

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université Hassiba Benbouali de Chlef (U.H.B.C) Faculté de Technologie

DEPARTEMENT DE MECANIQUE



PROJET DE FIN D'ETUDES

Présenté pour l'obtention du diplôme de master (LMD) Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
Filière : GENIE MECANIQUE Option : ENERGETIQUE

Thème

**Amélioration de la production d'énergie par
reconfiguration Sudoku dans des parcs photovoltaïques
sous ombrage partiel**

Présentés par :

RABAH Billel

AMAMRA Mohamed Zahredine

**Dirigé par: Mr. ZERGLAINE
Abdelaziz**

Les membres du jury :

Pr : Bessghier

Ex : Mokhtar Didouche

Ex : Belkacem N

Année Universitaire 2024/2025

Remerciements

En premier lieu, nous voudrions adresser toute notre gratitude à Mr. ZERGLAINE Abdelaziz.

En tant que directeur de mémoire, il nous a guidés et aidés dans notre travail. Nous le remercions pour les connaissances qu'il a su nous transmettre, ainsi que pour sa disponibilité et la qualité de ses conseils.

Nous remercions également l'ensemble des professeurs et des employés de l'université Hassiba BENBOUALI de Chlef qui nous ont fourni les outils nécessaires à la réussite de notre cursus universitaire.

Enfin, nous tenons à remercier les membres du jury d'avoir bien voulu estimer ce travail.

Table des matières:

Remerciement	2
Table des matières	4
Liste des figures	7
Liste des tableaux	10
Introduction générale	11

Chapitre 01: Les énergies renouvelables.

1.1. Introduction	14
1.2. Définition des énergies renouvelables	14
1.3. Différence entre énergie renouvelable et énergie non renouvelable	15
1.4. État des lieux des énergies renouvelables	15
1.5. Etat de l'art d'énergies renouvelables	16
1.6. Production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde.....	18
1.7. le taux de croissance du marché des énergies renouvelables au niveau mondial et régional.....	20
1.8. La répartition du mix énergétique entre renouvelables et fossiles.....	20
1.9. Les prix de production des technologies renouvelables.....	21
1.10. Différents types des énergies renouvelables	21
1.11. L'énergie hydraulique	23
1.11.1. Définition	23
1.11.2. Principe de fonctionnement des centrales hydrauliques	24
1.11.3. Les Avantages de l'énergie hydraulique	24
1.11.4. Les Inconvénients de l'énergie hydraulique	24
1.12. L'énergie de la biomasse	25
1.12.1. Définition	25
1.12.2. Les Avantages de L'énergie biomasse	26
1.12.3. Les Inconvénients de L'énergie biomasse	26
1.13. L'énergie de la géothermie	26
1.13.1. Définition	26
1.13.2. Les Avantages de L'énergies géothermie	28
1.13.3. Les Inconvénients de L'énergie géothermie	28
1.14. L'énergie éolienne	28
1.14.1. Définition	28
1.14.2. Principe de conversion de l'énergie éolienne	29
1.14.3. Les Avantages de l'énergie éolien	30
1.14.4. Les Inconvénients de l'énergie éolien	30
1.15. L'énergie solaire	30
1.15.1. Définition	30
1.15.2. Les différents types d'énergie solaire	31
1.15.3. Les Avantages de l'énergie solaire	31
1.15.4. Les Inconvénients de L'énergie solaire	32
1.16. Potentiel solaire en Algérie.....	32
1.17. La capacité de l'énergie solaire en Algérie.....	33

1.18.	Des avantages écologiques pour le futur	35
1.19.	L'intermittence et l'efficacité énergétique des énergies renouvelables.....	36
1.20.	Conclusion	37

Chapitre 02: Modélisation d'un panneau photovoltaïque.

2.1.	Introduction	39
2.2.	Modélisation d'une cellule photovoltaïque	39
2.2.1.	Modèle à une diode	40
2.2.2.	Modèle à deux diodes	42
2.3.	Caractéristiques électriques d'une cellule PV.....	43
2.3.1.	Caractéristique (I-V)	43
2.3.1.1.	U_{co} : Tension de circuit ouvert	44
2.3.1.2.	I_{cc} : Courant de court-circuit	44
2.3.1.3.	P_m : Le point de fonctionnement optimal/point de puissance maximale.....	44
2.3.1.4.	Puissance crête et rendement	44
2.3.1.5.	Le rendement	45
2.3.1.6.	Le facteur de forme FF.....	45
2.3.1.7.	Le facteur de qualité A	45
2.4.	Simulation d'une cellule PV	45
2.5.	Influence de l'éclairement	48
2.6.	Influence de la température	49
2.7.	Module photovoltaïque	50
2.8.	Panneau photovoltaïque	51
2.9.	Associations des modules en série	52
2.10.	Association des modules en parallèle	54
2.11.	Conclusion	55

Chapitre 03: Modélisation des différentes techniques de reconfiguration.

3.1.	Introduction	58
3.2.	Description des différents modèles d'ombrage	59
3.3.	Modélisation et présentation des différentes configurations PV	60
3.3.1.	Configuration Série-Parallèle (SP)	60
3.3.2.	Configuration Bridge-Linked (BL)	62
3.3.3.	Configuration Total-Cross-Tied (TCT)	63
3.3.4.	Configuration Honey-Comb (HC)	65
3.4.	Évaluation des performances des topologies de générateurs photovoltaïques sous PSC	67
3.5.	Analyse comparative des configurations de câblage photovoltaïque (SP, TCT, HC et BL)	71
3.6.	Comparaison de la puissance générée par différentes configurations de connexion (PV)	72
3.7.	Conclusion	75

Chapitre 04: Modélisation la technique de reconfiguration SUDOKU.

4.1. Introduction	77
4.2. Présentation du problème de l'ombrage partiel dans les générateurs PV	78
4.3. Nécessité de reconfigurer les modules pour maximiser la puissance	79
4.4. Concept de reconfiguration des panneaux photovoltaïques	80
4.5. Définition de la reconfiguration statique et dynamique	81
4.5.1. Reconfiguration statique.....	81
4.5.2. Reconfiguration dynamique.....	82
4.6. Les techniques statiques de reconfiguration des panneaux photovoltaïque	83
4.6.1. Série-Parallèle (SP).....	83
4.6.2. Bridge-Linked (BL).....	84
4.6.3. Honey-Comb (HC).....	84
4.6.4. Total Cross Tied (TCT).....	85
4.6.5. Technique Sudoku (SuDoKu).....	86
4.7. Présentation de la technique Sudoku	86
4.8. Intégration de la technique Sodoku dans la matrice PV	87
4.9. Description des différents modèles d'ombrage	88
4.10. Résultat de simulation.....	89
4.11. Comparaison avec les autres techniques de reconfiguration sous l'ombrage partiel	91
4.12. Comparaison de la puissance et de la tension maximales selon les techniques de reconfiguration	92
4.13. Discussion des résultats	96
4.14. Conclusion	96
Conclusion générale	97
Bibliographie.....	99

Liste des figures :

Figure (1.1) : Consommation d'énergie primaire dans le monde et prévisions.
Figure (1.2) : Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde.
Figure (1.3) : Production mondiale d'électricité basée sur les énergies renouvelables.
Figure (1.4) : Principe de fonctionnement des centrales hydrauliques.
Figure (1.5) : Centrale à biomasse en France.
Figure (1.6) : centrale géothermique.
Figure (1.7) : énergie éolienne.
Figure (1.8) : panneau solaire.
Figure (1.9) : soleil quotidien moyen de l'irradiation directe.
Figure (1.10) : Programme algérien des énergies renouvelables 22 GW à l'horizon 2030.

Figure (2.1) : Schéma équivalent du modèle à une diode d'une cellule photovoltaïque.
Figure (2.2) : Schéma équivalent du modèle à deux diodes d'une cellule photovoltaïque
Figure (2.3) : Caractéristique courant-tension d'une cellule PV.
Figure (2.4) : le panneau photovoltaïque.
Figure (2.5) : Schéma d'un module PV sous Simulink.
Figure (2.5.a) : Caractéristique (I-V) d'une cellule PV dans les conditions standards de fonctionnement.
Figure (2.5.b) : Caractéristique (P-V) d'un module PV dans les conditions standards de fonctionnement.
Figure (2.6.a) : caractéristique (P-V) d'une cellule PV sous différents Éclairéments.
Figure (2.6.b) : caractéristique (I-V) d'une cellule PV sous différents éclairéments.
Figure (2.7.a) : Influence de la température sur la caractéristique (I-V).
Figure (2.7.b) : Influence de la température sur la caractéristique (P-V).
Figure (2.8) : Module photovoltaïque.
Figure (2.9) : Panneau PV.
Figure (2.10) : Schéma de 3 modules PV en série sous Simulink.
Figure (2.11) : Caractéristique (I-V) résultante d'un groupement de 3 modules en série.
Figure (2.12) : Caractéristique (P-V) résultante d'un groupement de 3 modules en série.
Figure (2.13) : Schéma de 3 modules PV en parallèle sous Simulink.
Figure (2.14) : Caractéristique (I-V) résultante d'un groupement de 3 Module en parallèle.
Figure (2.15) : Caractéristique (P-V) résultante d'un groupement de 3 Module en parallèle.

Figure (3.1) : Configuration (SP).
Figure (3.2) : Configuration (SP) sous Simulink.
Figure (3.3) : Caractéristique (I-V) pour (SP).
Figure (3.4) : Caractéristique (P-V) pour (SP).
Figure (3.5) : Configuration (BL).
Figure (3.6) : Configuration (BL) sous Simulink.
Figure (3.7) : Caractéristique (I-V) pour (BL).
Figure (3.8) : Caractéristique (P-V) pour (BL).
Figure (3.9) : Configuration (TCT).
Figure (3.10) : Configuration (TCT) sous Simulink.

Figure (3.11) : Caractéristique (I-V) pour (TCT).

Figure (3.12) : Caractéristique (P-V) pour (TCT).

Figure (3.13) : Configuration (HC).

Figure (3.14) : Configuration (HC) sous Simulink.

Figure (3.15) : Caractéristique (I-V) pour (HC).

Figure (3.16) : Caractéristique (P-V) pour (HC).

Figure (3.17) : Evolution de la puissance maximale pour la configuration (SP) selon différents cas d'ombrage.

Figure (3.18) : Evolution de la puissance maximale pour la configuration (TCT) selon différents cas d'ombrage.

Figure (3.19) : Evolution de la puissance maximale pour la configuration (HC) selon différents cas d'ombrage.

Figure (3.20) : Evolution de la puissance maximale pour la configuration (BL) selon différents cas d'ombrage.

Figure (3.21) : Comparaison des Configurations PV – Cas 1.

Figure (3.22) : Comparaison des Configurations PV – Cas 2.

Figure (3.23) : Comparaison des Configurations P(V) – Cas 3.

Figure (3.24) : Comparaison des Configurations PV – Cas 4.

Figure (3.25) : Comparaison des Configurations PV – Cas 5.

Figure (3.26) : Comparaison des Configurations PV – Cas 6.

Figure (4.1) : Schéma d'une Reconfiguration dynamique.

Figure (4.2) : Une instance difficile de sudoku.

Figure (4.3) : La grille Sudoku appliquée aux matrices PV.

Figure (4.4) : Les différents scénarios d'ombrage.

Figure (4.5) : Courbes (P-V) comparatives des différentes configurations de matrices photovoltaïques sous ombrage partiel (cas 01).

Figure (4.6) : Courbes (P-V) comparatives des différentes configurations de matrices photovoltaïques sous ombrage partiel (cas 02).

Figure (4.7) : Courbes (P-V) comparatives des différentes configurations de matrices photovoltaïques sous ombrage partiel (cas 03).

Figure (4.8) : Courbes (P-V) comparatives des différentes configurations de matrices photovoltaïques sous ombrage partiel (cas 04).

Figure (4.9) : Courbes (P-V) comparatives des différentes configurations de matrices photovoltaïques sous ombrage partiel (cas 05).

Figure (4.10) : Puissance maximale obtenue pour le Cas 01 selon différentes techniques de reconfiguration.

Figure (4.11) : Puissance maximale obtenue pour le Cas 02 selon différentes techniques de reconfiguration.

Figure (4.12) : Puissance maximale obtenue pour le Cas 03 selon différentes techniques de reconfiguration.

Figure (4.13) : Puissance maximale obtenue pour le Cas 04 selon différentes techniques de reconfiguration.

Figure (4.14) : Puissance maximale obtenue pour le Cas 05 selon différentes techniques de reconfiguration.

Figures (4.15) : Tension maximale pour les cinq cas selon les techniques de reconfiguration.

Liste des tableaux :

Tableau (1.1) : Différentes types d'énergies.

Tableau (1.2) : Evolution de la part des renouvelables dans la production d'électricité dans le monde.

Tableau (1.3) : Part des renouvelables dans la production d'électricité par continent en 2022.

Tableau (1.4) : Les prix de production des technologies renouvelables.

Tableau (1.5) : Répartition du potentiel solaire en Algérie.

Tableau (2) : Paramètres de la cellule PV à 25°C et 1000 W/m².

Tableau (3.1) : Performances comparatives des différentes configurations photovoltaïques (SP, TCT, BL et HC) sous différents cas d'ombrage.

Tableau (3.2) : Comparaison des principales configurations de câblage photovoltaïque.

Tableau (4) : Performances comparatives des différentes configurations photovoltaïques (SP, TCT, BL, HC et SUDOKU) sous différents cas d'ombrage.

المخلص

تتناول هذه المذكرة دراسة تأثير التظليل الجزئي على أداء المولدات الكهروضوئية، والحلول الممكنة للتقليل بعد عرض عام لمصادر الطاقات المتجددة. (Mismatch) من خسائر القدرة الناتجة عن ظاهرة عدم التطابق والمبادئ الأساسية للخلايا الشمسية، تم تطوير نموذج رياضي وكهربي لمحاكاة سلوك الوحدات الكهروضوئية تحت ظروف مختلفة من الإشعاع الشمسي. كما تم إجراء مقارنة بين عدة تراكيب توصيل تقليدية (السلسلة-المتوازي، التوصيل الجسري، التوصيل المتقاطع الكامل، والتوصيل السداسي) من حيث الكفاءة الطاقوية. أظهرت نتائج المحاكاة أن هذه التراكيب التقليدية تتعرض لانخفاض ملحوظ في القدرة المستخرجة عند وجود التظليل. في المقابل، أثبتت تقنية إعادة التوصيل بطريقة السودوكو فعاليتها في توزيع $(V-)$ وقد بينت (P) الإشعاع بشكل أكثر تجانساً، مما يقلل من تأثير عدم التطابق ويحسن استمرارية المنحنيات هذه التقنية أنها الأكثر كفاءة من حيث القدرة القصوى والاستقرار. كأفاق مستقبلية، يُقترح تطوير دارة إلكترونية ذكية تسمح بإعادة التوصيل الديناميكي للوحدات الكهروضوئية من أجل تحسين إنتاج الطاقة في الظروف التشغيلية الواقعي.

Abstract:

This thesis focuses on the study of the impact of partial shading on the performance of photovoltaic (PV) generators and on the solutions that can mitigate the power losses related to the mismatch phenomenon. After presenting renewable energy sources and the fundamental principles of photovoltaic cells, a mathematical and electrical model was developed to simulate the behavior of PV modules under different irradiance conditions. Several interconnection topologies (Series-Parallel, Bridge-Linked, Total-Cross-Tied, and Honey-Comb) were compared in terms of energy efficiency. Simulation results show that these conventional configurations experience a significant degradation of the maximum extractable power under shading conditions. In contrast, the application of the Sudoku reconfiguration method enables a more homogeneous distribution of irradiance, thereby reducing

mismatch effects and improving the continuity of P–V curves. This technique proved to be the most effective, delivering higher maximum power and better stability. As a perspective, the development of an intelligent electronic circuit enabling dynamic reconfiguration of PV modules is proposed, in order to optimize energy production under real operating conditions.

Résumé:

Ce mémoire porte sur l'étude de l'impact de l'ombrage partiel sur les performances des générateurs photovoltaïques et sur les solutions permettant de réduire les pertes de puissance associées au phénomène de mismatch. Après une présentation des énergies renouvelables et des principes fondamentaux des cellules photovoltaïques, un modèle mathématique et électrique a été développé afin de simuler le comportement des modules PV dans différentes conditions d'irradiance. Plusieurs configurations de câblage (Série-Parallèle, Bridge-Linked, Total-Cross-Tied et Honey-Comb) ont été comparées en termes de rendement énergétique. Les résultats de simulation montrent que ces topologies classiques subissent une dégradation notable de la puissance maximale extraite en cas d'ombrage. En revanche, l'application de la méthode de reconfiguration Sudoku permet une répartition plus homogène de l'irradiance, réduisant le phénomène de mismatch et améliorant la continuité des courbes P–V. Cette technique s'est révélée la plus performante, offrant une puissance maximale plus élevée et une meilleure stabilité. Comme perspective, il est proposé de concevoir un circuit électronique intelligent permettant la reconfiguration instantanée des modules PV afin d'optimiser la production d'énergie dans des conditions réelles.

Introduction

Générale

Introduction générale :

Au cours des dernières années, le monde a connu une croissance importante de la demande en énergie dans tous les domaines de la vie, en particulier l'électricité qui provient malheureusement en grande partie des sources d'énergie fossiles, lesquelles ont un impact très nocif sur l'environnement.

La solution repose sur le recours aux énergies renouvelables. Dans cette optique, plusieurs pays ont engagé des investissements immenses et semblent de ce fait sur la bonne voie pour réussir le challenge d'allier production et consommation d'énergie d'un côté et le maintien de l'équilibre environnemental de la planète de l'autre. Le soleil reste dans ce cas, que ce soit de manière directe ou indirecte, la source d'énergie la plus prometteuse.

Il est bien connu que la puissance électrique générée par un module photovoltaïque peut être fortement diminuée par rapport aux conditions optimales de production (point maximum de puissance) pour des conditions météorologiques données par de nombreux facteurs, tels qu'ombrage, mauvais fonctionnement du MPPT, déséquilibres, etc...

Dans ce mémoire, notre travail a porté sur l'étude des effets de l'ombrage sur la production d'énergie photovoltaïque, ainsi que sur les différentes approches visant à en atténuer l'impact.

Dans le premier chapitre, nous donnerons un aperçu général des énergies renouvelables, en mettant en évidence leurs principales sources, leurs caractéristiques et leurs avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre représente le comportement électrique et énergétique d'un panneau photovoltaïque à travers des équations mathématiques et des schémas équivalents.

Le troisième chapitre étudie l'effet de l'ombrage partiel sur un module PV, six cas de l'ombrage partiel seront traités et discutés et une comparaison des pertes de puissance des différentes configurations est ensuite présentée.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude de la technique de reconfiguration **Sudoku** appliquée aux matrices photovoltaïques. Les performances de cette configuration sont analysées et comparées à celles des topologies classiques, à savoir : Série-Parallèle (SP), Total-Cross-Tied (TCT), Bridge-Linked (BL) et Honey-Comb (HC).

On clôture avec une conclusion générale.

Chapitre 01 :

Les énergies

Renouvelables

1.1. Introduction :

Face à la croissance démographique, au développement industriel et aux exigences de la vie moderne, la consommation énergétique mondiale connaît une augmentation continue. Historiquement dominée par les énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel), cette consommation soulève aujourd'hui de nombreuses préoccupations, notamment en matière de pollution, de raréfaction des ressources et de changement climatique. [1]

Dans ce contexte, les énergies renouvelables apparaissent comme une solution incontournable pour assurer un avenir énergétique durable. Elles sont issues de sources naturelles en constante régénération, telles que le soleil, le vent, la biomasse, l'eau ou encore la chaleur terrestre. Contrairement aux sources conventionnelles, ces énergies présentent l'avantage d'être propres, disponibles localement, et inépuisables à l'échelle humaine.

Le recours aux énergies renouvelables constitue un enjeu stratégique majeur pour les pays cherchant à diversifier leur mix énergétique, réduire leur dépendance aux hydrocarbures, et limiter leur impact environnemental. En Algérie, pays richement doté en ressources naturelles, le développement des énergies renouvelables représente une opportunité considérable pour répondre aux besoins énergétiques croissants tout en préservant l'environnement. [2]

1.2. Définition des énergies renouvelables :

Les énergies renouvelables sont des formes finales d'énergie (électricité, chaleur ou carburant) obtenues à partir de sources renouvelables d'énergie. Contrairement aux sources d'énergie classiques, fossile ou nucléaire, les énergies primaires renouvelables sont inépuisables à très long terme, car issues directement de phénomènes naturels liés au soleil, au vent, aux flux hydrauliques, à la chaleur naturelle de la terre, etc. Leur consommation ne limite pas leur utilisation future. En d'autres termes, elles se reconstituent plus rapidement qu'elles sont utilisées. Les énergies renouvelables reposent sur des flux, par opposition aux énergies classiques qui s'appuient sur des stocks issus de gisements limités de combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz) ou fissiles (uranium, plutonium, etc.). Les énergies renouvelables ont pour principaux avantages de pouvoir être produites sur place et à un coût limité pour l'environnement, par comparaison avec l'exploitation des énergies fossiles. Plusieurs défis sont cependant à relever concernant les énergies renouvelables : des coûts

d'exploitation élevés, des problèmes de stockage et des difficultés de raccordement au réseau. [3]

1.3. Différence entre énergie renouvelable et énergie non renouvelable :

Pour résumer, les énergies renouvelables sont celles dont la production est possible de manière illimitée sans problème de ressource. À l'inverse, les énergies non renouvelables ne sont disponibles qu'en quantité limitée et dont les stocks s'épuisent plus vite qu'ils ne se refont. [4]

➤ Voici les différentes énergies et les modes de productions associés :

Énergies non renouvelables	Énergies renouvelables
Centrale thermique à flamme (charbon, gaz naturel, pétrole)	Barrages hydrauliques (eau)
Centrale nucléaire (uranium)	Éoliennes (vent)
	Panneaux solaires (soleil)
	Hydroliennes (courants marins)
	Géothermie (chaleur naturelle du sol)
	Usines de méthanisation (déchets organiques)

Tableau (1.1) : Différentes types d'énergies. [4]

1.4. État des lieux des énergies renouvelables :

En 2023, la part des énergies renouvelables dans la production mondiale d'électricité a atteint 30,24 %, une nette progression par rapport aux années précédentes (18,71 % en 2000, 19,71 % en 2010 et 28,08 % en 2020). Ce chiffre témoigne d'une prise de conscience croissante de la nécessité d'adopter des formes d'énergie plus durables. La répartition des sources d'énergie renouvelables se compose de 14,28 % d'hydroélectricité, 7,82 % d'éolien,

4,6 % d'énergie solaire (photovoltaïque), et 2,3 % de biomasse, le tout représentant une avancée significative, bien que le rythme reste insuffisant pour atteindre les objectifs climatiques fixés par l'Accord de Paris.

À travers le globe, plusieurs pays se distinguent par leurs efforts significatifs en matière d'énergies renouvelables. Par exemple, l'Allemagne et les Pays-Bas se classent parmi les pionniers, mettant en œuvre des politiques ambitieuses pour augmenter leur production renouvelable. Ces nations ont réussi à diversifier leurs sources d'énergie, et leur modèle peut inspirer d'autres pays, notamment ceux d'Afrique de l'Ouest qui s'interrogent sur le modèle énergétique à adopter. [5]

1.5. Etat de l'art d'énergies renouvelables :

Dans une perspective de développement durable, le monde est confronté à un double défi majeur : l'épuisement progressif des ressources énergétiques fossiles et les impacts environnementaux liés à leur utilisation. Face à ces enjeux, le recours aux énergies renouvelables apparaît comme une solution de plus en plus encouragée. En effet, la consommation mondiale d'énergie ne cesse d'augmenter, soulevant des préoccupations cruciales quant à l'effet de serre et à la raréfaction des ressources énergétiques.

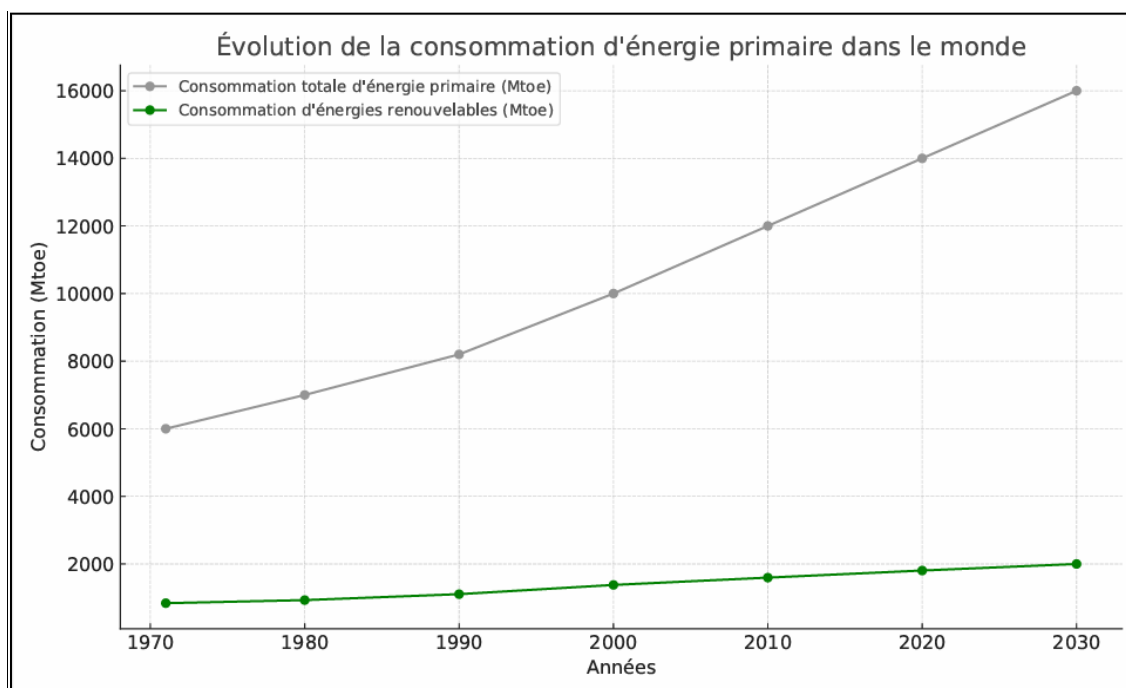


Figure (1.1) : Consommation d'énergie primaire dans le monde et prévisions. [6]

Aujourd’hui plus de 85% de l’énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou de l’énergie nucléaire. La figure (1.2) montre la répartition en termes d’énergie primaire dans le monde pour toutes les ressources actuelles.

Les formes de production d’énergie non renouvelables engendrent une forte pollution environnementale par rejet des gaz à effet de serre qui provoque un changement climatique irréversible ou dans le cas du nucléaire une pollution par radiations de longue durée qui pose le problème, aujourd’hui non résolu, du stockage des déchets radioactifs.

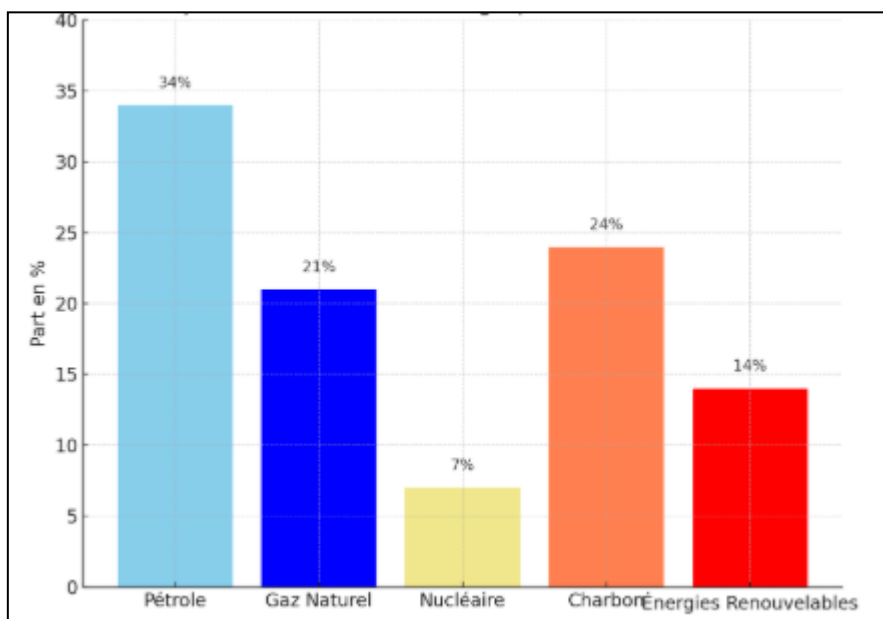


Figure (1.2) : Répartition des sources primaires d’énergie dans le monde. [7]

L’autre argument qui milite à l’avantage des sources renouvelables est lié à la pérennité des ressources en énergies. Dans le courant de 21^{ème} siècle, le paysage énergétique va radicalement changer car plusieurs ressources fossiles risquent de disparaître, De nouvelles ressources associées à des technologies performantes et fiables sont indispensables pour « tenter » de maintenir le niveau de la production énergétique mondiale.

