

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**UNIVERSITÉ AMAR TELIDJI - LAGHOUAT**



**FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT : D'ELECTROTECHNIQUE**

*Mémoire de Projet de Fin d'Etudes en vue de l'obtention du diplôme  
De master en **Energie Renouvelables en Electrotechnique***

**Réalisé par : MALLEK Amel  
DOMAINE : Science et Technologie  
FILIERE : Electrotechnique  
OPTION : Energie Renouvelables en électrotechnique**

**Thème**

---

***Etude , modélisation et stratégie d'optimisation des convertisseurs  
pour améliorer le rendement énergétique dans le système  
photovoltaïque***

---

Jury de soutenance :

BOUCHIBA Oumelkheir	MCA	Présidente
KOUZI Katia	PRF	Examinatrice
Mr. BIRANE Mouhoub	MCA	Promoteur

Année universitaire 2023-2024

## Résumé

Pour un développement industriel, économique et écologique, l'énergie photovoltaïque constitue actuellement une bonne alternative pour le remplacement des énergies fossiles polluantes.

Le travail de ce mémoire traite l'étude, modélisation et stratégie d'optimisation des convertisseurs dans un système photovoltaïque, fonctionnant à sa puissance maximale et énergétiquement autonome en améliorant les performances de contrôleurs du hacheur DC/DC face aux changements climatiques brutaux et défaillances de ses composants. A cet effet, ce mémoire est consacré à l'étude comparative entre les algorithmes de recherche de point de puissance maximale (MPPT), « perturbation et observation » et « conductance incrémentale » testés sous diverses conditions atmosphériques telles que la variation brutale de la température et l'éclairement et évaluées en termes d'efficacité, de stabilité, de rapidité et de robustesse

Mots clés : Photovoltaïque, convertisseur DC-DC, MPPT, Optimisation, Matlab. Inductance incrémentale, perturbation et observation

## Abstract:

For industrial, economic and ecological development, photovoltaic energy is currently a good alternative to the replacement of polluting fossil energies. The performance of the photovoltaic system is strongly affected by the environmental conditions which is subjected such as temperature and illumination as well as failures at the switch level. The work of this thesis deals with the study, modeling and optimization strategy of converters in a photovoltaic system, operating at its maximum power and energetically autonomous by improving the performance of DC/DC machinery controllers in the face of brutal climate change. For this purpose, this thesis is devoted to the comparative study of the following algorithms of maximum power point tracking (MPPT) "perturb and observ" et "incremental conductance" algorithms are tested under a variety of atmospheric conditions such as temperature variation and illumination and evaluated in terms of efficiency, stability, speed and robustness.

Keywords: Photovoltaics, DC-DC converter, MPPT, Optimization, modeling, simulation, matlab, perturb and observ, incremental conductance

## ملخص

من أجل التنمية الصناعية والاقتصادية والبيئية، تشكل الطاقة الكهروضوئية حالياً بديلاً جيداً لاستبدال الوقود الأحفوري الملوث. يتناول هذا العمل أطروحة دراسة ونمذجة وإستراتيجية التحسين للمحولات في النظام الكهروضوئي، التي تعمل بأقصى طاقتها وتكتفي ذاتياً من الطاقة من خلال تحسين أداء وحدات التحكم DC/DC في مواجهة التغيرات المناخية المفاجئة. ولتحقيق هذه الغاية، تم تخصيص هذه الأطروحة للدراسة المقارنة بين خوارزميات البحث عن نقطة الطاقة القصوى (MPPT) اضطراب ومراقبة، والتي تم اختبارها في ظل ظروف جوية مختلفة مثل التغير المفاجئ في درجة الحرارة والإشعاع وتقييمها من حيث الكفاءة والاستقرار والسرعة والمتانة. الكلمات المفتاحية: الخلايا الكهروضوئية، محول، التحسين، النمذجة، المحاكاة، الماتلاب، اضطراب ومراقبة.

## *Dédicace:*

### *Je dédie humblement ce travail,*

*A mon grand-père,  
avec un cœur ouvert et une immense joie que je te dédie ce travail.*

*A mes parents,*

*Votre amour inconditionnel, votre présence et votre confiance ont été une source de force inestimable pour moi. Que ce travail soit un modeste témoignage de gratitude et d'amour que je vous porte. Qu'ALLAH le Tout-Puissant vous préserve et vous donne santé et bonheur.*

*A toi ma très cher maman ,*

*Les mots semblent insuffisants pour exprimer l'amour que je ressens envers toi. Ta tendresse , ton soutien et tes sacrifices ont illuminé chaque étape de mon parcours , tu as été ma source constante d'encouragement. Je ne saurais te remercier Qu'ALLAH veille sur toi, te comble de santé, de bonheur, et t'accorde une longue vie.*

*A toute ma famille et à tous ceux qui me sont chers, et à tous ceux qui ont cru en moi et m'ont soutenu .*

*À mes beaux-parents et à ma belle-famille,*

*Votre présence marquée par vos paroles bienveillantes et vos conseils inestimables ont toujours été d'une grande valeur pour moi, entourée par l'ambiance chaleureuse, m'a apporté tant de réconfort et de motivation et d'encouragements durant la longue de cette formation. Qu'Allah vous protège et veille sur vous.*

*Je conclus en dédiant ce travail à mon conjoint Massinissa, qui a été présent à chaque instant, m'encourageant et me guidant avec patience. Tu as été une source de motivation depuis toujours ,le soutien moral et la compréhension que tu m'as apportés jusqu'à ce jour m'ont permis de surmonter les défis et de persévérer jusqu'à l'accomplissement de ce mémoire.*

*Merci pour ta présence inestimable et ton aide précieuse.*

*Un grand merci à vous tous*

# Remerciements

*Je tiens à remercier, tout d'abord ALLAH Tout-Puissant qui est mon soutien et mon appui tout au long de mes études , pour la force, la patience et la détermination qu'il m'a accordées pour atteindre cet objectif et qui m'a permis d'apprécier le plaisir de la vie estudiantine .*

*J'adresse mes plus sincères remerciements à mon promoteur monsieur BIRANE Mouhoub , pour son encadrement rigoureux, ses précieux conseils et le temps qu'il m'a accordé pendant la réalisation de ce travail et son savoir faire , et surtout pour la confiance qu'il m'a accordée.*

*Je tiens également à exprimer ma gratitude à mme KOUZI pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail,*

*J'adresse mes vifs remerciements à mme BOUCHIBA la présidente de jury d'avoir accepté de présider le jury de ma soutenance mais aussi pour sa qualité humaine, son entière disponibilité, son aide et ses précieux conseils durant ces deux années.*

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour réaliser ce travail. En fin, tous mes remerciements vont à tous les enseignants du département d'électrotechnique qui ont contribué à ma formation.*

*J'adresse ma sympathie à toutes les personnes que j'ai pu côtoyer amicalement ces deux dernières années et qui ont toujours su maintenir une ambiance de travail chaleureuse.*

*Enfin, que toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouve ici l'expression de mes sincères remerciements.*

*De peur d'en oublier certains, je ne m'aventurerais pas à tous les citer et, nul doute qu'ils sauront ici se reconnaître.*

# Sommaire

Résumé.....	2
Liste de figure: .....	8
Liste des symboles : .....	10
Liste Abréviations : .....	11
Liste de tableaux : .....	11
Introduction générale: .....	1
I.1. Introduction : .....	5
I.2. Généralités Sur Les Systèmes Solaires.....	5
I.2.1. L'énergie solaire : .....	5
Le système hybride : .....	6
Bilan mondial actuel des énergies renouvelables .....	6
I.2.2. Origine de l'énergie solaire .....	9
I.2.3. Spectre de la Lumière blanche .....	9
I.2.4. Rayonnement solaire .....	10
I.2.5. Paramètres influents sur le flux terrestre : .....	11
I.2.6. La masse d'air (AM) : .....	11
I.3. Le système photovoltaïque: .....	12
I.3.1. L'histoire de l'énergie photovoltaïque: .....	12
I.3.2. La cellule photovoltaïque : .....	12
I.3.3. Les différentes technologies des cellules photovoltaïques : .....	14
I.3.4. Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule solaire : .....	15
I.3.5. Modèle d'une cellule solaire idéale : .....	15
I.3.6. Modèle d'une cellule solaire réelle : .....	16
I.4. Le générateur photovoltaïque et ses performances : .....	17
I.4.1. Caractéristiques d'un générateur photovoltaïque .....	18
I.4.2. Protections classiques d'un GPV .....	21
I.4.3. Association de plusieurs GPV .....	22
I.4.3.1. Association en parallèle de plusieurs GPV .....	22
I.4.3.2. Association en série de cellules PV .....	22
I.4.3.3. Association série-parallèle : .....	23
I.4.4. Paramètres influant sur le comportement du module PV .....	24
I.4.4.1. Influence de l'ensoleillement : .....	24
I.4.4.2. Influence de la température.....	25
.....	25
I.4.4.3. Influence de la résistance série : .....	26
I.4.4.4. Influence de la résistance shunt : .....	26
I.5. Le stockage .....	27
I.5.1. Composition : .....	27
I.5.2. Principe de fonctionnement.....	28
I.5.3. Caractéristiques .....	28

I.5.3.1.	Tension.....	28
I.5.3.2.	Charge .....	29
I.5.3.3.	Décharge .....	29
I.5.3.4.	Résistance interne .....	29
I.5.3.5.	Capacité.....	30
I.6.	Conclusion .....	30
II.1.	Introduction .....	32
II.2.	Différentes configurations des systèmes PV .....	32
I.1.	Système autonome sans batterie .....	33
I.2.	Système autonome avec batterie .....	33
I.3.	Système fonctionnant au fil du soleil.....	33
II.3.	Le convertisseur statique .....	33
II.3.1.	Hacheur .....	33
II.3.1.1.	Domaine d'utilisation : .....	34
II.3.1.2.	Le principe de fonctionnement des hacheurs .....	34
II.3.1.3.	Caractéristiques de fonctionnement .....	34
II.3.1.4.	Les types d'hacheur .....	35
	Hacheur à liaison direct .....	35
	Hacheurs à accumulation (liaison indirect) .....	35
II.3.1.5.	Hacheur dévolteur « Buck » .....	35
II.3.1.6.	Hacheur survolteur « Boost » .....	39
II.3.1.7.	Hacheur dévolteur/survolteur « Buck-Boost » .....	41
II.3.1.8.	Comparaison : .....	43
II.3.2.	Onduleur : .....	43
II.4.	Connexion directe entre la source et la charge.....	44
II.5.	Étage d'adaptation entre un générateur PV et une charge.....	46
II.6.	Principe de la recherche du point de puissance maximale .....	47
II.7.	Critères de qualité d'une commande MPPT : .....	48
II.8.	Fonctionnement d'un générateur PV à sa puissance maximale :.....	49
II.8.1.	Premiers types de commande MPPT .....	49
II.8.2.	Méthodes à contre réaction de tension .....	50
II.8.3.	Méthodes à contre réaction de courant.....	50
II.8.4.	Méthodes à contre réaction de puissance .....	50
II.8.5.	Algorithme perturbation et observation P&O .....	51
II.8.6.	Algorithme d'incrémentatation de la conductance (INC).....	52
II.9.	Conclusion :.....	54
III.1.	Introduction : .....	57
III.2.	Logiciel MATLAB :.....	57
III.3.	Système photovoltaïque : .....	58
III.4.	Effets climatiques sur le générateur PV:.....	61
III.4.1.	Influence de l'éclairement : .....	62

III.4.2.	Influence de la température :	62
III.5.	Simulation d'un hacheur boost raccordé a une source constante:	63
	la tension d'entrée et de sortie du convertisseur survolteur.....	64
	Le rapport cyclique :	64
III.6.	Diagnostic des defaults :	65
III.6.1.	Hypothèse de défaut en circuit-ouvert (C.O) :	65
III.6.2.	Hypothèse de défaut en court-circuit (C.C) :	66
III.6.3.	Méthode de détection de défauts :	67
III.7.	Simulation d'un convertisseur boost utilisé comme étage d'adaptation .....	67
III.7.1.	Caractéristiques du convertisseur Boost étudié .....	67
III.7.2.	La commande MPPT :	68
III.7.3.	Influence de l'association de convertisseur sur le rendement .....	69
III.7.3.1.	Association string parallèle du BOOST :	69
III.7.3.2.	Association string série du BOOST :	71
III.7.3.3.	Le cas central :	73
III.7.4.	Fonctionnement sous des conditions standard :	75
III.7.4.1.	Simulation avec la méthode P&O .....	75
III.7.4.2.	Simulation avec la méthode INC .....	76
III.7.5.	Fonctionnement sous des conditions climatiques variables :	76
III.7.5.1.	Méthode de P&O.....	77
III.7.5.2.	Méthode de INC .....	78
III.8.	Conclusions :	80
	Conclusion générale.....	81
	Bibliographie.....	83

## Liste de figure:

Figure I. 1 Parcours de conversion pour les énergies renouvelables.....	5
Figure I. 2 Emission mondiale de CO2 en gigatonne de CO2 .....	7
Figure I. 3 production d'énergie dans le monde .....	8
Figure I. 4 Approvisionnement total en énergie par vecteur énergétiques .....	8
Figure I. 5 Champ photovoltaïque .....	8
Figure I. 6 dispersion de la lumière blanche par un prisme.....	9
Figure I. 7 Répartition spectrale du rayonnement solaire.....	10
Figure I. 8 Effets atmosphériques sur le rayonnement .....	10
Figure I. 9 coefficient de masse d'air .....	12
Figure I. 10 Cellule photovoltaïque .....	13
Figure I. 11 chaîne de fabrication de générateur PV .....	14
Figure I. 12 type de cellule en silicium .....	15
Figure I. 13 Schéma équivalent d'une cellule idéale .....	15
Figure I. 14 Schéma équivalent d'une cellule idéale .....	16
Figure I. 15 variation du courant en fonction de la tension(V) .....	19
Figure I. 16 caractéristique I(V) d'un module photovoltaïque typique dans STC.....	20
Figure I. 17 Puissances maximale idéale et pratique.....	21
Figure I. 18 Schématisation d'un GPV élémentaire avec diode by-pass et diode anti-retour.....	21
Figure I. 19 Courbe caractéristique d'un groupement en parallèle des modules photovoltaïque .....	22
Figure I. 20 courbe caractéristique d'un groupement en série des modules .....	23
Figure I. 21 Courbe caractéristique d'un groupement série/parallèle des modules photovoltaïque .....	24
Figure I. 22 effet de l'éclairement sur le courant et la puissance de GPV .....	25
Figure I. 23 Effet de la température sur le courant et la puissance de GPV.....	25
Figure I. 24 Effet de la résistance série sur le courant et la puissance de GPV.....	26
Figure I. 25 effet de la résistance shunt sur le courant et la puissance de GPV .....	27
Figure I. 26 composition de la batterie .....	28
Figure I. 27 principe de fonctionnement de la batterie.....	28
Figure I. 28 Le phénomène de charge et décharge, (a) Courbe de charge, (b) Courbe de décharge.....	29
Figure II. 1 représente symboliquement les divers éléments du système.....	32
Figure II. 2 symbole d'un convertisseur DC/DC.....	33
Figure II. 3 Représentation de la sortie d'un commutateur en ouverture/fermeture sur une période.....	35
Figure II. 4 schéma de base d'un convertisseur Buck.....	35
Figure II. 5 ccircuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec commutateur ouvert.....	36
Figure II. 6 Circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec commutateur fermé .....	37
Figure II. 7 Courant dans la self du hacheur série .....	37
Figure II. 8 Courant en discontinuité dans la self de l'hacheur série .....	38
Figure II. 9 La caractéristique de la tension d'inductance $V_L(t)$ pour un hacheur série.....	38
Figure II. 10 le rapport de conversion $M(d)$ pour un hacheur série.....	39
Figure II. 11 schéma de base d'un convertisseur Boost.....	39
Figure II. 12 circuit équivalent d'un convertisseur survolteur avec commutateur fermé .....	40
Figure II. 13 circuit équivalent d'un convertisseur survolteur avec commutateur ouvert .....	40
Figure II. 14 L'allure du rapport de conversion en fonction du rapport cyclique .....	41
Figure II. 15 Circuit de base d'un Buck-Boos.....	41
Figure II. 16 Circuit équivalent d'un Buck-Boost lorsque $\alpha \in [0, \alpha.TS]$ .....	42

Figure II. 17 circuit équivalent d'un Buck-Boost lorsque $d \in [d_{TS}, TS]$ .....	42
Figure II. 18 Rapport de conversion en fonction du rapport cyclique.....	42
Figure II. 19 Symbole des convertisseurs DC-AC monophasé et triphasé .....	43
Figure II. 20 Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode antiretour .....	44
Figure II. 21 Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge en connexion directe. ....	45
Figure II. 22 Etage d'adaptation entre le GPV connecté à une charge.....	46
Figure II. 23 Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de P <sub>MAX</sub> du GPV .....	47
Figure II. 24 chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec CS contrôlé par une commande MPPT sur charge DC.....	47
Figure II. 25 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT .....	49
Figure II. 26 Organigramme de la première commande MPPT .....	50
Figure II. 27 caractéristique P <sub>pv</sub> (V <sub>pv</sub> ) d'un panneau solaire et fonctionnement de la méthode P&O...	51
Figure II. 28 Organigramme de la méthode P&O .....	52
Figure II. 29 principe de l'algorithme d'Incrément de Conductance .....	53
Figure II. 30 organigramme de l'algorithme d'incrément de conductance .....	54
Figure III. 1 bibliothèque Simulink .....	57
Figure III. 2 Bloc de simulation du module PV. ....	59
Figure III. 3 blocs constituant le générateur photovoltaïque .....	61
Figure III. 4 influence de l'éclairement sur le GPV .....	62
Figure III. 5 influence de la température sur le GPV .....	63
Figure III. 6 Schéma bloc d'un convertisseur boost.....	63
Figure III. 7 la tension d'entrée et de sortie du convertisseur survolteur .....	64
Figure III. 8 Signal de commande le rapport cyclique (D).....	64
Figure III. 9 Représentation électrique d'un dysfonctionnement, circuit-ouvert. ....	65
Figure III. 10 Défaut circuit-ouvert dans l' MOSFET de le hacheur. A l'état défaillant. ....	65
Figure III. 11 Représentation électrique d'un dysfonctionnement, court-circuit. ....	66
Figure III. 12 le schéma la simulation de la commande MPPT .....	68
Figure III. 13 Schéma du raccordement du convertisseur boost avec le générateur PV et la commande MPPT en MATLAB-SIMULINK .....	69
Figure III. 14 trois convertisseurs boost connectés en parallèle.....	70
Figure III. 15 Résultats de simulation de la tension d'entrée et la tension de sortie du système .....	70
Figure III. 16 Résultats de simulation de la puissance d'entrée et la tension de sortie du système .....	71
Figure III. 17 Schéma globale des générateurs PV avec convertisseur string en série. ....	72
Figure III. 18 Résultats de simulation de la tension d'entrée et la tension de sortie du système -série.	72
Figure III. 19 Résultats de simulation de la puissance d'entrée et la tension de sortie du système -série .....	73
Figure III. 20 Schéma MATLAB SIMULINK globale des générateurs PV avec convertisseur .....	74
Figure III. 21 Résultats de simulation de la tension d'entrée et la tension de sortie du système -série	74
Figure III. 22 Résultats de simulation de la puissance d'entrée et la tension de sortie du système -série .....	74
Figure III. 24 puissance et tension de sortie commandé par P&O .....	75
Figure III. 25 puissance et tension de sortie commandé par INC.....	76
Figure III. 26 variation de l'éclairement [w/M <sup>2</sup> ] et le température [K].....	76
Figure III. 27 Résultat de la simulation de la méthode P&O avec variation de la température .....	77
Figure III. 28 Résultat de la simulation de la méthode P&O avec variation de l'éclairement .....	77
Figure III. 29 Résultat de la simulation de la méthode INC avec variation de l'éclairement .....	78

## Liste des symboles :

$c$  : la vitesse de la lumière [m/s]

$E_g$  : énergie de gap [W/m<sup>2</sup>]

$E_{ph}$ : l'énergie de photon [eV]

FF :facteur de forme

$G$  : Irradiation sur la surface de la cellule[W/m<sup>2</sup> ]

$h$  : la constante de Planck [ $6,62 \cdot 10^{-34}$  J.s]

$I$ : le courant de générateur PV [A]

$I_{cc}$  : courant de court-circuit [A]

$I_d$  :courant traversant une diode [A]

$I_{op}$  : courant optimale d'un générateur PV [A]

$I_{ph}$  : le photo-courant produit par un générateur PV [A]

$I_{PV}$ :courant photovoltaïque [A]

$I_{rs}$  : Le courant de saturation inverse de la diode [A]

$I_s$  : le courant de saturation d'une diode [A]

$I_{sc}$ :courant de court-circuit d'une cellule ou d'un module solaire [A]

$I_{sh}$ :Le courant de résistance de shunt [A]

$K$  : La constante de Boltzmann [ $1,381 \cdot 10^{-23}$  J/K]

$T_s$  : Période de commutation [s]

$K_i$ : courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau [A/K]

$n$  : constante d'idéalité de la jonction

$N_p$  : nombre de cellules connecté en parallèle

$N_s$ :nombre de cellule connecté en série

$P_{max}$  : puissance maximale d'un générateur PV [W]

$V$  : Tension aux bornes du module ou panneau PV [V]

$P_{op}$  :puissance optimale d'un générateur PV [W]

PPM :puissance maximale [W]

$P_{pv}$ : puissance photovoltaïque [W]

$q$  : charge de l'électron [ $1,602 \cdot 10^{-19}$  Coulomb]

$R_s$  :résistance série [ $\Omega$ ]

$R_{sh}$  :résistance shunt [ $\Omega$ ]

$T$  : Température de la jonction des cellules PV [ $^{\circ}K$ ]

$T_{ref}$ : température de référence [K]

$V_{mp}$  : Tension d'un module PV au point de puissance maximale [V]

$V_i$  : Tension d'entrée (in) d'un module PV [V]

$V_o$  : Tension de sortie (out) d'un module PV [V]

$V_{oc}$  : tension en circuit ouvert [V]

$V_{op}$  : tension optimale d'un générateur PV [V]

$V_{pv}$  : Tension photovoltaïque[V]

$\alpha$  : le rapport cyclique du commutateur

$\lambda$  : la longueur d'onde lumineuse [m]

## **Liste Abréviations :**

AM0 : Air Masse 0.  
AM1 : Air Masse 1.  
DC :Direct Current Courant Continu.  
AC : Alternatif Current Courant alternatif  
GPV : Générateur Photovoltaïque  
INC : Incrémentation de Conductance.  
MPP : Maximum Power Point.  
MPPT : Maximum Power Point Tracking  
P&O : Perturbation Et Observation.  
PPM : Point de Puissance Maximale.  
PV : Photovoltaïque  
STC : Standard Test Conditions  
DDP: Différence De Potentiel  
Si : silicium

## **Liste de tableaux :**

Table 1 Les Valeurs des composants du convertisseur boost utilisé dans la simulation.....	67
Table 2 rendement des différentes topologies de convertisseurs .....	74
Table 3 tableau comparatif des deux commande de conversion .....	79

## Introduction générale:

En raison de la croissance démographique mondiale, l'urbanisation croissante et du développement économique, la demande en énergie augmente de manière exponentielle et devient un enjeu majeur. Pour répondre à ces défis tout en préservant l'environnement, le recours aux énergies renouvelables s'avère être une solution prometteuse pour les autorités internationales qui se sont mobilisées vers son déploiement en vue de fournir une énergie fiable et rentable tant du point de vue économique que sociétal.

L'exploitation des principales ressources énergétiques renouvelables, offre de nombreuses solutions aux défis posés par l'exploitation des énergies fossiles, responsables des émissions de gaz à effet de serre, qui ont un impact néfaste sur la santé humaine, la faune et la flore, un fait qui interpelle plus fort que jamais le développement des énergies renouvelables, également connues sous le nom d'énergies vertes, alternatives ou propres.

Actuellement, des recherches sont menées dans le monde pour développer des technologies d'énergie renouvelable efficaces rentables et innovants tels que les photovoltaïques organiques (OPV) et les méthodes de recherche de point de puissance maximale. En les rendant aussi plus accessibles aux individus et aux organisations à l'échelle mondiale.

Les préoccupations croissantes concernant le changement climatique et la nécessité d'un développement durable ont souligné l'importance d'une transition vers des sources d'énergie renouvelables ce qui nécessitera des changements majeurs dans les modes de consommation traditionnels, notamment la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles afin de réduire les émissions des gaz à effet de serre qui est un sujet de consensus quasi universel.

Guidée par des accords internationaux tels que le Protocole de Kyoto et l'Accord de Paris, la transition énergétique durable vise à réduire les émissions de gaz à effet de serre promouvant ainsi un avenir plus propre et plus viable pour tous.

Parmi les principaux accords internationaux figurent :

- Le Protocole de Kyoto : Mis en place en 1997, entré en vigueur en 2005 ce protocole engage les pays développés signataires à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre afin de lutter contre le changement climatique.
- L'Accord de Paris : Conclu lors de la COP21 en décembre 2015, signé par 197 pays cet accord vise à limiter le réchauffement climatique en maintenant la hausse de la température mondiale en dessous de 2 degrés Celsius par rapport aux niveaux préindustriels. C'est le premier accord universel et historique pour limiter la hausse des températures mondiales.[2]

De nos jours, une grande partie de la production d'électricité provient de ressources fossiles telles que le carbone, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine. Cela impliquera un risque d'épuisement de ces ressources dans un avenir proche. Cet épuisement, la flambée des cours du brut et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent urgentes la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie. Pour réaliser cette transition énergétique du fossile aux énergies renouvelables il faut résoudre le problème majeur du rendement de ces énergies à cet effet cette étude veille à améliorer et optimiser le rendement du système photovoltaïque.

Un des verrous technologiques qui existe dans ce type de couplage est le problème du transfert de la puissance maximale du générateur photovoltaïque (GPV) à la charge qui souffre souvent d'une mauvaise adaptation. Le point de fonctionnement qui en découle est alors parfois très éloigné du point de puissance maximale (PPM).

Cependant, la faible efficacité de conversion, la dépendance aux facteurs environnementaux (l'irradiation et la température) ainsi que la non-linéarité de la caractéristique courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) d'un module photovoltaïque sont les principaux défis dans l'utilisation d'un tel système. Le point de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque (PV) ne se coïncide pas toujours avec le point de puissance maximale (PPM). Par conséquent, un mécanisme de commande est nécessaire pour l'identification et la poursuite du point de puissance maximale, appelé « Maximum power point Tracking » (MPPT) afin que la puissance maximale soit générée en permanence. La commande MPPT est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique en l'amenant à sa valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV. La littérature propose une grande quantité de solutions sur l'algorithme de contrôle qui effectue une recherche de point de puissance maximale lorsque le GPV est couplé à une charge à travers un convertisseur statique.

Dans ce travail, l'ensemble constitué par un GPV, un étage d'adaptation et une charge DC et le stockage est abordé dans sa globalité. Ainsi, nous avons étudié le problème de l'extraction du maximum de puissance d'un générateur suivant deux conditions climatiques, changement brusque en température et en éclairage.

Le but essentiel de notre travail est l'étude avec simulation d'un système au biais d'un étage d'adaptation DC/DC hacheur BOOST commandé par la méthode de recherche du point de puissance maximale MPPT. Ce manuscrit s'organise selon le plan de travail suivant :

Dans le premier chapitre, sont abordées les généralités et théories indispensables à la compréhension de l'énergie solaire photovoltaïque dans la production de l'énergie solaire et ses principales propriétés,

avantages et inconvénients. La cellule photovoltaïque, sa modélisation, ses caractéristiques et sa dépendance directe à l'éclairement et à la température. Les différentes étapes de formation de la structure d'un champ photovoltaïque et sa protection sont présentées, les paramètres influants sur le rendement du champ photovoltaïque sont définis. Pour terminer une vue générale sur le stockage.

Dans le deuxième chapitre, sont représentés différentes topologies des convertisseurs DC/DC pour la conception d'une interface de puissance et leurs principes de fonctionnement expliqués. Puis, sont décrites les différentes méthodes (MPPT) de recherche du point de fonctionnement à puissance maximale (PPM), qui permettent au champ photovoltaïque de fonctionner à sa puissance maximale. Un contrôle MPPT combiné à un convertisseur DC/DC permet à un générateur photovoltaïque de produire la puissance continue maximale, quelles que soient les conditions météorologiques (irradiation, température).

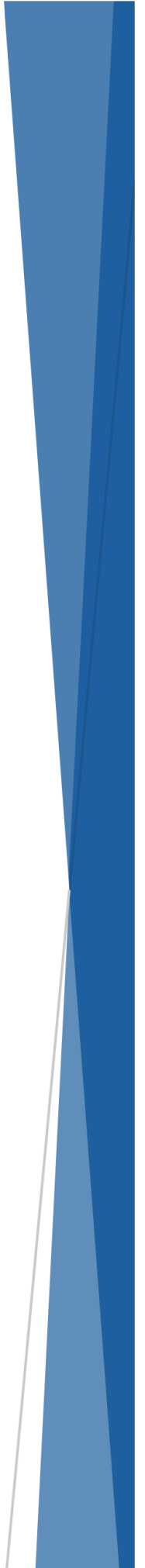
Le dernier chapitre est consacré à la simulation, aux résultats obtenus et les discussions. L'implémentation des différentes commandes MPPT pour la validation de l'efficacité des techniques proposées par simulation des caractéristiques et de la performance du système générateur photovoltaïque dans différentes conditions météorologiques (irradiation, température), est effectuée.

Les simulations ont été faites sous environnement Matlab/Simulink en fonction de variations de l'irradiation et de la température.

Le travail se termine par une conclusion générale.

# *Chapitre I*

## Généralités sur l'énergie photovoltaïque



### I.1. Introduction :

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Elles proviennent de phénomènes naturels cycliques, leur caractère renouvelable dépend d'une part de la vitesse à laquelle la source est consommée ou à laquelle elle se régénère. Ces sources d'énergie ne sont pas affectées par la volatilité des marchés des combustibles fossiles et ont l'avantage supplémentaire de stimuler l'emploi. L'énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, on peut ainsi compter sur 1000 w/m<sup>2</sup> crête dans les zones tempérées et jusqu'à 1367 W/m<sup>2</sup> lorsque l'atmosphère est faiblement polluée [1] . Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances , les générateurs photovoltaïque et leurs performances ainsi que le stockage de cette énergie.

### I.2. Généralités Sur Les Systèmes Solaires

Les énergies renouvelables sont dotées d'un cycle de régénération par rapport aux source conventionnelles non renouvelables telles que le diesel et le charbon. La figure (I.1) donne une vue d'ensemble des principales ressources énergétiques qu'on peut exploiter pour produire de l'électricité propre.

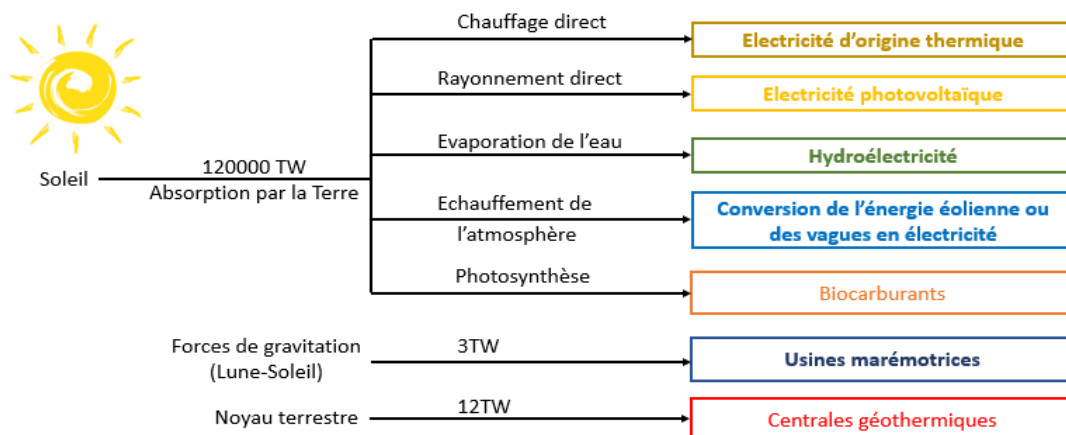


Figure I. 1 Parcours de conversion pour les énergies renouvelables.

#### I.2.1. L'énergie solaire :

C'est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables.

Le soleil est un gisement d'énergie quasiment inépuisable. On utilise des capteurs spécifiques (photopile) afin d'absorber l'énergie des rayons solaires et de la rediffuser sous des principaux modes de fonctionnement : photovoltaïque (l'objet de notre étude) et thermique.

L'énergie solaire alternative aux autres sources d'énergies conventionnelles, elle représente un potentiel considérable. En effet, la terre reçoit plus de 3000h de lumière solaire par année avec un haut niveau d'éclairement, la moyenne annuelle journalière est de 5 à 7 kWh /m<sup>2</sup>/jour. Ainsi l'Algérie dispose d'environ 3200 heures d'ensoleillement par an bénéficiant d'une situation climatique favorable à l'application des techniques solaires avec un nombre d'heure d'ensoleillement plus important que la moyenne de la terre.

### **Le système hybride :**

Les énergies par exemple photovoltaïque sont intermittentes, leur exploitation est irrégulière alors que les installations électriques doivent fonctionner en permanence. En conséquence, on fait appel à l'électronique de puissance utilisant des dispositifs de conversion capable d'établir une liaison entre les sources d'énergies renouvelables, la source de secours (générateur diesel), le système de stockage et la charge à alimenter, dont le seul objectif est d'obtenir une énergie électrique de même type (en forme et en valeur) et durable (permanente). Cette innovation est appelée système hybride à sources d'énergie renouvelables (SHSER) qui est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie de nature différente, parmi lesquelles une au moins est renouvelable.

