

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Ecole Nationale Polytechnique

Département d'automatique



Projet

En vue de l'obtention du diplôme

De Master en Automatique

Etudié par :

HAMICHE Koussaila

Thème :

Extraction du Maximum de Puissance d'une Chaine Photovoltaïque pour alimenter un système de dessalement RO

Proposé et dirigé par :

Pr. M.TADJINE.

Laboratoire de Commande des Processus

Ecole Nationale Polytechnique, 10, AV. Hassen Badi, El-Harrach, Algérie

REMERCIEMENT

Nous remercions d'abord **ALLAH** qui nous a guidé, et nous a donné le courage, la volonté et la patience pour tenir à terme ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre promoteur, monsieur le professeur **M.TADJINE**, pour sa disponibilité et sa contribution avec ses précieuses orientations et ses pertinents conseils et remarques, qu'il trouve ici notre profonde reconnaissance pour son temps qu'il nous a consacré. Nos chaleureux remerciements vont aussi à monsieur **M.CHAKIR** pour son assistance, ses éclaircissements et son aide inestimable ainsi que ses encouragements durant toute la période du travail.

Nous tenons à remercier très chaleureusement :

- Monsieur **ABDELOUAL** pour avoir fait l'honneur de présider notre jury de soutenance.
- Monsieur **R.ILOUL** pour l'honneur qu'il nous a fait d'avoir accepté d'en être examinateur et d'avoir consacré de son temps précieux à la lecture de ce mémoire.

Nos vifs remerciements sont adressées aussi à tous les enseignants du génie électrique et du département de l'automatique en particulier pour leurs engagements, leur générosités et leurs sérieux au travail afin qu'ils nous transmettent de leur précieux savoir tout au long de notre cursus à l'Ecole Nationale Polytechnique.

C'est avec une attention particulière que nous remercions chaleureusement nos deux familles pour leurs aides permanentes, et soutiens aussi bien financier qu'affectif. On leurs témoigne notre profondes reconnaissance et gratitude

Nous remercions profondément tous nos amis qui nous ont été d'un grand soutiens et appui dans les moments plus difficiles.

Que les nombreuses personnes qui par une participation quelconque ou avec une simple suggestion, nous ont aidés, qu'ils trouvent nos sincères reconnaissances.

ملخص:

يهدف هذا العمل الى المساهمة في تلبية حاجة صناعية الا وهي توفير الطاقة اللازمة لمحطة تحلية مياه البحر عن طريق التناضح العكسي بواسطة الطاقة الشمسية. اهتمنا في هذا العمل بالتحكم و زيادة مردود مولدات كهروضوئية موصلة بمحولات طاقة متعددة الخلايا. أثناء عملنا قمنا بإيجاد استراتيجية تحكم تعتمد على آلية التحكم التراجعي و الهدف من هذه الاستراتيجية هو ضمان اسخراج الاستطاعة القصوى من المولدات الكهروضوئية و المسماة بخوارزمية تتبع نقطة الاستطاعة القصوى.

كلمات المفتاح: تحلية مياه البحر, التناضح العكسي, المولدات الكهروضوئية

Résumé :

Ce manuscrit apporte une contribution à un besoin industriel spécifique ; celui d'alimenter une station dessalement d'eau de mer par osmose inverse par énergie solaire. Le travail établi repose sur l'extraction de puissance maximale du panneau photovoltaïque afin de bénéficier de l'énergie disponible en tout circonstances. Pour cela, nous avons placé un convertisseur statique d'électronique de puissance DC-DC entre la le GPV et la charge. Ce dernier par le biais d'une commande spécifique et que nous avons utilisé, appelée en anglo-saxon MPPT P&O « Maximum Power Point Tracking » permet au générateur de délivrer sa puissance maximale P_{max} en faisant glisser n'importe quel point de fonctionnement au point de fonctionnement nominal MPP pour une courbe $I(V)$ donnée.

Mots clés : Osmose inverse, Dessalement, Générateur photovoltaïque.

Abstract :

This manuscript brings a contribution for a specific industrial need; which is supplying a sea water desalination station by reverse osmosis powered by solar energy. This work is based on the extraction of the maximum power from photovoltaic panels to take advantage from available energy in all circumstances. To do that, we placed a static power electronic convertor DC-DC between the photovoltaic generator and the charge. This convertor by a specific algorithm that we used, called MPPT « Maximum Power Point Tracking » allow us to the generator to deliver its maximum power P_{max} by sliding any operating point to a nominal operation point MPP for a given curve $I(V)$.

Key words: Reverse Osmosis, Desalination, photovoltaic generator.

Table des matières

Introduction	1
I.1.Potentiels de l'énergie solaire en Algérie.....	1
I.2.Type d'installations photovoltaïque	2
I.3. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque	2
I.4.Principe de l'effet photovoltaïque	3
I.4.1. La cellule photovoltaïque.....	3
I.4.2.Type de modules photovoltaïques.....	4
I.5. Modélisation électrique d'un module photovoltaïque	5
I.6. Problématique de production de puissance maximale	7
I.6.1. Connexion directe GPV-charge comme mode de transfert de puissance	7
I.6.2.Influence de l'ensoleillement et de la température sur la caractéristique du GPV.....	9
I.6.3. La connexion GPV-charge via un étage d'adaptation continu-continu	9
I.6.4. L'étage d'adaptation	10
I.6.5. Les batteries	12
I.7. Principe de recherche du point de fonctionnement maximal	13
I.8. Synthèse des différentes MPPT rencontrées dans la littérature	14
I.8.1. Les premiers types de commande MPPT.....	14
I.8.2.Commandes MPPT extrémales.....	16
I.8.2.1.Principe des commandes "Perturb and Observe" (P&O).....	16
I.8.2.2.Commande avec "Conductance incrémentale"	17
I.8.3. Commandes intelligentes	20
I.9. Simulation et analyse	20
I.9.1 fonctionnement de la chaine sous conditions constantes	20
I.9.2. comportement de la chaine face aux changements d'éclairements.....	21
Conclusion	23
Bibliographie	

Notations et abréviations

GPV : Générateur Photovoltaïque.
MMP : Point de Puissance Maximale.
MPPT: Maximum Power Point Tracking.
P&O : Perturb & observe.
InCond: Incremental Conductance.
 I_{sc} : courant de court circuit.
 I_{pv} : courant Photovoltaïque.
 V_{pv} : tension photovoltaïque.
 V_{oc} : tension de court circuit.
 I_{MPP} : courant du point de fonctionnement optimal.
 V_{MPP} : tension du point de fonctionnement optimal.
 k_v : facteur de la régulation proportionnelle de tension.
 k_i : facteur de la régulation proportionnelle de courant.
 t : temps
 N_e : nombre d'heure équivalent.
 E_{sol} : Energie solaire journalière par unité de surface.
 P_c : puissance crête.
 C_u : capacité utile.
 C_t : capacité totale.

Caractéristiques du module photovoltaïque (YINLGLY SOLAR):

puissance crête (W)	80	Tension Optimale (v)	17
Tension de circuit ouvert (v)	22	Courant optimal (A)	4.71
Courant de court circuit (A)	5.04	Tension maximale (v)	50

Introduction :

De nos jours, les problèmes écologiques constituent un véritable enjeu pour la société qui, paradoxalement, ne cesse d'accroître ses besoins en énergie, toutes les études le montrent que nos besoins en énergie sont en constante augmentation : la consommation mondiale d'énergie a été multipliée par quarante au cours du siècle dernier. La figure fig.1 montre l'évolution de ces derniers siècles avec une extrapolation pour les 50 années à venir [1]. A l'heure à laquelle les réserves de pétrole s'amenuisent et alors que le débat éthique compromet l'avenir déjà incertain du nucléaire, les énergies renouvelables en général et l'énergie photovoltaïque en particulier s'avèrent être un atout incontournable pour régler ce genre de problèmes.

L'effet photovoltaïque est une technologie qui transforme le rayonnement lumineux en électricité. Une curiosité scientifique découverte par le physicien français Edmond Becquerel en 1839 et dont Einstein en expliqua les mécanismes en 1912 qui resta une recherche de laboratoire jusqu'aux années 50. Dès les années 50, de rapides progrès furent obtenus par les équipes de *Bell Laboratories* qui fabriquèrent la première cellule au silicium cristallin de rendement 4% à partir du procédé de tirage *Czochralski*. En fait, c'étaient les programmes spatiaux qui donnèrent à cette technique ses premières applications commerciales. Or, jusqu'aux années 70, les photopiles étaient vraiment trop chères pour être utilisées sur terre. Et ce n'est que depuis le deuxième choc pétrolier, au début des années 80, qu'un intérêt s'est rapidement manifesté à travers le monde pour les applications énergétiques terrestres des photopiles solaires. L'utilisation du photovoltaïque, étant une énergie propre et inépuisable, s'est étendue dans les pays développés puis dans les pays émergents et ceux en voie de développement, afin de soulager ou assurer entièrement l'alimentation en électricité [2].

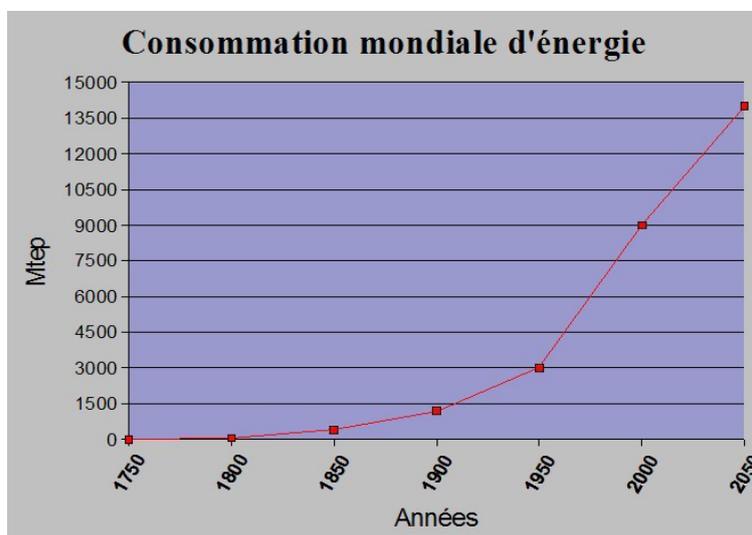


Fig.1. Evolution et extrapolation de la consommation d'énergie mondiale

1.Potentiels de l'énergie solaire en Algérie :

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an}$ au Nord et $2263\text{ kWh}/\text{m}^2/\text{an}$ au Sud du pays. Le tableau 1 montre la répartition du potentiel solaire en Algérie [3] :

Régions	Régions cotières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Énergie moyenne reçue ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{an}$)	1700	1900	2650

Tableau.1. Potentiel solaire en Algérie.