Il existe plusieurs ressources en énergies renouvelables : l’énergie hydraulique, l’énergie éolienne, l’énergie solaire thermique et photovoltaïque, l’énergie produite par les vagues et la houle ainsi que les courants marins, la géothermie et la biomasse. Ces ressources en énergie sont pratiquement inépuisables et propres. Dans le contexte économique actuel où l’on ne chiffre qu’une partie des coûts en occultant certains « coûts collatéraux » (démantèlement de centrales, pollution,...) les installations à énergie renouvelable peuvent encore aujourd’hui

avoir un coût important (exemple des modules solaires PV) et sont donc plutôt réservées à des pays développés où elles peuvent dans d'autres cas être assez peu onéreuses (exemple de la combustion de la biomasse) et peuvent être utilisées dans les pays en voie de développement.[7]

1.6. Production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde:

La part des énergies renouvelables dans la production d'électricité mondiale a montré une progression significative. En 1985, les renouvelables représentaient 20,82 % de la production mondiale (presque exclusivement de l'hydraulique), mais cette part a diminué régulièrement jusqu'à atteindre un minimum de 18,09 % en 2005. A partir de 2010, une inversion de cette tendance est observée, avec une part des renouvelables atteignant 19,71 % puis augmentant régulièrement chaque année. En 2020, la part des renouvelables a dépassé les 28 %, atteignant 30,24 % en 2023.

Cette croissance rapide au cours des dernières années reflète des investissements accrus dans les énergies renouvelables, des avancées technologiques, ainsi qu'une prise de conscience mondiale accrue des enjeux climatiques et des politiques environnementales visant à réduire les émissions de carbone.[8]

Année	Part des renouvelables
1985	20,82%
1990	19,06%
1995	19,72%
2000	18,71%
2005	18,09%
2010	19,71%
2011	20,01%
2012	20,97%
2013	21,70%
2014	22,26%
2015	22,99%
2016	23,75%
2017	24,54%
2018	25,18%

2019	26,19%
2020	28,08%
2021	28,14%
2022	29,42%
2023	30,24%

Tableau (1.2) : Evolution de la part des renouvelables dans la production d'électricité dans le monde. [8]

La part des énergies renouvelables dans la production d'électricité varie considérablement selon les continents. L'Amérique du Sud se distingue avec une part exceptionnelle de 75 %, largement supérieure à la moyenne mondiale. Cette performance remarquable s'explique principalement par l'abondance de ressources hydroélectriques dans des pays comme le Brésil. L'Océanie suit avec 40,04 %, grâce à des politiques énergétiques agressives en faveur des renouvelables en Australie et en Nouvelle-Zélande.

L'Europe, avec 35,23 %, bénéficie de ses investissements massifs dans les énergies éoliennes et solaires, soutenus par des politiques environnementales strictes. En comparaison, l'Amérique du Nord (28,44 %), l'Asie (24,68 %), et l'Afrique (23,30 %) affichent des parts inférieures mais en croissance forte, reflétant des efforts variés pour intégrer les renouvelables dans leurs mix énergétiques respectifs.

Continent	Part des renouvelables (%)
Afrique	23,30%
Asie	24,68%
Europe	35,23%
Amérique du Nord	28,44%
Océanie	40,04%
Amérique du Sud	74,74%
Monde	29,42%

Tableau (1.3) : Part des renouvelables dans la production d'électricité par continent en 2022. [8]

La croissance significative des énergies renouvelables est toujours concentrée dans quelques pays et régions comme l'Asie, les États-Unis et l'Europe. Environ 60% des nouvelles capacités renouvelables installées en 2023 ont en particulier été implantées en Asie.

Une trentaine de pays produisent plus de la moitié de leur électricité grâce aux renouvelables. Certains ayant des besoins électriques plus limités s'appuient encore davantage sur les EnR. C'est le cas de l'Islande qui produit l'intégralité de son électricité grâce à ses centrales hydrauliques et géothermiques(1). L'Éthiopie (99,9%) et la Norvège (98%) s'appuient aussi presque uniquement sur leurs installations hydrauliques pour produire de l'électricité. [8]

1.7. le taux de croissance du marché des énergies renouvelables au niveau mondial et régional:

Le marché mondial des énergies renouvelables connaît une expansion remarquable avec un taux de croissance annuel moyen de 9,93% prévu jusqu'en 2035.

Pour les filières spécifiques, l'éolien et le solaire affichent une croissance spectaculaire de 40 à 50% entre 2024 et 2029, tandis que le solaire photovoltaïque présente un taux de croissance annuel composé (TCAC) de 26,2% pour les trackers solaires d'ici 2030.

Au niveau régional, l'Asie mène la danse avec la Chine représentant 64% des capacités ajoutées en 2024. En France, le marché devrait croître à un TCAC supérieur à 7,4% au cours de la période 2022-2027, malgré un retard sur les objectifs européens.

Cette croissance se traduit par des résultats concrets : le secteur photovoltaïque et éolien ont enregistré des croissances respectives de 64% et 20% entre 2020 et 2022 en France. [9]

1.8. La répartition du mix énergétique entre renouvelables et fossiles:

Au niveau mondial, les énergies renouvelables représentent 30% de la production électrique en 2023 et devraient atteindre 37% en 2025. En France, elles atteignent 27% de la production électrique en 2022 et 22,2% de la consommation finale brute d'énergie en 2023.

Les disparités régionales sont significatives. La Norvège affiche 93,4% d'énergies renouvelables avec une dominante hydroélectrique, tandis que la Chine, leader solaire, produit 32,9% de la production photovoltaïque mondiale. L'Inde connaît une forte croissance via des mégaprojets éoliens et solaires.

En France, le bois-énergie et l'hydroélectricité restent les filières les plus développées, mais l'éolien, le solaire photovoltaïque et les pompes à chaleur progressent le plus rapidement. Au niveau européen, la part des renouvelables a progressé de 18,09% en 2005 à 30,24% en 2023.

Cette transition s'accélère : les prévisions indiquent un dépassement de l'hydroélectricité par le solaire et l'éolien d'ici 2030. [9]

1.9. Les prix de production des technologies renouvelables:

Les coûts actualisés des énergies renouvelables ont atteint des niveaux historiquement bas : l'éolien terrestre coûte 33 \$/MWh et le solaire photovoltaïque 49 \$/MWh en 2022.

Technologie	Les coûts actualisés de l'énergie 2022-2024 (\$/MWh)	Comparaison fossiles	Évolution depuis 2010
Éolien terrestre	33	52% moins cher	-68%
Solaire PV	49	29% moins cher	-88%
Éolien offshore	75-140	Compétitif	-60%
Géothermie	Variable	Très compétitive	-22% (2022)
Hydraulique	47	Très compétitive	Stable
Fossiles (référence)	100	Base comparaison	Volatil
Solaire (projection 2030)	20	80% moins cher	Baisse continue

Tableau (1.4) : Les prix de production des technologies renouvelables. [9]

1.10. Différents types des énergies renouvelables :

Une des propriétés qui limite l'utilisation de l'énergie renouvelable est lié au fait que la matière première (source de l'énergie) n'est pas transportable dans la majorité des cas contrairement aux sources traditionnelles comme le pétrole ou l'uranium qui est extrait des gisements respectifs et acheminé « sans gros problèmes » vers les distributeurs ou les usines qui peuvent être éloignées de milliers de kilomètres. Par contre, le lieu de « l'extraction » de l'énergie renouvelable est déterminant pour le lieu de transformation. Seule la biomasse

semble avoir les propriétés les moins restrictives. Par exemple un site éolien doit être précisément déterminé en choisissant les lieux géographiques les plus régulièrement ventés, les modules solaires doivent évidemment être placés dans les zones bien ensoleillées, les propriétés de la houle ne sont pas favorables partout sur les mers

Dans les zones où le réseau existe, il est donc pratique et dans la majorité des cas nécessaire de transformer l'énergie renouvelable sous la forme électrique qui est transportable via les lignes électriques.

La production énergétique est alors centralisée et mise en réseau entre plusieurs sites de production et de consommation. Cependant, le caractère capricieux des sources renouvelables pose le problème de la disponibilité énergétique et du stockage de masse, actuellement principalement assuré par l'hydraulique.

Parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent : l'énergie d'origine mécanique (la houle, éolien), énergie électrique (modules photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de chaleur (géothermie, solaire thermique,...) en sachant qu'à la racine de toutes ces énergies est l'énergie en provenance du soleil transformée ensuite par l'environnement terrestre.

Etant donné que l'énergie mécanique est très difficilement transportable, elle n'est utilisable directement que ponctuellement (pompage direct de l'eau, moulins,...). Cette énergie est donc majoritairement transformée en énergie électrique. A l'exception de la biomasse et de l'hydraulique, l'autre inconvénient majeur des énergies renouvelables vient de la non régularité des ressources. A l'opposé, les fluctuations de demande en puissance selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément en phase avec les ressources. Par exemple, en hiver il y a un besoin énergétique plus important pour le chauffage et l'éclairage mais les journées d'ensoleillement sont plus courtes.

La solution à retenir est certainement la diversification voire le couplage entre plusieurs sources, par exemple du solaire avec l'énergie éolienne. [10]

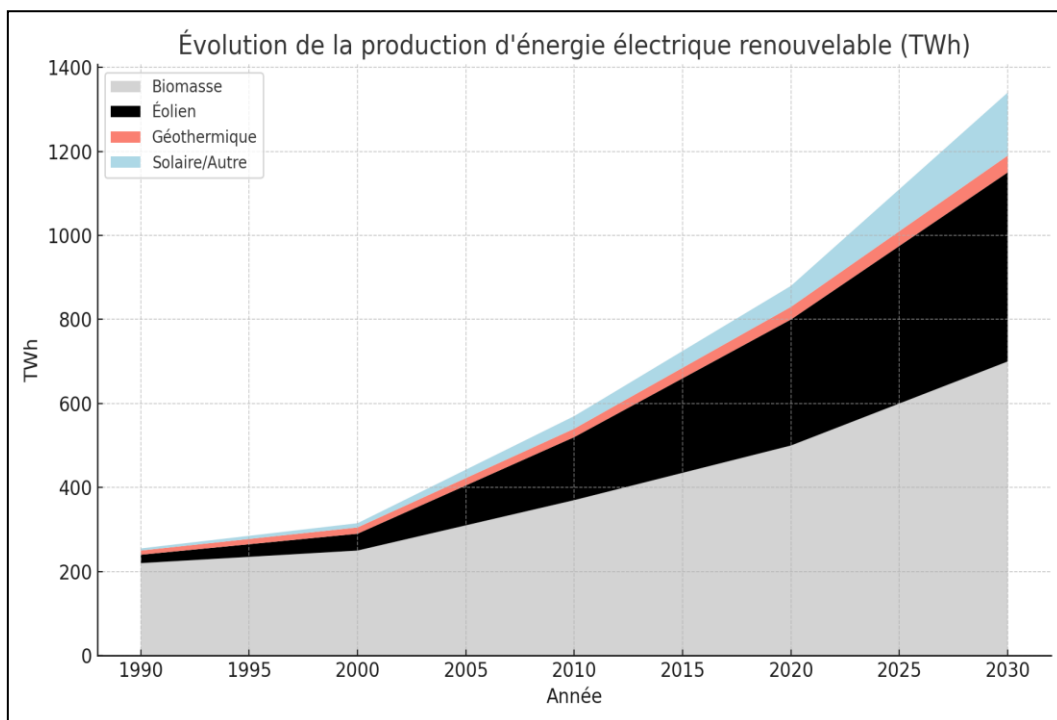


Figure (1.3) : Production mondiale d'électricité basée sur les énergies renouvelables. [11]

Une grande partie de l'énergie consommée par l'humanité est sous la forme de chaleur (chauffage, procédés industriels...). Cette énergie est majoritairement obtenue par la transformation de l'électricité en provenance du nucléaire, gaz ou du pétrole. Il existe des moyens de remplacer ces sources conventionnelles par des sources renouvelables.

1.11. L'énergie hydraulique :

1.11.1. Définition :

L'énergie hydraulique ou énergie hydroélectrique fonctionne un peu comme l'énergie éolienne. Elle exploite l'énergie potentielle des flux d'eau en s'écoulant ou en chutant d'une grande hauteur, ou créés artificiellement à partir des retenues de barrage, ou courants marins pour faire tourner une turbine qui transmet cette énergie à un générateur capable de produire de l'électricité. Plus l'eau coule vite, plus l'énergie produite est importante. 18% de la production d'énergie électrique mondiale est d'origine hydraulique. Elle constitue la première source renouvelable et la troisième source - toutes filières confondues - de production électrique au monde. [12]

1.11.2. Principe de fonctionnement des centrales hydrauliques :

Une centrale hydraulique ou hydroélectrique transforme l'énergie potentielle de l'eau lors de la descente dans une conduite forcée en énergie cinétique linéaire, puis cette énergie cinétique linéaire est convertie en énergie cinétique de rotation dans une turbine hydraulique. Cette turbine entraîne un alternateur dans lequel l'énergie cinétique de rotation est transformée en énergie électrique.

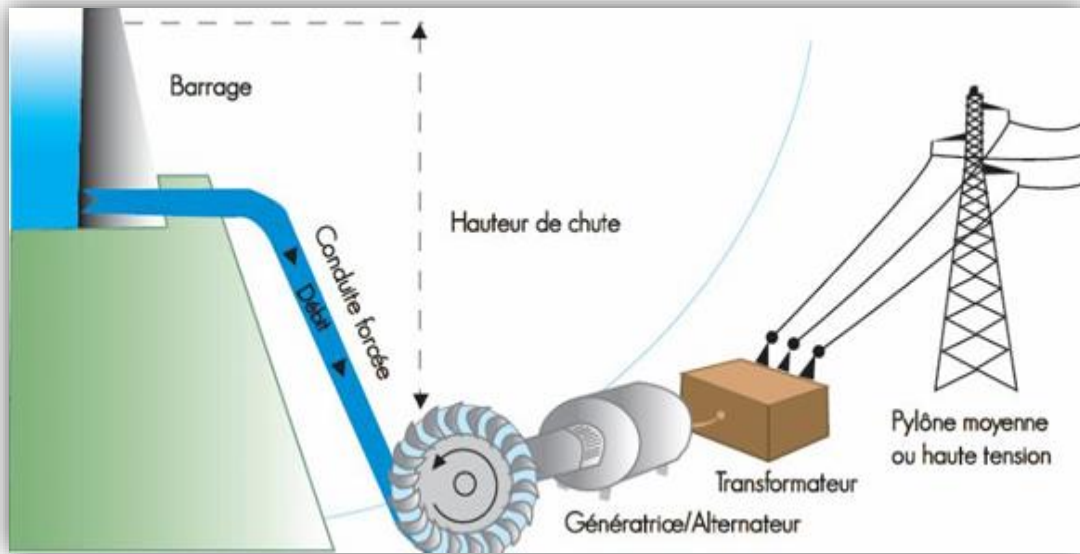


Figure (1.4) : Principe de fonctionnement des centrales hydrauliques. [13]

1.11.3. Les Avantages de l'énergie hydraulique :

- Une énergie naturelle non-polluante.
- L'eau est partout dans le monde entier.
- c'est l'énergie renouvelable qui coûte le moins cher.

1.11.4. Les Inconvénients de l'énergie hydraulique :

- Une perturbation de l'équilibre écologique.
- Grands barrages coûteux.
- Le risque de sécheresse.

1.12. L'énergie de la biomasse :

1.12.1. Définition :

La biomasse désigne l'ensemble des matières organiques pouvant se transformer en énergie. Elle est une réserve d'énergie considérable née de l'action du soleil grâce à la photosynthèse. Elle existe sous forme de carbone organique. Sa valorisation se fait par des procédés spécifiques selon le type de constituant.

On entend par matière organique aussi bien les matières d'origine végétale (résidus alimentaires, bois, feuilles) que celles d'origine animale (cadavres d'animaux, êtres vivants du sol). [14]

Il existe trois formes de biomasse présentant des caractéristiques physiques très variées :

- les solides (ex : paille, copeaux, bûches).
- les liquides (ex : huiles végétales, bioalcools).
- les gazeux (ex : biogaz).

Elle est considérée comme une source d'énergie renouvelable uniquement si sa régénération est au moins égale à sa consommation (par exemple, l'utilisation du bois ne doit pas conduire à une diminution du nombre d'arbres).

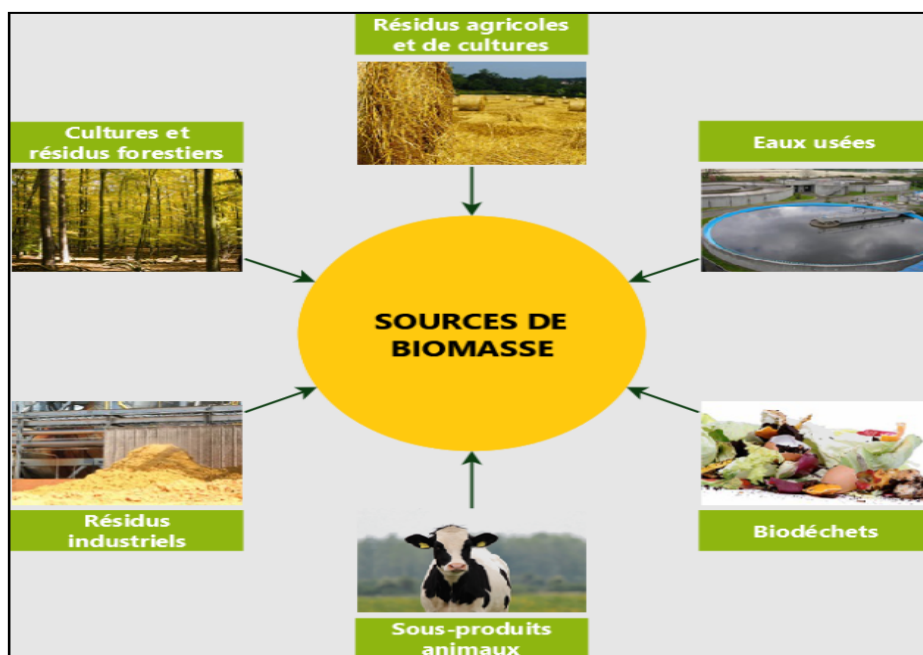


Figure (1.5): Centrale à biomasse en France. [14]

1.12.2. Les Avantages de L'énergie biomasse :

- La biomasse participe au traitement et à la destruction des déchets organiques.
- A l'heure où le prix des carburants ne cesse d'augmenter, cette énergie serait une bonne alternative au pétrole.
- Peu de modifications dans les chaudières fioul, il suffit de changer quelques parties comme les brûleurs.
- Les ressources de la biomasse sont disponibles à grande échelle.
- La biomasse est une ressource renouvelable lorsqu'utilisée et gérée de façon durable.
- Elle permet de réduire la quantité de déchets envoyés aux sites d'enfouissement. Grâce à la combustion et les émondes, on peut produire de l'énergie utile et il est moins nécessaire d'élargir les sites d'enfouissement locaux.

La biomasse peut être convertie en différentes formes d'énergie .Par exemple , le bois peut être traité et converti en gaz .Les sites d'enfouissements peuvent produire du méthane, de même que du maïs , du blé et d'autres matières qui peuvent être utilisées pour la fabrication d'éthanol- carburant liquide

1.12.3. Les Inconvénients de L'énergie biomasse :

- La production de biocarburant a un prix conséquent. En plus elle n'est pas encore totalement développée. .
- La biomasse peut être polluante si elle est mal utilisée.

1.13. L'énergie de la géothermie :**1.13.1. Définition :**

Le principe de l'énergie géothermique est de récupérer la chaleur présente dans le sol : l'eau réchauffée au contact des roches du sous-sol est utilisée pour remonter cette chaleur à la surface. Or, il est possible d'accéder à des couches géologiques contenant de l'eau chaude presque partout dans le monde, sous réserve de disposer de conditions géologiques favorables et d'effectuer des forages suffisamment profonds.

Les « réservoirs d'eau » (ou gisements géothermiques) ont des températures variant de 15°C à plus de 250°C en fonction de leur profondeur. Outre le chauffage, la conversion de la chaleur en électricité est également possible à partir de 150°C. [15]

Classiquement, trois types de géothermie sont distingués selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

- a) La géothermie à haute énergie : ou géothermie privilégiée qui exploite des sources hydrothermales très chaudes, ou des forages très profonds où de l'eau est injectée sous pression dans la roche. Cette géothermie est surtout utilisée pour produire de l'électricité.
- b) La géothermie de basse énergie : géothermie des nappes profondes (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) aux températures situées entre 30 et 100 °C.

La principale utilisation est appliquée pour les réseaux de chauffage urbain.

- c) La géothermie de très basse énergie : géothermie des faibles profondeurs aux niveaux de température compris entre 10 et 30 °C. Sa principale utilisation est le chauffage et la climatisation individuelle

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie de profondeur (haute et basse énergie), présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). C'est donc une source d'énergie quasi-continue, car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou le réseau de distribution de l'énergie. [15]

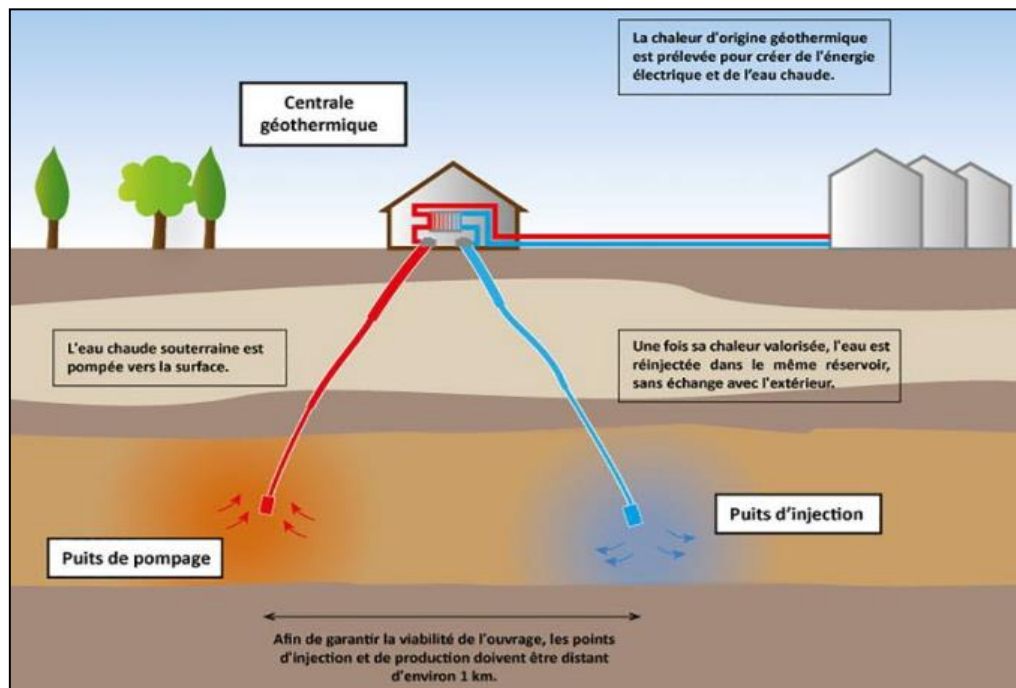


Figure (1.6) : centrale géothermique. [16]

1.13.2. Les Avantages de L'énergies géothermie :

- La géothermie est écologique
- La géothermie est renouvelable
- La géothermie est partout
- La géothermie est économique

1.13.3. Les Inconvénients de L'énergie géothermie :

- L'installation géothermique peut être faite partout, sur tous les terrains certes, mais cette énergie est tout de même optimisée sur certains terrains bien spécifiques.
- La rentabilité de l'installation géothermique n'est pas immédiate. En effet, investir dans la géothermie engendre un budget conséquent compris entre 20 000 € et 40 000 €, ce qui n'est pas à la portée de tous. La rentabilisation de votre investissement se fait uniquement après 5 ans d'utilisation environ.
- Il est également nécessaire d'intervenir régulièrement pour que l'eau utilisée pour produire cette énergie dans le sol soit réintroduite à une distance bien précise. En effet, cela ne fonctionne pas n'importe comment, et une petite aide extérieure est parfois nécessaire.

1.14. L'énergie éolienne :**1.14.1. Définition :**

L'énergie éolienne est une machine qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique au niveau du rotor, tout en convertissant l'énergie produite en énergie électrique utilisée quotidiennement au niveau du générateur. L'énergie éolienne est considérée comme l'une des énergies les plus importantes qui existent aujourd'hui, car elle a été étudiée et développée pour utiliser de manière optimale le vent et le convertir en énergie utilisable, pour la facilité de le connecter au réseau électrique.

Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. Selon le Global Wind Energie Council (GWEC), le parc éolien pourrait une puissance installée de 71, 3GW en 2020,. De 2020 à

2024, le marché mondial cumulatif de l'énergie éolienne croîtra à un taux annuel composé de 8,5% et installera 348 GW de nouvelle capacité, portant la capacité totale d'énergie éolienne mondiale à près de 1000 GW d'ici la fin de 2024, ce qui représente une augmentation de 54% pour les installations éoliennes totales par rapport à 2019[8] ,Le principal inconvénient de cette source d'énergie est l'indisponibilité et l'imprévisibilité du vent. [17]



Figure (1.7) : énergie éolienne. [18]

1.14.2. Principe de conversion de l'énergie éolienne :

Une éolienne fonctionne en convertissant l'énergie cinétique du vent en énergie électrique à travers plusieurs étapes clés impliquant les différentes pièces de l'appareil. Le vent fait tourner les pales fixées au moyeu, situé à l'avant de la nacelle. Ce mouvement rotatif est capté par le multiplicateur, qui augmente la vitesse de rotation du mouvement pour l'adapter aux besoins de production d'électricité. Le frein mécanique est également présent pour arrêter ou ralentir les pales en cas de vents trop forts ou lors de la maintenance. L'énergie cinétique augmentée est ensuite transférée au générateur (ou alternateur), situé à l'intérieur de la nacelle, où elle est convertie en énergie électrique. Le système d'orientation de la nacelle permet à l'éolienne de s'ajuster automatiquement à la direction du vent pour maximiser l'efficacité de la production. Le mât soutient l'ensemble de la structure et joue un rôle crucial en élevant les pales à une hauteur où les vents sont plus constants et plus forts. Enfin, l'électricité produite par le générateur est envoyée vers le transformateur pour ajuster la tension de l'électricité produite avant d'être transmise au réseau électrique via des câbles

électriques. Les fondations solides assurent la stabilité de l'éolienne, surtout par temps venteux, garantissant ainsi une production continue et sécurisée d'électricité. [19]

1.14.3. Les Avantages de l'énergie éolien :

- Il y a toujours du vent dans un même endroit, donc jour et nuit
- Tout le mécanisme est dans l'éolienne donc pas de grandes usines.
- Une énergie renouvelable donc non- polluante
- L'énergie éolienne produit de l'électricité : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux, sans polluer les sols.

1.14.4. Les Inconvénients de l'énergie éolien :

- Un impact visuel.
- Le prix
- La migration des oiseaux.
- La qualité de la puissance électrique.

1.15. L'énergie solaire :

1.15.1. Définition :

L'énergie solaire est une source d'énergie propre, abondante et renouvelable qui peut créer de l'eau chaude et mieux encore, d'électricité grâce à l'utilisation de panneaux photovoltaïques. Les panneaux photovoltaïques sont des dispositifs électroniques qui utilisent l'énergie lumineuse du soleil pour produire de l'électricité. Ils sont une technologie propre qui peut aider à réduire la dépendance aux sources d'énergie non renouvelables et réduire les émissions de gaz à effet de serre. Les panneaux photovoltaïques ont été utilisés pour la première fois dans les années 1950 pour alimenter les satellites en orbite, mais depuis lors, leur utilisation s'est répandue dans le monde entier [20].

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m²) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année.



Figure (1.8) : panneau solaire. [21]

1.15.2. Les différents types d'énergie solaire :

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

a) L'énergie solaire thermique: qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

b) L'énergie solaire photovoltaïque: qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de modules solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon.

c) L'énergie solaire passive: est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser directement la lumière pour le chauffage.

1.15.3. Les Avantages de l'énergie solaire :

- Une bonne source d'énergies renouvelables.
- Une énergie non-polluante.
- La lumière ne coute rien.
- Peut de soutenir et durent longtemps .

1.15.4. Les Inconvénients de L'énergie solaire :

- Il n'y a pas de lumière la nuit.
- A besoin de beaucoup d'espace.
- Le placement peut modifier l'énergie pris dans les panneaux.
- Panneau fragile.

1.16. Potentiel solaire en Algérie :

Potentiel solaire De part sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'ensoleillement sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh /m² /an au Nord et 2263 kWh /m² /an au sud du pays. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien selon l'ensoleillement reçu annuellement.

[22]

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Irradiation moyenne reçue (KWh/m²/an)	1700	1900	2263

Tableau (1.5) : Répartition du potentiel solaire en Algérie.

