



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique Et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة العربي التبسي - تبسة  
Université Larbi Tebessi – Tébessa  
معهد المناجم  
Institut des Mines  
قسم الإلكتروميكانيك  
Département Electromécanique

*MEMOIRE*

*Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master*

*Filière : Electromécanique*

*Option : Electromécanique*

# Etude et simulation d'un système hybride (photovoltaïque/groupe électrogène)

Présenté par :

SAI Seif Eddine

KRIDIS Abdelhamid

Devant le jury

HOUEM Alaa	MAA	Président	Université Larbi Tebessi Tébessa
MOGHRANI Redhouane	MAA	Encadreur	Université Larbi Tebessi Tébessa
FARES Nouredine	MAA	Examinateur	Université Larbi Tebessi Tébessa
MALKIA chawki	MAA	Examinateur	Université Larbi Tebessi Tébessa

Année universitaire 2021/2022

# Remerciements

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

*Ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'intervention, la consciente, d'un grand nombre de personnes. Nous souhaitons ici les en remercier.*

*Nous tenons à remercier notre encadreur Mr: Moghrani Redhouane, pour son encadrement, sa disponibilité, ses remarques pertinentes et ses précieux conseils. Ses orientations nous ont permis d'avoir une approche objective de ce sujet de mémoire.*

*Nous adressons l'expression de nos gratitude à notre maître le docteur Houem Alaa, qui nous fait l'honneur de présider ce jury et d'examiner ce mémoire.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury le docteur Fares Noureddine qui, malgré ses multiples occupations il est là pour examiner ce travail avec son professionnalisme.*

*Merci, pour nous avoir fait l'honneur d'évaluer ce travail.*

*L'enseignement de qualité dispensé par le Master Electromécanique a également su nourrir nos réflexions et a représenté une profonde satisfaction intellectuelle, merci donc aux enseignants-chercheurs.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études. Nos remerciements s'étendent également à tous nos enseignants durant les années des études.*

*Nous remercions avec une pensée chaleureuse tous nos proches, familles ou amis, que nous remercions pour leur soutien et leurs encouragements.*

*Enfin, et ce seront nos derniers mots nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*Merci à tous et à toutes.*

# Dédicace

## *Ma très chère mère aimable*

*Vous présentez pour moi, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.*

## *Mon père*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.*

## *Mes précieux frères*

*Ali, Brahim, présents dans tous mes moments d'examens par ses soutiens moraux. Sans oublier les chers frères Othman et Oussama. Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.*

## *Mes chères sœurs*

*En témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous, je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.*

## *Mon binôme*

*Hamid Kridis; les mots ne suffisent pas pour exprimer l'attachement, l'amour et le respect que je porte pour vous. Je vous dédie cette mémoire.*

*Tous mes collègues, tous mes amis, tous les membres de ma famille grands et petits.*

*Enfin, je dédie ce travail à tous qui m'aident dans ce dernier de près ou de loin.*

*Saif*

# Dédicace

*A mes très chers parents,*

*Aucun mot ne peut exprimer mon respect, ma considération et l'amour éternel pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien être.*

*Votre générosité, votre soutien inconditionnel et constant, votre bonneté ont toujours été un exemple pour moi. Sans vous je ne serais absolument pas où j'en suis aujourd'hui.*

*Vous m'avez donné du courage et de l'espoir, pour être toujours présent même à distance.*

*Je t'aime papa, je t'aime maman et sachez que je vous suis très reconnaissant*

*«Que le bon Dieu vous bénisse d'avantage ».*

*A mon cher frère,*

*Ilyes ; vous avez toujours été une source inépuisable d'encouragements.*

*Je vous souhaite une vie pleine de joie et de bonheur. A mes oncles, tantes, cousins et cousines, Je vous exprime toute ma gratitude pour votre soutien.*

*A mon binôme,*

*"Seif sai" tu m'a beaucoup aidé pour faire ce travail, tu es aussi l'un de mes proches amies, tu es adorable, je t'aime, je te respecte et je te souhaite une bonne continuation.*

*Je n'oublie pas mes collègues et mes amies sans exception, avec qui j'ai partagé des instants inoubliables.*

*Pour notre frère Imran Djelailia et ma sœur Ritaa Sofi qu'Allah eux fasse miséricorde et les accueille dans sons vaste paradise*

*A tous ceux qui m'aiment, A tous ceux que j'aime.*

*Hamid*

## Résumé

Dans le monde actuel, le développement des applications d'énergies renouvelables tels que les systèmes solaires thermiques, le photovoltaïque, les éoliennes, la micro hydraulique, les pompes à chaleur et la géothermie a connu un essor considérable et suscite plusieurs débats dans les médias pour cette transition énergétique. Actuellement, plusieurs pays du monde se tournent vers l'utilisation des énergies renouvelables et le mix énergétique car il a été constaté que dans moins de 40 ans les réserves pétrolières disponibles seront épuisées.

Nous présentons dans ce travail une configuration d'un système hybride de génération d'énergie essentiellement sur des énergies renouvelables pour l'autonomie énergétique. Le système étudié est composé de cellules photovoltaïques couplées avec un groupe électrogène avec des batteries de stockage. L'objectif principal de ce système est de satisfaire à la demande de la charge électrique pour l'alimentation des sites isolés. En effet, pour vérifier la performance du système hybride photovoltaïque/générateur diesel, plusieurs simulations numériques ont été effectuées avec le logiciel MATLAB en utilisant des données météorologiques de la wilaya de Tébessa. Les résultats obtenus montrent que cette combinaison hybride est plus rentable en marge de coût économique avec un investissement moins coûteux. Ces résultats présentent aussi une meilleure optimisation du système hybride utilisé, satisfaisant la demande et contribuant à la préservation de l'environnement pour lutter contre le changement climatique.

**Mots Clés :** Mix énergétique ; système hybride ; énergies renouvelables photovoltaïque ; groupe électrogène ; MATLAB ; données météorologiques.

## **Abstract**

In today's world, the development of renewable energy applications such as solar thermal systems, photovoltaics, wind turbines, micro hydraulics, heat pumps and geothermal has grown considerably and is the subject of many media debates for this energy transition. Currently, several countries of the world are circumventing themselves towards the use of renewable energies and the energy mix because it has been found that in less than 40 years the available oil reserves will be exhausted.

In this work we present a configuration of a hybrid energy generation system essentially on renewable energies for energy autonomy. The system studied is composed of photovoltaic cells coupled with a generator with storage batteries. The main objective of this system is to satisfy the demand of the electrical load for the supply of isolated sites. Indeed, to verify the performance of the hybrid photovoltaic/diesel generator system, several numerical simulations were carried out with the MATLAB software using meteorological data from the Tebessa wilaya. The results obtained show that this hybrid combination is more profitable in economic cost margin with a less expensive investment. These results also show a better optimization of the hybrid system used, satisfying the demand and contributing to the preservation of the environment to fight against climate change.

**Keywords:** Energy mix; hybrid system; photovoltaic renewables; generator; MATLAB; meteorological data.

## ملخص

في عالم اليوم، نما تطوير تطبيقات الطاقة المتجددة مثل الأنظمة الحرارية الشمسية والخلايا الكهروضوئية وتوربينات الرياح والهيدروليك الدقيقة والمضخات الحرارية والحرارة الأرضية بشكل كبير وهو موضوع العديد من المناقشات الإعلامية لهذا التحول في الطاقة. وفي الوقت الراهن، تتحائل عدة بلدان في العالم على استخدام الطاقات المتجددة ومزيج الطاقة لأنه تبين أن احتياطات النفط المتاحة ستستنفد في أقل من 40 عاماً.

في هذا العمل، نقدم تكويناً لنظام توليد الطاقة الهجين بشكل أساسي على الطاقات المتجددة من أجل استقلالية الطاقة. يتكون النظام المدروس من خلايا كهروضوئية مقترنة بمولد مع بطاريات تخزين. الغرض الرئيسي من هذا النظام هو تلبية طلب الحمل الكهربائي على إمدادات الطاقة للمواقع المعزولة. في الواقع، للتحقق من أداء نظام مولد الطاقة الكهروضوئية/الديزل الهجين، تم إجراء العديد من عمليات المحاكاة العددية باستخدام برنامج MATLAB باستخدام بيانات الأرصاد الجوية من ولاية تبسة. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن هذا المزيج الهجين أكثر ربحية في هامش التكلفة الاقتصادية مع استثمار أقل تكلفة. تظهر هذه النتائج أيضاً تحسين تحسين النظام الهجين المستخدم، وتلبية الطلب والمساهمة في الحفاظ على البيئة لمكافحة تغير المناخ.

**الكلمات المفتاحية:** مزيج الطاقة، النظام الهجين؛ ومصادر الطاقة المتجددة الكهروضوئية؛ والمولد؛ MATLAB؛ بيانات الأرصاد الجوية.

## Tables des matières

<b>Résumé</b> .....	<b>i</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>ii</b>
<b>ملخص</b> .....	<b>iii</b>
<b>Tables des matières</b> .....	<b>iv</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>v</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>vii</b>
<b>Liste des abréviations</b> .....	<b>viii</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b><i>Chapitre I. Généralité sur les systèmes hybride</i></b> .....	<b>5</b>
<b>1. Introduction</b> .....	<b>4</b>
<b>2. Les systèmes hybrides</b> .....	<b>4</b>
<b>3. Les Composants des systèmes hybrides</b> .....	<b>4</b>
<b>4. Généralité sur le soleil</b> .....	<b>6</b>
4.1 Rayonnement solaire .....	6
4.1.1 Rayonnement direct.....	7
4.1.2 Rayonnement diffus .....	7
4.1.3 Rayonnement solaire réfléchi .....	7
4.1.4 Rayonnement global.....	7
4.2 Spectre du rayonnement .....	8
<b>5. L'énergie photovoltaïque</b> .....	<b>9</b>
5.1 Cellule photovoltaïque.....	9
5.1.1 Cellule solaire.....	9
5.1.2 Structure de la cellule photovoltaïque .....	10
5.2 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques.....	11
5.2.1 Avantages .....	11
5.2.2 Inconvénients .....	11

5.3	Effet photovoltaïque .....	11
5.4	Rappel sur les Propriétés des Semi-conducteurs .....	12
5.4.1	Semi-conducteur.....	12
5.4.2	Dopage du silicium.....	13
5.4.3	Dopage de type N .....	13
5.4.4	Dopage de type P.....	13
5.4.5	Formation de la jonction PN .....	14
5.5	Différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque).....	15
5.6	Rendement d'une cellule .....	16
<b>6.</b>	<b>Générateur photovoltaïque .....</b>	<b>16</b>
6.1	Zones de fonctionnement du module solaire .....	16
6.2	Association des modules photovoltaïques .....	17
6.2.1	Association en série.....	18
6.2.2	Association en parallèle .....	18
6.2.3	Association série-parallèle .....	19
6.3	Facteur de forme .....	19
<b>7.</b>	<b>Les éléments de sécurité et protection de l'installation PV .....</b>	<b>19</b>
<b>8.</b>	<b>Les groupes électrogènes.....</b>	<b>21</b>
8.1	Généralité et définition .....	21
8.2	Les différentes parties d'un groupe électrogène.....	22
8.2.1	Moteur diesel.....	22
8.2.2	Alternateur.....	22
8.2.3	L'armoire de contrôle .....	23
8.3	Les classes de puissance .....	23
8.4	Classes d'application .....	23
<b>9.</b>	<b>Les différents types de configurations des systèmes hybrides PV/GE .....</b>	<b>24</b>
9.1	Configuration PV/GE série.....	24
9.2	La configuration PV/GE parallèle .....	26
9.3	La configuration PV/GE commutée .....	27
<b>10.</b>	<b>Classification des systèmes hybrides .....</b>	<b>28</b>
<b>11.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>28</b>

<b>Chapitre II. Les convertisseurs et la commande MPPT .....</b>	<b>29</b>
<b>1. Introduction.....</b>	<b>30</b>
<b>2. Étage d’adaptation entre un Générateur PV et une charge ...</b>	<b>30</b>
<b>3. Convertisseurs DC-DC (Les Hacheurs) .....</b>	<b>31</b>
3.1 Type de convertisseurs DC-DC .....	31
3.1.1 Convertisseur Boost .....	31
3.1.2 Convertisseur Buck .....	33
<b>4. Commande MPPT .....</b>	<b>34</b>
4.1 Principe du MPPT .....	34
4.2 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche.....	34
4.2.1 MPPT Indirect .....	34
4.2.2 MPPT directs.....	35
<b>5. Techniques MPPT différents.....</b>	<b>35</b>
5.1 Perturber & Observer.....	35
5.1.1 Principe de la technique “Perturb and Observe” (P&O) .....	35
5.2 Principe du MLI (PWM) .....	37
<b>6. Convertisseurs DC-AC (L’onduleur) .....</b>	<b>39</b>
6.1 Modélisation de l’onduleur de tension .....	39
<b>7. Système de stockage.....</b>	<b>40</b>
<b>8. Les batteries .....</b>	<b>41</b>
8.1 Types de batteries .....	42
8.2 Installation des éléments de la batterie .....	43
8.3 Caractéristiques des batteries.....	43
<b>9. Système de régulation.....</b>	<b>44</b>
<b>10. Conclusion .....</b>	<b>44</b>
<b>Chapitre III. Présentation de la société SKTM Oued Elkebarit Souk Ahras .....</b>	<b>46</b>
<b>1. Introduction.....</b>	<b>47</b>
<b>2. Présentation de La Société SKTM.....</b>	<b>47</b>
2.1 Objectifs et missions.....	47

2.2	Réalisations.....	48
2.2.1	Projets en cours de réalisation .....	49
2.3	Les perspectives de SKTM.....	49
<b>3.</b>	<b>Etude de Cas de la Centrale OUED EL KEBRIT.....</b>	<b>50</b>
3.1	Localisation Géographique du Site.....	50
3.2	Présentation Générale de la Centrale.....	51
<b>4.</b>	<b>Conception de la Centrale.....</b>	<b>52</b>
4.1	Le Champ Photovoltaïque .....	53
4.1.1	Structure porteuse / de fixation .....	53
4.1.2	Panneaux photovoltaïques.....	53
4.1.3	Boîtes de raccordements.....	54
4.2	Poste de Conversion DC/AC et Transformation .....	56
4.2.1	L'onduleur solaire .....	56
4.2.2	Le transformateur et la cellule de bouclage.....	58
4.3	Poste d'Evacuation .....	61
4.3.1	Cellules.....	61
4.3.2	Transformateur de service auxiliaires (TSA).....	62
4.4	Systèmes Auxiliaires .....	63
4.4.1	Station météo.....	63
4.4.2	Alimentation sans interruption et de secours .....	65
4.4.3	Redresseurs chargeurs batteries.....	65
4.4.4	Salle de Contrôle-Commande .....	67
4.4.5	La cellule d'hybridation .....	69
<b>5.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>69</b>
	<i>Chapitre IV. Modélisation et simulation des composants du Système hybride (PV/GE) .....</i>	<i>69</i>
<b>1.</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>70</b>
<b>2.</b>	<b>Modélisation d'une cellule photovoltaïque .....</b>	<b>70</b>
<b>3.</b>	<b>Simulation d'une cellule photovoltaïque .....</b>	<b>72</b>
<b>4.</b>	<b>Caractéristiques I(V) et P(V).....</b>	<b>73</b>
<b>5.</b>	<b>Effets climatiques sur la cellule PV.....</b>	<b>75</b>

5.1	Influence de la température sur la cellule .....	75
5.1.1	Caractéristique (I-V) .....	75
5.1.2	Caractéristique (P-V).....	75
5.2	Influence de l'éclairement sur la cellule.....	76
5.2.1	Caractéristique (I-V) .....	77
5.2.2	Caractéristique (P-V).....	77
5.3	Simulation du générateur photovoltaïque.....	77
5.3.1	Caractéristique (I-V) .....	78
<b>6.</b>	<b>Effets climatiques sur le générateur PV .....</b>	<b>79</b>
6.1	Influence de la température sur le générateur PV.....	79
6.2	Influence de l'éclairement sur le générateur PV .....	80
6.3	Influence de l'association des cellules PV sur le GPV .....	81
6.4	Influence de l'association série des cellules PV .....	81
6.5	Influence de l'association parallèle des cellules PV .....	82
6.6	Influence de l'association série / parallèle des cellules PV .....	83
<b>7.</b>	<b>Simulation d'un onduleur triphasé.....</b>	<b>84</b>
7.1	Résultats de la simulation .....	87
7.2	Interprétation de résultats de la simulation.....	88
<b>8.</b>	<b>Modélisation du groupe électrogène .....</b>	<b>90</b>
8.1	Modélisation du moteur diesel .....	90
8.2	Simulation du groupe électrogène .....	91
<b>9.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>92</b>
	<i>Conclusion générale .....</i>	<i>94</i>
	<i>Références bibliographiques .....</i>	<i>97</i>

## Liste des figures

Figure 1. Système hybride PV-diesel. ....	5
Figure 2. Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.....	8
Figure 3. Le spectre du rayonnement solaire. ....	9
Figure 4. La cellule solaire. ....	10
Figure 5. La structure de la cellule photovoltaïque. ....	10
Figure 6. Principe de la conversion photovoltaïque. ....	12
Figure 7. Dopage de type N. ....	13
Figure 8. Dopage de type P. ....	14
Figure 9. Génération de la paire électron-trou. ....	14
Figure 10. La jonction PN. ....	15
Figure 11. Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques. ....	16
Figure 12. Les différentes zones de la caractéristique I (V), T=25°C.....	17
Figure 13. Caractéristique résultante du regroupement de Ns cellules en série.....	18
Figure 14. Caractéristique résultante du regroupement de Np cellules en parallèle. ....	19
Figure 15. Association mixte des modules solaires. ....	19
Figure 16. L'installation des parafoudres pour la protection de panneaux solaires et surtout l'onduleur. ....	20
Figure 17. Les éléments de protection des panneaux solaires.....	20
Figure 18. Groupe électrogène. ....	21
Figure 19. Schématique d'un alternateur. ....	22
Figure 20. Système hybride PV - Diesel série. ....	25
Figure 21. Système hybride PV - Diesel parallèle. ....	26
Figure 22. Système hybride PV - Diesel commuté. ....	27
Figure 23. Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque. ....	30
Figure 24. Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost. ....	32
Figure 25. Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé.....	32
Figure 26. Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert.....	32
Figure 27. Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck. ....	34
Figure 28. Caractéristique P(V) d'un panneau solaire.....	36
Figure 29. Algorithme MPPT perturbation et observation (P&O).....	37
Figure 30. Le résultat de la comparaison entre l'onde de référence et la porteuse triangulaire. ....	38

Figure 31. Schéma d'un onduleur triphasé.....	39
Figure 32. Batterie solaire. ....	42
Figure 33. Plan de Situation de la centrale OKP. ....	51
Figure 34. schéma unifilaire centrale PV Souk Ahras. ....	53
Figure 35. Structure porteuse. ....	53
Figure 36. Caractéristiques du panneau utilisé.....	54
Figure 37. La matrice. ....	54
Figure 38. Boîte de raccordement Niv1. ....	55
Figure 39. Boîte de raccordement Niv2. ....	55
Figure 40. Onduleur TBEA utilisé dans la centrale OKP. ....	58
Figure 41. Transformateur SUNTEN utilisé dans la centrale OKP. ....	58
Figure 42. Surveillance d'unité d'onduleur.....	59
Figure 43. Cellule de boucle. ....	61
Figure 44. Cellules du poste d'évacuation .....	62
Figure 45. Caractéristiques du TSA. ....	62
Figure 46. Transformateur de services auxiliaires. ....	63
Figure 47. Station de mesure météorologie.....	64
Figure 48. Equipements de mesures.....	64
Figure 49. Surveillance station météorologique.....	65
Figure 50. Batteries de secours. ....	66
Figure 51. Redresseur-Chargeur.....	66
Figure 52. Groupe électrogène. ....	67
Figure 53. Salle de contrôle-commande.....	67
Figure 54. Interface du logiciel NC2000.....	69
Figure 55. La cellule d'hybridation.....	69
Figure 56. Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque [32]. ....	70
Figure 57. Bloc Simulink représentant la cellule photovoltaïque. ....	72
Figure 58. Simulation d'une cellule. ....	73
Figure 59. Caractéristique I(V) d'une cellule (T=25°C, G=1000W/m²).....	74
Figure 60. Caractéristique P(V) d'une cellule (T=25°C, G=1000W/m²).....	74
Figure 61. Caractéristique I(V) pour différentes températures (G=1000W/m²). ....	75
Figure 62. Caractéristique P(V) pour différentes températures (G=1000W/m²). ....	75
Figure 63. Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C). ....	77

Figure 64. Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).....	77
Figure 65. Schéma bloc d'un module PV en MATLAB-SIMULINK. ....	78
Figure 66. Caractéristique I(V) d'une générateur PV (T=25°C, G=1000W/m <sup>2</sup> ). ....	78
Figure 67. Caractéristique P(V) d'une générateur PV (T=25°C, G=1000W/m <sup>2</sup> ). ....	79
Figure 68. Caractéristique I(V) d'un générateur pour différentes températures (G=1000W/m <sup>2</sup> ). .....	79
Figure 69. Caractéristique P(V) d'un générateur pour différentes températures (G=1000W/m <sup>2</sup> )......	80
Figure 70. Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C). ....	80
Figure 71. Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C). ....	81
Figure 72. Caractéristique I(V) pour différents nombres de cellule en série. ....	81
Figure 73. Caractéristique P(V) pour différents nombres de cellule en série. ....	82
Figure 74. Caractéristique I(V) pour différents nombres de cellule en parallèle. ....	82
Figure 75. Caractéristique P(V) pour différents nombres de cellule en parallèle. ....	83
Figure 76. Caractéristique I(V) pour différents nombres de cellule en Série / parallèle.....	83
Figure 77. Caractéristique P(V) pour différents nombres de cellule en Série / parallèle.....	84
Figure 78. Onduleur triphasé sous Simulink. ....	84
Figure 79. Les courants Ia Ib Ic à la sortie de l'onduleur 3ph.....	85
Figure 80. Les tensions composées à la sortie de l'onduleur 3ph. ....	86
Figure 81. Hacheur boost commandé par perturb and observ sous simulink. ....	87
Figure 82. Irradiation d'une journée à l'entrée de générateur photovoltaïque et la température considérée constante 25°C. ....	87
Figure 83. Les puissances à la sortie de générateur photovoltaïque et boost dans la température considérée constante 25°C. ....	88
Figure 84. Irradiation d'une journée à l'entrée de générateur photovoltaïque et la température variable 10°C, 35°C, 40°C, 60°C .....	89
Figure 85. Les puissances à la sortie de générateur photovoltaïque et boost la température pour différentes températures et pendant une journée avec irradiation variable.....	89
Figure 86. Caractéristiques P(V) à l'irradiation (1000 w/m <sup>2</sup> ) températures (10°C, 35°C, 40°C, 60°C). ....	90
Figure 87. Simulation du groupe électrogène. ....	91
Figure 88. Les tensions de la charge du GE.....	92
Figure 89. Zoom des tensions de la charge du GE.....	92

## Liste des tableaux

Tableau 1. Caractéristiques des différentes technologies des cellules PV. ....	15
Tableau 2. Famille d'application des groupes électrogènes [32]. ....	24
Tableau 3. Classification des SH par gamme de puissance. ....	28
Tableau 4. Différents types de batteries utilisables pour les applications PV. ....	42
Tableau 5. Parc EnR SKTM (Décembre 2019). ....	48
Tableau 6. Projets En cours de réalisation. ....	49
Tableau 7. Les perspectives de SKTM. ....	49
Tableau 8. Présentation générale de la centrale OKP. ....	51
Tableau 9. Energie produite de la centrale OKP (2017-2020). ....	52
Tableau 10. Caractéristiques de la boîte de raccordement Niv1. ....	55
Tableau 11. Caractéristiques de la boîte de raccordement Niv2. ....	56
Tableau 12. Caractéristiques de l'onduleur TBEA. ....	56
Tableau 13. Caractéristiques de transformateur SUNTEN. ....	60
Tableau 14. Caractéristiques des batteries de secours. ....	65
Tableau 15. Rayonnement solaire à Tébessa pendant un jour (31 mai 2022). ....	76

## Liste des abréviations

<b>PV</b>	Photovoltaïque.
<b>GPV</b>	Générateur photovoltaïque
<b>I-V</b>	Courant-Tension
<b>MPPT</b>	Poursuite du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking)
<b>DC-DC</b>	Continue-Continue.
<b>T</b>	Température.
<b>DS</b>	Diamètre de soleil.
<b>Dt</b>	Diamètre de la terre
<b>Lts</b>	Distance moyenne soleil- terre.
<b>E</b>	Énergie du photon.
<b>H</b>	Constante de Planck.
<b>C</b>	Vitesse de propagation.
<b>V</b>	Longueur d'onde
<b>UV</b>	Ultraviolet.
<b>IR</b>	Infrarouge.
<b>CuO</b>	Oxyde cuivreux
<b>Se</b>	Sélénium.
<b>Si</b>	Silicium.
<b>N</b>	Couche avec porteurs des charges libres négatives.
<b>P</b>	Couche avec porteurs des charges libres positives.
<b>K</b>	Couche conductrice.
<b><i>E<sub>g</sub></i></b>	Énergie du «bonde gap».
<b><i>eV</i></b>	Électron-volt
<b>P</b>	Phosphore.
<b>Br</b>	Bore.
<b>P<sub>m</sub></b>	Puissance maximale.
<b>S</b>	Surface du module photovoltaïque
<b>G</b>	Éclairement.
<b>N<sub>s</sub></b>	Nombre des cellules en série.
<b>N<sub>p</sub></b>	Nombre des cellules en parallèle
<b>FF</b>	Facteur de forme
<b>I<sub>cc</sub></b>	Courant de court-circuit.
<b>V<sub>oc</sub></b>	Tension de circuit ouvert.
<b>R<sub>s</sub></b>	Résistance série.
<b>R<sub>sh</sub></b>	Résistance shunt
<b>I<sub>ph</sub></b>	Photo-courant.
<b>I<sub>0</sub></b>	Courant de saturation
<b>A</b>	Facteur d'idéalité de la jonction
<b>I<sub>cell</sub></b>	Courant délivré par la photopile
<b>I<sub>d</sub></b>	Courant de diode
<b>I<sub>Rsh</sub></b>	Courant shunt
<b>K<sub>i</sub></b>	Courant de court-circuit divisé par le coefficient de température du panneau.

<b>G</b>	Irradiation sur la surface de la cellule
<b>Tref</b>	Température de référence
<b>Gref</b>	Irradiation de référence (1000 W/m <sup>2</sup> ).
<b>IRs</b>	Courant de fuite.
<b>q</b>	Charge de l'électron
<b>K</b>	Constante de Boltzmann
<b>Ipv</b>	Courant du panneau
<b>CST</b>	Conditions de Test Standard
<b>P-V</b>	Puissance -Tension
<b>PPM</b>	point de puissance maximale
<b>MOSFET</b>	Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor
<b>MLI</b>	Modulation de Largeur d'Impulsion
<b>FS</b>	Fréquence de commutation
<b>IGBT</b>	Insulated Gate Bipolar Transistor
<b><i>a</i></b>	Rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur
<b>Te</b>	Période des impulsions
<b><i>f<sub>e</sub></i></b>	Fréquence de découpage
<b>VLmoy</b>	Valeurs moyennes de tension.
<b>Icmoy</b>	Valeurs moyennes du courant
<b>Vmpp</b>	Tension qui correspond à la puissance maximale (V).
<b>Impp</b>	Courant qui correspond à la puissance maximale (A).
<b>P&amp;O</b>	Perturbation et Observation
<b>PPV</b>	Puissance du panneau
<b>VPV</b>	Tension du panneau
<b>V0(t)</b>	Tension de sortie
<b>V0moy</b>	Tension moyenne
<b>VDS</b>	Tension en dents de scie
<b>S</b>	Interrupteur
<b>OKP</b>	Oued Elkebarit Photovoltaïque

# *Introduction générale*

---

## Introduction générale

La plus part des énergies renouvelables s'exprime à deux niveaux. Premièrement, il existe plusieurs sources « inépuisables » ou du moins possédant une capacité de régénération plus rapide que leur utilisation : mouvement terrestre, vent, soleil etc. Certaines d'entre elles sont employées depuis longtemps, comme le bois, d'autres ont été découvertes plus récemment (géothermie, hydraulique)... Deuxièmement, les possibilités de transformation de ces sources en énergie utile aux activités humaines sont variées (chauffage domestique, réfrigération industrielle, cuisson de la nourriture, électricité alimentant les ordinateurs, les véhicules.

L'énergie solaire se caractérise par la chaleur et la lumière. La chaleur peut être utilisée directement pour chauffer des bâtiments, de l'eau au moyen de capteurs, pour sécher des fourrages ou dans des installations de climatisation solaire. La chaleur solaire, comme n'importe quel type de chaleur peut aussi être convertie en énergie mécanique puis en électricité dans des centrales électriques thermiques[1].

Le soleil permet également de générer de l'électricité par son rayonnement grâce à l'effet photovoltaïque. Les équipements peuvent néanmoins poser des problèmes de toxicité des matériaux utilisés. Les systèmes photovoltaïques permettent d'exploiter l'énergie du soleil à diverses fins. Ils sont très fiables, silencieux et rentables dans les régions éloignées.

Dans ce contexte, on s'intéresse au système hybride photovoltaïque/ diesel, les énergies photovoltaïques est l'un des problèmes énergétiques les plus importants de notre époque, dans ce travail, nous traitons en problème de la production d'électricité au moindre coût et avec meilleur énergie et la moins dommageable pour l'environnement.

Le déroulement de cette mémoire se fera de la manière suivante : Dans le premier chapitre, on va donner un aperçu général sur le système hybride (PV/GE)

Dans le deuxième chapitre, nous présentons le convertisseur statique DC-DC utilisés dans les systèmes PV, en particulier le convertisseur survolteur et abaisseur utilisé dans ce mémoire. Ensuite, nous présentons quelques méthodes MPPT basant sur la méthode de perturbation et observation et après nous avons expliqué le principe du MLI(PWM) et présenté le système de stockage, les batteries et le système de régulation.