2.Type d'installations photovoltaïque :

Généralement on distingue deux types d'installations photovoltaïques :

- Installations autonomes : Ces installations sont isolées du réseau de distribution comme le montre la figure fig2.a, elles sont dimensionnées de sorte à assurer la demande de charge.
- Installations raccordées au réseau : dans ces installations, le générateur est rattaché au réseau de distribution électrique pour injecter de l'énergie au réseau publique tel que c'est montré dans la figure fig.2.b.

Dans notre travail on s'intéressera à l'alimentation de l'installation osmose inverse par un système photovoltaïque autonome.

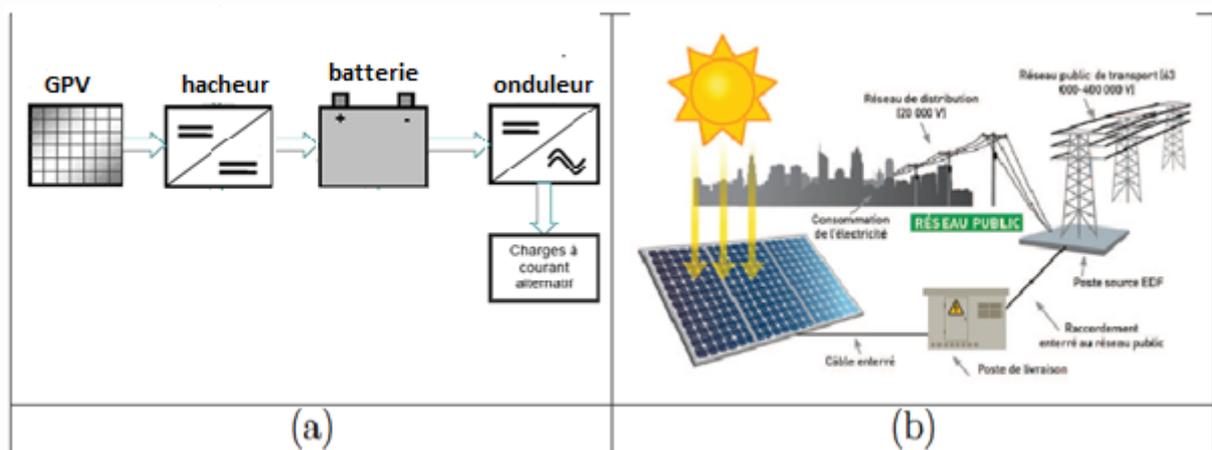


Fig.2 Type d'installations Photovoltaïques.

3. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque :

Certes, la technologie photovoltaïque présente de nombreux avantages et veille à un développement durable de la planète, mais elle présente aussi quelques inconvénients. On citera [4] :

a. Les avantages :

- Le soleil est une source d'énergie propre et renouvelable, qui ne produit ni de gaz polluant ni de déchets toxiques.
- L'énergie solaire est inépuisable, contrairement aux énergies fossiles.
- Rendre les endroits isolés autonomes.
- Les panneaux solaires demandent très peu d'entretien.
- Les panneaux solaires restent silencieux et non dérangeants.
- Les panneaux solaires sont recyclables.
- Les panneaux solaires sont simples et rapides à installer et ne présentent aucun danger au niveau de l'installation ou de l'exploitation.

b. Inconvénients :

- Les panneaux solaires sont actuellement trop onéreux.
- Certaines cellules solaires nécessitent des produits polluants (ex : des solvants).
- Basse fiabilité des éléments auxiliaires (les batteries de stockage).
- Le rendement de conversion d'un module est faible, et diminue avec le temps (20% de moins au bout de 20 ans).
- L'énergie solaire n'est pas compétitive lorsqu'il s'agit de production importante d'énergie (nécessite grandes superficies).
- L'énergie solaire est variable sous les climats tempérés, surtout en fonction des saisons.

4.Principe de l'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque est la conversion de l'énergie lumineuse provenant du Soleil en énergie électrique par l'intermédiaire des cellules photovoltaïques. Ceci se fait en trois étapes [1] :

- Absorption des photons de la lumière solaire.
- Conversion de l'énergie reçue par les photons en énergie électrique (particules électriques libres).
- Collecter les particules dans un circuit électrique externe.

4.1. La cellule photovoltaïque :

Les cellules solaires ont une structure similaire qui ne dépend pas du semi conducteur utilisé ; malgré qu'elles sont, généralement, fabriquées en silicium cristallin. Ainsi, elles sont constituées de deux couches d'un semi-conducteur d'épaisseurs différentes, l'une dopée positivement « p » (la couche inférieure) et l'autre négativement « n » (la couche supérieure) avec ce qu'on appelle l'apport ciblé d'atomes étrangers (en général, le bore et le phosphore) créant ainsi une jonction P-N et, par la suite, une barrière de potentiel au niveau de la jonction. Donc, lorsque la cellule est éclairée le champ électrique généré dans cette zone permet de séparer les électrons des trous, et de les véhiculer dans des sens différents, ce qui va créer une différence de potentiel entre les deux couches. Cette dernière est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule, sachant que les deux couches sont en contact avec deux électrodes. C'est ainsi qu'on peut récolter la puissance convertie à travers une charge continue. De plus, les cellules sont recouvertes d'une couche antireflet lumineux afin d'emprisonner le maximum de photons en étant exposées au rayonnement solaire dans le but d'augmenter leurs rendement. Cette dernière est aussi protégée par une

couche de verre contre les conditions extérieures défavorables [2], comme illustré sur la figure fig.3.

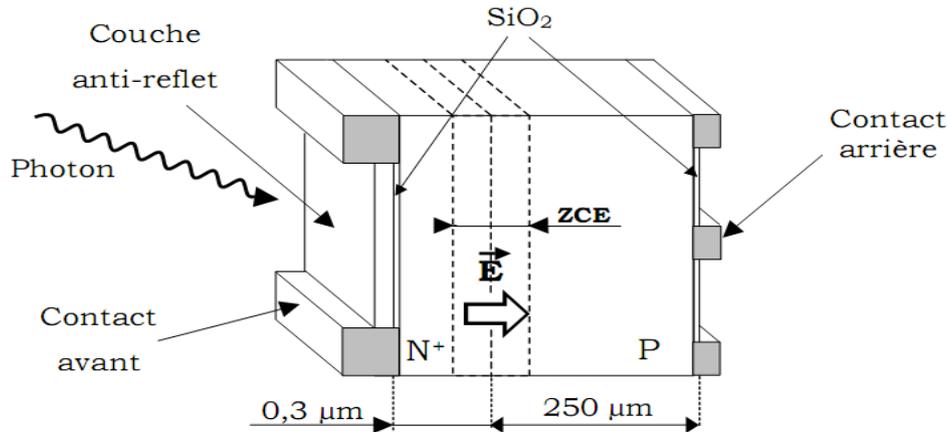


fig.3 cellule photovoltaïque typique [1].

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN) [5]. Donc, pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées créant ainsi un module ou un panneau photovoltaïque. Tel que, la connexion en série des cellules permet d'augmenter la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur photovoltaïque aux caractéristiques souhaitées [2] comme le montre la figure 4.

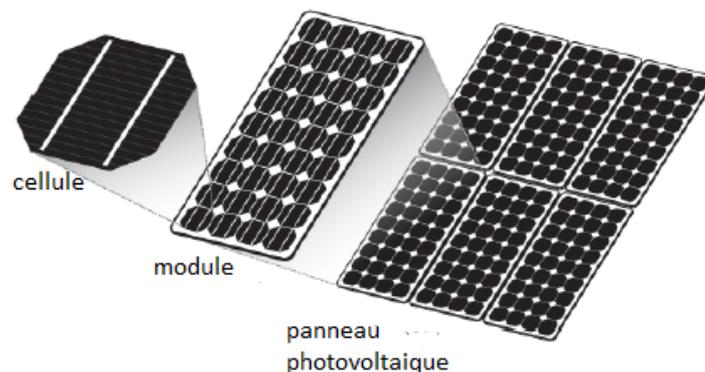


Fig.4. composants d'un générateur photovoltaïque.

4.2.Type de modules photovoltaïques :

Selon leur matériau de base, les cellules peuvent être divisées en 3 groupes [2] :

Cellules au silicium monocristallin : elles sont les plus répandues, elles ont la meilleure efficacité qui varie généralement de 13 à 18 %. Leur durée de vie est habituellement de plus de 25 à 30 ans.

Cellules au silicium polycristallin : possèdent les mêmes caractéristiques physiques, cependant elles ont une efficacité légèrement inférieure, soit de 12 à 15 %.

Cellules à couche mince (cellules amorphes au silicium et autres matériaux tels que, CIS, CdTe, GaAs). Leur efficacité est moindre, elle varie de 6 à 10 % et leur durée de vie est généralement inférieure à 20 ans.



Fig.5. Type de modules photovoltaïques.

5. Modélisation électrique d'un module photovoltaïque :

Pour décrire le comportement du module photovoltaïque, on est amené à utiliser le modèle électrique. Le circuit électrique équivalent est donné dans [5] et représenté par la figure figI.6 suivante :

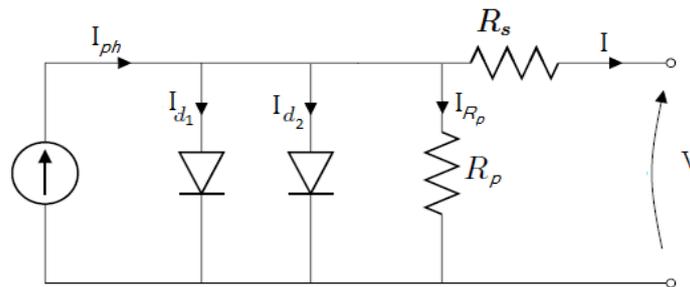


Fig.6. Schéma du modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque

Comme le montre la figure fig.6 une photopile comporte en réalité une résistance série R_s et une résistance en dérivation ou shunt R_p . Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile.

La résistance série est 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.

La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

De la figureI.6, le modèle mathématique de la caractéristique I-V est donné par la relation suivante :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\frac{q(V-R_S I)}{\mu_1 K T}} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{\frac{q(V-R_S I)}{\mu_2 K T}} - 1 \right) - \frac{V + R_S I}{R_p} \quad (1)$$

Où :

I et V sont le courant et la tension de sortie de la cellule photovoltaïque,

I_{ph} : est le photo-courant produit,

I_{s1} et I_{s2} : sont les courants de saturation des diodes,

μ_1 et μ_2 : les facteurs de pureté de la diode,

R_s et R_p : sont respectivement la résistance série et la résistance parallèle,

T : est la température absolue en Kelvin,

q : est la charge élémentaire constante,

k : est la constante de Boltzmann.