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes :

- Les systèmes hybrides qui fonctionnent en parallèle avec le réseau électrique (connectés au réseau).
- Les systèmes hybrides en régime isolé ou en mode autonome. Ils sont conçus de tel sorte à répondre aux besoins des consommateurs des villages isolés...etc.

### **Bilan mondial actuel des énergies renouvelables**

- ✚ Les énergies fossiles couvraient 62 % de la production d'électricité comme le montre la Figure (1.9), cependant, ces sources d'énergie sont en constante diminution. Les réserves de pétrole en exploitation permettent de satisfaire la demande actuelle pour encore 30 ans et celle du gaz pour 60 ans [4]. Par ailleurs, l'utilisation de ces sources augmente de façon considérable les émissions des gaz à effet de serre et la pollution de l'air.
- ✚ Le scénario de 1,5°C décrit une voie de transition énergétique pour limiter l'augmentation de la température moyenne mondiale d'ici la fin du siècle à 1,5 °C, d'où la nécessité de réduire les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et d'atteindre zéro émission nette dans le secteur de l'énergie d'ici 2050 figure(I.8).

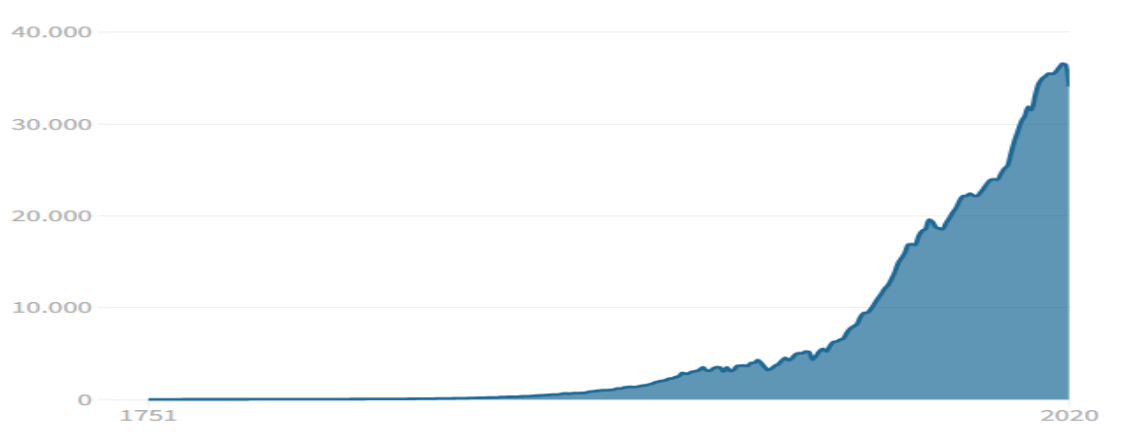


Figure I. 2 Emission mondiale de CO2 en gigatonne de CO2

- ✚ La capacité de production des énergies renouvelables augmente rapidement ,elle représente environ un quart de la production annuelle d'électricité dans le monde en 2020. Ce résultat est le fruit de plusieurs facteurs : les progrès scientifiques, le développement des technologies d'énergies renouvelables avec la baisse des coûts, les facilités d'accès aux financements, les aides financières de l'Etat, l'attention portée à la protection de l'environnement, l'accès à la technologie, à la formation, au renforcement des capacités et à un financement abordable, qui sont essentiels pour la contributions des pays à la transition énergétique mondiale
- ✚ Diversification du marché énergétique afin de réduire les risques liés à la chaîne d'approvisionnement, améliorer la sécurité énergétique.

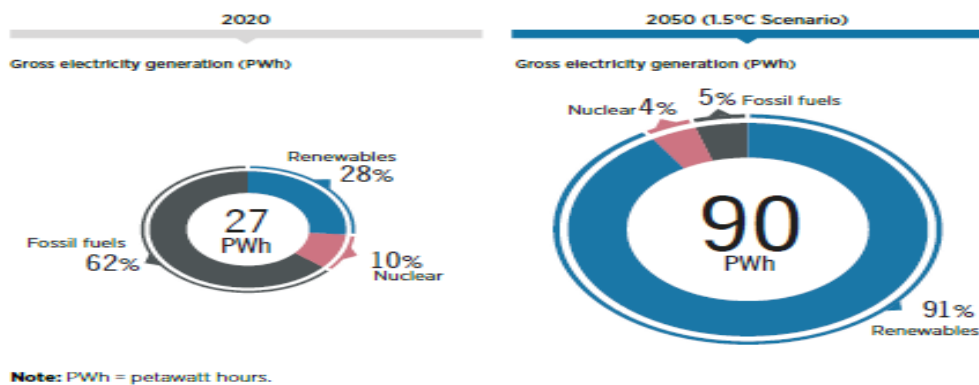


Figure I. 3 production d'énergie dans le monde[17]

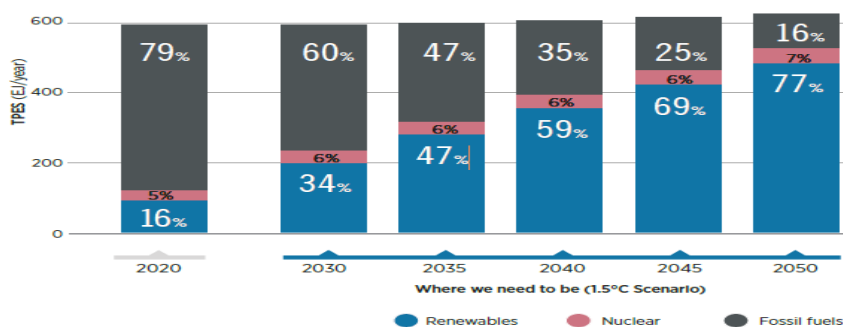


Figure I. 4 Approvisionnement total en énergie par vecteur énergétiques[17]

- ✚ L'Algérie : Le projet de production de 3.000 MW d'énergie solaire photovoltaïque s'inscrit dans le cadre du Programme de développement des énergies renouvelables, lancé par les hautes autorités et visant à atteindre 15.000 MW à l'horizon 2035, consistant en la réalisation de 15 centrales solaires photovoltaïques, d'une capacité de production de 80 à 220 MW chacune, réparties sur 12 wilayas [5].



Figure I. 5 Champ photovoltaïque

### I.2.2. Origine de l'énergie solaire

Le soleil émet son énergie sous forme de rayonnement dans l'espace, de manière uniforme et dans toutes les directions mesuré en ( $W/m^2$ ) qui représente la puissance par unité de surface.[6]

La lumière est décrite comme une onde électromagnétique, traduite par une longueur d'onde ou une fréquence déterminée. C'est un déplacement de photon, porteurs d'énergie, donnée par la formule suivante :

$$E_{ph} = h c / \lambda \quad (I.1)$$

$h$  : la constante de Planck [ $j.s^{-1}$ ].

$c$  : la vitesse de la lumière [ $m.s^{-1}$ ].

$\lambda$  : la longueur d'onde [ $m$ ].

### I.2.3. Spectre de la Lumière blanche

La décomposition de la lumière blanche avec un prisme révèle de différentes longueurs d'onde ou de couleurs, d'une source de lumière qu'on appelle spectre ou répartition spectrale comme illustré à la figure(I.12).

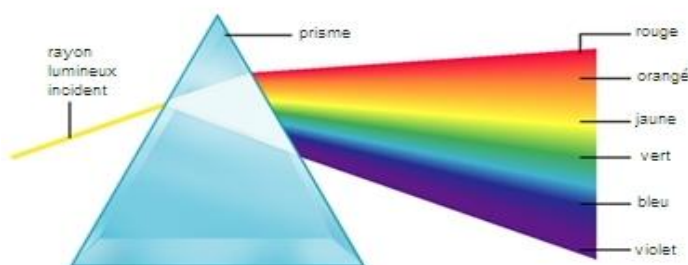


Figure I. 6 dispersion de la lumière blanche par un prisme

En atmosphère terrestre, le spectre de l'énergie solaire est décalé vers le rouge et l'infrarouge par rapport au spectre hors atmosphère. Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueurs d'onde variant de 0,22 à 10  $\mu m$ , se décomposant approximativement ainsi : [7]

- 6,4% dans la bande des ultraviolets ( $0,20 < \mu < 0,38 \mu m$ ).
- 48% dans la bande visible ( $0,38 < \mu < 0,78 \mu m$ ).
- 45,6% dans la bande des infrarouges ( $0,78 < \mu < 10 \mu m$ ).

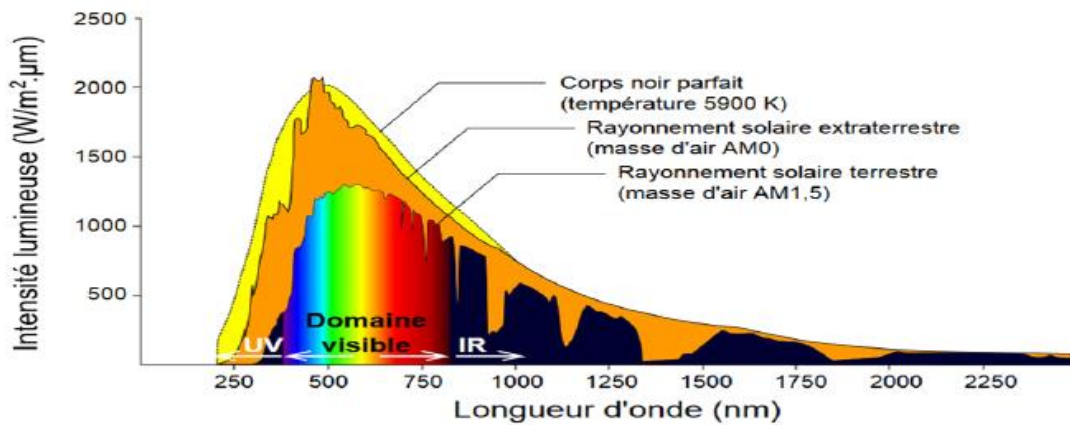


Figure I. 7 Répartition spectrale du rayonnement solaire

### I.2.4. Rayonnement solaire

Lorsque le rayonnement solaire atteint la Terre après un trajet de 150 millions de kilomètres, sa densité est de  $1367 W/m^2$ , évaluée avec précision par la NASA, une valeur connue sous le nom de "constante solaire" [8]. Ce rayonnement solaire instantané, extraterrestre subit de légères variations en fonction de la distance Terre-Soleil. En une heure, la Terre reçoit suffisamment d'énergie solaire pour couvrir ses besoins énergétiques annuels.

Le rayonnement subit des transformations en traversant l'atmosphère. Le flux énergétique reçu au sol ne dépasse guère  $1000 W/m^2$  par ciel clair. Le rayonnement global au sol est donc en fonction de la composition et de l'épaisseur d'atmosphère traversée par les rayons lumineux au cours de la journée. Il se décompose en rayonnement direct et rayonnement diffus et ce sont ces deux rayonnements qui sont exploités par les générateurs solaires. [6]

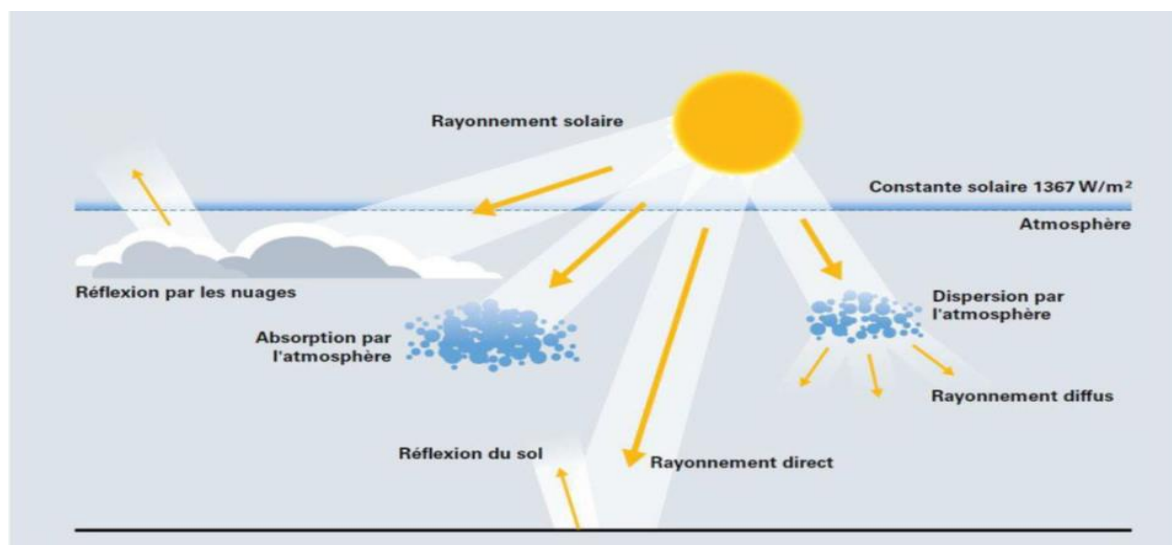


Figure I. 8 Effets atmosphériques sur le rayonnement

• **Rayonnement direct** : Ce rayonnement provient directement du soleil sans être diffusé par l'atmosphère.

• **Rayonnement diffus** : Il est constitué de la lumière solaire diffusée ou réfléchi par l'atmosphère, avant d'atteindre les cellules photovoltaïques.

• **Rayonnement solaire réfléchi (Albédo)** : Ce rayonnement est celui réfléchi par le sol ou d'autres surfaces dont il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés.

• **Rayonnement global** : C'est la somme de tous les rayonnements solaires reçus, incluant le rayonnement réfléchi par le sol et les objets à sa surface, mesuré par un pyromètre ou un Solari mètre.[6]

$$\text{Rayonnement Globale} = \left[ \begin{array}{l} \text{rayonnement direct} \\ + \\ \text{rayonnement diffus} \\ + \\ \text{rayonnement réfléchi} \end{array} \right]$$

### I.2.5. Paramètres influents sur le flux terrestre : [7]

- L'orientation l'inclinaison et la surface de la terre.
- La latitude de milieu de collecte, degré de pollution ainsi son altitude.
- La période de l'année.
- L'instant considéré dans la journée.
- La nature des couches nuageuse.

### I.2.6. La masse d'air (AM) :

La masse d'air (ou Air Mass en anglais) est utilisée pour évaluer la quantité d'atmosphère que le rayonnement solaire traverse avant d'atteindre la Terre. Elle dépend de l'épaisseur de l'atmosphère traversée, ce qui définit le spectre de référence pour unifier les performances des cellules photovoltaïques.

Voici quelques coefficients de masse d'air couramment utilisés [9]

- AM0 : Spectre à la limite de l'atmosphère (rayonnement direct sans atmosphère).
- AM1 : Spectre arrivant à la surface de la Terre lorsque le soleil est au zénith.
- AM1.5G : Spectre standard arrivant à 48,2° à la surface de la Terre à une atmosphère et demi. C'est le spectre standard le plus étudié car il regroupe le rayonnement direct et diffus.

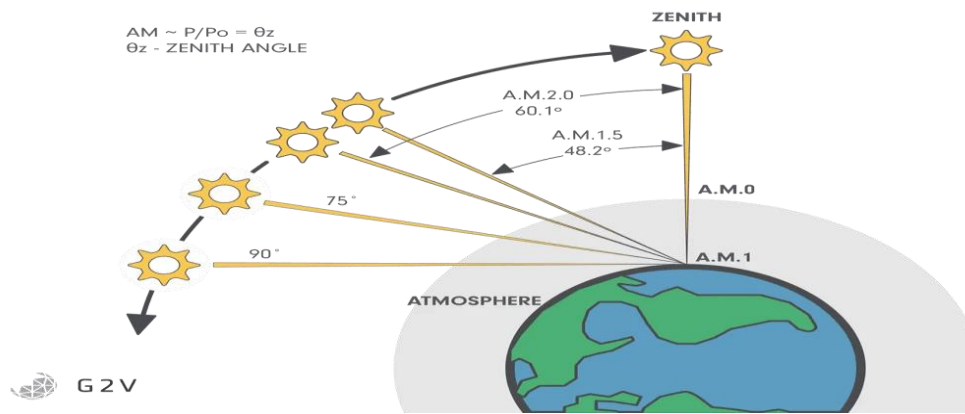


Figure I. 9 coefficient de masse d'air

### I.3. Le système photovoltaïque:

#### **I.3.1. L'histoire de l'énergie photovoltaïque:**

Ces suivantes étapes illustrent l'évolution de la technologie photovoltaïque depuis sa découverte jusqu'à son utilisation répandue comme source d'énergie renouvelable : [10]

**Effet photovoltaïque découvert (1839)** : Alexandre-Edmond Becquerel découvre l'effet PV

**Première cellule solaire fonctionnelle (1954)** : la première cellule solaire à semi-conducteurs pratique, marquant le début de l'utilisation commerciale de l'énergie solaire.

**Première utilisation spatiale (1958)** : Les satellites utilisent des cellules solaires

**Premiers systèmes solaires domestiques (1970s)** : des progrès dans la technologie photovoltaïque rendent les systèmes solaires domestiques plus abordables et accessibles pour les utilisateurs.

**Record d'efficacité des cellules solaires (2020).**

#### **I.3.2. La cellule photovoltaïque :**

Un panneau photovoltaïque est un dispositif mesurant environ 1,7m de hauteur pour 1m de largeur, son élément unitaire et actif est la cellule solaire dans laquelle se produit l'effet photovoltaïque. Celui-ci permet au matériau de la cellule de capter l'énergie lumineuse (photons) et de la transformer en énergie électrique, il génère une tension électrique qui peut varier entre 0,3 V et 0,7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et de son vieillissement. [11]

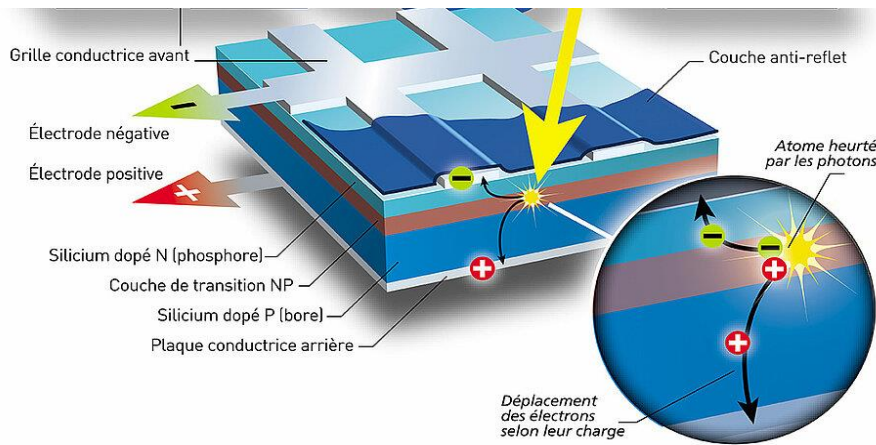


Figure I. 10 Cellule photovoltaïque

Sous l'effet d'un rayonnement lumineux incident, les électrons des bandes de valence du semi-conducteur vont pouvoir passer dans la bande de conduction et devenir libres. Comme tous les matériaux, un semi-conducteur a son propre niveau de Fermi ( $E_f$ ) qui se situe entre la bande de conduction et une bande de valence. Afin que l'électron puisse passer de la bande de valence à la bande de conduction, il a besoin d'une énergie issue du photon de lumière. Cette énergie doit être supérieure à l'énergie de transition dite de gap qui lui permet de traverser la bande interdite pour atteindre la bande de conduction [13,14]. Ce phénomène va engendrer au sein de la structure du semi-conducteur la création d'une paire électron trou. Ceux-ci, sous l'effet de la barrière de potentiel, vont s'accumuler sur chacune des faces extérieures des zones P et N. Ainsi, une DDP entre les faces extérieures de la jonction est créée : La photopile est prête à générer la puissance électrique selon un principe appelé « effet photoélectrique ».

En effet les électrons doivent circuler d'un côté de la cellule à l'autre à travers un circuit externe. On peut donc recouvrir le dessous de la cellule avec un métal très bon conducteur qui doit aussi ne pas subir des phénomènes de corrosion pour cela on place une grille métallique sur le dessus de la cellule. Aussi, le silicium est très réflecteur, on place donc un revêtement anti-réflexion sur le dessus de la cellule. Son rôle est de capter le maximum de soleil. Une couche de verre de quelques millimètres protège la cellule.

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches qui est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule.

Plusieurs cellules sont reliées entre elles, formant un panneau solaire (ou module) photovoltaïque éventuellement qui donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique

courant-tension  $I(V)$  non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM) et plusieurs modules sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque pour former un champ photovoltaïque.

### I.3.3. Les différentes technologies des cellules photovoltaïques :

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), de sulfure de cadmium (CdS), de tellure de cadmium (CdTe) ou d'arséniure de gallium (GaAs). Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. On le trouve dans la nature sous forme de pierre de silice. La silice est un composé chimique (dioxyde de silicium) et un minéral de formule  $SiO_2$ . Il est le principal constituant des roches sédimentaires détritiques (sables, grès).

On distingue plusieurs types des cellules photovoltaïques selon la propriété et le type de matériaux utilisés, on s'intéresse au silicium.



Figure I. 11 chaîne de fabrication de générateur PV

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïques. Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non toxique. Cette filière est elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinctes de par la nature du silicium employé et/ou sa méthode de fabrication, présentées dans la figure (I.19)

a. Cellule en silicium monocristallin : gris bleuté ou noir d'un aspect uniforme, fabriquées à partir d'un seul cristal de silicium qu'on découpe ensuite en fines tranches qui donneront les cellules. Son rendement est supérieur à 29%. [13]

b. Cellules en silicium polycristallin : bleues d'un aspect mosaïque, constituées de plusieurs cristaux de silicium, son rendement est supérieur à 22.9%, inférieur au rendement des monocristallins, du point de vue du prix elles sont les mieux adaptées aux applications domestiques. [13]

c. Cellule en silicium amorphe: rendement de 10% à 15% sont réalisées avec du silicium amorphe, non cristallisé, étalé sur une plaque de verre. Il a un processus d'absorption des photons plus important que celui du silicium cristallin, ce qui permet la fabrication sous forme de couche mince, mais

son rendement est plus faible, compris entre 6 et 8 %. Il est par contre compensé par un coût plus bas, il est principalement utilisé dans les appareils électroniques. [13]

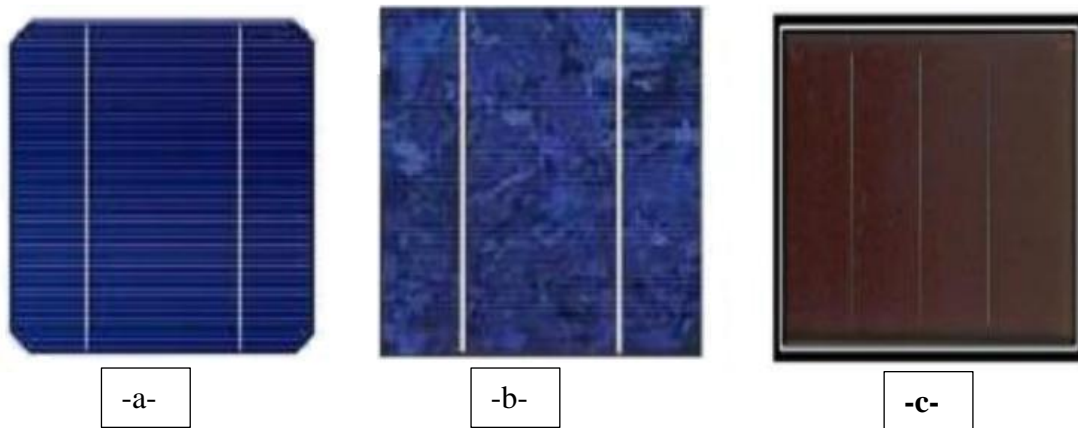


Figure I. 12 type de cellule en silicium

### I.3.4. Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule solaire :

La cellule PV (Figure I.20) fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour les pertes.

La cellule photovoltaïque est représentée généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés à partir des caractéristiques courant-tension en fonction de l'ensoleillement et de la température. De nombreux modèles mathématiques de cellule photovoltaïque ont été développés dans le but d'obtenir les caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension afin d'analyser et d'évaluer des performances des systèmes photovoltaïques.

### I.3.5. Modèle d'une cellule solaire idéale :

Une cellule PV peut se modéliser à partir de l'équation définissant le comportement statique de la jonction PN d'une diode classique. Ainsi la figure illustre le schéma équivalent électrique d'une cellule PV idéale qui correspond à un générateur de courant monté en parallèle avec une diode. [14]

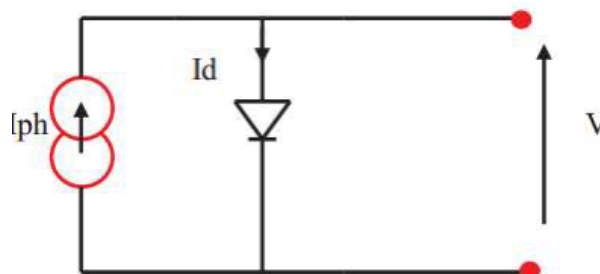


Figure I. 13 Schéma équivalent d'une cellule idéale

Par application de lois de Kirchhoff et l'équation exponentielle de la diode

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s \left[ e^{\left(\frac{qV}{2KT}\right)} - 1 \right] \quad (I.2)$$

### I.3.6. Modèle d'une cellule solaire réelle :

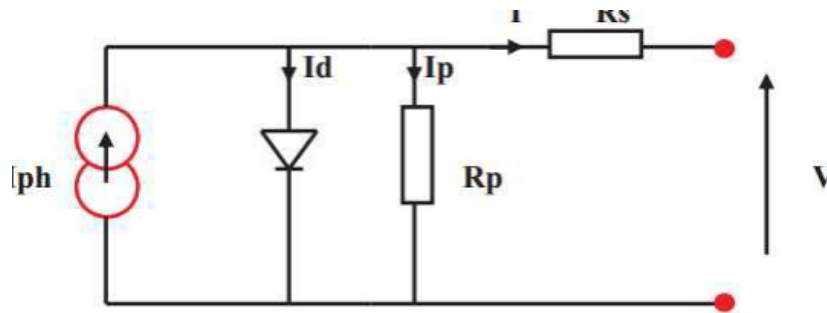


Figure I. 14 Schéma équivalent d'une cellule idéale

La photopile présentée comporte en réalité une diode en parallèle qui modélise la jonction PN, une résistance série ( $R_s$ ) et une résistance Shunt ( $R_{sh}$ ). Ces résistances auront une influence sur la caractéristique  $I=f(V)$  de la cellule

- La résistance série ' $R_s$ ' représente la résistance de contact des grilles collectrices et de connexion de ces grilles
- La résistance shunt ' $R_{sh}$ ' montée en parallèle représente le courant de fuite de la jonction.

**Le modèle mathématique du circuit s'écrit comme suit :**

$$I = I_{ph} - I_d - I_{rs} \quad (I.3)$$

**Le courant de la diode :** Dans le cas d'obscurité,  $I(V)$  obéit à l'équation du courant de la diode Schottky suivante

$$I_d = I_s \left[ e^{\left(\frac{qV}{nKT}\right)} - 1 \right] \quad (I.4)$$

- $I$  et  $V$  : le courant et la tension de sortie de la cellule respectivement
- $I_{ph}$  : le photo-courant produit
- $I_s$  : le courant de saturation de la diode
- $T$  [K]: La température en kelvin
- $K$  : La constante de Boltzmann ( $k=1,380 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ).
- $q$ [C] :charge de l'électron  $1.602 \times 10^{-19}$
- $n$  : constante d'idéalité de la jonction

**Le photo-courant  $I_{ph}$  :** C'est le courant généré par la source, il est proportionnel à l'irradiation solaire et est légèrement influencé par la température selon l'équation suivante :

$$I_{ph} = [I_{sc} - K_i (T - T_{ref})] \frac{G}{1000} \quad (I.5)$$

- $I_{sc}$  [A] : courant de court-circuit du panneau (donné par le constructeur).
- $K_i$  [A/K] : courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau
- $G$  [W/m<sup>2</sup>] : Irradiation sur la surface de la cellule
- $T_{ref}$ [K] : température de référence (298K)

**Le courant de saturation :** Ce courant varie avec la température et est donné par :

$$I_s = I_{rs} \left[ \frac{T}{T_{ref}} \right]^3 e^{\frac{q \cdot E_g \cdot \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)}{nK}} \quad (I.6)$$

- $E_g$  : énergie de gapp

**Le courant de saturation inverse de la diode(courant de fuite )  $I_{rs}$  :**

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\frac{q \cdot V_{oc}}{e \cdot n \cdot N_s \cdot K \cdot T} - 1} \quad (I.7)$$

- $V_{oc}$  [V] : tension de circuit ouvert du module (donné par le constructeur)
- $N_s$  : nombre de cellule connecté en serie

**Le couran de resistance de shunt :**

$$I_{sh} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (I.8)$$

**Le courant du panneau :**

Les équations décrites précédemment ne peuvent représenter la caractéristique I-V d'un module PV puisqu'elle sont propres à une seule cellule PV qui représente l'élément de base du panneau, on introduit donc l'équation spécifique à un module

$$I = I_{ph} - I_0 * \left[ e^{\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot K \cdot N_s \cdot T}} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (I.9)$$

#### I.4. Le générateur photovoltaïque et ses performances :

Un module PV est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série  $N_s$  (additionnant les tensions de chaque cellule augmentant ainsi la tension totale du générateur) et/ou en parallèle  $N_p$  (c'est l'ampérage qui augmentera), afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert.

La considération de circuit équivalent du modèle mène à l'équation pour un GPV avec  $N_s$  cellules en série et  $N_p$  en parallèle.

$$I = N_p * I_{ph} - N_p * I_s \left[ e^{\left( \frac{q(V/N_s + I R_s / N_p)}{nKT} \right)} - 1 \right] - \frac{N_p(V/N_s + I R_s / N_p)}{R_p} \quad (I.10)$$

en généralisant à  $N_s$  cellules en série et  $N_p$  cellules en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV ainsi constitué est donnée par

$$P_{pv} = N_s V_{pv} N_p I_{pv} P_{pv} = N_s V_{pv} N_p I_{pv} \quad (I.11)$$

Avec  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  respectivement, la tension et le courant du générateur PV.

On note que, la puissance du GPV sera optimale si chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale notée  $P_{max}$ . Soit, si elle a à ses bornes une tension  $V_{op}$  nommée tension optimale et un courant  $I_{op}$ , nommé courant optimal. :

$$P_{op} = N_s N_p P_{max} = N_s N_p V_{op} I_{op} P_{op} = N_s N_p P_{max} = N_s N_p V_{op} I_{op} \quad (I.12)$$

### I.4.1. Caractéristiques d'un générateur photovoltaïque

Nous pouvons remarquer que comme pour une cellule, la caractéristique électrique  $I(V)$  d'un GPV est non linéaire et présente un point de puissance maximale. Le point de fonctionnement d'un GPV est en fonction de l'impédance de la charge qu'il alimente. Cette charge pourrait être une charge résistive ou un bus de tension continue (par exemple, connecté à une batterie). Dans le cas d'une batterie, c'est elle qui impose le point de fonctionnement du GPV lors d'une connexion directe.

Chaque cellule ou module photovoltaïque a ses propres caractéristiques de fonctionnement et est représentée par les courbes caractéristiques non linéaires  $I(V)$  et  $P(V)$ .

La courbe représentant la variation du courant  $I$  en fonction de la tension  $V$  aux bornes du module photovoltaïque suivant l'équation "la dernière figure (I.22) . Elle présente trois zones [14]

- La zone (I) : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le module photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.

- La zone (II) : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du module, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé

- La zone (III) : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le module est assimilable à un générateur de tension.

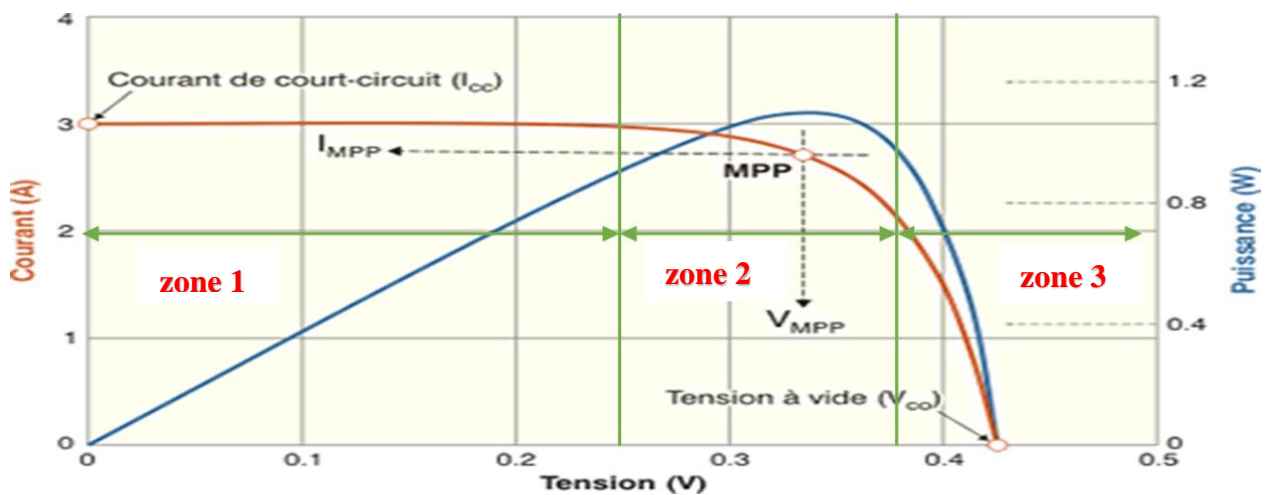


Figure I. 15 variation du courant en fonction de la tension(V)

- **La caractéristique I(V) :**

La courbe qui représente le courant I débité par le module en fonction de la tension à ses bornes. [15]

- **Tension en circuit ouvert  $V_{co}$  :**

Si l'on place une cellule sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur à ses bornes, appelée tension en circuit ouvert  $V_{co}$  (elle varie légèrement avec l'éclairement). Cette valeur correspond à la tension de coupure d'une diode, ce qui confirme le fait que l'on puisse assimiler une cellule solaire à une jonction P-N. Pour obtenir une tension plus élevée à la sortie du module, il va falloir associer les cellules en série. [15]

- **Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  :**

Si l'on place une cellule en obscurité, elle va débiter un courant maximal à tension nulle. Ce courant est dit courant de court-circuit  $I_{cc}$ . Il faudra associer les cellules en parallèle pour augmenter significativement la valeur de l'intensité en sortie du module. [15]

- **La puissance optimale :**

Le point dit point de puissance maximale PPM de coordonnées  $(V_{mp}, I_{mp})$  représente le point où la puissance de la cellule est maximale. C'est cette puissance qui sera toujours recherchée par des régulateurs de charge afin d'optimiser la charge de la batterie et le fonctionnement du générateur.