Ensuite, dans la troisième chapitre nous avons présenté une vue générale sur la société SKTM (Shariket Kahraba Wa Taket Moutadjadida) Algérien avec une étude approfondie de cas de la centrale de OUED EL KEBRIT, unes des centrales réaliser en Algérie et ça dans le but d'avoir une idée générale sur les centrales photovoltaïque.

---

Enfin, dans le quatrième chapitre nous allons étudier la modélisation de la cellule et le générateur photovoltaïque (composé de 60 cellules connectées en série) dans les conditions standard ( $E=1000\text{W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ) et réel de la wilaya de Tébessa, nous allons traiter l'effet de la température et l'éclairement sur l'énergie de la cellule PV, et l'effet de regroupement de cellule (série, parallèle, série – parallèle) sur l'énergie produite, et on utilise l'outil MATLAB -SIMULINK pour faire la simulation de comportement de la cellule et du générateur PV et la technique P&O pour optimiser la puissance maximal.

# *Chapitre I. Généralité sur les systèmes hybride*

## 1. Introduction

Le terme « Système d'Énergie Hybride » fait allusion aux systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types de sources. La combinaison des sources d'énergie renouvelable comme l'éolienne, le photovoltaïque ou les petites centrales hydroélectriques peut constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes diesels. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées mais la présence du générateur diesel dans ce type de système hybride autonome suscite certaines discussions quant aux notions de « propreté » et de durabilité [2,3].

Dans ce chapitre, nous présenterons les différentes composantes d'un système énergétique hybride (SEH). De plus, nous aborderons le fonctionnement et les méthodes de dimensionnement de ces systèmes.

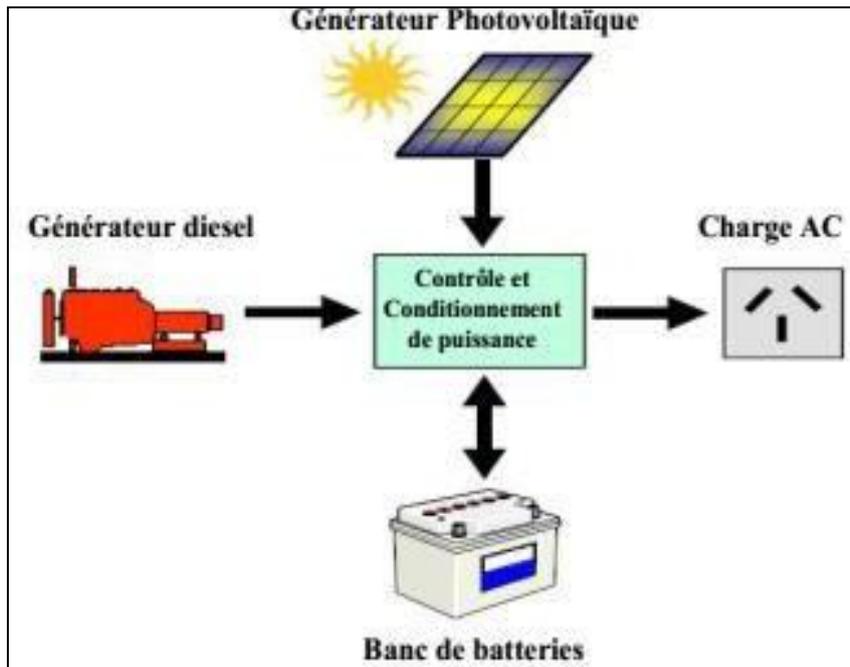
## 2. Les systèmes hybrides

Un système énergétique hybride est un système qui associe au moins deux technologies complémentaires ; une ou plusieurs sources d'énergies classiques (groupes électrogènes) et au moins une source d'énergie renouvelables (photovoltaïque, Eolien ...) [4]. Le but du système hybride est d'assurer la production de l'énergie demandée par la charge et si possible de produire le maximum d'énergie à partir d'énergies renouvelables, tout en maintenant la qualité de l'énergie fournie. Les systèmes hybrides sont souvent utilisés dans les régions isolées, ils sont généralement autonomes. Les performances d'un système hybride, son rendement et sa durée de vie sont influencés d'une part par sa conception notamment l'architecture, le dimensionnement des composants, le type de composants et d'autre part par le choix de la stratégie de fonctionnement des différents composants.

## 3. Les Composants des systèmes hybrides

Le système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources. Le système qui nous intéresse regroupe deux parties pour la production de l'énergie passant par un stockage électrochimique [5] :

- Energie solaire à travers les panneaux PV.
- L'hydrocarbure à travers le générateur électrogène.



**Figure 1. Système hybride PV-diesel.**

Quant aux systèmes photovoltaïques (PV), ils fournissent une alimentation ininterrompue sans nuisances sonores ni environnementales, à l'exception des difficultés de recyclage liées aux batteries. Ils sont faciles à installer, nécessitent peu d'entretien et sont très fiables. Leur inconvénient est le coût d'investissement élevé nécessaire à leur installation et la limitation de la charge électrique à satisfaire [6].

Cependant, les systèmes photovoltaïques (PV) peuvent être associés à d'autres sources d'énergie, la plupart du temps contrôlables comme un groupe électrogène, parfois à caractère aléatoire (association PV-éolien). Dans tous les cas, dans ces configurations d'association de plusieurs sources, les avantages de chacune des sources d'énergie sont cumulés [4] :

- Le système photovoltaïque réduit la consommation en carburant, le temps de fonctionnement et donc la fréquence de maintenance du groupe diesel,
- La présence du stockage par batteries réduit la puissance nominale du groupe diesel,
- La présence du générateur diesel réduit la taille du champ photovoltaïque et la capacité de stockage des batteries diminuant ainsi le coût du système,
- La fiabilité du système global est augmentée.
- Les puissances et les énergies mises en jeu sont plus importantes et la charge à alimenter plus élevée.

Il se pose alors les problèmes suivants :

- Choisir correctement la taille de chaque composant du système énergétique,
- Optimiser la gestion de l'énergie au sein de ce système,
- Et enfin, rechercher la configuration optimale, c'est-à-dire celle qui offre le coût de production minimal pour une demande énergétique définie.

Les groupes diesels sont souvent considérés comme une solution économique et fiable, mais générant quelques nuisances d'ordre environnementales et pratique pour l'utilisateur [4] :

- Coûts élevés de fonctionnement,
- Dépendance liée au problème d'approvisionnement en carburant,
- Maintenance compliquée et coûteuse,
- Faible durée de vie (environ 5 ans et parfois moins),
- Difficile production d'énergie électrique en continue sur 24 heures, (ou Nécessité d'associer plusieurs GD),
- Nuisances sonores et problèmes de gestion des huiles de vidange.

#### **4. Généralité sur le soleil**

##### **4.1 Rayonnement solaire**

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 109 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Lavoisier et Laplace, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène - hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement Sa lumière, à une vitesse de 300000km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre. Sa distribution spectrale de l'atmosphère présente un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5  $\mu$ m, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°k [7-8] :

- Diamètre de soleil  $DS = 1.39 \cdot 10^9 \text{ m}$
- Diamètre de la terre  $Dt = 1.27 \cdot 10^7 \text{ m}$
- Distance moyenne soleil- terre  $Lts = 1.5 \cdot 10^{11} \text{ m}$

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2 et 4.10<sup>-6</sup>m. sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent [9].

#### 4.1.1 Rayonnement direct

C'est la partie reçue directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un pyréliomètre [9].

#### 4.1.2 Rayonnement diffus

Il est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet éclatement des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques [9].

#### 4.1.3 Rayonnement solaire réfléchi

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige) [9].

#### 4.1.4 Rayonnement global

Le rayonnement global est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran. Les stations météorologiques généralement mesurent le rayonnement global horizontal par un Pyranomètre placé horizontalement à l'endroit requis [9].

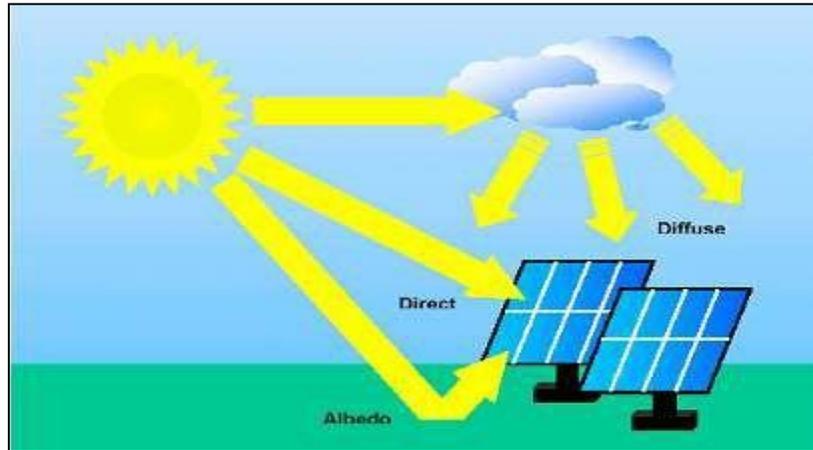


Figure 2. Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.

#### 4.2 Spectre du rayonnement

Le rayonnement électromagnétique est composé de « grains » de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde. L'énergie de chaque photon est donnée par la formule suivante :

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ JS}^{-1}$  la constante de Planck.

$C = 3 \cdot 10^8 \text{ mS}^{-1}$  étant la vitesse de propagation.

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à  $5800^\circ \text{ K}$ . Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom d'AM0. Sa distribution en énergie est répartie en [8] [10] :

- Ultraviolet **UV**  $0.20 < \lambda < 0.38 \text{ nm}$  **6.4%**
- Visible **0.38 < \lambda < 0.78 \text{ nm}** **48.0%**
- Infrarouge **IR**  $0.78 < \lambda < 10 \text{ nm}$  **45.6%**

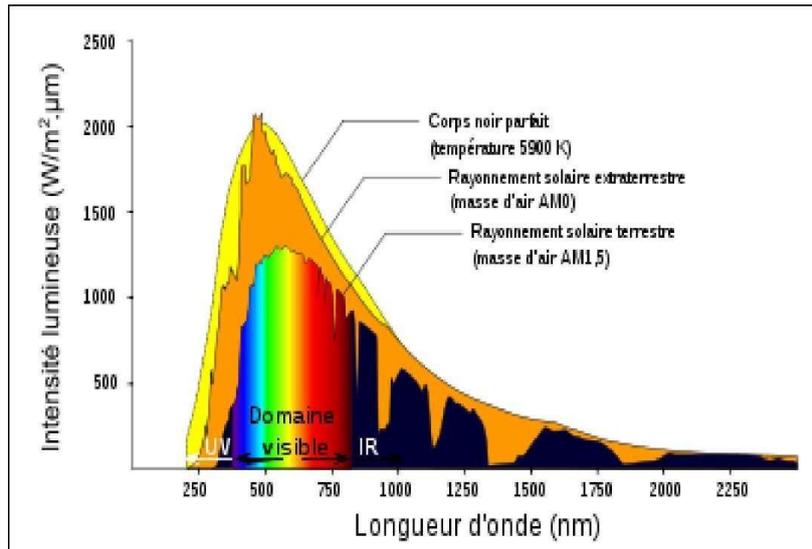


Figure 3. Le spectre du rayonnement solaire.

## 5. L'énergie photovoltaïque

L'énergie solaire fait appel à la ressource la plus abondante sur terre : Le rayonnement solaire. Cette énergie peut être récupérée par deux procédés :

- Procédé photovoltaïque pour la production d'électricité avec ou sans système de stockage ;
- Procédé thermique pour la production de la chaleur.

Le mot « photovoltaïque » vient du grec « phôtos » qui signifie lumière et de « Volta » du nom du physicien italien qui a découvert la pile électrique en 1800. C'est en 1839 que le physicien français Antoine Edmond Becquerel mit en évidence cette conversion particulière de l'énergie.

Le phénomène de conversion photovoltaïque est dû à la variation de la conductivité d'un matériau (semi-conducteur) sous l'effet de la lumière.

### 5.1 Cellule photovoltaïque

#### 5.1.1 Cellule solaire

Les cellules solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé effet photovoltaïque. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque [11].



Figure 4. La cellule solaire.

### 5.1.2 Structure de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches. On trouve au centre de cette cellule, une couche avec porteurs de charges libres négative (N) en contact avec une autre couche avec porteurs de charges libres positives (P). De part et autre du cœur de la cellule, on a une couche conductrice (K) autrement dit une grille métallique, puisqu'il faut que cette couche soit conductrice et ne subisse pas des phénomènes de corrosion. On a donc une couche qui sert de cathode (pôle +) recouvrant la couche semi-conductrice dopée N et une couche qui joue le rôle de l'anode (pôle -) en dessous la couche semi-conductrice P. Aussi le silicium est très réflécheur, on place donc un revêtement anti-réflexion sur le dessus de la cellule. Enfin on trouve une couche de verre qui protège la cellule. Ces couvertures de protections sont indispensables car la cellule est très fragile. L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre. Pour finir, on relie les cellules entre elles, constituant alors le panneau solaire, afin d'obtenir une puissance suffisante [12].

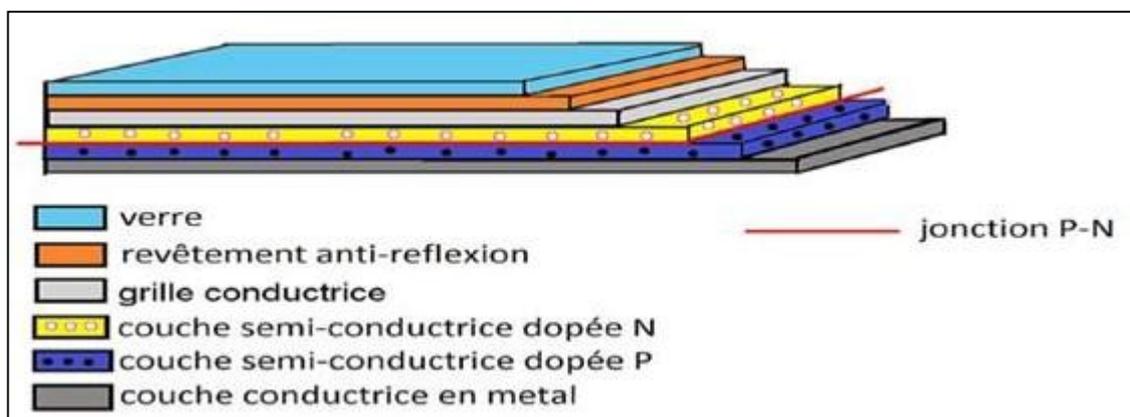


Figure 5. La structure de la cellule photovoltaïque.

## **5.2 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques**

### **5.2.1 Avantages**

- Sa gratuité.
- Pas de pollution.
- Sa fiabilité et la longue vie de l'installation.
- Sa structure fixe.
- Son coup de maintenance bas.
- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- L'installation ne produit aucun bruit
- Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts sucrerait pour alimenter la planète entière.

### **5.2.2 Inconvénients**

- Le coût élevé de l'installation.
- Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.

Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution, la fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement [13-14-15].

## **5.3 Effet photovoltaïque**

Le terme photovoltaïque est formé à partir de deux mots :

- « Photo », qui signifie lumière.
- « Volta », du nom du physicien Alessandro Volta (1745-1827), inventeur de la pile électrique) [16].

La photopile ou la cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de semi-conducteurs de différents types, elle constitue l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. Son rôle est de transformer de manière directe l'énergie reçue par le soleil en énergie électrique avec un certain rendement qui est caractéristique du semi-conducteur utilisé dans la fabrication.

La photopile utilise deux couches de semi-conducteur, une dopée de type N qui est excédentaire en électrons et l'autre dopée P qui est excédentaire en trous. Ces deux couches

sont comprises entre deux électrodes métalliques (+) et (-) pour collecter le courant.

L'énergie du photon absorbée par le semi-conducteur va servir à arracher des électrons qui vont passer à un état d'énergie supérieur créant un déséquilibre électrique se traduisant par une paire électron-trou. Lorsque les deux couches entrent en contact, les électrons libérés se déplacent de la zone dopée N vers la zone dopée P, de même pour les trous qui se déplacent de la zone P vers la zone N, ceci va créer une jonction P-N et donc un champ électrique.

Le champ permet de déplacer les électrons de la zone N vers la surface négative où ils deviennent disponibles pour le circuit électrique. En même temps les trous se déplacent dans la direction opposée, vers la surface positive où ils attendent les électrons entrants.

Quand les trous et les électrons rejoignent la jonction P-N, une tension est générée, elle peut varier entre 0,3V et 0,7 V en fonction du matériau utilisé, de la température et du vieillissement de la cellule [17-18].

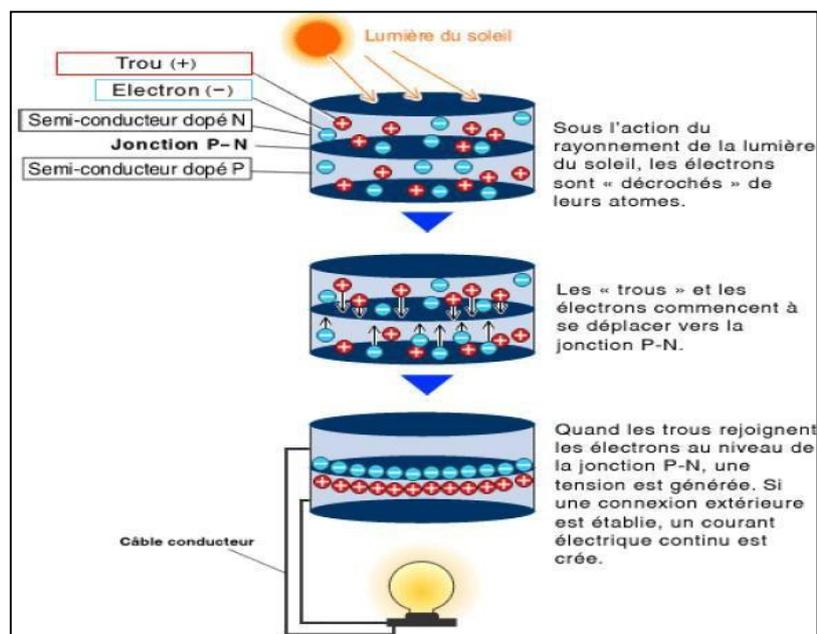


Figure 6. Principe de la conversion photovoltaïque.

## 5.4 Rappel sur les Propriétés des Semi-conducteurs

### 5.4.1 Semi-conducteur

Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charge libre est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est l'énergie du « bande gap »,  $E_g$  en électron-volt (eV). Cette

valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1.0 à 1.8 eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1.1 eV pour le silicium cristallin (c - Si), et 1.7eV pour le silicium amorphe (a -Si). Le spectre du rayonnement solaire est la distribution des photons particules de lumière en fonction de leur énergie (inversement proportionnelle à la longueur d'onde). Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera à travers l'épaisseur de la cellule [19].

Les photons absorbés dont l'énergie est supérieure à l'énergie de la bande gap vont libérer un électron négatif, laissant un 'trou' positif derrière lui. Pour séparer cette paire de charges électriques de signes opposés (positive et négative) et recueillir un Courant électrique, il faut introduire un champ électrique  $e$ , de part et d'autre de la cellule [20].

#### 5.4.2 Dopage du silicium

Les atomes de Si ont quatre électrons de valence, chacun étant lié à un atome Si voisin par une liaison covalente [13].

#### 5.4.3 Dopage de type N

Si un atome ayant cinq électrons de valence (le phosphore (P)), est incorporé dans le réseau cristallin, alors cet atome présentera quatre liaisons covalentes et un électron libre. Cet électron faiblement lié à l'atome peut être facilement excité vers la bande de conduction. Dans ce genre de matériau, le nombre d'électrons dépasse le nombre de trous.

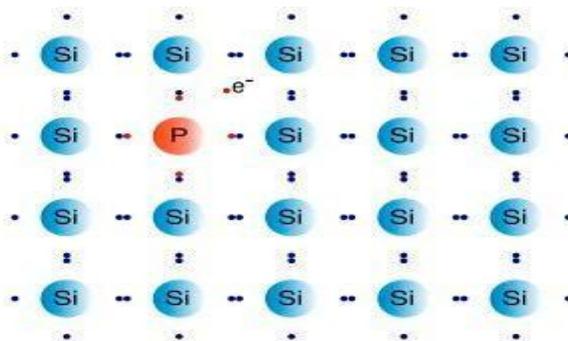


Figure 7. Dopage de type N.

#### 5.4.4 Dopage de type P

Si un atome trivalent (bore (B)) est substitué à un atome de silicium dans le réseau cristallin, alors il manquera un électron pour l'une des quatre liaisons covalentes des atomes de silicium adjacents et l'atome trivalent peut accepter un électron pour compléter cette

quatrième liaison, formant ainsi un trou. Quand le dopage est suffisant, le nombre de trous dépasse le nombre d'électrons.

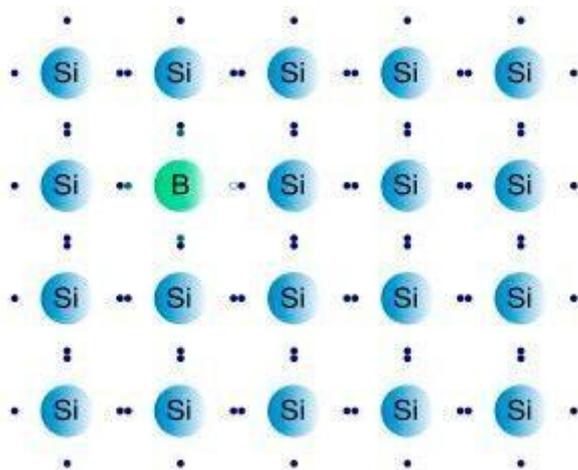


Figure 8. Dopage de type P.

#### 5.4.5 Formation de la jonction PN

Le silicium, comme tous les semi-conducteurs, a une bande de valence pleine et une bande de conduction vide. Mais grâce à un apport énergétique suffisant, il est possible de faire passer des électrons de la bande de valence (BV) à la bande de conduction (BC), d'où la génération d'électrons libres [21], figure (9).

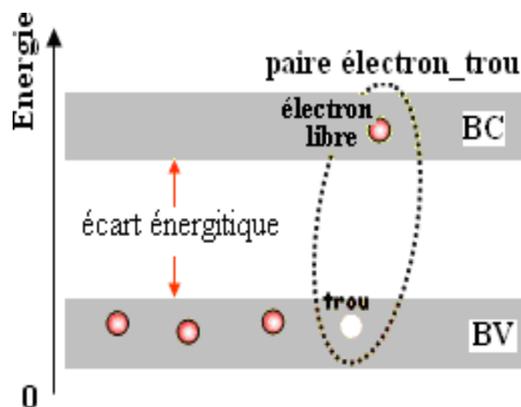


Figure 9. Génération de la paire électron-trou.

La présence d'électrons libres dans la bande de conduction d'un matériau n'est pas suffisante pour générer un courant : il est nécessaire de créer une différence de potentiel aux bornes du photo- générateur afin d'entraîner les charges positives d'un côté et les charges négatives de l'autre. Cette opération est possible par dopage du Silicium. Une jonction PN est créée par l'assemblage de deux barreaux de Silicium de type N et P.

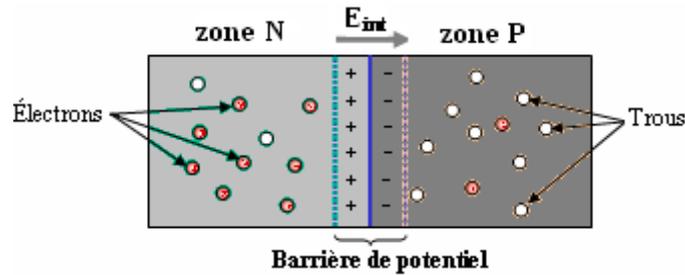


Figure 10. La jonction PN.

### 5.5 Différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque)

Tableau 1. Caractéristiques des différentes technologies des cellules PV.

Matériaux	Rendements	Longévités	Caractéristiques	Principales Utilisations
<b>Silicium mono cristallin</b>	12 à 18 % (24,7 % en laboratoire)	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Très performant.</li> <li>• Stabilité de production d'énergie</li> <li>• Méthode de production coûteuse et laborieuse</li> </ul>	Aérospatiale, modules pour toits, façade...
<b>Silicium poly cristallin</b>	11 à 15 % (19,8% en laboratoire)	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adapté à la production à grande échelle ;</li> <li>• Stabilité de production d'énergie ;</li> <li>• Représente plus de 50 % de la production mondiale.</li> </ul>	Modules pour toits, façades, générateurs, ...
<b>Amorphe</b>	5 à 8 %	15 ans	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peut fonctionner sous la lumière fluorescente ;</li> <li>• Fonctionnement avec faible luminosité ;</li> <li>• Fonctionnement par temps couvert ;</li> <li>• Fonctionnement avec ombrage partielle</li> </ul>	Appareils électroniques (montres, calculatrices, ...), intégration dans les bâtiments.

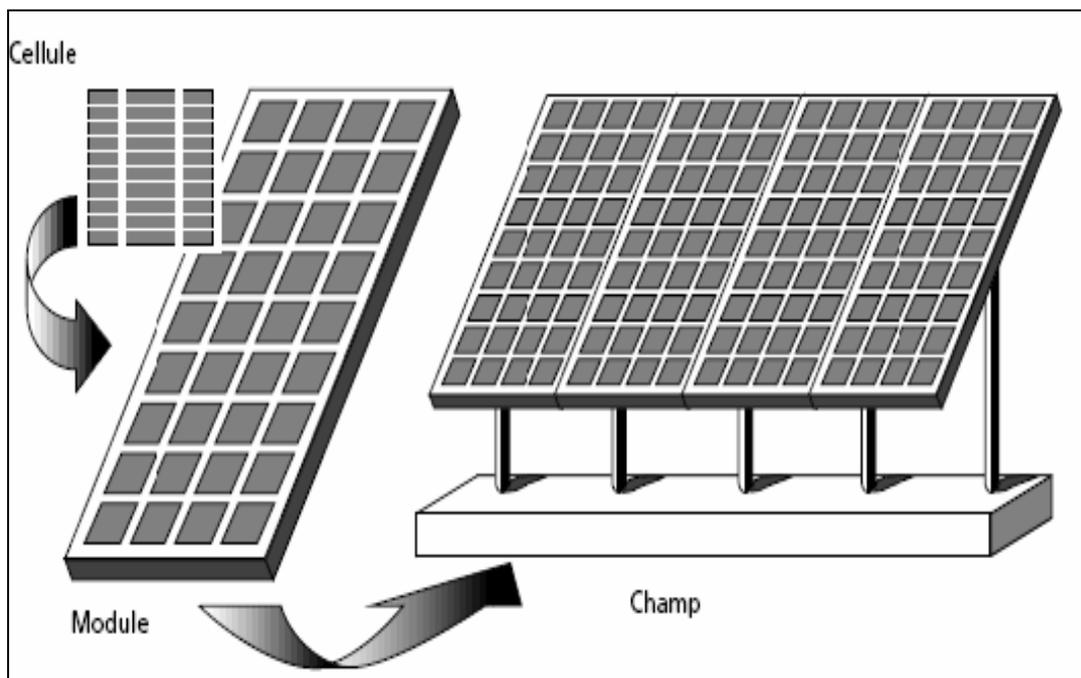
## 5.6 Rendement d'une cellule

Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module. Soit  $S$  la surface du module et  $G$  l'éclairement en  $W/m^2$ , ce rendement a pour formule [22] :

$$\eta = \frac{P_m}{S \times G}$$

## 6. Générateur photovoltaïque

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un GPV. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera [23].



**Figure 11. Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques.**

### 6.1 Zones de fonctionnement du module solaire

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement ; seule la courbe  $I(V)$  est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du

générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (11) représente trois zones essentielles :

- **La zone (I)** : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur 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 générateur, 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 générateur est assimilable à un générateur de tension [24].

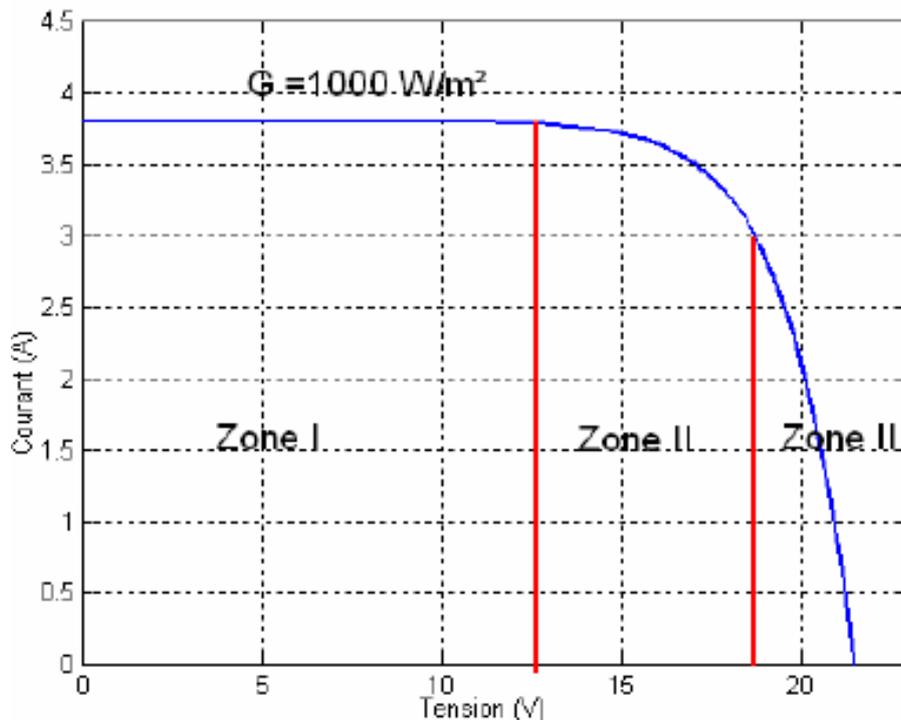


Figure 12. Les différentes zones de la caractéristique I (V),  $T=25^{\circ}\text{C}$ .

