

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique



Université de Jijel

جامعة جيجل

Faculté des Sciences et Technique

كلية العلوم و التكنولوجيا

Département d'Automatique

قسم الاليات

*Mémoire De Fin D'études Pour L'obtention Du Diplôme
De Master*

Option : Automatique et Système

Thème

*Modélisation et commande
robuste des systèmes
photovoltaïques*

Proposé par:

M^{me} Saifia Dounia

Présenté par :

Boukerroum Imène

Année Universitaire : 2017- 2018

Remerciement

*Je remercie «Allah » qui a donné du courage
et de la Volonté d'avoir réussi dans mon étude.*

*Je remercie m'encadreur Dounia Saïfia qui a proposé ce
sujet de recherche, et qui m'a encadré et surtout pour
ses conseils, sa compréhension, sa gentillesse, ses
encouragements.*

*Je remercie toutes ma famille et en particulier mon père et
ma mère qui ont m'encouragé par tous les moyens,
matériels et morales notamment par leur supplication.*

*Je veux remercier aussi toute personne qui a contribué de
loin ou de près à la réalisation de ce mémoire, et tous les
enseignants de l'automatique de l'université de Jijel.*

*Enfin, mon respect aux membres
de jury d'avoir accepté d'honorer ce jury pour examiner
mon mémoire.*

Merci à tous

Dédicace

Je dédie ce travail

A ma mère et mon père

*Qui ont sacrifié leur vie a fin de me voir devenir
ce que je suis*

A M^{me} Dounia Saïfia et tous mes enseignants

A tous mes amies fidèles

A tous ceux qui me sont chers

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
CHAPITRE 1 : Introduction aux systèmes photovoltaïques	
1.1 Introduction	3
1.2 Ressources énergétiques	3
1.3 Energie solaire	4
1.3.1 Energie solaire en Algérie	4
1.4 Générateur photovoltaïque	5
1.4.1 Cellule photovoltaïque.....	6
1.4.2 Module photovoltaïque.....	6
1.4.3 Champ photovoltaïque.....	7
1.4.4. Différents types de PV.....	7
1.5. Avantages et inconvénients de l'énergie PV	7
1.5.1. Inconvénients.....	9
1.5.2. Avantages.....	10
1.6. Conclusion.....	9
CHAPITRE 2 : Modélisation du système photovoltaïque	
2.1 Introduction	11
2.2 Modélisation du module photovoltaïque	11
2.2.1 Modèle électrique réel	11
2.2.2 Cellule idéale	12

2.3 Constitution d'un module PV	13
2.3.1 Association des cellules PV en série :	13
2.3.2 Association des cellules PV en parallèle :	14
2.3.3 Association série/parallèle des cellules PV	14
2.4 Influence de la température sur un système PV	15
2.5 Influence de l'éclairement sur un système PV	17
2.6 Module PV avec convertisseur DC-DC	18
2.6.1 Module PV avec convertisseur Boost.....	18
2.6.2 Module PV avec convertisseur Buck.....	21
2.7 Résultats de simulation	23
2.7.1 Avec convertisseur Boost	23
2.9.2 Avec convertisseur Buck	26
2.8 Conclusion.....	29
 CHAPITRE 3 : Représentation multi-modèle d'un système photovoltaïque	
3.1 Introduction	28
3.2 Principe de l'approche multi-modèles (MM).....	28
3.3 Présentation de la structure MM	28
3.4 A propos de l'approche MM	29
3.5 Différentes structures multi-modèle	30
3.5.1 Structure couplée	30
3.5.2 Structure découplée	31

3.5.3 Structure hiérarchisée	31
3.6 Multi-modèle de Takagi-Sugeno (TS)	31
3.6.1 Définition d'un modèle flou TS.....	31
3.6.2 Constriction des modèles flous TS	33
3.6.2.1 Par identification	33
3.6.2.2 Par linéarisation	33
3.6.2.3 Par l'approche des secteurs non linéaires	34
3.7 Représentation du système photovoltaïque.....	35
3.7.1 Représentation de système PV avec convertisseur Boost	35
3.7.2 Représentation de système PV avec convertisseur Buck	37
3.8 Résultats de simulation	39
3.8.1 Convertisseur Boost.....	39
3.8.2 Convertisseur Buck.....	42
3.9 Conclusion.....	46
 CHAPITRE 4 : Poursuite de la puissance optimale du système photovoltaïque	
4.1 Introduction	47
4.2 Analyse de la stabilité.....	47
4.2.1 Stabilité au sens de Lyapunov	47
4.2.2 Types des fonctions de Lyapunov	48
4.2.2.1 Fonction quadratique.....	49
4.2.2.2 Fonctions polyquadratique	49

4.2.2.3 Fonction affine paramétrique	49
4.2.2.4 Fonction continues par morceaux	49
4.3 Inégalités linéaires matricielles (LMI).....	50
4.4 Problèmes LMI.....	50
4.5 Stabilité quadratique.....	51
4.5.1 Stabilité globale	51
4.5.2 Stabilité locale (Ellipsoïde invariant)	52
4.6 Complément de schur	52
4.7 Stabilisation par retour d'état.....	53
4.7.1 Commande PDC	53
4.7.2 Commande CDF	53
4.8 Stabilisation du système PV	53
4.9 Poursuite de la puissance optimale du système photovoltaïque.....	55
4.9.1 Recherche d'état optimal	56
4.9.2 Modèle de référence	57
4.9.3 Commande H_∞	59
4.10 Résultats de simulation	62
4.11 Conclusion	67
Conclusion générale	68

Notations

Ensembles et domaines

\mathbb{R}	Ensembles des nombres réels.
\mathbb{R}^p	Ensembles des nombres réels.
C^k	Ensemble des fonctions continument dérivable.

Acronymes

PV	Photovoltaïque.
LMI	Linear Matrix Inequality.
TS	Takagi Sugeno.
MPPT	Maximum Power Point Tracking.

Liste des figures

Figure 1.1 Schéma d'une cellule élémentaire	6
Figure 1.2 Module photovoltaïque	7
Figure 1.3 Champ photovoltaïque	7
Figure 1.4 Différents types de systèmes photovoltaïques autonomes.....	8
Figure 1.5 Systèmes photovoltaïque connectés au réseau.....	8
Figure 1.6 Schéma décrivant un système hybride.....	9
Figure 2.1 Circuit équivalent d'une cellule réel	11
Figure 2.2 Circuit équivalent d'une cellule idéal	13
Figure 2.3 Connexion série des cellules PV	14
Figure 2.4 Connexion parallèle des cellules PV.....	14
Figure 2.5 Connexion parallèle des cellules PV.....	15
Figure 2.6 Caractéristique du courant en fonction de la température	16
Figure 2.7 Caractéristique de la puissance en fonction de la température	16
Figure 2.8 caractéristique du courant en fonction de l'éclairement	17
Figure 2.9 Caractéristique de la puissance en fonction de l'éclairement	17
Figure 2.10 Schéma d'un convertisseur Boost.....	18
Fig 2.11 Schéma équivalent d'un convertisseur Boost ou l'interrupteur est fermé.....	19
Figure 2.12 Schéma équivalent d'un convertisseur Boost ou l'interrupteur est ouvert	19
Figure 2.13 Schéma d'un convertisseur Buck.....	21
Figure 2.14 Schéma équivalent d'un convertisseur Buck ou l'interrupteur est fermé	22

Figure 2.15 Schéma équivalent d'un convertisseur Buck ou l'interrupteur est ouvert	22
Figure 2.16 Tension : $V_{pv}(t)$	25
Figure 2.17 Courant : $i_l(t)$	25
Figure 2.18 Tension : $V_{c2}(t)$	26
Figure 2.19 Puissance : P_{pv}	26
Figure 2.20 Courant : $i_l(t)$	27
Figure 2.21 Tension : $V_{pv}(t)$	28
Figure 2.22 Tension : $V_b(t)$	28
Figure 3.1 Approche MM	29
Figure 3.2 Tension : $V_{pv}(t)$	40
Figure 3.3 Courant : $i_l(t)$	40
Figure 3.4 Tension : $V_{c2}(t)$	42
Figure 3.5 Puissance : P_{pv}	42
Figure 3.6 Courant : $i_l(t)$	43
Figure 3.7 Tension : $V_{pv}(t)$	44
Figure 3.8 Tension : $V_b(t)$	44
Figure 3.9 Puissance : P_{pv}	45
Fig 4.1 Ellipsoïde dans le cas d'un système à trois dimensions	52
Fig 4.2 Processus de commande MPPT	56
Fig 4.3 La forme d'impulsion PWM	56
Fig 4.4 Tension de référence et la tension optimale	59

Fig 4.5 Puissance de référence et puissance optimal	59
Fig 4.6 Courant de référence et courant optimal.....	59
Fig4.7 Poursuite de la tension maximal	64
Fig 4.8 Commande : $u(t)$	64
Fig 4.9 Tension : V_{pv}	65
Fig 4.10 Puissance : P_{pv}	65
Fig 4.11 Courant : i_l	66
Fig 4.12 Puissance : P_{pv}	66
Fig 4.13 Tension : V_{pv}	67
Fig 4.14 Courant : i_l	67

Introduction générale

Introduction générale

La production d'énergie est un fait de grande importance dans la vie de l'humanité. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrielles ne cessent pas d'augmenter. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir des sources fossiles. Les sources d'énergie conventionnelles (fossiles), obtenues de notre environnement, tendent à échapper avec une rapidité relative due à ses utilisations irrationnelles par l'humanité. Cette consommation incontrôlée, certainement mène à un accord avec notre système écologique à l'instabilité, elle donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc augmentation de pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures. Ce danger oblige la recherche d'autre source d'énergie pour permettre une réduction dans l'utilisation des sources naturelles fossile [1].

Dans ce contexte, le monde a changé la direction vers l'utilisation des sources d'énergies renouvelables à ressources illimitées. Parmi ses ressources, on trouve l'énergie solaire qui apparaît comme une importante source. A travers l'effet photovoltaïque, l'énergie contenue dans la lumière solaire peut être convertie directement en une énergie électrique. Les trois genres de systèmes photovoltaïques (PV) que l'on rencontre généralement sont les systèmes autonomes, hybrides et connectés à un réseau. Les deux premiers sont indépendants du service public de distribution d'électricité; on les retrouve souvent dans les régions éloignées.

L'énergie photovoltaïque est une source d'énergie intéressante qu'elle soit utilisée sur une large plage d'applications et satisfaire des contraintes du coût, le système devrait présenter une bonne exploitation des cellules PV. Donc, il faut extraire le maximum de puissance. Cependant que la conception des systèmes photovoltaïques optimisés est une tâche très difficile. En effet, la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement et de la température [2].

La poursuite du point maximal de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable (énergie solaire, énergie éolienne...) de type photovoltaïque. Ces techniques se

différent entre eux par leurs complexités, nombre des capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application [3].

A cause de la nature non linéaire du système photovoltaïque, il est difficile de commander ce système, c'est pourquoi on a proposée dans ce projet une commande à base de la représentation multi-modèles. En effet, l'approche multi-modèle permet de fournir une représentation efficace du système non linéaire sous forme d'interpolation entre des modèles linéaires invariants valides dans une zone de fonctionnement. Dans la littérature, on peut trouver de nombreuses structures des multi-modèles. Cependant, on peut distinguer deux classes principales : la classe de multi-modèles à états découplés et la classe de multi-modèles à état unique. Les modèles de Takagi-Sugeno (T-S) appartiennent à la classe de multi-modèles à état unique. Ces modèles permettent de représenter de manière précise un système non linéaire par une structure simple en se basant sur des modèles linéaires interpolés entre eux par des fonctions non linéaires positives et bornées. Leur structure particulière permet l'extension de certains résultats obtenus dans le cadre des systèmes linaires. C'est la raison pour laquelle, nous proposons d'utiliser ce modèle dans l'étude de la stabilité et de la stabilisation des systèmes photovoltaïques.

L'objectif principale de ce travail est de développer une commande robuste basée sur le critère H_∞ pour commander un convertisseur intermédiaire qui permette au générateur photovoltaïque de délivrer sa puissance maximale.

Le mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre expose un aperçu sur les types des énergies, le système photovoltaïque et son principe de fonctionnement, à la fin on cite ses avantages et ses inconvénients.

Le deuxième chapitre parle sur les caractéristiques des systèmes PV et la modélisation non linéaire sans et avec convertisseur.

Le troisième chapitre englobe quelques notions sur les modèle T-S, une représentation multi-modèle des systèmes photovoltaïques.

Le quatrième chapitre présente les conditions de stabilisation LMI (Linear Matrix Inequality) des systèmes photovoltaïques via la commande PDC (Parallel Distributed Compensation), associée d'une action intégrale.

Chapitre 01
Introduction aux
systemes
photovoltaïques

1.1 Introduction

Depuis l'avènement de l'ère industrielle au milieu du *XIX^{ième}* siècle, l'humanité ne cesse d'accroître sa consommation d'énergie sous des formes multiples pour répondre à la complexification des sociétés (industrie, transports, chauffage, électricité, etc.). Ce développement n'a pu se produire que grâce à l'utilisation massive des combustibles dits fossiles, essentiellement le charbon et le pétrole. Or, nous savons maintenant que la combustion de ceux-ci « nous détraque le climat » alors que les besoins énergétiques continuent d'augmenter toujours. Pour résoudre ce problème, les sources d'énergies fossiles sont remplacés par des sources renouvelables comme l'énergie solaire.

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui présente chaque année environ 15000 fois de la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que consomme l'humanité en une année [4].

Dans ce chapitre, nous présentons un bref rappel sur les ressources d'énergie renouvelable, et l'énergie solaire. Ensuite, nous présentons des généralités sur les systèmes photovoltaïques. Et on termine par citer les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

1.2 Ressources énergétiques

Les ressources énergétiques de la planète se présentent sous deux formes différentes: ressources *renouvelables* (énergies de flux) et ressources *non renouvelables* (énergies de stock).

- **Ressources non renouvelables**

Les ressources non renouvelables sont des ressources qui se renouvellent moins vite qu'on ne les consomme et de manière négligeable à l'échelle humaine. Ils possèdent des propriétés énergétiques intrinsèques. On trouve deux familles d'énergie non-renouvelable : des ressources *fossiles* qui renferment de l'énergie chimique comme le pétrole, le gaz et le charbon et une ressource *fissile* qui renferme de l'énergie nucléaire on cite comme exemple l'uranium.

- **Ressources renouvelables**

Les ressources renouvelables sont des ressources qui sont exploitables sans limite de durée à l'échelle humaine. Parmi ses ressources on trouve : *l'air* (l'air en mouvement possède de l'énergie mécanique qui permet de faire tourner les pales éolienne) donne l'énergie éolienne, le *Soleil* (le soleil renferme de l'énergie nucléaire transformée en énergie thermique par des réactions de fusion est donne de l'énergie solaire. Une partie de cette énergie est transférée sur Terre par rayonnement) donne l'énergie solaire, *l'eau* (l'eau en mouvement possède de l'énergie mécanique) donne l'énergie hydraulique, Le *monde vivant, végétal* et *animal*, possède de l'énergie chimique, *le sol* renferme de l'énergie thermique.

1.3 Energie solaire

Le soleil peut satisfaire tous nos besoins, si nous apprenons à exploiter rationnellement l'énergie qu'il rayonne vers la terre. Il brille dans le ciel depuis presque 5 milliards d'années et les scientifiques ont calculé qu'il est à la moitié de son existence. Nous avons du mal à imaginer qu'au cours d'une année le soleil diffuse vers la terre quatre mille fois plus d'énergie que celle consommée par toute la population mondiale. De plus il faut considérer que cette source d'énergie est gratuite, propre et inépuisable. Cette énergie pourrait par ailleurs nous libérer de notre dépendance aux énergies fossiles ou aux autres alternatives peu sûres ou polluantes. Cette énergie peut être directement exploitée ou transformée en électricité. Une fois cette électricité produite, et contrôlée, il est possible de la vendre à l'exploitant du réseau électrique [5].

1.3.1 Energie solaire en Algérie

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	désert
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau 1.1 Potentiel solaire en Algérie

D'après le ministère de l'énergie, Le potentiel photovoltaïque de l'Algérie est l'un des plus importants au monde. C'est-à-dire que non seulement il y a du soleil abondamment, mais aussi de vastes territoires. Donc, à la fois, il y a la profondeur stratégique, la position géographique, la capacité solaire et le besoin pour le marché algérien.

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an}$ au Nord et $2263\text{ kWh}/\text{m}^2/\text{an}$ au Sud du pays.

Le tableau 1.1 présente les régions en Algérie et le potentiel pour chaque région, ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh [6].

1.4 Générateur photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au un volt.

Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un champ photovoltaïque. La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées [7].

1.4.1 Cellule photovoltaïque

Dans un système photovoltaïque la cellule joue le rôle d'une diode, elle est constituée de deux couches minces et d'un semi-conducteur qui sont dopées différemment. Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons, les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel.

L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu.

Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches du semi-conducteur. L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche anti reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée [8], [9]. La figure (1.1) représente un échantillon schématique d'une configuration de la cellule photovoltaïque.

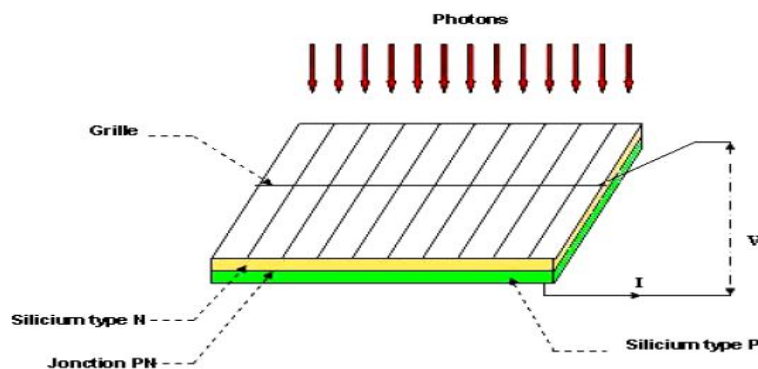


Figure 1.1 Schéma d'une cellule élémentaire

1.4.2 Module photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est l'élément élémentaire d'un module, donc le module photovoltaïque est un ensemble des cellules bien organisé pour obtenir plus de puissance. La tension augmente si plusieurs cellules sont connectées en série et le courant reste constant tandis que la connexion parallèle des cellules fait croître le courant et réserver la même tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène -vinylacétate) et protégé sur la surface avant d'un verre, trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique[10].



Figure 1.2 Module photovoltaïque

1.4.3 Champ photovoltaïque

Le champ photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique. La figure (1.3) représente un champ photovoltaïque.