Pour des raisons de simplification, les professionnels caractérisent un module PV par sa puissance nominale aux conditions de fonctionnement standard (STC) on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête ( $W_c$ ) [15]

L'irradiation standard, internationalement acceptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Ces conditions sont appelées «STC » pour Standard Test Conditions.

La figure (I.24) représente la courbe  $I = f(V)$  d'un module photovoltaïque typique dans STC :

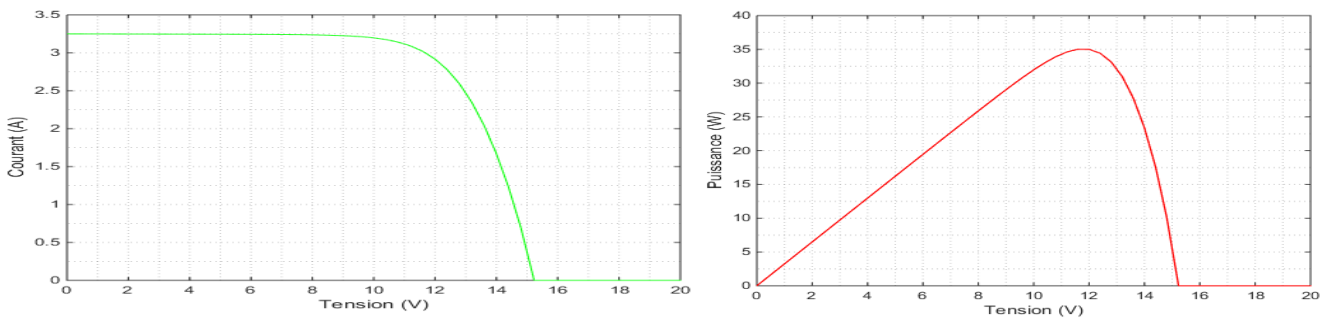


Figure I. 16 caractéristique  $I(V)$  d'un module photovoltaïque typique dans STC

On s'aperçoit alors l'existence d'un point  $P_m$  où la puissance se trouve être maximale. Il est sans aucun doute intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée. Seule une charge dont la caractéristique passe par le point  $P_m$  permettra d'extraire la puissance maximale. Certains régulateurs solaires réalisent donc une adaptation d'impédance pour qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point PPM, c'est ce que l'on appelle le Maximum Power Point Tracking (MPPT). Nous reviendrons par la suite sur cette technique.

- **Le rendement :**

Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite  $P_m$  et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module. Soit  $S$  la surface du module et  $E$  l'éclairement en  $W/m^2$ , ce rendement a pour expression [12]

$$\eta = \frac{P_m}{E * S} \tag{I.14}$$

- **Le facteur de forme :**

On appelle facteur de forme  $FF$  le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule  $P_{max}$ , et le produit du courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) par la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ) (c'est à dire la puissance maximale d'une cellule idéale) : [15]

$P_{max}$  idéale : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV idéale (Watt).

$V_{co}$  : Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV(Volt).

$I_{cc}$  : Intensité de court-circuit mesurée aux bornes de la cellule PV(Ampère).

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} * I_{cc}} = \frac{V_m I_m}{V_{co} * I_{cc}} \tag{I.15}$$

Le facteur de forme  $f$  est de l'ordre de 70 % pour une cellule de fabrication industrielle.

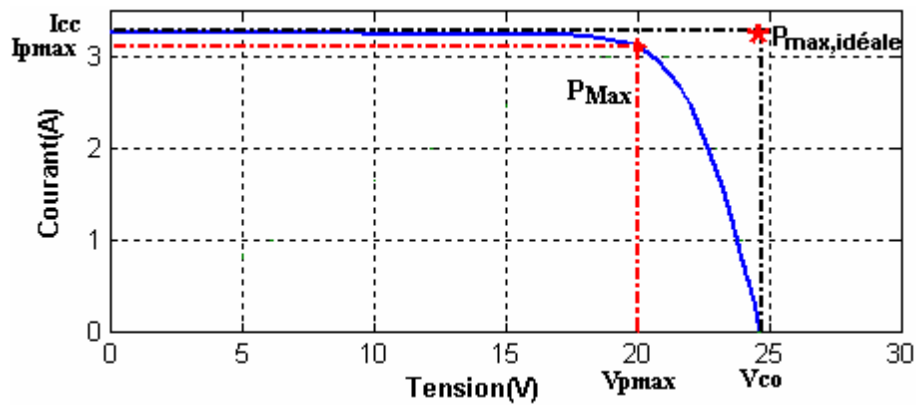


Figure I. 17 Puissances maximale idéale et pratique

### I.4.2. Protections classiques d'un GPV

La plupart des panneaux PV commerciaux sont constitués par des sous-réseaux de cellules connectés en série. Chacun de ces sous-réseaux est lui-même constitué d'un groupe de cellules PV connectés en série. Le nombre de cellules par sous-réseaux est le fruit d'un compromis économique entre protection et pertes d'une partie importante du GPV en cas de défaut partiel.

La protection électrique permet d'augmenter la durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisées dans les installations actuelles :

- la protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour)
- la protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds.

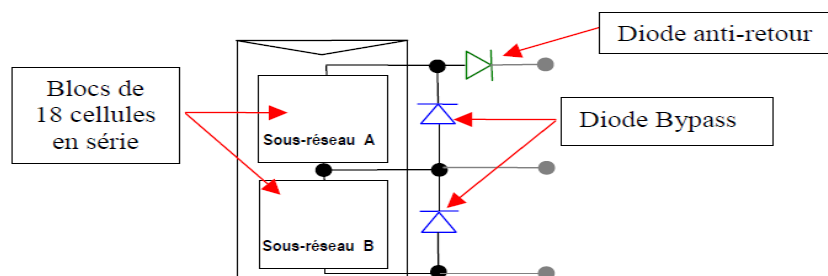


Figure I. 18 Schématisation d'un GPV élémentaire avec diode by-pass et diode anti-retour

### I.4.3. Association de plusieurs GPV

#### I.4.3.1. Association en parallèle de plusieurs GPV

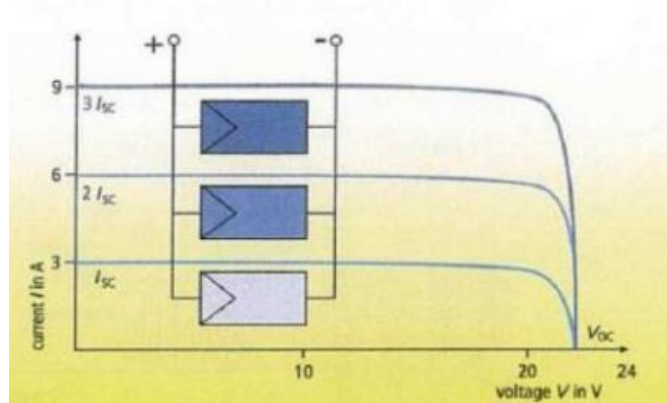


Figure I. 19 Courbe caractéristique d'un groupement en parallèle des modules photovoltaïques

Dans un groupement de modules identiques connectés en parallèle, les modules sont soumis à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants (Figure I-26).

L'équation 1-13 donne respectivement le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) et la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ) d'une association parallèle de  $N_p$  cellules.

$$V_{co_{np}} = V_{co} \quad I_{cc_{np}} = I_{cc} * N_p \quad (I.13)$$

- Si les modules en parallèles ne sont pas identiques ou si quelques cellules d'un module sont ombragées, le courant d'utilisation total des modules sera plus faible et deviendront récepteurs si la tension d'utilisation est supérieure à la tension produite par ces modules.

- Ainsi pour le cas le plus critique où la charge est nulle et le circuit ouvert, le courant des branches des modules performants se dissipera dans la branche la moins performante. Bien que la cellule puisse dissiper un courant important sans être altérée, il est préférable de disposer d'une diode anti-retour. Celle-ci empêche aussi de gaspiller dans le module occulté une partie de la puissance produite par les modules fonctionnant normalement. Cette solution n'est valable que si la chute de tension provoquée par cette diode est négligeable devant la tension produite par les modules de la branche

- On dispose pour cela de diodes anti-retour mises en série avec le GPV (de blocage) comme le montre la figure I.25. Cette diode est indispensable quand la charge du module PV est une batterie. En fait, cette diode évite que la batterie ne débite sur le module PV pendant la nuit. La figure (I.25) montre les caractéristiques  $I(V)$  d'une cellule solaire, ensoleillée, puis dans l'obscurité.

#### I.4.3.2. Association en série de cellules PV

Les modules sont alors traversés par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque module comme noté sur la Figure I- 27.

L'équation (I-14) donne respectivement la tension en circuit ouvert ( $V_{co}$ ) et le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) d'une association série des ( $n_s$ ) modules photovoltaïques.

$$V_{coN_s} = V_{co} * N_s \quad I_{ccN_s} = I_{cc} \quad (I.14)$$

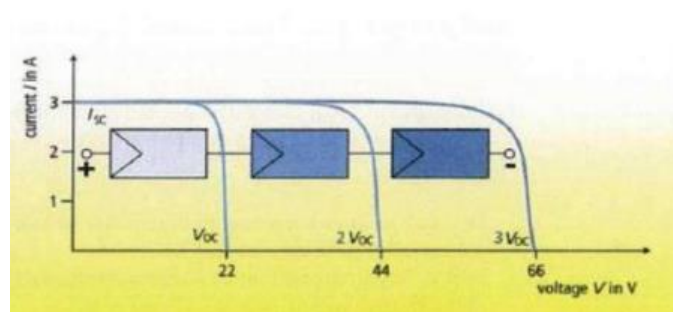


Figure I. 20 courbe caractéristique d'un groupement en série des modules

Si les cellules des modules en série ne sont pas identiques ou si certaines cellules sont partiellement ombragées, la tension d'utilisation des modules en série sera légèrement diminuée. Pour une impédance de charge faible, les cellules moins efficaces peuvent devenir réceptrices si le courant d'utilisation est inférieur au courant produit par ces cellules. Ainsi, pour une impédance nulle (court-circuit), une cellule ombragée sera soumise à ses bornes à une tension inverse importante et la puissance qu'elle devra dissiper sera trop grande. Cette dissipation a comme effet immédiat un échauffement de la zone sous irradiée. Cet échauffement local peut donner lieu à des « points chauds » (hot spot en anglais) [7] qui peuvent endommager la zone affectée et dégrader définitivement les performances du module PV entier par claquage. Il convient donc de limiter la tension inverse maximale susceptible de se développer aux bornes d'une cellule en plaçant une diode parallèle (by-pass) associées à un sous-réseau de cellules comme le montre la figure (I.25) [7].

La diode parallèle limite la tension inverse par sa tension directe puisqu'elle devient passante. En court-circuit, la puissance dissipée par la cellule moins efficace se limite à l'ordre du watt, ce qui évite toute destruction. La diode parallèle est inopérante en fonctionnement normal et ne diminue donc pas le rendement des modules.

### I.4.3.3. Association série-parallèle :

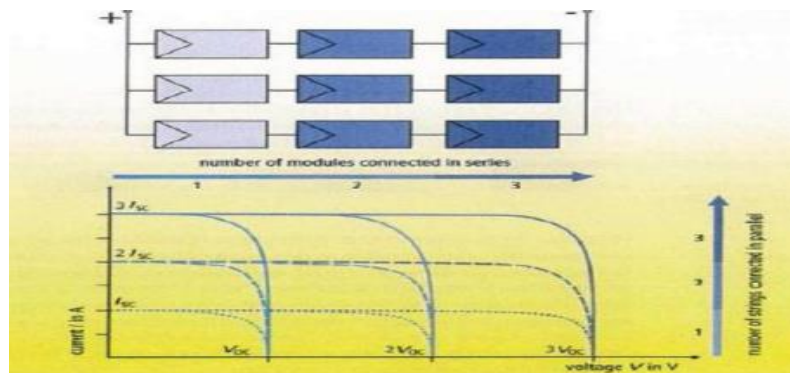


Figure I. 21 Courbe caractéristique d'un groupement série/parallèle des modules photovoltaïques

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est-à-dire le montage série/parallèle, illustré sur la Figure (I.28).

Les cellules photovoltaïques sont associées entre elles en série, et les modules sont associés en parallèle. On utilise alors les diodes by-pass pour éviter que les cellules les moins performantes deviennent consommatrices, et les diodes anti-retour pour éviter le retour du courant des autres modules lorsqu'un module est mal ensoleillé.

#### I.4.4. Paramètres influant sur le comportement du module PV

Les informations fournies par les constructeurs d'équipements photovoltaïques ne permettent généralement qu'un dimensionnement approximatif du système PV. Dans cette partie, on cite l'influence des paramètres météorologiques (température, ensoleillement) et électriques (résistance série ( $R_s$ ), résistance shunt ( $R_{sh}$ )) sur les performances d'un module PV c-à-d les caractéristiques électriques I-V et P-V :

##### I.4.4.1. Influence de l'ensoleillement :

L'influence d'éclairement sur les caractéristiques ((V-I) et (V-P)) d'un module photovoltaïque est notée sur la Figure (I-29).

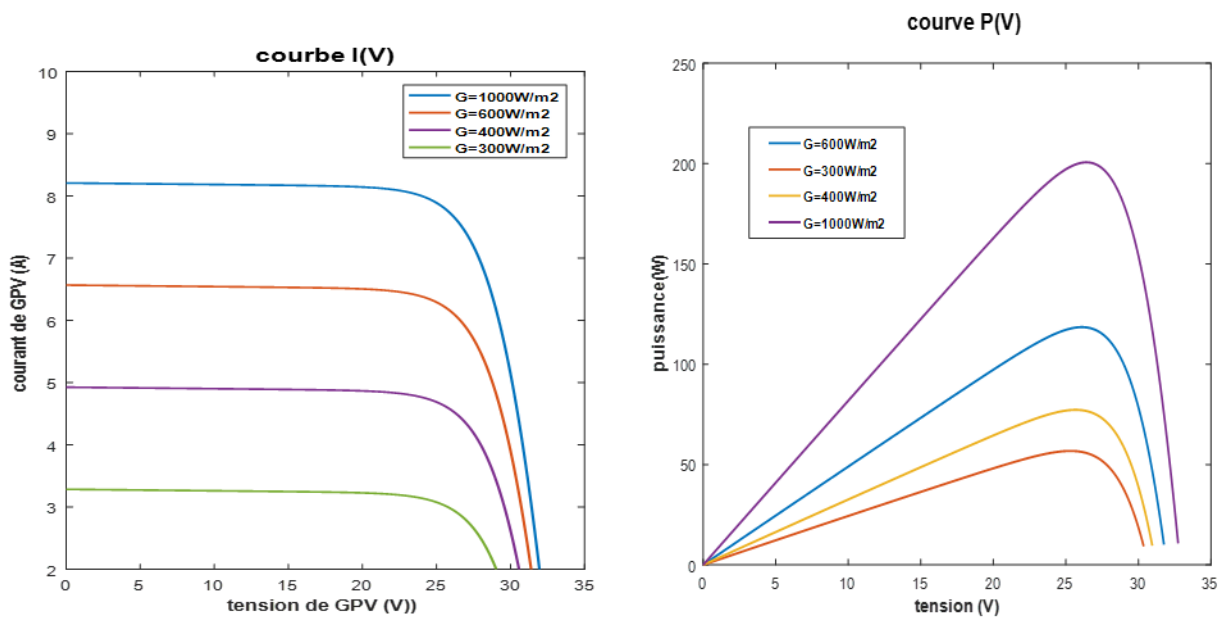


Figure I. 22 effet de l'éclairement sur le courant et la puissance de GPV

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

#### I.4.4.2. Influence de la température

L'influence de la température sur les caractéristiques ((V-I) et (V-P)) d'un module photovoltaïque est notée sur la Figure (I-30).

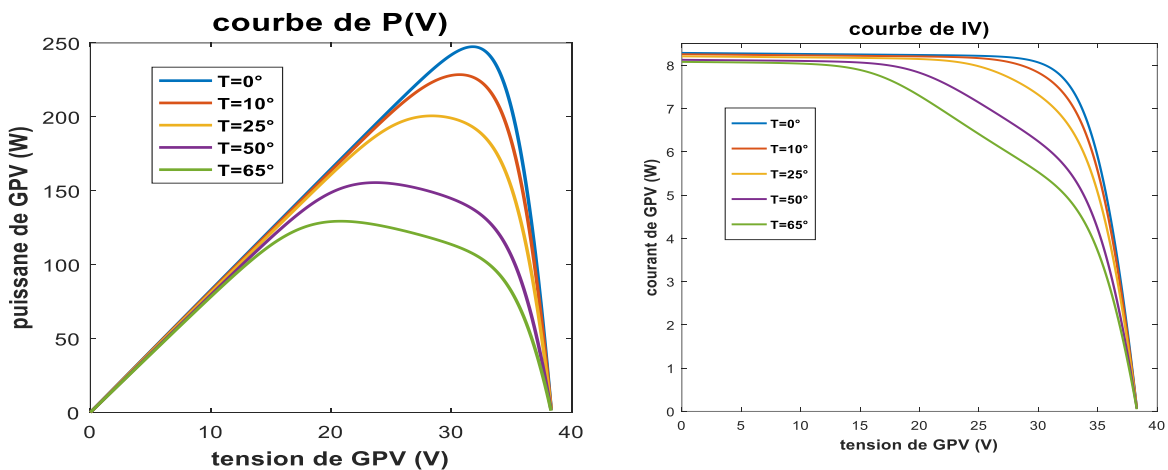


Figure I. 23 Effet de la température sur le courant et la puissance de GPV

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit . Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement à prendre en compte car elle a une relation avec la tension des cellules.

Il est important de savoir que la puissance du module diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25 °C.

#### I.4.4.3. Influence de la résistance série :

La résistance série ( $R_s$ ) présente aussi un paramètre très important qui affecte les caractéristiques (V-I) et (P-V) d'un module photovoltaïque. Elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices [10]. L'augmentation de la résistance série ( $R_s$ ) produit une diminution de la puissance maximale et une diminution de la pente de la courbe I-V dans la zone où le module fonctionne comme source de tension à droite du point de puissance maximum comme noté sur la Figure(I.23) .

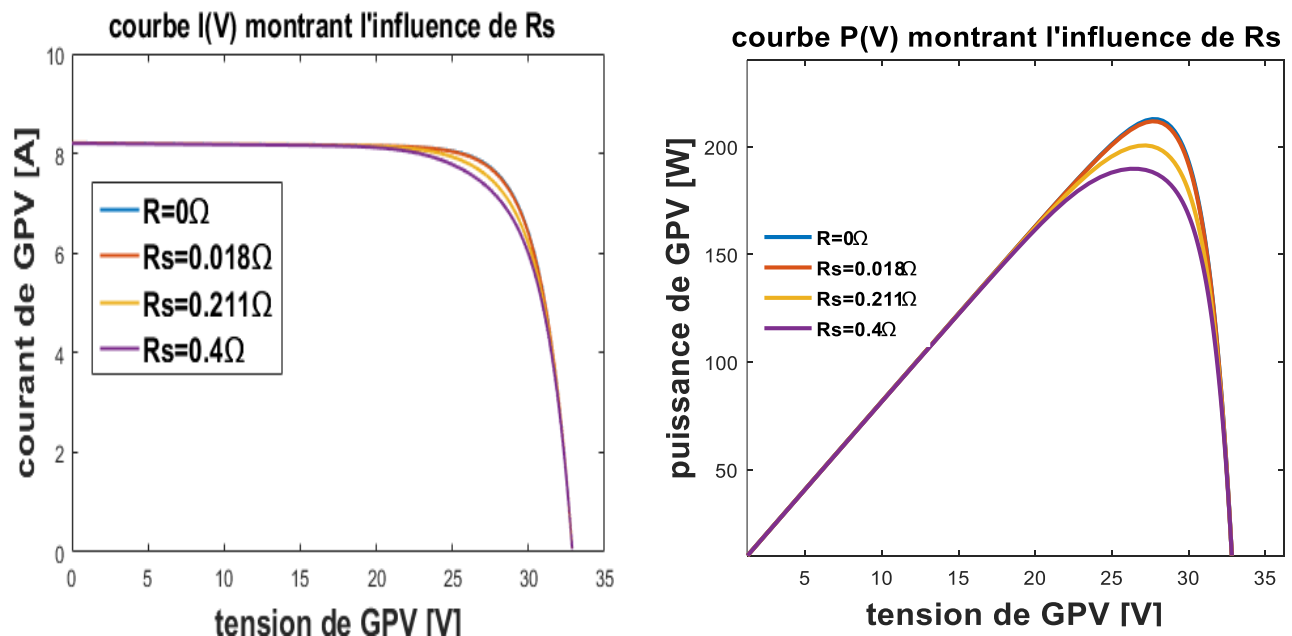


Figure I. 24 Effet de la résistance série sur le courant et la puissance de GPV

#### I.4.4.4. Influence de la résistance shunt :

La résistance shunt ( $R_{sh}$  ou  $R_p$ ) est un paramètre d'une grande importance qui affecte le comportement d'un module photovoltaïque. Elle tient compte des courants de fuite qui interviennent entre les bornes d'une cellule photovoltaïque [11] L'effet de cette résistance sur les caractéristiques (I-V) et (P-V) est noté sur la Figure I-32.

L'augmentation de la résistance shunt augmente la puissance et la puissance maximale. De même, une augmentation de la pente de la courbe (I-V) dans la zone correspondante à un fonctionnement du module

PV en source de courant. Cela se traduit par le fait que plus la résistance shunt est faible, plus le courant qui la traverse est important et par conséquent le courant produit par le module est plus faible.

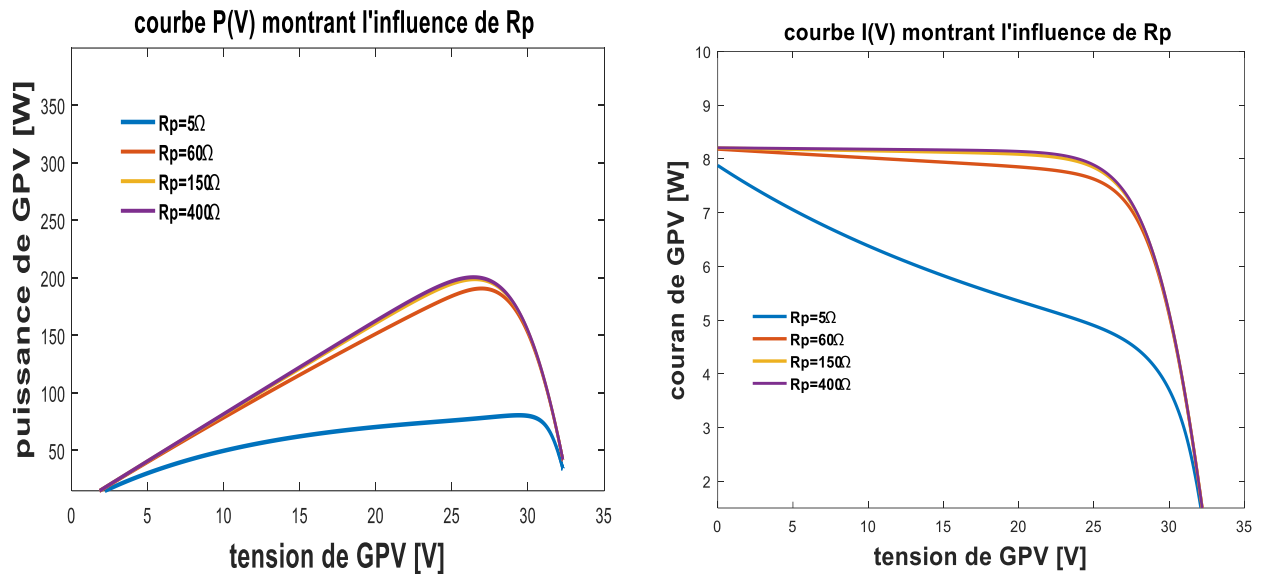


Figure I. 25 effet de la résistance shunt sur le courant et la puissance de GPV

## I.5. Le stockage

L'un des inconvénients majeurs des systèmes photovoltaïques réside dans les pénuries permanentes de l'énergie solaire, qui sont dues aux diverses raisons. Parmi lesquelles on dénote; l'apport périodique de l'énergie solaire (alternances jour/nuit, été/hiver) et l'effet météorologique aléatoire, la durée d'ensoleillement qui est subordonnée aux différentes saisons (position du soleil par rapport au zénith)...etc.[7] En conséquence, chaque fois que la demande énergétique est décalée dans le temps vis à vis de l'apport solaire, le stockage de l'électricité se révèle alors très important.

Pour cela le système tampon le plus couramment utilisé pour les systèmes photovoltaïques est la batterie d'accumulateurs électrochimiques bien connue dans le domaine automobile.

Les accumulateurs électrochimiques sont des générateurs "réversibles" c'est-à-dire pouvant stocker l'énergie électrique sous forme chimique puis la restituer à tout moment sur demande grâce à la réversibilité de la transformation. Ces réactions consistent en des oxydations et des réductions au niveau des électrodes, le courant circulant sous forme d'ions dans l'électrolyte et sous forme d'électrons dans le circuit raccordé à la batterie.

### **I.5.1. Composition :**

La figure suivante présente la composition de la batterie

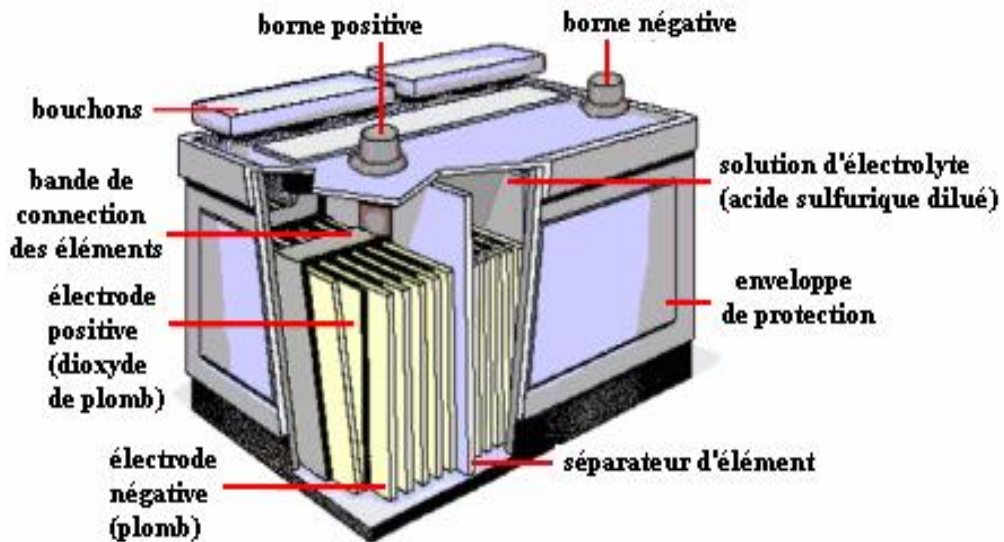


Figure I. 26 composition de la batterie

### I.5.2. Principe de fonctionnement

Pendant la décharge, la concentration de l'acide sulfurique décroît. Inversement, l'acide sulfurique se reforme pendant la charge. Le moyen le plus sûr de vérifier l'état de charge est de mesurer la densité de l'électrolyte, ce qui permet de connaître la concentration en acide.

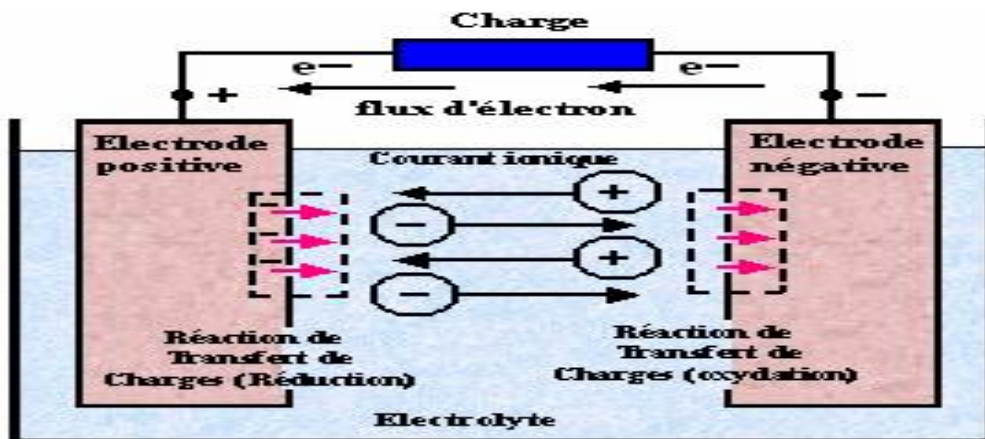


Figure I. 27 principe de fonctionnement de la batterie

### I.5.3. Caractéristiques

#### I.5.3.1. Tension

La tension aux bornes d'un élément d'accumulateur au plomb est voisine de 2V. Sa valeur varie entre 1,7 V et 2,4 V suivant l'état de charge en conditions normales de fonctionnement.

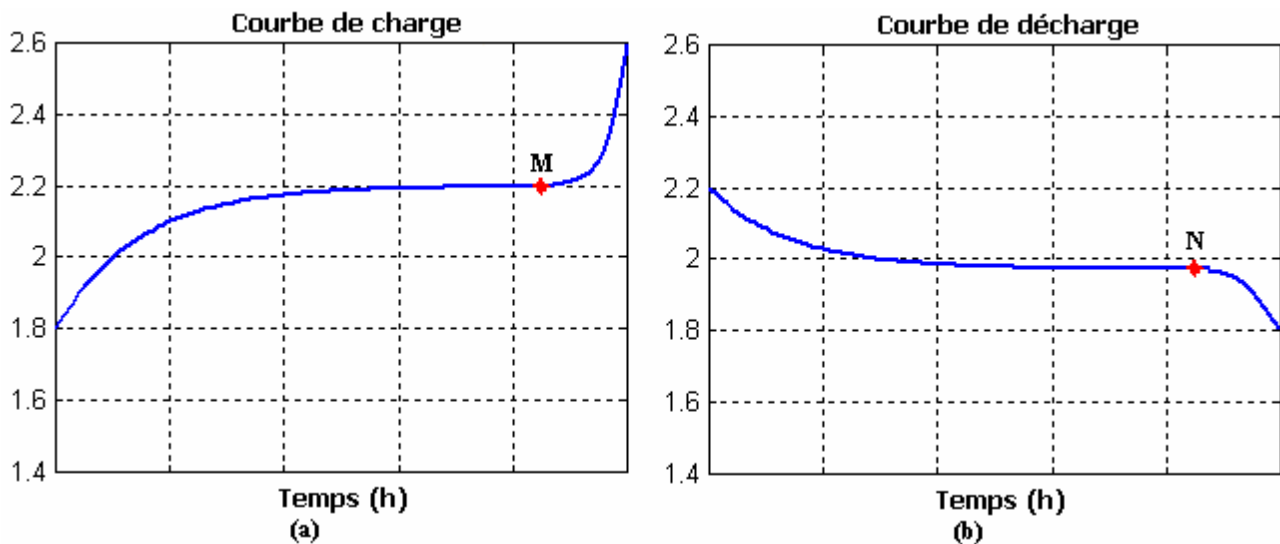


Figure I. 28 Le phénomène de charge et décharge, (a) Courbe de charge, (b) Courbe de décharge.

### I.5.3.2. Charge

Pendant la charge, l'accumulateur est un récepteur. Si on trace graphiquement la différence de potentiel à ses bornes en fonction du temps, on constate qu'après un court régime transitoire elle s'établit aux environs de 2,2 V.

En fin de charge (point **M**) figure 1.24.(a), on note un accroissement rapide de la tension. Les plaques, complètement polarisées, ne retiennent plus l'oxygène et l'hydrogène dégagés. La fin de charge est atteinte à 2,6 V en charge cyclique.

En charge flottante (régulation de charge) on se limite entre 2,25 V et 2,35 V par élément.

### I.5.3.3. Décharge

Pendant la décharge, la force électromotrice varie, en fonction du temps comme l'indique la figure 1.24.(b). Pendant une assez longue durée d'utilisation, elle reste remarquablement constante à la valeur de 2V environ. À partir du point **N**, elle diminue brusquement (1,8 V), il faut alors recharger l'accumulateur, sous peine de voir apparaître la sulfatation des plaques.

En pratique, on ne descend pas en général en dessous de 20 % de la capacité batterie.

Sinon, la sulfatation entraîne une perte de capacité et une augmentation de la résistance interne d'où baisse de tension.

