

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Centre Universitaire Abdel hafid Boussouf-Mila**

**Institut des Sciences et de Technologie**

**Département de génie mécanique et électromécanique**



N°Ref:.....

**Projet de Fin d'Etude préparé en vue de l'obtention du  
diplôme de MASTER en Electromécanique**

**Spécialité : Electromécanique**

## **Gestion Optimale D'un Système Hybride**

**Réalisé par :**

- BOULFOUS Charaf Eddine**
- BEN MAKHLOUF Mohammed**

**Soutenu devant le jury :**

**M. S. BAZI**  
**M. H. GUENTRI**  
**M. M. TIAR**

**Président**  
**Examineur**  
**Promoteur**

**Année universitaire :2021/2022**

## Dédicace

Je dédie ce travail

A celui qui m'ont fait de moi un homme,

Aux personnes les plus chères dans ma vie,

Mes parents,

Pour leur soutien moral,

Leurs amours

et leur sacrifices,

A mes chères frères et sœurs,

A tous les membres de ma famille,

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé et à qui je souhaite plus de succès

A tous ceux que j'aime.

***Boulfous Charaf Eddine***

---

## Dédicace

Je dédie ce mémoire

Ames chers parents ma Mère et Mon père

Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements.

Ames frères Ames amies et mes camarades

Sans oublier tous les enseignants que ce soit

Du primaire, du moyen, di secondaire ou de l'enseignement supérieur.

***Ben Makhlouf Mohammed***

# REMERCIEMENTS

---

## Remerciement

On remercie Allah de tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer cette mémoire.

Tout d'abord, ce travail serait pas aussi riche et n'aurait pas avoir le jour sans l'aide de l'encadrement de **Mr M.Tiar** on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de cette mémoire.

---

$I_{cc}$	Courant de court-circuit du module photovoltaïque (A).
$I_D$	Courant de saturation inverse (A).
$V_{oc}$	Tension à circuit ouvert du module photovoltaïque (V).
$V_{th}$	Tension thermique (V).
$I_{sh}$	Courant shunt (A).
$I_{pv}$	Courant du module photovoltaïque(A).
$V_{pv}$	Tension du module photovoltaïque (V).
$P_{pv}$	Puissance du module photovoltaïque(W).
$I_{pvdc}$	Courant du module PV coté bus DC(A).
$I_{op}$	Courant optimum du module PV(A).
$V_{op}$	Tension optimale du module PV (V).
$P_{pv}$	Puissance optimale du module PV (W)
$C_{pv}$	Capacité coté module PV ( $\mu$ F).
$L_{pv}$	Inductance coté module PV(mH).
$R_s$	Résistance série du module PV ( $\Omega$ ).
$R_{sh}$	Résistance shunt du module PV( $\Omega$ ).
$\alpha_{mppt}$	Rapport cyclique de l'hacheur boost du module PV.
MPPT	Recherche du point de puissance maximale.
Module PV	Module photovoltaïque
$I_{ch}$	Courant de la charge coté bus DC (A).
$I_{ac}$	Courant de la charge (A).
$L_f$	Inductance du filtre (mH).
$C_f$	Capacité du filtre( $\mu$ F).
$P_{ch}$	Puissance de la charge (W).
$P_{charge-dc}$	Puissance de la charge côté PV(W).

---

$P_{\text{loss}}$	Pertes de puissance dans les convertisseurs (hacheur boost+onduleur)(W).
$P_{\text{net}}$	Puissance nette (W).
$\alpha_{\text{ch}}$	Rapport cyclique de l'onduleur de charge.
$I_g, I_{\text{refg}}$	Courant du réseau et sa référence, respectivement (A).
$I_{\text{gdc}}, I_{\text{gdc-ref}}$	Courant du réseau coté bus DC (A).
$I_{\text{amp-ref}}$	Amplitude du courant de référence du réseau (A).
$V_g$	Tension du réseau (V).
$V_{g\text{-amp}}$	Amplitude de la tension du réseau (V).
$P_g, P_{\text{refg}}$	Puissance du réseau et sa référence, respectivement (W).
$L_g$	Inductance coté du réseau (mH).
$\alpha_g$	Rapport cyclique de l'onduleur du réseau.
$I_{\text{dcref}}$	Courant de référence, collecté sur le bus DC (A).
$V_{\text{dc}}, V_{\text{dcref}}$	Tension du bus DC et sa référence, respectivement (V).
$C_{\text{dc}}$	Capacité du bus DC ( $\mu\text{f}$ ).

---

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre 1 : système hybride</b>	
1.1 Introduction .....	4
1.1.1 Configuration les sources d'énergie renouvelable.....	5
1.2 Définition des systèmes hybrides.....	6
1.2.1 Les Avantages et les inconvénients d'un système hybride .....	7
A. Les Avantage .....	7
B. Les Inconvénients .....	7
1.2.2 Les Différentes configurations des systèmes de génération hybrides.....	7
1.2.2.1 Architecture à bus continu .....	7
1.2.2.2 Architecture à bus alternatif.....	8
1.3 Stratégies de gestion d'énergie des systèmes hybrides .....	8
1.4 Conclusion .....	8
<b>Chapitre 2 : Modélisation du Système de Génération Hybride</b>	
2.1 Le générateur photovoltaïque (GPV) .....	10
2.1.1 Définition .....	10
2.1.2. Principe photovoltaïque .....	10
2.2 Modélisation du système .....	11
2.2.1 Modèle du module PV.....	11
A. Influence de l'éclairement .....	14
B. Influence de la température .....	15
2.3 Modèle moyen du hacheur survolteur .....	16
2.4 Dimensionnement et choix des éléments .....	21
2.4.1 Module photovoltaïques et convertisseur associé .....	21
2.4.2 Réseau et convertisseur associé.....	22
2.5 Conclusion.....	23
<b>Chapitre 3 : Description des Approches de Commande</b>	
3.1 Introduction .....	25
3.2 Description du gestionnaire d'énergie propose .....	25
3.3 Commande rapprochée des convertisseurs statiques .....	26
3.3.1 Commande côté source photovoltaïque PV .....	26
A. Principe générale de la commande MPPT.....	26



---

B. L'algorithme Perturber et Observer ( P&O ).....	26
3.3.2 Commande côté réseau monophasé .....	29
A. Calcul de la valeur crête du courant de référence .....	30
B. Estimation de l'angle $\theta$ du réseau .....	30
C. Contrôle du courant par régulateur à hystérésis.....	31
3.4 Conclusion .....	32
 <b>Chapitre 4 : Résultat de Simulation</b>	
4.1 Introduction.....	34
4.2 Résultats de simulations .....	34
4.3 Conclusion .....	40
Conclusion générale .....	41
Références bibliographiques .....	42
Résumé.....	43

---

# Liste des tableaux

Tableau .1.1.	bilan des ressources d'énergie renouvelable dans l'union européenne .	.....	6
Tableau .2.1.	Pièce d'identité du module solaire « Isophoton I-75/12 ».....		15
Tableau .4.1.	représentée la puissance par rapport le temps.....		34

---

## Chapitre 1

- Figure 1.1 l'énergie renouvelable Solaire et l'éolienne.
- Figure 1.2 Configuration du système hybride a bus continue.
- Figure 1.3 Configuration du système hybride a bus alternatif.

## Chapitre 2

- Figure.2.1. Terminologie du système photovoltaïque
- Figure.2.2. Principe photovoltaïque.
- Figure.2.3. Le Schéma équivalent du module solaire
- Figure.2.4. Caractéristique du module solaire aux conditions standards ( $E=1000\text{W}/\text{m}^2$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ )
- Figure.2.5. Caractéristiques électriques du module pour différentes valeurs d'éclairement à  $T=25^\circ\text{C}$ : (a) courbe (I-V); (b) courbe (P-V).
- Figure.2.6. Caractéristiques électriques du module pour différentes valeurs température à  $E= 1000\text{W}/\text{m}^2$  : (a) courbe (I-V); (b) courbe (P-V).
- Figure.2.7. Schéma de principe d'un hacheur survolteur
- Figure.2.8. Circuit électrique équivalent de la première séquence de conduction.
- Figure.2.9. Convertisseur associé au module photovoltaïque
- Figure.2.10. Convertisseur associé au module photovoltaïque
- Figure.2.11. Schématique de l'onduleur côté réseau.

## Chapitre 3

- Figure.3.1. Schéma synoptique de l'installation hybride.
- Figure.3.2. Schématique du contrôle MPPT du convertisseur coté PV
- Figure.3.3. Caractéristique de fonctionnement de la méthode de P&O
- Figure.3.4. Organigramme de la méthode «P&O»
- Figure.3.5. Schéma de principe du contrôle de l'onduleur du réseau
- Figure.3.6. Régulateur PI
- Figure.3.7. Structure du PLL monophasé
- Figure.3.8. Commande par Hystérésis

## Chapitre 4

- Figure.4.1. Puissance demandée par la charge (W).
- Figure.4.2. puissance du module PV (W).
- Figure.4.3. puissance du réseau (W).
- Figure.4.4. Allure du courant du réseau : (1) courant mesuré et (2) référence.

- Figure.4.5. Allure de la tension et du réseau (mode 1) (1)tension de réseau (20V/1div),(2) référence de courant de réseau (1A/1div).
- Figure.4.6. Allure de la tension et du réseau (mode 2) (1)tension de réseau (20V/1div),(2) référence de courant de réseau (1A/1div).
- Figure.4.7. Allure de la tension bus continu : (1) référence, (2) tension mesurée.
- Figure.4.8. Allure de tension de panneau photovoltaïque : (1) référence et (2) courant mesuré.
- Figure.4.9. Allure du courant de panneau photovoltaïque : (1) référence et (2) courant mesuré.
- Figure.4.10. tension de commande de l'onduleur.

**Abstract :**

The work presented in this thesis deals with study and simulation of an optimal power management of a small-scale generation hybrid system. The system consists of a photovoltaic array, supported by a single-phase grid that supplies a DC load. The supervisory algorithms based of voltage DC bus regulation guarantee the system to switch smart between two operation modes, according to the load demand, depending of the PV availability. Obviously, the PV side DC-DC converter is controlled to track permanently the maximum power point by using a MPPT method; whereas, the grid converter is tuned to cover the remaining power, or alternatively, injecting the exceeding power to the utility. To prove the effectiveness of the proposed algorithms, simulation results obtained with a given load profile are presented and commented.

**Keywords:** Photovoltaic, Power management, MPPT

**المخلص:**

يتعامل العمل المقدم في هذه الأطروحة مع دراسة ومحاكاة إدارة الطاقة المثلى لنظام توليد هجين صغير الحجم. يتكون النظام من وحدة كهروضوئية، مدعومة بشبكة كهربائية أحادية الطور ، توفر حمل تيار مباشر متغير. تضمن خوارزمية إدارة الطاقة القائمة على تنظيم ناقل التيار المستمر أن يقوم النظام بذكاء بالتبديل بين وضعي التشغيل ، اعتمادًا على طلب الحمل وتوافر مصدر الطاقة الشمسية. ولهذه الغاية ، يُطلب من الشبكة تغطية النقص الذي تشير إليه الوحدة الكهروضوئية ، والتي توفر الحد الأقصى بشكل دائم ، عبر MPPT. بالإضافة إلى ذلك، يتم التحقق من فلسفة الشبكة الذكية (SMART GRID) ، حيث يتم ضمان تدفق ثنائي الاتجاه لطاقة الشبكة من خلال قوانين التحكم المختلفة المقترحة. لاختبار فعالية الخوارزميات المقترحة، تم الحصول على نتائج المحاكاة باستخدام يتم عرض ملف التعريف والتعليق عليه.

**الكلمات المفتاحية:** الكهروضوئية ، إدارة الطاقة ، MPPT

## **1. Introduction Générale :**

Avec le développement progressif de la vie moderne, les études écologiques ont démontré que la consommation énergétique croissante est accompagnée par une augmentation énorme de l'émission des gaz toxiques dans l'atmosphère, ce qui cause la pollution de l'air et de l'eau. Compte tenu de cette situation, les chercheurs et les opérateurs dans le domaine ont commencé de s'orienter vers les sources et les méthodes de production renouvelable et écologique, en exploitant les énergies propres sur la terre, comme l'énergie solaire, hydraulique, éolienne, géothermie...etc. Ils visent à réduire au minimum la demande d'énergie provenant des sources classiques ; en conséquence, une ville durable et propre dans son énergie, dans son climat et même dans sa nourriture[2].

Les énergies renouvelables peuvent être classées en trois grandes familles, l'énergie d'origine mécanique (la houle, celle du vent), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique,...etc.) ; en sachant qu'à la racine de toutes ces énergies est celle en provenance du soleil, transformée ensuite par l'environnement terrestre. Parmi les différentes sources citées, deux retiennent l'attention pour leur important potentiel, l'énergie éolienne et l'énergie solaire[2].

Avec la croissance de plus en plus d'énergie électrique, la qualité de service et la continuité de l'approvisionnement ont été considérés comme le premier soucis de tous les principaux secteurs de production d'électricité à travers le monde[2].

## **2. Organisation de thème :**

Ce travail est structuré en quatre chapitres :

- ❖ Le premier chapitre décrit des généralités sur les configurations des systèmes hybrides, ainsi qu'une lecture bibliographique sur les principales techniques utilisées comme gestionnaires d'énergies de tels systèmes, et ce, en décrivant en bref le principe.
- ❖ Dans le deuxième chapitre, une modélisation mathématique explicite des différentes parties du système (source et convertisseurs statiques) est exposée, qui permet en fait de suggérer les lois de commande appropriées, et prédire les performances.

- ❖ Dans le troisième chapitre, considéré en fait, comme pièce maitresse de la thèse, on décrit les différentes lois de gestion et de commande appliquées au système pour un fonctionnement souple et fiable.
- ❖ Le quatrième chapitre affichée les résultats de simulation et commenté sur les graphes des résultats [3].