## 6.2 Association des modules photovoltaïques

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité du courant d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc....) peuvent en dommage les cellules de façon permanente.

### 6.2.1 Association en série

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau).

L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule [25].

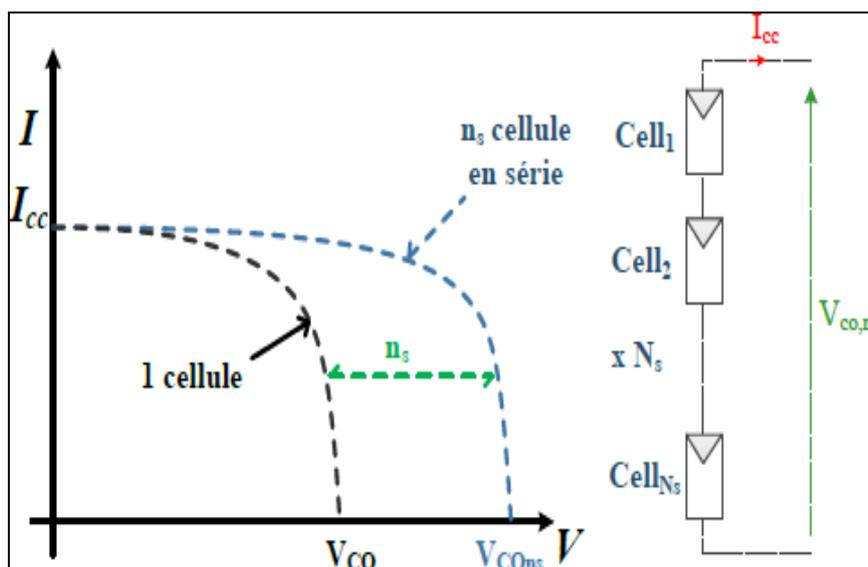
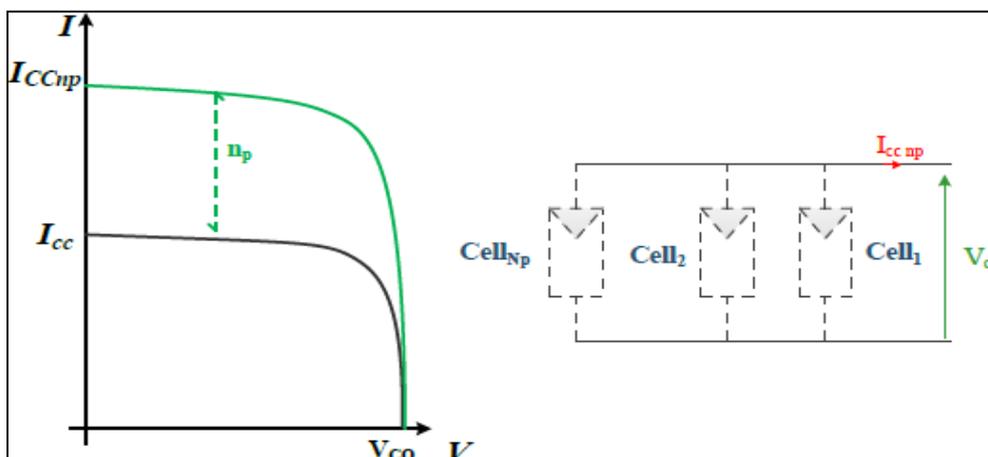


Figure 13. Caractéristique résultante du regroupement de  $N_s$  cellules en série.

### 6.2.2 Association en parallèle

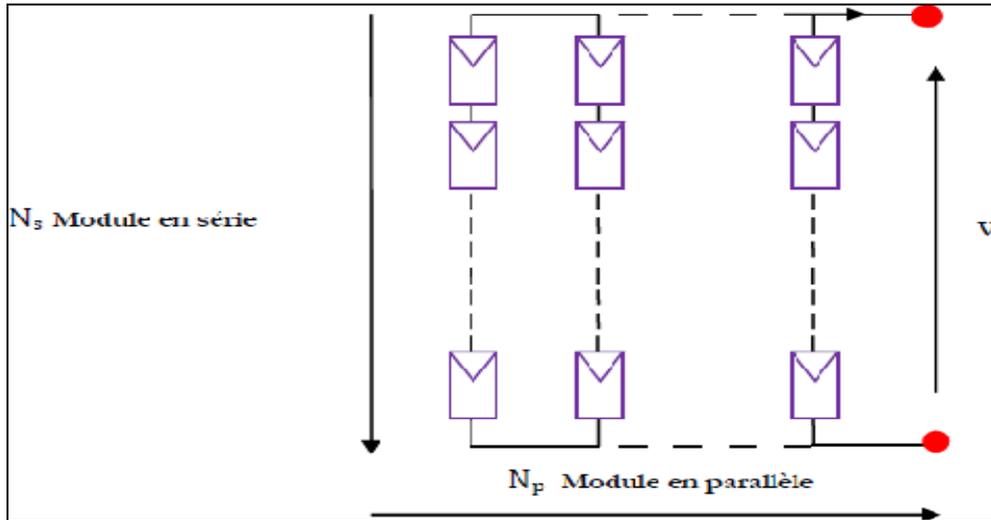
En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche [26].



**Figure 14. Caractéristique résultante du regroupement de  $N_p$  cellules en parallèle.**

**6.2.3 Association série-parallèle**

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle [27].



**Figure 15. Association mixte des modules solaires.**

**6.3 Facteur de forme**

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique  $I(V)$  pour qualifier la qualité d'une cellule d'une générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou « fill factor » (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{max}$  et la puissance formée par le rectangle  $I_{cc} \times V_{oc}$ . Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologique pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales, IL est défini par la relation suivant [28] :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{oc}}$$

**7. Les éléments de sécurité et protection de l'installation PV**

Dans le boîtier électrique on trouve :

1-Diodes by-pass : On a 9 diodes pour cette installation pour le cas d'ombrage d'un panneau donc s'il n'y a pas protection cette panneau va être détruite par les courants fort des autres panneaux.

2-les fusibles : On a 6 fusibles pour protéger les trois chaînes. Chaque chaîne se compose de trois panneaux solaires en série.

3-disjoncteur DC pour protéger toute l'installation les trois chaînes que sont montées en parallèles de surintensité.

Surtout il n'est pas fallu installer un disjoncteur AC à cause des phénomènes arcs électriques. Si on installe un disjoncteur AC il se détruira.

4-parafoudre.

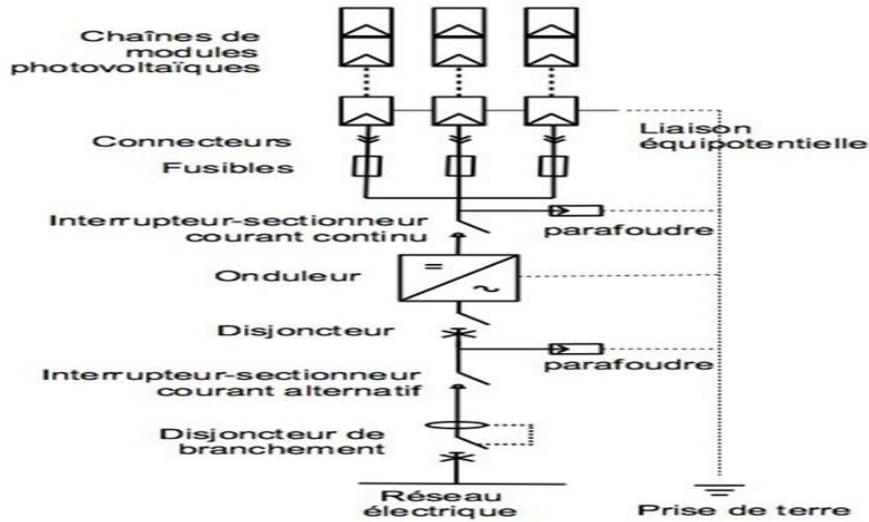


Figure 16. L'installation des parafoudres pour la protection de panneaux solaires et surtout l'onduleur.

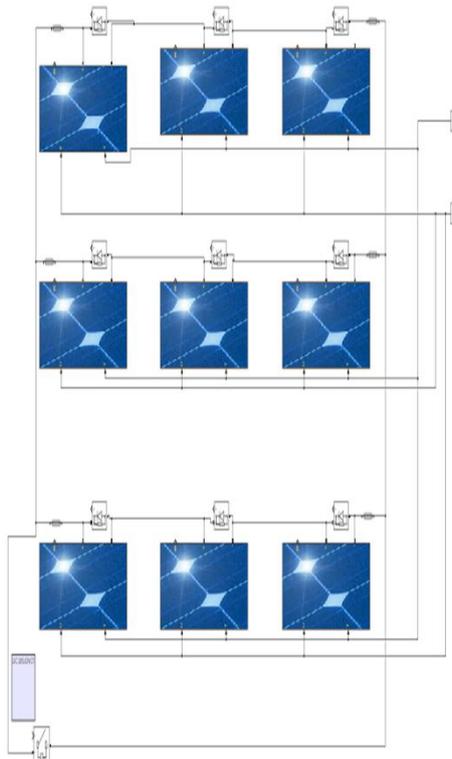


Figure 17. Les éléments de protection des panneaux solaires.

## 8. Les groupes électrogènes

### 8.1 Généralité et définition

Dans le cas des installations à sources d'énergies renouvelables autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage et/ou d'ajouter un ou plusieurs groupes électrogènes afin d'assurer la continuité dans la fourniture de l'énergie électrique. Les générateurs diesel jouent un rôle non négligeable dans les systèmes hybrides. Leur intégration offre une source d'énergie rapidement disponible et fiable, qui permet de réduire considérablement la taille de l'installation solaire.



**Figure 18. Groupe électrogène.**

Le groupe électrogène est une machine qui utilise des sources d'énergie conventionnelles, en particulier le diesel, pour produire de l'électricité. Il se compose d'un moteur thermique, d'un alternateur, d'un boîtier de commande et d'accessoires. Lorsque le groupe électrogène démarre, le moteur commence à tourner, en tournant il entraîne avec lui l'alternateur, qui se compose d'un rotor composé d'enroulements entraînés par le moteur et d'un stator fixe composé d'un ensemble de 3 bobines. L'induit et le circuit magnétique du stator. Lorsqu'il tourne, le rotor génère un flux magnétique dans le stator, qui est converti en énergie électrique au niveau du stator.

Un groupe électrogène est une machine constituée de deux grandes parties [29] :

- Une partie motrice qui fournit l'énergie mécanique, récupérée en bout d'un arbre sous forme rotative à partir de la transformation de l'énergie chimique d'un carburant. C'est le cas des moteurs thermiques, des groupes Diesel ou à Essence.
- Une seconde partie appelée génératrice qui convertit en énergie électrique,

l'énergie mécanique rotative ainsi recueillie sur l'arbre de la partie motrice.

## 8.2 Les différentes parties d'un groupe électrogène

### 8.2.1 Moteur diesel

Le moteur diesel du groupe électrogène est constitué principalement des unités suivantes nécessaires au fonctionnement du moteur :

- Unité de pression d'huile : installée au-dessus du filtre à huile, elle mesure la pression d'huile du moteur.
- Unité de température du liquide de refroidissement : située sous le couvercle du thermostat, elle détecte la température du liquide de refroidissement.
- Les dispositifs de protection du moteur sont très importants puisqu'ils actionnent une alarme ce qui oblige d'arrêter le moteur [30].

### 8.2.2 Alternateur

L'alternateur est composé d'un rotor qui entre en mouvement grâce au moteur. Il tourne autour d'un stator, qui contient un circuit magnétique. Ce mouvement crée un champ magnétique. Le stator transforme le flux magnétique en énergie électrique [30].

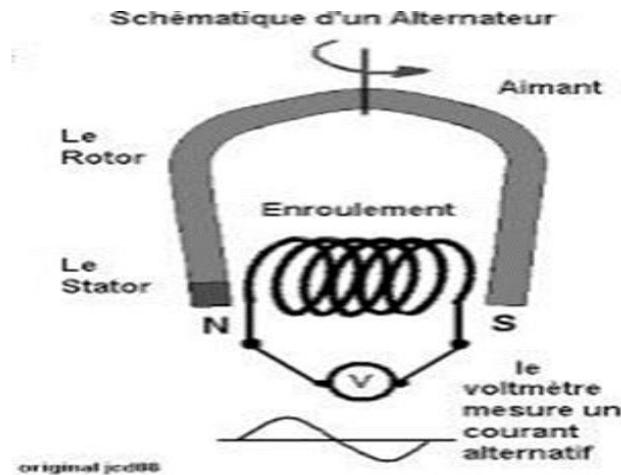


Figure 19. Schématique d'un alternateur.

• **Stator** : comprend des tôles magnétiques acier à faibles pertes, assemblées sous pression. Les tôles magnétiques sont bloquées axialement par un anneau soudé. Les bobines du stator sont insérées et bloquées dans les encoches puis imprégnées de vernis et polymérisées.

L'inducteur d'excitateur comprend un élément massif et un bobinage.

Le système d'excitation est fixé sur le palier arrière de la machine. Le bobinage est constitué de fils de cuivre.

•**Rotor** : la roue polaire comprend un paquet de tôles d'acier, découpées et frappées pour reproduire le profil des pôles saillants. L'empilage des tôles est terminé par des tôles de grande conductivité électrique.

### 8.2.3 L'armoire de contrôle

Contient les commandes de démarrage et d'arrêt du groupe électrogène. La puissance d'un groupe électrogène se mesure en watts. Plus un groupe électrogène est puissant, plus son rendement sera élevé. Les appareils les plus modernes permettent d'adapter leur puissance selon la consommation réelle. [31]

### 8.3 Les classes de puissance

La puissance d'un groupe électrogène est définie comme la puissance disponible aux bornes de l'alternateur, déduction faite de la puissance électrique absorbée par les auxiliaires essentiels [30]. Elle s'exprime en kW, à la fréquence de définition et sous un facteur de puissance de 0,8.

Trois types de puissances sont définis pour les groupes électrogènes [32] :

- La puissance continue correspond à la puissance que le groupe est capable de fournir en service continu, pendant un nombre illimité d'heures par an, tout en respectant les arrêts normaux de maintenance et dans les conditions ambiantes définies ;
- La puissance principale correspond à la puissance maximale que peut fournir le groupe sous une charge variable pendant un nombre illimité d'heures par an et dans les conditions ambiantes définies. La puissance moyenne admissible sur une période de 24 heures, ne doit pas être supérieure à une fraction de la puissance principale ;

La puissance pour utilisation limitée correspond à la puissance maximale que peut fournir le groupe avec une durée annuelle limitée à 500 heures et une marche continue maximale de 300 heures, en respectant les arrêts pour maintenances. Toutefois, le fonctionnement dans ces conditions peut affecter la durée de vie du groupe.

### 8.4 Classes d'application

Un groupe électrogène est défini en fonction des exigences de son utilisation. Il existe quatre classes d'utilisation des groupes électrogènes [32].

- **La classe G1** : définie pour l'alimentation des charges ne nécessitant que des contraintes mineures en tension et en fréquence. Exemple : éclairage et charges électriques.
- **La classe G2** : définie pour l'alimentation de charges nécessitant des caractéristiques proches de celle du réseau public ; sur application brutale de la charge, des fluctuations temporaires en tension et fréquence sont admises. Exemples : éclairages, pompes, ventilateurs, ...
- **La classe G3** : définie pour des exigences sévères en tension, en fréquence et en Forme d'onde. Exemple : charges régulées par thyristors, télécommunication.
- **La classe G4** : définie pour des exigences en tension, en fréquence et en forme d'onde exceptionnellement sévères. Exemple : systèmes informatiques.

**Tableau 2. Famille d'application des groupes électrogènes [32].**

Vitesse de rotation	Type	Puissances	Applications
3000 tr/min	Rapide	Faible	Domestiques-secours
900 < N < 1800 tr/min	Rapide	Moyenne < 5000 kVA	Production-secours
350 < N < 900 tr/min	Semi Rapide	Forte 4 < P < 20 MVA	Production-secours
N < 350 tr/min	Lent	Forte	Production

## 9. Les différents types de configurations des systèmes hybrides PV/GE

En général, les générateurs photovoltaïques fonctionnent en parallèle ou en alternance avec des générateurs diesel. Il existe trois configurations principales, chacune avec ses avantages et ses inconvénients.

- Système hybride PV- GE série.
- Système hybride PV- GE Commuté.

Système hybride PV- GE parallèle.

Nous présenterons ici, les avantages et les inconvénients de chaque configuration :

### 9.1 Configuration PV/GE série

Dans cette configuration, l'énergie produite par le générateur diesel est d'abord redressée puis convertie en courant alternatif pour alimenter la charge, ce qui entraîne des pertes de

conversion importantes. Lorsque l'énergie générée et stockée par le champ photovoltaïque est suffisante pour répondre aux exigences de la charge, le moteur diesel est déconnecté. Le courant continu fourni par le champ magnétique et la batterie est converti en courant alternatif par un onduleur. Aussi, il est important de noter que dans la plupart de ces systèmes, puisque la majeure partie de l'énergie est transférée par la batterie, l'efficacité du système est réduite, augmentant ainsi le nombre de cycles de charge-décharge [33].

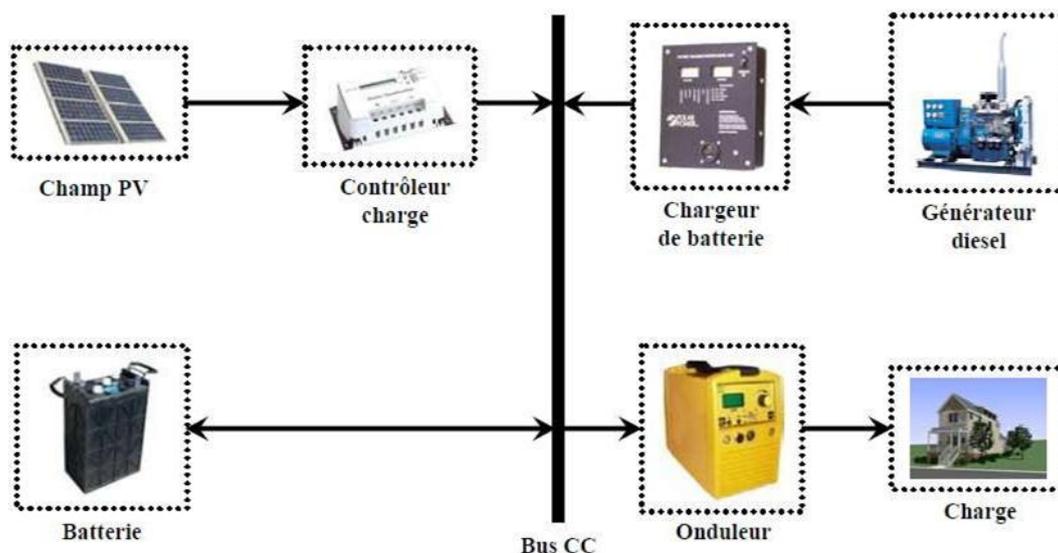


Figure 20. Système hybride PV - Diesel série.

Les avantages de cette configuration sont :

- La mise en marche du groupe électrogène ne cause pas d'interruption de l'alimentation de la charge ;
- La puissance du groupe électrogène peut être optimale lorsqu'elle est proche de celle de la charge et qu'elle permet de charger les batteries ;
- Le système électrique est simplifié par l'absence de changement de la source d'électricité en courant alternatif.

Les inconvénients de cette configuration sont :

- Le rendement total du système est faible car le courant fourni par le groupe électrogène est converti en courant continu via un redresseur pour alimenter les batteries puis en alternatif par l'onduleur pour alimenter la charge ;
- La détérioration des onduleurs provoque l'arrêt complet de l'alimentation électrique car la charge est alimentée exclusivement par le champ PV et les batteries, via ces onduleurs dimensionnés à cet effet ;
- L'onduleur ne peut pas travailler en parallèle avec le groupe électrogène, c'est

pourquoi il doit être dimensionné pour satisfaire la charge maximale possible ;

- La durée de vie de la batterie est diminuée à cause de l'augmentation du nombre de cycles charge ou de décharge.

## 9.2 La configuration PV/GE parallèle

Ici toutes les sources peuvent alimenter la charge séparément à faible et moyenne demande car les deux sources d'énergie sont dimensionnées pour des pourcentages bien définis de la charge. Mais également en combinant les sources, elles peuvent faire face à la puissance maximale de la charge. C'est à dire coupler les différentes sources d'énergies et ainsi diminuer leur puissance respective. Dans cette architecture, le champ photovoltaïque produit tant qu'il y a de l'ensoleillement, contrairement au générateur diesel qui fonctionne en permanence car il constitue le réseau pour les onduleurs [34–35].

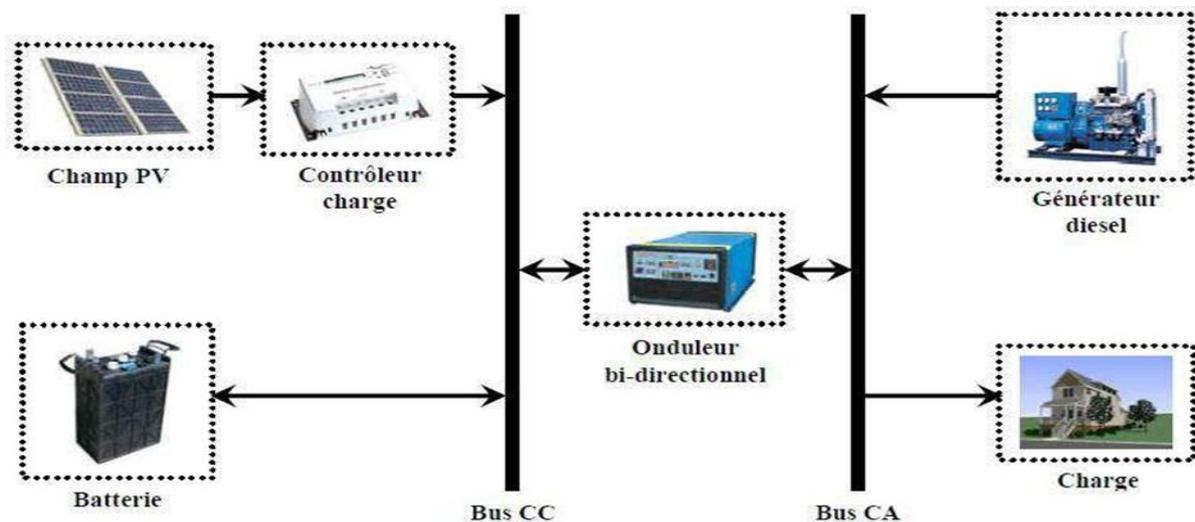


Figure 21. Système hybride PV - Diesel parallèle.

Les avantages sont :

- Un meilleur rendement du système, car les sources fonctionnent avec une puissance plus proche de leur puissance nominale ;
- Possibilité de synchroniser le PV avec le groupe électrogène, ce qui permet une meilleure flexibilité du système ;
- Les puissances nominales des différents éléments peuvent être diminuées par rapport aux puissances nominales dans les autres configurations, en alimentant toujours la même charge.

Les inconvénients de cette configuration sont :

- Une fréquente déconnexion du PV du système dû aux creux de tension et aux fortes

variations de fréquence ;

- Une très faible durée de vie des batteries ;
- Une faible pénétration solaire (non optimisée).

### 9.3 La configuration PV/GE commutée

Dans cette configuration, le champ PV et le groupe électrogène ne peuvent pas fonctionner simultanément, ils sont dimensionnés à cet effet pour satisfaire chacun toute la charge. Lorsque le niveau de charge des batteries est tel que la demande ne peut être satisfaite par le champ solaire, ce dernier est déconnecté de l'alimentation des charges et le groupe électrogène est mis en marche pour alimenter directement les charges. En cas de surplus d'énergie, il complète la charge de la batterie. Le groupe électrogène est arrêté lorsque la demande peut être satisfaite par le champ solaire et les batteries. L'inversion de source se fait manuellement.

Dans cette configuration les pertes de conversion sont réduites par rapport à la précédente car le groupe électrogène alimente directement la charge [34–35].

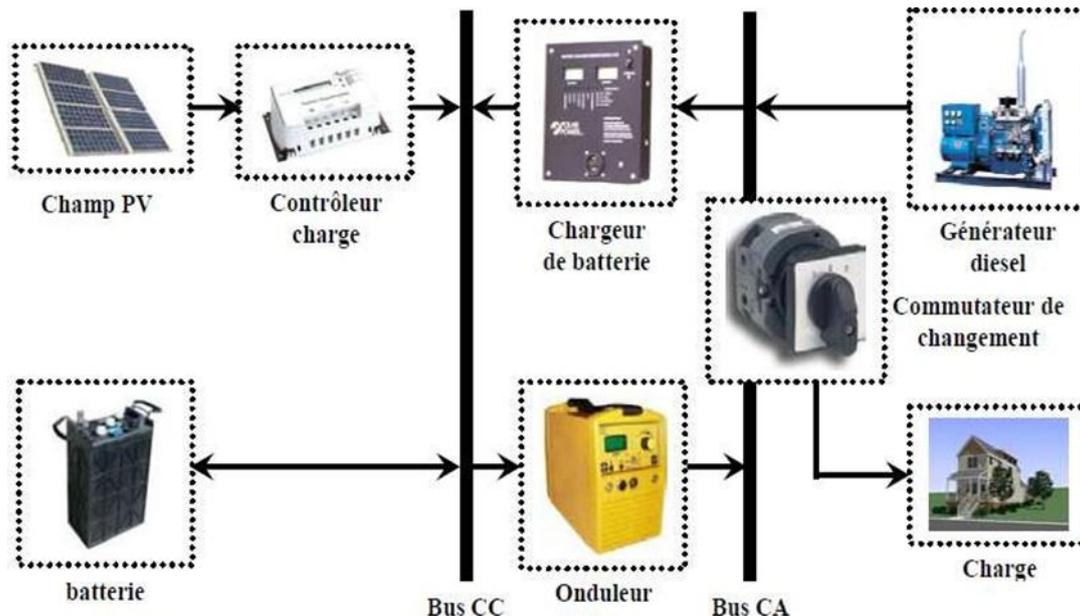


Figure 22. Système hybride PV - Diesel commuté.

Les avantages de cette configuration sont :

- La charge peut être alimentée soit par le groupe électrogène, soit par l'onduleur alimenté par le photovoltaïque ou la batterie ;
- Le groupe électrogène peut alimenter directement la charge, ce qui augmente le rendement du système et diminue la consommation de carburant ;
- Principalement dans cette configuration les pertes de conversion sont réduites par

rapport à la configuration série car le groupe électrogène alimente directement la charge.

Les inconvénients sont :

- Coupure instantanée de l'alimentation lors de la commutation des sources ;
- Le générateur et l'onduleur sont dimensionnés pour la puissance maximale de la charge, ce qui réduit leur rendement en fonctionnement à faible charge.

### 10. Classification des systèmes hybrides

Le champ d'application des systèmes hybrides est trop vaste à cause des multiples structures, cette richesse en structure mène la tâche de classification des systèmes un peu compliqué, on peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance selon le tableau suivant [36].

**Tableau 3. Classification des SH par gamme de puissance.**

<b>Puissance du SH en KW</b>	<b>Application</b>
<b>Faible &lt; 5</b>	Système autonome : station de télécommunication, pompage de l'eau, autres applications isolées.
<b>Moyenne entre 10 et 250</b>	Micro réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, des zones rurales...
<b>Grande &gt; 500</b>	Grand réseaux isolés

### 11. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu généralité sur les systèmes hybride et ses composants, avec un rappel sur l'énergie solaire et le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au silicium, ainsi que le générateur (GPV) tel que nous l'avons connu le groupe électrogène et ses parties. Enfin nous avons présenté trois types de configurations des systèmes hybrides PV/GE.

# *Chapitre II. Les convertisseurs et la commande MPPT*

## 1. Introduction

Dans ce chapitre nous avons fait l'étude de les convertisseurs DC-DC (hacheur) et DC-AC (l'onduleur) son commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.

## 2. Étage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge

Un générateur photovoltaïque présente des caractéristiques I-V non linéaires avec un point de puissance maximum MPP. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge comme présenté dans la figure (23).

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 puissance maximale disponible.

Rôle du convertisseur DC-DC fait fonctionner les modules à leur point de puissance optimale, quelques soient l'éclairement et la charge pour délivrer cette puissance à l'utilisation [36].

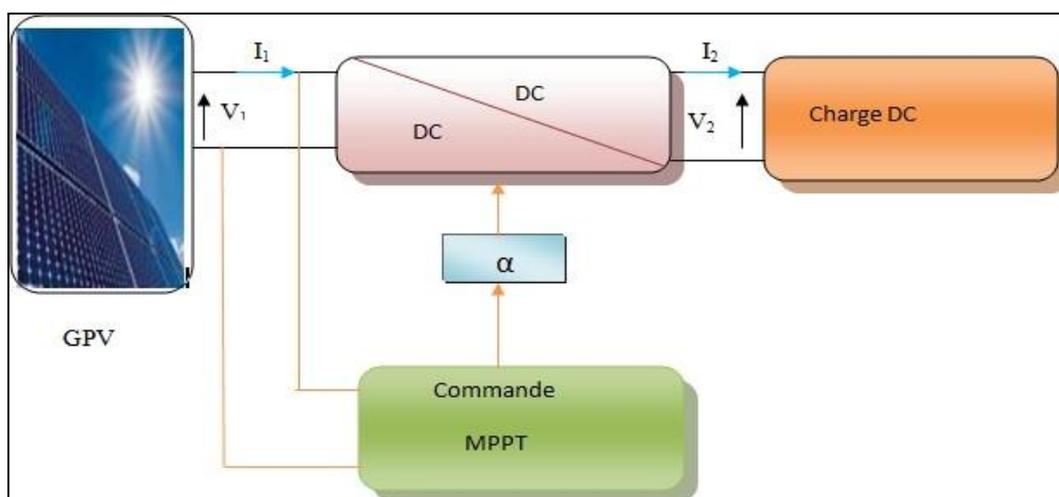


Figure 23. Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

### 3. Convertisseurs DC-DC (Les Hacheurs)

Le hacheur ou convertisseur continu-continu est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue. Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit dévolteur. Dans le cas contraire, il est dit survolteur. Ils se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance dans le cas idéal, c'est pour cette raison que les hacheurs ont de bons rendements. Généralement le commutateur est un transistor MOSFET qui travaille en mode bloqué-saturé.

