

8/03

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Département ELECTRONIQUE

Projet de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme 'ingénieur d'état en électronique

**ETUDE ET REALISATION D'UN CONTROLEUR MPPT PAR
LA METHODE 'INCREMENTATION DE LA
CONDUCTANCE' A BASE DE PIC 16F876**

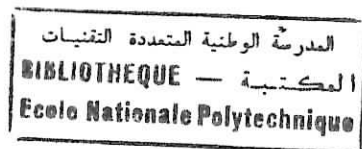
Proposé et dirigé par :
Mr.C.LARBES
Mr.M. HADDADI

Etudié par
Mr.M.L.SI HAMDI

PROMOTION JUIN 2003

ENP, 10 Avenue Hassen Badi EL-Harrach

Remerciements



Ce travail a été fait au laboratoire des dispositifs de communication et de conversion photovoltaïque (LDCCP) du département d'électronique de l'école national polytechnique d'Alger, sous la direction de **M C.LARBES** et **M M.HADDADI**.

Je tiens à remercier mes promoteurs **M C.LARBES** et **M M.HADDADI** qui ont suivi notre travail durant tout un semestre, ainsi leur aide leurs soutiens matériel précieux.

Je remercie également, **M.S.AIT-CHEIKH** et **M E.M.BERKOUK** de nous avoir honoré de leurs présence au sein du jury.

Aussi je voudrai remercier tous les enseignants qui mon encadré durant ma formation d'ingénieur à l'école national polytechnique.

Enfin je remercie tout le personnel de l'école, administratif, agent de bibliothèque, gardiens pour leur dévouement.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Ce travail est dédié à mon père et à ma mère pour leurs aides et leur patience ,et que je pense ne jamais pouvoir assez remercier.
A mon frère, à tous mes grands parents et à toute ma famille.
A mes amis et à tous ceux qui mon aider de près ou de loin.

Sommaire

Introduction.....	1
Chapitre 1	Généralités sur les générateurs photovoltaïques
1.Introduction	3
2.Le rayonnement solaire	3
3.La cellule photovoltaïque	5
3.1.Conversion photon-électrons.....	5
3.2.Cellule à jonction PN	6
3.2.1Jonction PN	6
3.2.2.Polarisation de la jonction PN	7
3.2.3.Jonction PN sous éclairement.....	8
3.2.4.Caractéristiques réelle.....	9
4.Les panneaux solaires	10
4.1.Panneaux en association série	11
4.1.1.Influence de l'insolation.....	12
4.1.2.Influence de la température.....	13
4.2.Association de cellules en série parallèle.....	16
5. Systèmes photovoltaïques.....	18
5.1 Adaptateur continu/continu.....	18
5.2 Adaptateur continu/alternatif.....	19
5.3. Couplage du convertisseur au générateur photovoltaïque.....	19
5.4. Commande de l'adaptation d'impédance.....	19
5.5.Adaptation de la structure du générateur.....	20
Chapitre 2	Généralités sur les hacheurs
1.Introduction.....	21
2.Structures fondamentales des hacheurs.....	21
2.1 hacheur dévolteur.....	21
2.1.1 Configuration de base.....	21
2.1.2 circuit du hacheur dévolteur.....	23
2.2Hacheur survolteur.....	27
2.2.1.Configuration de base.....	27
2.2.2. Le circuit du convertisseur survolteur.....	28
3. Le hacheur survolteur dévolteur.....	31

Chapitre 3	Les méthodes de poursuites MPPT (Maximum Power Point Tracking)	
1.	Introduction.....	34
2.	Les méthodes de poursuites MPPT.....	35
2.1	Assortiment simple de panneau-charge.....	35
2.2.	Assortiment Semi-dynamique de charge	36
2.3	.Les méthode de poursuites <u>du</u> MPP par retour de l'information de tension (voltage-feedback).....	36
2.3.1.	Mesure de Voc au panneau.....	38
2.3.2.	Utilisation d'une cellule pilote.....	38
2.4	.Les méthodes de poursuites du MPP par retour de l'information de puissance (power-eedback).....	39
2.4.1.	La méthode de perturbation et d'observation (P&o).....	40
2.4.2.	La méthode d'incrémentation de la conductance(Incremental Conductance).....	45
2.4.3.	La méthode d'incrémentation de la conductance amélioré.....	49
2.4.4.	La méthode de poursuite MPPT analogique.....	51
2.4.5.	Oscillation forcée.....	54
3.	Conclusion.....	56
Chapitre 4	Simulation de la méthode Incrémentation de la Conductance	
1.	Introduction.....	57
2.	Schéma global de la simulation.....	57
2.1.	Le Générateur photovoltaïque.....	58
2.2	Le convertisseur DC/DC.....	59
2.3.	La batterie (12V).....	59
2.4.	Le microcontrôleur utilisant la méthode MPPT d'Incrémentation de la Conductance(simple et améliorée).....	60
3.	Simulation du système photovoltaïque utilisant l'algorithme MPPT d'Incrémentation de la Conductance.....	60
3.1.	Comportement de la méthode face à un changement de l'insolation.....	61
3.1.1	changement rapide de l'insolation.....	61
3.1.2.	Comportement de la méthode à un changement lent de l'insolation S.....	63
3.2.	Comportement de la méthode face à un changement de la température.....	65
3.2.1.	Changement lent de la température.....	65
3.2.2.	changement rapide de la température.....	66

3.3.Comportement de la méthode avec une charge resistive.....	68
4.Conclusion	69
Chapitre 5	Réalisation pratique
1.Introduction.....	70
2.Presentations des différents modules	70
2.1. Le microcontrôleur PIC16F876.....	70
2.2.Le panneau solaire.....	71
2.3.Le convertisseur DC/DC.....	71
2.4.Le schéma général.....	72
2.4.1.L'information sur la tension.....	72
2.4.2.L'information sur le courant.....	73
3.Résultats pratiques.....	74
Conclusion Générale.....	76

Introduction :

Le soleil est presque à l'origine de la quasi-totalité des sources d'énergies utilisées par l'humanité pour ses besoins alimentaires, domestiques et industriels : biomasse, vent, hydraulique, combustibles fossiles. Le Soleil fournit ainsi chaque jour à la Terre, par son rayonnement, l'équivalent de plusieurs milliers de fois la consommation énergétique totale de l'humanité pour ses activités d'aujourd'hui.

À titre d'exemple, pour donner un ordre de grandeur des énergies mises en jeu, une toiture de 100 m² située en Méditerranée (durée moyenne d'ensoleillement 8 h/j), orientée perpendiculairement à l'inclinaison moyenne des rayons, reçoit par jour un flux énergétique d'une puissance de 70 kW, soit l'équivalent d'une énergie électrique de 560 kWh ou l'équivalent d'une énergie thermique d'environ 480 000 kcal, ce qui représente 50 L de fuel.

On imagine que même un capteur dont le rendement est de 10 % peut récupérer une énergie importante, le problème principal étant le coût de 1 m² de capteur.

L'hélioélectricité traite de la transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique, mais, malgré les espoirs initiaux suscités par les nombreux avantages potentiels de cette nouvelle source d'énergie électrique, celle-ci ne s'est pas imposée en dehors du domaine spatial, en raison d'obstacles techniques et surtout économiques.

En effet, malgré des progrès significatifs, le coût du kilowattheure produit reste le plus souvent beaucoup plus élevé qu'avec les technologies lourdes classiques. Ainsi, en 1996 l'ensemble des installations photovoltaïques mondiales représente seulement 100 MW installés, que l'on peut comparer aux 1 300 MW d'une seule tranche de centrale nucléaire.

En fait, l'énergie solaire est par nature une énergie répartie, ce qui constitue un handicap car sa densité, en moyenne de quelques kilowattheures par mètre carré est faible, mais aussi un atout que l'on peut mettre à profit dès que les distances rendent exorbitants l'installation et l'entretien d'un réseau de distribution d'énergie électrique à partir d'une unité de production centralisée. L'énergie solaire devient alors compétitive sur le long terme et la technologie photovoltaïque est aujourd'hui suffisamment mûre et maîtrisée pour prendre un véritable essor dans le domaine des applications de puissance sur sites

isolés, car tel apparaît son créneau privilégié. Sont alors concernés les zones d'accès difficile des pays industrialisés et, bien plus encore, les pays en développement qui représentent un immense marché potentiel, car plus de deux milliards d'habitants du tiers-monde sont encore privés d'électricité.

Pour tout cela il est nécessaire de réaliser des systèmes de conversion photovoltaïque optimaux qui ont très peu de pertes pour récoltés le maximum d'énergie est ainsi faire baisser le prix du mètre carré de capteur et ainsi récolter toujours la puissance maximale , c'est-à-dire qu'il y est toujours adaptation d'impédance entre le générateur photovoltaïque et la charge et ceci en temps réel. Il existe plusieurs méthodes de poursuite du point optimale qu'on appel MPPT *Maximum Power Point Tracking* et c'est ce que nous allons voir dans ce travail.

Chapitre 1

Généralités sur les générateurs photovoltaïques

Généralités sur les générateurs photovoltaïques

1.Introduction

L'hélioélectricité, qui traite de la transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique, est apparue en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium, mais ce n'est qu'à partir de 1954, avec la réalisation des premières cellules photovoltaïques au silicium dans les laboratoires de la compagnie Bell Telephone, que l'on entrevoit la possibilité de fournir de l'énergie.

Très rapidement utilisées pour l'alimentation des véhicules spatiaux, leur développement et de rapides progrès ont été motivés par la conquête de l'espace.

Mais, pour les raisons techniques évoquées dans l'introduction, cette nouvelle source d'énergie électrique a tardé à s'imposer en dehors du domaine spatial.

Cependant, au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts, et même est devenue familière des consommateurs à travers de nombreux produits de faible puissance y faisant appel : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires.

La cellule photovoltaïque est la base de tout système photovoltaïque alors nous allons essayer d'illustrer dans ce chapitre leur fonctionnement et voir des notions sur les panneaux solaires et les systèmes photovoltaïque. Au préalable nous commencerons par donner une idée sur le potentiel solaire.

2.Le rayonnement solaire : [1]

Hors atmosphère, l'énergie moyenne annuelle reçue par la Terre est d'environ 5,5 kWh/m² et par jour. En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes complexes d'absorption par les gaz, de diffusion par les molécules, et d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols. Ainsi la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge.

Le flux énergétique reçu au sol dépend ainsi de nombreux facteurs et son maximum au sol ne dépasse guère $1\ 000\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ avec un spectre décalé vers le rouge par rapport au spectre hors atmosphère . Le rayonnement global au sol est donc fonction de la composition et de l'épaisseur d'atmosphère traversée par les rayons lumineux au cours de la journée. Il se décompose en rayonnement direct et rayonnement diffus et ce sont ces deux rayonnements qui sont exploités par les générateurs solaires.

Pour tenir compte de la position relative du Soleil qui modifie l'épaisseur d'atmosphère traversée, on introduit un coefficient m appelé masse atmosphérique ou **nombre d'air masse AM** défini par :

$$m \approx \frac{1}{\sin A} \quad (1.1)$$

$A(^{\circ})$ élévation du Soleil sur l'horizon (90° au zénith).

Ainsi lorsque le Soleil est au zénith, on dit que l'on a les conditions AM1 car les rayons lumineux traversent une épaisseur d'atmosphère unité (7,8 km). Avec un Soleil à 30° sur l'horizon, on obtient les conditions AM2. Hors atmosphère, à haute altitude, on définit les conditions AM0 .

Le concept de **nombre d'air masse** caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire ($1\ 353\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ pour AM0, $833\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ pour AM1,5) ; d'autre part, il sert à définir un spectre de référence pour calibrer les cellules étalons destinées à qualifier les performances des dispositifs photovoltaïques. Ainsi les conditions standards de qualification des cellules sont un spectre **AM1,5**, une puissance incidente de $1000\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ et une température de 25°C et c'est se que nous allons utiliser -sauf indication contraire, c'est pour de telles conditions que doivent être fournies les performances et spécifications d'un dispositif photovoltaïque donné.

On peut dire que, outre l'influence de l'atmosphère, le flux solaire reçu sur une surface dépend :

- de l'orientation et de l'inclinaison de la surface .
- de la latitude du lieu et de son degré de pollution .
- de la période de l'année .
- de l'instant considéré dans la journée .
- de la nature des couches nuageuses.

3.La cellule photovoltaïque :

Son fonctionnement est basé sur les propriétés des semi-conducteurs. C'est le seul convertisseur direct pour transformer la lumière en énergie électrique. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque découvert par A. Becquerel en 1839. Pour une bonne compréhension des phénomènes mis en jeu lors de la conversion on doit étudier le comportement de la jonction PN, vu que la cellule photovoltaïque n'est rien qu'une jonction PN sous éclairage.

3.1.Conversion photon-électrons :

Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant une énergie donnée par la relation :

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda} \quad (1.2)$$

avec : E (J) énergie, λ (m) longueur d'onde,
 ν (Hz) fréquence, c (m/s) : vitesse de la lumière

La structure périodique des atomes dans un solide entraîne des bandes d'énergies interdites pour l'électron et chaque matériau est caractérisé par une largeur de bande interdite (gap) exprimée en eV dont la valeur détermine la nature du matériau (conducteur, semi-conducteur, isolant). Si E_v est l'énergie la bande de valence et E_c l'énergie de la bande de conduction, la largeur de la bande interdite du matériau est donnée par :

$$E_g = E_c - E_v \quad (1.3)$$

Sous certaines conditions, les photons dont l'énergie est supérieure à E_g peuvent faire passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction laissant ainsi un trou dans la bande de valence. L'électron et le trou ainsi libérés doivent rapidement être collectés pour participer ensuite à la conduction électrique avant leur recombinaison.

La jonction PN sous éclairage, caractérisée par une barrière de potentiel importante au niveau de la jonction et réalisée à partir de matériaux semi-conducteurs photovoltaïques, est la solution actuellement la plus répandue de convertisseur photovoltaïque.

Pour la cellule photovoltaïque idéale, on peut dire que les photons d'énergie inférieure à E_g ne sont pas absorbés et traversent le matériau sans transmettre d'énergie aux électrons si ils ont une d'énergie supérieure ou égale à E_g ils sont totalement absorbé et crée une paire électron-trou qui participe à la conduction (pas de recombinaison) avec

une tension de sortie de cette cellule élémentaire idéale de E_g/e avec e charge de l'électron ($e = 1,6 \times 10^{-19}$ C).

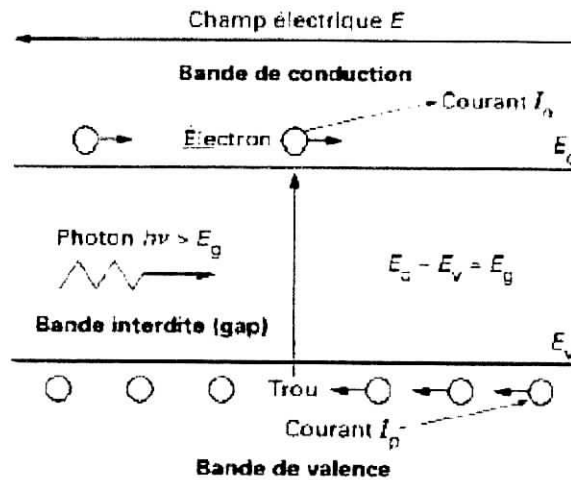


Figure 1 : – Principe de la conversion photon-électron dans un système à deux niveaux d'énergie

3.2. Cellule à jonction PN :

3.2.1 Jonction PN :

Elle résulte de la juxtaposition dans un même matériau semi-conducteur de deux zones ; l'une de type P (majoritaire en trous, minoritaire en électrons) et l'autre de type N (majoritaire en électrons, minoritaire en trous). Dès la juxtaposition, des courants de diffusion de trous et d'électrons se développent autour de la jonction et créent, au voisinage immédiat de celle-ci, une barrière de potentiel qui s'oppose aux courants de diffusion des porteurs majoritaires de chaque zone. Lorsque l'équilibre est atteint, le champ électrique créé par la barrière de potentiel est suffisant pour équilibrer les courants de diffusion des porteurs majoritaires et des porteurs minoritaires, par suite de la largeur très faible de la jonction (de 0,2 à quelques micromètres), d'où un courant global de diffusion nul.

On peut dire que, si la température augmente, les électrons remplissent progressivement tous les états d'énergie et peuvent, pour une température donnée, annuler la bande interdite donc l'effet jonction PN (cas du silicium à 400°C). Cette remarque est importante pour les cellules photovoltaïques à jonction PN dont le rendement diminue avec l'élévation de la température.

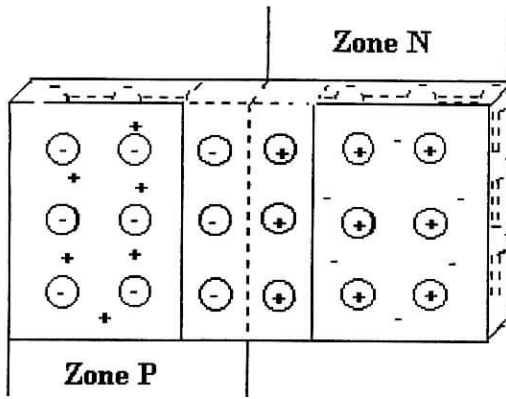


Figure 2 – Jonction PN

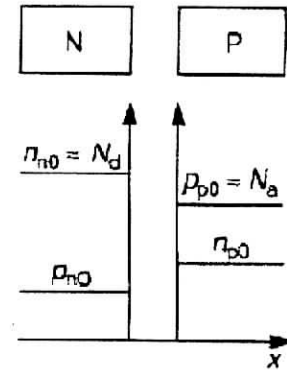


Figure 3 – Concentrations des porteurs dans une jonction PN

3.2.2. Polarisation de la jonction PN :

Si l'on polarise une jonction PN, on obtient la caractéristique suivante :

$$I_d = I_s \left[e^{\frac{qV}{\eta kT}} - 1 \right] \quad (1.4)$$

$I_s(A)$ courant d'obscurité des porteurs minoritaires (saturation),

η coefficient dépendant du matériau,

$\eta = 1$; $I_s \approx 5\mu A$ à $T = 300 K$ pour le germanium,

$\eta = 2$; $I_s \approx 10 nA$ à $T = 300 K$ pour le silicium aux courants faibles,

$\eta = 1$ pour le silicium aux courants forts.

q charge élémentaire ($q = 1,602 \cdot 10^{-19} C$)

k constante de Boltzmann ($k = 1,380 \cdot 10^{-23} J/K$)

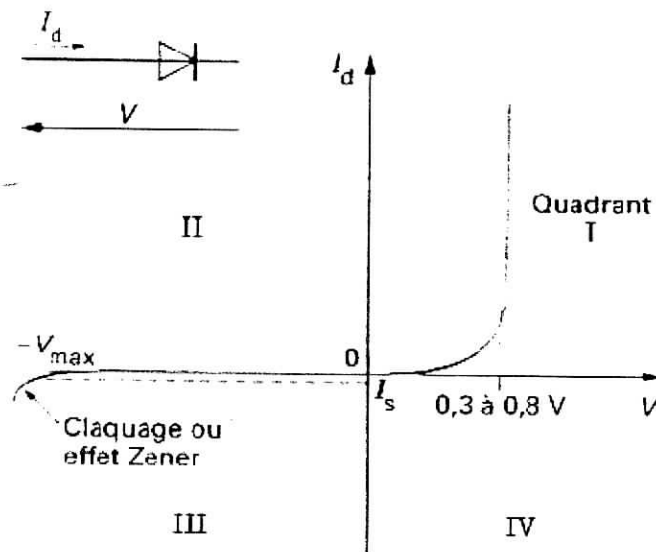


Figure 4 – Caractéristique d'une jonction PN polarisée

3.2.3. Jonction PN sous éclairement :

Si l'on soumet une jonction PN de faible épaisseur à un flux lumineux, des paires électron-trou sont créées par les photons dont l'énergie est supérieure à la largeur de la bande interdite du matériau. Il en résulte une augmentation du courant inverse de saturation proportionnelle au flux lumineux. Physiquement, cet effet se traduit de deux manières selon le quadrant de fonctionnement du dispositif : (figure 5)

— dans le 3^e quadrant, le système fonctionne en récepteur dont la résistance varie fortement avec l'éclairage, c'est la photo résistance.

— dans le 4^e quadrant, le système fonctionne en générateur dont le courant de court-circuit est proportionnel à l'éclairage et dont la tension à vide est celle de la diode en polarisation directe (0,5 à 0,8 V pour Si) ; c'est la cellule photovoltaïque à jonction PN.

Nous allons maintenant nous intéresser uniquement au quadrant IV pour la réalisation du générateur photovoltaïque à partir de cellules photovoltaïques. Pour cela, nous allons représenter les caractéristiques dans un nouveau repère $I_p = f(V_p)$ donné par la figure 6 où le courant de saturation inverse est compté positivement. I_{cc} ou I_{ph} représente le courant de court-circuit (photo courant) et V_{co} la tension en circuit ouvert de la cellule photovoltaïque.

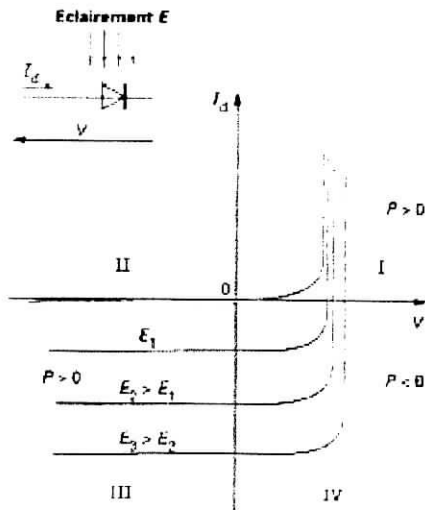


Figure 5– Caractéristiques d'une jonction PN sous éclairement

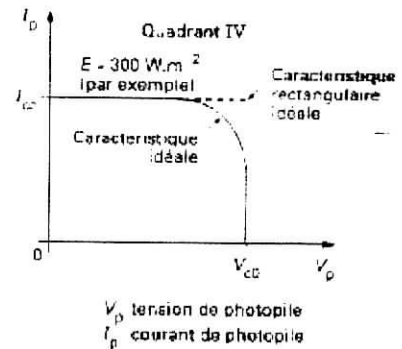


Figure 6– Caractéristique d'une cellule photovoltaïque idéale

Dans ce nouveau repère, l'équation d'une caractéristique correspondant à un éclairement E en $W \cdot m^{-2}$ est donnée par :

$$I_p = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{qV}{\eta kT}} - 1 \right] \quad (1.5)$$

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque déduit de cette équation est donné par la figure 8 et comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN.

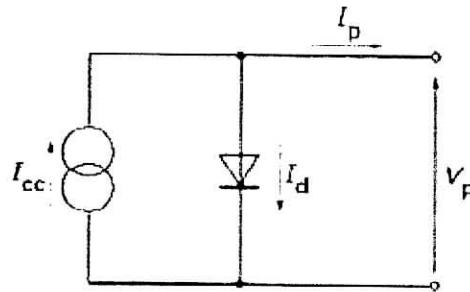


Figure 7– Schéma équivalent de la cellule idéale

3.2.4. Caractéristiques réelle: [3]

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle tient compte d'effets résistifs parasites dus à la fabrication et représentés sur le schéma équivalent par deux résistances:

- une résistance série R_s représentant les diverses résistances de contacts et de connexions ;
- une résistance R_p (shunt) en parallèle sur le générateur de courant qui caractérise les divers courants de fuite dus à la diode et aux effets de bords de la jonction.
- Une représentation avec deux diodes qui est plus fidèle aux caractéristique réelle de la cellule photovoltaïque.

L'équation caractéristique de la cellule réelle est alors donnée par :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{n_1 kT}} - 1 \right] - I_{s2} \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{n_2 kT}} - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (1.6)$$

La caractéristique réelle et le schéma équivalent de la cellule sont représentés sur la figure 9.

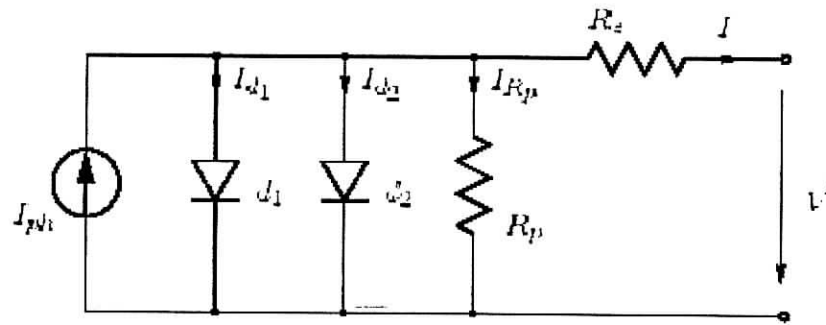


figure 8 :Schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle à deux diode

I_{ph} est le photo-courant produit,

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

n_1 et n_2 les facteurs d'idéalité de diode, ($n_1=1, n_2=2$)

$$\text{ou } I_{ph} = I_{ph} /_{(T=298)} \cdot [1 + (T - 298) \cdot 5 \cdot 10^{-4}] \quad (1.7)$$

$$I_{ph} /_{(T=298)} = 3.25 A$$

$$\text{avec } I_{s1} = K_1 T^3 e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad \text{et} \quad I_{s2} = K_2 T^{5/2} e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

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

$$K_2 = 2,9 \cdot 10^5 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^{5/3}$$

On prend généralement le photo-courant $I_{ph_{max}}$ égal à sa valeur à insolation maximale (les conditions standards de qualification des cellules sont un spectre AM1,5, une puissance incidente S de $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ et une température de 25°C) puis on le multiplie par la valeur en pourcentage de S ($I_{ph} = S \cdot I_{ph_{max}}$).