Le photo-courant est atteint à une insolation maximum. Souvent on a :

$$I_{ph} = SI_{ph.max} \quad (2)$$

S : pourcentage d'insolation.

Il est évident de l'équation (1), que la caractéristique courant-tension dépend fortement de l'insolation et de la température.

La dépendance de la température est encore amplifiée par les propriétés du photo-courant et les courants de saturation inverse des diodes qui sont donnés par :

$$I_{ph}(T) = I_{(ph.T=29)}(1 + (T - 29)(5.10^{-4})) \quad (3)$$

$$I_{s1} = K_1 T^3 e^{-\frac{E_g}{KT}} \quad (4)$$

$$I_{s2} = K_2 T^{\frac{5}{2}} e^{-\frac{E_g}{KT}} \quad (5)$$

Où :

E_g est la bande d'énergie du semi-conducteur avec :

$$K_1 = 1.2 \text{ A/cm}^2 \text{K}^3$$

$$K_2 = 2.9 \cdot 10^5 \text{ A/cm}^2 \text{K}^3$$

La considération du modèle de circuit équivalent la figure 6 mène à l'équation 6 pour une rangée photovoltaïque de cellules (généralement considéré comme un panneau solaire), avec z cellules photovoltaïques raccordées en série.

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\frac{q(V-R_s I Z)}{\mu_1 K T}} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{\frac{q(V-R_s I Z)}{\mu_2 K T}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I Z}{R_p} \quad (6)$$

Ainsi la caractéristique statique du courant et de la puissance en fonction de la tension de la cellule est illustrée dans la figure fig7 :

En observant la caractéristique, on voit qu'il y a trois points essentiels à retenir :

- Le premier point correspond au point de fonctionnement à tension nulle, où la cellule fournit un courant maximum, nommé courant de court-circuit I_{sc} .
- Le deuxième point correspond au point de fonctionnement à vide, où la cellule présente une tension maximale, nommée tension de circuit ouvert V_{oc} .
- Le troisième point correspond au point de fonctionnement où la puissance est égale à la puissance maximale que peut fournir la cellule, caractérisé par les coordonnées $(V_{MPP}, I_{MPP}, P_{MPP})$.

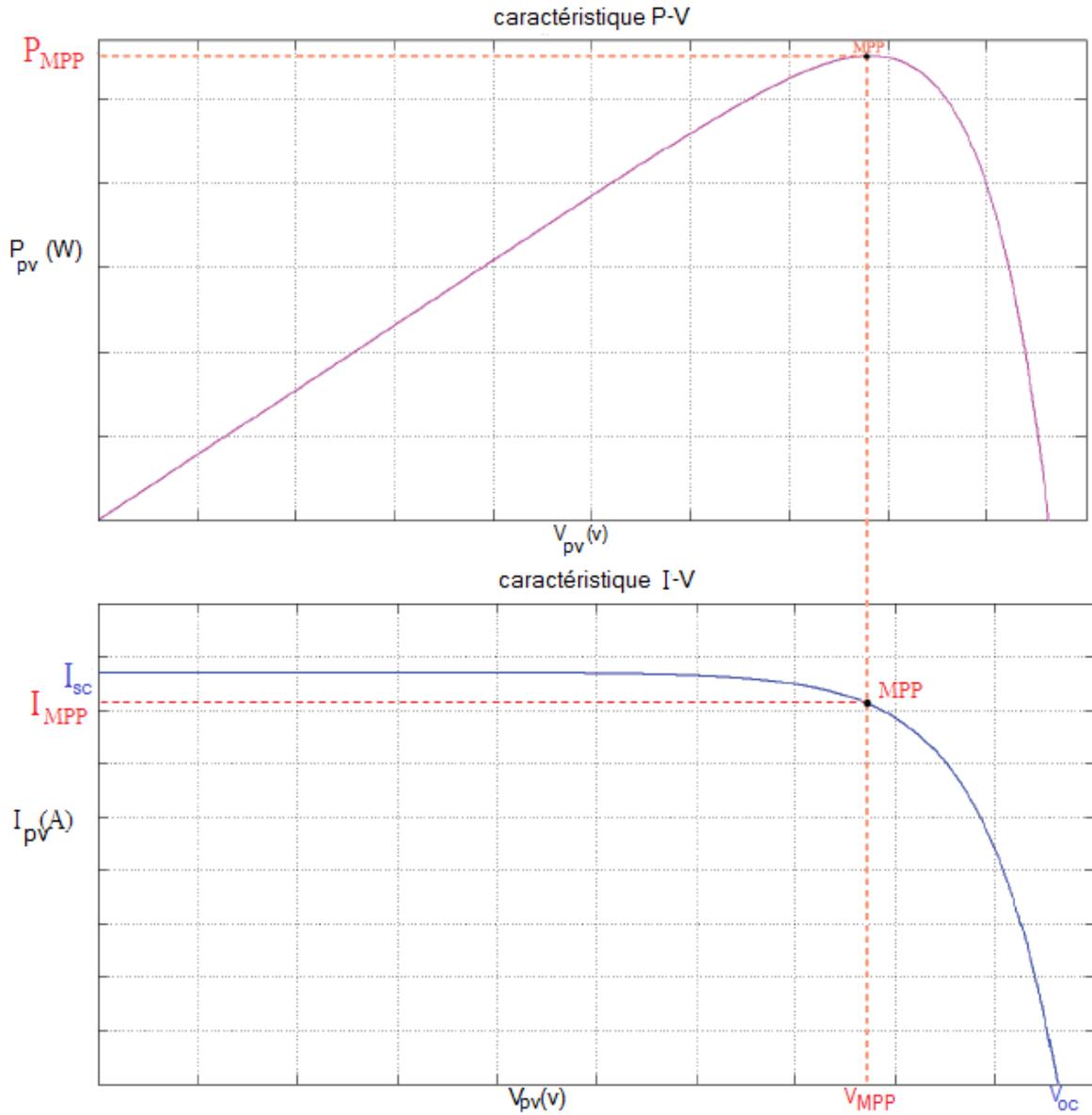


fig.7. caractéristique statique d'une cellule photovoltaïque.

6. Problématique de production de puissance maximale :

6.1. Connexion directe GPV-charge comme mode de transfert de puissance :

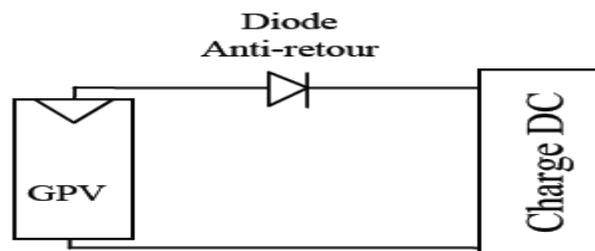


fig.8. Connexion directe GPV-Charge via une diode anti-retour.

La connexion directe du panneau solaire photovoltaïque à une charge reste actuellement le principe de fonctionnement le moins cher et le plus répandu [6], Figure fig8. Bien sûr, il faut s'assurer auparavant que la charge accepte bien la connexion directe au générateur de puissance continue qu'est le panneau solaire. En effet, le GPV est une source d'énergie continue qui ne peut être connectée à une charge alternative que via un étage d'adaptation de type onduleur.

L'inconvénient majeur de cette connexion est sa dépendance directe entre la puissance fournie par le générateur et la charge. En fait, la puissance fournie par le module photovoltaïque résulte de l'intersection entre la caractéristique $I(V)$ du GPV et celle de la charge. Comme la caractéristique de la Figure fig.9 le montre, la puissance transmise directement à une batterie ou une charge résistive de type lampe ou bien même un moteur (MCC), n'est pas toujours effectuée à la puissance maximale P_{MAX} (PPM = point de puissance maximale) que peut fournir le panneau solaire. La solution la plus utilisée actuellement est de créer généralement un GPV par association de cellules pour obtenir une puissance nominale donnée proche de celle nécessaire pour l'utilisation. Cette solution est valable pour les charges DC de type batterie recueillant le courant PV sous des tensions proches de V_{opt} . Une autre application directe est le pompage d'eau « au fil du soleil ». Dans ce cas, on garantit statistiquement la coïncidence du point de puissance maximale PPM du générateur avec les besoins optimaux de la charge. Toutefois, les pertes de ce genre d'association peuvent aller de 5% à 30% selon les gisements solaires et l'état des charges [6].

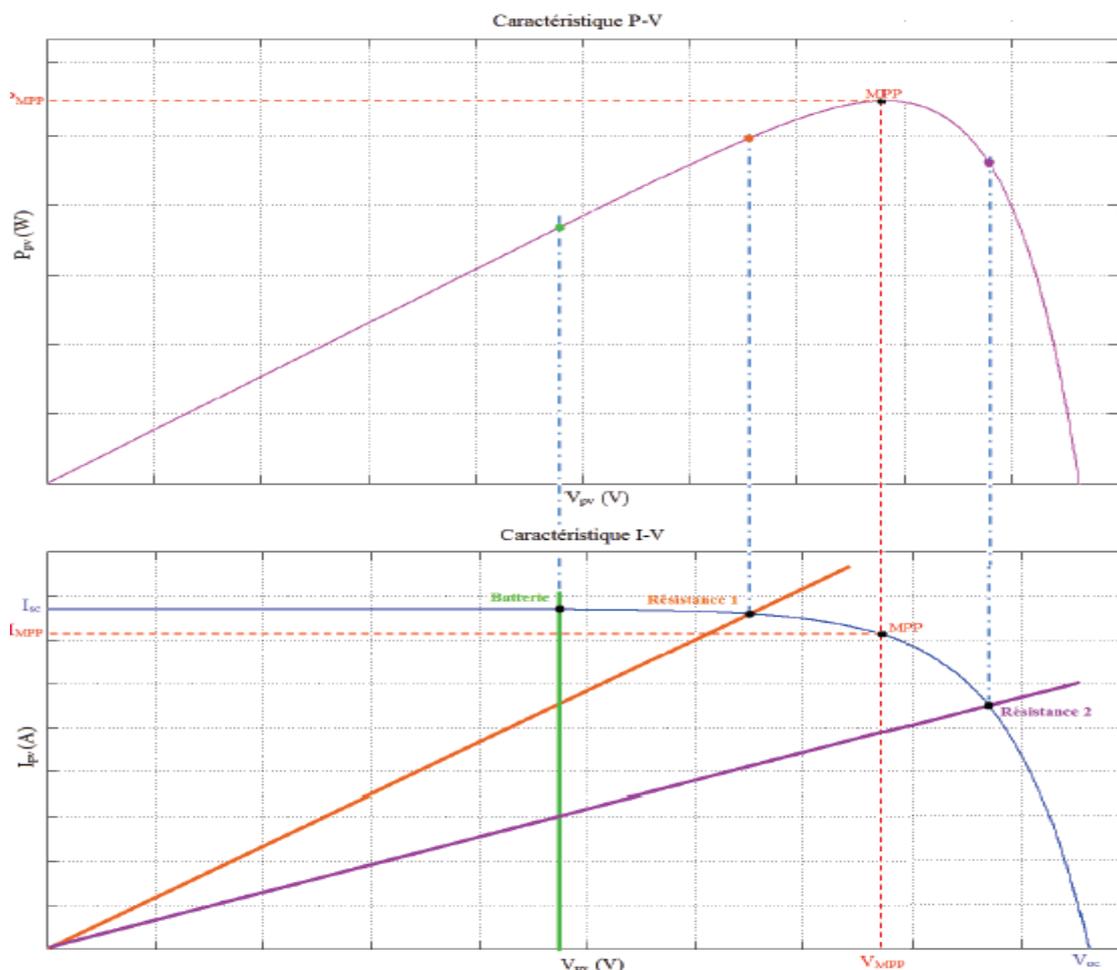


Fig.9. Caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque en connexion directe GPV-Charge.