Si le commutateur est bloqué, son courant est nul, il ne dissipe donc aucune puissance ; s'il est saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque nulle et par conséquent la puissance perdue sera très petite.

Le commutateur du convertisseur est commandé par un signal PWM (Pulse Width Modulation) ou MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion), avec une fréquence de commutation FS fixe et un rapport cyclique  $\alpha$  variable [37].

#### 3.1 Type de convertisseurs DC-DC

Il y a un plusieurs topologies des convertisseurs DC-DC. Ils sont classés par catégorie selon que la topologie isolée ou non isolée. Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence, elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage. Les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le Fly back, en demi-pont et en pont complet. Dans les applications photovoltaïques (PV), les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté [38].

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu [38]. Ces topologies sont encore classées en trois catégories :

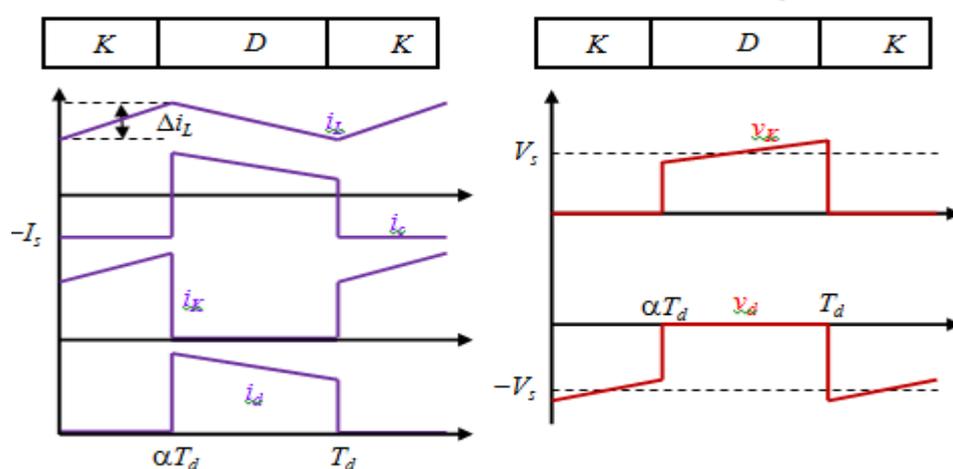
- Abaisseurs (Buck).
- Elévateurs (Boost).

Elévateurs - Abaisseurs (Buck-Boost). Dans cette partie nous nous sommes intéressés par le hacheur abaisseur (Buck) et le hacheur élévateur (Boost).

##### 3.1.1 Convertisseur Boost

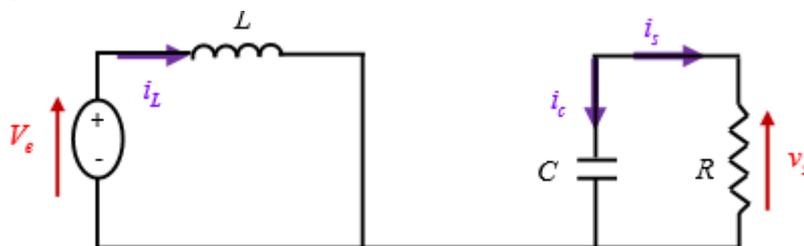
On considère un convertisseur DC-DC de type Boost. Il est composé essentiellement d'un interrupteur  $K$  (comme IGBT ou MOSFET) et d'une diode  $D$ . L'interrupteur  $K$  est

commandé par un signal à modulation de largeur d'impulsion (MLI) de période de découpage fixe  $T_d$  et de rapport cyclique variable  $\alpha$ . La conduction des deux interrupteurs est complémentaire, quand K est fermé D est ouvert ; et quand K est ouvert, D est fermé. Durant chaque période, K est fermé de l'instant 0 à  $\alpha T_d$ . On distingue deux modes de fonctionnement selon que le courant dans l'inductance s'annule (conduction discontinue) ou pas (conduction continue). On s'intéresse au second cas qui est le plus important. La (figure 24) donne le schéma de principe de ce convertisseur, les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode ainsi que les formes d'ondes de ses courants (à gauche) et tensions (à droite).

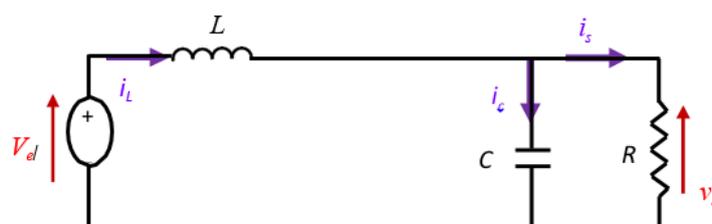


**Figure 24. Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Boost.**

Lorsque l'interrupteur K est fermé ( $0 < t < \alpha T_d$ ), le circuit de convertisseur devient (figure 25)



**Figure 25. Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé.**



**Figure 26. Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert.**

On remarque qu'on peut contrôler la tension de sortie du convertisseur en faisant varier sa tension d'entrée ou son rapport cyclique. Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, alors le montage fonctionne en élévateur de tension.

En appliquant le principe de conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur, on peut établir la valeur moyenne du courant dans l'inductance en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique :

$$I_L = \frac{1}{1-\alpha} I_s$$

De l'expression (2.5), on exprime l'ondulation de courant dans l'inductance :

$$\Delta i_L = \frac{\alpha V_e}{L} T_d = \frac{\alpha V_e}{L f}$$

Avec  $f$  la fréquence de découpage.

Pendant la première séquence de fonctionnement ( $0 < t < \alpha T_d$ ), seul le condensateur donne de l'énergie à la charge, on peut écrire :

$$C \frac{dV_s}{dt} = -i_s$$

Alors l'ondulation de la tension de sortie peut être exprimée par :

$$\Delta V_s = \frac{\alpha I_s}{C f} = \frac{\alpha V_e}{(1-\alpha) R C f}$$

D'après l'analyse des deux séquences de fonctionnement, on constate que les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes en courant et en tension.

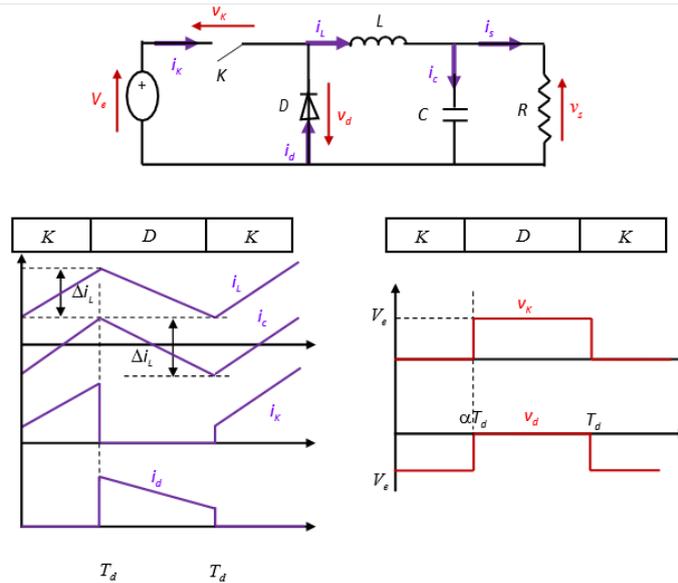
$$i_{k, \max} = i_{d, \max} = I_{\max} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\Delta i_L}{2}$$

$$V_{k, \max} = |V_{d, \max}| = V_{s, \max} = V_s + \frac{\Delta V_s}{2} = \frac{V_e}{1-\alpha} + \frac{\Delta V_s}{2}$$

### 3.1.2 Convertisseur Buck

On procède de la même manière dans l'étude du convertisseur Buck. La figure 27 montre la structure et les formes d'ondes du courant et de la tension de ce convertisseur qui est caractérisé par la disposition en série de l'interrupteur avec la source.

La tension de sortie en valeur moyenne, l'ondulation de courant dans l'inductance et l'ondulation de la tension de sortie sont donnés respectivement par:



**Figure 27. Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck.**

#### 4. Commande MPPT

Un MPPT, (Maximum Power Point Tracking) est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens [22].

##### 4.1 Principe du MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum ( $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ) [22].

##### 4.2 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche

###### 4.2.1 MPPT Indirect

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées ( $I_{sc}$  ou  $V_{oc}$ ), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes en se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur [41-42].

Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques.

#### 4.2.2 MPPT directs

Ces méthodes utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures. L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des GPV. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode « Perturb & Observe », l'incrément de conductance... [16][8].

### 5. Techniques MPPT différents

Il existe différentes techniques utilisées pour le suivi du point de puissance maximale. Uns des plus populaires techniques sont les suivantes:

- 1) Perturber et Observer (courses de côtes méthode)
- 2) Méthode de conductance incrémentale
- 3) Courant fractionnel de court-circuit
- 4) Tension fractionnel en circuit ouvert
- 5) Les réseaux de neurones
- 6) La logique floue

Le choix de l'algorithme dépend de la complexité en temps de l'algorithme prend pour suivre MPP, le coût de la mise en œuvre et la facilité de mise en œuvre.

#### 5.1 Perturber & Observer

Perturber & Observer (P & O) est la méthode la plus simple. En cela, nous utilisons un seul capteur, qui est le capteur de tension, pour détecter la tension photovoltaïque et donc le coût de mise en œuvre est moins et donc facile à mettre en œuvre.

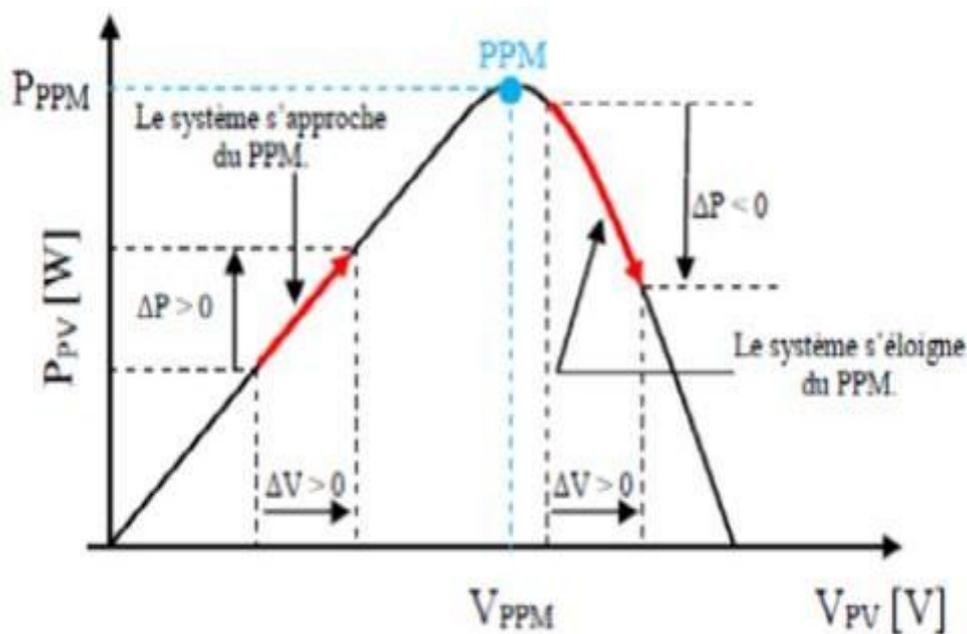
La complexité en temps de cet algorithme est très inférieure mais en arrivant très proche à IMPPt ne s'arrête pas à la MPP et continue à perturber les deux directions. Lorsque cette arrive que l'algorithme a atteint tout près de la MPP et nous pouvons définir une erreur appropriée limiter ou peut utiliser une fonction d'attente qui finit par augmenter la complexité en temps de l'algorithme.

##### 5.1.1 Principe de la technique "Perturb and Observe" (P&O)

La méthode de perturbation et d'observation P&O est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  respectivement. Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température.

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension  $V_{PV}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{PV}$  qui en résulte ainsi, comme l'illustre la figure (28), 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. À partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P_{PV}$  ( $V_{PV}$ ), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire 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 [42].

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance  $P_{PV}$  augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM. La figure (29) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type (P&O), où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension [43].



**Figure 28. Caractéristique  $P(V)$  d'un panneau solaire.**

Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant.

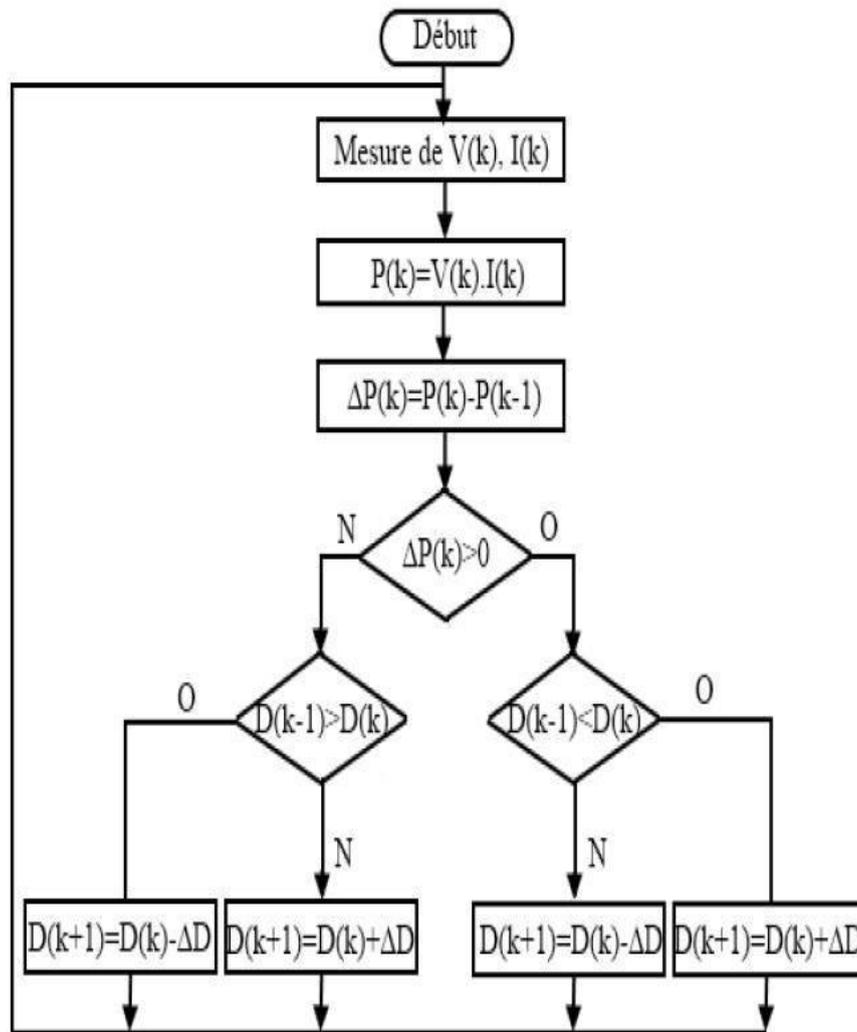


Figure 29. Algorithme MPPT perturbation et observation (P&O).

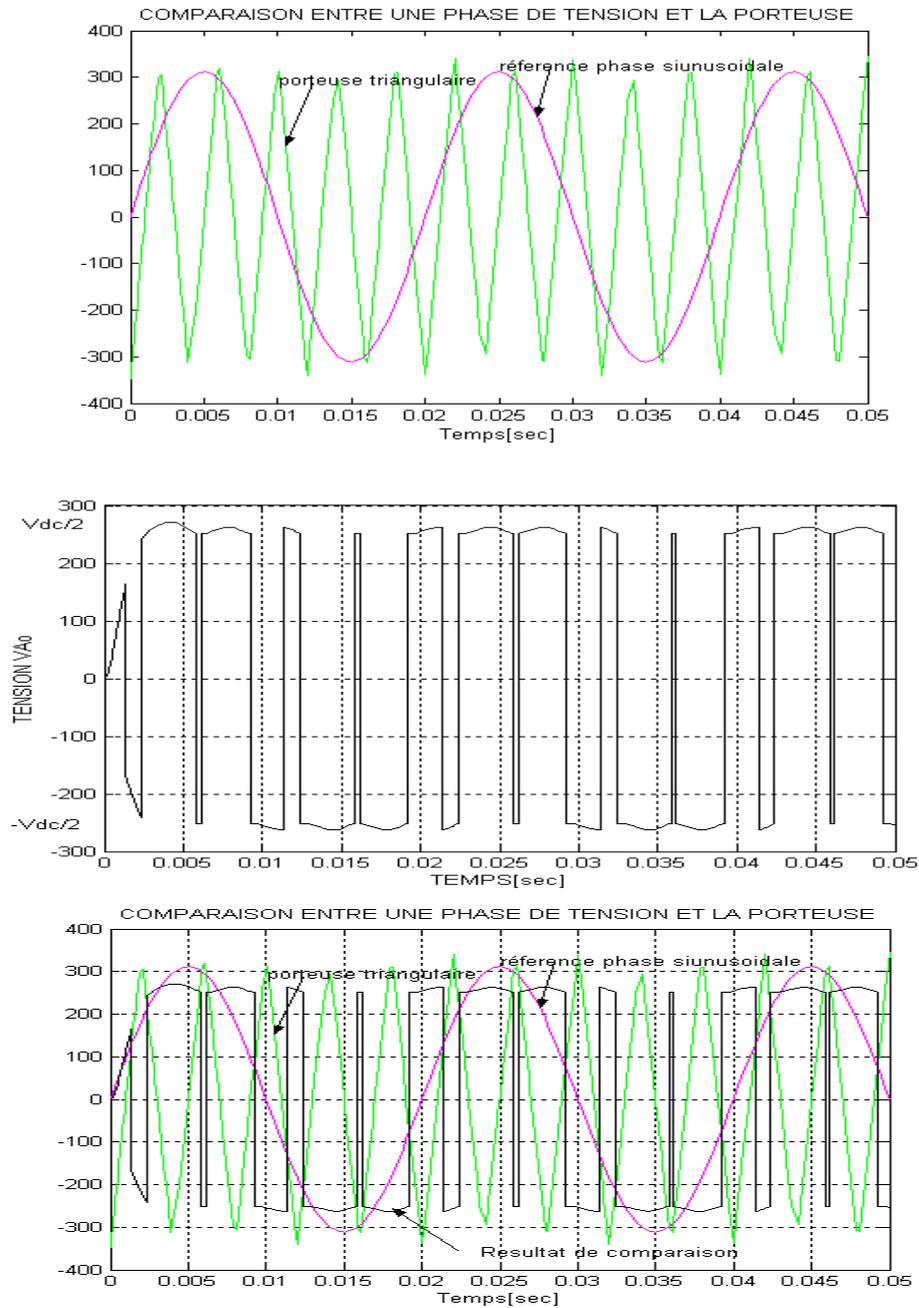
## 5.2 Principe du MLI (PWM)

Dans les convertisseurs DC-DC, la tension de sortie doit être régulée pour être constamment égale à une tension de référence, du fait que la tension d'alimentation  $V$  et les caractéristiques de la charge peuvent varier.

Donc il faut penser à une forme proche à notre alimentation triphasée équilibrée, la manière de faire cela et de prendre trois signaux de commandes (modulantes). Ces signaux sont les images des tensions que l'on souhaite appliquer sur chaque phase. Les tensions d'alimentation comme référence c'est-à-dire (amplitude constante et fréquence aussi constante), ces trois références (modulantes) seront comparées à une porteuse triangulaire, le résultat de cette comparaison nous donne des signaux à l'aide d'eux on peut commander les transistors de puissance, comme si les instants de commutation étaient déterminés par l'intersection de modulantes sinusoïdales avec la porteuse. C'est ainsi est piloté une phase de la machine. Les autres phases sont pilotées par des ensembles identiques déphasés de  $120^\circ$ . Cette méthode

s'appelle modulation de largeur d'impulsion triangle- sinusoïdales. C'est-à-dire l'onduleur va nous délivrer des impulsions de tension d'amplitude fixe mais de largeur variable[44].

**Le résultat de la comparaison entre l'onde de référence et la porteuse triangulaire**



**Figure 30. Le résultat de la comparaison entre l'onde de référence et la porteuse triangulaire.**

- Quand  $V_{référence} > V_{triangulaire} \rightarrow V_{AO} = V_{dc}/2$
- Quand  $V_{référence} < V_{triangulaire} \rightarrow V_{AO} = -V_{dc}/2$

Aussi, le convertisseur MLI sa tension de sortie à les caractéristiques suivantes :

- MLI fréquence est la même que la fréquence de  $V_{triangulaire}$

- L'amplitude est contrôlée par la valeur maximale de  $V_{référence}$
- La fréquence fondamentale est contrôlée par la fréquence de  $V_{référence}$ .
- L'indice de modulation ( $m_a$ ) rapport des amplitudes est définie par :

$$(m_a = V_{réf}/V_{tri} = \max(V_{A0})/V_{dc}/2).$$

L'indice de modulation ( $m_f$ ) rapport des fréquences est définie par : ( $m_f = f_{tri}/f_{réf}$ )

## 6. Convertisseurs DC-AC (L'onduleur)

Il a pour but de convertir le courant continu des panneaux photovoltaïque en courant alternatif (DC-AC), c'est un appareil électrique de haute technologie conçu pour répondre à toutes les exigences du réseau, comme la qualité, la sécurité et la fiabilité, et pour permettre un contrôle parfait du fonctionnement.

Il se présente sous la forme d'un boîtier métallique de petite dimension, muni d'un radiateur et doit être placé sur un support vertical (mur par exemple). Il n'émet aucun parasite électromagnétique et ne génère quasiment aucun bruit. Afin de limiter les pertes, il doit être placé le plus près possible des panneaux photovoltaïques.

L'onduleur arrête automatiquement de fonctionner lorsque le réseau est mis hors tension, une sécurité est en effet prévue afin de supprimer les risques d'électrocution lorsque des techniciens font une opération de maintenance sur le réseau.

### 6.1 Modélisation de l'onduleur de tension

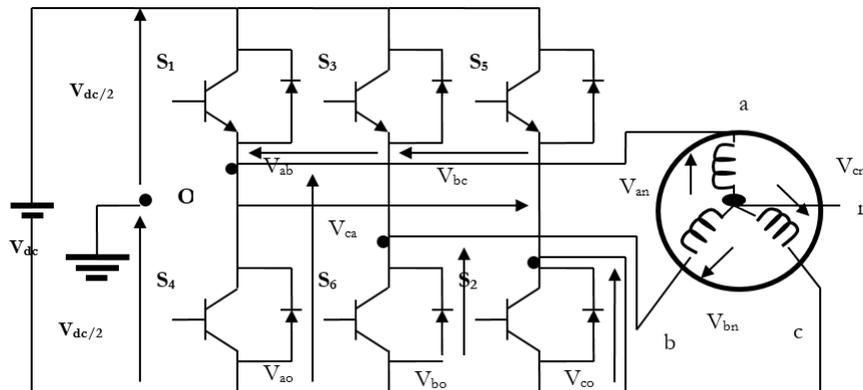


Figure 31. Schéma d'un onduleur triphasé.

Les interrupteurs sont supposés idéales (chute de tension à ces bornes est nulle)

La commutation des interrupteurs est instantanée ;

La charge est équilibrée (trois bobines de stator), couplée en étoile avec neutre isolé.

Les (IGBT) sont supposés des interrupteurs parfaits notés ( $S_i$  avec  $i=1, \dots, 6$ ).

Les Diodes par ( $D_i$  avec  $i=1, \dots, 6$ ).

Chaque interrupteur à deux états booléennes soit fermé ou ouvert par exemple l'interrupteur  $N^{\circ}=1$

$(S_1 = 0)$  ou  $(S_1=1)$ .

Donc quand  $(S_1 =0)$  le courant  $(I=0)$  et la tension  $(V \neq 0)$  interrupteur ouvert

Ou  $(S_1 =1)$  le courant  $(I \neq 0)$  et la tension  $(V=0)$  interrupteur fermé.

Nous avons d'après la figure précédente les tensions alternatifs  $V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$  : tensions des phases de la charge.

$V_{no}$ : Tension de neutre de la charge par rapport au point fictif  $\ll o \gg$ .

Notre charge est équilibrée donc :  $V_{an}+V_{bn}+V_{cn}= 0$ .

On peut écrire les relations de charles, comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ao}=V_{an}+V_{no} \\ V_{bo}=V_{bn}+V_{no} \\ V_{co}=V_{cn}+V_{no} \end{array} \right.$$

Les tensions composées  $V_{ab}, V_{bc},$ et  $V_{ca}$  sont obtenus par les relations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ab}= V_{ao}+V_{ob}= V_{ao}-V_{bo} \\ V_{bc}= V_{bo}+V_{oc}= V_{bo}-V_{co} \\ V_{ca}= V_{co}+V_{oa}= V_{co}-V_{ao} \end{array} \right.$$

Tel que  $V_{ao}, V_{bo},$  et  $V_{co}$  : les tensions d'entrée de l'onduleur ou tension continues . Elles sont référencées au point milieu  $\ll o \gg$  ou disons un diviseur de tension fictif à l'entrée.

$$V_{no}= 1/3(V_{ao}+V_{bo}+V_{co}).$$

## 7. Système de stockage

Il y a nécessité de stockage à chaque fois que la demande est inférieure à l'apport d'énergie externe. En effet, la demande est fonction de la charge à alimenter, l'apport externe quant à lui est périodique (alternance jour/nuit) et aléatoire. C'est la différence entre la demande et l'apport énergétique qui exige un stockage. Le stockage de l'énergie n'est envisageable qu'en courant continu par :

- Accumulation d'énergie dans le champ électrique d'un condensateur ou d'une super capacité ;
- Dans le champ magnétique d'une bobine à supraconduction ;
- Ou sous forme d'énergie chimique dans un accumulateur électrochimique.

C'est cette dernière forme de stockage qui sera utilisée dans la suite de l'étude. Du fait de la nature aléatoire des ressources renouvelables, les accumulateurs doivent pouvoir résister sans dommage à de nombreux cycles de charge et décharge.

Le stockage d'énergie est un facteur clef dans un système d'énergie hybride en site isolé. Dans la plupart des cas, les batteries représentent la technologie la plus rentable [6]. L'intérêt de l'utilisation des systèmes de stockage est la minimisation du temps de fonctionnement du générateur diesel et la réduction des émissions des gaz. Cela permet d'exploiter au maximum les ressources renouvelables disponibles en rechargeant les batteries. Le stockage remplit en outre, la fonction de source « tampon », en attendant que le groupe électrogène prenne le relais de la fourniture [3], afin d'éliminer les fluctuations de puissances à court terme ou de répondre à une brusque demande d'électricité.

Comme système de stockage d'énergie, on distingue les batteries au plomb (Pb), les batteries au nickel-cadmium, au nickel-zinc, nickel-fer et au lithium. Cependant la technologie plomb-acide est la plus utilisée puisqu'elle bénéficie des avantages tels son faible coût et sa disponibilité dans le commerce. Par contre, les batteries nickel-cadmium coûtent plus chères, et sont utilisées dans les applications où la fiabilité est vitale.

## 8. Les batteries

Les générateurs photovoltaïques autonomes ont besoin d'un stockage électrique pour assurer une fourniture d'énergie quasi permanente quelles que soient les séquences d'ensoleillement.

Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie générée dans le domaine des modules photovoltaïques. Chaque fois que la demande d'énergie évolue dans le temps par rapport à l'approvisionnement solaire.

Dans un système photovoltaïque, la batterie remplit trois fonctions importantes :

- Autonomie : une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps, même la nuit ou par temps nuageux ;
- Courant de stockage : une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants, c'est-à-dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV. Ceci est nécessaire pour faire démarrer les moteurs et les autres appareils requérant un courant de démarrage de 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation ;
- Stabilisation de la tension : une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée [45].



Figure 32. Batterie solaire.

### 8.1 Types de batteries

Les deux types de batterie utilisés le plus couramment dans les systèmes photovoltaïques sont les batteries avec accumulateurs au plomb-acide (Pb-acide) et les batteries avec accumulateurs au nickel-cadmium (ni-cd).

**Remarque :** les batteries avec plomb sont les plus utilisées en raison de leur faible coût et d'une maturité étayée par un retour d'expérience conséquent. Cette technologie est par ailleurs largement disponible dans le commerce.

Tableau 4. Différents types de batteries utilisables pour les applications PV.

Type de batteries	Capacités	Particularités
Batteries formées d'éléments stationnaires à plaque positive tabulaire (2V) et grande réserve d'électrolyte	1000 à 3000 Ah	Bien adaptées aux cycles journaliers et saisonniers rencontrés dans les systèmes photovoltaïques
Batteries formées d'éléments stationnaires à plaques planes (2V) et grande réserve d'électrolyte	10 à 3000 Ah	Durée de vie plus courte que la précédente (nombre de cycles inférieur)
Batteries plomb étanches sans entretien (2V, 6V et 12V)	10 à 500 Ah	Nécessite très peu de maintenance
Batteries monobloc dérivées de la batterie automobile	10 à 500 Ah	Aptitude au cyclage moins élevée Réservées aux petites installations

## 8.2 Installation des éléments de la batterie

L'utilisation de la batterie peut présenter certain danger, comme le risque d'explosion, et dégagement de gaz toxiques (brouillard d'acides sulfurique). En outre, leur durée de vie et le bon fonctionnement de toute l'installation dépend aussi bien des conditions d'installation que d'exploitation.