On peut déduire des deux équations (1.6) et (1.7) que la caractéristique courant-tension $I=f(V)$ dépend fortement de l'insolation et de la température.

La dépendance de la température est davantage amplifiée par les propriétés du photo-courant I_{ph} et les courants de saturation des diodes

4. Les panneaux solaires :

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur électrique de très faible puissance au regard des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles.

En effet, une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension très faible, par principe, puisqu'il s'agit

d'une tension de jonction. Les générateurs photovoltaïques sont, par conséquent, réalisés par association d'un grand nombre de cellules élémentaires.

Ces cellules sont commercialisées sous la forme de modules photovoltaïques associant, généralement en série pour élever la tension, un certain nombre de cellules élémentaires de technologie et caractéristiques identiques. Suivant les besoins de l'utilisation, ces modules sont ensuite associés en réseau série-parallèle de façon à obtenir la tension et le courant désirés.

Cette association doit être réalisée en respectant des critères précis, en raison des déséquilibres apparaissant dans un réseau de photopiles en fonctionnement.

En effet, bien que choisies théoriquement identiques, les nombreuses cellules qui constituent le générateur présentent des caractéristiques différentes du fait des dispersions de construction inévitables, mais aussi d'un éclairement et d'une température non uniformes sur l'ensemble du réseau.

La mise en place de dispositifs de protection efficaces contre les effets négatifs de ces déséquilibres sur le comportement et la fiabilité doit être prévue.

Une voie de développement complémentaire à celle des modules a consisté à augmenter la surface de captage du rayonnement solaire sans augmenter celle des cellules avec les générateurs à concentration de flux solaire.

Séduisant a priori par l'économie de matériau photovoltaïque ainsi obtenue, ce type de générateur s'est révélé décevant par les difficultés de mise en œuvre qu'il implique, liées à la température élevée atteinte par le matériau photovoltaïque qui entraîne une chute de rendement, d'où la nécessité de refroidir et une baisse de fiabilité.

Dans ce paragraphe nous allons essayer de voir surtout les principales caractéristiques des panneaux solaires issu de cellules associées en série ensuite voir l'effet de leur combinaison en parallèle

4.1.Panneaux en association série : [3]

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné.

En associant z cellules en série l'équation (1.6) devient :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[e^{\frac{q(V+IzRs)}{z n1kT}} - 1 \right] - I_{s2} \left[e^{\frac{q(V+IzRs)}{z n2kT}} - 1 \right] - \frac{V+IzRs}{zRp} \quad (1.8)$$

La figure 9 montre la caractéristique résultante $I=f(V)$ obtenue en associant en série z cellules identiques et donne : $V_{panneau} = z.V$

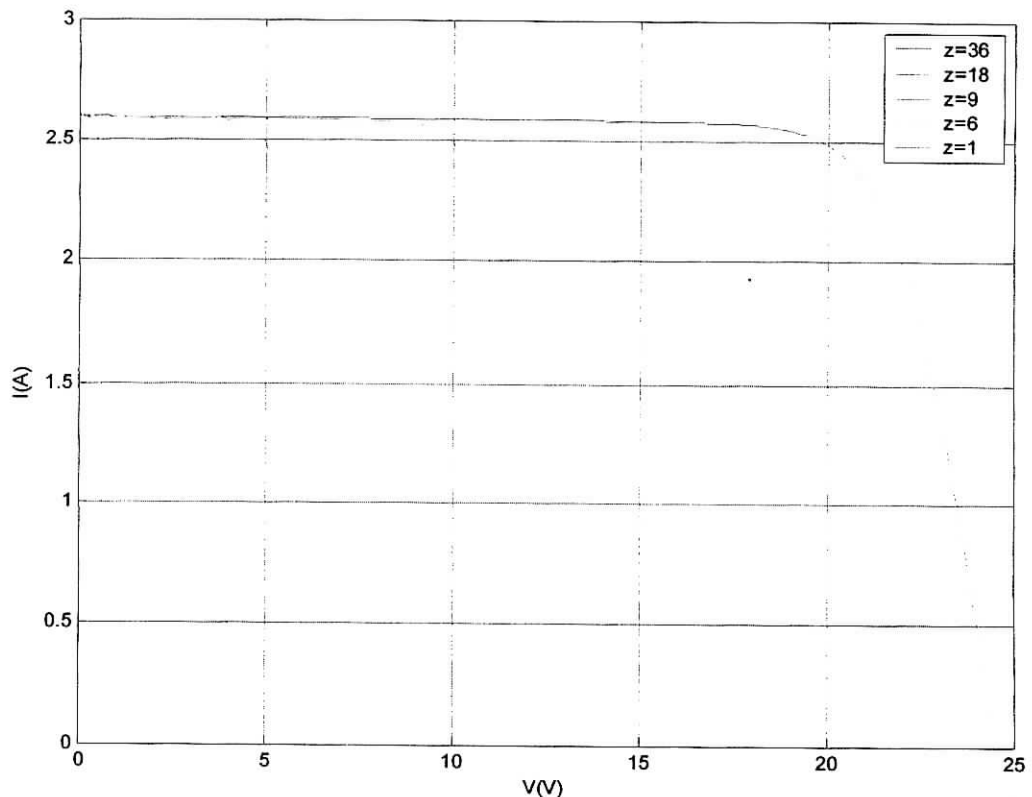


Figure 9 : – Caractéristique résultante d'un groupement en série de z cellules identiques (simulation avec MATLAB Simulink)

On remarque que le courant ne change pas mais c'est la tension qui augmente avec l'augmentation de z ce qui est logique puisque on les associe en série.

4.1.1. Influence de l'insolation :

Comme mentionné précédemment dans la section 2.4 les caractéristiques $I=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque dépendent fortement de l'insolation et de la température .

La figure10 ($P=f(V)$) et la figure11 ($I=f(V)$) nous montrent très clairement l'influence qu'a l'insolation sur les caractéristiques de la cellule photovoltaïque.

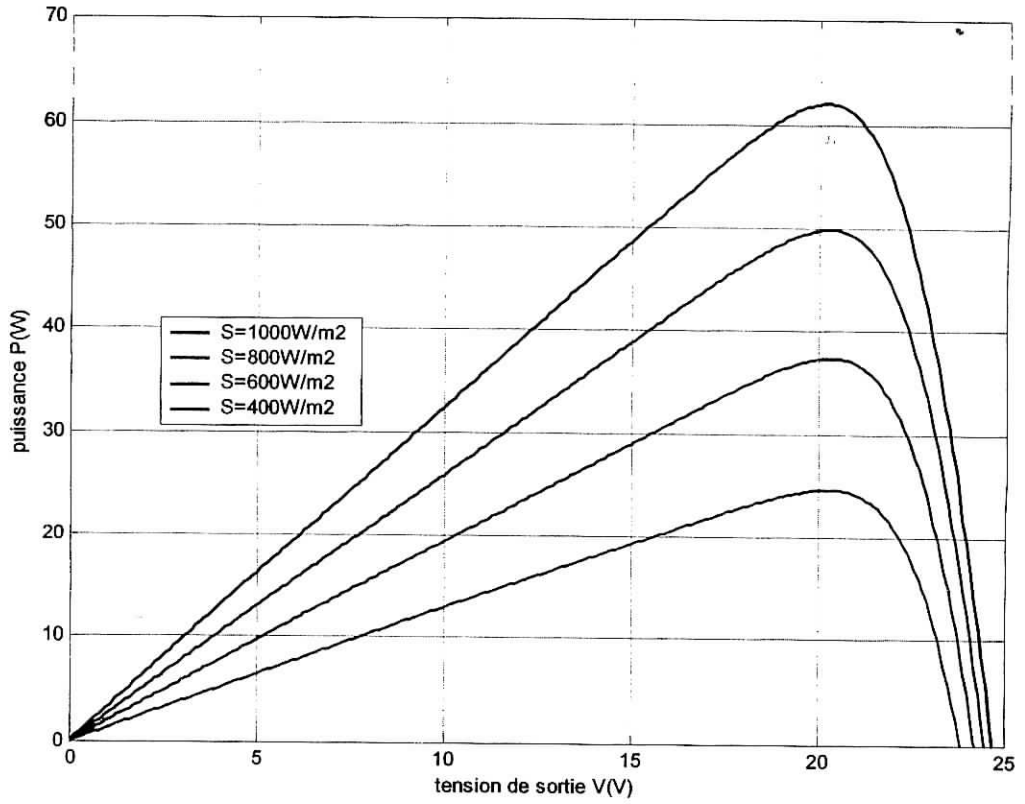


Figure 10 : – Caractéristiques $P=f(V)$ pour différentes valeurs de l'insolation S à $25^{\circ}c$ (simulation avec MATLAB Simulink)

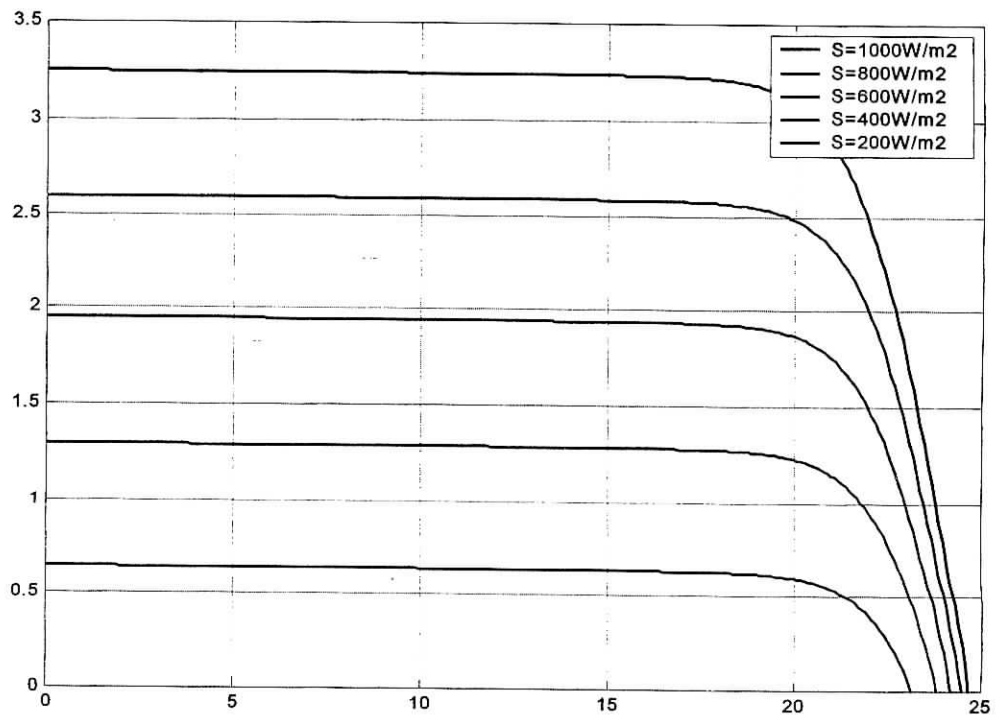


Figure 11 : Caractéristique $I=f(V)$ pour différentes valeurs de l'insolation S à $25^{\circ}c$

On remarque que la valeur du courant augmente au fur et à mesure que la valeur de l'insolation augmente tandis que la valeur de la tension de sortie reste pratiquement constante et on peut faire la même remarque pour la figure 10 ($P=f(V)$) car c'est l'insolation qui fixe la valeur du courant I_{ph} donc du courant I .

4.1.2. Influence de la température :

On sait que pour une jonction PN l'augmentation de la température diminue le rendement et c'est la même chose pour les cellules photovoltaïques

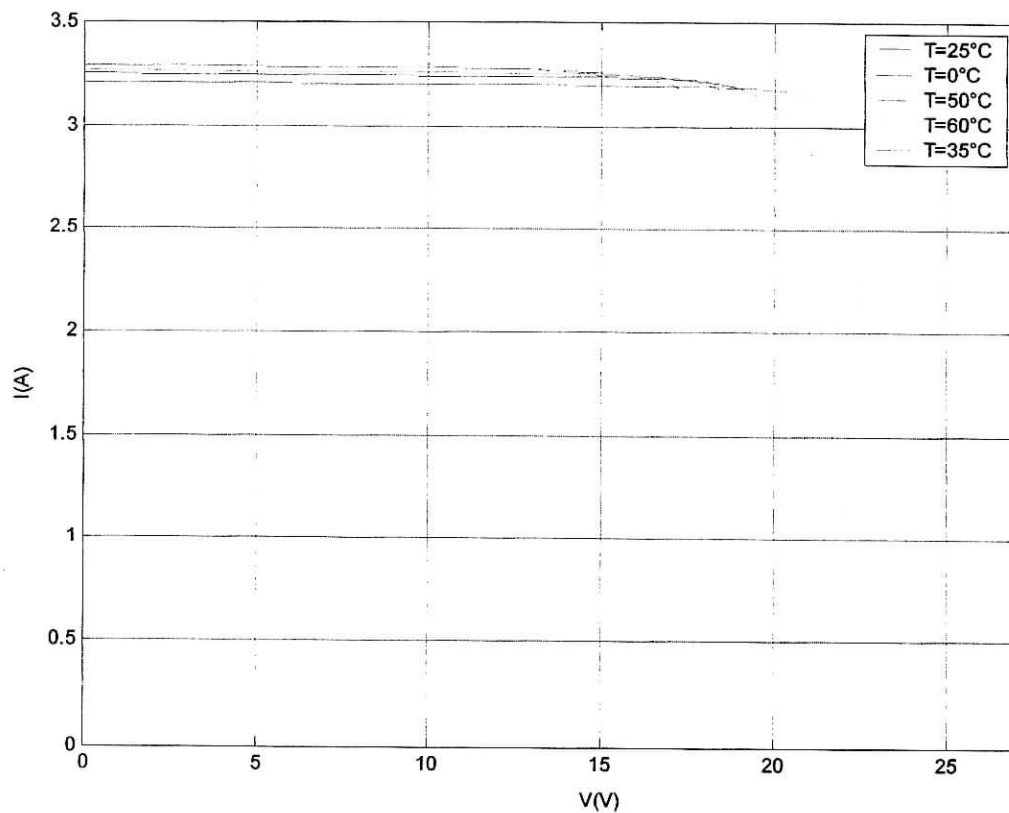


Figure 12 : Caractéristique $I=f(V)$ pour différentes valeurs de la température T à l'insolation $S = 1000 \text{ W/m}^2$ (simulation avec MATLAB Simulink)

Lorsque la température augmente le courant I ne varie presque pas tandis que la tension V diminue au fur et à mesure que T augmente. La même remarque peut être faite pour la puissance $P=f(V)$ (figure 13) ce qui est justifié par le fait qu'à température élevées il y a plus de recombinaison donc moins d'énergie fournie d'où une diminution du rendement.

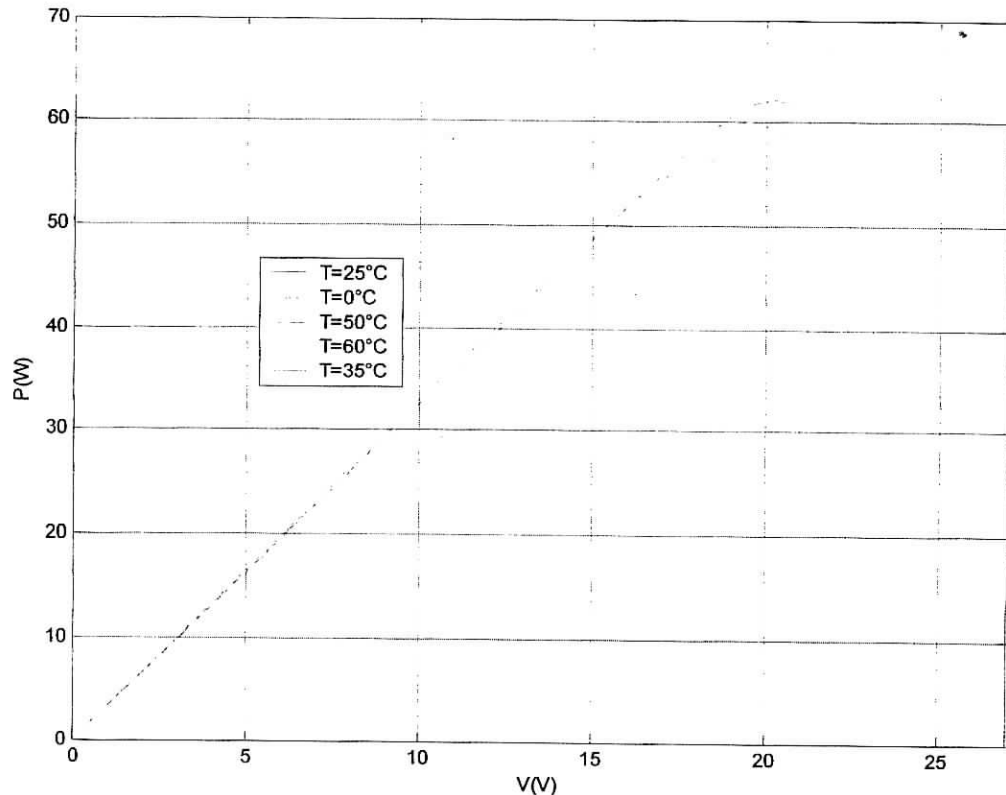


Figure 13 : Caractéristique $P=f(V)$ pour différentes valeurs de la température T à l'insolation $S=1000W/m^2$

Les variations de température et d'insolation au cours du temps apporte des changements aux caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ du panneau solaire donc à la tension V_{mp} de fonctionnement qui changera alors constamment ce qui nous oblige à faire une adaptation impédance en temps réel .

Dans ces circonstances on aura recours aux méthodes de recherche du point maximum (MPPT) cette méthode peut aider à l'augmentation du rendement de manière significative. Ce mécanisme agit en ajustant la charge de système de telle manière que la tension V d'opération soit toujours approximativement égale à la tension optimale V_{mp} de fonctionnement : $V = V_{mp} + \varepsilon$

la valeur de la tension V d'opération doit être très proche de V_{mp} quand on sait qu'une variation de 10% sur la tension V entraîne une diminution d'environ 18% de la puissance fournie, et même plus si on travaille avec des puissances et tensions élevées.

Si on compare les systèmes qui fonctionnent sans mécanisme de recherche du point maximum avec les systèmes avec MPPT on trouve que ces derniers produisent entre 80 et 90% de leur puissance théorique maximale sachant que les systèmes sans MPPT fonctionnent seulement à 30% de leur puissance théorique maximale . La figure suivante nous montre les conséquences d'un écart entre la tension d'opération est la tension qui correspond au point maximum de fonctionnement.

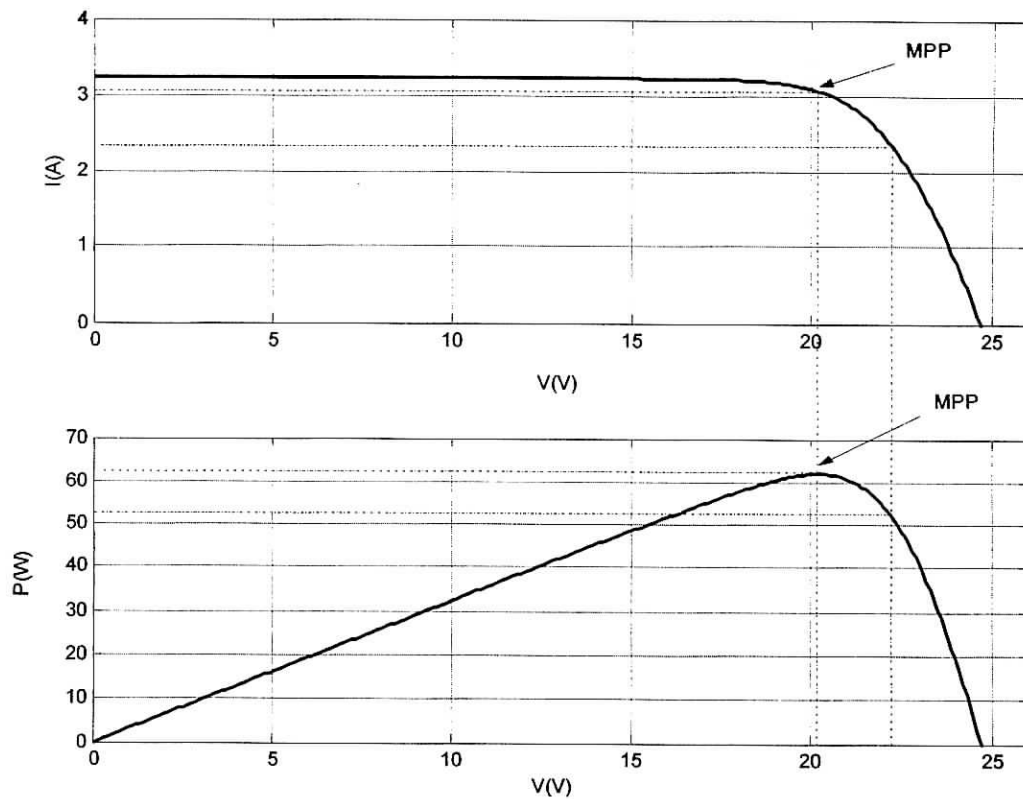


figure14 : caractéristiques $I=f(V), P=f(V)$ d'un panneau solaire à 36 cellules en série

4.2.Association de cellules en série parallèle[1]

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques.

La caractéristique électrique globale courant/tension du générateur photovoltaïque se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des $n_s \times n_p$ cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport n_s parallèlement à l'axe des tensions et de rapport n_p parallèlement à l'axe des courants,

ainsi que l'illustre la figure 15, n_s et n_p étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle.

En pratique, cette caractéristique combine les caractéristiques de modules soumis à des éclairagements et à des températures différents car non uniformes sur l'ensemble d'un générateur de plusieurs mètres carrés regroupant plusieurs panneaux, mais conserve l'allure fondamentale classique de celle d'une cellule élémentaire avec des valeurs de tension et de courant plus élevées tant que les déséquilibres inévitables restent assez faibles (les diodes de protection).

L'influence de l'éclairagement et de la température sur les courants et tensions caractéristiques I_{cc} , V_{co} $I=f(V)$, $P=f(V)$ reste la même que pour la cellule élémentaire ou en série.

En revanche, dès que des déséquilibres importants apparaissent, l'action de certaines diodes de protection séries ou parallèles modifie notablement cette allure classique, laissant apparaître des irrégularités ou cassures typiques ainsi qu'illustré par la figure 15, ce qu'il faudra équilibrer car cela rendrait difficile la recherche du point maximum.

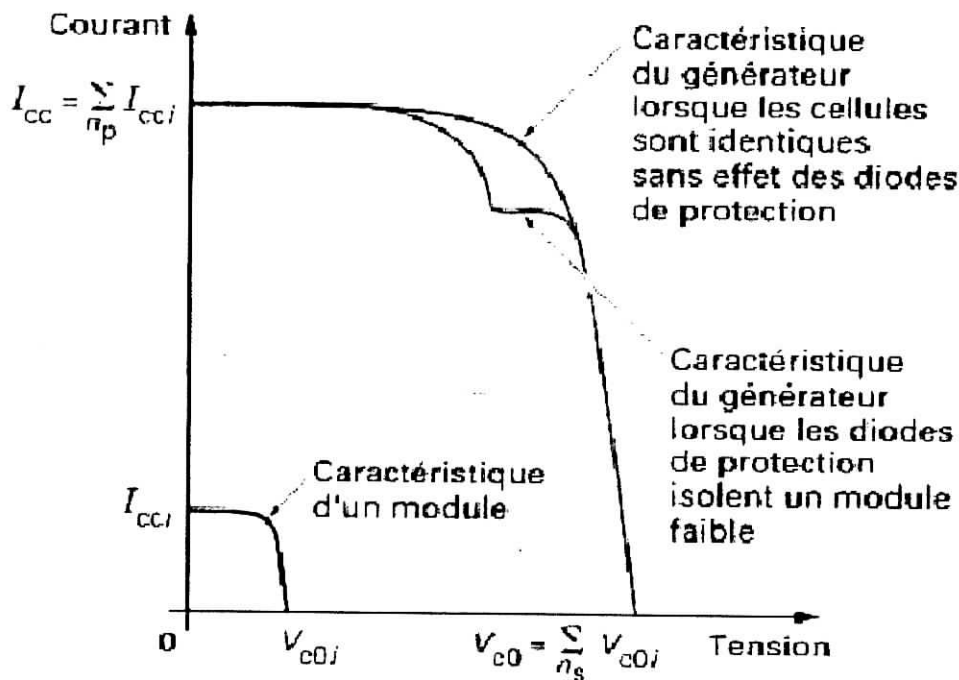


Figure 15 – Caractéristiques résultantes d'un générateur associant n_p cellules en parallèle et n_s cellules en série

5. Systèmes photovoltaïques

L'exploitation de l'énergie solaire photovoltaïque peut revêtir deux formes principales :

- La production centralisée d'énergie électrique à partir d'une centrale photovoltaïque de grande puissance très supérieure aux applications alimentées, à l'instar des centrales classiques ;
- La mise à profit de la nature répartie de cette énergie par une production et une utilisation décentralisée pour chaque application .

