

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
Et de la Recherche Scientifique
Université Saad Dahlab Blida-1



Faculté de Technologie
Département des Énergies Renouvelables

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE
Pour l'obtention du diplôme
MASTER EN ENERGIES RENOUVELABLES
OPTION : Conversion Photovoltaïque

Thème :

Modélisation De Différentes Configurations Des Réseaux Photovoltaïques
Pour La Prévision Des Pics De Puissance Dans Des Conditions D'ombrage
Partiel : Analyse Approfondie Dans Les Applications BIPV

Présenté par :

BOUACIDA Amel
ZARZAR Maroua

Soutenu devant le jury composé par :

Mr. Doumaz Toufik	M.A.A	USDB1	Président
Mr. Boukenoui Rachid	M.C.B	USDB1	Encadreur
Mr. Ait Sahed Oussama	M.C.B	USDB1	Co-Encadreur
Mlle. Bedia Asma	M.C.B	USDB1	Examineur

11 Juillet 2021



Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier DIEU, le tout puissant qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nos chers parents, pour tous leurs sacrifices, leurs amours, leurs tendresses, leurs soutiens et leurs prières tout au long de nos études.

En second lieu nous tenons à remercier nos encadreurs *Dr Boukenouí. R* et *Dr Aít Sahed. O* pour l'orientation, la confiance, la patience qui a constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené à bon port. Qu'ils trouvent dans leurs travaux un hommage vivant à leurs hautes personnalités.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury *Dr DoumaZ. T* et *Dr Bedia. A* pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci à toutes et à tous.





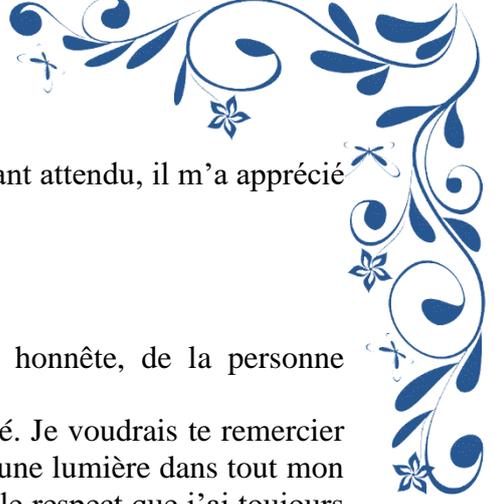
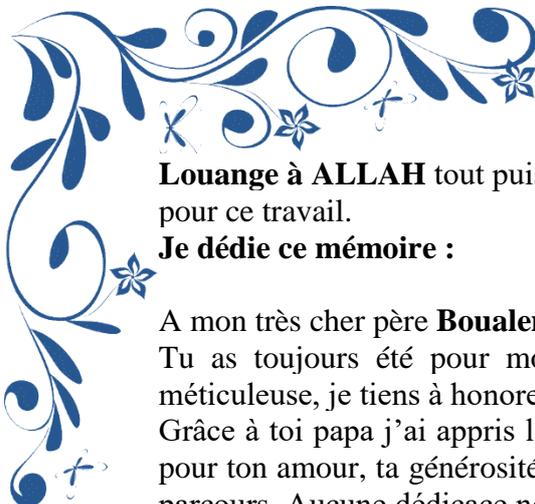
Dédicaces

Je dédie ce travail :

- ♥ A celle qui m'a arrosé de tendresse et d'espoir, à la source d'amour incessible, à la mère des sentiments fragiles qui m'a bénie par ces prières, à ma mère pour son amour inépuisable, Ceci est le fruit de sa patience.
- ♥ A mon support dans la vie, qui m'a appris, m'a supporté, et m'a dirigé vers la gloire,
À mon cher papa, je te dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain et je ferais toujours de mon mieux pour rester ta fierté et ne jamais te décevoir.
- ♥ A ma Mira, ma meilleure amie, ma complice, et mon autre moitié qui m'a toujours soutenu.
- ♥ A mon frère Ouassim. Je te souhaite de recevoir autant d'amour et d'attention que tu m'as offerte.
- ♥ Et finalement à la personne dont je ne pourrai pas mettre son nom ici, Merci.

Amel ♥





Louange à ALLAH tout puissant, qui m'a permis de voir ce jour tant attendu, il m'a apprécié pour ce travail.

Je dédie ce mémoire :

A mon très cher père **Boualem**

Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je tiens à honorer l'homme que tu es.

Grâce à toi papa j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité. Je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension... Ton soutien fut une lumière dans tout mon parcours. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que tu as déployés pour mon éducation et ma formation. Je t'aime papa et j'implore le tout-puissant pour qu'il t'accorde une bonne santé et une vie longue et heureuse.

A ma meilleur mère **Amel**

Aucune dédicace très chère maman, ne pourrait exprimer la profondeur des sentiments que j'éprouve pour vous, vos sacrifices innombrables et votre dévouement firent pour moi un encouragement. Vous avez guetté mes pas, et m'avez couvé de tendresse, ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Vous m'avez aidé et soutenu pendant de nombreuses années avec à chaque fois une attention renouvelée. Puisse DIEU, tout puissant vous combler de santé, de bonheur et vous procurer une longue vie.

A ma chère sœur **Saliha** et son mari **Lotfi** et ma nièce **Iline**

En signe de l'affection et du grand amour que je vous porte, les mots sont insuffisants pour exprimer ma profonde estime. Je vous dédie ce travail en témoignage de ma profonde affection et de mon attachement indéfectible. Que DIEU vous accorde santé, succès et félicité pour faire de vous un couple uni et heureux à jamais. Que DIEU protège Saliha et Lotfi et notre ange Iline.

A ma petite adorable sœur **Kawther**

Aucune dédicace ne peut exprimer mon amour et ma gratitude de t'avoir comme sœur. Je ne pourrais jamais imaginer la vie sans toi, tu comptes énormément pour moi, tu es la sœur qui assure son rôle comme il faut, je n'oublierais jamais ton encouragement et ton soutien le long de mes études, je t'estime beaucoup et je t'aime beaucoup. Je te souhaite beaucoup de succès surtout à l'examen du BAC, de prospérité et une vie pleine de joie et de bonheur.

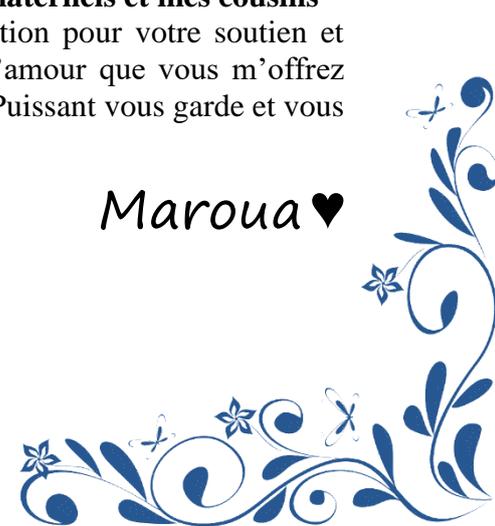
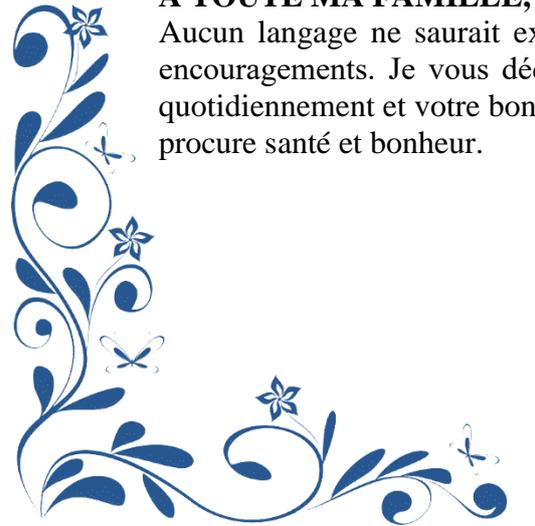
A ma chère tante **Sabrina**

Ta présence à mes côtés m'a toujours donné l'impression d'être forte. Je voudrais t'exprimer à travers ces quelques lignes tout l'amour et toute l'affection que j'ai pour toi. Je t'aime ma belle je te souhaite une vie pleine de joie et de réussite.

A TOUTE MA FAMILLE, Mes tantes et oncles paternelles et maternels et mes cousins

Aucun langage ne saurait exprimer mon respect et ma considération pour votre soutien et encouragements. Je vous dédie ce travail en reconnaissance de l'amour que vous m'offrez quotidiennement et votre bonté exceptionnelle. Que DIEU le Tout Puissant vous garde et vous procure santé et bonheur.

Maroua ♥



ملخص

يقدم هذا العمل تحليلاً شاملاً للتكوينات المختلفة للألواح الكهروضوئية (PV) للاستخدام الفعال في الطاقة الكهروضوئية للمباني الحضرية (BIPV) تحت ظروف التظليل الجزئي. يمكن أن يكون البحث عن أماكن بدون تظليل متكرر لثبيت الأنظمة الكهروضوئية حلاً فعالاً للتخفيف من التأثير السلبي للتظليل الجزئي (PS) على كفاءة التحويل الكهروضوئية. ومع ذلك، من الناحية العملية، لا يمكن تجنب الظل على المولدات الكهروضوئية في معظم التركيبات، خاصة في أنظمة البناء الكهروضوئية المتكاملة (BIPV). الهدف من هذه الدراسة هو اكتشاف أفضل ترتيب كهربائي للوحدات الكهروضوئية المظللة جزئياً لتحسين أداء النظام الكهروضوئي من خلال تحليل ثمانية عشر تكويناً (SP، BL، HC، TCT... إلخ) من حيث أقصى طاقة مولدة دون تغيير مواقع الوحدات الكهروضوئية داخل المصفوفات الكهروضوئية. ستعتمد الدراسة على استخدام برنامج MATLAB-Simulink لنمذجة هذه التكوينات من خلال استخدام نموذج للوحدة الكهروضوئية التي تم التحقق منها بالفعل بشكل تجريبي. الكلمات الرئيسية: نظام الكهروضوئية، ترتيب، Série-Parallèle, Honey-Comb, Bridge-Linked, Total Cross Tied، أنماط التظليل، عامل التعبئة، الحد الأقصى للطاقة، خسائر عدم التطابق.

Résumé

Ce travail présente une analyse complète des différentes configurations de modules Photovoltaïques (PV) pour une utilisation efficace dans les applications PV intégrées au bâtiment (BIPV) dans des conditions d'ombrage partiel dans les zones urbaines.

La recherche d'endroits sans ombrage fréquent pour installer des systèmes PVs peut être une solution efficace pour atténuer l'impact négatif de l'ombrage partiel (PS) sur l'efficacité de la conversion photovoltaïque. Cependant, dans la pratique, l'irradiance non-uniforme des générateurs PV n'est pas évitable dans la plupart des installations, en particulier dans les systèmes PV intégrés au bâtiment (BIPV).

Le but de cette étude est de découvrir la meilleure configuration électrique des modules PV partiellement ombragés pour améliorer les performances du système PV en analysant dix-huit configurations (SP, BL, HC, TCT..., etc.) en termes de la puissance de sortie maximale sans changer l'emplacements physique des modules dans un réseau PV.

L'étude sera basée sur l'utilisation de logiciel Matlab-Simulink pour la modélisation de ces configurations en utilisant un modèle d'un module PV qui a été déjà vérifié expérimentalement.

Mots clefs : Un système PV, Configuration, Série-Parallèle, Honey Comb, Bridge-Linked, Total Cross Tied, les motifs d'ombrage, Facteur de forme, Point de puissance maximal, Pertes de puissance.

Abstract

This work presents a comprehensive analysis of different configurations of photovoltaic modules for efficient use in building integrated photovoltaic (BIPV) applications under partial shading conditions.

Looking for places without frequent shadowing to install PV systems can be an effective solution to alleviate the negative impact of Partial Shading (PS) on the Photovoltaic conversion efficiency. However, practically, the non-uniformity of irradiance of PV generators is not avoidable in most installations, especially in Building Integrated PV (BIPV) systems,

The aim of this study is to discover the best electrical configuration of partially shaded PV modules to improve the performance of the PV system by analyzing eighteen configurations (SP, BL, HC, TCT..., etc.) in terms of maximum output power without changing the physical locations of PV modules within the PV arrays.

The study will be based on the use of MATLAB-Simulink software for modeling of these configurations by employing a model of a PV module which has already been verified experimentally.

Keywords: PV system, Configuration, Series-Parallel, Honey Comb, Bridge-Linked, Total Cross Tied, Shading patterns, Fill Factor, Global Maximum Power Point, mismatch losses.

Liste des symboles et Abréviations

STC	Standard test condition (condition de test standard).
PV	Photovoltaïque.
G	Irradiance solaire en W/m^2 .
E_g	Energie de gap.
q	Charge d'électron $1,602 \cdot 10^{-19}C$.
k_B	Constante de Boltzmann $1,3854 \cdot 10^{-23} J/K$.
T	Température effective de la cellule.
FF	Facteur de forme.
I	Courant fourni par le Générateur PV.
V	Tension aux bornes du Générateur PV.
I_d	Courant de la diode
GPV	Générateur Photovoltaïque
I_{ph}	Photo-courant, dépendant de l'intensité de l'irradiation.
I_{sh}	Courant dérivé par la résistance parallèle.
I_s	Courant de saturation de diode, dépendant de la température.
I_{cc}	Courant de court-circuit.
V_{co}	Tension de circuit ouvert.
V_{th}	Tension thermique.
R_{sh}	Résistance parallèle, représentant l'admittance parallèle du générateur de courant
R_s	Résistance série, modélisant les pertes ohmiques du matériau et des contacts
I-V	Caractéristique courant-tension
P-V	Caractéristique puissance-tension
SP	Série Parallèle.
TCT	Totale-Cross-Tied
HC	Honey Comb.
BL	Bridge-Linked.
MS	Magic square
DS	Dominance Square
GMPP	Global Maximum Power Point (Point de puissance global)

Table des matières

Introduction Générale	1
Chapitre I	5
I.1 La cellule photovoltaïque	7
I.2 Fonctionnement d'une cellule	7
I.3 Circuit électrique équivalent d'une cellule.....	8
I.4 Caractéristique d'une cellule solaire	10
I.4.1 Tension en circuit ouvert	10
I.4.2 Courant de court-circuit	10
I.4.3 Point de fonctionnement P_{mpp} (V_{mpp} , I_{mpp}).....	10
I.4.4 Facteur de forme	10
I.4.5 Le rendement	11
I.5 Cellules mise en série	11
I.6 Cellules mise en parallèle.....	12
I.7 Générateur PV	13
Chapitre II	14
II.1 Présentation de MATLAB/SIMSCAPE.....	16
II .1.1 Modélisation physique (Simscape) d'un GPV.....	16
II.2 Influence de l'éclairement sur le GPV	18
II.3 Influence de la température	19
II.4 L'ombrage partiel.....	19
II .4.1 L'ombrage partiel dans les applications BIPV	20
II .4.2 La diode by-pass	21
II .4.3 Effet d'éclairement non homogène sur le GPV	22
II.5 Conclusion.....	24
Chapitre III	25
A. Présentation	27
III.1 La Configuration Série-Parallèle (SP).....	27
III.2 Honey-Comb (HC).....	27
III.3 Total-Cross-Tied (TCT)	28
III.5 Alternative Trie-Tie (ATT)	29
III .6 Alternate TCT-BL	30
III .7 Modified Bridge-Linked (MBL)	31
III .8 Série-Parallèle- Total-Cross-Tied (SPTCT)	32

III .9	Cross-Tied- Honey- Comb (CT-HC).....	32
III .10	Triple-Tied (TT)	33
III .11	Ladder-Diagram (LD).....	33
III .12	Triple-Tied-Cross-Linked (TTCL)	34
III .13	Hybrid HC-TCT	34
III .14	Modified Bridge-Linked (MB).....	35
III .15	BL-TCT	35
III .16	Sudoku	36
III .17	Magic-Square (MS)	37
III .18	Dominance square	38
B.	Modélisation.....	39
C.	Les différents motifs d’ombrage :	44
	□ Condition d’essai standard (STC)	44
	□ Coin (Corner)	45
	□ Centre (Center).....	45
	□ Côté droit (Right side).....	45
	□ Bas (Bottom)	45
	□ En forme de L (L shaped).....	45
	□ Cadre (Frame)	45
	□ Aléatoire (Random).....	45
	□ Court et long (Short and Long)	45
	□ Diagonale	46
	□ Court (Short)	46
	□ Long	46
	Chapitre IV	48
IV.1.	Résultats de simulation des différentes configurations	50
IV.2.	Evaluation des performances des différentes configurations PV	62
IV.3.	Discussions des résultats	75
IV.4.	Conclusion	76
	Conclusion générale	77
	Annexe A.....	83

Liste des figures

Chapitre 1

Figure I. 1 : structure d'une cellule solaire	7
Figure I. 2: Principe de fonctionnement d'une cellule solaire PV.	8
Figure I. 3: Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire.	9
Figure I. 4: Caractéristiques résultantes d'un groupement de NS cellules en série.	12
Figure I. 5: Caractéristiques résultantes d'un groupement de Np cellules en parallèle.	12
Figure I. 6: La composition d'un panneau solaire.	13
Figure I. 7: la structure GPV.	13

Chapitre 2

Figure II. 1: Le modèle Simscape d'un module photovoltaïque avec une résistance variable. 17	17
Figure II. 2: Les caractéristiques P-V et I-V d'un module PV.....	18
Figure II. 3: Influence de l'éclairement sur les caractéristiques d'un module PV.....	18
Figure II. 4: Influence de la température sur les caractéristiques d'un module PV.....	19
Figure II. 5: L'ombrage dans les applications BIPV.	20
Figure II. 6: L'effet d'ombrage sur les champs PV.....	21
Figure II. 7: La diode by-pass.	22
Figure II. 8: Connexion de 3 modules en parallèle.	22
Figure II. 9: Connexion de 3 modules en série.....	22
Figure II. 10: Caractéristiques d'un générateur de 3 modules en parallèle.....	23
Figure II. 11: Caractéristiques d'un générateur de 3 modules en série.....	23

Chapitre 3

Figure III. 1: Configuration Série-Parallèle	27
Figure III. 2: Configuration H-C	28
Figure III. 3: Configuration TCT	28
Figure III. 4: Configuration B-L	29
Figure III. 5: Configuration ATT	30
Figure III. 6: Configuration ATCT-BL	31
Figure III. 7: Configuration MBL	31
Figure III. 8: Configuration SPTCT.....	32
Figure III. 9: Configuration CT-HC.....	32
Figure III. 10: Configuration TT	33
Figure III. 11: LD configuration	33
Figure III. 12: Configuration TTCL.....	34
Figure III. 13: Configuration HCTCT	34
Figure III. 14: Configuration MB.....	35
Figure III. 15: Configuration BLTCT	35
Figure III. 16: Sudoku pattern	36
Figure III. 17: Simulink model Of Sudoku arrangement	36
Figure III. 18: MS pattern	37
Figure III. 19: Simulink model Of MS arrangement.....	38
Figure III. 20: TCT Arrangement	39
Figure III. 21: DS Arrangement.....	39
Figure III. 22 : Simulink model of DS configuration.....	39
Figure III. 23: Les modèles Simulink des différentes configurations	44
Figure III. 24: Les motifs d'ombrage.....	47

Chapitre 4

Figure IV. 1: P-V Caractéristiques des différentes configurations en STC	50
Figure IV. 2: P-V Caractéristiques des différentes configurations en corner condition	51
Figure IV. 3: P-V Caractéristiques des différentes configurations en center condition.....	52
Figure IV. 4: P-V Caractéristiques des différentes configurations en Bottom condition	53
Figure IV. 5: P-V Caractéristiques des différentes configurations en Right-Side condition ...	54
Figure IV. 6: P-V Caractéristiques des différentes configurations en L-Shaped condition.....	55
Figure IV. 7: P-V Caractéristiques des différentes configurations en Frame condition	56
Figure IV. 8: P-V Caractéristiques des différentes configurations en Random condition.....	57
Figure IV. 9: P-V Caractéristiques des différentes configurations en S and L condition	58
Figure IV. 10: P-V Caractéristiques des différentes configurations en Diagonal condition....	59
Figure IV. 11: P-V Caractéristiques des différentes configurations en Short condition.....	60
Figure IV. 12: P-V Caractéristiques des différentes configurations en Long condition	61
Figure IV. 13: GMPP des Configurations PV en STC.....	63
Figure IV. 14: GMPP des Configurations PV en Corner	64
Figure IV. 15: GMPP des Configurations PV en Center	65
Figure IV. 16: GMPP des Configurations PV en Bottom.	66
Figure IV. 17 :GMPP des Configurations PV en Right-Side.....	67
Figure IV. 18: GMPP des Configurations PV en L-Shaped.	68
Figure IV. 19: GMPP des Configurations PV en Frame	69
Figure IV. 20: GMPP des Configurations PV en Random	70
Figure IV. 21: GMPP des Configurations PV en Short and Long	71
Figure IV. 22: GMPP des Configurations PV en Diagonal	72
Figure IV. 23: GMPP des Configurations PV en Short	73
Figure IV. 24: GMPP des Configurations PV en Long.....	74

Liste des Tableaux

Chapitre 4

Table I : Résultats de simulation des différentes configurations en STC.	50
Table II: Résultats de la simulation des différentes configurations en Corner	51
Tab III: Résultats de la simulation des différentes configurations en Center	52
Table IV: Résultats de la simulation des différentes configurations en BOTTOM.....	53
Table V: Résultats de la simulation des différentes configurations en Right-Side	54
Table VI: Résultats de la simulation des différentes configurations en L-Shaped	55
Table VII: Résultats de la simulation des différentes configurations en Frame	56
Table VIII: Résultats de la simulation des différentes configurations en Random.....	57
Table IX: Résultats de la simulation des différentes configurations en Short and long	58
Table X: Résultats de la simulation des différentes configurations en Diagonal.....	59
Table XI: Résultats de la simulation des différentes configurations en Short	60
Table XII: Résultats de la simulation des différentes configurations en Long	61
Table XIII : Les pertes de puissance et FF pour le motif uniforme	63
Table XIV: Les pertes de puissance et FF pour le motif Corner.....	64
Table XV: Les pertes de puissance et FF pour le motif Center	65
Table XVI: Les pertes de puissance FF pour le motif Bottom.....	66
Table XVII: Les pertes de puissance et le FF pour le motif Right-Side	67
Table XVIII: Les pertes de puissance et FF pour le motif L-Shaped	68
Table XIX: Les pertes de puissance et le FF pour le motif Frame.....	69
Table XX: Les pertes de puissance et le FF pour le motif Random.....	70
Table XXI: Les pertes de puissance et le FF pour le motif S and L	71
Table XXII: Les pertes de puissance et le FF pour le motif Diagonal.....	72
Table XXIII: Les pertes de puissance et le FF pour le motif Short	73
Table XXIV: Les pertes de puissance et le FF pour le motif Long	74

Introduction Générale

Avec la tendance et l'augmentation de la demande d'énergie ces dernières années, les sources d'énergie durables sont largement utilisées pour répondre à la demande d'énergie. Ainsi, l'utilisation de sources d'énergie durables est la nécessité de l'heure.

Parmi ces sources durables, l'énergie solaire est la principale énergie non polluante qui peut être utilisée pour la cause. Des cellules et modules photovoltaïques (PV) sont utilisés pour obtenir de l'électricité à partir de l'énergie solaire. Mais la puissance fournie par un Générateur Photovoltaïque (GPV) diminue considérablement en raison d'une condition d'irradiance non uniforme.

Concernant ce problème, de nombreuses solutions ont été proposées pour améliorer l'efficacité des systèmes PV. Ces solutions peuvent appartenir à deux groupes principaux, les solutions software et hardware.

Les solutions software concernent les méthodes MPPT qui identifient correctement le GMPP global du système PV [1, 2]

Les techniques MPPT conventionnelles telles que Perturb & Observe (P&O) [3], Incremental Conductance (InCond) [4] et Hill Climbing (HC) sont toutes basées sur la poursuite du point de puissance maximale d'une caractéristique P-V auquel la dérivée de la puissance par rapport à la tension ou au rapport cyclique est nulle. Par conséquent, lorsqu'ils sont utilisés pour suivre le MPP d'un modules PV partiellement ombragés (PS), ils ne parviendraient pas à suivre le MPP approprié et par conséquent des pertes de puissance supplémentaires en résulteraient [5].

Cela explique la nécessité de développer un algorithme MPPT approprié capable de faire face au problème de l'ombrage partiel et d'assurer par la suite une meilleure efficacité et fiabilité.

Dans ce contexte, certaines techniques MPPT conventionnelles ont été modifiées ou combinées avec d'autres méthodes méta heuristiques pour échapper aux points de puissance locaux (LMPPs) et donc correctement identifiées le GMPP. Cependant, ce type de solution présente un niveau de complexité élevé en termes d'algorithme et d'implémentation, ce qui engendre un temps de calcul élevé et une mémoire d'implémentation saturée.

Les solutions Hardware incluent les connexions de réseau [6-9]. Ces derniers définissent la manière dont les modules PV dans un réseau PV sont connectés. La réduction de la puissance de sortie n'est pas directement proportionnelle à la zone d'ombrage mais dépend du motif d'ombrage, de la configuration du GPV et de l'emplacement physique des modules et des diodes bypass.

L'objectif principal de ce travail est :

- Utiliser un module PV ET-M53620WW qui a été déjà validé expérimentalement [10] pour Modéliser et simuler les différentes configurations des modules photovoltaïques pour extraire la puissance maximale et diminuer le courant qui traverse les cellules PV ombragées et donc de maintenir la polarisation des diodes Bypass en inverse, en atténuant également les pertes de puissance.
- Évaluer les performances de dix-huit configurations de modules PV (SP, BL, HC, TCT..., etc.) Sous différents motifs d'ombrage (i.e., Uniform, corner, center, diagonal, L-shaped, Random...etc.)
- Analyser les caractéristiques électriques à la sortie du GPV (i.e., courant, tension et puissance)

L'évaluation des performances des configurations des modules photovoltaïques a pour but d'identifier la configuration la moins sensible à l'effet d'ombrage pour qu'elle soit utilisée dans la conception des systèmes photovoltaïques intégrés aux bâtiments.

En plus d'une introduction et une conclusion générale, qui contient une synthèse des travaux réalisés et les principaux résultats obtenus, le présent travail est subdivisé en quatre chapitres organisés comme suit :

- Le premier chapitre présente des généralités sur les systèmes solaires PV et des notions fondamentales sur l'élément clé dans la conversion PV.
- Dans le deuxième chapitre, nous allons examiner et analyser les performances des GPV à diverses insolation, température et l'ombrage non Uniform et leur relation avec la puissance de sortie sera étudiée dans l'environnement MATLAB / Simulink.
- Dans le troisième chapitre on se concentre sur la présentation et la description des configurations PV et la modélisation sous plusieurs motifs d'ombrage pour extraire une puissance maximale.
- Le quatrième chapitre est consacré pour les résultats et la comparaison des performances pour faire le choix de la configuration PV optimale. Finalement,

L'Annexe A présente les paramètres électriques du module PV ET-M53620WW utilisé pour la modélisation et la simulation des configurations photovoltaïques.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes solaires PV

« Croyez en vos rêves et ils se réaliseront peut-être. Croyez en vous et ils se réaliseront
Sûrement »
Martin Luther King

Introduction

L'énergie solaire PV est l'une des énergies renouvelables et la plus utilisée. Elle consiste à convertir directement le rayonnement électromagnétique solaire en électricité. Elle utilise pour ce faire des convertisseurs PV qui représentent l'élément de base dans la conversion PV.

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur les systèmes PV et des notions fondamentales sur l'élément clé dans la conversion PV.

« La cellule solaire ».

I.1 La cellule photovoltaïque

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation PV. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs qui transforment directement l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Pour répondre à des besoins plus importants, elle est assemblée en modules solaires photovoltaïques, que nous appelons couramment des modules solaires.

Les cellules photovoltaïques sont constituées comme montre Figure I. 1 :

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

Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouche réfléchissante juste en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement[11].

