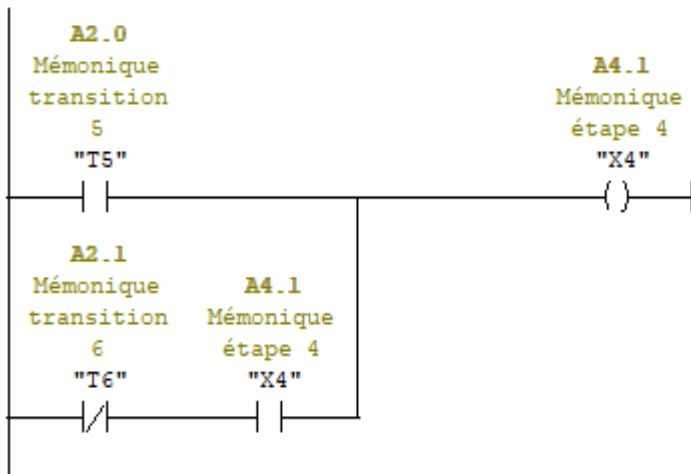
Réseau 3 : étape 2



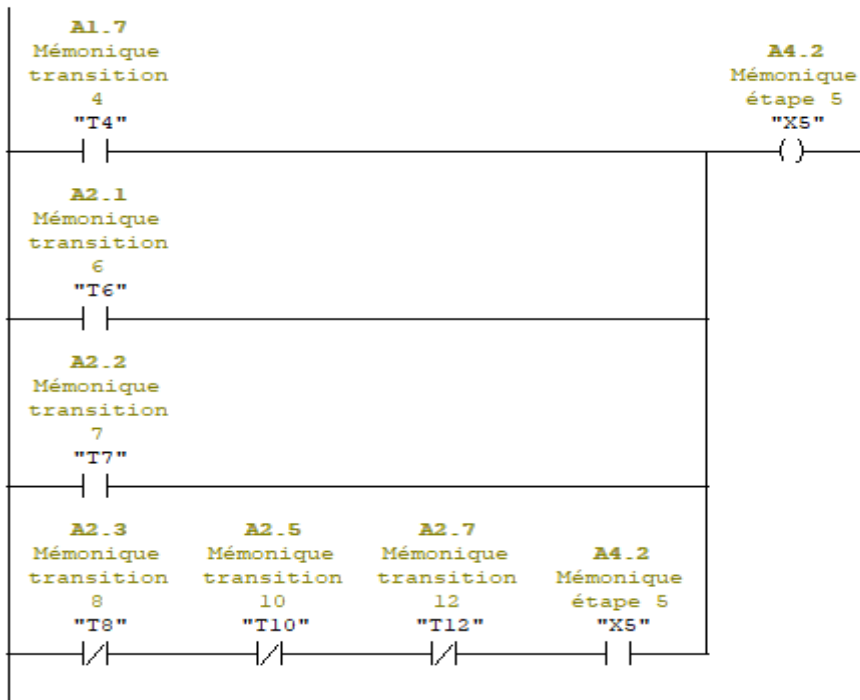
Réseau 4 : étape 3



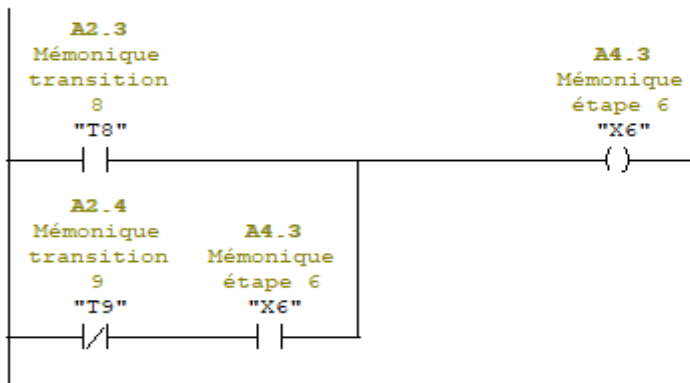
Réseau 5 : étape 4



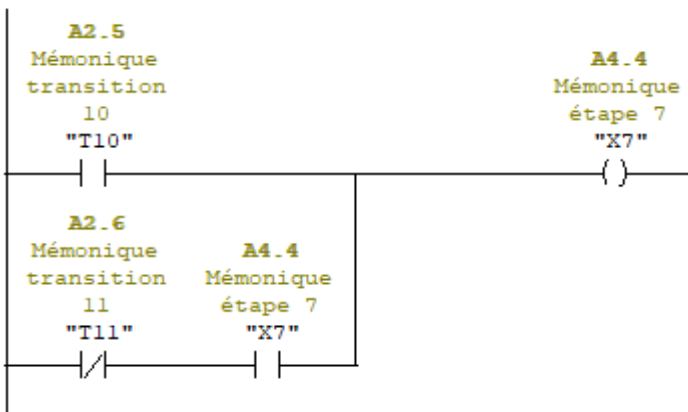
Réseau 6 : étape 5