Dans le premier cas, les utilisateurs ont à leur disposition un réseau de distribution régulier, aux caractéristiques garanties, dont la puissance disponible peut généralement être considérée comme infinie devant celle de leur application.

Il n'en est pas du tout de même dans le second cas où, compte tenu du coût élevé de la puissance crête du générateur installé, on s'efforce de dimensionner celle-ci le plus justement au regard des besoins de l'application, en prenant en compte les problèmes particuliers posés par une disponibilité soumise aux aléas météorologiques.

Il résulte de ce caractère *source de puissance finie* du générateur relativement à sa charge une interaction permanente de ces deux éléments qui font du *système photovoltaïque* un système électrique très particulier pour l'ingénieur.

Dans le paragraphe qui suit , nous désignons par **système photovoltaïque** l'ensemble des éléments constituant une application industrielle ou domestique tirant tout ou une partie de son énergie électrique d'un générateur photovoltaïque au sens du second cas décrit ci-dessus, donc isolée d'un réseau de distribution de très grande puissance. Ce générateur constitue naturellement l'élément de base à considérer dans la conception d'un système photovoltaïque et d'en optimiser le fonctionnement et le dimensionnement, d'autant que celui-ci représente le plus souvent 50 % du coût total de l'installation.

5.1 Adaptateur continu/continu

L'adaptation continu/continu effectuée dans le but d'alimenter une charge électrique à courant continu mal adaptée à un couplage direct repose sur l'utilisation de structures de type hacheurs non réversibles analogues à celles utilisées, par exemple, dans les alimentations à découpage : hacheur série dévolteur (buck), hacheur parallèle survolteur (boost), hacheur dévolteur-survolteur à bobine intermédiaire (buck-boost).

5.2 Adaptateur continu/alternatif

Ce type d'adaptation, bien connu également, fait appel à des structures de convertisseurs continu/alternatif de type onduleur. On peut distinguer aujourd'hui trois grands types de structures utilisées en milieu industriel :

- les onduleurs à source de courant ;
- les onduleurs à source de tension et modulation de largeur d'impulsion ;
- les onduleurs à résonance.

5.3. Couplage du convertisseur au générateur photovoltaïque

Les règles classiques d'association des circuits électriques impliquent que chacune des structures de convertisseur citée précédemment est apte à régler le transfert d'énergie entre des circuits électriques, en raison de leur fonctionnement en commutation, ces convertisseurs statiques sont générateurs de perturbations susceptibles de nuire au bon fonctionnement du générateur tant sur le plan électrique qu'énergétique. Sur le plan énergétique, les ondulations de la tension ou du courant à l'entrée de certains convertisseurs se traduisent par une oscillation du point de fonctionnement sur la caractéristique autour du point de puissance optimale ce qui implique une dégradation de la conversion photovoltaïque.

5.4. Commande de l'adaptation d'impédance

Dans la plupart des systèmes photovoltaïques, le coût du seul générateur représente plus de 50 % du coût total de l'installation. De ce fait, l'objectif principal du concepteur est de définir des stratégies de fonctionnement conduisant à une réalisation qui minimise la puissance photovoltaïque crête installée. Il s'agit donc d'optimiser le traitement global de l'énergie électrique au sein du système et, en particulier, au niveau du générateur, en plaçant celui-ci à chaque instant à son point optimal de fonctionnement grâce à un système de poursuite de type MPPT que nous verrons dans le chapitre 3.

5.5.Adaptation de la structure du générateur

Le problème d'adaptation ne se pose pas seulement par rapport à la charge du générateur. En effet, le point de fonctionnement optimal propre à chaque module dépend de l'éclairement et de la température de celui-ci. On peut espérer satisfaire l'uniformité de ces conditions dans un générateur plan de petite surface. En revanche dans les générateurs de grande surface, ou présentant une forme non plane, il est préférable de subdiviser le générateur en plusieurs sections présentant un éclairement et une température relativement uniformes et d'associer à chacune un adaptateur continu/continu. Ces adaptateurs, de type hacheur dévolteur ou survolteur munis d'un système de poursuite, permettent un fonctionnement découplé optimal de chaque section. Leur interconnexion conduit au générateur complet avec une meilleure exploitation de l'énergie solaire.

Chapitre 2

Généralités sur les hacheurs

Généralités sur les hacheurs

1.Introduction

Dans ce chapitre nous allons voir les principes de la conversion des hacheurs qui sont des convertisseurs directs du type continu-continu, leur utilisation permet le contrôle de la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé qui dans notre cas va nous permettre de poursuivre le point de fonctionnement maximum, aussi nous allons essayer d'illustrer quelque détails de circuit de ces convertisseurs DC/DC ainsi que les modèles mathématiques qui en dérivent.

Les circuits des convertisseurs de commutation se composent de condensateurs, d'inductances, et des commutateurs ceux-ci consomment que très faiblement de la puissance électrique, ce qui est la raison du rendement élevé de ces convertisseurs DC/DC. Le commutateur est réalisé avec un dispositif de semi-conducteur, habituellement un transistor MOSFET en mode de commutation.

2.Structures fondamentales des hacheurs

2.1 hacheur dévolteur

2.1.1 Configuration de base[2]

Le générateur est une source de tension continue parfaite de fém E , unidirectionnelle en courant.

Le récepteur qui, compte tenu de la nature du générateur, doit avoir la nature d'une source de courant, est lui-même unidirectionnel en tension et en courant. Supposons que sa nature de source de courant soit suffisamment affirmée pour que le courant qui le parcourt puisse être considéré comme constant et d'amplitude I .

Les deux éléments peuvent être soit connectés suivant le schéma de la figure 1a, soit déconnectés (figure 1b). Dans ce dernier cas, le récepteur doit être court-circuité pour assurer la continuité du courant I (roue libre).

La modulation de la puissance électrique échangée entre les deux éléments sera réalisée en modifiant périodiquement leur interconnexion c.a.d le rapport cyclique :

- pendant un temps t_f (état 2a) : phase active ;
- pendant un temps t_0 (état 2b) : phase de roue libre.

La période T est définie par :

$$T = t_0 + t_f \quad (2.1)$$

$$D = t_f / T \quad D' = D - 1 \quad (2.2)$$

Ce fonctionnement peut être réalisé à partir d'un convertisseur direct élémentaire dont la structure à deux interrupteurs est représentée sur la figure 1c.

Il est évident que le passage de l'un à l'autre des deux états est obtenu par la commutation des deux interrupteurs K 1 et K 2, c'est-à-dire par leur changement d'état simultané et complémentaire. K1 et K 2 constituent la cellule de commutation du convertisseur

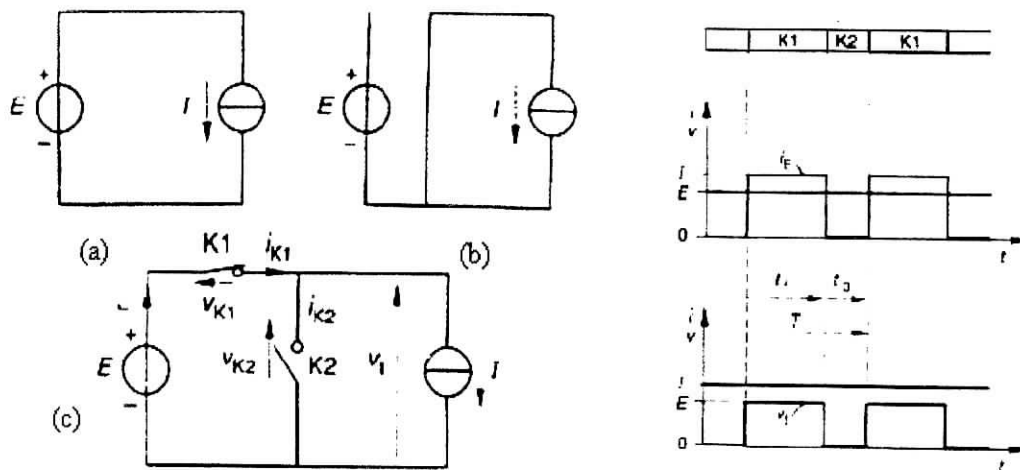


figure 1 : a : phase active b : phase de roue libre c : structure à 2 interrupteurs

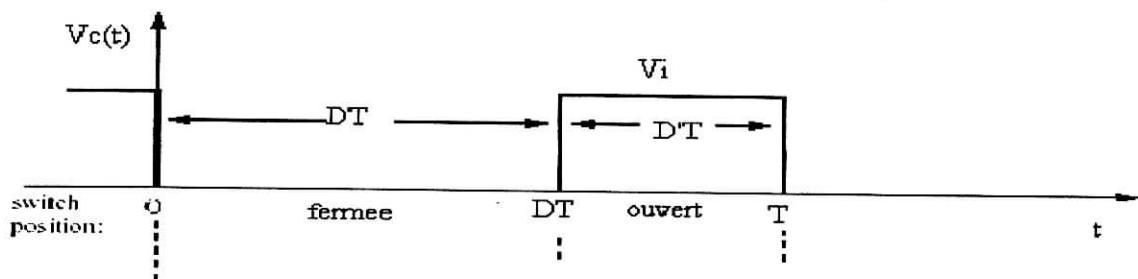


figure2 :représentation du rapport cyclique

2.1.2 circuit du hacheur dévolteur[3]

Le modèle de circuit équivalent du hacheur dévolteur est illustre dans la figure 3 :

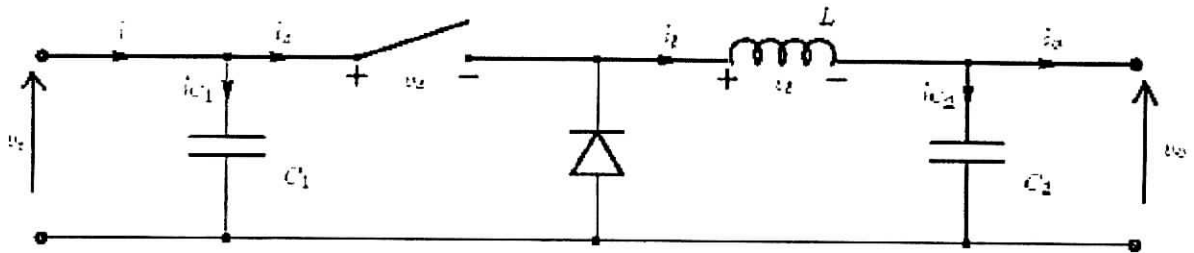


figure 3 :Circuit hacheur dévolteur

Quand le commutateur est fermé la diode sera en inverse alors le courant passera à travers l'inductance vers la charge. Aussitôt que le commutateur est ouvert l'inductance maintient le courant dans la charge, à travers la diode maintenant polarisée en direct.

Pour étudier le circuit du hacheur dévolteur et pour dériver son modèle mathématique, nous devons faire la représentation du circuit équivalent pour les deux états du commutateur (ouvert et fermé). La figure 4 montre le schéma du circuit équivalent du convertisseur avec le commutateur fermé. Le schéma représente le convertisseur avec le commutateur fermé pendant l'intervalle de temps DT .

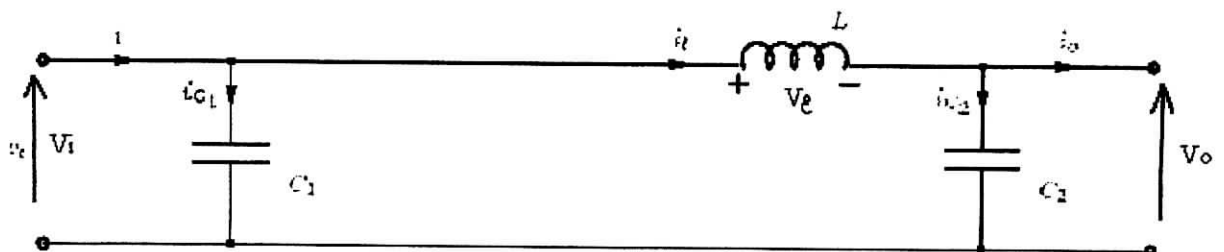


figure4 :Schéma du circuit équivalent du convertisseur avec le commutateur fermé

Nous pouvons déduire de ce circuit les équations suivantes :

$$i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \quad (2.3)$$

$$i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_l(t) - i_o(t) \quad (2.4)$$

$$v_l(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = v_i(t) - v_o(t) \quad (2.5)$$

Le schéma suivant représente le convertisseur avec le commutateur ouvert pendant l'intervalle de temps D'T

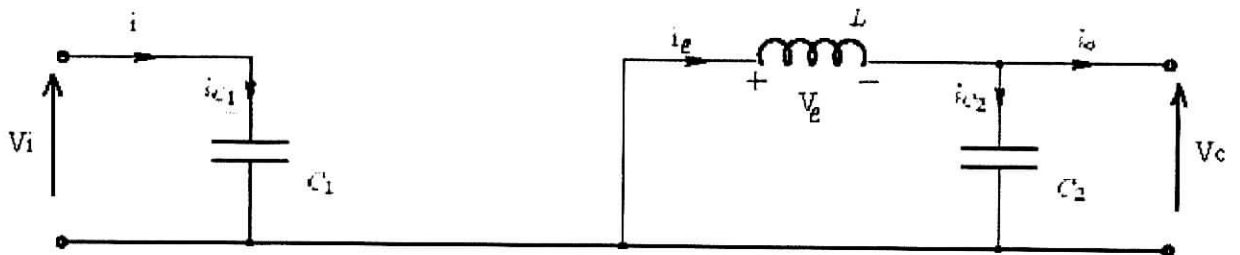


figure5 :Schéma du circuit équivalent du convertisseur avec le commutateur ouvert.

Nous pouvons déduire de ce circuit les équations suivantes

$$i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) \quad (2.6)$$

$$i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_l(t) - i_o(t) \quad (2.7)$$

$$v_l(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = -v_o(t) \quad (2.8)$$

Comme notre régime de travail est le continu (DC) nous pouvons faire l'approximation suivante pour les signaux: $x(t) = X + x_{alt} \cong X = \langle x(t) \rangle$ tel que :

X :est la composante continue du signal

x_{alt} : est la composante alternatif du signal

$\langle x(t) \rangle$:la valeur moyenne du signal et que $X \gg |x_{alt}|$

Alors les équations précédentes(3-8) deviennent :

pendant l'intervalle de temps DT

pendant l'intervalle de temps DT

$$i_{c1} = I - I_l \quad (2.9)$$

$$i_{c2} = I_l - I_o \quad (2.10)$$

$$v_l = V_i - V_o \quad (2.11)$$

pendant l'intervalle de temps D'T

$$i_{c1} = I \quad (2.12)$$

$$i_{c2} = I_l - I_o \quad (2.13)$$

$$v_l = -V_o \quad (2.14)$$

pour obtenir le rapport de conversion et établir un modèle mathématique pour la simulation on doit passer par ces étapes :

-le calcul de la tension de l'inductance et le courant de la capacité

$$V_l = \langle v_l \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v_l(t) dt \quad (2.15)$$

$$I_c = \langle i_c \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T i_c(t) dt \quad (2.16)$$

On a $V_l = L \frac{di_l}{dt}$ et $i_c = C \frac{dv_c}{dt}$ donc

$$i_l(T) - i_l(0) = \frac{1}{L} \int_0^T v_l(t) dt \quad (2.17)$$

$$v_c(T) - v_c(0) = \frac{1}{C} \int_0^T i_c(t) dt \quad (2.18)$$

on a aussi $i_l(t+T) = i_l(t)$ et $v_c(t+T) = v_c(t)$ donc (2.17),(2.18) deviennent

$$\frac{1}{L} \int_0^T v_l(t) dt = 0 \quad (19)$$

$$\frac{1}{C} \int_0^T i_c(t) dt = 0 \quad (20)$$

donc les valeurs moyennes de la tension et du courant deviennent :

$$V_l = \langle v_l \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v_l(t) dt = 0 \quad (2.21)$$

$$I_c = \langle i_c \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T i_c(t) dt = 0 \quad (2.22)$$

En combinant les équations (2.9) à (2.14) avec les équations (2.21),(2.22) on aura :

$$\langle v_l(t) \rangle = D (V_i - V_o) + D'(-V_o) = 0 \quad (2.23)$$

$$\langle i_{c1}(t) \rangle = D (I - I_l) + D'(I) = 0 \quad (2.24)$$

$$\langle i_{c2}(t) \rangle = D (I_l - I_o) + D'(I_l - I_o) = 0 \quad (2.25)$$

on a $D = 1 - D'$ donc :

$$D V_i = V_o \quad (2.26) \quad ; \quad I = D I_l \quad (2.27) \quad ; \quad I_l = I_o \quad (2.28)$$

D'où le rapport de conversion qui est $M(D) = \frac{V_o}{V_i} = D$ avec $0 < D < 1$ (2.29)

Donc le rapport de conversion est égal au temps de fermeture donc dépend du rapport cyclique ce qui nous permet dans notre cas de fixer le point de fonctionnement du panneaux solaire en agissant seulement sur le rapport cyclique.

Pour le model mathématique on calcule les moyennes :

$$\langle i_{c1}(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_i^{i+T} i_{c1}(t) dt = \frac{1}{T} \int_i^{i+DT} i_c(t) dt + \frac{1}{T} \int_{i+DT}^{i+T} i_c(t) dt = \frac{1}{T} [i - i_l] i^{i+DT} + [i] = i - D i_l \quad (2.24)$$

d'après (2.3) et (2.6) on aura : $\frac{dv_i}{dt} = \frac{1}{C_1} [i - D i_l]$ (2.30)

avec les équations (2.25) et (2.4), (2.7) on aura $\frac{dv_o}{dt} = \frac{1}{C_2} [i_l - i_o]$ (2.31)

et avec les équations (2.23) et (2.5), (2.8) on aura $\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} [D v - v_o]$ (2.32)

Les équations 30, 31, et 32 représentent le model mathématique mais il faut les arranger pour qu'on puisse les faire coordonnées ensemble comme ceci sachant que v_o est une valeur d'entres car fixée par la charge ainsi que D, i :

$$i_o = i_l - C_2 \frac{dv_o}{dt} \quad (33)$$

$$i_l = \frac{1}{D} (i - C_1 \frac{dv_i}{dt}) \quad (34)$$

$$v = \frac{1}{D} (v_o - L \frac{di}{dt}) \quad (35)$$

nous verrons ces équations plus tard dans le chapitre concernant la simulation.

2.2 Hacheur survolteur

2.2.1. Configuration de base[2]

Par rapport à la précédente structure, les rôles de générateur et de récepteur sont inversés entre la source de tension et la source de courant :

- le **générateur** a la nature d'une source de courant continu constant d'amplitude I ; il est unidirectionnel en tension ;
- le **récepteur** a la nature d'une source de tension unidirectionnelle en courant et sa structure est telle que la tension à ses bornes peut être considérée comme constante et d'amplitude E (cette condition est généralement assurée par un condensateur en parallèle de capacité élevée comme nous allons le voir dans le circuit).

Les différentes possibilités d'interconnexion de ces deux sources sont représentées sur les figures 6a et b et c. L'évolution des grandeurs d'entrée et de sortie pendant une période est tracé dans la figure 5d. L'observation de ces cycles permet de les identifier :

- K1 est un interrupteur unidirectionnel en tension et en courant, à amorçage et blocage spontanés, c'est donc une diode D ;
- K2 est un interrupteur unidirectionnel en tension et en courant, commandé à l'amorçage et au blocage (par exemple un transistor T).

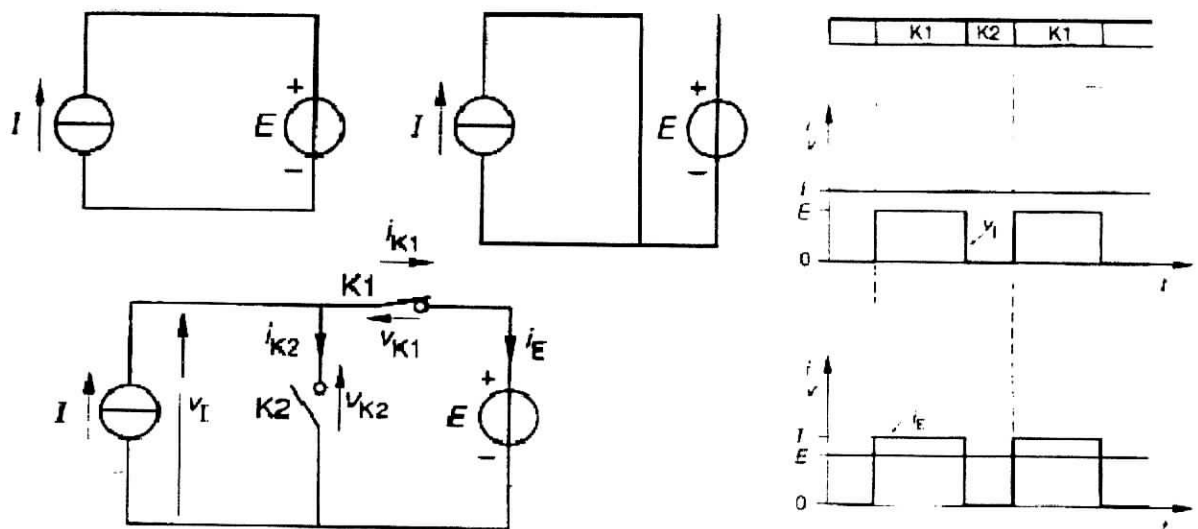


figure 6 : Les différentes phases du hacheur survolteur

2.2.2. Le circuit du convertisseur survolteur[3]

Le modèle de circuit équivalent du hacheur survolteur est illustré dans la figure 7 :

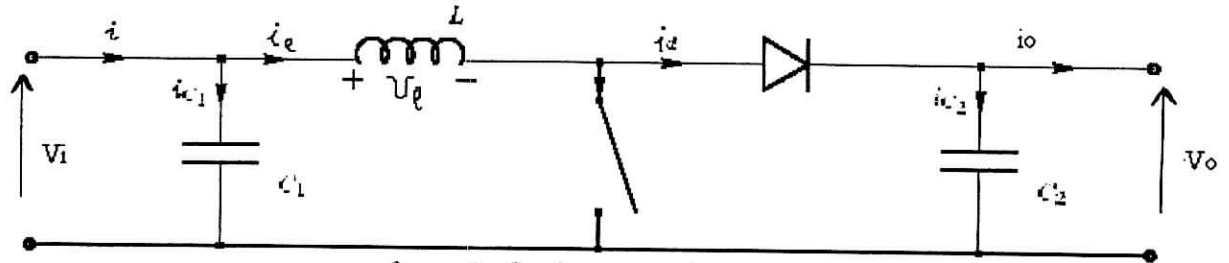


figure 7 : hacheur survolteur

Pendant l'intervalle de temps DT le commutateur est fermé, un courant traverse l'inductance sans passer par la diode va directement à la masse (figure 8). Ensuite le commutateur est ouvert pendant l'intervalle $D'T$, du fait de la nature de l'inductance le courant élevé est maintenu et passe à travers la diode polarisée en direct, celle-ci se comporte maintenant comme un générateur de tension qui s'additionne à la tension V_i , $(V_i + (-V_\ell))$ ceci mène à une élévation de tension qui est appliquée en sortie d'où le nom survolteur.

Nous allons refaire les mêmes étapes que pour le paragraphe 2.1.2 c.a.d la représentation du circuit équivalent pour les deux états du commutateur (ouvert et fermé) ainsi que les modèles mathématiques qui en dérivent.

La figure 8 montre le schéma du circuit équivalent du convertisseur avec le commutateur pendant l'intervalle de temps DT .