La figure (1.8) montre l'irradiation globale journalière sur les plans horizontal et normal. Comme le potentiel en énergies renouvelables est très important en Algérie, le gouvernement Algérien veut promouvoir ce type d'énergie et ce, en lançant un programme ambitieux qui sera bien décrit dans la section suivante :

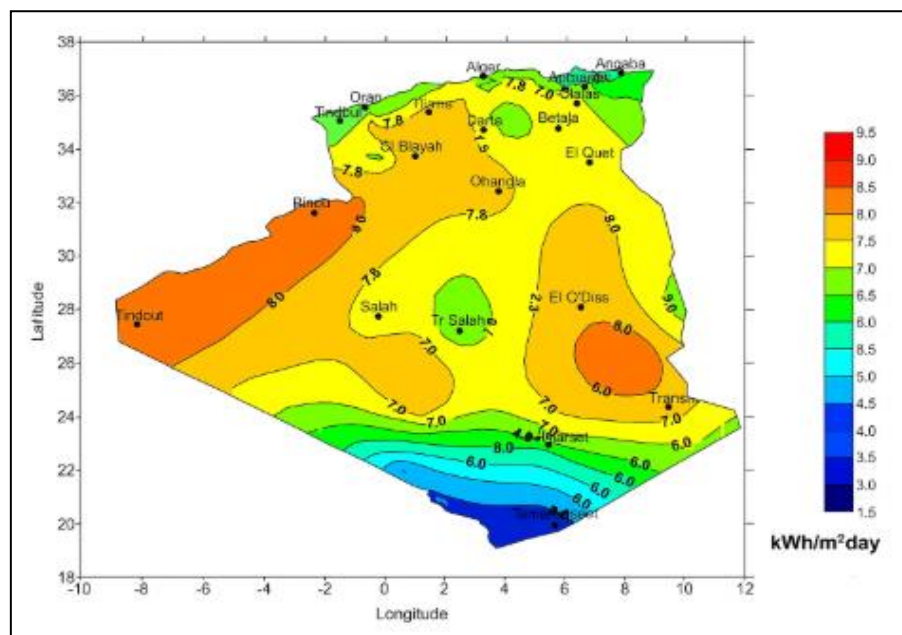


Figure (1.9) : soleil quotidien moyen de l'irradiation directe. [23]

En effet, l'Algérie est en train de réaliser quels bénéfices elle pourrait tirer d'un fort développement de l'énergie solaire dans son pays. C'est un des pays d'Afrique subsaharienne possédant le plus fort taux d'ensoleillement, et si ce pays décidait de s'équiper, cela en ferait le principal producteur d'énergie solaire du bassin méditerranéen

1.17. La capacité de l'énergie solaire en Algérie :

L'Algérie possède le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen. La preuve en a été apportée par l'Agence spatiale allemande (ASA), qui a procédé à une évaluation par satellites.

Les résultats semblent sans équivoque. Le potentiel est ainsi estimé à 169, 440 téra-watts heure/an (TWH/an) pour le solaire thermique, et de 13,9 TWH/an pour le solaire photovoltaïque. Fort de cette étude, l'Algérie lance un projet de création d'un technopôle solaire située à Hassi R'mel, d'une capacité de 150 MW/an, et opérationnel à la fin de l'année. L'objectif étant d'être en capacité de produire 6000 MW d'électricité issue du solaire d'ici 2015, soit 5% de la production globale d'électricité d'ici 2010. [24]

L'UDTS (Unité de développement de la technologie du silicium) et Sonnergy, société de droit allemand active dans le domaine de l'énergie solaire et le développement durable ont annoncé conjointement qu'elles allaient mettre sur pied une usine de production de 5000 tonnes de silicium grade solaire (SOG). Les deux organismes ont signé, hier, un mémorandum

d'entente pour la création d'une joint-venture en Algérie. Présents déjà en Algérie avec environ 150 entreprises, les Allemands s'intéressent grandement à l'énergie renouvelable en Algérie avec, à la carte, une dizaine d'entreprises allemandes qui investissent actuellement dans le solaire et l'éolien.

A partir de 2025 en Algérie, Energie solaire : l'alternative Pour préserver les réserves énergétiques actuelles de l'Algérie (pétrole et gaz), les pouvoirs publics ont opté pour le développement et l'exploitation des énergies alternatives, notamment solaire, éolienne et nucléaire.

L'exploitation de l'énergie solaire a été entamée par la réalisation d'une centrale à Hassi R'mel d'une capacité de 15 mégawats. D'autres projets sont envisagés, assure Monsieur ministre de l'Energie. « A très long terme, à l'horizon 2025, je dirai que 15% de l'électricité sera produite à partir du solaire.

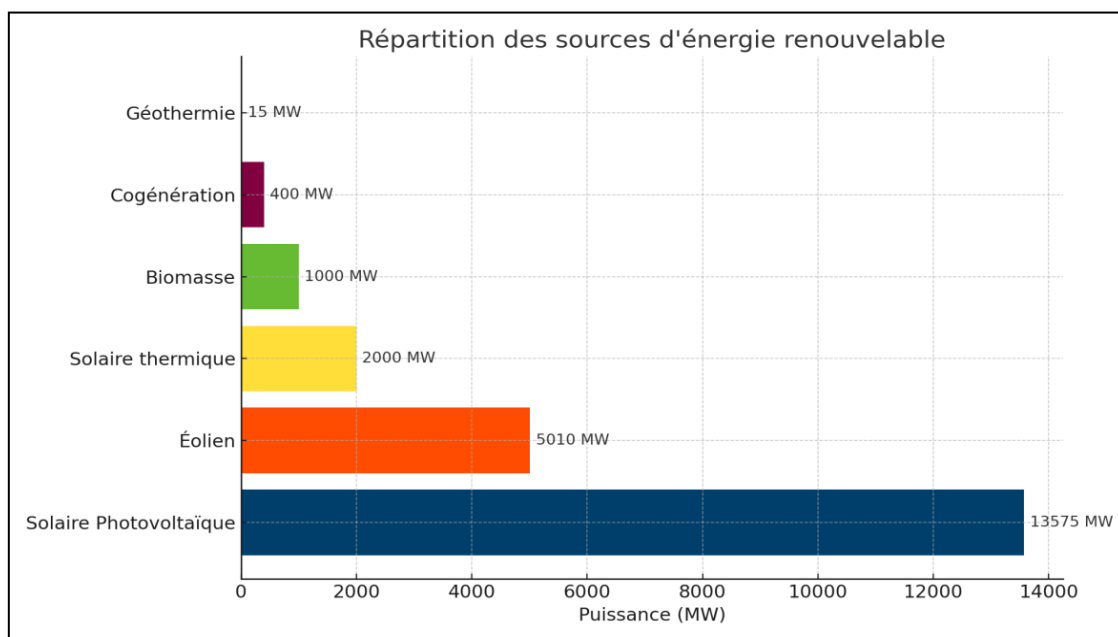


Figure (1.10) : Programme algérien des énergies renouvelables 22 GW à l'horizon 2030.

[25]

Le potentiel solaire de l'Algérie est considéré comme l'un des plus importants dans la Méditerranée et l'exploitation de cette source pourra contribuer à économiser le pétrole et le gaz. Monsieur ministre de l'Energie estime que les énergies solaire et éolienne sont techniquement faisables. « Dans le domaine de la production industrielle d'énergie solaire, nous avons déjà commencé. Nous avons maintenant une centrale en construction d'énergie

hybride solaire-gaz à Hassi R'mel d'une capacité de 150 mégawatts », a-t-il affirmé, précisant que 35% de la capacité de cette centrale sont à base solaire. Le défi majeur est relatif à l'acquisition des technologies de stockage de cette énergie à générer durant la journée et l'utiliser le soir. Dans ce sens, le ministre estime que la question n'est pas urgente.. Le nucléaire constitue l'autre option. Notre pays a déjà signé de nombreux accords avec différents pays (l'Argentine, la Chine, la France, les USA) et actuellement les négociations avec la Russie et l'Afrique du Sud sont en cours, a estimé l'invité de la radio nationale. Toutefois, l'énergie nucléaire pose problème pour l'uranium, a-t-il expliqué.

1.18. Des avantages écologiques pour le futur :

Ces dernières années, les énergies renouvelables se sont développées partout dans le monde. Sur le papier l'idée paraît excellente : contrairement aux centrales à charbon, une éolienne ou un panneau solaire produisent de l'électricité sans émettre de CO₂. Il suffit que le vent fasse tourner l'hélice ou que le soleil atteigne le panneau. Ainsi, si l'on prend en compte l'ensemble du cycle de vie d'une source de production d'électricité d'origine éolienne (de sa fabrication à sa fin de vie), elle génèrera environ 11 g de CO₂ par kWh d'électricité produite, contre plus de 800 pour une centrale à charbon

De même, du gaz produit à partir de déchets végétaux (des ressources renouvelables) permettrait en théorie de dégager moins de CO₂ et moins de pollutions.

Les promesses du renouvelable sont donc nombreuses : produire de l'énergie sans émettre de CO₂, sans déchets radioactifs dangereux, en n'utilisant que des ressources plus ou moins infinies (le vent ou le soleil, la biomasse). Selon les calculs de plusieurs études, on pourrait théoriquement alimenter la planète entière en électricité avec seulement 500 000 km carré de panneaux solaires par exemple. En théorie, il serait donc relativement simple d'investir massivement dans les énergies renouvelables, pour produire enfin une énergie propre et non polluante.

Mais les énergies renouvelables n'ont pas que des avantages. Toutes les sources de production d'énergie dites renouvelables ont des impacts environnementaux et leur production n'est pas toujours si simple qu'il n'y paraît. [26]

1.19. L'intermittence et l'efficacité énergétique des énergies renouvelables:

Le dernier problème des énergies renouvelables, c'est que leurs modes de production sont beaucoup plus complexes que ceux des énergies fossiles. Pour utiliser du gaz, du charbon ou du pétrole, il suffit d'extraire ces ressources, et d'en faire la combustion dans une centrale ou dans un moteur. Pour les énergies renouvelables, c'est beaucoup plus difficile. Pour la production électrique par exemple, les sources d'énergie comme l'éolien ou le solaire ont la particularité d'être irrégulières, ou plutôt « intermittentes ». Concrètement, pour qu'un panneau photovoltaïque fonctionne, il faut qu'il y ait du soleil. S'il n'y en a pas, le panneau ne produit pas d'électricité. Idem pour l'éolien. Généralement, on admet que l'éolien est en capacité de produire de l'électricité environ 2600 heures par an (30% du temps) et le solaire environ 1200 heures par an (15% du temps), dans un pays avec un climat similaire à la France. Avec l'hydraulique, il est possible de contrôler en partie la production, puisque l'eau est stockée dans un barrage et que la production peut donc être « activée » à volonté.

Mais si l'on veut généraliser l'utilisation de l'énergie renouvelable avec des panneaux solaires et des éoliennes, il faut être capable de stocker l'énergie pour en disposer lorsqu'il n'y a pas de vent ou pas de soleil. Or à l'heure actuelle, il est très difficile et très coûteux de stocker l'électricité. Il faut fabriquer des batteries, qui utilisent énormément de ressources (métaux précieux, terres rares, lithium), sont relativement coûteuses en termes environnementaux, et dont le fonctionnement n'est pas encore optimisé.

La plupart des pays engagés dans une transition énergétique centrées sur les énergies renouvelables font face au problème de l'intermittence. Cette année le Portugal a alimenté 100% de son réseau électrique grâce aux renouvelables pendant 5 jours. Mais cela n'a été possible que grâce à une conjonction de facteurs favorables : ces 5 jours ont eu lieu à une période où la demande énergétique était basse (fin mai, avec des températures élevées, des journées très ensoleillées qui limitent les besoins en éclairage et en chauffage), et où dans le même temps la production était élevée (grâce à la présence du soleil notamment). De plus le Portugal a pu compter sur son important réseau hydroélectrique qui permet une production stable. [26]

1.20. Conclusion :

En conclusion, les énergies renouvelables sont probablement la source d'énergie la plus prometteuse en termes écologiques. D'une part, ce sont les énergies les moins émettrices de CO₂, ce qui est essentiel du point de vue climatique. Et de toute façon, en plus d'être catastrophiques du point de vue environnemental, les énergies fossiles n'ont plus d'avenir à moyen terme car les réserves s'épuisent. Une transition vers le renouvelable sera donc inévitable. Mais pour parvenir à un modèle viable grâce aux énergies renouvelables, il ne suffit pas d'investir et de construire toujours plus d'éoliennes ou de panneaux solaires. Il faut un vrai projet de société, une société qui consomme moins d'énergie, beaucoup moins d'énergie. Il faut aussi être capable de stocker cette énergie et de mieux en gérer les flux de manière plus efficiente et décentralisée.

Bref, c'est un projet qui demande du temps et surtout un vrai investissement politique et économique, un vrai choix qui implique tout le monde, du consommateur en passant par les grandes et les petites entreprises et surtout, les pouvoirs publics.

Chapitre 02 :

Modélisation d'un

Panneau photovoltaïque

2.1. Introduction :

La modélisation d'un panneau photovoltaïque constitue une étape essentielle dans l'analyse, la conception et l'optimisation des systèmes solaires. Elle permet de représenter le comportement électrique du panneau en fonction des conditions d'ensoleillement, de température et des caractéristiques physiques des matériaux utilisés. Grâce à cette approche, il devient possible de simuler les performances du panneau, de prédire sa production d'énergie, et de mieux comprendre les phénomènes qui influencent son rendement.

À travers des modèles mathématiques, la modélisation vise à établir la relation entre la tension et le courant délivré par le panneau, ainsi qu'à estimer les pertes dues à des éléments tels que la résistance série ou la non-idéalité de la jonction. Ces modèles, allant des plus simples (à une diode) aux plus complexes (à deux diodes), sont basés sur des paramètres extraits soit des données constructeur, soit de mesures expérimentales.

Ce chapitre présente les fondements théoriques de la modélisation d'un panneau photovoltaïque, les équations associées, ainsi que les différents paramètres nécessaires à sa caractérisation.

Pour plus de détails sur la modélisation et le dimensionnement d'une cellule photovoltaïque, vous pouvez consulter les documents disponibles en ligne qui traitent de ces sujets en profondeur.

2.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

La modélisation d'une cellule photovoltaïque vise à reproduire son comportement électrique à l'aide de modèles mathématiques. Elle permet d'analyser et de prévoir les performances de la cellule sous différentes conditions d'éclairement et de température. Cette approche est indispensable pour le dimensionnement, l'optimisation et l'intégration des systèmes photovoltaïques dans des applications pratiques.

Le modèle électrique le plus utilisé pour représenter une cellule photovoltaïque est le modèle à une diode. Ce modèle assimile la cellule à une source de courant dépendante du rayonnement solaire, connectée en parallèle avec une diode, et accompagnée d'une résistance série (R_s) et d'une résistance parallèle (R_{sh}). Ces deux résistances permettent de prendre en compte

respectivement les pertes ohmiques et les courants de fuite. Pour une modélisation plus précise, notamment en basse irradiante, un modèle à deux diodes peut être utilisé.

Les paramètres du modèle sont généralement déterminés à partir des données constructrices (courant de court-circuit, tension à vide, point de puissance maximale) ou obtenus par des méthodes expérimentales ou d'identification numérique. Une bonne modélisation permet de tracer les courbes courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V), qui sont essentielles pour évaluer les performances d'un module photovoltaïque.

2.2.1. Modèle à une diode :

Une cellule photovoltaïque peut être assimilée au circuit électrique équivalent :

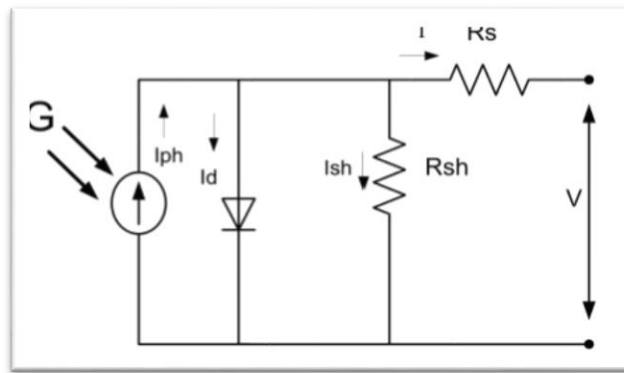


Figure (2.1) : Schéma équivalent du modèle à une diode d'une cellule photovoltaïque.[27]

En notant que : $I = I_{ph} - I_d - I_{sh}$ (II.1)

Avec : $I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{(V + I R_s)}{(n V_T)}\right) - 1 \right]$ (II.2)

$$I_{sh} = \frac{(V + I R_s)}{V_T} \quad (II.3)$$

$$I_0 = \frac{I_{cc}}{\left[\exp\left(\frac{V_{co}}{n V_T}\right) - 1 \right]} \quad (II.4)$$

$$I_{cc} = I_{CCR} \left(\frac{G}{1000} \right) \quad (II.5)$$

$$V_T = \frac{(k T)}{q} \quad (II.6)$$

Où :

I : Courant fourni par la cellule.

V : Tension aux bornes de la cellule.

I_d : Courant de diode.

I_{ph} : Photo-courant, dépendant de l'intensité de l'irradiation.

I_{sh} : Courant dérivé par la résistance parallèle.

I₀ : Courant de saturation de diode, dépendant de la température.

I_{cc} : Courant de court-circuit.

V_{co} : Tension de circuit ouvert.

V_T : Tension thermique.

I_{CCR} : Courant de court-circuit de référence.

R_{sh} : Résistance en parallèle, représentant l'admittance parallèle du générateur de courant.

R_s : Résistance en série, modélisant les pertes ohmiques du matériau et des contacts.

G : Irradiation solaire en W/m².

q : Charge d'électron 1,602.10-9 C.

k : Constante de Boltzmann 1,3854.10-23 J/K.

n : Facteur de non idéalité de la jonction comprise entre 1 et 5 dans la pratique.

T : Température effective de la cellule en kelvin.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + I R_s}{n V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (II.7)$$

La résistance parallèle (Rp) est très grande par rapport à la résistance série (Rs), Son effet est donc très faible de telle sorte que l'on peut la négliger.

2.2.2. Modèle à deux diodes :

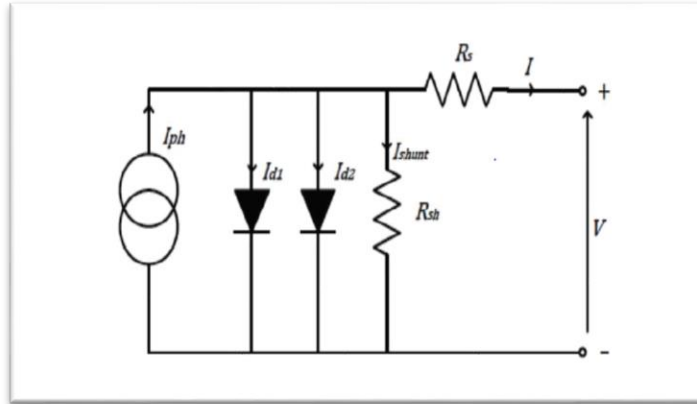


Figure (2.2) : Schéma équivalent du modèle à deux diodes d'une cellule photovoltaïque

La caractéristique courant-tension est donnée par l'expression suivante :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(\frac{q(V + I * R_s)}{(n1 * V_{T1})} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(q \frac{(V + I * R_s)}{(n2 * V_{T2})} \right) - 1 \right] - \frac{(V + I * R_s)}{R_{sh}} \quad (II.8)$$

Où l'expression mathématique du courant I_{ph}, le photo-courant, est la suivante :

$$I_{ph} = (I_{cc} + K_1 (T - T_{ref})) \cdot \left(\frac{G}{1000} \right) \quad (II.9)$$

K1: le coefficient de température de I_{cc} en (%/°C), donnée par la fiche technique du constructeur.

T_{ref}: la température de référence, donnée par la fiche technique du constructeur (Mesurée sous un ensoleillement de 1Kw/m²), en Kelvin (°K), généralement 298°K (25°C).

Et I_{s1,2} sont respectivement les courants de saturation de la diode 1 et la diode 2 et leur expression est comme suit :

$$I_{d1,2} = I_{rs1,2} \left(\left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 * \exp \left(\frac{qE_g}{(n_{1,2})} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right) \right) \quad (II.10)$$

E_g : Energie de gap (Silicium cristallin = 1,12 eV, Silicium amorphe = 1,7 eV, CIS =1,03 eV, CdTe =1,5 eV)

n_1 : le facteur de non idéalité de la jonction de la diode 1,

n_2 : le facteur de non idéalité de la jonction de la diode 2,

Et $I_{rs1, 2}$ sont les courants inverses de saturation :

$$I_{rs1,2} = \frac{I_{sc}}{\exp \left(\frac{\exp (V_{oc})}{(\rho * K N_s T_{ref} n_{1,2})} \right)} \quad (II.11)$$

2.3. Caractéristiques électriques d'une cellule PV :

2.3.1. Caractéristique (I-V) :

La courbe caractéristique d'une cellule photovoltaïque représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule photovoltaïque depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule).

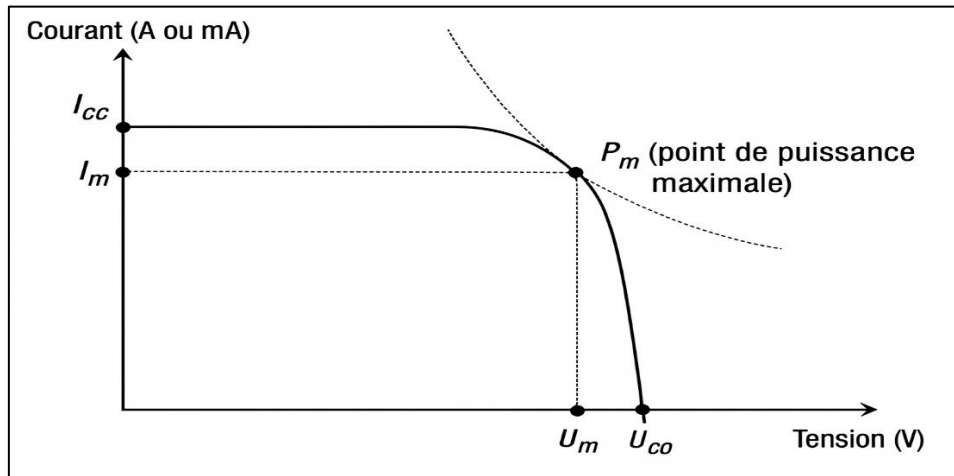


Figure (2.3) : Caractéristique courant-tension d'une cellule PV.[28]

À partir de la caractéristique sous éclairement de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule :

2.3.1.1. U_{co} : Tension de circuit ouvert :

Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur, elle peut générer à ses bornes une tension continue maximale, dite tension de circuit ouvert U_{co} ou tension à vide.

Cette tension est de l'ordre de 0,7 V pour une cellule élémentaire (elle varie avec la technologie et l'éclairage), (obtenue pour $I=0$).

2.3.1.2. I_{cc} : Courant de court-circuit :

À l'inverse du point de circuit ouvert, lorsqu'on place le photo-générateur en court-circuit, il débite son courant maximal, mais aucune tension. C'est le courant que l'on peut mesurer en branchement direct sur un ampèremètre. On appelle ce courant maximal à tension nulle courant de court-circuit. (Obtenu pour $V=0$).

2.3.1.3 P_m : Le point de fonctionnement optimal/point de puissance maximale :

L'utilisation optimale d'une photopile consiste à alimenter une charge sous la tension maximale et à un courant maximal. En effet, suivant la formule $P = UI$, pour que la puissance soit maximale : il faut être dans les conditions où le produit UI est maximal : c'est le point de charge idéal de la photopile, ou point de puissance maximale P_m . On a coutume d'appeler U_m et I_m la tension et le courant correspondant à ce point $P_m = U_m \cdot I_m$.

2.3.1.4. Puissance crête et rendement :

La puissance maximale est fonction de l'éclairage. Lorsqu'il s'agit de la puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement STC (1 000 W/m², 25 °C, spectre solaire AM 1,5, on parle alors de watts-crête (W_c) ou de puissance-crête.

2.3.1.5. Le rendement :

Le rendement d'une photo génératrice est le rapport entre la puissance électrique générée et la puissance lumineuse reçue par la photo génératrice.

$$\eta = \frac{P_m}{(E S)} \quad (II.12)$$

Où S est la surface de la photo génératrice.

On peut calculer ce rendement pour différents éclairagements, mais le plus Souvent, c'est dans les conditions STC qu'il est donné. On le calcule donc Avec la puissance crête :

$$\eta = \frac{P_c}{(1000 \cdot S)} \quad (II.13)$$

2.3.1.6. Le facteur de forme FF :

C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la Puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale) :

$$FF = \frac{(V_m \times I_m)}{(V_{co} \times I_{cc})} \quad (II.14)$$

2.3.1.7. Le facteur de qualité A :

Est le facteur d'idéalité de la cellule qui dépend des Mécanismes de recombinaison dans la zone de Charge d'espace (compris Entre 1 et 2).

2.4. Simulation d'une cellule PV :

Pour la simulation, nous avons utilisé le Matlab et les outils du Simulink. Les paramètres de la cellule PV sont donnés par le tableau suivant :

Modèle	TPS105-90W
La puissance maximale P max	90 W
Dimensions (mm)	1316*546*35
Courant au point maximal	5.06 A
La tension au point maximal	17.8 V
Le courant de court-circuit	5.35 A
La tension au circuit ouvert	22.2 V
Poids (Kg)	8.4 Kg

Tableau (2) : Paramètres de la cellule PV à 25°C et 1000 W/m².



Figure (2.4) : le panneau photovoltaïque.

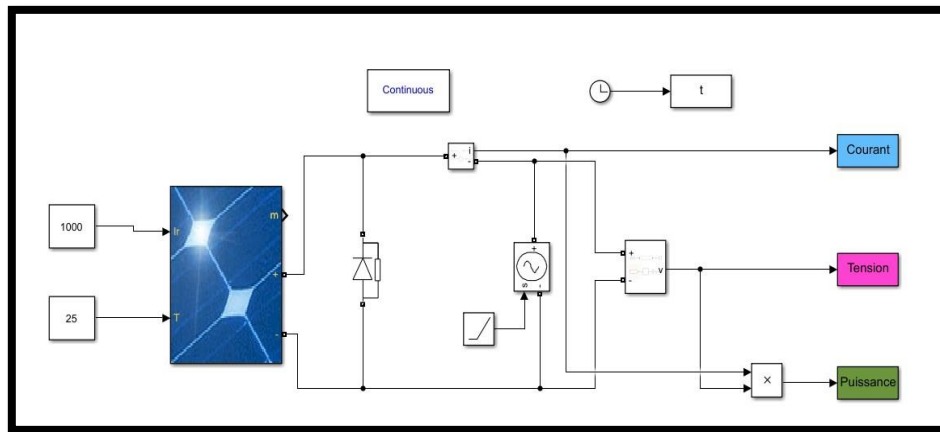


Figure (2.5) : Schéma d'un module PV sous Simulink.

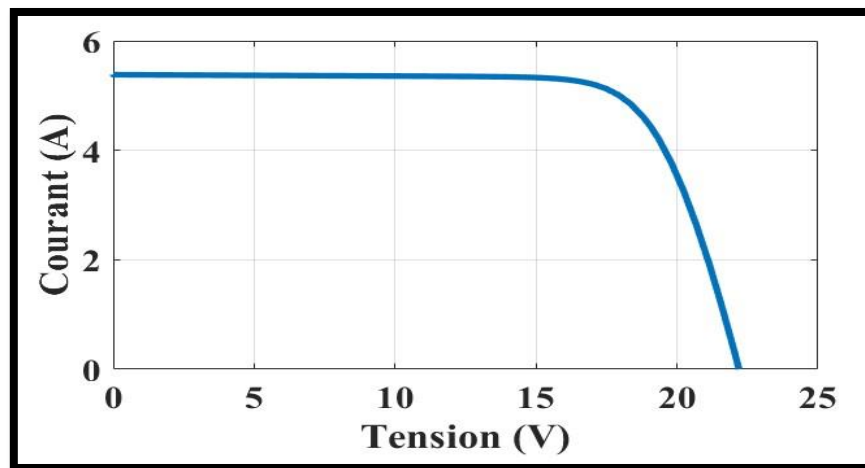


Figure (2.5.a) : Caractéristique I-V d'une cellule PV dans les conditions standards de fonctionnement.

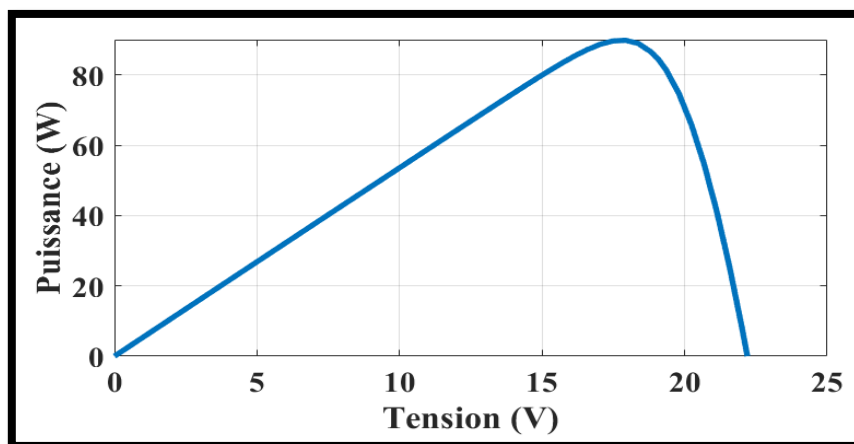


Figure (2.5.b) : Caractéristique (P-V) d'un module PV dans les conditions standards de fonctionnement.

2.5. Influence de l'éclairement :

En faisant varier l'éclairement entre 400 W/m^2 et 1000 W/m^2 avec un pas de 200 W/m^2 , les caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ sont respectivement données sur les figures II.6 (a, b).

A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement ; car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique [3].