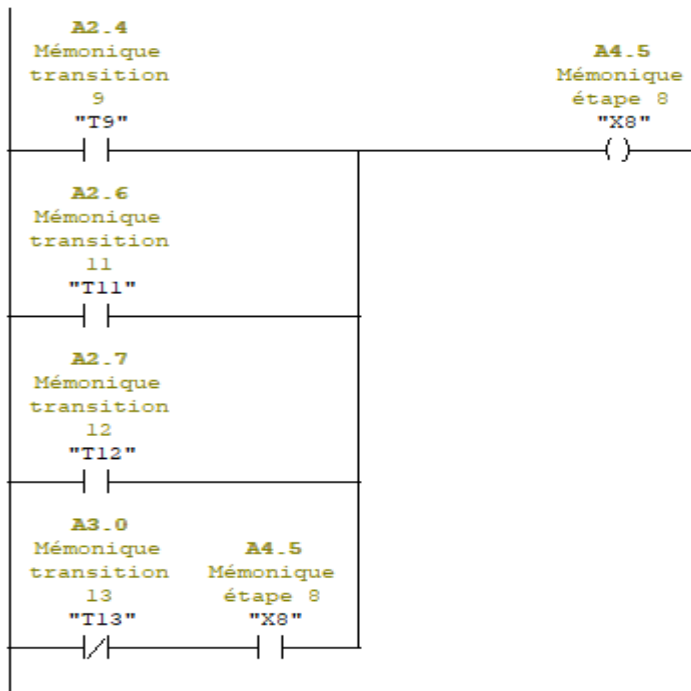
Réseau 7 : étape 6



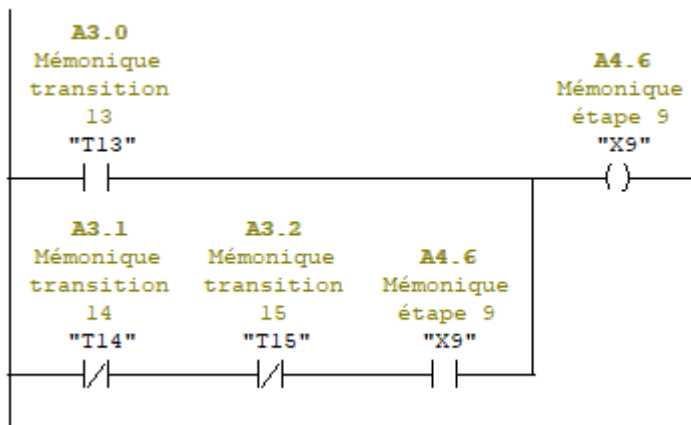
Réseau 8 : étape 7



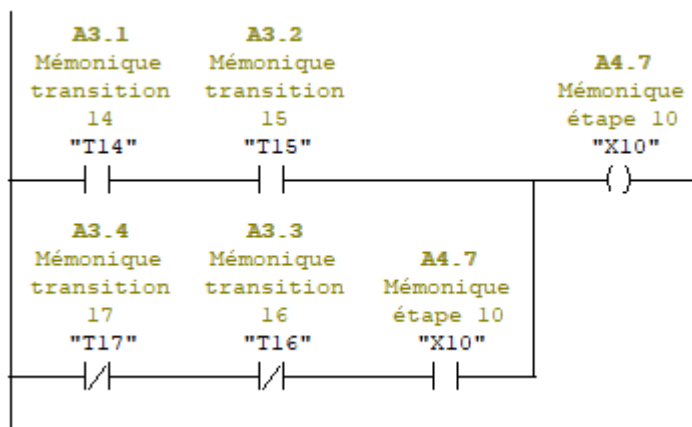
Réseau 9 : étape 8



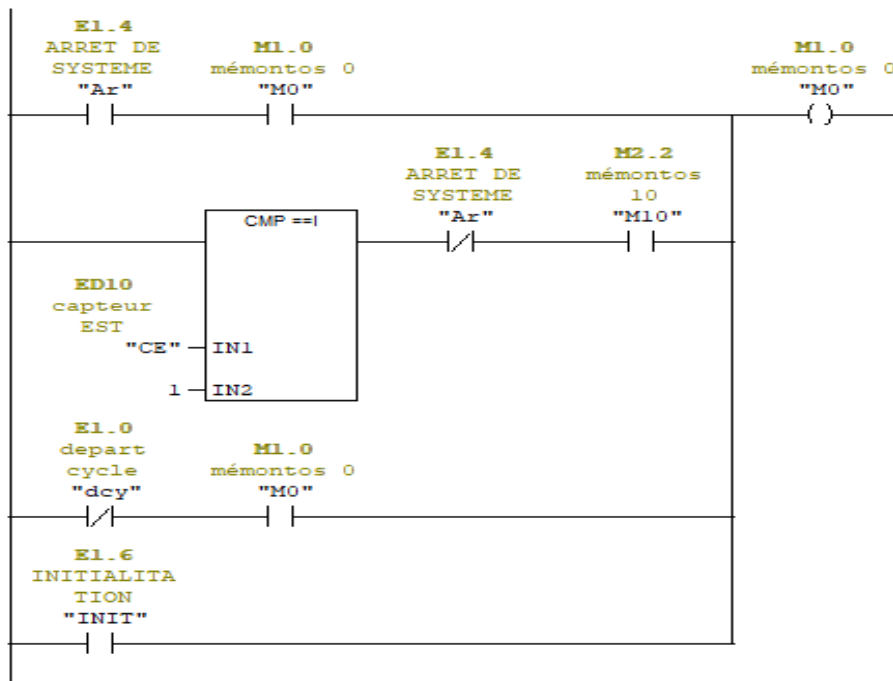
Réseau 9 : étape 8