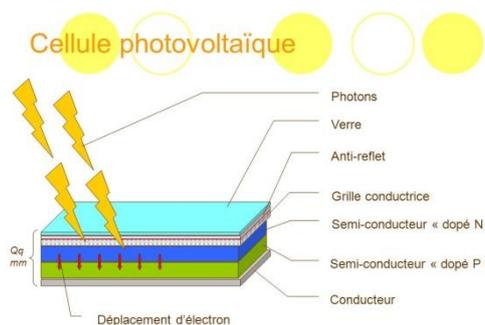


Figure I. 1 : structure d'une cellule solaire

I.2 Fonctionnement d'une cellule

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants[11]:

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

- Collecte des particules générées dans le dispositif.

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

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électron/trou créées est nécessaire.

Pour cela on utilise le plus souvent une jonction PN d'autres structures, comme les Hété-jonctions et les Schottky peuvent également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïque est illustré sur la Figure I. 2.

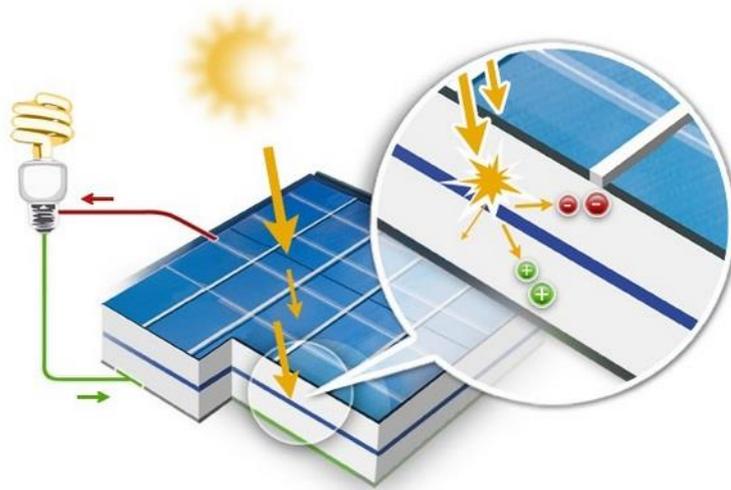


Figure I. 2: Principe de fonctionnement d'une cellule solaire PV.

I.3 Circuit électrique équivalent d'une cellule

Le circuit équivalent d'un système électrique est fréquemment utilisé afin de décrire son comportement électrique à l'aide de composants électriques élémentaires (source, résistance, diode, bobine, condensateur, etc.).

L'expérience montre qu'à l'obscurité une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique, elle commence à conduire lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil V_s [12].

Dans le cas d'une cellule idéale à l'obscurité : les caractéristiques I-V peut être représenté par la relation suivant :

$$I_{obs} = I_s \left[e^{\frac{V}{nV_{th}}} - 1 \right] \quad (I)$$

Où

I_s : le courant de saturation en (A).

n : le facteur de qualité de la diode.

V_{th} : Le potentiel thermique en (V), il est donné par : $V_{th} = \frac{KT}{q}$

K : la constante de Boltzmann (1.38066×10^{-23} J/K = 8.61400×10^{-5} eV/K).

T : la température absolue en Kelvin (K).

q : la charge absolue d'un électron en coulomb (1.60281×10^{-19} C).

Sous éclaircissement : un terme I_{ph} tenant compte du photo-courant généré est rajouté, On obtient le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale sous éclaircissement qui est représenté par l'équation suivante[11] :

$$I = I_{ph} - I_{obs} = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{V}{nV_{th}}} - 1 \right] \quad (II)$$

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs et des fuites vers les bords, qu'ils doivent être pris en considération

Et l'équation de la caractéristique I-V devient alors[13] :

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{V+IR_s}{nV_{th}}} - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (III)$$

Et par conséquent le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle est représenté sur la Figure I. 3 par un générateur de courant (I_{ph}), une diode et deux résistances parasites (R_s) et (R_{sh}).

Elles sont liées à l'impédance des électrodes et du matériau, il en résulte que la tension V aux bornes de la cellule est différente de la tension aux bornes de la jonction. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.

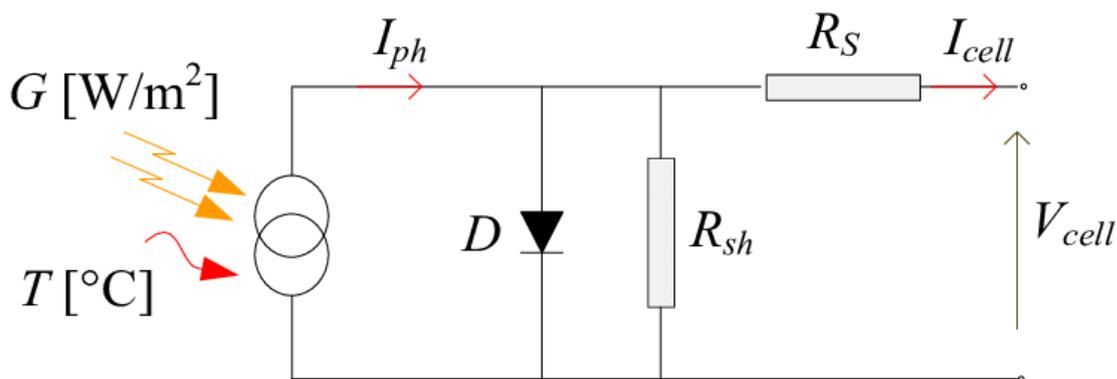


Figure I. 3: Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire.

- Le générateur du courant (I_{ph}) : délivre le courant I_{ph} correspondant au courant photogène.
- La diode (D) : modélise la jonction P-N.
- La résistance série R_s : modélise les pertes résistives au sein de la photopile.
- La résistance parallèle R_p (résistance shunt R_{sh}) : correspond à une résistance de fuite entre les deux zones N et P de la jonction ; il en résulte qu'une partie du courant I_{ph} sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge. Cette résistance devra être la plus élevée possible[11].

I.4 Caractéristique d'une cellule solaire

Les caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque sont caractérisées par un certain nombre de paramètres extraits de la caractéristique courant-tension[14].

I.4.1 Tension en circuit ouvert

C'est la tension mesurée aux bornes de la cellule et pour laquelle le courant débité par la cellule solaire est nul, elle est donnée par la relation :

$$V_{oc} = nV_{th} \log \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (IV)$$

I.4.2 Courant de court-circuit

En court-circuit $V=0$:

$$D'où \quad I_{cc} = I_{ph} \quad (V)$$

I.4.3 Point de fonctionnement P_{mpp} (V_{mpp} , I_{mpp})

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance, elle est donnée par la relation :

$$P_{mpp} = I_{mpp} \times V_{mpp} \quad (VI)$$

Elle traduit sur la caractéristique I-V le point du fonctionnement P_{mpp} (V_{mpp} , I_{mpp}) qui est situé au coude de la caractéristique I-V et dit point de puissance maximale où les valeurs de tension V_{mpp} et du courant I_{mpp} appelées également tension et courant maximums respectivement [14].

I.4.4 Facteur de forme

A l'aide de la caractéristique courant-tension d'une cellule dans l'obscurité et sous éclairage, il est possible d'évaluer les performances et le comportement électrique de la cellule photovoltaïque, donc le facteur de forme (FF) est défini comme le rapport entre la puissance maximale et le produit (I_{cc} , V_{co}), d'où il est donné par la relation :

$$FF = \frac{P_{mpp}}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (VII)$$

Ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en (%) qualifie la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique I-V de la cellule solaire. Si celle-ci était carrée le facteur de forme serait égale à 1, la puissance P_{mpp} sera égale à (I_{cc}, V_{co}) [14].

I.4.5 Le rendement

Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire absorbant par la cellule.

Si S est la surface de la cellule (m^2) et E est l'éclairement-irradiante (en W/m^2).

Le rendement énergétique s'écrit [12]:

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{S \times P_{inc}} \quad (VIII)$$

D'où :

P_{inc} : Puissance incident.

S : surface de la cellule photovoltaïque.

I.5 Cellules mise en série

Une association de N_S cellules en série permet d'augmenter la tension du GPV.

Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule.

La Figure I. 4 résume les caractéristiques électriques d'une association série de N_S cellules.

$$V_{co_{N_S}} = V_{co} \times N_S \quad (IX)$$

V_{co} : la tension du circuit ouvert

Ce système d'association est généralement le plus communément et utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce.

Comme la surface des cellules devient de plus importante, le courant par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible. L'association en série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble[12].

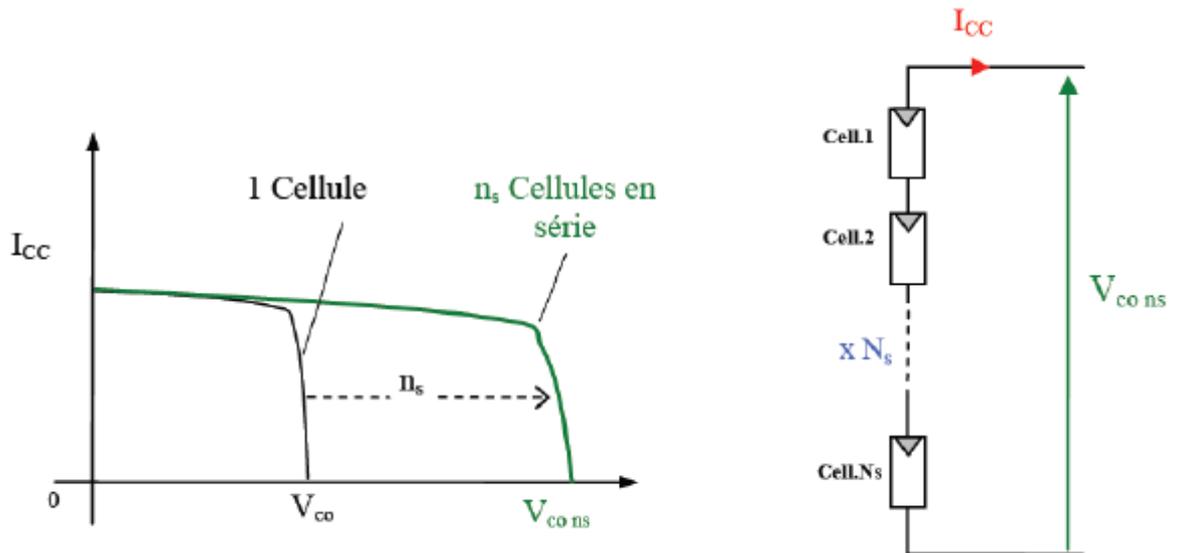


Figure I. 4: Caractéristiques résultantes d'un groupement de NS cellules en série.

I.6 Cellules mise en parallèle

D'autre part, une association parallèle de N_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie de générateur ainsi créé.

Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants. La Figure I. 5 résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de NP cellules.

$$I_{cc_{np}} = N_p \times I_{cc} \quad (X)$$

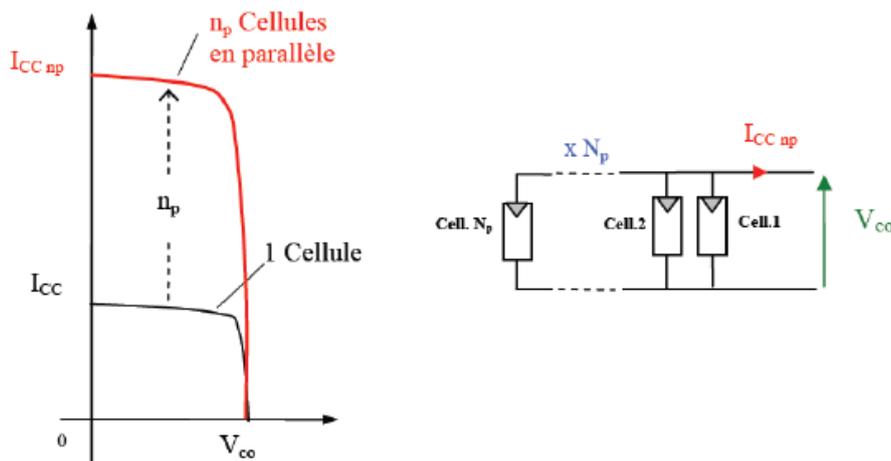


Figure I. 5: Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_p cellules en parallèle.

Si l'on désire avoir un GPV ayant une courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement, soit associer en parallèle plusieurs modules PV de caractéristiques similaires. Pour qu'un GPV ainsi constitué puisse fonctionner de façon optimale, il faut que les (NS, NP) cellules se comportent toutes de façon

identique. Elles doivent pour cela être issues de la même technologie, des mêmes conditions de fonctionnement (éclairage, température, vieillissement et inclinaison).

I.7 Générateur PV

Un GPV est utilisé pour produire et générer une énergie électrique à partir de la lumière solaire (rayonnement solaire, insolation). En règle générale, un GPV se compose de cellules PV. Les dispositifs PV sont disponibles sous forme d'ensembles de cellules PV connectées en série et/ou en parallèle combinées en un seul élément étanche (protection contre l'humidité, les chocs et autres nuisances), Communément appelé module PV. La Figure I.6 montre en détail la composition d'un panneau solaire[15].

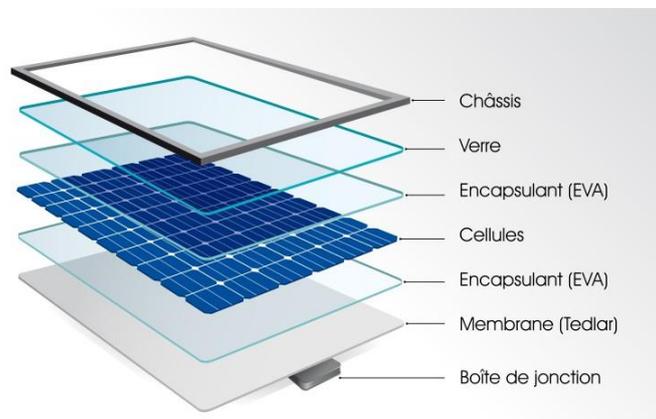


Figure I. 6: La composition d'un panneau solaire.

La connexion en série de plusieurs modules PV constitue une chaîne PV. Il convient de mentionner que le nombre de modules PV connectés en série dans une même chaîne PV est lié à la tension requise à la sortie[15]. Enfin, un champ photovoltaïque est formé de deux ou plusieurs chaînes PV connectées en parallèle, dans le but de générer une puissance requise.

La figure I. 7 jointe illustre la structure GPV.

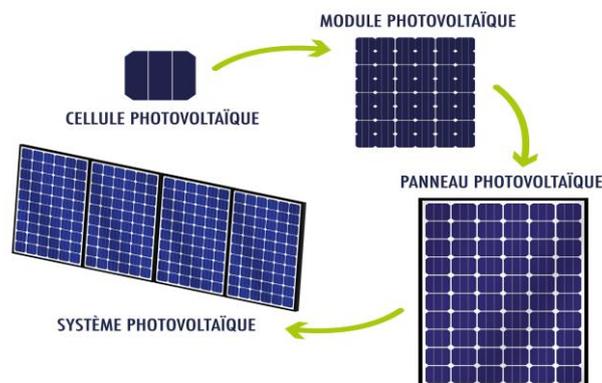


Figure I. 7: la structure GPV.

Chapitre II

Modélisation d'un GPV

« Tout est possible à qui rêve, ose, travaille et n'abandonne jamais »

Xavier Dolan

Introduction

Comme la production d'électricité PV devient de plus en plus attrayante en raison de la disponibilité des ressources et des avantages environnementaux, il est très important de contrôler et d'optimiser la puissance de sortie pour assurer la stabilité et la sécurité du système électrique.

Dans ce chapitre, l'analyse des performances des GPV à divers niveaux d'éclairages, températures et d'ombrage partiel seront examinés et leur relation avec la puissance de sortie sera étudiée dans l'environnement MATLAB / Simulink.

II.1 Présentation de MATLAB/SIMSCAPE

- MATLAB est un langage de calcul scientifique créé en 1984 par Math Works.
- Simulink est un outil de conception visuel, intégré à l'environnement MATLAB. Il fournit un environnement de modélisation graphique par schéma-blocs. Parmi les bibliothèques Simulink on trouve : Simscape, Stateflow, SimMechanics, SimElectronics et SimPowerSystems.
- Simscape est la plateforme de modélisation physique et multi physique de Simulink. Simscape est utilisé pour de la modélisation physique multi domaines (mécanique, électrique, hydraulique, ...). Les bibliothèques de Simscape sont composées de différents blocs (composants physiques) dans différents domaines (cellule solaire, voltmètre, ampèremètre, résistance variable, condensateur, ampli op, sources, amortisseur, moteur courant continu, asynchrone etc....)



II .1.1 Modélisation physique (Simscape) d'un GPV

Un module PV est constitué essentiellement des cellules PV et des diodes By-pass, d'où la modélisation dans l'environnement Simscape consiste à utiliser les outils constitués de blocs de composants physiques (Solar-cell block, by-pass diode bloc) et des connexions physiques pour connecter ensemble toute configuration de pièces photovoltaïques ainsi que pour transmettre la puissance entre elles. Alors, pour caractériser un bloc de cellule PV, la tension en circuit ouvert (V_{co}), le courant de court-circuit (I_{cc}) sont obtenus à partir de la fiche technique, le facteur d'idéalité et la résistance série (R_s) sont les principaux paramètres électriques à définir.

Alors que l'irradiation et la température sont les paramètres d'entrée du bloc.

Le choix s'est fixé sur le module « ET-M53620 : P8202.2 » ses caractéristiques électriques sont rapportées dans l'annexe A. C'est un module photovoltaïque de puissance de 20 Watt composé de 36 cellules en silicium Poly cristalline connectées en série.

Les mesures standards, internationalement acceptées, pour mesurer la réponse des modules PV sont une intensité rayonnante de 1000W/m² et une température de 25°C.

Le modèle de notre module PV est représenté sur la figure suivante :

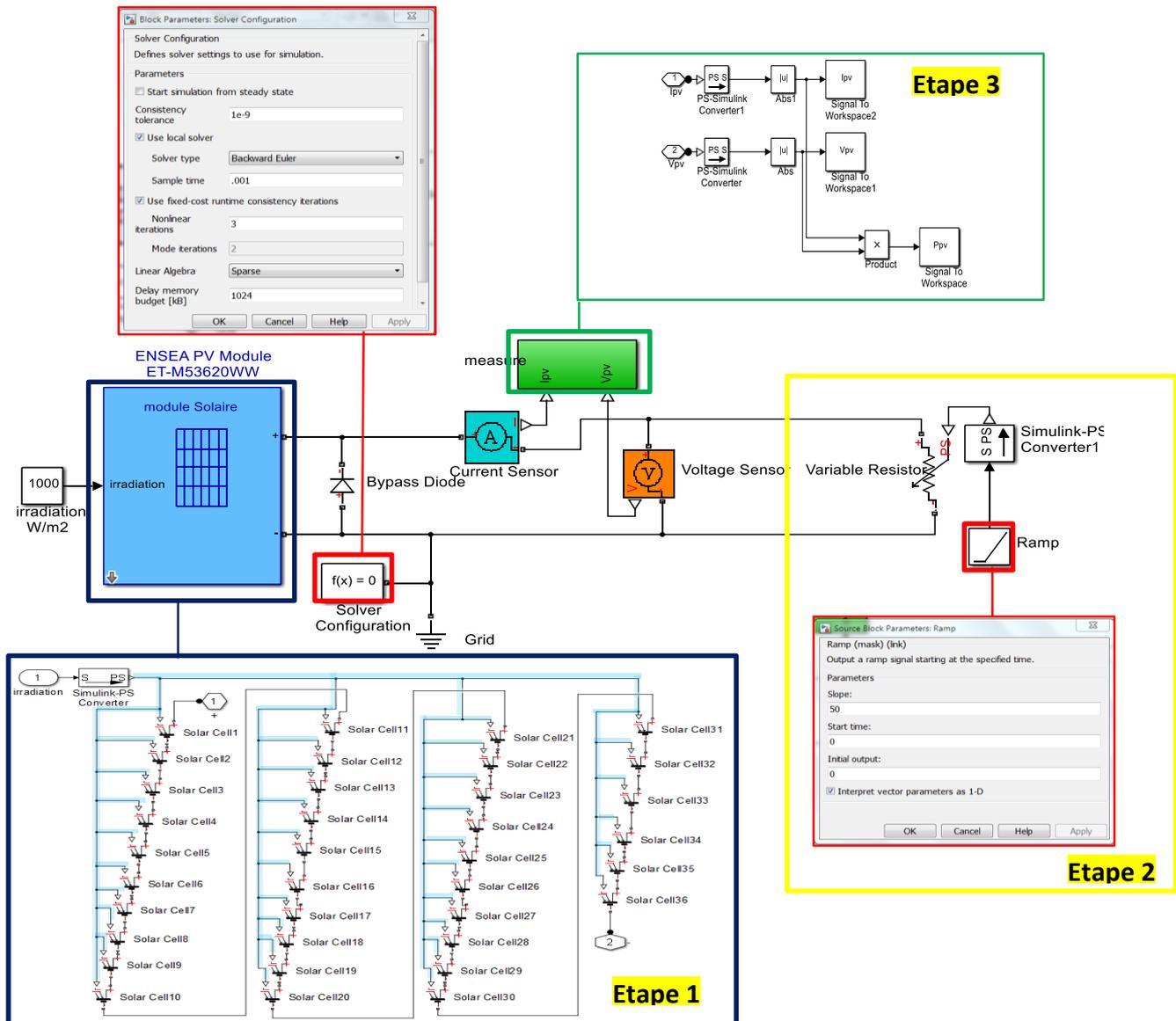


Figure II. 1: Le modèle Simscape d'un module photovoltaïque avec une résistance variable.

La Figure précédente montre le modèle Simscape du module PV « **ET-M53620 : P8202.2** ».

Pour cela, 3 sous-systèmes sont mis en œuvre :

Etape 01 GPV : simulant le fonctionnement du module «**ET-M53620 : P8202.2** ».

Etape 02 Résistance variable : dont la valeur est contrôlée par un signal physique (Signal rampe).

Etape 03 Bloc « Mesure » : pour l'acquisition et l'enregistrement des valeurs I_{pv} Et V_{pv} mesurées par des capteurs de courant et de tension, respectivement.

Tout système modélisé par Simscape nécessite exactement un bloc Solveur-Configuration pour y être connecté. Ce dernier bloc vise à déterminer les variables inconnues pour l'ensemble du système modélisé, il peut être connecté n'importe où sur le circuit du réseau physique en créant un point de branchement. Il est impératif de régler les paramètres du solveur avant d'exécuter la simulation afin d'éviter un avertissement ou un message d'erreur.

La Figure II. 2 montre les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'un module PV à une température ambiante (25°C) et à une certaine irradiation (1000W/m²).

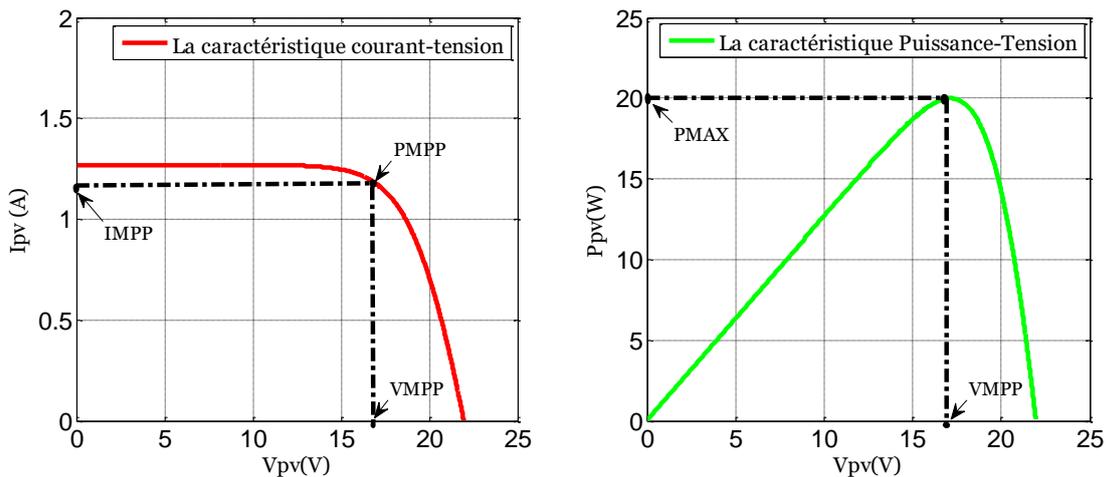


Figure II. 2: Les caractéristiques P-V et I-V d'un module PV.

II.2 Influence de l'éclairement sur le GPV

L'irradiation est le paramètre le plus important dans le comportement du module.

La Figure II.3 illustre respectivement les caractéristiques I-V et P-V du module simulé sous une température de 25 °C à différents niveaux d'éclairement (allant de 200W/m² à 1000 W/m² avec un pas de 200 W/m²)

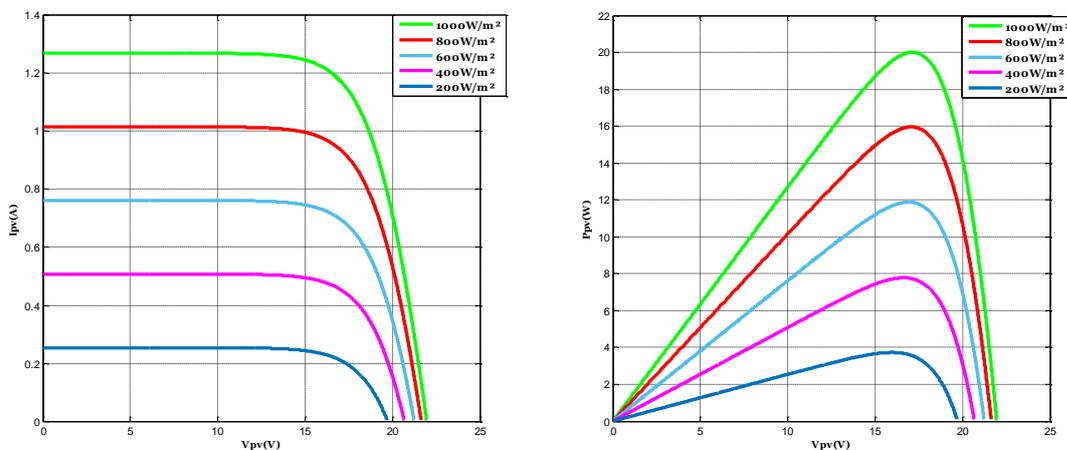


Figure II. 3: Influence de l'éclairement sur les caractéristiques d'un module PV.

Remarque : On constate que les fortes variations du niveau d'éclairement provoquent des variations relativement importantes du courant optimal, contrairement à la tension, qui varie très peu en fonction de l'éclairement, par conséquent la variation du point de puissance maximale MPP est proportionnelle à l'éclairement.

Ceci implique que les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

II.3 Influence de la température

La température est le second paramètre le plus important dans le comportement du module.

La Figure II. 4 illustre respectivement les caractéristiques I-V et P-V du module simulé sous un éclairement de 1000 W/m^2 à différentes températures (allant de -25°C à 75°C avec un pas de 25°C).

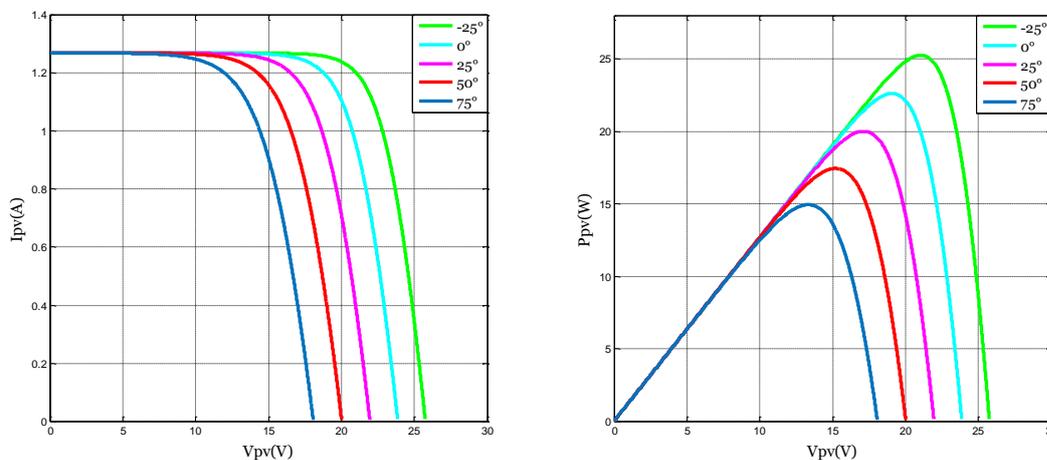


Figure II. 4: Influence de la température sur les caractéristiques d'un module PV.