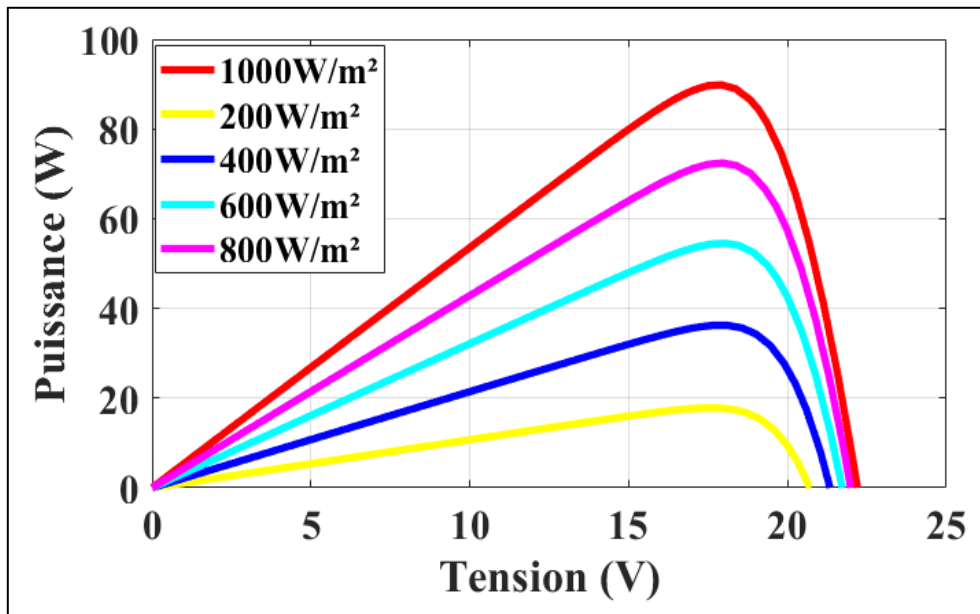


Figure (2.6.a) : caractéristique P-V d'une cellule PV sous différents Éclairagements.

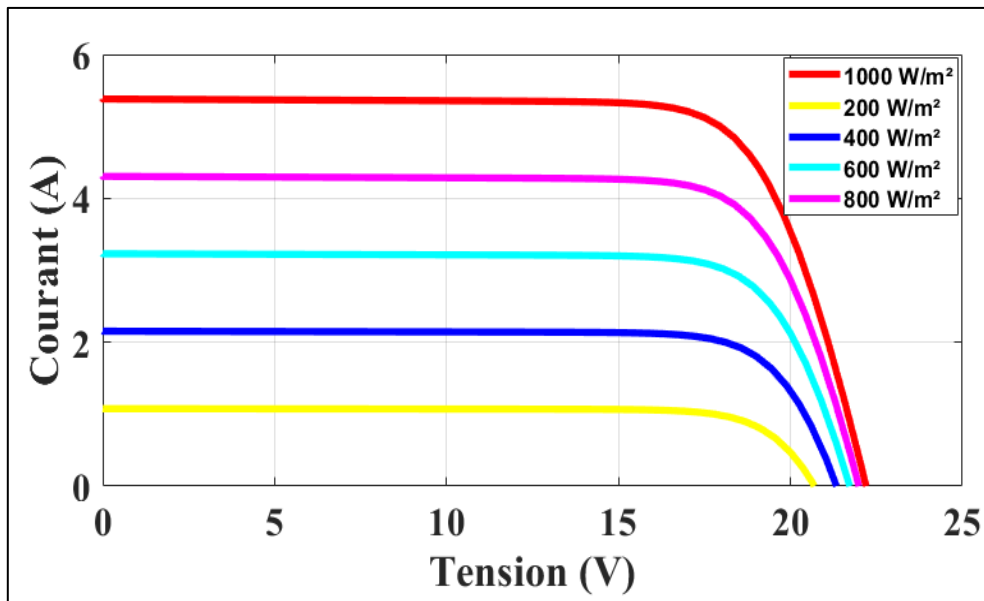


Figure (2.6.b) : caractéristique I-V d'une cellule PV sous différents éclairagements.

2.6. Influence de la température :

La température est le second paramètre le plus important dans le comportement de la photopile. La figure (2.7 (a,b)) illustre respectivement les caractéristiques (I-V) et (P-V) de la photopile simulée sous un éclairement de 1000W/m^2 et différentes températures. On remarque que le courant du court-circuit I_{sc} reste très peu sensible à la variation de la température mais la tension du circuit ouvert V_{oc} diminue en augmentant la température ce qui cause une diminution de la puissance à la sortie de la photopile.

Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte. [4]

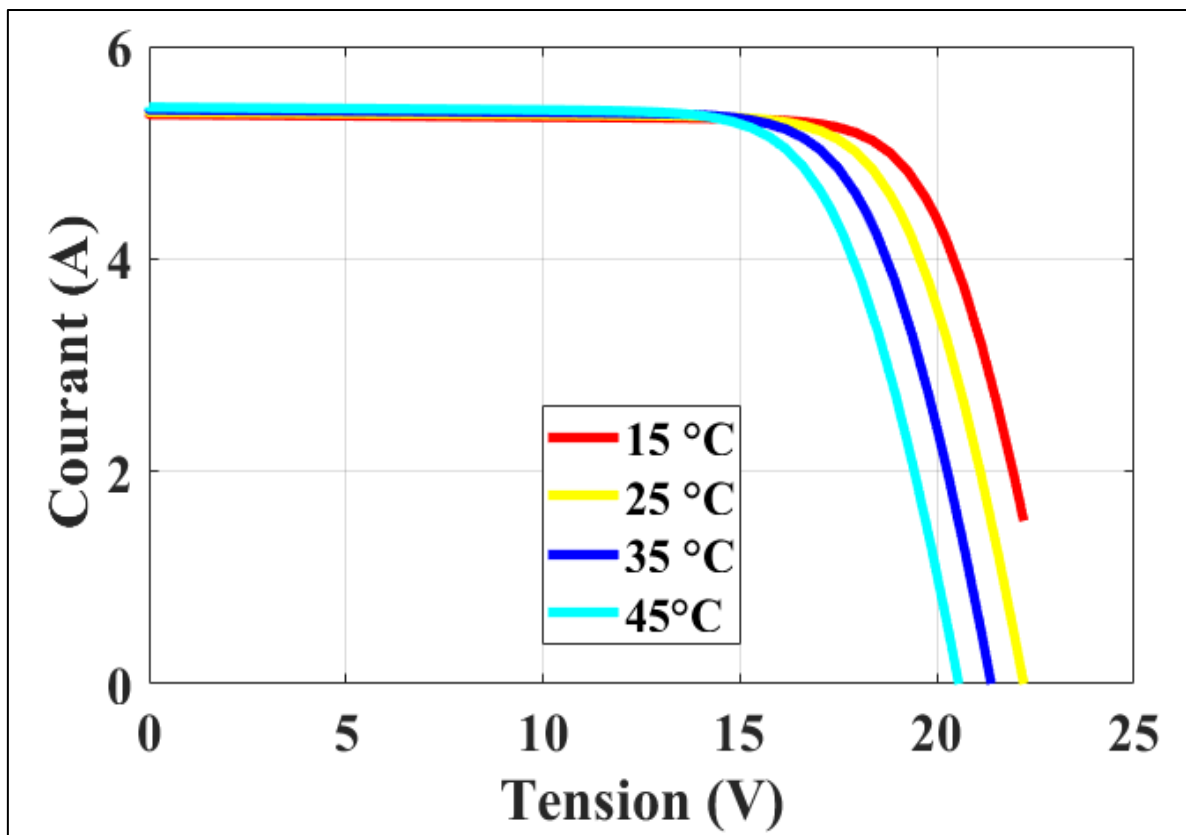


Figure (2.7.a) : Influence de la température sur la caractéristique (I-V).

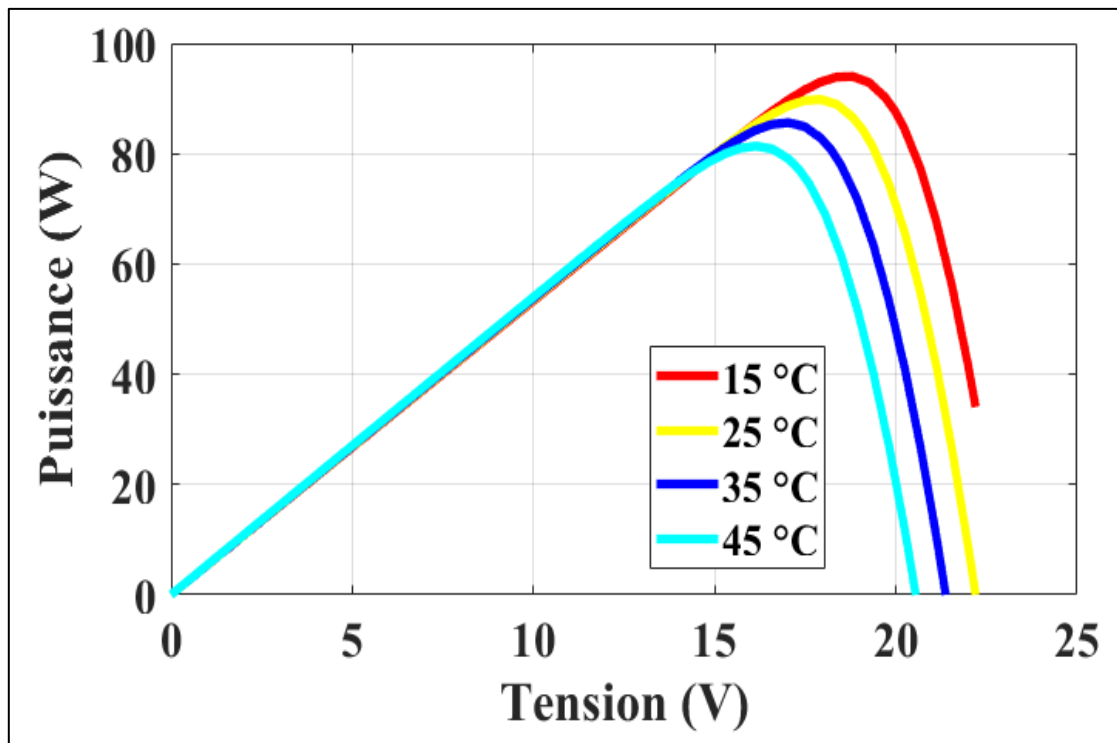


Figure (2.7.b): Influence de la température sur la caractéristique (P-V).

2.7. Module photovoltaïque :

Module photovoltaïque Également connu sous le nom de panneau photovoltaïque ou cellule photovoltaïque, est un dispositif technologique qui convertit l'énergie solaire en électricité. Voici une définition plus détaillée :

Un module photovoltaïque est généralement composé de :

- 80% de verre
- Un cadre en aluminium
- Des connexions en cuivre et/ou en argent
- Deux couches d'encapsulant
- Du plastique pour la membrane
- Et du silicium cristallin, qui est l'élément semi-conducteur essentiel pour transporter l'énergie photovoltaïque au sein du module.

Le processus de conversion de l'énergie solaire en électricité fonctionne comme suit :

1. Les cellules de silicium captent les rayons du soleil et les transforment en électricité sous forme de courant continu.
2. Comme les appareils électriques utilisent du courant alternatif, un onduleur solaire est ajouté pour transformer le courant continu en courant alternatif².

Les modules photovoltaïques sont une composante clé des systèmes solaires et peuvent avoir une durée de vie allant jusqu'à 40 ans, ce qui en fait un investissement durable et rentable pour la production d'énergie verte.



Figure (2.8): Module photovoltaïque.

- a. Raccordement en série : même que celui des cellules.
- b. Raccordement en parallèle : même que celui des cellules.
- c. Raccordement mixte : c'est le branchement qui s'impose lorsque l'on a besoin d'une certaine puissance à une tension voulue, les règles du montage en série et celles du montage en parallèle s'appliquent dans le cas du montage mixte. [5]

2.8. Panneau photovoltaïque :

Un panneau solaire se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise.



Figure (2.9) : Panneau PV. [29]

2.9. Associations des modules en série :

C'est une méthode de connexion des modules photovoltaïques où la borne positive d'un module est reliée à la borne négative du module suivant. Cette configuration permet d'additionner les tensions de chaque module, tandis que le courant reste identique à celui d'un seul module. Elle est utilisée lorsqu'une tension plus élevée est nécessaire.

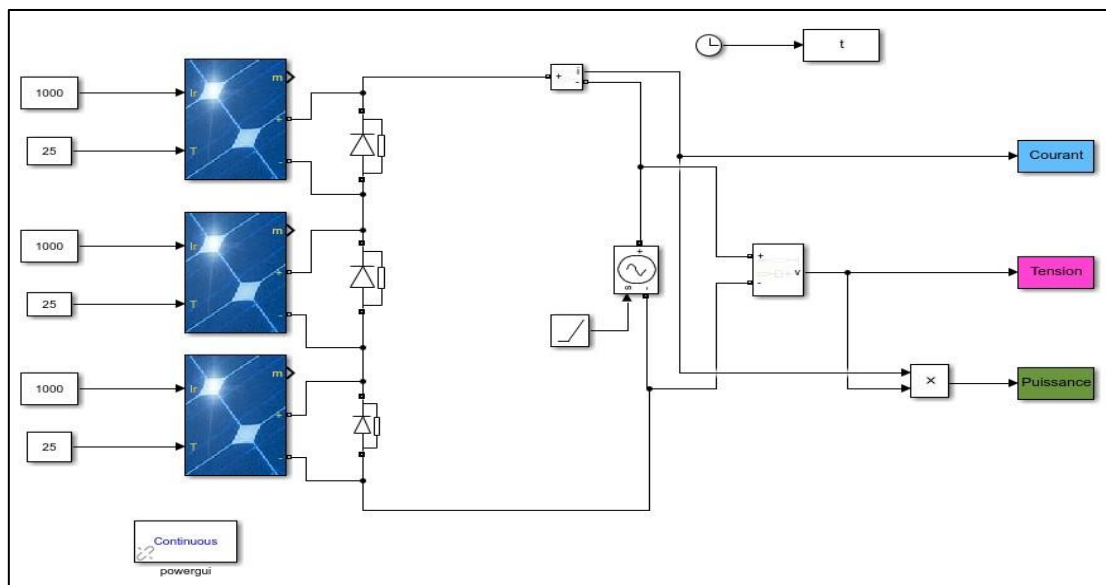


Figure (2.10) : Schéma de 3 modules PV en série sous Simulink.

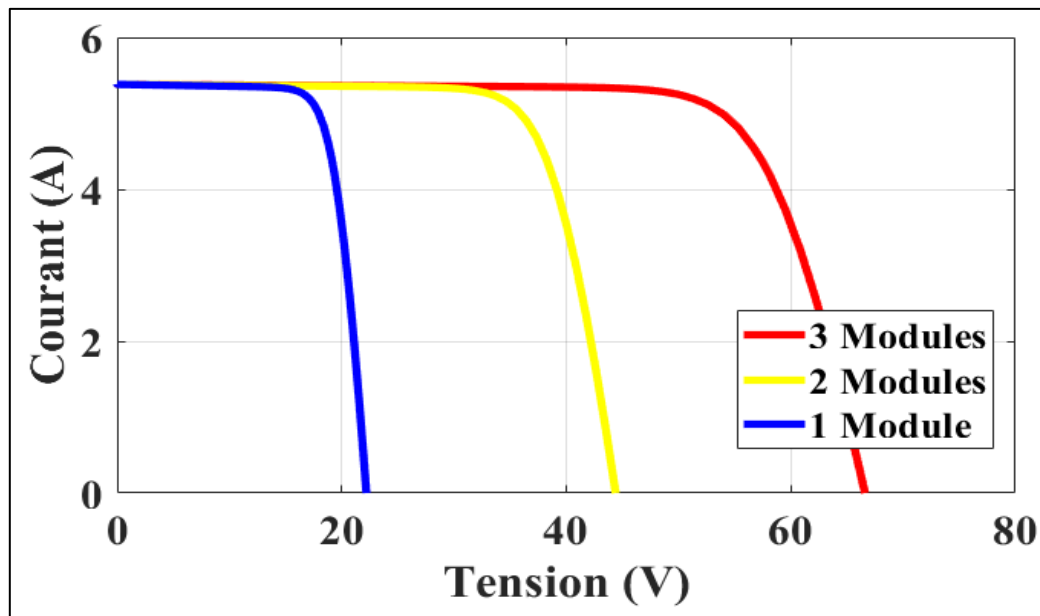


Figure (2.11): Caractéristique (I-V) résultante d'un groupement de 3 modules en série.

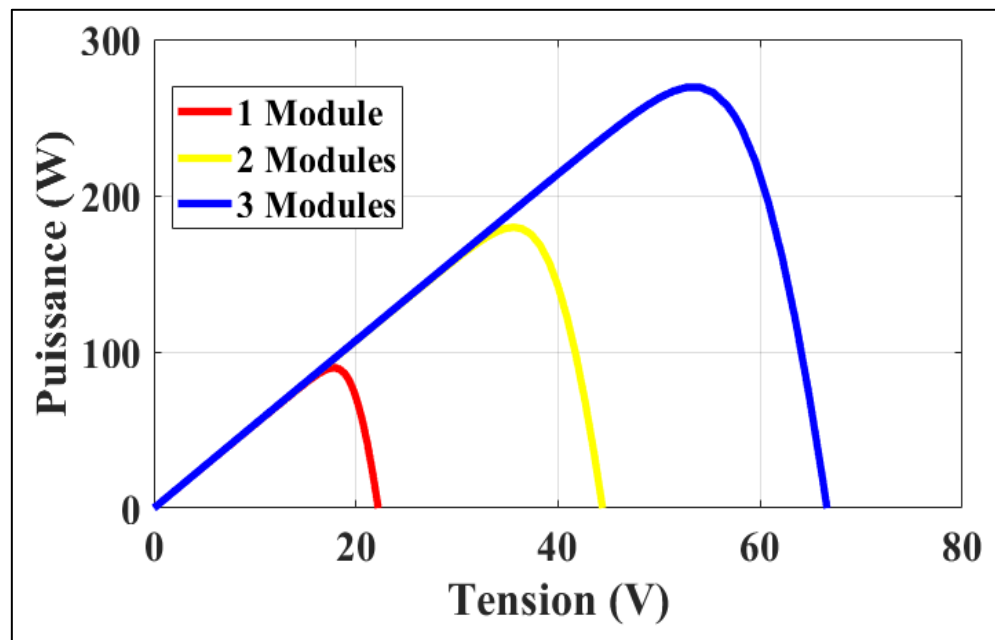


Figure (2.12) : Caractéristique (P-V) résultante d'un groupement de 3 modules en série.

Dans un assemblage de n cellules connectées en série, la caractéristique globale du groupement s'obtient par l'addition des tensions individuelles de chaque cellule, tandis que le courant traversant l'ensemble reste identique à celui circulant dans une seule cellule.

2.10. Association des modules en parallèle :

L'association en parallèle des modules photovoltaïques consiste à connecter ensemble les bornes positives entre elles et les bornes négatives entre elles. Cette configuration permet d'additionner les courants de chaque module, tandis que la tension reste égale à celle d'un seul module. Elle est utilisée lorsque l'on souhaite augmenter l'intensité du courant disponible pour alimenter des charges ou charger des batteries à faible tension.

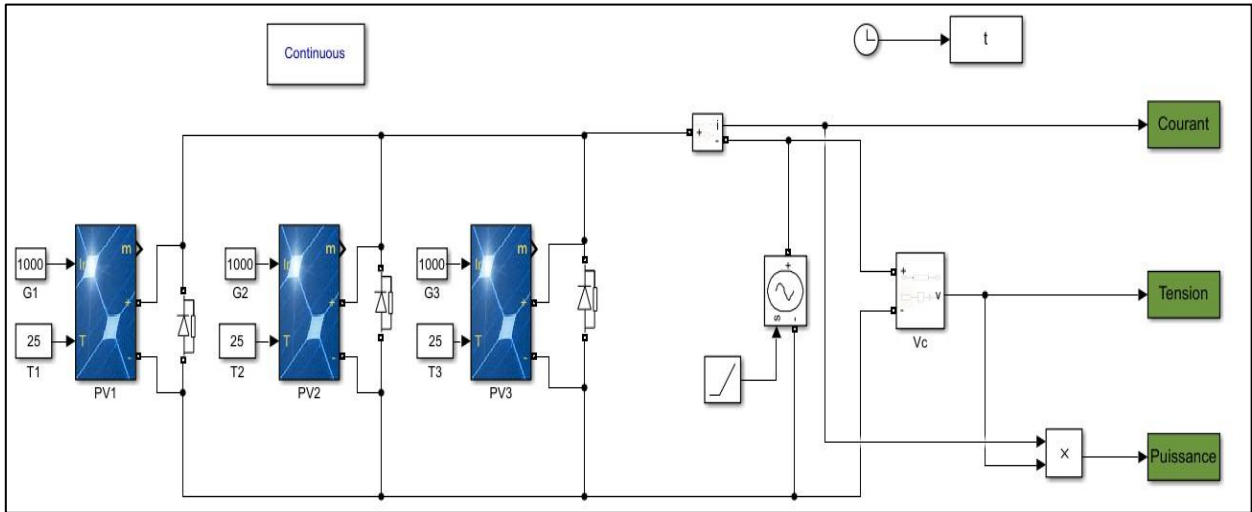


Figure (2.13) : Schéma de 3 modules PV en parallèle sous Simulink.

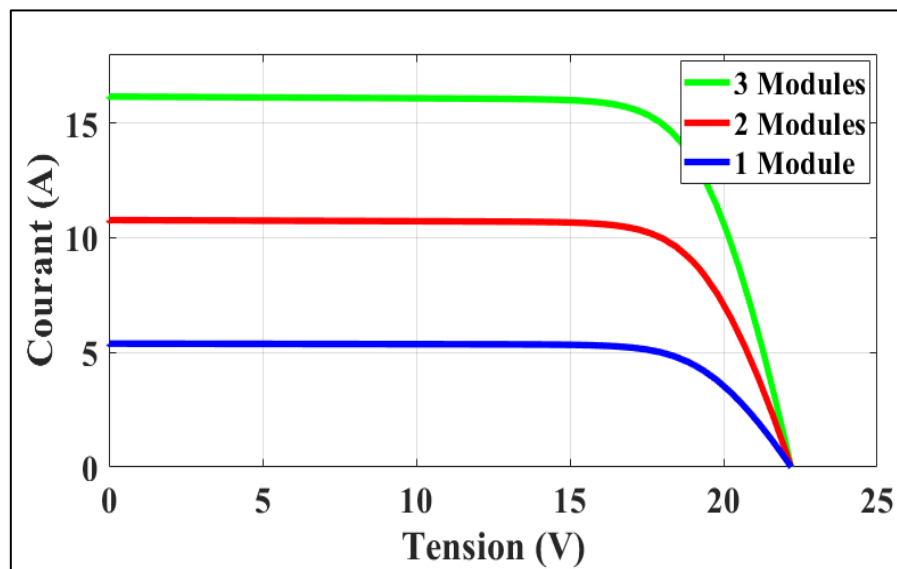


Figure (2.14) : Caractéristique (I-V) résultante d'un groupement de 3 Module en parallèle.

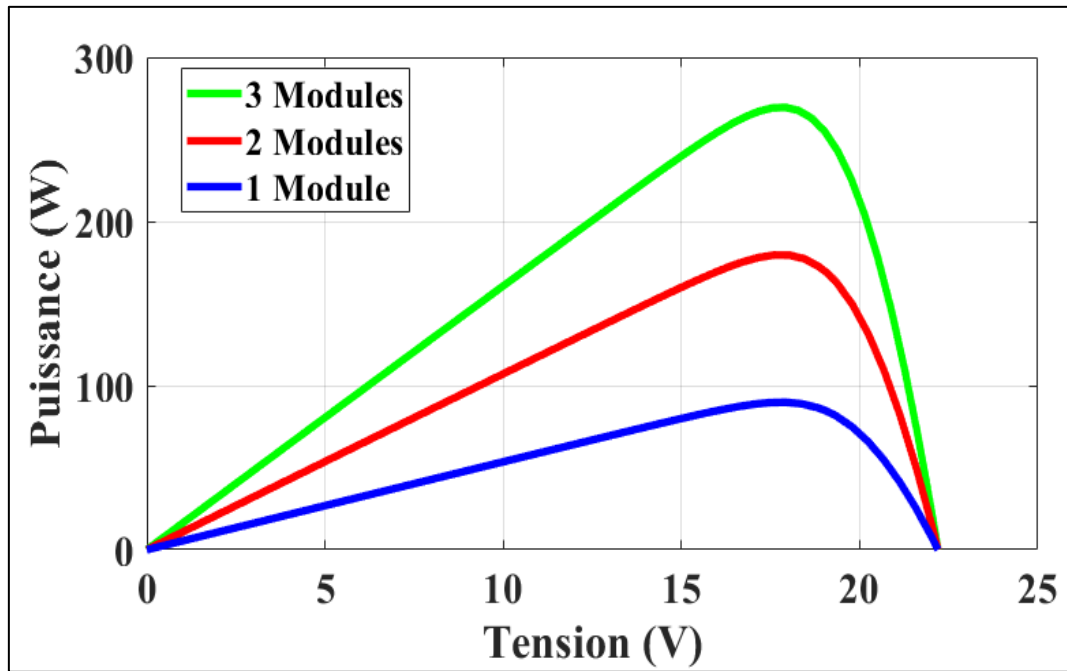


Figure (2.15) : Caractéristique (P-V) résultante d'un groupement de 3 Module en parallèle.

Lorsqu'un groupement de n cellules est connecté en parallèle, chaque cellule est soumise à la même tension, et la caractéristique globale du groupement s'obtient par la somme des courants délivrés par chaque cellule.

2.11. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié la production d'énergie électrique à partir d'un générateur photovoltaïque en nous intéressant particulièrement à la modélisation d'une cellule photovoltaïque à travers son schéma équivalent.

L'analyse des différents paramètres du circuit équivalent nous a permis de tracer la caractéristique courant-tension $I = f(V)$ et de mieux comprendre le comportement de la cellule en fonction des conditions environnementales et des propriétés internes du système.

Il a été constaté que les performances d'un générateur photovoltaïque sont fortement influencées par des facteurs externes tels que l'éclairement et la température, ainsi que par des paramètres internes comme la résistance série et la résistance parallèle.

Le dimensionnement et la modélisation d'une cellule photovoltaïque représentent des étapes fondamentales pour le développement de systèmes solaires efficaces. À travers cette étude,

nous avons mis en évidence l'importance des paramètres physiques et environnementaux sur le rendement d'une cellule PV.

L'utilisation d'un logiciel de simulation tel que PSIM nous a permis d'élaborer un modèle basé sur les données nominales du fabricant, notamment la tension à vide et le courant de court-circuit, afin de simuler le comportement de la cellule sous différentes conditions d'irradiation et de température.

Ce modèle constitue un outil essentiel pour optimiser la conception des panneaux solaires et assurer un fonctionnement au point de puissance maximale (MPP). De plus, la modélisation nous a aidés à mieux cerner l'influence des éléments du modèle électrique, tels que la résistance série, la résistance shunt et le courant de saturation de la diode, sur les performances globales de la cellule.

En conclusion, une modélisation précise et rigoureuse des cellules photovoltaïques s'avère indispensable pour améliorer l'efficacité des systèmes solaires et promouvoir des solutions énergétiques renouvelables durables et économiquement viables.

Chapitre 03 :
Modélisation des
Différentes techniques
De reconfiguration

3.1. Introduction :

L'ombrage partiel est la principale cause des pertes de désaccord qui peuvent réduire considérablement le rendement énergétique des systèmes photovoltaïques (PV). L'ombrage partiel peut être causé par des nuages, des arbres, des bâtiments voisins, des cheminées, de la neige, de la poussière, de la saleté, des excréments d'oiseaux. La présence d'ombre sur les panneaux photovoltaïques crée des masques qui bloquent tout ou partie du rayonnement direct du soleil, entraînant ainsi une perte d'énergie reçue par les cellules. De plus, lorsqu'une cellule solaire est ombragée, elle devient équivalente à une résistance qui consomme l'énergie générée par ses cellules voisines. L'énergie absorbée est convertie en chaleur, ce qui augmente la température de la cellule et l'endommagement. Ceci est connu sous le nom d'effet de point chaud et heureusement, ce problème peut être résolu en utilisant des diodes de contournement. De même, l'ombrage partiel d'un seul module dans une série de modules limitera la puissance de l'ensemble du parc photovoltaïque. L'effet de l'ombrage a été largement étudié en ce qui concerne les performances des modules photovoltaïques. [30]

Les pertes associées à l'effet d'ombrage peuvent être réduites en utilisant plusieurs approches : des techniques de suivi du point de puissance maximum (MPPT) qui permettent l'extraction du point de puissance maximum global, des architectures de systèmes, des topologies de convertisseur et des configurations de panneaux photovoltaïques (PV).[31] La configuration de panneaux PV est l'une des solutions qui peut réduire de manière significative les pertes de désaccord. Elle est basée sur les interconnexions de panneaux PV qui sont des configurations en série-parallèle (SP), Total-Cross-Tied (TCT), Bridge-Linked (BL) et Honey-Comb (HC).

Plusieurs chercheurs ont proposé des modèles pour étudier et analyser l'effet de l'ombrage sur différentes configurations de panneaux photovoltaïques (PV) afin de réduire les pertes de désaccord et de trouver la meilleure configuration de panneau PV qui offre les meilleures performances.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons particulièrement à l'effet de l'ombrage partiel sur la production énergétique des PV des différentes configurations citées au-dessus.

L'objectif est de pouvoir sélectionner la configuration la plus appropriée du champ photovoltaïque qui fournit les meilleures performances à savoir celle qui présente les pertes les plus faibles sous les mêmes conditions d'ombrage partiel.