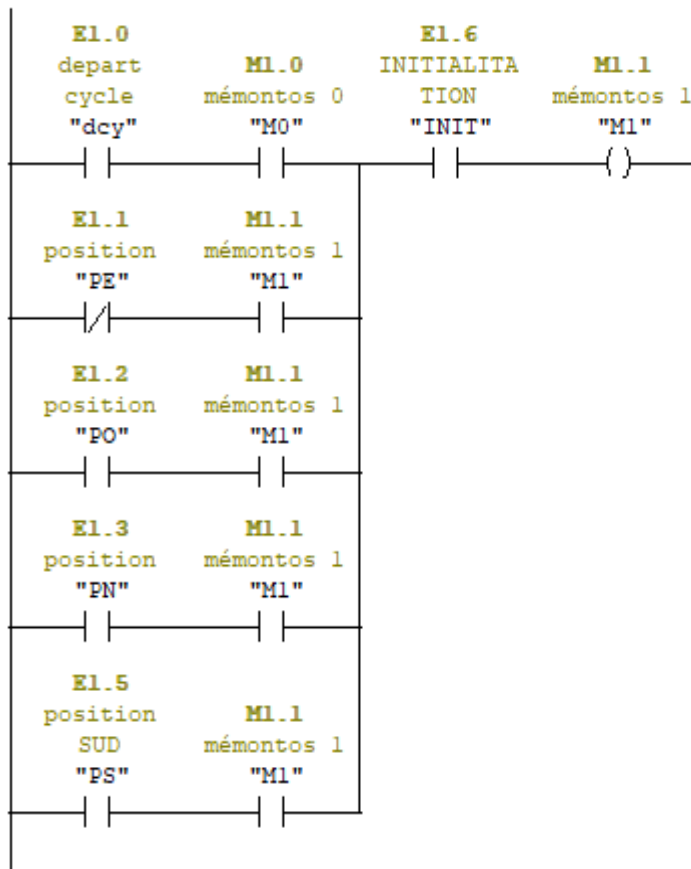
Réseau 11 : étape 10



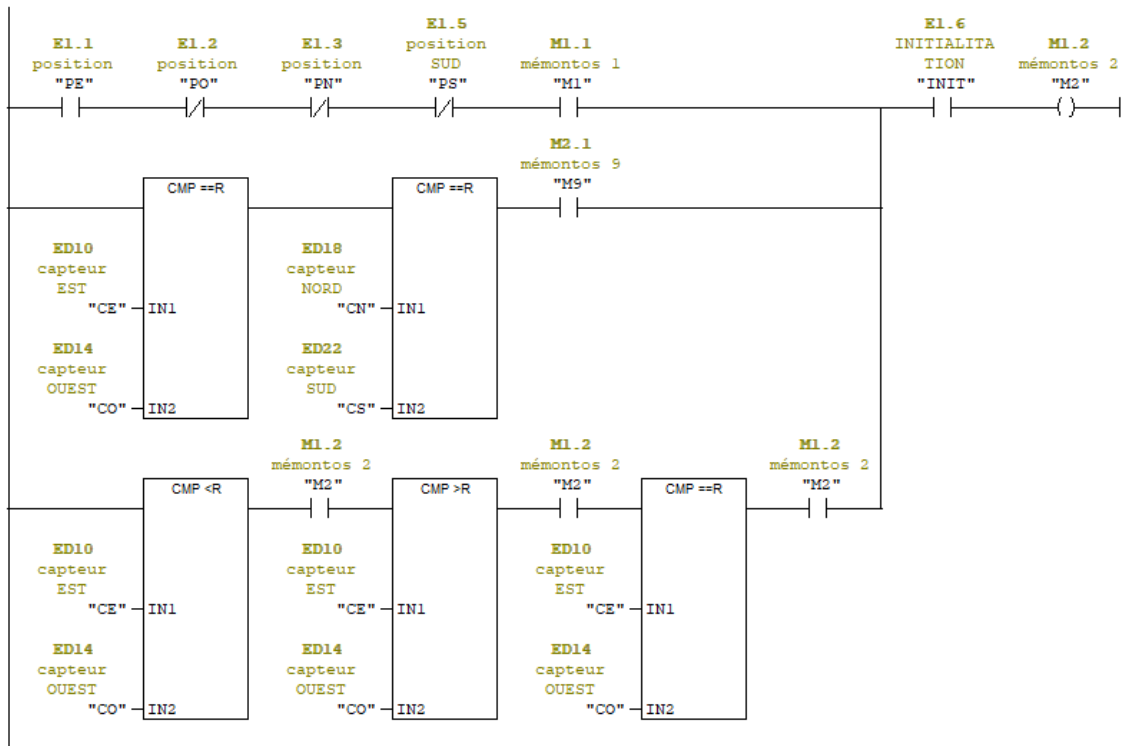
Réseau 12 : memento initial



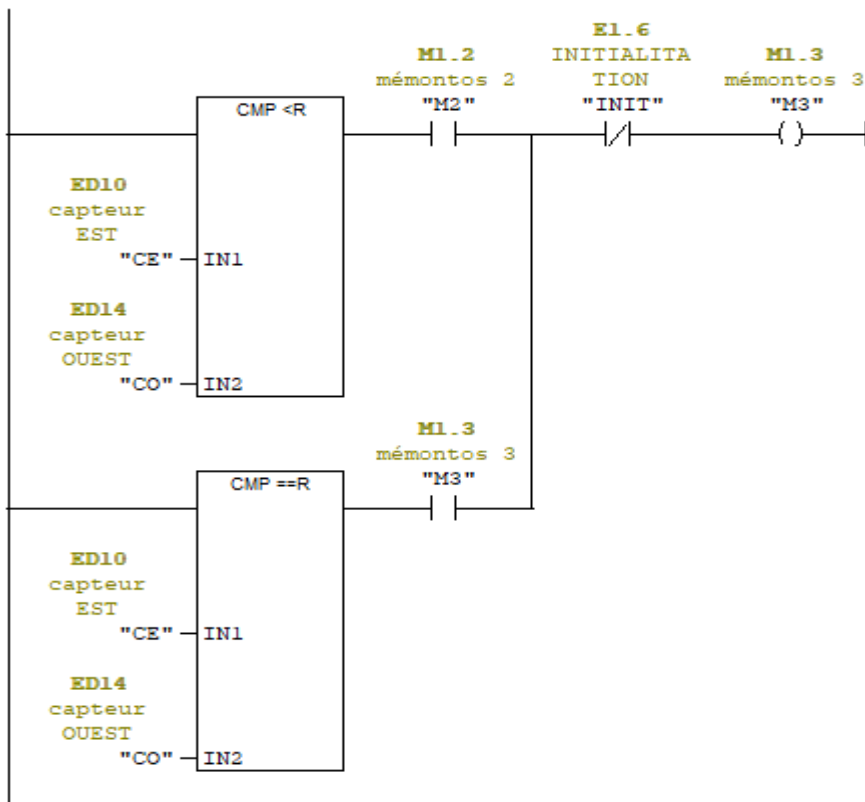
Réseau 12 : memento 1



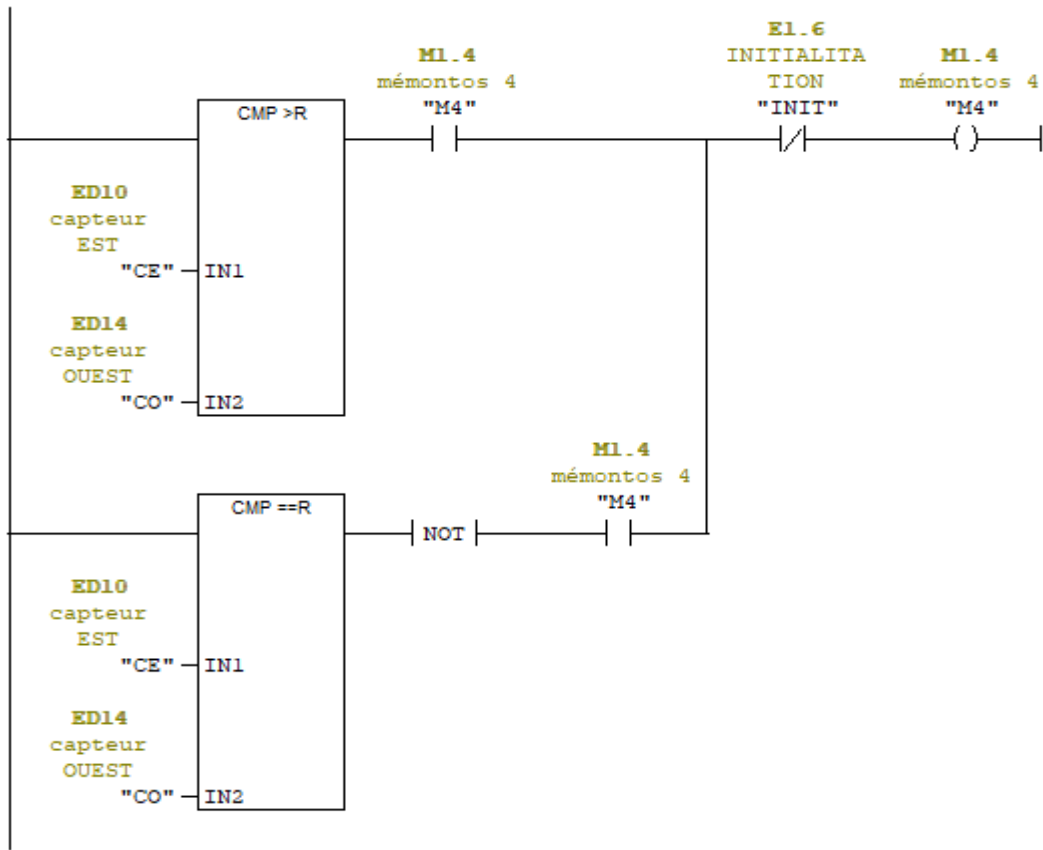