6.2. Influence de l'ensoleillement et de la température sur la caractéristique du GPV :

Les caractéristiques électriques d'un GPV dépendent fortement et peuvent changer rapidement en fonction de l'irradiation solaire, de la température et à plus long terme du vieillissement des cellules. Les deux figure fig.10 donnent un extrait de caractéristiques électriques fournies par un constructeur et illustrant bien ces phénomènes en fonction de l'éclairement et de la température en environnement contrôlé. En réalité, la connexion directe est surtout utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre, son coût minimal et sa fiabilité. En termes de rendement, même si la puissance du GPV est choisie judicieusement par rapport à la charge, ce type de connexion souffre souvent d'une mauvaise adaptation électrique et présente des pertes importantes de production d'énergie.

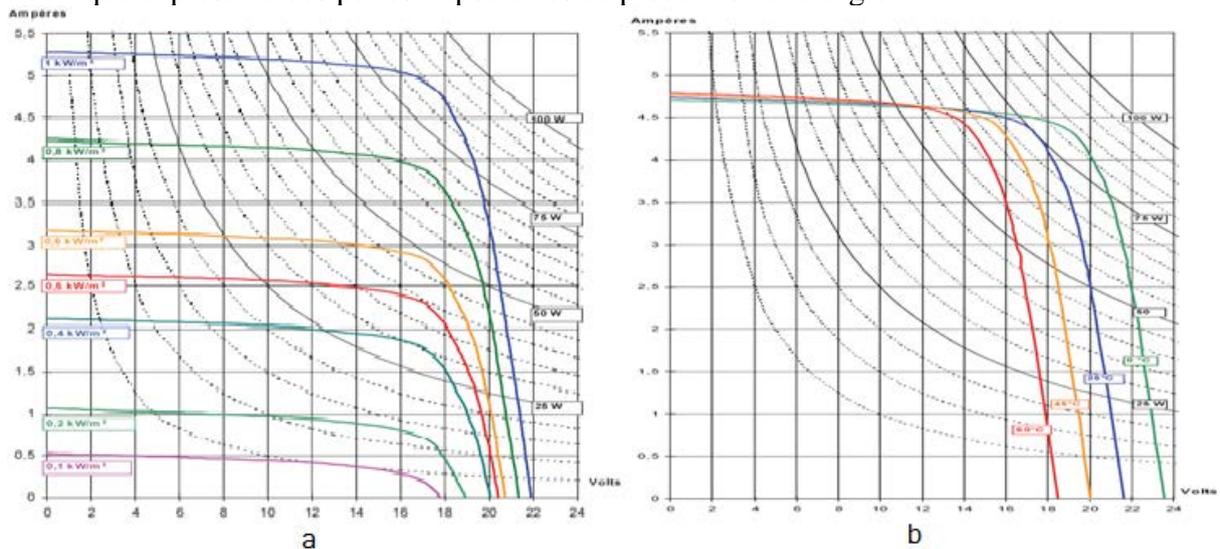


Fig.10. Influence de l'ensoleillement (a) et de la température (b) sur la caractéristique du GPV.

6.3. La connexion GPV-charge via un étage d'adaptation continu-continu :

Les panneaux solaires de première génération sont généralement dimensionnés pour que leurs PPM correspondent à la tension nominale de batterie de 12 ou 24 Volts. Grâce à cette configuration, une simple connexion directe via une diode anti-retour suffit à effectuer le transfert d'énergie du GPV à la charge. Cependant, les caractéristiques non-linéaires du module photovoltaïque et sa sensibilité aux conditions extérieures, comme l'éclairement et la température, induisent des pertes énergétiques. L'utilisation d'un étage d'adaptation afin d'optimiser la production d'énergie à tout moment est ainsi de plus en plus préconisée [6].

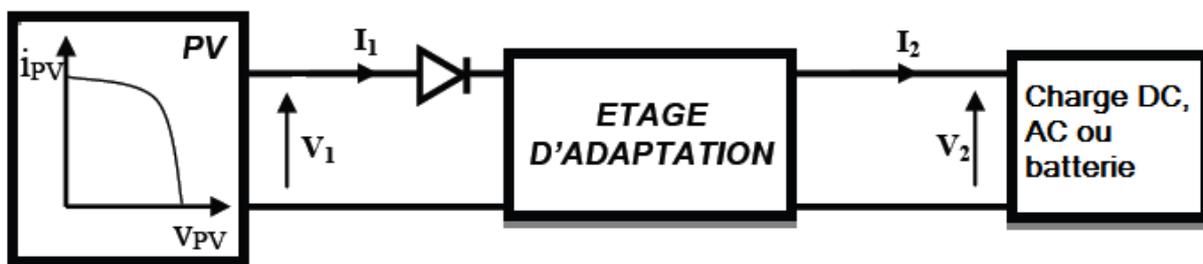


fig.11. Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation.

Ce dernier, par le biais d'une commande spécifique est alors susceptible de permettre au générateur de délivrer sa puissance maximale P_{\max} en faisant glisser n'importe quel point de fonctionnement au point de fonctionnement nominal MPP pour une courbe $I(V)$ donnée ; tout en assurant que la tension ou bien le courant de la charge correspond bien aux caractéristiques de cette dernière.

6.4. L'étage d'adaptation :

La solution communément adoptée, de sorte à amener le générateur PV à fonctionner dans son régime optimal, est l'introduction d'un convertisseur statique DC-DC pour jouer le rôle d'adaptateur de puissance entre la source et la charge. Ce qui permet, par la suite, d'assurer l'optimisation du transfert de puissance. Dans notre étude, on s'intéressera à la poursuite du point de fonctionnement maximal en utilisant un hacheur (Back/Boost) qui est représenté sur la figure fig.13.

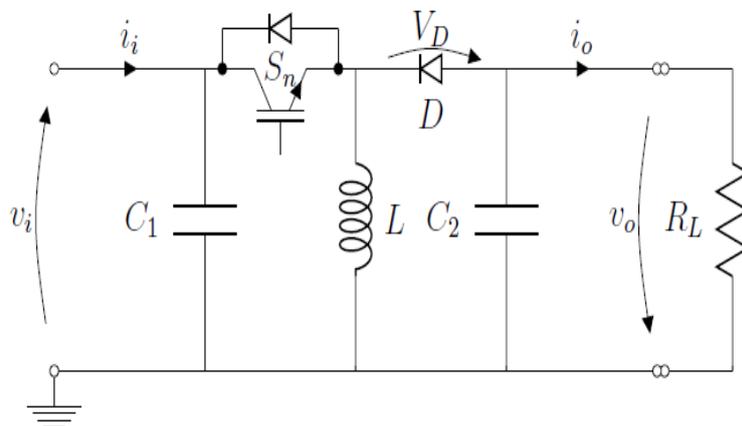


Fig.13. schéma électrique d'un hacheur back/boost lié à une charge DC.

Suivant l'état de l'interrupteur S , le fonctionnement d'un hacheur Buck-Boost peut être subdivisé en deux configurations.

Configuration1 :

$S=1, t \in [0, \alpha T_d]$: L'interrupteur S est fermé, la diode D est bloquée ($V_D < 0$), ceci conduit à une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance L .

Avec :

α : Le rapport cyclique ;

T_d : La période de commutation qui est égale à $\frac{1}{f_d}$ (f_d : La fréquence de hachage).

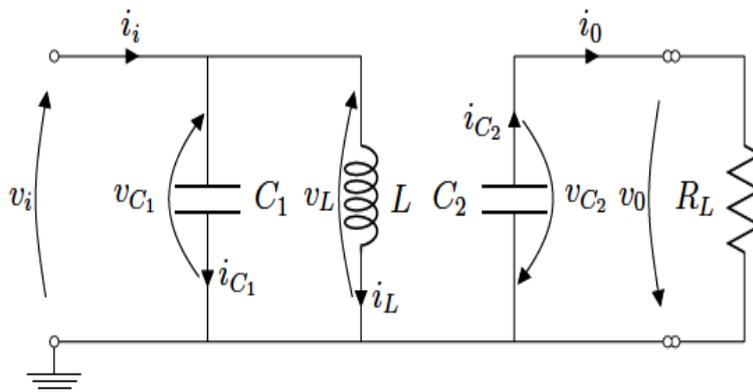


fig.14. Schéma électrique d'un hacheur back/boost lorsque $S=1$.

En appliquant la loi des nœuds et des mailles à ce circuit, on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} i_{C_1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{C_2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_o(t) \\ v_L = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_i(t) \end{cases} \quad (7)$$

Configuration2 :

$S=0$, $t_2 \in [\alpha T_d, T_d]$: L'interrupteur S est ouvert, la diode D est passante ($V_D > 0$), ceci assure le transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance L vers la capacité C₂ et la charge R_L.