Remarque : On remarque que le courant du court-circuit I_{cc} reste très peu sensible à la variation de la température mais la tension du circuit ouvert V_{co} diminue en augmentant la température ce qui cause une diminution de la puissance à la sortie du module.

Par conséquent, on peut noter que l'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique d'un GPV, de sorte qu'un niveau de température inférieur donne une tension de circuit ouvert V_{co} plus grande et une puissance de sortie plus élevée et vice versa.

II.4 L'ombrage partiel

Les performances globales des modules PVs sont souvent affectées par le rayonnement, la température du module, l'ombrage non-homogène et la configuration du réseau. La compréhension des impacts d'ombrage parmi les puissances de sortie du réseau PV peut être très essentielle dans un effort pour avoir une bonne performance globale du système PV.

L'ombrage partiel est un cas où les modules du réseau reçoivent un niveau d'éclairement différent. Cette ombre peut être à la fois facile à attendre en raison de situations extraordinaires ou difficile à attendre (Eg., raison des nuages par exemple) [16].

II.4.1 L'ombrage partiel dans les applications BIPV

La recherche d'endroits sans ombrage fréquent pour installer des systèmes PVs peut être une solution efficace pour atténuer l'impact de l'ombrage partiel (PS) mais ne peut pas totalement s'en débarrasser.

De nombreux facteurs entraînent des problèmes de PS, par exemple, dans les installations PVs intégrées dans les bâtiments, les cellules/modules PVs peuvent être soumis à des ombres projetées par des objets environnants prévisibles, qui peuvent être des arbres/antennes à proximité, des tours de services publics, des lignes électriques.

Ou des sources imprévisibles, par exemple, des feuilles mortes ou des excréments d'oiseaux couvrant des parties de la surface du module PV.



Figure II. 5: L'ombrage dans les applications BIPV.

Dans les grandes installations PVs occupant une vaste superficie de terrain, où les modules PVs sont généralement placés loin de tout obstacle environnant, les différentes orientations des

modules appartenant à la même chaîne PV, les nuages en mouvement et les ombres des rangées adjacentes de modules conduisent également à des problèmes d'ombrage.



Figure II. 6: L'effet d'ombrage sur les champs PV.

II .4.2 La diode by-pass

Dans un GPV, la mise en série des cellules/modules peut être dangereuse lorsque l'un d'entre eux se trouve à l'ombre donc il va s'échauffer et risque de se détruire[16].

En effet, un(e) cellule/module masqué voit l'intensité qui le traverse diminuer. De ce fait, il bloque la circulation de l'intensité normale produite par les autres cellules/modules. La tension aux bornes de ce module masquée augmente, d'où l'apparition d'une surchauffe.

C'est l'effet d'auto-polarisation inverse. Dans ce cas, les cellules/modules PV ombragés consomment l'énergie au lieu d'en produire. Un tel phénomène est appelé Hot spot. Il est à noter que ce dernier peut endommager les cellules/modules PV ombragés.

Pour éviter les effets indésirables du phénomène point chaud où Hot spot, les fabricants ont implantés des diodes dites Bypass dont le principe est de court-circuiter les cellules/modules ombragés. Les constructeurs des modules implantent généralement entre 2 et 5 diodes By-pass par module dans le boîtier de connexion du module (ou la boîte de jonction), Chacune des diodes by-pass est associée à un sous-réseau de cellules/module.

Lorsqu'un des modules du sous-réseau est ombragé, la diode by-pass devient passante, c'est-à-dire que le courant circule dans la diode en isolant ainsi le circuit électrique du sous-réseau de module associé Figure II. 7.

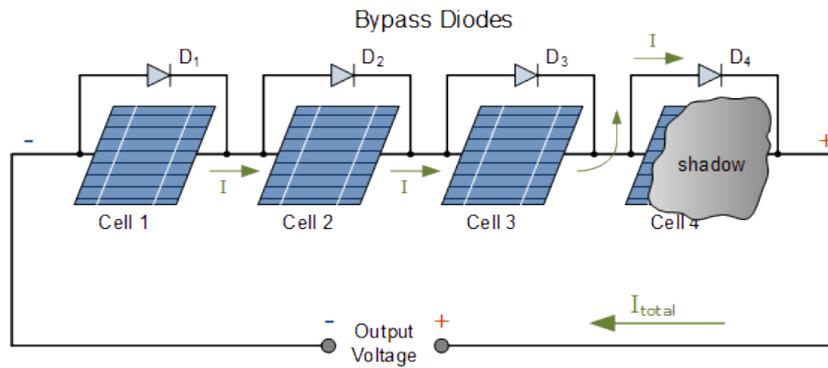


Figure II. 7: La diode by-pass.

II.4.3 Effet d'éclairement non homogène sur le GPV

Cette section a pour but de marquer l'effet de l'ombrage partiel ou d'éclairement constant non homogène sur le GPV. Pour cela, on considère un GPV composé de trois modules type «ET-M53620 : P8202.2 ».

On fixe la température à la valeur de référence (25°C) et on met les trois modules connectés en série ou parallèle sous des éclairements constants et différents.

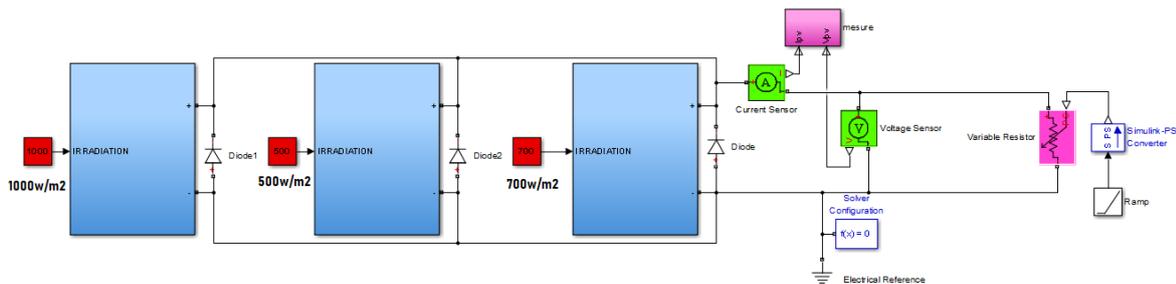


Figure II. 8: Connexion de 3 modules en parallèle.

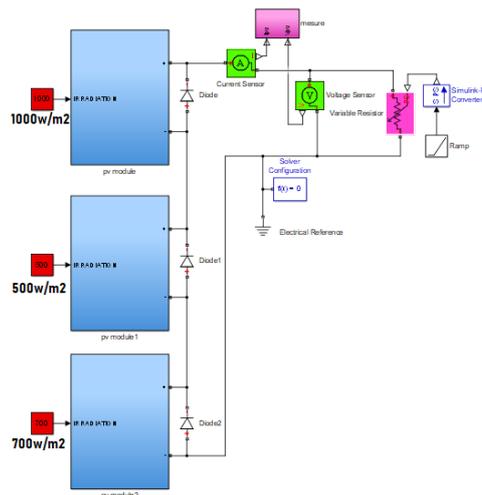


Figure II. 9: Connexion de 3 modules en série.

On a vu précédemment que quand l'éclairement est homogène, les courbes caractéristiques n'ont qu'un seul sommet nommé pic, nous verrons le changement lors d'un éclairage non Homogène ou ce qu'on appelle effet d'ombre.

Les résultats de la simulation des deux modèles Figures II. 8 et II. 9 sont montrés sur les Figures II. 10 et II. 11 respectivement.

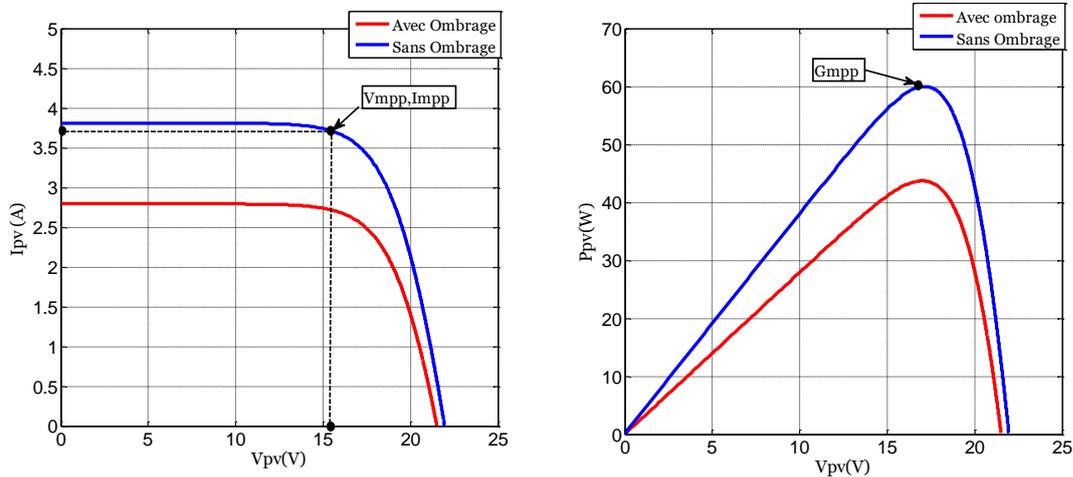


Figure II. 10: Caractéristiques d'un générateur de 3 modules en parallèle.

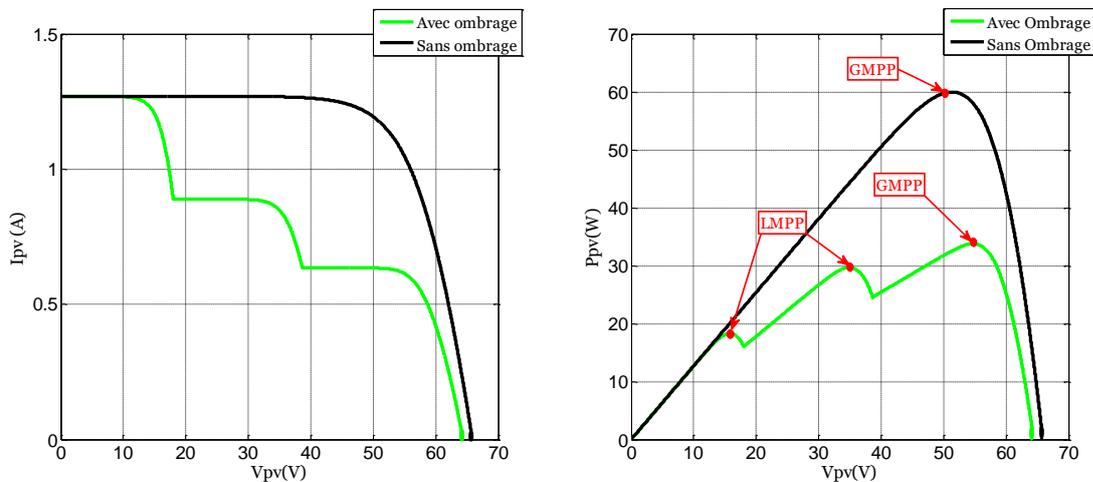


Figure II. 11: Caractéristiques d'un générateur de 3 modules en série.

Remarque : Il est bien clair que la connexion parallèle est beaucoup plus avantageuse que la topologie série en situation d'ombrage partiel, il est donc conseillé que la connexion en parallèle soit adoptée lorsque la tension série répond à l'exigence.

II.5 Conclusion

En tant que source d'énergie renouvelable importante dans les micros réseaux, la production photovoltaïque s'est développée rapidement récemment en raison des mérites d'une flexibilité et d'une extensibilité élevée.

Mais l'ombrage partiel des arbres, des bâtiments ou des nuages apparaît facilement dans le système de modules PVs de grande surface.

Dans ce chapitre, l'impact de l'ombrage partiel sur le système PV est analysé, et les résultats montrent qu'il réduira toute la production d'énergie de sortie et le défaut d'ombrage dur endommagera la stabilité du système PV.

De plus, il convient de souligner que lors de la connexion en série, plusieurs pics de puissance ayant le même nombre que les niveaux d'irradiation résultant sur la courbe P-V qui sont causés à la fois par l'irradiation non uniforme et par l'intégration des diodes By-pass.

Et de là, on en conclue que la configuration des modules PV peut jouer un rôle dans l'atténuation de l'effet d'ombre.

Et donc, la configuration la moins susceptible à l'effet d'ombre est celle en parallèle

Chapitre III

Les différentes configurations PV

« Dans la vie on ne fait pas ce que l'on veut mais on est responsable de ce que l'on est. »

Jean-Paul Sartre

Introduction

Ce chapitre se concentre sur la modélisation de dix-huit configurations PV sous un motif d'ombrage donné pour extraire la puissance maximale et analyser les pertes de puissance.

Diverses configurations photovoltaïques conventionnelles telles que la série parallèle SP, le Total Cross Tied TCT, le Bridge Linked BL et le Honey Comb sont modélisés et analysés sous des conditions uniformes et d'autres non-uniformes tels que : center, diagonal, corner, L-Shaped, Long Short et Random, tous ces motifs d'ombrage sont considérés pour étudier le comportement de la forme de matrice 4x4 de la configuration PV.

Plusieurs autres nouvelles configurations hybrides sont proposées pour générer une puissance maximale sous l'ombrage partiel et pour minimiser le nombre de liaisons transversales et la complexité du câblage. Ces configurations sont des combinaisons de deux configurations conventionnelles.

Les différentes configurations PV :

A. Présentation

Afin d'obtenir une puissance maximale sous une tension appropriée, il est nécessaire de connecter les modules sur la forme la plus diverse appelée configuration PV.

Dans cette partie, nous visons à exposer toutes les configurations PV utilisées dans cette étude. Néanmoins, pour toutes les analyses de simulation et pour tous les résultats de configuration, nous avons utilisé des modules PV avec dimension 4x4. Chaque module comprend 36 cellules basées sur le modèle à une diode.

III.1 La Configuration Série-Parallèle (SP)

Une configuration Série-parallèle (illustrée dans la Figure III. 1) est présentée où une chaîne se compose de 4 modules en série qui sont connectées en parallèle, l'une à l'autre.

Pour les connexions en série comme chaîne, la tension résultante est une somme de chaque module PV individuelle, tandis que dans son ensemble, le courant résultant est une somme de chaque Chaîne PV connectée en parallèle[17].

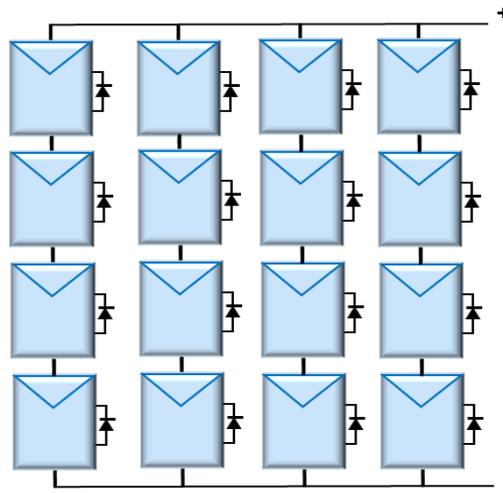


Figure III. 1: Configuration Série-Parallèle

III.2 Honey-Comb (HC)

Dans cette configuration PV, les modules sont connectés de manière similaire à la forme hexagonale de l'architecture de nid d'abeille [18, 19].

La configuration en nid d'abeille (HC) illustrée sur la Figure III. 2 est la structure modifiée de la configuration BL avec des tailles de pont variables.

Pour cette configuration, une taille des sous-réseaux 1x2 et 3x2 sont considérés comme des unités de pont variables. À concevoir une configuration 4x4, les unités de 1x2 et 3x2 respectivement sont connecté en série à encadrer chaque corde de chevalet. Ces derniers sont alors connectés en parallèle et relié au lien alternatif pour former la configuration HC [20].

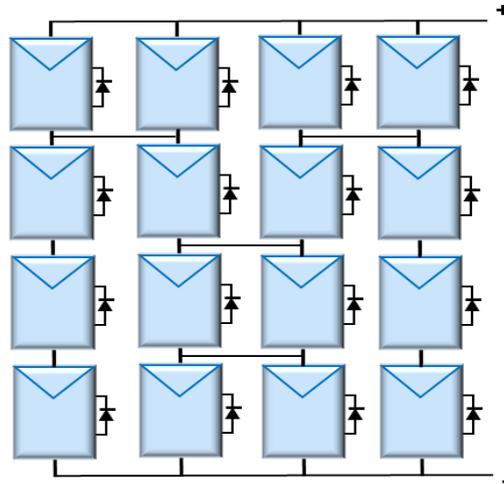


Figure III. 2: Configuration H-C

III.3 Total-Cross-Tied (TCT)

Pour la configuration TCT, tout d'abord les modules sont connectés en série, les chaînes série sont connectées en parallèle et les modules de chaque chaîne sont interconnectés les uns aux autres. Cette disposition est illustrée à la Figure III. 3 [20].

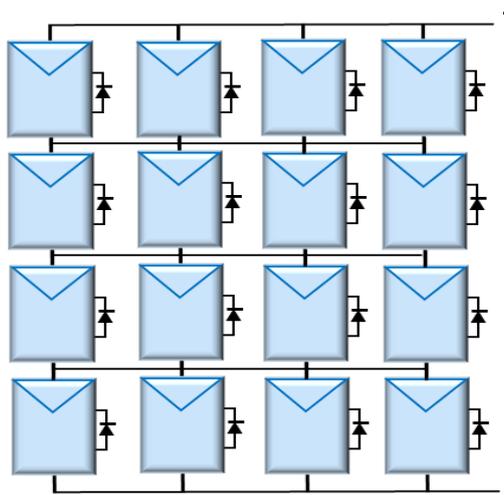


Figure III. 3: Configuration TCT

III.4 Bridge-Linked (BL)

Dans la configuration BL, les modules sont connectés en pont [20].

Pour cette configuration, un sous-réseau 2x2 est utilisé comme unité de pont. Pour concevoir la taille du champ PV 4x4, 4 nombres de sous-réseaux 2x2 sont requis comme unités de pont. Les deux unités de pont sont connectées en série pour encadrer chaque corde de chevalet. Alors ces cordes de chevalet sont connectées en parallèle et liés aux connexions de liaison alternatives pour former une configuration de réseau BL.

La configuration est illustrée à la Figure III. 4 suivante :

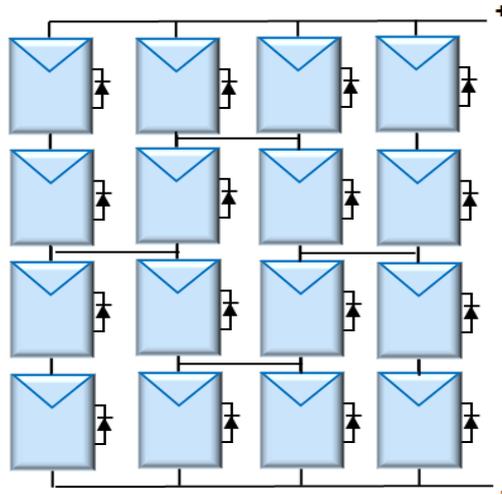


Figure III. 4: Configuration B-L

III.5 Alternative Tie-Tie (ATT)

Une nouvelle configuration qui est appelée configuration Alternative Tri-Tie (ATT). Dans cette configuration, pour connecter les chaînes en série, deux nombres de lien de connexions sont utilisées dans chaque ligne. Ces deux liens sont utilisés individuellement ou combinaison de deux pas à pas comme alternative entre les chaînes de la série. Ici pour concevoir une configuration de baie 4x4, dans la première rangée, de la 1^{ère} à la 2^{ème}, de la 3^{ème} à la 4^{ème} et ainsi de suite. Les chaînes de série sont liées par deux liaisons individuelles et créent un espace entre elles.

En seconde rangée, les chaînes de la 2^{ème} à la 4^{ème} colonne sont liées par une combinaison de deux connexions. Ces arrangements sont considérés comme une alternative pour les rangées restantes comme une connexion étape par étape pour former la configuration alternative Tie Tie [21].

Les connexions sont illustrées sur la Figure III. 5 suivante :

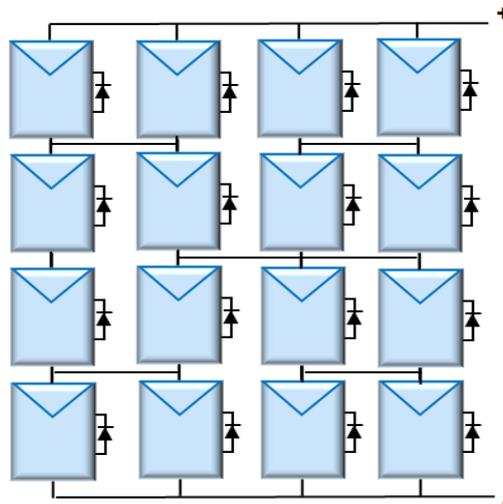


Figure III. 5: Configuration ATT

III .6 Alternate TCT-BL

Cette configuration est nouvelle dans son genre et est formée en connectant alternativement deux colonnes de réseau en configuration BL et les deux colonnes suivantes en configuration TCT. Ceci est illustré sur la Figure III. 6.

Dans la configuration PV 4x4 de TCT, le nombre total de traverses est de 9 qui sont plus et nécessitent donc plus de fils pour la connexion. Dans cette configuration PV, une tentative est faite pour réduire l'exigence de fils, réduisant ainsi sa complexité mais en maintenant toujours ses performances meilleures que BL et HC en termes d'extraction de puissance de sortie maximale sous PSC.

La configuration PV A-TCT-BL étant une combinaison de TCT et BL avec un emplacement spécifique des traverses, présente les avantages de la configuration PV TCT et BL. Cela est dû au fait que le nombre total de traverses présentes dans cette configuration est de 7, soit plus que la configuration PV BL et HC mais moins que la configuration PV TCT.

En raison du plus grand nombre de liaisons croisées par rapport à la configuration PV BL et HC, cette nouvelle configuration PV fonctionne mieux sous la plupart des motifs d'ombrage[22].

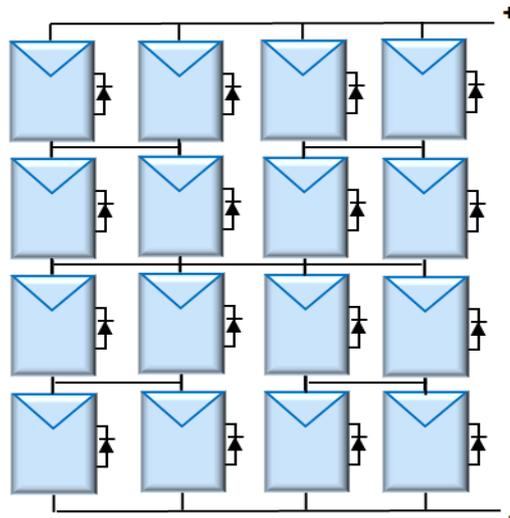


Figure III. 6: Configuration ATCT-BL

III.7 Modified Bridge-Linked (MBL)

Pour cette configuration, un sous-champ PV 1×2 et 3×2 sont considéré comme une unité de pont. Pour concevoir un GPV 4×4 , 2 sous-ensembles de 3×2 et 1×2 respectivement sont nécessaires comme unités de pont. Tout d'abord, une unité de pont est connectée en série pour construire la chaîne photovoltaïque, puis chaque chaîne est connectée en parallèle et reliée avec des connexions de liaison alternatives pour former la configuration modifiée du générateur. Comme illustré sur la Figure III. 7 suivante[20].

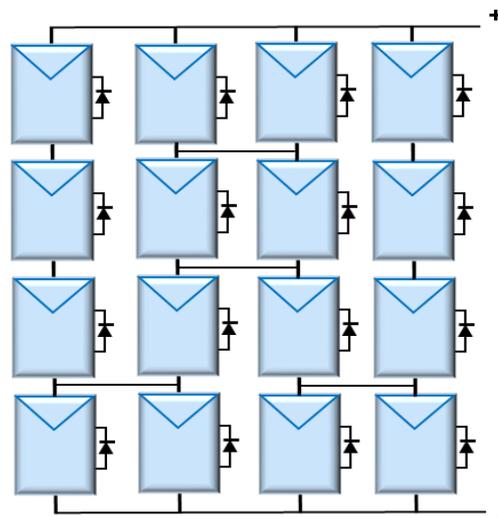


Figure III. 7: Configuration MBL

III .8 Série-Parallèle- Total-Cross-Tied (SPTCT)

Cette configuration contient deux mailles répétitives, chaque maille contient quatre chaînes connectées en parallèles entre eux, et chaque chaîne contient deux modules connectés en série, puis les tous sont connectés en TCT comme montre la Figure suivante[23].

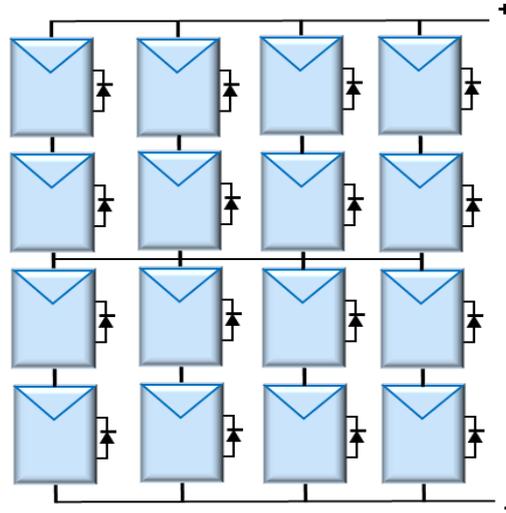


Figure III. 8: Configuration SPTCT

III .9 Cross-Tied- Honey- Comb (CT-HC)

Pour cette configuration, les chaînes de la première rangée sont liées de la 1^{ère} colonnes à la 3^{ème} par une combinaison de deux connexions. Pour la 2^{ème} rangée, le module de la 1^{ère} et la 2^{ème} colonne sont connectés entre eux en TCT. La 3^{ème} ligne est comme la 1^{ère} [23].

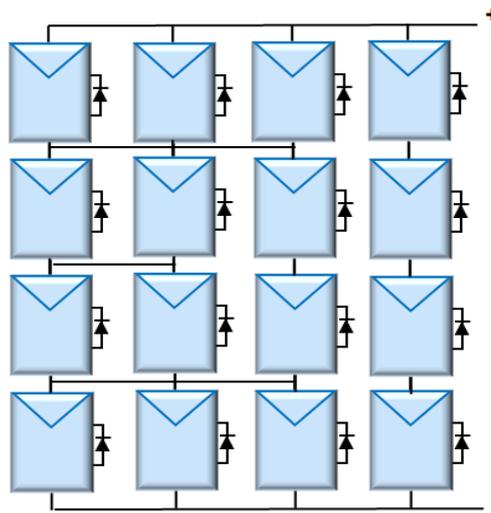


Figure III. 9: Configuration CT-HC

III .10 Triple-Tied (TT)

Cette configuration est proposée comme nouvelle configuration modifiant le concept de BL.

En BL deux modules consécutifs sont connectés suivis d'un intervalle. Dans la configuration TT, la longueur du pont est augmentée de deux modules à trois modules et suivis d'un écart après. Il est également considéré comme une configuration croisée en raison des traverses connectées entre les cordes. La configuration des connexions dans la configuration TT est inspirée de Volées d'escalier. À la 1^{ère} rangée, les traverses sont connectées entre la 1^{ère} et la 2^{ème} colonne, 3^e à 4^e colonnes. A la 2^{ème} ligne, le motif est décalé vers la droite d'une colonne. Le déplacement va de même pour la 3^e rangée. A la 4^{ème} rangée les 4 chaînes sont connectées en parallèle[24].

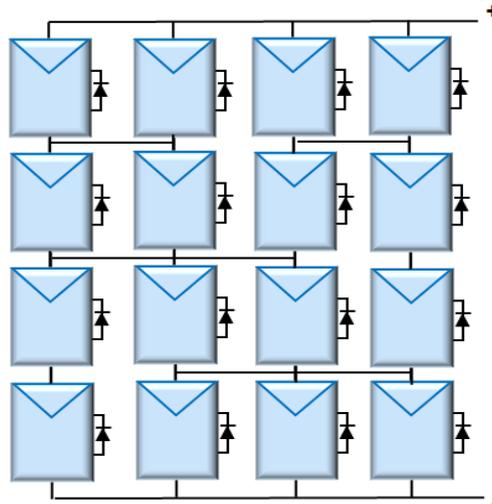


Figure III. 10: Configuration TT

III .11 Ladder-Diagram (LD)

Dans la configuration LD, deux chaînes sont d'abord jointes TCT, puis les deux chaînes connectées TCT sont couplées en parallèle comme montre la Figure III. 11 suivante[25].