Compte tenu de cela, l'installation de ces éléments doit être effectuée avec grand soin. Ils doivent être installés dans un local approprié à l'abri des intempéries, surtout quand le produit de la capacité (en Ah) par la tension (en V) de décharge est supérieur à 1000. Ce local doit satisfaire à certaines exigences qui sont les suivantes :

- D'être bien ventilé garantir la circulation des gaz émanent de ces derniers ;
- D'être à une température proche de 25°C, pour assurer le bon fonctionnement des éléments. Ainsi la température a une influence notable sur leur fonctionnement : si elle est trop élevée, l'activation des réactions électrochimiques provoque une usure rapide des plaques ; par contre, si elle est très basse, le rendement est fortement diminué ;
- De ne pas installer des équipements ou matériels pouvant provoquer un arc électrique

## 8.3 Caractéristiques des batteries

Les caractéristiques principales d'une batterie de stockage électrochimique sont [5]:

- Capacité en Ampère heure : c'est le produit de l'intensité en Ampère (A) du courant qu'elle débite et de la durée en heure (h) pendant laquelle ce courant est débité. En pratique, la capacité d'une batterie est relative et dépend des conditions d'utilisation. Dans les applications automobiles et photovoltaïques, les capacités se définissent respectivement par rapport à une décharge en 10h (C10) et en 100h (C100). Une batterie de capacité 100 Ah par exemple peut fournir en 10 heures un courant de 10 A. Pour une décharge en 100 heures, cette même batterie peut fournir un courant de 1,4 A. Ce qui lui confère une capacité de 140 Ah. On dira de cette batterie qu'elle est de 100 Ah à C/10 et de 140 Ah à C/100. Par ailleurs, la capacité nominale augmente avec la température de 0,7%/°C [10] dans la plage de température autorisée et diminue avec le vieillissement et le nombre de cycle.
- La tension d'usage : la tension d'usage de la batterie est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.
- Profondeur de décharge : c'est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge. A cet effet, on distingue les batteries à

cycles peu profonds pouvant se décharger jusqu'à 25 % de leur capacité nominale et les batteries à cycles profonds en occurrence les batteries utilisées dans les applications photovoltaïques et dont la profondeur de décharge peut atteindre 80%.

- La tenue en cycle : la tenue en cycle est le nombre de cycle que peut supporter la batterie avant de se détériorer. Elle s'exprime en nombre de charge/décharge et dépend fortement de la profondeur de décharge. Typiquement la tenue en cycle peut varier de 400 cycles à 80% de décharge à 2000 cycles à 40% de décharge.
- La durée de vie : elle est exprimée en nombre d'années et dépend foncièrement des conditions de fonctionnement de la batterie. Pour un fonctionnement au voisinage de 25°C, elle varie de 2 à 7 ans pour les batteries au plomb et de 10 à 25 ans pour les batteries au nickel-cadmium.
- Le rendement d'utilisation : c'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à celui-ci. Pour une batterie au plomb ce rapport est supérieur à 90%.
- L'autodécharge : l'autodécharge est la perte de la capacité de la batterie au repos. Elle s'exprime en pourcentage (%) par mois et augmente avec le vieillissement et la température. Dans les applications photovoltaïques, on utilise des batteries à faible taux d'autodécharge typiquement de 5%/mois pour les batteries au plomb et 30%/mois pour les batteries de type nickel-cadmium.

## 9. Système de régulation

Les systèmes de régulation de charge permettent de contrôler la charge et la décharge d'une batterie afin de maximiser sa durée de vie. Le régulateur réduit le courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée. Le régulateur de charge assure deux fonctions principales :

- La protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes.
- L'optimisation du transfert d'énergie du système.

La tension aux bornes de la batterie est l'indication sur laquelle s'appliquera le régulateur pour assurer sa fonction.

## 10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les convertisseurs statiques (DC-DC et DC-AC) utilisé dans les systèmes PV, et nous avons fait la modélisation du convertisseur abaisseur (Buck), élévateur (Boost) et l'onduleur.

Ensuite, nous avons exposé brièvement la commande MPPT des convertisseurs, et la technique perturbation et observation (P&O). Après nous avons expliqué le principe du MLI(PWM) et nous avons présenté le système de stockage, les batteries et le système de régulation.

***Chapitre III. Présentation de la société SKTM***  
***Oued Elkebarit Souk Ahras***

## 1. Introduction

Ce chapitre va s'occuper de l'étude de cas de la centrale photovoltaïque Oued EL Kebrit, Une des 18 centrales réalisées dans le cadre du programme national des énergies renouvelables.

## 2. Présentation de La Société SKTM

Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida, par abréviation SKTM:

- Est une société de production d'électricité conventionnelle pour réseaux isolés du sud et des Energies Renouvelables pour le territoire national.
- SKTM est une société par actions avec un capital souscrit en totalité par Sonelgaz et dont le siège social est situé à Ghardaïa.
- **Actionnariat** : 100% filiale de la Holding SONELGAZ
- **Création de la société** : 07/04/2013.

### 2.1 Objectifs et missions

SKTM a été créée pour répondre à des enjeux stratégiques de l'heure. Il s'agit :

- Des spécificités qui caractérisent la gestion du parc de production Diesel des RIS (Réseaux Isolés du Sud).
- De satisfaire aux meilleures conditions de continuité et de qualité de service fourni aux populations des régions du sud du pays.
- De la volonté de concrétiser l'ambitieux programme national de développement des Energies Renouvelables, en mettant en valeur les potentialités énormes dont dispose notre pays, notamment l'étendue de son territoire et la durée d'ensoleillement.

SKTM est chargée principalement de :

1. L'exploitation des réseaux d'énergie électrique isolés du sud (production d'électricité en conventionnel) et des énergies renouvelables.
2. Le développement des infrastructures électriques du parc, de production des Réseaux Isolés du Sud, de l'Engineering, de la maintenance et de la gestion des centrales électriques relevant de son champ de compétence.
3. La commercialisation de l'énergie produite pour les filiales de la Distribution,

## 2.2 Réalisations

- Dix (10) stations de mesures ont été acquises et installées le premier semestre 2015, actuellement en exploitation au niveau des sites retenus conformément aux résultats des études satellitaires réalisées (Identification des sites éligibles). Il s'agit de : KHENCHELA, EL BAYADH, NAAMA, TIARET, EL GOLEA, TIMIMOUNE, M'SILA, LABREG, BATNA ET IN SALAH.

- Centrales installées : 24 Centrales (23 Centrales PV et 01 Centrale Eoliens).

**Tableau 5. Parc EnR SKTM (Décembre 2019).**

Centrales	Puissance	Production (GWh) installée (MW)
<b>Réseau Interconnecté Nord (RIN)</b>		
<b>OUED NECHOU _ GHARDAIA</b>	1,1	8,910
<b>SEDRET LEGHZEL _ NAAMA</b>	20	121,844
<b>OUED EL KEBRIT _ SOUK AHRAS</b>	15	84,915
<b>AIN SEKHOUNA _ SAIDA</b>	30	133,481
<b>DHAYA _ SIDI BEL ABBAS</b>	12	54,317
<b>AIN EL BEL 1 et 2 _ DJELFA</b>	53	241,368
<b>LEKHNEG 1 et 2 _ LAGHOUAT</b>	60	296,938
<b>LABIODH SIDI CHIKH _ EL-BAYADH</b>	23	116,270
<b>EI HEDJIRA _ OURGLA</b>	30	127,449
<b>AIN EL MELH _ MSILA</b>	20	100,297
<b>OUED EL MA _ BATNA</b>	02	5,606
<b>Réseau Pole IN SALAH - ADRAR – TIMIMOUNE (PIAT)</b>		
<b>Eolienne KABERTENE</b>	10,2	77,068
<b>ADRAR</b>	20	142,164
<b>KABERTENE</b>	03	21,995
<b>IN SALAH</b>	05	32,855
<b>TIMIMOUNE</b>	09	62,698
<b>REGGUEN</b>	05	32,472
<b>ZAQUIAT KOUNTA</b>	06	40,929
<b>AOULEF</b>	05	33,704
<b>Réseau Isolé Sud (RIS)</b>		
<b>TAMNRASSET</b>	13	85,609
<b>DJANET</b>	03	22,605
<b>TINDOUF</b>	09	39,34
<b>Total SKTM (EnR)</b>	<b>354,3</b>	<b>1882,540</b>

### 2.2.1 Projets en cours de réalisation

**Tableau 6. Projets En cours de réalisation.**

<b>Centrales</b>	<b>Puissance installée (MW)</b>
<b>IN GUEZZAM-TIN ZAOUATINE</b>	09
<b>DJANET-BORDJ OMAR IDRIS</b>	07
<b>BORDJ BADJI MOKHTAR-TIMIAOUINE</b>	12
<b>TALMINE ET TABELBALA</b>	11
<b>TINDOUF</b>	11

### 2.3 Les perspectives de SKTM

- La réduction de 9 % de la consommation globale du gaz,
- Atteindre 27% de la production nationale d'électricité grâce aux énergies renouvelables,
- Une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 7 à 22%, à l'horizon 2030
- SKTM envisage de continuer le système d'hybridation des centrales diesels et Turbines à Gaz existantes jusqu'à saturation de ces dernières,

Les centrales restantes de ce programme sont :

**Tableau 7. Les perspectives de SKTM.**

<b>Localités</b>	<b>Capacité PV (MWc)</b>	<b>L'année de mise en service</b>
<b>El Golea</b>	<b>25</b>	<b>2022</b>
<b>Béni Abbés</b>	<b>15</b>	<b>2022</b>
<b>Illizi</b>	<b>8</b>	<b>2022</b>
<b>Oum Lassel</b>	<b>1</b>	<b>2022</b>
<b>El Borma</b>	<b>1</b>	<b>2022</b>
<b>Tamanrasset</b>	<b>25</b>	<b>2023</b>
<b>Debdeb</b>	<b>2</b>	<b>2023</b>

<b>In Amenas</b>	<b>6</b>	<b>2023</b>
<b>Idless</b>	<b>2</b>	<b>2023</b>
<b>Bordj El Haoues</b>	<b>1</b>	<b>2023</b>
<b>Kerzaz</b>	<b>4</b>	<b>2023</b>
<b>Tindouf</b>	<b>10</b>	<b>2023</b>
<b>Total</b>	<b>100 MWc</b>	

### 3. Etude de Cas de la Centrale OUED EL KEBRIT

Dans le cadre de notre projet de fin d'étude nous avons effectué un stage pratique à une des centrales photovoltaïques actives dans la production national : Oued el Kebrit (OKP) dans la wilaya de Souk Ahras de 15 MWc qui s'inscrit dans le cadre du programme national des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique.

Les attentes de la réalisation de cette centrale sont :

- Diversification des sources de production de l'électricité et développement de moyens de production à partir des ressources renouvelables,
- Préservation des ressources primaires : économie des combustibles fossiles.
- Protection de l'environnement par la réduction des émissions des gaz à effet de serre.
- Participation à la production nationale de l'énergie électrique par l'injection dans l'étage 30KV du poste d'El Aouinet.

#### 3.1 Localisation Géographique du Site

La centrale photovoltaïque d'Oued Kebrit est située à 65 km au sud du chef-lieu de la Wilaya de Souk Ahras. Et à 07 km au nord de la daïra d'El Aouinet Wilaya de Tébessa.

- Coordonnées géographiques : 35°55'N et 7°52'E.
- Superficie : Trente et un (31) Hectares.



Figure 33. Plan de Situation de la centrale OKP.

### 3.2 Présentation Générale de la Centrale

Le tableau suivant résume quelque information sur la centrale OKP :

Tableau 8. Présentation générale de la centrale OKP.

<b>Puissance Installée</b>	<b>15 000 kWc</b>
<b>Tension d'injection au réseau</b>	30 kV
<b>Constructeur</b>	Groupement (YINGLI-SINOHYDRO-HYDROCHINA)
<b>Délais de réalisation</b>	08 mois
<b>Date de Mise Sous Tension</b>	24/04/2016
<b>Montant Global Du Projet</b>	2 880 660 881,14 DA
<b>Coût du kWh</b>	12,99 DA/kWh
<b>Coût du kWc Installé</b>	2,500\$/kWc
<b>Production Estimée</b>	24,4 GWh/An
<b>Gain en CO2</b>	15 200 Tonnes CO2/An

Pour l'énergie produite, le tableau suivant donne les valeurs réelles atteintes dans les 04 dernières années de la production (en GWh) :

**Tableau 9. Energie produite de la centrale OKP (2017-2020).**

	2017	2018	2019	2020
<b>Janvier</b>	1.382	1.872	1.280	1.662
<b>Février</b>	1.604	1.525	1.815	2.165
<b>Mars</b>	2.244	1.892	2.318	1.938
<b>Avril</b>	2.027	2.318	2.342	2.159
<b>Mai</b>	2.465	2.295	2.321	2.516
<b>Juin</b>	2.404	2.455	2.495	2.501
<b>Juillet</b>	2.531	2.457	2.551	2.617
<b>Aout</b>	2.449	2.330	2.460	2.444
<b>Septembre</b>	2.207	2.009	2.135	2.124
<b>Octobre</b>	2.090	1.830	2.022	2.245
<b>Novembre</b>	1.480	1.537	1.609	1.544
<b>Décembre</b>	1.470	1.550	1.600	1.520
<b>CUMUL</b>	24.353	24.07	24.948	25.435

#### 4. Conception de la Centrale

Dans cette partie nous allons donner une vue détaillée sur la conception de la centrale OKP, son dimensionnement et ses équipements.

Les principaux équipements sont:

- Champ Photovoltaïque (modules PV, supports, boîte de raccordement, tableaux électriques, câblage)
- Poste de conversion DC/AC et transformation (onduleurs, transformateurs, cellules, tableaux électriques, câblage)
- Systèmes auxiliaires (station météo, groupe de secours, redresseurs chargeurs batteries,
- éclairage, télésurveillance et d'anti intrusion, Détection et lutte anti-incendie, ...)
- Salle de contrôle-commande,
- Poste de garde, clôture, guérites,

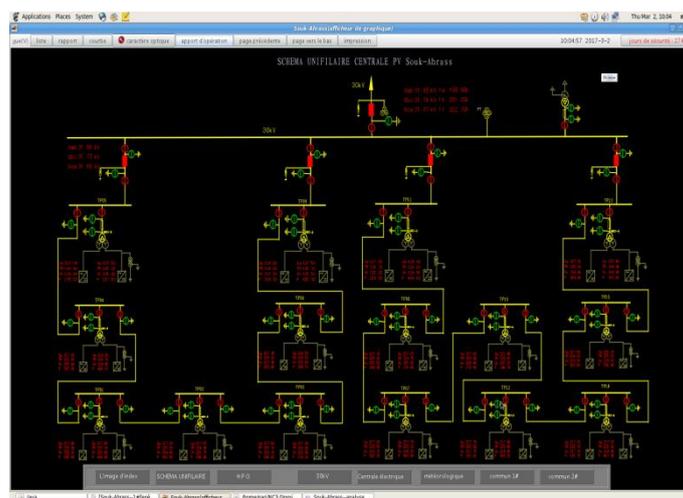


Figure 34. schéma unifilaire centrale PV Souk Ahras.

## 4.1 Le Champ Photovoltaïque

### 4.1.1 Structure porteuse / de fixation

Les structures porteuses sont le support sur lequel sont disposés les modules. Le rôle de ces structures :

- Être stable ;
- Supporter le poids des panneaux ;
- Résister aux contraintes environnementales.



Figure 35. Structure porteuse.

### 4.1.2 Panneaux photovoltaïques

La centrale d'Oued EL KEBRIT est composée de Quinze (15) sous-champs ; de 01 MWc chacun. Chaque sous-champs contient 4004 panneaux avec un totale de 60060 panneaux.

Le panneau utilisé dans la centrale OKP est un panneau en poly cristallin de marque chinoise YINGLI (YL250P-29b). (Figure 37)

La matrice (ou la table) est composée de 44 panneaux (4x11). (Figure 38)

- **Mise en série**

La chaîne (String) est constituée de 22 panneaux en série. Ce qui donne une tension continue entre 500V et 820 V, qui se situe dans la plage d'entrée de l'onduleur choisi (Plage de fonctionnement de la MPPT)

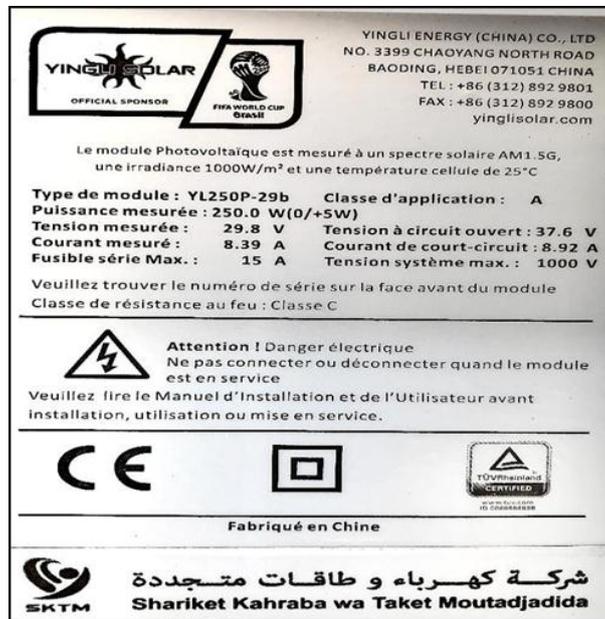


Figure 36. Caractéristiques du panneau utilisé.



Figure 37. La matrice.

**4.1.3 Boîtes de raccordements**

- **Mise en parallèle**

La mise en parallèle des chaînes se fait au niveau des boîtes de raccordement Niv1 (Figure 39), chaque boîte contient généralement 08 chaînes. Ensuite, chaque sortie des boîtes de raccordement Niv1 est mise en parallèle encore une fois dans une autre boîte de raccordement Niv2 (Figure 40). Cette dernière contient 03 boîtes Niv1 (environ 24 chaînes).

L'étape finale de la mise en parallèle, se déroule au niveau de l'onduleur lui-même. Chaque onduleur reçoit 4 boîtes Niv2 dans sa partie A et de même pour sa partie B.



Figure 38. Boite de raccordement Niv1.

Tableau 10. Caractéristiques de la boîte de raccordement Niv1.

<b>Modelé du produit</b>	<b>TBEA-H0810/1000-A</b>
<b>Tension DC</b>	DC 1000V
<b>Courant nominal</b>	DC 10A/Circuit
<b>Nombre d'entrées</b>	08 circuits
<b>Degré de protection</b>	IP65



Figure 39. Boite de raccordement Niv2.

<b>Modèle du produit</b>	<b>TBEA TD04/01</b>
<b>Tension DC</b>	DC 1000V
<b>Courant nominal</b>	DC 125A/Circuit
<b>Nombre d'entrées</b>	04 circuits
<b>Degré de protection</b>	IP65

**Tableau 11. Caractéristiques de la boîte de raccordement Niv2.**

## 4.2 Poste de Conversion DC/AC et Transformation

### 4.2.1 L'onduleur solaire

Dans une installation photovoltaïque, l'onduleur (ou inverseur de courant) occupe une place essentielle, il a le rôle principal de transformer le courant continu délivré par les panneaux solaires photovoltaïques en un courant alternatif.

Dans la centrale d'Oued El Kebrit, il existe un nombre de 15 onduleurs de type TBEA TC1000KS, dont les spécifications sont regroupées dans le Tableau III.8 Chaque onduleur (Figure 41) est composé de deux compartiments séparés A et B.

Notant qu'il existe un dispositif de suivi du point de puissance maximum (MPPT) qui permet de contrôler la tension et le courant de sortie des rangées PV pour générer la puissance maximale possible à une irradiation et une température donnée.

**Tableau 12. Caractéristiques de l'onduleur TBEA.**

<b>MODELE</b>	<b>TC1000KS</b>
<b>ENTREE DC</b>	
<b>Puissance DC maximale</b>	1,2 MW
<b>Tension DC maximum</b>	1000 V
<b>Courant DC maximal</b>	1236 A x 2
<b>Plage de tension MPPT</b>	500 ~ 820 V

<b>Sortie DC</b>	14
<b>SORTIE AC</b>	
<b>Puissance AC nominale</b>	1 MW
<b>Puissance AC maximale</b>	1,1 MW
<b>Tension AC nominale</b>	3 ~ AC 315 V
<b>Courant AC maximal</b>	AC 1008 A x 2
<b>Courant AC nominal</b>	AC 916 A x 2
<b>Fréquence</b>	50/60 Hz
<b>COS<math>\Phi</math></b>	0,9
<b>Taux De Distorsion Harmonique (THD)</b>	< 3 %
<b>Rendement Maximal</b>	98,5 %
<b>Rendement Européen</b>	98,4 %
<b>DONNEES GENERALES</b>	
<b>Dimensions (H/L/P)</b>	2591x2438x2991 mm
<b>Poids</b>	7000 kg
<b>Température d'utilisation</b>	-25 ~ +60 °C
<b>Classe de protection</b>	IP54
<b>Humidité</b>	5-95 %
<b>Refroidissement</b>	Ventilateur
<b>Altitude maximum</b>	3000 m
<b>Communication</b>	RS 485, Ethernet
<b>CARACTERISTIQUES DE PROTECTION</b>	Protection d'Ilotage, Protection Surcharge, Protection Surtension, Protection Surintensité



Figure 40. Onduleur TBEA utilisé dans la centrale OKP.

#### 4.2.2 Le transformateur et la cellule de bouclage

Chaque compartiment de l'onduleur à sa sortie, donne 3 phases avec une tension alternative de 315V. Ces phases sont acheminées par la suite vers un transformateur élévateur (315V/30kV) avec 2 enroulements en primaire et un en secondaire. (Figure 42)



Figure 41. Transformateur SUNTEN utilisé dans la centrale OKP.



Figure 42. Surveillance d'unité d'onduleur.

Le tableau III.9 Résume les caractéristiques du transformateur SUNTEN présent dans la centrale OKP.

**Tableau 13. Caractéristiques de transformateur SUNTEN.**

<b>MARQUE</b>	<b>SUNTUN</b>
<b>Modèle</b>	SCLB10-1250/30/2 × 0, 315
<b>Classe thermique</b>	F
<b>Normes</b>	IEC60076-11
<b>Repère du groupe d'accouplement</b>	Dy11y11
<b>Capacité nominale</b>	1250kVA
<b>Fréquence nominale</b>	50Hz / 3Phases
<b>Indice de protection</b>	IP 00
<b>Mode de refroidissement</b>	AN/AF
<b>Condition d'utilisation</b>	Type intérieur
<b>Poids total</b>	4960kg
<b>Date de fabrication</b>	10/2014
<b>Classe climatique</b>	C2
<b>Niveau environnemental</b>	E2
<b>Classe de performance de combustion</b>	F1
<b>COTE SECONDAIRE</b>	
<b>TENSION nominale</b>	30000V
<b>Courant nominale</b>	24,1A
<b>Impédance de court-circuit</b>	6,28%
<b>COTE PRIMAIRE</b>	
<b>Tension Nominale</b>	315/315V
<b>Courant nominale</b>	1146/1146A

Dans la 2<sup>ème</sup> cabine du SHELTER du transformateur, on trouve la cellule de boucle (Figure 44). Cette dernière avec les autres 14 cellules de boucles, servent à diviser la production totale

(15 MW) en deux boucles.

La conception des 2 boucles assure la continuité de service et facilite l'isolation et la consignation de n'importe quelle partie en cas d'intervention ou maintenance.



**Figure 43. Cellule de boucle.**

### **4.3 Poste d'Evacuation**

#### **4.3.1 Cellules**

Ce sont des cellules métalliques étanches en gaz SF6 constituées de : (Figure 45)

- Isolation en SF6 ;
- Jeu de barre fermé ;
- Système de commande BT ;
- Câblage étanche.

Ces cellules sont en nombre de 06 :

- 01 Cellule de départ (Vers le réseau de distribution) ;
- 04 Cellules d'arrivée (les 04 extrémités des 02 boucles) ;
- 01 Cellule SSAA (Vers le TSA).



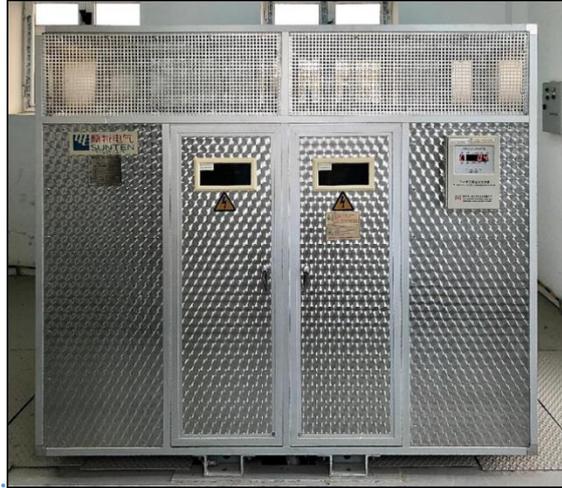
Figure 44. Cellules du poste d'évacuation

#### 4.3.2 Transformateur de service auxiliaires (TSA)

C'est un transformateur abaisseur 30kV/400V, son rôle est d'alimenter les auxiliaires de la centrale à partir du jeu de barre 30kv (Cellule SSAA).

Type		SC10-160 / 30		No. de série			
Capacité nominale		160	kVA	Code du produit		SSD21104337-2	
Normes		IEC60076-11		Fréquence nominale	50 Hz	3	Phase
	Tension nominale (V)	Courant nominale (A)	Impédance de court-circuit (%)	Repère du groupe d'accouplement	Dyn11		
Côté primaire	1	31500		Classe thermique	F		
	2	30750		Valeur limitée d'augmentation de température	100 K		
	3	30000	3.08	Indice de protection	IP 20		
	4	29250		Mode de refroidissement	AN/AF		
	5	28500		Conditions d'utilisation	Type intérieur		
Côté secondaire	400	231		Poids total	1670 kg	Date de fabrication	2014 10
Classe climatique	C2	Niveau environnemental	E2	Classe de performance de combustion	F1		
Niveau d'isolation	Borne de ligne HT LI/AC 170 / 70kV			Borne de ligne BT LI/AC 10 / 3 kV			
SUNTEN ELECTRIC EQUIPMENT CO.,LTD. Numéro d'urgence: +86 757 22338222							

Figure 45. Caractéristiques du TSA.



**Figure 46. Transformateur de services auxiliaires.**

#### **4.4 Systèmes Auxiliaires**

Nous allons classer dans cette section quelques équipements qui ne font pas partie de la production d'électricité, mais leur présence est indispensable pour le fonctionnement d'une centrale.

##### **4.4.1 Station météo**

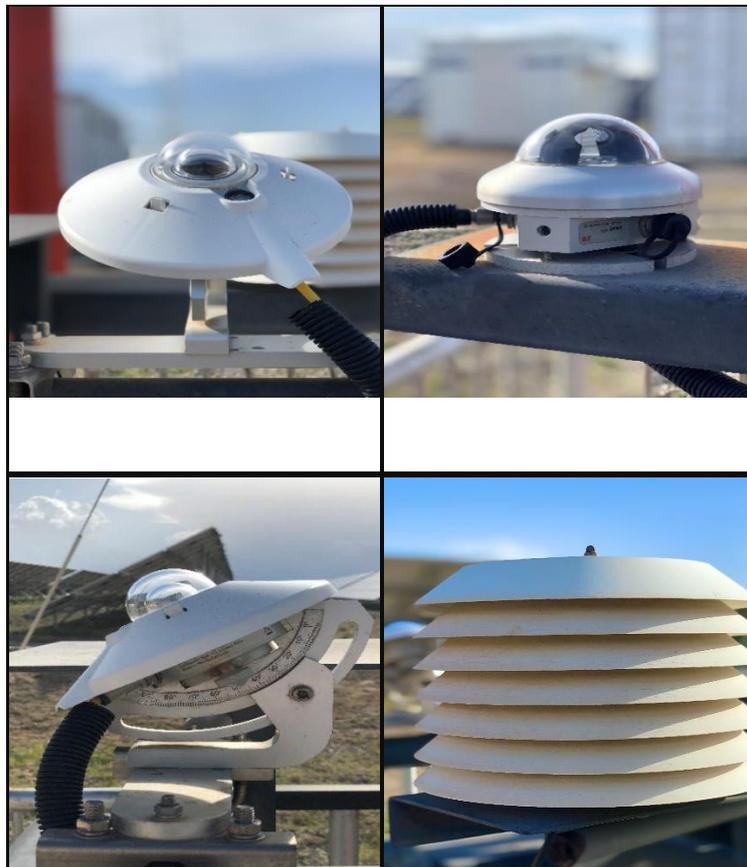
La centrale est dotée d'une station de mesure météorologique (Figure 48), comportant :

- Des instruments de mesures des rayonnements solaires (pyromètre de type ISO9060) ;
- Un capteur de mesure de température (de type DLE120) ;
- Un capteur de mesure d'humidité (de type DMA672.1) ;
- Un anémomètre pour la mesure de la vitesse du vent (de type KIT 5.0).

Ces instruments illustrés sur la (Figure 49) permettent d'enregistrer les conditions climatiques dans la zone de l'installation des modules PV. Les données collectées sont enregistrées dans un des ordinateurs d'acquisition des données de la centrale installé dans la salle de contrôle.