Réseau 12 : memento 2



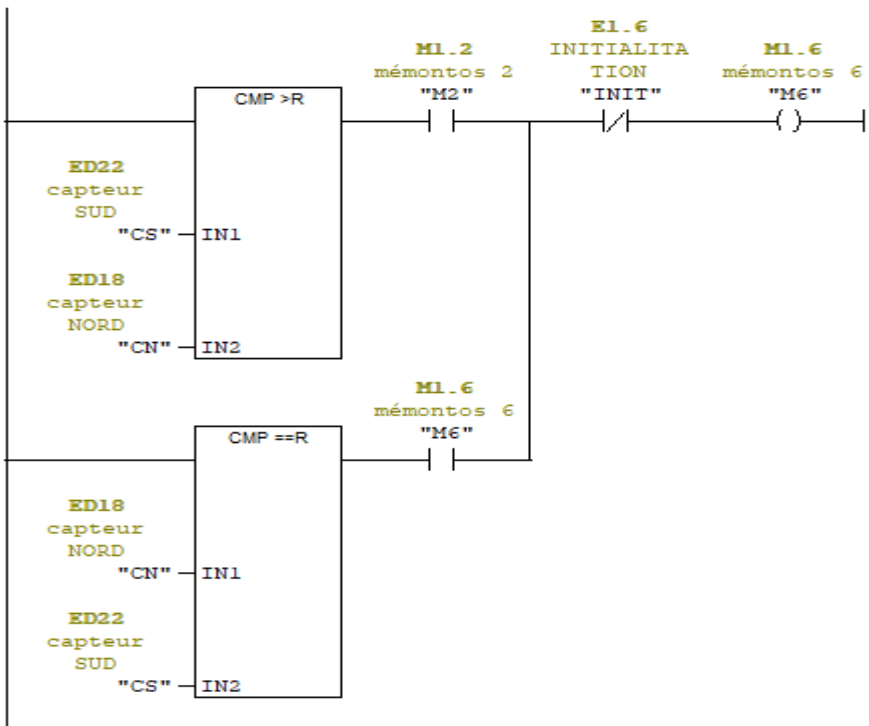
Réseau 13 : memento 3



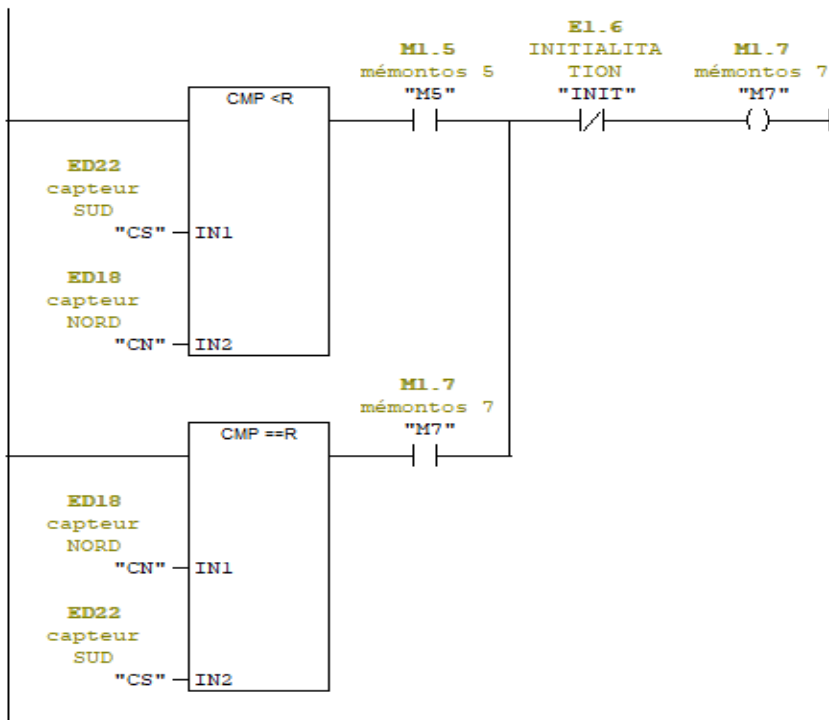
Réseau 14 : memento 4



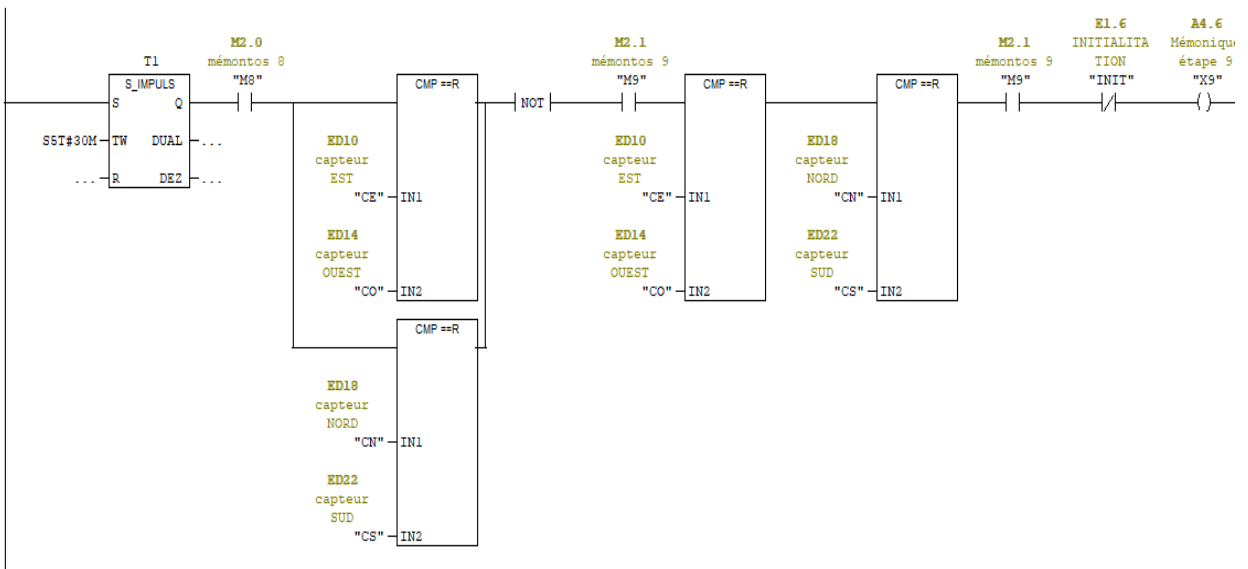
Réseau 15 : memento 6



Réseau 16 : memento 7