Enfin, une conclusion générale, résumant le travail, suivies de quelques perspectives envisagées seront mentionnées.

# CHAPITRE 1

## Systeme hybride



## 1.1 Introduction :

Depuis une vingtaine d'années, les énergies renouvelables connaissent une croissance exceptionnelle. Sources d'énergie inépuisables, elles n'émettent pas de gaz à effet de serre. Malgré ces énormes atouts, leur part dans la production mondiale d'énergie reste minime par rapport à celle des énergies fossiles.

Les énergies renouvelables se répartissent en cinq catégories : l'éolien, le solaire, l'hydraulique, la géothermie et la biomasse. Pour chacune, il existe plusieurs technologies. Dans l'énergie solaire par exemple, il y a les panneaux photovoltaïques, les chauffe-eaux solaires, les centrales thermodynamiques... Côté avantages, toutes les énergies renouvelables sont inépuisables, n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne polluent pas l'environnement. Toutefois, chacune a ses inconvénients et aucune ne pourra remplacer à elle seule les énergies fossiles, qui sont responsables à 70% du changement climatique : il faudra mélanger plusieurs sources d'énergie, qui seront différentes selon la région du monde.

Après 30 ans de croissance exceptionnelle à la sortie de la Seconde guerre mondiale où les pays industrialisés ont consommé de plus en plus de pétrole, le prix de cette énergie a soudainement grimpé. En 1973, le prix du baril de pétrole a été multiplié par quatre en quelques semaines : la croissance s'est effondrée et le chômage a explosé. Le choc s'est reproduit six ans plus tard, en 1979. Cela a poussé les pays industrialisés à réduire leur consommation de pétrole et à développer les énergies renouvelables.

En 2018, les énergies renouvelables ont représenté 11% de la consommation mondiale d'énergie primaire dans le monde, contre 85% pour les énergies fossiles ! Les énergies fossiles ont encore plusieurs dizaines d'années de réserve devant elles : elles ne vont pas s'épuiser subitement, il y aura un étalement dans le temps. Mais peu à peu, leur prix va grimper, ce qui sera une nouvelle incitation à développer les énergies renouvelables [1].



**Figure 1.1** l'énergie renouvelable Solaire et l'éolienne.

L'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente une alternative intéressante et bien adaptée à des besoins limités. Malgré sa facilité de mise en œuvre, son faible impact environnemental et le peu d'entretien qu'il nécessite, un système photovoltaïque n'est plus concurrentiel lorsque la demande augmente. La performance d'un système PV dépend fortement des conditions météorologiques, telles que le rayonnement solaire, la température et la vitesse du vent. Pour fournir l'énergie continuellement durant toute l'année, un système PV doit donc être correctement dimensionné. Ce qui exige une étude assez rigoureuse dans le but de faire le meilleur choix, le plus performant et au moindre coût [5].

### **1.1.1. configuration les sources d'énergie renouvelables :**

Il existe différentes sources d'énergie renouvelables disponibles sur la planète dont les principales sont : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie. Elles peuvent être converties, selon les besoins, en électricité ou en chaleur. La cogénération d'électricité et de chaleur est possible dans le cas de la géothermie, de la biomasse et de l'énergie solaire. Depuis les années 1990, les énergies renouvelables (autres que l'hydroélectricité) connaissent un essor important. Depuis 1994 dans l'Union Européenne, le taux de croissance annuel pour l'éolien est d'environ 34 % et d'environ 30 % pour le solaire (principalement pour des applications connectées au réseau) [5]. Fin 2004, la puissance éolienne installée en Europe s'élève à 34,4 GW et la puissance crête photovoltaïque s'élève à 1,1 GW crête (voir Tableau (1-1)). Les politiques de développement durable mises en place dans le monde ont permis une meilleure exploitation du vaste potentiel que représentent les ressources renouvelables. L'indépendance énergétique, couplée à la diminution des émissions de gaz à effet de serre et la volonté de diversification des ressources, ont été les moteurs d'un développement industriel très conséquent, permettant d'initier des filières nouvelles tout en soutenant des technologies plus matures. Les perspectives économiques du domaine des énergies renouvelables sont en outre confortées par le contexte d'appauvrissement des énergies fossiles.

Ressource renouvelable	Capacité installée / Production d'électricité dans l'Union Européenne
Eolienne	34,4 GW / 57 TWh
Solaire	Photovoltaïque : 1,1 GW <sub>crête</sub> (dont 92 % connectés au réseau) / 650 GWh <sub>e</sub>
	Thermique : 10,7 GW <sub>th</sub> <sup>3</sup> (15 millions de m <sup>2</sup> )
Géothermie	électricité : 0,8 GW <sub>e</sub> <sup>4</sup> / 5,5 TWh <sub>e</sub> chaleur : 2 GW <sub>th</sub>
Petite hydraulique (installations de taille < 10 MW)	11,6 GW
Biomasse	Bois 55,4 Mtep <sup>5</sup> ; électricité : 34600 GWh <sub>e</sub> chaleur : 435000 GWh <sub>th</sub>
	Biogaz (valorisation des déchets) 4,1 Mtep

**Tableau 1.1** bilan des ressources d'énergie renouvelable dans l'union européenne fin 2004 [2],[4]

GW<sub>th</sub> : gigawatts thermiques, GW<sub>e</sub> : gigawatts électriques ,Mtep : mégatonnes équivalent pétrole.

## 1.2. Définition des systèmes hybrides :

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées [8], [9].

Le but d'un système d'énergie hybride est de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable pour satisfaire la demande de la charge. En plus des sources d'énergie, un système hybride peut aussi incorporer un système de distribution à courant continu, un système de distribution à courant alternatif, un système de stockage, des convertisseurs, des charges et une option de gestion des charges ou un système de supervision. Toutes ces composantes peuvent être connectées en différentes architectures (voir figure (1.2) et (1.3)). Les sources d'énergie renouvelable peuvent être connectées au bus continu ou alternatif en fonction de la dimension du système.

La puissance délivrée par les systèmes hybrides peut varier de quelques watts pour des applications domestiques jusqu'à quelque mégawatt pour les systèmes utilisés dans

l'électrification de petits villages.

Ainsi, les systèmes hybrides utilisés pour des applications de très faible puissance (en dessous de 5 kW) alimentent généralement des charges à courant continu. Les systèmes plus grands, ayant une puissance supérieure à 100kW, connectés sur le bus à courant alternatif, sont conçus pour être connectés aux grands réseaux interconnectés.

### 1.2.1. Les Avantages et les inconvénients d'un système hybride :

#### A. Les Avantages :

- ✚ Non dépendant d'une seule source d'énergie.
- ✚ Flexible, extensible et capable de satisfaire des charges évolutives.
- ✚ Exploitation simple, travaux de maintenance et de révision réduits.

#### B. Les Inconvénients :

- ✚ Plus complexe que les systèmes mono source et nécessite du stockage.
- ✚ Coût capital élevé comparé aux générateurs diesel.

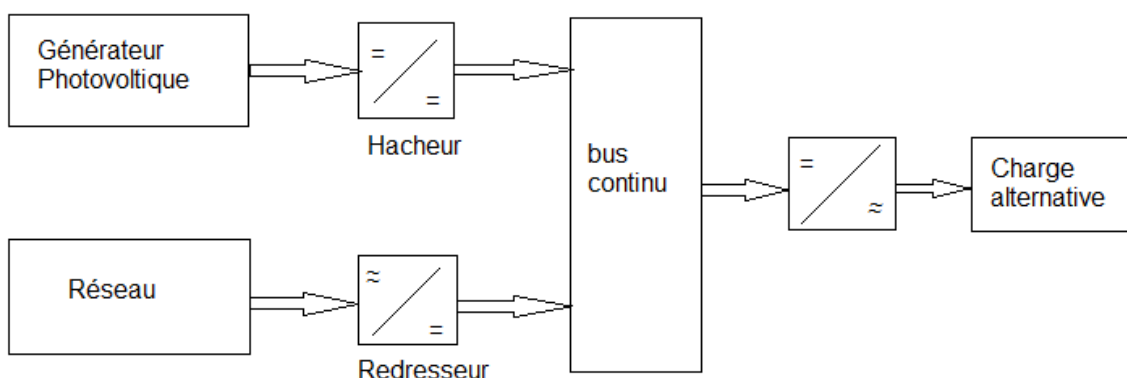
### 1.2.2 Les Différentes configurations des systèmes de génération hybrides :

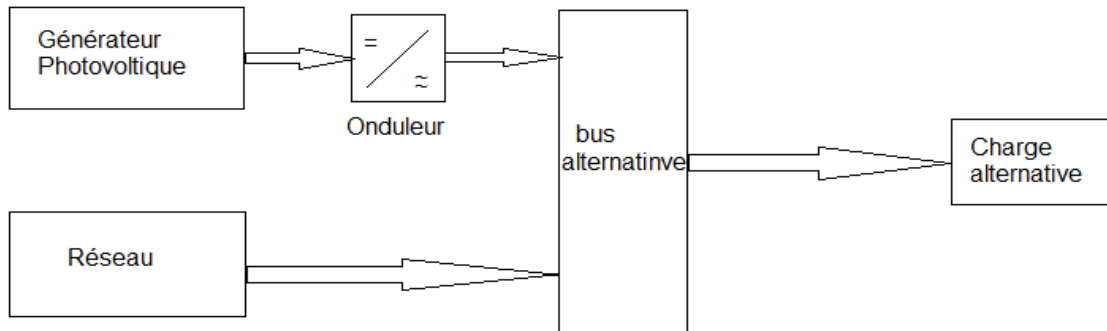
Le système hybride incorpore en général, un mariage d'un ensemble de sources, conventionnelles (diesel, réseau), et renouvelables (éoliennes, solaires, biomasse,...), permettant d'améliorer l'autonomie du système. En ajout, le système est doté d'un gestionnaire d'énergie permettant de gérer adéquatement le flux d'énergie.

Toutes ces composantes peuvent être interconnectées en différentes architectures: illustré sur les figures (1.2) et (1.3).

Dans la majorité des architectures, la collecte des différents flux d'énergie sur le bus continu reste la plus utilisée, vu qu'elle offre une simplicité d'implémentation, et ne nécessite pas un procédé de synchronisation, comme sollicite la technique du bus alternatif.

#### 1.2.2.1 Architecture à bus continu:



**Figure 1.2** Configuration du système hybride à bus continu.**1.2.2.2 Architecture à bus alternatif :****Figure 1.3** Configuration du système hybride à bus alternatif.**1.3. Stratégies de gestion d'énergie des systèmes hybrides :**

Dans les applications embarquées ou stationnaires, la stratégie de gestion d'énergie joue un rôle primordial pour assurer une opération optimale du système hybride, causée par la nature intermittente des sources impliquées. Son rôle est de trouver à chaque instant la meilleure répartition de puissance entre les différentes sources. Pour un système hybride, incluant des sources renouvelables, on peut ci-après citer les objectifs communs des stratégies de gestion :

- ✚ Maintien stable du bus DC.
- ✚ Réduire la possibilité de perte d'énergie d'alimentation.
- ✚ Réduire le cout de fonctionnement et la maintenance.
- ✚ Améliorer l'efficacité du système.

**1.4. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelques notions sur des systèmes énergétiques hybrides avec les avantages et les inconvénients. En plus d'identifier le principe de son travail et la méthode de fonctionnement du système énergétique hybride.

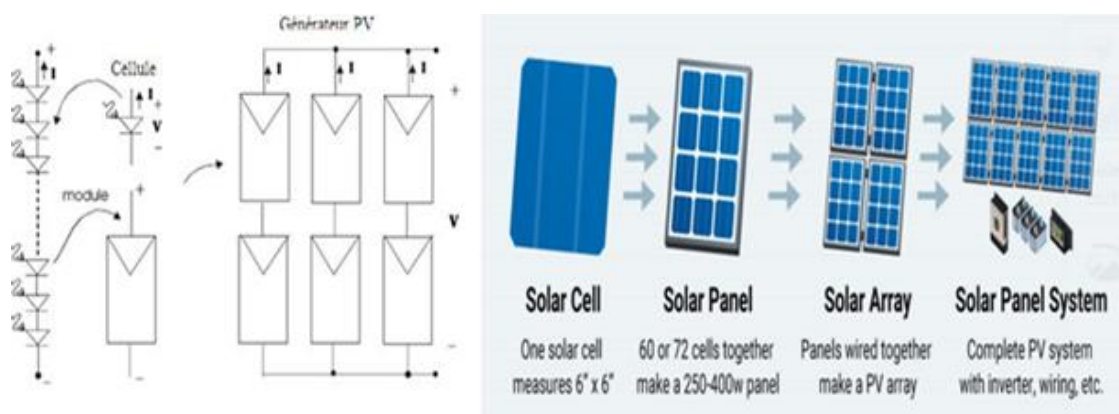
## Chapitre 2

# MODELISATION DU SYSTEME DE GENERATION HYBRIDE

## 2.1. Le générateur photovoltaïque (GPV) :

### 2.1.1. Définition :

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé aux photons de la lumière, produit de l'électricité. Cet effet photovoltaïque fut découvert en 1839 par le physicien français Antoine Becquerel<sup>1</sup>. Il faut attendre les années 1960 et les satellites spatiaux pour que les cellules trouvent de réelles applications. Les panneaux solaires, formés par des assemblages de cellules, commencent à arriver sur les toits à la fin des années 1980. L'essor du photovoltaïque, avec de grands parcs de production électrique[6].



**Figure 2.1.** Terminologie du système photovoltaïque [8][9].

### 2.1.2. Principe photovoltaïque :

Le principe de fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques se base évidemment sur l'effet photovoltaïque. L'effet photovoltaïque survient au niveau des cellules solaires qui sont composées de matériaux semi-conducteurs. La jonction des cellules solaires entre elles pour donner un module photovoltaïque permet la production d'un « photocourant » d'une puissance apte à alimenter des appareils électriques.