**Figure 47. Station de mesure météorologie.**



**Figure 48. Equipements de mesures.**

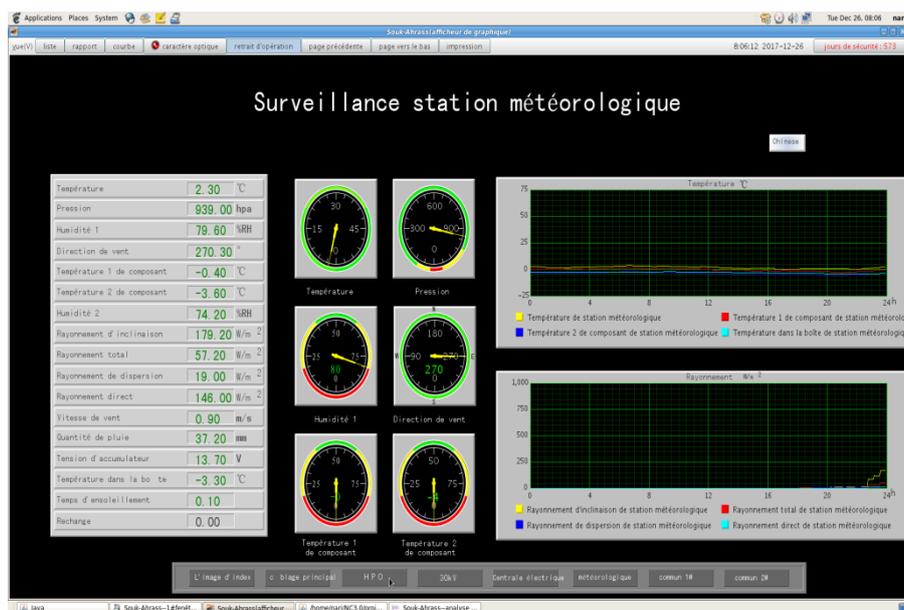


Figure 49. Surveillance station météorologique.

#### 4.4.2 Alimentation sans interruption et de secours

L'alimentation sans interruption ASI est assurée en permanence à l'aide des équipements suivants :

##### Batteries

En cas d'absence d'alimentation à partir du jeu de barre 30kv, les auxiliaires de la centrale continueront à fonctionner à l'aide des batteries de secours. On compte 59 batteries solaires tubulaires (VRLA). Le tableau suivant donne les caractéristiques de ces batteries.

Tableau 14. Caractéristiques des batteries de secours.

<b>Marque/Modèle</b>	<b>HAZE HZB2-400</b>
<b>Capacité C10 (Ah)</b>	<b>417</b>
<b>Température de fonctionnement</b>	<b>-20°C – 50°C</b>
<b>Voltage en mode FLOAT</b>	<b>2.27 – 2.30 V</b>

#### 4.4.3 Redresseurs chargeurs batteries

Ils servent à redresser le courant AC (Venu du TSA) au courant DC, pour :

- Alimentation pour la commande ;
- Alimentation des protections et des alarmes ;
- Recharge des batteries de secours.



Figure 50. Batteries de secours.



Figure 51. Redresseur-Chargeur.

- Le groupe électrogène

C'est le 2<sup>ème</sup> secours après les batteries. Il peut être couplé manuellement ou bien d'une façon automatique (API intégré), après détection d'absence de la tension.



**Figure 52. Groupe électrogène.**

#### **4.4.4 Salle de Contrôle-Commande**

Les équipements de la centrale solaire PV sont connectés à une Salle de contrôle (Figure 54). On décompose cette partie sur deux volets : Hardware et Software.



**Figure 53. Salle de contrôle-commande.**

##### **- Equipements de la salle**

La salle de contrôle contient cinq (05) ordinateurs :

- Un poste INGENIEUR et deux (02) postes MAIN01 et MAIN02 : pour l'acquisition de toutes les données de la centrale et le contrôle des systèmes ;
- Deux (02) Postes HIS1 et HIS2 : qui ont les mêmes fonctions des postes précédents, en addition ils font la sauvegarde et le stockage de l'historique de toutes les paramètres de la centrale durant toute l'année ;

- Un (01) poste pour le contrôle du système de détection d'incendie et la télésurveillance.

Dans la 2<sup>ème</sup> partie de la salle de commande –dite la salle électrique-, on trouve également :

- L'armoire de comptage ;
- L'armoire de communication ;
- La cellule téléphonie et internet ;
- Les armoires des batteries de secours et de redressement, ainsi que les coffret et disjoncteurs de distribution d'alimentation.

#### **- Logiciel de monitoring et de commande**

La centrale utilise NARI NC2000 en tant que logiciel basé sur le système d'exploitation UNIX, le programme interactif est conçu par un logiciel Java.

Le logiciel a comme fonctions :

- La surveillance instantanée de toutes les paramètres de la centrale (Puissance, Production, météo, ... ;
- La surveillance et la commande des onduleurs et transformateurs (courants, tensions, fréquences, températures, alarmes, incidents ; ... ) ;
- Commande des cellules d'arrivées et du départ, ainsi que la surveillance de leurs paramètres ;
- Suivre le fonctionnement et la performance de l'installation ;
- Permettre d'optimiser la production (détection d'anomalie) ;
- Consultation de l'historique de n'importe quelle donnée ou paramètre enregistré précédemment ;
- Affichage de tous types de courbes liés aux données de la centrale.

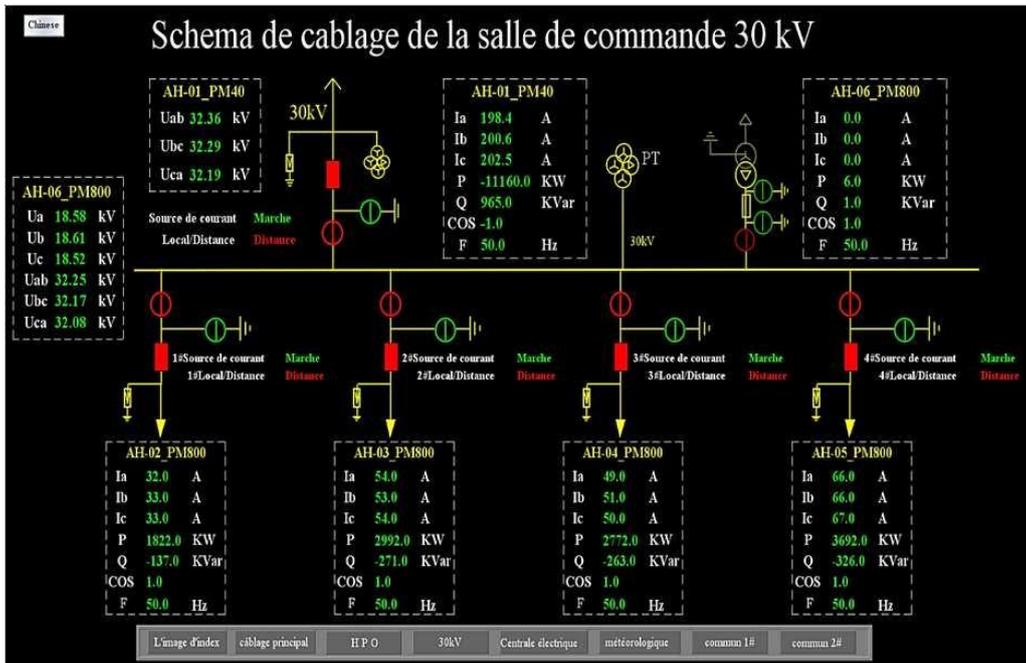


Figure 54. Interface du logiciel NC2000.

#### 4.4.5 La cellule d'hybridation

En cas il y a une coupure d'électricité et les batteries sont épuisées le groupe électrogène démarrera automatiquement.



Figure 55. La cellule d'hybridation.

### 5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une vue générale sur le programme national de transition énergétique Algérien avec une étude approfondie de cas de la centrale d'OUED EL KEBRIT, unes des centrales réaliser en Algérie et ça dans le but d'avoir une idée générale sur les centrales photovoltaïques implantées.

***Chapitre IV. Modélisation et simulation  
des composants du Système hybride  
(PV/GE)***

## 1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier la modélisation de la cellule et le générateur photovoltaïque (composé de 60 cellules connectées en série) dans les conditions standard ( $E=1000\text{W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ) et réel de la wilaya de tébessa, nous allons traiter l'effet de la température et l'éclairement sur l'énergie de la cellule PV, et l'effet de regroupement de cellule (série, parallèle, série – parallèle) sur l'énergie produite, et on utilise l'outil MATLAB -SIMULINK pour faire la simulation de comportement de la cellule et du générateur PV et la technique P&O pour optimiser la puissance maximal.

## 2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

La photopile présentée comporte en réalité une résistance série ( $R_s$ ) et une résistance Shunt ( $R_{sh}$ ). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique  $I=f(V)$  :

- La résistance série : elle représente la résistance interne de la cellule, elle dépend Principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles [19] [32].
- La résistance shunt : elle est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée [19] [32].

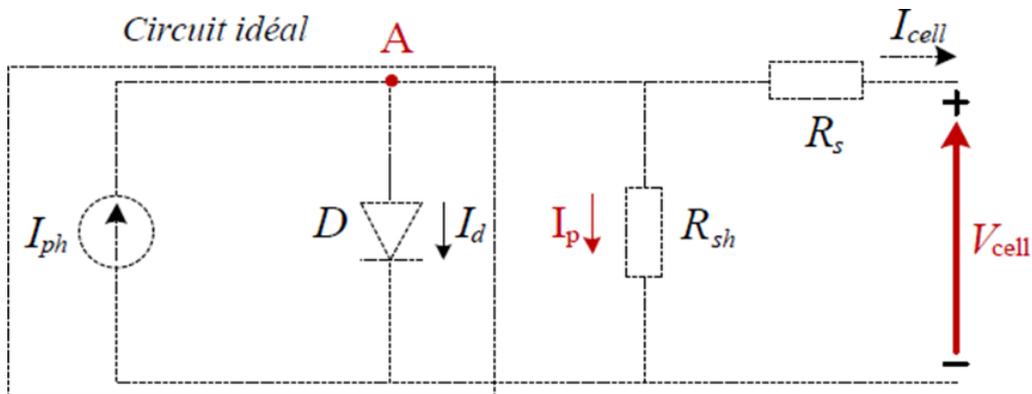


Figure 56. Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque [32].

Ce modèle fait intervenir un générateur de courant pour modéliser le flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour les pertes [19] [33].

Ce modèle est dit à cinq paramètres, ces paramètres sont :

Le photo-courant ( $I_{ph}$ ), le courant de saturation ( $I_0$ ), le facteur d'idéalité de la jonction ( $A$ ), la résistance série ( $R_s$ ) et la résistance shunt ( $R_{sh}$ ).

Si on néglige l'effet de la résistance shunt  $R_{sh}$ , en le considérant infini, on retrouve le modèle à quatre paramètres qui est très utilisé. Et si en plus, on néglige la résistance série, on retrouvera alors le modèle à 3 paramètres. Le choix du modèle se fait en fonction des besoins de l'étude. Le modèle à cinq paramètres offre un bon compromis entre simplicité et précision. Ces équations permettent de décrire la caractéristique I-V de la cellule et du module en donnant les expressions des différents courants [19][34] :

L'étude physique d'une photopile nous permet d'obtenir l'équation de courant de la charge :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d - I_{Rsh} \dots \dots \dots (I-1)$$

Avec :

$I_{cell}$  : Courant délivré par la photopile.

$I_{ph}$  : Photo courant.

$I_d$  : Courant de la diode.

$I_{Rsh}$  : Courant shunt.

On a la résistance ( $R_{sh}$ ) plus élevée donc on peut négliger le courant  $I_{Rsh}$  donc l'équation s'écrit :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_d \dots \dots \dots (II-2)$$

a. Le photo-courant

C'est le courant généré par une cellule, il est proportionnel à l'irradiation solaire et est légèrement influencé par la température selon l'équation suivante

Avec :

$$I_{ph} = [I_{cc} + K_i (T - T_{ref})] \times G / G_{ref} \dots \dots \dots (II-3)$$

$I_{cc}$  [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.  $T$  [K] : Température ambiante.

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

$T_i$  [K] : Température de référence (298 K).

$G_{ref}$  [W/m<sup>2</sup>] : Irradiation de référence

Le courant de saturation  $I_0$

Ce courant varie avec la température et est donné par :

$$I_0 = I_{Rs} (T/T_{ref})^3 \exp [qE_g / AK (1/T_{ref} - 1/T)]$$

Avec :

$E_g$  [eV] : Énergie de gap du semi-conducteur (1.1 eV pour le silicium poly cristallin à 25°C).

Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite)

Son expression est donnée par l'équation :

$$I_{Rs} = I_{cc} / (\exp((qV_{oc}/KAT) - 1))$$

Où :

$V_{oc}$  [V] : Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur).

$q$  [°C] : Charge de l'électron ( $1.602 \cdot 10^{-19}$  °C).

$A$  : Constante d'idéalité de la jonction ( $1 < A < 2$ ).

$K$  [J/K] : Constante de Boltzmann ( $1.3805 \cdot 10^{-23}$  J/K).

À partir des expressions décrites précédemment on peut déduire le courant délivré par une cellule :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0 [\exp((q(V_{cell} + R_s I_{cell}))/N_s A K T) - 1] - (V_{cell} + R_s I_{cell})/R_{sh}$$

Le courant du panneau

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

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_0 [\exp((q(V_{cell} + R_s I_{cell}))/N_s A K T) - 1] - N_p (V_{cell} + R_s I_{cell})/R_{sh}$$

Où :

$N_s$  : Nombre de cellules connectées en série dans un module.

$N_p$  : Nombre de cellules connectées en parallèle dans un module.

### 3. Simulation d'une cellule photovoltaïque

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 communications et de traitement du signal [1].

La figure (57) représente le schéma bloc d'une cellule photovoltaïque :

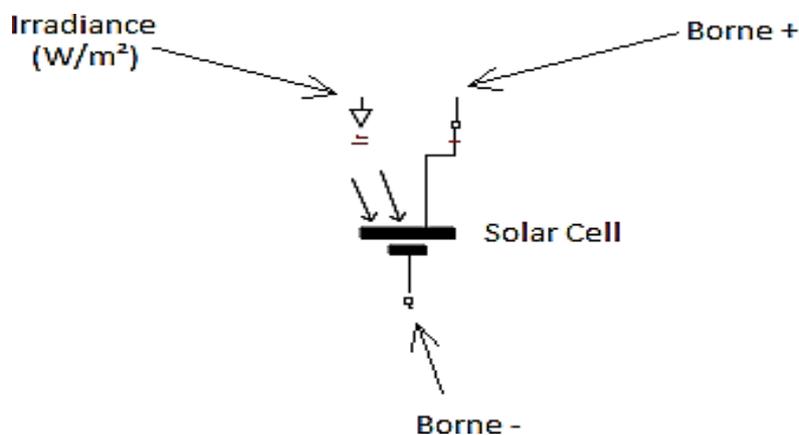
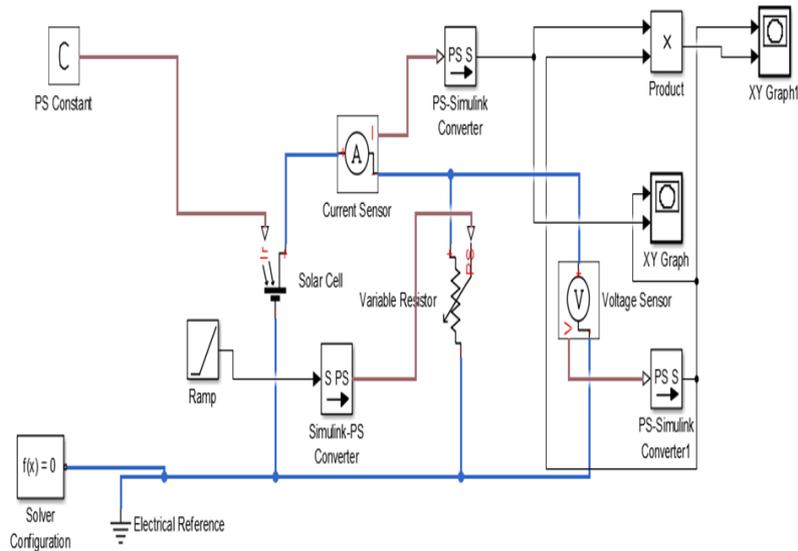


Figure 57. Bloc Simulink représentant la cellule photovoltaïque.



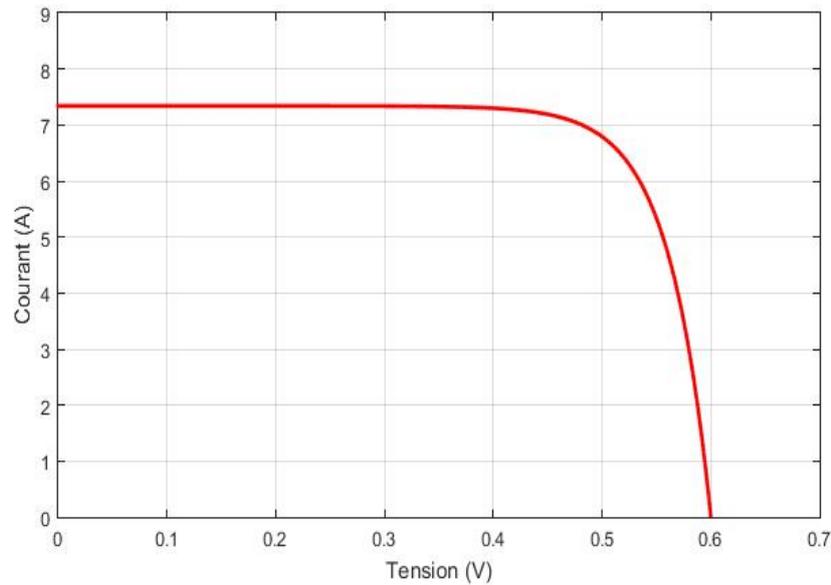
**Figure 58. Simulation d'une cellule.**

#### 4. Caractéristiques I(V) et P(V)

Les résultats obtenus de la simulation (programmation en utilisant le logiciel MATLAB) d'une caractéristique courante –tension I(V) et puissance -tension P(V) de la cellule photovoltaïque dans les conditions standards ( $T=25^{\circ}\text{c}$ ,  $E=1000 \text{ W/m}^2$ ) sont représentés dans les figures (59) et (60) :

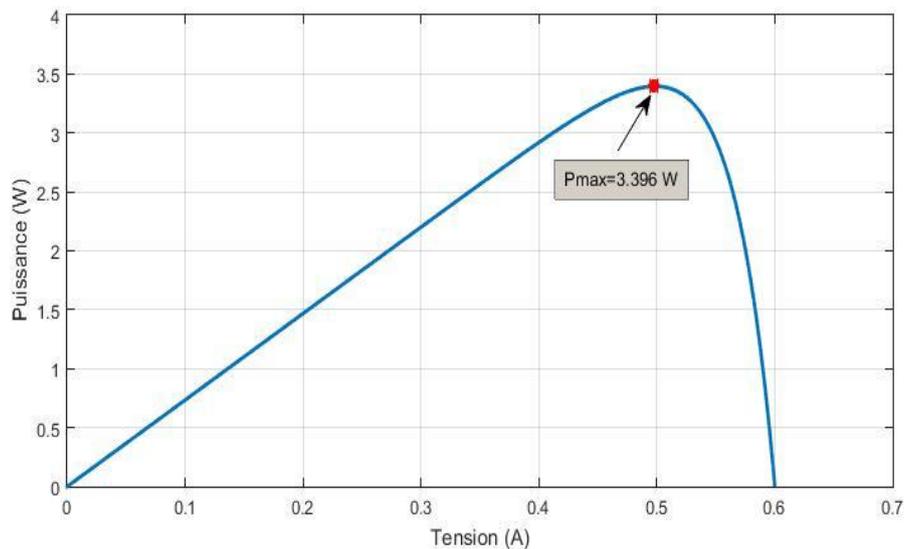
La figure (59) représente la caractéristique courant – tension d'une cellule solaire dans les conditions de  $G=1000 \text{ W/m}^2$  et  $T=25^{\circ}\text{c}$ . Le courant de court-circuit est égal 8.92 A et la tension de circuit ouvert est 0.62 v.

On observe que la caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement.



**Figure 59. Caractéristique I(V) d'une cellule ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ ).**

La figure (60) représente la caractéristique puissance – tension d'une cellule solaire dans les conditions de  $G=1000\text{ W}/\text{m}^2$  et  $T=25^{\circ}\text{c}$ .



**Figure 60. Caractéristique P(V) d'une cellule ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ ).**

La puissance maximale est  $P_{\text{max}}=3.396\text{ W}$ . On remarque que, quand la tension augmente la puissance augmente jusqu'à atteindre la valeur optimale ( $P_{\text{max}}$ ) ensuite elle décroît.

## 5. Effets climatiques sur la cellule PV

### 5.1 Influence de la température sur la cellule

Les figures (61) et (62) représentent la caractéristique courant – tension I(V) et puissance – tension P(V) dans la même condition de l'éclairement ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ) et pour différents température ( $T=0, 15, 30, 45$ ) :

La tension de circuit ouvert est diminuée avec l'augmentation de la température, par contre le courant de court-circuit augmente légèrement avec l'augmentation de la température et la puissance maximale diminue. On constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert.

#### 5.1.1 Caractéristique (I-V)

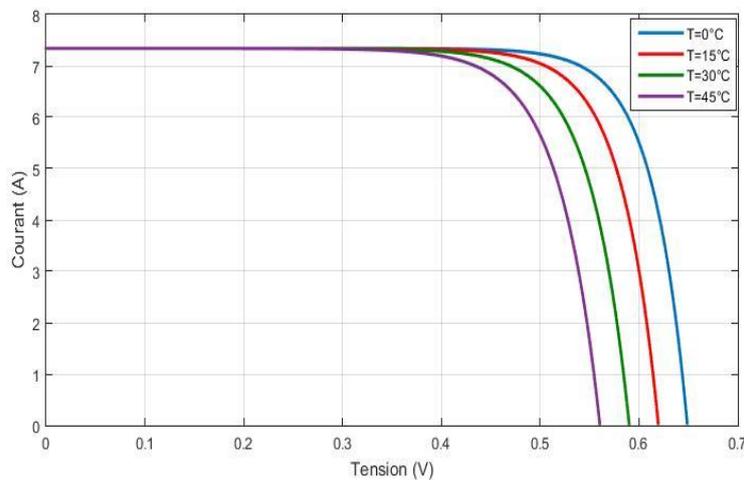


Figure 61. Caractéristique I(V) pour différentes températures ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ).

#### 5.1.2 Caractéristique (P-V)

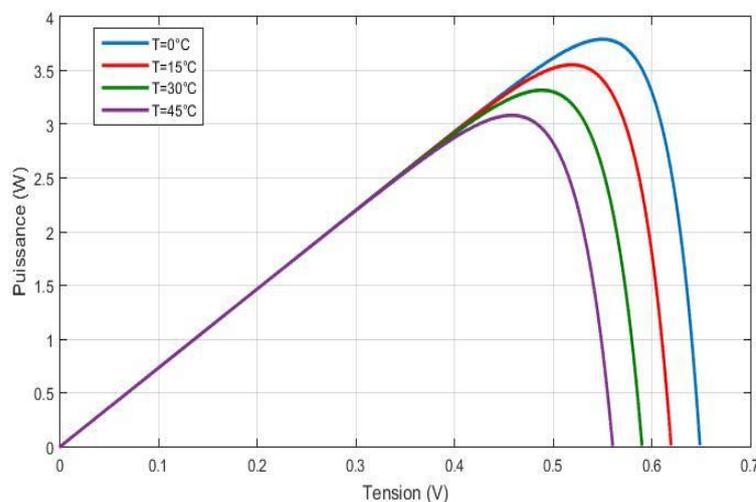


Figure 62. Caractéristique P(V) pour différentes températures ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ).

On peut donc tirer la conclusion suivante : les cellules PV ont de meilleure performance dans un environnement froid avec ciel dégagé.

### 5.2 Influence de l'éclairement sur la cellule

Les figures (63) et (64) représentent la caractéristique (I-V) et (P-V) d'une cellule en fonction de la variation de l'éclairement ( $G=484.651.766.881.922 \text{ W/m}^2$ ) à température constants ( $T=25^\circ\text{C}$ ) :

Le courant de court-circuit est directement proportionnel au rayonnement incident. Par contre, la tension de circuit ouvert augmente rapidement pour de faibles niveaux d'éclairement, puis lentement pour des niveaux plus élevés . La figure (64) illustre la variation de la puissance délivrée par la cellule en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V).

**Tableau 15. Rayonnement solaire à Tébessa pendant un jour (31 mai 2022).**

Heures	Rayonnement solaire [ $\text{w/m}^2$ ]
6	100
7	209
8	484
9	651
10	786
11	881
12	922
13	772
14	742
15	396
16	157
17	114
18	67
19	18

### 5.2.1 Caractéristique (I-V)

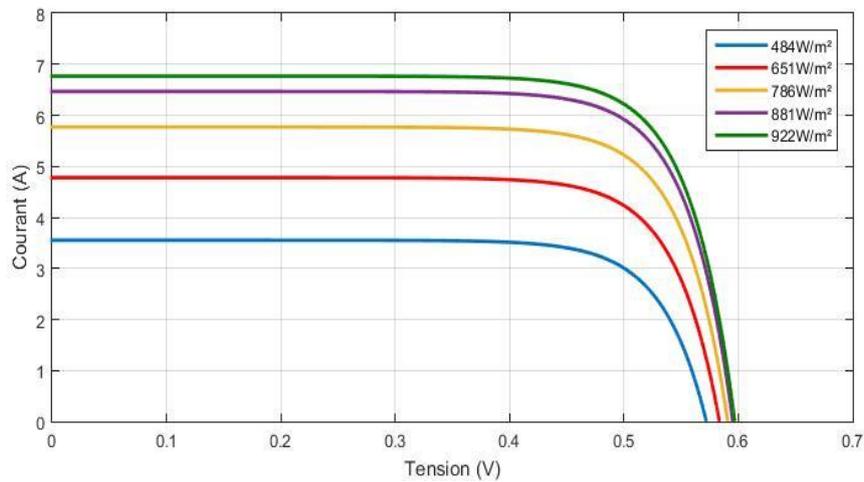


Figure 63. Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

La figure (64) illustre la variation de la puissance délivrée par la cellule en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V).

### 5.2.2 Caractéristique (P-V)

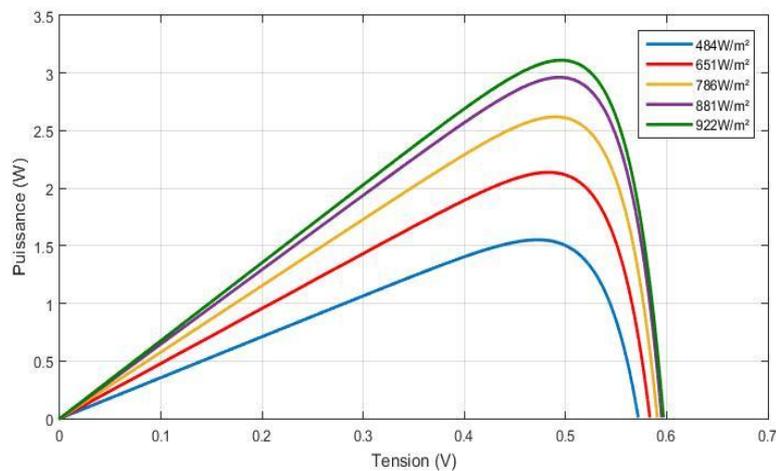


Figure 64. Caractéristique P(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

### 5.3 Simulation du générateur photovoltaïque

Nous avons prendre un générateur composé de 60 cellules connectées en série et est considérés dans les conditions standards. T=25°C, G=1000W/m².

Cette figure représente le schéma bloc du générateur PV en MATLAB-SIMULINK :

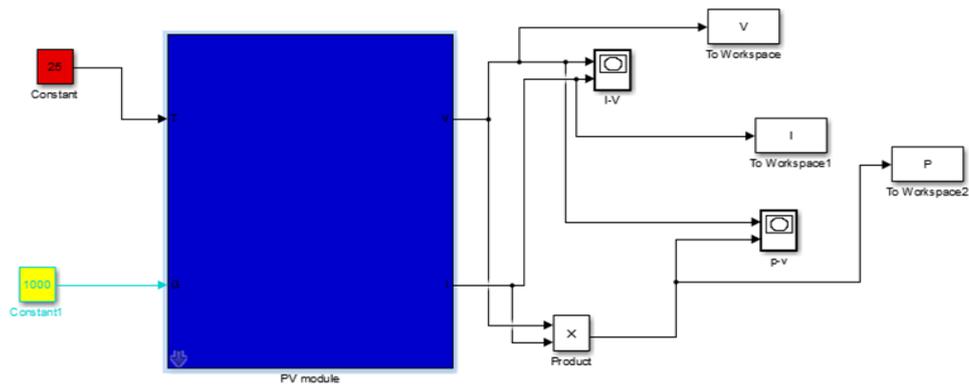


Figure 65. Schéma bloc d'un module PV en MATLAB-SIMULINK.