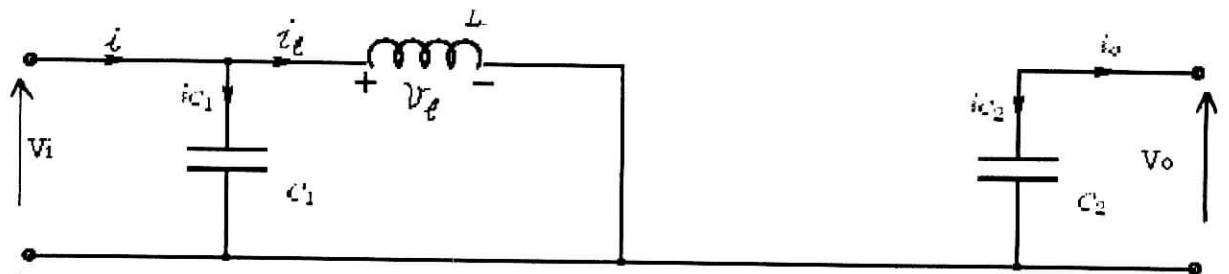


figure 8 : Schéma du circuit équivalent du convertisseur avec le commutateur fermé

Nous pouvons déduire de ce circuit les équations suivantes :

$$i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \quad (2.36)$$

$$i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \quad (2.37)$$

$$v_l(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = v_i(t) \quad (2.38)$$

Le schéma suivant représente le convertisseur avec le commutateur ouvert pendant l'intervalle de temps D'T

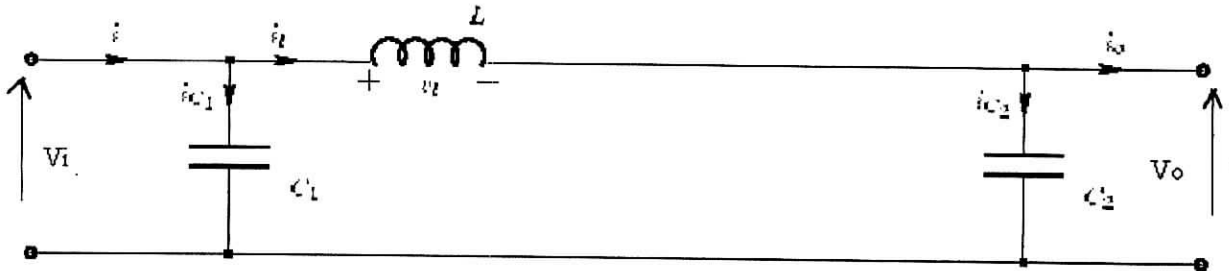


figure9 : Schéma du circuit équivalent du convertisseur avec le commutateur ouvert

Nous pouvons déduire les équations suivantes :

$$i_{C1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \quad (2.39)$$

$$i_{C2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_l(t) - i_o(t) \quad (2.40)$$

$$v_l(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = v_i(t) - v_o(t) \quad (2.41)$$

en faisant les mêmes supposition $X \gg |x_{alt}|$ alors les équations précédentes (36-41) deviennent :

pendant l'intervalle de temps DT

$$i_{c1} = I - I_l \quad (2.42)$$

$$i_{c2} = -I_o \quad (2.43)$$

$$v_l = V_i \quad (2.44)$$

pendant l'intervalle de temps D'T

$$i_{c1} = I - I_l \quad (2.45)$$

$$i_{c2} = I_l - I_o \quad (2.46)$$

$$v_l = V_i - V_o \quad (2.47)$$

pour obtenir le rapport de conversion et établir un modèle mathématique on calcul les valeurs moyennes de i_{c1}, i_{c2} et v_l

on aura directement

$$\langle i_{c1}(t) \rangle = D(I - I_l) + D'(I - I_l) = 0 \quad (48)$$

$$\langle i_{c2}(t) \rangle = D(-I_o) + D'(I_l - I_o) = 0 \quad (49)$$

$$\langle v_l(t) \rangle = D(V_i) + D'(V_i - V_o) = 0 \quad (50)$$

on a $D = 1 - D'$ donc :

$$; I = I_l \quad (2.51) \quad ; \quad D' I_l = I_o \quad (2.52) \quad D V_i = V_o \quad (2.53)$$

D'où le rapport de conversion qui est $M(D) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{D'} = \frac{1}{1-D} \quad (2.54)$

avec $0 < D < 1$ donc $\frac{1}{1-D} > 1$ d'où survolteur

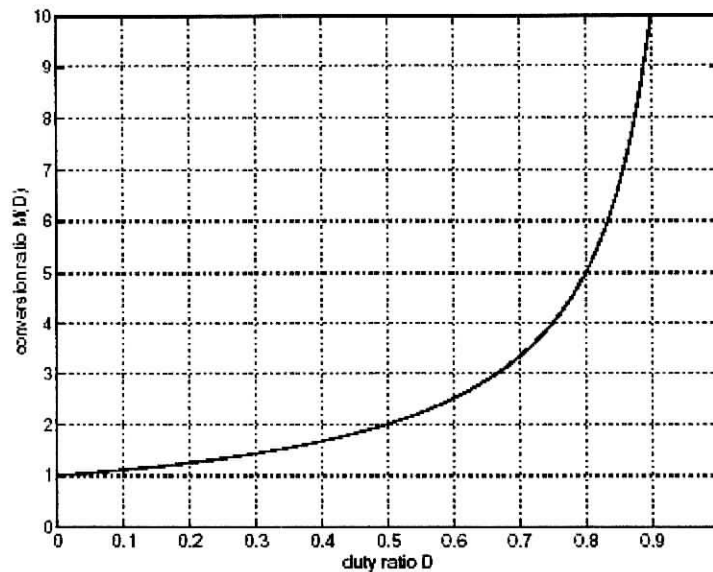


figure 10 : Le rapport de conversion $M(D)$ en fonction du rapport cyclique D

Donc comme pour le hacheur dévolteur le rapport cyclique nous permet dans notre cas de fixer le point de fonctionnement du panneau solaire.

Pour le modèle mathématique on peut extrapoler des équations (36-41)

$$C_l \frac{dv_l(t)}{dt} = D(i - i_l) - D'(i - i_l) = i - i_l \quad (2.55)$$

$$C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = D(-i_o) + D'(i_r - i_o) = (1-D)i_r - i_o \quad (2.56)$$

$$L \frac{di_r(t)}{dt} = D v_i(t) + D'(v_r - v_o) = v - (1-D)v_o \quad (2.57)$$

On doit les faire coordonner ensemble pour qu'elles puissent être simulées, toujours en sachant que v_o est une valeur d'entrée car fixée par la charge ainsi que D et i :

$$i_r = (i - C_1 \frac{dv_i}{dt}) \quad (2.58)$$

$$i_o = (1-D)i_r - C_2 \frac{dv_o}{dt} \quad (2.59)$$

$$v = (1-D)v_o - L \frac{di_r}{dt} \quad (2.60)$$

nous verrons l'utilisation de ces équations plus tard dans le chapitre concernant la simulation.

3. Le hacheur survolteur dévolteur [3]

Le hacheur survolteur dévolteur comme son nom l'indique combine les propriétés des deux structures fondamentales étudiées précédemment. Nous verrons mieux cette particularité en essayant de comprendre son fonctionnement sur la figure 11 :

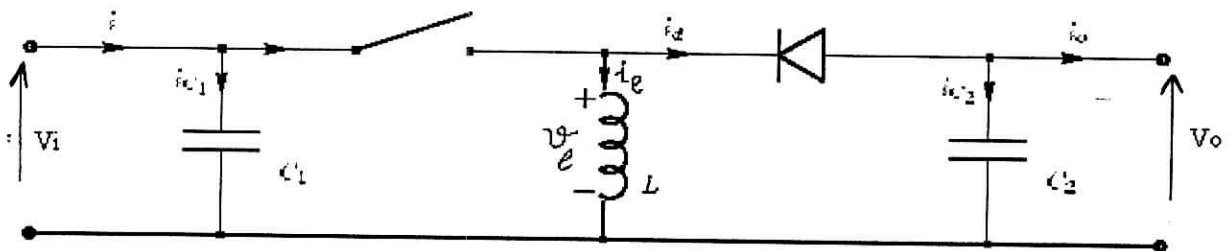


figure 11 : hacheur survolteur dévolteur

Pendant l'intervalle de temps DT le commutateur est fermé, un courant traverse l'inductance sans passer par la diode qui est polarisée en inverse. Ensuite le commutateur est ouvert pendant l'intervalle $D'T$, du fait la nature de l'inductance le courant est maintenu et passe à-travers la diode polarisée en direct ceci mène à une élévation de tension V_o qui devient négative est celle ci dépend comme nous le verrons plus tard du ratio $-D/(1-D)$ qui peut être supérieur ou inférieur à 0 .

pendant l'intervalle de temps DT nous avons.

$$i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \quad (2.61)$$

$$i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \quad (2.62)$$

$$v_l(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = v_i(t) \quad (2.63)$$

pendant l'intervalle de temps D'T nous avons.

$$i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i(t) \quad (2.64)$$

$$i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_l(t) - i_o(t) \quad (2.65)$$

$$v_l(t) = L \frac{di_l(t)}{dt} = v_o(t) \quad (2.66)$$

pendant les états stables DT :

$$i_{c1} = I - I_l \quad (2.67)$$

$$i_{c2} = -I_o \quad (2.68)$$

$$v_l = V_i - \quad (2.69)$$

pendant les états stables D'T :

$$i_{c1} = I \quad (2.70)$$

$$i_{c2} = -I_l - I_o \quad (2.71)$$

$$v_l = V_o \quad (2.72)$$

en calculant les valeurs moyennes on aura:

$$\langle i_{c1}(t) \rangle = D(I - I_l) + D'I = 0 \quad (73)$$

$$\langle i_{c2}(t) \rangle = D(-I_o) + D'(-I_l - I_o) = 0 \quad (74)$$

$$\langle v_l(t) \rangle = D(V_i) + D'V_o = 0 \quad (75)$$

Sachant que $D = 1 - D'$ on en déduit que :

$$; I = D I_l \quad (76) \quad ; \quad (-D') I_l = I_o \quad (77) \quad D V_i = -D' V_o \quad (78)$$

$$D'ou le rapport de conversion qui est $M(D) = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{D}{D'} = \frac{D}{1-D} \quad (79)$$$

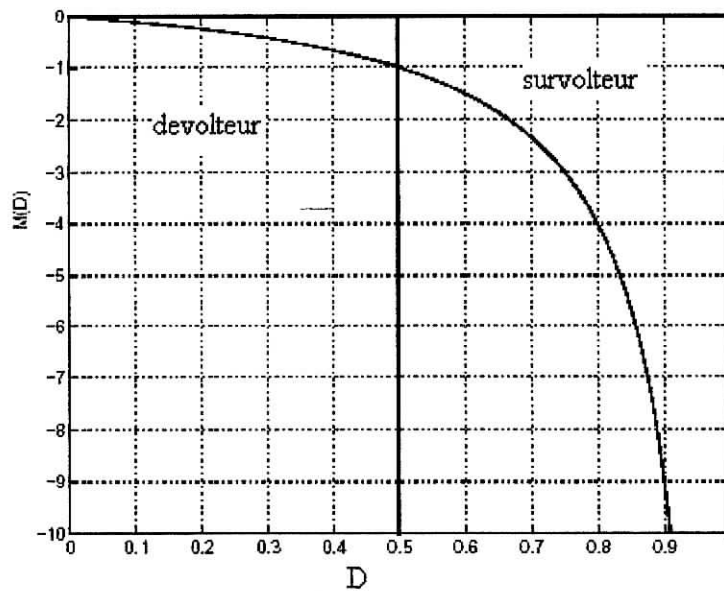


figure 12 : le rapport de conversion $M(D)$ en fonction du rapport cyclique D

on voit bien qu'il existe deux régions pour le rapport cyclique :

$0 < D < 0.5$ pour que le hacheur soit dévolteur

$0.5 < D < 1$ pour que le hacheur soit survolteur

Pour le model mathématique on peut extrapoler les équations (61-66)

$$C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = D(i - i_l) - D' i = i - D i_l \quad (2.80)$$

$$C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = D(-i_o) + D'(-i_r - i_o) = -(1-D) i_r - i_o \quad (2.81)$$

$$L \frac{di_l(t)}{dt} = D v_i + D' v_o = D v + (1-D) v_o \quad (2.82)$$

On peut les arranger :

$$i_l = \frac{1}{D} (i - C_1 \frac{dv_i}{dt}) \quad (2.83)$$

$$i_o = -(1-D) i_r - C_2 \frac{dv_o}{dt} \quad (2.84)$$

$$v = \frac{1}{D} (L \frac{di_l}{dt} - (1-D) v_o) \quad (2.85)$$

Dans notre réalisation et suivant nos besoins ,on aura a travailler avec un hacheur dévolteur.

Chapitre 3

Les méthodes de poursuites MPPT

(Maximum Power Point Tracking)

Les méthodes de poursuites MPPT (Maximum Power Point Tracking)

1.Introduction

Comme montré dans le chapitre précédent, l'énergie extraite à partir d'un panneau solaire est fortement limitée par les contraintes physiques des cellules photovoltaïques.

La densité d'alimentation électrique de l'insolation d'un jour ensoleillé est autour de 1000W/m².

En association avec des rendements de pile solaire entre 15% et 17% [1] ceci rapporte un rendement maximum possible de l'alimentation électrique entre 150W/m² et 170W/m².

Il y a deux manières d'augmenter l'alimentation électrique venant d'une rangée photovoltaïque:

On peut ajouter plus de panneaux à la rangée, ce qui signifie une augmentation en surface de capteurs donc une grande augmentation en coût pour le matériel.

On peut également essayer de faire travailler des panneaux, qui existant toujours, à leurs puissance maximale.

La figure 14 à la page 16 montre le point de puissance maximale (MPP) d'une rangée solaire. Si la rangée est actionnée en ce moment avec ses valeurs correspondantes pour une tension V_{mp} et un courants I_{mp} , Le rendement maximum possible est réalisé.

Le but de ce chapitre est d'étudier les méthodes qui peuvent nous aider à extraire la puissance maximale des panneaux et choisir l'une d'elles pour implémenter son algorithme sur un microcontrôleur (PIC16F876)

Il y a beaucoup d'approches à ce problème. Une variété énorme de concepts mène à une variété encore plus grande de circuits et de mécanismes pour faire fonctionner les panneaux photovoltaïque aussi étroitement que possible avec point de puissance maximale.

Certains des concepts sont très robustes et simples, tandis que d'autres approches exigent des dispositifs de logique très sophistiqués tels que des microprocesseurs combinés avec de des circuits de puissance, de convertisseurs de commutation...

Dans ce chapitre on verra les différentes méthodes de poursuite du point maximum

2. Les méthodes de poursuites MPPT[3]

2.1 Assortiment simple de panneau-charge

Le but d'actionner les cellules photovoltaïques près de leur point d'alimentation électrique maximum, la méthode d'assortiment simple de charge peut être employée.

Et pour cela le point optimum de fonctionnement du panneau solaire est déterminé en théorie et dans des conditions de fonctionnement par une série de mesures.

Ensuite les valeurs correspondantes pour le courant et la tension maximum d'alimentation électrique (I_{pm} et V_{mp}) sont trouvés, une charge assortie est conçu.

L'avantage de cette configuration est donc sa simplicité, aucun circuit additionnel n'est employé, le risque d'échec de composant est minime et la perte d'alimentation électrique entre le panneau et les batteries est réduite aux pertes de semi-conducteurs.

L'inconvénient de ce système est qu'il ne prend aucun compte du changement de l'insolation ou de la température. Leurs variations change ainsi V_{mp} dans la considération donc perte du point maximum. Aussi le vieillissement du matériel photovoltaïque de cellules ou du panneau poussiéreux d'une surface peut également causer une variation du point de l'alimentation électrique et du rendement maximum.

Tout ceux-ci entraîne des pertes comme nous l'avons préciser dans le paragraphe précédent si on force le panneau à travailler à des tensions différentes de 10% de la tension V_{mp} ceci entraîne une diminution de la puissance d'environ 20%.

La différence entre la tension maximum V_{mp} d'alimentation électrique et la tension nominale V_b de batterie(charge) sont avérés parfois plus que 50% pour certains panneaux solaires ceci réduit le rendement d'alimentation électrique d'une façon très critique d'après les constatations précédentes.

Par conséquent une méthode plus sophistiquée d'assortiment de panneau-charge doit être trouvée si un plus haut rendement est désiré.

2.2.Assortiment Semi-dynamique de charge

Une amélioration de la méthode discutée dans la section 1.2 est nécessaire.

Un certain nombre de batterie contrôlables son connectées en série. Selon la tension d'opération désirée de la cellule photovoltaïque , le nombre de cellules de batterie en série peut être changée.

On peut aussi en réarrangeant les raccordements en série et parallèles entre les différents panneaux entres eux, l'assortiment entre la charge et la rangé photovoltaïque de cellules est amélioré .

Ceci permet au système de réagir aux changements des conditions environnementales comme la température et l'irradiation et fonctionne donc plus près du MPP réel .

Cette approches exige beaucoup de circuits et de câblages supplémentaires.

En outre, l'augmentation ou la diminution par étapes de la tension de fonctionnement ne permet pas le cheminement précis du MPP.

Cette approche dans le long terme dégrade la vie des batteries. Ces méthodes pourraient être rentables pour des usages avec cellules photovoltaïques stationnaires a condition de trouver des systèmes ingénieux et économiques de contrôle.

2.3 .Les méthode de poursuites du MPP par retour de l'information de tension (voltage-feedback) :

Si aucune batterie n'est présente dans le système pour fixer la tension de sortie à un niveau presque constant, un système de commande simple peut être appliqué. Un convertisseur DC-DC (hacheur) peut être employé pour convertir le niveau de tension de la rangée de cellules photovoltaïque à un autre niveau de tension à la charge. Contrôlée par retour de l'information de la tension (voltage-feedback) de panneau et la comparaison avec une tension constante de référence peuvent être employées à ajuster sans interruption le rapport cyclique d pulse width modulation (PWM) pour pouvoir approcher le maximum que possible le point de fonctionnement MPP.

Cette méthode permet d'utiliser une rangée solaire sous une charge inconnue ou des conditions de charge changeantes et peut toujours choisir un point souhaitable de fonctionnement pour le panneau.

Cette méthode permet d'utiliser une rangée solaire sous une charge inconnue ou des conditions de charge changeantes et peut toujours choisir un point souhaitable de fonctionnement pour le panneau.

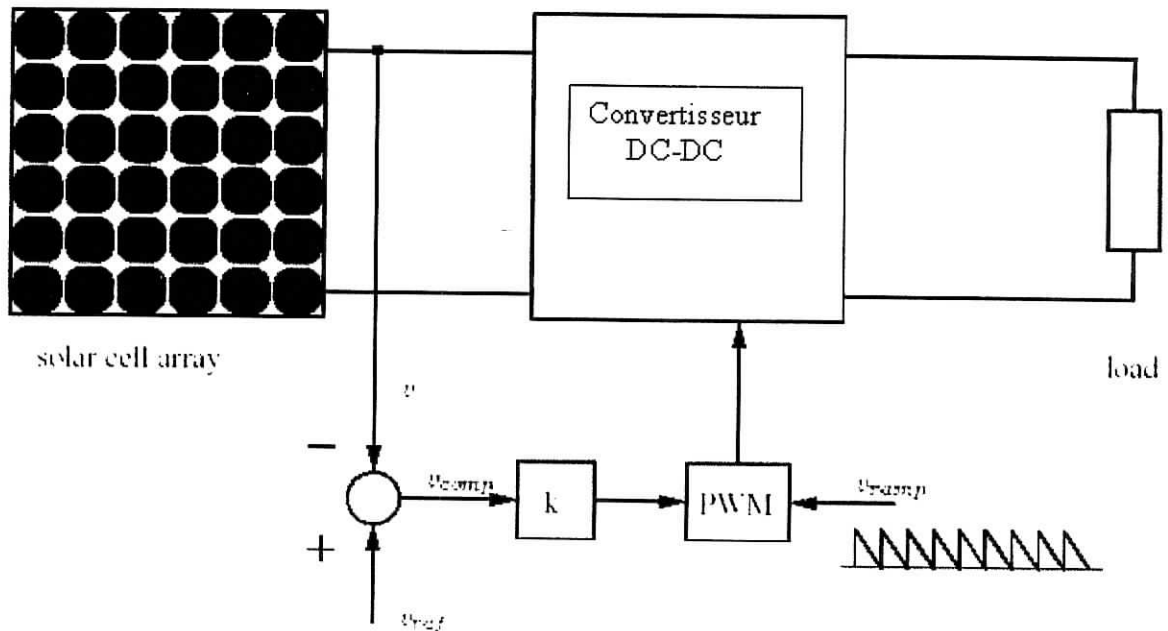


Figure 1: Voltage-feedback à modulation de largeur d'impulsion (PWM) avec Un convertisseur dc-dc.

Les inconvénients de cette méthode sont les mêmes que pour la méthode de simple charge discutée dans le paragraphe 1.1. Le système ne peut pas s'ajuster au gré des changements des conditions environnementales telles que l'insolation et la température il se réfère constamment à des repères du point maximum prédéfini . Il est donc non approprié pour des usages où on a des changements fréquents et aléatoires de ces paramètres (dans des systèmes mobiles ,voitures solaires par exemple) .

Comme la donnée sur la tension ne suffit pas on essaye d'approcher la valeur de la tension du panneau au point maximum d'alimentation électrique V_{mp} qui peut être considéré comme une fraction constante de la tension du panneau à circuit ouvert V_{oc} . Cette relation peut être employée pour obtenir des informations sur la position actuelle du MPP et sont utilisés dans les approche suivantes.

2.3.1.Mesure de V_{oc} au panneau [9]

Une version améliorée de la méthode de tension-contrôle par retour de l'information est employée .

La tension V_{oc} du circuit ouvert du panneau est mesurée par l'interruption du fonctionnement normal du système avec une certaine fréquence, et puis on ajuste la tension de sortie V à V_{ref} tension de référence qui est elle même ajustée sur une certaine fraction de la tension V_{oc} du circuit ouvert .

V_{ref} ou V_{mp} ont été expérimentalement déterminée pour être 76% de V_{oc} [3]. La tension de référence est comparée à la tension de fonctionnement du panneau V et le V_{comp} résultant de signal d'erreur est employé comme entrée dans la commande de PWM du convertisseur DC-DC.

Cette méthode permet la commande de la tension de fonctionnement du panneau photovoltaïque avec la considération des facteurs importants comme l'insolation et la température. Le vieillissement et l'accumulation de la poussière sur la surface de cellules sont aussi pris en considération.

Quand on fait l'ajustement de la tension de référence V_{ref} avec 76% de la tension V_{oc} du circuit ouvert on est sûr de commettre des erreurs car l'exactitude de cet l'ajustement de la tension d'opération à la tension de la puissance maximale V_{mp} d'alimentation électrique dépend du choix de cette fraction qui souvent est changeante.

L'interruption de l'exploitation du système régulière avec une certaine fréquence pour les besoins de mesure de V_{oc} occasionne des pertes qui sont estimées 0.05% de la puissance d'alimentation électrique maximum disponible.

Les pertes provoquées par l'inexactitude dans notre choix de cette fraction est estimé à 0.5% de la puissance d'alimentation électrique maximale disponible.

L'interruption fréquente du système mènera à une augmentation des bruits électriques.

Donc les composants des systèmes dans le convertisseur et le circuit de commande doivent être conçus pour pouvoir faire face aux interruptions régulières du courant.

2.3.2. Utilisation d'une cellule pilote [3]

Pour éviter les inconvénients dus aux interruptions fréquentes du système précédent , on utilise une cellule pilote. C'est une cellule photovoltaïque simple qui est électriquement

indépendante du reste de la rangée. Sa tension V_{oc} de circuit ouvert est constamment mesurée et fournit donc l'information implicite sur les conditions de fonctionnement. Comme avec la méthode discutée dans le paragraphe précédent V_{oc} de la cellule pilote est multipliée par un certain facteur constant pour avoir comme conséquence la tension de référence V_{ref} pour la boucle d'asservissement de contrôle par retour de l'information. Cette méthode évite les problèmes provoqués par le fonctionnement interrompu de la rangée photovoltaïque, mais permet toujours l'ajustement de la référence de commande de contrôle par retour de l'information.

Ceci bien sûr, tient compte des changements des facteurs importants tels que l'insolation et la température.

Il y a des inconvénients car l'utilisation d'une cellule pilote comme référence pour le comportement de la rangée n'est pas facile à mettre en application. La superficie qui est très limitée, l'emplacement de la cellule, font que la cellule pilote ne soit pas toujours fidèle à ce que est ressentie par le panneau.

Pour limiter cette inconvénient on place une cellule pilote individuelle pour chaque petit groupe de panneaux puis estimer le facteur pour le fonctionnement optimum .

2.4 .Les méthodes de poursuites du MPP par retour de l'information de puissance (power-feedback) :

Dans cette approche, il est nécessaire d'obtenir l'information au sujet de l'alimentation électrique réelle extraite à partir de la rangée photovoltaïque.

Ceci peut être fait par la mesure directement sur le panneau de la tension V et du courant de sortie I et puis la multiplication de ces deux paramètres pour obtenir la valeur réelle de la puissance fournie par le panneau solaire $P = V I$.

Ces valeurs ainsi obtenu, il existe diverses méthodes de poursuites du point de fonctionnement maximal (MPP) de la rangée.