L'effet photovoltaïque fait partie des phénomènes photoélectriques. Un phénomène photoélectrique consiste en un déplacement d'électrons dans un matériau semi-conducteur, dû à l'action des particules lumineuses : les photons. L'incidence de la lumière sur le semi-conducteur entraîne soit une éjection d'électrons, soit un mouvement d'électrons modifiant la conductivité du matériau (effet photovoltaïque).

Le mouvement d'électrons sera exploité à travers la superposition de 2 couches de semi-conducteurs aux propriétés électriques différentes (positive « p » et négative « n »). La couche « n » contient donc une surcharge d'électrons. A la jonction des 2 couches (jonction p-n) apparaît un champ électrique (Zone de Charge d'espace ou ZCE).

Bombardée de photons, les charges de la ZCE se séparent, faisant apparaître une **tension électrique**. De façon imagée, si on relie les deux couches par un petit fil, les électrons emprunteront alors ce fil pour aller rejoindre les charges positives qui les attendent dans la zone « p ». Un circuit fermé de **courant continu** est alors formé [7].

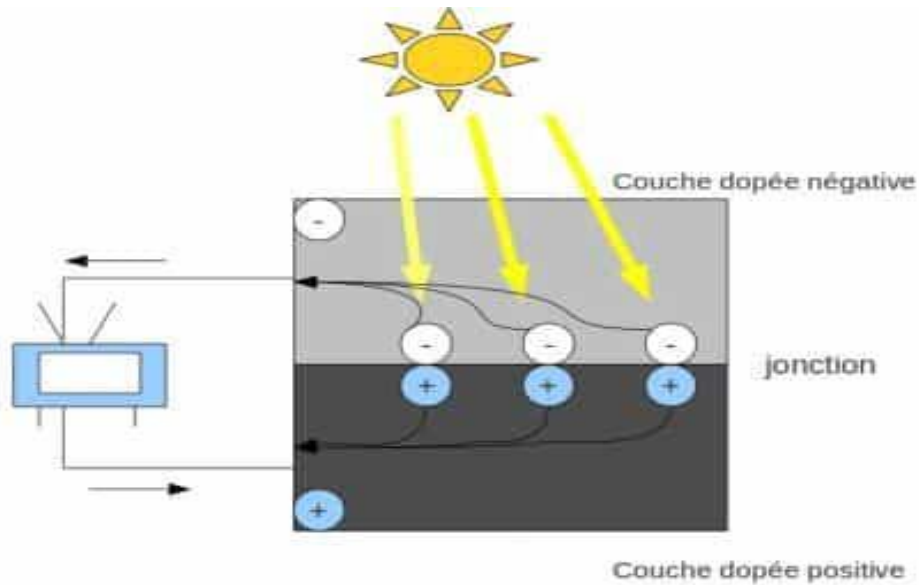


Figure 2.2. Principe photovoltaïque [7].

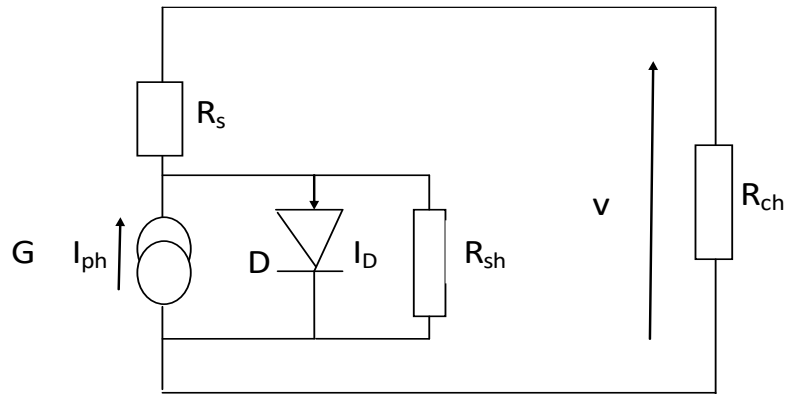
## 2.2. Modélisation du système :

### 2.2.1. Modèle du module PV :

Les générateurs photovoltaïques PV sont considérés ni des sources de tension, ni sources de courant, mais peuvent être estimés comme des sources de courant, contrôlés en tension, où le module solaire est l'unité de base. Il se compose de plusieurs cellules solaires de type monocristallin, permettant la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique [2].



Le schéma équivalent d'un module solaire peut se présenter en littérature sous diverses variantes (à une exponentielle, à deux exponentielle,...), alors que la configuration illustrée sur la figure 2.4, dite : à une seule diode reste la plus usuelle. Il est constitué d'une diode (D) caractérisant la jonction, une source de courant (G) caractérisant le photo courant, une résistance série  $R_s$  représentant les pertes par effet joule, et une résistance shunt ( $R_{sh}$ ) simulant les fuites entre la grille supérieure et le contact arrière de l'élément. Elle est généralement très supérieure à  $R_s$  et peut être placée indifféremment dans le schéma équivalent [2].



**Figure 2.4.** le Schéma équivalent du module solaire

La caractéristique est modélisée par une équation non linéaire de forme implicite, souhaitable pour les modules monocristallins :

$$I_{pv} = I_{cc} - I_o \left[ \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (2-1)$$

Idéalement, on peut négliger ( $R_s \cdot I_{pv}$ ) devant  $V_{pv}$ , puis travailler avec un modèle simplifié :

$$I_{pv} = I_{cc} - I_o \left[ \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_{sh}} \quad (2-2)$$

Comme la résistance shunt est beaucoup plus élevée que la résistance série, on peut encore négliger le courant dévié dans  $R_{sh}$ , et en définitif, l'équation (2-3) modélise avec exactitude la caractéristique électrique des modules monocristallins :

$$I_{pv} = I_{cc} - I_o \left[ \exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_{th}}\right) - 1 \right] \quad (2-3)$$

La tension thermique  $V_{th}$  et le courant d'obscurité  $I_o$  s'identifient par :

$$V_{th} = \frac{V_{op} + R_s I_{op} - V_{oc}}{\log\left(1 - \frac{I_{op}}{I_{cc}}\right)} \quad (2-4)$$

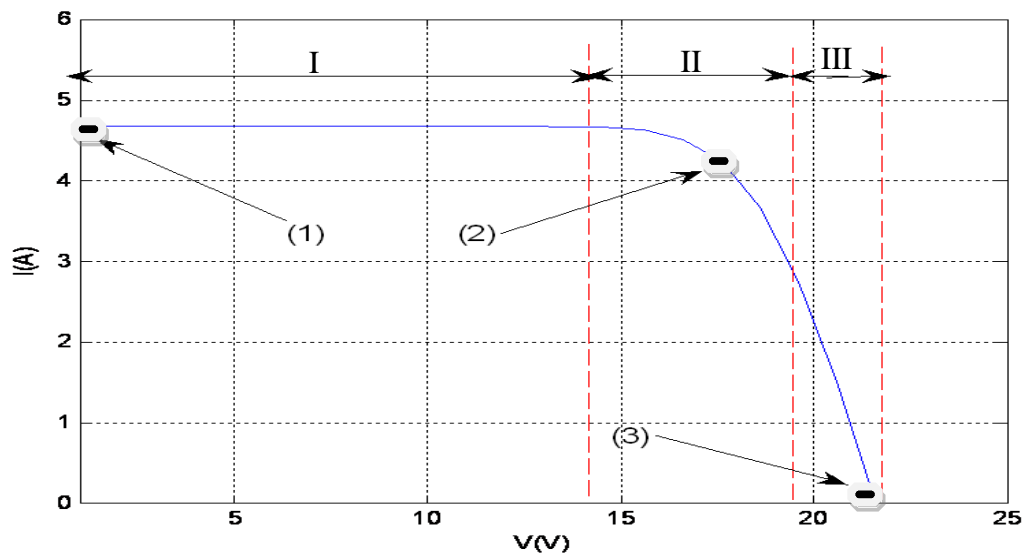
$$I_o = (I_{cc} - I_{op}) \exp\left(-\frac{V_{op} + R_s I_{pv}}{V_{th}}\right) \quad (2-5)$$

Pour tracer la caractéristique, il faut trois points de mesure, fournis par le constructeur (figure 5):

- Le point (1) : dite court-circuit ( $I_{cc}, 0$ ), qui correspond au courant maximum que peut fournir le module à tension nulle.
- Le point (2), dite le point optimum ( $I_{op}, V_{op}$ ), où le module délivre sa puissance maximale.
- Le point (3), à circuit ouvert ( $0, V_{oc}$ ), qui correspond à la tension maximale du module sans charge[2].

Sans tenir compte des valeurs de la tension et du courant, la caractéristique illustrée sur la figure 2.5 peut être lue en trois intervalles différents :

- 1) Intervalle I : le module solaire est considéré comme source de courant, où le courant est constant alors que la tension est variable.
- 2) Intervalle II : le module solaire n'est considéré ni comme source de courant ni source de tension. Cette partie constitue en fait la zone préférée.
- 3) Intervalle III : le module solaire est considéré comme une source de tension, où la tension est constante alors que le courant est variable[2].



**Figure 2.5** Caractéristique du module solaire aux conditions standards (E=1000W/m<sup>2</sup>, T=25°C)[2].

**- Pièce d'identité du module I-75/12 Isofoton :**

Dans la présente architecture, le module I-75/12 de la compagnie espagnole "Isofoton" est choisi comme l'élément constitutif de la source solaire, et où la table.1 illustre la pièce d'identité fournie, par le constructeur aux conditions standards (1000 w/m<sup>2</sup> et 25°C) :

**A. Influence de l'éclairement :**

La caractéristique (I-V) du module solaire est influencée principalement par la variation de deux entrées : l'éclairement solaire et la température de la cellule.

La figure 2.6 ((a) et (b)) présente les caractéristiques (I-V) et (P-V) respectivement pour différents niveaux d'éclairement. On peut voir que le courant de court-circuit varie en proportion du niveau de l'éclairement, alors que la tension en circuit est peu affectée. Par conséquent, la puissance extraite augmente en monotonie, comme on peut le distinguer sur la figure 2.6 [2].

Caractéristiques électriques	
Puissance maximale P <sub>max</sub> (Wc)	75
Courant de court-circuit I <sub>cc</sub> (A).	4,67
Tension en circuit ouvert V <sub>oc</sub> (V)	21,6
Courant Optimum I <sub>op</sub> (A)	4,34
Tension optimale V <sub>op</sub> (V)	17,3
Coefficients de température	
Coefficient de la variation du courant en fonction de la température	0.06 % / °c
Coefficient de la variation de la tension en fonction de la température	0.36 % /°c
Caractéristiques mécaniques	
Type de cellules	Monocristallin

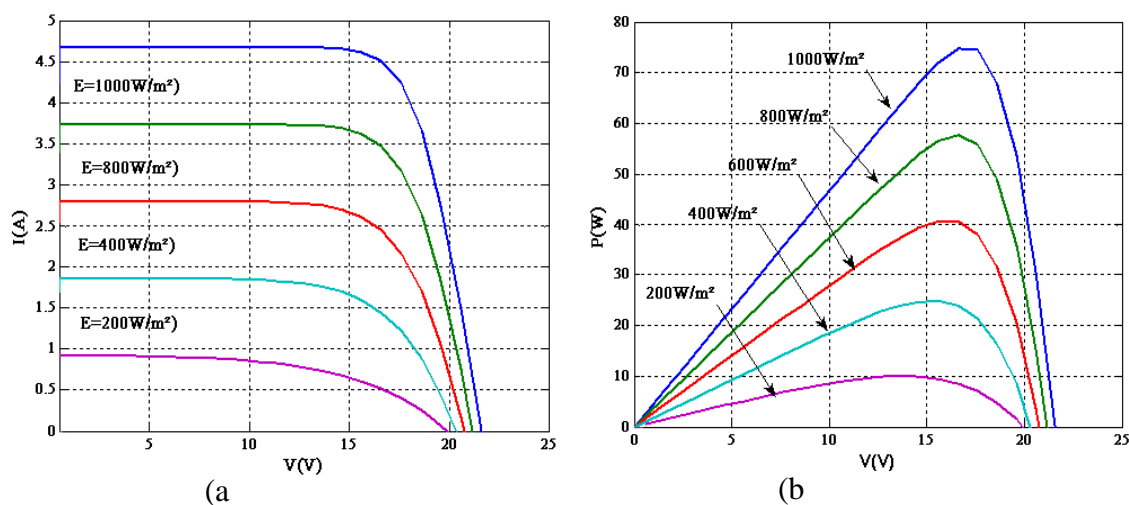
Nombre de cellules	36
Dimensions	1224,0 × 545.0 × 39.5mm (21,5 × 48,2 × 1,6 pouces)
Poids	9,0 kg

**Tableau 2.1** Pièce d'identité du module solaire « Isophoton I-75/12 » [2].

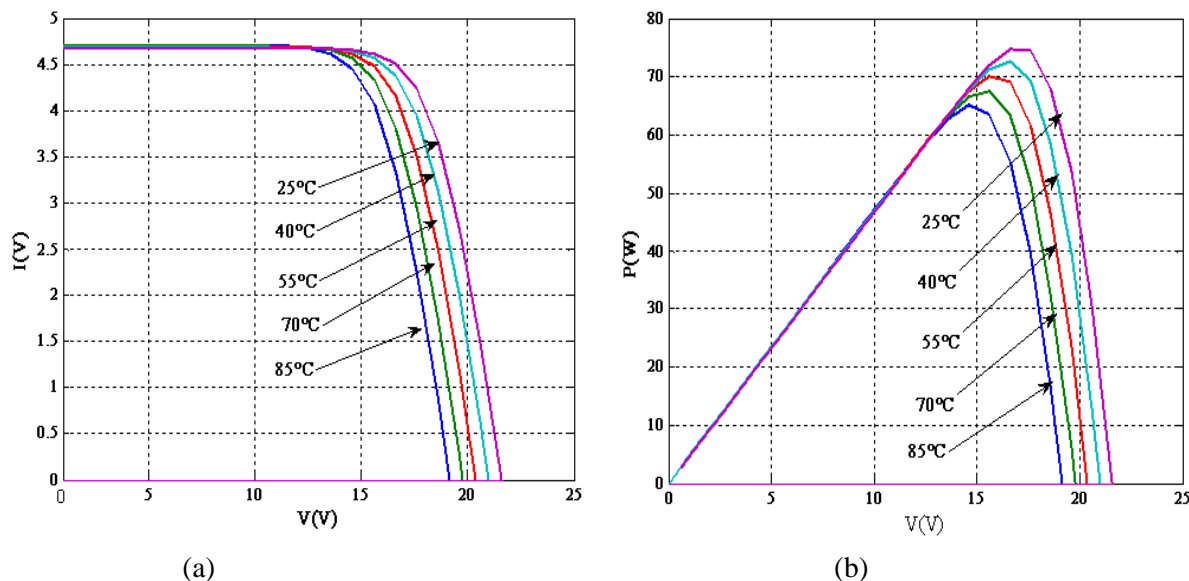
**B. Influence de la température :**

De manière analogue, la figure 2.7 ((a) et (b)) illustre les mêmes comportements du module PV, pour une augmentation graduelle de la température de la cellule, alors que le niveau d'éclairement est maintenu constant à sa valeur standard 1000 W/m<sup>2</sup>.