### 5.3.1 Caractéristique (I-V)

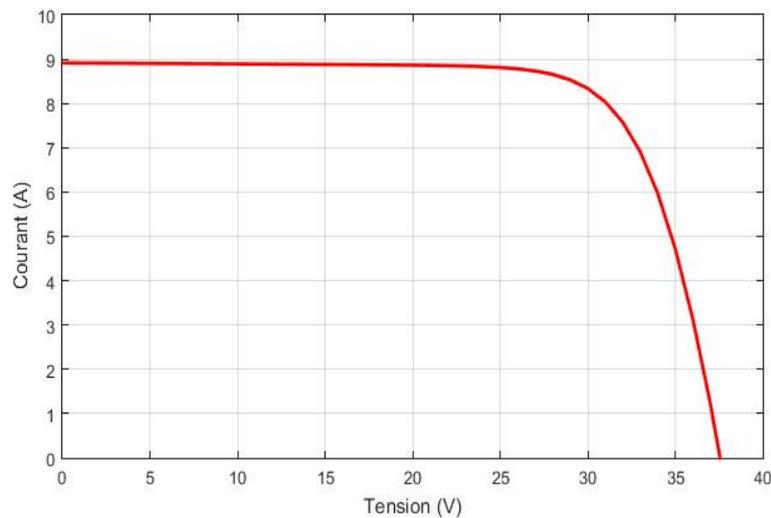
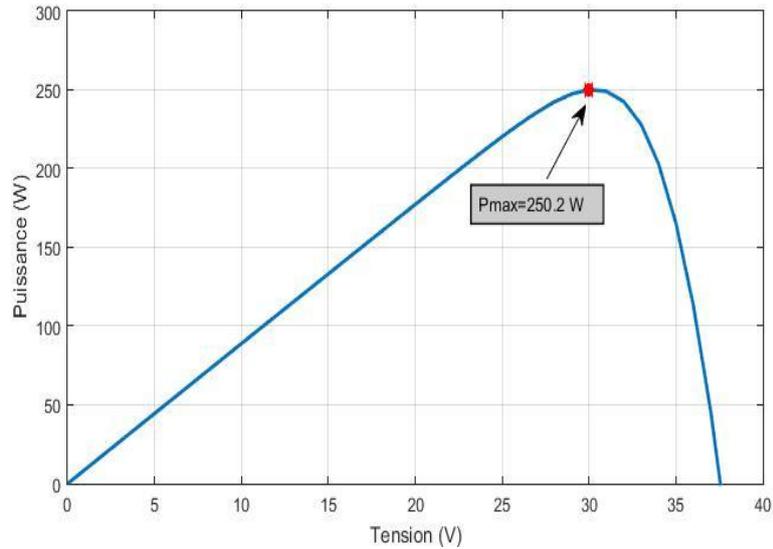


Figure 66. Caractéristique I(V) d'une générateur PV ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ ).

Le courant de court-circuit est  $I_{cc}=8.92\text{A}$ , la tension de circuit ouvert est  $V_{oc}=37.6\text{V}$  (figure 66). Ce résultat peut être expliqué par le fait que le générateur est composé de 60 cellules connectées en série ce qui donne :

$$V_{oc}=60*0.62=37.6\text{V}.$$



**Figure 67. Caractéristique P(V) d'un générateur PV ( $T=25^{\circ}\text{C}$ ,  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ ).**

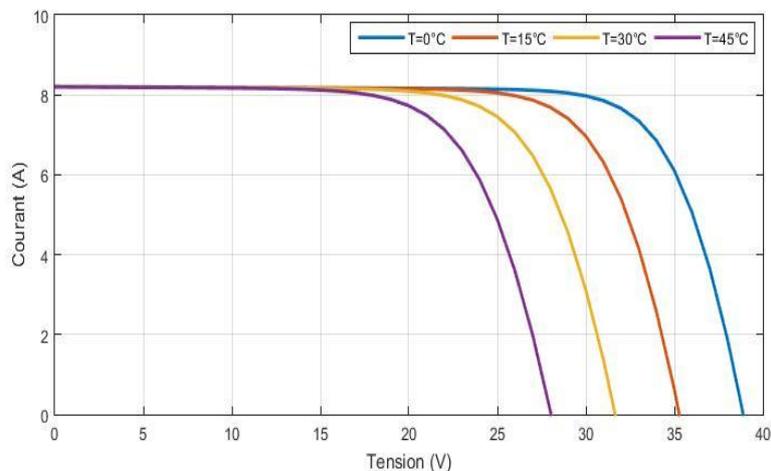
La puissance débitée par le générateur photovoltaïque dépend du point de fonctionnement du générateur comme il a montré par la figure (67). Le point max représente la puissance maximale débitée par le générateur.

A ce point  $P_{\text{max}}=250.2\text{W}$ .

## 6. Effets climatiques sur le générateur PV

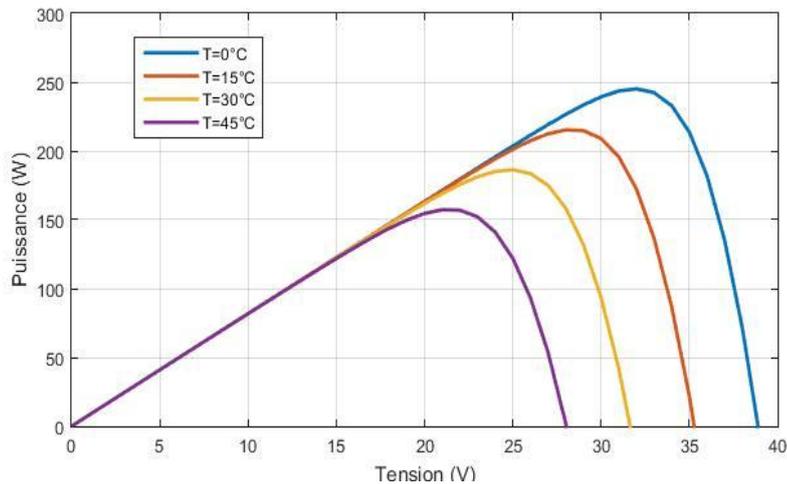
Les figures (68),(69), (70) et (71) et représentent la caractéristique (I-V) et (P-V) d'un générateur PV pour différentes températures et différents éclaircissements, on obtient aucune différence par rapport à la simulation d'une cellule :

### 6.1 Influence de la température sur le générateur PV



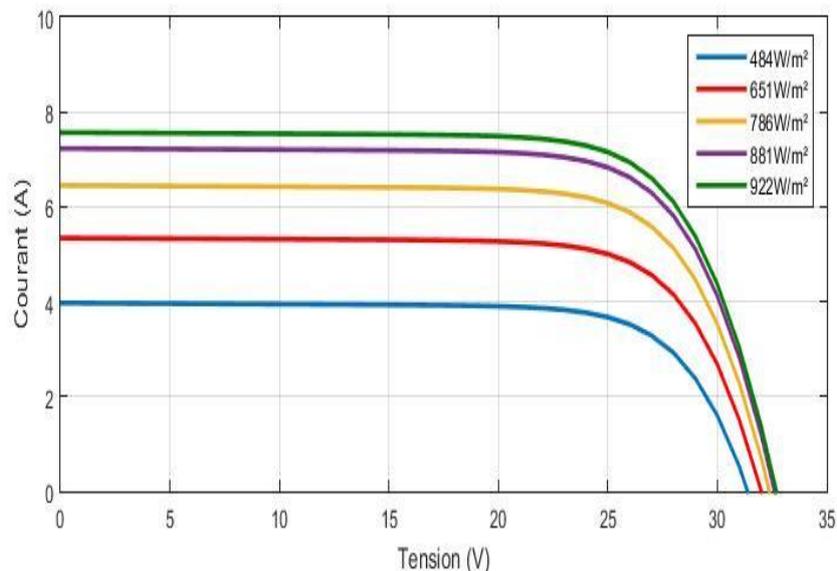
**Figure 68. Caractéristique I(V) d'un générateur pour différentes températures ( $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ ).**

La figure (68) montre l'influence de la température sur la caractéristique  $I=f(V)$ . Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique  $I=f(V)$ . Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de générateur.



**Figure 69. Caractéristique P(V) d'un générateur pour différentes températures (G=1000W/m²).**

## 6.2 Influence de l'éclairement sur le générateur PV



**Figure 70. Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).**

La figure (70) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $I=f(V)$ . A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par

contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

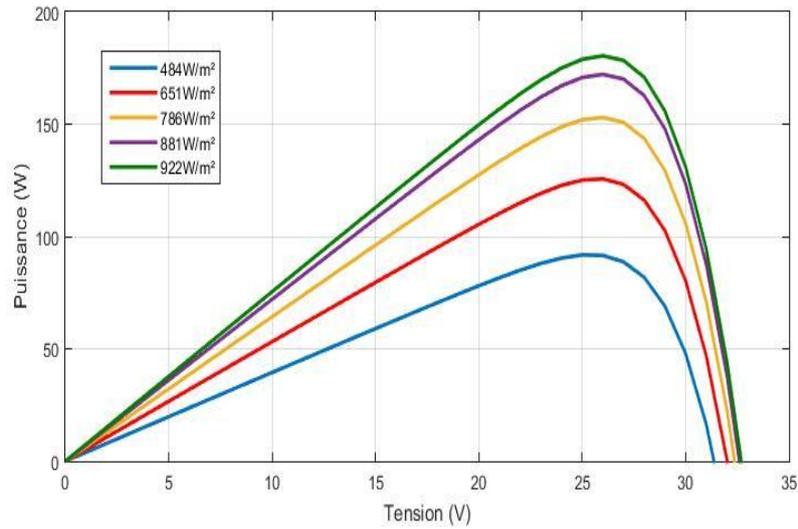


Figure 71. Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C).

### 6.3 Influence de l'association des cellules PV sur le GPV

La cellule tout de seule ne produit qu'une très faible puissance avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance les cellules sont assemblées pour former un générateur. Dans cette partie on va étudier l'influence de l'association série et /ou parallèle des cellules.

### 6.4 Influence de l'association série des cellules PV

Les figures (72) et (73) représentent la caractéristique (I-V) et (P-V) d'une association de cellule en série :

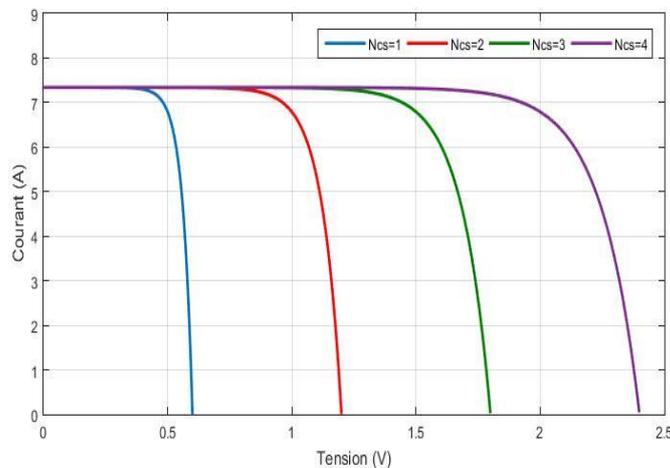


Figure 72. Caractéristique I(V) pour différents nombres de cellule en série.

La tension de circuit ouvert augmente quand le nombre de cellule en série augmente, la valeur de courant de court-circuit n'influe pas par l'augmentation du nombre de cellule en série alors que la puissance augmente.

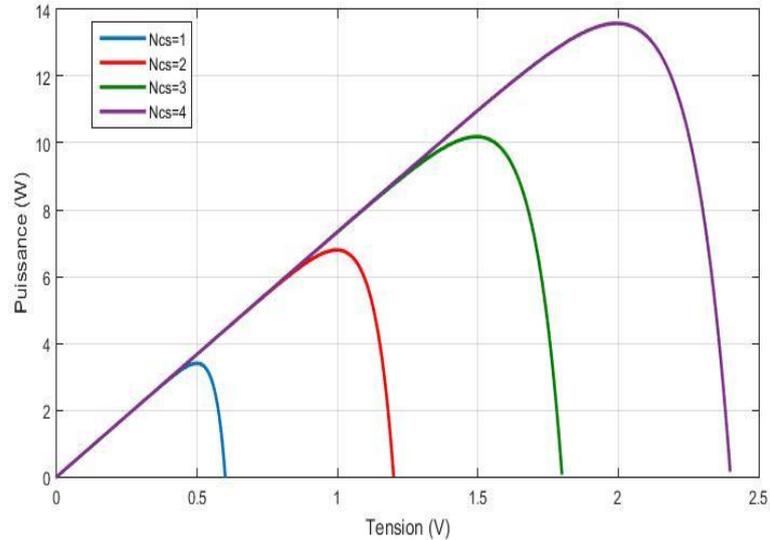


Figure 73. Caractéristique P(V) pour différents nombres de cellule en série.

### 6.5 Influence de l'association parallèle des cellules PV

Les figures (74) et (75) représentent la caractéristique (I-V) et (P-V) d'une association de cellule en parallèle :

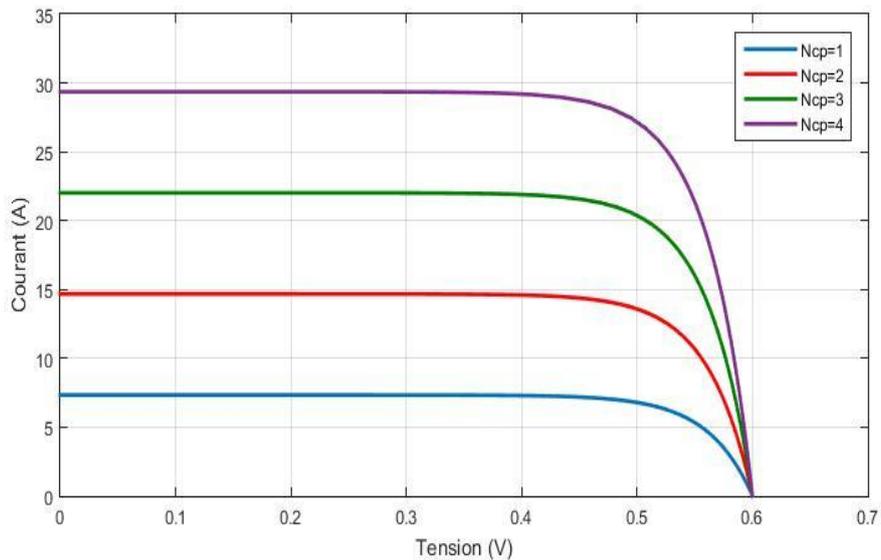
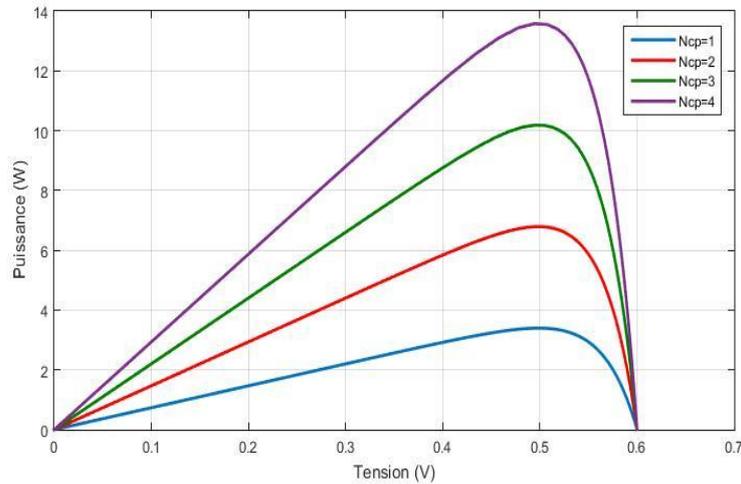


Figure 74. Caractéristique I(V) pour différents nombres de cellule en parallèle.

Le courant de court-circuit augmente quand le nombre de cellule en parallèle augmente, la valeur de la tension de circuit ouvert n'influe pas par l'augmentation du nombre de cellule en parallèle alors que la puissance augmente.

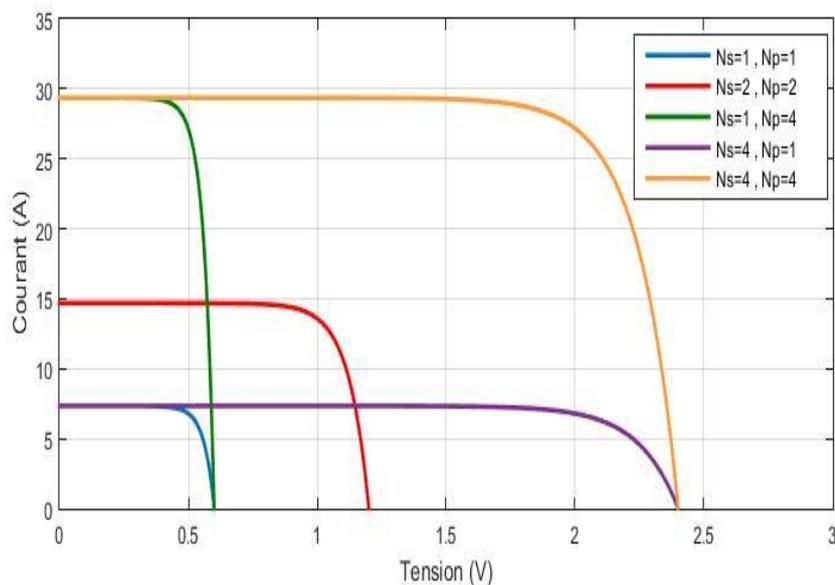


**Figure 75. Caractéristique P(V) pour différents nombres de cellule en parallèle.**

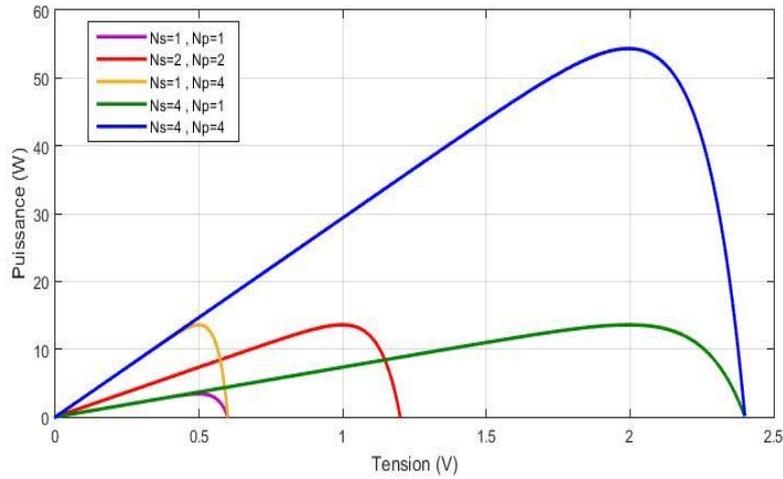
$N_{cp}$  : nombre de cellule en parallèle.

### 6.6 Influence de l'association série / parallèle des cellules PV

Les figures (76) et (77) représentent la caractéristique (I-V) et (P-V) d'une association de cellule en série/parallèle :



**Figure 76. Caractéristique I(V) pour différents nombres de cellule en Série / parallèle.**

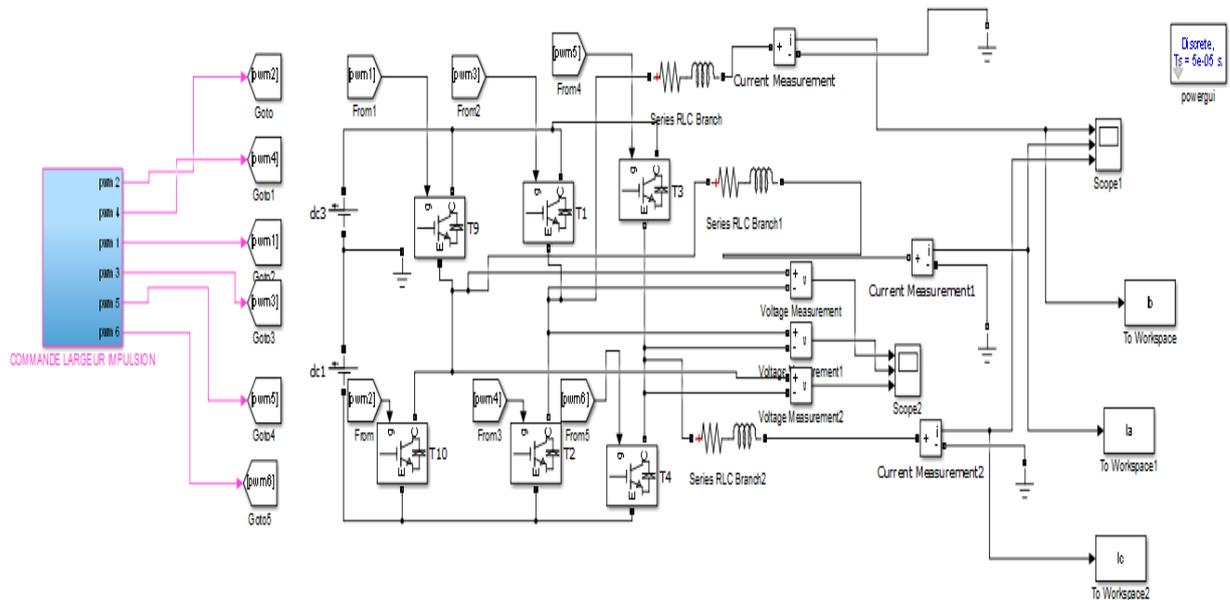


**Figure 77. Caractéristique P(V) pour différents nombres de cellule en Série / parallèle.**

Le courant de court-circuit et La tension de circuit ouvert augmente relativement quand le nombre de cellule en série/parallèle augmente, alors la puissance augmente aussi.

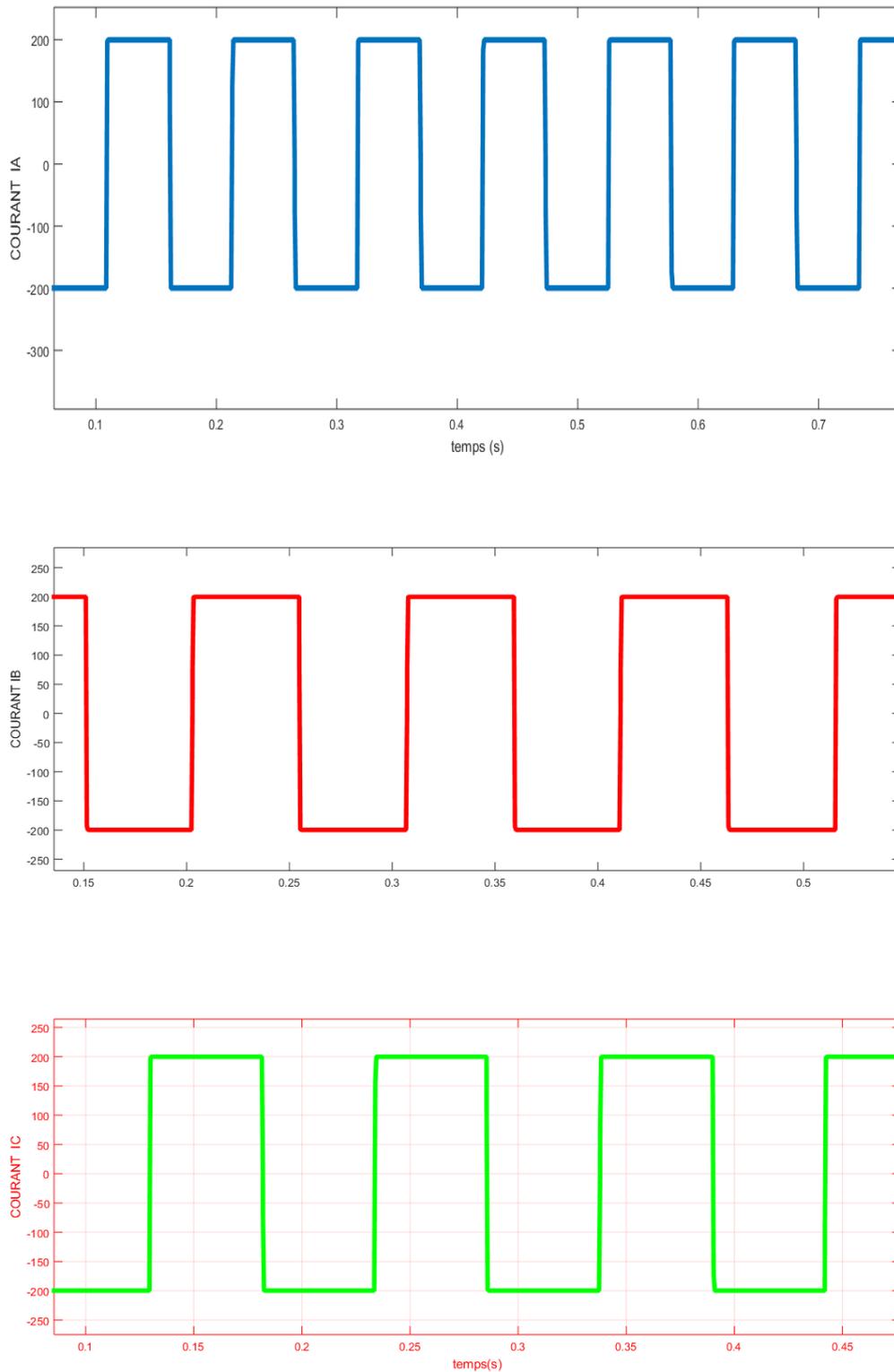
$N_s$ =nombre de cellule en série.

### 7. Simulation d'un onduleur triphasé



### ONDULEUR TROIS PHASES

**Figure 78. Onduleur triphasé sous Simulink.**



**Figure 79. Les courants Ia Ib Ic à la sortie de l'onduleur 3ph.**

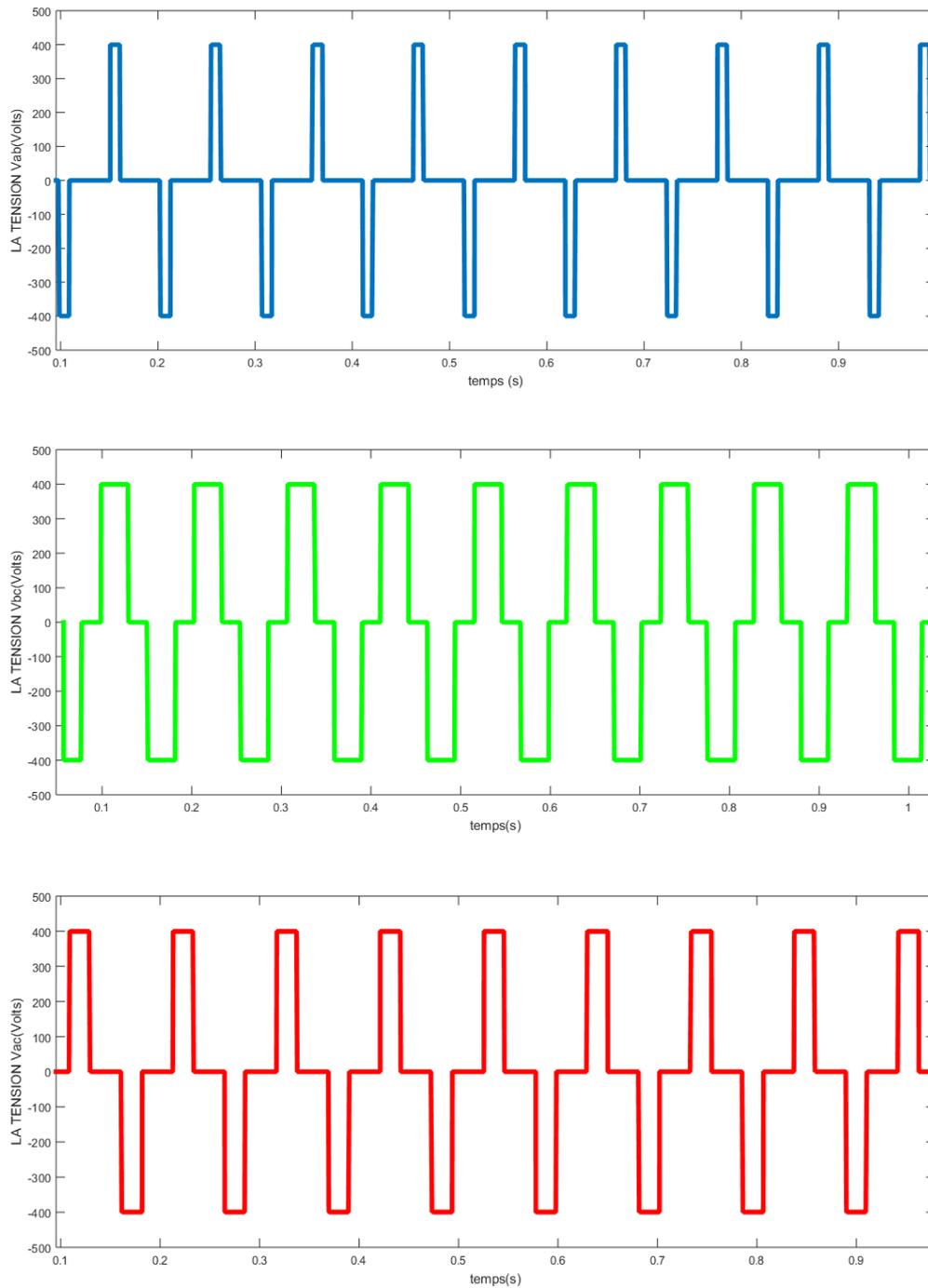


Figure 80. Les tensions composées à la sortie de l'onduleur 3ph.