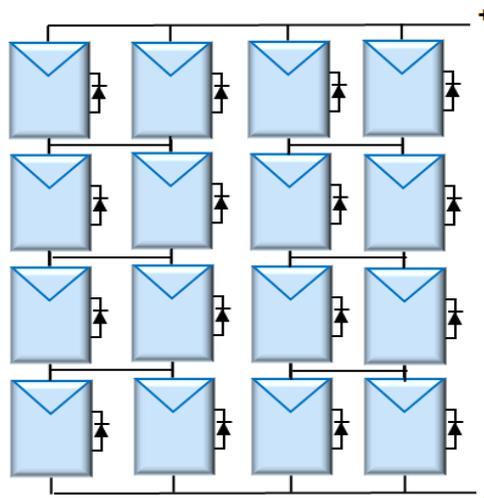


Figure III. 11: LD configuration

III .12 Triple-Tied-Cross-Linked (TTCL)

La configuration T-T-C-L illustrée dans la Figure III. 12 a été modélisée en modifiant la configuration TCT avec des attaches réduites, comme montre la figure.

Dans cette configuration la première ligne et les trois premières chaînes sont liées suivies d'un écart. La connexion de la deuxième ligne suit la même chose que la première ligne.

Dans la troisième rangée, tous les chaînes sont liées entre elles. Dans la quatrième rangée toutes les chaînes sont jointes ensemble de la même manière que la connexion de troisième rangée.

Le principal avantage de la configuration T-T-C-L est le nombre réduit de traverses par rapport à TCT[26].

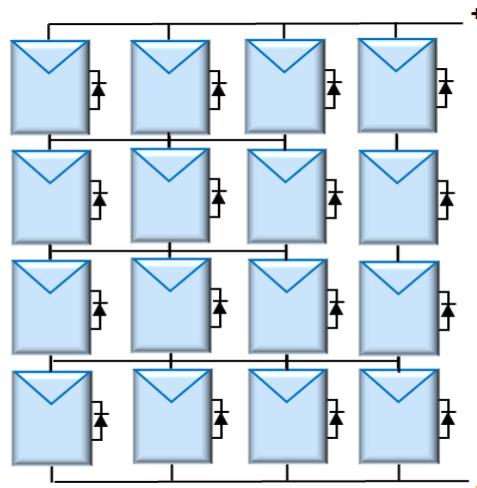


Figure III. 12: Configuration TTCL

III .13 Hybrid HC-TCT

Pour cette configuration, la 1^{ère} ET la 2^{ème} rangées sont connectées en HC, La 3^{ème} ET la 4^{ème} en TCT[27].

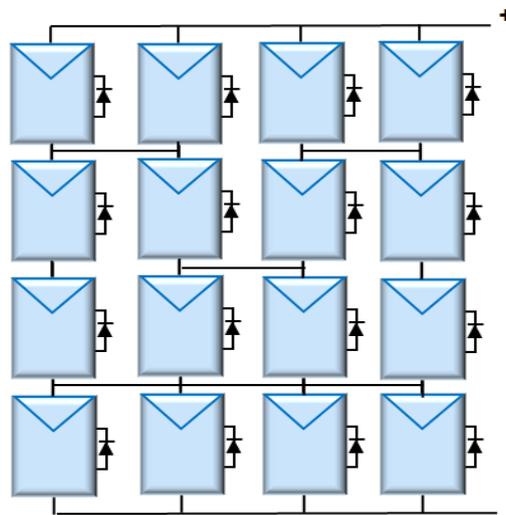


Figure III. 13: Configuration HCTCT

III .14 Modified Bridge-Linked (MB)

Dans cette configuration, la 1^{ère} et la 2^{ème} ligne sont connectées en HC, À la 3^{ème} rangée, les traverses sont connectées entre la 1^{ère} et la 2^{ème} colonne, et entre la 3^{ème} et la 4^{ème} colonne. Dans la 4^{ème} rangée toutes les chaînes sont jointes ensemble[27].

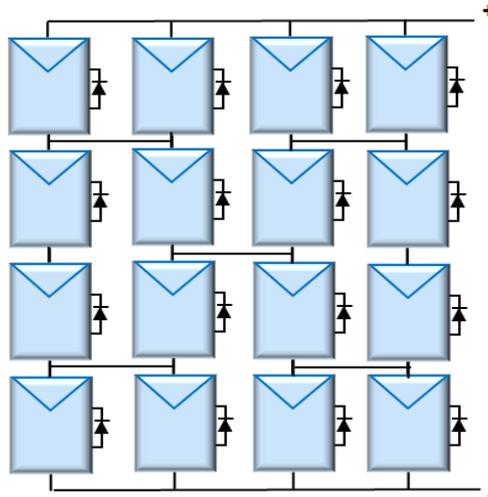


Figure III. 14: Configuration MB

III .15 BL-TCT

Cette configuration PV est une combinaison entre Total-Cross-Tied et Bridge-Linked.

Dans un champ de 4x4, les modules de la première rangée sont connectés en forme de pont entre 1^{ère} et la 2^{ème} colonne et la même chose pour les modules de la 3^e et la 4^e colonne.

Par la suite, les modules de la 2^{ème} à la 4^{ème} rangée sont connectés en forme TCT.

Le schéma de la configuration PV A-TCT-BL est montré dans la Figure suivante [28].

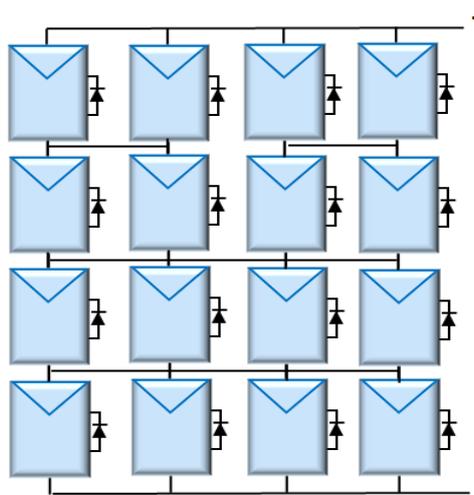


Figure III. 15: Configuration BLTCT

III.16 Sudoku

Le nom de cette configuration est inspiré par le jeu Sudoku.

Cette configuration est une amélioration de celle de TCT, elle consiste à faire la dispersion de l'ombrage sur les différentes lignes et colonnes pour que les lignes de la configuration TCT reçoivent les mêmes quantités de puissance.

Dans la configuration Sudoku, la position physique des modules PV est modifiée sans modifier le raccordement électrique des modules.

Le premier chiffre de chaque module représente la ligne et le deuxième chiffre désigne la colonne de la matrice 4x4 [29, 30].

Par exemple le module 32 comme montre Fig. 34 est physiquement déplacé vers la première ligne deuxième colonne mais la connexion du module PV reste dans la troisième ligne. De même arranger tous les modules de la Sudoku configuration, sans changer les connexions électriques des modules PV dans des conditions d'ombrage partiel.

11	32	23	44
21	42	13	34
31	12	43	24
41	22	33	14

Figure III. 16: Sudoku pattern

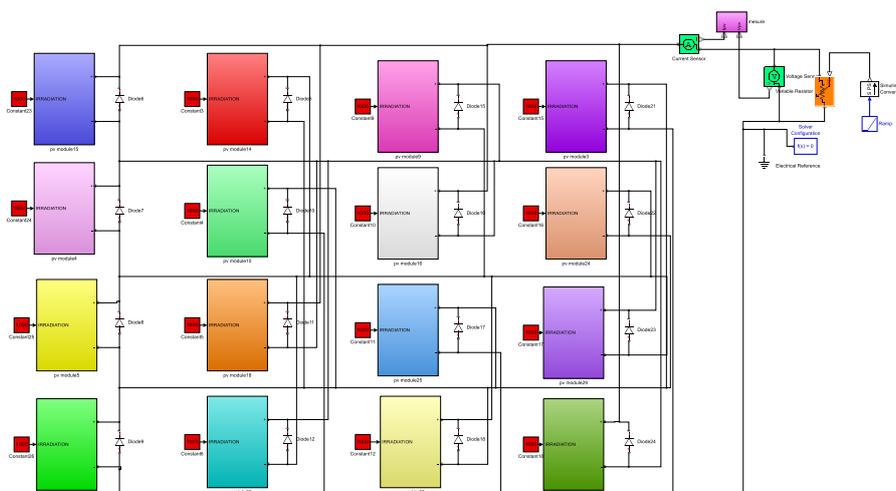


Figure III. 17: Simulink model Of Sudoku arrangement

III .17 Magic-Square (MS)

MS est un puzzle de placement de nombres basé sur la logique.

Ces nombres sont spéciaux car chaque ligne, colonne et diagonale s'additionne au même numéro. Les 4×4 propriétés de base de la configuration MS sont montrés dans la Fig. 36 suivante, et il est montré que la somme de chaque colonne, chaque ligne et chaque diagonale vaut 10. De plus, la somme des éléments de la matrice carrée centrale vaut également 10. Ainsi, les propriétés de 4×4 matrices carrées sont satisfaites.

Le premier chiffre de chaque module représente le numéro de la ligne et le deuxième chiffre désigne la colonne. La configuration photovoltaïque TCT est réorganisée sur la base du modèle de puzzle MS, qui sont illustrés à la Fig. 36 ci-dessus. Cette disposition est encadrée à l'aide de la configuration MS proposée sans modifier la connexion électrique des modules PV dans des conditions d'ombrage partiel. Il est bien vu de la Fig. 36, le module 42 4^{ème} rangée, 2^{ème} colonne, est placé physiquement sur la première rangée et la deuxième colonne, le module 32 3^{ème} rangée, 2^{ème} colonne est physiquement placé sur la deuxième rangée deuxième colonne, le module 22 2^{ème} ligne 2^{ème} colonne est physiquement placé sur la troisième ligne deuxième colonne, le module 12 1^{ère} ligne 2^{ème} colonne est physiquement placé sur la 4^{ème} ligne 2^{ème} colonne dans la configuration MS. De même, d'autres modules sont disposés dans le champ photovoltaïque selon la configuration MS [31].

11	42	23	34
21	32	13	44
31	22	43	14
41	12	33	24

Figure III. 18: MS pattern

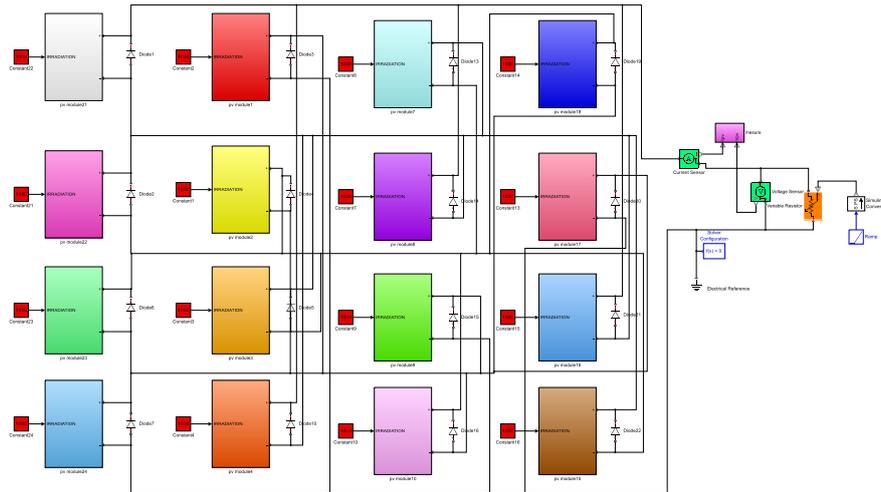


Figure III. 19: Simulink model Of MS arrangement

III.18 Dominance square

Ayant des inférences pratiques à partir du simple puzzle de DS, le GPV peut être reconfiguré pour une extraction de puissance maximale à n'importe quelle condition d'ombrage. Le premier et le deuxième chiffre de chaque module représentent la ligne et sa position en colonne respectivement. Par exemple, le module numéro 12 représente sa position, c'est-à-dire la première ligne et la deuxième colonne. Pour démontrer l'efficacité de la méthode, un réseau PV 4×4 connecté en TCT représenté dans La Figure III. 20 est reconfiguré en suivant la méthode DS.

Il est à noter que la disposition des modules est faite séquentiellement à droite du module PV. Pour expliquer plus en détail le positionnement des modules photovoltaïques, deux processus de relocalisation physique sont expliqués :

- Le module PV numéroté 32 positionné sur la 3^e rangée et la 2^e colonne de la Fig. 38 est déplacé physiquement vers 4^e rangée, 2e colonne sur la Fig. 39
- Le module PV numéroté 24 positionné sur la 2^e rangée La 4^e colonne est physiquement déplacée sur la 1^e rangée 4^e colonne en appliquant la méthode DS.

De même, d'autres modules sont également réarrangés sur la base de la méthode du DS. Après avoir appliqué le puzzle mathématique du carré de dominance, un réseau PV bien dispersé est arrivé. Pour une compréhension claire et meilleure, l'ensemble du processus de reconfiguration qui correspond à la fois à l'arrangement TCT et à l'arrangement du carré de dominance physiquement déplacé est illustré dans les figures suivantes [32].

11	12	13	14
21	22	23	24
31	32	33	34
41	42	43	44

Figure III. 20: TCT Arrangement

11	42	33	24
31	12	43	34
21	22	13	44
41	32	23	14

Figure III. 21: DS Arrangement

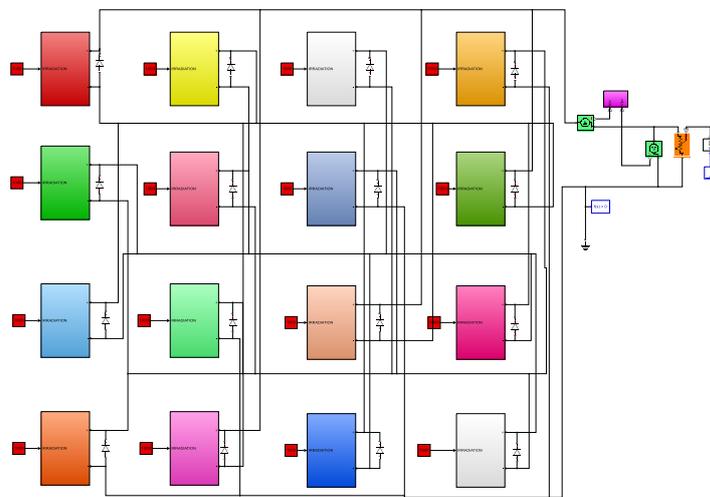
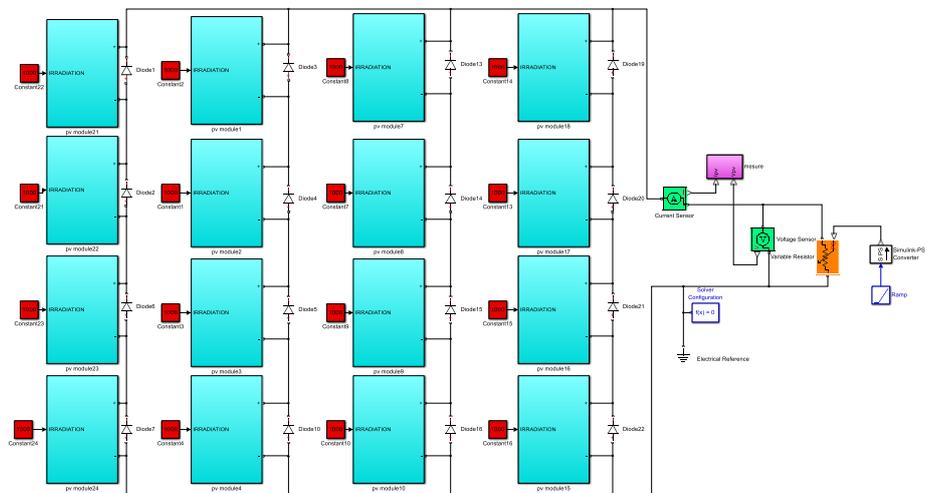


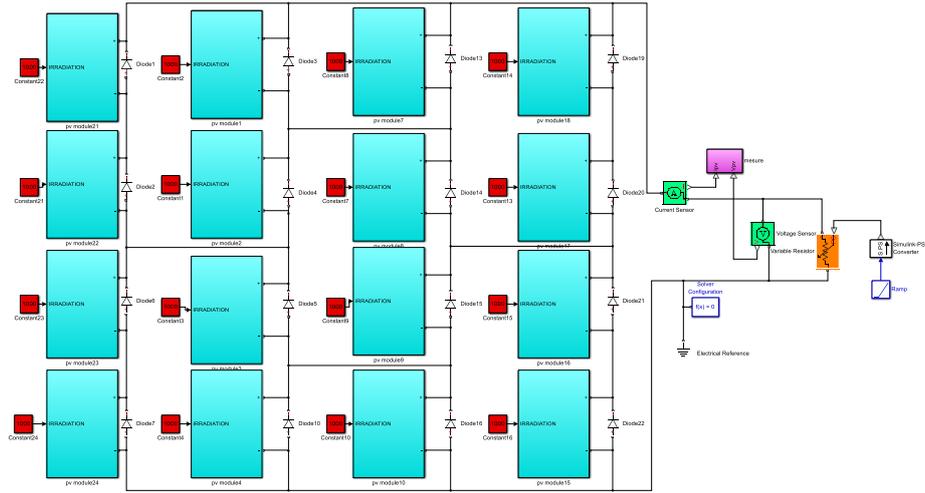
Figure III. 22 : Simulink model of DS configuration

B. Modélisation

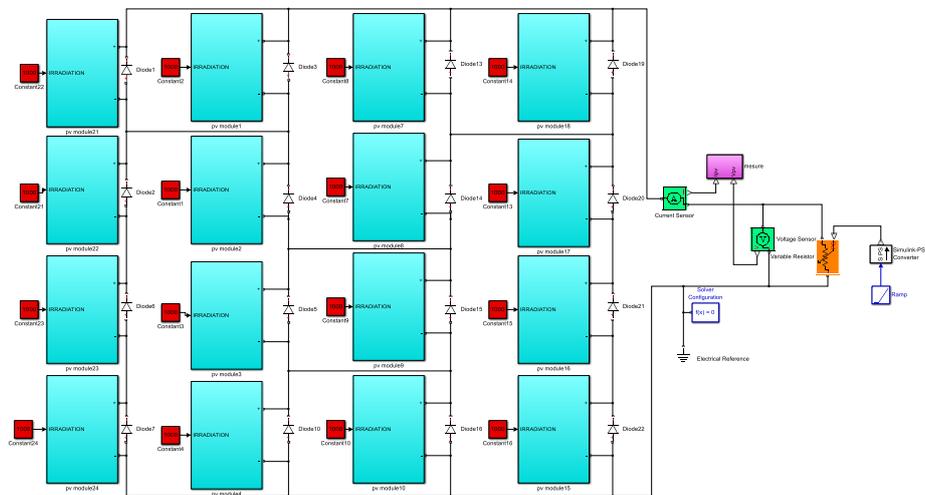
Les modèles MATLAB/Simulink des différentes configurations sont montrées ci-dessous :



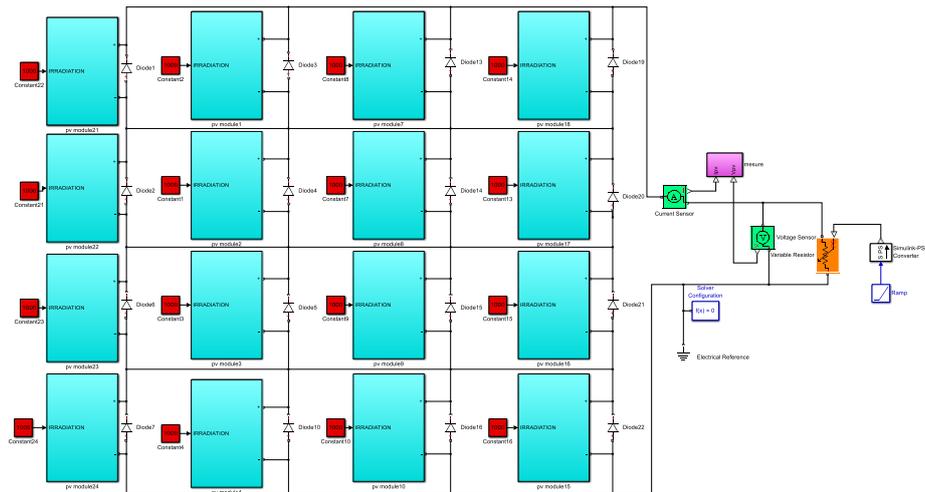
(a)



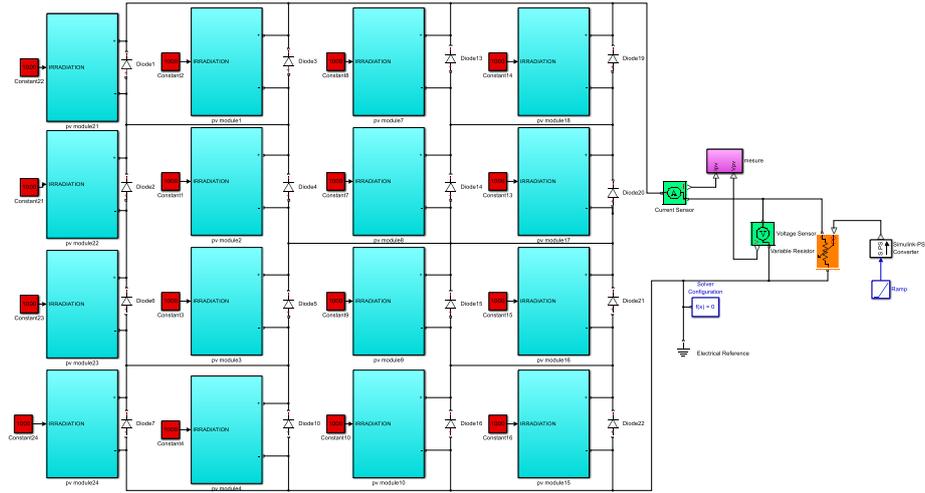
(b)



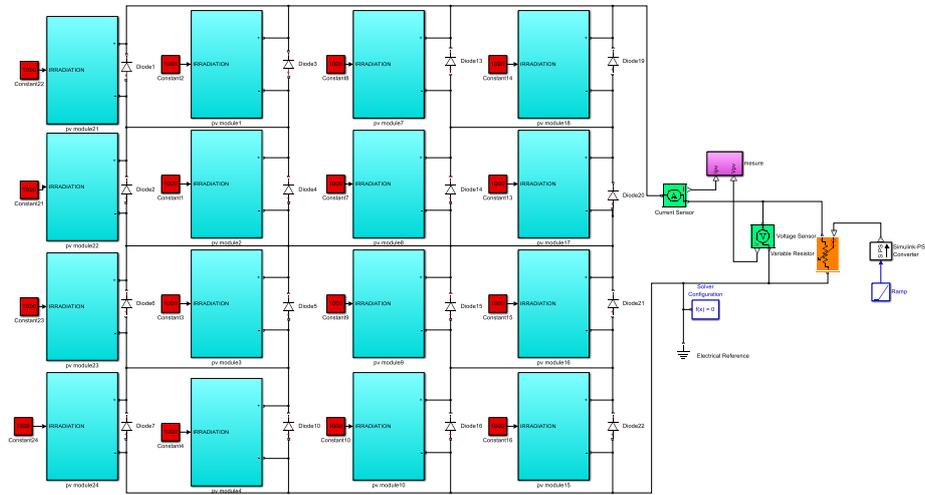
(c)



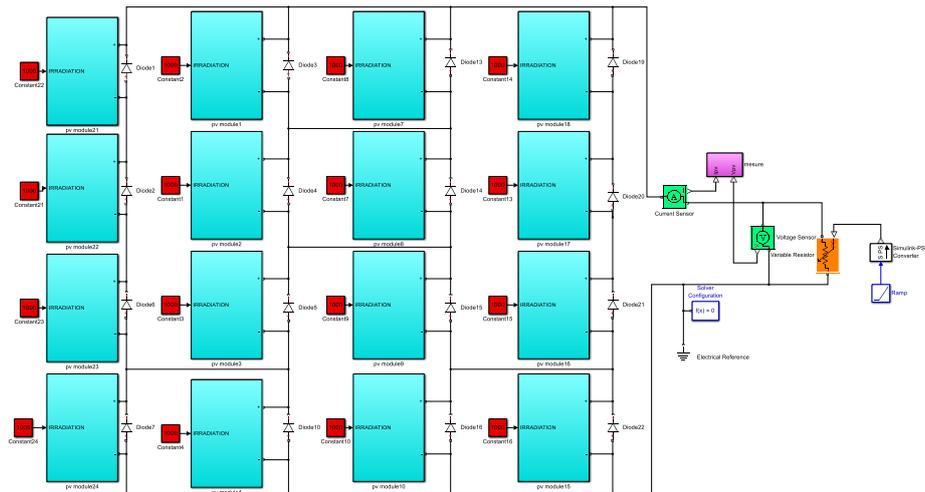
(d)



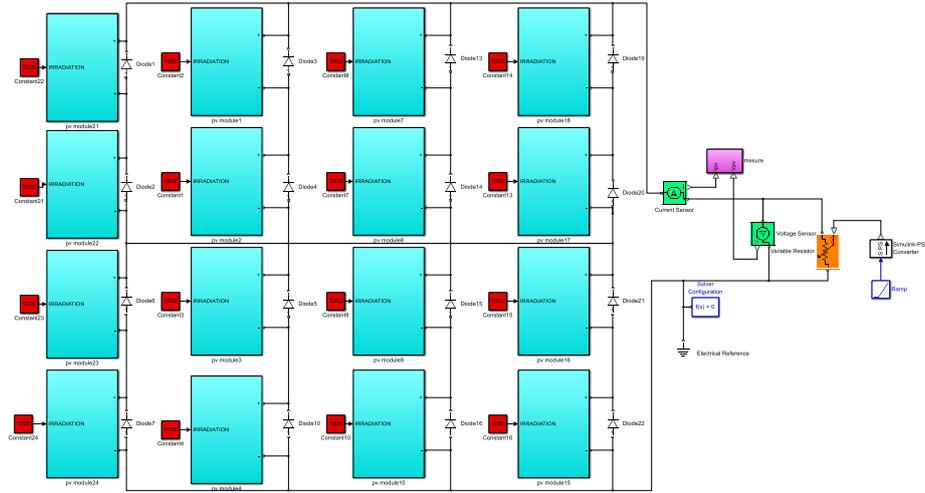
(e)



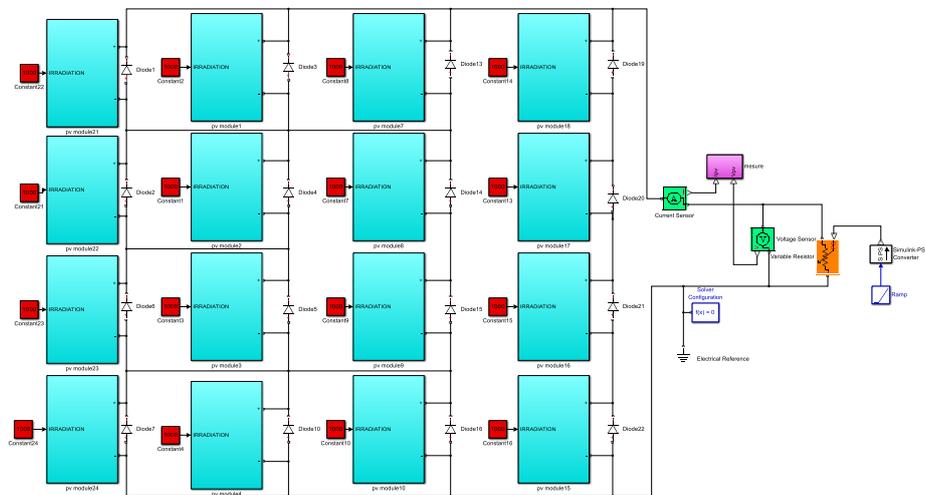
(f)