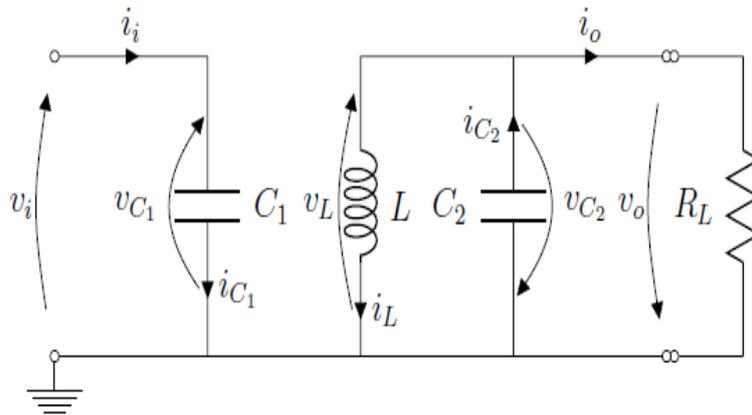


fig.14. Schéma électrique d'un hacheur back/boost lors que S=0.

$$\begin{cases} i_{C_1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{C_2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) + i_o(t) \\ v_L = L \frac{di_L(t)}{dt} = -v_o(t) \end{cases} \quad (8)$$

L'équation 7 et 8 représentent le comportement du hacheur dans la configuration 1 et la configuration 2 respectivement. Ainsi en assemblant les deux, on obtient son comportement sur une période complète, les équations décrivant sa dynamique est donc donnée comme suit :

$$\begin{cases} C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i - \alpha i_L \\ C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_o(t) + (1 - \alpha) i_L(t) \\ L \frac{di_L(t)}{dt} = \alpha v_i - (1 - \alpha) v_o(t) \end{cases} \quad (9)$$

Ondulations du courant et des tensions :

Les équations de l'ondulation du courant et de la tension sont données par les équations suivantes [12] :

$$\begin{cases} I_{LCC} = 2\Delta I_L = \frac{V_i - R_L I_L}{L} DT_s \\ V_{iCC} = 2\Delta V_{C1} = -\frac{I_i - I_L}{C_1} DT_s \\ V_{OCC} = 2\Delta V_{C2} = \frac{I_O}{C_2} DT_s \end{cases} \quad (10)$$

Les valeurs des composants à choisir pour des ondulations données sont :

$$\begin{cases} L = \frac{V_i - R_L I_L}{2\Delta I_L} DT_s \\ C_1 = -\frac{I_i - I_L}{2\Delta V_i} \\ C_2 = \frac{I_O}{2\Delta V_O} DT_s \end{cases} \quad (11)$$

6.5. Les batteries :

Le système tampon utilisé le plus couramment pour les systèmes photovoltaïques est la batterie d'accumulateurs électrochimiques. Les deux types de batteries 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).

La batterie au plomb-acide est la plus connue, étant utilisée depuis plus longtemps pour fournir le courant de démarrage des voitures.

Dans ce qui suit, on prendra le modèle électrique d'une batterie plomb-acide proposé dans [5] représenté dans la figure fig.15.

C_{bp} est la capacité électrochimique de la batterie, elle est donnée par l'expression générale de l'énergie :

$$E_c = \frac{1}{2} C V_c^2 \quad (10)$$

Avec C étant la capacité et V_c la tension du condensateur.

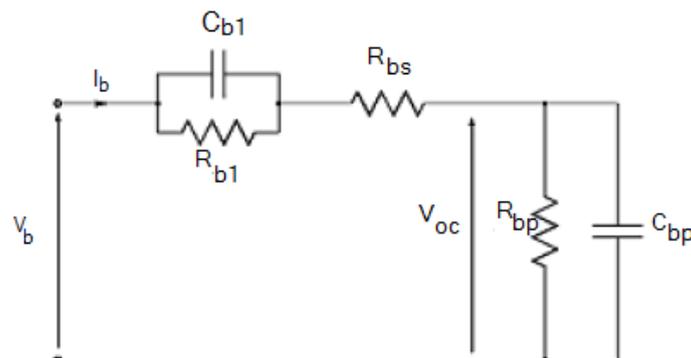


Fig.15. Modèle équivalent de la batterie.

À la différence d'un condensateur, la tension d'une batterie ne sera pas égale à zéro à son plus bas état de charge.

La capacité entièrement chargée de la batterie est représentée par un niveau maximum de charge.

Ceci est indiqué par l'équation suivante :

$$E_b = E_{C_{max}} - E_{C_{min}} = \frac{1}{2} C_{bp} V_{max}^2 - \frac{1}{2} C_{bp} V_{min}^2 = \frac{1}{2} C_{bp} (V_{max}^2 - V_{min}^2) \quad (11)$$

L'énergie E_b est donnée par le constructeur de la batterie directement en kilowatt par heure (kWh).

Les tensions V_{max} et V_{min} sont la tension maximale et la tension minimale de la batterie en circuit ouvert respectivement.

L'expression du condensateur représentant la capacité de la charge de la batterie est donnée comme suit :

$$C_{bp} = \frac{2E_b}{V_{max}^2 - V_{min}^2} \quad (12)$$

La résistance interne de la batterie est représentée par les deux résistances R_{bs} et R_{b1} en série.

La résistance en bloc d'électrolyte et de plaque est représentée par la résistance R_{bs} tandis que la résistance R_{b1} représente la diffusion d'électrolyte.

Ceci représente la tension du circuit ouvert de la batterie, dès qu'une charge sera reliée. On peut exprimer la tension de batterie V_b en fonction de la tension de batterie en circuit ouvert et les autres composants R_{bs} et R_{b1} et C_{b1} avec le constante de temps $\tau = R_{b1}C_{b1}$.

$$V_b = V_{oc} + R_{b1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) i_b + R_{bs} i_b \quad (13)$$

La relation mathématique représentant l'impédance équivalente d'entrée d'une batterie plomb-acide dans le domaine fréquentiel est donnée par :

$$Z(s) = R_{bs} + (R_{b1} || C_{b1}) + (R_{bp} || C_{bp}) = R_{bs} + \frac{R_{b1}}{R_{b1}C_{b1}s + 1} + \frac{R_{bp}}{R_{bp}C_{bp}s + 1} \quad (14)$$

Donc la fonction de transfert s'écrit sous la forme suivante :

$$Z(s) = \frac{V_b}{I_b} = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \quad (15)$$

Avec :

$$\begin{cases} a_2 = R_{bs} R_{b1} R_{bp} C_{b1} C_{bp} \\ a_1 = R_{bs} R_{b1} C_{b1} + R_{bs} R_{bp} C_{bp} + R_{bp} R_{b1} C_{b1} \\ a_0 = R_{bs} + R_{b1} + R_{bp} \\ b_2 = R_{b1} R_{bp} C_{b1} C_{bp} \\ b_1 = R_{b1} C_{b1} + R_{b1} R_{bp} \\ b_0 = 0 \end{cases} \quad (16)$$

7. Principe de recherche du point de fonctionnement maximal :

Des lois de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'à priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance [7].

La figure fig.16 représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque associée à une commande MPPT.

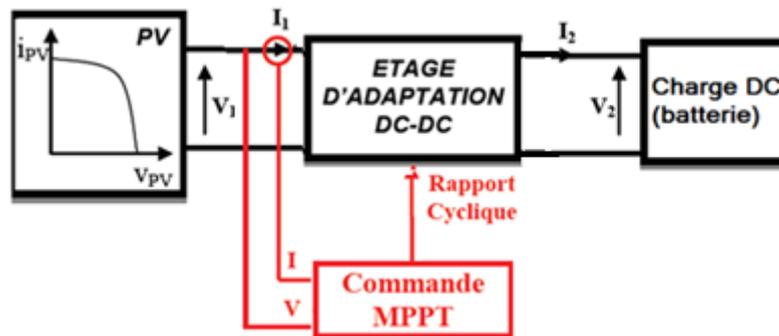


Fig.16. Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.

Ces variations qui peuvent subvenir de manière aléatoire causent un basculement du point de fonctionnement de la position de puissance maximale $PPM1$ vers un nouveau point $P1$ plus ou moins éloigné de l'optimum. Ainsi, afin de faire converger ce point de fonctionnement vers une nouvelle position optimale $PPM2$, on doit réajuster la valeur du rapport cyclique du convertisseur utilisé. La figure fig.17 illustre le principe de recherche du point de fonctionnement maximal [7] en présence des trois types de perturbations :

- Changement de d'ensoleillement.
- Changement de charge.
- Changement de température.

8. Synthèse des différentes MPPT rencontrées dans la littérature :

Diverses publications sur les commandes assurant un fonctionnement de type commande MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce genre, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque [6]. Nous allons dans ce qui suit, présenté brièvement les différentes techniques principales MPPT utilisées.

8.1. Les premiers types de commande MPPT :

L'algorithme mis en œuvre dans les premières commandes MPPT était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à l'époque étaient faibles et les applications, surtout destinées au spatial avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres. Appliqué initialement au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F. Boehringer [8]. Cette commande est basée sur un algorithme adaptatif, qui permet d'optimiser le fonctionnement du système en l'amenant à son point de puissance maximale (MPP). Ce dernier est décrit en figure fig.19 et peut être implanté entièrement en numérique.

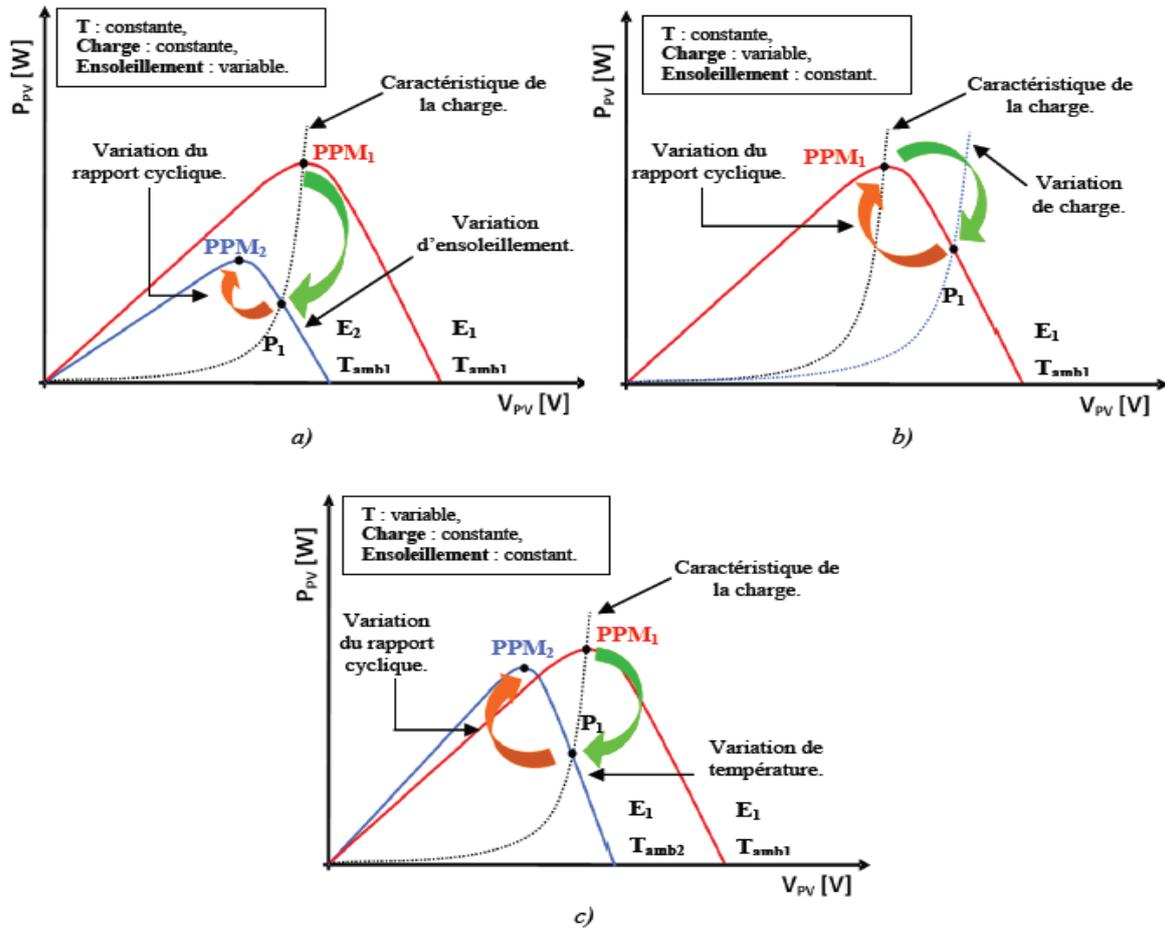


fig.18. Recherche du Point de Puissance Maximal a) suite à une variation d'ensoleillement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.