Figure 1.3 Champ photovoltaïque

1.4.4 Différents types des systèmes photovoltaïques

Il existe trois types de PV :

- **Les systèmes autonomes**

Les systèmes autonomes assurent un fonctionnement autonome (utilisation d'énergie solaire uniquement). Ils sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau).

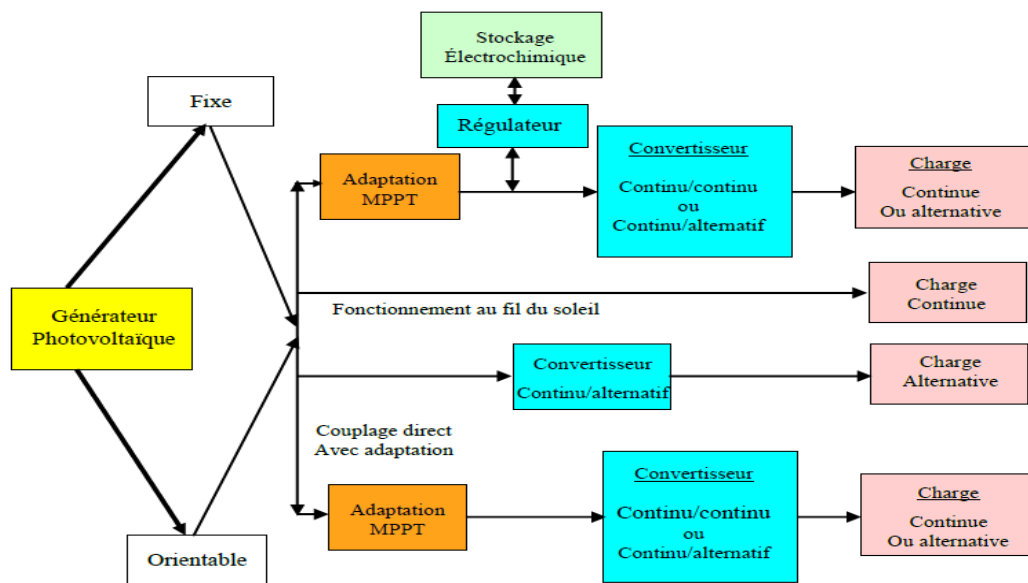


Figure 1.4 Différents types de systèmes photovoltaïques autonomes

- **Systèmes connectés au réseau**

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau; L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Le photovoltaïque raccordé au réseau est constitué de systèmes de production d'électricité photovoltaïque; qui peuvent être centralisés (centrale solaire photovoltaïque) ou décentralisés (toits de maisons individuelles, de mairies, de granges, etc.).

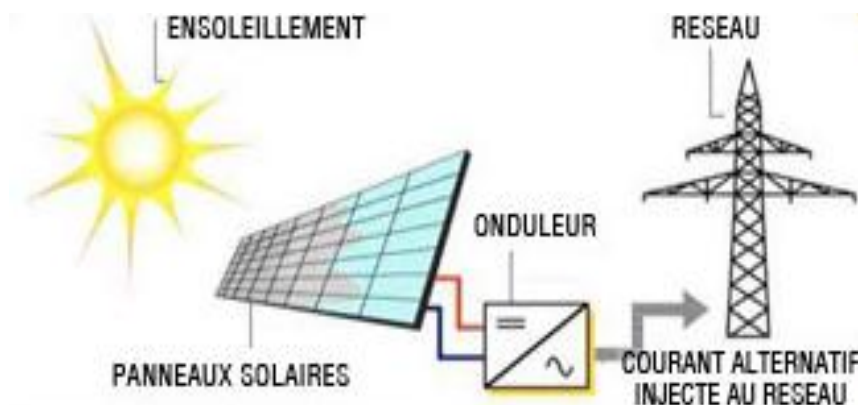


Figure 1.5 Systèmes photovoltaïque connectés au réseau

- **Systèmes photovoltaïques hybrides autonomes**

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable comme le photovoltaïque et l'éolienne.

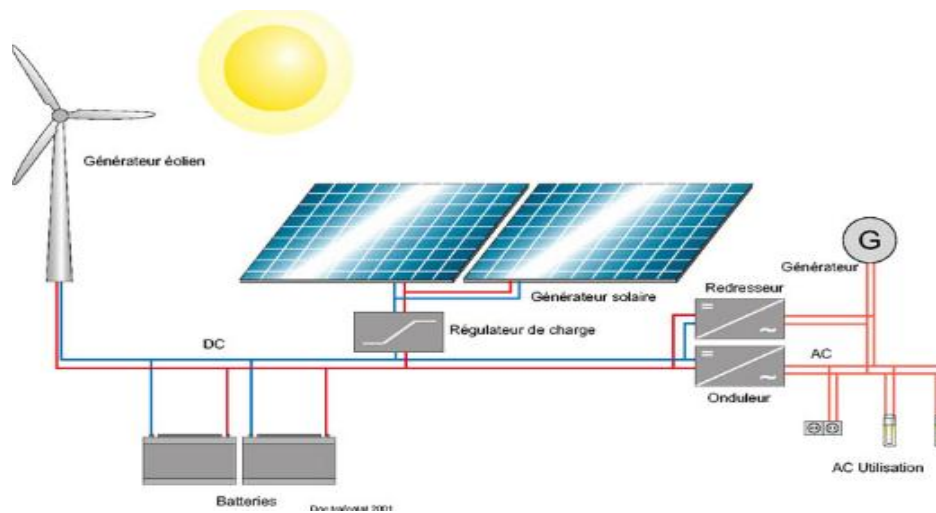


Figure 1.6 Schéma décrivant un système hybride

1.5 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Chaque système possède des avantages et des inconvénients, pour le système PV en cite les suivantes :

1.5.1 Inconvénients

- Le cout d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le cout de système photovoltaïque augmente.
- les panneaux contiennent des produits toxiques et la filière de recyclage n'est pas encore existante.
- Le rendement électrique diminue avec le temps.
- ils sont dépend des conditions météorologique.
- Il donne une énergie continue de faible voltage, donc, il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.

1.5.2. Avantages

- L'énergie photovoltaïque peut être installée partout, même en ville.
- L'énergie photovoltaïque est renouvelable et gratuite.
- Sur les sites isolés, l'énergie photovoltaïque offre une solution pratique pour obtenir de l'électricité à moindre coût.
- La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voire de générer des revenus.
- Le contrat d'achat est conclu pour une durée de 20 ans
- Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement. Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes.
- L'énergie photovoltaïque est totalement modulable et peut donc répondre à un large éventail de besoins. La taille des installations peut aussi être augmentée par la suite pour suivre les besoins de son propriétaire.
- Le coût de fonctionnement des panneaux photovoltaïques est très faible car leur entretien est très réduit, et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les systèmes d'énergie renouvelable et en particulier l'énergie solaire. Cette énergie connaît depuis quelques années une évolution profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. Par la suite, on a donné quelques notions de base sur l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et module photovoltaïque. Et en fin, nous avons exposé les avantages et les inconvénients des systèmes photovoltaïques.

Chapitre 02
Modélisation de
système
photovoltaïques

2.1 Introduction

La modélisation d'une cellule PV permet de bien comprendre le principe de conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique. Donc, il est nécessaire de choisir un modèle électrique équivalent. Ces modèles électriques se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de courant et de tension du module PV.

2.2 Modélisation du module photovoltaïque

De nombreux modèles mathématiques de modules photovoltaïques, ont été développés, dont le but est l'obtention de la caractéristique Courant-Tension pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes photovoltaïques.

2.2.1 Modèle électrique réel

Le circuit équivalent d'une cellule solaire est donné par une diode de jonction P-N et une source de courant I_{ph} , une résistance série R_s modélise les pertes par effet joule, qui sont dues à une série de résistances causée par la résistivité du matériau semi-conducteur, la valeur habituelle de cette résistance est très petite de quelque dixième d'ohms, et une résistance parallèle R_{sh} représente les pertes internes, ou le courant de fuite à travers la diode de Shockley [11].

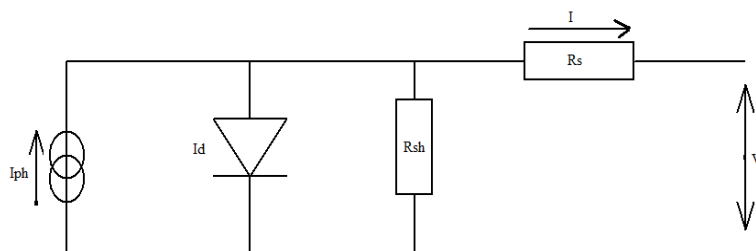


Figure 2.1 Circuit équivalent d'une cellule réelle

En employant la loi de Kirchhoff au circuit équivalent au-dessus, on trouve :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2.1)$$

I_{ph} : photo courant créé par la cellule PV dépendant de l'éclairement et la température.

I : le courant fourni par le module PV

I_d : le courant de la diode.

- Le courant de la diode est donné par la formule suivante :

$$I_d = I_o(e^{V_d/V_t} - 1) \quad (2.2)$$

$$V_d = V_{pv} + R_s I \quad (2.3)$$

$$I_o = I_{or} \left[\left(\frac{T}{T_r} \right)^{(3/p)} e^{E_g / PK(1/T - 1/T_r)} - 1 \right] \quad (2.4)$$

I_{or} : est le courant de court-circuit de la cellule à la température de référence T_r et l'éclairement de référence.

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

T_r : Température de référence des cellules PV [$^{\circ}$ K].

P : Facteur d'idéalité de la jonction.

E_g : Énergie de gap [ev].

$$V_t = q/pKT \text{ où : } \left\{ \begin{array}{l} q : \text{charge de l'électron.} \\ K : \text{constante de Boltzmann.} \\ p : \text{facteur caractéristique.} \end{array} \right.$$

- Le courant I_{sh} donné par :

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + R_s I}{R_{sh}} \quad (2.5)$$

Dans ce cas, le courant I est défini comme suit:

$$I = I_{ph} - I_o \left[e^{(V_{pv} + R_s I)/V_t} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

2.2.2 Cellule idéale

Dans le cas de la cellule idéale, on néglige les résistances des pertes, donc la cellule est considérée comme idéale.

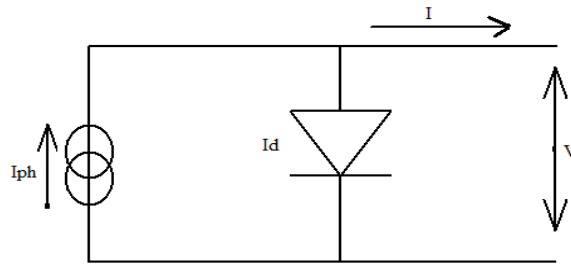


Figure 2.2 Circuit équivalent d'une cellule idéale

D'après la figure au-dessus on trouve :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (2.7)$$

La relation entre le courant de photo-courant, la température et l'éclairement est donné par :

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_T(T - T_r)] \lambda / 1000 \quad (2.8)$$

I_{sc} : Courant de la cellule de court-circuit a la température de référence et l'insolation.

K_T : Coefficient de température [mA/°K].

λ :Eclairement absorbé par la cellule.

2.3 Constitution d'un module photovoltaïque

La mise en série et/ou en parallèle des cellules PV donne un module photovoltaïque qui va générer un générateur PV (ou GPV), qui va faire un changement au niveau de tension selon leur association.

2.3.1 Association des cellules photovoltaïque en série

Lorsque l'on associe N_s cellules PV en série, les tensions de ces cellules s'additionnent et le courant généré est le même dans toute la branche. Donc, la connexion série de N_s cellules PV augmente la tension totale des générateur(GPV).

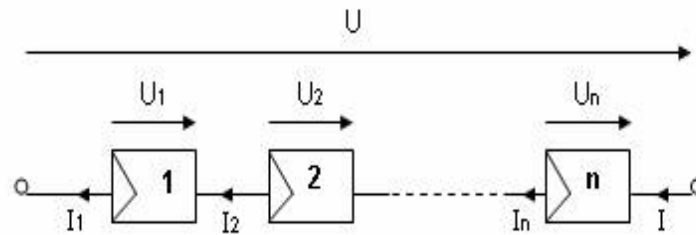


Figure2.3 Connexion série des cellules PV

I_i : est le courant de cellule PV.

U_i : représente la tension de chaque cellule PV.

Le courant du module PV est donc donné par :

$$I = I_i \quad / \quad i=1:N_s \quad (2.9)$$

La tension de module PV est :

$$U = N_s I \quad (2.10)$$

2.3.2 Association des cellules photovoltaïques en parallèle :

À la connexion parallèle de N_p cellules, les cellules sont soumises à la même tension.

Le courant PV est la somme des courants de chaque cellule.

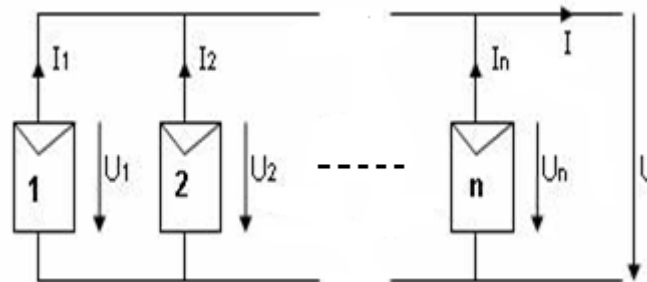


Figure 2.4 Connexion parallèle des cellules PV

D'après la figure si dessus, on trouve :

$$I = N_p \sum I_i \quad \text{tq: } i=1:n \quad (2.11)$$

$$U = U_i \quad \text{tq: } i=1:n \quad (2.12)$$

2.3.3 Association série/parallèle des cellules photovoltaïques

C'est la connexion qui s'impose lorsque l'on a besoin d'une certaine puissance à une tension voulue ; La caractéristique électrique courant/tension du GPV se déduit de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires qui le composent par deux affinités de rapport N_s parallèlement à l'axe de tension et de rapport N_p parallèlement à l'axe des courants.

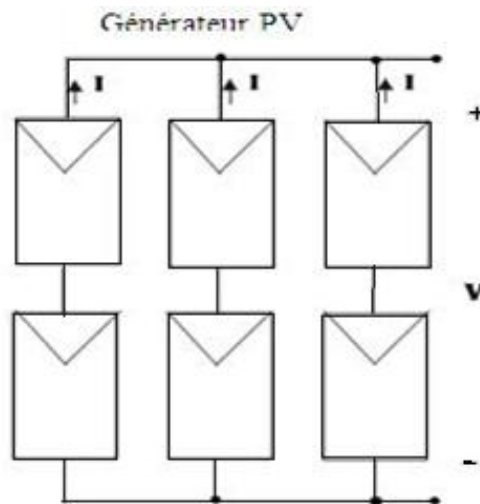


Figure 2.5 Connexion parallèle des cellules PV

Le courant généré par l'association de N_p cellules parallèle et N_s cellules série est défini par la formule suivante:

$$I_{pv} = N_p(I_{ph} - I_0(e^{V_d/V_t N_s} - 1)) \quad (2.13)$$

2.4 Influence de la température sur un système photovoltaïque

Pour voir l'influence de la température sur le système PV, on va faire une simulation de ce dernier pour des valeurs différentes de température avec un éclairage constant (600K). Les caractéristiques ($I_{pv}=f(V_{pv})$ et $P_{pv}=f(V_{pv})$) sont données par les figures (2.6) et (2.7).

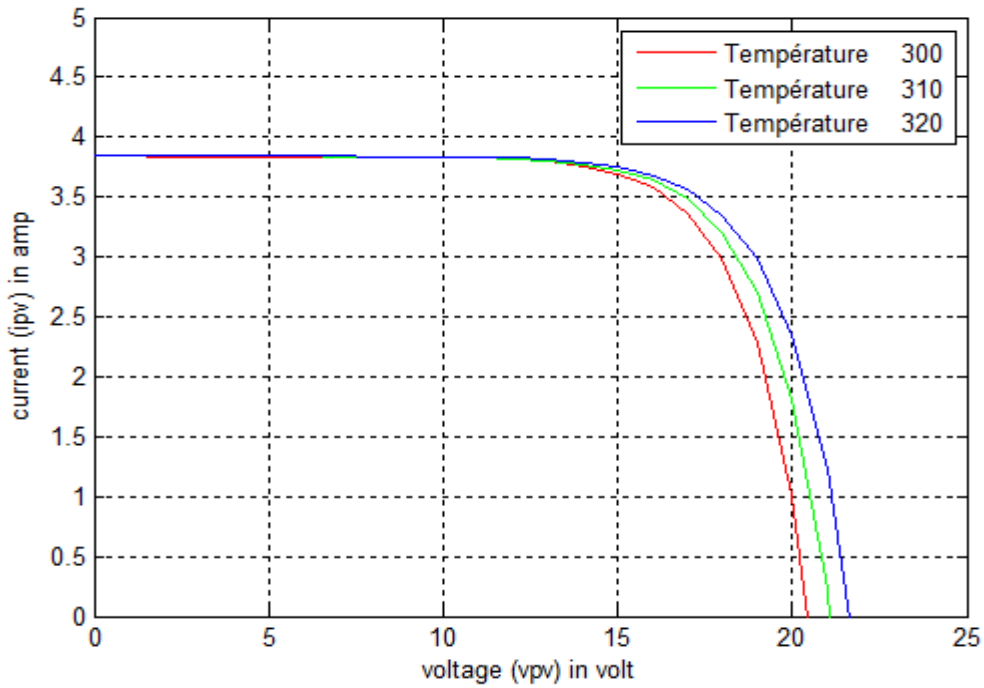


Figure 2.6. Caractéristique du courant en fonction de la température

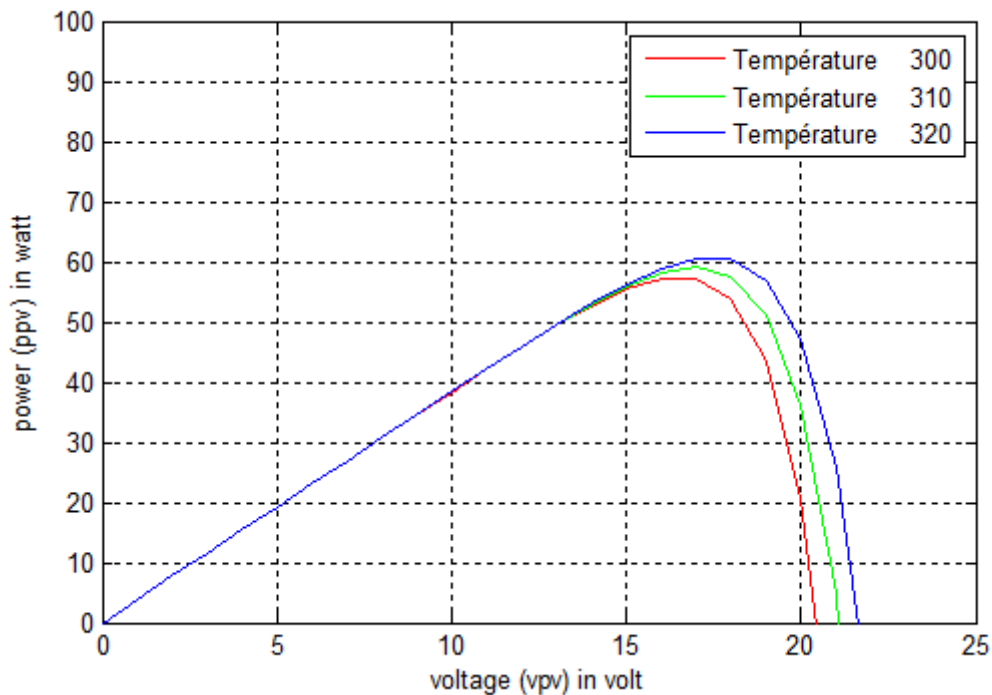


Figure 2.7 Caractéristique de la puissance en fonction de la température

Remarque :

On observe que la puissance maximale change avec le changement avec le changement de la température. La puissance diminue avec l'augmentation de la température.