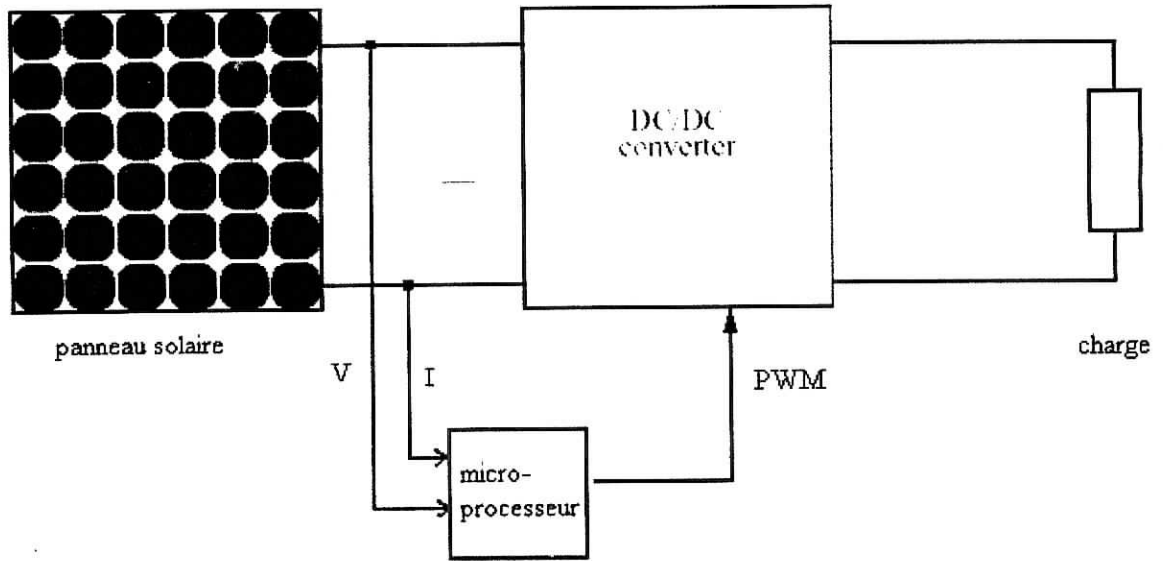


Figure2 : schéma de principe des méthodes de poursuites du MPP avec un microprocesseur

2.4.1. La méthode de perturbation et d'observation (P&o) : [3][7]

La méthode de P&o est une approche simple et largement répandue. Elle utilise un microprocesseur qui traite les valeurs de la tension V et du courant I du panneau et qui à partir de ces valeurs calcule la puissance.

Ceci permet au microprocesseur de commander directement le rapport cyclique variable d qui génère le signal de modulation de largeur d'impulsion (PWM) pour la commande du convertisseur DC/DC.

La méthode de perturbation et d'observation (P&o), génère la perturbation continue du système en augmentant ou en diminuant la tension d'opération du panneau et observe son impact sur le rendement de ce même panneau.

Le diagramme suivant explicite l'algorithme de cette méthode de perturbation et d'observation (P&o) qui est implémenté dans le microprocesseur.

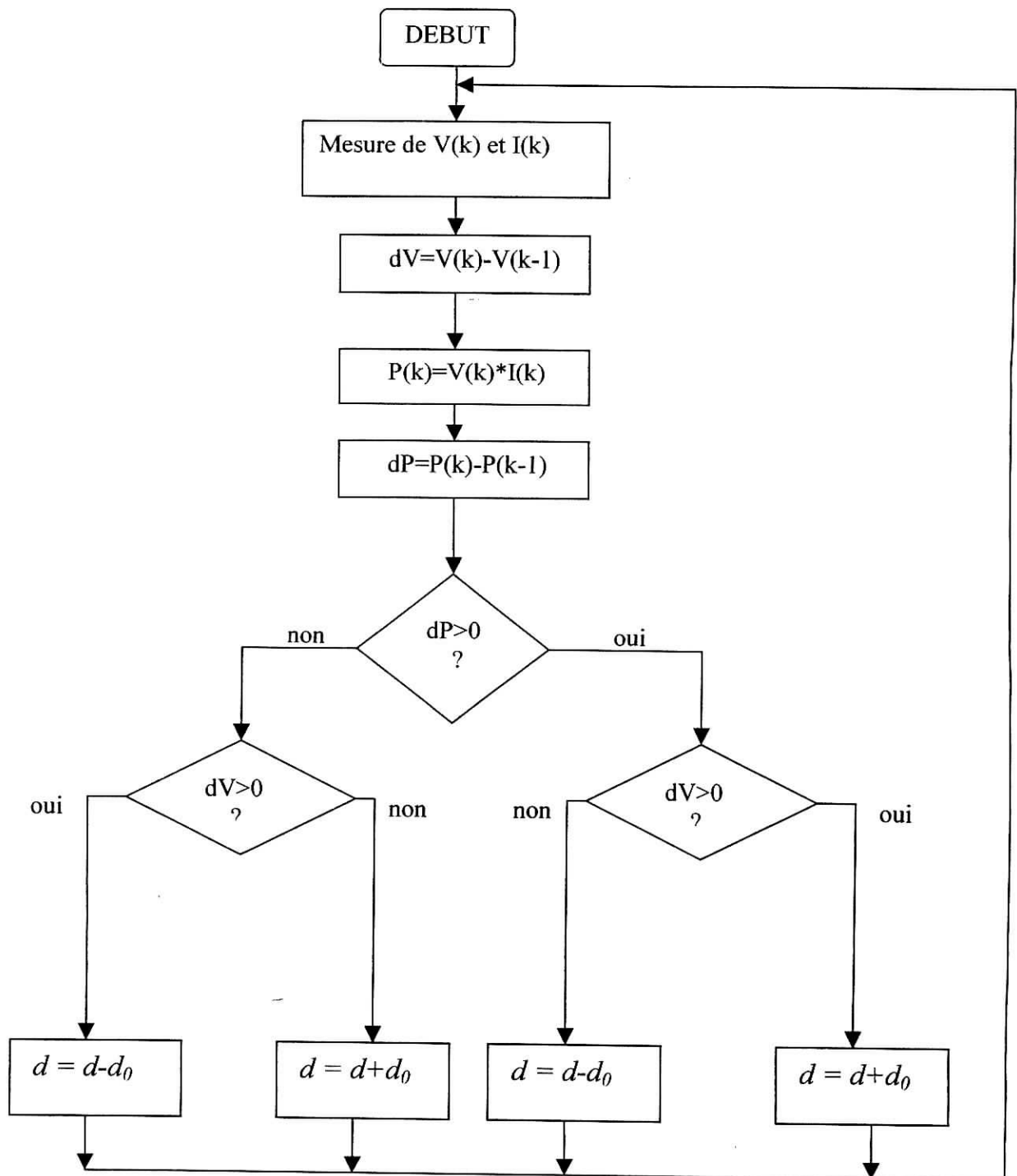


Figure 3: algorithme de la méthode de perturbation et d'observation P&O

Le fonctionnement de cet algorithme est comme suit :

d'abord la tension V et le courant I sont mesurés pour calculer la puissance $P(k)$. Cette valeur $P(k)$ est comparée à la valeur de la puissance obtenue durant la dernière mesure $P(k-1)$. Si la puissance fournie par le panneau a augmenté depuis la dernière mesure, l'incrémentement ou la desincrémentement du rapport cyclique d continuera dans le même sens que dans le dernier cycle et ceci est fait par le test sur dV .

Si $dV > 0$ cela veut dire qu'on a incrémenté V durant le dernier cycle c'est-à-dire $d = d + d_0$

Donc on fait la même chose.

Si $dV < 0$ cela veut dire qu'on a décrémenté V durant le dernier cycle c'est-à-dire $d = d - d_0$

Donc on fait la même chose

Si la puissance fournie par le panneau a diminué depuis la dernière mesure, l'incrémentement ou la desincrémentations de du rapport cyclique d sera en sens inverse par rapport au dernier cycle et ceci est fait aussi par le test sur dV .

Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V est perturbée avec chaque cycle. Dès que le MPP sera atteint, V oscillera autour du point de fonctionnement idéal i.e tension V_{mp} .

Ceci cause des pertes de puissances qui dépendent de la largeur du pas d'une simple perturbation d_0 .

Si la largeur du pas est grande, l'algorithme de MPPT répondra rapidement aux changements soudains et rapides des conditions de fonctionnement mais occasionnera des pertes dans des conditions changeantes lentement et dans les états stable.

Si la largeur du pas est très petite les pertes dans les états stables ou les conditions changeantes lentement seront réduites, mais le système aura une réponse lente aux changements rapides de la température ou d'insolation.

La valeur pour la largeur idéale du pas d_0 du système ne peut être déterminée qu'expérimentalement où par simulation est ainsi satisfaire un compromis entre la réponse rapide et perte de puissance dans les états stables.

La méthode de P&o paraît simple mais si on regarde bien on trouve que la recherche du point de fonctionnement maximal dans certaines conditions n'est pas très optimale .

Ainsi dans le cas d'une augmentation soudaine de l'insolation S l'algorithme de P&o réagit comme si l'augmentation s'est produite en raison de la perturbation précédente de la tension d'opération du panneau. Donc la prochaine perturbation, sera dans le même sens que la précédente même si ce n'est pas le bon.

En Supposant que le système oscille autour du point de fonctionnement maximum MPP, si une perturbation continue de l'insolation(augmentation par exemple) notre algorithme mènera le point de fonctionnement loin du MPP réel parce que dP étant toujours positif durant cette perturbation alors d subira toujours la même variations comme la figure 4 le montre.

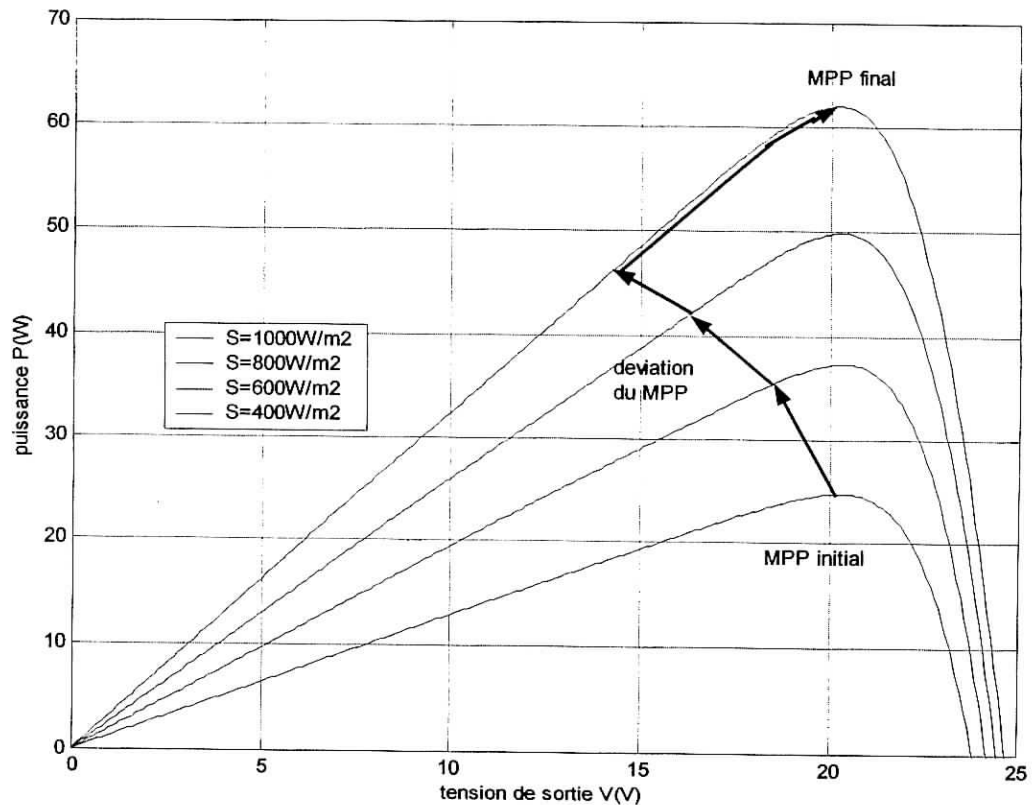


figure4 : Exemple d'une déviation du MPP avec l'algorithme de P&o sous une rapide augmentation de insolation S .

Ceci continue jusqu'à ce que l'augmentation de l'insolation ralentisse ou finisse.

La figure !!! nous montre un cas où on a une rapide augmentation de l'insolation de 400W/m² à 1000W/m² cause la déviation de la tension d'opération V du MPP V_{mp}

Les résultats expérimentaux de cet algorithme de P&o montrent un rendement de 81,5% c' est toujours une vaste amélioration comparée au rendement de environ 30% démontré pour les systèmes fonctionnant sans MPPT .

L'algorithme de cette méthode de perturbation et d'observation P&o peut être amélioré et une solution au problème de l'écart du MPP peut être faite .

Cela se fait en présentant un nouvel état à la branche (oui,non) de la condition $P(k) > 0$? de l'algorithme de P&o .

Cet état est une condition qui demande si la puissance a augmenté deux fois de suite pendant les deux derniers cycles ou si la direction de la perturbation a été la même pour les deux dernières étapes, si c'est le cas alors la direction de la perturbation du rapport cyclique est renversée.

Cette amélioration de la méthode de perturbation et d'observation est nécessaire que si les conditions de température et d'insolation sont très changeantes sinon la méthode classique est efficace et a déjà fait ses preuves.

2.4.2. La méthode d'incrémentation de la conductance (Incremental Conductance)

[4] [7]

Pour éviter les inconvénients de la méthode perturbation et observation P&o MPPT, l'algorithme d'incrémentation de la conductance MPPT (IncCond) a été développé.

Il est basé sur le fait que la dérivé de la puissance P par rapport à la tension V du panneau est égale à zéro au point de puissance maximale (MPP).

les caractéristiques de cette dérivé sont expliciter dans la figure 5 :

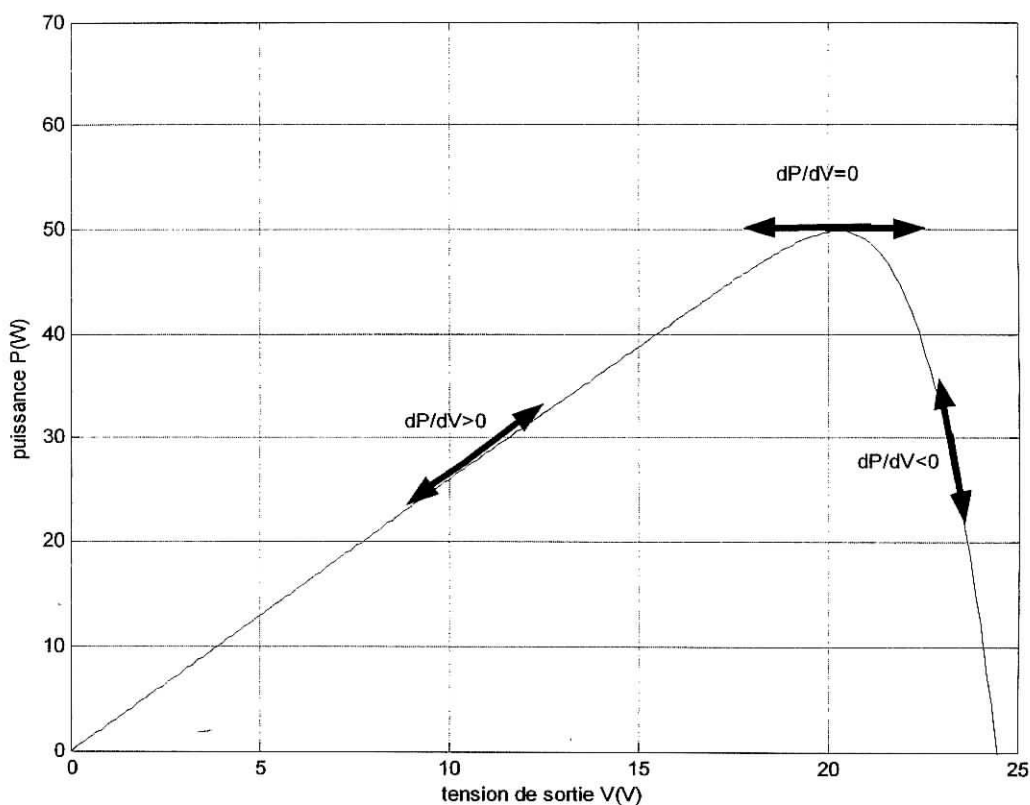


figure5 : Caractéristiques de la dérivé autour du point de puissance maximale(MPP).

Ceci donne les équations suivantes:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad \text{pour } V = V_{mp} \quad (3.1)$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \quad \text{pour } V < V_{mp} \quad (3.2)$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \quad \text{pour } V > V_{mp} \quad (3.3)$$

on a $P = VI$ alors on développe la dérivé dP/dV

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (3.4)$$

La combinaison des ces équations donne :

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad \text{pour } V = V_{mp} \quad (3.5)$$

$$\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad \text{pour } V < V_{mp} \quad (3.6)$$

$$\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad \text{pour } V > V_{mp} \quad (3.7)$$

$-\frac{I}{V}$: c'est la conductance

$\frac{dI}{dV}$: la conductance instantanée

Avec ces relations on pourrait développer l'algorithme d'incrément de la conductance et ceci est représenté sur le schéma suivant figure 6:

L'algorithme est mis en application en l'implémentant sur un microprocesseur qui contrôle directement le convertisseur DC-DC via le rapport cyclique d comme montré par la figure 2.

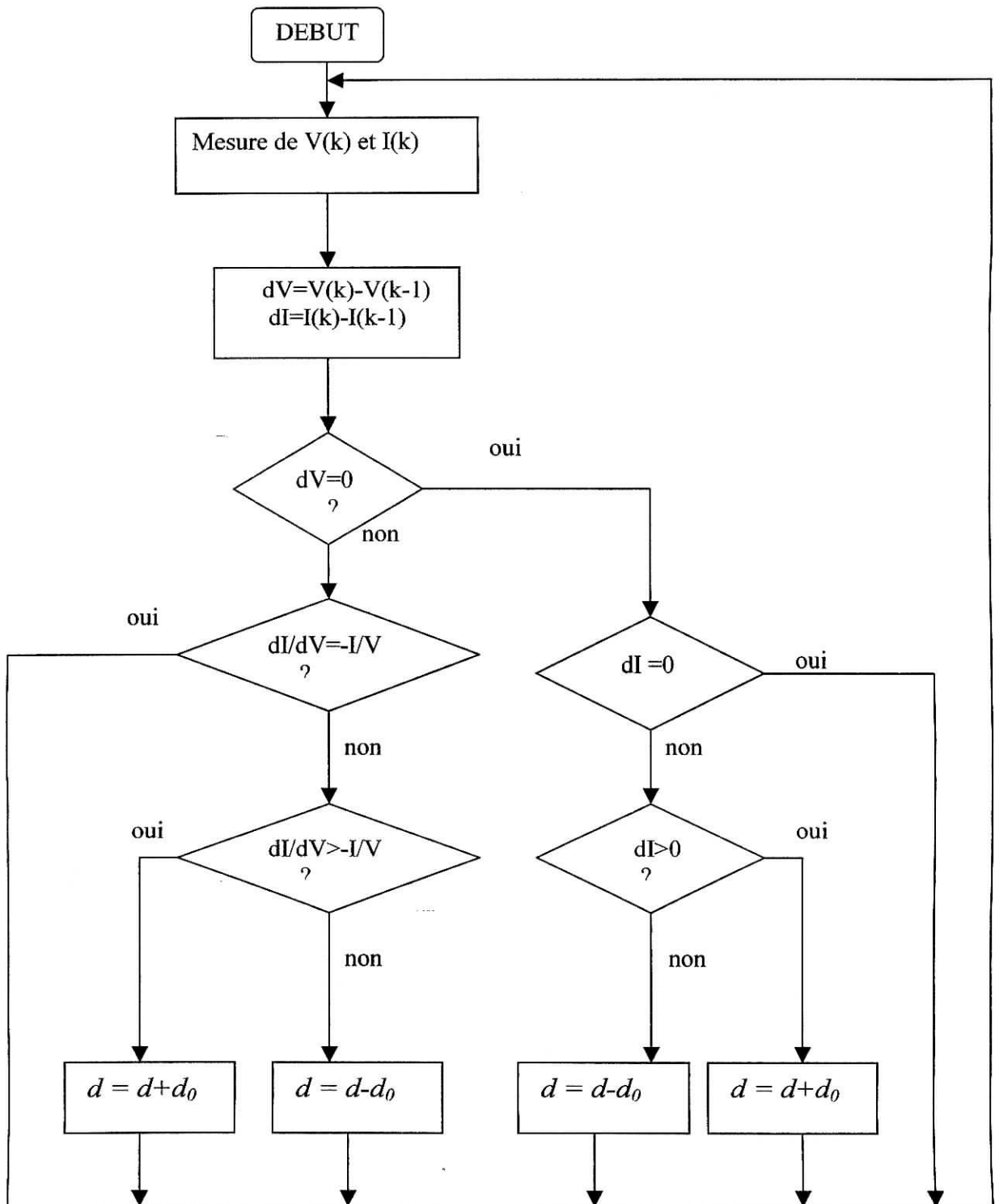


Figure 6: l'algorithme de la méthode d'incrément de la conductance

L'algorithme de la méthode d'incrémentation de la conductance nous permet de trouver le point de fonctionnement maximum et cela en mesurant V et I et en faisant l'approximation sur les dérivées dV et dI avec la différence entre les plus récentes valeurs mesurées de V et I et celles mesurées dans le cycle précédent:

$$dV(k) \approx V(k) - V(k-1) \quad (3.8)$$

$$dI(k) \approx I(k) - I(k-1) \quad (3.9)$$

si on est dans le cas où on a atteint le point de fonctionnement maximum donc $\frac{dP}{dV} = 0$

alors $\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$ pour $V = V_{mp}$ l'algorithme prend ça en considération et ne change pas le paramètre d donc rien ne change.

Dans le cas où le système fonctionnait au MPP pendant le cycle précédent, la dérivée de la tension de fonctionnement sera zéro ($dV(k) = 0$). Ceci mènerait à une division par zéro.

Pour éviter un arrêt du système, cette condition est testée en premier et si c'est vrai une autre branche dans l'algorithme teste les possibles changements des conditions de fonctionnement du panneau (dI). Puisque la tension n'a pas changé, les seules informations utiles sur les changements possibles peuvent être obtenues du courant I .

S'il est stable, $dI=0$, alors aucun changement du rapport cyclique n'est effectué parce qu'il est au point de fonctionnement maximum.

S'il y a accroissement de dI alors on tombe dans le cas semblable à $\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$ donc $V < V_{mp}$ alors le rapport cyclique $d = d + d0$.

Si il y a diminution de dI c'est le cas $\frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V}$ alors $V > V_{mp}$ donc $d = d - d0$.

Et bien sûr si $\frac{dP}{dV} \neq 0$ on utilisera le test $\frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V}$ employé pour déterminer si le système fonctionne au-dessus ou au-dessous de V_{mp} et l'ajustement du rapport cyclique d comme dans le précédent paragraphe.

Un des avantages de cet algorithme MPPT est qu'il n'oscille pas autour du MPP mais il se fixe et s'arrête à ce point. Les conditions de tests de $\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$ et de $dI = 0$ lui permet d'éviter l'étape de perturbation et de maintenir donc une tension de fonctionnement V constante une fois le MPP trouvé.

La réaction de ce système est assez rapide et correcte aux conditions de fonctionnement qui changent assez rapidement et devrait avoir un haut rendement .

Le problème mentionné précédemment sur l'écart du MPP pour des variations croissantes et rapides de l'insolation dans les systèmes commandés par la méthode de perturbation et d'observation P&o est surmonté avec la méthode d'Incrémentation de la Conductance. Des études et autres résultats expérimentaux ont montré que pour la méthode d'Incrémentation de la conductance le rendement maximum théorique est de 89,9 % contre, pour les mêmes expérimentations avec l'algorithme de perturbation et d'observation P&o est de 81,5% .

Cette méthode d'Incrémentation de la conductance n'est pas pour autant irréprochable mais elle est sujette à des améliorations pour l'adapter aux conditions réelles.

Les expériences montrèrent que l'état du point maximum $\frac{dP}{dV} = 0$ (qui est équivalent à $dI/dV = -I/V$) ne se produit que rarement . Ceci a comme conséquence des oscillations autour du MPP même sous des conditions environnemental assez stable .

Cette instabilité est principalement provoquée par les approximations faites pour dV et dI avec les équations $dV(k) \approx V(k) - V(k-1)$ et $dI(k) \approx I(k) - I(k-1)$.

2.4.3. La méthode d'incrémentation de la conductance amélioré [3] [4]

L'amélioration de méthode précédente propose une solution à ce problème serait d'ajouter une petite erreur marginale ε à l'état maximum de puissance $\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$ tel qu'on assume que le MPP est trouvé si la condition $\left| \frac{dI}{dV} + \frac{I}{V} \right| \leq \varepsilon$ est vérifiée et pour le maintien de cette stabilité la condition sur le courant lorsque le MPP est atteint $dI = 0$ est approximée et devient $\left| dI \right| \leq \frac{\varepsilon}{10}$.