CHAPITRE 03 Modélisation des différentes techniques de reconfiguration

3.2. Description des différents modèles d'ombrage :

Dans ce chapitre, nous présentons une modélisation détaillée et une simulation des différentes topologies de panneaux photovoltaïques pour l'évaluation de leurs performances sous l'effet d'un défaut d'ombrage partiel. Les interconnexions considérées sont : Série-Parallèle (SP), Total-Cross-Tied (TCT), Bridge-Linked (BL) et Honey-Comb (HC). En simulant un réseau PV 6×6 L'analyse des performances des topologies de générateurs photovoltaïques sont examinées sous différents scénarios d'ombrage (6 cas) :

11	12	13	14	15	16
21	22	23	24	25	26
31	32	33	34	35	36
41	42	43	44	45	46
51	52	53	54	55	56
61	62	63	64	65	66

Cas 01

11	12	13	14	15	16
21	22	23	24	25	26
31	32	33	34	35	36
41	42	43	44	45	46
51	52	53	54	55	56
61	62	63	64	65	66

Cas 02

11	12	13	14	15	16
21	22	23	24	25	26
31	32	33	34	35	36
41	42	43	44	45	46
51	52	53	54	55	56
61	62	63	64	65	66

Cas 03

11	12	13	14	15	16
21	22	23	24	25	26
31	32	33	34	35	36
41	42	43	44	45	46
51	52	53	54	55	56
61	62	63	64	65	66

Cas 04

11	12	13	14	15	16
21	22	23	24	25	26
31	32	33	34	35	36
41	42	43	44	45	46
51	52	53	54	55	56
61	62	63	64	65	66

Cas 05

11	12	13	14	15	16
21	22	23	24	25	26
31	32	33	34	35	36
41	42	43	44	45	46
51	52	53	54	55	56
61	62	63	64	65	66

Cas 06

Pour chaque scénario d'ombrage, les niveaux d'irradiation solaire sont classés :

Blanc : **1000** W/m²

Gris : **200** W/m²

CHAPITRE 03 Modélisation des différentes techniques de reconfiguration

Les caractéristiques de sortie simulées des topologies de panneaux photovoltaïques sous chaque motif d'ombrage sont présentées.

3.3. Modélisation et présentation des différentes configurations PV :

Dans cette partie on s'est intéressé à faire une étude comparative entre les différentes topologies de connexion des Panneaux photovoltaïques. Les simulations ont été effectuées sous Matlab/Simulink en utilisant un générateur photovoltaïque (6×6).

3.3.1. Configuration Série-Parallèle (SP) :

Dans la topologie série-parallèle, tous les modules sont connectés en série pour former des chaînes afin de générer une tension de sortie souhaitée puis ces chaînes sont connectées en parallèle pour générer le courant de sortie désiré. Cette topologie est généralement la plus couramment utilisée parce qu'elle est facile à concevoir, économique et qu'il n'y a pas de connexions redondantes. Le modèle construit sous MATLAB/Simulink est illustré sur la Figure (3.2). Le circuit comporte six strings (branches) en parallèles, chacun contient six modules connectés en série. Le courant est la somme des six courants et la tension est égale à la somme des tensions des modules.

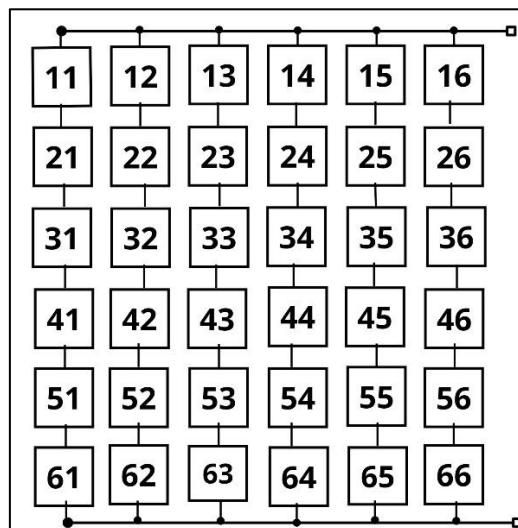


Figure (3.1) : Configuration (SP).

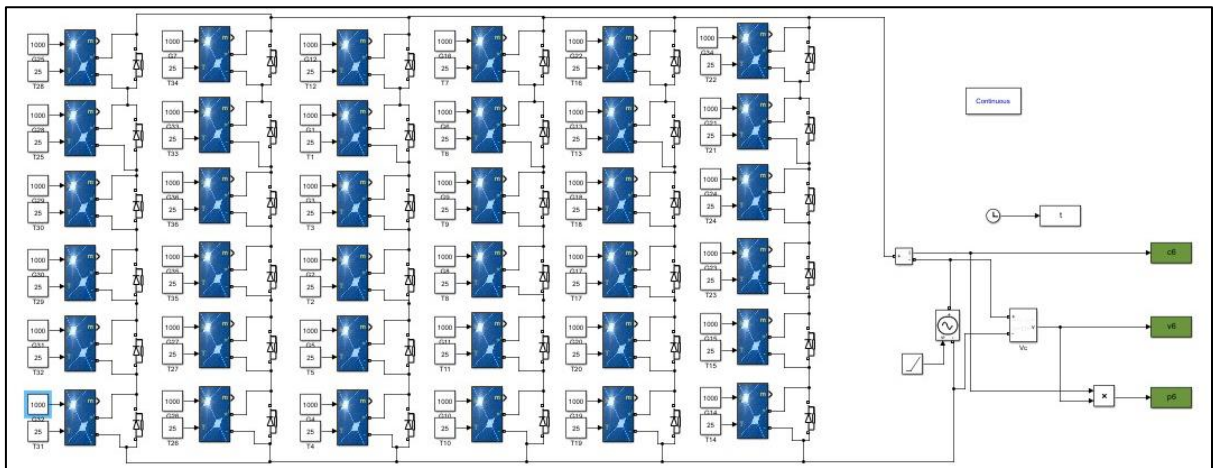


Figure (3.2) : Configuration (SP) sous Simulink.

- Résultat (SP) : les caractéristiques électriques sous les différents scénarios d'ombrage :

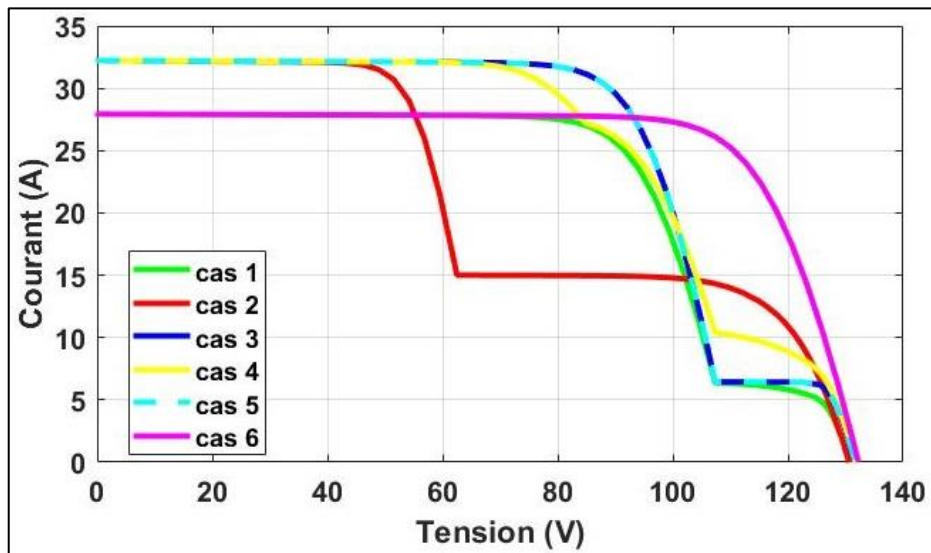


Figure (3.3) : Caractéristique (I-V) pour (SP).

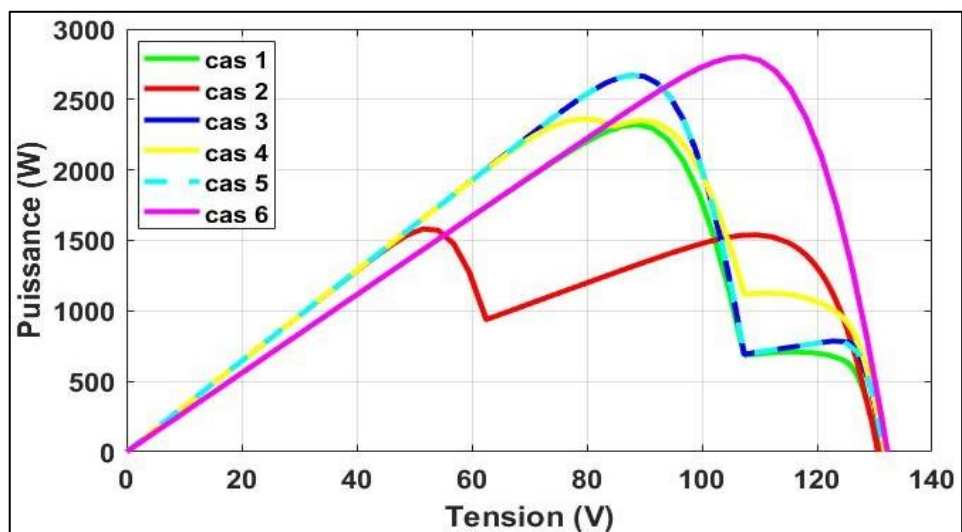


Figure (3.4) : Caractéristique (P-V) pour (SP).

3.3.2. Configuration Bridge-Linked (BL) :

Dans cette configuration, les modules photovoltaïques sont organisés en chaînes de connexion de type série, mais reliés entre eux par des ponts électriques (souvent assurés par des diodes de liaison). Ces interconnexions additionnelles permettent de redistribuer le courant au sein de la matrice, de manière à ce que la diminution de performance d'un module ou d'une sous-chaîne n'entraîne pas une dégradation significative de la puissance de l'ensemble du champ.

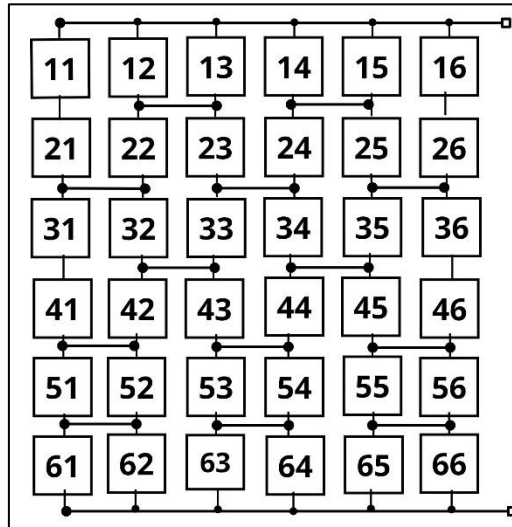


Figure (3.5) : Configuration (BL).

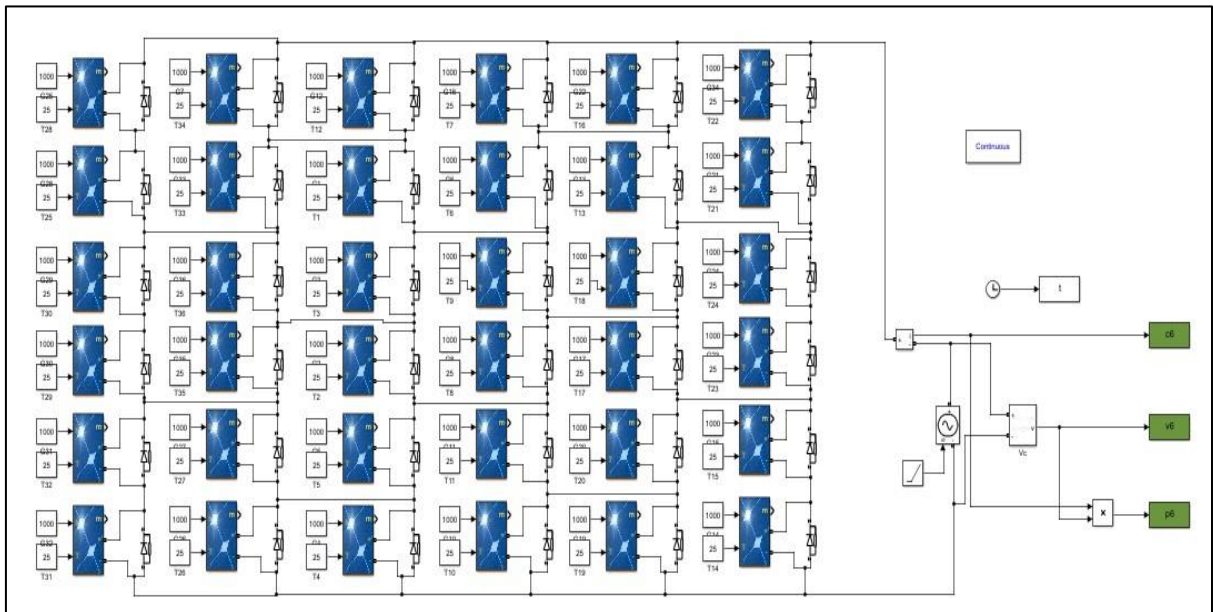


Figure (3.6) : Configuration (BL) sous Simulink.

CHAPITRE 03 Modélisation des différentes techniques de reconfiguration

- Résultat (BL) : les caractéristiques électriques sous les différents scenarios d'ombrage :

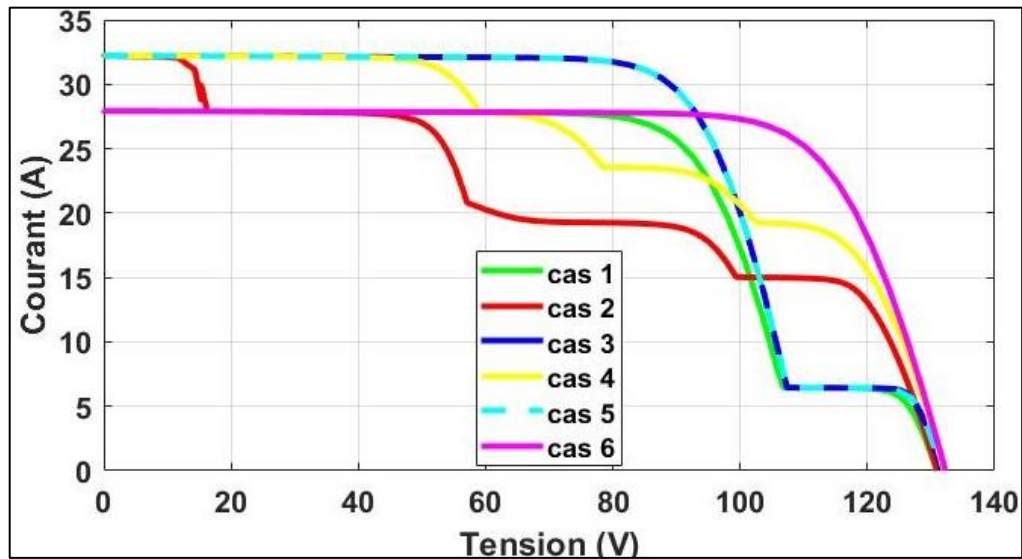


Figure (3.7) : Caractéristique (I-V) pour (BL).

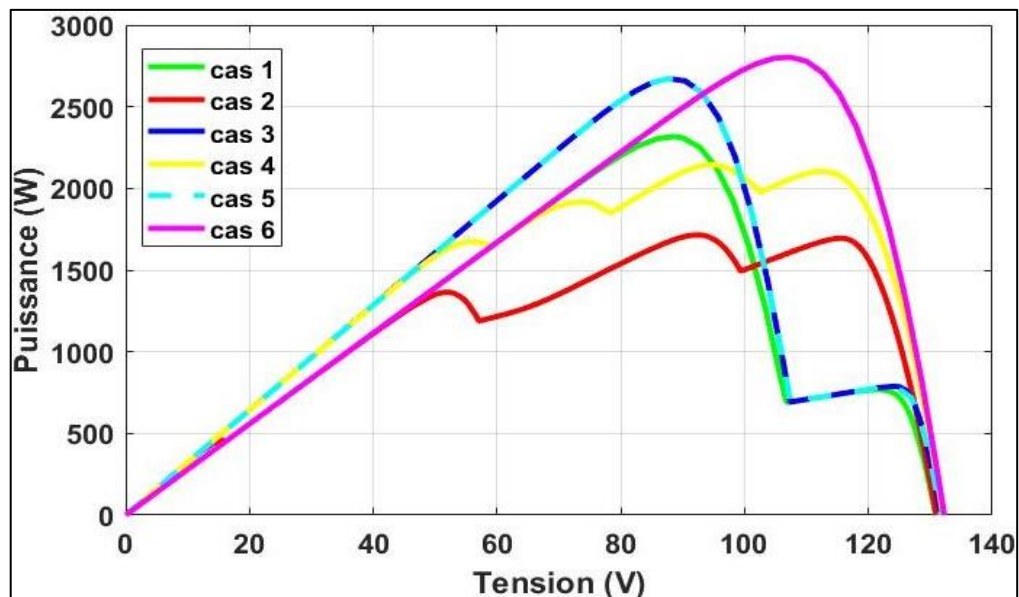


Figure (3.8) : Caractéristique (P-V) pour (BL).

3.3.3. Configuration Total-Cross-Tied (TCT) :

Cette topologie peut résoudre les inconvénients de la topologie (SP). Dans ce cas les modules sont connectés en parallèle sous forme de ligne, puis les lignes sont connectées en série. Le modèle MATLAB/Simulink de la topologie du générateur PV 6×6 (TCT) est représenté sur la Figure (3.10). Dans cette topologie, la tension aux bornes de chaque ligne est

CHAPITRE 03 Modélisation des différentes techniques de reconfiguration

égale à la tension du circuit ouvert d'un seul module, la tension de sortie souhaitée est égale à la somme des tensions sur toutes les lignes. Le courant total est la somme des courants générés par tous les modules. Étant donné que la topologie du générateur PV (TCT) a un nombre plus élevé de connexions électriques par rapport à d'autres topologies ; l'architecture de cette topologie est complexe, les pertes de puissance dues aux connexions de câblage sont élevées et le coût du câblage électrique est aussi considérablement élevé.

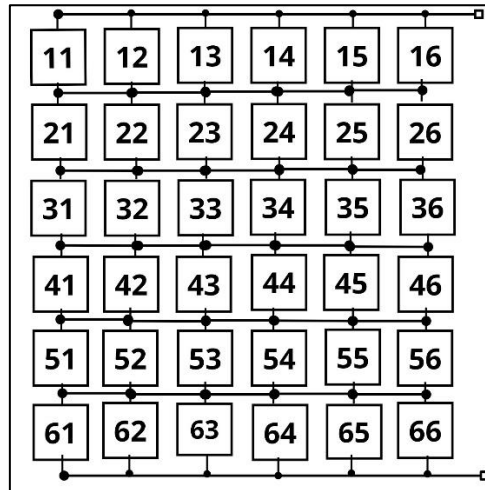


Figure (3.9) : Configuration (TCT).

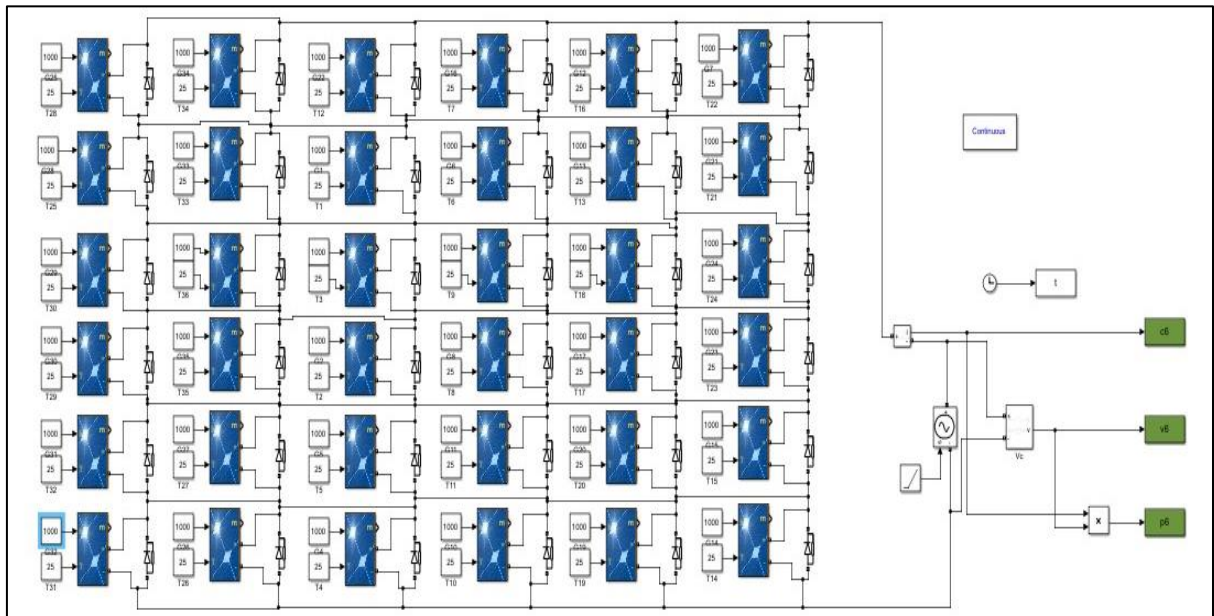


Figure (3.10) : Configuration (TCT) sous Simulink.

- Résultat (TCT) : les caractéristiques électriques sous les différents scenarios d'ombrage :

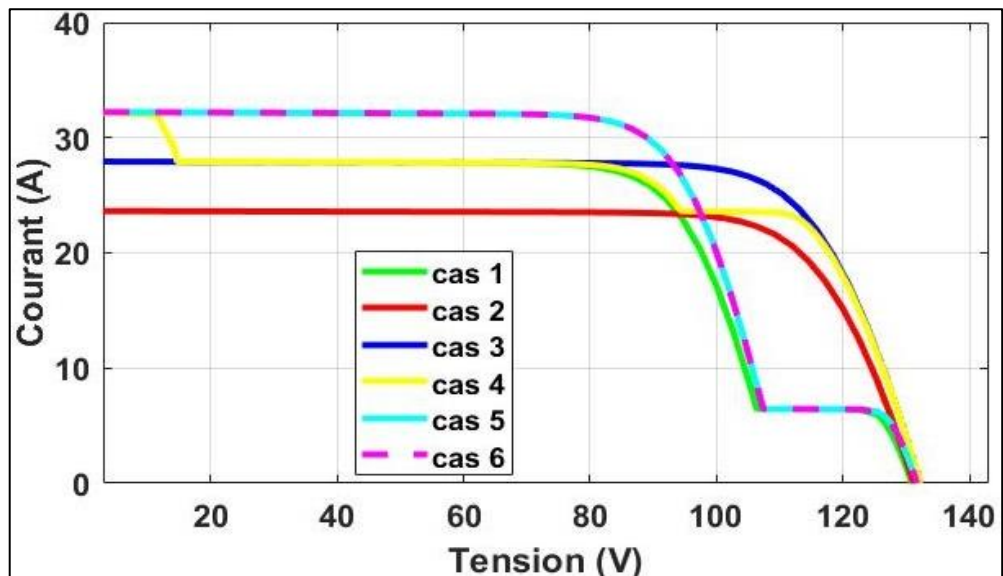


Figure (3.11) : Caractéristique (I-V) pour (TCT).

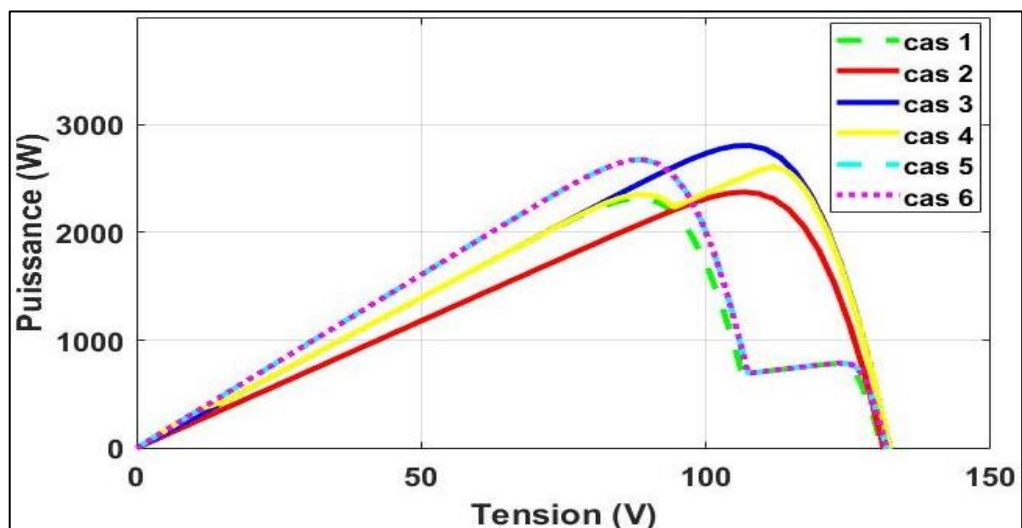


Figure (3.12) : Caractéristique (P-V) pour (TCT).

3.3.4. Configuration Honey-Comb (HC) :

Les inconvénients de la topologie des générateurs photovoltaïques (SP) peuvent également être surmontés en utilisant la topologie de générateur photovoltaïque (HC). Le modèle MATLAB/Simulink de topologie de générateur PV 6×6 (HC) est illustré sur la Figure (3.14). Dans cette topologie, les modules sont interconnectés de la même manière qu'une forme hexagonale en nid d'abeille. La topologie du générateur photovoltaïque (HC) a un plus grand nombre de connexions en série par rapport aux topologies (TCT) et (BL), et

CHAPITRE 03 Modélisation des différentes techniques de reconfiguration

ayant moins de connexions par rapport aux topologies de réseau (SP). Donc, les pertes de puissance sont plus importantes.

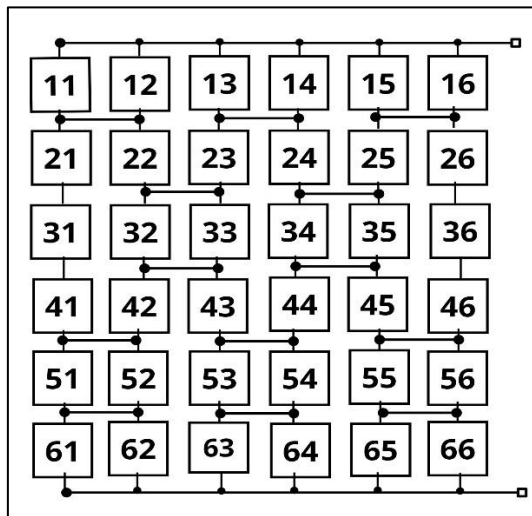


Figure (3.13) : Configuration (HC).

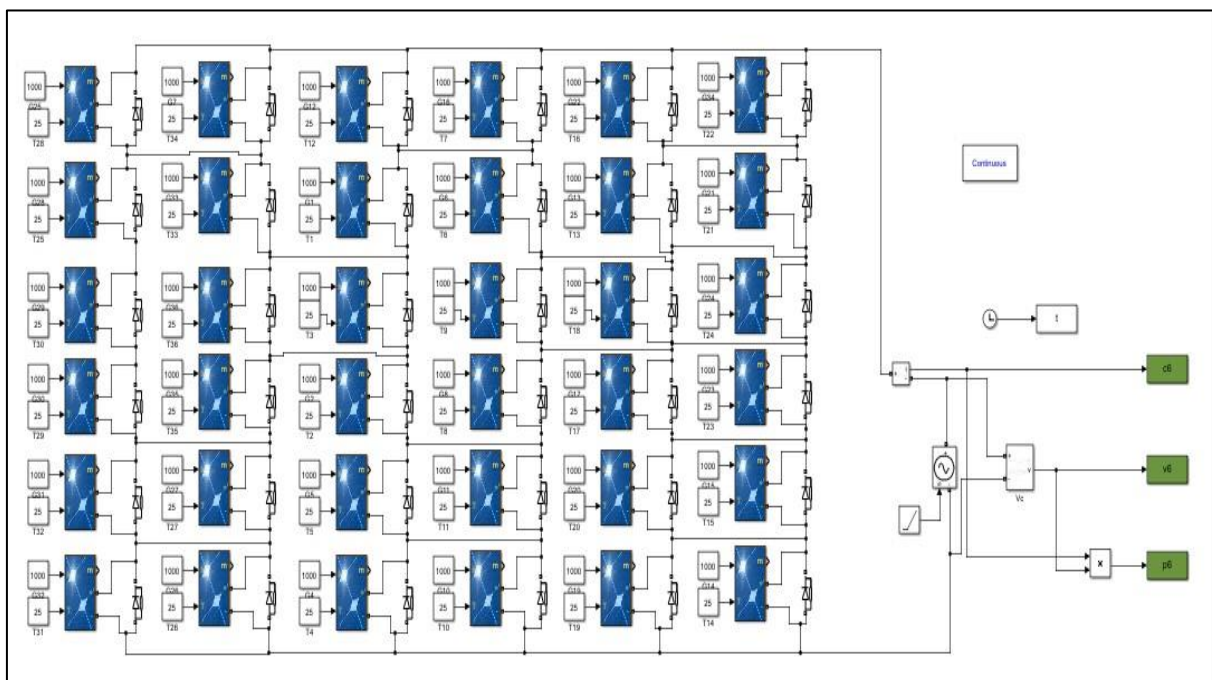


Figure (3.14) : Configuration (HC) sous Simulink.