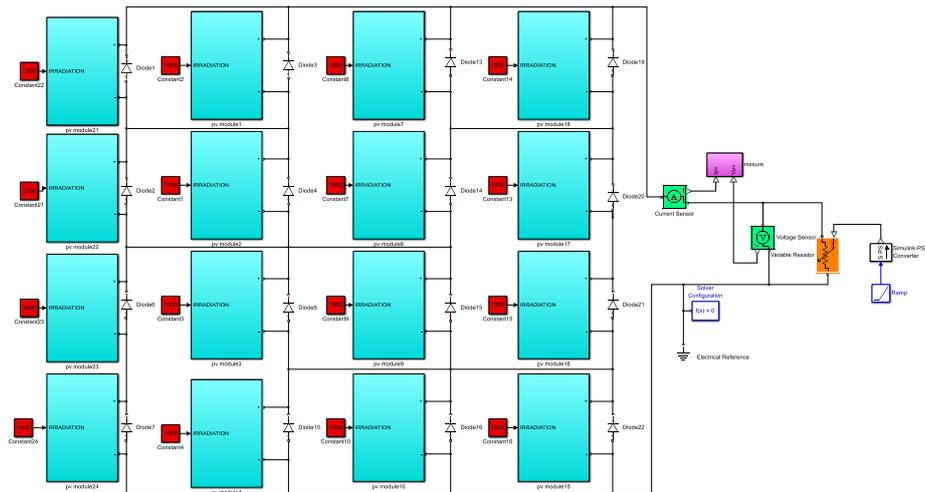
(g)



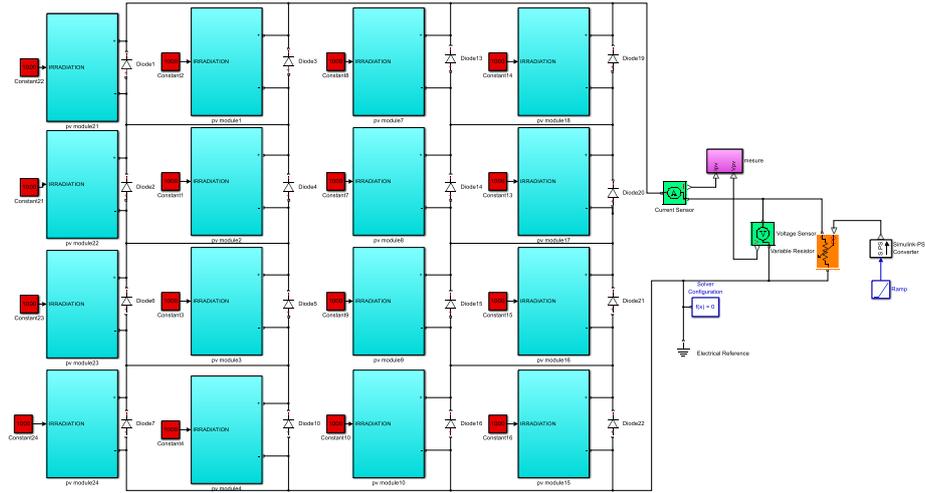
(h)



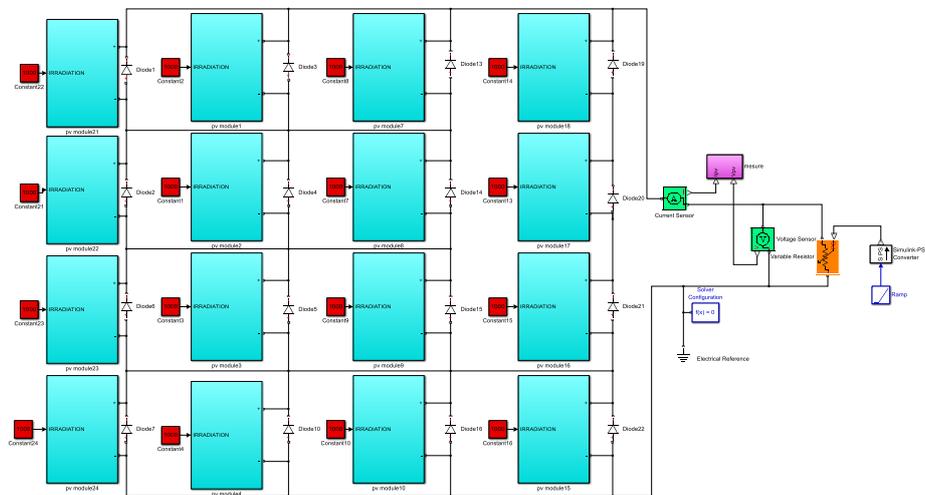
(i)



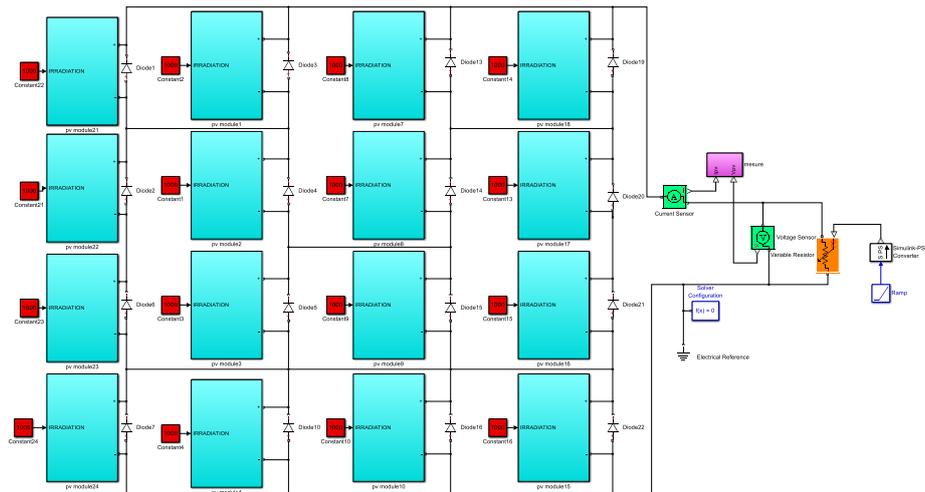
(j)



(k)



(L)



(m)

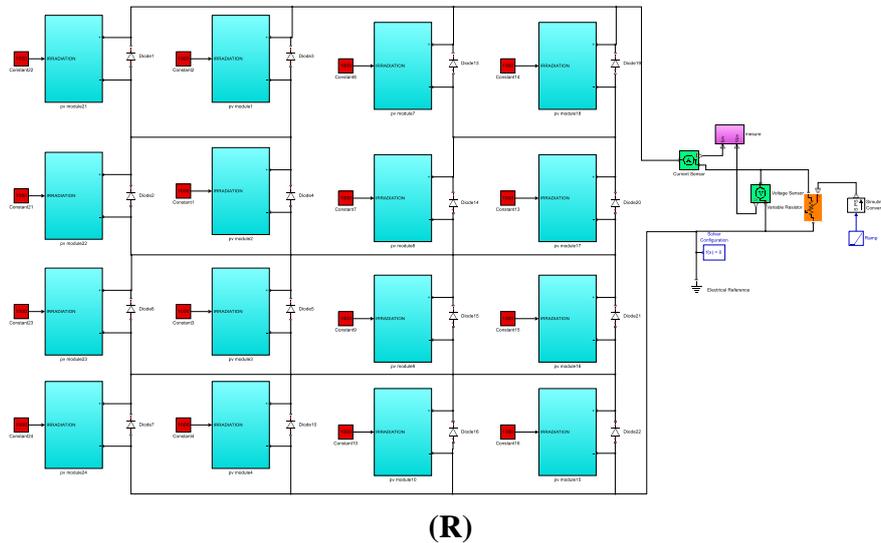
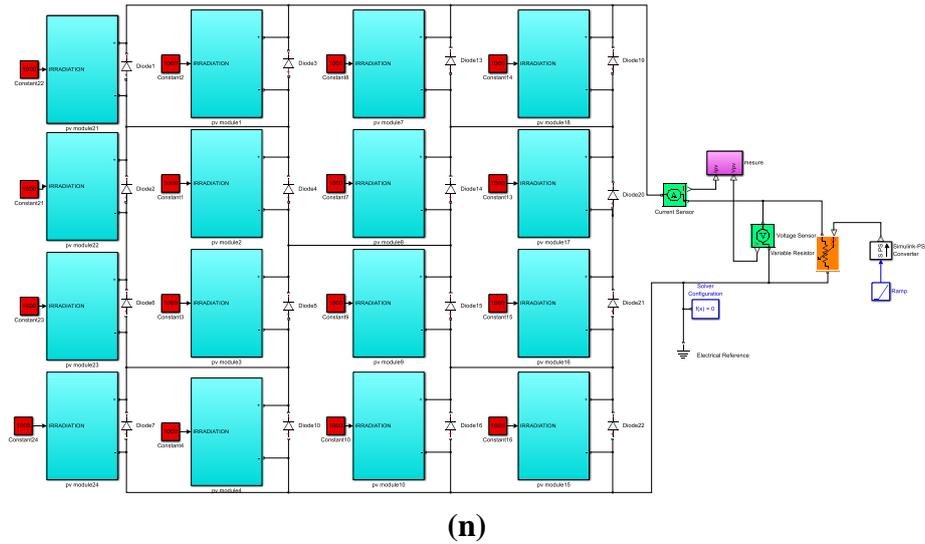


Figure III. 23: Les modèles Simulink des différentes configurations

C. Les différents motifs d'ombrage :

Pour analyser les caractéristiques P-V de sortie des configurations, différents motifs d'ombrage sont pris en compte. Dans la figure suivante, différents cas d'ombrage sont pris en compte. Parmi eux on trouve : Uniform, corner, center, diagonal, L-shaped, Random...etc.

Et différents niveaux d'irradiance sont considérés comme 1000 W/m^2 , 700 W/m^2 , 500 W/m^2 et 300 W/m^2 à une température de 25°C [21].

🚦 Condition d'essai standard (STC)

Dans des conditions **STC** comme le montre la Fig. III. 24 (a), tous les modules (4x4) du GPV reçoivent la même quantité d'éclairement de 1000 W/m^2 .

✚ **Coin (Corner)**

En condition d'ombrage **Corner** comme illustré à la Figure III.24 (b), 4 modules d'angle du coin supérieur gauche sont sous l'ombre de $500\text{W}/\text{m}^2$ les modules restants sont exposés à plein rayonnement de $1000\text{W}/\text{m}^2$.

✚ **Centre (Center)**

Dans la condition d'ombrage **Center** comme illustré à la Figure III. 24(c), les modules au centre sont sous ombrage de $500\text{W}/\text{m}^2$, le reste des modules recueille l'éclairement de $1000\text{W}/\text{m}^2$.

✚ **Côté droit (Right side)**

Dans la condition d'ombrage illustré à la Figure III. 24 (d), la première colonne à partir de droit est sous ombrage de $500\text{W}/\text{m}^2$ et les trois colonnes restantes reçoivent un éclairement de $1000\text{W}/\text{m}^2$.

✚ **Bas (Bottom)**

Dans les conditions d'ombrage **Bottom** comme indiqué dans la Figure III. 24 (e), la 1^e rangée à partir du bas est sous ombrage de $500\text{W}/\text{m}^2$ et les lignes restantes collectent l'irradiance de $1000\text{W}/\text{m}^2$.

✚ **En forme de L (L shaped)**

Dans la condition d'ombrage suivante illustré à la Figure III. 24 (f), la première colonne à partir de la gauche et la première rangée à partir du bas sous forme de L à l'envers sont sous ombrage de $500\text{W}/\text{m}^2$, les 9 modules restants reçoivent un éclairement de $1000\text{W}/\text{m}^2$.

✚ **Cadre (Frame)**

Dans ce cas comme indique à la Figure III. 24 (g), la première rangée du bas et du haut, la première colonne à partir de la droite et la première à partir de la gauche sont sous ombrage de $500\text{W}/\text{m}^2$, Les quatre modules restants sont exposés à plein rayonnement.

✚ **Aléatoire (Random)**

Dans ce PSC, les modules sont ombrés aléatoirement. Les modules 11 et 22, 34, et 43 sont soumis à $500\text{W}/\text{m}^2$ et les modules restants sont incidents avec un ensoleillement de $1000\text{W}/\text{m}^2$. Ceci est représenté sur la Figure III. 24 (h).

✚ **Court et long (Short and Long)**

Dans ce cas les deux premiers modules du haut de la première et la deuxième colonne à partir de la droite ont respectivement un ensoleillement de $500\text{W}/\text{m}^2$.

Les deux modules de la première et de la deuxième colonne du bas à partir de la droite ont une insolation solaire de $300\text{W}/\text{m}^2$, également les deux premiers modules inférieurs

de la première et la deuxième colonne à partir de la gauche ont respectivement un ensoleillement de $500\text{W}/\text{m}^2$. Le reste des modules ont un ensoleillement de $1000\text{W}/\text{m}^2$. Ceci est représenté sur la Figure III. 24 (i).

Diagonale

Chaque diagonale de 4×4 reçoit un niveau d'ensoleillement différent. Les modules 11, 22, 33, 44 sont soumis à un niveau d'ensoleillement de $500\text{W}/\text{m}^2$, les modules 14, 23, 32, 41 sont soumis à un niveau d'ensoleillement de $300\text{W}/\text{m}^2$ et les modules restants sont incidents avec une insolation de $1000\text{W}/\text{m}^2$. Ceci est représenté sur la Figure III. 24 (j).

Court (Short)

Dans cette condition, la première rangée est soumise à un ensoleillement de $500\text{W}/\text{m}^2$, la deuxième ligne a $300\text{W}/\text{m}^2$ et le reste des modules recueille l'éclairement de $1000\text{W}/\text{m}^2$ comme indique la Figure III. 24(k).

Long

Les modules 11,12 reçoivent un éclairement de $700\text{W}/\text{m}^2$, 21,22 reçoivent $500\text{W}/\text{m}^2$, et les modules 31,32 reçoivent $300\text{W}/\text{m}^2$. Les modules restants collectent l'irradiance de $1000\text{W}/\text{m}^2$. Ceci est représenté sur la Figure III. 24 (L)

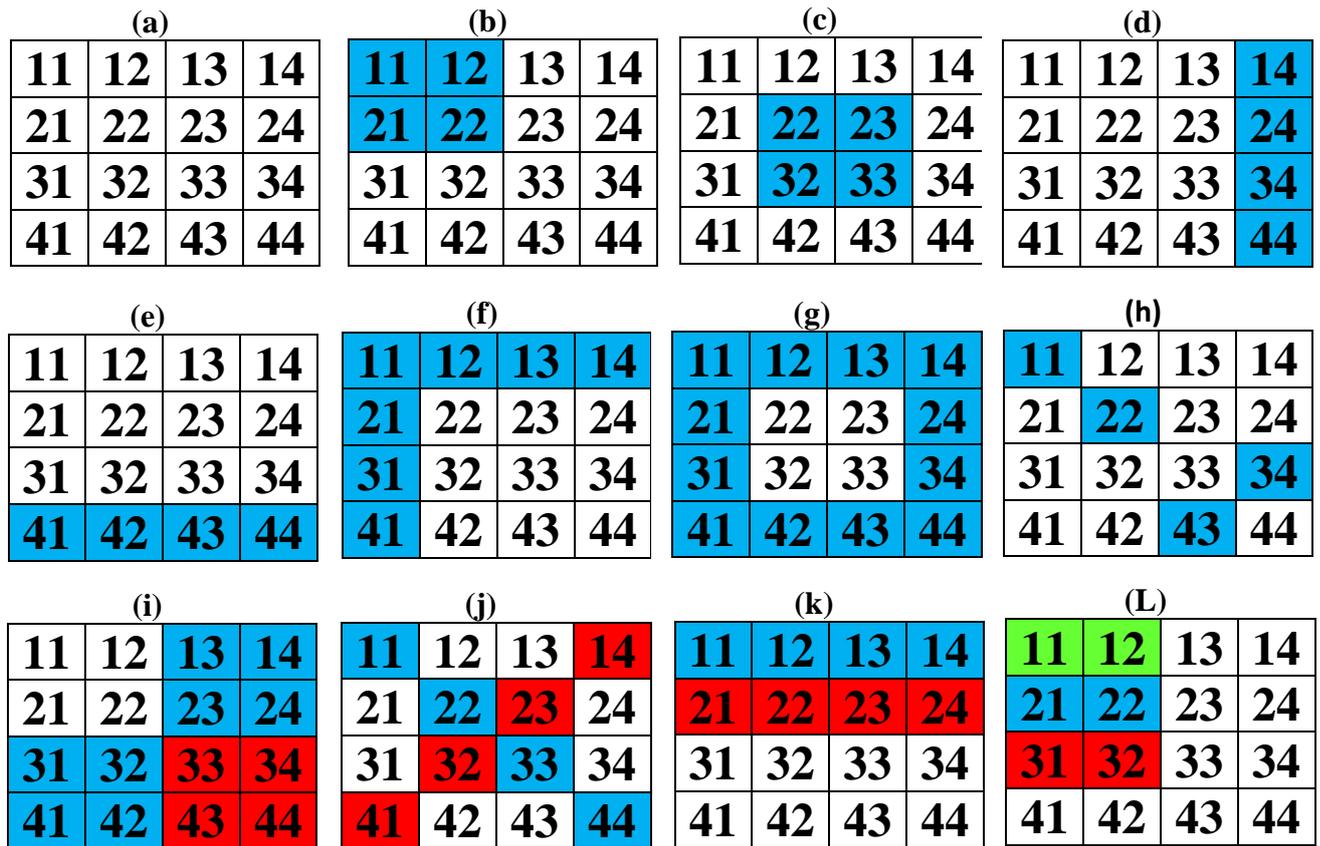


Figure III. 24: Les motifs d'ombrage

Chapitre IV

Résultats et discussions

« Il faut viser la lune, parce qu'au moins, si vous échouez, vous finirez dans les étoiles »
Oscar Wilde

Introduction

Dans ce chapitre les performances des différentes configurations seront comparées en fonction de la tension en circuit ouvert V_{oc} , du courant de court-circuit I_{cc} , du point de puissance maximale globale (GMPP), de la tension maximale V_{mpp} , du courant maximal I_{mpp} , de facteur de forme FF et les pertes de puissances ΔPM .

IV.1. Résultats de simulation des différentes configurations

◆ Sous un motif d'ombrage STC

Les performances des différentes configurations peuvent être observées dans le tableau suivant. Un courant I_{mpp} et une tension V_{mpp} de 4.66A et 68.46V, respectivement ont été générés par les configurations.

Les caractéristiques P-V sont identiques pour toutes les configurations, il n'y a pas de pics locaux et donc un seul point de puissance maximum est présent dans toutes les configurations.

Conditions Environnemental	Configuration (4×4)	P_{mpp} (W)	V_{oc} (V)	V_{mpp} (V)	I_{sc} (A)	I_{mpp} (A)
STC	SP	319.93	87.76	68.46	5.08	4.66
	BL	319.93	87.76	68.46	5.08	4.66
	HC	319.93	87.76	68.46	5.08	4.66
	TCT	319.93	87.76	68.46	5.08	4.66
	ATT	319.93	87.76	68.46	5.08	4.66
	ATCTBL	319.93	87.76	68.46	5.08	4.66
	MBL	319.93	87.76	68.46	5.08	4.66
	LD	319.93	87.76	68.46	5.08	4.66
	TTCL	319.93	87.76	68.46	5.08	4.66
	HCTCT	319.93	87.76	68.46	5.08	4.66
	MB	319.93	87.76	68.46	5.08	4.66
	BLTCT	319.93	87.76	68.46	5.08	4.66
	CTHC	319.93	87.76	68.46	5.08	4.66
	SPTCT	319.93	87.76	68.46	5.08	4.66
	TT	319.93	87.76	68.46	5.08	4.66
	DS	319.93	87.76	68.46	5.08	4.66
	SUDOKO	319.93	87.76	68.46	5.08	4.66
MS	319.93	87.76	68.46	5.08	4.66	

Table I : Résultats de simulation des différentes configurations en STC.

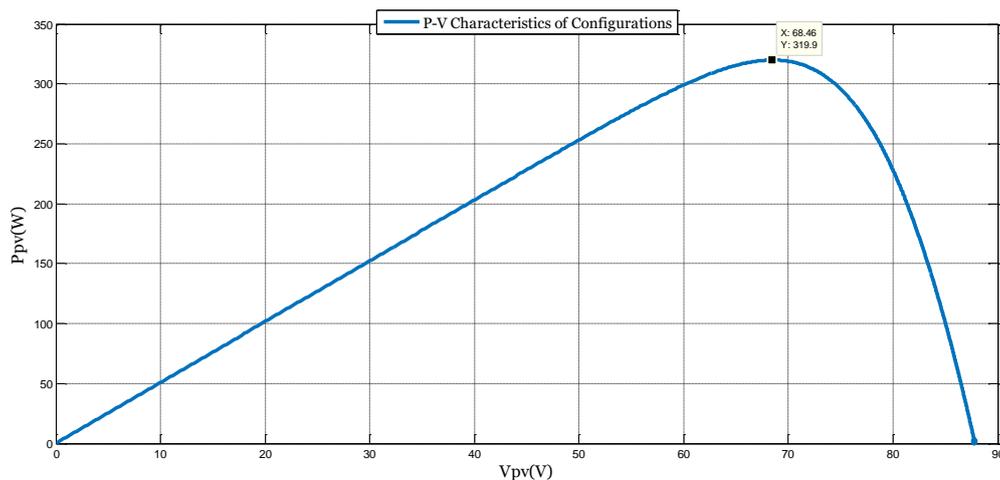


Figure IV. 1: P-V Caractéristiques des différentes configurations en STC

◆ **Sous un motif d’ombrage Corner**

Les caractéristiques P-V des configurations PVs pour le cas d’ombrage **Corner** sont montrés dans la Figure IV. 2.

On observe l’apparition des pics locaux qui sont loin des pics globaux pour les configurations hybrides et conventionnels “SP, BL, HC, TCT, ATCTBL, MBL, LD, TTCL, HCTCT, MB, BLTCT, CTHC, SPTCT et TT”. Cependant, les configurations Sudoku et MS produisent un véritable GMPP sans aucun pic local. Le GMPP obtenu pour toutes les configurations est donné dans Tableau suivant.

Conditions Environnemental	Configuration (4×4)	P _{mpp} (W)	V _{oc} (V)	V _{mpp} (V)	I _{sc} (A)	I _{mpp} (A)
Corner	SP	246.78	86.87	70.34	5.08	3.50
	BL	249.37	86.88	69.72	5.08	3.57
	HC	251.82	86.90	70.25	5.08	3.58
	TCT	257.15	86.92	70.45	5.08	3.65
	ATT	255.58	86.91	70.14	5.08	3.62
	ATCTBL	257.15	86.92	70.45	5.08	3.65
	MBL	253.73	86.90	70.25	5.08	3.61
	LD	246.78	86.87	69.63	5.08	3.54
	TTCL	254.84	86.91	70.49	5.08	3.61
	HCTCT	254.41	86.91	70.25	5.08	3.62
	MB	253.62	86.90	70.23	5.08	3.61
	BLTCT	257.15	86.92	70.45	5.08	3.65
	CTHC	249.20	86.88	69.88	5.08	3.56
	SPTCT	257.15	86.92	70.45	5.08	3.65
	TT	254.69	86.91	70.29	5.08	3.62
	DS	262.86	86.97	71.04	5.08	3.70
	SUDOKO	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10
MS	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10	

Table II: Résultats de la simulation des différentes configurations en Corner

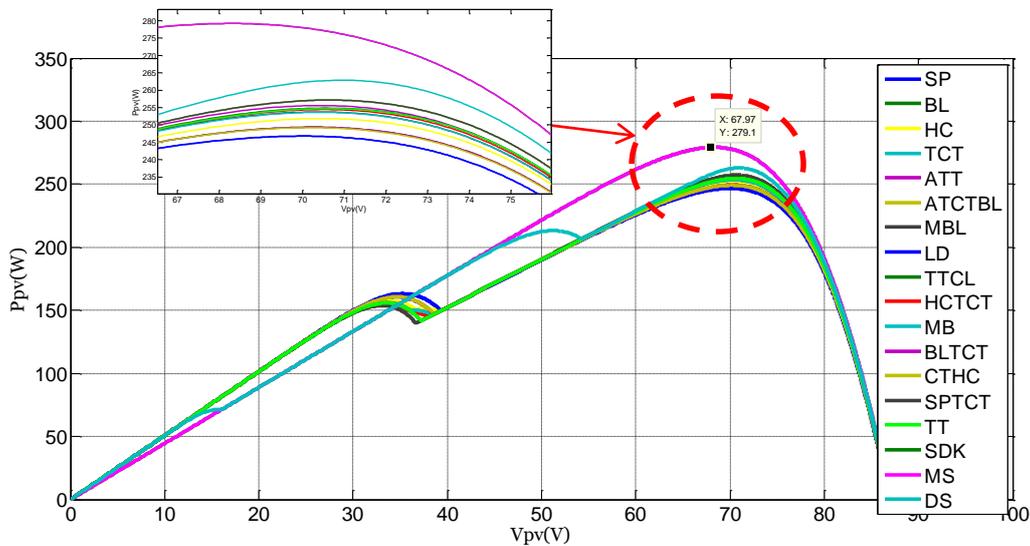


Figure IV. 2: P-V Caractéristiques des différentes configurations en corner condition

◆ Sous un motif d'ombrage Center

Les caractéristiques P-V des configurations pour le cas d'ombrage **Center** sont illustrés à la Figure IV. 3.

On observe que les pics locaux sont loin des pics globaux pour toutes les configurations.

En revanche, la configuration MS produit un GMPP réel sans pic local.

La puissance de sortie maximale globale obtenue pour toutes les configurations PVs est indiquée dans le tableau suivant.

Conditions Environnemental	Configuration (4x4)	P _{mpp} (W)	V _{oc} (V)	V _{mpp} (V)	I _{sc} (A)	I _{mpp} (A)
Center	SP	246.78	86.87	69.63	5.08	3.54
	BL	246.78	86.87	69.63	5.08	3.54
	HC	251.84	86.89	70.17	5.08	3.58
	TCT	257.15	86.92	70.45	5.08	3.65
	ATT	257.15	86.92	70.45	5.08	3.65
	ATCTBL	257.15	86.92	70.45	5.08	3.65
	MBL	251.84	86.89	70.17	5.08	3.58
	LD	257.15	86.92	70.45	5.08	3.65
	TTCL	254.84	86.91	70.49	5.08	3.61
	HCTCT	257.15	86.92	70.45	5.08	3.65
	MB	257.15	86.92	70.45	5.08	3.65
	BLTCT	257.15	86.92	70.45	5.08	3.65
	CTHC	252.34	86.90	70.42	5.08	3.58
	SPTCT	246.78	86.87	69.63	5.08	3.54
	TT	254.77	86.91	70.30	5.08	3.62
	DS	262.86	86.95	71.22	5.08	3.69
	SUDOKO	257.15	86.92	70.45	5.08	3.65
MS	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10	

Tab III: Résultats de la simulation des différentes configurations en Center

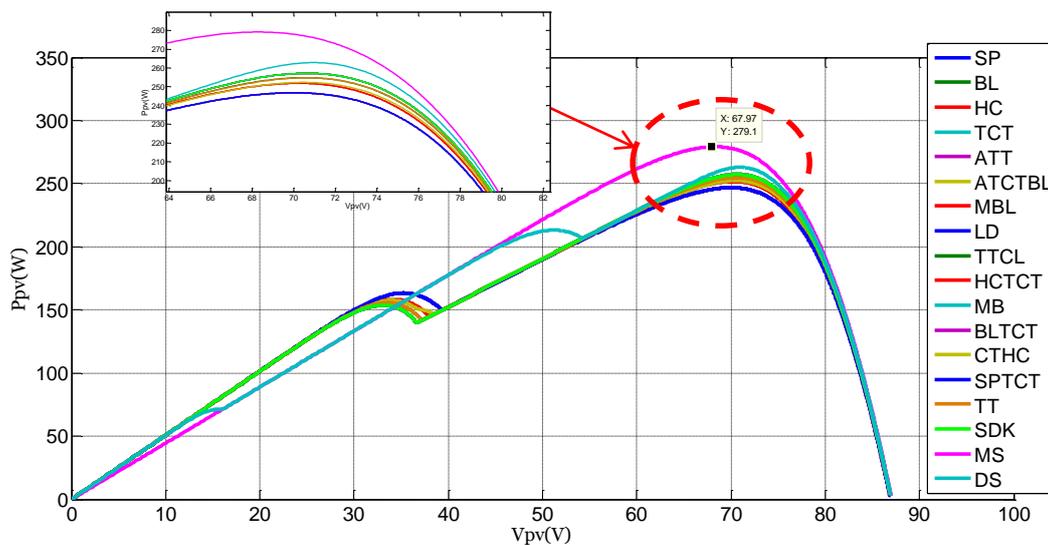


Figure IV. 3: P-V Caractéristiques des différentes configurations en center condition

◆ **Sous un motif d’ombrage Bottom**

Dans le cas d'ombrage **Bottom**, On observe que les caractéristiques P-V sont identiques pour les classiques et les hybrides avec l’apparitions d’un pic local qui est proches de pic global comme le montre la Figure IV. 4, en revanche les configurations MS, DS, et Sudoku produisent le même GMPP qui est donné dans le tableau suivant sans aucun pic local.