Le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, ce qui est dû à l'absorption accrue de la lumière. Toutefois, comme la température augmente la tension en circuit ouvert tend à diminuer, et par conséquent la puissance extraite tend alors à diminuer [2].



**Figure 2.6.** Caractéristiques électriques du module pour différentes valeurs d'éclairement à T=25°C: (a) courbe (I-V); (b) courbe (P-V) [2].



**Figure 2.7.**Caractéristiques électriques du module pour différentes valeurs température à  $E= 1000W/m^2$  : (a) courbe (I-V); (b) courbe (P-V)[2].

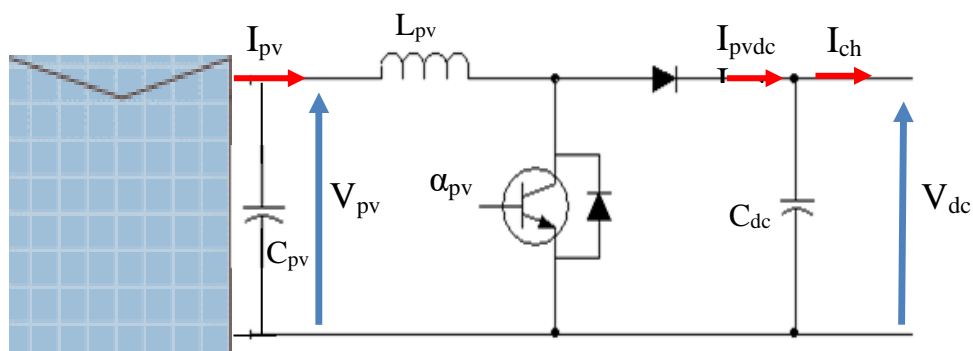
### 2.3. Modèle moyen du hacheur survolteur :

Sur la figure (2.8) est illustré le schéma du hacheur boost à liaison directe, composé de l'interrupteur commandé S, de la diode d'anti-retour D, et du dipôle de stockage ( $L_{pv}$ ,  $C_{dc}$ ). L'évolution en fonction du temps est basée sur les équations des éléments de stockage ( $L_{pv}$ ,  $C_{dc}$ ), et peut être représenté par une écriture d'état linéaire (2-17), ayant comme paramètre le rapport cyclique  $\alpha$ .

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{2-17}$$

Pour la synthèse de la matrice de transition A, et du vecteur B, les deux séquences de commutation sont considérées :

Où : x : vecteur d'état ;  $x = \begin{bmatrix} I_{pv} \\ V_{dc} \end{bmatrix}$ , et u : entrée de commande ;  $u = V_{pv}$ [2].



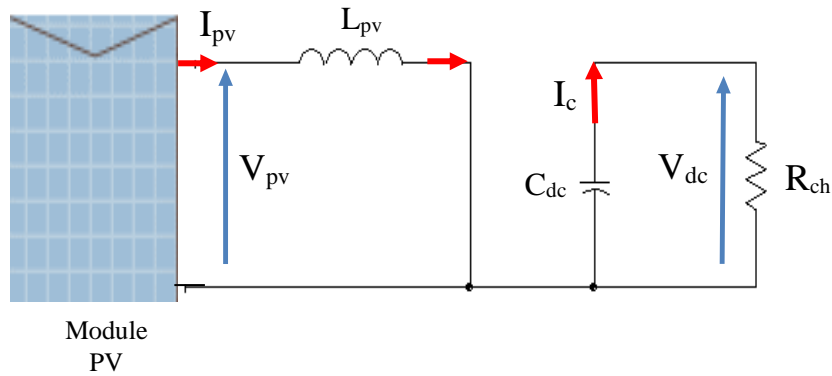
Hacheur survolteur

**Figure 2.8.** Schéma de principe d'un hacheur survolteur [2].

✚ **Séquences de fonctionnement et équations d'état:**

➤ Première séquence de conduction [0 à  $\alpha T$ ]:

Dans cette séquence, l'interrupteur S est fermé, et alternativement la diode D est bloquée. Cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance et le stockage d'une quantité d'énergie sous forme magnétique, alors que la charge se trouve déconnecté [2].



**Figure 2.9.** Circuit électrique équivalent de la première séquence de conduction [2].

Le comportement dynamique du circuit est régi par les équations :

$$V_{pv} - L_{pv} \frac{dI_{pv}}{dt} - R_{pv} I_{pv} = 0 \quad (2-18)$$

$$\dot{V}_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \frac{V_{dc}}{R_{ch}} \quad (2-19)$$

En considérant le courant  $I_{pv}$  et la tension de sortie  $V_{dc}$  comme variables d'état, l'équation (2-20) modélise la première séquence, et qui peut être réécrite implicitement dans (2-21).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_{pv}}{L_{pv}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{ch} C_{dc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{pv}} \\ 0 \end{bmatrix} V_{pv} \quad (2-20)$$

$$\begin{cases} \dot{x} = A_1 x + B_1 V_{pv} \\ y = D_1 x \end{cases} \quad (2-21)$$

Avec :  $D_1 = [0 \quad 1]$

Dans la suite du manuscrit,  $R_{ch}$  représente l'impédance d'entrée du côté du deuxième étage de conversion, identifiée par :

$$R_{ch} = \frac{V_{dc}}{I_{ch}} \quad (2-22)$$

➤ Deuxième séquence de conduction :

Dans cette phase, l'interrupteur S est bloqué. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans la bobine vers le condensateur  $C_{dc}$  (figure 2.10). De manière analogue les équations (2-24), (2-25) et (2-26) définissent le comportement dynamique du convertisseur pour cette séquence [2]:

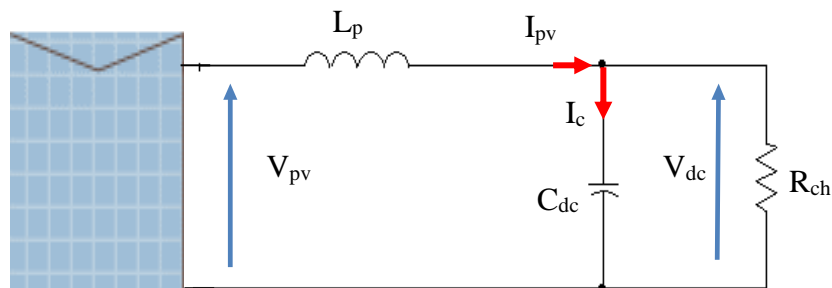


Figure 2.10. Circuit électrique équivalent de la deuxième séquence de conduction [2].

$$L_{pv} \frac{dI_{pv}}{dt} = V_{pv} - R_{pv} I_{pv} - V_{dc} = 0 \quad (2-23)$$

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = I_{pv} - \frac{V_{dc}}{R_{ch}} \quad (2-24)$$

Ou:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{pv}}{L_{pv}} & -\frac{1}{L_{pv}} \\ \frac{1}{C_{dc}} & -\frac{1}{R_{ch} C_{dc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{pv}} \\ 0 \end{bmatrix} V_{pv} \quad (2-25)$$

Qui peut être écrit implicitement, comme :

$$\begin{cases} \dot{x} = A_2 x + B_2 V_{pv} \\ y = D_2 x \end{cases} \quad (2-26)$$

✚ Modèle moyen

A partir des équations (2-21) et (2-25), on peut déduire l'équation d'état pour toute la période, qui consiste en fait, à une sommation des deux écritures d'état, pondérées par le rapport cyclique  $\alpha$  :

$$\begin{cases} \dot{x} = (A_1 x + B_1 V_{pv})\alpha + (A_2 x + B_2 V_{pv})(1-\alpha) \\ V_{dc} = (D_1 \alpha + D_2 (1-\alpha))x \end{cases} \quad (2-27)$$

Qui se met en définitif, sous:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{1-\alpha}{L_{pv}} x_2 + \frac{1}{L_{pv}} u \\ \dot{x}_2 = \frac{1-\alpha}{C_{dc}} x_1 - \frac{1}{R_{ch} C_{dc}} x_2 \end{cases} \quad (2-28)[2]$$

### 🚦 Séquences de conduction :

➤ Première séquence de conduction : [0 à  $\alpha T$ ]

Pendant cette séquence, les deux interrupteurs  $S_1$  et  $S_2$  sont fermés, et  $S_3$  et  $S_4$  sont ouverts.

Les équations dynamiques se résument comme suit ;

$$\begin{cases} U = L_f \frac{dI_f}{dt} + V_{ac} \\ C_f \frac{dV_{ac}}{dt} = I_f - \frac{V_{ac}}{R} \end{cases} \quad (2-29)$$

Qui se met sous la forme canonique suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = A_3 x + B_3 U \\ y = C_3 x \end{cases} \quad (2-30)$$

Où la matrice de transition  $[A_3]$ , le vecteur  $[B_3]$  et  $[C_3]$  s'identifiaient comme suit:

$$[A_3] = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & -\frac{1}{RC_f} \end{bmatrix}, [B_3] = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{pv}} \\ 0 \end{bmatrix}, [C_3] = [0 \quad 1]$$

$$x = [I_f \quad V_{ac}] ; y = V_{ac}.$$

➤ deuxième séquence de conduction : [ $\alpha T$  à  $T$ ]

Pendant cette deuxième séquence, alternativement :  $S_1$  et  $S_2$  sont ouverts, et  $S_3, S_4$  sont fermés. Durant cette période, le circuit reçoit une excitation négative ( $-U$ ), et le système dynamique sera, modélisé par les équations suivantes:

$$\begin{cases} -U = L_f \frac{dI_f}{dt} + V_{ac} \\ C_f \frac{dV_{ac}}{dt} = I_f - \frac{V_{ac}}{R} \end{cases} \quad (2-31)$$



Qui se met à son tour sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = A_4 x + B_4 U \\ y = C_4 x \end{cases} \quad (2-32)$$

Où :

$$[A_4] = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & -\frac{1}{RC_f} \end{bmatrix}, [B_4] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_{pv}} \\ 0 \end{bmatrix}, [C_4] = [0 \quad 1].$$

La déduction de la représentation d'état moyenne du convertisseur se fait par une sommation des équations d'état (2-30) et (2-32), pondérée par le rapport cyclique  $\alpha$  :

$$\dot{x} = (A_3 x + B_3 U)\alpha + (A_4 x + B_4 U)(1-\alpha) \quad (2-33)$$

Qui se met finalement sous :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{1}{L_f} x_2 + \frac{1}{L_f} U \\ \dot{x}_2 = \frac{\alpha}{C_f} x_1 - \frac{1}{RC_f} x_2 \end{cases} \quad (2-34)$$

Pour une modulation sinusoïdale ( $\alpha = \alpha_m \sin \omega t$ ), la valeur moyenne de la tension de sortie  $\bar{U}$  pendant une période de commutation est synthétisée ainsi :

$$\bar{U} = \alpha_m V_{dc} \sin \omega t \quad (2-35)$$

Nb : Dans le présent travail, ce modèle est retenu pour l'onduleur côté réseau [2].

## 2.4 Dimensionnement et choix des éléments :

### 2.4.1 Module photovoltaïques et convertisseur associé :

Afin de limiter la sollicitation du réseau électrique, le module PV est une source principale dans ce système hybride. Il sera appelé à couvrir environ 75% de la puissance crête de la charge. Ce choix permet d'éviter un surdimensionnement de la source solaire, et une contribution adéquates des autres sources.

A cet effet, le module I-75/12 de la compagnie Isofoton, de puissance crête de 75Wc est utilisé. Ce module solaire est connecté au bus continu, de manière analogue via un boost à liaison directe (figure.2.11). Dans le présent scénario, et pour permettre une utilisation fiable du panneau solaire, le convertisseur associé fonctionne en mode MPPT [2].

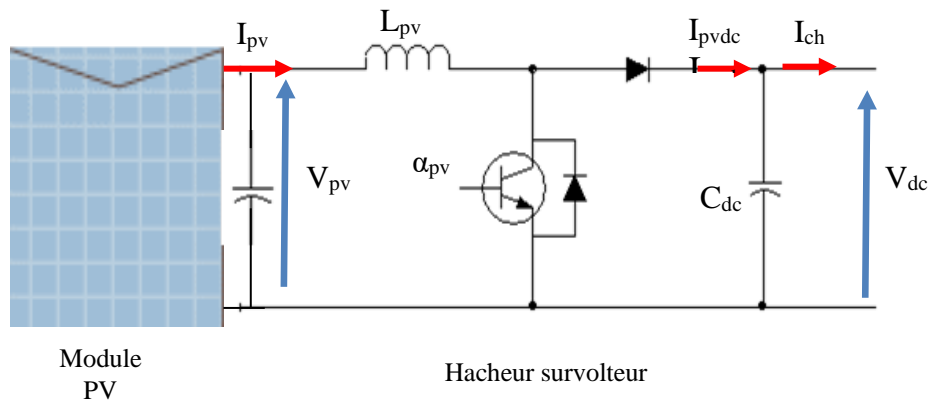


Figure 2.11. Convertisseur associé au module photovoltaïque [2].