### I.5.3.4. Résistance interne

La résistance interne d'un accumulateur est toujours très faible et négligeable en général, dans les applications numériques. Cette faible résistance interne présente d'ailleurs un inconvénient : quand les deux bornes sont accidentellement réunies par un conducteur lui-même peu résistant, la résistance totale du circuit reste très faible, l'intensité du courant débité est considérable, l'accumulateur, mis ainsi en court-circuit, est rapidement rendu hors usage.

### I.5.3.5. Capacité

On appelle capacité la quantité d'électricité, évaluée habituellement en ampères heures (Ah), qu'un accumulateur chargé peut faire circuler pendant la période de décharge. La capacité d'un élément est fonction du régime de décharge, la capacité nominale ( $C_n$ ) d'une batterie étant donnée, généralement, pour un régime de décharge en 10 h ( $C/10$ ).

Pour un régime de décharge plus élevé ( $I > C/10$ ) la capacité diminue.

Pour un régime de décharge plus faible ( $I < C/10$ ) la capacité augmente.

Le courant de décharge est évalué en fractions de la capacité exprimée en Ah (ex :  $C/100$ ).

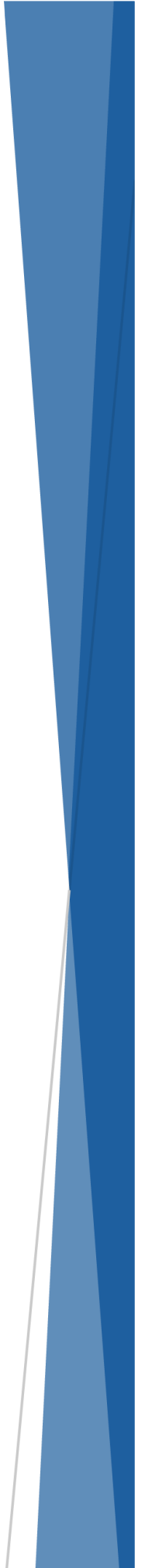
## I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, on a vu l'importance du générateur PV dans la production de l'énergie. On a passé en revue ses caractéristiques et les différentes technologies de productions de la cellule PV. Un aperçu est donné sur l'influence de la température, l'ensoleillement la résistance série et résistance parallèle sur la puissance du générateur PV ainsi que le stockage.

Par la suite on va traiter les moyens d'adaptation de l'énergie solaire photovoltaïque en sortie du générateur grâce à divers types de commandes appropriées (l'objet de notre étude).

# *Chapitre II*

## Etage d'adaptation d'un système de conversion photovoltaïque



## II.1. Introduction

Les convertisseurs statiques gèrent l'énergie électrique dans des processus industriels de plus en plus complexes et variés. Aussi, leurs structures se diversifient pour mieux satisfaire des exigences toujours plus poussées. Par ailleurs, ils utilisent le même principe : à partir d'une source d'énergie donnée, on doit obtenir l'énergie désirée en imposant, à travers l'organe de commande, une série de commutations aux interrupteurs.

On distingue selon la transformation d'énergie réalisée quatre familles de convertisseur :

- les redresseurs : permettent de convertir une tension alternative en une tension continue.
- les hacheurs : assurent la conversion continue - continue en agissant sur l'amplitude de la sortie.
- les onduleurs : ont pour objectif de transformer une tension continue en une alternative.
- les gradateurs ou les cyclo-convertisseurs : délivrent une tension alternative à partir d'une source aussi alternative en agissant sur l'amplitude et / ou la fréquence.

Dans le cadre de notre travail, nous restreindrons notre étude aux hacheurs et plus particulièrement au survolteur connu sous le nom de « boost ».

Ce choix est motivé par sa large gamme d'utilisation. En effet, on peut le rencontrer dans des applications dont la consommation varie d'un watt (systèmes électroniques embarqués), à une centaine, voire un millier de watts (équipements bureautiques ou informatiques).

## II.2. Différentes configurations des systèmes PV

Généralement une installation photovoltaïque comprend les éléments suivants : [2], [10]

- Un générateur photovoltaïque.
- Un convertisseur statique continu / continu (DC/DC).
- Un convertisseur statique continu / alternatif (DC/AC).
- Un système de régulation et de stockage.

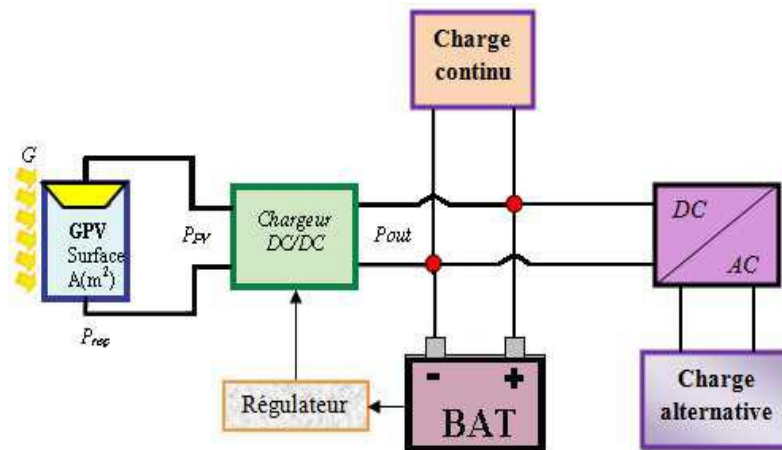


Figure II. 1 représente symboliquement les divers éléments du système

### I.1. Système autonome sans batterie

Les systèmes photovoltaïques autonomes sans batterie sont représentés par le GPV et la Batterie de la figure précédente. La charge de type continu est alimentée soit directement par le GPV, car la production d'énergie est suffisante pour le fonctionnement de la charge soit éventuellement par l'intermédiaire d'un convertisseur continu - continu (adaptateur d'impédance).

### I.2. Système autonome avec batterie

Ces systèmes sont représentés par le GPV, le régulateur et la Batterie et la charge continu dans le cas où la charge et de type continu ; et le GPV, le régulateur, la Batterie, l'onduleur et la charge alternative si la charge et de type alternatif. La batterie sert à stocker de l'énergie produite par le GPV, alors l'énergie peut être utilisée de tout temps, même en l'absence de rayonnement solaire.

### I.3. Système fonctionnant au fil du soleil

Ces systèmes font intervenir des convertisseurs DC/DC qui permet de faire une adaptation entre le générateur et la charge continu (le GPV, l'hacheur et la charge continu). Si la charge et de type alternatif, le convertisseur DC/AC est introduit (le GPV, l'onduleur piloté à la fréquence du réseau et la charge alternative).

## II.3. Le convertisseur statique

C'est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné en la convertissant. Les premiers convertisseurs de puissance électrique ont été réalisés avec des machines électriques couplées mécaniquement. Avec l'apparition des semi-conducteurs et de l'électronique de puissance avec les diodes, les transistors, thyristors etc... Les systèmes de conversion deviennent de plus en plus élaborés et ne nécessitent plus de machines tournantes. C'est l'ère des convertisseurs statiques. [16]

### II.3.1. Hacheur

L'utilisation des convertisseurs DC-DC permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé qui dans notre cas va nous permettre de poursuivre le point de fonctionnement optimum. Aussi nous allons essayer d'illustrer quelques détails des circuits de ces convertisseurs ainsi que les modèles mathématiques qui leurs correspondent.

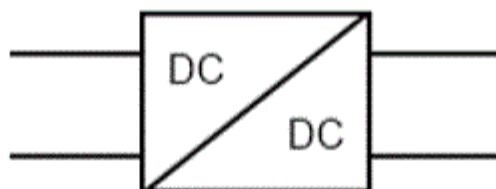


Figure II. 2 symbole d'un convertisseur DC/DC

### II.3.1.1. Domaine d'utilisation :

L'étude des convertisseurs " Courant continu - Courant continu" est à la fois un domaine très actif de la recherche et aussi l'une des plus anciennes techniques de l'électricité et de l'électronique

- Ils sont utilisés pour alimenter une gamme d'équipements électroniques embarqués. Ces convertisseurs sont essentiels pour fournir une alimentation électrique stable et fiable aux systèmes de communication par exemple.
- Applications spatiales : Ces convertisseurs fonctionnent de manière fiable dans des environnements extrêmes de température, de vide et de rayonnement cosmique.
- Applications industrielles exemple véhicules électriques.
- Énergie renouvelable pour convertir et réguler l'énergie produite par les sources en une forme utilisable par le réseau électrique. Le convertisseur DC/DC est souvent nécessaire dans les installations solaires car il permet de présenter l'énergie électrique fournie par le générateur (Panneau Solaire) avec une tension de sortie appropriée. Souvent il peut aussi servir à améliorer les caractéristiques de la source : maintenir la tension de sortie dans de plus étroite limite ou au contraire régulariser le courant du générateur.
- Électronique grand public : De nombreux appareils électroniques grand public, tels que les téléphones portables, les ordinateurs portables et les chargeurs de batteries, intègrent des convertisseurs continu-continu pour gérer l'alimentation électrique. Ces convertisseurs permettent d'adapter la tension et le courant aux besoins spécifiques de chaque appareil.

### II.3.1.2. Le principe de fonctionnement des hacheurs

Les circuits des hacheurs se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements. Le commutateur est réalisé avec un dispositif semi-conducteur, habituellement un transistor MOSFET ou un IGBT. Dans ce qui suit nous rappelons brièvement leur principe de fonctionnement en mode de fonctionnement continu [7]

### II.3.1.3. Caractéristiques de fonctionnement

Pendant le fonctionnement de l'hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante  $f_s$  avec un temps de fermeture égal à  $(\alpha \cdot T_s)$  et un temps d'ouverture égal  $[(1 - \alpha) \cdot T_s]$  où :

- $T_s = 1/f_s$  est la période de commutation
- $\alpha$  le rapport cyclique du commutateur ( $\alpha \in [0,1]$ ) (figure II.7).

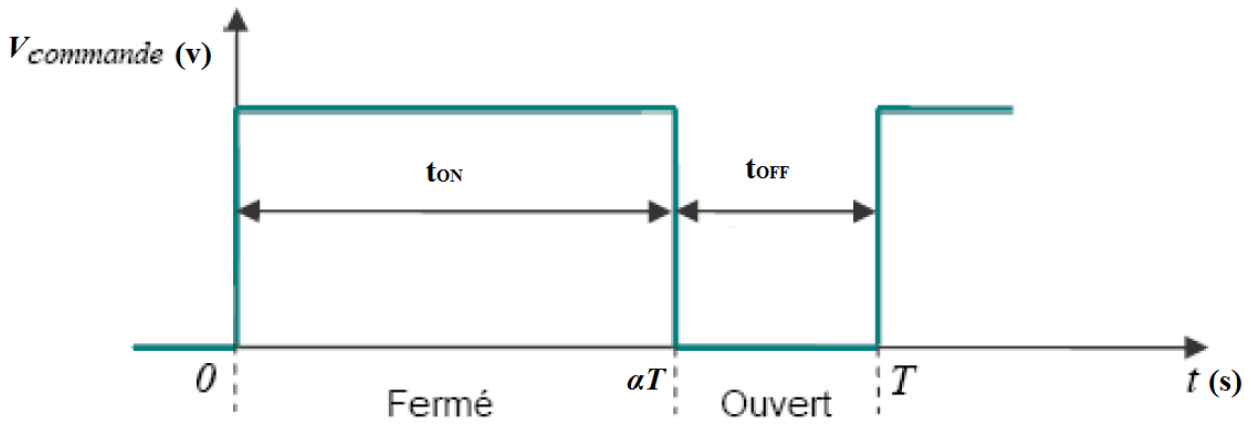


Figure II. 3 Représentation de la sortie d'un commutateur en ouverture/fermeture sur une période

### II.3.1.4. Les types d'hacheur

#### Hacheur à liaison direct " source de nature différente"

- Hacheur dévolteur
- Hacheur survolteur

#### Hacheurs à accumulation (liaison indirect) " source de même nature"

- Hacheur à accumulation inductive
- Hacheur à accumulation capacitive

### II.3.1.5. Hacheur dévolteur « Buck »

Le convertisseur dévolteur ou hacheur Buck ou hacheur série, est un interrupteur qui ne peut relier que deux sources de type différent courant/tension ou l'inverse. L'utilisation du Buck dans les systèmes de conversions photovoltaïques est tout à fait adéquate, étant donné que le générateur photovoltaïque est une source de courant continu, tandis que le récepteur qui est généralement la batterie, a la nature d'une source de tension. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion  $\alpha = V_{out}/V_{in}$  change avec le rapport cyclique  $d$  du commutateur. [15] [7]

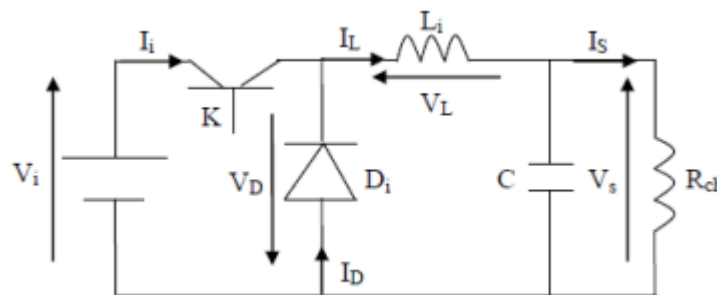


Figure II. 4 schéma de base d'un convertisseur Buck

• À l'état conducteur de l'interrupteur **K**, pendant la durée  $t_{ON}$  c-à-d  $\alpha \in [0, \alpha \cdot T_s]$ , la tension appliquée aux bornes de la diode est  $V_t$ . L'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage  $f = \frac{1}{T_s}$ . La source fournit  $V_i$  de l'énergie à la charge et à l'inductance. La diode se bloque et un courant circulera dans la charge à travers l'inductance qui stocke une énergie

$$W = \frac{1}{2} L I_L^2 \tag{II.2}$$

Lors des commutations successives de l'interrupteur **K**, le courant à l'intérieur de l'inductance aura deux composantes l'une est constante égale à la valeur moyenne du courant sur une période du hachage, tandis que la composante variable est égale à :

✓ Lorsque **K** est fermé : Pendant le temps  $t = [\alpha T_s, T_s]$ , l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre **D**. La tension à ses bornes est donc nulle [44] Le courant  $I_L$  n'augmente pas instantanément, mais plutôt linéairement avec un taux d'accroissement imposé par l'inductance  $L_i$ .

$$V_L = V_e - V_s \tag{II.3}$$

$$(\Delta I_L)_{ON} = \frac{V_e - V_s}{L} t_{ON} \tag{II.4}$$

Le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec le commutateur fermé :

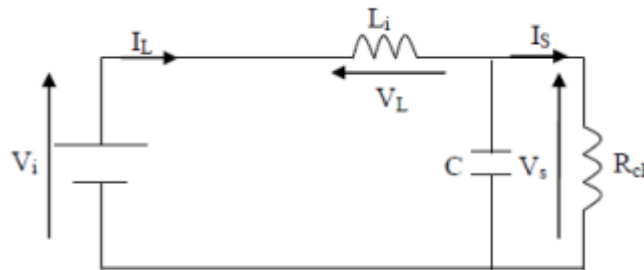


Figure II. 5 ccircuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec commutateur ouvert[15]

En appelant  $T$  la période de récurrence d'état de **K**, ce qui permet d'écrire :

$$t_{on} = \alpha \cdot T ; T = t_{on} + t_{off} ; \alpha = T_{on} / (T_{on} + t_{off})$$

✓ Lorsque **K** est ouverte, la self se décharge dans la sortie pendant le temps  $t_{OFF} : [ \alpha T, T ]$  la diode devient passante afin d'assurer, la continuité du courant dans l'inductance. La tension de sortie est  $V_L = -V_s$

$$(\Delta I_L)_{OFF} = \frac{V_s}{L} t_{OFF} \tag{II.5}$$

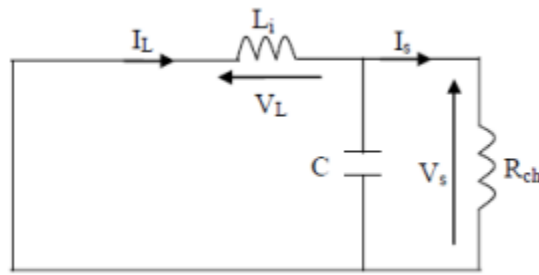


Figure II. 6 Circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec commutateur fermé [15]

$$t_{OFF} = (1 - \alpha).T$$

Ces variations du courant sur un cycles du hachage engendrent des ondulations donc des harmoniques, mais on peut écrire en régime permanent, pour dire qu'à une exactitude près les ondulations peuvent être négligées et le signal peut être rapproché à sa composante constante.

$$(I_S = \frac{V_S}{R_L}) \Rightarrow (\Delta I_L)_{ON} + (\Delta I_L)_{OFF} = 0 \tag{II.6}$$

On obtient alors l'expression fondamentale :

$$V_S = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} V_e \tag{II.7}$$

En appelant  $T$  la période de récurrence d'état de  $K$ , on peut écrire  $T = t_{ON} + t_{OFF}$  ce qui permet d'écrire :

$$V_S = \frac{t_{ON}}{T} V_e = \alpha T \tag{II.8}$$

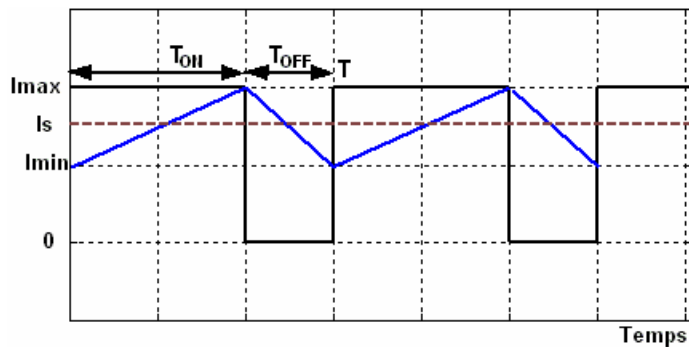


Figure II. 7 Courant dans la self du hacheur série

Le condensateur  $C_1$  dans la figure (II.8) a pour rôle de délivrer l'écart des intensités de la source et de la charge au moment de l'enclenchement de  $K$  ; il transforme la source de courant en source de tension (tension du condensateur pratiquement constante à l'enclenchement de  $K$ , quel que soit le courant appelé par la charge, à condition que la capacité de  $C_1$  soit suffisante). Ce régime de conduction de courant est appelé le régime continu.

Lorsque  $T > t_{ON} + t_{OFF}$ , le régime est appelé conduction discontinue. Dans ce cas le courant de sortie vaut :

$$I_S = \frac{I_m}{2T} (t_{ON} + t_{off}) = \frac{V_e V_S}{2TL} t_{ON} (t_{ON} + t_{OFF}) = \frac{V_S}{R_L} \tag{II.9}$$

Ainsi,

$$V_s = \frac{1}{1 + \frac{2LT I_s}{t_{ON}^2 V_e}} V_e \tag{II.10}$$

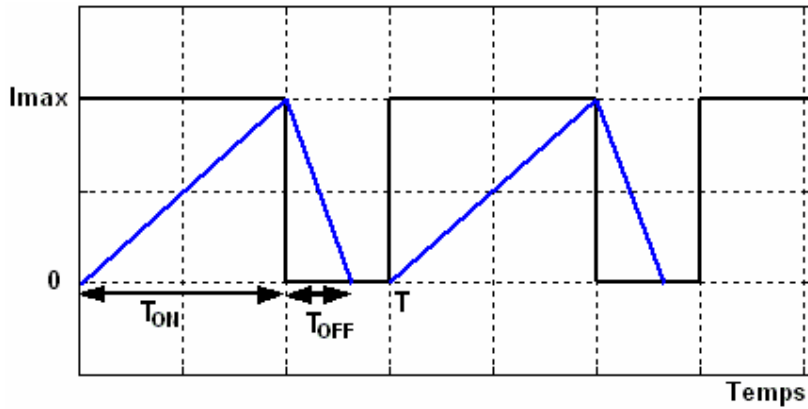


Figure II. 8 Courant en discontinuité dans la self de l'hacheur série

**Le rapport de conversion :**

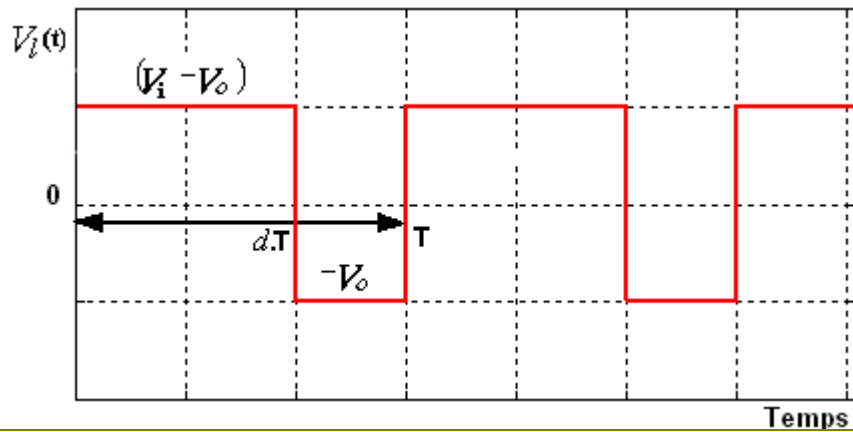


Figure II. 9 La caractéristique de la tension d'inductance  $V_L(t)$  pour un hacheur série

La tension moyenne d'inductance est égale à zéro en régime permanent :

$$V_L(t) = d(V_i - V_o) + (1 - d) \cdot (-V_o) = 0 \tag{II.11}$$

Les équations de base qui décrivent les caractéristiques du courant continu à l'état d'équilibre d'un hacheur dévolteur sont :

$$d V_i = V_o \tag{II.12}$$

$$I = d I_L \tag{II.13}$$

$$I_o = I_L \tag{II.14}$$

On déduit donc de l'équation (2.18) que le rapport de conversion d'un hacheur dévolteur est donné par la relation (2.21) en considérant que le convertisseur est idéal (sans perte) :

$$M(d) = \frac{V_o}{V_i} = d \tag{II.15}$$

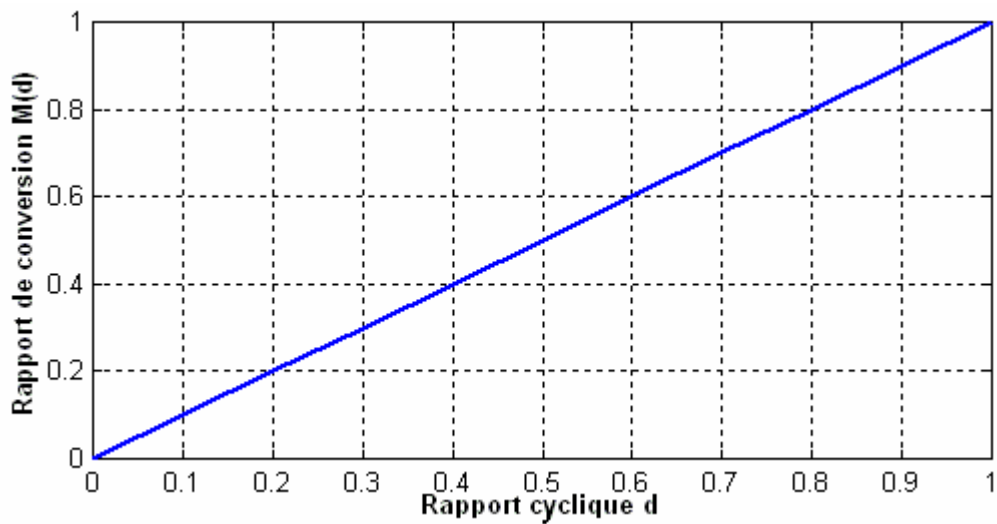


Figure II. 10 le rapport de conversion M(d) pour un hacheur série

### II.3.1.6. Hacheur survolteur « Boost »

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de Boost ou hacheur parallèle ; son circuit de base est celui de la figure 2.9.

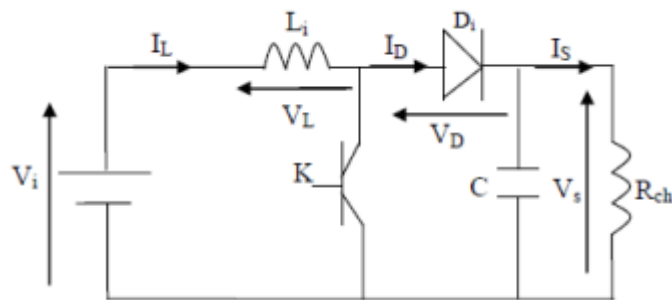


Figure II. 11 schéma de base d'un convertisseur Boost

Son principe de fonctionnement est basé sur la position du commutateur **K** ouvert/fermé,

- Interrupteur **K** est fermé, pendant la durée  $t_{ON}$  c-à-d  $\alpha \in [0, \alpha.TS ]$ , dans cette phase le courant croit progressivement, ce qui laisse l'inductance stocker davantage d'énergie durant tout le temps de la fermeture de **K**. La diode  $D_i$  est alors bloquée et la charge est, par conséquent déconnectée de l'alimentation.

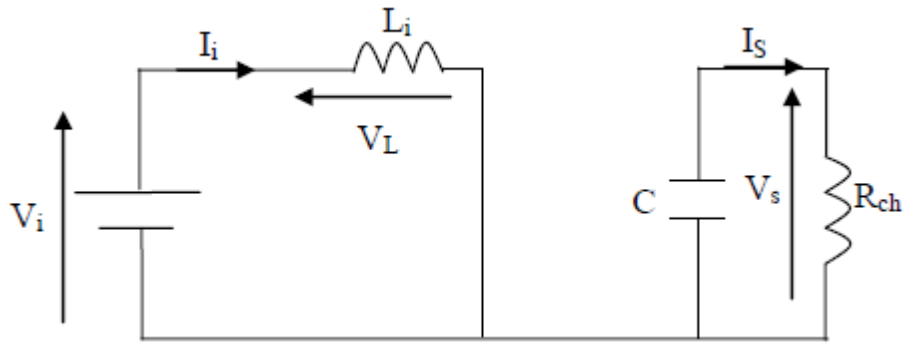


Figure II. 12 circuit équivalent d'un convertisseur survolteur avec commutateur fermé

- Interrupteur K ouvert, Le commutateur se bascule en ouverture c-à-d pendant la durée  $t_{OFF} \alpha \in [d.T_s, T_s]$ , durant cette action de transition de la fermeture à l'ouverture l'inductance  $L$  s'oppose à la variation du courant  $I_L$  dans son circuit selon la loi de Lenz. la f.é.m. de l'inductance s'additionne à celle du générateur, conséquence du placement en série de l'inductance avec le générateur (effet élévateur de tension). La diode est alors passante, le courant traverse l'inductance, le condensateur et la charge. Il en résulte un transfert vers la capacité de l'énergie accumulé.

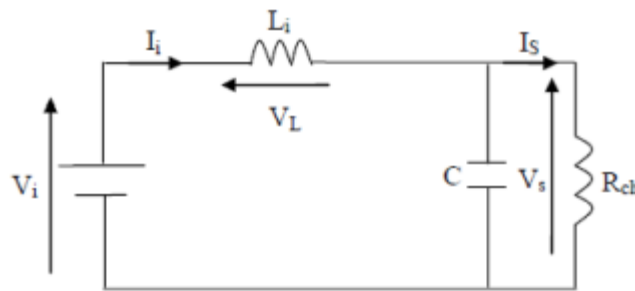


Figure II. 13circuit équivalent d'un convertisseur survolteur avec commutateur ouvert

Cette variation sollicite aussi la variation du flux magnétique dans son noyau, et donc elle génère une tension à ses bornes qui s'ajoute à la tension de source, le tout se trouve aux bornes du condensateur C2 La grandeur du courant qui varie à l'intérieur de la self est donné par :

$$(\Delta I_L)_{OFF} = \frac{V_e - V_s}{L} t_{OFF} \tag{II.16}$$

On écrit alors en régime permanent, comme pour le BUCK :

$$(\Delta I_L)_{ON} + (\Delta I_L)_{OFF} = 0 \tag{II.17}$$

Ce qui conduit à l'expression fondamentale :

$$V_s = \frac{t_{ON} + t_{OFF}}{t_{ON}} V_e \tag{II.18}$$

Une conduction discontinue est définie par un  $T > t_{ON} + t_{OFF}$

$$V_s = \frac{1}{1 + \frac{t_{ON} T V_e}{2L I_s}} V_e \tag{II.19}$$

Dans une conduction continue on a :  $\frac{2L}{R_L T} > \left(\frac{V_e}{V_s}\right)^2 \left(1 - \frac{V_e}{V_s}\right)$  (II.20)

Le rapport de conversion est  $M(\alpha) = \frac{V_e}{V_s} = \left(1 - \frac{1}{1-d}\right)$  (II.21)

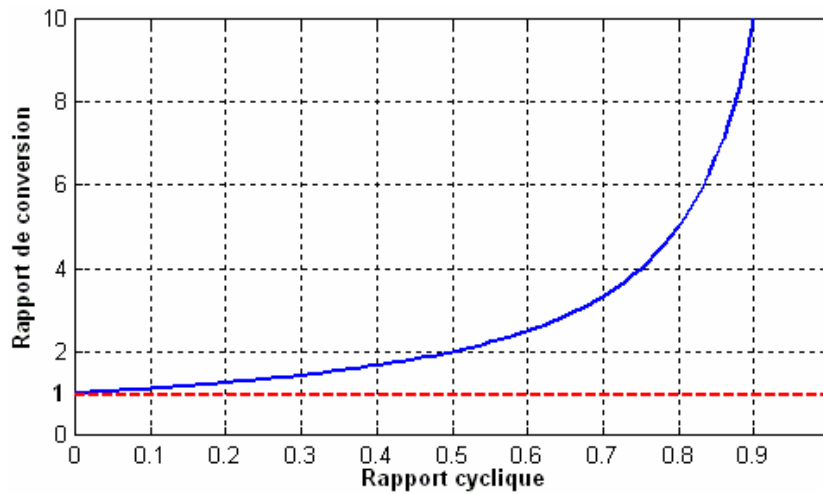


Figure II. 14 L'allure du rapport de conversion en fonction du rapport cyclique

### II.3.1.7. Hacheur dévolteur/survolteur « Buck-Boost »

Ce dernier a acquis les caractéristiques et les propriétés électriques des deux types évoqués précédemment, appelé aussi « Flyback ». Il présente donc une sorte d'un transformateur hybride (abaisseur/élevateur) pour une tension d'entrée/sortie continue ; son schéma de base est illustré par la figure (II.20)

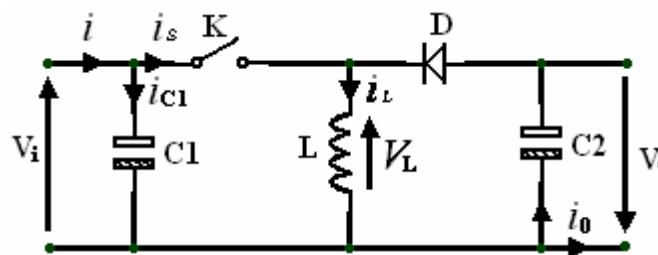


Figure II. 15Circuit de base d'un Buck-Boos

Son principe de fonctionnement est basé essentiellement sur la position du commutateur **K** ouvert/fermé. Lorsque ce dernier est fermé, pendant la durée ON  $t_c$ -à-d  $\alpha \in [0, \alpha.TS ]$ , la diode est bloquée, tandis que le courant croît linéairement à l'intérieur de la self avec une pente égale  $\alpha = V_e / L$  ce qui laisse l'inductance stocke d'avantage d'énergie durant tout le temps de la fermeture de **K**. Lorsque le commutateur s'ouvre c-à-d durant  $t_{OFF}$ ,  $\alpha \in [ \alpha.TS , TS ]$ , la diode conduit à travers l'inductance, où le courant décroît aussi linéairement avec une pente de  $\beta = - V_O / L$

Lorsque l'interrupteur **K** est fermé le circuit équivalent du « flyback » est montré sur la

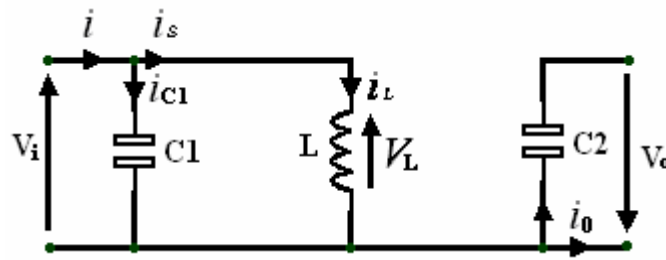


Figure II. 16 Circuit équivalent d'un Buck-Boost lorsque  $\alpha \in [0, \alpha.TS ]$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = Vi(t) \tag{II.21}$$

Lorsque l'interrupteur  $K$  est ouvert le circuit équivalent du « flyback » est montré sur la figure (II.22)

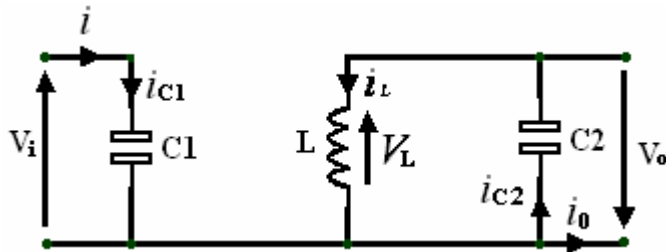


Figure II. 17 circuit équivalent d'un Buck-Boost lorsque  $d \in [d.TS , TS]$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -Vo(t)$$

le rapport de conversion qui est égal à  $M(d) = \frac{v_e}{v_s} = -\frac{d}{(1-d)}$  (II.23)

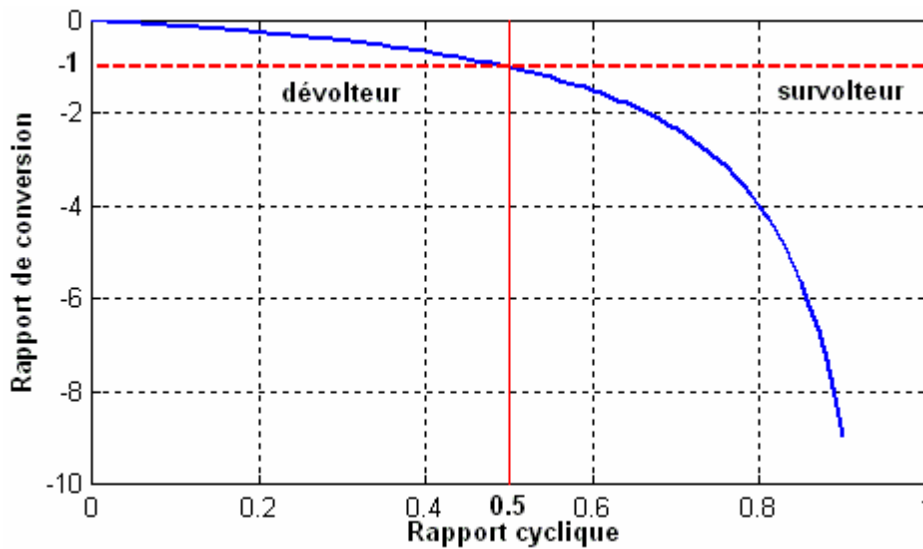


Figure II. 18 Rapport de conversion en fonction du rapport cyclique.