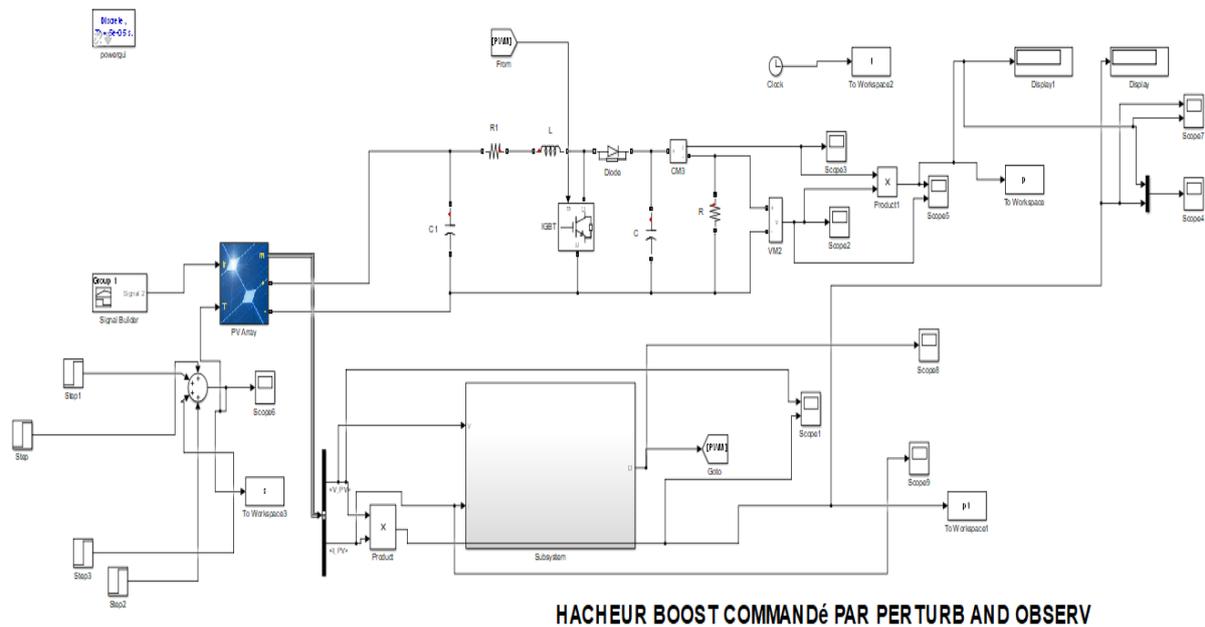


Figure 81. Hacheur boost commandé par perturb and observ sous simulink.

### 7.1 Résultats de la simulation

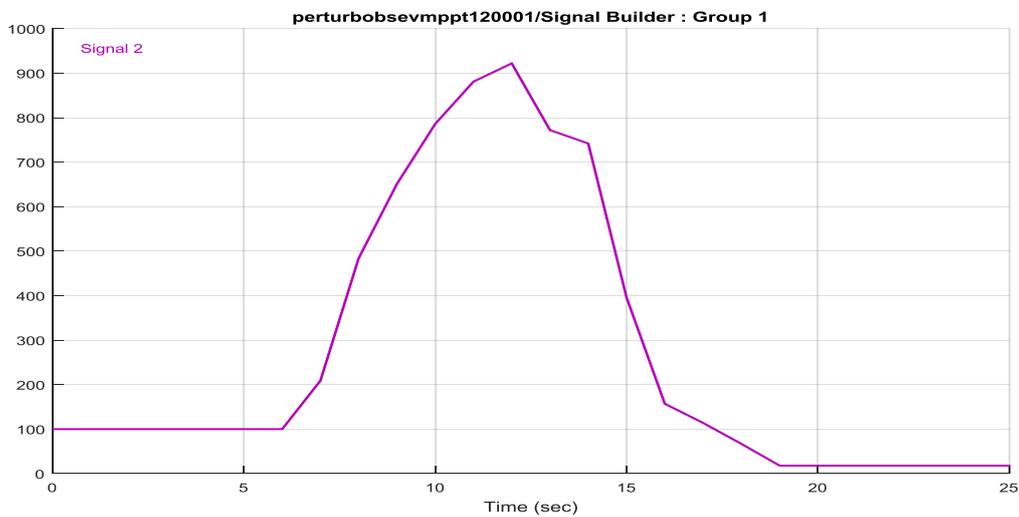
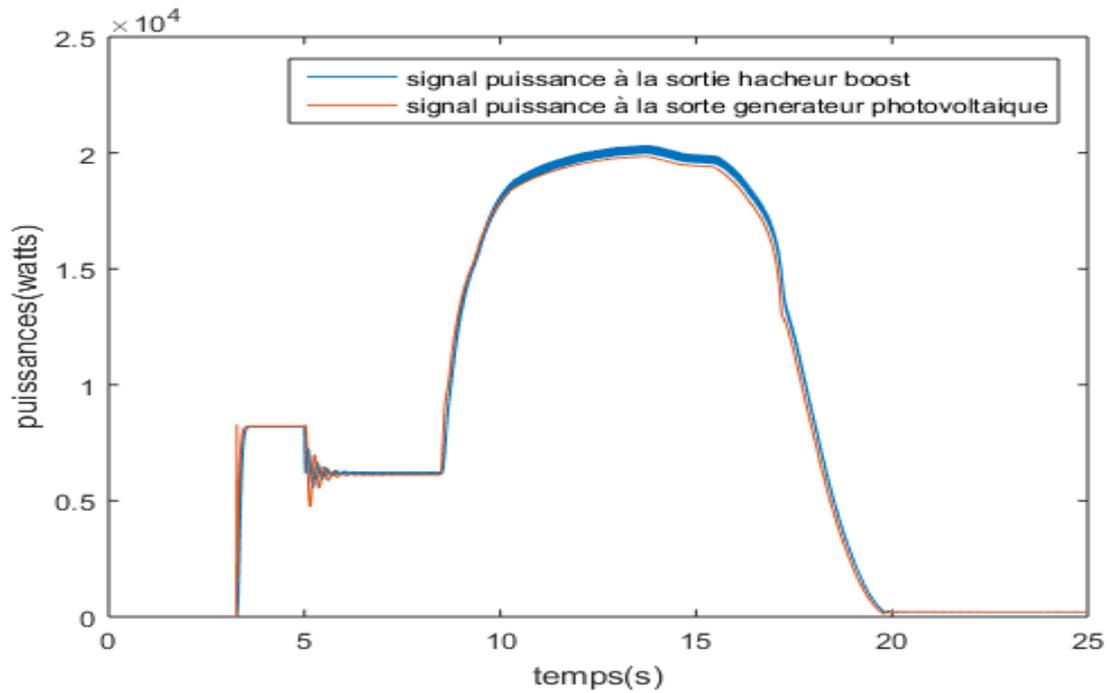


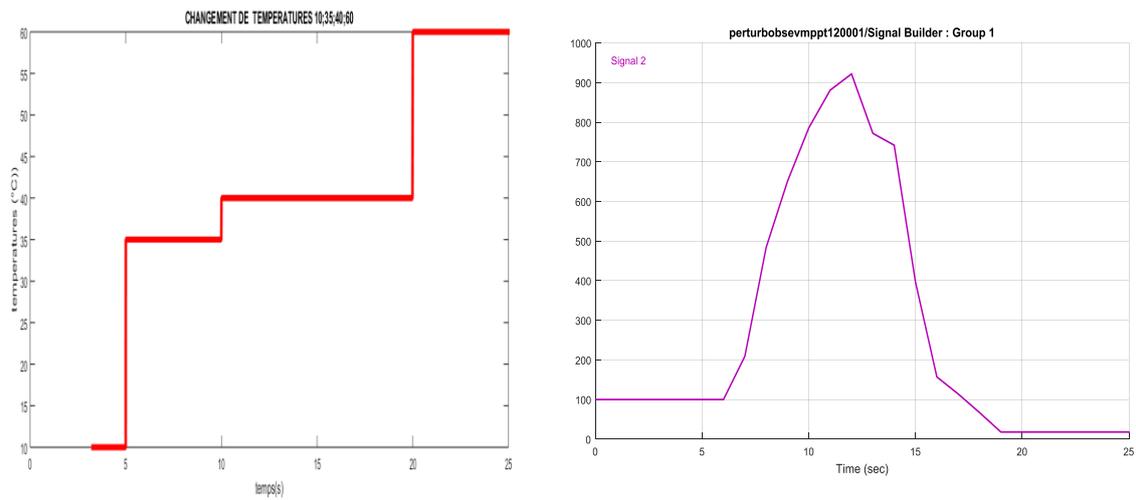
Figure 82. Irradiation d'une journée à l'entrée de générateur photovoltaïque et la température considérée constante 25°C.



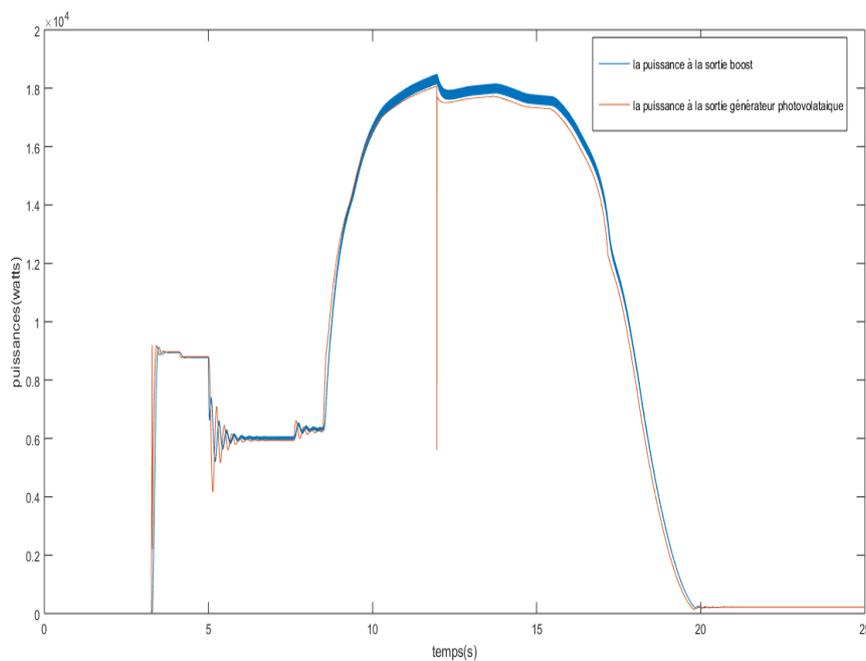
**Figure 83. Les puissances à la sortie de générateur photovoltaïque et boost dans la température considérée constante 25°C.**

### 7.2 Interprétation de résultats de la simulation

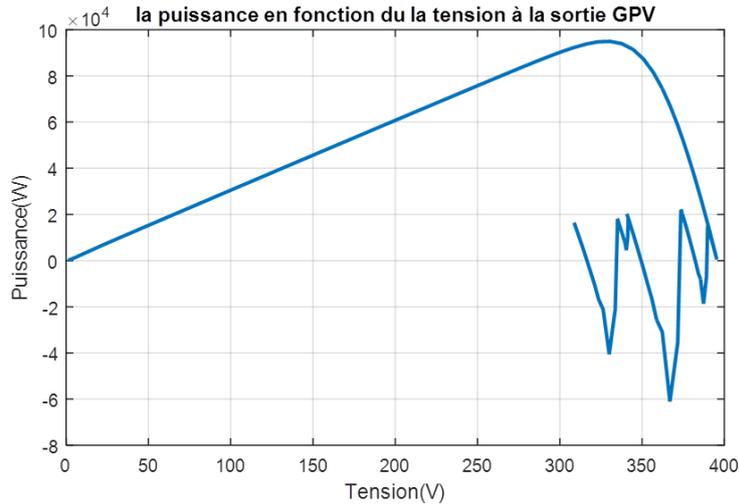
- En voir dans la figure (82) l'irradiation d'une journée complète de la wilaya Tébessa avec température constante à l'entrée de GPV.
- Dans la figure (83) nous obtenons les puissances en fonction de temps a la sortie de la GPV et le hacheur Boost .
- Nous voyons bien que la puissance à la sortie de le hacheur Boost est plus grande que la GPV.



**Figure 84.** Irradiation d'une journée à l'entrée de générateur photovoltaïque et la température variable 10°C, 35°C, 40°C, 60°C



**Figure 85.** Les puissances à la sortie de générateur photovoltaïque et boost la température pour différentes températures et pendant une journée avec irradiation variable.



**Figure 86. Caractéristiques P(V) à l’irradiation (1000 w/m<sup>2</sup>) températures (10°C, 35°C, 40°C, 60°C).**

En voir dans la figure (86) l’irradiation d’une journée complète de la wilaya Tébessa avec changement des températures (10°C, 35, 40,60) à l’entrée de GPV.

Dans la figure (85) nous obtenons les puissances en fonction de temps à la sortie de la GPV et le hacheur Boost.

Nous voyons bien que la puissance a la sortie du hacheur Boost est plus grande que la GPV.

Par comparaison de la figure (83) et figure (85) des puissances a la sortie de GPV et le hacheur Boost. Il n’y a pas une grande différences de l’allure malgré le changement de température, donc l’influence de la température n’y pas significatif par rapport à l’irradiation.

Figure (87) présente le changement de la puissance en fonction de la tension à la sortie du GPV en voir qu’il y a une perturbation à cause de changement des températures 10, 35, 40,60 avec une irradiation fixe 1000 w/m<sup>2</sup>.

## 8. Modélisation du groupe électrogène

### 8.1 Modélisation du moteur diesel

La modélisation du moteur diesel doit prendre en considération les pièces du moteur en mouvement, la puissance fournie  $P_i$  et la somme des puissances dissipées  $P_{diss}$ . Le moteur fonctionne à régime constant pour une charge donnée afin de maintenir constante la tension et la fréquence du courant fourni par l’alternateur. Le principe de la conversion d’énergie s’écrit alors comme suit [33] :

$$P_i - P_{diss} = 0$$

La puissance fournie peut être représentée par l’expression suivante :

$$P_i = P_{ci} \cdot n_i \cdot m_f$$

Avec

$P_{ci}$  : Désigne le pouvoir calorifique inférieur du carburant.

$n_i$  : Le rendement indiqué du moteur

$m_f$  : Le débit de carburant injecté dans la chambre de combustion.

La puissance dissipée totale, inclut d'une part l'effet de frottement des pièces mécaniques en mouvement comme (bielles, pistons, vilebrequin) et d'autre part celui de la charge appliquée sur le moteur, celle de la génératrice. Elle peut être exprimée par la formule suivante :

$$P_{diss} = P_{mf} \cdot \frac{C_y}{4\pi} \cdot \omega + C_r \cdot \omega$$

$P_{mf}$  : La pression moyenne des pertes par frottement.

$C_y$  : La cylindrée totale du moteur.

$C_r$  : Le couple résistant dû à la charge appliquée.

La modélisation des frottements au niveau des différents éléments du moteur a fait l'objet de nombreux travaux qui aboutissent à des formes très variées. Vu la complexité pour traiter chaque élément à part, il a été préféré d'utiliser les formules d'évaluations globales de ces pertes [49]. La formule la plus précise qui représente la variation de la puissance de frottement en fonction du régime et de la pression d'air à l'admission du moteur s'écrit comme suit :

$$P_{mf} = [ 1 + \omega \cdot S_{eng} (K_{f1} + K_{f2} \frac{P_{in}}{P_a}) + K_{f3} \omega ]. P_a \cdot \frac{C_y}{4\pi} \cdot \omega$$

## 8.2 Simulation du groupe électrogène

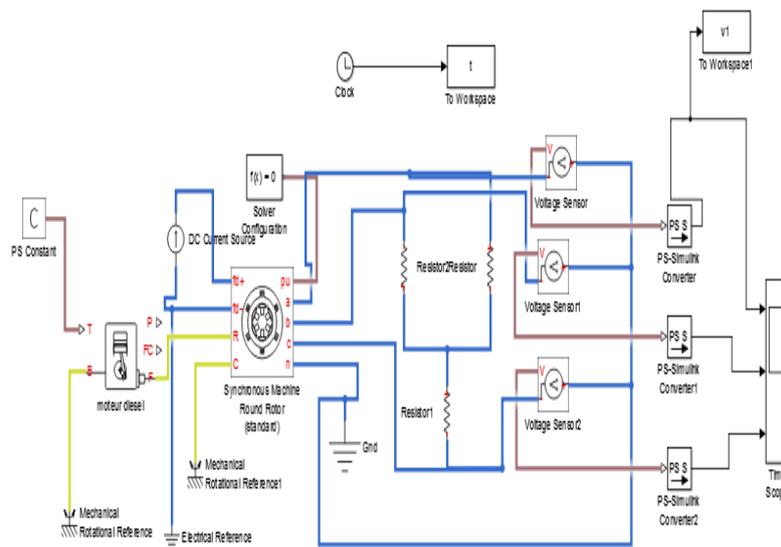


Figure 87. Simulation du groupe électrogène.

Les résultats de simulation sont montrés sur les figures ci-dessous.

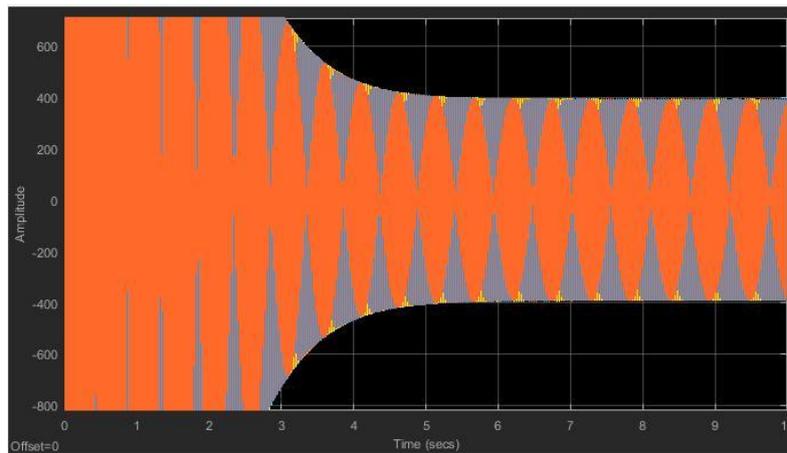


Figure 88. Les tensions de la charge du GE

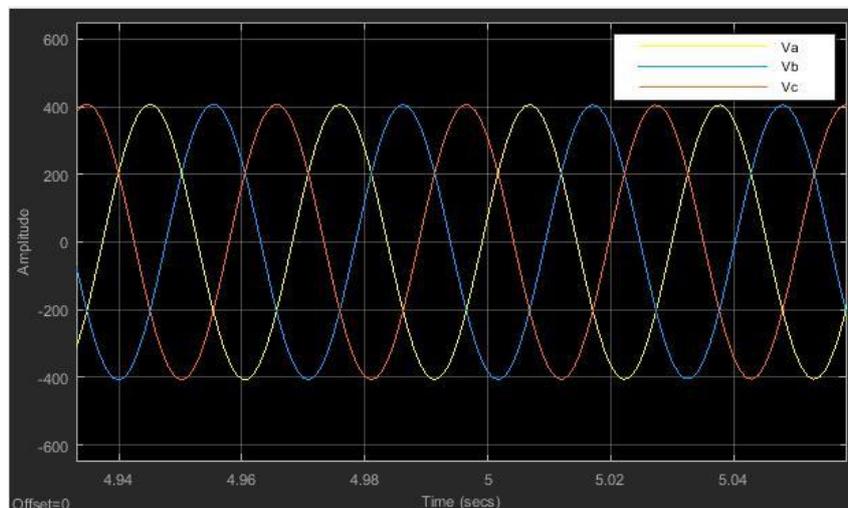


Figure 89. Zoom des tensions de la charge du GE

Le régulateur de la tension joue son rôle important, puisque les formes de la tension gardent des formes sinusoïdales.

## 9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule, le générateur photovoltaïque et le groupe électrogène. La simulation est faite par le logiciel MATLAB pour étudier dans un premier temps le comportement d'une cellule photovoltaïque puis un générateur photovoltaïque (composé de 60 cellules connectées en série) dans les conditions standard ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ). Nous avons étudié aussi l'influence de la température et de l'éclairement sur l'énergie produite par la cellule PV, ainsi l'influence de l'association de cellule (série, parallèle et série / parallèle) sur l'énergie produite. Nous avons utilisé l'outil MATLAB-SIMULINK pour simuler le comportement de la cellule et du

générateur PV en définissant le point de puissance maximale PPM avec la technique P&O et les tensions à la sortie de GE.

# *Conclusion générale*

---

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire, concerne à l'étude et implémentation d'une stratégie de contrôle d'un système hybride pour un fonctionnement autonome constitué des panneaux photovoltaïques, groupe électrogène et batteries de stockage. A travers ce projet nous avons traité les points suivant :

- Dans le premier chapitre nous avons vu généralité sur les systèmes hybride et ses composants, avec un rappel sur l'énergie solaire et le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque au silicium, ainsi que le générateur (GPV) tel que nous l'avons connu le groupe électrogène hybrides PV/GE.
- Ensuite, dans le deuxième chapitre nous nous avons présenté les convertisseurs statiques (DC-DC et DC-AC) utilisé dans les systèmes PV, et nous avons fait la modélisation du convertisseur abaisseur (Buck), élévateur (Boost) et l'onduleur. Et nous avons exposé brièvement la commande MPPT des convertisseurs, et la technique perturbation et observation (P&O). Après nous avons expliqué le principe du MLI(PWM) et nous avons présenté le système de stockage, les batteries et le système de régulation.
- Pour la troisième chapitre nous avons présenté une vue générale sur le programme nationale de transition énergétique Algérien avec une étude approfondie de cas de la centrale de OUED EL KEBARIT, unes des centrales réaliser en Algérie et ça dans le but d'avoir une idée générale sur les centrales photovoltaïque implantées.
- Enfin, dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation mathématique de la cellule, le générateur photovoltaïque et le groupe électrogène. La simulation est faite par le logiciel MATLAB pour étudier dans un premier temps le comportement d'une cellule photovoltaïque puis un générateur photovoltaïque (composé de 60 cellules connectées en série) dans les conditions standard ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ ). Nous avons étudié aussi l'influence de la température et de l'éclairement sur l'énergie produite par la cellule PV, ainsi l'influence de l'association de cellule (série, parallèle et série / parallèle) sur l'énergie produite. Nous avons utilisé l'outil MATLAB-SIMULINK pour simuler le comportement de la cellule et du générateur PV en définissant le point de puissance maximale PPM avec la technique P&O et les tensions à la sortie de GE.

# *Références bibliographiques*

- [01]: S. M. Ait-Cheikh, «Etude, Investigation et conception d’algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d’état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007
- [2]: “Photovoltaic’s systems; a buyer’s guide. Natural resources Canada”, Renewable and electrical energy Division, 580 Booth Street, 17th floor Ottawa, Ont. KIA OE4. ISBN0-662-31120-5.
- [3]: Mann Mk, “Economics of renewable hydrogen it’s about more than production”.Renewable hydrogen energy forum, Washington.
- [4]: Brahim Abdallah BRAHIM, “Etude des différentes configurations des systèmes d’énergie hybrides PV/Diesel et de leur impact sur le cout de production d’électricité,” 2iE, Burkina Faso (Ouagadougou), Mémoire pour l’obtention du master en ingénierie de l’eau et de l’environnement, Juin 2013.
- [5]: S.Moussa, A. Kaabèche et M. Belhamel” Evaluation des Performances d’un Système Hybride de Production d’Electricité- Fourniture d’énergie électrique sans interruption au moyen d’un système hybride (solaire, éolien, et diesel) totalement autonome .
- [6]: Isdeen YAYA NADJO ‘mémoire de fin de formation POUR L’OBTENTION DU DIPLÔME D’INGENIEUR DE CONCEPTION. Thème : Étude d’un système hybride solaire photovoltaïque/diesel pour une production décentralisée d’électricité au Bénin.
- [7]: Tsuda. I, Kurokawa. K, Nozaki.K, «Annual simulation results of photovoltaic system with redox flow battery », solar Energy Materials and solar cells 35, pp 503 –508, 1994.
- [8]: ZEGGAOUI.S, « Stockage de l’énergie Solaire », Master en Electronique, Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hacen Badi, El-Harrach, Alger, Algérie.2013.
- [9] : Touil.N, Ghenbazi.S, « Modélisation et Simulation d’un Systèm Photovoltaïque », MASTER ACADEMIQUE, Université Echahid Hama Lakhder d’El-Oued Septembre 2015.
- [10]: Zerga .A, Benyarou. F. et B. Benyousef : « Optimisation du rendement d’une cellule solaire NP au silicium monocristallin », Rev. Energ. Ren : physique Energétique (1998pp.95-100).
- [11]: BELAOUDMOU. O, BAHLOUL. A, «Etude et Commande d’un Système Hybride Eolien-Photovoltaïque Connecté au Réseau», diplôme de Master en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2012

- [12]: SAADI.S, « Effet Des Paramètres Opérationnels Sur Les Performances D'un Capteur Solaire Plan » Thèse de Magistère en physique, Université Mentouri De Constantine – 2010
- [13]: Boukli .h, « Conception et Réalisation d'un Générateur photovoltaïque Muni d'un convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique », THESE DE MAGISTER, Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen 2010/2011
- [14]: Antonio Luque and Steven Hegedus,"Handbook of Photovoltaic Science andEngineering", John Wiley & Sons Ltd, 2003
- [15]: F. Kininger, "Photovoltaic Systems Technology", University of Kassel, 2003
- [16]: HANANOU.F, ROUABAH.A, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque», MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 09 /06/2014
- [17]: Cédric Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Décembre 2008.
- [18] : BISKER. A, CHIRI .M, « Commande d'un Système Photovoltaïque en mode Isolé et en mode Connecté au Réseau », Projet de fin d'études En vue de l'obtention du diplôme D'Ingénieur d'État en Électrotechnique, École Nationale Polytechnique, Juin 2012
- [19]: B. Robyns, P. Bastard, "Production décentralisée d'électricité : contexte et enjeux techniques", La revue 3EI n°39, Décembre 2004.
- [20]: BELAKEHAL. S, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », THÈSE Doctorat, UNIVERSITE DE CONSTANTINE, 10/06/2010.
- [21]: SLAMA, F, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques Interconnectés au réseau électrique », Mémoire de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS -SETIFUFAS (ALGERIE) ,01/04/2011.
- [22]: MERAHLR, « MODELISATION D'UN DIPOSITIF MPPT POUR L'ETUDE DE L'AUGMENTATION DE LA PUISSANCE PRODUITE PAR LES GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUES » Mémoire de Magister, BADJI MOKHTAR ,2010.
- [23]: AOUIFI. S, « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque », Mémoire Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF-1 UFAS (ALGERIE), 2014.

- [24]: Bouguerra.T, «Optimisation d'un système photovoltaïque : Application en continu et en alternatif», Mémoire Magister, UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE 1, 30/06/2014.
- [25]: Makhoulf .M «Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque application», thèse de doctorat, Université de Constantine, 2012.
- [26]: Saidani.A, « Amélioration de la technique d'extraction de maximum de puissance du système photovoltaïque basé sur la méthode (P&O) », mémoire de master, Université de M'sila 2015.
- [27]: Chekired.F, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA», mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [28]: Helali.K, «Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude Comparative», Mémoire Magister, Université Mouloud de Tizi-Ouzou, 25/06/2012.
- [29]: E. SANYA, "Connaissance et maintenance des groupes électrogènes", Document de cours, Institut Universitaire et des Technologies de Lokossa, Bénin, 2006.
- [30]: BELGHMI Youssef, H. A. (s.d.). ETUDE DU GROUPE ELECTROGENE AUX SEIN DE CHU Hassan II.
- [31]: Chafa Aliane, A. Z. (s.d.). Etude d'un groupe électrogène. Récupéré sur [https://dl.ummo.dz/bitstream/handle/ummo/8645/AlianeChafa\\_ZerioulAziz.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dl.ummo.dz/bitstream/handle/ummo/8645/AlianeChafa_ZerioulAziz.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [32]: B. COLIN, "groupes électrogènes de secours", techniques de l'ingénieur, D 5180, 18 pages, 2007.
- [33]: Isdeen YAYA NADJO, 'Étude d'un système hybride solaire photovoltaïque/diesel pour une production décentralisée d'électricité au Bénin',Mémoire pour l'obtention du DIPLÔME D'INGENIEUR DE CONCEPTION,2012.
- [34]: SANKARA Moussa, "Conception de système de pilotage de centrale hybride PV/Diesel sans stockage d'énergie," 2iE, Burkina Faso (Ouagadougou), Mémoire pour l'obtention du master en ingénierie de l'eau et de l'environnement, Juin 2011.
- [35]: Ludmil Stoyanov, "Etude de différentes structures de systèmes hybrides a sources d'énergie renouvelables," UNIVERSITE DE CORSE PASQUALE PAOLI et UNIVERSITE TECHNIQUE DE SOFIA, 2011.

[36]: F. Baghdadi, “ Modélisation et Simulation des Performances d’une Installation Hybride de conversion d’Energies Renouvelables ”, Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.

[34]: A. Lyes, « Etude de la connexion au réseau électrique d’une centrale photovoltaïque », UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU Mémoire de Magister, 2011.

[35]: NECHE. K, « Aide à la mise au point d’un banc de test photovoltaïque », Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi, El-Harrach, ALGER.

[36]: A. Oi, « Design and simulation of photovoltaïque water pumping système », Thèse de Magister de l’université California, USA, Septembre 2005.

[37]: ARCHES Raphaël, CHERON Yvon, ESCAUT Bernard, Equipe de recherche des Convertisseurs Statiques du LEEI « Convertisseurs continu-continu non isolés » Institut Nationale Polytechnique de Toulouse.

[38]: Michel Pinard « Commande électronique des moteurs », ISBN 210 00 5326 4 dunod, Paris 2004, (www.dunod.com).

[39]: Minwon Park, In-Keun Yu, Member IEEE, "A Study on the Optimal Voltage for MPPT obtained by Surface Temperature of Solar Cell ", Changwon National University, 2000.

[40]: Home Energy, « Etude comparative de panneaux solaires photovoltaïques », Rapport de stage de fin de D.U.T. Mesures Physiques, Université Paris VII 2, place Jussieu 75005 PARIS, Mai 2006/Juillet 2006

[40]: Sahraoui.A.N, «étude d’une chaîne de convertisseur photovoltaïque», Mémoire de magistare Univerisité de Msila, 2010.

[41]: Walker, Geoff R« Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV Model », Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC ‘00, Brisbane. 2000.

[43]: DJERIOU.S, « Simulation d’un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone », MAGISTER, Soutenu le 03/07/ 2011.

[44]: Eric Schiller « le pompage photovoltaïque » manuel de cours à l’intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF / universités d’Ottawa, EIER / CERRPOMPAGE.

[45]: HANANOU.F, ROUABAH.A, «Modélisation et simulation d’un système photovoltaïque», MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE KASDI MERBAHOUARGLA, 09 /06/2014