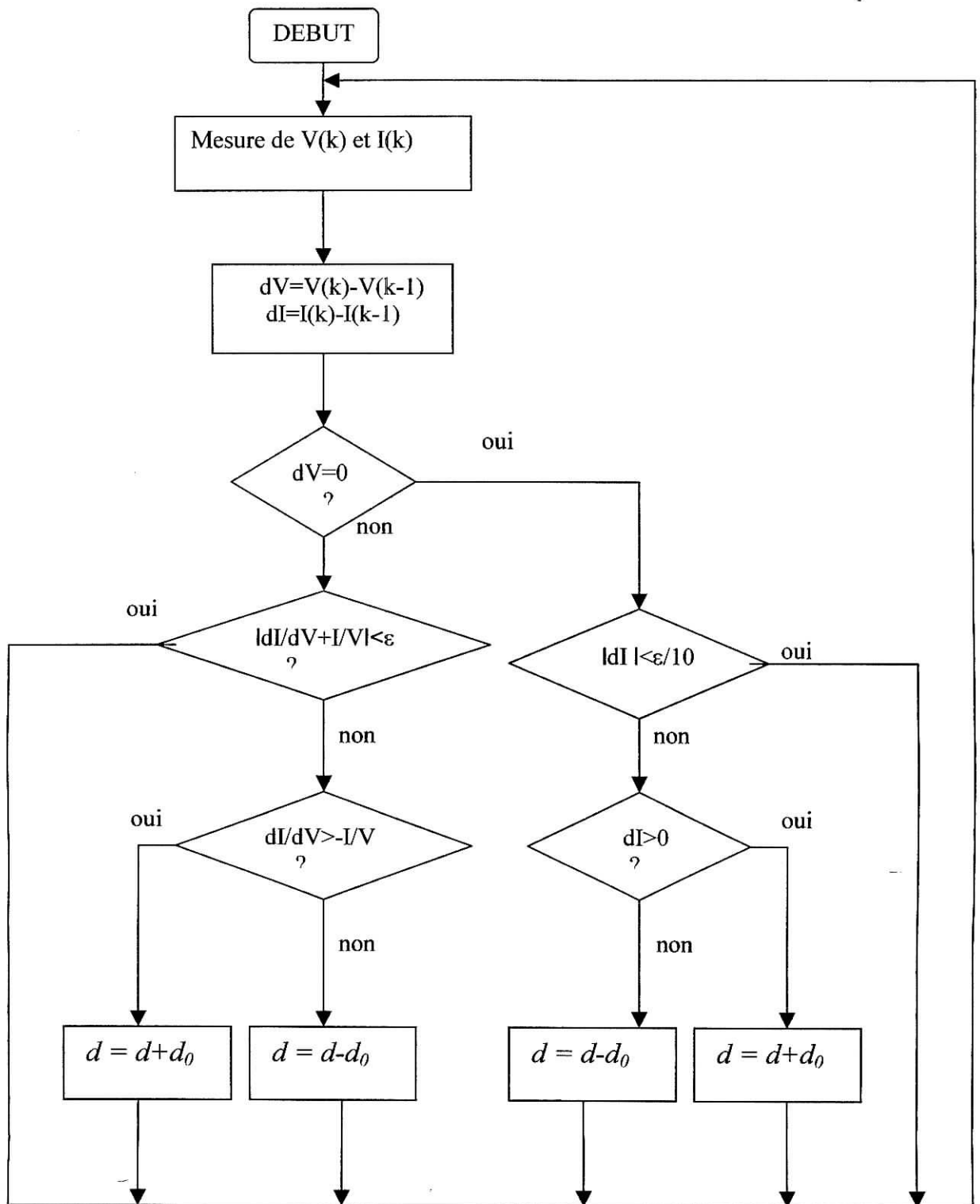


Figure 7: l'algorithme de la méthode améliorée d'incrément de la conductance

ceci nous permettra d'avoir un contrôle sur la sensibilité de cette algorithmme en plus du contrôle du pas du rapport cyclique d_0 .

La valeur ϵ devra être déterminée en faisant un compromis entre le besoin de travailler exactement au point de puissance maximale MPP et à la possibilité d'une oscillation autour de lui. Il dépendra également de la largeur choisie de pas de perturbation d_0 .

A priori la méthode d'Incrémentation de la conductance semble être théoriquement la plus intéressante et nous l'avons choisie pour l'étudier avec plus de détails en faisant d'abord une simulation de son algorithme dans un système photovoltaïque complet sur *MATLAB Simulink* puis après analyse des résultats directement une implémentation sur un microcontrôleur type PIC16F876.

2.4.4.La méthode de poursuite MPPT analogique[3]

Les deux méthodes précédemment discutées toutes les deux utilisent des microprocesseurs pour poursuivre le point de fonctionnement maximum MPP.

Les valeurs pour la tension V et le courant de sortie I sont digitalisées et alors analysées par un algorithme pour décider d'une commande appropriée.

Les systèmes analogiques emploient la tension et le courant des cellules photovoltaïques directement pour commander le point de fonctionnement du panneau. Le courant est capté par une résistance shunt dans le chemin courant. La tension V_{sense} résultante de chute de tension est proportionnelle à la valeur du courant.

La tension V_{sense} est multipliée avec tension V de panneau par un multiplieur qui produit un signal proportionnel à la puissance électrique P .

Un circuit dérivateur calcule alors la dérivé dP/dt puis un comparateur est utilisé.

Si la puissance est croissante donc la pente est positive à la sortie on aura **1**.

Si la puissance est décroissante donc la pente est négative à la sortie on aura **-1**.

Ensuite la bascule se chargera via un integrateur d'incrémenter ou de décrémenter le V_{comp} pour former le signal de commande de PWM du convertisseur DC/DC comme représenté sur les deux figures suivantes

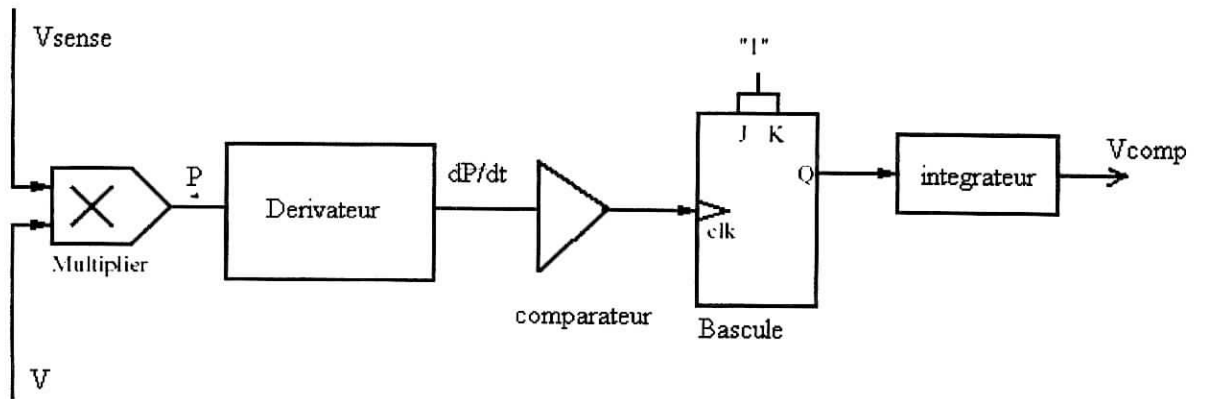


figure8 : Mécanisme analogique de la poursuite du point de puissance maximale

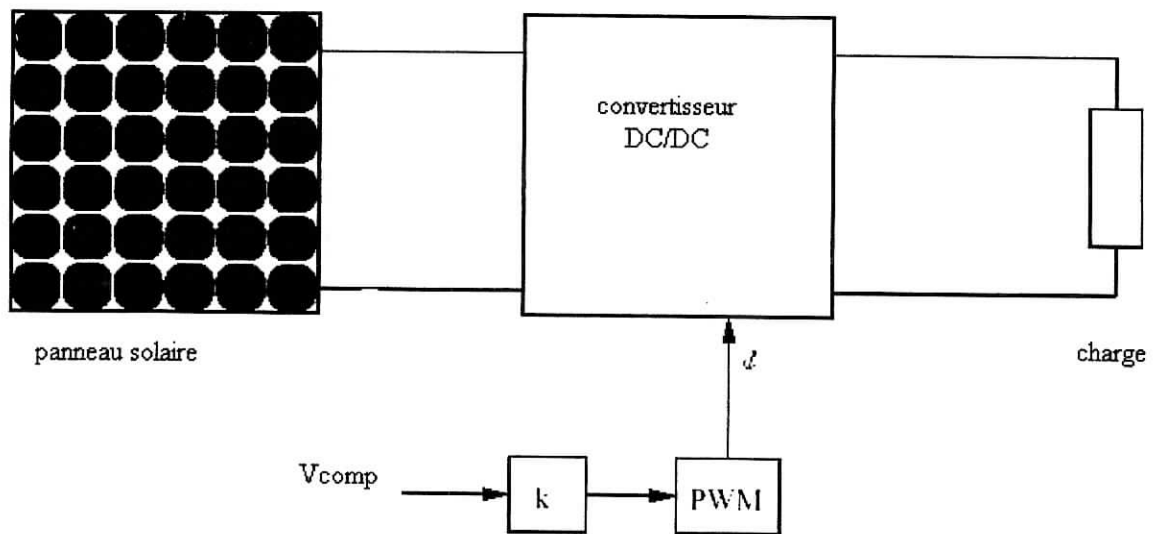


figure9 : Modulation de la largeur d'impulsion PWM par Vcomp

Cette approche analogique des MPPT est semblable à la méthode de perturbation et d'observation (P&o) simple discutée dans la section (1.4.1.) La puissance du panneau est perturbée en changeant le ratio de conversion d du convertisseur DC/DC.

Pour décider de la direction de la perturbation on regarde si la valeur dP du panneau a augmentée ou diminuée.

Si la puissance augmente, la perturbation continue dans une direction jusqu'à ce qu'une diminution soit détectée. La perturbation est alors renversée et continue dans la direction opposée jusqu'à l'inversion du signe de dP .

Quand on dépasse le point de fonctionnement idéal (MPP) la tension V_{mp} est dépassée et la puissance diminue dP/dt devient négative. Ceci cause un changement d'état pour la bascule et donc la perturbation est inversée et le point de fonctionnement MPP sera encore atteint. Il en résulte une oscillation constante autour du MPP.

Cette similitude à la méthode de P&O vient avec presque les mêmes inconvénient : dans le cas où on a une croissance rapide de l'insolation, le mécanisme de cheminement est incapable de détecter si l'augmentation d'alimentation électrique est provoquée par la perturbation du fonctionnement ou par l'augmentation de l'insolation sur les cellules photovoltaïques.

Ceci peut causer une déviation du MPP comme représenté sur le schéma 4.1. Les inconvénients principaux de cette technique analogique de MPPT sont essentiellement les changements rapides de l'insolation et les bruits et parasites dans le signal qui peut faire changer d'état de la bascule car le système ne peut pas corriger cette erreur.

L'état faux de la bascule forcera le point de fonctionnement à se diriger loin du MPP, celui-ci continuera à dériver dans la direction fautive jusqu'à ce que le système s'arrête. Pour empêcher le système d'être arrêté on peut éventuellement imaginer une condition de panne sur le courant de sortie du panneau et forcer la bascule à changer son état dès que le courant tombe au-dessous d'une limite prédéterminée. L'inconvénient de cette solution est la limitation de la plage de fonctionnement du panneau aux valeurs courantes au-dessus de cette limite.

Même si le rendement de cette méthode n'est pas très élevé, mais c'est mieux que de travailler sans mécanisme de poursuite du MPP.

2.4.5.Oscillation forcée [3]

Dans toutes les méthodes de MPPT discutées jusqu'ici, une dérivé d'un des paramètres du panneau solaire a été employée de diverses manières de façon à déterminer l'endroit relatif du MPP.

L'ajustement approprié de la tension de fonctionnement nous a mené par la suite à une oscillation étroite autour du MPP. Ces oscillations étaient automatiquement produites par la commande utilisée de contrôle par retour de l'information.

Une nouvelle méthode avec une oscillation obligatoire du point de fonctionnement est apparue dont le principe est d'ajoutée à la tension de fonctionnement du panneau une petite ondulation de 100 Hertz. Ceci a comme conséquence une ondulation de la puissance dont la phase et l'amplitude dépendent de la position du point de fonctionnement relativement au MPP.

La figure 10 montre comment une ondulation ou modulation de la tension V du panneau cause une ondulation de la puissance.

Si cette modulation se produit dans le secteur au-dessous du MPP noté (A), la tension et l'ondulation de la puissance seront parfaitement en phase.

Si la modulation se produit à un point d'opération dans le secteur au-dessus du MPP noté (B), l'ondulation de la puissance sera déphasé de 180 degrés .

Dans le cas spécial ou le point de fonctionnement est exactement au MPP, l'ondulation de la puissance aura deux fois la fréquence de l'ondulation de tension et une faible amplitude.

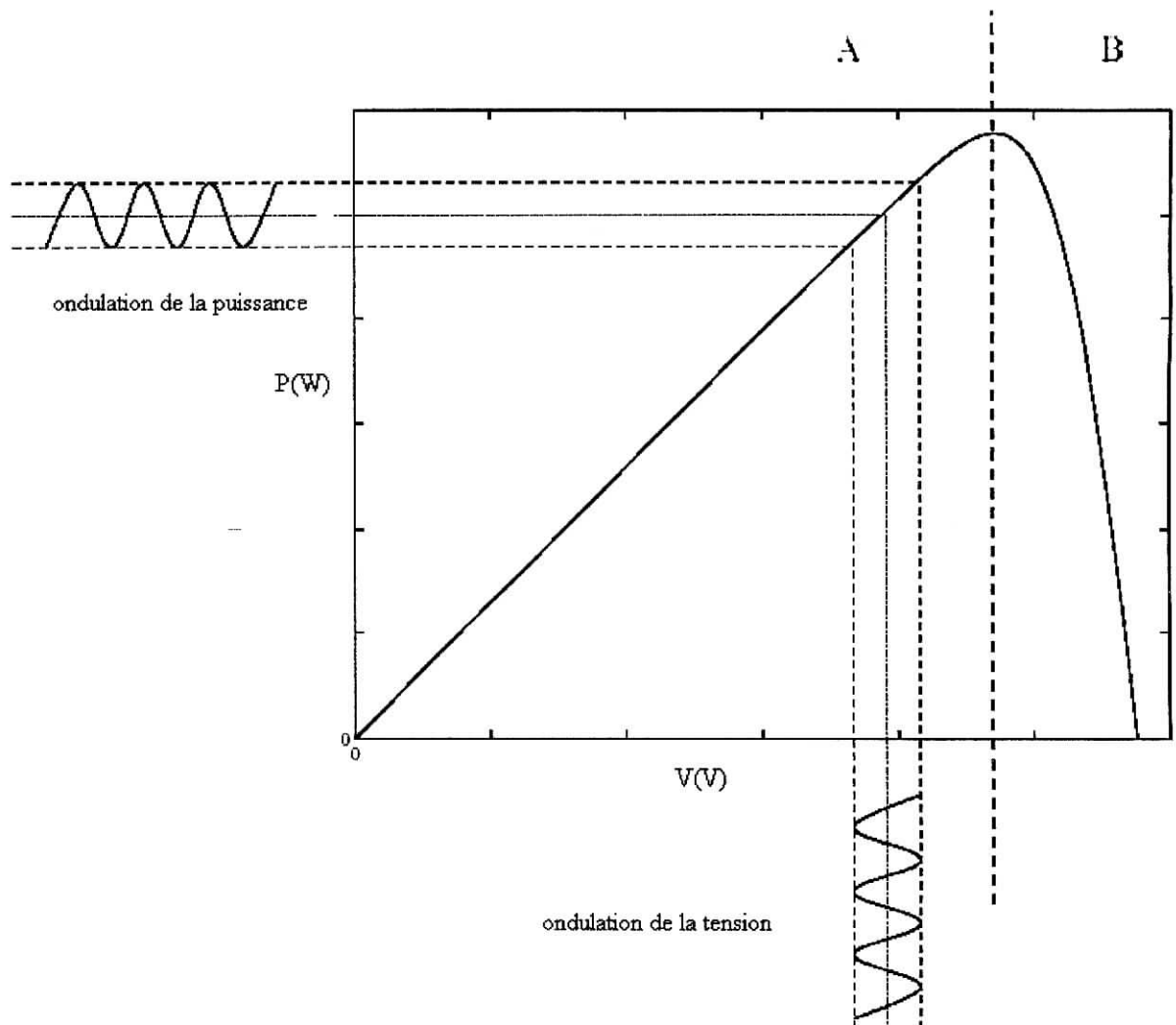


figure10 : l'effet d'une ondulation de la tension sur la puissance (cas ou $V < V_{mp}$)

Un détecteur synchrone est mis à la sortie du signal proportionnel à la puissance comme pour le méthode analogique qui est lui même synchronisé par l'ondulation de tension alimentation V .

Ce détecteur analyse la phase et l'amplitude du signal et produit un signale d'erreur proportionnel à la distance entre le point de fonctionnement et le point maximum MPP. Le signal d'erreur agit sur la commande du PWM qui agit sur le convertisseur DC/DC.

L'avantage de cette méthode est que l'analyse de phase et d'amplitude fournit les informations sur l'endroit du MPP. Le signal du détecteur synchrone converge lentement vers zéro tant que le point de fonctionnement approche le MPP. Il n'y aura aucune oscillation autour du MPP causée par la largeur du pas du MPPT comme pour les méthodes déjà étudiées. La seule oscillation qui se produit avec cette méthode est la modulation de 100Hz de la tension de fonctionnement.

L'inconvénient de cette méthode est la difficulté à évaluer les signaux de faible amplitudes et les bruits dus aux commutations. Ce bruit peut être éliminé en employant un filtre passe-bas, mais ceci aboutira à d'autres pertes dans l'amplitude du signal. Quand le point de fonctionnement approche le MPP, l'amplitude du signal diminuera et on aura des difficultés avec le détecteur synchrone pour maintenir un signal de sortie stable.

Si on augmente l'amplitude du signal de modulation pour améliorer le rapport signal sur bruit, ceci mènera également à des oscillations plus élevées au MPP et augmentera donc pertes en puissance.

3. Conclusion

On a vu plusieurs méthodes de poursuites MPPT chacune avec ses avantages et ses inconvénients, le choix doit se faire en sachant pour quelles applications elles est destinée mais nous pouvons dire pour une application où l'on veut avoir le meilleur rendement (exemple : véhicule solaire, domaine spatial) on devra choisir l'une des deux méthodes d'incrément de la conductance ou perturbation et d'observation (P&O)

Chapitre 4

Simulation de la méthode Incrémentation de la Conductance

Simulation de la méthode Incrémentation de la Conductance

1.Introduction

Les logiciels de simulations sont des outils puissants pour tester et évaluer l'exécution théorique des systèmes. Les conditions d'exécution du dispositif à tester peuvent être facilement contrôlable .

La simulation nous permet de passer de la conception du système théorique à la réalisation pratique avec plus d'assurance car les changements lors de la conception peuvent être faits facilement dans un système simulé, ceci nous permet d'expérimenter un ensemble large de variations et de choisir enfin la solution optimale.

Pour simuler les méthodes numériques de MPPT (Incrémentation de la Conductance simple et améliorée) on utilise le logiciel de *MathWorks Matlab* qui inclut l'outil de simulation *Simulink*.

Simulink tient compte de la division d'un système simulé en un certain nombre de sous-ensembles. Ces sous-ensembles peuvent être modélisés et examinés individuellement et interconnecté plus tard. Ceci permet d'établir des sous-ensembles physiques comme le panneau solaire, les batteries, le convertisseur DC/DC, et l'algorithme MPPT choisi.

2.Schéma global de la simulation[3][8]

Ce schéma global est constitué de plusieurs sous-systèmes coordonnés entre eux et le sens des flèches contenant les variable nous aide à mieux comprendre le fonctionnement du système et à savoir qui contrôle qui.

Par exemple la tension V du panneau solaire est une variable fixée par le rapport cyclique du hacheur donc V est sortante du convertisseur DC/DC et est entrante dans le panneau solaire. Donc ce schéma obéit aux équations de chaque sous systèmes que nous avons vue précédemment mais pas au circuit électrique réel.

Nous verrons un peut plus en détail chaque sous-système et les équations utilisées.

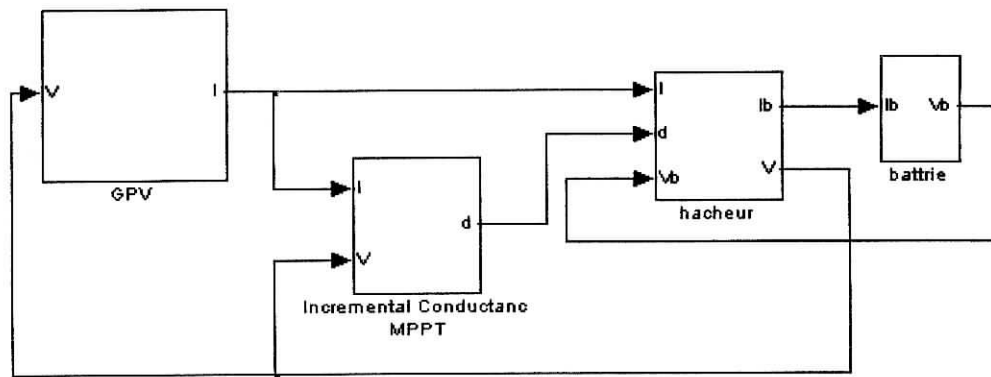


figure1 : Schéma global de la simulation de la méthode Incrémentation de la Conductance

2.1.Le Générateur photovoltaïque

Nous avons utilisé les équations du paragraphe(4.1) relatives aux panneaux solaires série (chapitre1).

$$I = I_{ph} - I_{s1} [e^{\frac{q(V+IzRs)}{z n1kT}} - 1] - I_{s2} [e^{\frac{q(V+IzRs)}{z n2kT}} - 1] - \frac{V+IzRs}{zRp}$$

où $I_{ph} = I_{ph} /_{(T=298)} \cdot [1 + (T - 298) \cdot 5 \cdot 10^{-4}]$

$I_{ph} /_{(T=298)} = 3.25A$

avec $I_{s1} = K_1 T^3 e^{-\frac{Eg}{kT}}$ et $I_{s2} = K_2 T^{5/2} e^{-\frac{Eg}{kT}}$

$K_1 = 1.2 A/cm^2 K^3$

$K_2 = 2,9 \cdot 10^5 A/cm^2 K^{5/3}$

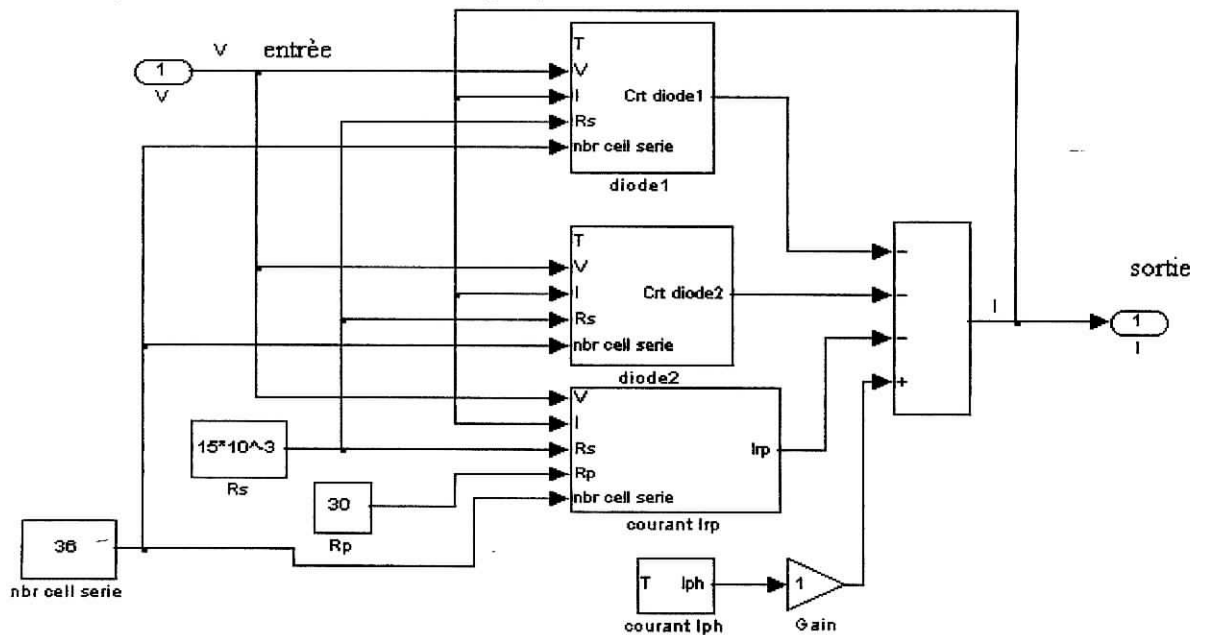


figure 2 :schéma bloc de la simulation du panneau solaire avec 36 cellules sous $1000W/m^2$

2.2 Le convertisseur DC/DC

Nous avons utilisé les équations (33,34,35)du paragraphe(2.1.2 chapitre2) relatives au hacheur dévolteur .

$$I_b = i_l - C_2 \frac{dv_b}{dt} \quad \text{correspond au sous bloc 1}$$

$$i_l = \frac{1}{D} (i - C_1 \frac{dv_i}{dt}) \quad \text{correspond au sous bloc 2}$$

$$v = \frac{1}{D} (v_b - L \frac{di_l}{dt}) \quad \text{correspond au sous bloc 3}$$

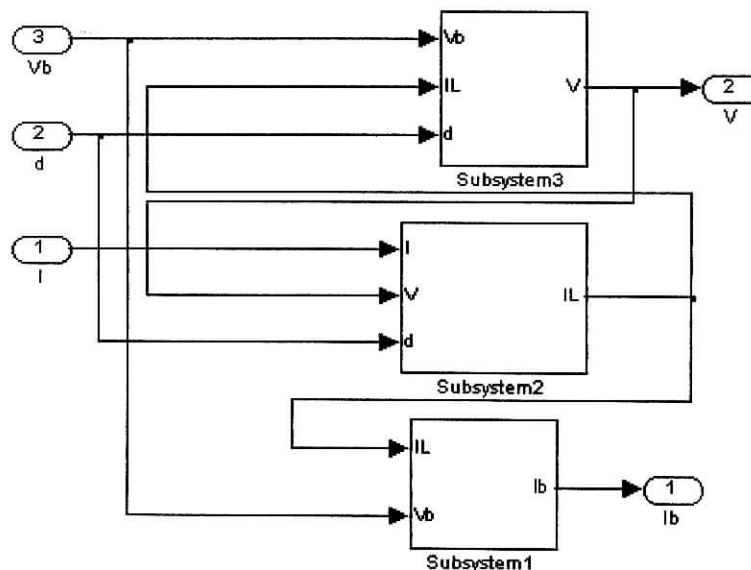


figure3 :schéma bloc de la simulation du hacheur dévolteur

pour les autres types les équations correspondantes sont exploitées de la même manière.