II.3.1.8. Comparaison : [11]

	<i>Boost</i>	<i>Buck</i>	<i>Buck – Boost</i>
Gain en tension	$\frac{1}{1 - \alpha}$	$\alpha$	$\frac{\alpha}{1 - \alpha}$
$V_{k_{max}}$ $ V_{d_{max}} $	$\frac{V_e}{1 - \alpha} + \frac{\Delta V_s}{2}$	$V_e$	$\frac{V_e}{1 - \alpha} + \frac{\Delta V_s}{2}$
$i_{k_{max}}$ $i_{D_{max}}$	$\frac{I_s}{1 - \alpha} + \frac{\alpha \cdot V_e}{2 \cdot L \cdot f}$	$I_s + \frac{\alpha(1 - \alpha)V_e}{2 \cdot L \cdot f}$	$\frac{I_s}{1 - \alpha} + \frac{\alpha \cdot V_e}{2 \cdot L \cdot f}$
Courant de source	Continu	Discontinu	Discontinu

II.3.2. Onduleur :

Un convertisseur (DC/AC) est un convertisseur statique qui permet la transformation de l'énergie de type continue, produit par le générateur photovoltaïque, en une énergie alternative monophasé ou triphasé. La forme de la tension de la sortie de l'onduleur doit être plus proche d'une sinusoïde c'est que le taux d'harmonique soit très faible, et ça dépend essentiellement à la technique de commande utilisée. Ils sont employés pour deux raisons :

- Soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables.
- Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes.

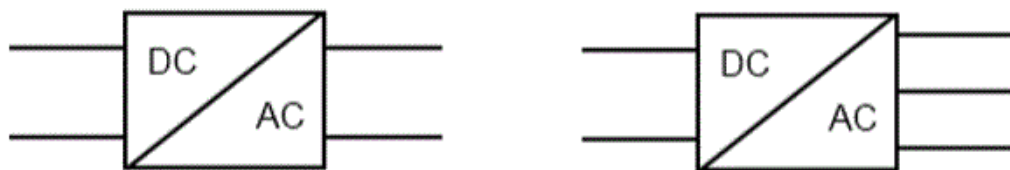


Figure II. 19 Symbole des convertisseurs DC-AC monophasé et triphasé

Ces convertisseurs (DC/AC) se distinguent principalement par la nature de l'étage continu et par le nombre de phases de la source alternative.

- Si l'étage continu est vu comme étant une source de courant, les convertisseurs continus alternatifs associés sont des onduleurs de courant.
- Si l'étage continu est vu comme étant une source de tension, les convertisseurs continus alternatifs associés sont des onduleurs de tension.

Le plus souvent, on utilise deux ou trois phases. Ces convertisseurs (DC/AC) sont des convertisseurs directs, ils ne sont composés que d'interrupteurs semi-conducteurs, et la nature de la source continue

impose la nature de la source alternative. Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques sont quelques peu différents des onduleurs classiques utilisés en électrotechnique, mais le but de conversion DC/AC est le même.

Pour alimenter une charge à courant alternatif à partir d'un GPV, un onduleur doit être utilisé comme étage d'adaptation. En effet, un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance qui permet de délivrer une tension alternative à partir d'une source à courant continu.

La structure d'un onduleur est généralement constituée d'interrupteurs électroniques tels que les IGBT, transistors de puissance ou thyristors. Pour avoir un signal alternatif de fréquence bien déterminée, on module la source à l'aide des commutations commandées généralement par modulation de largeur d'impulsion (MLI) [11]

Actuellement, les installations destinées à l'alimentation du réseau électrique public, représentent les applications photovoltaïques les plus bénéfiques. En effet, différentes méthodes existent pour monter ses installations dont le principe est basé sur un GPV raccordé au réseau à travers un ou plusieurs onduleurs. Ces onduleurs permettent de transformer la tension continue délivrée par le GPV en une tension alternative en le forçant à fonctionner à sa puissance maximale. En plus, ils assurent une protection du réseau contre les défauts qui peuvent survenir de ce dernier ou de l'installation. Pour la gestion de ces installations, les différentes topologies qui existent sont : l'onduleur central, les onduleurs strings, les onduleurs intégrés aux panneaux et les onduleurs multi-string [3].

#### II.4. Connexion directe entre la source et la charge

La configuration d'une connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode antiretour est illustrée à la figure (II.1). Dans le cas où, lorsque le module n'est pas éclairé et la charge est une batterie le GPV pourrait fonctionner en tant que récepteur. La batterie pourrait donc se décharger sur le GPV et endommager par conséquent les modules PV . De ce fait, pour éviter cette situation, la connexion doit être assurée à l'aide d'une diode anti-retour placée entre le GPV et la charge. L'inconvénient de cette configuration, c'est qu'elle n'offre aucun type de limitation et/ou réglage de la tension de la batterie. Le transfert de  $P_{max}$  disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti. [24]

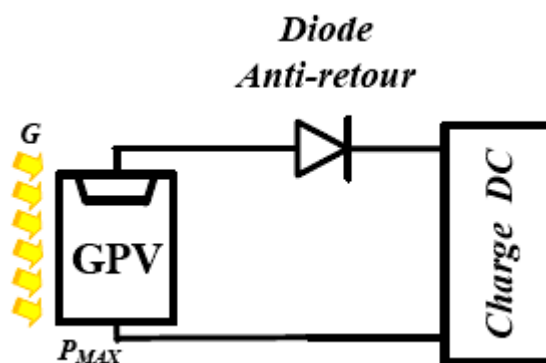


Figure II. 20 Connexion directe GPV-Charge par le biais d'une diode antiretour

En effet, le point de fonctionnement du GPV résulte de l'intersection entre la caractéristique I-V du GPV et la caractéristique I-V de la charge.

Il est à noter que dans ce type de connexion directe la nature de la charge est continue (DC) car une charge de type alternative n'est pas du tout compatible avec la connexion directe car le GPV fournit un courant continu. Pour la connexion d'un GPV à une charge alternative, nous avons obligatoirement besoin d'un étage d'adaptation spécifique de type onduleur.

Trois types de charges DC existent à savoir :

- Charge purement résistive.
- Charge de type source de tension.
- Charge de type source de courant.

Sur la figure (II.2), nous avons représenté les caractéristiques I (V) et P (V) d'un GPV ainsi que les caractéristiques I (V) pour les trois types de charges. Le point de fonctionnement où la puissance fournie par le générateur est maximale (P<sub>MAX</sub>) pour un courant optimal (I<sub>OPT</sub>) et une tension optimale (V<sub>OPT</sub>) est le point d'intersection entre les caractéristiques I (V) du générateur et celles des trois types de charges

- 1) point A pour une charge résistive.
- 2) point B pour une charge de type source de tension.
- 3) point C pour une charge en source de courant.

Pour ces trois points, la puissance fournie par le générateur est respectivement P<sub>A'</sub>, P<sub>B'</sub> et P<sub>C'</sub>, correspondant à des valeurs de puissance inférieures à la puissance maximale disponible P<sub>MAX</sub>

Ce qui nous permet de dire qu'une perte d'une partie de la puissance délivrable aux bornes du générateur PV entraînant à la longue des pertes de production énergétiques importantes. [14]

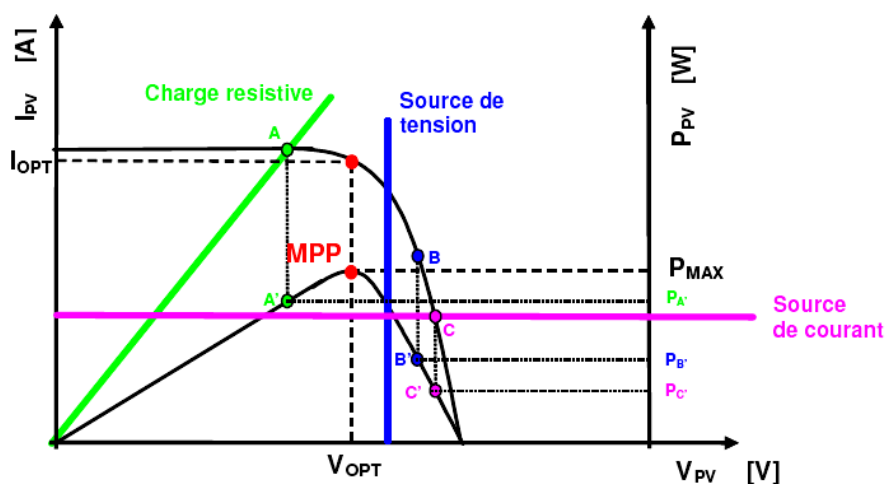


Figure II. 21 Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge en connexion directe.

Comme illustré précédemment, le point de fonctionnement peut se trouver plus ou moins éloigné du PPM, voir ne pas exister. Ce dernier cas se produit par exemple, lorsqu'une batterie connectée à un GPV, présente une tension de batterie systématiquement supérieure à la tension de circuit ouvert du générateur

photovoltaïque ( $VOC$ ). Alors, aucun transfert de puissance ne peut avoir lieu. Ainsi, l'un des intérêts à introduire un étage d'adaptation comme indiqué sur la figure (II.3) est d'assurer que le transfert d'énergie est toujours possible et qu'il peut s'effectuer dans des conditions de fonctionnement optimales pour la source PV et la charge.

L'électronique de puissance largement utilisée dans divers domaines de la conversion d'énergie offre plusieurs solutions potentielles sous forme de convertisseurs statiques (CS).

### II.5. Étage d'adaptation entre un générateur PV et une charge

Selon l'application et le degré d'optimisation de production souhaité, l'étage d'adaptation entre le GPV et la charge peut être constitué d'un ou plusieurs convertisseurs statiques et permet d'assurer les fonctions suivantes :

- adapter les niveaux de tensions entre la source et la charge dans de grandes proportions si nécessaire (convertisseur Buck, Boost...)
- introduire une isolation galvanique (convertisseur Flyback, Forward...),
- connecter une charge avec des besoins d'alimentation de type alternative (onduleur).

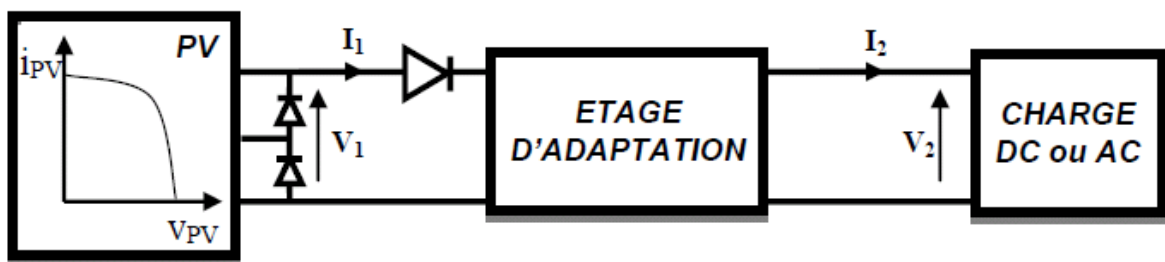


Figure II. 22 Etage d'adaptation entre le GPV connecté à une charge

Ainsi, dans la plupart des cas, les protections initiales de diodes by-pass et de diodes anti-retour sont également indispensables lors d'une connexion à l'aide d'un étage d'adaptation.

L'introduction d'un étage d'adaptation permettant de fixer le point de fonctionnement du GPV indépendamment de celui de la charge, permet l'extraction de la puissance optimale, la technique la plus usuelle consiste à utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge (figure. II.26). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de  $P_{MAX}$  disponible. [14]

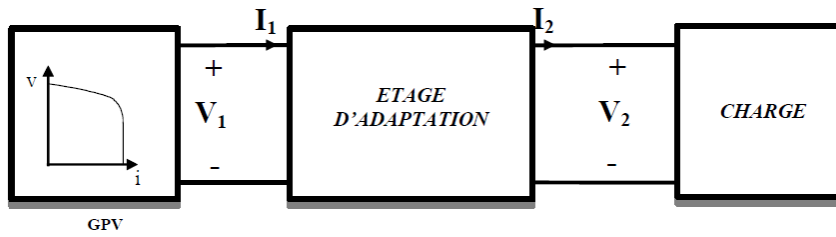


Figure II. 23 Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de  $P_{MAX}$  du GPV

Pour que le générateur PV fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge.

## II.6. Principe de la recherche du point de puissance maximale

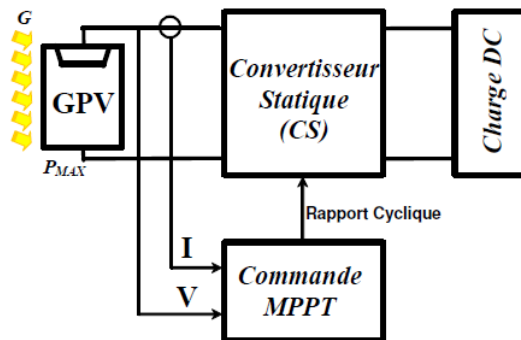


Figure II. 24 chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque avec CS contrôlé par une commande MPPT sur charge DC

L'adaptateur de charge dans notre étude est un hacheur électronique qui permet d'élever la tension (hacheur survolteur) dont le rôle primordial est de transformer une puissance d'entrée  $P_e = V_e I_e$  en une puissance de sortie  $P_s = V_s I_s$  plus élevée avec un rendement en conversion  $\eta = P_s/P_e$  très grand (proche de 100%).

La chaîne de puissance d'un GPV où une charge DC est alimentée par un générateur à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT, peut être représentée comme indiquée sur la figure II.28. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT). Le principe de ces commandes est d'assurer une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance en chaque instant.

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du CS de telle sorte que la puissance fournie par le GPV soit le  $P_{MAX}$  disponible à ses bornes. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour

rechercher le PPM, mais en général il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS jusqu'à se placer sur le PPM en fonction des évolutions des paramètres d'entrée du CS ( $I_{PV}$  et  $V_{PV}$ ).

Dans la section suivante, nous présentons un bilan sur les différents types d'algorithmes MPPT présents dans la littérature.

### **II.7. Critères de qualité d'une commande MPPT :**

Une commande MPPT doit avoir :

- Un niveau de simplicité important favorisant une faible consommation et un coût raisonnable. En effet, il ne faut pas oublier que dans un contexte énergétique, le fait d'insérer un étage d'adaptation avec une commande MPPT doit avoir un gain du point de vue énergétique recouvrant le surcoût économique. Dans le cas contraire, la commande aussi performante qu'elle soit, n'est pas recevable pour l'utilisation d'un tel type de commande.

$$\eta = \frac{P_{eff}}{P_{max}} \quad \text{Le rendement du point de fonctionnement}$$

$P_{eff}$  : La puissance effectivement délivrée par le GPV

$P_{max}$  : Le maximum de puissance potentiellement disponible à la sortie d'un panneau PV.

L'évaluation de la performance d'une commande MPPT n'est pas limitée au seul paramètre  $\eta$ . D'autres critères, aussi importants, sont utilisés pour l'évaluation de la qualité de commande :

- Un comportement en dynamique et en statique pour piloter l'étage d'adaptation auquel elle est associée et pour assurer que l'adaptation aux changements d'éclairement soit faite le plus rapidement possible.
- En même temps, elle doit pouvoir piloter l'étage d'adaptation de telle sorte qu'en régime statique, le point de fonctionnement du GPV soit le plus près possible du PPM dans n'importe quelle condition météorologique ou état de la charge DC alimentée par l'étage d'adaptation.

Donc l'utilisation d'un type de commande MPPT par rapport à un autre ou bien à une connexion directe doit apporter un gain énergétique et économique quantifiable.

## II.8. Fonctionnement d'un générateur PV à sa puissance maximale :

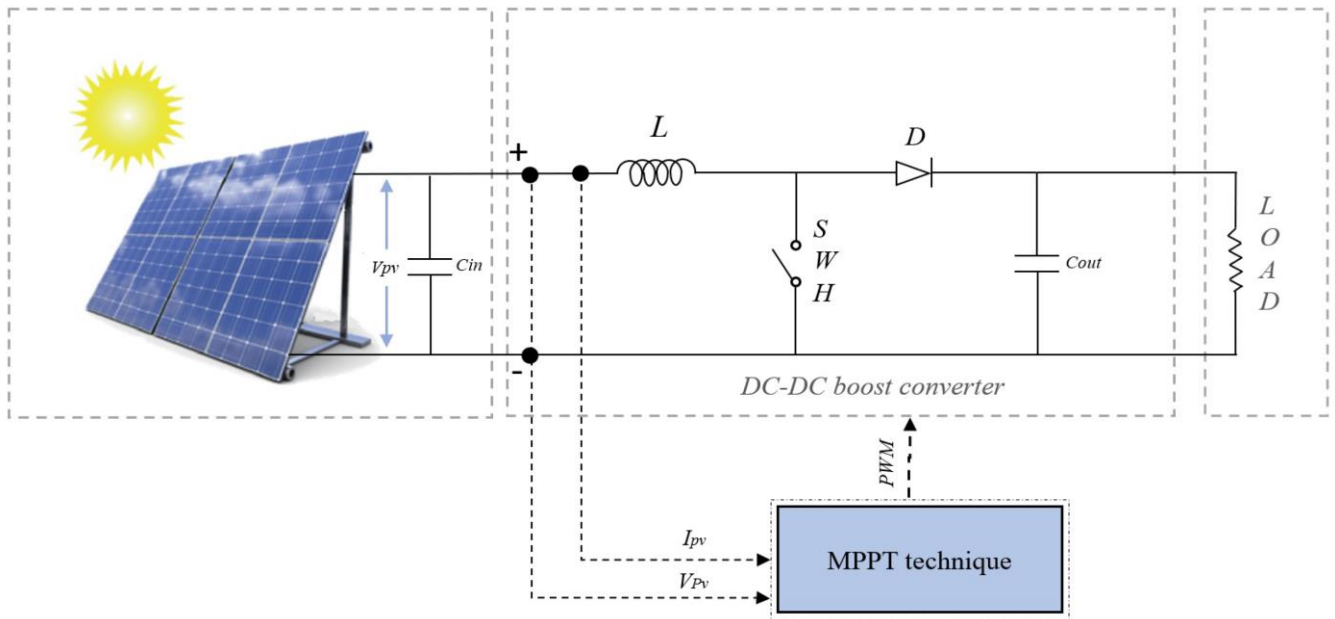


Figure II. 25 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation (commande des convertisseurs), permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quelles que soient les conditions météorologiques (température et irradiation), et quelle que soit la tension de la batterie. La commande MPPT du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum ( $V_{OPT}$ ,  $I_{OPT}$ ). Elle est basée généralement sur l'ajustement du rapport cyclique du convertisseur statique jusqu'à se placer sur le PPM.

Différentes méthodes MPPT ont été publiées dans la littérature afin d'obtenir un fonctionnement optimal. Beaucoup de chercheurs s'intéressent au rappel et à la comparaison des différentes techniques MPPT qui existent dans la littérature comparent plusieurs algorithmes MPPT selon leurs dépendances des paramètres des panneaux solaires et de leurs complexités d'implémentation .

### II.8.1. Premiers types de commande MPPT

La première MPPT créée dans les années 1968, été décrit par A.F. Boehringer. Cette commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM). Elle est destinée aux applications spatiales qui avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres.

Cette commande simple pouvant être implantée numériquement. Elle consiste à calculer la puissance à l'instant  $t_i$  à partir des mesures de  $I_{PV}$  et  $V_{PV}$ , et de la comparer à celle stockée en mémoire, correspondant à l'instant  $t_{i-1}$ . De là, un nouveau rapport cyclique  $\alpha$  est calculé et est appliqué au convertisseur statique. L'algorithme de cette MPPT est donné dans la figure (II.31).

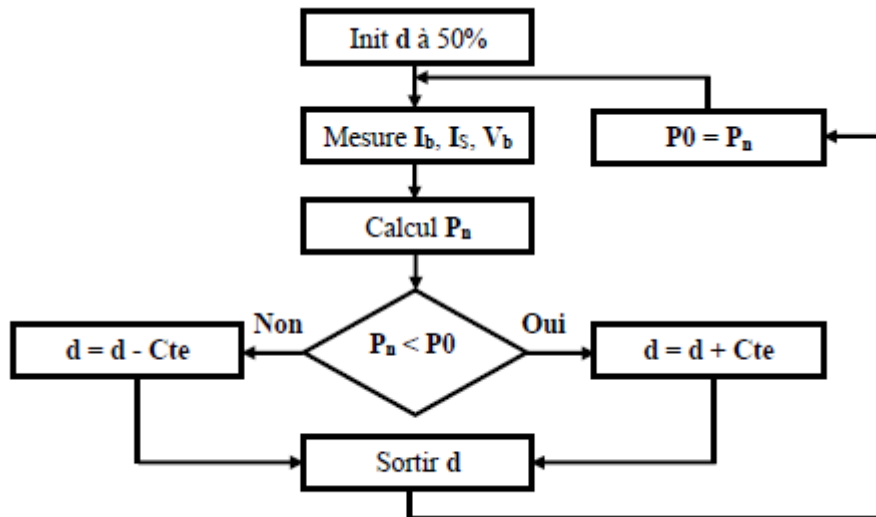


Figure II. 26 Organigramme de la première commande MPPT

### II.8.2. Méthodes à contre réaction de tension

Ce genre de mécanismes repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par la comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la PWM de commande afin d'annuler cette erreur. Selon la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe) on a trois types de méthodes :

- Méthode à tension de référence fixe
- Méthode a tension de référence en fonction d'un paramètre
- Tension de référence extrême (cellule pilote)

### II.8.3. Méthodes à contre réaction de courant

Cette méthode utilise seulement une mesure de courant pour obtenir l'information sur le point opérationnel et actuel du système. Elle permet de savoir la valeur du courant optimal dans lequel doit fonctionner le panneau pour extraire le maximum de puissance

- Méthode à courant de référence en fonction du courant de court-circuit.
- Méthode de maximisation du courant de sortie.

### II.8.4. Méthodes à contre réaction de puissance

Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherches itératives pour trouver le point de fonctionnement du panneau pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles ne sont pas basées sur des valeurs de références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les panneaux solaires. Ainsi pour un point donné, on fait la recherche dans un certain sens. Si on a une augmentation de la puissance du panneau alors on maintient cette direction de recherche, sinon on cherche dans le sens opposé .

### II.8.5. Algorithme perturbation et observation P&O

La méthode de P&O est une approche largement utilisée dans le domaine des techniques MPPT. Elle exige seulement des mesures sur la tension de sortie du panneau  $V_{PV}$  et son courant de sortie  $I_{PV}$ , et elle peut donc dépister le PPM. Comme son nom l'indique, cette méthode basée sur la perturbation du système à travers l'augmentation ou la diminution de  $V_{ref}$  ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis par l'observation des effets de ces perturbations sur la puissance de sortie du panneau on peut faire la comparaison des puissances calculés.

Comme montre la figure II.32, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{PV}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{PV}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P_{PV}(k)$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

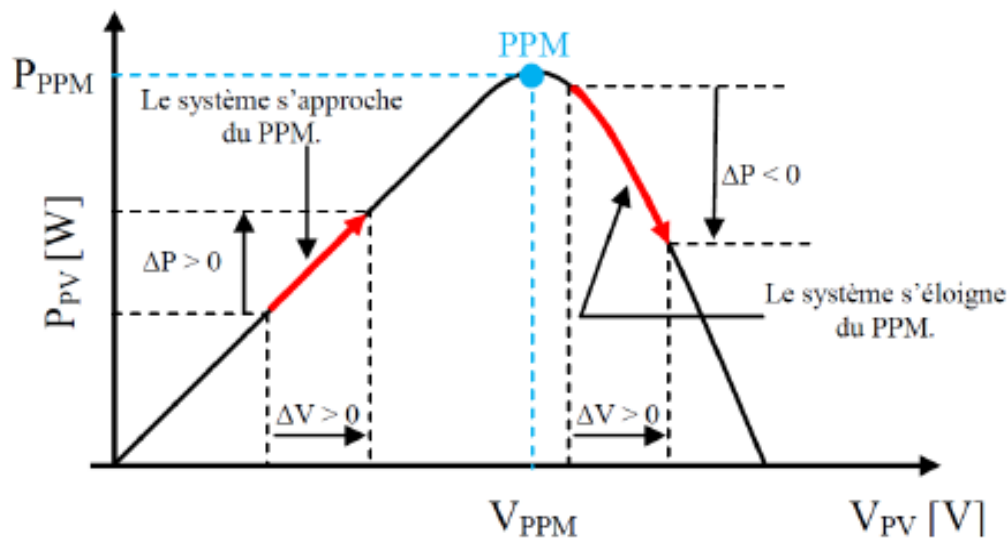


Figure II. 27 caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$  d'un panneau solaire et fonctionnement de la méthode P&O

La figure (II.33) montre l'organigramme de l'algorithme de P&O. Cet algorithme est conçu de sorte qu'il fonctionne sur un ordinateur. Donc à chaque cycle de l'algorithme, les grandeurs  $V_{PV}$  et  $I_{PV}$  sont mesurés pour calculer  $P_{PV}(k)$ . Cette valeur de  $P_{PV}(k)$  est comparée avec celle de  $P_{PV}(k-1)$  déjà calculée à l'itération précédente. Si la valeur de la puissance actuelle  $P(k)$  du panneau est supérieure à la valeur précédente  $P(k-1)$  alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent.

Le problème avec cet algorithme est:

- L'oscillation autour du PPM dans les conditions de fonctionnement normales.
- La mauvaise convergence de l'algorithme dans le cas des variations brusques de la température et/ou de l'ensoleillement.

Il faut noter que ces oscillations peuvent être réduites si on fixe un faible pas d'incrémental mais au détriment du temps de convergence. Alors, un compromis doit être fait entre précision et rapidité lors du choix de ce pas de mise à jour. Donc on peut dire que le pas idéal est déterminé expérimentalement en fonction des besoins [15].

On conclut que la commande P&O classique recherche le PPM en faisant une perturbation sur la tension du GPV. Si la tension est perturbée dans une direction donnée, et cette perturbation engendre une augmentation de la puissance. Cela signifie que le PF est déplacé vers le PPM. Par conséquent, la tension de fonctionnement doit être encore perturbée dans la même direction. Sinon, si la puissance diminue, le PF s'éloigne du PPM ; et par conséquent, la direction de la perturbation doit être inversée. La procédure continue jusqu'à ce que le PPM soit atteinte et le PF reste oscillant autour de ce PPM.

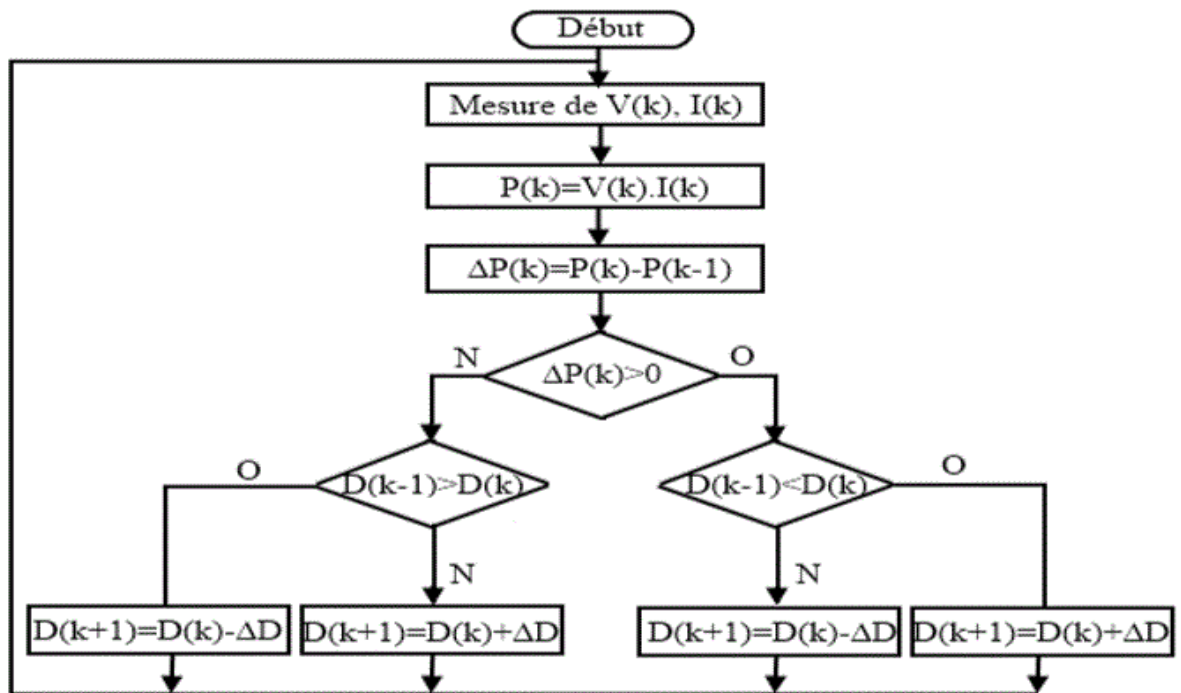


Figure II. 28 Organigramme de la méthode P&O

### II.8.6. Algorithme d'incrémental de la conductance (INC)

L'algorithme d'incrémental de conductance et en anglo-saxonne « Incremental Conductance », la commande MPPT essaye de faire monter le point de fonctionnement (PF) du GPV le long de la caractéristique P-V jusqu'à atteindre le PPM. Elle permet la recherche du PPM en se basant sur l'égalité de la conductance ( $1/V$ ) et de l'incrémental de la conductance  $\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}}$  voir la figure II.34. Cet algorithme nécessite la connaissance de la valeur initiale du PF ( $V_{ref}$ ) et le pas de mise à jour de la tension de référence ( $\Delta V$ ) (Figure II.35) [15].

La puissance maximale est obtenue lorsque la dérivée de la puissance du GPV par rapport à la tension s'annule :

$$G = I_{pv}/P_{pv} \tag{II.24}$$

et une variation élémentaire de cette dernière peut être définie par :

$$dG = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \tag{II.25}$$

Dans le cas le PPM est atteint seulement si la dérivée de la puissance par rapport à la tension est nulle

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} \cdot \frac{dV_{pv}}{dV_{pv}} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = \tag{II.26}$$

$$\frac{I_{pv}}{V_{pv}} = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \tag{II.27}$$

$$G = \Delta G \tag{II.28}$$

G :la conductance et ΔG :Variation de la conductance

Pour les autres cas ou le PPM n'a pas atteint une incrémentation ou une décrémentation de la tension doit se faire selon le point de fonctionnement du générateur PV voire figure ci-dessous

Si  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$  le point de fonctionnement est à gauche du PPM= incrémentation de la tension.

Si  $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$  le point de fonctionnement est à droite du PPM= décrémentation de la tension.