Conditions Environnemental	Configuration (4×4)	P _{mpp} (W)	V _{oc} (V)	V _{mpp} (V)	I _{sc} (A)	I _{mpp} (A)
Bottom	SP	236.40	86.79	50.41	5.08	4.68
	BL	236.40	86.79	50.41	5.08	4.68
	HC	236.40	86.79	50.41	5.08	4.68
	TCT	236.40	86.79	50.41	5.08	4.68
	ATT	236.40	86.79	50.41	5.08	4.68
	ATCTBL	236.40	86.79	50.41	5.08	4.68
	MBL	236.40	86.79	50.41	5.08	4.68
	LD	236.40	86.79	50.41	5.08	4.68
	TTCL	236.40	86.79	50.41	5.08	4.68
	HCTCT	236.40	86.79	50.41	5.08	4.68
	MB	236.40	86.79	50.41	5.08	4.68
	BLTCT	236.40	86.79	50.41	5.08	4.68
	CTHC	236.40	86.79	50.41	5.08	4.68
	SPTCT	236.40	86.79	50.41	5.08	4.68
	TT	236.40	86.79	50.41	5.08	4.68
	DS	279.18	86.79	67.97	4.44	4.10
	SUDOKO	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10
	MS	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10

Table IV: Résultats de la simulation des différentes configurations en BOTTOM

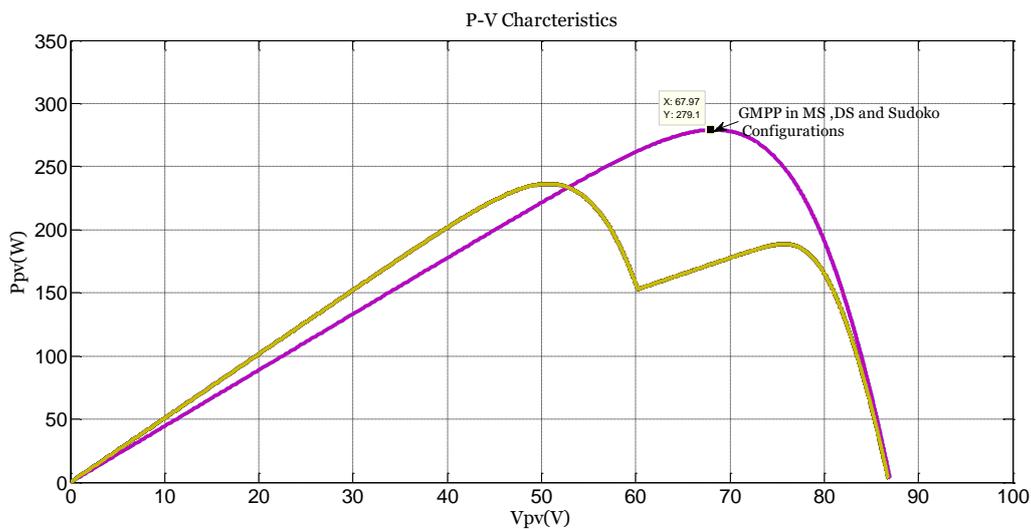


Figure IV. 4: P-V Caractéristiques des différentes configurations en Bottom condition

◆ **Sous un motif d'ombrage Right-Side**

Les caractéristiques P-V des configurations pour ce cas d'ombrage sont toutes identiques et illustrées dans la Figure IV. 5.

C'est observé que toutes les configurations présentent un seul point de puissance maximale. C'est à dire, elles produisent le même GMPP qui est donné dans le tableau suivant.

Conditions Environnemental	Configuration (4×4)	P_{mpp} (W)	V_{oc} (V)	V_{mpp} (V)	I_{sc} (A)	I_{mpp} (A)
Right-Side	SP	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10
	BL	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10
	HC	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10
	TCT	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10
	ATT	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10
	ATCTBL	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10
	MBL	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10
	LD	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10
	TTCL	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10
	HCTCT	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10
	MB	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10
	BLTCT	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10
	CTHC	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10
	SPTCT	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10
	TT	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10
	DS	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10
	SUDOKO	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10
MS	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10	

Table V: Résultats de la simulation des différentes configurations en Right-Side

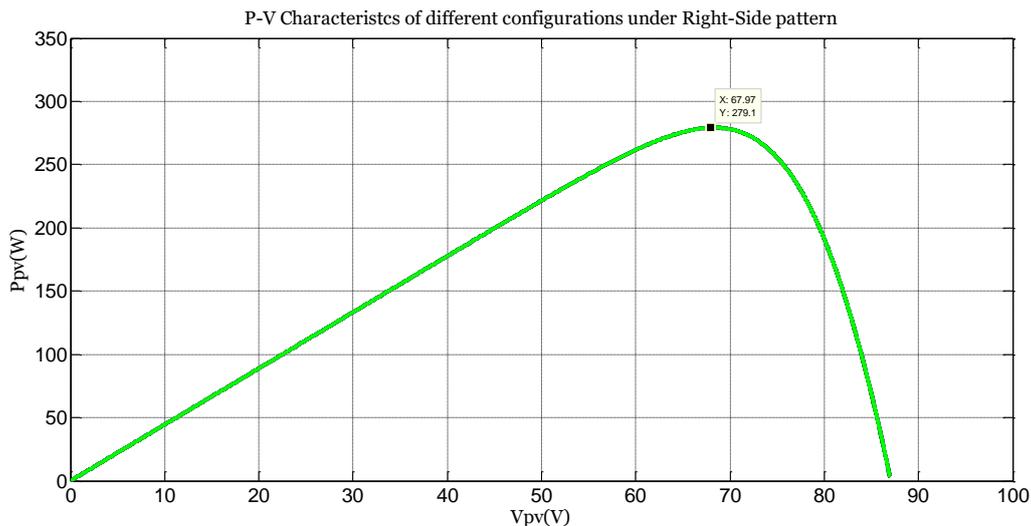


Figure IV. 5: P-V Caractéristiques des différentes configurations en Right-Side condition

◆ **Sous un motif d'ombrage L-Shaped**

Dans ce cas, les divers pics multiples sont observés sur la courbe P-V comme le montre la Figure IV. 6.

On observe l'apparition de deux pics sur les courbes pour les hybrides et les conventionnels tels que les pics locaux sont proches des pics globaux.

En revanche les configurations MS, DS, et Sudoku produisent le même GMPP qui est donné dans le tableau suivant avec deux sommets sur la caractéristique P-V.

Conditions Environnemental	Configuration (4×4)	P _{mpp} (W)	V _{oc} (V)	V _{mpp} (V)	I _{sc} (A)	I _{mpp} (A)
L-shaped	SP	209.58	86.15	51.08	4.44	4.10
	BL	207.55	86.17	50.63	4.44	4.09
	HC	206.44	86.19	50.60	4.44	4.07
	TCT	206.46	86.20	50.39	4.44	4.09
	ATT	206.44	86.19	50.60	4.44	4.07
	ATCTBL	206.44	86.19	50.60	4.44	4.07
	MBL	208.65	86.16	50.86	4.44	4.10
	LD	206.44	86.19	50.60	4.44	4.07
	TTCL	206.45	86.19	50.28	4.44	4.10
	HCTCT	206.44	86.19	50.60	4.44	4.07
	MB	206.44	86.19	50.60	4.44	4.07
	BLTCT	207.55	86.17	50.63	4.44	4.09
	CTHC	206.45	86.19	50.28	4.44	4.10
	SPTCT	207.44	86.17	50.82	4.44	4.08
	TT	206.44	86.19	50.60	4.44	4.07
	DS	244.35	86.31	68.40	4.44	3.57
	SUDOKO	244.35	86.31	68.40	4.44	3.57
MS	244.35	86.31	68.40	4.44	3.57	

Table VI: Résultats de la simulation des différentes configurations en L-Shaped

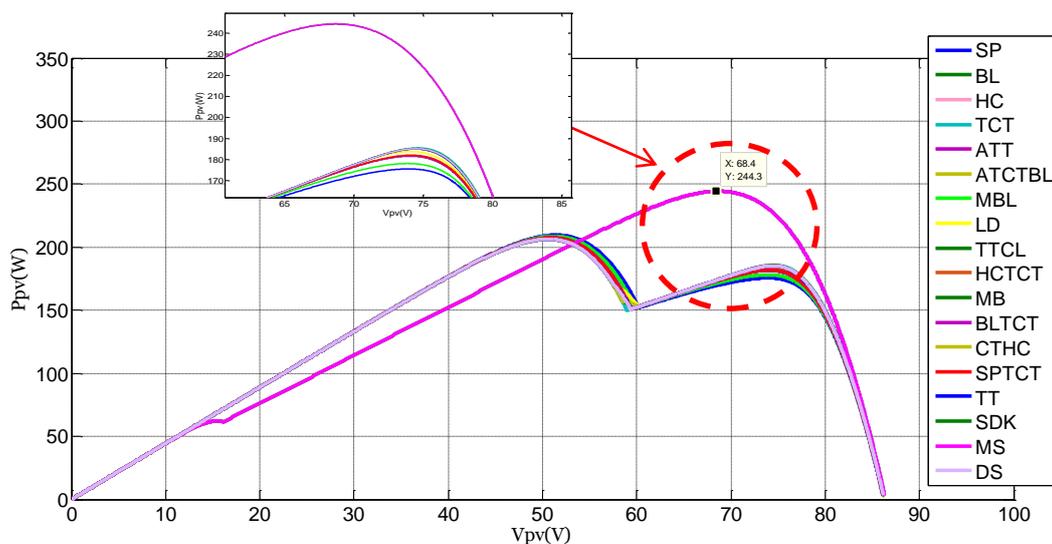


Figure IV. 6: P-V Caractéristiques des différentes configurations en L-Shaped condition

◆ **Sous un motif d'ombrage Frame**

Les caractéristiques P-V du cas d'ombrage **Frame** est illustrée à la Figure IV. 7.

On remarque que le MPP local est à distance du MPP global pour toutes les configurations hybrides, conventionnels et Sudoku. Par contre aucun MPP local n'est observé pour la configuration MS, ce qui a été clairement observé dans la Fig. 48 avec un GMPP élevée. Le GMPP obtenu pour toutes les configurations PVs est observés dans le tableau suivant.

Conditions Environnemental	Configuration (4×4)	P _{mpp} (W)	V _{oc} (V)	V _{mpp} (V)	I _{sc} (A)	I _{mpp} (A)
Frame	SP	164.92	84.90	69.45	3.81	2.37
	BL	164.92	84.90	69.45	3.81	2.37
	HC	164.11	84.92	69.45	3.81	2.36
	TCT	171.90	84.98	70.29	3.81	2.44
	ATT	171.90	84.98	70.29	3.81	2.44
	ATCTBL	171.90	84.98	70.29	3.81	2.44
	MBL	164.11	84.92	69.45	3.81	2.36
	LD	171.90	84.98	70.29	3.81	2.44
	TTCL	168.57	84.96	70.27	3.81	2.39
	HCTCT	171.90	84.98	70.29	3.81	2.44
	MB	171.90	84.98	70.29	3.81	2.44
	BLTCT	171.90	84.98	70.29	3.81	2.44
	CTHC	168.46	84.95	70.01	3.81	2.40
	SPTCT	164.92	84.90	69.45	3.81	2.37
	TT	170.15	84.97	70.30	3.81	2.42
	DS	177.00	85.03	71.27	3.81	2.48
	SUDOKO	171.90	84.98	70.29	3.81	2.44
MS	197.81	85.08	67.30	3.17	2.93	

Table VII: Résultats de la simulation des différentes configurations en Frame

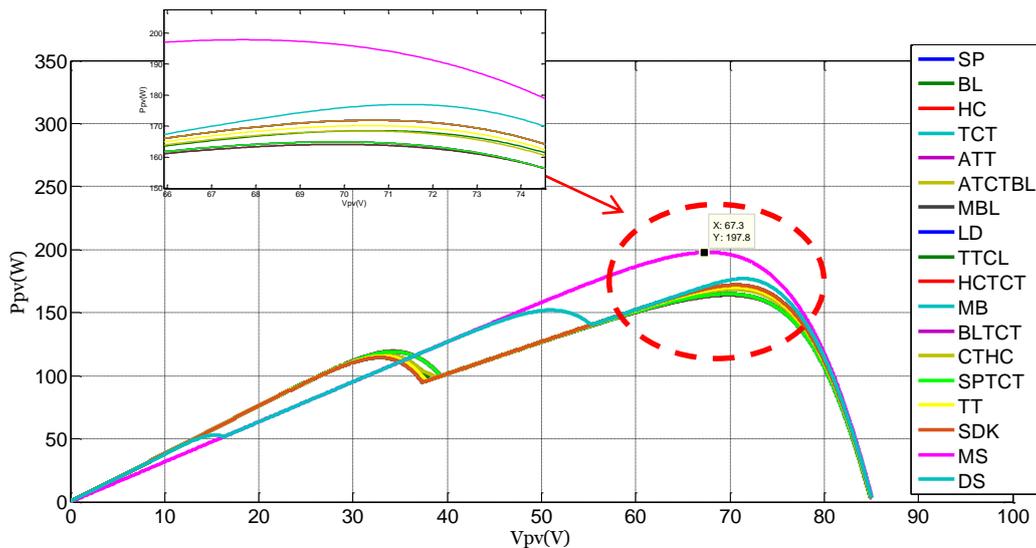


Figure IV. 7: P-V Caractéristiques des différentes configurations en Frame condition

◆ **Sous un motif d'ombrage Random**

Les caractéristiques P-V des configurations de GPV pour le cas d'ombrage **Random** sont illustrés dans la Figure IV. 8. Dans ce cas chaque configuration de GPV présente plusieurs pics. Parmi tous les pics multiples, le TCT, ATT, ATCTBL, BL-TCT et Sudoku produisent de vrai GMPP sans aucun pic local. Le GMPP obtenu pour toutes les configurations PVs est observés dans le tableau suivant.

Conditions Environnemental	Configuration (4x4)	P _{mpp} (W)	V _{oc} (V)	V _{mpp} (V)	I _{sc} (A)	I _{mpp} (A)
Random	SP	236.40	86.79	50.41	5.08	4.68
	BL	225.59	86.85	72.65	5.08	3.10
	HC	250.70	86.92	70.09	5.08	3.57
	TCT	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10
	ATT	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10
	ATCTBL	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10
	MBL	226.60	86.87	72.89	5.08	3.10
	LD	257.15	86.92	70.45	5.08	3.65
	TTCL	254.45	86.92	69.98	5.08	3.63
	HCTCT	256.19	86.93	70.58	5.08	3.62
	MB	256.27	86.93	70.59	5.08	3.63
	BLTCT	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10
	CTHC	245.76	86.90	69.84	5.08	3.51
	SPTCT	246.78	86.87	69.63	5.08	3.54
	TT	257.89	86.93	70.45	5.08	3.66
	DS	262.86	86.95	71.04	5.08	3.74
SUDOKO	279.18	86.97	67.97	4.44	4.10	
MS	257.15	86.92	70.45	5.08	3.65	

Table VIII: Résultats de la simulation des différentes configurations en Random

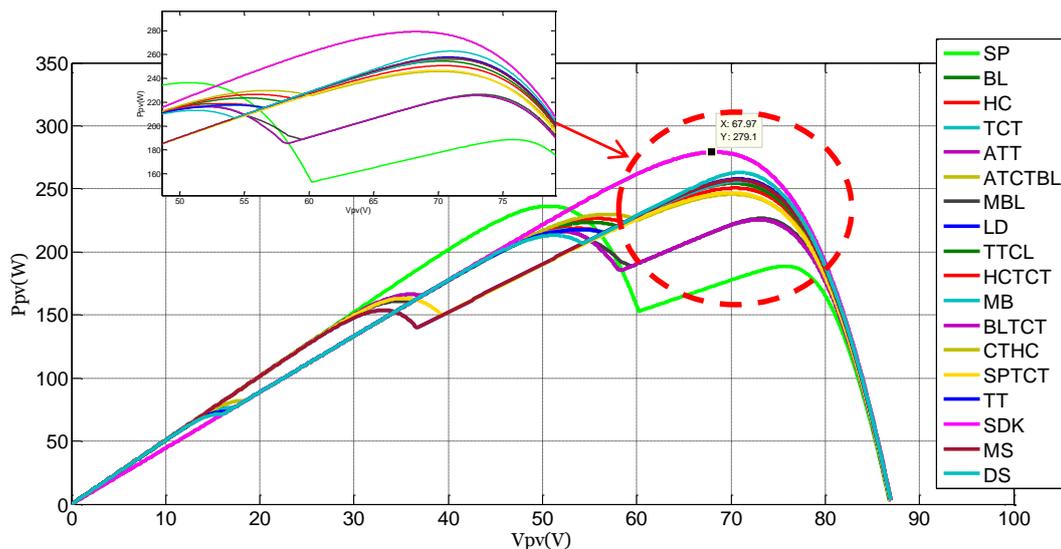


Figure IV. 8: P-V Caractéristiques des différentes configurations en Random condition

◆ **Sous un motif d’ombrage Short and Long**

Dans ce cas d’ombrage, les configurations hybrides et conventionnels ont deux pics et ils ont généré le plus faible GMPP par rapport aux autres configurations.

Le GMPP le plus élevé a été généré par Sudoku et MS sans aucun pic local. D’autre part la configuration DS génère également une puissance proche de MS et Sudoku avec quatre pics locaux légers. Les puissances de sorties GMPP obtenues pour toutes les configurations PVs sont données dans le tableau suivant.

Conditions Environnemental	Configuration (4x4)	P _{mpp} (W)	V _{oc} (V)	V _{mpp} (V)	I _{sc} (A)	I _{mpp} (A)
Short and long	SP	138.56	84.33	70.71	3.81	1.95
	BL	138.71	84.33	70.80	3.81	1.95
	HC	138.90	84.34	70.85	3.81	1.96
	TCT	139.03	84.35	70.93	3.81	1.96
	ATT	138.96	84.34	71.96	3.81	1.93
	ATCTBL	139.03	84.35	70.98	3.81	1.95
	MBL	138.75	84.34	70.91	3,81	1.95
	LD	138.56	84.33	70.71	3.81	1.95
	TTCL	138.76	84.34	70.92	3.81	1.95
	HCTCT	138.85	84.34	70.94	3.81	1.95
	MB	138.87	84.34	70.84	3.81	1.96
	BLTCT	139.03	84.35	70.93	3.81	1.96
	CTHC	138.71	84.33	70.80	3.81	1.95
	SPTCT	139.03	84.35	70.93	3.81	1.95
	TT	138.91	84.34	70.90	3.81	1.95
	DS	170.25	84.54	70.00	3.55	2.43
	SUDOKO	181.31	84.58	67.05	2.92	2.70
MS	181.31	84.58	67.05	2.92	2.70	

Table IX: Résultats de la simulation des différentes configurations en Short and long

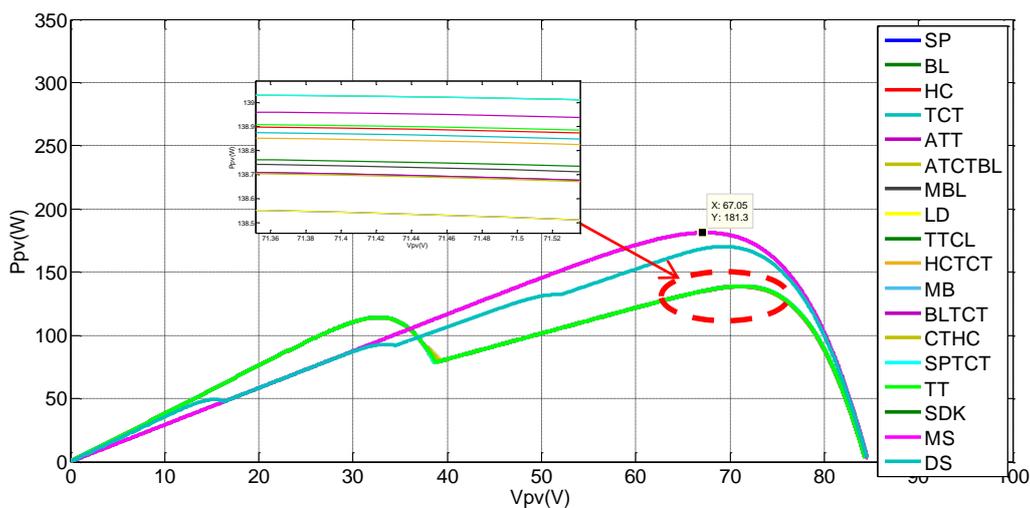


Figure IV. 9: P-V Caractéristiques des différentes configurations en S and L condition

◆ **Sous un motif d'ombrage Diagonal**

Dans ce cas d'ombrage, les différents pics sont observés sur la courbe P-V comme le montre la Figure IV. 10.

Parmi tous les pics multiples obtenus, les configurations TCT, ATT, ATCTBL, HCTCT, MB, BLTCT et MS produisent une puissance maximale globale réelle sans aucun pic local. Les puissances de sorties GMPP obtenues pour toutes les configurations PVs sont données dans le tableau suivant.

Conditions Environnemental	Configuration (4x4)	P _{mpp} (W)	V _{oc} (V)	V _{mpp} (V)	I _{sc} (A)	I _{mpp} (A)
Diagonal	SP	152.54	85.10	32.91	5.08	4.63
	BL	152.54	85.10	32.91	5.08	4.63
	HC	168.25	85.32	51.31	5.08	3.27
	TCT	221.91	85.66	67.53	3.55	3.28
	ATT	221.91	85.66	67.53	3.55	3.28
	ATCTBL	221.91	85.66	67.53	3.55	3.28
	MBL	168.25	85.32	51.31	5.08	3.27
	LD	216.05	85.65	68.54	3.81	3.15
	TTCL	180.15	85.50	70.38	4.44	2.55
	HCTCT	221.91	85.66	67.53	3.55	3.28
	MB	221.91	85.66	67.53	3.55	3.28
	BLTCT	221.91	85.66	67.53	3.55	3.28
	CTHC	164.48	85.41	70.93	4.44	2.31
	SPTCT	152.54	85.10	32.91	5.08	4.63
	TT	183.62	85.55	71.51	4.44	2.56
	DS	185.00	85.23	51.43	5.08	3.59
	SUDOKO	152.54	85.10	32.91	5.08	4.63
MS	221.91	85.66	67.53	3.55	3.28	

Table X: Résultats de la simulation des différentes configurations en Diagonal

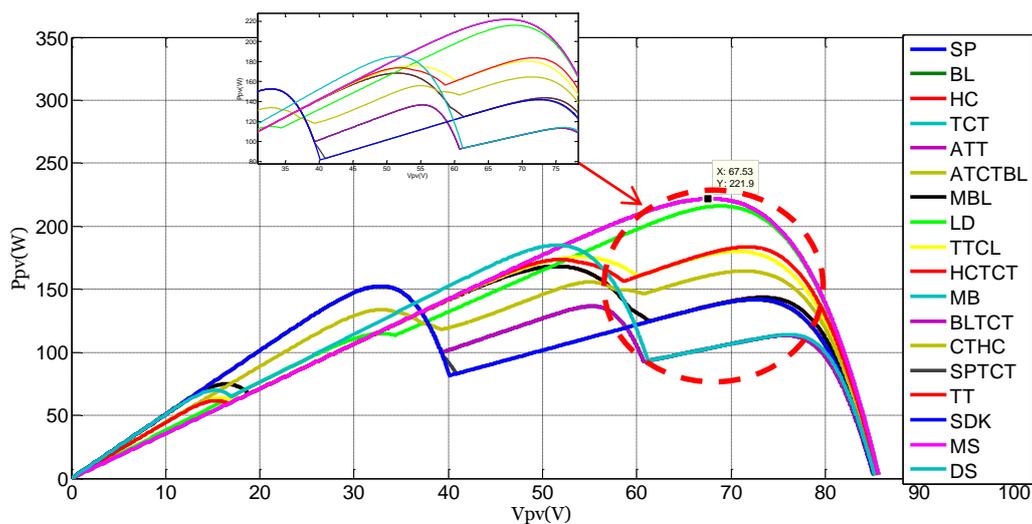


Figure IV. 10: P-V Caractéristiques des différentes configurations en Diagonal condition

◆ Sous un motif d'ombrage Short

Les caractéristiques P-V des configurations pour ce cas d'ombrage sont montrés dans les Figure IV. 11.

A partir des résultats on observe l'apparition de trois pics à la fois pour les classiques et les hybrides tels que les pics locaux sont très proches des pics globaux. On constate également que les pics locaux sont loin des pics globaux pour la configuration DS. En revanche les configurations MS et Sudoku présentent un point de puissance maximale GMPP sans aucun pic local. Le GMPP obtenu pour toutes les configurations PVs est donné dans le tableau suivant.

Conditions Environnemental	Configuration (4x4)	P_{mpp} (W)	V_{oc} (V)	V_{mpp} (A)	I_{sc} (A)	I_{mpp} (A)
Short	SP	152.54	85.10	33.02	5.08	4.61
	BL	152.54	85.10	33.03	5.08	4.61
	HC	152.54	85.10	33.03	5.08	4.61
	TCT	152.54	85.10	33.03	5.08	4.61
	ATT	152.54	85.10	33.03	5.08	4.61
	ATCTBL	152.54	85.10	33.03	5.08	4.61
	MBL	152.54	85.10	33.03	5.08	4.61
	LD	152.54	85.10	33.03	5.08	4.61
	TTCL	152.54	85.10	33.03	5.08	4.61
	HCTCT	152.54	85.10	33.03	5.08	4.61
	MB	152.54	85.10	33.03	5.08	4.61
	BLTCT	152.54	85.10	33.03	5.08	4.61
	CTHC	152.54	85.10	33.03	5.08	4.61
	SPTCT	152.54	85.10	33.03	5.08	4.61
	TT	152.54	85.10	33.03	5.08	4.61
	DS	188.84	85.59	72.26	4.44	2.61
	SUDOKO	221.91	85.66	67.53	3.55	3.28
	MS	221.91	85.66	67.53	3.55	3.28

Table XI: Résultats de la simulation des différentes configurations en Short

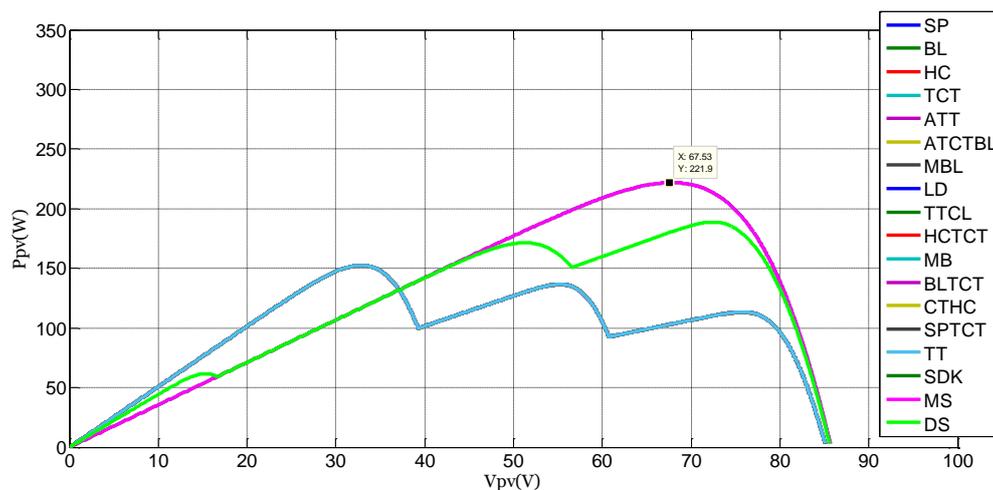


Figure IV. 11: P-V Caractéristiques des différentes configurations en Short condition

◆ **Sous un motif d’ombrage Long**

Les caractéristiques P-V des configurations pour ce cas d'ombrage sont montrés dans la Figure IV.12.