- Résultat (HC) : les caractéristiques électriques sous les différents scenarios d'ombrage :

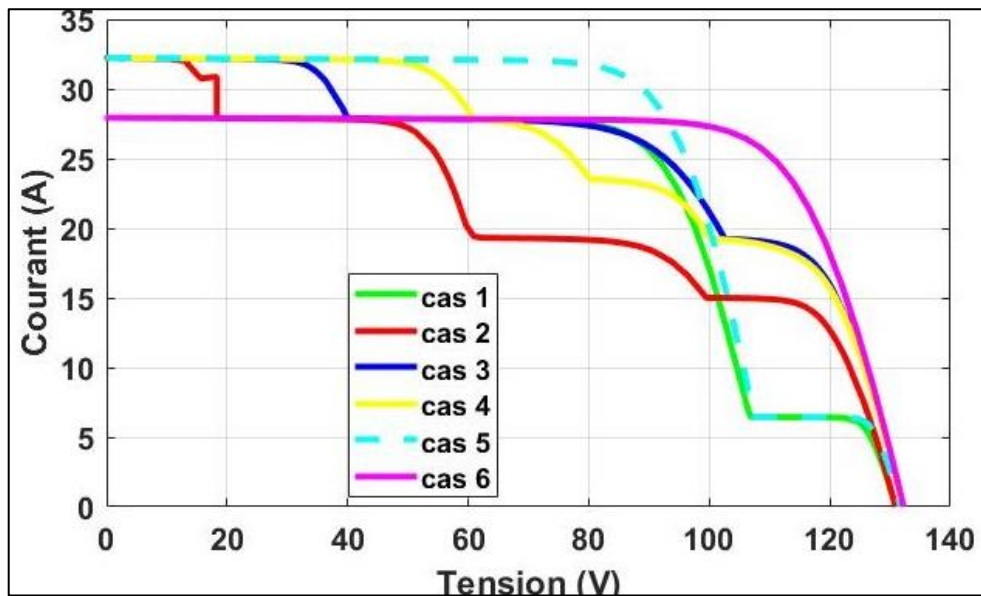


Figure (3.15) : Caractéristique (I-V) pour (HC).

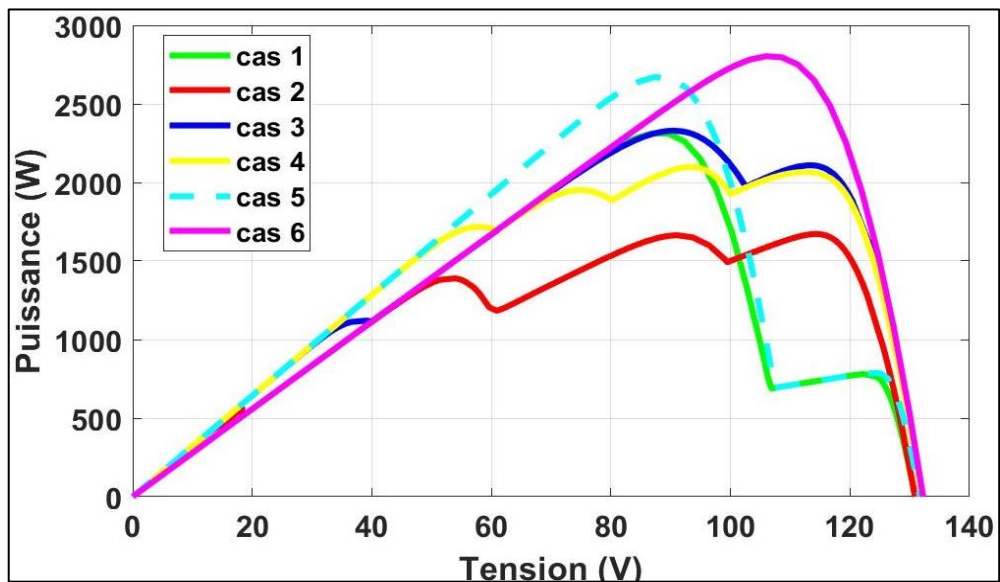


Figure (3.16) : Caractéristique (P-V) pour (HC).

3.4. Évaluation des performances des topologies de générateurs photovoltaïques sous PSC :

Le tableau (3.1) présente les résultats de simulation obtenus pour les différentes topologies de connexion des Panneaux photovoltaïques (Série-Parallèle, Total-Cross-Tied, Bridge-Linked et Honey-Comb) sous divers cas d'ombrage. Les valeurs du point de puissance maximale (P_{max}), de la tension correspondante (V_{max}) et du courant (I_{max}) sont comparées afin d'évaluer l'influence de chaque topologie sur les performances globales du générateur.

CHAPITRE 03 Modélisation des différentes techniques de reconfiguration

	Configuration	P_{\max} (W)	V_{\max} (V)	I_{\max} (A)
Cas 1	SP	2322	88.78	26.15
	TCT	2314	89.08	25.97
	BL	2317	88.15	26.28
	HC	2316	88.08	26.29
Cas 2	SP	1585	52.07	30.43
	TCT	2371	107.4	22.07
	BL	1715	92.32	18.57
	HC	1672	114	14.66
Cas 3	SP	2672	87.68	30.47
	TCT	2801	108	25.93
	BL	2673	88.54	30.18
	HC	2329	90.73	25.67
Cas 4	SP	2362	78.98	29.90
	TCT	2602	111.6	23.31
	BL	2145	94.70	22.65
	HC	2099	93.14	22.54
Cas 5	SP	2672	87.49	30.54
	TCT	2673	88.02	30.36
	BL	2673	87.83	30.43
	HC	2673	88.39	30.24
Cas 6	SP	2803	107.07	26.02
	TCT	2804	107.4	26.10
	BL	2804	107.4	26.10
	HC	2801	105.5	26.54

Tableau (3.1) : Performances comparatives des différentes configurations photovoltaïques (SP, TCT, BL et HC) sous différents cas d'ombrage.

a) Configuration (SP) :

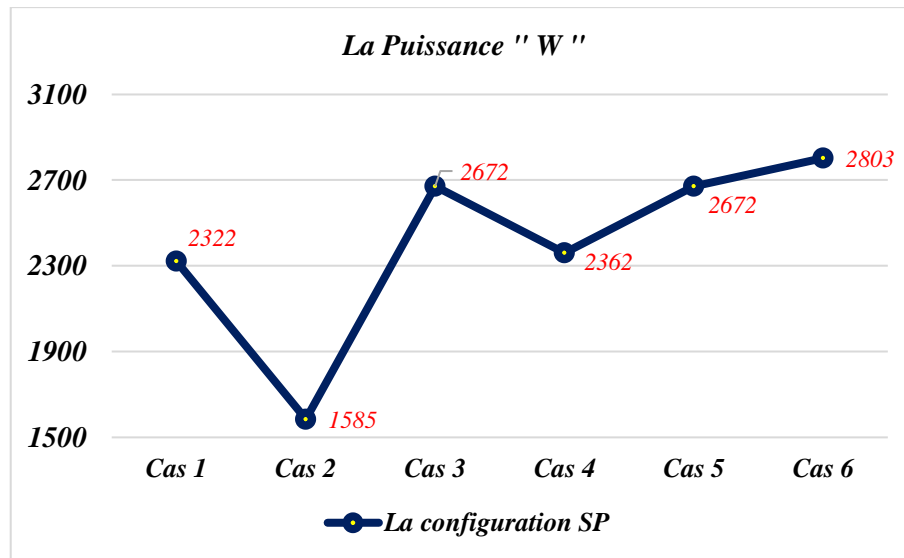


Figure (3.17) : Evolution de la puissance maximale pour la configuration (SP) selon différents cas d'ombrage.

Cette structure se montre très sensible aux effets de l'ombrage partiel. La puissance chute considérablement au Cas 2 (1585 W), traduisant l'influence directe du module le moins performant sur l'ensemble de la chaîne. Bien que la puissance maximale atteigne (2803 W) au Cas 6, cette configuration reste la moins robuste face aux désadaptations.

b) La configuration (TCT) :

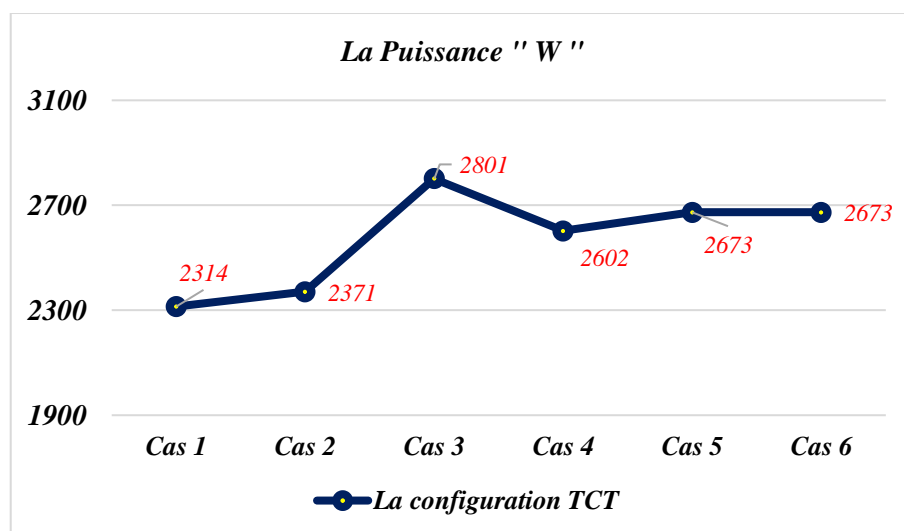


Figure (3.18) : Evolution de la puissance maximale pour la configuration (TCT) selon différents cas d'ombrage.

CHAPITRE 03 Modélisation des différentes techniques de reconfiguration

La TCT présente la meilleure stabilité et la plus grande régularité. Les variations de puissance entre les différents cas sont limitées, avec une valeur maximale de (2801 W) au Cas 3. Cette performance s'explique par les interconnexions transversales, qui permettent une répartition homogène du courant. La TCT apparaît ainsi comme la configuration la plus fiable et la plus adaptée aux conditions d'irradiation hétérogènes.

c) La configuration (HC) :

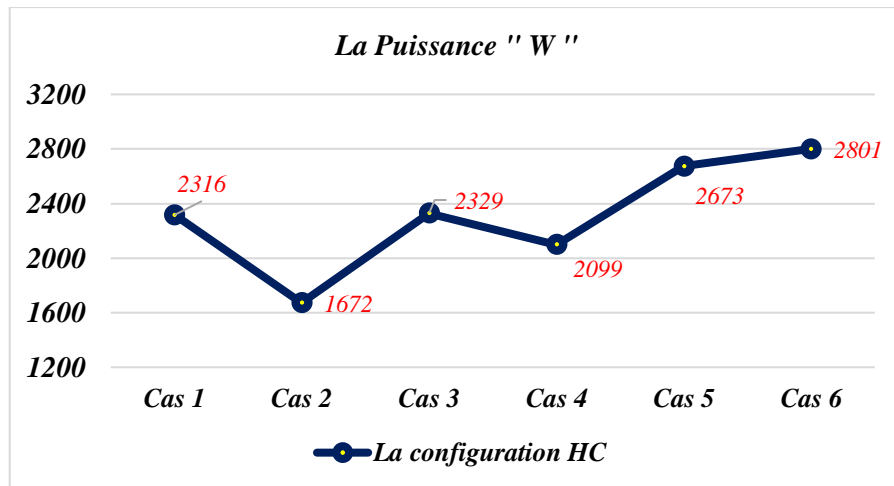


Figure (3.19) : Evolution de la puissance maximale pour la configuration (HC) selon différents cas d'ombrage.

Bien qu'elle présente une chute marquée au Cas 2 (1672 W), la HC retrouve progressivement de meilleures performances et atteint 2801 W au Cas 6. Son comportement montre une tolérance partielle à l'ombrage, mais moins efficace que la TCT. Elle se situe

Donc dans une position intermédiaire, assurant de bonnes performances lorsque l'irradiation est globalement homogène.

d) La configuration (BL) :

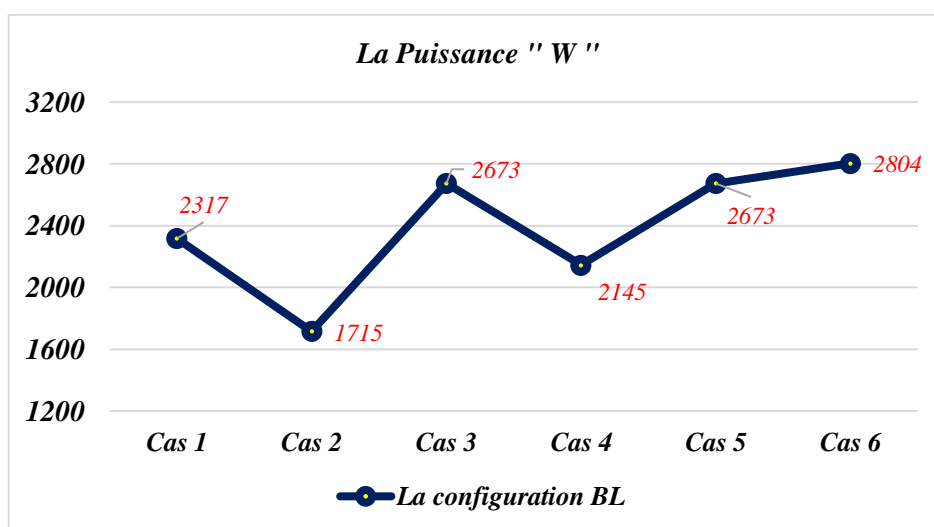


Figure (3.20) : Evolution de la puissance maximale pour la configuration (BL) selon différents cas d'ombrage.

CHAPITRE 03 Modélisation des différentes techniques de reconfiguration

La BL enregistre une baisse significative au Cas 2 (1715 W), mais elle parvient à remonter efficacement dans les cas suivants pour atteindre un maximum de (2804 W) au Cas 6, soit la valeur la plus élevée observée. Cette topologie offre ainsi un compromis intéressant entre simplicité de mise en œuvre et tolérance au mismatch, bien qu'elle demeure légèrement moins stable que la TCT.

➤ **Donc la configuration TCT s'impose comme la plus robuste et régulière, idéale pour des environnements soumis à des ombrages partiels fréquents.**

3.5. Analyse comparative des configurations de câblage photovoltaïque (SP, TCT, HC et BL) :

Configuration	Avantages	Inconvénients	Performance observée
SP (Série parallèle)	<ul style="list-style-type: none">- Simplicité de câblage- Faible coût d'installation	<ul style="list-style-type: none">- Très sensible à l'ombrage partiel- Le module le plus faible limite toute la chaîne	Puissance minimale : 1585 W (Cas 2) Puissance maximale : 2803 W (Cas 6)
TCT (Total Cross Tied)	<ul style="list-style-type: none">- Répartition homogène du courant- Très bonne tolérance au mismatch- Excellente stabilité des courbes I-V et P-V	<ul style="list-style-type: none">- Câblage complexe- Coût légèrement plus élevé	Puissance minimale : 2314 W (Cas 1) Puissance maximale : 2801 W (Cas 3)
HC (Honey-Comb)	<ul style="list-style-type: none">- Bon compromis entre stabilité et rendement- Amélioration par rapport au SP	<ul style="list-style-type: none">- Sensible dans certains cas (ex. Cas 2)- Moins robuste que TCT	Puissance minimale : 1672 W (Cas 2) Puissance maximale : 2801 W (Cas 6)
BL (Bridge-Linked)	<ul style="list-style-type: none">- Compromis entre simplicité et performance- Bonne tolérance au mismatch- Puissance élevée en conditions uniformes	<ul style="list-style-type: none">- Stabilité inférieure à TCT- Sensibilité en cas d'ombrage (Cas 2)	Puissance minimale : 1715 W (Cas 2) Puissance maximale : 2804 W (Cas 6)

Tableau (3.2) : Comparaison des principales configurations de câblage photovoltaïque.

3.6. Comparaison de la puissance générée par différentes configurations de connexion (PV) :

Cas 01 :

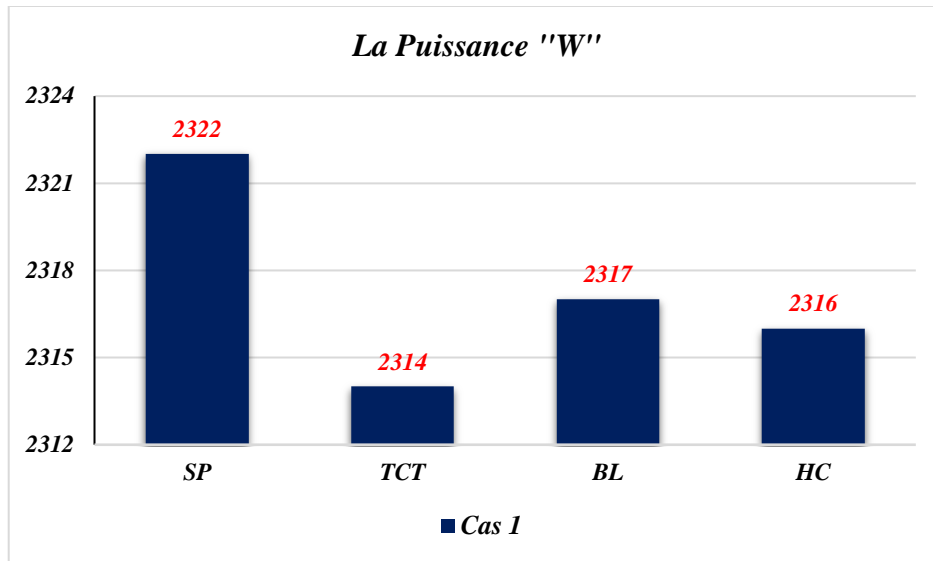


Figure (3.21) : Comparaison des Configurations PV – Cas 1.

Le graphique met en évidence la performance des différentes configurations de connexion de modules photovoltaïques dans le Cas 1. Il est observé que la configuration Série-Parallèle (SP) génère la puissance maximale avec 2322 W, traduisant une meilleure efficacité dans ce scénario. Les configurations Bridge-Linked (BL) et Honey-Comb (HC) suivent avec des puissances respectives de 2317 W et 2316 W. La configuration Total-Cross-Tied (TCT) présente la puissance la plus faible (2314 W), indiquant une performance légèrement inférieure. Ces résultats laissent supposer que, dans des conditions d'ensoleillement homogène, la configuration SP est la plus favorable.

Cas 02 :

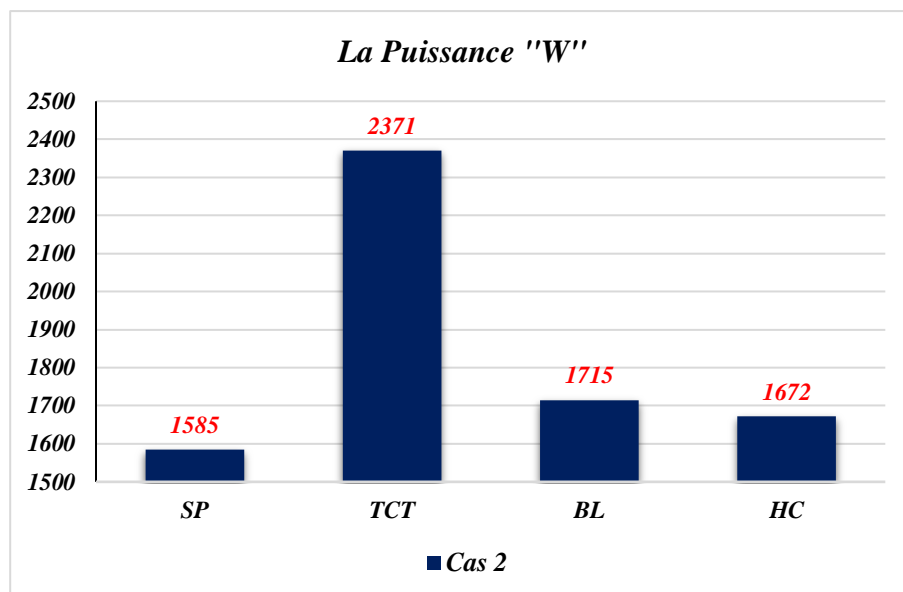


Figure (3.22) : Comparaison des Configurations PV – Cas 2.

CHAPITRE 03 Modélisation des différentes techniques de reconfiguration

Le graphique relatif au (Cas 2) montre une nette supériorité de la configuration Total-Cross-Tied (TCT), avec une puissance générée de (2371 W), très largement supérieure aux autres topologies. La configuration Bridge-Linked (BL) suit avec (1715 W), tandis que Honey-Comb (HC) et Série-Parallèle (SP) affichent respectivement (1672 W) et (1585 W). Ces résultats indiquent que, dans ce scénario, probablement marqué par un ombrage partiel important, la configuration (TCT) est nettement plus adaptée, grâce à sa meilleure capacité à répartir les courants et à atténuer les pertes dues à l'irradiation inégale.

Cas 03 :

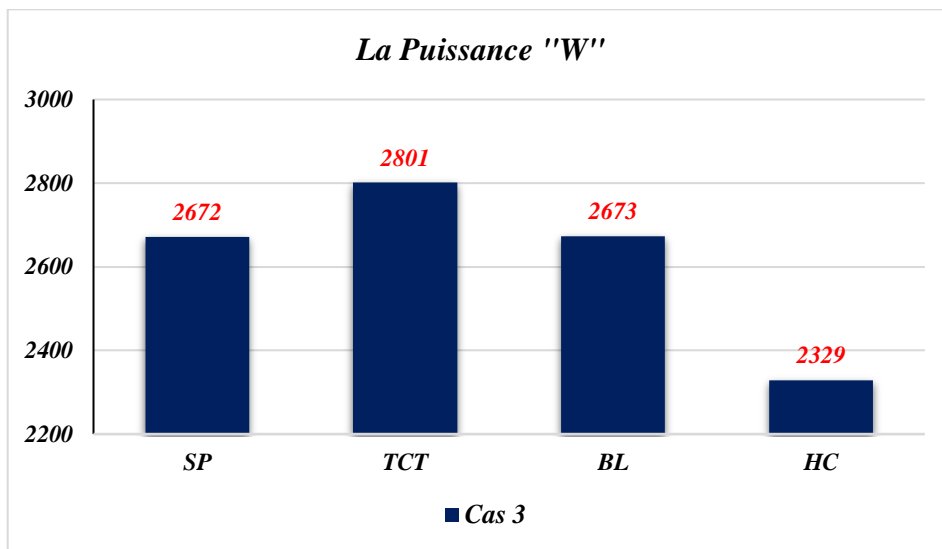


Figure (3.23) : Comparaison des Configurations P(V) – Cas 3.

Dans le Cas 3, la configuration (TCT) reste la plus performante avec (2801 W), confirmant sa robustesse dans des environnements probablement affectés par un ombrage partiel. Elle est suivie de très près par BL (2673 W) et SP (2672 W), qui présentent des performances quasi équivalentes. En revanche, (HC) reste en retrait avec (2329 W). Ce comportement suggère que, dans des conditions d'irradiation partiellement homogène, TCT conserve un avantage, mais les autres configurations (notamment SP et BL) deviennent également compétitives, tandis que HC semble moins adaptée.

Cas 04 :

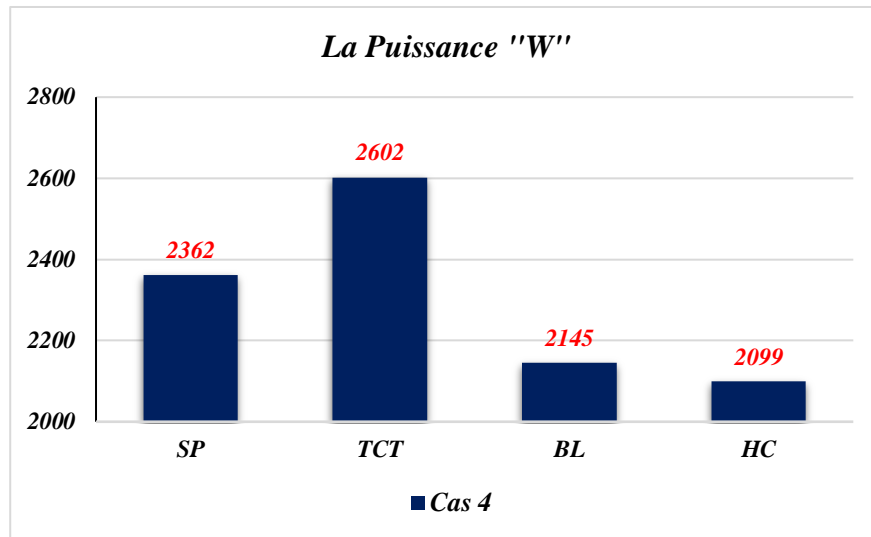


Figure (3.24) : Comparaison des Configurations PV – Cas 4.

Dans le Cas 4, la configuration (TCT) se démarque nettement avec une puissance générée de 2602 W, devant la configuration (SP) qui atteint 2362 W. Les configurations (BL) et (HC) présentent des performances plus faibles, respectivement 2145 W et 2099 W. Ce cas confirme une fois de plus la robustesse de TCT face aux effets de l'ombrage, probablement présents dans ce scénario. SP conserve une certaine efficacité, mais reste en retrait, tandis que BL et HC semblent moins adaptées aux conditions de ce cas.

Cas 05 :

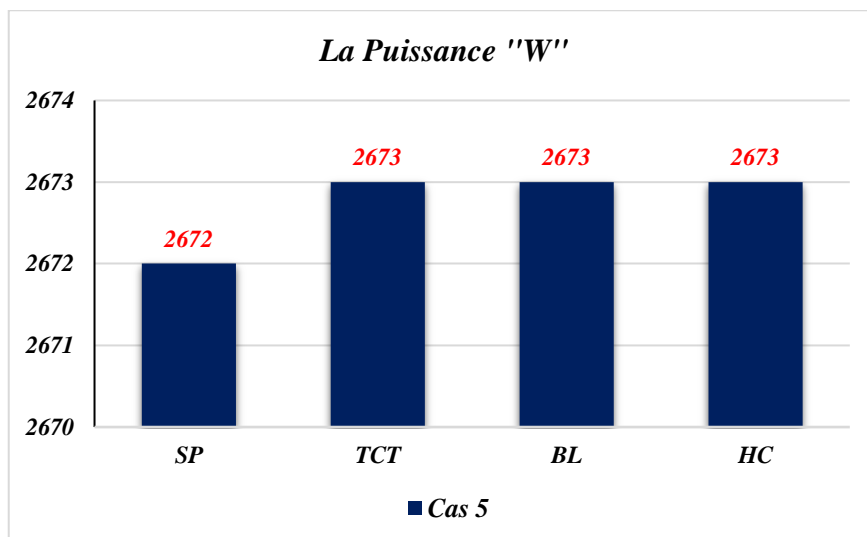


Figure (3.25) : Comparaison des Configurations PV – Cas 5.

CHAPITRE 03 Modélisation des différentes techniques de reconfiguration

Le Cas 5 montre une situation où les performances des différentes configurations sont quasiment identiques. Les puissances produites par TCT, BL et HC sont égales à 2673 W, tandis que SP est très légèrement en dessous à 2672 W. Cette uniformité indique que les conditions du Cas 5, probablement une irradiation parfaitement homogène, neutralisent les avantages structurels des configurations avancées. Dans un tel cas, le choix de la configuration pourrait être dicté par d'autres critères comme le coût ou la facilité d'installation.

Cas 06 :

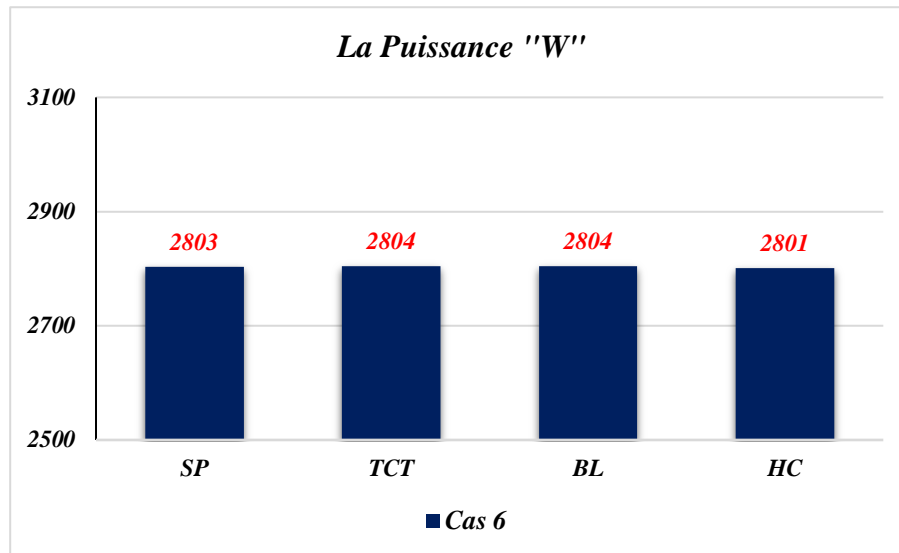


Figure (3.26) : Comparaison des Configurations PV – Cas 6.

Dans le Cas 6, les résultats sont quasiment équivalents pour toutes les configurations : TCT et BL affichent la puissance la plus élevée avec 2804 W, suivies de SP (2803 W) et HC (2801 W).