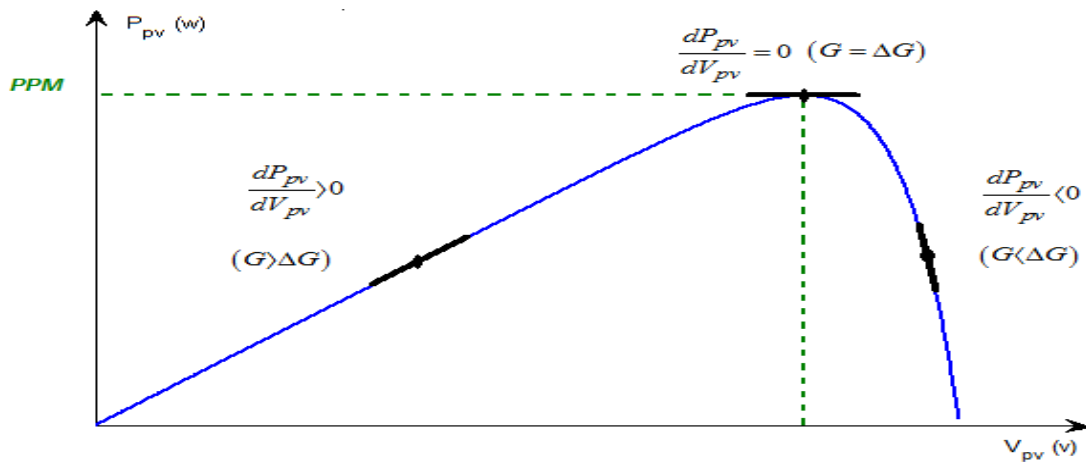


Figure II. 29 principe de l'algorithme d'Incrément de Conductance

L'organigramme de la figure (II.35) est établi sur la base de ce raisonnement :

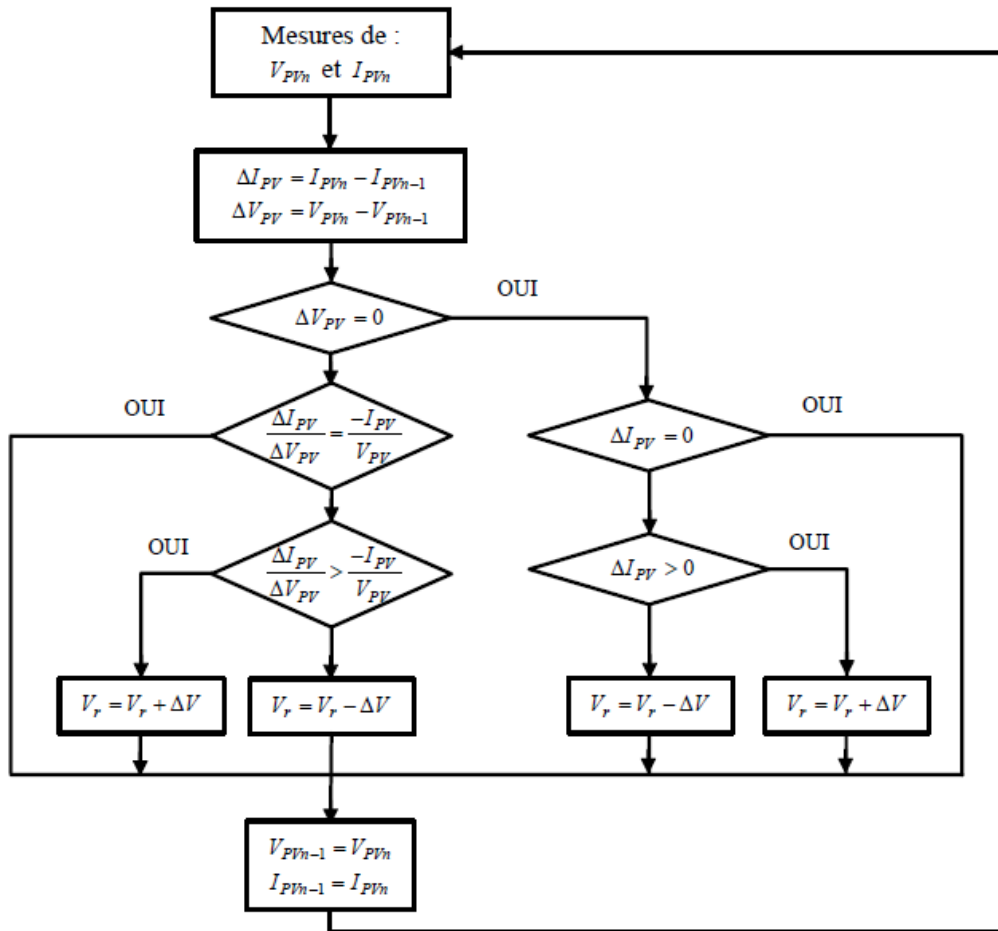


Figure II. 30 organigramme de l'algorithme d'incrément de conductance

L'avantage de cet algorithme est la précision et la vitesse de recherche du PPM quand les conditions atmosphériques changent rapidement. Cet algorithme présente des difficultés de mise en œuvre due à la complexité du circuit de commande et le calcul en temps réel de la dérivée nécessite un processeur de calcul rapide.

## II.9. Conclusion :

Dans ce chapitre on s'est basé principalement à présenter les différents types des convertisseurs statique (DC/DC), (DC/AC) .on a étudié les caractéristique de fonctionnement des hacheurs (DC/DC) et leur principes de fonctionnements, la modélisation des convertisseurs (boost).

Ce travail a comme objectif primordial l'amélioration du rendement d'un système d'alimentation photovoltaïque. Grâce à la présence d'un processus de poursuite du point de puissance maximale, connu sous le nom de contrôleur MPPT, ce dernier indispensable pour une meilleure adaptation source/charge, permettant un transfert maximum de puissance.

On confirme ces points dans la simulation P&O

- L'oscillation autour du PPM dans les conditions de fonctionnement normales.
- La mauvaise convergence de l'algorithme dans le cas des variations brusques de la température et/ou de l'ensoleillement.

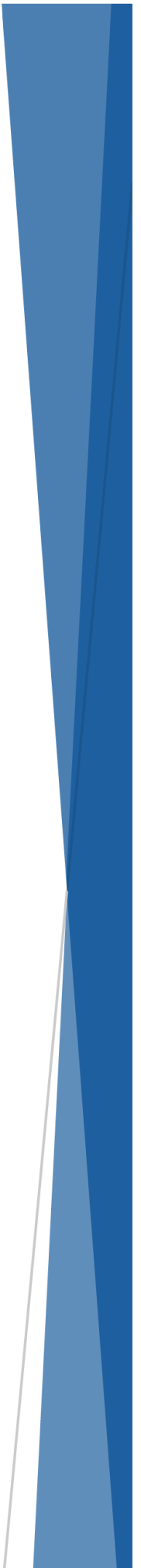
INC

la précision et la vitesse de recherche du PPM quand les conditions atmosphériques changent rapidement. Cet algorithme présente des difficultés de mise en œuvre due à la complexité du circuit de commande et le calcul en temps réel de la dérivée nécessite un processeur de calcul rapide.

Par la suite on s'est mis à l'exécution de la simulation de notre système photovoltaïque et les différentes structures d'étages d'adaptation (convertisseur central, convertisseur string en parallèle, convertisseur string en série). Et la comparaison entre ces structures en parlant sur le rendement l'efficacité de chaque structure les avantages et les inconvénients.

# *Chapitre III*

## *Simulation et validation des résultats*



### III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on présentera une évaluation par simulation effectuées sur un système photovoltaïque, constitué principalement d'un générateur photovoltaïque, étage d'adaptation et d'une charge, . Ce dernier est piloté par différentes techniques MPPT permettant une meilleure adaptation source/charge, pour un transfert maximum de puissance sous les conditions environnementales stables avec différentes valeurs de température et d'ensoleillement. De ce fait, la simulation est la seule manière d'évaluer la performance d'un contrôleur numérique à rétroaction dans un système avant d'établir un prototype réel.

### III.2. Logiciel MATLAB :

MATLAB fait partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulations spécialisés (Blocksets).
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop. SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques.

Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communication et de traitement du signal[6].

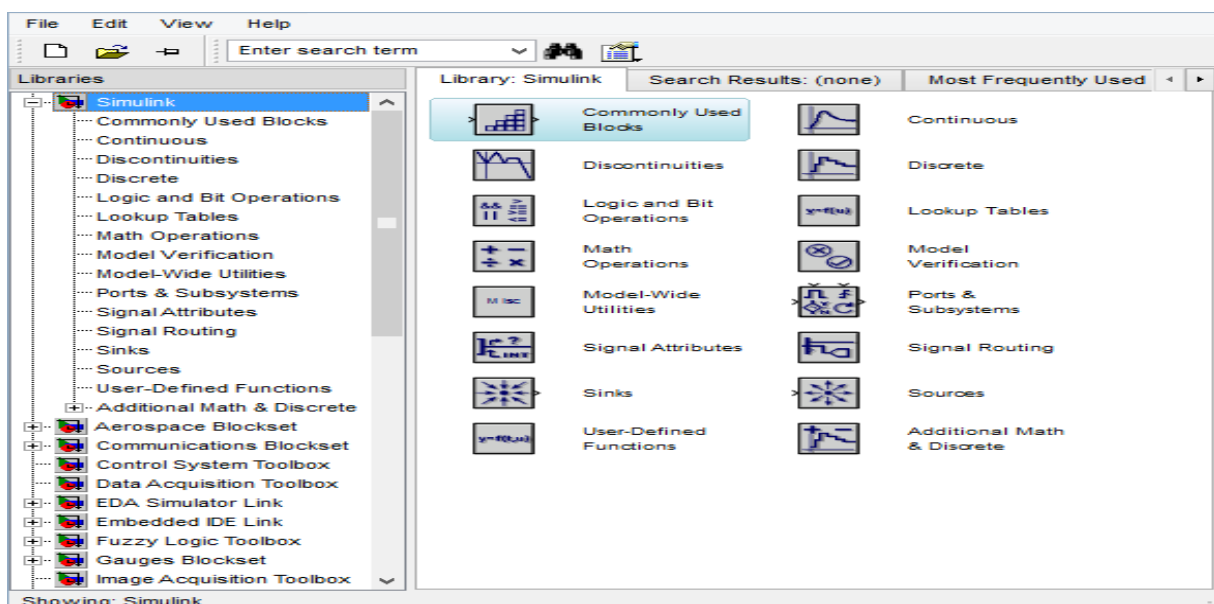


Figure III. 1 bibliothèque Simulink

Les résultats figurant dans ce chapitre nous permettent de valider les concepts théoriques de chaque commande et d'évaluer les diverses techniques MPPT présentées aux (chapitre 2) et d'analyser leur comportement sous les mêmes conditions de fonctionnement. Cette étude comparative entre les différentes techniques MPPT existantes, nous permet de valider la technique la plus appropriée à une application qui répondra aux exigences de la rapidité de convergence vers un nouveau PPM causé par un changement éventuel dans les conditions climatiques. Dans certaines figures, la simulation des changements rapides des conditions climatiques est exagérée, mais l'efficacité de la commande dans la rapidité de convergence peut trouver une autre utilisation dans les véhicules mobiles où l'occultation des cellules par les arbres, les immeubles...etc. est fréquemment rencontrée.

On commence par évaluer le système solaire par simulation avec l'outil de simulation *Simulink* inclus dans le logiciel de Mathworks Matlab. Ensuite, la méthode P and O pour la poursuite du MPP est étudiée par simulation. Les deux systèmes sont simulés en les combinant avec des convertisseurs DC/DC : (hacheurs boost), sous les conditions environnementales stables avec différentes valeurs de température et d'ensoleillement.

Le schéma synoptique simulé est donné par le bloc global représenté par la figure III.2. Nous soulignons ici que chaque bloc a été construit d'après les équations de fonctionnement déjà étudiées dans les chapitres précédents.

### III.3. Système photovoltaïque :

Tableau 1 Valeurs des composants du GPV utilisé dans la simulation

Composant	Valeur
La tension du circuit ouvert - $V_{co}$ (V)	$V_{co}=42V$
Courant du court-circuit - $I_{sc}$ (A)	$I_{sc}=5.92 A$
Résistance série ( $\Omega$ )	$R_s=0.038 \Omega,$
Résistance parallèle ( $\Omega$ )	$R_p=993 \Omega,$
Courant de court-circuit (A)	$I_{sc}=5.96,$
Nombre de cellule	$N_s=54,$

Le schéma du circuit de générateur photovoltaïque sous environnement Matlab/Simulink est illustré par la figure III.2

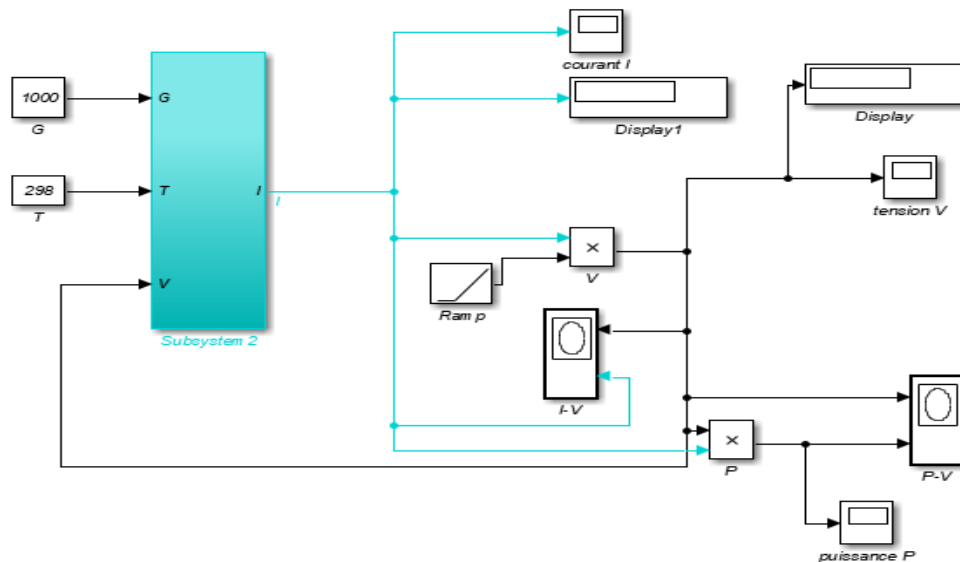


Figure III. 2 Bloc de simulation du module PV.

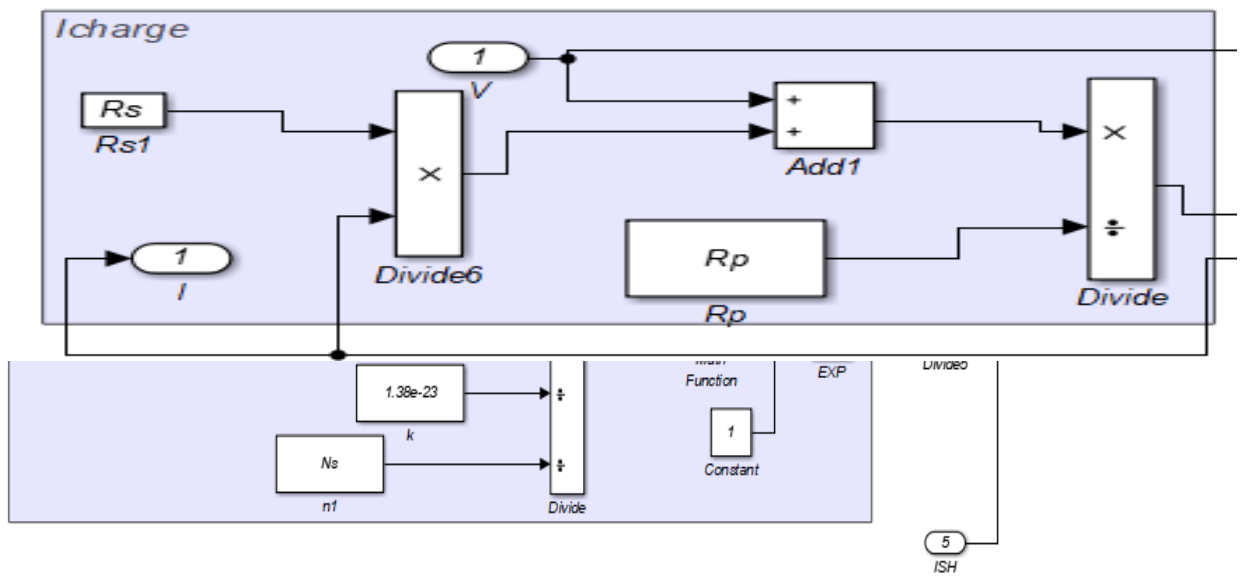
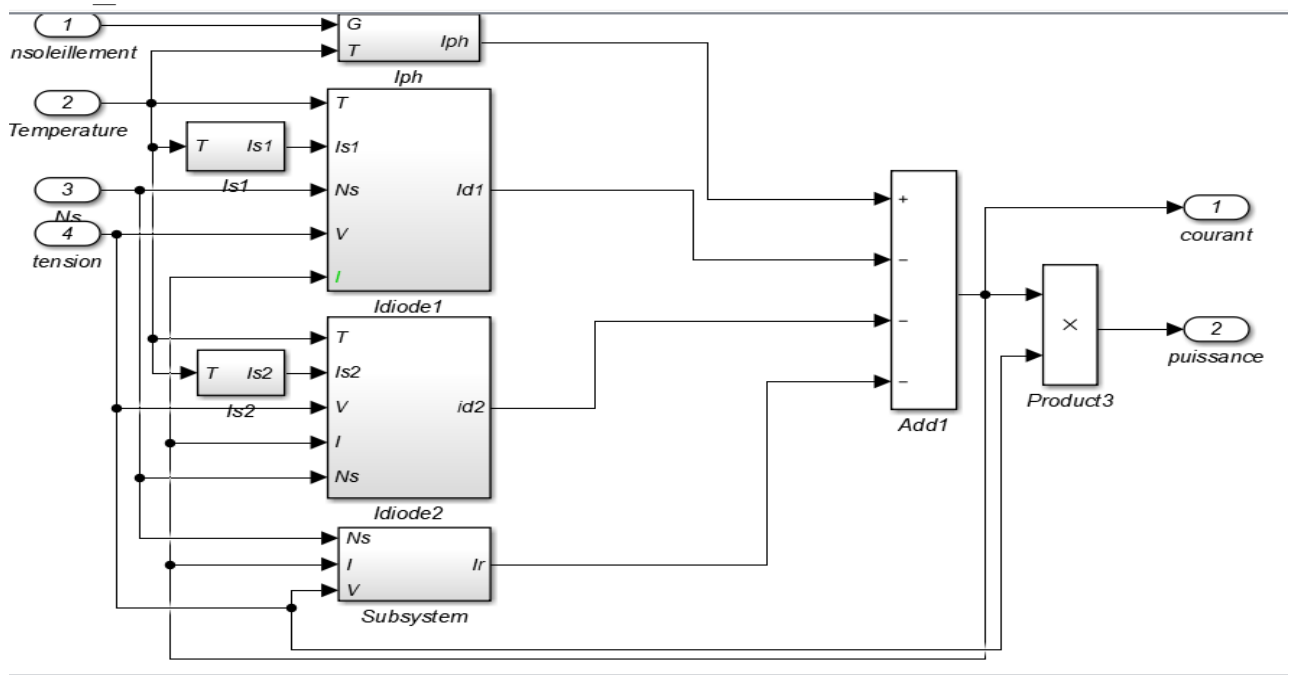
La figure (III.2) montre le schéma fonctionnel du panneau solaire sous Simulink, ce schéma modélise les équations mathématique du panneau solaire vu dans le chapitre I. Le bloc de simulation de la figure (III.3) a comme entrées :

- Les valeurs de température et d'ensoleillement : en changeant ces valeurs on peut évaluer la réaction du système contre différents changement des conditions atmosphériques.

Et comme sorties :

- Le courant et la tension du panneau.

Le nombre de cellules en série  $N_s$  et en parallèle  $N_p$  est considéré comme un paramètre définissant le module.



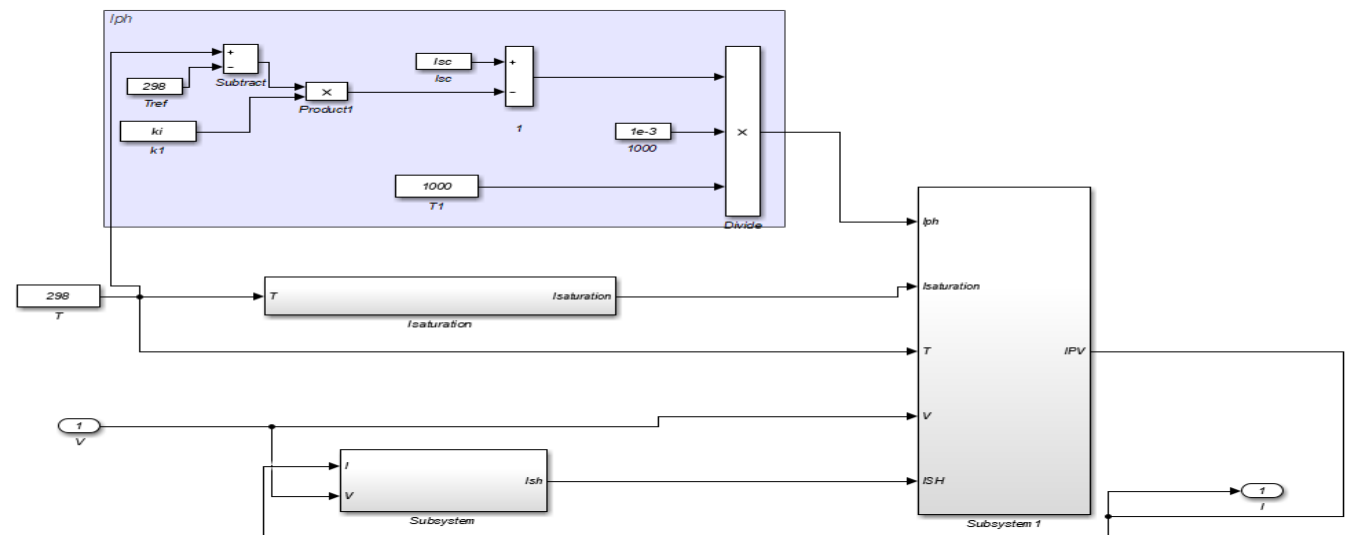
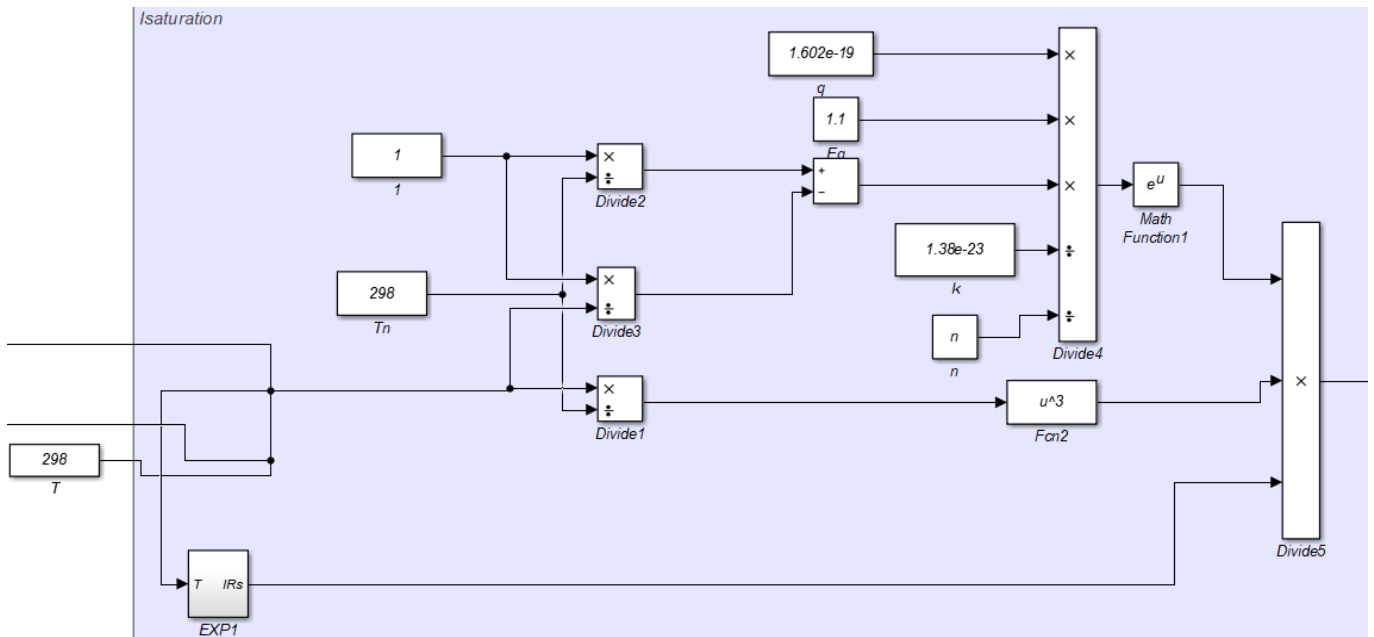


Figure III. 3 blocs constituant le générateur photovoltaïque

### III.4. Effets climatiques sur le générateur PV:

Pour cette série de simulations, les paramètres de température T et d'ensoleillement G sont maintenus constamment égaux aux valeurs d'essais standards qui sont respectivement  $T=25^{\circ}\text{C}$  et  $S=1000 \text{ W/m}^2$ . L'intérêt majeur sera focalisé sur l'ondulation de puissance provoquée par des oscillations autour du PPM et des diverses techniques MPPT et le hacheur DC-DC utilisé.

Pour constater l'influence des paramètres météorologiques S et T, nous allons adopter la méthode suivante :

- A température ambiante fixée à  $25^{\circ}\text{C}$ , on fera varier l'éclairement dans une certaine gamme ce qui nous permettra de voir l'influence de ce paramètre sur le comportement du générateur.

- Pour un éclairement fixé à une valeur constante de  $1000\text{W/m}^2$ , nous verrons l'influence due à la variation de la température.

### III.4.1. Influence de l'éclairement :

En faisant varier l'éclairement entre  $300$  et  $1000\text{W/m}^2$ , nous obtenons un faisceau de courbes de caractéristiques I-V de même allure et la caractéristique P-V, représentant la puissance de sortie du générateur PV par rapport à la tension V ; données par la figure suivante:

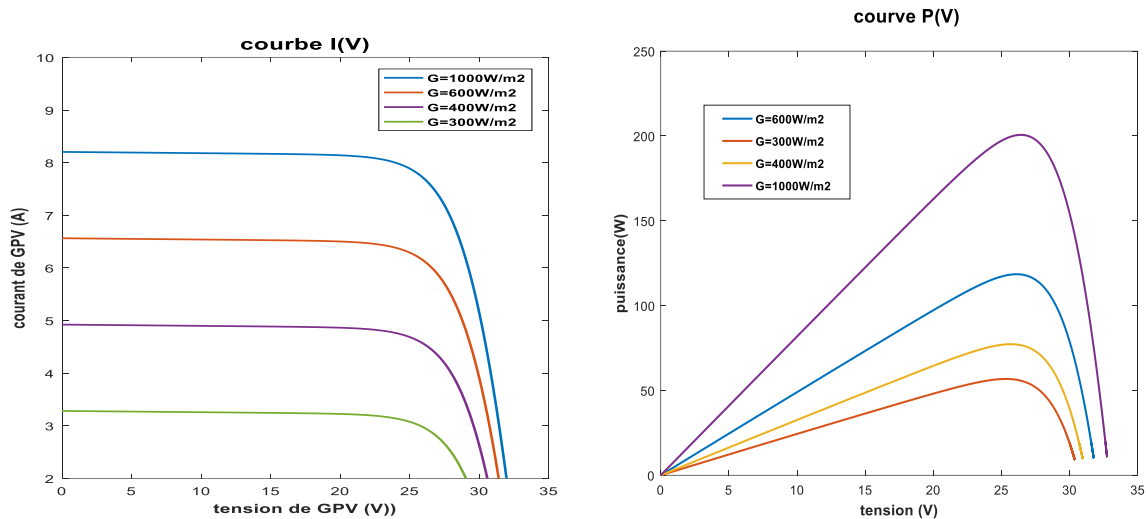


Figure III. 4 influence de l'éclairements sur le GPV

Nous remarquons que l'influence due à la variation de l'éclairement fait diminuer fortement la valeur du courant de court-circuit. Par contre, on remarque une diminution plus faible de la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  lorsque cet éclairement diminue. Le point de puissance maximum s'abaisse par conséquent. Nous remarquons que :

- ✓ La puissance optimale de module est pratiquement proportionnelle à l'éclairement
- ✓ Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

### III.4.2. Influence de la température :

La courbe de la caractéristique I-V et P-V obtenue après simulation du modèle du générateur pour un éclairement constante de l'ordre de  $1000\text{W/m}^2$  et une variation de la température ambiante sur une gamme allant de  $0^\circ\text{C}$  à  $65^\circ\text{C}$  est donnée par la figure suivante:

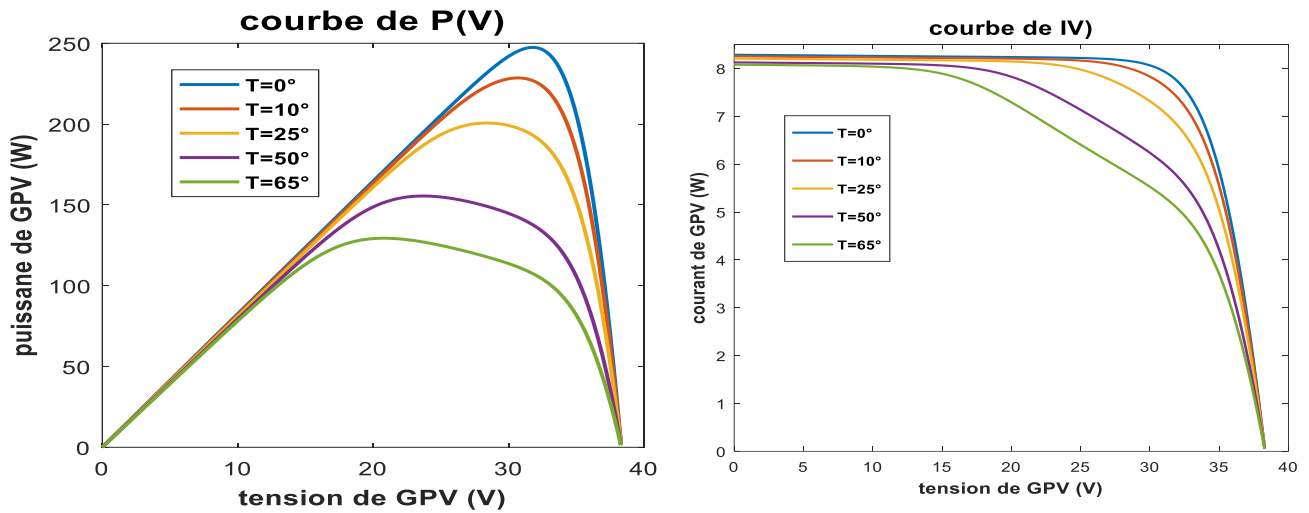


Figure III. 5 influence de la température sur le GPV

Nous constatons comme nous l'avons vu dans la partie théorique que l'effet de la variation de la température ambiante  $T$  sur la caractéristique I-V fait diminuer la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  qu'on peut visualiser sur le faisceau de courbes ci-dessus. Par contre le courant de court-circuit  $I_{cc}$  demeure pratiquement constant. Le point de puissance maximum diminue.

- ✓ Nous remarquons que l'augmentation de la température fait diminuer la puissance maximale de même que la tension optimale  $V_{opt}$ .

### III.5. Simulation d'un hacheur boost raccordé a une source constante:

La figure ci-dessous représente un schéma bloc d'un convertisseur boost :

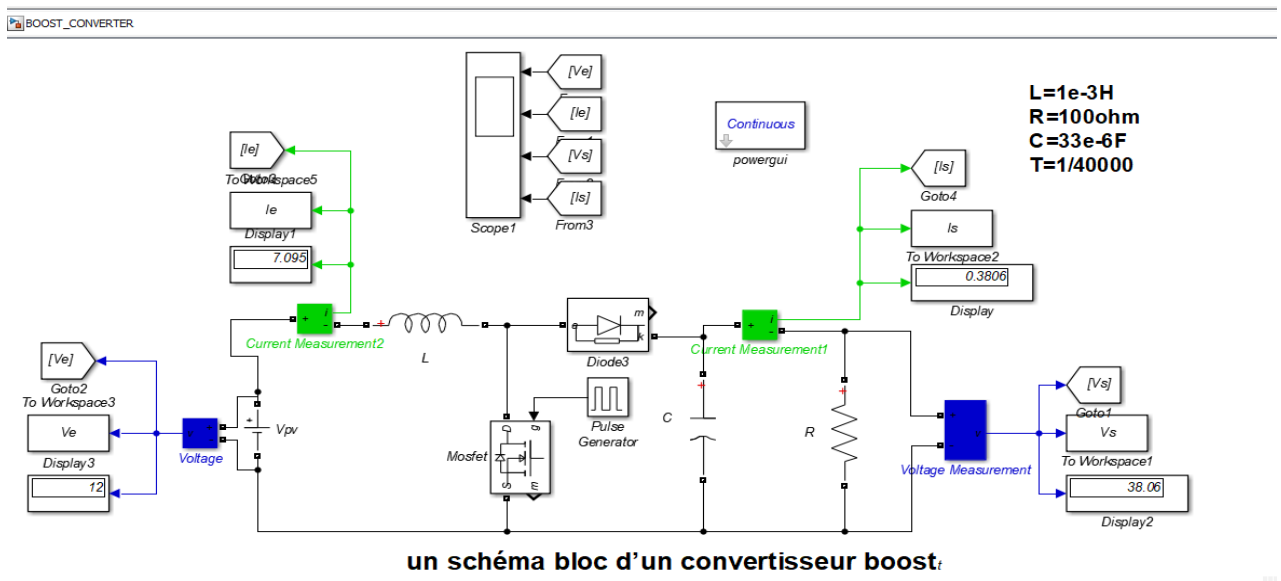


Figure III. 6 Schéma bloc d'un convertisseur boost

Ce schéma bloc se compose d'un circuit de puissance raccordé avec un générateur de commande qui a pour tension d'entrée  $V_{pv}=12V$  et un rapport cyclique  $d=0.75\%$

### la tension d'entrée et de sortie du convertisseur survolteur

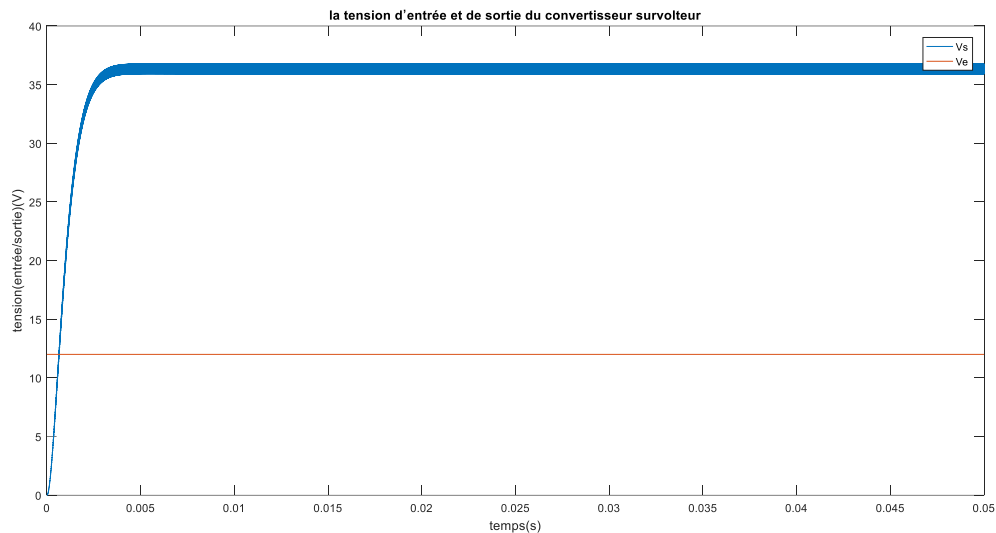


Figure III. 7 la tension d'entrée et de sortie du convertisseur survolteur

### Interprétation :

- ✓ Ces résultats montrent que la tension de sortie  $V_s= 38V$  du hacheur survolteur est supérieur à celle d'entrée  $V_i =12v$ . Donc le hacheur survolteur effectue correctement son rôle.
- ✓ La valeur de la tension de sortie du convertisseur boost augmente proportionnellement dans le régime transitoire  $[0s ,0.005s]$  jusqu'à ce qu'elle se stabilise dans le régime permanent  $[0.005s, 0.05s]$ .