2.5 Influence de l'éclairement sur un système photovoltaïque

Pour voir l'influence de l'éclairement sur le système PV on va faire une simulation de ce dernier pour des valeurs différentes de l'éclairement avec une température constante (298K) ; Les caractéristiques $I_{pv} = f(V_{pv})$ et $P_{pv} = f(V_{pv})$ sont données par les figures (2.8) et (2.9).

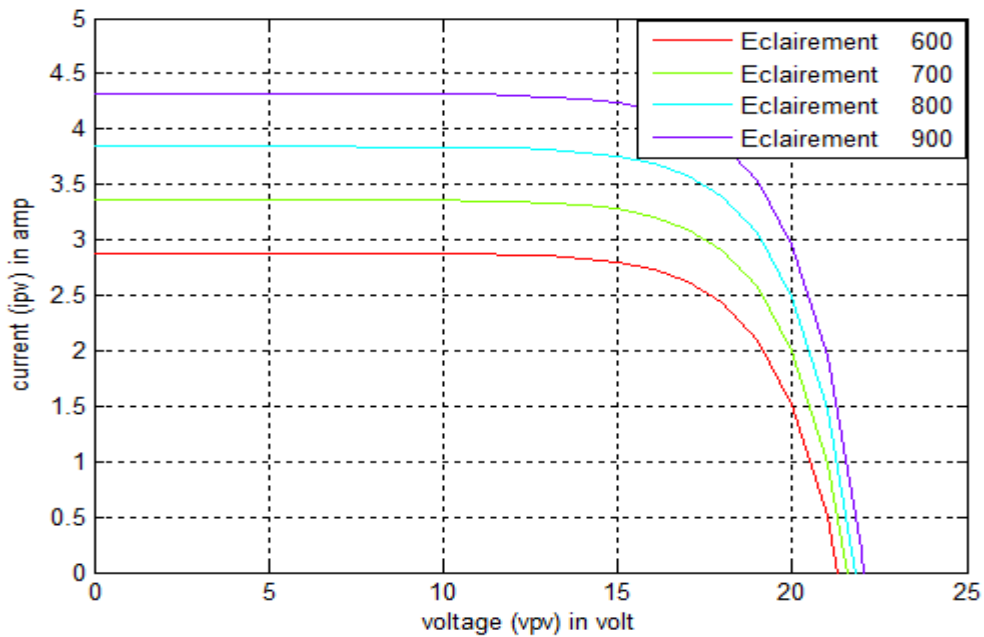


Figure 2.8 caractéristique du courant en fonction de l'éclairement

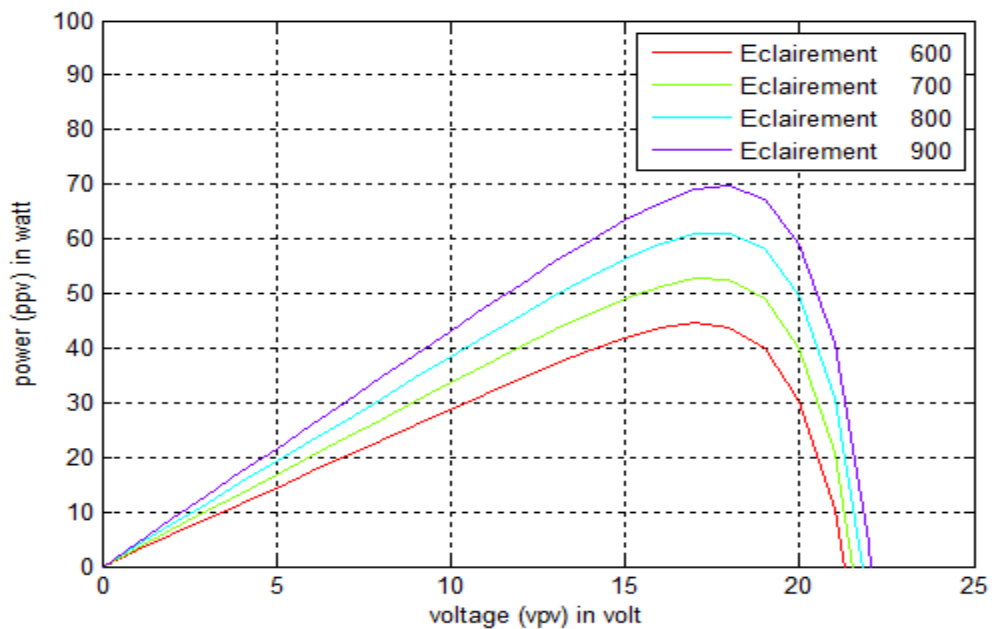


Figure 2.9 Caractéristique de la puissance en fonction de l'éclairement

Remarque :

On remarque que la variation de l'éclairement influe visiblement sur le courant de court-circuit et peu sur la tension de circuit ouvert par conséquent la variation de PPM est proportionnelle à l'éclairement.

2.6 Module PV avec convertisseur DC-DC

Les convertisseurs DC/DC en général réalisent deux fonctions: modifier le niveau de tension (élever ou abaisser) et réguler la tension, Le convertisseur étant une étape intermédiaire entre la source d'énergie et la charge, donc on va étudier deux type de convertisseur :

2.6.1 Module PV avec convertisseur Boost

Un convertisseur Boost ou hacheur parallèle est un convertisseur qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur.

La figure (2.10) montre le schéma électrique d'un convertisseur Boost.

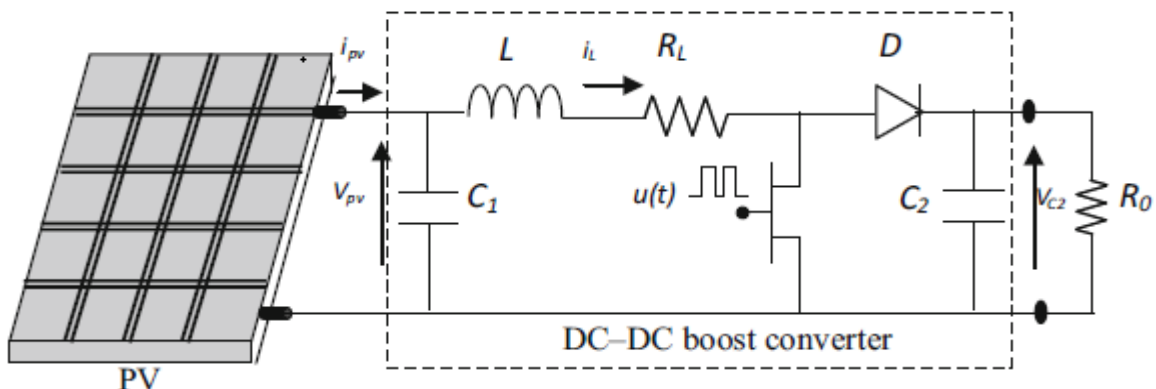


Figure 2.10. Schéma d'un convertisseur Boost

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur $u(t)$:

- **Une phase d'accumulation d'énergie :** lorsque l'interrupteur $u(t)$ est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance, donc, le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.

- **Lorsque l'interrupteur est ouvert** : l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.e.m. s'additionne à celle du générateur. Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge R_0 .

D'après la figure ci-dessus, on trouve :

- Si $u(t)=1$ (interrupteur fermé) :

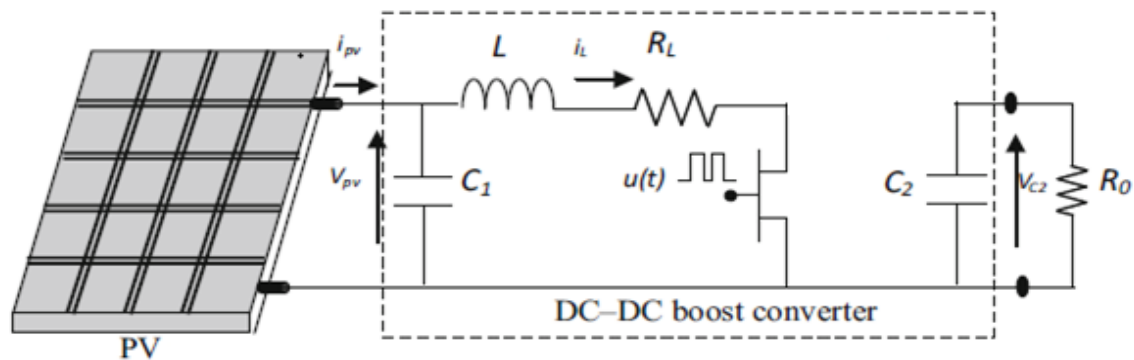


Fig 2.11 Schéma équivalent d'un convertisseur Boost ou l'interrupteur est fermé

D'après la figure (2.11), on obtient les équations suivantes :

$$\begin{aligned} \frac{dV_{pv}(t)}{dt} &= -\frac{1}{C_1} i_l(t) + \frac{1}{C_1} i_{pv}(t) \\ \frac{di_l(t)}{dt} &= \frac{1}{L} V_{pv}(t) - \frac{R_L}{L} i_l(t) \\ \frac{dV_{c2}(t)}{dt} &= -\frac{1}{R_0 C_2} V_{c2}(t) \end{aligned} \quad (2.14)$$

- Si $u(t)=0$ (interrupteur ouvert) :

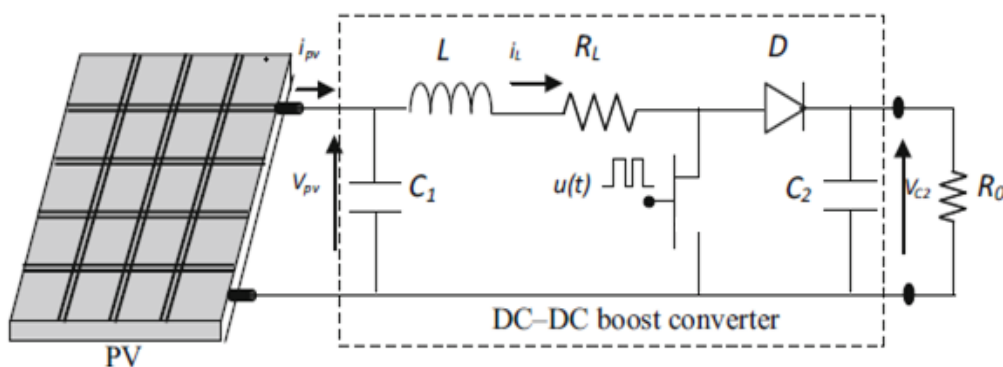


Figure 2.12. Schéma équivalent d'un convertisseur Boost ou l'interrupteur est ouvert

Les équations de système sont données comme suit :

$$\begin{aligned}\frac{dV_{pv}(t)}{dt} &= -\frac{1}{C_1}i_l(t) + \frac{1}{C_1}i_{pv}(t) \\ \frac{di_l(t)}{dt} &= \frac{1}{L}V_{pv}(t) - \frac{R_l}{L}i_l(t) - \frac{1}{L}V_{c_2}(t) \\ \frac{dV_{c_2}(t)}{dt} &= -\frac{1}{R_0C_2}V_{c_2}(t) + \frac{1}{C_2}i_l(t)\end{aligned}\quad (2.15)$$

Les équations (2.14) et (2.15) peut être donnés sous forme d'état comme suit :

$$\dot{x}(t) = A_k x(t) + Ew(t) \quad k=1,2 \quad (2.16)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C_1} & 0 \\ \frac{1}{L} & -\frac{R_l}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{C_2 R_0} \end{bmatrix}; A_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C_1} & 0 \\ \frac{1}{L} & -\frac{R_l}{L} & -\frac{1}{L} \\ 0 & \frac{1}{C_2} & -\frac{1}{C_2 R_0} \end{bmatrix}; E = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; w(t) = i_{pv}(t); x(t) = \begin{bmatrix} V_{pv}(t) \\ i_l(t) \\ V_{c_2} \end{bmatrix}.$$

Les équations (2.14) et (2.15) peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\dot{x}(t) = [A_1 x(t) + Ew(t)]u(t) + [A_2 x(t) + Ew(t)][1-u(t)] \quad (2.17)$$

ou sous la forme suivante :

$$\dot{x}(t) = A_2 x(t) + (A_1 - A_2)x(t)u(t) + Ew(t) \quad (2.18)$$

donc:

$$\dot{x}(t) = A_2 x(t) + Bx(t)u(t) + Ew(t)u(t) \quad u(t) \in [0,1] \quad (2.19)$$

avec: $B(x(t)) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V_{c_2}}{L} \\ -\frac{i_l(t)}{C_2} \end{bmatrix}$ et $u(t)$ est considérée comme une entrée de contrôle pour le

commutateur de puissance.

2.6.2 Module PV avec convertisseur Buck

Un convertisseur Buck est un convertisseur abaisseur de tension, qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur.

La figure (2.13) montre le schéma électrique d'un convertisseur Buck.

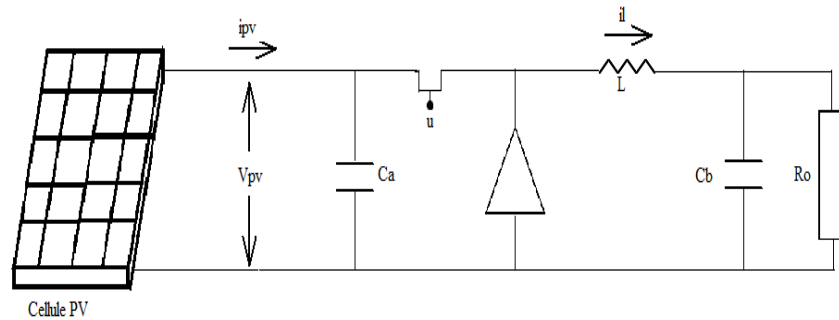


Figure 2.13 Schéma d'un convertisseur Buck

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck peut être divisé en deux phases distinctes suivant l'état de l'interrupteur $u(t)$:

- Dans l'état passant, l'interrupteur $u(t)$ est fermé. La tension aux bornes de la diode étant négative, aucun courant ne la traverse.
- Dans l'état bloqué, l'interrupteur est ouvert. La diode devient passante afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance.

D'après la figure si dessus en trouve :

- Si $u(t)=1$ (interrupteur fermé) le schéma électrique équivalent de la figure (2.14) est le suivant :

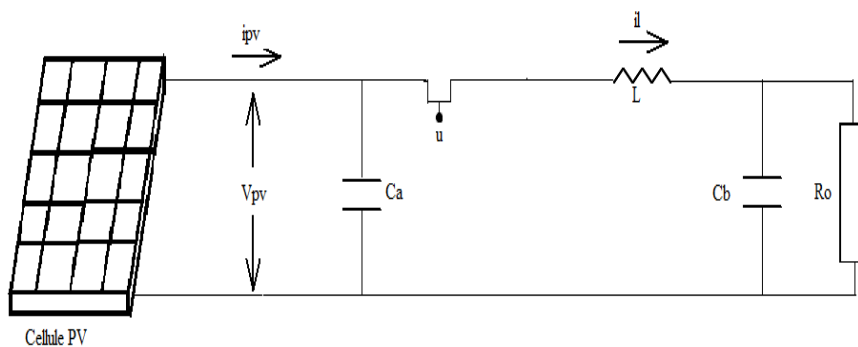


Figure 2.14 Schéma équivalent d'un convertisseur Buck ou l'interrupteur est fermé

$$\begin{aligned} \dot{i}_l(t) &= \frac{1}{L} [-(R_l + R_b)i_l(t) - V_d(t) + R_b i_0(t)] \\ \dot{V}_{pv}(t) &= \frac{1}{C_a} (i_{pv}(t) - i_l(t)) \\ \dot{V}_b(t) &= \frac{1}{C_b} (i_l(t) - i_0(t)) \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$i_0(t) = i_l(t) - i_b(t) \quad (2.21)$$

- La substitution de l'égalité (2.21) dans les équations (2.20), on trouve :

$$\begin{aligned} \dot{i}_l(t) &= \frac{1}{L} \left[-(R_l + R_b \frac{i_b(t)}{i_l(t)}) i_l(t) - V_d(t) + R_b i_0(t) \right] \\ \dot{V}_{pv}(t) &= \frac{1}{C_a} (i_{pv}(t) - i_l(t)) \\ \dot{V}_b(t) &= \frac{1}{C_b} (i_l(t) - \frac{i_b(t)}{i_l(t)}(t)) \end{aligned} \quad (2.22)$$

- Si $u(t) = 0$ (interrupteur ouvert) le schéma électrique équivalent de la figure (2.15) est le suivante :

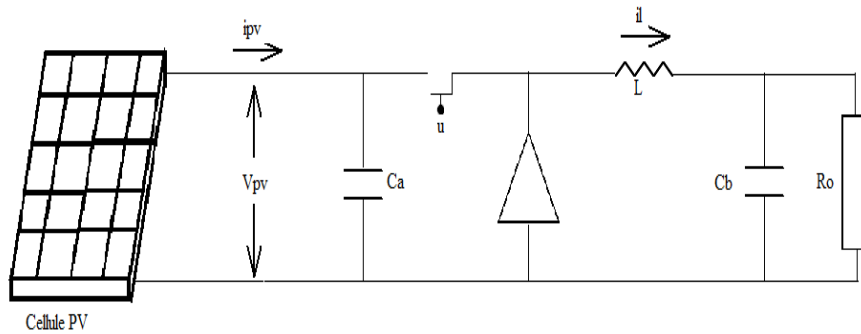


Figure2.15 Schéma équivalent d'un convertisseur Buck ou l'interrupteur est ouvert