On observe que les pics locaux sont proches des pics globaux pour les configurations PVs conventionnels et hybrides. Cependant, la Sudoku produit un véritable GMPP dans cet ombrage avec deux sommets sur la caractéristique P-V. Le GMPP obtenu pour tous les modules PVs est donné dans le tableau suivant.

Conditions Environnemental	Configuration (4x4)	P _{mpp} (W)	V _{oc} (V)	V _{mpp} (V)	I _{sc} (A)	I _{mpp} (A)
Long	SP	212.77	86.39	69.64	5.08	3.05
	BL	219.67	86.43	70.60	5.08	3.11
	HC	222.02	86.43	70.83	5.08	3.13
	TCT	231.10	86.47	71.54	5.08	3.23
	ATT	218.86	86.39	69.77	5.08	3.13
	ATCTBL	221.54	86.39	70.73	5.08	3.15
	MBL	217.63	86.40	70.21	5.08	3.09
	LD	212.77	86.39	69.64	5.08	3.05
	TTCL	226.50	86.46	71.62	5.08	3.16
	HCTCT	226.32	86.45	71.20	5.08	3.17
	MB	218.05	86.39	69.88	5.08	3.12
	BLTCT	230.47	86.47	71.36	5.08	3.22
	CTHC	220.04	86.43	70.98	5.08	3.10
	SPTCT	221.54	86.39	70.73	5.08	3.13
	TT	226.39	86.44	70.96	5.08	3.19
	DS	250.59	86.52	69.54	4.69	3.60
	SUDOKO	251.08	86.52	69.06	4.44	3.63
MS	239.14	86.49	70.27	4.69	3.40	

Table XII: Résultats de la simulation des différentes configurations en Long

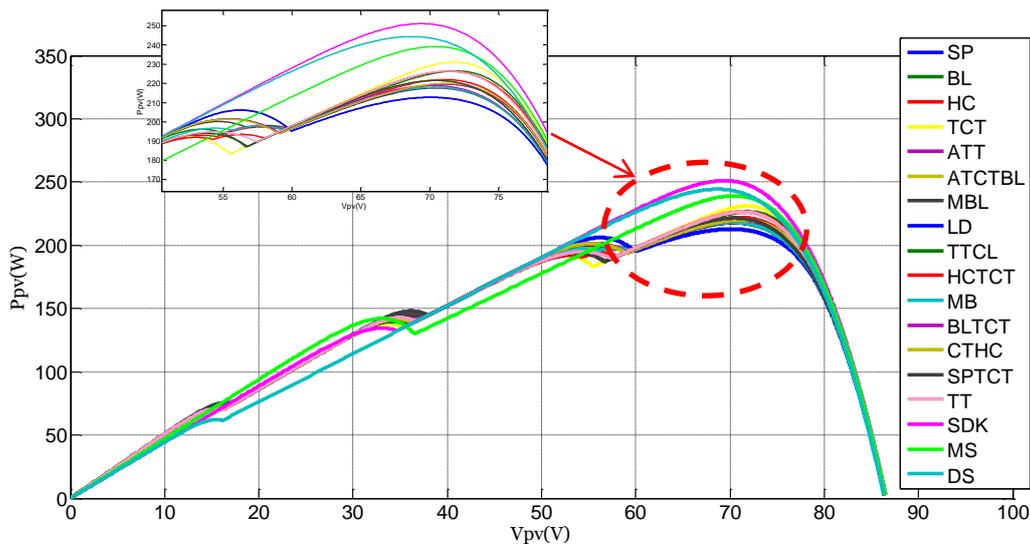


Figure IV. 12: P-V Caractéristiques des différentes configurations en Long condition

IV.2. Evaluation des performances des différentes configurations PV

Cette section décrit la comparaison des performances des configurations de GPVs sous une irradiance uniforme et non uniforme pour sélectionner la meilleure configuration PV.

L'évaluation des performances des configurations est déterminée par rapport à l'inadéquation des pertes de puissance et le facteur de forme (FF) et le GMPP.

La perte de puissance ΔPM (%) du système PV est donné dans l'équation suivante[33] :

$$\Delta PM(\%) = \frac{P_{MAX} - P_{mpp}}{P_{MAX}} \times 100 \quad (XI)$$

P_{MAX} : désigne la puissance maximale générée sous des conditions d'irradiance uniforme en STC (i.e., 1000 W/m² et 25°C).

P_{mpp} : La puissance maximale générée dans des conditions d'ombrage particulier.

La puissance maximale $V_{MP} \times I_{MP}$ générée à un PSC particulier est liée à la puissance $V_{OC} \times I_{SC}$ générée dans des conditions de test standard par le facteur de forme FF donné dans l'équation(VII. Chapitre1).

a) Uniforme :

Dans un état d'irradiance uniforme, tous les modules 4×4 des différentes configurations PV reçoivent une irradiance de 1000W/m².

A partir des caractéristiques de sortie illustrées dans l'histogramme de la Figure IV. 13 et le tableau suivant, toutes les configurations génèrent une puissance maximale de 319,93W et représente un MPP unique sur les caractéristiques de sortie qui est appelé le MPP global. Dans cette condition, les pertes de puissance de toutes ces configurations est nulle avec un facteur de forme égale à 71,7%.

Conditions Environnemental	Configuration (4×4)	ΔP_{MP} (%)	FF(%)
STC	SP	0	71.77
	BL	0	71.77
	HC	0	71.77
	TCT	0	71.77
	ATT	0	71.77
	ATCTBL	0	71.77
	MBL	0	71.77
	LD	0	71.77
	TTCL	0	71.77
	HCTCT	0	71.77
	MB	0	71.77
	BLTCT	0	71.77
	CTHC	0	71.77
	SPTCT	0	71.77
	TT	0	71.77
	DS	0	71.77
	SUDOKO	0	71.77
MS	0	71.77	

Table XIII : Les pertes de puissance et FF pour le motif uniforme

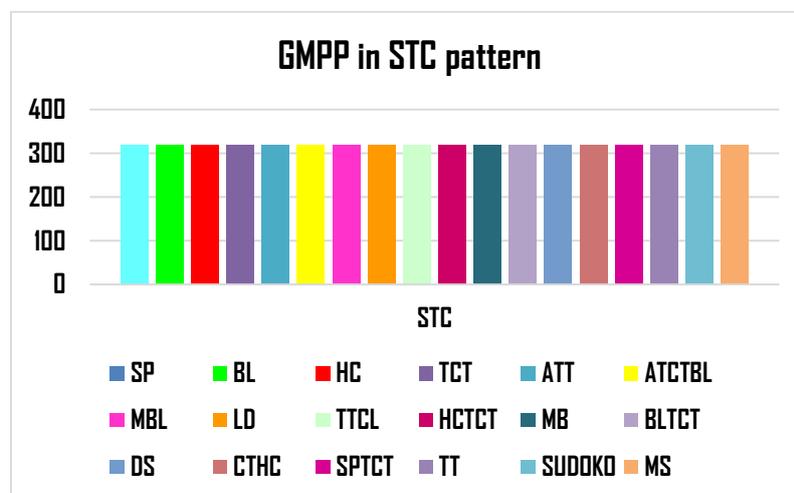


Figure IV. 13: GMPP des Configurations PV en STC

b) Corner :

Sous le motif d'ombrage Corner, la puissance maximale des configurations Sudoku et MS est de 279,18 W. Elle est élevée par rapport aux autres configurations conventionnelle et hybride qui n'ont pas dépassées le 257,15W. Les pertes de puissance pour SP, BL, LD et CTHC ont été assez importantes avec des taux qui dépassent les 22%. En revanche, les configurations Sudoku et MS se retrouvent avec des taux de pertes plus faible dans les environs de 12,75% et un facteur de forme relativement élevée (72,29%). Donc elles peuvent être considérées les meilleures configurations pour ce motif d'ombrage.

Conditions Environnemental	Configuration (4x4)	ΔP_{MP} (%)	FF (%)
Corner	SP	22,88	56,00
	BL	22,07	56,50
	HC	21,30	57,04
	TCT	19,64	58,23
	ATT	20,01	57,88
	ATCTBL	19,64	58,23
	MBL	20,70	57,47
	LD	22,88	56,00
	TTCL	20,63	57,72
	HCTCT	20,49	57,62
	MB	20,74	57,45
	BLTCT	19,64	58,23
	CTHC	22,12	56,46
	SPTCT	19,64	58,23
	TT	20,40	57,68
	DS	17,85	59,49
	SUDOKO	12,75	72,29
	MS	12,75	72,29

Table XIV: Les pertes de puissance et FF pour le motif Corner

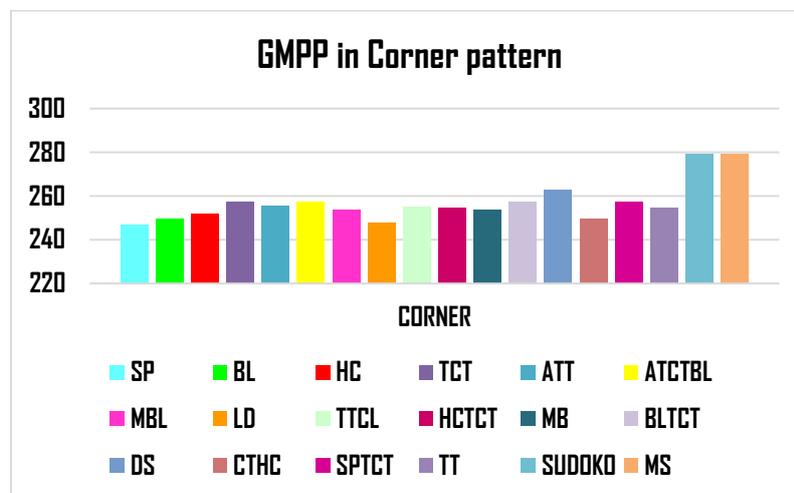


Figure IV. 14: GMPP des Configurations PV en Corner

c) Center :

Dans le motif Center, la configuration PV MS génère une puissance maximale de 279.18W suivie par DS avec 262.86W, tandis que TCT, ATT, ATCTBL, LD, HCTCT, MB, BLHC, et Sudoku se limitent à 257.15W.

On observe que la perte de puissance est minimale pour la configuration MS 12,75% avec un facteur de forme accru 72,29%. D'autre part, les configurations SP, BL, SPTCT ont des pertes de puissance plus importantes qui touchent les 22% avec un FF plus dégradé. Donc pour ce cas d'ombrage, la configuration MS est le choix évident.

Conditions Environnemental	Configuration (4x4)	ΔP_{MP} (%)	FF(× 100)
Center	SP	22,88	56,00
	BL	22,88	56,00
	HC	21,30	57,40
	TCT	19,64	58,23
	ATT	19,64	58,23
	ATCTBL	19,64	58,23
	MBL	21,30	57,40
	LD	19,64	58,23
	TTCL	20,63	57,72
	HCTCT	19,64	58,23
	MB	19,64	58,23
	BLTCT	19,64	58,23
	CTHC	21,14	57,16
	SPTCT	22,88	56,00
	TT	20,38	57,70
	DS	17,85	59,49
	SUDOKO	19,64	58,23
	MS	12,75	72,29

Table XV: Les pertes de puissance et FF pour le motif Center

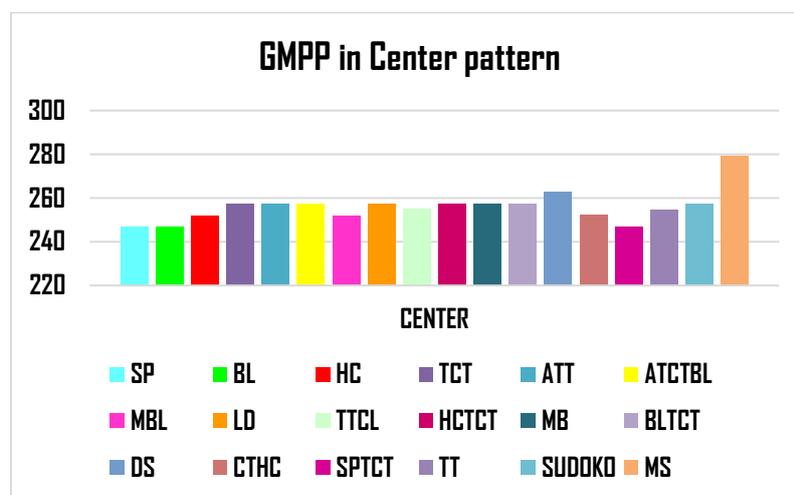


Figure IV. 15: GMPP des Configurations PV en Center

d) Bottom :

Dans le motif d'ombrage Bottom, la configuration Sudoku, DS et MS génèrent une puissance maximale de 279,18W, tandis que r les autres configurations se limitent à 236,40W.

Une perte de puissance de 26,12% avec une dégradation du facteur de forme de l'ordre de 53,61% ont été enregistrées pour toutes les configurations hybrides et conventionnelles. D'autre part, seules les configurations DS, Sudoku et MS qui sont moins affectées avec une perte de 12,75% et un facteur de forme de 72,29%. Donc les configurations DS, MS et Sudoku sont les configurations les plus satisfaites pour ce motif d'ombrage.

Conditions Environnemental	Configuration (4x4)	ΔP_{MP} (%)	FF($\times 100$)
Bottom	SP	26,12	53,61
	BL	26,12	53,61
	HC	26,12	53,61
	TCT	26,12	53,61
	ATT	26,12	53,61
	ATCTBL	26,12	53,61
	MBL	26,12	53,61
	LD	26,12	53,61
	TTCL	26,12	53,61
	HCTCT	26,12	53,61
	MB	26,12	53,61
	BLTCT	26,12	53,61
	CTHC	26,12	53,61
	SPTCT	26,12	53,61
	TT	26,12	53,61
	DS	12,75	72,29
	SUDOKO	12,75	72,29
	MS	12,75	72,29

Table XVI: Les pertes de puissance FF pour le motif Bottom

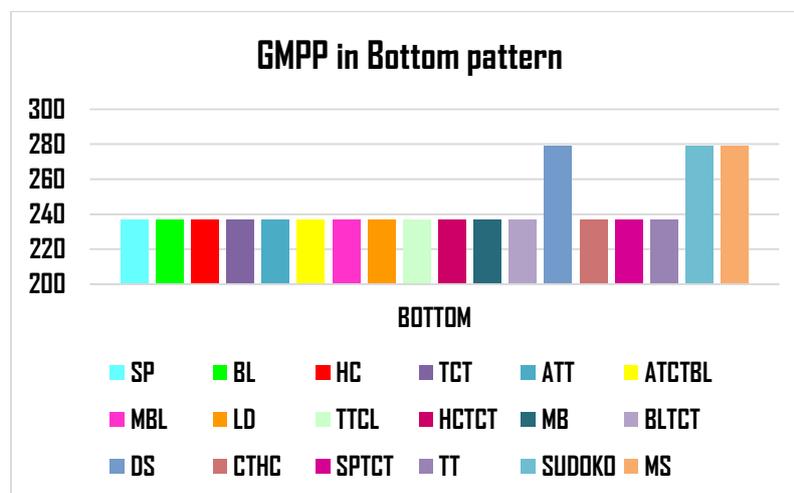


Figure IV. 16: GMPP des Configurations PV en Bottom.

e) **Right-Side :**

Dans ce type d'ombrage, toutes les configurations considérées ici atteignent le même GMPP. La puissance maximale obtenue pour toutes les configurations PV est de 279.18W.

Les pertes de puissances et le facteur de forme sont identiques pour toutes les configurations de 12,75% et 72,29%, respectivement

Conditions Environnemental	Configuration (4×4)	ΔP_{MP} (%)	FF(× 100)
Right-Side	SP	12,75	72,29
	BL	12,75	72,29
	HC	12,75	72,29
	TCT	12,75	72,29
	ATT	12,75	72,29
	ATCTBL	12,75	72,29
	MBL	12,75	72,29
	LD	12,75	72,29
	TTCL	12,75	72,29
	HCTCT	12,75	72,29
	MB	12,75	72,29
	BLTCT	12,75	72,29
	CTHC	12,75	72,29
	SPTCT	12,75	72,29
	TT	12,75	72,29
	DS	12,75	72,29
	SUDOKO	12,75	72,29
MS	12,75	72,29	

Table XVII: Les pertes de puissance et le FF pour le motif Right-Side

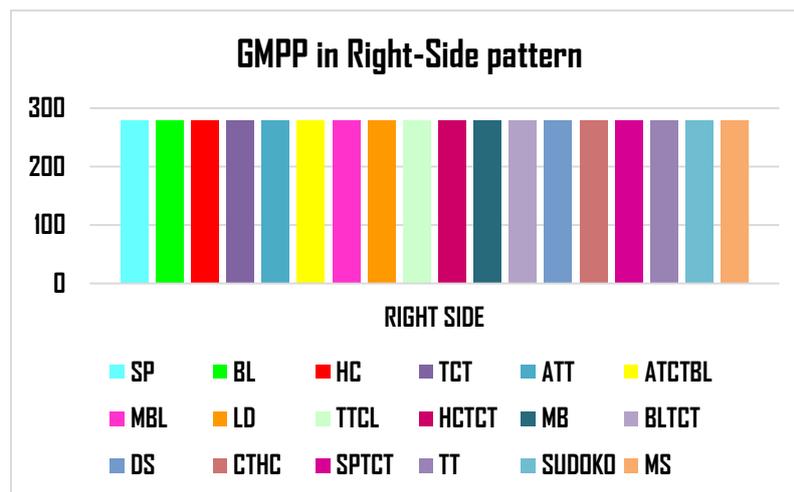


Figure IV. 17 : GMPP des Configurations PV en Right-Side

f) L-Shaped :

Dans ce modèle, les configurations Sudoku, DS et MS génèrent une puissance maximale de 244.35W, suivie par SP (i.e., 209.85W), MBL (i.e., 208.65W) et BL (i.e., 207.55W).

Les configurations HC, TCT, ATT, ATCTBL, LD, TTCL, HCTCT, MB, CTHC et TT ont les pertes les plus élevées de 35,48%. D'autre part, les méthodes DS, MS et Sudoku sont hautement capable de diffuser l'effet d'ombre pour ce profil d'irradiation. Notamment, le facteur de remplissage de 63,76% est très élevé. Donc on peut en déduire que ces derniers sont les plus performantes pour ce type d'ombrage.

Conditions Environnemental	Configuration (4x4)	ΔP_{MP} (%)	FF(× 100)
L-Shaped	SP	34,50	54,79
	BL	35,14	54,24
	HC	35,48	53,94
	TCT	35,48	53,94
	ATT	35,48	53,94
	ATCTBL	35,48	53,94
	MBL	34,79	54,54
	LD	35,48	53,94
	TTCL	35,48	53,94
	HCTCT	35,48	53,94
	MB	35,48	53,94
	BLTCT	35,14	54,24
	CTHC	35,48	53,94
	SPTCT	35,17	54,21
	TT	35,48	53,94
	DS	23,64	63,76
	SUDOKO	23,64	63,76
MS	23,64	63,76	

Table XVIII: Les pertes de puissance et FF pour le motif L-Shaped

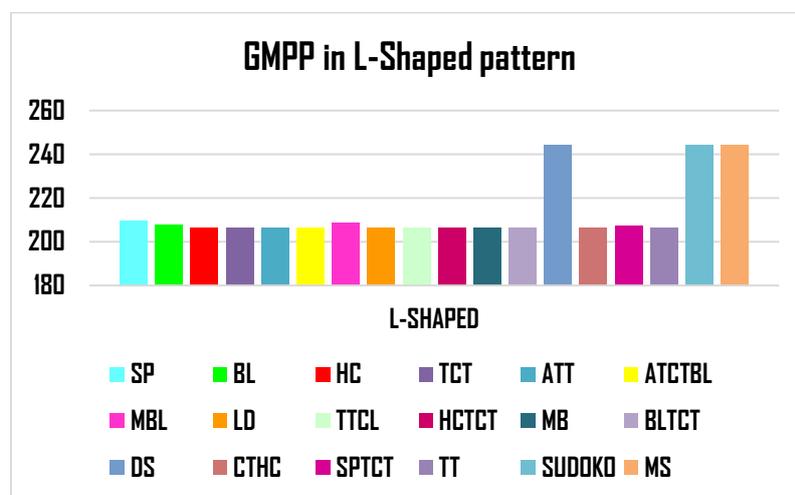


Figure IV. 18: GMPP des Configurations PV en L-Shaped.

g) Frame :

Le GMPP le plus élevé de 197.81W a été généré par MS configuration, suivie par DS avec 177W. Les configurations Sudoku, BLTCT, MB, HCTCT, LD, ATCTBL, ATT, et TCT génèrent également une puissance de 171.9W proche de DS, la configuration TT se trouve en 4eme position avec une puissance de 170.15W. Les configurations restantes tels-que SP génèrent le moins de GMPP (i.e., 164.92W). Avec une excellente capacité à disperser l'ombre, donc la configuration MS avec 38% de perte de puissance encore une fois montre une grande performance par rapport à d'autres configurations.

Conditions Environnemental	Configuration (4×4)	ΔP_{MP} (%)	FF(× 100)
Frame	SP	48,46	50,98
	BL	48,46	50,98
	HC	48,71	50,72
	TCT	46,28	53,09
	ATT	46,28	53,09
	ATCTBL	46,28	53,09
	MBL	48,71	50,72
	LD	46,28	53,09
	TTCL	47,32	52,02
	HCTCT	46,28	53,09
	MB	46,28	53,09
	BLTCT	46,28	53,09
	CTHC	47,35	52,04
	SPTCT	48,46	50,98
	TT	46,82	52,55
	DS	44,68	54,63
	SUDOKO	46,28	53,09
	MS	38,18	73,34

Table XIX: Les pertes de puissance et le FF pour le motif Frame

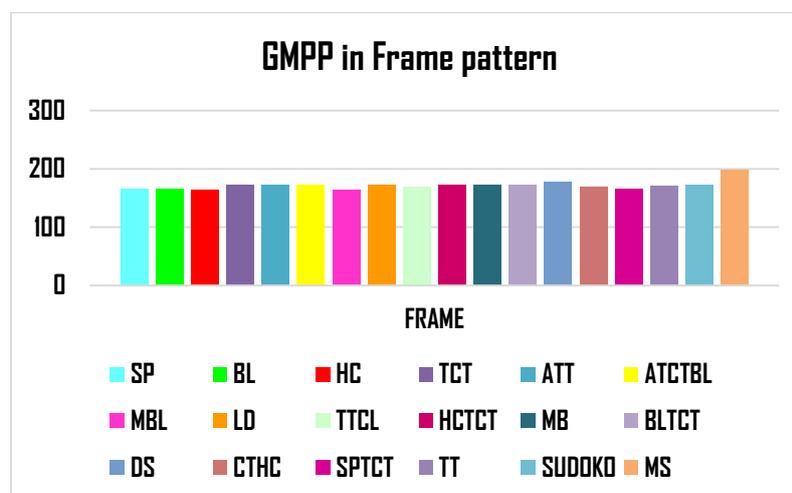


Figure IV. 19: GMPP des Configurations PV en Frame

h) Random :

Pour les spécifications de performance d'ombrage Random des différentes configurations, le GMPP le plus élevé de 279.18W a été généré par les configurations Sudoku, BLTCT, ATCTBL, ATT, et TCT, suivie par DS avec 262.86W. La configuration BL a généré le moins de GMPP de 225.59 Comme indique la Figure IV. 20. Donc les configurations BL et MBL ont produit de mauvaise performance et occupe la dernière position dans la perte de puissance avec plus de 29%. En revanche la TCT, ATT, ATCTBL, BLTCT et Sudoku ont le facteur de forme le plus élevé (i.e., 72,29%).

Conditions Environnemental	Configuration (4x4)	ΔP_{MP} (%)	FF ($\times 100$)
Random	SP	26,12	53,61
	BL	29,50	51,13
	HC	21,65	56,77
	TCT	12,75	72,29
	ATT	12,75	72,29
	ATCTBL	12,75	72,29
	MBL	29,18	51,34
	LD	19,64	58,23
	TTCL	20,48	57,62
	HCTCT	19,94	58,01
	MB	19,91	58,03
	BLTCT	12,75	72,29
	CTHC	23,20	55,67
	SPTCT	22,88	55,92
	TT	19,40	58,39
	DS	17,85	59,51
	SUDOKO	12,75	72,29
MS	19,64	58,23	

Table XX: Les pertes de puissance et le FF pour le motif Random

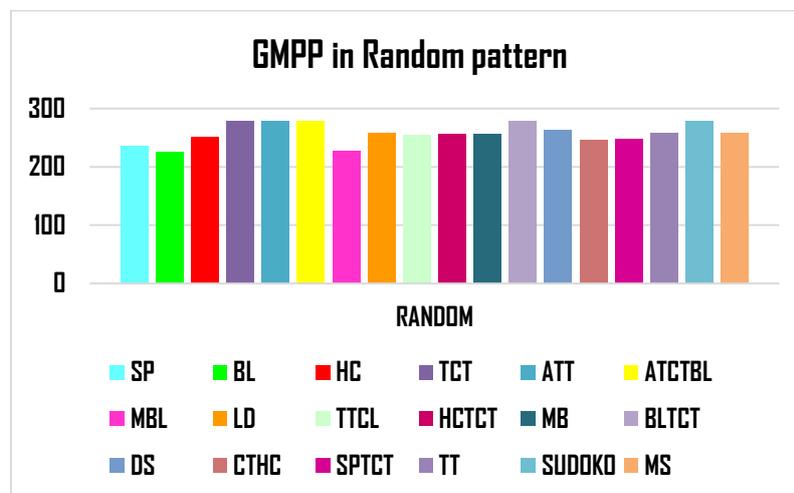


Figure IV. 20: GMPP des Configurations PV en Random

i) Short and Long :

Les performances des différentes configurations sous un ombrage Short and Long peuvent être observées dans la Figure IV. 21. Dans cet ombrage, la configuration Sudoku et MS génèrent le GMPP le plus élevé de 181.31W. La configuration SP a généré le GMPP le moins élevé avec 138.56W comparée aux autres configurations qui atteignent une puissance presque identique, entre 138.71W à 139.07W. Les pertes de puissance pour les configurations hybrides et conventionnels sont trouvés très élevés, c'est-à-dire, plus de 56%, alors que l'arrangement MS et Sudoku produit 43,34%, ce qui met en valeur toutes les possibilités d'application de ces deux méthodes pour ce motif.

Conditions Environnemental	Configuration (4×4)	ΔP_{MP} (%)	FF(× 100)
Short and Long	SP	56,70	43,12
	BL	56,65	43,17
	HC	56,59	43,22
	TCT	56,55	43,26
	ATT	56,57	43,24
	ATCTBL	56,55	43,26
	MBL	56,64	43,17
	LD	56,70	43,12
	TTCL	56,63	43,18
	HCTCT	56,60	43,21
	MB	56,60	43,21
	BLTCT	56,55	43,26
	CTHC	56,65	43,17
	SPTCT	56,55	43,26
	TT	56,59	43,22
	DS	46,79	56,72
	SUDOKO	43,34	73,41
MS	43,34	73,41	

Table XXI: Les pertes de puissance et le FF pour le motif S and L

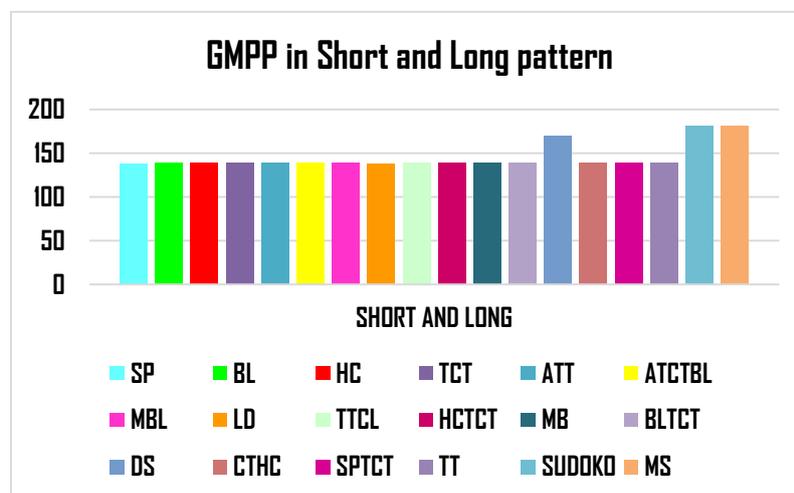


Figure IV. 21: GMPP des Configurations PV en Short and Long

j) Diagonal :

Les performances des différentes configurations sous ombrage diagonal peuvent être observées dans la Figure IV. 22.