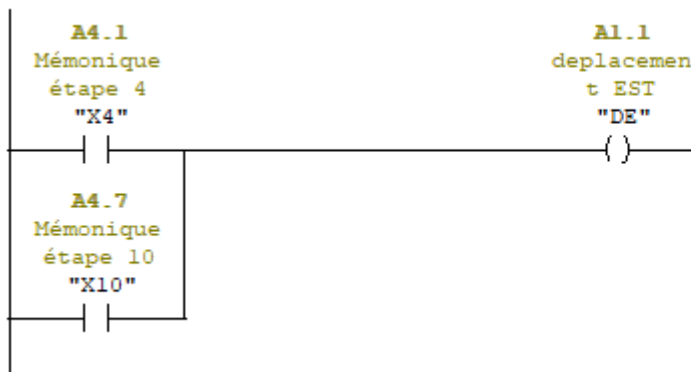


Réseau 17 : memento 9



Réseau 18 : action 1



Réseau 19 : action 2**Réseau 20 : action 3****Réseau 20 : action 4****Conclusion**

L'automatisation des suiveurs solaires est une innovation majeure, permettant un ajustement précis et continu des panneaux solaires sans intervention humaine. Le développement de systèmes automatisés, intégrant des capteurs, des moteurs et des algorithmes de contrôle, optimise l'orientation des panneaux et accroît la production d'énergie.