#### 2.4.2 Réseau et convertisseur associé :

Dans le présent travail, l'onduleur côté réseau est un onduleur de tension monophasé lié au réseau via un filtre inductif ( $R_g, L_g$ ). C'est en fait un convertisseur réversible, commandé en MLI, et fonctionnant en redresseur/onduleur (voir figure 2.12). Du fait de la faible valeur de la tension du bus ( $V_{dc} = 50V$ ), et pour fonctionnement en redresseur, la tension de réseau doit être maintenue égale à  $\frac{\pi V_{dc}}{4}$ .

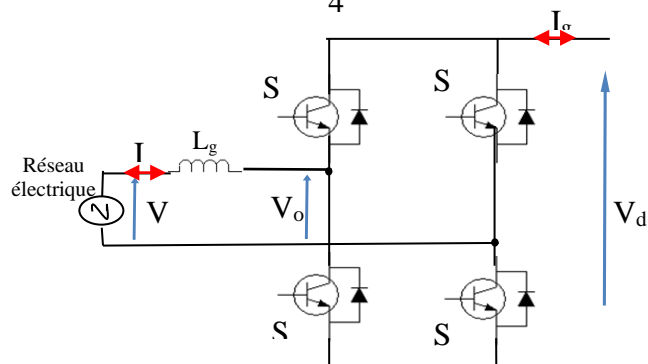


Figure 2.12. Schématique de l'onduleur côté réseau [2].

De ce fait, le réseau est ajusté à une tension efficace de 32V, 50 Hz. L'inductance  $L_g$  est identifiée par la fameuse équation, liant la valeur maximale de l'ondulation permise, la fréquence maximale de découpage, et ce pour une commande en hystérésis de l'onduleur [2] :

$$L_g = \frac{V_{dc}}{8f_{PWM}\Delta I} \quad (2-42)$$

Pour une tension du bus de 50V, une bande d'hystérésis est de 0.01, et une fréquence de

découpage est de 25kHz, l'inductance  $L_g$  est dimensionnée à 25mH.

L'inductance disponible dans laboratoire utilisée pour les expérimentations a une valeur de 10mH et possède une résistance série ( $R_g$ ) de  $0.9\Omega$ .

Enfin, l'équation dynamique de la liaison : convertisseur-filtre inductif et le réseau électrique est décrit par l'équation suivante :

$$V_g = R_g I_g + L_g \frac{dI_g}{dt} + V_o \quad (2-43)[2]$$

## 2.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, une description, ainsi qu'une modélisation explicite des différents composants du système de génération hybride ont été décrites, à citer : le module photovoltaïque, le réseau électrique, ainsi que les convertisseurs statiques introduits.

Cette modélisation nous permettra de prédire les performances du système une fois les approches de commande suggérées au chapitre suivant sont appliquées.

## Chapitre 3

# DESCRIPTION DES APPROCHES DE COMMANDE

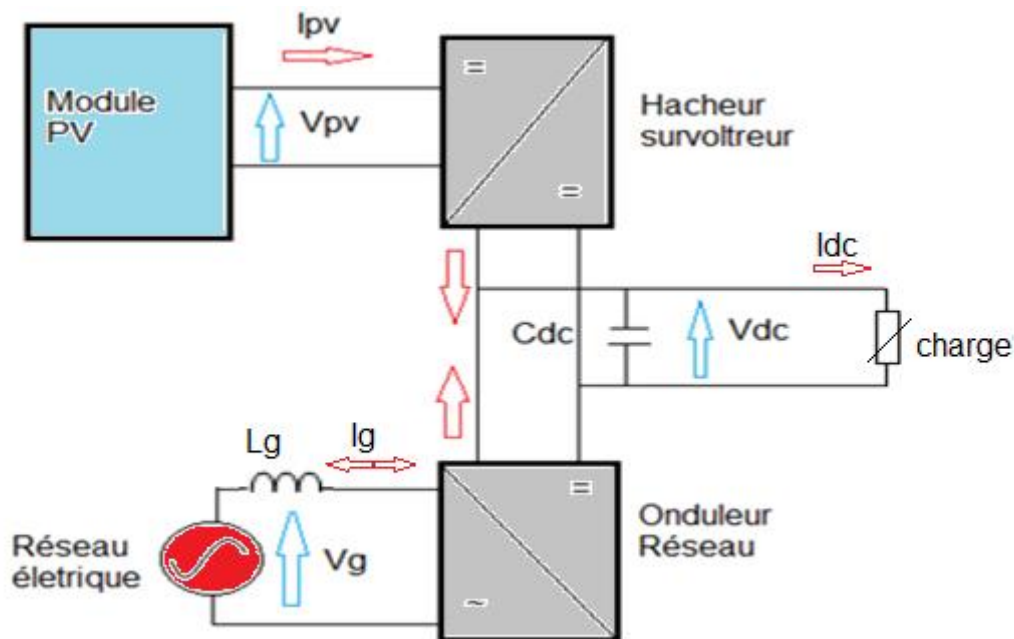
### 3.1 Introduction :

Dans ce chapitre, un ensemble de lois de commande permettant de gérer adéquatement le flux d'énergie des sources seront explicitement exposées. En fait, ces techniques ciblent principalement deux volets :

- 1) Une gestion d'énergie optimale du système hybride selon un profil de charge prédéfini.

Pour ce faire, le système hybride proposé dans cette thèse, précédemment décrit, est à nouveau rappelé dans la figure.3.1, où un ensemble de commandes rapprochées apparaissent. Il est à citer que l'architecture proposée regroupe une sources principales (module photovoltaïque).

L'objectif visé est d'alimenter la charge continue sur un site spécifique avec une énergie issue de la combinaison du photovoltaïque. Le problème est alors de trouver un équilibre entre l'apport énergétique et la demande: c'est la gestion optimale d'énergie.



**Figure 3.1** Schéma synoptique de l'installation hybride

### 3.2 Description du gestionnaire d'énergie proposé:

L'idée principale derrière cette recherche est de concevoir un système hybride pouvant utiliser le module PV. La recherche proposée est alors concentrée dans les parties suivantes :

- 1) Une permutation souple entre les modes de fonctionnement, servant à un écoulement fiable de flux d'énergie produit.

Notre gestionnaire qui a basé sur la régulation de bus contenue est devisé en deux mode :

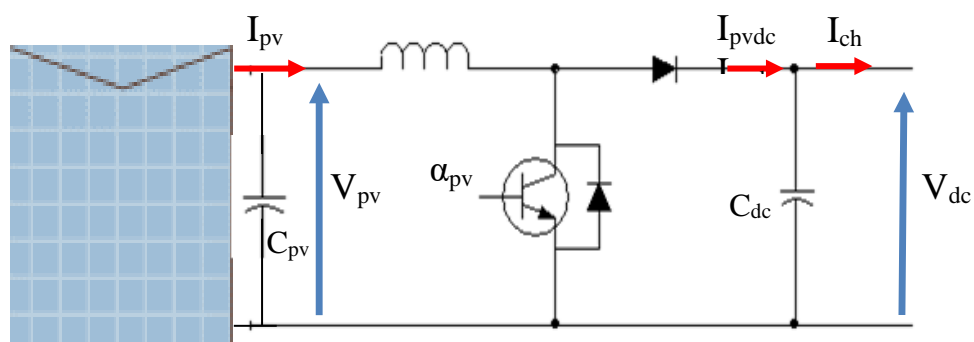
**Mode1** :  $P_{ch} \leq P_{pv}$  : L'excès de puissance injecté dans le réseau.

**Mode2** :  $P_{ch} > P_{pv}$  : Le réseau fourni le manque de puissance afin de satisfaire la demande de charge.

### 3.3 Commande rapprochée des convertisseurs statiques :

#### 3.3.1. Commande côté source photovoltaïque PV :

Présente le schéma de principe du module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation DC-DC, de type boost à liaison directe.



Algorithme MPPT

**Figure.3.2.** Schématique du contrôle MPPT du convertisseur coté PV.

#### A-Principe générale de la commande MPPT :

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

L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur CC / CC. L'algorithme de commande MPPT utilise, selon son type, des paramètres captés du GPV.

Dans notre étude, on a opté pour l'algorithme « Perturber et Observer » car c'est le plus utilisé de par sa simplicité.

#### B-L'algorithme Perturber et Observer ( P&O ) :

Comme son nom l'indique, cet algorithme est basé sur la perturbation du système à travers l'augmentation ou la diminution de la tension ou en agissant

directement sur le rapport cyclique du convertisseur CC-CC, puis par l'observation des effets de ces perturbations sur la puissance de sortie du panneau.

Le principe de cette commande consiste à perturber la tension  $V$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P$  qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure II-22. On peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V$  engendre un accroissement de la puissance  $P$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. À partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P(V)$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande.

Dès que le PPM est atteint, la tension oscille autour de la tension idéale  $V_{ppm}$ . Cette oscillation cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas de la perturbation. Un compromis devrait être trouvé entre les pertes en puissance et la rapidité de réponse de l'algorithme. Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues. Si la largeur du pas est très petite les pertes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation. La valeur pour la largeur idéale du pas dépend du système, elle doit être déterminée expérimentalement.

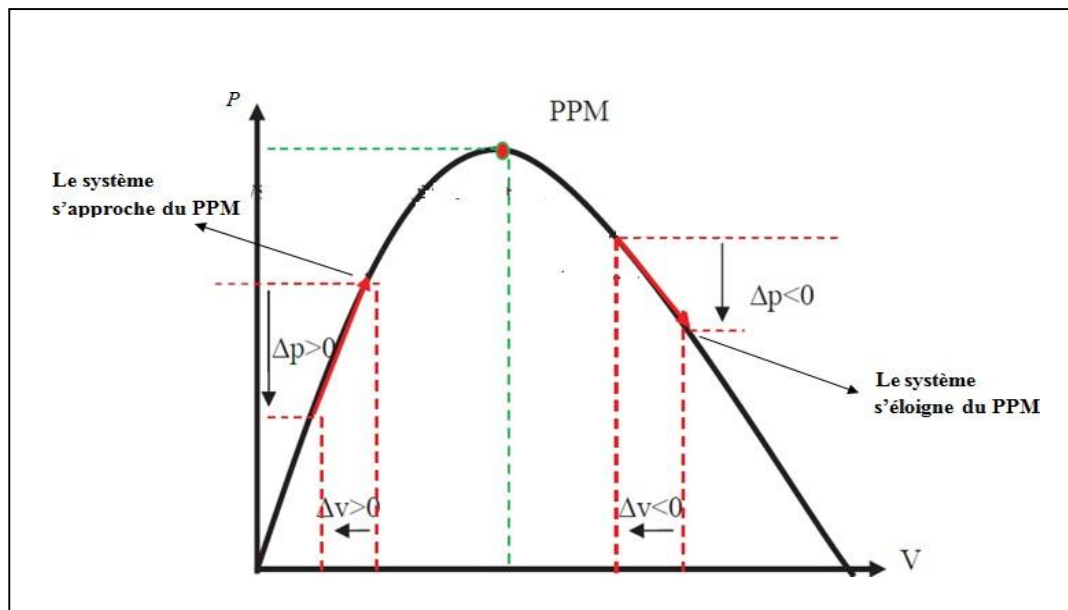


Figure 3.3. Caractéristique de fonctionnement de la méthode de P&O



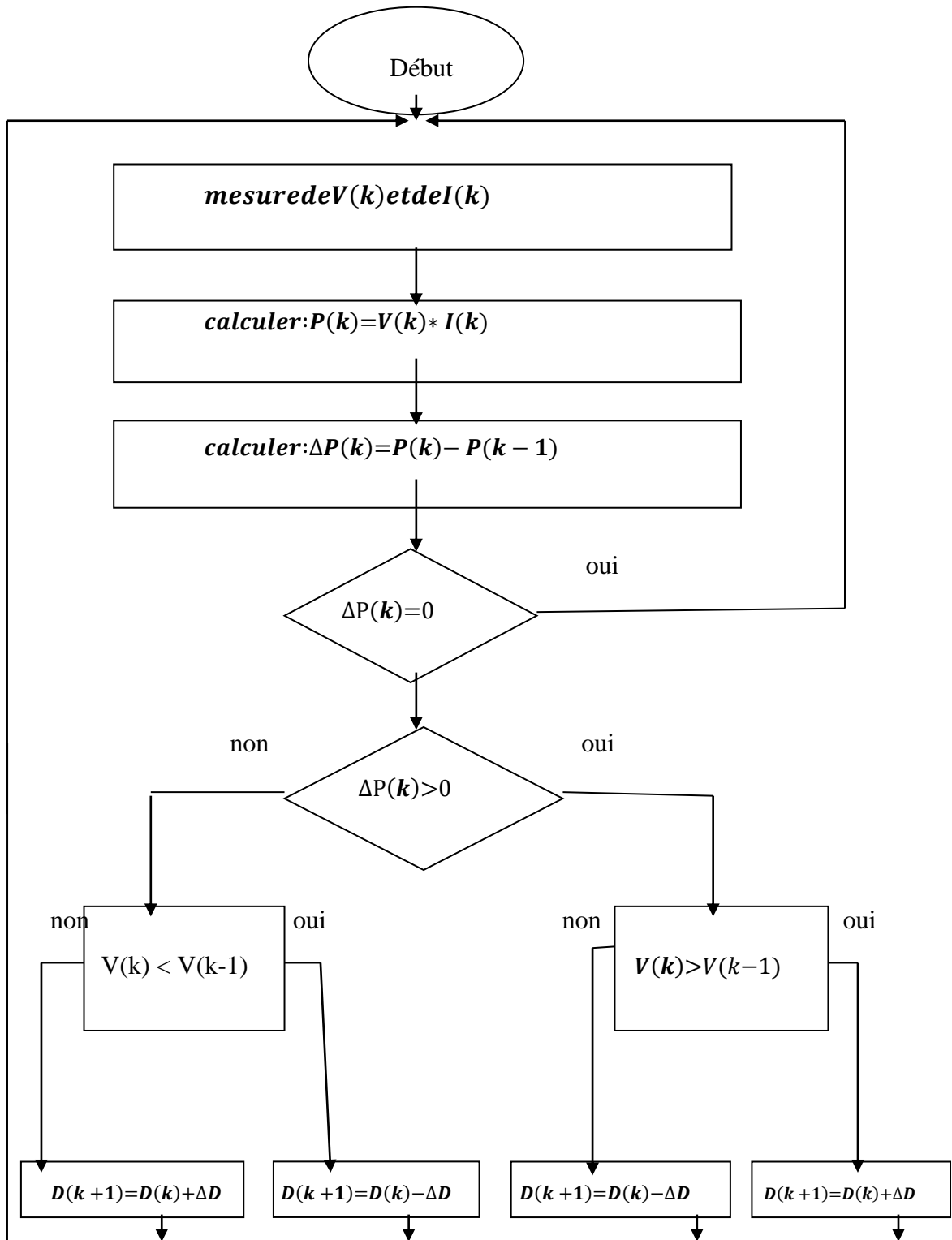


Figure 3.4. Organigramme de la méthode «P&O»