D'après la figure on trouve :

$$\begin{aligned} \dot{i}_l(t) &= \frac{1}{L} [-(R_l + R_b)i_l(t) - V_d - V_b(t) + R_b i_0(t)] \\ \dot{V}_{pv}(t) &= \frac{1}{C_a} i_{pv}(t) \\ \dot{V}_b(t) &= \frac{1}{C_b} (i_l(t) - i_0(t)) \end{aligned} \quad (2.23)$$

- La substitution de l'égalité (2.21) dans les équations (2.23), on trouve :

$$\begin{aligned} \dot{i}_l(t) &= \frac{1}{L} \left[-(R_l + R_b \frac{i_b(t)}{i_l(t)}) i_l(t) - V_d(t) + R_b i_0(t) \right] \\ \dot{V}_{pv}(t) &= \frac{1}{C_a} i_{pv}(t) \\ \dot{V}_b(t) &= \frac{1}{C_b} (i_l(t) - \frac{i_b(t)}{i_l(t)}(t)) \end{aligned} \quad (2.24)$$

Les équations (2.16), (2.20) et (2.24) donnent :

$$\dot{x}(t) = A_k x(t) + Ew(t) \quad k=1,2$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\frac{R_l}{L} + \frac{R_b}{i_l} i_b & \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C_a} & \frac{1}{C_a} \frac{i_{pv}}{V_{pv}} & 0 \\ \frac{1}{C_b} \frac{i_b}{i_l} & 0 & 0 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} -\frac{R_l}{L} + \frac{R_b}{i_l} i_b & 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & \frac{1}{C_a} \frac{i_{pv}}{V_{pv}} & 0 \\ \frac{1}{C_b} \frac{i_b}{i_l} & 0 & 0 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$w(t) = V_d(t), x(t) = \begin{bmatrix} i_l(t) \\ V_{pv}(t) \\ V_b(t) \end{bmatrix}$$

Donc le système s'écrit sous le forme donné par l'équation (2.19), avec : $B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} V_{pv} \\ -\frac{1}{C_a} i_l \\ 0 \end{bmatrix}$

2.7 Résultat de simulation

2.7.1 Avec convertisseur Boost

Paramètre de simulation	Valeurs (unités)
Inductance (C1)	$500 \times 10^{-6} (F)$
Inductance (C2)	$100 \times 10^{-6} (F)$
Stockage de l'inductance (L)	$10(mH)$

Charge d'électron (q)	$1.602 \times 10^{-19}(C)$
Coefficient de température de court-circuit (Ki)	$0.09 \times 10^{-3}(mA / ^\circ k)$
Résistance (Ro)	$20(Ohm)$
Nombre de cellule parallèle (Np)	1
Nombre de cellule série (Ns)	36
Courant de cellule de court-circuit (Icc)	4.8(A)
Température de référence (Tr)	298 ($^\circ k$)
Energie de Gaps (Eg)	1.1 (eV)
Courant à circuit ouvert (Ior)	$1.95 \times 10^{-6}(A)$
Température (T)	323.18 ($^\circ k$)
Eclairement (lamda)	600 (W / m^2)
Facteur caractéristique (P)	1.8
Constante de Boltzmann (K)	1.3805×10^{-23}
Résistance (Rl)	0.01(ohm)

Tableau 2.1 Paramètres de cellule PV

Pour simuler le comportement du système photovoltaïque (**Module PV avec convertisseur DC-DC**), on utilise le langage MATLAB comme outil de test et de simulation. Nous faisons une simulation en boucle ouverte avec les données présentées sur le tableau (2.1)

La simulation a été réalisé avec les conditions initiales $[V_{pv} \text{ il } V_{c2}] = [0 \ 0 \ 0]$, avec une commande $u = 0.2$, les résultats sont présenté par les figures ci-dessous :

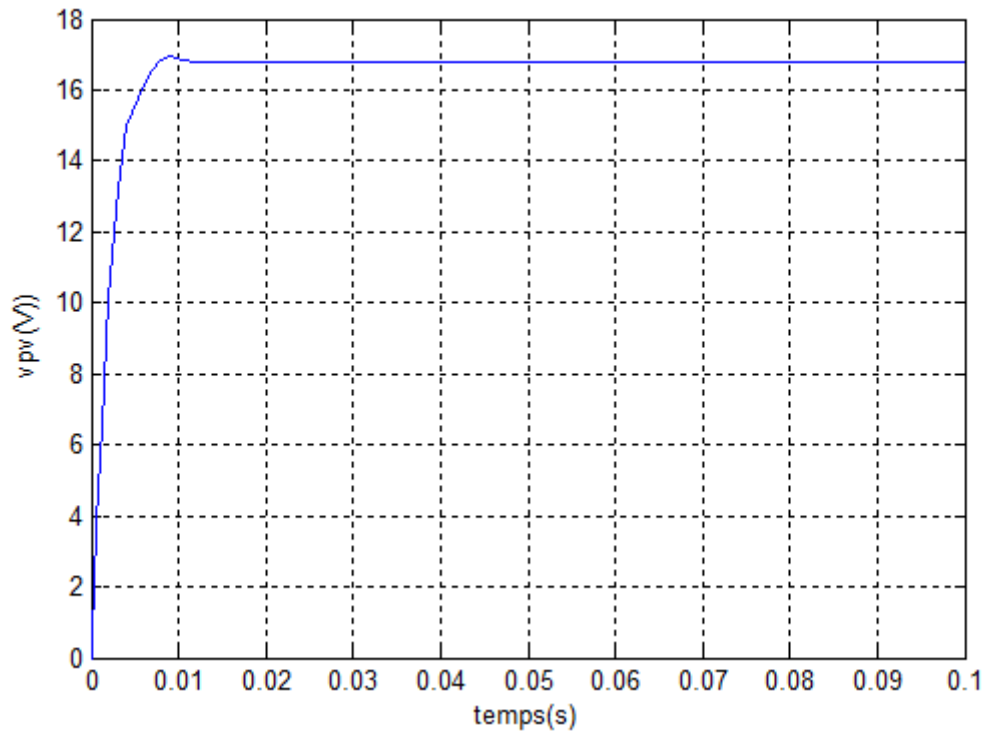


Figure 2.16 Tension: $V_{pv}(t)$

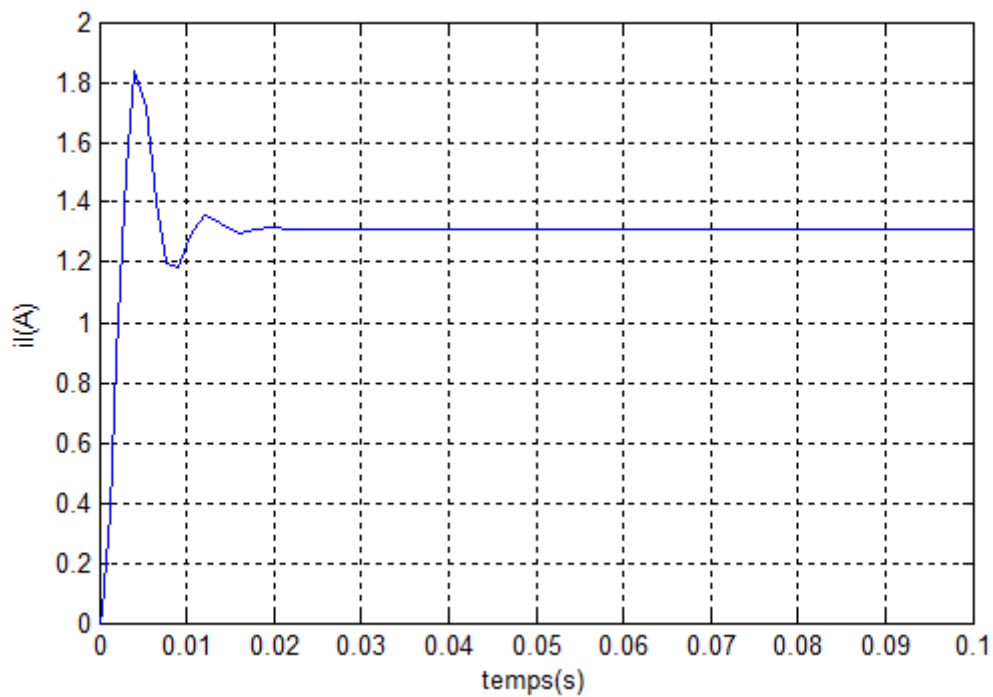


Figure 2.17 Courant: $i_l(t)$

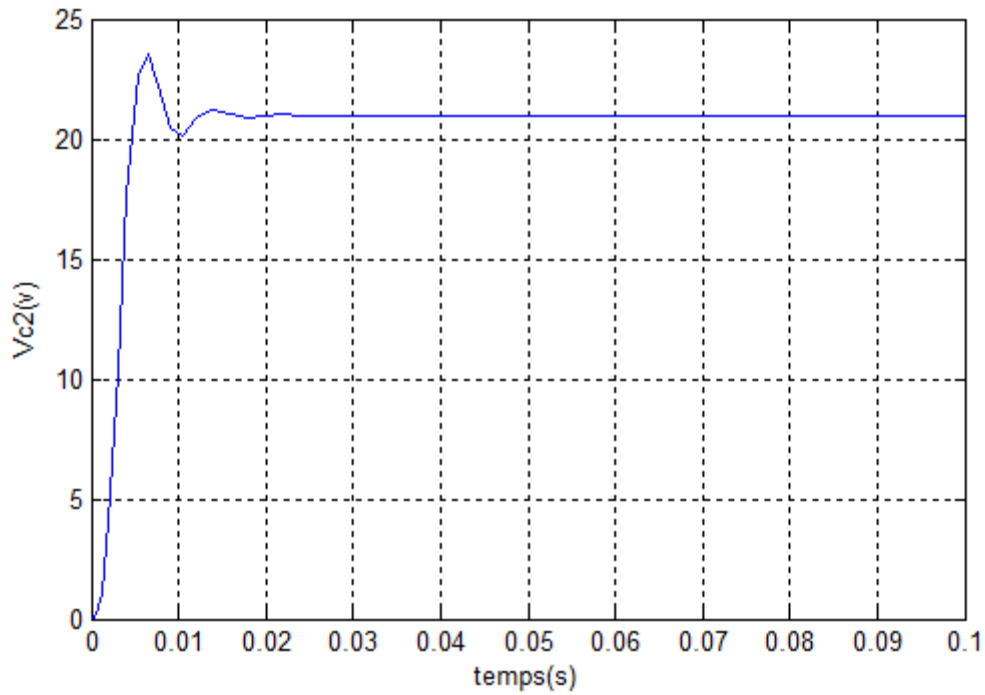


Figure 2.18 Tension: $V_{c2}(t)$

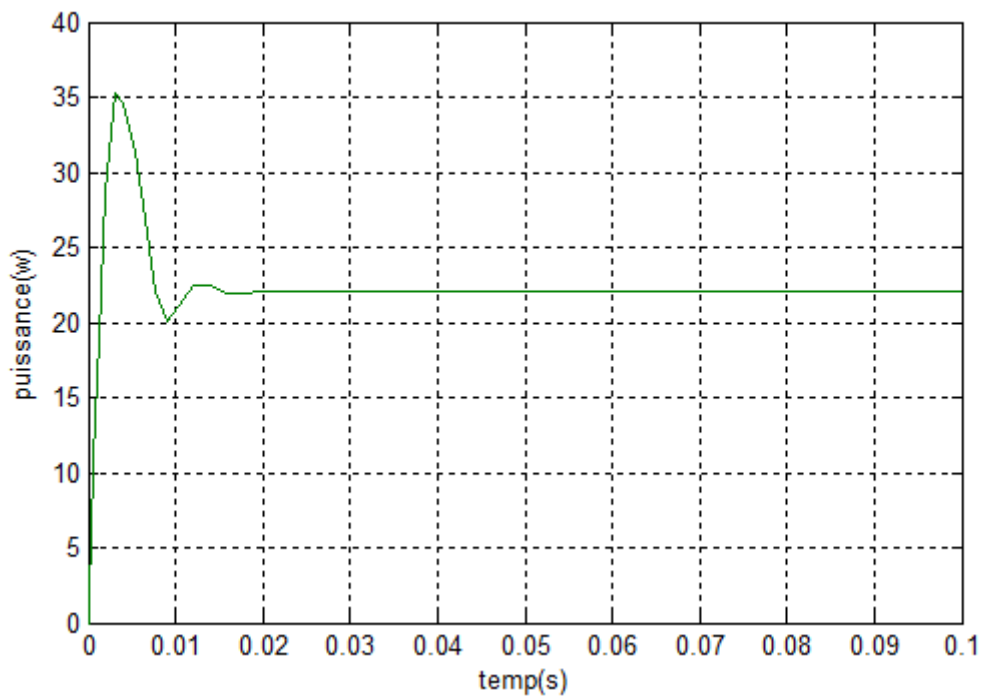


Figure 2.19 Puissance P_{pv}

2.9.2 Pour le convertisseur Buck

Nous faisons une simulation en boucle ouverte avec les données présentée par le tableau suivant :

Paramètre de simulation	Valeurs (unités)
Inductance (Ca)	$1000 \times 10^{-6} (F)$
Inductance (Cb)	$1000 \times 10^{-6} (F)$
Stockage de l'inductance (L)	$150 \times 10^{-6} (H)$
Resistance (Ro)	2(ohm)
Resistance (Rl)	1(ohm)

Tableau 2.2 Paramètres de cellule PV

La simulation a été réalisée sous les conditions initiales $[V_{pv} \ i_l \ V_{c2}] = [1 \ 12 \ 0]$, avec une commande $u=0.2$, les résultats sont présentés par les figures ci-dessous :

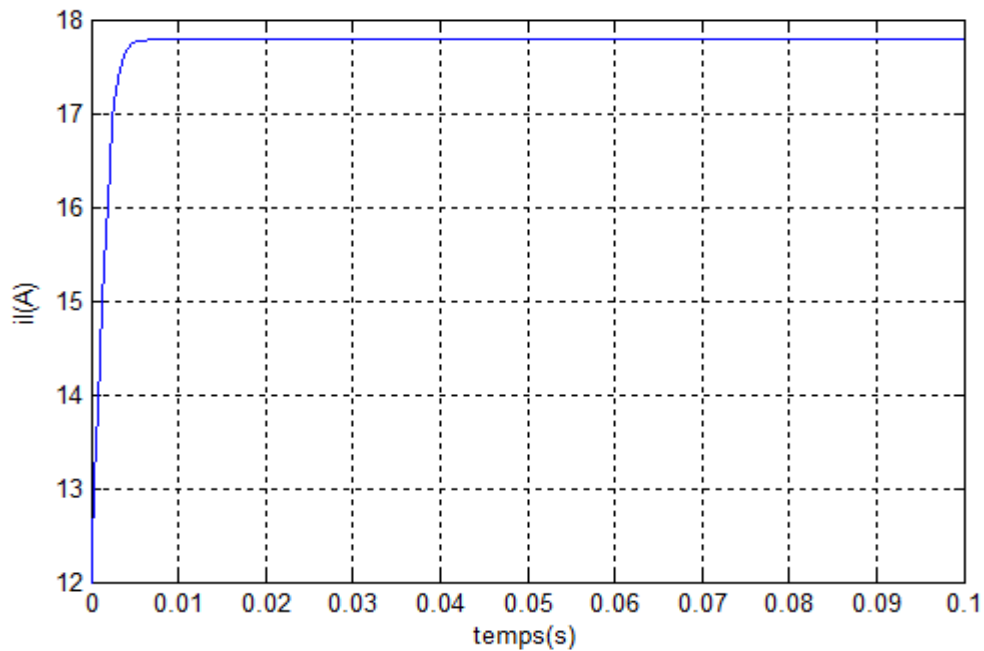
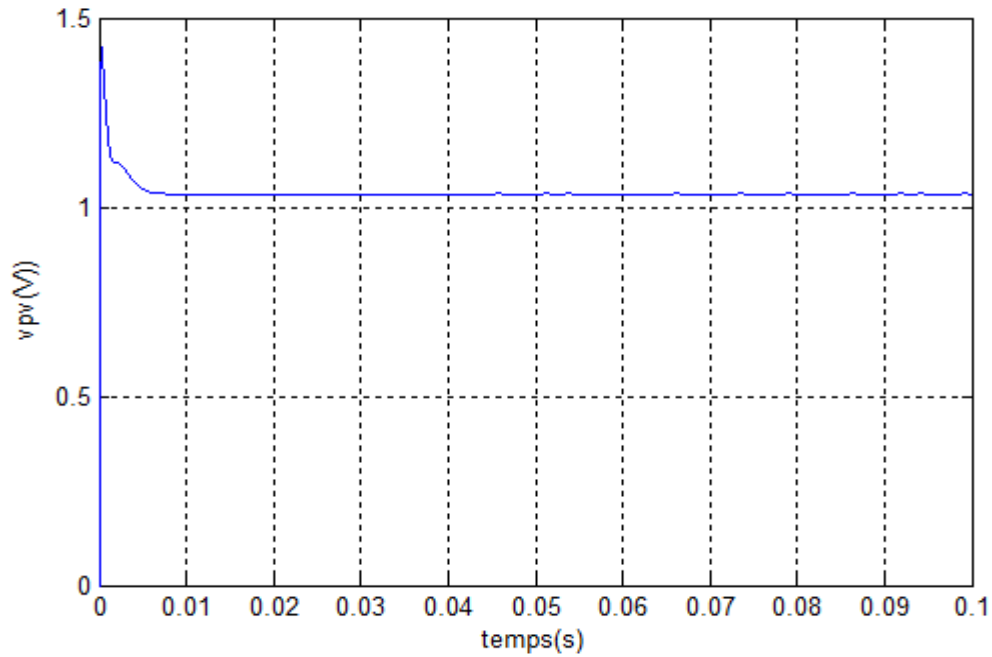
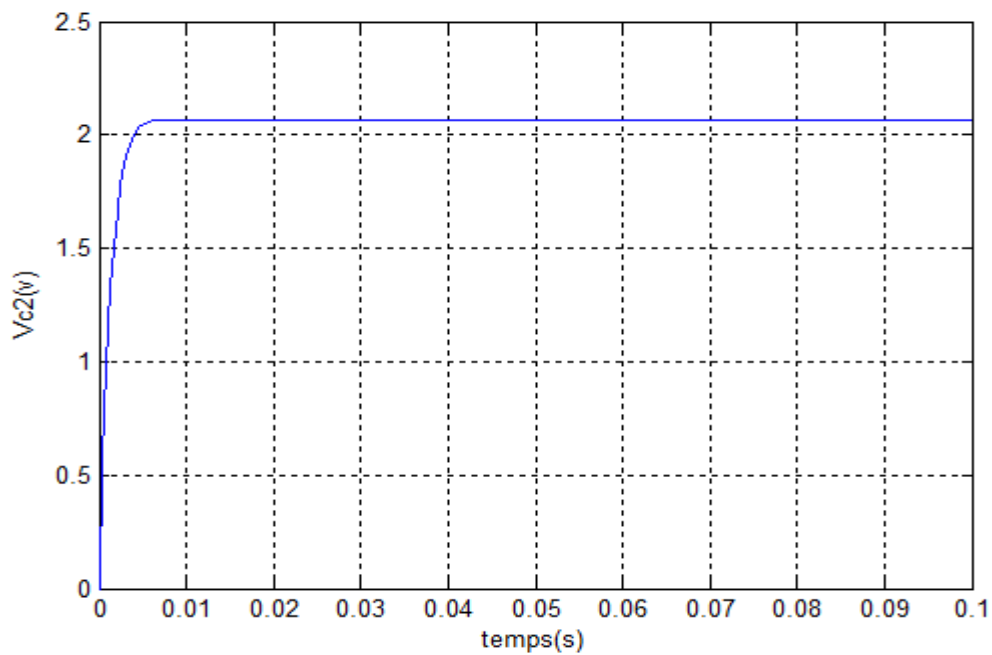


Figure 2.20 Courant: i_l (t)

**Figure 2.21** Tension: $V_{pv}(t)$ **Figure 2.22** Tension: $V_b(t)$ **Remarque :**

Les résultats de simulation montrent que le système non linéaire est stable, mais la commande en BO n'arrive pas à stabiliser le système au point de fonctionnement optimal.