2.3.La batterie (12V)

Pour la simulation de la batterie 12V à l'acide on pouvait la fixée comme constante quelque soit le courant I_b , mais par volonté d'approcher son fonctionnement réel sans disposer pour autant de son vrai model mathématique on à décider de lui faire de petites variations autour de sa valeur 12V qui dépendent linéairement de la valeur du courant I_b .

2.4. Le microcontrôleur utilisant la méthode MPPT d'Incrémentation de la Conductance (simple et améliorée)

Nous avons tout simplement essayé de traduire l'algorithme de chaque méthode en une suite de portes logiques et de comparateurs utilisant aussi des mémoires pour avoir des retards de signal.

Le schéma suivant montre globalement la procédure suivie, et c'est le sous bloc qui différencie les deux méthodes. Le microcontrôleur génère directement le rapport cyclique d avec un ajustement $\Delta d = 0.005$ ce résultat a été trouvé par la simulation pour avoir un compromis entre une poursuite du point Max rapide et une bonne efficacité. Donc ce Δd peut être aussi modifié au cours de la réalisation pratique.

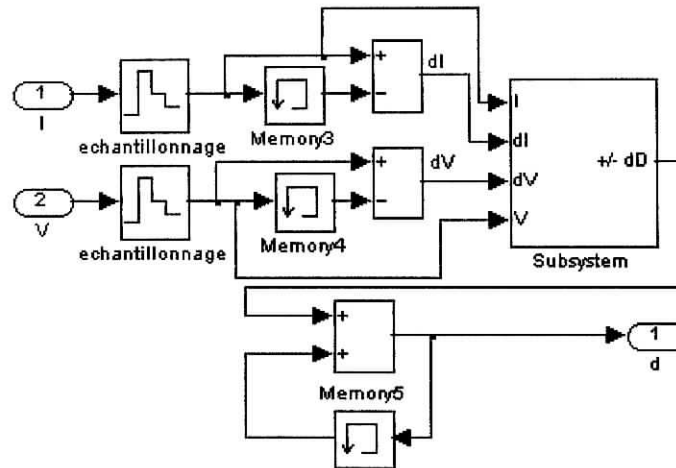


figure4 : schéma bloc de la simulation du microcontrôleur utilisant l'algorithme MPPT d'Incrémentation de la Conductance

3. Simulation du système photovoltaïque utilisant l'algorithme MPPT d'Incrémentation de la Conductance

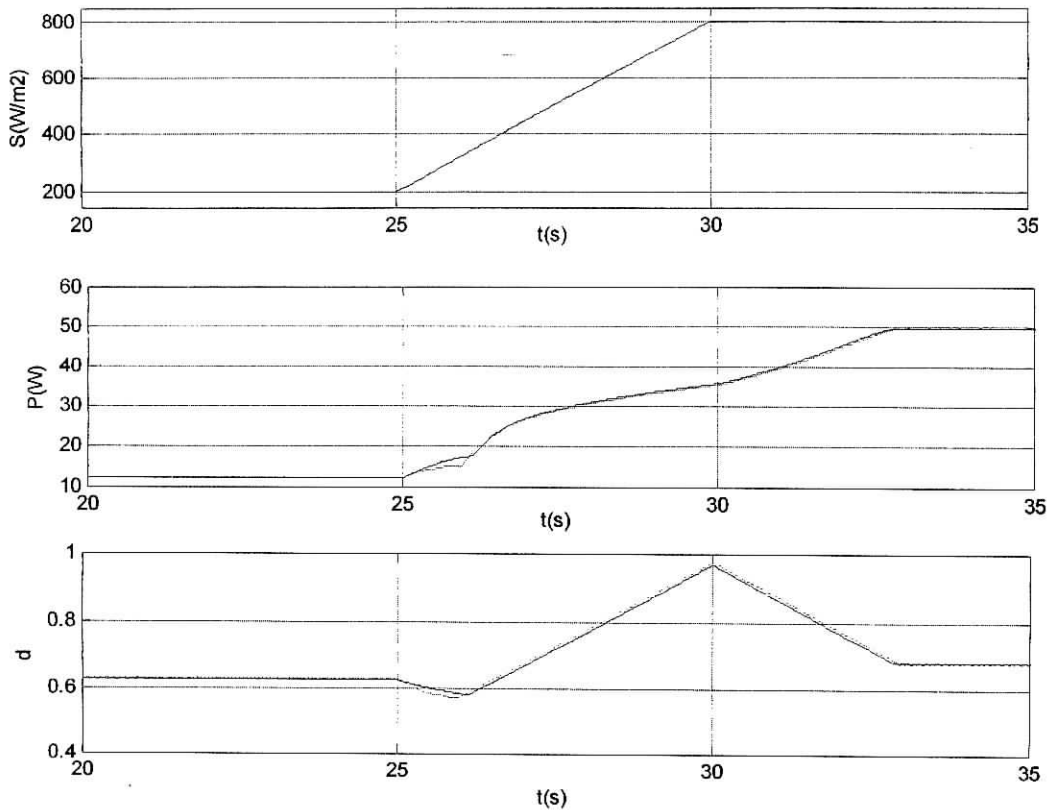
La simulation de ces méthodes MPPT est faite avec un échantillonnage de 100hz ce qui est suffisant bien que le microcontrôleur qu'on utilisera en pratique a une fréquence de 20Mhz donc nous permettra si on veut, d'aller à quelques kHz .

Les panneaux utilisés sont à 36 cellules et on utilisera le hacheur dévolteur traité précédemment. Nous essayerons de voir le comportement de ces méthodes sous différentes perturbations d'insolations et de températures.

3.1.Comportement de la méthode face à un changement de l'insolation

3.1.1changement rapide de l'insolation

On a simulé un brusque changement de l'insolation de 200W/m² à 800W/m² pendant un temps très court de 5secondes ce qui est en pratique rare sauf pour les véhicules solaires lors de leur sortie d'un tunnel ou il fait sombre à l'intérieur



..... *InCond améliorée*
 *InCond simple*

figure 5 :comportement de P lors d'un rapide augmentation de l'insolation S avec un $\Delta d=0.001$

On remarque que les deux méthodes on pratiquement les mêmes comportements ceci s'explique comme nous l'avons précisé dans le chapitre 3 que la méthode améliorée diffère de la méthode simple que par le fait qu'en état stable elle ne tourne pas autour du point de fonctionnement maximum mais se fixe à ce point ou tout près de lui ,dans les simulations qui suivent nous utiliserons que la méthode améliorée.

Nous remarquons aussi que nous avons une perte de puissance c.a.d que le système tarde à se fixer sur le point maximum et perd ainsi 2.5 seconds pour arriver à exploiter la puissance maximale, ce qui n'est négligeable. Ceci est dû au mauvais choix de Δd car sa valeur 0.01 est trop petite et le système a du mal à poursuivre le point max qui change rapidement, pour éviter cela nous avons choisi une autre valeur pour Δd qui est $\Delta d=0.005$.

Cette valeur n'a pas été choisie au hasard mais après de nombreux essais dont le but était de faire un compromis entre une poursuite efficace pour changements rapides de l'insolation et même de température et une bonne efficacité pour les états stables ou les changements lents. Si Δd était choisi trop grand on approchera que très rarement le point de fonctionnement maximal.

La figure suivante nous montre comment la poursuite est faite avec un $\Delta d=0.005$

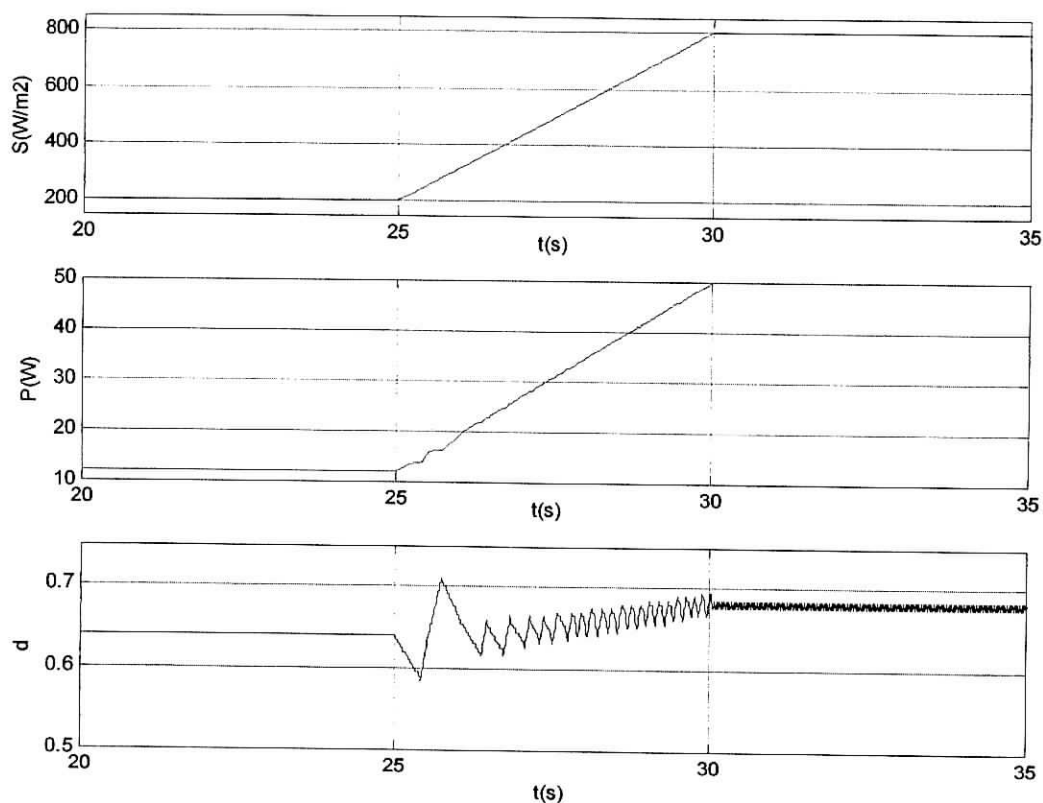


figure6 :comportement de P lors d'un rapide augmentation de l'insolation S avec un $\Delta d=0.005$

Avec un $\Delta d=0.005$ la poursuite donne de très bons résultats reste à savoir son comportement sous un changement lent ,c'est ce que nous verrons dans le point suivant.

3.1.2.Comportement de la méthode à un changement lent de l'insolation S

La figure suivante nous confirme que ce choix de $\Delta d=0.005$ n'est pas mauvais , mais il faut juste se rappeler que ceci est bon que si on garde les paramètres de départs à savoir une fréquence d'échantillonnage de 100Hz et un erreur $\epsilon=0.1$

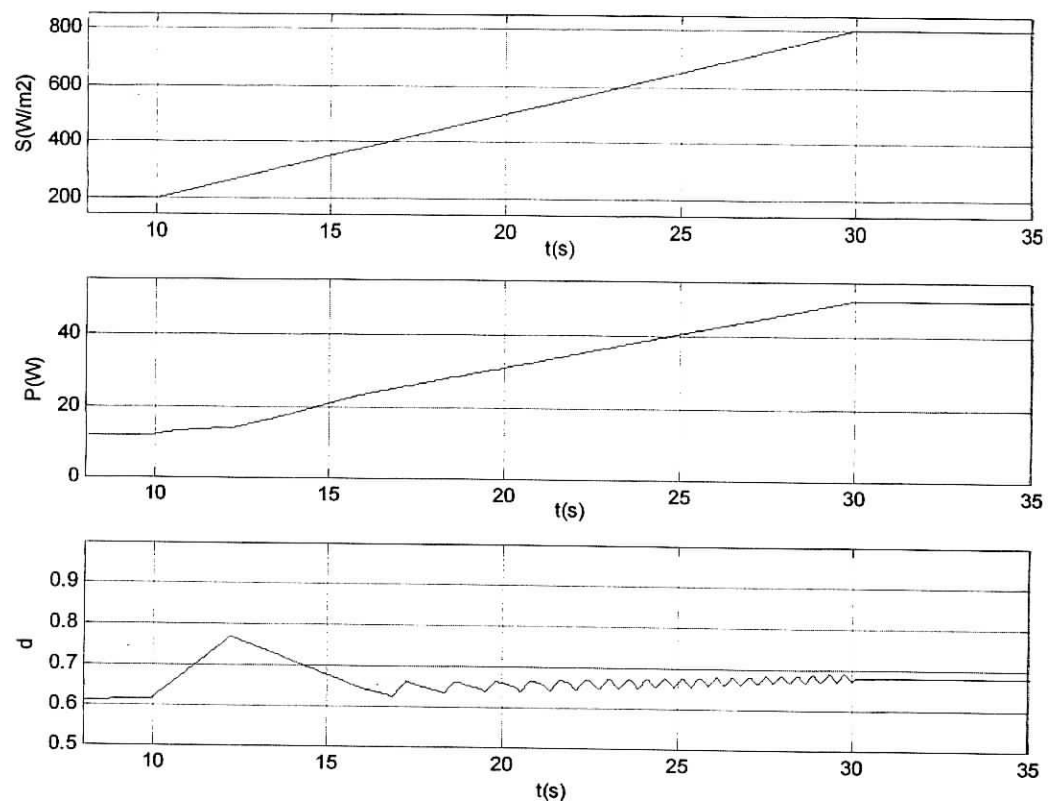


figure7 :comportement de P lors d'un lente augmentation de l'insolation S avec un $\Delta d=0.005$

La figure nous montre bien que la poursuite est bonne et que pour l'état stable d reste fixe et le point de fonctionnement maximal est atteint ou on est vraiment très proche de ce dernier.

Nous avons aussi simulé une décrémentation rapide de l'insolation pour prouver que cette méthode n'est pas sensible au signe de la pente comme pour la méthode de perturbation et d'observation.

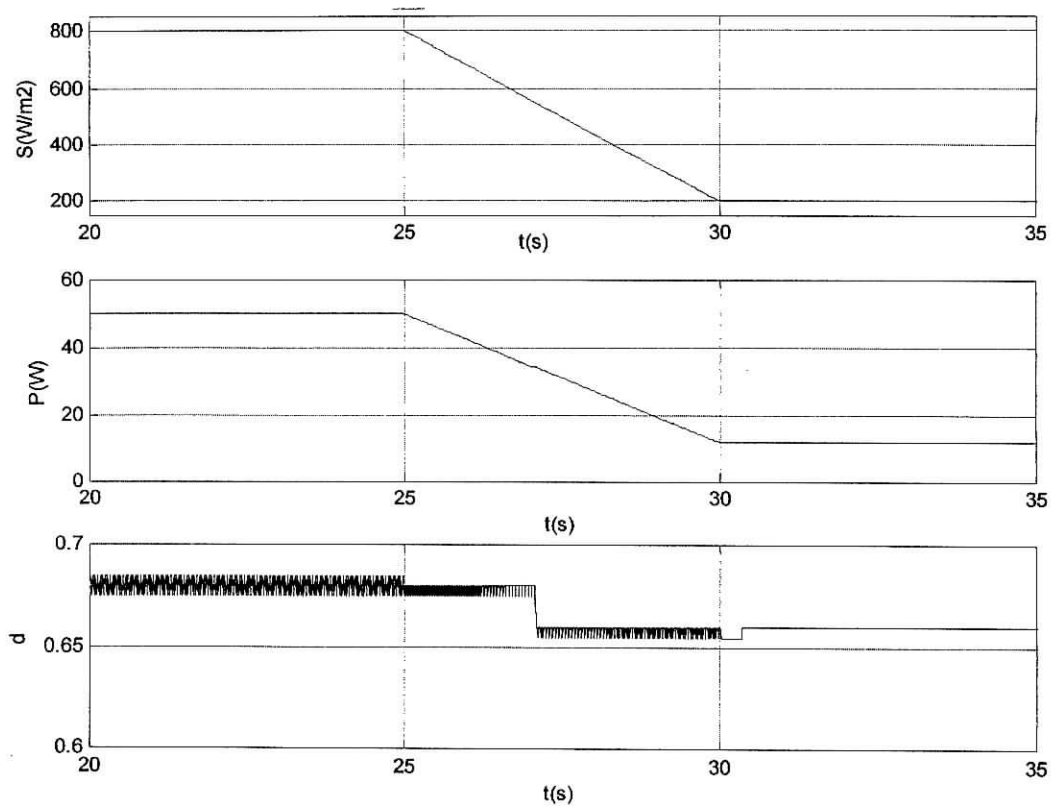


figure8 :comportement de P lors d'une diminution rapide de l'insolation S avec un $\Delta d=0.005$

La figure 9 montre les valeurs du courant et de la tension pendant cette rapide diminution de l'insolation ,on peut remarquer que la tension du point de fonctionnement maximal est relativement stable(moins de 1.5V) en considérant que l'insolation à diminué de 75%,et que le courant a fortement diminué (de 2.45A à 0.65A)ce qui est normal car il dépend directement de l'insolation comme on l'a vue dans le premier chapitre.

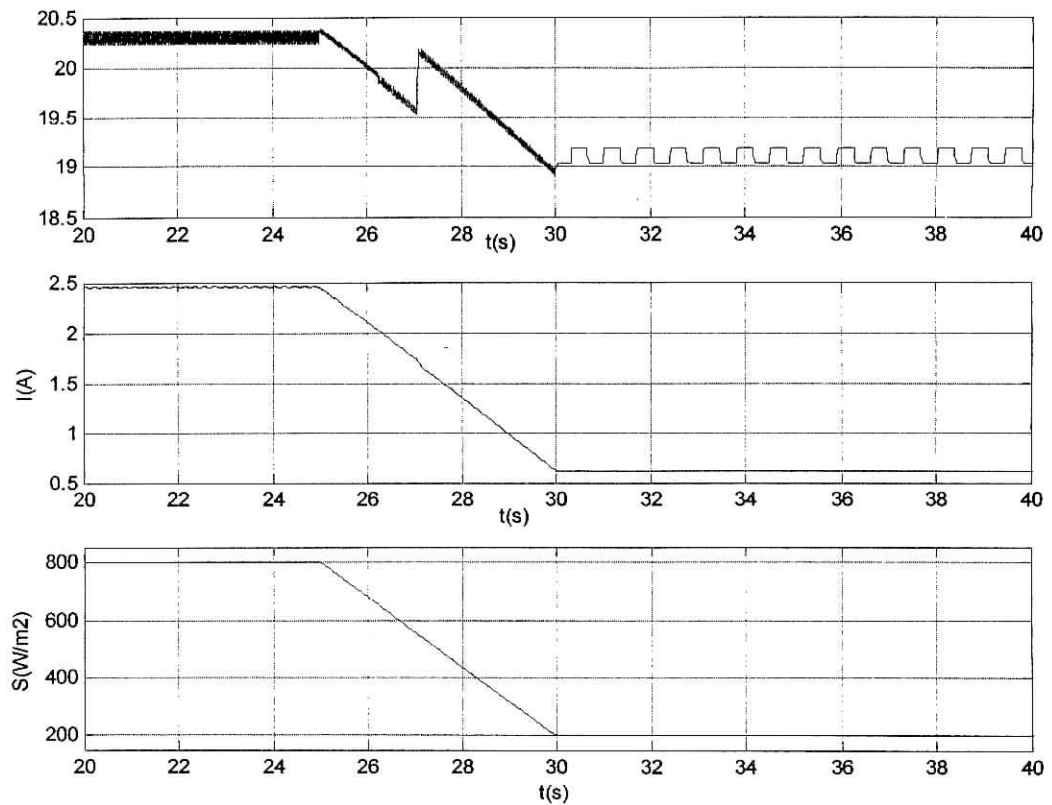


figure 9 : les valeurs du courant et de la tension pendant une rapide diminution de l'insolation

3.2.Comportement de la méthode face à un changement de la température

3.2.1.Changement lent de la température

On fait subir au système (cellules du panneau solaire) une augmentation de la température qui est relativement lente de $25^{\circ}C$ à $35^{\circ}C$ pendant une durée de 20 secondes .

Comme vu dans le premier chapitre une augmentation de la température de la cellule diminue son rendement, mais ces variations de températures ne perturbent pas beaucoup le système et le point de fonctionnement maximum est très vite trouvé après stabilisation.

La figure suivante montre que la poursuite du point de fonctionnement est de bonne qualité et des que la température est stabilisée, le système commence par osciller autour du point de fonctionnement pour se fixer en principe à sa meilleur valeur plus tard, mais cela n'est pas toujours le cas.

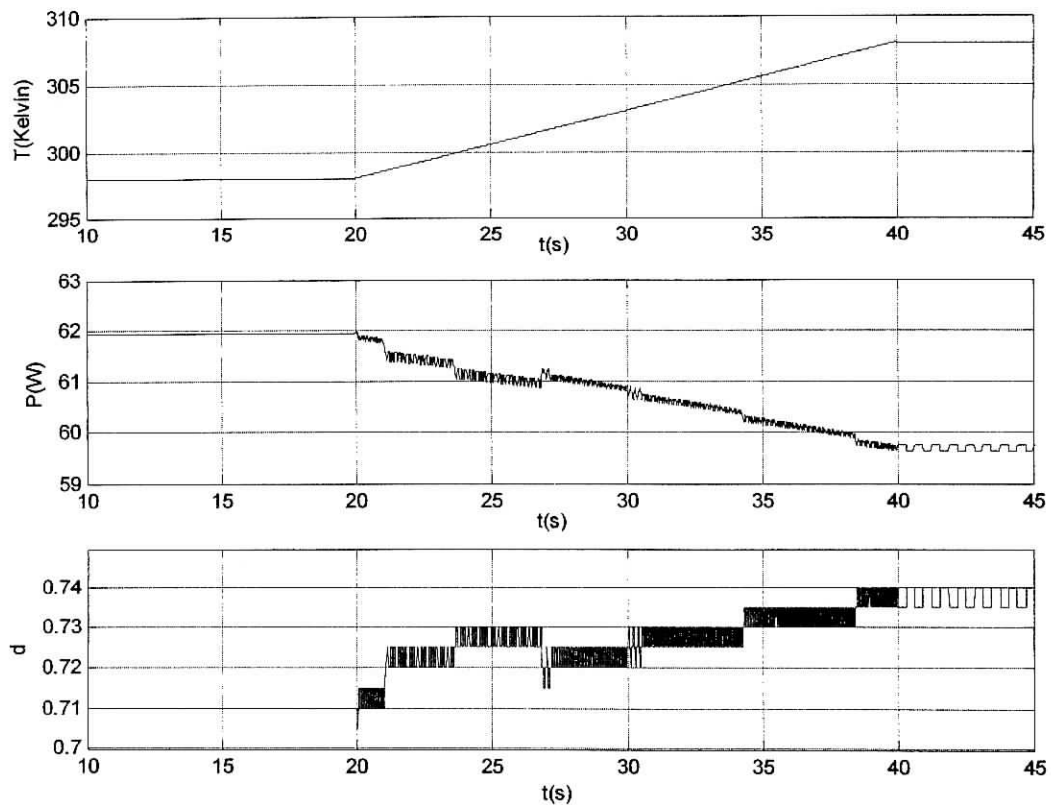


figure 10: Comportement du système face à un changement lent de la température

3.2.2.changement rapide de la température

On fait subir au système (cellules du panneau solaire) une augmentation de la température de 25°C à 35°C mais cette fois ci pendant une durée moins longue qui est de 5 secondes.

La figure suivante montre que la poursuite du point de fonctionnement se fait à temps et sans retard et que la aussi des que la température se stabilise le système commence par osciller autour du point de fonctionnement pour se fixer plus loin sur la valeur adéquate.