### 3.3.2 Commande côté réseau monophasé:

L'objectif du contrôle coté réseau monophasé, est de permettre un écoulement souple et fiable de la puissance produite ou injectée, tout en assurant une opération à facteur de puissance de valeur absolue unitaire (1 ou -1) .

Pour ce faire, la commande rapprochée de l'onduleur est obtenue via une régulation par hystérésis du courant du réseau.

Pour permettre ceci, le courant de référence est synthétisé ainsi :

$$I_{refg} = I_{amp-ref} \sin \theta \quad (3-1)$$

Où  $I_{amp-ref}$  et  $\theta$ , désignent respectivement la valeur crête du courant du réseau et sa phase. Le courant crête  $I_{amp-ref}$  est calculé selon l'hypothèse d'un transfert d'énergie sans pertes (onduleur idéal), alors que l'angle électrique du réseau  $\theta$  est déduite via un circuit de verrouillage de phase (PLL).

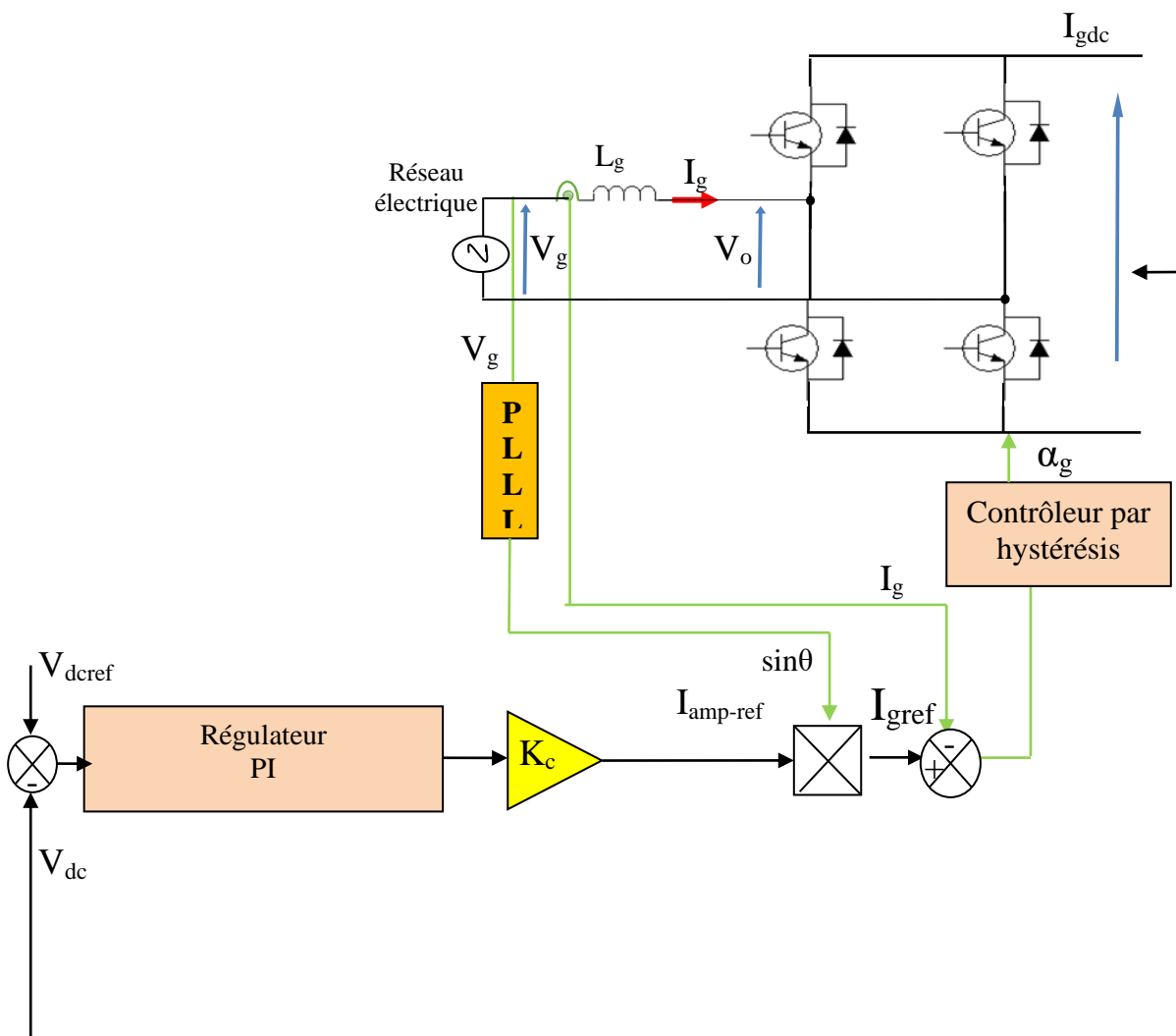
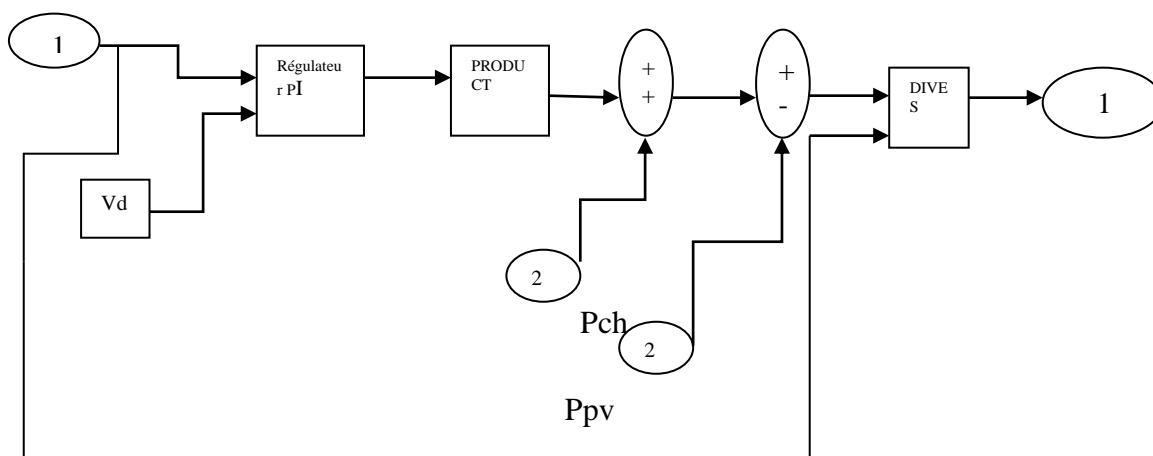


Figure.3.5. Schéma de principe du contrôle de l'onduleur du réseau

**A. Calcul de la valeur crête du courant de référence :**



**Figure.3.6.**Régulateur PI

En supposant un fonctionnement avec un facteur de puissance unitaire côté réseau, la valeur crête du courant  $I_{amp-ref}$  est liée à son image côté continu  $I_{gdc-ref}$  par l'équation linéaire :

$$I_{amp-ref} = K_c I_{gdc-ref} \quad (3-2)$$

Où la constante  $K_c$  est déduite sur la base d'un onduleur sans pertes [61]:

$$K_c = \frac{\sqrt{2}V_{dcref}}{V_{g-eff}} \quad (3-3)$$

**B. Estimation de l'angle  $\theta$  du réseau :**

Pour réaliser la commande par hystérésis de l'onduleur associé au réseau, il est nécessaire d'avoir l'angle  $\theta$  de la tension du réseau pour former le courant de référence, comme illustré sur la figure (3-5). Dans ce contexte, il est existé plusieurs méthodes classiques pour définir cet angle dans la littérature, telles que :

- Method PLL (Phase Locked Loop).

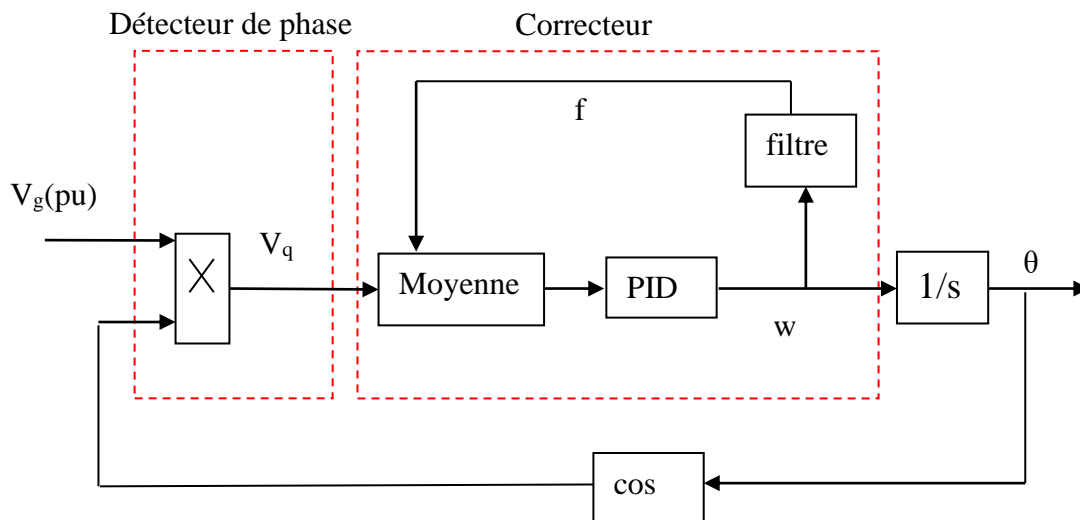
La méthode PLL est la plus efficace, et sa structure est très diversifiée, mais comprend toujours 3 blocs : détecteur de phase, correcteur, oscillateur commandé en tension.

Les PLL monophasés sont soumis aux mêmes problèmes que le triphasé avec une difficulté supplémentaire qui résulte du champ d'information plus réduit (une seule phase).

Dans notre application, une PLL dont la structure présentée dans la figure.3.7 est

utilisé, elle comprend deux blocs principaux:

- Bloc de détecteur de Phase.
- Bloc « Moyenne » dans le correcteur estime l'angle  $\theta$  d'une façon synchronisée.



**Figure.3.7.** Structure du PLL monophasé.

### C. Contrôle du courant par régulateur à hystérésis :

Cette méthode consiste à élaborer le signal MLI directement à partir de la grandeur à contrôler, par des décisions de type tout ou rien. L'avantage majeur est la très grande de mise en œuvre, alors que le principal inconvénient est l'absence de contrôle de la fréquence de commutation, ce qui rend délicat le dimensionnement. Le principe de ce contrôle consiste à maintenir le courant réel à l'intérieur d'une bande de largeur donnée, centrée autour du courant de référence (figure.3.8). Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation aux interrupteurs.