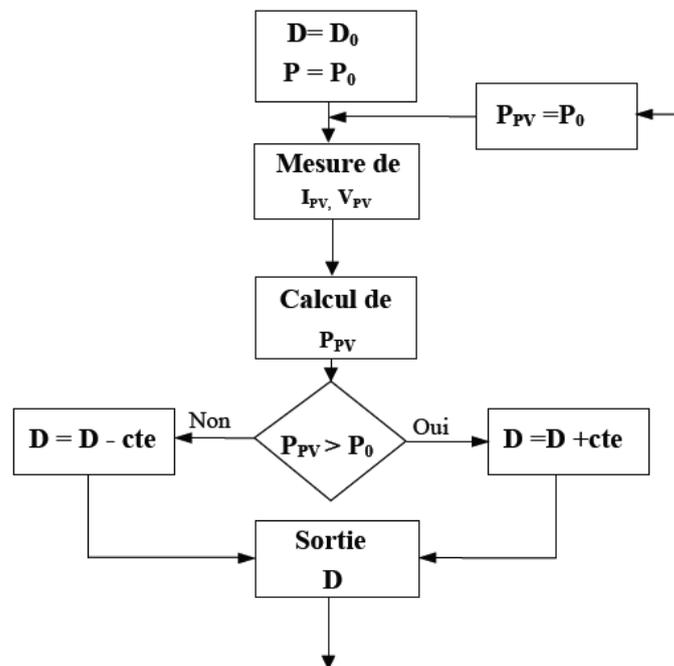


fig.18. Principe de la première commande MPPT numérique.

Il consiste à calculer la puissance à l'instant t_i à partir des mesures de I_{pv} et V_{pv} et de la comparer à celle stockée en mémoire, correspondant à l'instant t_{i-1} . De là, un nouveau rapport cyclique D est calculé et est appliqué au convertisseur statique. Ce principe est toujours valable du point de vue théorique et il est appliqué de nos jours sur des algorithmes numériques plus performants. Cependant, le temps de réaction a été amélioré ainsi que la précision de la recherche du MPP associée à un certain nombre de précautions pour ne pas perdre le MPP même temporairement.

8.2. Commandes MPPT extrémales :

Il existe différents types d'algorithmes effectuant la recherche du PPM. Les méthodes les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement *Perturb & Observ (P&O)* et *l'incrément de conductance (IncCond)*. Pour une meilleure compréhension des performances de ces commandes, nous rappelons brièvement leurs différents principes dans les paragraphes suivants.

8.2.1. Principe des commandes "Perturb and Observe" (P&O) :

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 .19, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM [7].

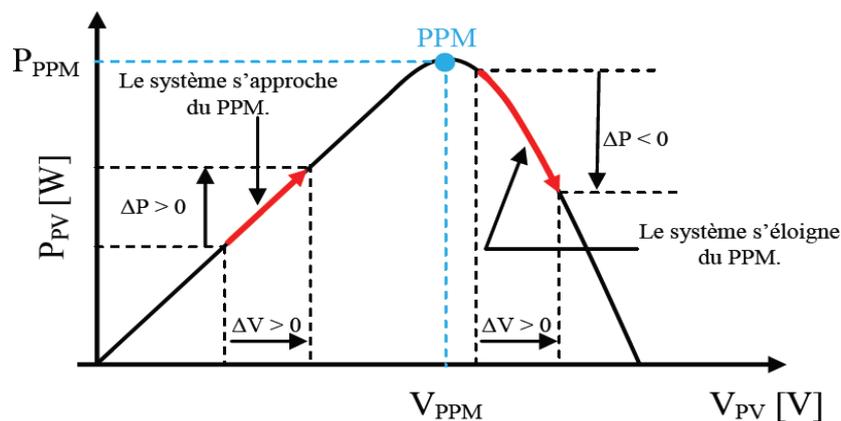


Fig.19. Caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$ d'un panneau solaire.

La figure fig .20 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. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

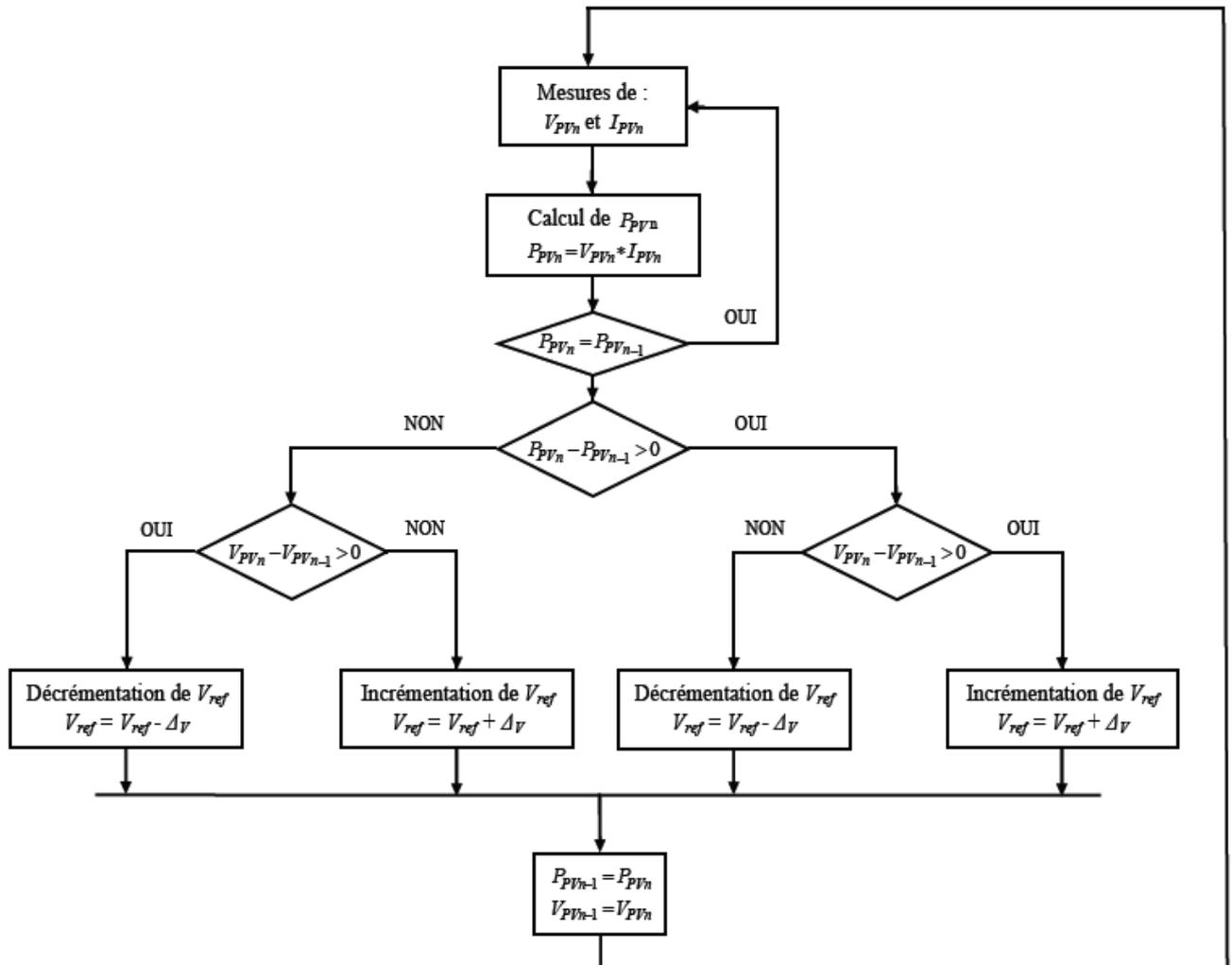


fig.20. Organigramme de l'algorithme P&O.

8.2.2. Commande avec "Conductance incrémentale" :

Pour rechercher les MPP, cette technique se base sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et de ces conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM.

On définit la conductance du module photovoltaïque par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous :

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (22)$$

De même, une variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par :

$$G = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (23)$$

Par ailleurs, l'évolution de la puissance du module (P_{PV}) par rapport à la tension (V_{PV}) donne la position du point de fonctionnement par rapport au MPP. Lorsque la dérivée de puissance est nulle, cela signifie que l'on est sur le MPP, si elle est positive le point d'opération se trouve à gauche du maximum, lorsqu'elle est négative, on se situe à droite. La figure fig.21 permet d'écrire les conditions suivantes :

Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$ le point de fonctionnement est à gauche du MPP.

Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$ le point de fonctionnement sur le MPP.

Si $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$ le point de fonctionnement est à droite du MPP.