### Le rapport cyclique :

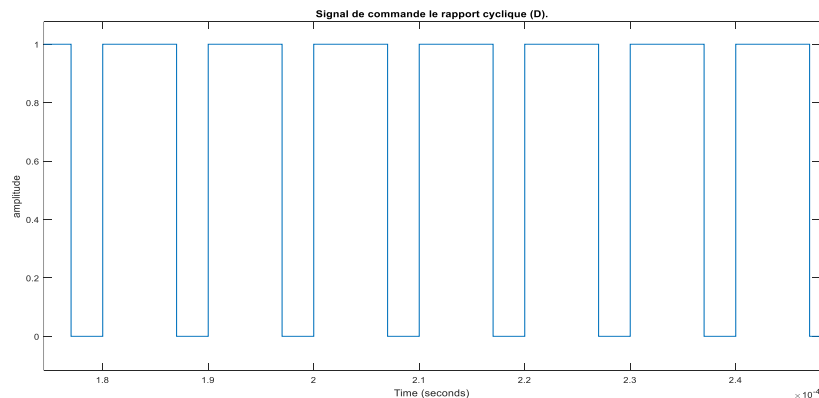


Figure III. 8 Signal de commande le rapport cyclique (D).

## III.6. Diagnostic des défauts :

### III.6.1. Hypothèse de défaut en circuit-ouvert (C.O) :

Lorsqu'un défaut de type circuit-ouvert est apparu dans un MOSFET, il correspond à la défaillance en Circuit ouvert de l' MOSFET pendant que la diode en antiparallèle reste saine et continue à conduire le Courant.

La réalisation physique d'un défaut circuit-ouvert se fait par remplacer l' MOSFET avec un switch à l'état ouvert, comme illustré dans la Figure III-9 . En effet un MOSFET peut être détecté en défaut de circuit ouvert lorsque la commande du l' MOSFET est à L'état ouvert (S=0)

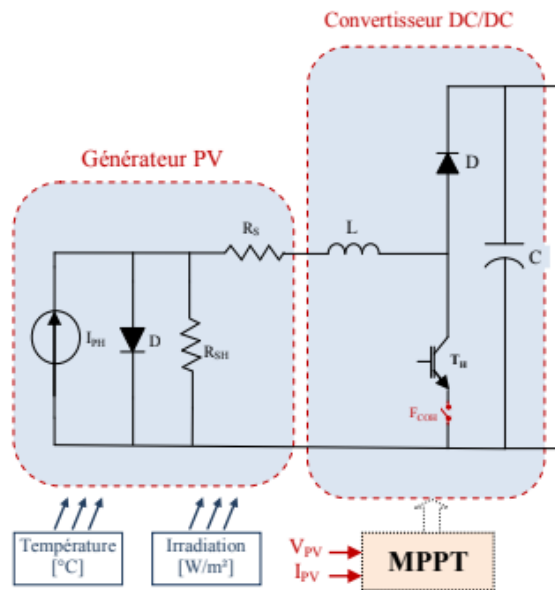


Figure III. 9 Représentation électrique d'un dysfonctionnement, circuit-ouvert.

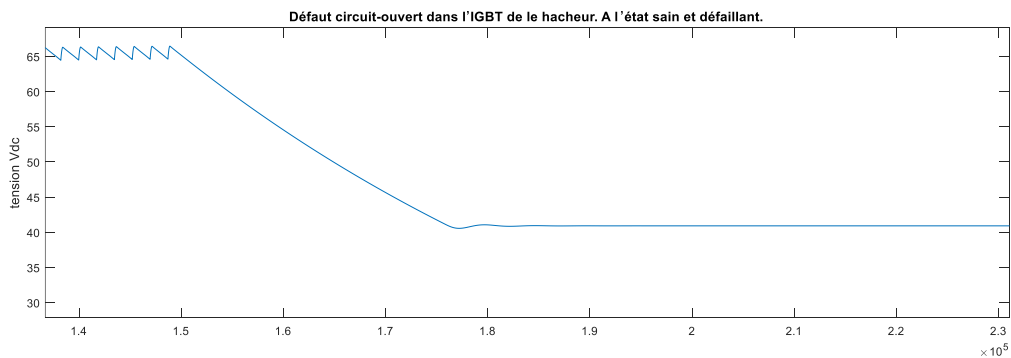


Figure III. 10 Défaut circuit-ouvert dans l' MOSFET de le hacheur. A l'état défaillant.

La Figure III-10 montre les résultats de simulation en régime permanent et en présence de défaut de circuit-ouvert. A l'état sain la tension du hacheur Vdc est maintenue à sa valeur nominale 40V . A un Instant appelé "temps de provocation de défaut" qui es  $TP=1.5.10^4 \mu s$  dans notre cas, on provoque un Défaut de circuit-ouvert (C.O) sur la commande du transistor qui entraîne l'apparition d'une Composante continue dans la tension du hacheur. Cela est dû aux effets du condensateur.

- ✓ le signal mesuré après le temps de la provocation de défaut dépasse du côté positif.

### III.6.2. Hypothèse de défaut en court-circuit (C.C) :

Le défaut de court-circuit correspond à la défaillance en C-C d'un interrupteur (MOSFET) dans l'un des Convertisseurs statiques L'hypothèse d'avoir ce type de défaut est illustré dans la Figure III-11. Et la réalisation physique d'un défaut court-circuit se fait par remplacer l'interrupteur par un câble électrique ou un switch à l'état fermé, en parallèle avec l'MOSFET, et qui permet de reproduire cette défaillance.

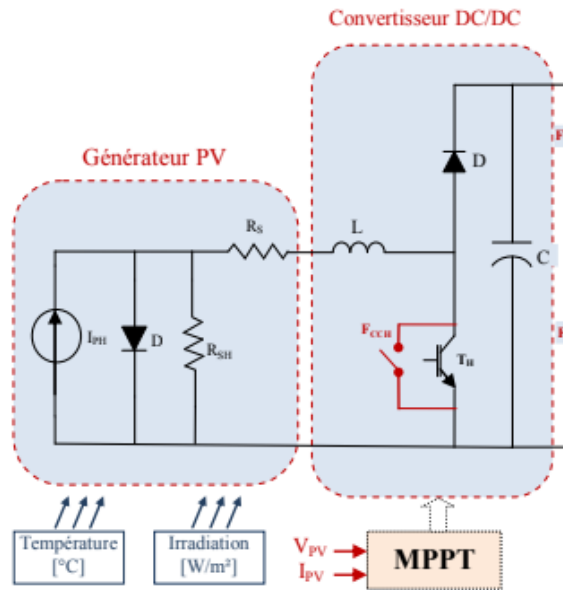
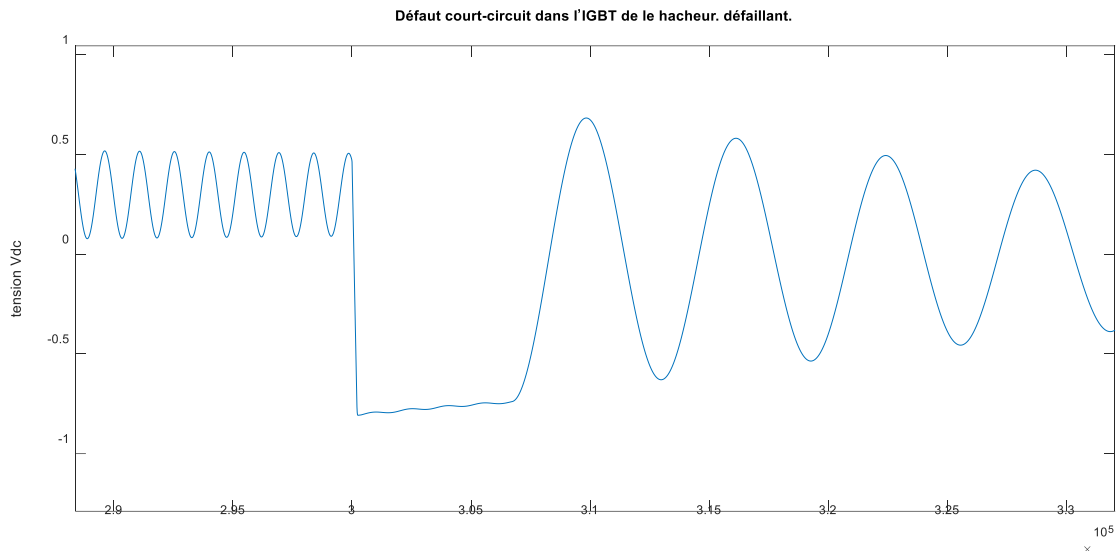


Figure III. 11 12 Représentation électrique d'un dysfonctionnement, court-circuit.

La Figure III-16 montre qu'au départ la tension  $V_{dc}$  est maintenue à sa valeur nominale. A l'instant  $t=3.10^4 \mu s$  on provoque un défaut de court-circuit (C.C) sur la commande de MOSFET de le hacheur, entraîne un transitoire de la tension, et ce transitoire est due aux effets inductives de la charge.

- ✓ le signal mesuré après le temps de la provocation de défaut dépasse du côté négatif



### III.6.3. Méthode de détection de défauts :

La méthode de détection de défaut circuit-ouvert et court-circuit utilisé dans le cas du convertisseur DC-DC est de comparer le signal obtenu avec le seuil choisi si le signal mesuré dépasse le seuil (soit du côté positif ou négatif) il va afficher un défaut.

- ✓ Si le signal mesuré le dépasse du côté positif, il va afficher un défaut de type circuit-ouvert.
- ✓ Si le signal mesuré le dépasse du côté négatif, il va afficher un défaut de type court-circuit.

## III.7. Simulation d'un convertisseur boost utilisé comme étage d'adaptation

Le convertisseur DC/DC est utilisé pour transmettre la puissance du panneau solaire du côté de la charge, garantissant ainsi la puissance maximale transmise. Le dispositif de commutation est un MOSFET, Il est caractérisé par son rapport cyclique compris entre 0 et 1 avec lequel on peut exprimer les valeurs moyennes des grandeurs de sortie avec celles de l'entrée.

Dans ce cas, un seul interrupteur de puissance est contrôlé par la commande MPPT.

### III.7.1. Caractéristiques du convertisseur Boost étudié

Table 1 Les Valeurs des composants du convertisseur boost utilisé dans la simulation

Composant	Valeur
Conductance(H)	C1=100 $\mu$ F; C2= 1 $\mu$ F
Inductance(H)	L=60 $\mu$ H

### III.7.2. La commande MPPT :

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV qui dépend des conditions climatiques et de la charge fixe. Son principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique  $d$  à la valeur adéquate de manière à maximiser invariablement le produit du courant et la tension à la sortie du panneau PV.

Pour que les panneaux solaires délivrent leur puissance maximale, il faut l'associer au circuit du hacheur boost. Une commande de type MPPT (Maximum Power Point Tracking) cette commande impose toujours un rapport cyclique  $d=d_{opt}$  pour maximiser l'énergie retirée à partir du champ solaire.

La figure III.12 représente la simulation de la commande MPPT

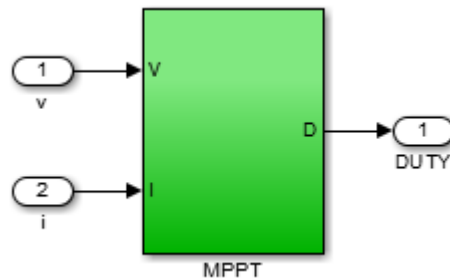


Figure III. 13 le schéma la simulation de la commande MPPT

Schéma suivant représente le raccordement du convertisseur boost avec le générateur PV et la commande MPPT :

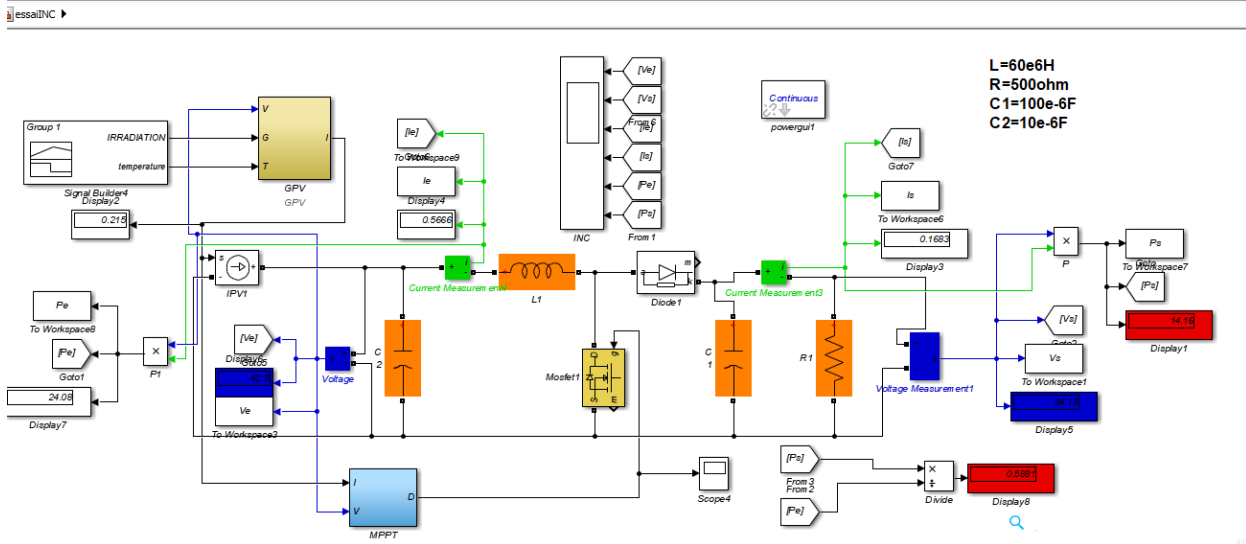


Figure III. 14 Schéma du raccordement du convertisseur boost avec le générateur PV et la commande MPPT en MATLAB-SIMULINK

Les résultats de simulation du convertisseur string en parallèle avec générateur photovoltaïque est une intensité rayonnante de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ .

### III.7.3. Influence de l'association de convertisseur sur le rendement

#### III.7.3.1. Association string parallèle du BOOST :

Dans cette section, nous étudions une nouvelle structure d'étage d'adaptation basée sur la mise en parallèle de trois convertisseurs de puissance, dans le but d'améliorer les performances de la chaîne de conversion photovoltaïque et d'avoir une meilleure capacité de traitement de la puissance en présentant une meilleure fiabilité.

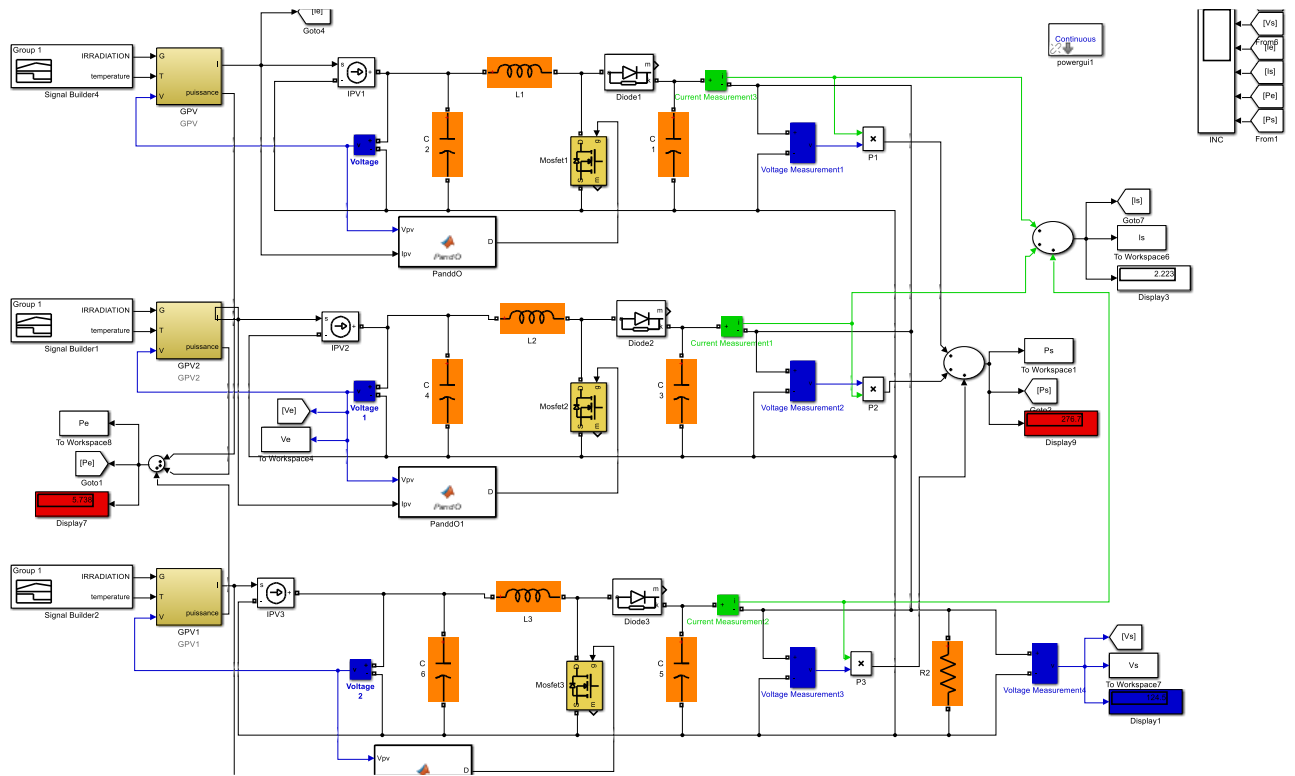


Figure III. 15 trois convertisseurs boost connectés en parallèle

La Figure (III.14) représente ainsi trois convertisseurs boost connectés en parallèle.

La distribution équitable du courant, a permis de réduire le stress enduré par les composants. Elle a également amélioré le rendement de conversion de l'étage d'adaptation en diminuant considérablement les pertes en conduction des semi-conducteurs.

Les graphes représentent:

- Puissance d'entrée et la Puissance de sortie.
- Courant d'entrée et de sortie
- Tension de sortie et tension d'entrée

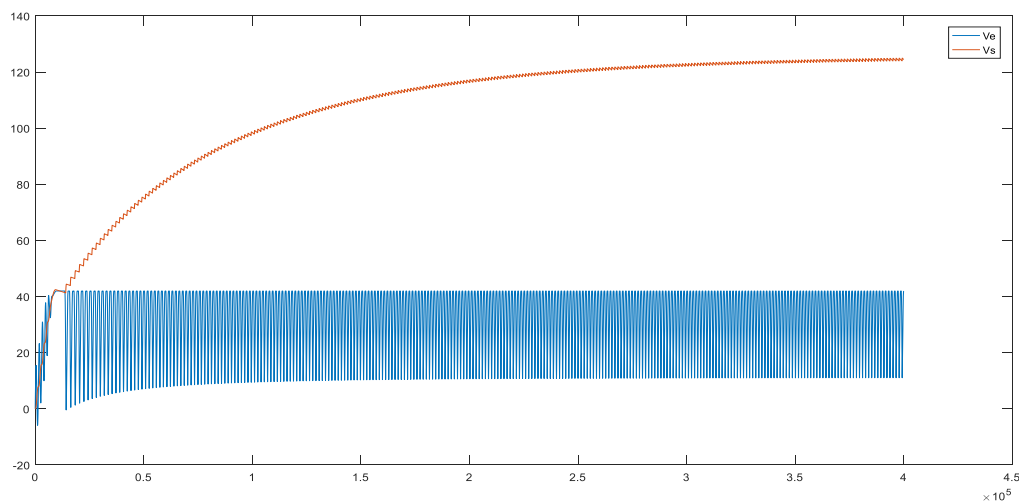


Figure III. 16 Résultats de simulation du la tension d'entrée et la tension de sortie du système

- ✓ La tension de sortie augmentée de  $0s < t < 3.75 \cdot 10^4 \mu s$  est (0v à 125V), et d'après  $3.75 \cdot 10^4 \mu s$  la tension de sortie est stable (125V) dans cette valeur
- ✓ La tension d'entrée augmentée de  $0 \mu s$  jusqu'à  $1.75 \cdot 10^4 \mu s$  est instable et d'après  $1.75 \cdot 10^4 \mu s$  la tension d'entrée est stable (27.75v).

0

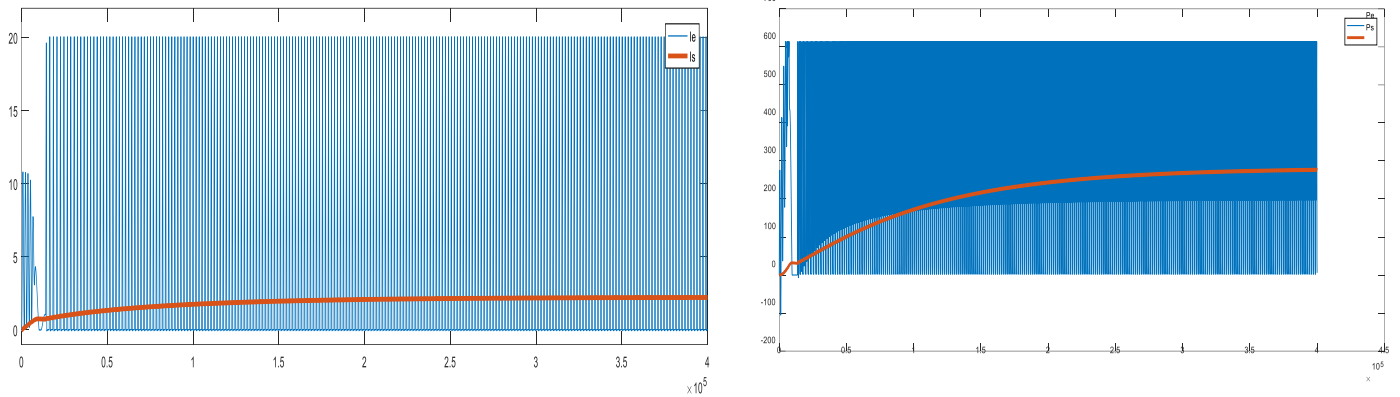


Figure III. 17 Résultats de simulation du la puissance d'entrée et la tension de sortie du système

- ✓ Le courant de sortie augmentée de  $0s < t < 1.5 \cdot 10^4 \mu s$  est (0A à 2.25A), et d'après  $1.5 \cdot 10^4 \mu s$  la tension de sortie est stable (2.25A) dans cette valeur
- ✓ Le courant d'entrée augmentée de  $0 \mu s$  jusqu'à  $0.2 \cdot 10^4 \mu s$  est instable et d'après  $0.2 \cdot 10^4 \mu s$  la tension d'entrée est stable a une moyenne de (10A).
- ✓ La puissance de sortie augmentée de  $0s < t < 3 \mu s$  (0W à 276W), et d'après  $3 \mu s$  la puissance est stable (276w) sur cette valeur.
- ✓ La puissance moyenne d'entrée augmentée de  $0s < t < 0.2 \cdot 10^4 \mu s$  est instable et d'après  $0.2 \cdot 10^4 \mu s$  la puissance moyenne d'entrée est stable (306.5W)
- ✓ **Le rendement dans le cas string en parallèle est 90%**

### III.7.3.2. Association string série du BOOST :

Les résultats de simulation du convertisseur string en série avec le générateur photovoltaïque sous une intensité rayonnante de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$  sont représentés par les figures ci-dessous qui représentent :

- La tension de sortie et la tension d'entrée
- Le courant d'entrée et de sortie
- La puissance de sortie et la puissance d'entrée de convertisseur string en série.

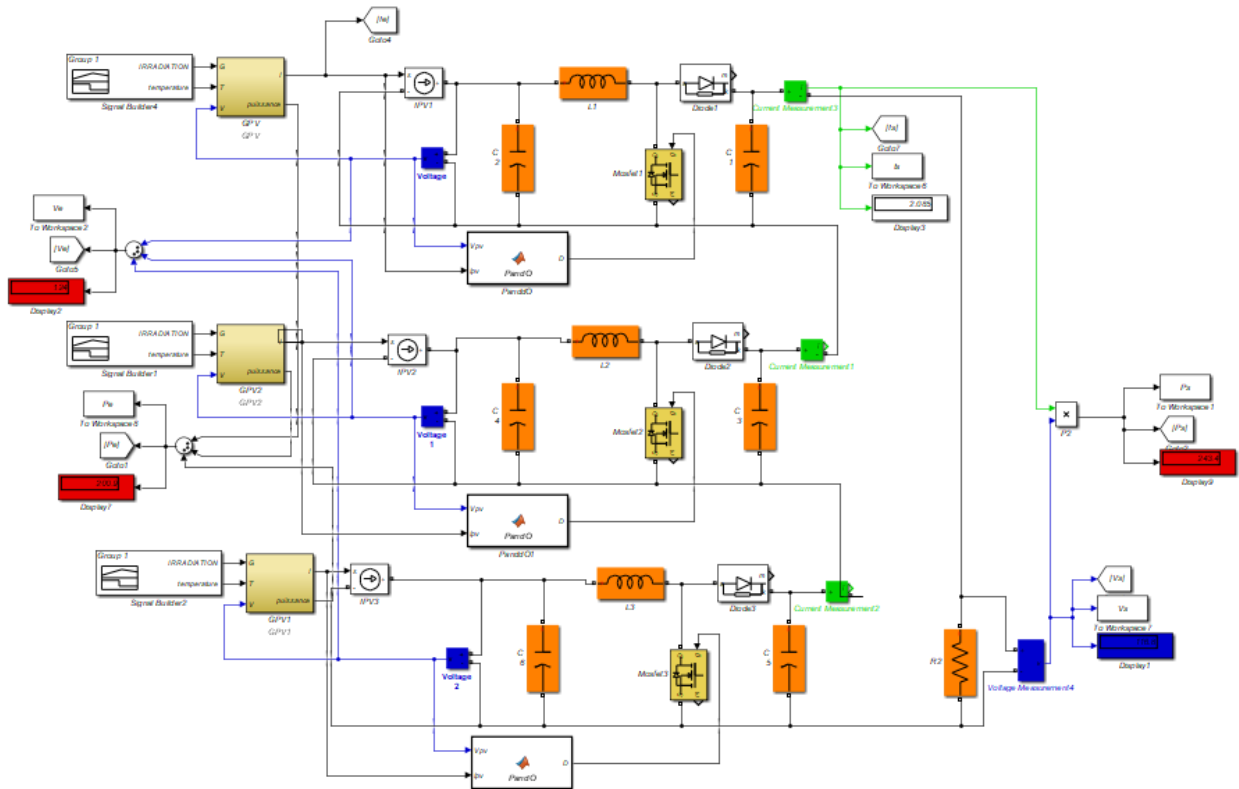


Figure III. 18 Schéma globale des générateurs PV avec convertisseur string en série.

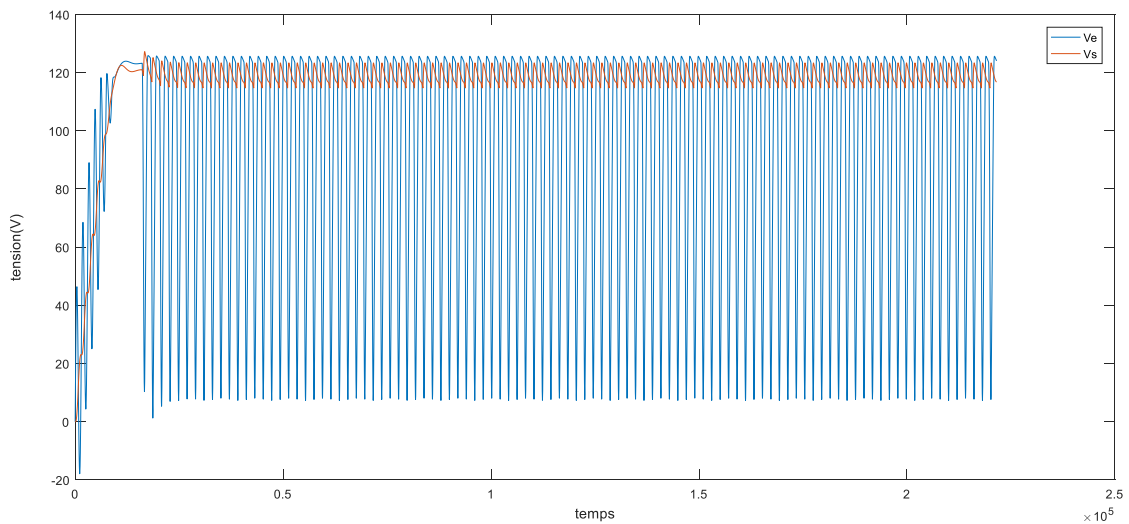


Figure III. 19 Résultats de simulation du la tension d'entrée et la tension de sortie du système -série

- ✓ La tension moyenne de sortie augmentée de  $0 \mu s < t < 1.83 \cdot 10^4 \mu s$  est (0v à 125.2v), et d'après  $1.83 \cdot 10^4 \mu s$  la tension de sortie est stable (120.5v) sur cette valeur.
- ✓ La tension d'entrée augmentée de 0s jusqu'à  $1.75 \cdot 10^4 \mu s$  est instable et d'après  $1.75 \cdot 10^4 \mu s$  la tension d'entrée est stable a une moyenne de 64.25V.