De ce fait, les conditions de commutation des deux Interrupteurs statiques  $K_i$  ( $i=a, b$ ) de l'onduleur sont définies en terme des états logiques correspondants :

$$K_i = +1 \text{ si } (I_{\text{refg}} - I_g) > \Delta I \quad (3-4)$$

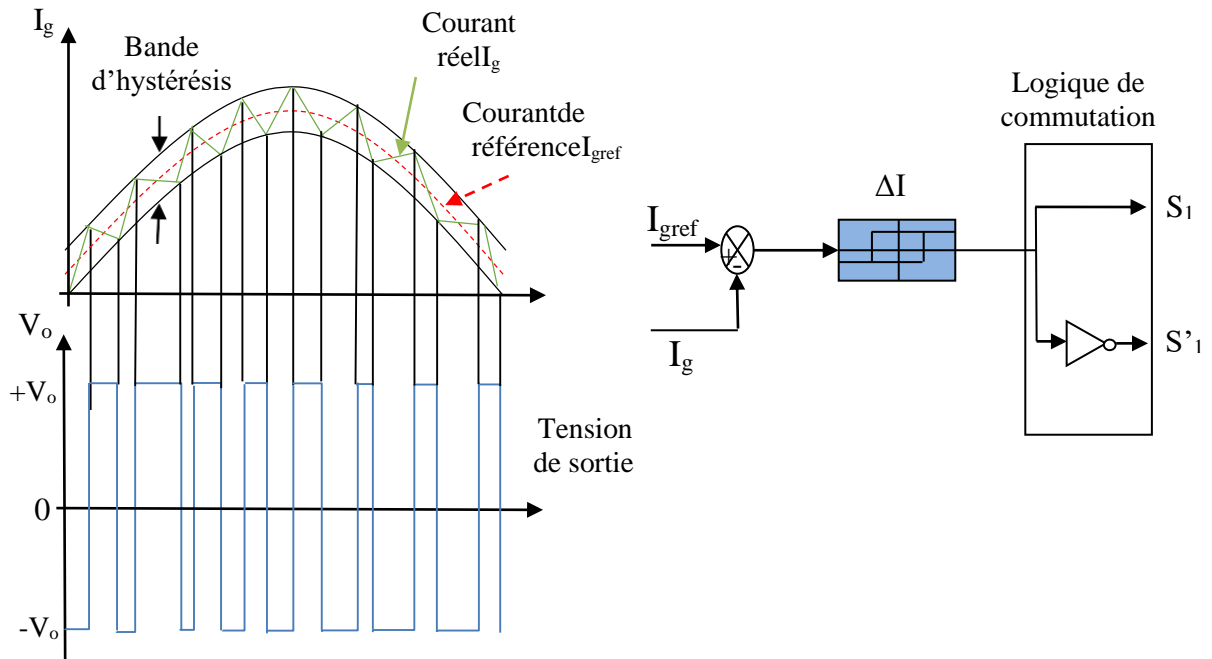
$$K_i = 0 \text{ si } (I_{\text{refg}} - I_g) < \Delta I \quad (3-5)$$

$$K_i = -K_{i-1} \text{ si } I_{\text{refg}} = I_g \quad (3-6)$$

Où :

- $I_g$  et  $I_{refg}$  désignent le courant du réseau mesuré et sa référence, respectivement.
- $\Delta I$  : bande d'hystérésis, choisie de façon à ne pas dépasser la fréquence de commutation admissible des semi-conducteurs.

Dans la présente application,  $\Delta I$  est choisie égal à 0.01.



**Figure.3.8.**Commande par Hystérésis.

### 3.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, une présentation explicite des lois de commande permettant une opération optimale du système hybride a été décrite. En fait, ses algorithmes de contrôle permettent une fois implémentés de gérer les quantités de puissances fournies par chaque source, ainsi qu'un pilotage adéquat des différents convertisseurs statiques introduits.

# Chapitre04: Résultats de simulations

### 4.1.Introduction:

Dans le présent chapitre ,on va mettre en exergue les performances du système de génération photovoltaïque issues des modes de fonctionnement et des lois de commande présentées au chapitre précédent .

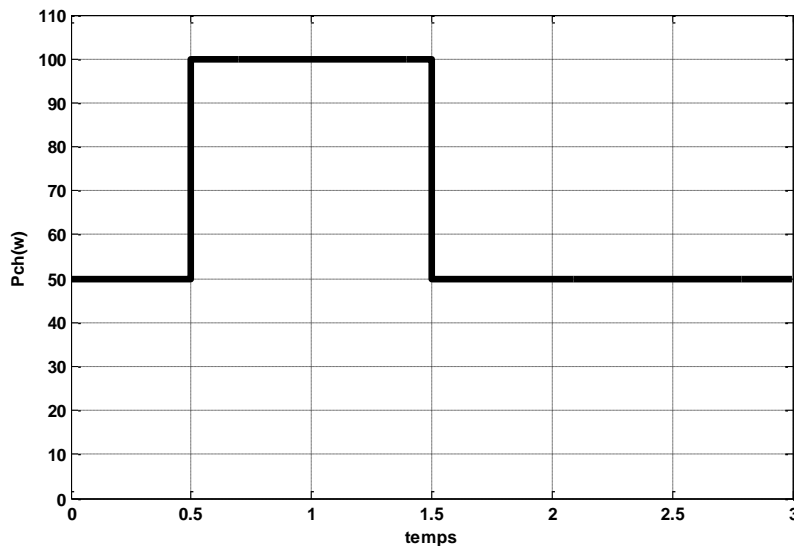
### 4.2.Résultats de simulations:

On présentera en fait dans ce qui suit un ensemble de graphes démontrant les performances du système.

A cet effet, une intervalle de temps de 3s simule la demande da la charge. Pour permettre de visualiser de près les performances dynamiques et statiques, cette demande est choisie variable en créneaux de façon aléatoire, où la charge demande 50W entre 0 et 0.5s ; 100W entre 0.5s et 1.5s ; et enfin 50W entre 1.5s et 3s, comme illustré respectivement sur la figure.4.1 et le tableau.4.1.

Temps(s)	0-0.5	0.5-1.5	1.5-3
$P_{ch}$ (W)	50	100	50

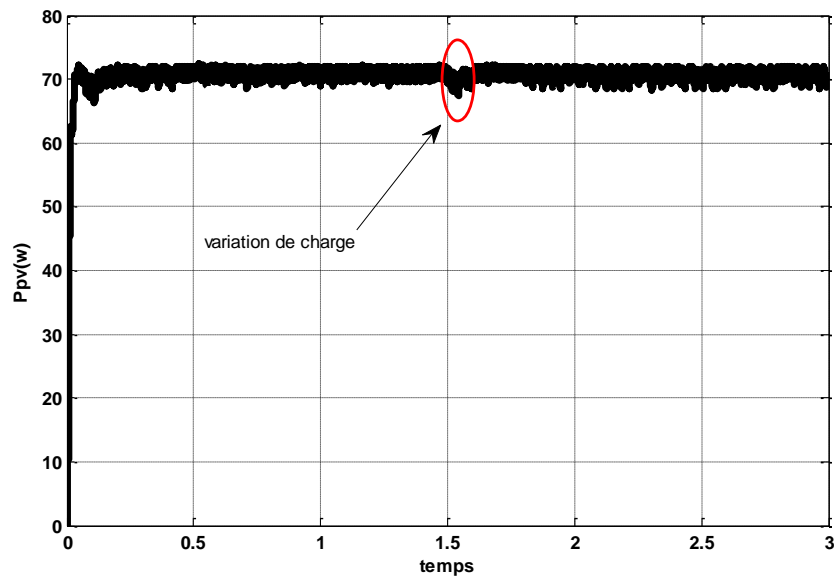
**Tableau 4.1** représentée la puissance par rapport le temps



**Figure.4.1.** Puissance demandée par la charge (W).

- Sur la figure.4.2 est illustrée l'allure de la puissance extraite du module solaire  $P_{pv}$  à température et éclairement sont fixes qui sont respectivement ( $25^{\circ}\text{C}$ ,  $1000\text{w/m}^2$ ), on remarque que pendant toute l'intervalle de temps, la puissance extraite du module est maintenue optimale (environ de 75W), ce qui prouve par

conséquent l'efficacité de l'algorithme MPPT basé sur la méthode perturbation et observation qui est décrite au chapitre 3.



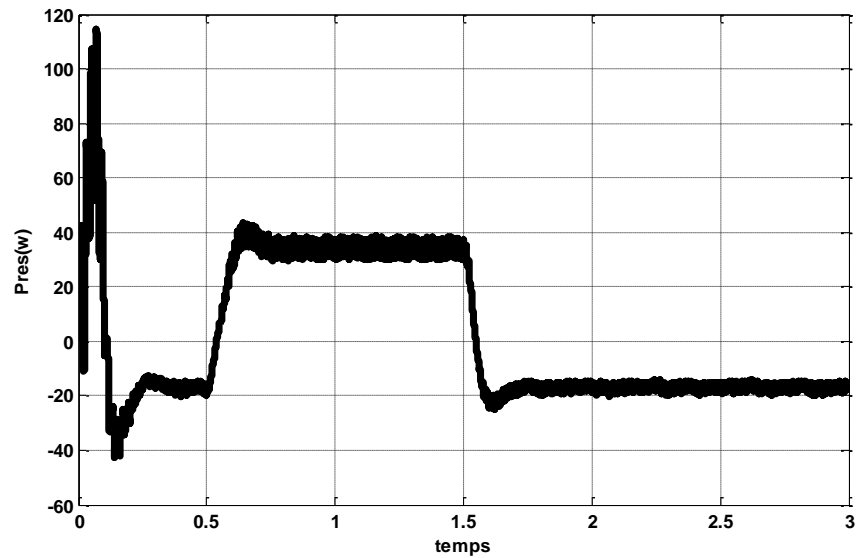
**Figure.4.2.** puissance du module PV (W)

- Durant le premier palier de la demande de la charge (jusqu'à 0.5s), cette dernière appelle moins de puissance, Le système est alors en mode 1 ( $P_{ch} \leq P_{pv}$ ), et l'excès de puissance est injecté dans le réseau électrique, comme observé sur la figure.4.3 (puissance du réseau négative). La tension et le courant du réseau sont alors maintenus en opposition de phase, comme montré sur la figure.4.6. et le convertisseur coté réseau opère alors en onduleur autonome. Ce changement du facteur de puissance d'un mode à un autre, peut-être simplement justifier par le basculement du courant crête du réseau  $I_{amp-ref}$ , qui change de signe une fois le mode de fonctionnement change, comme indiqué sur la figure.4.7.
- Durant le deuxième palier de la demande de la charge (jusqu'à 1.5s), le système bascule en mode 2 voir figure 4.7. le réseau délivre la quantité d'énergie qui ne peut être fournie par le module PV (figure.4.3.).

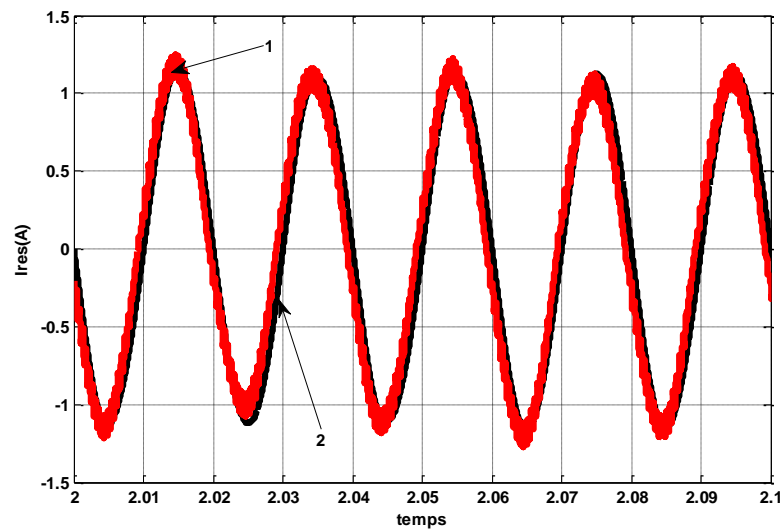
On remarque que le courant est maintenu en phase avec la tension du réseau (figure.4.5), indiquant un fonctionnement à facteur de puissance unitaire, et le convertisseur coté réseau opère alors en redresseur commandé.



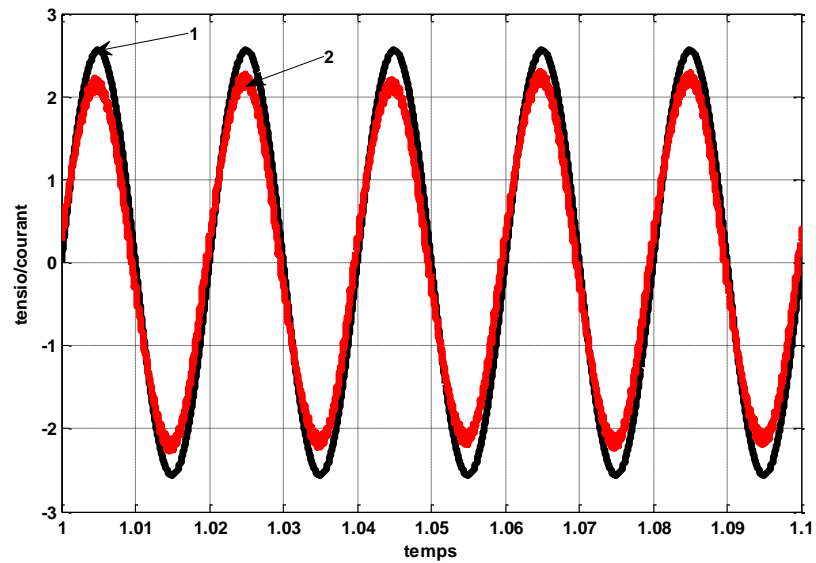
On peut clairement remarquer que le courant mesuré embrase d'une manière satisfaisante sa référence (figure.4.4), prouvant ainsi l'efficacité du régulateur à hystérésis introduit.