Dans ce chapitre, nous avons exploré les différents types de suiveurs solaires, leurs principes de fonctionnement et les éléments constitutifs des systèmes de suivi à deux axes. Nous avons également détaillé la conception d'un Grafcet pour un suiveur solaire à deux axes et sa traduction en langage Ladder, facilitant ainsi la programmation et la mise en œuvre de ces systèmes automatisés. Les automates programmables industriels (API) et les langages de

programmation associés jouent un rôle crucial dans cette automatisation, rendant les systèmes plus fiables, robustes et efficaces.

Nous avons étudié en détail le potentiel de l'énergie photovoltaïque, essentielle pour une transition énergétique vers un avenir durable. Cette énergie propre et fiable convertit le rayonnement solaire en électricité grâce aux cellules photovoltaïques, pièces maîtresses de cette technologie. Nous avons exploré leur fonctionnement, leurs caractéristiques, ainsi que les facteurs externes influençant leur rendement.

L'association des cellules en série ou en parallèle permet d'optimiser la production d'électricité, bien qu'il faille gérer les déséquilibres pour maintenir l'efficacité du système. Les avantages de l'énergie photovoltaïque incluent sa propreté et sa fiabilité, malgré des défis persistants liés au coût et au rendement. Son potentiel pour une production décentralisée et adaptable en fait une option prometteuse pour notre approvisionnement énergétique futur.

Le premier chapitre a clarifié les fondements des systèmes photovoltaïques, ouvrant la voie à des développements futurs. Le deuxième chapitre a mis en lumière l'importance de comprendre les paramètres influençant les performances des panneaux solaires, notamment les conditions météorologiques et les défauts potentiels. L'utilisation de modèles simplifiés à une diode a permis de simuler précisément le comportement des cellules photovoltaïques dans divers environnements, soulignant l'importance de maximiser le point de puissance maximale (PPM).

Le dernier chapitre s'est concentré sur l'automatisation du suiveur solaire à double axe, essentielle pour maximiser l'efficacité des systèmes photovoltaïques. Nous avons décrit leur fonctionnement, les composants essentiels et les systèmes de contrôle. L'intégration d'automates programmables industriels (API) et l'utilisation du logiciel STEP7 ont montré comment programmer et tester efficacement ces systèmes. L'élaboration d'un Grafcet pour un suiveur solaire à deux axes a permis de visualiser les séquences opérationnelles pour une gestion et une maintenance optimales.

En conclusion, l'automatisation des suiveurs solaires améliore l'efficacité énergétique et réduit la dépendance à l'intervention humaine, ouvrant la voie à des systèmes plus durables et rentables. Ces chapitres offrent une compréhension approfondie et des bases solides pour la mise en œuvre de technologies avancées dans l'exploitation des énergies renouvelables.

Perspectives

- Etudier les autres défauts subits par les systèmes photovoltaïques.
- Réalisation de ce suiveur solaire et l'installer sur un système PV déjà implanté.

Référence Bibliographique

- [1] Mekki Mounira, Récupération des déperditions d'énergie dans les complexes industriels et leur conversion en énergie électrique exploitable, thèse de doctorat, Algérie, 2014,
- [2] M. Blhadj "Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome " Mémoire de Magister Centre Universitaire de Bechar 2007-2008.
- [3] Nichiporuk Oleksiy « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités ». Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.
- [4] Z. Idir, A. Adrar " Etude et simulation du comportement d'un générateur photovoltaïque en présence de problème de désadaptation ", Mémoire de Master, Université A. MIRA-BEJAIA, Algérie, 2016.
- [5] M Saad Saoud Merwan, "Optimisation de la gestion de l'énergie photovoltaïque utilisée dans une zone agricole ", Thèse de Doctorat, Université BADJI MOKHTAR – ANNABA, Algérie, 2015.
- [6] M. Boukhli, O. Hacem. "Conception et réalisation un Générateur PV Muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique". Mémoire de Magister. Université Aboubaker Bel Kaid Telemcen 2011.
- [7] : S. ABOUDA. « Contribution à la commande des systèmes Photovoltaïque Thèse. Université de Reims Champagne-ardenne.2015.
- [8] R. Khezzar et al. « Comparaison entre les différents modèles électriques Et détermination des paramètres de la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque ». Revue des Energies Renouvelables Vol.13 N° 3, pp 379-388,2010
- [9] BOUZEGANE Mhenna GAOUAOUI Ferhat « Alimentation d'un moteur à courant continu par une source photovoltaïque » Mémoire de Fin d'Etudes De MASTER ACADEMIQUE Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou.2018
- [10] A Betka « Optimisation d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil » Mémoire de Magister université de Biskra ,1997.