Dans cet ombrage, le GMPP le plus élevé de 221.91W, a été généré par les configurations MS, BLTCT, MB, HCTCT, ATCTBL, ATT, TCT. La configuration LD se trouve en deuxième position avec un GMPP de 216.05W, Suivie par DS 185W. La configuration TT génère également une puissance proche de ces derniers (i.e., 183.62W). Les configurations SP, BL, SPTCT, et Sudoku ont généré un de GMPP le moins élevée (i.e., 152.54W).

Conditions Environnemental	Configuration (4×4)	ΔP_{MP} (%)	FF(× 100)
Diagonal	SP	52,33	35,28
	BL	52,33	35,28
	HC	47,42	38,81
	TCT	30,65	72,97
	ATT	30,65	72,97
	ATCTBL	30,65	72,97
	MBL	47,42	38,81
	LD	32,48	66,20
	TTCL	43,70	47,45
	HCTCT	30,65	72,97
	MB	30,65	72,97
	BLTCT	30,65	72,97
	CTHC	48,60	43,37
	SPTCT	52,33	53,28
	TT	42,61	48,34
	DS	42,18	42,72
	SUDOKO	52,33	53,28
	MS	30,65	72,97

Table XXII: Les pertes de puissance et le FF pour le motif Diagonal

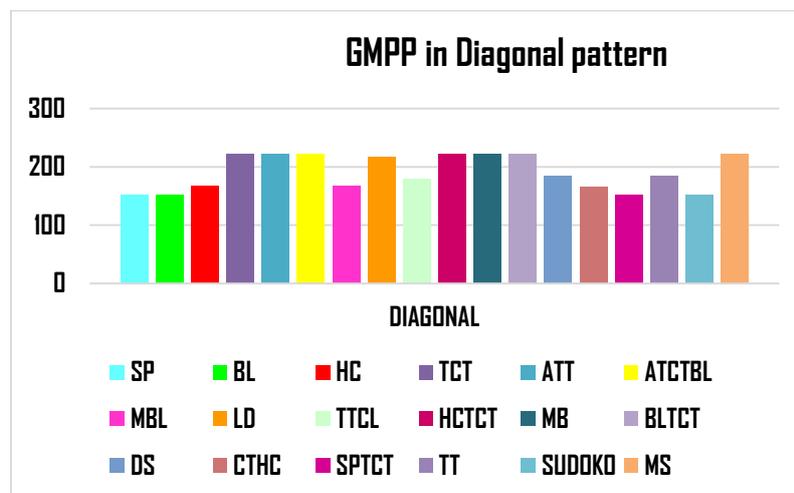


Figure IV. 22: GMPP des Configurations PV en Diagonal

k) Short :

Les configurations MS et Sudoku génèrent une puissance maximale de 221.91W, suivie par DS avec une puissance de 188.84W. Les autres configurations se trouvent en 3^{ème} position, avec une puissance de 152.54W. Après une observation de la puissance produite, la perte de puissance pour la méthode MS et Sudoku est supposée être très inférieure de 30,65% par rapport aux autres configurations et permet ainsi de se tenir debout dans la production d'électricité avec ce motif. De plus, la méthode DS prend la deuxième position dans l'inadéquation des pertes avec 40,98%. En résumé, les configurations restantes se sont avérées avoir des pertes sévères due aux occurrences d'ombre avec plus de 50% et un FF très faible.

Conditions Environnemental	Configuration (4×4)	ΔP_{MP} (%)	FF(× 100)
Short	SP	52,33	35,28
	BL	52,33	35,28
	HC	52,33	35,28
	TCT	52,33	35,28
	ATT	52,33	35,28
	ATCTBL	52,33	35,28
	MBL	52,33	35,28
	LD	52,33	35,28
	TTCL	52,33	35,28
	HCTCT	52,33	35,28
	MB	52,33	35,28
	BLTCT	52,33	35,28
	CTHC	52,33	35,28
	SPTCT	52,33	35,28
	TT	52,33	35,28
	DS	40,98	49,69
	SUDOKO	30,65	72,97
MS	30,65	72,97	

Table XXIII: Les pertes de puissance et le FF pour le motif Short

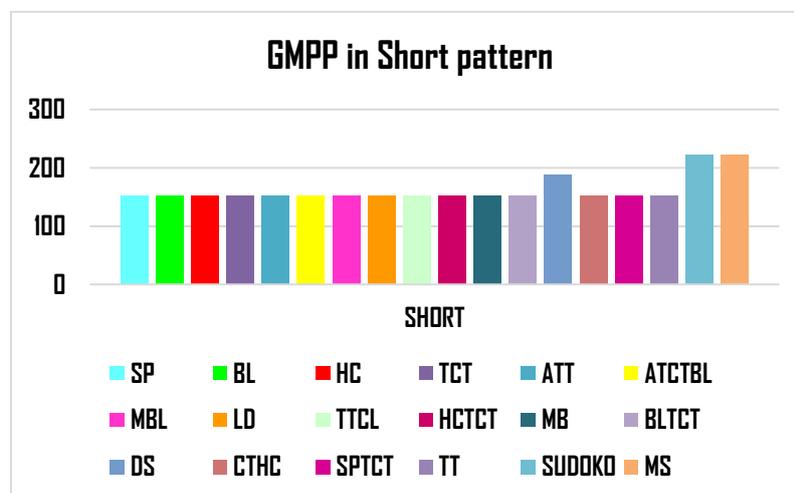


Figure IV. 23: GMPP des Configurations PV en Short

1) Long :

Pour ce motif d'ombrage, la configuration PV Sudoku génère une puissance maximale de 251.08W suivie de DS, MS, TCT et BLTCT (i.e., 250.59, 239.14W, 231.07W et 230.47W, respectivement). Les configurations S-P et LD se trouvent en dernière position avec un GMPP de 212.77W. La configuration SP a produit de mauvaise performance et occupe la dernière position dans la perte de puissance avec 33,50%. D'autre part, le Sudoku a le facteur de forme le plus élevé de 65,53% et les pertes les plus faibles de 21,53%. Donc elle est le choix optimal pour ce cas.

Conditions Environnemental	Configuration (4x4)	ΔP_{MP} (%)	FF(%)
Long	SP	33,50	48,48
	BL	31,35	50,05
	HC	30,61	50,56
	TCT	27,78	52,61
	ATT	31,60	49,68
	ATCTBL	30,76	50,48
	MBL	32,00	49,58
	LD	33,50	48,48
	TTCL	29,21	51,56
	HCTCT	29,27	51,53
	MB	31,85	49,68
	BLTCT	27,97	52,46
	CTHC	31,23	50,11
	SPTCT	30,76	50,48
	TT	29,25	51,55
	DS	21,69	61,75
	SUDOKO	21,53	65,53
MS	25,26	58,95	

Table XXIV: Les pertes de puissance et le FF pour le motif Long

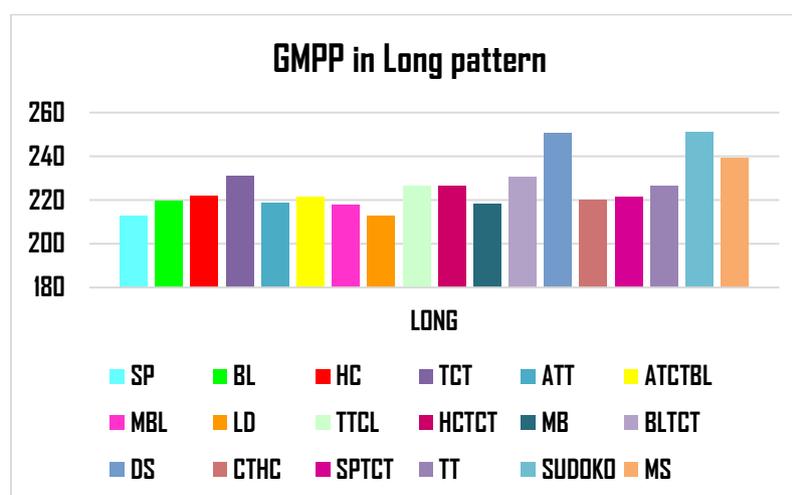


Figure IV. 24: GMPP des Configurations PV en Long

IV.3. Discussions des résultats

Selon l'analyse des puissances maximales (i.e., représentées dans les histogrammes précédents) produites par les dix-huit configurations soumises à 12 motifs d'ombrage. Il est bien clair que :

- 1** La configuration SP est l'extrême configuration qui produit le moins de puissance dans presque tous les cas. La perte de puissance est drastique pendant presque tous les motifs d'ombrage. Cependant, il est observé que SP a une puissance de sortie remarquable (Compare à d'autres configurations) pendant le motif d'ombrage L-Shaped. Ceci est en accord avec la revue de la littérature où SP peut fonctionner relativement bien dans l'ombrage des rangées comme L-Shaped[34].
- 2** De plus, on observe que des configurations comme TCT, BLTCT, ATT, ATCTBL et HCTCT, sont des autres extrêmes configurations où elles produisent le plus de puissance de sortie dans la plupart des conditions d'ombrage. Bien que le TCT soit parmi les plus robustes configurations parce qu'elle nécessite de nombreuses connexions de traverses, il existe également certains cas tels que l'ombrage en L-Shaped où même SP produit plus de puissance de sortie que le TCT.
- 3** Il peut être observé également que la performance de puissance de sortie par BL et HC n'est que raisonnablement bien. La quantité de la puissance de sortie est normalement supérieure à SP mais beaucoup inférieure par rapport à celui de TCT.
- 4** Quant à la configuration triple-lié (TT), elle est relativement mieux que les configurations SP, BL et HC dans la plupart des conditions d'ombrage. Malgré la supériorité du TCT dans la plupart des conditions, TT délivre une quantité de puissance qui n'est que légèrement inférieur à celui du TCT. Donc en général dans presque tous les motifs d'ombrage, la configuration TT prend la 3^{ème} place.
- 5** La configuration MBL a moins de nombre des attaches par rapport aux autres configurations, donc elle assure ainsi la réduction de pertes des câbles. Également elle fonctionne mieux que la configuration BL sous tous les motifs d'ombrages considérés.
- 6** Sous presque tous les motifs d'ombrage, SPTCT a de meilleures performances que les performances de la configuration SP.
- 7** Les performances de la configuration Su-Do-Ku sont étudiées en détail. La tension, le courant et la puissance au GMPP sont considérés pour évaluer l'amélioration des performances. Les résultats montrent que la Su-Do-Ku conserve sa première ou sa deuxième place dans presque tous les motifs d'ombrages considérés parmi les 17 configurations restantes. Elle surpasse toutes les configurations sauf MS et DS parfois,

elle prend même la première place dans certains cas d'ombrage tel que LONG et Random, et elle le Partage avec MS dans d'autres comme Short, Short and Long, Bottom, Corner, L-shaped. La Sudoku effectue également relativement plus pauvre par rapport à MS en ombrage Center et diagonal. De tels phénomènes arrivent également à la configuration MS en ombrage sous forme Random et Long.

Les configurations PV Sudoku DS et MS s'avèrent être le choix évident pour tout motif d'ombrage à l'étude. Cependant, en raison de plus complexités de câblage et augmentation des coûts de câblage, La configuration PV TCT-BL peut être considéré comme le prochain meilleur choix pour le PV connecté au réseau. Avec moins de liens croisés, moins de câblage compliqué, tout en générant une puissance maximale en atténuant la discordance des pertes de puissance, donc la configuration TCT-BL peut servir de deuxième choix supérieur après la Su-do-Ko et la MS.

IV.4. Conclusion

Dans des conditions d'ombrage partiel, les résultats montrent clairement que les performances des configurations de modules PVs sont variables et dépendent fortement du scénario d'ombrage utilisé.

L'analyse détaillée de chaque configuration à travers de multiples scénarios d'ombrage montrent que le choix de la configuration la plus optimale et la plus appropriée dépend fortement de l'intensité de l'ombrage, le motif d'ombrage, l'emplacement du motif d'ombrage et le type d'ombrage affectant le GPV (uniforme ou non).

Dans l'ensemble des résultats obtenus, il est bien conclu que les performances des configurations Sudoku et MS sont les meilleures par rapport à la configuration SP de base, où leurs puissances de sortie restent supérieures à la moyenne quelle que soit le motif d'ombrage.

Conclusion générale

« L'échec N'est qu'une Opportunité Pour Recommencer La Même Chose
Plus Intelligemment. »
Henry Ford

La demande d'énergie toujours croissante, l'incertitude des prix du pétrole ont eu un impact énorme sur la production d'électricité solaire PV en dernières années. Bénéficiant de zéro émission pour l'environnement, cette énergie durable a progressé de plusieurs manières pour une production d'électricité efficace. De plus, diverses initiatives ont été prises à l'échelle mondiale pour promouvoir les installations PVs à grande échelle.

L'un des problèmes concernant les modules PV est l'ombrage partiel. Cela peut réduire considérablement la puissance de sortie d'un GPV et compliquer le fonctionnement en provoquant l'apparition de plusieurs pics dans la courbe caractéristique P-V. L'étendue de ces problèmes dépend non seulement de la zone d'ombrage, mais aussi de manière beaucoup plus significative du motif d'ombrage.

Dans ce travail, dix-huit nouvelles configurations de modules PVs sont proposées pour atténuer les effets de l'ombrage partiel. Les configurations sont basées sur la maximisation de la distance entre les modules PV adjacents dans un GPV en disposant les modules de manière appropriée dans différentes rangées et colonnes sans modifier les connexions électriques. Une analyse systématique est effectuée pour évaluer les configurations proposées sous différents modèles et scénarios d'ombrage, et pour comparer les performances avec les configurations existantes.

Il est démontré que les nouvelles configurations :

- ◆ Redistribuent efficacement les motifs d'ombrage sur l'ensemble des modules PVs.
- ◆ Minimisent la dissipation de puissance des diodes de protection (bypass).
- ◆ Éliminent les pics multiples.
- ◆ Maximisent la puissance produite par le GPV.

Des nouvelles techniques de reconfiguration des GPV « Sudoku, MS, et DS » ont été récemment proposées dans la littérature pour améliorer la puissance maximale sous l'ombrage partiel. L'avantage major de ces techniques est que l'ombrage peut être dispersé au lieu de se localiser sur un groupe de modules, ce qui entraîne une augmentation de la puissance maximale. Dans ces méthodes, l'emplacement physique des modules s'inter changent selon la méthode choisie mais la connexion électrique reste exactement la même. Ces configurations sont à la fois un arrangement pour les modules photovoltaïques et aussi pour démontrer l'amélioration dans la production d'énergie PV sous les conditions d'ombrage partiel.

Alors notre travail analyse ces nouvelles techniques pour améliorer la puissance de sortie du système PV et de réduire les pics multiples sous les différentes conditions d'ombrage.

Les dix-huit configurations de modules photovoltaïques proposées sont : S-P, B-L, H-C, TCT, ATCT-BL, ATT, M-BL, LD, TTCL, HCTCT, MB, BLTCT, CTHC, SPTCT, TT, Sudoku, MS et DS.

Dans cette étude, les configurations ont été modélisées et analysées. La modélisation MATLAB/Simulink de toutes les configurations a été effectuée pour obtenir les caractéristiques PV et analyser leurs histogrammes.

Le résultat révèle que la méthode de reconfiguration de Sudoku et MS offre une puissance de sortie supérieure par rapport à des configurations classiques comme la Série-Parallèle. On constate également que le nombre des pics se réduisent également à un pic dans certains cas d'ombrage avec la Sudoku et MS. C'est-à-dire que les configurations Sudoku et MS présentent les meilleures performances, les pertes de puissance les plus faibles et donc la puissance maximale la plus élevée dans tous les scénarios d'ombrage envisagés.

Plus précisément, par rapport à la configuration SP de base, les gains de performance varient d'environ 12% sous des conditions d'ombrage en Corner à plus de 43% pour les plus grands modèles d'ombrage comme Short and Long.

En revanche, la configuration A-TCT-BL aussi réalise des gains "plus faibles par rapport à Sudoku et MS, mais plus forts par rapport à d'autres configurations, mais il rencontre des problèmes sous quelque scénario d'ombrage.

Et de cela on peut conclure que le choix optimal ne dépend pas que de la configuration mais dépend fortement sur l'intensité, le motif et le type d'ombrage affectant sur le GPV (uniforme ou non).

Les futurs travaux visent à :

- Améliorer les configurations Sudoku et MS.
- Développer de nouvelles configurations des modules PV.
- Utiliser les résultats obtenus dans un algorithme intelligent pour le suivi du point de puissance global (GMPP) dans le cas d'ombrage partiel.

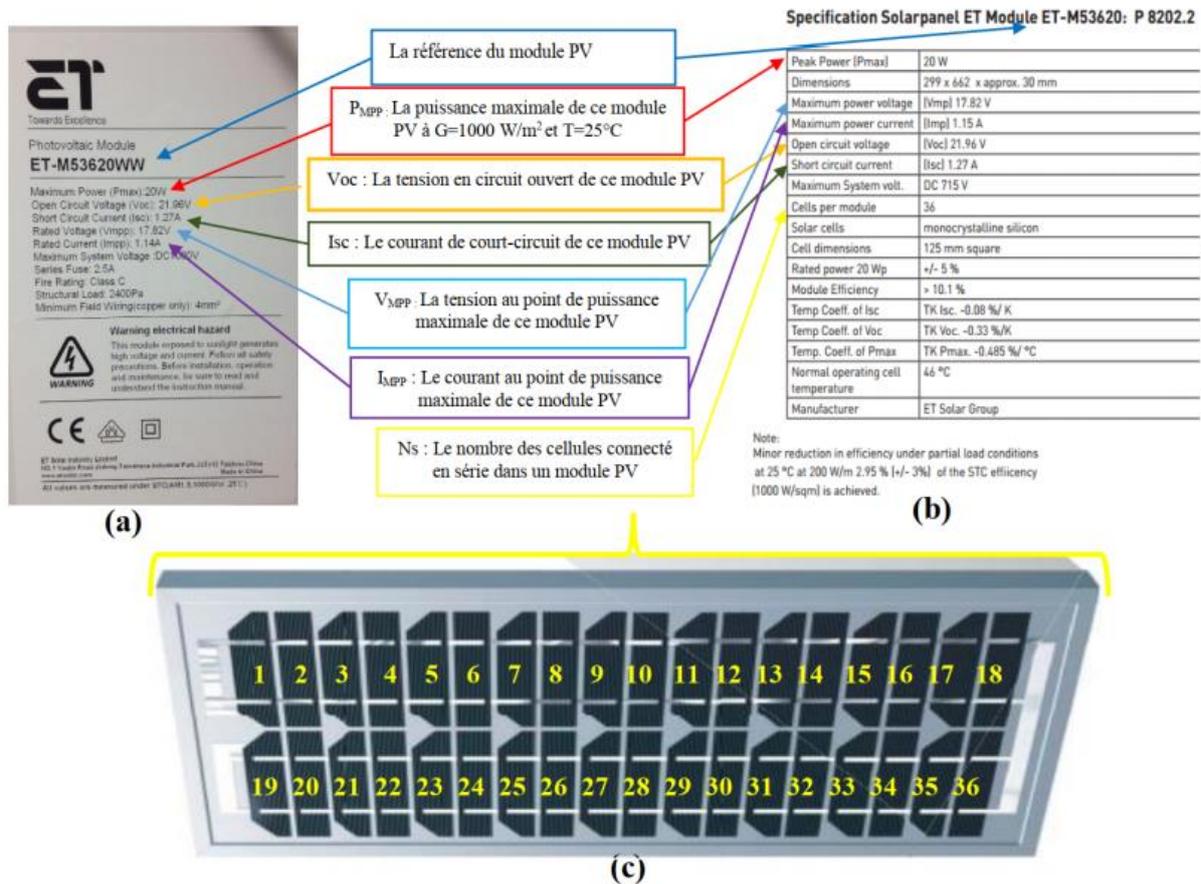
Références bibliographiques

- [1] Z. Salam, J. Ahmed, and B. S. Merugu, "The application of soft computing methods for MPPT of PV system: A technological and status review," *Applied Energy*, vol. 107, pp. 135-148, 2013.
- [2] J. Ahmed and Z. Salam, "A critical evaluation on maximum power point tracking methods for partial shading in PV systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 47, pp. 933-953, 2015.
- [3] R. Boukenoui, R. Bradai, A. Mellit, M. Ghanes, and H. Salhi, "Comparative analysis of P&O, modified hill climbing-FLC, and adaptive P&O-FLC MPPTs for microgrid standalone PV system," in *2015 international conference on renewable energy research and applications (ICRERA)*, 2015, pp. 1095-1099.
- [4] K. Ishaque, Z. Salam, and G. Lauss, "The performance of perturb and observe and incremental conductance maximum power point tracking method under dynamic weather conditions," *Applied Energy*, vol. 119, pp. 228-236, 2014.
- [5] K. Lappalainen and S. Valkealahti, "Output power variation of different PV array configurations during irradiance transitions caused by moving clouds," *Applied Energy*, vol. 190, pp. 902-910, 2017.
- [6] S. Moballegh and J. Jiang, "Modeling, prediction, and experimental validations of power peaks of PV arrays under partial shading conditions," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, pp. 293-300, 2013.
- [7] N. Belhaouas, M.-S. A. Cheikh, P. Agathoklis, M.-R. Oularbi, B. Amrouche, K. Sedraoui, and N. Djilali, "PV array power output maximization under partial shading using new shifted PV array arrangements," *Applied Energy*, vol. 187, pp. 326-337, 2017.
- [8] Y.-J. Wang and P.-C. Hsu, "Analytical modelling of partial shading and different orientation of photovoltaic modules," *IET Renewable Power Generation*, vol. 4, pp. 272-282, 2010.
- [9] M. Balato, L. Costanzo, and M. Vitelli, "Series-Parallel PV array re-configuration: Maximization of the extraction of energy and much more," *Applied Energy*, vol. 159, pp. 145-160, 2015.
- [10] R. Boukenoui, A. Mellit, and A. M. Pavan, "Photovoltaic Model Based on Manufacture's Datasheet: Experimental Validation for Different Photovoltaic Technologies," in *A Practical Guide for Advanced Methods in Solar Photovoltaic Systems*, ed: Springer, 2020, pp. 239-256.
- [11] O. Nichiporuk, "Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités," Lyon, INSA, 2005.
- [12] A. Labouret and M. Viloz, *Energie solaire photovoltaïque* vol. 3: Dunod, 2006.
- [13] B. Nadjib and B. Imene, "Optimisation par simulation d'une cellule solaire à hétérojonction," Université Mouloud Mammeri, 2018.
- [14] Y. MEDJELLED, "EFFET DE LA RESISTANCE SERIE SUR LES PERFORMANCES D'UN CELLULE PHOTOVOLTAIQUE A MULTI-JONCTION SOUS CONCENTRATION SOLAIRE. APPROXIMATION DE FORTE INJECTION," Université de Laghouat-Amar Telidji, 2013.
- [15] R. Merah and R. Chenni, "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques," *مذتوري الإخوة جامعة* ق سنط ڤنة, 2018.
- [16] A. DJALAB, N. BESSOUS, M. M. REZAOUI, and I. MERZOUK, "Study of the effects of partial shading on PV array," in *2018 International Conference on Communications and Electrical Engineering (ICCEE)*, 2018, pp. 1-5.

- [17] R. Pradhan and S. Kar, "A Comprehensive Study of Partial Shading Effect on the Performance of PV array with Different Configuration," in *2020 International Conference on Renewable Energy Integration into Smart Grids: A Multidisciplinary Approach to Technology Modelling and Simulation (ICREISG)*, 2020, pp. 78-83.
- [18] P. K. Bonthagorla and S. Mikkili, "A novel fixed PV array configuration for harvesting maximum power from shaded modules by reducing the number of cross-ties," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2020.
- [19] N. K. Gautam and N. Kaushika, "Reliability evaluation of solar photovoltaic arrays," *Solar Energy*, vol. 72, pp. 129-141, 2002.
- [20] C. Saiprakash, A. Mohapatra, B. Nayak, and S. R. Ghatak, "Performance Enhancement of PV Array under Partial Shading Condition by Modified BL Configuration," in *2020 IEEE Calcutta Conference (CALCON)*, 2020, pp. 308-312.
- [21] C. Saiprakash, A. Mohapatra, and B. Nayak, "An A TT Array Configuration for Performance Enhancement of PV system Under PSC," in *2021 1st International Conference on Power Electronics and Energy (ICPEE)*, 2021, pp. 1-5.
- [22] A. A. Desai and S. Mikkili, "Modelling and analysis of PV configurations (alternate TCT-BL, total cross tied, series, series parallel, bridge linked and honey comb) to extract maximum power under partial shading conditions," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2020.
- [23] A. Kumar, R. K. Pachauri, and Y. K. Chauhan, "Experimental analysis of SP/TCT PV array configurations under partial shading conditions," in *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, 2016, pp. 1-6.
- [24] C. T. K. Kho, J. Ahmed, Y. L. Then, and M. Kermadi, "Mitigating the effect of partial shading by triple-tied configuration of PV modules," in *2018 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2018, pp. 532-537.
- [25] A. Al Mansur and M. R. Amin, "Performance Investigation of Different PV Array Configurations at Partial Shading Condition for Maximum Power Output," in *2019 International Conference on Sustainable Technologies for Industry 4.0 (STI)*, 2019, pp. 1-5.
- [26] T. Ramesh, K. Rajani, and A. K. Panda, "A novel triple-tied-cross-linked PV array configuration with reduced number of cross-ties to extract maximum power under partial shading conditions," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 7, pp. 567-581, 2020.
- [27] G. S. Krishna and T. Moger, "Comparative study on solar photovoltaic array configurations under irregular irradiance conditions," in *2018 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, 2018, pp. 1-6.
- [28] A. A. Desai and S. Mikkili, "Novel Hybrid PV Array Configurations for extracting maximum Power by reducing number of peaks and mitigating mismatching power loss under partial shading conditions," in *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2020, pp. 1872-1877.
- [29] A. S. Yadav, R. K. Pachauri, and Y. K. Chauhan, "Comprehensive investigation of PV arrays under different shading patterns by shade dispersion using puzzled pattern based Su-Do-Ku puzzle configuration," in *2015 1st International Conference on Next Generation Computing Technologies (NGCT)*, 2015, pp. 824-830.
- [30] G. S. Krishna and T. Moger, "SuDoKu and Optimal SuDoKu Reconfiguration for TCT PV array Under Non-Uniform Irradiance Condition," in *2018 IEEE 8th Power India International Conference (PIICON)*, 2018, pp. 1-6.

- [31] A. S. Yadav, R. K. Pachauri, Y. K. Chauhan, S. Choudhury, and R. Singh, "Performance enhancement of partially shaded PV array using novel shade dispersion effect on magic-square puzzle configuration," *Solar Energy*, vol. 144, pp. 780-797, 2017.
- [32] B. Dhanalakshmi and N. Rajasekar, "Dominance square based array reconfiguration scheme for power loss reduction in solar PhotoVoltaic (PV) systems," *Energy conversion and management*, vol. 156, pp. 84-102, 2018.
- [33] S. R. Pendem and S. Mikkili, "Performance evaluation of series, series-parallel and honey-comb PV array configurations under partial shading conditions," in *2017 7th International Conference on Power Systems (ICPS)*, 2017, pp. 749-754.
- [34] R. Ramabadran and B. Mathur, "Effect of shading on series and parallel connected solar PV modules," *Modern applied science*, vol. 3, pp. 32-41, 2009.

Annexe A



(a) La plaque signalétique du module ET-M53620WW, (b) les paramètres électriques de la datasheet de ce module (c) le nombre de ses cellules.