**Figure.4.3.** puissance du réseau (W).

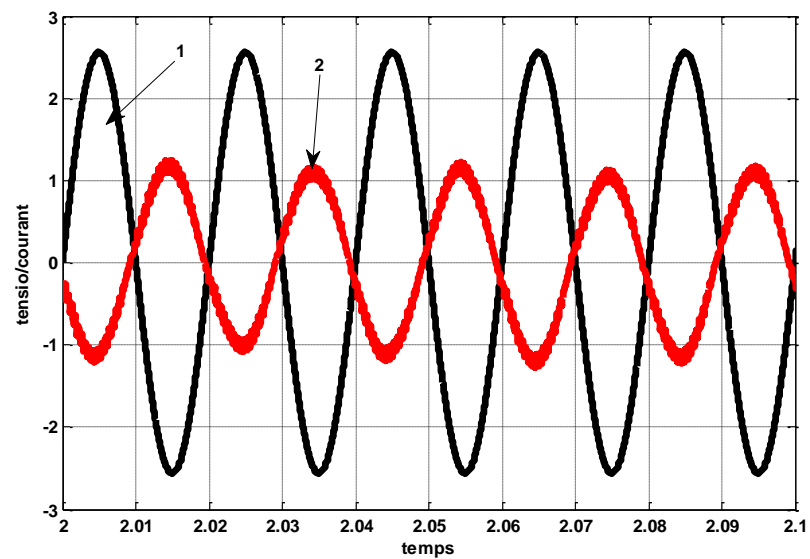


**Figure.4.4.** Allure du courant du réseau : (1) courant mesuré et (2) référence.(mode 2)



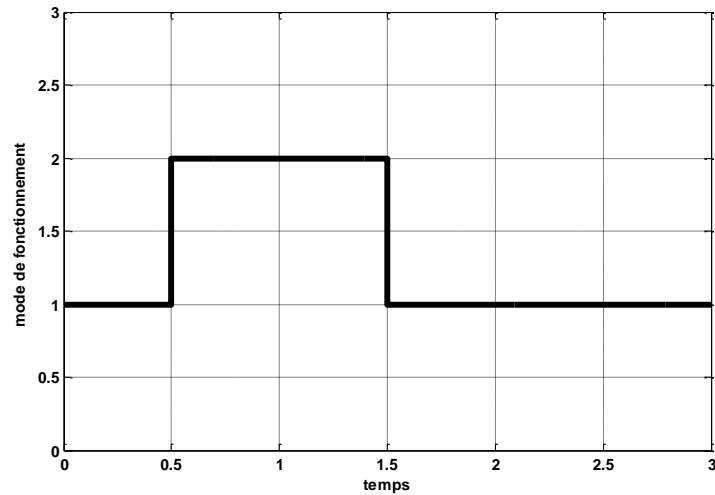
**Figure.4.5.** Allure de la tension et du courant du réseau (mode 1)

(1)Tension de réseau (20V/1div), (2) référence de courant de réseau (1A/1div).



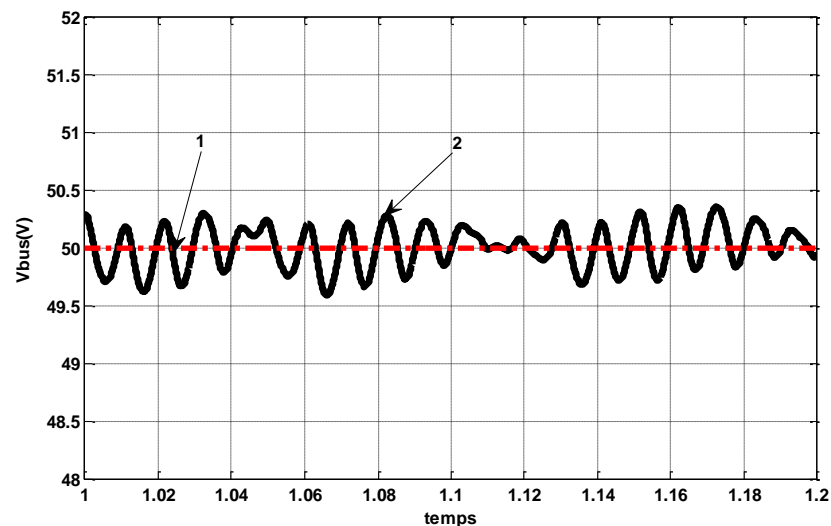
**Figure.4.6.** Allure de la tension et du courant du réseau (mode 1)

(1)Tension de réseau (20V/1div), (2) référence de courant de réseau (500mA/1div).



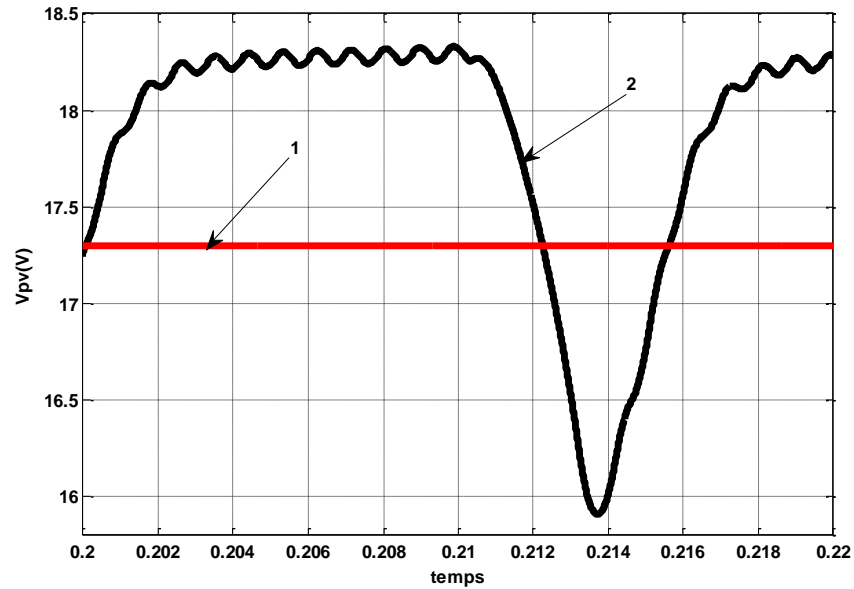
**Figure.4.7.** Mode de fonctionnement

- Sur les figures.4.8 est montrée la trace de la tension du bus continu, issus de la gestionnaire d'énergie basé sur la régulation de bus contenu on remarque de ce graphe, que Le régulateur PI arrive à maintenir constante la tension du bus continu à une valeur de référence de 50V sur toute l'intervalle de temps (figure.4.8), sans dépassement notable lors du changement du mode, et par conséquent un écoulement souple des différentes quantités d'énergie produites vers la charge est garantie.

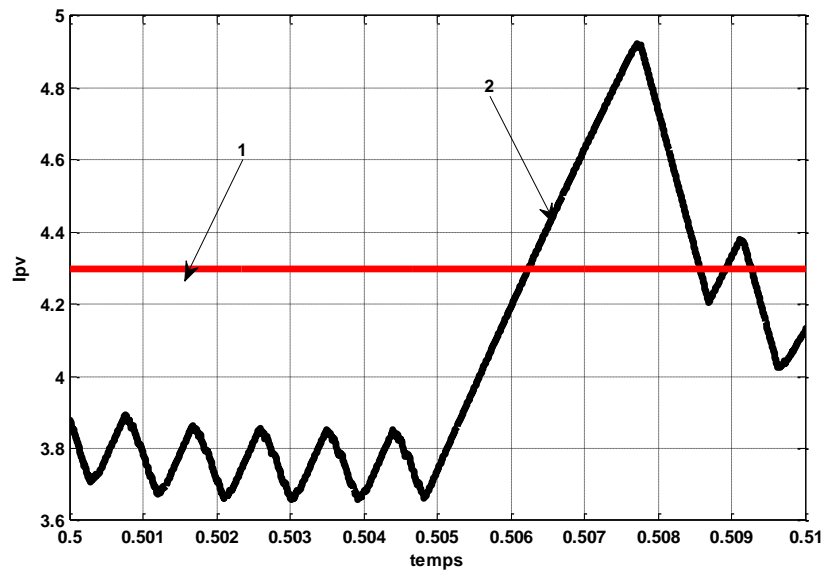


**Figure.4.8.** Allure de la tension du bus continu : (1) référence, (2) tension mesurée.

- Sur la figure (4-9) et (4-10) sont représentés respectivement la tension et le courant du générateur photovoltaïque, de ces graphes on peut constater que la tension et le courant embrassent les valeurs optimales ce qui prouve que l'efficacité de la commande MPPT par la méthode perturbation et observation.



**Figure.4.9.** Allure de tension de panneau photovoltaïque : (1) référence et (2) tension mesuré.



**Figure.4.10.** Allure du courant de panneau photovoltaïque : (1) référence et (2) courant mesuré.

---

### **4.3. Conclusion :**

Dans ce chapitre et pour éclairer les performances du système énergétique propose, nous avons présente une série de courbes accompagnées des commentaires des Coubes d'énergie ,de courant et de tension, pour clarifier le tableau ainsi que pour mettre en évidence la crédibilité de la thèse.

---

## Conclusion Générale:

Dans le présent travail, une gestion optimale d'énergie d'un système de génération hybride alimentant une charge résistive variable été présentée. Le travail a ciblé en résumé un écoulement souple des flux d'énergie des différentes entités de puissance (sources), suivant un scénario de deux modes de fonctionnement. Pour ce faire, l'architecture de gestionnaire a été présentée selon une régulation de la tension du bus continu et, permettant un fonctionnement adéquat du système en mode normal.

En outre, l'objectif était l'étude, la commande et simulation d'un ensemble de techniques de contrôle, inspirées de la méthode de perturbation et observation pour extraire le point optimum, et celles basées sur la théorie du contrôle (régulateur PI) pour commander les différents convertisseurs statiques impliqués.

De ce fait, un ensemble de conclusion ont été déduites :

- 1) Le gestionnaire d'énergie proposés est prouvé une efficacité notable, et une robustesse vis-à-vis de la variation de la charge, et ce par la permutation souple entre les différents modes de fonctionnement.
- 2) Le réseau électrique (source d'appoint) a été activé avec succès, où un écoulement bidirectionnel de l'énergie du/vers le réseau a été constaté lors de la variation de la demande.
- 3) La régulation de la tension du bus par régulateur PI, a prouvé des performances notables lors des changements des modes d'opération, en qualité de poursuite et réponse dynamique.
- 4) Le régulateur MPPT par méthode perturbation et observation a permis une extraction maximale de la puissance fournie par le module solaire pour toute la période de simulation.

Ainsi, le présent travail ouvre un ensemble de perspectives à citer :

- Implanter d'autres stratégies de gestion d'énergie, issues de la commande robuste ou de l'optimisation globale, et en faire des comparaisons.
- Augmentation de la taille du système, tout en ajoutant d'autres sources.

- [1] [Les énergies renouvelables | Mission énergie \(goodplanet.org\)](#)(la date de consultation 12/05/2022) .
- [2] TIAR Mourad, Thèse présentée en vue de l'obtention Du diplôme de Doctorat Gestion Optimale D'énergie d'une Chaîne de Production Electrique Renouvelable année 2017.
- [3] Abdelatif Mohamed, Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister Commande et motorisation des véhicules électriques.
- [4] TIAR Mourad, Mémoire présenté en vue de l'obtention Du Diplôme de Magister Commande Optimale d'un Système de Génération Photovoltaïque Hybride Mourad année 2011.
- [5] Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 N°3 (2013) 485 – 498.
- [6] [Cellule photovoltaïque – Principe de fonctionnement | Planète Énergies \(planete-energies.com\)](#)( la date de consultation 15/05/2022) .
- [7] [Principe de fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques - Solaire Guide \(solaire-guide.fr\)](#)( la date de consultation 11/06/2022) .
- [8] [1.JPG \(413×306\) \(googleusercontent.com\)](#)( la date de consultation 05/06/2022) .
- [9] [solarpanelsystem.JPG \(1744×550\) \(solarreviews.com\)](#) (la date de consultation 18/05/2022).

---

**Résumé :**

Le travail présenté dans ce mémoire traite une étude et simulation d'une gestion d'énergie optimale d'un système de génération hybride à petite échelle. Le système est constitué d'un module photovoltaïque, soutenu par un réseau électrique monophasé, alimentant une charge variable à courant continu. Un algorithme de gestion d'énergie basé sur la régulation de bus continu assure au système de passer intelligemment entre deux modes de fonctionnement, en fonction de la demande de la charge et de la disponibilité de la source solaire. A cet effet, le réseau est appelé à couvrir le manque signalé par le module photovoltaïque, qui délivre en permanence son maximum, via une MPPT. En outre, la philosophie du réseau intelligent (SMART GRID) est vérifiée, où un écoulement dans les deux sens de la puissance du réseau, est assuré par les différentes lois de commande suggérées. Pour tester l'efficacité des algorithmes proposés, les résultats de simulations obtenus avec un profil de charge donnée sont présentés et commentés.

**Mots clés :** photovoltaïque, gestion d'énergie, MPPT

**Abstract :**

The work presented in this thesis deals with study and simulation of an optimal power management of a small-scale generation hybrid system. The system consists of a photovoltaic array, supported by a single-phase grid that supplies a DC load. The supervisory algorithms based of voltage DC bus regulation guarantee the system to switch smart between two operation modes, according to the load demand, depending of the PV availability. Obviously, the PV side DC-DC converter is controlled to track permanently the maximum power point by using a MPPT method; whereas, the grid converter is tuned to cover the remaining power, or alternatively, injecting the exceeding power to the utility. To prove the effectiveness of the proposed algorithms, simulation results obtained with a given load profile are presented and commented.

**Keywords:** Photovoltaic, Power management, MPPT



**الملخص:**

يتعامل العمل المقدم في هذه الأطروحة مع دراسة ومحاكاة إدارة الطاقة المثلى لنظام توليد هجين صغير الحجم. يتكون النظام من وحدة كهروضوئية، مدعومة بشبكة كهربائية أحادية الطور ، توفر حمل تيار مباشر متغير. تضمن خوارزمية إدارة الطاقة القائمة على تنظيم ناقل التيار المستمر أن يقوم النظام בזكاء بالتبديل بين وضعي التشغيل ، اعتمادًا على طلب الحمل وتوافر مصدر الطاقة الشمسية. ولهذه الغاية ، يُطلب من الشبكة تغطية النقص الذي تشير إليه الوحدة الكهروضوئية ، والتي توفر الحد الأقصى بشكل دائم ، عبر MPPT. بالإضافة إلى ذلك، يتم التحقق من فلسفة الشبكة الذكية (SMART GRID) ، حيث يتم ضمان تدفق ثنائي الاتجاه لطاقة الشبكة من خلال قوانين التحكم المختلفة المقترحة. لاختبار فعالية الخوارزميات المقترحة، تم الحصول على نتائج المحاكاة باستخدام يتم عرض ملف التعريف والتعليق عليه.

**الكلمات المفتاحية:** الكهروضوئية ، إدارة الطاقة ، MPP