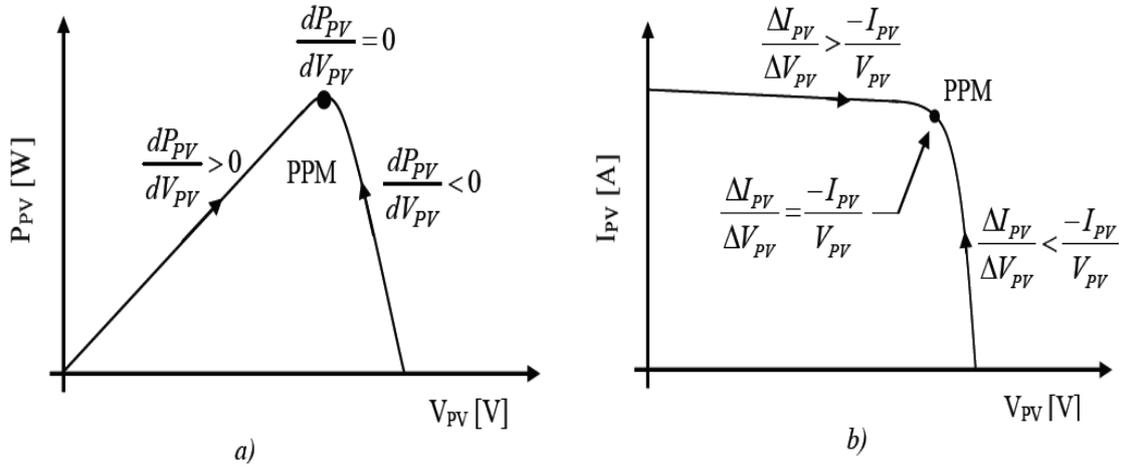


fig.21. Positionnement du point de fonctionnement selon la conductance du champ photovoltaïque.

Le lien entre la conductance donnée par l'équation (23) et la dérivée de la puissance $\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ peut être décrit par l'équation suivante :

$$\frac{I_{pv}}{V_{pv}} = \frac{d(I_{pv} \cdot V_{pv})}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \cong I_{pv} + V_{pv} \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} \quad (24)$$

D'où, on peut alors écrire de nouvelles conditions sur la variation de conductance comme celles données par (25) sur la dérivée de puissance :

Si $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} > -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ le point de fonctionnement est à gauche du MPP.

Si $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ le point de fonctionnement sur le MPP.

Si $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} < -\frac{I_{pv}}{V_{pv}}$ le point de fonctionnement est à droite du MPP.

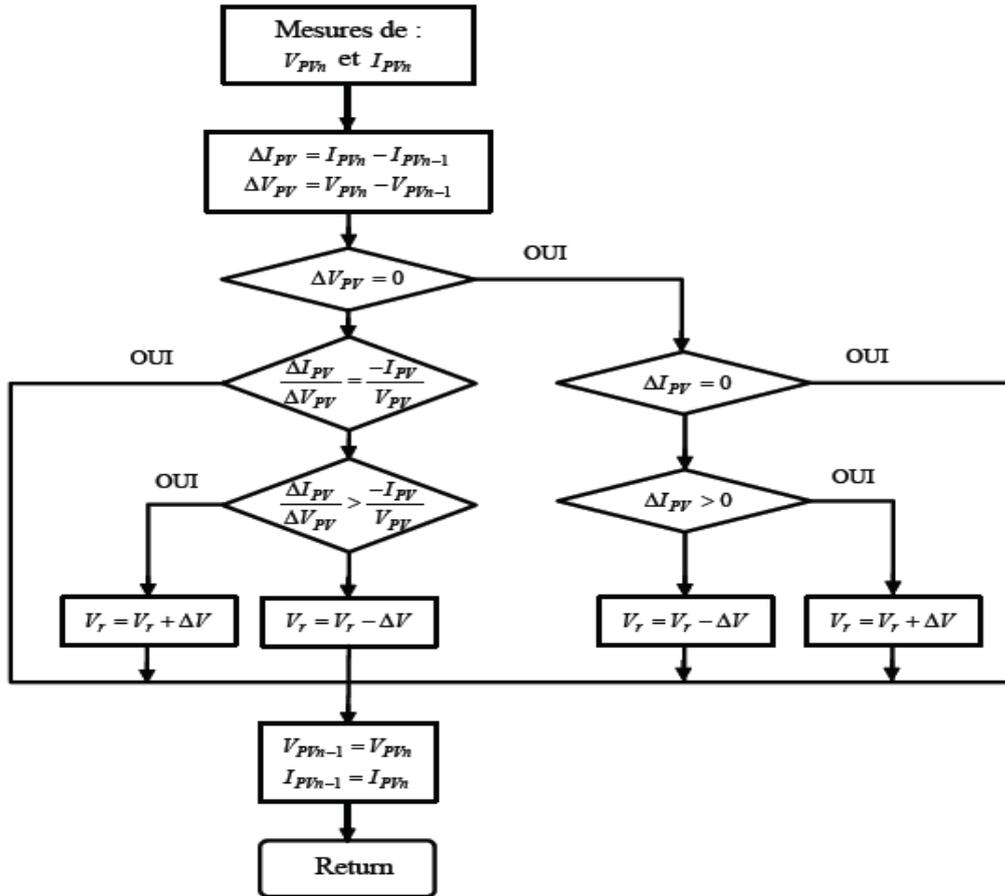


Fig.22. organigramme de l'algorithme Conductance incrémentale.

A partir de ces conditions, le maximum de puissance peut être alors traqué utilisant l'algorithme résumé par l'organigramme illustré sur la figure fig.23.

En pratique, le système présente une oscillation comme la commande P&O autour du MPP, à cause du bruit aux niveaux des acquisitions des paramètres d'entrée (I_{pv} et V_{pv}).

$$\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} + \frac{I_{pv}}{V_{pv}} = 0 \quad (25)$$

Ainsi, en réalité, cette condition n'étant jamais obtenue, le système restera toujours en train de la rechercher. De plus, par rapport à la commande P&O, le temps d'exécution de l'algorithme est plus long car ce dernier est plus complexe. De ce fait, l'intervalle de temps entre deux échantillons de tension et de courant est augmenté engendrant un retard sur la détection des variations climatiques. Cependant, lors d'une étude comparative en termes de rendement MPPT réalisée par H. Hussein [11] entre la commande InCond et P&O, le rendement affiché par la commande InCond était de 89,9 % par rapport à 81,5 % de la commande P&O. Cette différence est principalement due aux variations relativement faibles autour du PPM engendré par la commande InCond.

L'analyse de ces différentes méthodes de recherche, montre qu'elles ne sont pas trop éloignées sur leur fonctionnement en pratique ni sur les compromis à effectuer entre précision et rapidité au niveau de la valeur de la variable d'incrémental. Les divers essais extraits de la littérature montrent que ce type de commande peut être performant dans certaines conditions mais ne permettent pas de dire que tel mode de recherche est plus performant

qu'un autre car les conditions de test et les valeurs de variable d'incrémentation ne sont pas similaires.

8.3. Commandes intelligentes

En plus de ce qui a été développé dans les paragraphes précédents, On note que les méthodes MPPT ne cessent de se développer ; surtout que les recherches continuent toujours dans le but d'améliorer le rendement de production photovoltaïque. C'est ainsi que plusieurs théories d'automatique ont été utilisées pour l'optimisation des chaînes de production solaire telles que la logique floue, les modes glissants, les réseaux de neurones [2]... etc

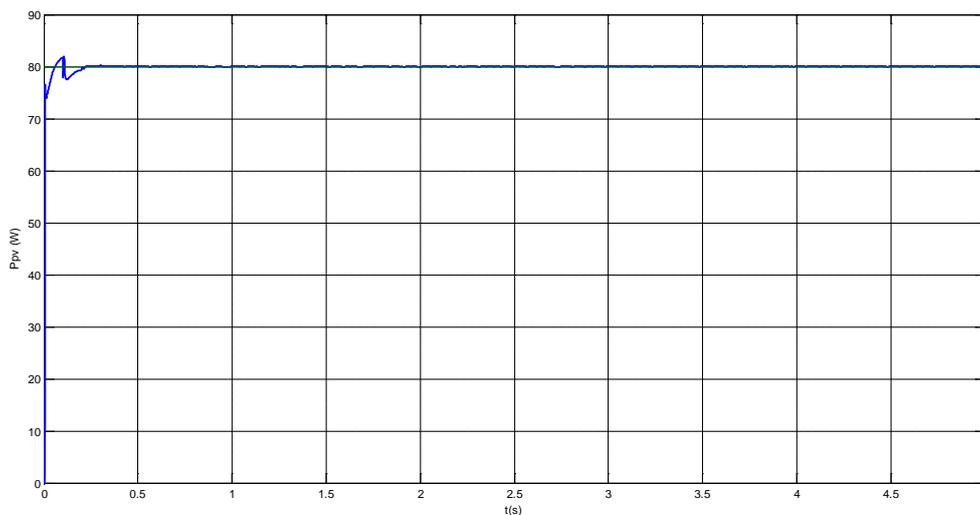
9. Simulation et analyse :

Dans cette partie, nous allons illustrer ce qu'on a expliqué précédemment par la simulation du système photovoltaïque sous différentes conditions en utilisant l'algorithme MPPT P&O.

9.1 fonctionnement de la chaîne sous conditions constantes :

On considère un module photovoltaïque constitué de 36 cellules et qui a les caractéristiques donnée dans l'annexe.

Dans cette première simulation, le système est soumis aux conditions standards de température (25°C) et d'ensoleillement (1000 W/m^2)



FigI.23. Poursuite du point de fonctionnement maximal de puissance sous conditions standards.

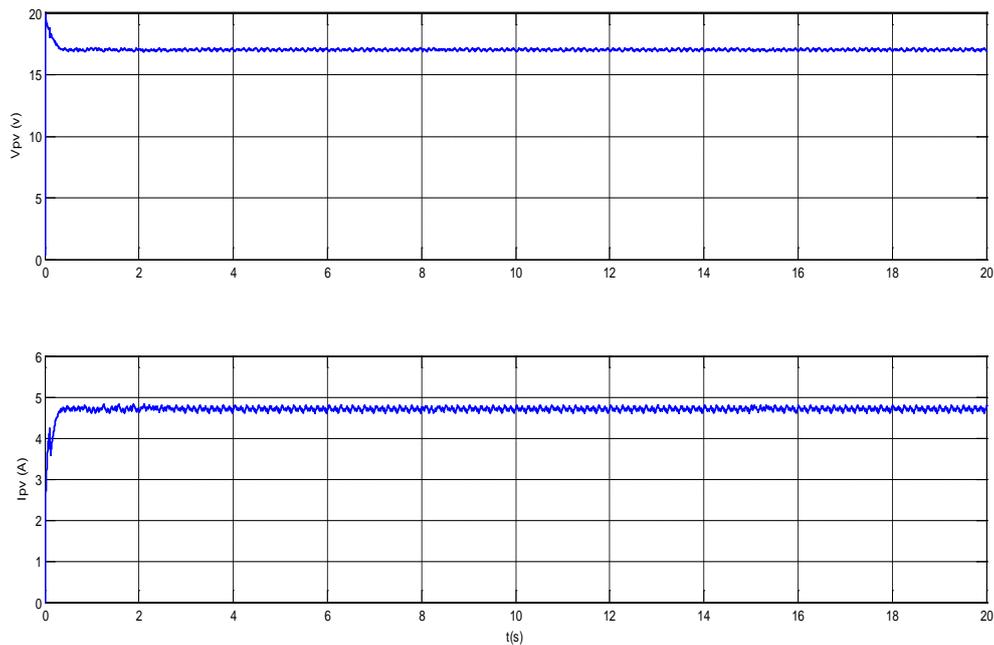


Fig.24. Evolution des caractéristiques électriques du panneau.