Ces écarts minimes témoignent d'un comportement stable du système PV dans ce scénario, probablement caractérisé par une très faible influence des ombrages ou des conditions d'ensoleillement très uniformes. Les quatre configurations se révèlent alors toutes efficaces, sans avantage significatif pour l'une ou l'autre.

3.7. Conclusion :

Au terme de l'analyse menée sur les six cas étudiés, il apparaît que la configuration Total-Cross-Tied (TCT) se distingue comme étant la plus performante. Que ce soit en conditions d'ensoleillement homogène ou en présence d'ombrage partiel, cette topologie a démontré une capacité constante à maintenir une production énergétique élevée, surpassant les autres configurations dans la majorité des cas. Cette stabilité et cette efficacité font de TCT une solution particulièrement recommandée pour les systèmes photovoltaïques installés dans des environnements à conditions variables. Son architecture permet une meilleure circulation du courant et une limitation des pertes dues à l'irradiation inégale, ce qui en fait un choix optimal du point de vue technico-économique.

Chapitre 04 :
Modélisation la
Technique de
Reconfiguration
SUDOKU

4.1. Introduction :

L'exigence de plus en plus croissante d'électricité peut être satisfaite par l'utilisation de la technologie photovoltaïque (PV), qui est la conversion de l'énergie solaire en électricité avec de faibles émissions de carbone et sans pièces mobiles. [32] La puissance générée par un système PV est imprévisible en raison de la variation des conditions atmosphériques. [33] L'ombrage partiel est un problème important qui entraîne une réduction de la puissance générée par les systèmes PV (2). Les systèmes PV résidentiels dans les zones urbaines et rurales sont affectés par l'ombrage partiel avec une perte de performance annuelle de 10 à 20 %. [34] En raison de la localisation de la chaleur pendant l'ombrage partiel, des points chauds se créent sur les modules PV, ce qui peut être évité en utilisant des diodes de contournement. [35] Cependant, l'utilisation de diodes de contournement entraînera la pluralité des points de puissance maximale dans les caractéristiques électriques du système PV. [36] L'ombrage du réseau PV influence directement la sortie de puissance et le rendement énergétique en minimisant la réception de l'énergie solaire ainsi qu'en augmentant la perte d'énergie des cellules ombragées. Même si nous évitons les ombrages partiels lors de l'installation, les chances d'occurrences d'ombrage ne peuvent pas être totalement écartées, et ainsi, les stratégies pour améliorer la puissance générée et renforcer les performances du système PV revêtent une grande importance.

Pour pallier ces limitations, plusieurs configurations d'interconnexion de modules ont été développées, telles que les schémas Série-Parallèle (SP), Total-Cross-Tied (TCT), Bridge-Linked (BL) et Honey-Comb (HC). Ces topologies visent à améliorer la tolérance des générateurs photovoltaïques face à l'irradiance non uniforme, mais elles restent limitées en termes d'efficacité lorsqu'il s'agit de conditions sévères d'ombrage.

Dans ce chapitre, nous présentons une étude comparative de ces différentes configurations et nous introduisons la technique Sudoku, qui repose sur une logique de permutation permettant de redistribuer de manière optimale les cellules ombragées au sein de la matrice PV. L'objectif est d'évaluer, à travers des simulations numériques, l'impact de cette approche innovante sur la puissance délivrée et de démontrer son avantage par rapport aux topologies classiques.

4.2. Présentation du problème de l'ombrage partiel dans les générateurs PV :

Le problème de l'ombrage partiel dans les générateurs photovoltaïques (PV) se présente lorsqu'une partie du panneau solaire est partiellement recouverte par une ombre, ce qui réduit la quantité de lumière solaire atteignant les cellules photovoltaïques. Cela entraîne une baisse significative de la production d'électricité, car les cellules sont souvent connectées en série, et l'ombre sur une seule cellule ou section peut affecter la performance de l'ensemble de la rangée ou même du panneau complet. De plus, l'ombrage partiel peut créer des points chauds qui accélèrent le vieillissement des panneaux. L'impact de cet ombrage dépend de la densité, de l'étendue, et de la durée de l'ombre mais il se traduit généralement par une perte importante d'efficacité énergétique du système PV. Ce problème est crucial à prendre en compte lors de la conception et de l'installation pour maximiser la production d'énergie et la durabilité des panneaux.

Détails du problème de l'ombrage partiel dans les générateurs PV:

- Les cellules photovoltaïques sont souvent connectées en série. Lorsque l'ombre réduit la lumière sur une cellule, cela limite le courant généré par toute la chaîne, affectant donc l'ensemble du panneau.
- L'ombre partielle provoque une diminution irrégulière de la production d'énergie, contrairement à une ombre totale où le panneau cesse complètement de produire.
- L'ombrage crée des zones chaudes (hot spots) qui peuvent endommager durablement les cellules et accélérer le vieillissement du panneau.
- Les sources d'ombrage peuvent être des arbres, bâtiments, saleté, ou déplacement du soleil dans la journée.
- L'ombre partielle peut aussi créer des problèmes de désadaptation au niveau du générateur photovoltaïque, nécessitant des solutions techniques comme les micro-onduleurs ou optimiseurs pour limiter la perte d'efficacité.

Cette problématique est essentielle pour la bonne intégration et le dimensionnement des systèmes PV, afin de garantir un rendement optimal et une durée de vie prolongée des installations solaires.

4.3. Nécessité de reconfigurer les modules pour maximiser la puissance :

La nécessité de reconfigurer les modules photovoltaïques (PV) s'impose principalement dans l'optique de maximiser la puissance extraite du générateur, en particulier lorsque celui-ci est soumis à des conditions de fonctionnement variables, telles que l'ombrage partiel. Dans un champ photovoltaïque conventionnel, les modules sont généralement connectés en série et en parallèle afin d'atteindre la tension et le courant requis par la charge ou par le convertisseur associé. Toutefois, cette configuration classique présente une limite importante : en présence d'irradiance inégale, une seule cellule ou un seul module ombragé peut imposer une contrainte à l'ensemble de la chaîne série, réduisant ainsi le courant global et engendrant des pertes de puissance significatives. Ce phénomène, connu sous le nom de mismatch, représente l'un des principaux facteurs de diminution de la performance des systèmes photovoltaïques.

Pour pallier ces inconvénients, la reconfiguration des modules photovoltaïques consiste à modifier de manière dynamique les connexions électriques entre les modules (série, parallèle ou encore à travers des topologies plus avancées telles que la Total Cross-Tied (TCT), la Bridge-Linked (BL), la Honey-Comb) ou Sudoku. L'objectif est de redistribuer les flux de courant et de tension afin de maintenir un point de fonctionnement proche de la puissance maximale théorique, malgré la présence d'irradiance non uniforme. En d'autres termes, la reconfiguration permet d'adapter en temps réel l'architecture du champ PV aux conditions environnementales changeantes, réduisant ainsi les pertes énergétiques et améliorant à la fois la fiabilité et la flexibilité du système.

Par ailleurs, cette stratégie est souvent couplée à des dispositifs électroniques intelligents, tels que les micro-onduleurs et les optimiseurs de puissance, qui assurent un pilotage individualisé de chaque module ou groupe de modules. Ces dispositifs facilitent l'application d'algorithmes de suivi du point de puissance maximale, capables d'identifier et de maintenir le système au niveau de puissance optimal, même en présence de plusieurs points locaux induits par l'ombrage partiel. L'intégration de ces techniques confère ainsi aux systèmes photovoltaïques une meilleure résilience face aux aléas climatiques, tout en maximisant la production d'énergie et en prolongeant la durée de vie opérationnelle des installations.

4.4. Concept de reconfiguration des panneaux photovoltaïques :

Le concept de reconfiguration des panneaux photovoltaïques (PV) se définit comme la modification de l'interconnexion électrique des modules, dans le but d'optimiser la production énergétique, en particulier dans des contextes d'ombrage partiel ou de conditions environnementales instables. Traditionnellement, les modules PV sont connectés en série ou en parallèle afin d'obtenir les niveaux de tension et de courant nécessaires. Toutefois, cette configuration classique se révèle vulnérable en cas d'irradiance non uniforme : un seul module ombragé peut limiter le courant de toute une chaîne série, générant ainsi des pertes énergétiques substantielles et compromettant le rendement global du système.

Pour surmonter cette contrainte, différentes topologies de reconfiguration ont été proposées. Parmi elles, on distingue la Total Cross-Tied (TCT), la Bridge-Linked (BL) et la Honey-Comb (HC), qui permettent une redistribution plus homogène des courants et une meilleure exploitation du potentiel des modules. La TCT, en particulier, est souvent considérée comme la plus performante en présence d'ombrage partiel, car elle favorise une circulation équilibrée des courants et réduit la sévérité des points chauds (hot spots), améliorant ainsi la sécurité et la durabilité des installations.

La reconfiguration peut être mise en œuvre de manière statique, en adoptant dès la conception une topologie optimisée, ou de manière dynamique, grâce à l'intégration de dispositifs électroniques capables de modifier en temps réel les connexions entre modules. Cette seconde approche, plus avancée, s'appuie sur des technologies telles que les micro-onduleurs, les optimiseurs de puissance ou encore les matrices de commutation intelligentes, associées à des algorithmes de suivi du point de puissance maximale.

Ces solutions permettent d'adapter la topologie du champ PV en fonction des variations d'ensoleillement, garantissant ainsi une extraction optimale de l'énergie.

Ce concept trouve une pertinence particulière dans les systèmes photovoltaïques intégrés en milieu urbain, où la présence de bâtiments, d'antennes, de cheminées ou d'arbres engendre des ombres fréquentes, dynamiques et difficilement prévisibles. En réduisant les pertes énergétiques dues à ces contraintes et en maintenant une production stable, la reconfiguration contribue non

seulement à accroître l'efficacité globale des systèmes PV, mais également à prolonger la durée de vie des équipements en limitant les contraintes électriques et thermiques sur les modules.

4.5. Définition de la reconfiguration statique et dynamique :

La reconfiguration dans un système photovoltaïque peut se définir à deux niveaux : statique et dynamique :

4.5.1. Reconfiguration statique:

La reconfiguration statique désigne l'ensemble des techniques permettant d'adapter ou de modifier les interconnexions électriques entre les modules photovoltaïques (PV) à l'intérieur d'un générateur, dans le but d'optimiser la production d'énergie. Contrairement à une configuration fixe, généralement limitée à des schémas en série ou en parallèle, la reconfiguration repose sur la possibilité de changer la topologie du champ photovoltaïque, en adoptant soit des dispositions simples (série ou parallèle), soit des agencements plus complexes tels que la Total Cross-Tied (TCT), la Bridge-Linked (BL), la Honey-Comb (HC) ou Sudoku. Ces topologies avancées offrent une meilleure tolérance aux irrégularités d'ensoleillement et aux conditions d'ombrage partiel, qui constituent l'une des principales sources de pertes dans les systèmes photovoltaïques.

Le principe fondamental de la reconfiguration consiste à rediriger et à équilibrer les chemins du courant électrique afin de limiter l'impact des cellules ou modules les plus faiblement irradiés sur l'ensemble de la chaîne. Ainsi, la puissance extraite du générateur est maximisée sans qu'il soit nécessaire d'effectuer de modifications physiques ou de déplacer les panneaux. Cette adaptation confère une plus grande flexibilité au système et permet de maintenir un fonctionnement proche du point de puissance maximale, même en présence de conditions environnementales défavorables.

Dans la pratique, la mise en œuvre de la reconfiguration repose souvent sur l'intégration de dispositifs électroniques et d'algorithmes de gestion avancés. Ces derniers sont capables de surveiller en temps réel l'état d'irradiance et de température des modules, puis de déterminer la configuration la plus appropriée. Des équipements tels que les micro-onduleurs, les optimiseurs de puissance ou encore les matrices de commutation électroniques jouent un rôle clé dans cette dynamique, en permettant un ajustement automatique et continu des connexions. L'association de

ces dispositifs avec des algorithmes de suivi du point de puissance maximale assure une exploitation optimale du champ photovoltaïque et contribue à réduire les pertes énergétiques, tout en améliorant la fiabilité et la durée de vie du système.

4.5.2. Reconfiguration dynamique:

La reconfiguration dynamique désigne l'ensemble des actions visant à modifier l'agencement spatial ou le placement des modules photovoltaïques (PV) au sein d'une installation, en intervenant directement sur leur emplacement, leur inclinaison ou leur orientation. Contrairement à la reconfiguration électrique, qui agit sur les connexions internes des modules, cette approche concerne l'aspect géométrique et structurel du champ photovoltaïque. L'objectif principal est de minimiser les effets de l'ombrage et d'optimiser l'exposition au rayonnement solaire, afin d'accroître la production énergétique globale.

Dans la majorité des cas, la reconfiguration dynamique est réalisée de manière statique, c'est-à-dire lors de la conception ou de l'installation du système. Elle implique alors une étude préalable approfondie de l'environnement, incluant l'analyse de la trajectoire solaire, la présence d'obstacles potentiellement générateurs d'ombre (bâtiments, arbres, antennes, etc.) ainsi que les caractéristiques géographiques du site (latitude, inclinaison du terrain, orientation des surfaces disponibles). Un choix optimal de l'angle d'inclinaison et de l'azimut des modules permet de maximiser le rendement énergétique sur l'ensemble de l'année.

Dans des configurations plus avancées, la reconfiguration dynamique peut également être dynamique, à travers l'utilisation de systèmes de suivi solaire. Ces dispositifs mécaniques ajustent en temps réel l'orientation et l'inclinaison des panneaux selon la position apparente du soleil au cours de la journée et des saisons. Bien que cette approche permette d'augmenter significativement la quantité d'énergie produite (jusqu'à 20 à 30 % selon les conditions climatiques et géographiques), elle engendre toutefois des coûts supplémentaires et une complexité accrue en termes de maintenance et de fiabilité.

Ainsi, la reconfiguration physique, qu'elle soit statique ou dynamique, constitue une stratégie efficace pour améliorer la captation du rayonnement solaire et réduire l'impact des ombrages partiels. Elle représente une solution complémentaire à la reconfiguration statique, en agissant sur

les paramètres géométriques du système et en garantissant une meilleure exploitation des ressources solaires disponibles.

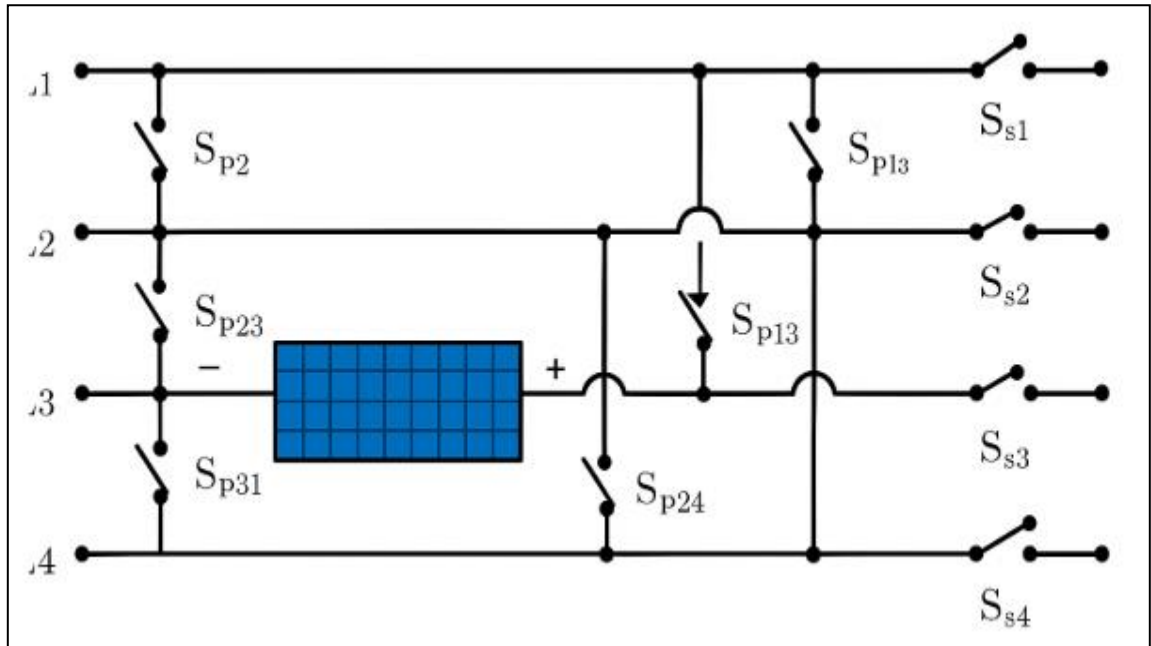


Figure (4.1) : Schéma d'une Reconfiguration dynamique. [37]

4.6. Les techniques statiques de reconfiguration des panneaux photovoltaïque :

Les techniques statiques de reconfiguration des panneaux photovoltaïques consistent à choisir et à fixer une topologie électrique et une disposition physique prédéfinies des modules, qui ne changent pas dynamiquement pendant le fonctionnement :

4.6.1. Série-Parallèle (SP):

La configuration série-parallèle est la plus classique et la plus utilisée dans les champs photovoltaïques. Les modules sont d'abord reliés en série pour former des chaînes, puis ces chaînes sont mises en parallèle afin d'augmenter le courant disponible. Son principal avantage réside dans sa simplicité et son faible coût de câblage. Cependant, cette disposition est très sensible à l'ombrage partiel : en effet, l'ombre sur un seul module limite le courant de toute la chaîne à laquelle il appartient, ce qui provoque une réduction importante de la puissance globale.

4.6.2. Bridge-Linked (BL):

Dans la configuration bridge-linked, des liaisons en pont sont ajoutées entre les modules voisins de différentes chaînes en parallèle. L'idée est de permettre une meilleure répartition du courant lorsque certains modules sont ombrés, réduisant ainsi les pertes par rapport au schéma classique SP. Cette méthode améliore la tolérance de l'ensemble PV face aux ombrages, mais le gain reste limité dans certains cas de figure et le câblage devient un peu plus complexe.

4.6.3. Honey-Comb (HC):

La configuration en nid-d'abeille (honey-comb) consiste à redistribuer les modules de façon à ce que les cellules d'une même chaîne ne soient pas regroupées dans une seule ligne ou colonne. Chaque string est ainsi dispersée dans plusieurs rangées, ce qui permet de réduire l'impact d'un module ombré sur toute la chaîne. Cette technique donne de meilleurs résultats que les configurations SP et BL sous différents scénarios d'ombrage, mais elle nécessite un câblage plus élaboré et une mise en place plus coûteuse.

4.6.4. Total Cross Tied (TCT):

La configuration total-cross-tied relie chaque module non seulement en série mais aussi en parallèle avec les modules de sa ligne et de sa colonne. Grâce à cette disposition, le courant peut circuler par plusieurs chemins alternatifs, ce qui améliore considérablement la tolérance du champ photovoltaïque aux ombrages partiels. La TCT est l'une des configurations les plus performantes en termes de récupération de puissance, mais elle exige un câblage dense et plus coûteux que les autres méthodes statiques.

4.6.5. Technique Sudoku (SuDoKu):

La configuration Sudoku applique une permutation des modules inspirée de la grille de Sudoku : chaque module d'une même string est placé dans une position différente au sein de la matrice. Ainsi, les modules susceptibles d'être ombrés sont répartis de façon homogène sur l'ensemble du champ, ce qui évite la concentration des pertes dans une seule chaîne. Cette technique a prouvé son efficacité pour maximiser la puissance sous plusieurs patterns d'ombrage (en coin, en bande, en L, etc.). Elle constitue un bon compromis entre la performance et la complexité du câblage.

4.7. Présentation de la technique Sudoku :

Le Sudoku est un jeu de logique dont la grille carrée de 81 cases est divisée en 9 blocs de dimension 3×3 , comprenant chacun 9 cases (voir figure 4.5). Certaines cases contiennent déjà des chiffres, et l'objectif est de remplir les autres en utilisant les nombres de 1 à 9. La contrainte essentielle est qu'aucun chiffre ne doit apparaître deux fois dans la même ligne, la même colonne ou le même bloc. Les instances de Sudoku sont construites de telle sorte qu'il n'existe qu'une solution unique.

Il a été démontré qu'il existe exactement 6 670 903 752 021 072 936 960 grilles complètes différentes.[38] Toutefois, en tenant compte des symétries intrinsèques de la grille (permutations des valeurs, des colonnes ou des lignes, etc.), ce nombre est réduit à 5 472 730 538 grilles distinctes.[39]

Ce jeu est souvent considéré comme un cas d'école pour la programmation par contraintes, et ce pour deux raisons principales :

- D'une part, cette discipline apparaît comme la méthode la plus adaptée pour résoudre automatiquement les instances du Sudoku.
- D'autre part, les techniques mises en œuvre par les joueurs humains pour compléter leurs grilles reposent elles-mêmes sur des principes fondamentaux de la programmation par contraintes.

Une problématique connexe au Sudoku concerne la mesure de la difficulté d'une grille, souvent précisée dans les versions publiées dans la presse. Cette difficulté, qualifiée de « très facile » à « expert », reste un concept hautement subjectif puisqu'elle reflète la perception d'un joueur face au processus de résolution. Contrairement à certaines idées reçues, elle ne dépend pas directement du nombre de cases pré-remplies dans l'instance. Une approche de plus en plus répandue consiste à évaluer la difficulté en fonction du niveau minimal de complexité des règles logiques nécessaires à l'achèvement correct de la grille.

5	8				4	2		
	2		6		8			
				7				
9				4				
					7	3	8	6
								4
			8					5
	3	6						9
		5		9			7	2

Figure (4.2) : Une instance difficile de sudoku. [40]

4.8. Intégration de la technique Sodoku dans la matrice PV :

L'intégration de la technique Sudoku dans une matrice photovoltaïque consiste à redistribuer les modules de chaque string en suivant une logique de permutation inspirée du puzzle Sudoku. Au lieu de connecter les modules ligne par ligne comme dans la configuration série-parallèle classique, on réorganise leur position de sorte qu'un module appartenant à une string donnée soit placé dans une ligne et une colonne différentes, et que chaque string soit représentée une seule fois par ligne et par colonne. Cette distribution homogène permet de disperser les modules susceptibles d'être ombrés sur l'ensemble du champ photovoltaïque, évitant ainsi la concentration des pertes dans une seule chaîne.

51	32	23	64	45	16
61	42	13	54	35	26
21	52	43	34	15	66
31	12	63	24	55	46
11	22	53	44	65	36
41	62	33	14	25	56

Figure (4.3) : La grille Sudoku appliquée aux matrices PV.

4.9. Description des différents modèles d'ombrage :

Nous présentons une modélisation détaillée et une simulation des différentes topologies de panneaux photovoltaïques afin d'évaluer leurs performances en présence d'un défaut d'ombrage partiel. Les interconnexions étudiées sont : Série-Parallèle (SP), Total-Cross-Tied (TCT), Bridge-Linked (BL), Honey-Comb (HC) ainsi que la configuration SUDOKU. L'analyse est réalisée sur un réseau PV de dimension 6×6, et les performances de chaque topologie sont examinées sous différents scénarios d'ombrage. Les motifs d'ombrage affichés dans la figure (4.7) sont considérés pour l'étude, qui sont sélectionnés en fonction d'un point de vue théorique et pratique.

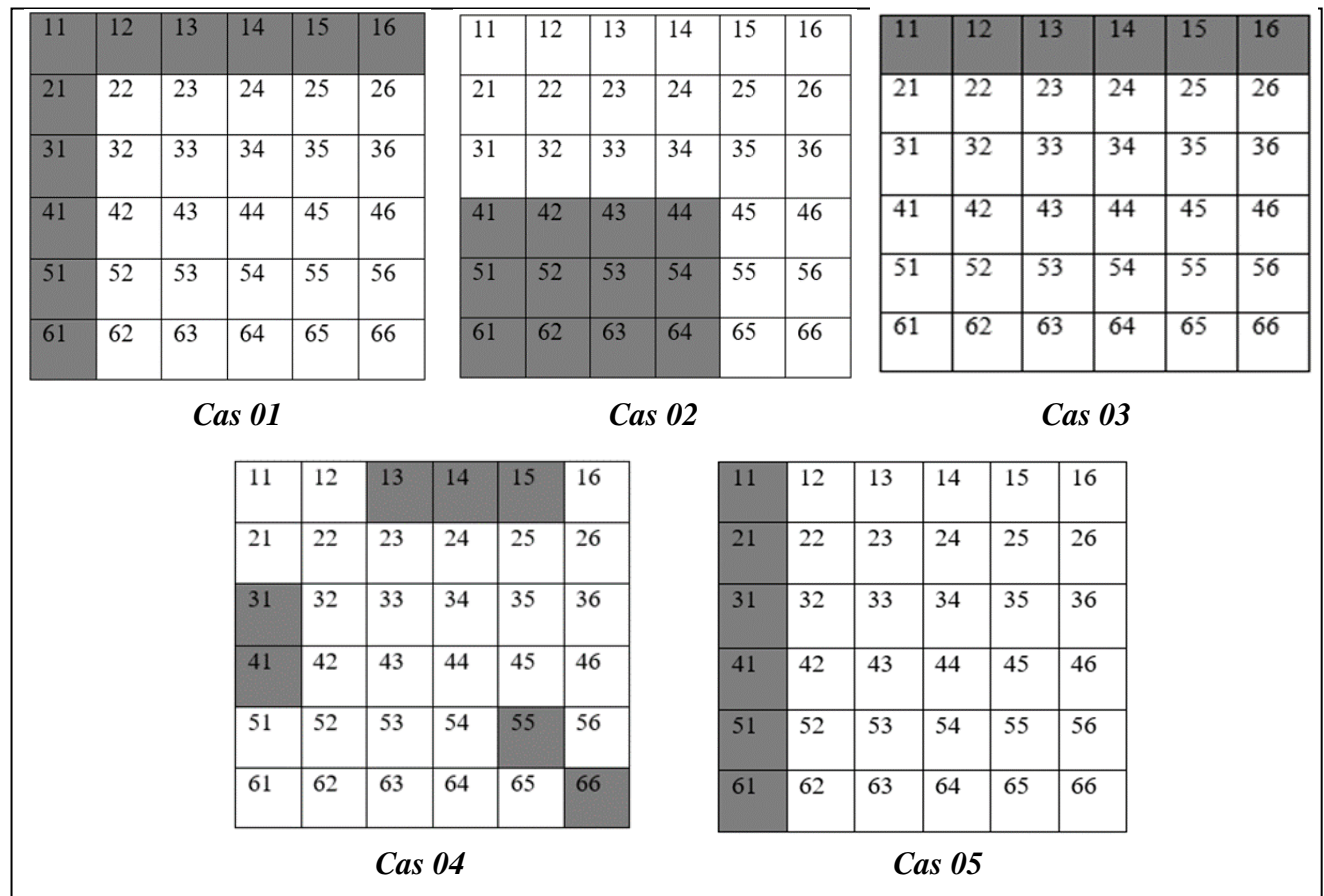


Figure (4.4) : Les différents scénarios d'ombrage.

4.10. Résultat de simulation :

Les caractéristiques P-V sous des conditions d'ombre uniforme et partielle pour des différents cas d'ombrage sont montrées dans les Figure 8 jusqu'à 12.

Cas 01 :

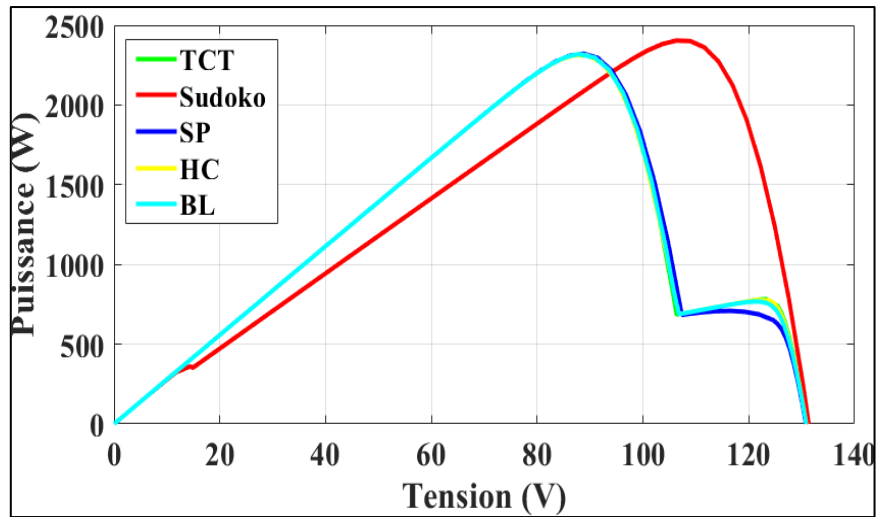


Figure (4.5) : Courbes (P-V) comparatives des différentes configurations de matrices photovoltaïques sous ombrage partiel (cas 01).