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les caractéristiques du système PV, et pour la conversion d'énergie nous avons présenté deux différents types de convertisseur. Ensuite nous avons analysé le système PV en BO. Nous concluons que le système PV est stable, mais la commande en BO est insuffisante pour suivre le point max de puissance, donc il faut chercher une commande en BF permettant de maintenir le point MPP.

Chapitre 03
Représentation multi-modèles des
systemes
photovoltaïques

3.1 Introduction

Parmi les objectifs actuels de l'automatique est de rendre les performances de système optimaux, cela se traduit par la nécessité d'obtenir une loi de commande. Donc la modélisation est une phase très importante pour la conception de lois de commande.

Une bonne représentation pour la plus part des processus réels est la représentation par un modèle non linéaire, par rapport à un modèle linéaire qui reste valable sur une zone assez restreinte de l'espace de fonctionnement. Malheureusement, l'utilisation d'un modèle non linéaire pour obtenir une commande devient plus difficile que celle d'un modèle linéaire. La solution apportée à ce problème est l'utilisation de l'approche multi-modèles qui permet l'utilisation des techniques adaptées aux processus linéaire, c'est une bonne technique qui permet de parvenir à un bon compromis entre la précision et la complexifié de modèle.

3.2 Principe de l'approche multi-modèle

Le MM est basé sur la décomposition du comportement dynamique du système en plusieurs zones de fonctionnement, chaque zone étant caractérisée par un sous-système. Chaque sous-système contribue plus ou moins à l'approximation du comportement global du système en fonction de la zone où le système évolue. Ainsi, la contribution de chaque sous-système au modèle global, qui est une combinaison convexe des sous-systèmes, est définie par une fonction d'activation. La représentation MM d'un système non linéaire peut être obtenue à partir différentes structures. En général, la représentation d'état est utilisée car elle permet de mettre facilement en évidence les sous-modèles. Cette représentation est simple et plus générale que la présentation sous forme d'une équation de régression entrée/sortie. De plus, la description sous forme d'état se relève une forme bien adaptée pour la construction d'observateurs ou de lois de commande[12].

3.3 Présentation de la structure multi-modèle

L'approche MM décrit le comportement de système sous la forme d'état, qui se traduit par la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x(t), u(t)) \\ y(t) = h(x(t)) \end{cases} \quad (3.1)$$

où $x(t)$ représente le vecteur d'état décrivant l'état interne du système, $u(t)$ la commande qui représente une entrée de système, $y(t)$ est la sortie de système et f et h représente les fonctions linéaires et/ou non linéaires.

3.4 A propos de l'approche multi-modèle

Le principe de l'approche multi-modèle repose sur la réduction de la complexité du système par le fractionnement de son espace de fonctionnement en un nombre fini de zones de fonctionnement.

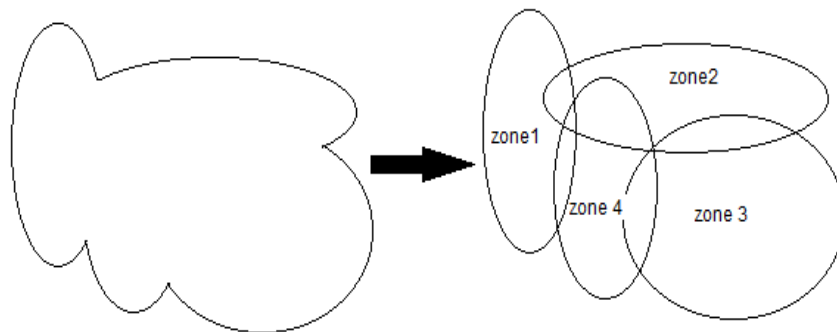


Figure 3.1 Approche MM

Définissons quelques notions utiles dans la description d'un MM :

-Un **espace de fonctionnement** est un espace vectoriel à l'intérieur duquel les variables d'un système évoluent (tenant éventuellement compte des bornes sur les variables).

-Une **zone de fonctionnement** est un domaine issu du partitionnement de l'espace de fonctionnement du système.

-Un **sous-modèle** (ou **sous-système**) est un modèle généralement simple de structure quelconque, mais souvent linéaire et/ou affine, qui représente le comportement du système non linéaire dans une zone de fonctionnement spécifique.

-Une autre notion liée à ces fonctions est la notion de **variable de prémisse** (ou **décision**). Ce nom est attribué à la variable $z(t)$ intervenant dans les fonctions de pondération $\mu_i(z(t))$. Cette variable peut englober une ou plusieurs variables internes ou externes du système. Ces variables peuvent être soit accessibles à la mesure en temps réel (des signaux d'entrée du système ou même des variables d'état mesurables), soit inaccessibles à la mesure (des variables d'état non-mesurables).

-Une **fonction de pondération (activation)** est une fonction, notée en général $\mu_i(z(t))$, qui dépend des variables internes et/ou externes du système non-linéaire (variables de prémisses). Ces fonctions sont choisies en général de façon à vérifier la propriété de somme convexe suivante :

$$\begin{aligned} 0 &\leq \mu_i(z(t)) \leq 1 \\ \sum_{i=1}^n \mu_i(z(t)) &= 1 \end{aligned} \quad (3.2)$$

3.5 Différentes structures multi-modèle

Il existe différentes formes de multi-modèles selon que l'on fait la segmentation sur l'entrée ou sur la sortie et aussi selon la nature du couplage entre les modèles locaux associés aux zones de fonctionnement.

3.5.1 Structure couplée (Modèle à état unique ou Modèle flou de Takagi-Sugeno)

La représentation multi-modèle est obtenue par interpolation de « r » modèles locaux linéaires.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t) + D_i) \\ y(t) &= \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))(C_i x(t) + E_i u(t) + N_i) \\ z(t) &= \{u(t), x(t), y(t)\} \end{aligned} \quad (3.3)$$

où: $\mu_i(z(t)); i \in \{1, \dots, r\}$ sont les fonctions d'activations, et $z(t)$ est le vecteur des variables de décision dépendant des variables d'état mesurables et éventuellement de la commande $u(t)$.

3.5.2 Structure découplée

La deuxième structure qui s'appelle structure découplée résulte de l'agrégation de modèles locaux décrits d'une façon découplée. La différence entre cette structure et la structure couplée réside dans le fait que chaque modèle local est indépendant de tous les autres.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= A_i x_i(t) + B_i u(t) + D_i \\ y_r(t) &= C_i x_i(t) + E_i u(t) + N_i \end{aligned} \quad (3.4)$$

Le multi-modèle global est donné par :

$$\begin{aligned}\dot{x}_i(t) &= A_i x_i(t) + B_i u(t) + D_i, i = 1, \dots, r. \\ y_r(t) &= \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) (C_i x_i(t) + E_i u(t) + N_i)\end{aligned}\quad (3.5)$$

3.5.3 Structure hiérarchisée

L'application de l'approche multi-modèle est limitée aux systèmes ayant peu de variables (dimension réduite). Le nombre de modèles locaux augmente d'une façon exponentielle avec l'augmentation du nombre de variables. Pour surmonter ce problème, une structure hiérarchique était proposée afin de réduire le nombre de modèles locaux.

3.6 Multi-modèle de Takagi-Sugeno (TS)

3.6.1 Définition d'un modèle flou TS

Considérons l'équation générale d'un système non linéaire dynamique :

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f(x(t)) + g(x(t))u(t) \\ y(t) &= h(x(t))\end{aligned}\quad (3.6)$$

Où : $x(t) \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ est le vecteur de commande, $y(t) \in \mathbb{R}^q$ est le vecteur de sortie, $f(x(t))$, $g(x(t))$ et $h(t)$ sont des fonctions non linéaires de dimensions appropriées.

Le système (3.3) non linéaire peut être décrit par un ensemble de règles floues (**Si-Alors**) qu'il représente localement les relations entrées sorties d'un système en exprimant chaque conclusion par un système linéaire [2]. La i^{eme} règle du modèle flou s'écrit :

Si $z_1(t)$ est F_{1i} et...et $z_g(t)$ est F_{gi} **Alors** :

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) &= C_i x(t)\end{aligned}\quad i=1, \dots, r \quad (3.7)$$

où r est le nombre de règle Si-Alors, F_{gi} est l'ensemble flou et $z_1 \dots z_g$ sont les variables de prémisses. $A_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ est la matrice d'état, $B_i \in \mathbb{R}^{n \times m}$ est la matrice de sortie.

L'inférence du système flou est donné par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} \\ y(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))(C_i x(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} \end{array} \right. \quad (3.8)$$

où :

$$i=1, \dots, r, \quad z(t) = [z_1(t) \ z_2(t) \ \dots \ z_g(t)], \quad w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^p F_{ij}(z_j(t)).$$

$F_{ij}(z_j(t))$ est la valeur de la fonction d'appartenance $z_j(t)$ dans l'ensemble flou F_{ij} , et $\forall t \geq 0$,

on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_i w_i(z(t)) > 0 \\ w_i(z(t)) \geq 0 \end{array} \right. \quad (3.9)$$

on pose :

$$\mu_i(z(t)) = \frac{w_i(z(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} \quad (3.10)$$

Le modèle TS (3.5) s'écrit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t))C_i x(t) \end{array} \right. \quad (3.11)$$

Les $\mu_i(z(t))$ possèdent la propriété de la somme convexe, $\forall t \geq 0$, $\sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) = 1$

3.6.2 Constriction des modèles flous TS

Il existe trois méthodes permettant d'obtenir un modèle flou de type TS à partir d'un système non linéaire.

3.6.2.1 Identification

Les données retenues sur les entrées et les sorties du système permettent l'identification des paramètres des modèle locaux correspondant aux différents points de fonctionnement. Alors, pour estimer les paramètres, on utilise les techniques d'optimisation qui sont généralement basé sur la minimisation de la fonction d'écart entre la sortie estimée du modèle TS et la sortie mesurée du système non linéaire [13].

3.6.2.2 Linéarisation

Obtenir un modèle TS par linéarisation consiste à linéariser le système autour d'un ensemble de points de fonctionnement choisis judicieusement.

On a le système non linéaire suivant :

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t)) \\ y(t) &= h(x(t), u(t)) \end{aligned} \quad (3.12)$$

où $(f, h) \in R^{2n}$ sont des fonctions non linéaires continues, $x(t) \in R^n$ est le vecteur d'état et $u(t) \in R^m$ est le vecteur d'entrées.

En linéarisant le système non linéaire autour d'un point $(x_i, u_i) \in R^n \times R^m$, on trouve :

$$\begin{aligned} \dot{x}_m(t) &= \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) (A_i x_m(t) + B_i u(t) + D_i) \\ y_m(t) &= \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) (C_i x_m(t) + E_i u(t) + N_i) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Avec :

$$A_i = \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \Big|_{(x, u) = (x_i, u_i)}, B_i = \frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \Big|_{(x, u) = (x_i, u_i)}, C_i = \frac{\partial h(x, u)}{\partial x} \Big|_{(x, u) = (x_i, u_i)}, E_i = \frac{\partial h(x, u)}{\partial u} \Big|_{(x, u) = (x_i, u_i)}$$

$$D_i = f(x_i, u_i) - A_i x_i - B_i u_i, N_i = h(x_i, u_i) - C_i x_i - E_i u_i$$

Le nombre des sous modèle locaux dépend de la précision de la modélisation souhaitée, du choix de la structure des fonctions d'appartenance et de la complexité du système non linéaire.

3.6.2.3 Approche des secteurs non linéaires

Cette approche consiste à obtenir un modèle de type TS identique au modèle non linéaire dans un compact de l'espace des variables de prémisse. Dans ce contexte, parfois, il est difficile de trouver un secteur global pour le système non linéaire, c'est pour cette raison on considère un secteur non linéaire local. Celle-ci est résumée par le lemme suivant.

L'approche de secteur non linéaire utilise le lemme suivant [2] :

Lemme1.1

Soit $f(x(t)): R \rightarrow R$ une fonction bornée, il existe toujours deux fonctions $w_1(x(t))$ et ainsi $w_2(x(t))$ ainsi que, deux scalaires D et d tels que [14] :

(3.14)

avec :

$$w_1(x(t)) + w_2(x(t)) = 1, w_1(x(t)) \geq 0 \text{ et } w_2(x(t)) \geq 0 \quad (3.15)$$

Preuve :

Sous l'hypothèse que la fonction $f(x(t))$ est bornée telle que : $d \leq f(x(t)) \leq D$, il est possible d'écrire :

$$f(x(t)) = Dw_1(x(t)) + dw_2(x(t)) \quad (3.16)$$

avec :

$$D = \max(f(x(t))), d = \min(f(x(t))), w_1(t) = \frac{f(x(t)) - d}{D - d}, w_2(t) = \frac{D - f(x(t))}{D - d} \quad (3.17)$$

Quand les bornes de la fonction continu f est imposée (contrainte), alors, dans ce cas, le modèle T-S obtenu ne peut être exact que sur le compact correspondant à ces limites dans l'ensemble des variables d'état [14] .

3.7 Modèle TS de système photovoltaïque

Dans cette partie on va modéliser le système PV non linéaire à l'aide de l'approche multi-modèle flou.

3.7.1 Représentation de système PV avec convertisseur Boost

Le système PV défini par l'équation (2.19) s'écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{PV} \\ \dot{i}_l \\ \dot{V}_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C_2} & 0 \\ \frac{1}{L} & -\frac{R_l}{L} & -\frac{1}{L} \\ 0 & \frac{1}{C_2} & -\frac{1}{C_2 R_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{PV} \\ i_l \\ V_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V_{C2}}{L} \\ -\frac{i_L}{C_2} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} i_{pv} \quad (3.18)$$

$$\Rightarrow \dot{x} = A(x) + B(x)u + Db$$

Il existe deux non linéarité en B(x), donc deux variables de décision :

$$z_1(t) = V_{c2}(t)$$

$$z_2(t) = i_l(t)$$

on suppose que ces termes sont bornés :

$$d1 \leq z_1(t) \leq D1$$

$$d2 \leq z_2(t) \leq D2$$

en utilisant la méthode de secteur non linéaire (voir 3.6.2.3), on donne pour chaque variable de décision deux sous-ensembles flous :

$$S_{aj} = \frac{z_j - d_j}{D_j - d_j} \text{ et } S_{bj} = 1 - S_{aj} \quad (3.19)$$

$$\text{où : } D_j \equiv \max(z_j(t)) \text{ et } d_j \equiv \min(z_j(t)) \text{ pour: } j = 1, 2 \quad (3.20)$$

Le modèle finale de TS est obtenu par l'interpolation de quatre (4) modèles locaux. Il est donné par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^4 \mu_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t) + Db) \\ y(t) = \sum_{i=1}^4 \mu_i(z(t))C_i x(t) \end{cases} \quad (3.21)$$

avec :

$$w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^2 F_{ij}(z_j(t))$$

$$\mu_i(z(t)) = \frac{w_i(z(t))}{\sum_{i=1}^2 w_i(z(t))} \geq 0 \quad (3.22)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C_2} & 0 \\ \frac{1}{L} & -\frac{R_l}{L} & -\frac{1}{L} \\ 0 & \frac{1}{C_2} & -\frac{1}{C_2 R_0} \end{bmatrix}, B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\theta_{1i}}{L} \\ -\frac{\theta_{2i}}{C_2} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Sachant que les paramètres F_{ij} et θ_{ji} sont illustrées dans le tableau suivant :

Numéro de règle	Fonction d'activation (F_{1i}, F_{2j})	Sortie de système flou (θ_{1i}, θ_{2j})
1	(S_{a1}, S_{a2})	(D_1, D_2)
2	(S_{a1}, S_{b2})	(D_1, d_2)
3	(S_{b1}, S_{a2})	(d_1, D_2)
4	(S_{b1}, S_{b2})	(d_1, d_2)

Tableau 3.1 Règle floues pour le système PV avec convertisseur Boost

3.7.2 Représentation de système PV avec convertisseur Buck

Le système PV défini par l'équation (2.19) s'écrit comme suit :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_l \\ \dot{V}_{pv} \\ \dot{V}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_l}{L} - \frac{R_b}{l} i_b & \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \\ 0 & \frac{1}{C_a} \frac{i_{pv}}{V_{pv}} & 0 \\ \frac{1}{C_a} i_b & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_l \\ V_{pv} \\ V_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} (V_d + V_{pv}) \\ -\frac{1}{C_a} i_l \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} V_d \quad (3.24)$$

$$\Rightarrow \dot{x} = A(x) + B(x)u + Db$$

Il existe cinq termes non linéaires, donc cinq variables de décision :

$$z_1(t) = i_b$$

$$z_2(t) = i_l$$

$$z_3(t) = G_a = \frac{i_{pv}}{V_{pv}}$$

$$z_4(t) = V_{pv}$$

$$z_5(t) = (n_p k_{pv} / n_s) I_{or} e^{k_{pv} V_{pv} / n_s}$$

En suppose que ces termes sont bornées :

$$d1 \leq z_1(t) \leq D1$$

$$d2 \leq z_2(t) \leq D2$$

$$d3 \leq z_3(t) \leq D3$$

$$d4 \leq z_4(t) \leq D4$$

$$d5 \leq z_5(t) \leq D5$$

En utilisant la méthode de secteur non linéaire (voir 3.6.2.3), on donne pour chaque variable de décision deux sous-ensembles flous :

$$S_{aj} = \frac{z_j - d_j}{D_j - d_j} \text{ et } S_{bj} = 1 - S_{aj} \quad (3.25)$$

où : $D_j \equiv \max(z_j(t))$ et $d_j \equiv \min(z_j(t))$ pour: $j = 1, 5$ (3.26)