- [11] Hassan Essakhi, University Ibn Zohr- ESTA Agadir Doctor of Engineering, MODÉLISATION ET SIMULATION D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE, May 2019.
- [12] ABABACAR, Ndiaye. Etude de dégradation et de fiabilité des modules photovoltaïques impact de la poussière sur les caractéristiques électriques de performance. Thèse de doctorat. Energie renouvelable et systèmes électriques. Dakar, université Cheikh Anta Diop de Dakar, 2016,181p.
- [13] Défauts des panneaux solaires les plus courants : délaminage de l'EVA
- [14] Mémoire de fin d'études, Master en Electromécanique, thème « Influence d'ombrage sur le comportement d'un générateur photovoltaïque », présenter par MEKIDECHE Yacine et AKKAL Mahmoud, année 2018
- [15] ENGIE MY POWER Ombre sur les panneaux solaires : impact & solutions possibles, Publié le 18/11/2022, mis à jour le 22/02/2023.
- [16] Group Roy énergie de l'ombre sur les panneaux solaires ? lumière sur les solutions pour optimiser la production d'énergie 23 janvier 2024.
- [17] M'SILTI Djamila et ARAIBIA Maria Hibet Allah'' ETUDE ET REALISATION D'UN SUIVEUR SOLAIRE' ''Mémoire Présenté pour obtenir LE DIPLOME DE MASTER, ETUDE ET Université SAAD DAHLAB de BLIDA 2019/2020
- [18] NAAMOUNE et KHAOULA et CHAACHIA HIBA et OUADI RAYANE''ETUDE ET REALISATION D'UN SUIVEUR SOLAIRE' 'Mémoire Présenté pour obtenir LE DIPLOME DE MASTER Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj 2020/2021
- [19] Benmohammadi Zahra : 'Etude, conception et réalisation d'une commande d'un suiveur Solaire', Mémoire de projet de fin d'étude, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Fès, juin 2014.
- [20] REZZIKA CYLIA ET SI HADJ MOUHAND NASMA''Automatisation et contrôle de la fardieuse TSM 4SDI de LALA Khedidja '' Mémoire de fin d'étude de master académique Université mouloud Mammeri de tizi Ouzou 2020 /2021
- [21] BOUCHAMA Kahina et ALLAM Lila' 'Automatisation et supervision de l'unité de production du détergent du groupe OSMOSE'' Mémoire de fin d'étude de master académique

Université mouloud Mammeri de tizi Ouzou 2018

[22] système de suivi solaire à axe unique horizontal à un portrait, mis en ligne à partir du novembre 2021, France.

[23] fesraoui Yacine abdelilah hafsi mohamed, automate programmable, communication et transmission des données, réseau profibus, automatique système, 2019/2020, université de Saïda.

[24] Adel bouchahed, grafcet et programmation des API, institut des sciences et techniques appliquées-UFM-constantine-1

[25] FERHAT Imène, « Entretien et maintenance d'une installation photovoltaïque », mémoire Master, Université Larbi Tebessi – Tébessa année 2022

[26] cours automatisme industrielle. Université UMMTO, auteure mezai Nabil. Année 2022

Résumé

Cette étude explore le potentiel de l'énergie photovoltaïque dans la transition énergétique vers un avenir durable. L'accent a été mis sur le fonctionnement des cellules photovoltaïques et les facteurs externes influençant leur rendement. L'optimisation de la production d'électricité par l'association des cellules en série ou en parallèle a été analysée, malgré des défis persistants liés aux coûts et au rendement. L'étude examine également l'automatisation des suiveurs solaires à double axe, permettant d'améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques en utilisant des automates programmables industriels (API) et le logiciel STEP7. Cette automatisation, combinée à une gestion optimale via un Grafset, contribue à rendre ces systèmes plus performants et rentables. Enfin, les perspectives futures incluent l'étude des défauts des systèmes photovoltaïques et l'installation pratique de ces suiveurs solaires.

This study investigates the potential of photovoltaic energy in the transition toward a sustainable future. It focuses on the operation of photovoltaic cells and the external factors affecting their efficiency. The optimization of electricity production through the series or parallel connection of cells was analyzed, despite ongoing challenges related to cost and performance. The research also highlights the automation of dual-axis solar trackers, improving the efficiency of photovoltaic systems through the use of industrial programmable logic controllers (PLCs) and STEP7 software. This automation, along with optimal management through Grafset, enhances the performance and cost-effectiveness of the systems. Future prospects include studying photovoltaic system defects and the practical implementation of these solar trackers.

Mots clés : énergie photovoltaïque, cellules photovoltaïques, rendement, transition énergétique, suiveur solaire, automatisation, API, STEP7, Grafset, efficacité énergétique.