Les figures montrent que l'algorithme MPPT P&O assure parfaitement la poursuite du point de fonctionnement maximal, ainsi que le courant et la tension qui se stabilisent à leurs valeurs optimales.

9.2. comportement de la chaîne face aux changements d'éclairements :

Nous allons maintenant faire varier l'ensoleillement qui peut se traduire par des passages de nuages, les résultats sont donnés sur les figures suivantes :

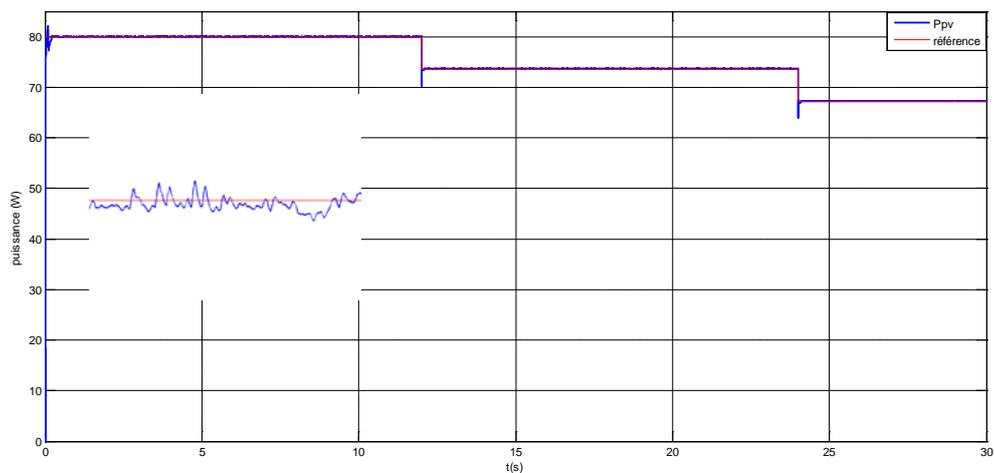


Fig.25. Poursuite du point de fonctionnement maximal de puissance sous changement d'éclairement.

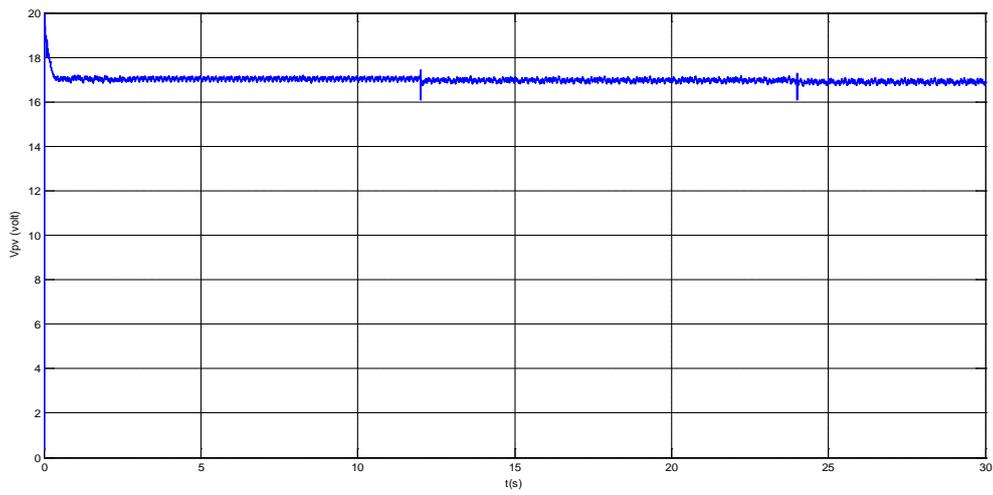


Fig.26. Comportement de la tension V_{pv} sous changement d'éclairement.

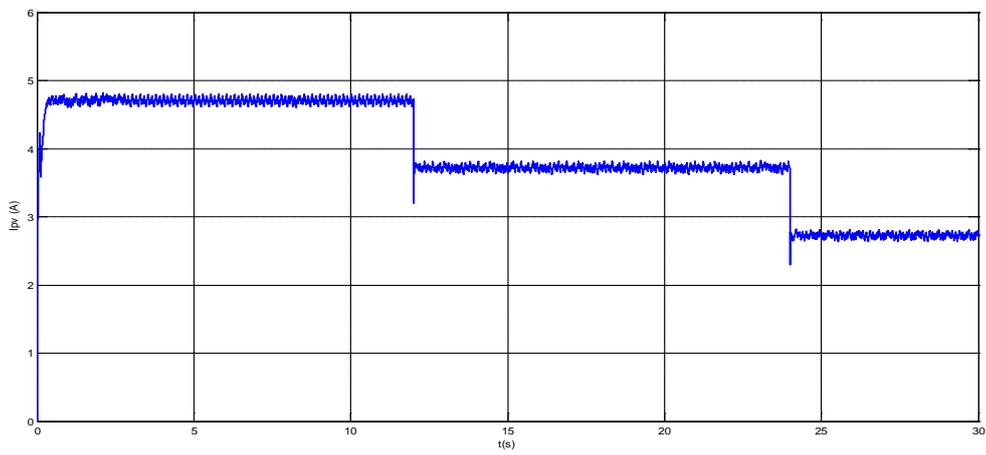


Fig.27. comportement du courant I_{pv} sous changement d'éclairement.

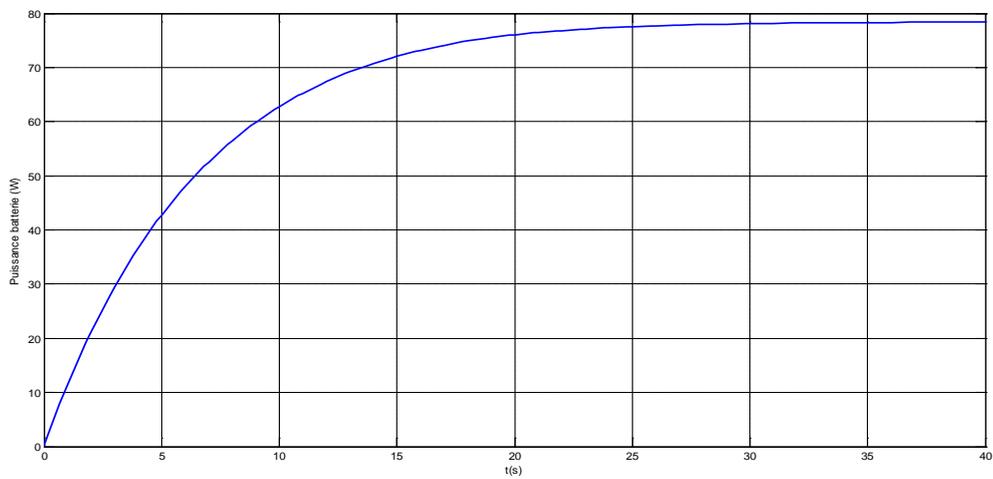


Fig.28. Puissance reçue par la batterie.

La figure .25 montre bien que l'algorithme P&O permet d'avoir une bonne poursuite de la référence avec une dynamique acceptable. Néanmoins, nous constatons qu'il y a toujours des oscillations autour du PPM.

Le courant I_{pv} de la figure fig.27 varie d'une manière importante avec l'irradiation solaire. Par contre la tension ne varie que très peu. Donc, nous pouvons dire que l'algorithme P&O est bien adapté pour un fonctionnement aux irradiances solaires importantes.

Conclusion :

Dans ce chapitre on a expliqué les principales caractéristiques d'une installation photovoltaïque afin de mieux comprendre les phénomènes régissant son fonctionnement de sorte à pouvoir élaborer une commande performante qui permet d'assurer les objectifs désirés. De plus, nous avons fait une synthèse des principales commandes MPPT utilisées sur le marché des installations photovoltaïques avec explication de leurs principes de fonctionnement pour la recherche du PPM. Nous avons utilisé l'algorithme P&O pour illustrer la poursuite du point de fonctionnement maximal et a montré de bonne performance.

- [1] J-J. PIREAUX. Physique et énergie, travail sur les panneaux photovoltaïques. Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix 2007.
- [2] C. I. ELMETENNANI. Commande et Optimisation par l'Approche Hybride d'une Chaîne de Production Photovoltaïque à base d'un Convertisseur Multicellulaire. Mémoire de Fin d'Etude, ENP d'Alger, 2012.
- [3] <http://www.mem-algeria.org/francais/index.php?page=potentiels>
- [4] F.MECIKAR, N.LOUKKAS. Étude et Commande d'un Système Hybride Éolien-photovoltaïque Connecté au Réseau. Mémoire de Fin d'Etude, ENP d'Alger, 2013.
- [4] M.BOUDJEMA, N.BELHAOUAS. Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones et implémentation sur FPGA et DSP. Mémoire de Fin d'Etude, ENP d'Alger, 2007..
- [6] S.PETIBON. Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques. Thèse Doctorat, Université ToulouseIII-Paul Sabatier 2009.
- [7] C.CABAL. Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque. Thèse Doctorat, Université ToulouseIII-Paul Sabatier 2008.
- [8] S. TALBI, R. RIAH, Comparaison et Synthèse d'un Nouvel Algorithme MPPT Robuste pour une Chaîne de Production d'Energie Photovoltaïque. Mémoire de Fin d'Etude, ENP d'Alger, 2011.
- [9] A. F. Boehinger, Self-Adaptive DC Converter for Solar Spacecraft Power Supply. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, pp. 102-111, 1968.
- [10] Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour l'alimentation d'une ferme. Étude de l'onduleur triphasé lié à cette application. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.
- [11] K. H. Hussein, I. Muta, T. Hshino, M. Osakada, Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions, Proc. Inst. Elect. Eng. Vol. 142, No.1, pp. 59-64, Jan. 1995.
- [12] SOBAlHI Khaled. Etude et réalisation d'un hacheur de tracking du point de puissance maximale (MPPT) à contre réaction de tension. Mémoire de magister. ENP d'Alger 2003.