Le modèle finale de TS est obtenu par l'interpolation de 32 modèles locaux. Il est donné par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^{32} \mu_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t) + Db) \\ y(t) = \sum_{i=1}^{32} \mu_i(z(t)) C_i x(t) \end{cases} \quad (3.27)$$

avec :

$$\begin{aligned} w_i(z(t)) &= \prod_{j=1}^5 F_{ij}(z_j(t)) \\ \mu_i(z(t)) &= \frac{w_i(z(t))}{\sum_{i=1}^{r=32} w_i(z(t))} \geq 0 \end{aligned} \quad (3.28)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_l}{L} + \frac{R_b}{L} \theta_{1i} & \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \\ 0 & \frac{1}{C_a} \theta_{3i} & 0 \\ \frac{1}{C_a} \theta_{1i} & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} V_{pv} \\ -\frac{1}{C_a} i_l \\ 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Sachant que les paramètres F_{ij} et θ_{ji} sont illustrées dans le tableau suivant :

Numéro de règle	Fonction d'activation (F_{1i}, F_{2j})	Sortie de système flou (θ_{1i}, θ_{2j})
1	($S_{a1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{a5}$)	($D_1, D_2, D_3, D_4, D_3 - D_5$)
2	($S_{a1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{b4}, S_{a5}$)	($D_1, D_2, D_3, d_4, D_3 - D_5$)
3	($S_{a1}, S_{a2}, S_{b3}, S_{a4}, S_{a5}$)	($D_1, D_2, d_3, D_4, D_3 - D_5$)
4	($S_{a1}, S_{a2}, S_{b3}, S_{b4}, S_{a5}$)	($D_1, D_2, d_3, d_4, D_3 - D_5$)
5	($S_{a1}, S_{b2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{a5}$)	($D_1, d_2, D_3, D_4, D_3 - D_5$)
6	($S_{a1}, S_{b2}, S_{b3}, S_{b4}, S_{a5}$)	($D_1, d_2, D_3, d_4, D_3 - D_5$)
7	($S_{a1}, S_{b2}, S_{b3}, S_{a4}, S_{a5}$)	($D_1, d_2, d_3, D_4, D_3 - D_5$)
8	($S_{a1}, S_{b2}, S_{a3}, S_{b4}, S_{a5}$)	($D_1, d_2, d_3, d_4, D_3 - D_5$)
9	($S_{b1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{a5}$)	($d_1, D_2, D_3, D_4, D_3 - D_5$)
10	($S_{b1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{b4}, S_{a5}$)	($d_1, D_2, D_3, d_4, D_3 - D_5$)
11	($S_{b1}, S_{a2}, S_{b3}, S_{a4}, S_{a5}$)	($d_1, D_2, d_3, D_4, D_3 - D_5$)
12	($S_{b1}, S_{a2}, S_{b3}, S_{b4}, S_{a5}$)	($d_1, D_2, d_3, d_4, D_3 - D_5$)
13	($S_{b1}, S_{b2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{a5}$)	($d_1, d_2, D_3, D_4, D_3 - D_5$)
14	($S_{b1}, S_{b2}, S_{a3}, S_{b4}, S_{a5}$)	($d_1, d_2, D_3, d_4, D_3 - D_5$)
15	($S_{b1}, S_{b2}, S_{b3}, S_{a4}, S_{a5}$)	($d_1, d_2, d_3, D_4, D_3 - D_5$)
16	($S_{b1}, S_{b2}, S_{b3}, S_{b4}, S_{a5}$)	($d_1, d_2, d_3, d_4, D_3 - D_5$)
17	($S_{a1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{a5}$)	($D_1, D_2, D_3, D_4, D_3 - D_5$)
18	($S_{a1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{b4}, S_{a5}$)	($D_1, D_2, D_3, d_4, D_3 - D_5$)

19	$(S_{a1}, S_{a2}, S_{b3}, S_{a4}, S_{a5})$	$(D_1, D_2, d_3, D_4, D_3 - d_5)$
20	$(S_{a1}, S_{a2}, S_{b3}, S_{b4}, S_{a5})$	$(D_1, D_2, d_3, d_4, D_3 - d_5)$
21	$(S_{a1}, S_{b2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{a5})$	$(D_1, d_2, D_3, D_4, D_3 - d_5)$
22	$(S_{a1}, S_{b2}, S_{b3}, S_{b4}, S_{a5})$	$(D_1, d_2, D_3, d_4, D_3 - d_5)$
23	$(S_{a1}, S_{b2}, S_{b3}, S_{a4}, S_{a5})$	$(D_1, d_2, d_3, D_4, D_3 - d_5)$
24	$(S_{a1}, S_{b2}, S_{a3}, S_{b4}, S_{a5})$	$(D_1, d_2, d_3, d_4, D_3 - d_5)$
25	$(S_{b1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{a5})$	$(d_1, D_2, D_3, D_4, D_3 - d_5)$
26	$(S_{b1}, S_{a2}, S_{a3}, S_{b4}, S_{a5})$	$(d_1, D_2, D_3, d_4, D_3 - d_5)$
27	$(S_{b1}, S_{a2}, S_{b3}, S_{a4}, S_{a5})$	$(d_1, D_2, d_3, D_4, D_3 - d_5)$
28	$(S_{b1}, S_{a2}, S_{b3}, S_{b4}, S_{a5})$	$(d_1, D_2, d_3, d_4, D_3 - d_5)$
29	$(S_{b1}, S_{b2}, S_{a3}, S_{a4}, S_{a5})$	$(d_1, d_2, D_3, D_4, D_3 - d_5)$
30	$(S_{b1}, S_{b2}, S_{a3}, S_{b4}, S_{a5})$	$(d_1, d_2, D_3, d_4, D_3 - d_5)$
31	$(S_{b1}, S_{b2}, S_{b3}, S_{a4}, S_{a5})$	$(d_1, d_2, d_3, D_4, D_3 - d_5)$
32	$(S_{b1}, S_{b2}, S_{b3}, S_{b4}, S_{a5})$	$(d_1, d_2, d_3, d_4, D_3 - d_5)$

Tableau 3.2 Règles floues pour le système PV avec convertisseur buck

3.8 Résultats de simulation

3.8.1 Avec le convertisseur Boost

Les figures suivantes présentent la réponse de système non linéaire et la réponse de la représentation multi-modèle en boucle ouvert pour les conditions initiales $x(0)=[0 \ 0 \ 0]$

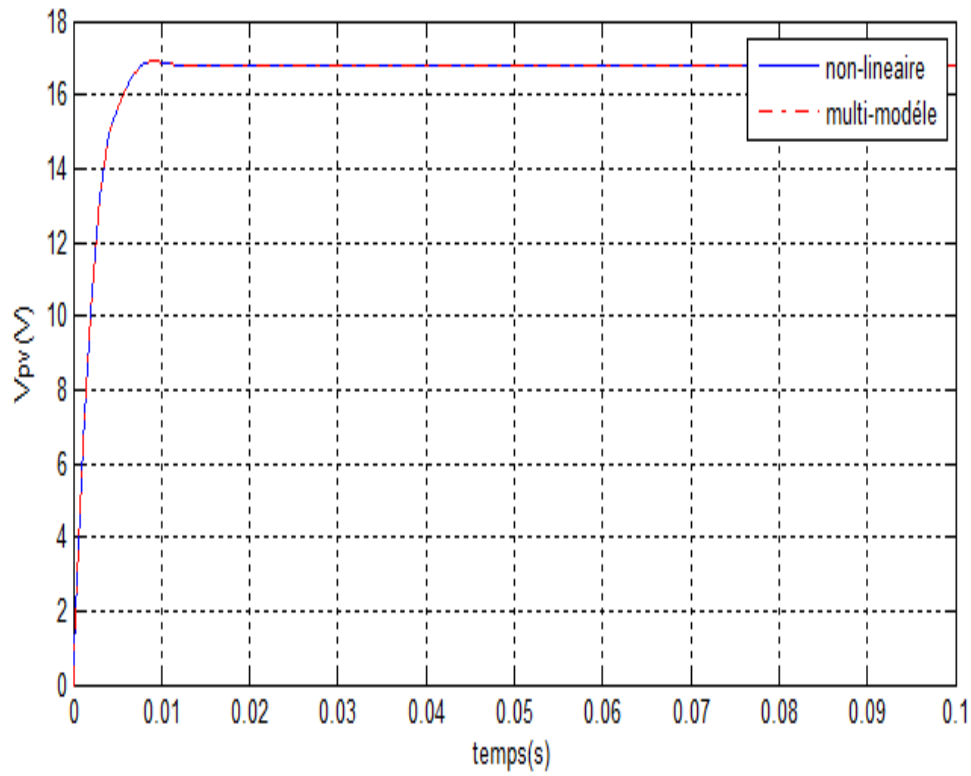


Figure 3.2 Tension : $V_{pv}(t)$

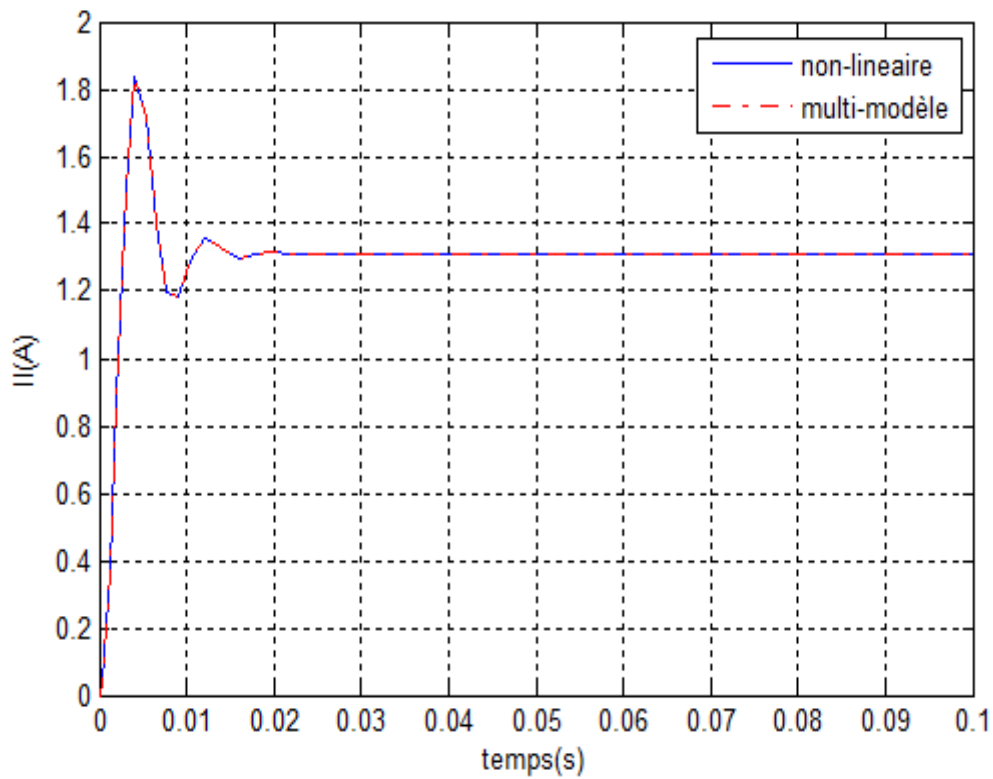


Figure 3.3 Courant: $il(t)$

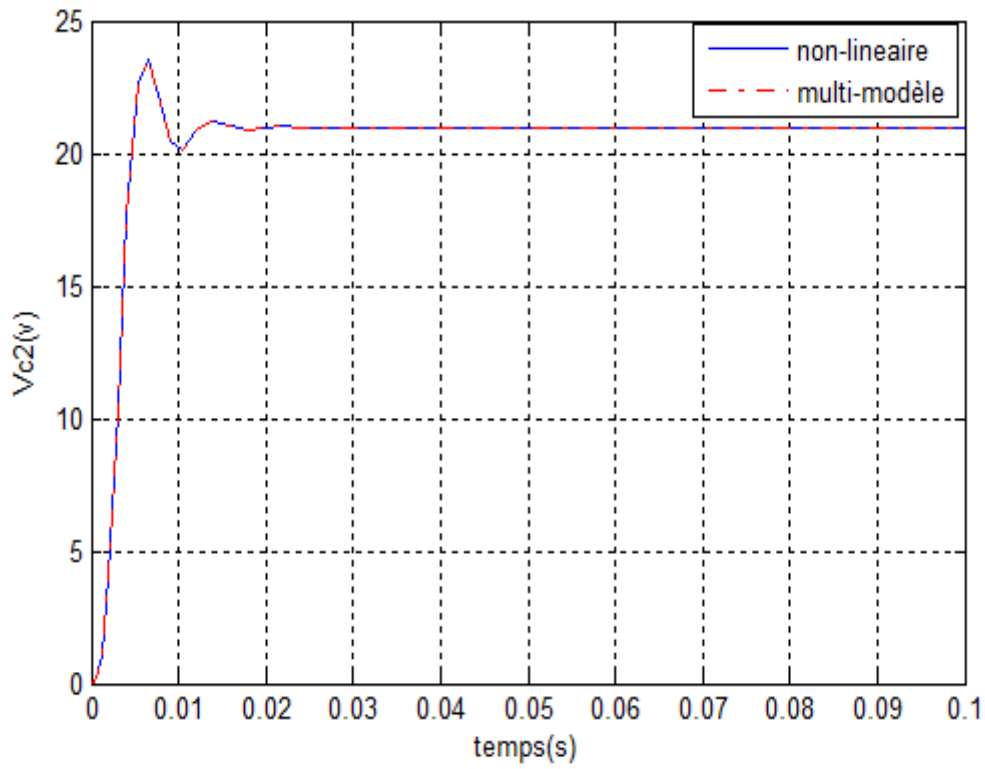


Figure 3.4 Tension: $V_{c2}(t)$

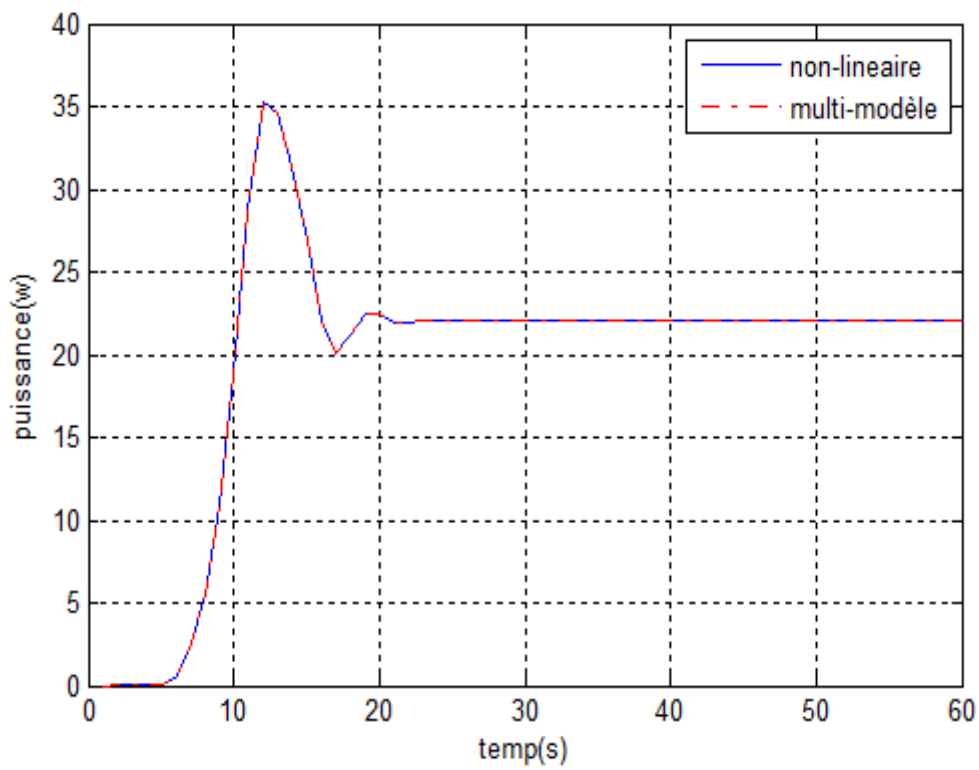


Figure 3.5 Puissance : P_{pv}

3.8.2 Avec convertisseur Buck

Les figures suivantes présentent la réponse de système non linéaire et la réponse de la représentation multi-modèle en boucle ouverte pour les conditions initiales $x(0)=[-5 \ 12 \ 0]$