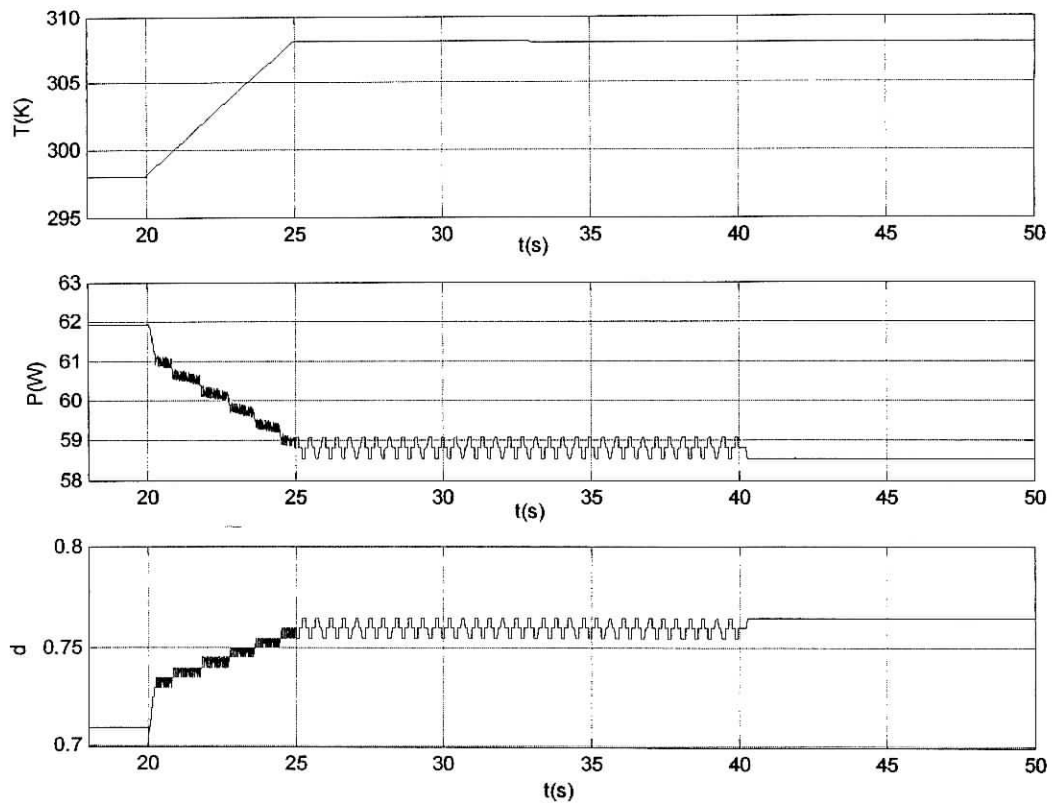


figure11 : Comportement du système face à un changement rapide de la température

3.3.Comportement de la méthode avec une charge resistive

Pour toutes les simulations faites nous avons utilisé une batterie qui a l'avantage de fixer la tension de sortie V_b qui ainsi nous facilitera les calculs et nous permet de savoir quel type de hacheur utiliser .

Dans la simulation suivante on utilise une charge resistive de 100Ω ce qui nous oblige à utiliser un hacheur survolteur car avec seulement un courant de 1A on aura une augmentation de la tension donc le type survolteur est nécessaire .

On simule ici une diminution de l'insolation de 800W/m^2 à 200W/m^2 pendant un temps assez court de 5 secondes.

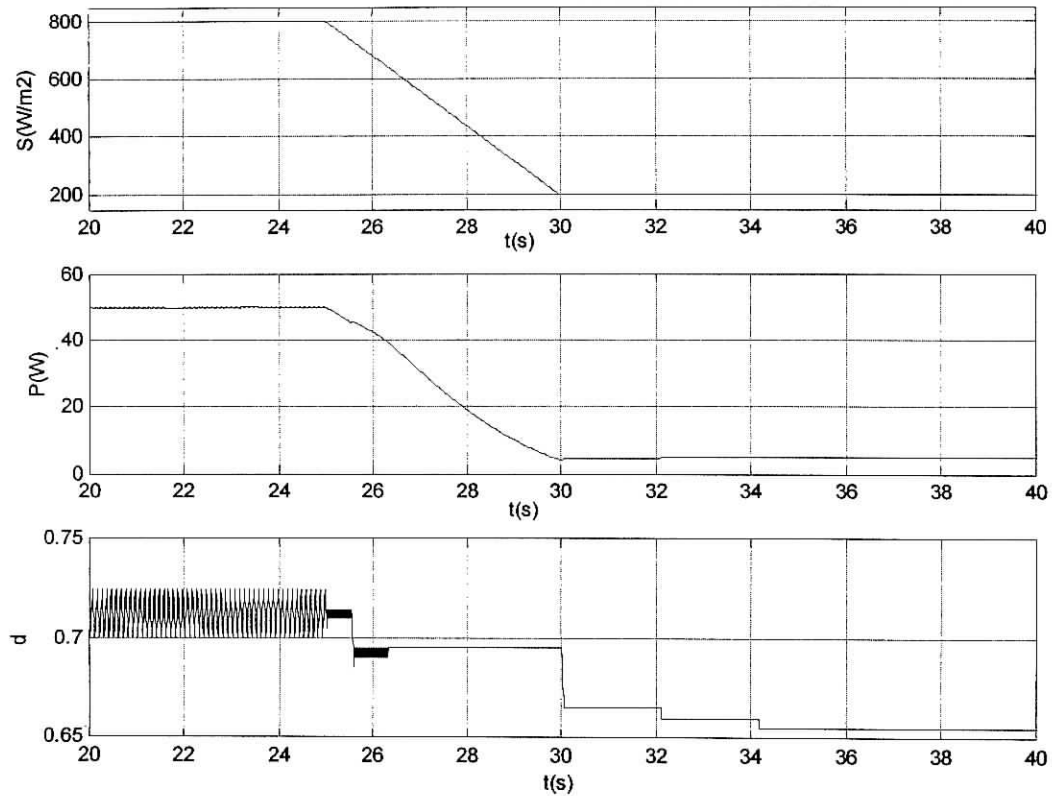


figure12 : Comportement du système face à un changement rapide de l'insolation sous une charge de 100Ω .

La simulation de la figure 12 nous montre un bonne poursuite du point maximum sans retard mais elle est un peut moins bonne qu'avec une batterie. Cela peut s'expliquer par le fait que pour le système il faut un petit temps d'adaptation pour que les deux valeurs V_b et I_b s'équilibrent entre elle car elles sont inter-dépendantes du point de vu de la simulation au niveau de la charge et au niveaux du hacheur .

4.Conclusion

La simulation du système photovoltaïque nous a permis de vérifier le bon fondement des relations et des modèles mathématiques de chaque partie de ce système. Ainsi nous avons pu faire simuler les panneaux solaires et avoir leurs caractéristiques que nous avons exploité dans le premier chapitre .

Le plus grand bénéfice de cette simulation est quelle nous a permis de trouver les ordres de grandeurs des différents paramètres qui font que le système fonctionne suivant le chemin optimal, bien sûr l'éventualité de changements de ces paramètres est a envisager durant la réalisation pratique on peut dire que cela est inévitable.

Chapitre 5

Réalisation pratique

Réalisation pratique

1.Introduction

Dans cette partie pratique nous allons implémenter notre algorithme MPPT d'incrémentation de la conductance sur un microcontrôleur PIC16F876 et utiliser un panneau solaire siemens SM55 à 36 cellules photovoltaïques. un hacheur boost à MOSFET et une charge de type ampoule à incandescence. Nous allons mesurer la puissance relative au point de fonctionnement maximum du panneau solaire et le rapport cyclique correspondant durant l'insolation maximale (soleil au zénith). Mais tout d'abord nous allons présenter les principales propriétés des différents éléments qui constituent notre système photovoltaïque et ensuite le circuit qui les lie.

2.Presentations des différents modules

2.1. Le microcontrôleur PIC16F876[11]

Le PIC16F876 est un microcontrôleur 14 bit issu d'une structure RISC (architecture HARVARD) utilisant la technique pipeline donc un cycle machine par instruction ou 4cycles d'horloges. Nous pouvons donner en quelques points, ses principales caractéristiques :

- Une fréquence d'horloge de 20MHz.
- Une mémoire programme de 8k mots de 14 bits.
- Une mémoire eeprom de 256 octets.
- Une mémoire RAM de 368 octets.
- Contient 3 ports d'E/S, A,B et C respectivement 5,8,8 lignes.
- 2 sorties PWM (Modulation de Largeur d'Impulsion) d'une résolution maximale de 10 bits.
- Un convertisseur Analogique –Digital de 10 bits.
- Jeux d'instructions réduit à 35.

Pour la réalisation de notre programme, nous avons opter de programmer en langage C, en utilisant un compilateur pour PIC(CCS C), car les opérations que requière

l'algorithme (division, multiplication) aurait été fastidieuses à programmer en langage assembleur.

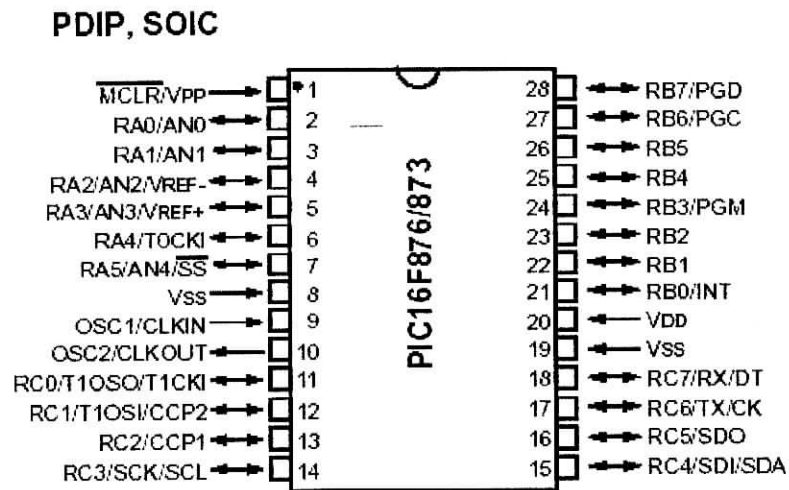


figure1 :Brochage du microcontrôleur PIC16F876.

2.2.Le panneau solaire

Nous avons utilisé un panneau solaire siemens SM55 de 36 cellules photovoltaïques disposées en série et dont les caractéristiques sont données par le constructeur sur le tableau suivant :

Nombre de cellules séries	36
Puissance maximale	55 W
Puissance minimale	50 W
Tension en circuit ouvert V_{oc}	21.7 V
Courant en court circuit I_{cc}	3.45 A
Tension de charge	17.4 V
Courant de charge	3.15 A

2.3.Le convertisseur DC/DC

Dans notre cas on travail avec une charge faible et non adaptée donc la tension du point de fonctionnement sera inférieur à celui du point fonctionnement maximal, pour cela on utilise un hacheur survolteur(figure 2).

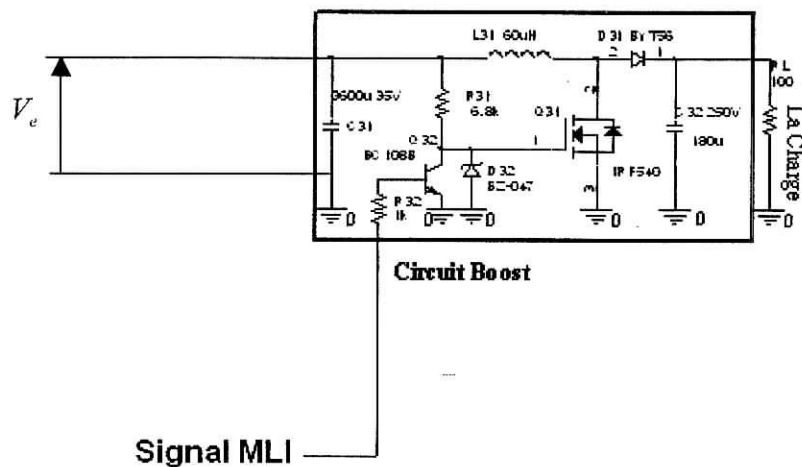


Figure 2 :Schéma du hacheur survolteur

2.4.Le schéma général[10]

Le circuit global a pour mission de donner au microcontrôleur PIC16F876 l'information en temps réel sur la tension et sur le courant. Aussi il fournit une tension continue de 5V pour l'alimentation des amplificateurs opérationnels et du microcontrôleur.

2.4.1.L'information sur la tension

La tension maximale qui peut être délivrée par le panneau est de 21.7V ce qui est supérieur aux 5V acceptée par le microcontrôleur donc on peut facilement abaisser cette tension à 5V en utilisant un simple diviseur de tension.

Pour ne pas avoir de pertes de courants vers la masse on a choisi un potentiomètre de 10K Ω ce qui réduit les pertes de courants vers la masse à $2.17 \cdot 10^{-3}$ A ce qui est négligeable. Et pour éviter des pertes de courants sur la 3^{ème} pin on utilise un amplificateur opérationnel en mode suiveur ce qui théoriquement ne fait pas passer de courant comme montré dans la figure 3.

2.4.2.L'information sur le courant

Pour le calcul de la valeur du courant on a utilisé une résistance shunt de 0.34Ω et deux amplificateurs opérationnels le premier en montage différentiel qui va calculer la différence de tension entre les bornes de la résistance shunt et l'autre en montage amplificateur non inverseur dont l'une des ses résistances est variables. Cela nous permet de faire le réglage nécessaire pour avoir pour le courant maximal une tension de 5V qui va vers le microcontrôleur. Dans ce montage on peut avoir une fuite de courant à travers R4 et R5 qui est de $2.17.10^{-3}A$ ce qui est la aussi négligeable.

Il est préférable de choisir une résistance shunt de valeur plus petite que celle-ci car elle consomme environ 3.4W ce qui est pas négligeable face à le puissance maximale fournie par le générateur.

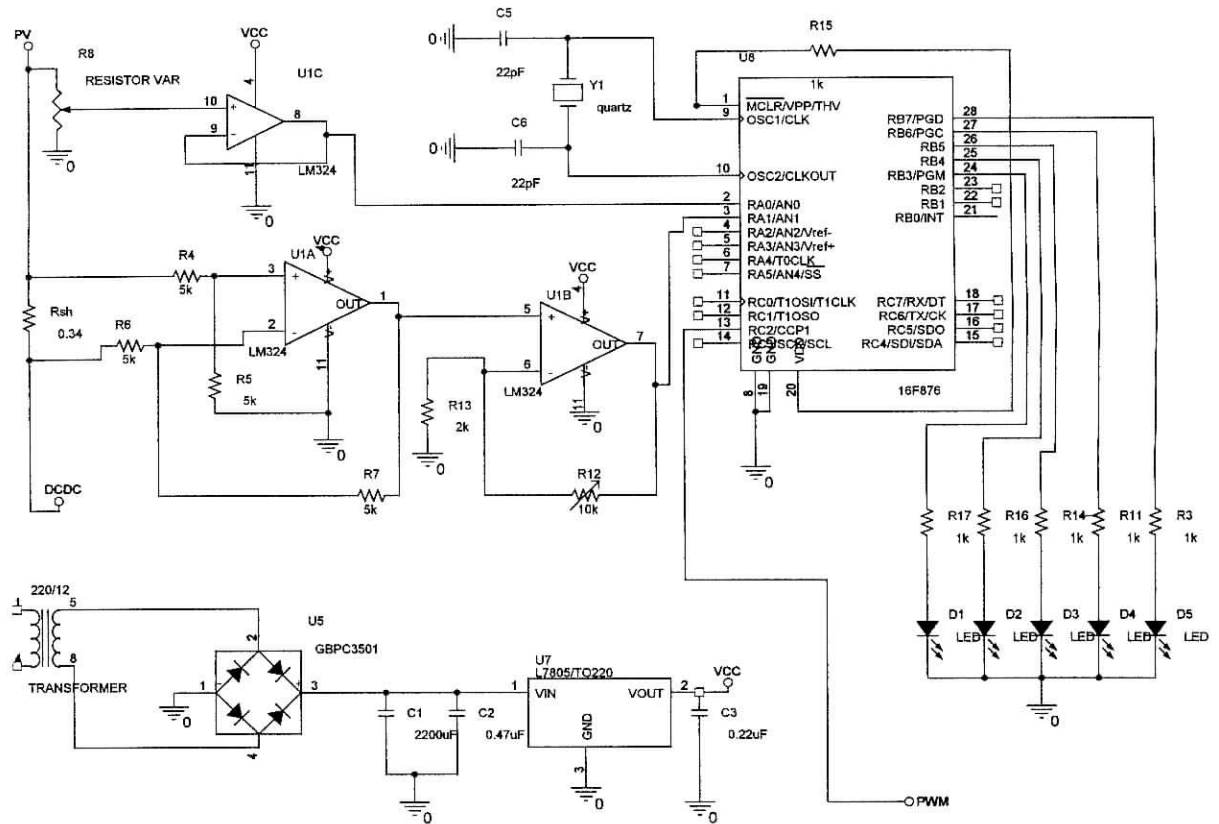


figure3: Schéma de la réalisation

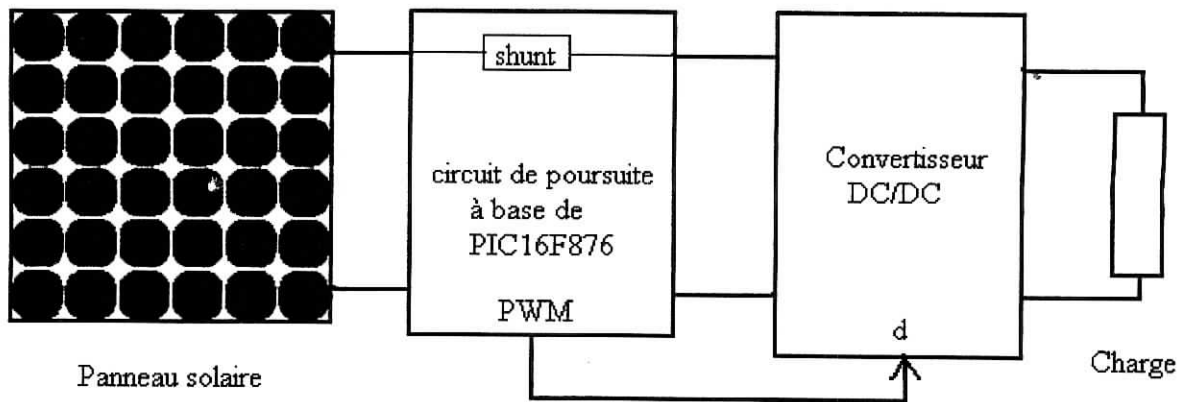


figure 4 :Montage générale du système photovoltaïque

3.Résultats pratiques

Ce qu'il faut prendre en compte pendant la programmation c'est qu'il est nécessaire de réajuster les valeurs de la tension et du courant car comme elles étaient normalisée à 5V la relation $\left| \frac{dI}{dV} + \frac{I}{V} \right| \leq \varepsilon$ aura perdu de son sens et sera faussée donc pour chaque valeur de V et de I, donc il faudra refaire le chemin inverse en les multipliant par des constantes. Et cela est nécessaire à chaque fois qu'on aura à faire des changements sur le circuit, ceci est nécessaire que pour cet méthode d'incrémentation de la conductance améliorée car dans les autres cas on aura à faire des comparaisons avec le zéro (Incrémentation de la Conductance simple) ou à comparer deux valeurs de même grandeur (Perturbation et Observation), dans ces deux cas la multiplication par un constante n'influe pas .

Ayant fait ces réajustements nous avons été contraint de modifier d'autres paramètres que nous avons vu dans le chapitre concernant la simulation et sont comme suit :

- La fréquence d'échantillonnage est de 1000Hz celle-ci a pour conséquence de diminuer l'erreur d'approximation sur la dérivé du courant et de la tension.
- Le pas $d0$ qui dépend beaucoup de la fréquence d'échantillonnage , devient $d0=0,002$
- L'erreur ε qui dépend du pas $d0$ est devenue $\varepsilon=0.01$

Avec toutes ces nouvelles données le contrôleur à pu trouver le point de fonctionnement maximum qui est :

$$P_{\max}=30 \text{ W} \quad \text{et un rapport cyclique } d \cong 0.2 \text{ (f=30KHz)}$$

Ce qui est un bon résultat ,avec un délais de poursuite satisfaisant à vue d'œil car nous l'avons pas calculer, mais sûrement il y'aura à peaufiner les réglages de ces paramètres et certainement on peut faire une amélioration au niveau de la programmation.

Conclusion générale

Conclusion Générale

L'énergie solaire a de nombreuses applications, elle est d'un véritable secours pour les zones isolées là où le réseau électrique est inexistant comme pour les relais de télécommunications, l'aérospatial, le pompage d'eau dans le désert..., malheureusement en ces temps de domination des combustibles fossiles, c'est leur seul domaine de prédilection.

Pour que l'énergie photovoltaïque soit rentable, il faut maîtriser tous les composants du système photovoltaïque, à commencer par la cellule photovoltaïque, car plus on domine ses moindres détails et caractéristiques, mieux on s'en servira plus tard. Les méthodes de poursuites du point de puissance maximale et les hacheurs font partie de ces composants à considérer. Selon les applications et les objectifs on choisira la plus adaptée des méthodes MPPT. Pour cela on utilisera tous les logiciels de simulation offerts par l'outil informatique et ainsi optimiser au maximum les futures systèmes, aussi pour faciliter le saut vers la conception réelle. Arrivé à ce stade, il faudra exploiter au maximum les nouvelles technologies des composants électroniques et des microprocesseurs modernes.

Durant ce travail nous avons essayé de respecter ce cheminement car il paraît logique et de bon sens. Pour cela nous avons fait les simulations du système photovoltaïque complet (*sur MATLAB simulink*) et du circuit (*sur Orcad PSpice*). Mais cela n'épargne pas pour autant les aléas de la réalisation pratique, car tant qu'on ne passe pas à la réalité du sujet (le hard), on ne peut pas confirmer les choix précédents effectués en simulation. Et on peut dire que durant la réalisation du contrôleur MPPT par la méthode « Incrémentation de la Conductance » sur la base d'un PIC16F876 on a acquis une expérience précieuse.

La méthode « Incrémentation de la Conductance » est une méthode pointue qui demande des calculs précis et de nombreux réglages et mises au points qu'on peut faire de manière efficace seulement sous les conditions réelles de fonctionnement. Mais en contrepartie elles nous donnent des résultats satisfaisants, ce qui prime car les calculateurs sont de plus en plus puissants.

L'énergie solaire demeure une énergie renouvelable et non polluante la plus prometteuse pour l'homme, et est des plus disponibles en Algérie. D'où la nécessité de la rendre rentable, compétitive et de la maîtriser maintenant pour en tirer les dividendes plus tard, car elle est inévitable dans le future.

Bibliographie :

[1] Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique **D 3 360**
. 1 <<Convertisseurs photovoltaïques>>

Ludovic PROTIN Professeur des Universités Directeur du Laboratoire d'électronique de puissance et d'informatique industrielle (LEPII), Université du Havre

Stephan ASTIER Maître de conférences Laboratoire d'électrotechnique et d'électronique industrielle (LEEI) (ENSEEIH), Institut national polytechnique de Toulouse

[2] Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique <<Hacheurs>> **D 3 160 . 1**

Henri FOCH Professeur à l'Institut National Polytechnique de Toulouse Responsable de l'Équipe de Recherche Convertisseurs Statiques du LEEI (URA au CNRS)

[3] **HANNES KNOPF** MASTER OF SCIENCE in ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING ANALYSIS, SIMULATION, AND EVALUATION OF MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT) METHODS FOR A SOLAR POWERED VEHICLE Portland State University 1999

[4] **K.H. Hussein, I.Muta, T. Hoshino, and M. Osakada.** Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions. In IEE Proceedings. Generation, Transmission and Distribution, volume 142(1), pages 59-64. IEE, Stevenage, Herts., U.K., January 1995.

[5] Les microcontrôleurs PIC-Applications : **Christian Tavernier**, Dunod, Paris, 2000

[6] Applications industrielles des PIC : **Christian Tavernier**, Dunod, Paris, 2001

[7] Maximum Power Point Tracker Model Author: Shengyi Liu Date: 09/05/00
Model name: Controller_MPPT DLL name: Controller_MPPT
Report errors or changes to: vtb@enr.sc.edu Pictorial Representation of Model

[8] EVALUATING MPPT CONVERTER TOPOLOGIES USING A MATLAB PV MODEL, Geoff Walker
Dept of Computer Science and Electrical Engineering,
University of Queensland, Australia.
email: walkerg@csee.uq.edu.au

[9] Design, Construction and Testing of a Voltage-based Maximum Power Point Tracker (VMPPT) for Small Satellite Power Supply . Masoum, Mohammad A.S. Department of Electrical Engineering Iran University of Science & Technology Narmak, Tehran, 16645, Iran. Dehbonei, Hooman
Advance Electronic Research Center P. O. Box: 19585 - 836 Tehran, Iran.
E-mail: Dehbonei@mavara.com.

[10] EXERCICES CORRIGES EN ELECTRONIQUE GENERALE avec résumé de cours. **M.HADDADI** maître de conférence à l'Ecole Nationale Polytechniques (office des publications universitaires 04-1995 2.06.4016).

[11] Programmations des pic par bigonoff
<http://www.jmb-electronique.com/Bigonoff.pdf>