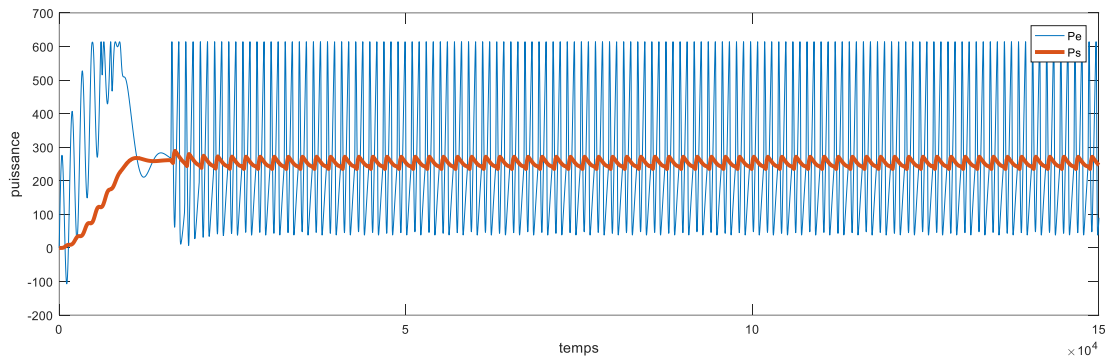


Figure III. 20 Résultats de simulation de la puissance d'entrée et la tension de sortie du système -série

- ✓ La puissance moyenne de sortie augmentée de  $0 \mu s < t < 1.64 \cdot 10^4 \mu s$  est (0w à 275w) et d'après  $1.64 \cdot 10^4 \mu s$  la puissance moyenne est (262W) se stabilise sur cette valeur.
- ✓ La puissance moyenne d'entrée augmentée de  $0 \mu s < t < 1.64 \cdot 10^4 \mu s$  est instable et d'après  $1.64 \cdot 10^4 \mu s$  la puissance moyenne d'entrée est (327.25W) stable.
- ✓ **Le rendement dans le cas string en serie est 80%.**

### III.7.3.3. Le cas central :

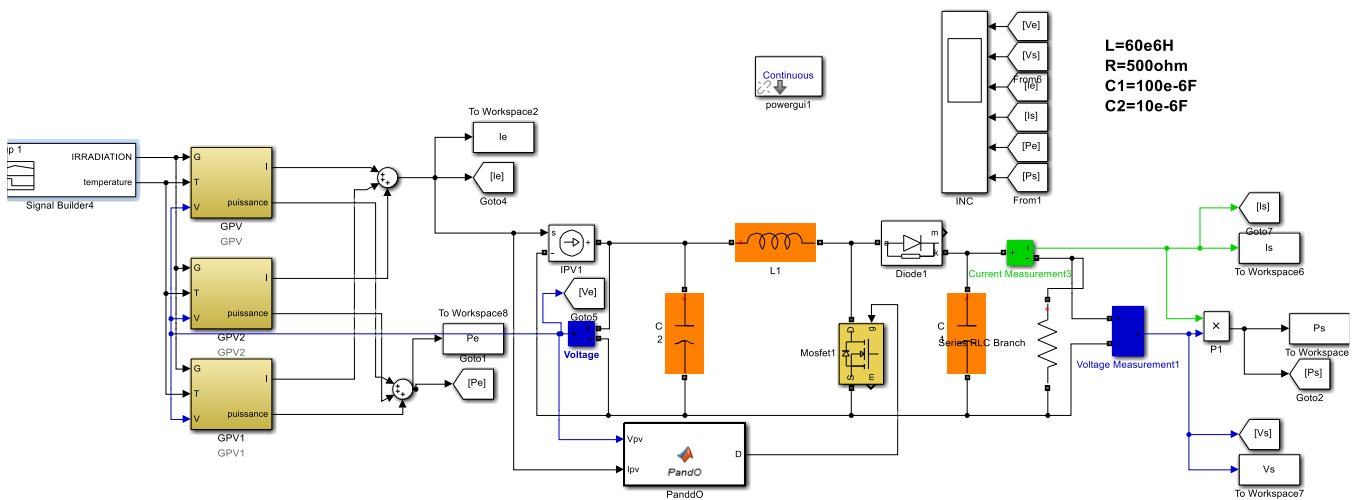


Figure III. 21 Schéma MATLAB SIMULINK globale des générateurs PV avec convertisseur

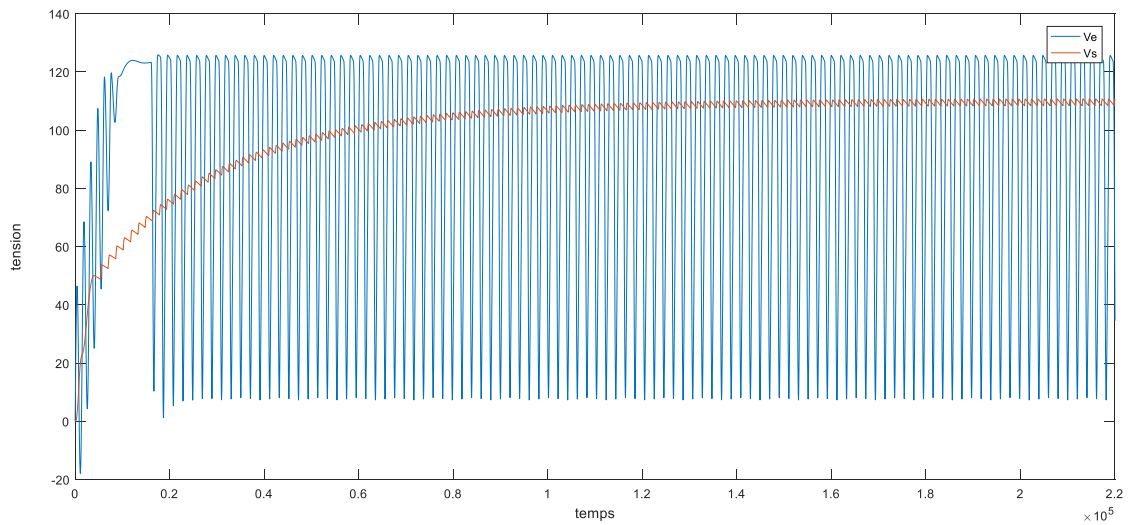


Figure III. 22 Résultats de simulation du la tension d'entrée et la tension de sortie du système -série

- ✓ La tension de sortie augmentée de  $0 \mu s < t < 1.36.10^4 \mu s$  est (0v à 108,4v), et d'après  $1.36.10^4 \mu s$  la tension de sortie est stable (110v) sur cette valeur
- ✓ la tension d'entrée augmentée de 0s jusqu'à  $1.73.10^4 \mu s$  est instable et d'après  $1,73.10^4 \mu s$  la tension d'entrée est stable (67V).

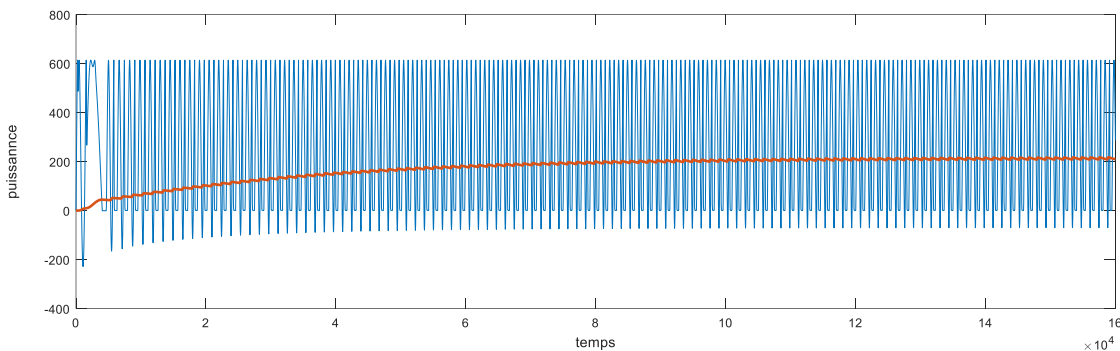


Figure III. 23 Résultats de simulation du la puissance d'entrée et la tension de sortie du système -série

- ✓ La puissance de sortie augmentée de  $0 \mu s < t < 1.05.10^4 \mu s$  est (0w à 210W), et d'après  $1.05.10^4 \mu s$  la puissance est stable (212W) en cette valeur
- La puissance moyenne d'entrée augmentée de  $0s < t < 5,5.10^4 s$  est instable et d'après  $5,5.10^4 \mu s$  la puissance moyenne d'entrée est stable (345W).
- ✓ **Le rendement dans le cas central est 61.45%**

Table 2 rendement des différentes topologies de convertisseurs

Pe	Ps	Rendement $\eta$
----	----	------------------

Cas string parallèle	306.5W	276W	90%
Cas string série	327.25W	262W	80%
Cas central	345W	212W	61.45%

- ✓ Le meilleur résultat après simulation du rendement des différentes topologies, est le rendement de cas string en parallèle qui prend la valeur de 90%, suivie par le rendement de cas string en série qui prend la valeur de 80% pour conclure par le rendement de cas central qui prend la valeur de 61.45%.
- ✓ La comparaison de rendement d'énergique de trois topologies de convertisseur DC-DC, convertisseur central, convertisseur string en parallèle et convertisseur string en série permettra d'identifier les domaines d'utilisation et les avantages et les inconvénients de chaque topologie.

### III.7.4. Fonctionnement sous des conditions standard :

#### III.7.4.1. Simulation avec la méthode P&O

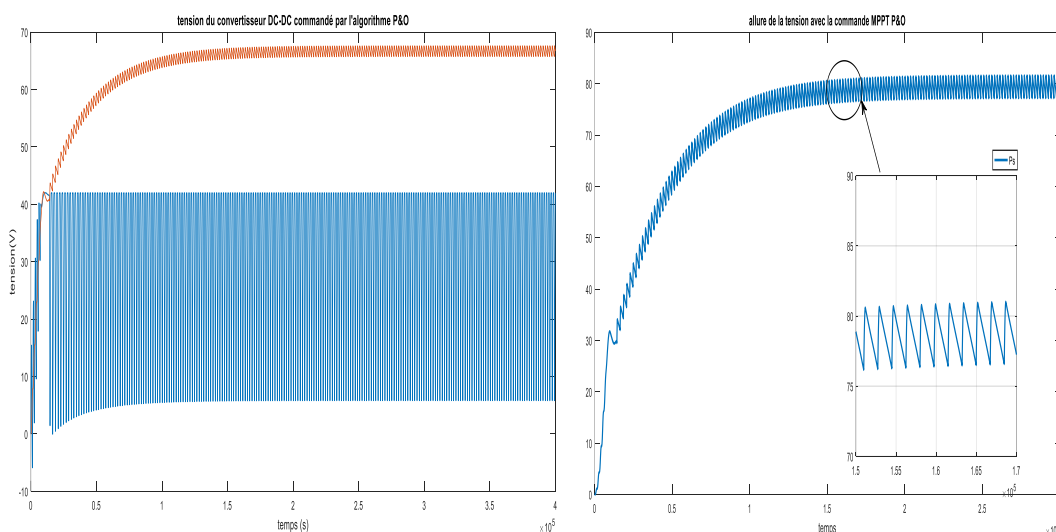


Figure III. 24 puissance et tension de sortie commandé par P&O

- ✓ On peut voir que le convertisseur a effectué sa fonction , la tension de sortie fournie est supérieure à celle du GPV et que la commande P&O diminue le fluctuation en sortie
- ✓ Les résultats de simulation obtenus par l'algorithme de la méthode MPPT P&O permettent d'atteindre le PPM en  $1.5e^4 \mu s$  avec des oscillations et d'avoir une assez bonne poursuite des tension et puissance de référence
- ✓ Toutefois, il est constaté la présence d'oscillations sur la puissance autour de MPP et de même sur la tension.
- ✓ Rendement de 31.58%

### III.7.4.2. Simulation avec la méthode INC

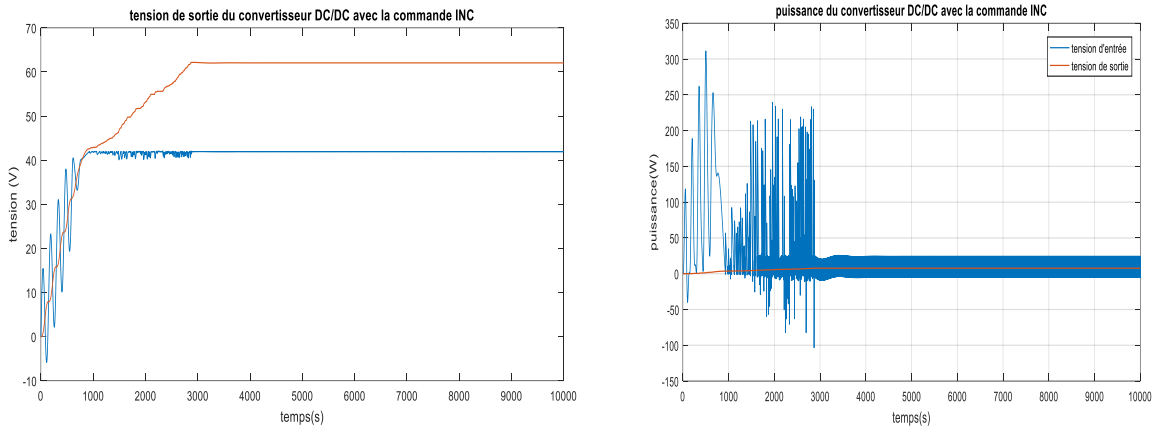


Figure III. 25 puissance et tension de sortie commandé par INC

- ✓ On peut voir que le convertisseur a effectué sa fonction, la tension de sortie fournie est supérieure à celle du GPV et que les fluctuations avec la commande INC sont minime
- ✓ La méthode MPPT INC permet d'atteindre le PPM en 3000  $\mu$ s et d'avoir une bonne poursuite des tension et puissance de références.
- ✓ Rendement : 26.7%

### III.7.5. Fonctionnement sous des conditions climatiques variables :

Les simulations du système, par les différentes méthodes, ont été réalisées en deux étapes :

- en fonction de la variation de la température (Figure 3.5a) l'irradiation fixée à 1000 W/m<sup>2</sup>
- en fonction de la variation de l'irradiation (Figure 3.5b), la température étant 25°C

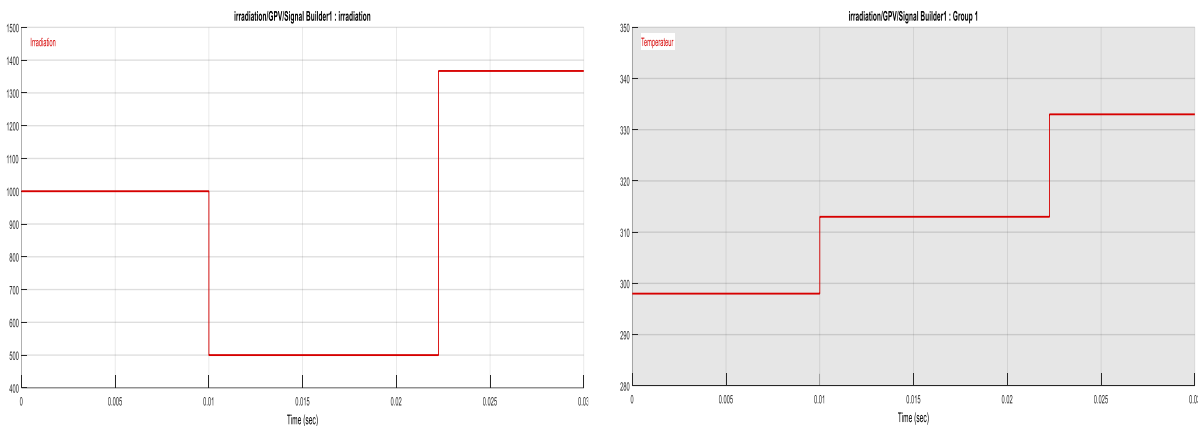


Figure III. 26 variation de l'éclairement [w/M2] et le température [K]

Nous avons soumis le système a une variation de luminosité de 1000 W/m<sup>2</sup> à 500 W/m<sup>2</sup> en suite de 500 à 1367 W/m<sup>2</sup> a l'instant t= 0.01  $\mu$ s et t= 0.0225  $\mu$ s respectivement.

L'objectif de cette commande est de voir le comportement des différentes commandes MPPT lors de condition de température et d'irradiance différentes. En réalité Ces deux grandeurs ne varient pas de manière brusque et instantanée, mais le but de la simulation est de tester la robustesse des commandes.

### III.7.5.1. Méthode de P&O

Les résultats de simulation obtenus par l'algorithme de la méthode MPPT P&O sont données par les figures (III.26)et (III.27). Cette technique permet d'atteindre le PPM en 0,059  $\mu$ s et d'avoir une bonne poursuite de tension et de puissance de références. Toutefois, il est constaté la présence d'oscillations de la tension . Celles-ci se répercutent sur le courant et du même ordre sur la puissance.

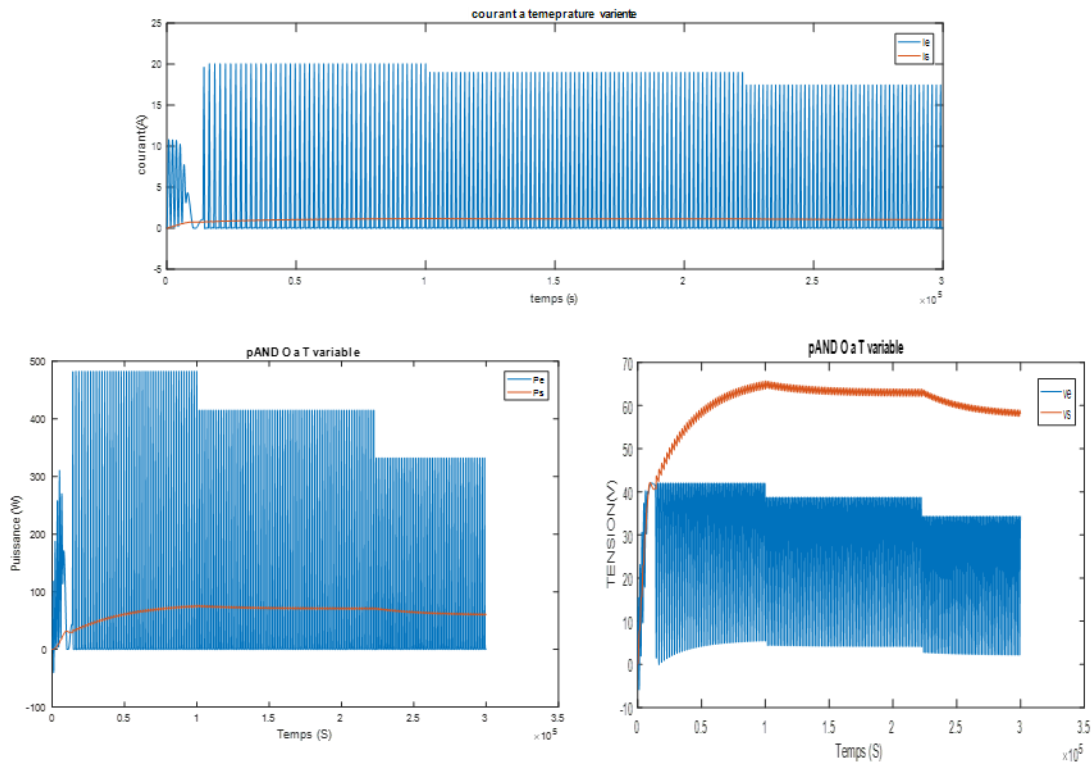


Figure III. 27 Résultat de la simulation de la méthode P&O avec variation de la température

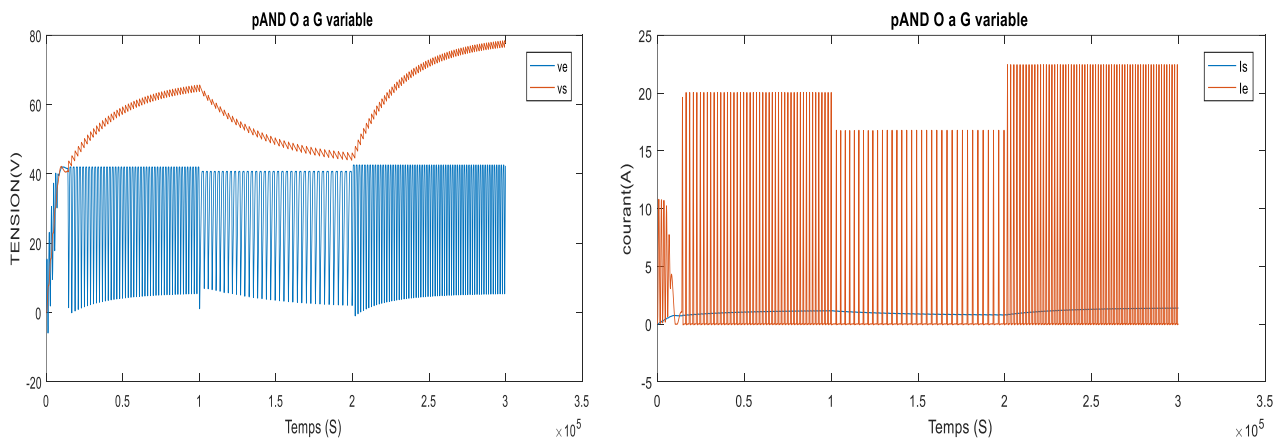


Figure III. 28 Résultat de la simulation de la méthode P&O avec variation de l'éclairement

#### Interprétation :

- ✓ On constate que pour ces test ,les algorithmes répondent correctement , le point de fonctionnement converge vers le point de fonctionnement maximal.

- ✓ Pour la commande P&O la puissance générée par le GPV oscille autour du PPM. Ces oscillations sont dues au fait que le point de fonctionnement du module est perturbé avec chaque cycle et ceci cause une perte de puissance.
- ✓ Des ondulations dans la valeur crête à crête de la puissance est en fonction du rapport cyclique  $\Delta d$ .
- ✓ Pendant le changement du rayonnement ou de la température imposés, le système converge vers les nouveaux PPM.
- ✓ La mauvaise convergence de l'algorithme dans le cas des variations brusques de la température et/ou de l'ensoleillement.

### III.7.5.2. Méthode de INC

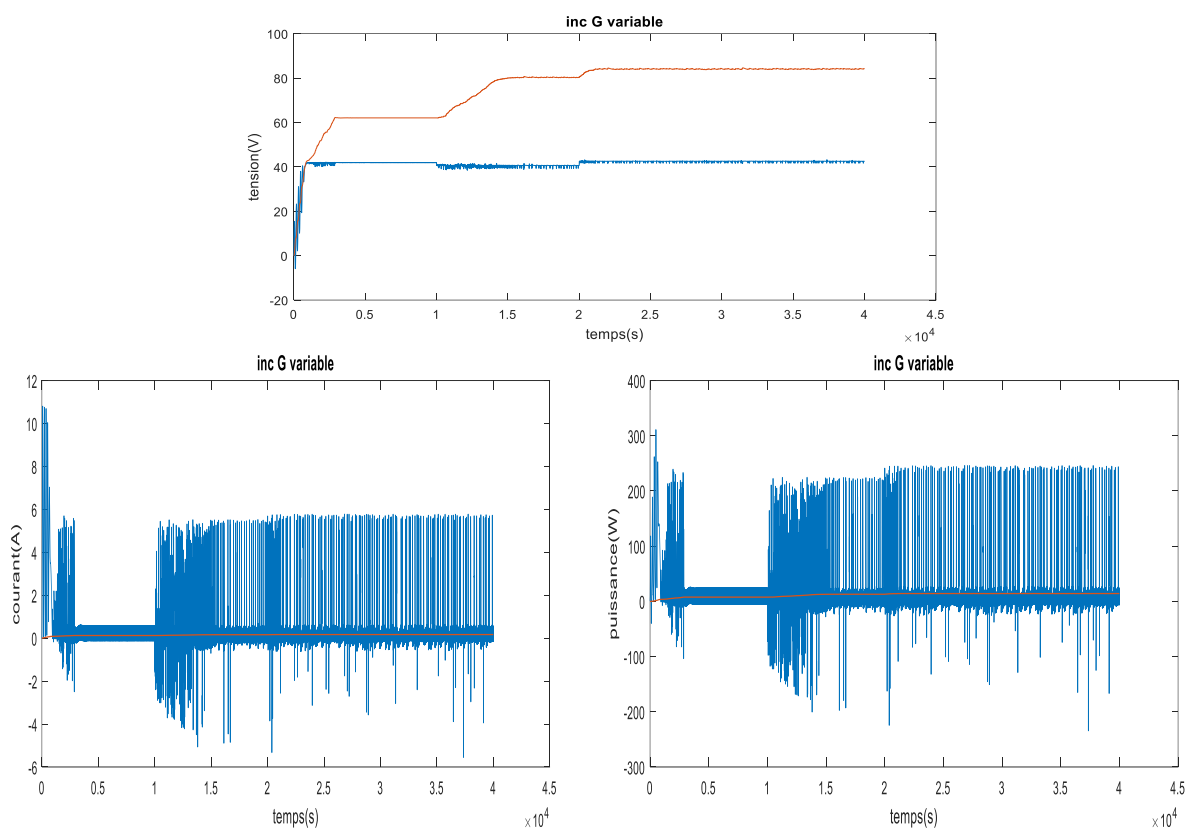
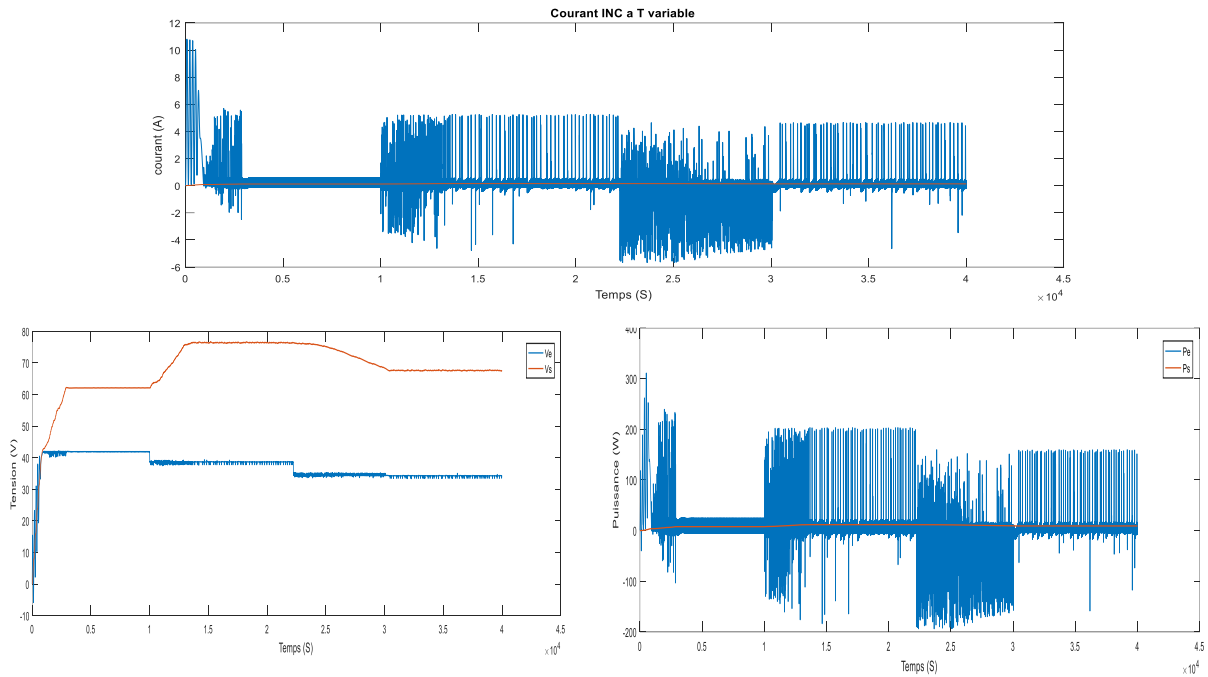


Figure III. 29 Résultat de la simulation de la méthode INC avec variation de l'éclairement



### Interprétation :

- ✓ On constate que pour ces test ,les algorithmes répondent correctement , le point de fonctionnement converge vers le point de fonctionnement maximal.
- ✓ Précision de suivi du PPM aux conditions standards et d'une vitesse de convergence vers le PPM plus grande que la méthode P&O.
- ✓ L'amplitude d'ondulation des portes de sorties est fortement réduite par rapport à la technique P&O.

Table 3 tableau comparatif des deux commande de conversion

		P&O	INC
<b>Temps de réponse</b>		$1.5e^5$	3000
<b>PV</b>	Ondulation du signal	Moyenne	Minime
<b>Sortie</b>		Élevée	Très élevée
<b>Rendement</b>		31.58%	26.7%
<b>Avantage</b>		Structure simple peu de paramètre de mesure	Il n'ya pas de perte par rapport au PPM
<b>Inconvénient</b>		Présente des oscillation au tour du PPM perte occasionnelle de la recherche de la PPM lors du changement rapide des conditions climatique	Le temps d'exécution l'algorithme est plus long car il est plus complexe

### III.8. Conclusions :

- ✓ Ces résultats montrent que le hacheur Boost et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles.
- ✓ Nous avons soumis le système à une variation de l'éclairement. On voit clairement que la puissance réagit correctement avec la variation de l'éclairement pour se stabiliser au point de puissance max par la commande MPPT, mais par contre l'amplitude de l'oscillation autour du point max varie.
- ✓ Les résultats de simulation obtenus avec l'algorithme de la méthode MPPT INC permet d'atteindre le PPM et d'avoir une bonne poursuite des tension et puissance de références. Toutefois, il est constaté la présence d'oscillations de la tension et de courant . Ces oscillations sont moins importantes que celles engendrées par la méthode P&O. Par conséquent, les oscillations au niveau de la puissance sont atténuées.
- ✓ Les algorithmes répondent correctement , le point de fonctionnement converge vers le point de fonctionnement maximal.
- ✓ La puissance générée par le GPV avec la commande P&O oscille autour du PPM. Ces oscillations sont dues au fait que le point de fonctionnement du module est perturbé avec chaque cycle et ceci cause une perte de puissance.
- ✓ D'après les résultats de la simulation, il est clair que pendant la recherche du PPM la méthode P&O produit une puissance qui oscille au tour du PPM avec des ondulations dans la valeur crête a crête est en fonction du rapport cyclique  $\Delta D$ .
- ✓ Pendant le changement du rayonnement imposé, le système converge vers les nouveaux MPP.
- ✓ Les performances du générateur se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairement  $1000\text{W}/\text{m}^2$
- ✓ La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.
- ✓ Le meilleur résultat après simulation du rendement des différentes topologies, est le rendement de cas string en parallèle qui prend la valeur de 90%, suivie par le rendement de cas string en série qui prend la valeur de 80% pour conclure par le rendement de cas central qui prend la valeur de 61.45%.

## Conclusion générale

Ce travail a pour objectif primordial l'amélioration du rendement d'un système d'alimentation photovoltaïque. Grâce à la présence d'un processus de poursuite du point de puissance maximale, connu sous le nom de contrôleur MPPT, ce dernier indispensable pour une meilleure adaptation source/charge, permettant un transfert maximum de puissance.

Nous avons élaboré en détail la synthèse du modèle électrique du module photovoltaïque, à savoir les cellules PV formant le module, sachant le raccordement, et l'effet des conditions climatiques et des composants électriques.

Les performances du GPV se dégradent avec l'augmentation de la température et la diminution de l'intensité de l'éclairement, de même pour les résistances, ils se dégradent avec la diminution de la valeurs de la résistance parallèle et l'augmentation de la valeur de la résistance série.

En effet, les études en simulations dans les paragraphes précédentes ont bien montré que l'énergie des photons convertie en électricité est une fonction fortement variable selon l'éclairement et la température mais aussi selon la charge qui est connectée au GPV.

La comparaison de rendement d'énergique de trois topologies de convertisseur DC-DC, convertisseur central, convertisseur string en parallèle et convertisseur string en série permettra d'identifier les domaines d'utilisation et les avantages et les inconvénients de chaque topologie.

En plus nous avons étudié la connexion GPV-charge et la nécessité d'un étage d'adaptation, puis on a exposé des méthodes de recherche du point de puissance maximal (MPPT). Par la suite venu l'exécution de la simulation de notre système photovoltaïque et les différents structure d'étages d'adaptation (convertisseur central, convertisseur string en parallèle, convertisseur string en série). Et la comparaison entre ces structures en parlant sur le rendement l'efficacité de chaque structure et les deux méthodes d'adaptation MPPT, (P&O, INC). Ainsi que l'effet de défaut de court-circuit et circuit ouvert au niveau d'un composant important dans le convertisseur (MOSFET dans notre cas) avec une méthode de détection du défaut de ce composant important

Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV.

La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfert de la puissance. La première méthode, appelée « perturbation et observation », est considérée comme étant un simple algorithme du point de vue de nombre de variables traitées et complexité de l'algorithme de traitement. Cette méthode a un problème de déviation du vrai point MPP lorsqu'une variation brusque de l'ensoleillement est produite ce qui cause une perte de puissance.

La méthode « incrémental conductance », qui traite la dérivée de puissance d'une autre manière, donne des résultats presque similaires à la méthode « perturbation et observation » malgré sa rapidité vis-

à-vis des variations brusques des conditions atmosphériques. Cette méthode est trahie par un taux d'ondulations de la puissance qui causent des pertes et requit plus de matériel par rapport P&O

La méthode MPPT (P&O) s'avèrent facile à mettre en œuvre mais son défaut principal est la présence d'oscillations autour du PPM et la méthode (INC) présente un avantage important par rapport à la méthode P&O qui est efficace et stable quand elle atteint le PPM qui nous permet de garantir de produire le maximum de puissance .

A la fin de ce mémoire nous proposons de différentes algorithmes d'optimisation basés sur l'intelligence artificielle , implémentation de commande par carte électronique DSP ou encore la réalisation expérimentale d'une chaine de conversion valider les résultats de simulation.

## Bibliographie

- [1] <https://www.digischool.fr/cours/la-puissance-solaire-recue-et-reflechie-par-la-terre>
- [2] <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/globe-terrestre-temperature-fait-il-centre-terre-19292/>
- [3] <https://www.larepubliquedespyrenees.fr/politique/agglomeration%20de%20pau/agglomeration-de-pau-la-geothermie-chauffe-les-debats-5066736.php>
- [4] <https://totalenergies.com/fr/compagnie/expertise-energies/explorer-produire/petrole-gaz/expertise-reconnue-production-petrole-et-gaz-gnl-offshore-profond>
- [5] <https://www.aps.dz/economie/168294-production-de-3-000-mw-d-energie-solaire-photovoltaique-sonelgaz-signe-des-contrats-avec-les-societes-concernees#:~:text=Le%20projet%20de%20production%20de%203.000%20MW%20d'%C3%A9nergie%20solaire,MW%20%C3%A0%20l'horizon%202035>
- [6] Bessemoulin P, Olivieri J. 'Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette'. Physique Atmosphérique La Météorologie 8ème Série - N° 31 - Sept 2000:42–59.
- [7] ISSAADI Salim, 'Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones'. Mémoire de magister. Ecole Nationale Polytechnique, 2006
- [8] <https://sunclimate.gsfc.nasa.gov/article/solar-irradiance> 9/6 21:15
- [9] <https://www.digischool.fr/cours/la-puissance-solaire-recue-et-reflechie-par-la-terre>
- [10] [https://www.doc-developpement-durable.org/file/Energie/Solaire-photovolta%C3%AFque/Energie\\_solaire\\_photovoltaique.pdf](https://www.doc-developpement-durable.org/file/Energie/Solaire-photovolta%C3%AFque/Energie_solaire_photovoltaique.pdf)
- [11] BIRANE Mouhoub ,Support de Cours (Destiné aux étudiants de Master Energies renouvelables) Systèmes de conversion de l'énergie Photovoltaïque 2018-2019
- [12] Mambrini T. Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. Thèse de Doctorat. Université Paris-Sud École doctorale : STITS, 2014.
- [13] <https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/monocrystalline-silicon#:~:text=Monocrystalline%20silicon%20cells%20can%20yield,to%2024.4%25%20%5B12%5D>.

- [14] BELAKEHAL. S, «Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables», THÈSE Doctorat, UNIVERSITE DE CONSTANTINE, 10/06/ 2010.
- [15] Mr. OUARI Mondher et Mr. ZINE Yakoub ‘‘Étude des commandes MPPT d’un système Photovoltaïque Mémoire de Projet de fin d’études’’ 2020
- [16] <https://www.automation-sense.com/blog/electronique/les-convertisseurs-statiques-definition-et-exemples.html>
- [17] Irena world energy transitionoutlook 2023 ‘‘1.5 pathway .international renewable energy agency’’