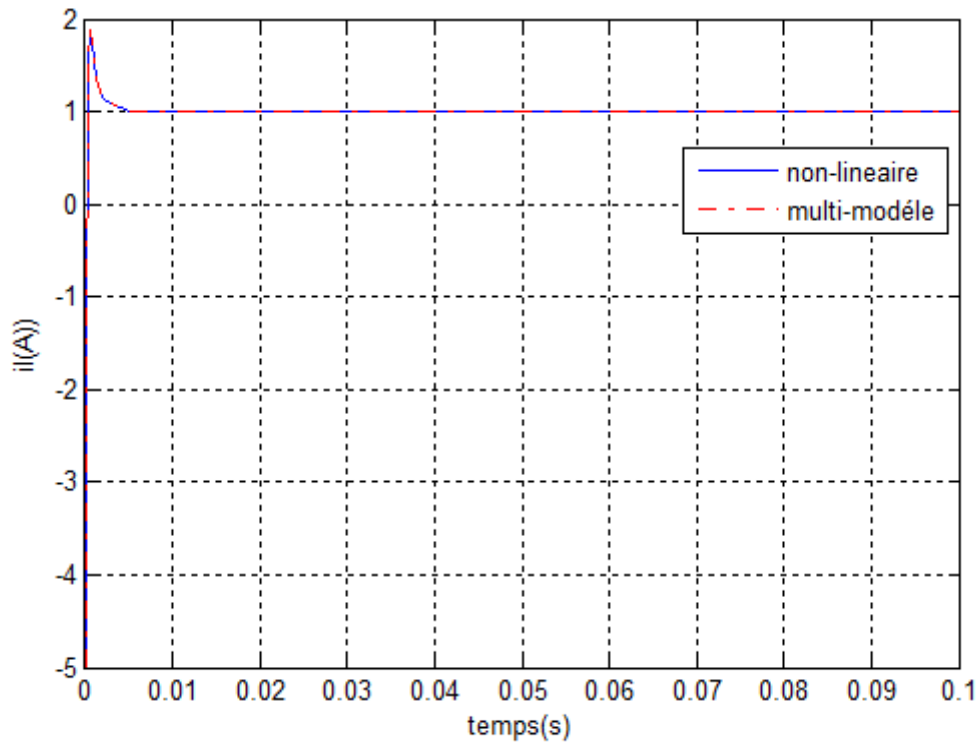


Figure 3.6 Courant : $i_l(t)$

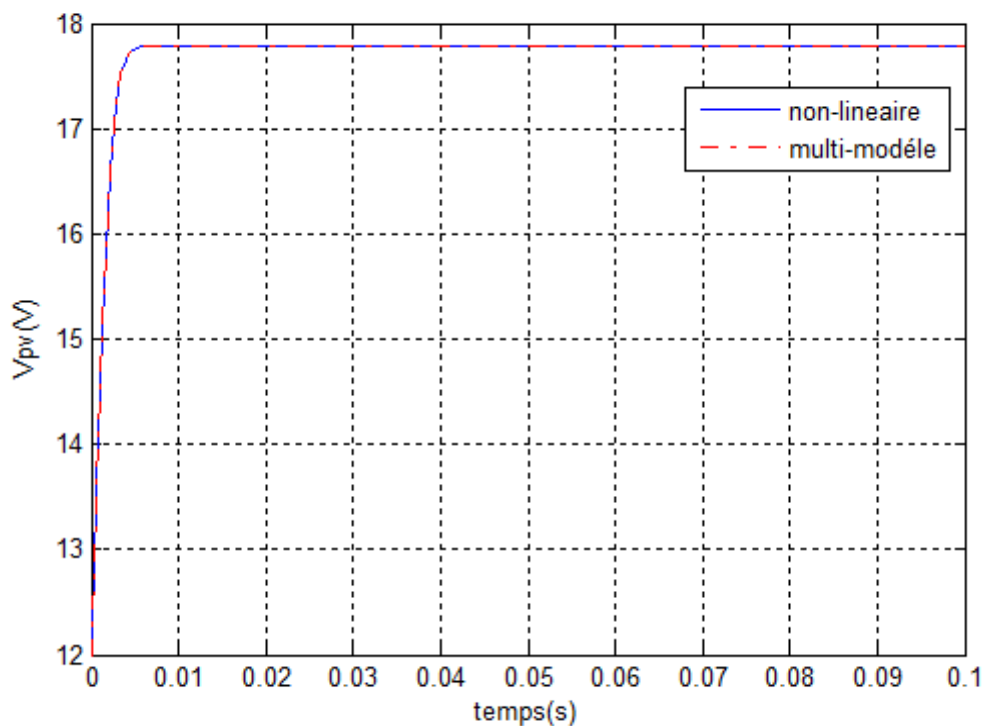
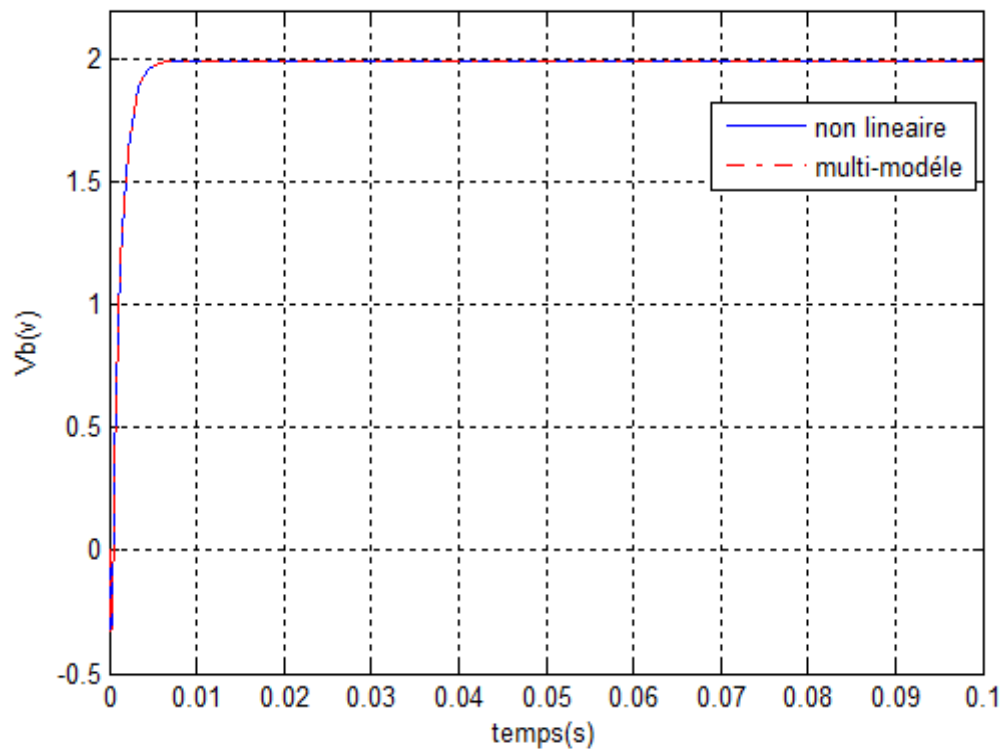
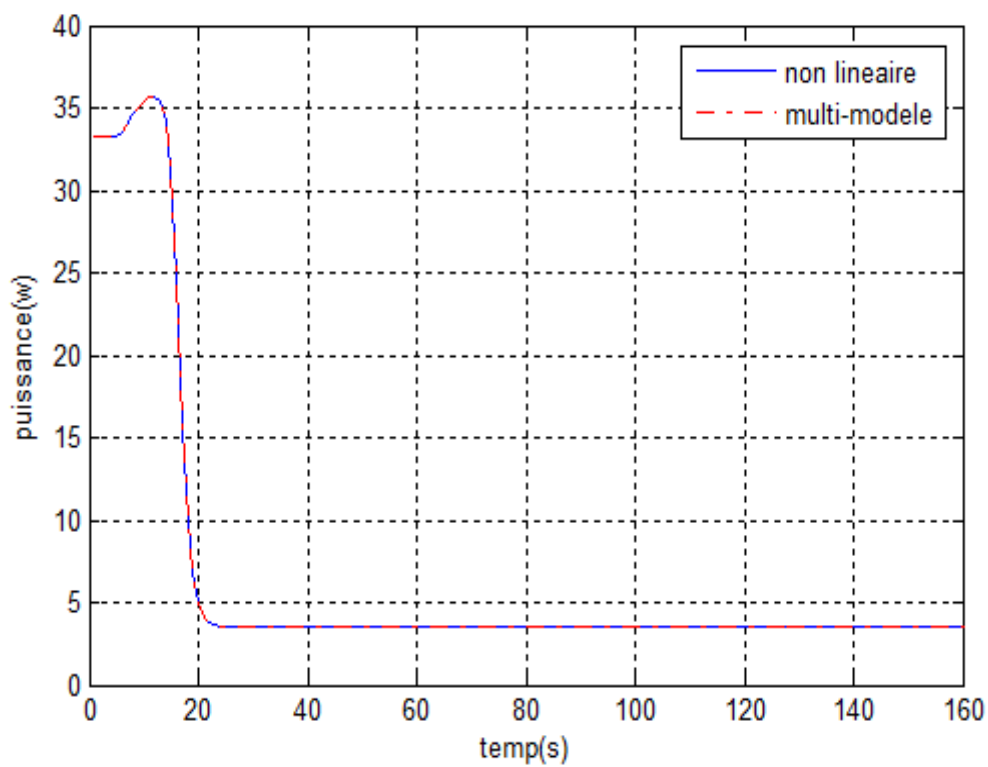


Figure 3.7 Tension: $V_{pv}(t)$

**Figure 3.8** Tension: $V_b(t)$ **Figure 3.9** Puissance : P_{pv}

Interprétation:

On remarque que la réponse de système non linéaire et celle de multi-modèle est la même, aucune différence n'existe, ce bon résultat revient à la capacité de l'approche multi-modèle à suivre le comportement dynamique du système non linéaire.

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié le passage d'un système de sa forme non linéaire vers la forme multi-modèle, ce passage est assuré par l'utilisation de la logique floue.

Les résultats obtenues par la simulation des multi-modèles sont les mêmes que les résultats de simulation des systèmes non linéaires. Donc on conclue que l'approche MM permet de donner une autre forme équivalente de systèmes

L'approche multi-modèle permet de concevoir une commande robuste des systèmes non linéaires. Ce point est bien détaillé dans le chapitre suivant.

Chapitre 04

Poursuite de la puissance optimale du système photovoltaïque

4.1 Introduction

La stabilité des systèmes en boucle fermée est l'un des problèmes les plus importants de la théorie de la commande. La boucle de retour est la structure qui permet d'obtenir les objectifs de la commande en termes de stabilité, de poursuite et de réjection de perturbation.

Une boucle de retour permet souvent de stabiliser un système instable en boucle ouverte, mais il est aussi possible de rendre instable en boucle fermée, un système stable en boucle ouverte[15].

Que ce soit pour l'analyse de la stabilité ou pour le calcul des lois de commande stabilisant un modèle T-S, l'approche basée sur la seconde méthode de Lyapunov reste, de loin, la plus utilisée. Des propriétés de stabilité peuvent alors déduites par la résolution d'un ensemble d'inégalités linéaires matricielles (LMIs).

L'étude effectuée dans ce chapitre a pour intérêt de mettre en relief les notions fondamentales, de la stabilité de Lyapunov et la commande par retour d'état, indispensables pour entamer les problèmes de stabilisation et la poursuite de puissance maximale du système PV.

4.2 Analyse de la stabilité

4.2.1 Stabilité au sens de Lyapunov : méthode directe

Le concept principal de cette théorie est basé sur l'idée que s'il y a une fonction ayant forme énergétique soit dissipée dans le temps, alors elle tend vers un point d'équilibre. Dans ce contexte, l'utilisation de la fonction de Lyapunov est une mesure de distance entre les variables d'état et le point d'équilibre. La difficulté de cette méthode repose sur la détermination de ces fonctions [1].

$$\dot{x}(t) = f(x(t)) \quad (4.1)$$

avec : $f(x(t)) \in C^1$ et $x(t) \in \mathbb{R}^n \longrightarrow \mathbb{R}^n$

Si l'état de système (4.1) ne varie pas au cours du temps autour d'un point x_0 , alors x_0 est un point d'équilibre.

Définition 4.1 (point d'équilibre)

x_0 est appelé point d'équilibre du système (4.1) si $f(x_0) = 0, \forall t > 0$

Théorème 4.1

Soit une fonction scalaire $V(x(t)) \in C^1$ telle que :

$$\alpha_1(x(t)) \leq V(x(t)) \leq \alpha_2(x(t)) \quad (4.2)$$

$\forall \|x\| < d$ où $\alpha_1(\cdot)$ et $\alpha_2(\cdot)$ sont des fonctions de classe k définies sur $[0, d), d \in \mathbb{R}^{+*}$

1-Si $\frac{\partial V(x)}{\partial x} f(x) \leq 0, \forall \|x\| < d$ alors le point d'équilibre ($x_0 = 0$) de (1.53) est localement stable (il est globalement stable si, de plus, $d = \infty$ et les fonctions $\alpha_1(\cdot)$ et $\alpha_2(\cdot)$ sont de classe k_∞).

2-Si $\frac{\partial V(x)}{\partial x} f(x) \leq -\alpha_0(\|x\|), \forall \|x\| < d$ avec $\alpha_0(\cdot)$ fonction de classe k définie sur $[0, d)$, alors le point d'équilibre de (4.1) est localement asymptotiquement stable.

3-Si $\frac{\partial V(x)}{\partial x} f(x) \leq -\alpha_0(\|x\|), \forall x (d = \infty)$ et les fonctions $\alpha_1(\cdot)$ et $\alpha_2(\cdot)$ sont de classe k_∞ alors le point d'équilibre de (4.1) est globalement asymptotiquement stable [1].

4.2.2 Types des fonctions de Lyapunov

Dans le cas général, il n'existe pas une méthode pour trouver toutes les fonctions candidates de Lyapunov. Dès lors, la théorie de Lyapunov conduit à des conditions suffisantes de stabilité dont le pessimisme dépend de la forme particulière imposée à la fonction $V(x(t))$ et de la structure du système. Cependant, il existe des familles de fonctions de Lyapunov souvent utilisées et dont l'adoption dépend de la nature du système à étudier (systèmes linéaires, systèmes à retard, systèmes linéaires incertains, etc... [1]).

4.2.2.1 Fonction quadratique

La forme quadratique est donnée par :

$$V(x(t)) = x^t(t) P x(t), P > 0 \quad (4.3)$$

La fonction quadratique est utilisée pour étudier les systèmes linéaires et les systèmes représentés sous la forme multi-modèles (système interconnecté), la forme de ces fonctions est :

$$V(x(t)) = x^t(t) \sum_{i=1}^r \alpha_i P_i x(t) \quad (4.4)$$

avec : $P_i > 0; \alpha_i \in R^{+*}$

4.2.2.2 Fonction polyquadratique

La forme utilisée pour ce type de fonction est la suivante :

$$V(x(t), z(t)) = x^t(t) \sum_{i=1}^r (z(t) P_i x(t)) \quad (4.5)$$

avec : $P_i > 0, \mu_i(z(t)) > 0; \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) = 1$

Ce type de fonction est utilisé pour les systèmes discrets à paramètres variant dans le temps.

4.2.2.3 Fonction affine paramétrique

Ce type de fonction est donné par :

$$V(x(t)) = x^t(t) P(\theta) x(t) \quad (4.6)$$

avec : $P(\theta) = P_0 + \theta_1 P_1 + \dots + \theta_k P_k > 0$

4.2.2.4 Fonction continues par morceaux

Ce type de fonction est donné par :

$$V(x(t)) = \max(V_1(x(t)), \dots, V_i(x(t)), \dots, V_n(x(t))) \quad (4.7)$$

avec : $V_i(x(t)) = x(t)^T P_i x(t), P_i > 0, i \in I_n$

4.3 Inégalités linéaires matricielles (LMI)

Depuis quelques années, de nombreux travaux ayant pour principale but de réduire une grande variété de problème de synthèse ou d'analyse a des problèmes d'optimisation

convexes impliquant des LMI, parmi les raisons d'application de cette approche est l'existence de méthode de résolution.

Définition 4.3

Etant donné une famille de matrices symétriques $P_i, i \in I_n$ de R^{pp} et un vecteur $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in R^n$, une LMI stricte (resp. non stricte) en $x_i, i \in I_n$ s'écrit sous la forme :

$$F(x) = P_0 + \sum_{i=1}^r x_i P_i > 0 \quad (\text{resp. } \geq 0) \quad (4.8)$$

avec : $E = \{x \in R^n : F(x) > 0\}$ est convexe, ce qui nous amène à considérer une contrainte LMI comme une contrainte convexe.

4.4 Problèmes LMI

Les trois problèmes d'optimisation convexe les plus connus sous forme de LMI sont :

- **Problème de réalisabilité (Faisabilité)** : il s'agit de trouver un vecteur z tel que la contrainte convexe $F(x) > 0$ est satisfaite, ce problème peut être résolu en trouvant un vecteur minimisant un scalaire t tel que :

$$-F(x) < tI \quad (4.9)$$

Le problème est réalisable si la valeur minimale de t est négative.

- **Problème de valeur propre** : il s'agit de minimiser la plus grande valeur propre d'une matrice symétrique sous une contrainte de type LMI

$$\text{minimiser } \lambda \text{ sous les contraintes } \begin{cases} \lambda I - A(x) > 0 \\ B(x) > 0 \end{cases} \quad (4.10)$$

- **Problèmes de valeurs propres généralisées** : il s'agit de minimiser la plus grande valeur propre généralisée d'une matrices, par rapport à une contrainte LMI

$$\text{minimiser } \lambda \text{ sous les contraintes } \begin{cases} \lambda B(x) - A(x) > 0 \\ B(x) > 0 \\ C(x) > 0 \end{cases} \quad (4.11)$$

Ces problèmes d'optimisation convexe peuvent alors être résolus par différents types des méthodes grâce aux outils disponibles comme le "LMI control Toolbox" de MATLAB.

4.5 Stabilités quadratique

La stabilité quadratique repose sur les fonctions de Lyapunov quadratique; qui cherche à obtenir une matrice P symétrique définie positive et sa fonction de Lyapunov associé tel que la stabilité est garantie à certaines conditions.

4.5.1 Stabilité globale

Le multi-modèles en BO est donné par :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) A_i x(t) \quad (4.12)$$

Le multi-modèles en BF est donné par :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) (A_i x(t) + B_i u(t)) \quad (4.13)$$

Le multi-modèle (4.12) est asymptotiquement stable s'il existe une matrice symétrique $P > 0$ telle que les LMIs suivante sont réalisables :

$$P > 0, A_i^T P + P A_i < 0, \forall i \in I_n \quad (4.14)$$

Preuve :

La fonction candidate quadratique de Lyapunov est donnée par : $V(x(t)) = x^T(t) P x(t), P > 0$

Le modèle de Takagi-Sugeno est stable si :

$$\dot{V}(x(t)) = \dot{x}(t) P x(t) + x^T(t) P \dot{x}(t) < 0 \quad (4.15)$$

Qui est équivalent à :

$$\dot{V}(x(t)) = x^T(t) \left(\sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) (A_i^T P + P A_i) \right) x(t) < 0 \quad (4.16)$$

Qui vérifie le 2^{ème} point de théorème (4.1)

4.5.2 Stabilité locale (Ellipsoïde invariant)

Soit une matrice Q définie positive symétrique et l'ellipsoïde centré sur zéro défini par :

$$\xi_Q = \{x \in \mathbb{R}^p : x^T Q^{-1} x \leq 1\} \quad (4.17)$$

Si la fonction de Lyapunov $V(x(t)) = x^T Q^{-1} x$ vérifie, pour toute trajectoire $x(t)$, la condition :

$$\frac{dV(x(t))}{d(x(t))} < 0 \quad (4.18)$$

Alors toute trajectoire de condition initiale $x(0) \in \xi_Q$ ne s'échappe pas de l'ellipsoïde.