Cas 02 :

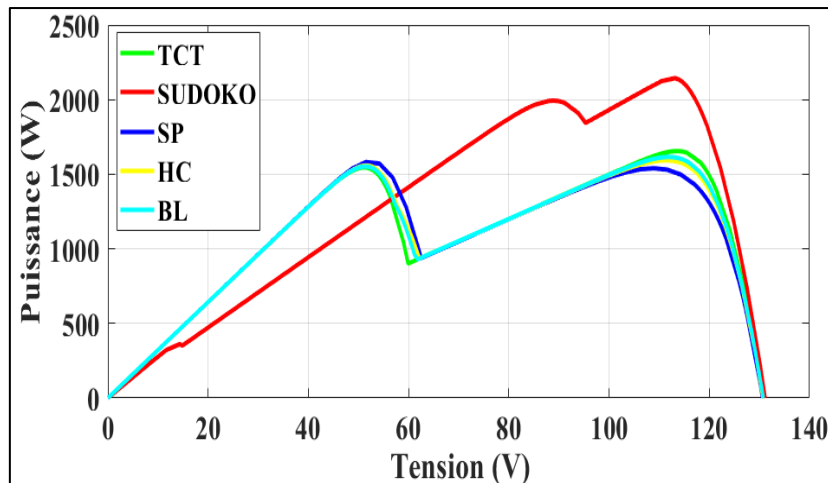


Figure (4.6) : Courbes (P-V) comparatives des différentes configurations de matrices photovoltaïques sous ombrage partiel (cas 02).

Cas 03 :

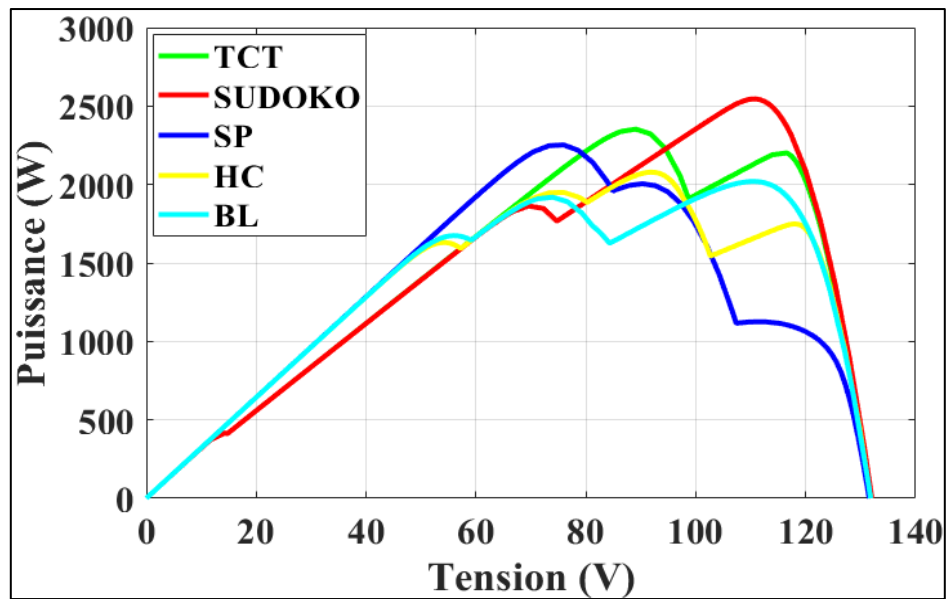


Figure (4.7) : Courbes (P-V) comparatives des différentes configurations de matrices photovoltaïques sous ombrage partiel (cas 03).

Cas 04 :

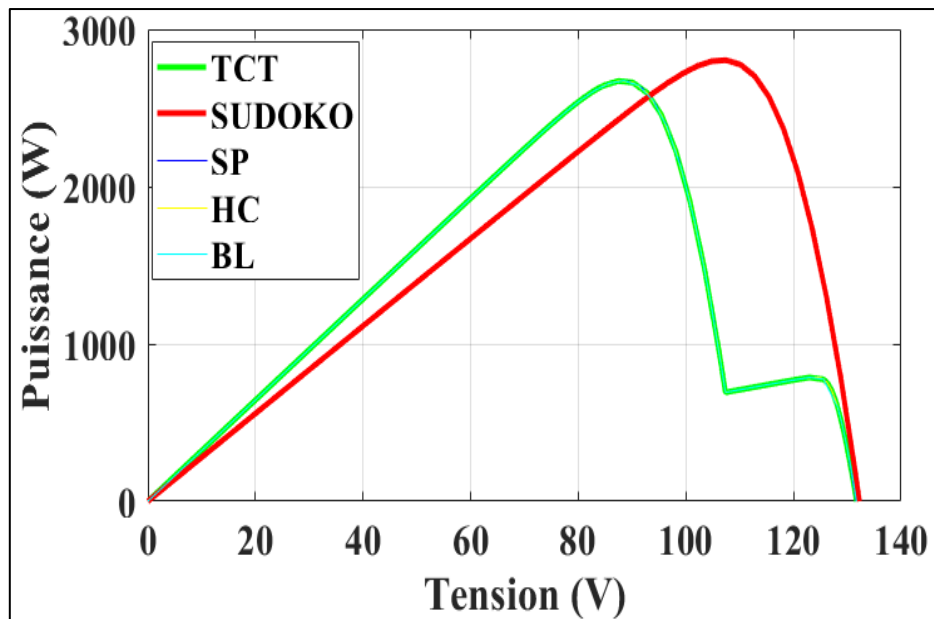


Figure (4.8) : Courbes (P-V) comparatives des différentes configurations de matrices photovoltaïques sous ombrage partiel (cas 04).

Cas 05 :

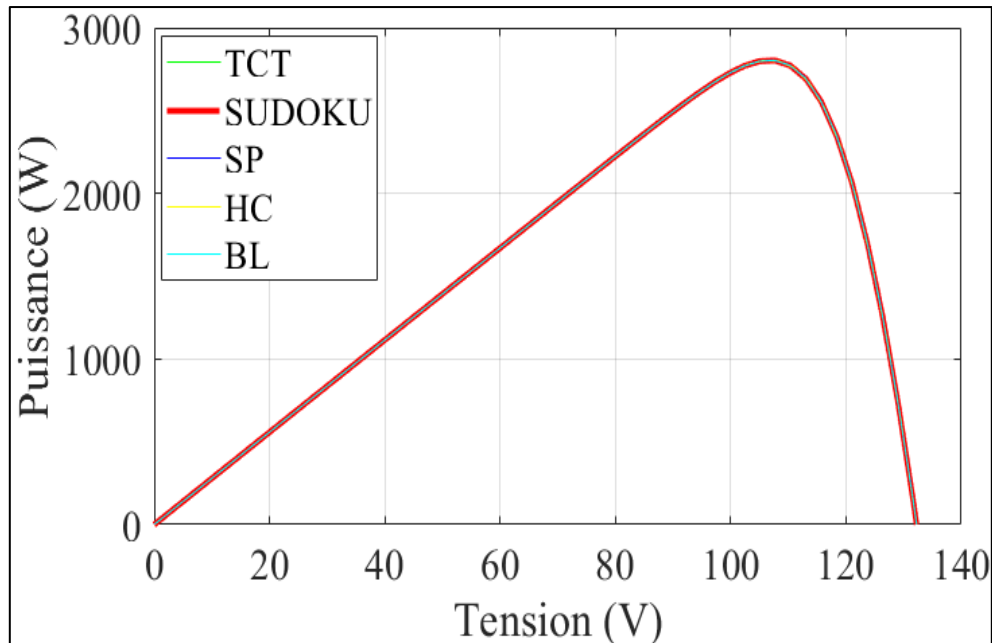


Figure (4.9) : Courbes (P-V) comparatives des différentes configurations de matrices photovoltaïques sous ombrage partiel (cas 05).

4.11. Comparaison avec les autres techniques de reconfiguration sous l’ombrage partiel :

Le tableau suivant présente une comparaison entre la technique Sudoku et les principales configurations statiques (SP, BL, HC et TCT) en termes de performances sous l’ombrage partiel :

	Configuration	P_{max}(W)	V_{max}(V)	I_{max}(A)
Cas 1	TCT	2313	86.98	26.59
	SUDOKO	2404	106.3	22.61
	SP	2322	88.78	26.15
	HC	2316	88.08	26.29
	BL	2317	88.15	26.28

Cas 2	TCT	1655	114	14.51
	SUDOKO	2144	113.2	18.93
	SP	1582	51.51	30.71
	HC	1616	112.1	14.41
	BL	1616	112.1	14.41
Cas 3	TCT	2348	87.48	26.84
	SUDOKO	2546	110.8	22.97
	SP	2254	75.25	29.95
	HC	2079	91.71	22.66
	BL	2019	110.1	18.33
Cas 4	TCT	2673	88.48	30.21
	SUDOKO	2803	107.5	26.07
	SP	2672	87.49	30.54
	HC	2673	88.39	30.24
	BL	2673	87.83	30.43
Cas 5	TCT	2803	107.6	26.05
	SUDOKO	2803	107.6	26.05
	SP	2803	107.6	26.05
	HC	2803	107.6	26.05
	BL	2803	107.6	26.05

Tableau (4) : Performances comparatives des différentes configurations photovoltaïques (SP, TCT, BL, HC et SUDOKU) sous différents cas d'ombrage.

4.12. Comparaison de la puissance et de la tension maximales selon les techniques de reconfiguration :

Afin d'analyser de manière approfondie l'impact des différentes techniques de reconfiguration sur les performances du générateur photovoltaïque soumis à des conditions

d'ombrage partiel, une comparaison de la puissance maximale obtenue (W) a été réalisée. Cinq méthodes représentatives ont été retenues pour cette étude : TCT (Total Cross Tied), Sudoku, SP (Series-Parallel), HC (Honey-Comb) et BL (Bridge-Linked). Les figures suivantes présentent les résultats obtenus pour les cinq cas d'ensoleillement étudiés, mettant en évidence les différences de performance entre chaque technique.

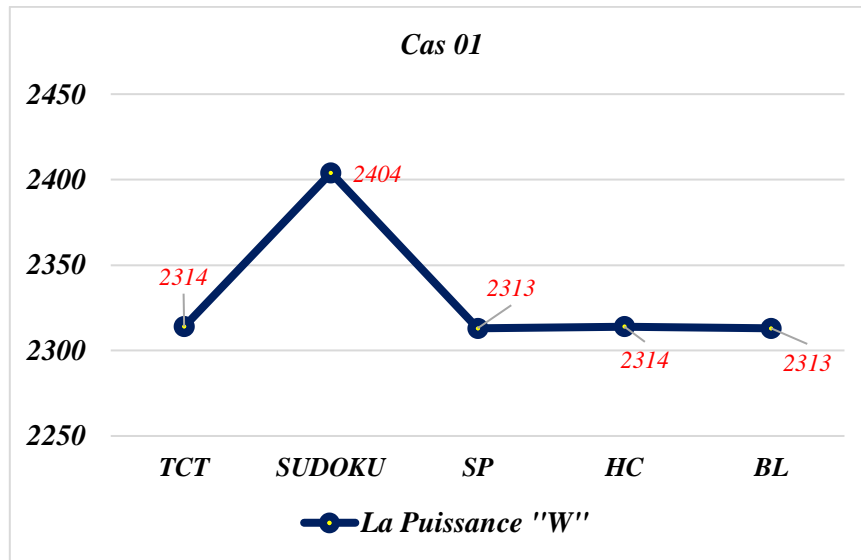


Figure (4.10) : Puissance maximale obtenue pour le Cas 01 selon différentes techniques de reconfiguration.

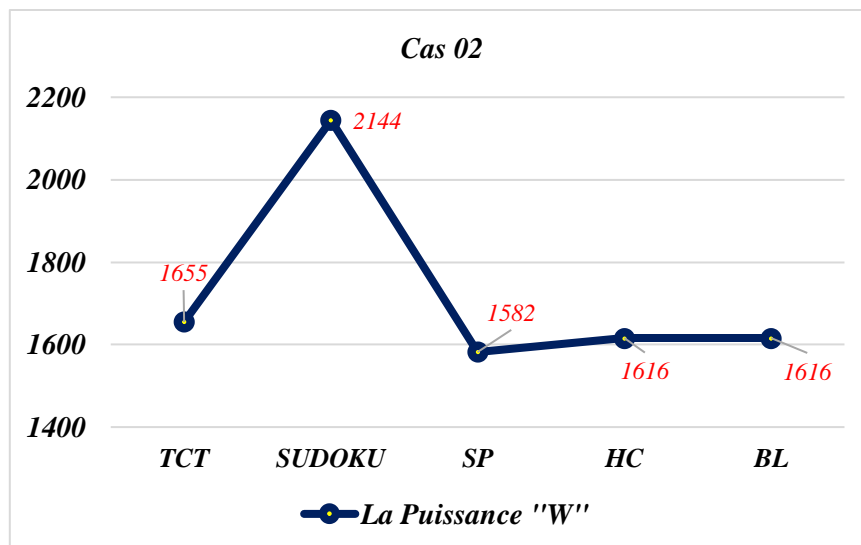


Figure (4.11) : Puissance maximale obtenue pour le Cas 02 selon différentes techniques de reconfiguration.

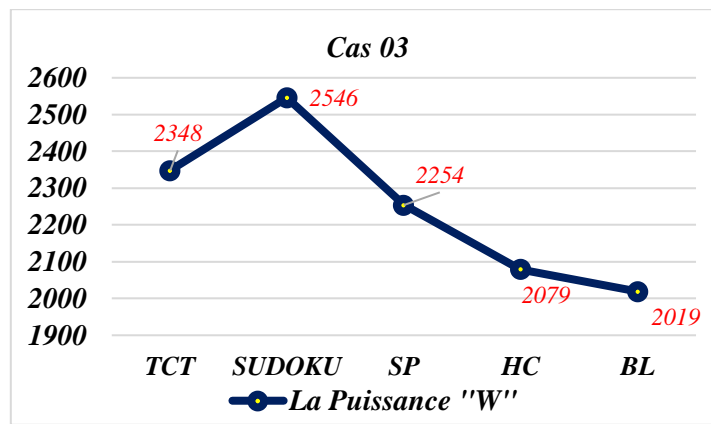


Figure (4.12) : Puissance maximale obtenue pour le Cas 03 selon différentes techniques de reconfiguration.

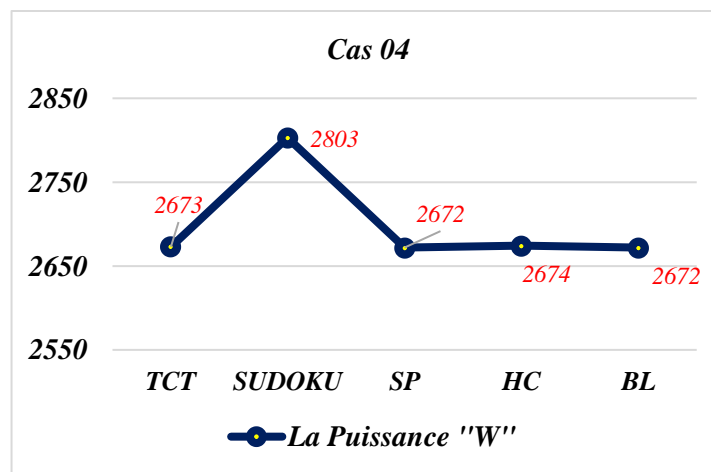


Figure (4.13) : Puissance maximale obtenue pour le Cas 04 selon différentes techniques de reconfiguration.

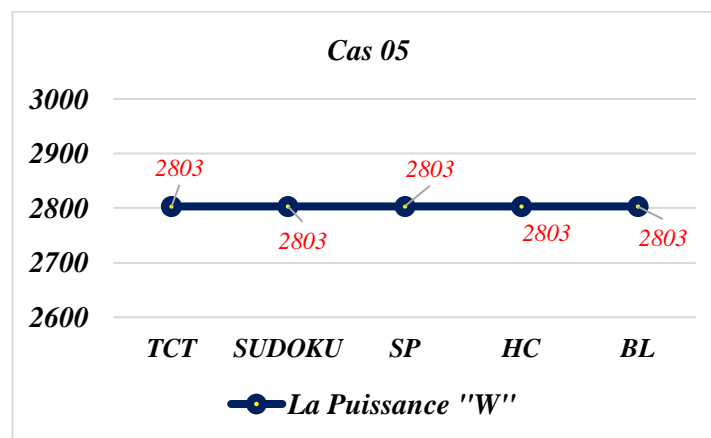
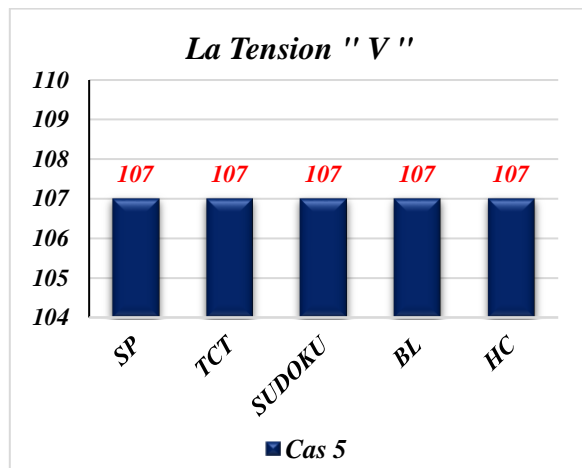
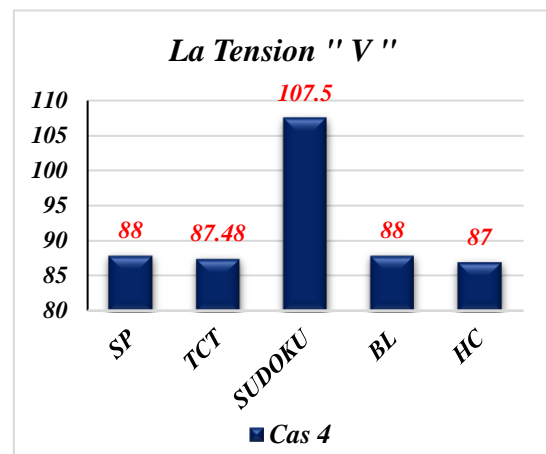
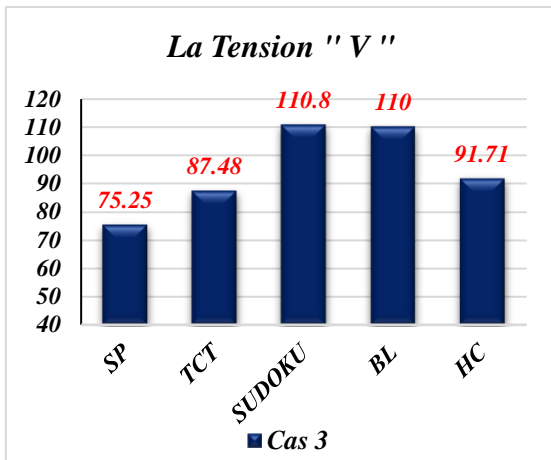
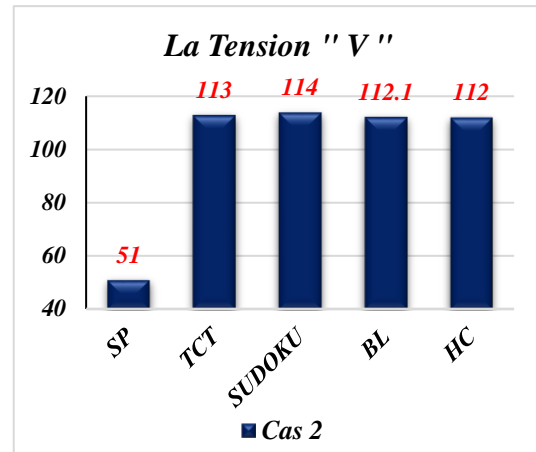
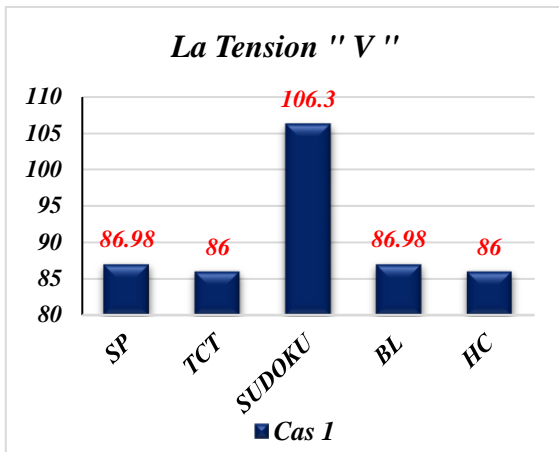


Figure (4.14) : Puissance maximale obtenue pour le Cas 05 selon différentes techniques de reconfiguration.

Les figures présentent la tension maximale (V) obtenue pour les cinq cas d'ombrage en fonction des différentes techniques de reconfiguration : SP, TCT, Sudoku, BL et HC. Les résultats mettent en évidence une variation des valeurs selon la méthode appliquée.



Figures (4.15) : Tension maximale pour les cinq cas selon les techniques de reconfiguration.

4.13. Discussion des résultats :

Les résultats de simulation obtenus mettent en évidence l'influence déterminante de la configuration des modules photovoltaïques sur leurs performances en présence d'ombrage partiel. L'analyse du tableau comparatif et des courbes (PV) montre que les schémas classiques tels que SP, BL, HC et TCT subissent une dégradation notable de la puissance maximale en raison de l'apparition de plusieurs points de puissance locaux, ce qui complique l'extraction du MPP global.

En revanche, la configuration **SUDOKU** se distingue par des performances nettement supérieures. Elle permet une répartition plus homogène des cellules ombragées sur la matrice, réduisant ainsi le phénomène de mismatch et améliorant la continuité des courbes (PV). Cette caractéristique se traduit par une puissance maximale plus élevée et une stabilité accrue par rapport aux autres configurations.

De plus, la logique de permutation appliquée dans la technique Sudoku favorise une distribution équilibrée de l'irradiance, ce qui limite l'influence des zones d'ombre localisées et garantit une meilleure exploitation du générateur photovoltaïque. Ces résultats confirment que l'approche Sudoku constitue une alternative prometteuse et la plus favorable parmi les topologies étudiées, puisqu'elle maximise la production d'énergie tout en minimisant les pertes induites par les conditions d'ombrage partiel.

4.14. Conclusion :

L'étude réalisée a permis de mettre en évidence l'impact majeur de l'ombrage partiel sur les performances des générateurs photovoltaïques ainsi que l'importance du choix de la configuration des modules pour limiter les pertes de puissance. Les simulations comparatives entre les topologies classiques (SP, BL, HC, TCT) et la méthode Sudoku montrent clairement que cette dernière offre de meilleures performances en termes de puissance maximale extraite et de continuité des courbes P-V. Grâce à sa logique de permutation, la configuration Sudoku réduit efficacement le phénomène de mismatch et constitue ainsi une solution prometteuse pour optimiser la production d'énergie dans des conditions réelles où l'irradiance est souvent non uniforme.

Conclusion

Générale

Conclusion générale :

Dans ce travail, la simulation des panneaux photovoltaïques en présence d'ombrage a été réalisée. Pour étudier l'effet de l'ombrage sur les configurations photovoltaïques à savoir ; série parallèle (SP), Bridge- Linked (BL) et Honey-Comb (HC), Total-Cross-Tied (TCT) et SUDOKU. Les résultats obtenus montrent clairement que les performances des configurations des modules PV dépendent fortement du scénario d'ombrage utilisé. L'analyse détaillée de chaque configuration à travers les scénarios d'ombrage proposés montrent que le choix de la configuration SUDOKU est plus optimal lorsque l'ombrage affecte un système photovoltaïque.

D'autre part, cette étude a démontrée que l'emplacement approprié des modules ombragés dans le champ joue un rôle très important pour l'amélioration du rendement des installations PV.

Comme perspective de ce travail, nous préconisons de réaliser un circuit électronique qui permet la reconfiguration instantanée des modules PV constituant le champ. Ce circuit qui est doté de capteurs cherche en instantané la configuration optimale et l'arrangement approprié pour assurer les très hautes performances possible d'une telle installation PV.

Bibliographie

Chapitre 01 :

- [1]: IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [2]: www.unep.org/fr/themes/energie.
- [3]: Bpifrance. (2024, 4 octobre). *Énergies renouvelables (EnR) : définition, types, avantages et limites*.
- [4] : Différence entre énergie renouvelable et non renouvelable? - Meilleurtaux Energie
- [5] : Énergie renouvelable dans le monde : état des lieux et perspectives .
- [6] : Consommation d'énergie primaire dans le monde et prévisions. | Download Scientific Diagram.
- [7] : E. KABANSHI, "Étude et conception d'un système de régulation automatique de la fréquence et de la tension de sortie d'une hydrolienne en fonction de la vitesse de la roue (cas du projet d'électrification décentralisée de la ferme Benjin Agriculture," 2007.
- [8] : Energie renouvelable : sources et données de production 2024.
- [9] : Analyse du marché des énergies renouvelables (Juin 2025).
- [10] : N. Benalouache, "L ' énergie solaire pour la production d ' électricité au Maghreb : transition énergétique et jeux d ' échelles L ' énergie solaire pour la production d ' électricité au Maghreb : transition énergétique et jeux d ' échelles Par : Nadia Benalouache," 2017.
- [11]: Memoire Online - Etude et conception d'un système de régulation automatique de la fréquence et de la tension de sortie d'une hydrolienne en fonction de la vitesse de la roue (cas du projet d'électrification décentralisée de la ferme Benjin Agriculture). - Eric KABANSHI.
- [12]: staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/boumaraf-farid/files/chapitre_4.pdf
- [13]: Schéma De Turbine Hydroélectrique
- [14]: La biomasse | biomasse-conseil.fr.
- [15]: F. R. Octobre, "Atlas du potentiel géothermique très basse énergie des aquifères de la région Nord-Pas de Calais," 2011.
- [16] : Environnement. Tremblements de terre et géothermie autour de Strasbourg : ce que l'on sait.
- [17]: " ABDOULAYB MAMADIE SYLLA« Modélisation D'un Émulateur Éolien À Basé de Machiné Asynchrone À Double Alimentation »HIVER 2013 ".
- [18]: Energie éolienne : réaliser des économies, générer des revenus | Pratique.fr.
- [19]: Composition et fonctionnement d'une éolienne : éléments et schéma.

[20]: Furfari, S. (2018, July 22). L'hydrogène, l'éternelle illusion | Science, climat et énergie. <https://www.science-climat-energie.be/2018/07/22/lhydrogene-leternelle-illusion/>

[21]: Énergie solaire : le déploiement de panneaux solaires dans les champs sera limité.

[22]: E. D. Histórica, U. N. A. Propuesta, P. El, D. Del, and P. Histórico, "L e p p," pp. 1–10.

[23]: 9 : Rayonnement solaire global quotidien moyen en kwh/m² pendant l'année | Download Scientific Diagram.

[24]: U. Bejaia, "Les opportunités de la technologie CSP « concentrating solar power » dans la génération d ' électricité renouvelable en Algérie Remerciements," 2013.

[25]: Figure 1 from Production de bioéthanol à partir des déchets de l'industrie de transformation de pomme de terre | Semantic Scholar.

[26] : Les énergies renouvelables sont-elles vraiment une solution écologique

Chapitre 02 :

[27] : Improvement of Self-Predictive Incremental Conductance Algorithm with the Ability to Detect Dynamic Conditions

[28] : Qu'est-ce qu'un module solaire photovoltaïque - Électronique Facile Top

[29] : Prix panneaux photovoltaïque –

Chapitre 03 :

[30]:Parlak KS, Can H. Une nouvelle méthode MPPT pour les systèmes de panneaux photovoltaïques dans des conditions partiellement ombragées. Dans : 3ème IEEE international...

[31]:Bidram, Ali, Davoudi, Ali, Balog, Robert S., 2012. Techniques de contrôle et de circuits pour atténuer les effets d'ombrage partiel dans les panneaux photovoltaïques. IEEE J. Photovoltaic 2 (4), 532-546

Chapitre 04 :

[32]:Ellabban, O., H. Abu-Rub, et F. Blaabjerg. 2014. "Ressources Énergétiques Renouvelables : État Actuel, Perspectives Futures et leurs Technologies Facilitrices." Revue des Énergies Renouvelables et Durables 39 : 748–64.

[33]:Yang, H., W. Zhou, et C. Lou. 2009. « Conception optimale et analyse techno-économique d'un système de génération d'énergie hybride solaire-éolien. » Applied Energy 86 (2) : 163-9.

[34]:Hanson, A. J., C. A. Deline, S. M. MacAlpine, J. T. Stauth, et C.R. Sullivan. 2014. « Évaluation de l'ombrage partiel des installations photovoltaïques via la surveillance au niveau des modules. » IEEE Journal of Photovoltaics 4 (6) : 1618–24.

- [35]:Kim, K. A., et P. T. Krein. 2013. « Analyse des points chauds photovoltaïques pour des cellules avec diverses caractéristiques de polarisation inverse à travers des simulations électriques et thermiques. » Dans le 14^{ème} atelier IEEE sur le contrôle et la modélisation pour l'électronique de puissance (COMPEL), 1–8. Salt Lake City : IEEE.
- [36]:Ishaque, K., Z. Salam, et H. Taheri. 2011. « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque (Pv) en cas d'ombrage partiel basé sur un modèle à deux diodes. » *Simulation Modelling Practice and Theory* 19 (7) : 1613–26.
- [37] : Iraj, F.; Farjah, E.; Ghanbari, T. Optimisation method to find the best switch set topology for reconfiguration of photovoltaic panels. *IET Renew. Power Gener.* **2018**, *12*, 374–379. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
- [38] : Bertram Felgenhauer and Frazer Jarvis. <http://www.afjarvis.staff.shef.ac.uk/sudoku/>.
- [39] : Ed Russell and Frazer Jarvis. <http://www.afjarvis.staff.shef.ac.uk/sudoku/sudgroup.html>.
- [40] : Laburthe, F., Rochart, G., & Jussien, N. (2006). Évaluer la difficulté d'une grille de sudoku à l'aide d'un modèle contraintes. In *Deuxièmes Journées Francophones de Programmation par Contraintes (JFPC06)*.