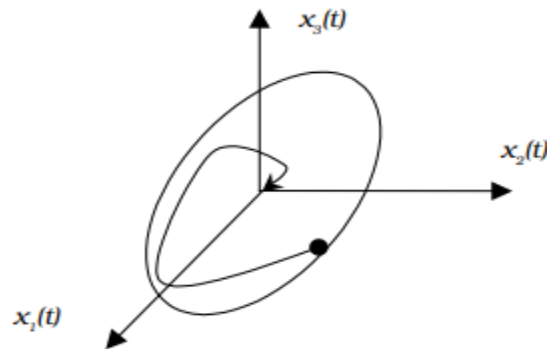


Fig 4.1 Ellipsoïde dans le cas d'un système à trois dimensions

4.6 Complément de schur

Soit trois matrices $R(x) = R(x)^T$, $Q(x) = Q(x)^T$ et $S(x)$ affines pour la variable x , les LMI suivantes sont équivalentes :

- $\begin{bmatrix} Q(x) & S(x) \\ S(x)^T & R(x) \end{bmatrix} > 0$
- $R(x) > 0, Q(x) - R(x)^{-1} S(x)^T > 0$

4.7 Stabilisation par retour d'état

Les conditions de synthèse s'obtiennent fréquemment en utilisant formellement les conditions d'analyse et en remplaçant les matrices de la représentation d'état du système en BO par celle de système en BF. Le problème ne se formule pas directement comme un

problème LMI, mais s'appuie sur des contraintes de type BMI. C'est le cas de la stabilisation par retour d'état. Plusieurs méthodes sont envisagées pour se ramener à des LMI.

4.7.1 Commande PDC

La commande PDC est utilisée pour trouver une loi de commande pour le multi-modèle. A chaque multi-modèle on construit un régulateur par retour d'état, elle est de la forme :

$$u(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) K_i x(t) \quad (4.19)$$

On s'aperçoit facilement que ce type de loi de commande fait intervenir des termes croisés, pour résoudre cette difficulté, un retour d'état linéaire est utilisé ou les fonctions d'activation sont omises :

$$u(t) = Kx(t) \quad (4.20)$$

4.7.2 Commande CDF

L'avantage de cette loi de commande est d'éviter l'utilisation des modèles croisés et s'écrit :

$$u(t) = \frac{\sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) \alpha_i K_i}{\sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) \alpha_i} \quad (4.21)$$

4.8 Stabilisation du système PV

Soit le système PV avec convertisseur Boost défini par le multi-modèle (3.23) et la loi de commande PDC (4.19).

Le système en BF s'écrit sous la forme suivante :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \mu_i(A_i + B_i k_j x) + Db \quad (4.22)$$

Donc :

$$\dot{x}(t) = A_i^\mu + B_i^\mu k_j^\mu + Db \quad (4.23)$$

$$\text{avec : } A_i^\mu = \sum_{i=1}^n \mu_i A_i, B_i^\mu = \sum_{i=1}^n \mu_i B_i, k_j^\mu = \sum_{j=1}^n \mu_j k_j, D_i^\mu = \sum_{i=1}^n \mu_i D_i,$$

on a :

$$\dot{V}(t) = \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x} \quad (4.24)$$

alors :

$$\dot{V}(t) = \left[(A_i^\mu + B_i^\mu k_j^\mu) x + Db \right]^T P x + x^T P \left[(A_i^\mu + B_i^\mu k_j^\mu) x + Db \right]$$

$$\dot{V}(t) = \left[(x^T (A_i^\mu + B_i^\mu k_j^\mu)^T + (Db)^T) P x + x^T P ((A_i^\mu + B_i^\mu k_j^\mu) x + Db) \right]$$

$$\Rightarrow \dot{V}(t) = x^T ((A_i^\mu + B_i^\mu k_j^\mu)^T P + P(A_i^\mu + B_i^\mu k_j^\mu)) x + b^T D^T P x + x^T P^T D b < 0$$

on suppose que : $A_i^\mu + B_i^\mu k_j^\mu = \overline{A_{ij}^\mu}$

$$\text{on trouve : } \dot{V}(t) = x^T (\overline{A_{ij}^\mu}^T P + P \overline{A_{ij}^\mu}) x + b^T D^T P x + x^T P^T D b < 0$$

par l'utilisation de la relation : $Y^T x + x^T Y < x^T x + Y^T Y$

$$\text{on trouve : } \dot{V}(t) = x^T (\overline{A_{ij}^\mu}^T P + P \overline{A_{ij}^\mu}) x + x^T P D D^T P x + b^T b < 0$$

en tenant compte de la contrainte suivante :

$$x^T Q x < b^T b \quad (4.25)$$

$$\text{alors : } \dot{V}(t) = x^T (\overline{A_{ij}^\mu}^T P + P \overline{A_{ij}^\mu}) x + x^T Q x + x^T P D^T D P x < 0$$

$$\dot{V}(t) = x^T (\overline{A_{ij}^\mu}^T P + P \overline{A_{ij}^\mu} + Q + P D^T D P) x < 0$$

$$\text{donc : } (\overline{A_{ij}^\mu}^T P + P \overline{A_{ij}^\mu} + Q + P D^T D P) < 0$$

Si on considère que $P = X^{-1}$, on obtient l'inégalité suivante :

$$(\overline{A_{ij}^{\mu}}^T X^{-1} + x^{-1} \overline{A_{ij}^{\mu}} + X^{-1} Q + X^{-1} D^T D X^{-1}) < 0$$

en multipliant a gauche et a droite par la matrice X, on trouve :

$$(X \overline{A_{ij}^{\mu}}^T + \overline{A_{ij}^{\mu}} X + QX + D^T D) < 0 \quad (4.26)$$

La formule (4.26) représente la condition de stabilisation pour $i=1 \dots n$ et $j=1 \dots n$

Les conditions de stabilisations peuvent s'écrire sous la forme matricielle suivante:

$$\begin{bmatrix} X \overline{A_{ij}^{\mu}}^T + \overline{A_{ij}^{\mu}} X + D^T D & QX \\ * & -X \end{bmatrix} < 0 \quad (4.27)$$

avec : $X \overline{A_{ij}^{\mu}}^T + \overline{A_{ij}^{\mu}} X + D^T D = X [A_i + B_i k_j]^T + [A_i + B_i k_j] X + D^T D$

Supposant que : $M_j = k_j X$

on obtient : $X \overline{A_{ij}^{\mu}}^T + \overline{A_{ij}^{\mu}} X + D^T D = (X A_i + M_j B_i)^T + (A_i X + B_i M_j) + D^T D$

si l'inégalité suivante est satisfaisante : $\min(x^T Q x) \leq \|b^2\|$

alors la relation (4.26) est vérifiée

4.9 Conception de commande poursuite du point maximal

L'objectif d'une commande MPPT est de concevoir un régulateur qui permet de maximiser la puissance du panneau PV, donc le rôle de régulateur est d'assurer que l'état $x(t)$ du système PV suit une trajectoire de référence $x_r(t)$ dans des conditions météorologiques variables.

Le schéma présente le processus à suivre pour obtenir une commande MPPT :

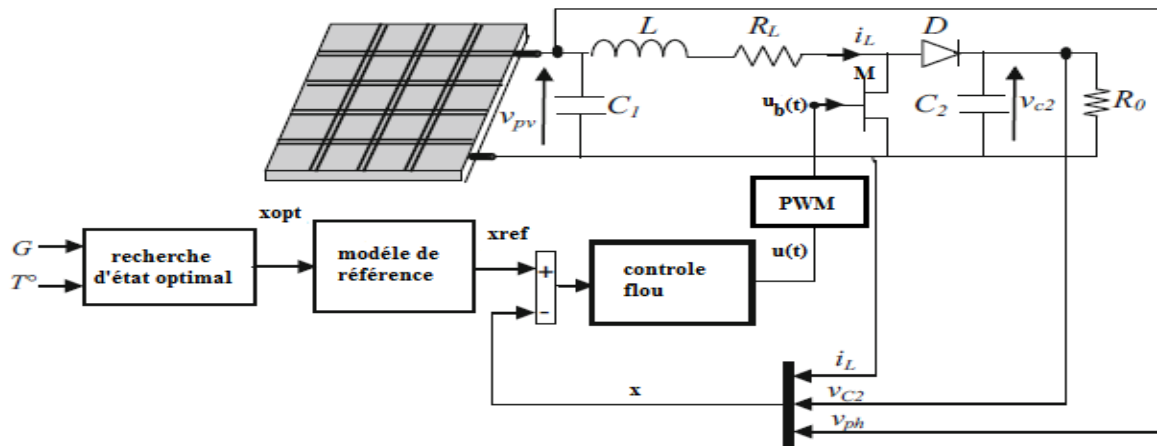


Figure 4.2 Processus de commande MPPT

L'état du transistor M est contrôlé par un signal binaire $u_b(t)$. Si $u_b(t) = 0$, le transistor sera bloqué (interrupteur ouvert). Si $u_b(t) = 1$, le transistor sera saturé (interrupteur fermé). Le signal $u_b(t)$ est généré en comparant un signal triangulaire de fréquence $\frac{1}{T_s}$ et d'amplitude 1 du circuit PWM (Pulse Width Modulation) avec le rapport cyclique $d(t) = \frac{T_{on}}{T_s}$ [18]

(voir Fig 4.33)

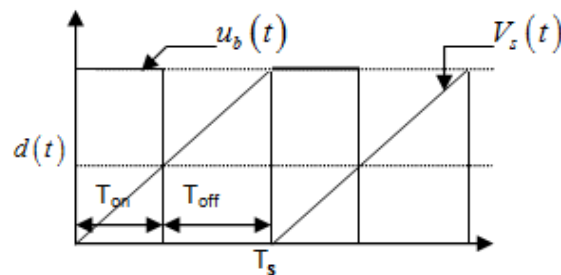


Figure 4.3 Forme d'impulsion PWM

4.9.1 Recherche d'état optimal

A l'état optimal ou la puissance est maximale, on a :

$$\frac{d}{dt}(V_{pv} i_{pv}) = 0 \quad (4.28)$$

Donc :

$$V_{pv} + i_{pv} \frac{dV_{pv}}{di_{pv}} = 0 \quad (4.29)$$

et on a :

$$i_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{pv}}{nV_t}} - 1 \right) \quad (4.30)$$

alors, si $i_{pv} = I_{pvopt}$ on trouve :

$$I_{pvopt} = 0.909 I_{ph} \quad (4.31)$$

et :

$$V_{pvopt} = nV_t \log\left(\frac{I_{ph} - I_{pvopt} + I_0}{I_0}\right) \quad (4.32)$$

4.9.2 Modèle de référence

Sur la base de la structure du modèle TS du convertisseur continu Boost, le modèle de référence MPP est conçu pour générer l'état de référence souhaité à suivre. Ici, le courant optimal (I_{opt}) est pris comme une entrée de modèle de référence (Figure 4.2). L'équation d'espace d'état du modèle de référence MPP est définie comme suit :

$$\dot{x}_r(t) = A_r x_r(t) + r(t) \quad (4.33)$$

$$\text{tel que : } A_r = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C_1} & 0 \\ \frac{1}{L} & -\frac{R_l}{L} & -\frac{1}{L}(1-u_{opt}) \\ 0 & \frac{1}{C_2}(1-u_{opt}) & -\frac{1}{R_0 C_2} \end{bmatrix}, r(t) = \begin{bmatrix} \frac{I_{pvopt}}{C_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, u_{opt} = 1 - \sqrt{\frac{V_{pvopt}}{R_0 I_{pvopt}}}$$

En tenant compte qu'il existe une seule variable de décision : $z_r = 1 - u_{opt}$

on obtient le modèle T-S du modèle de référence est présenté comme suit :

$$\dot{x}_r = \sum_{k=1}^2 \mu_{k(z_r(t))} (A_{rk} x_r(t) + r(t)) \quad (4.34)$$

Et :

$$A_{r1} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C_1} & 0 \\ \frac{1}{L} & -\frac{R_l}{L} & -\frac{1}{L} z_{r\min} \\ 0 & \frac{1}{C_2} z_{r\min} & -\frac{1}{R_0 C_2} \end{bmatrix}, A_{r2} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C_1} & 0 \\ \frac{1}{L} & -\frac{R_l}{L} & -\frac{1}{L} z_{r\max} \\ 0 & \frac{1}{C_2} z_{r\max} & -\frac{1}{R_0 C_2} \end{bmatrix}$$

Les figures suivantes montrent les trajectoires des variables optimales et la réponse du modèle de référence.

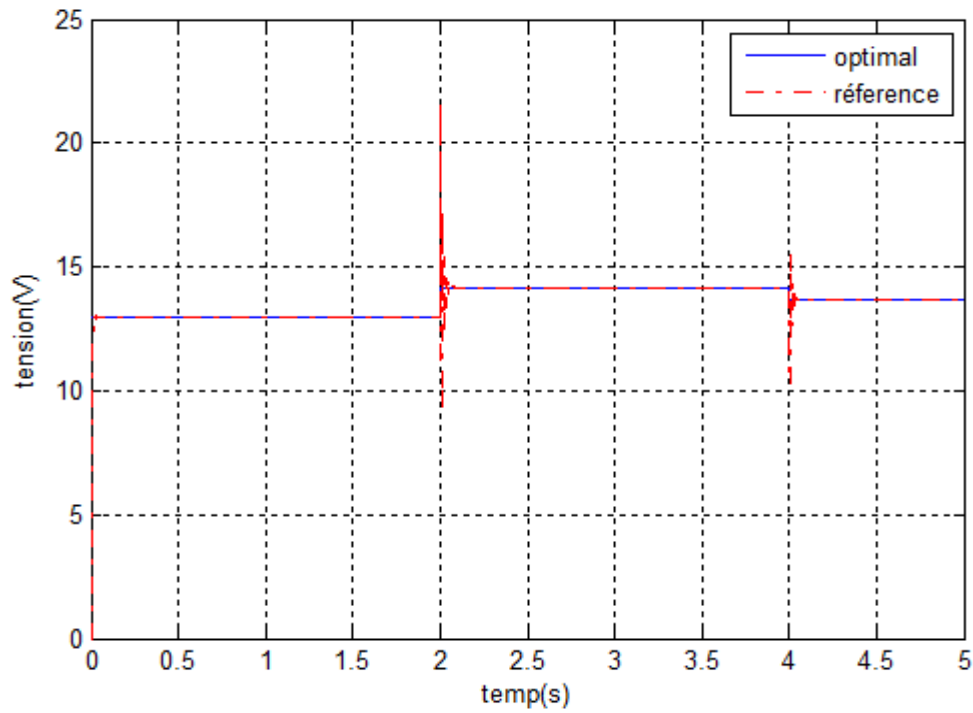


Figure 4.4 Tension de référence et la tension optimale

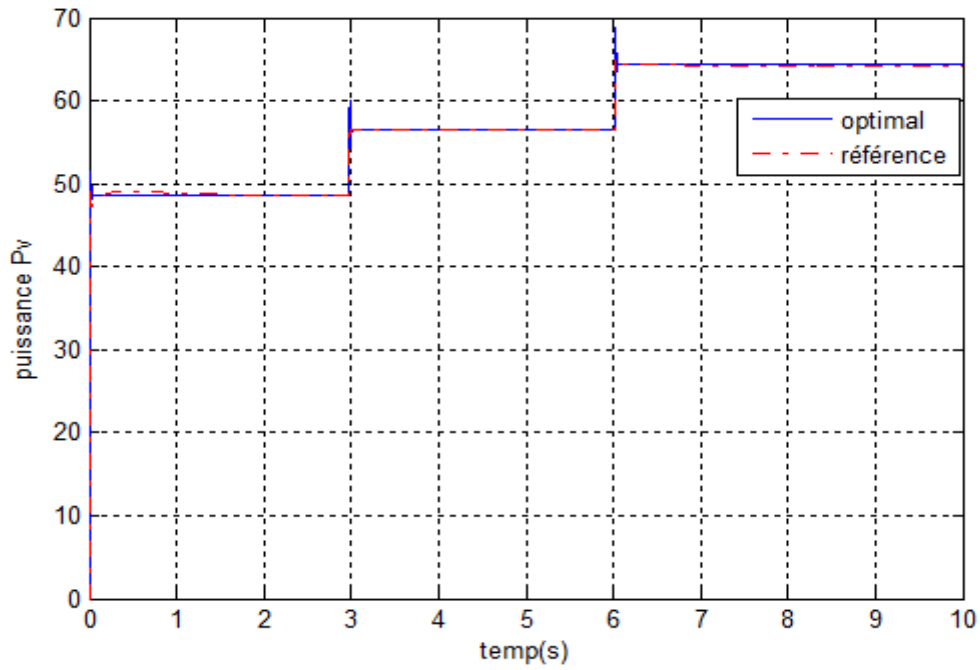


Figure 4.5 Puissance de référence et la puissance optimale

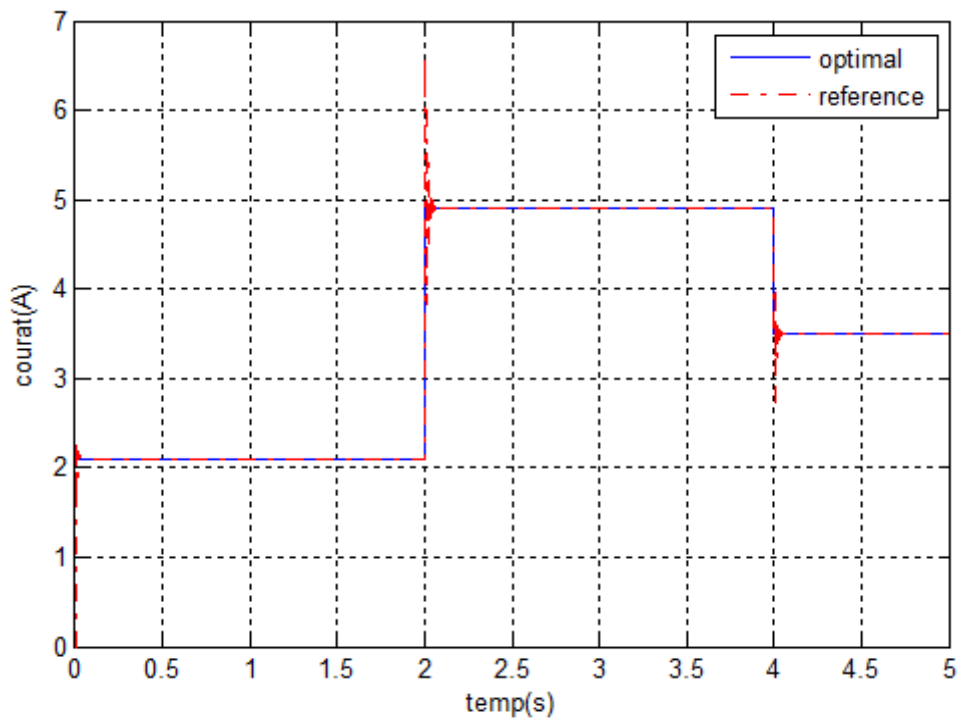


Figure 4.6 Courant de référence et le courant optimale

4.9.3 Commande H_∞

Le but de la commande H_∞ est d'étendre les conditions de stabilité de système qui est soumis à des perturbations $w(t)$ sur le comportement de système. Le signal $w(t)$ est supposé d'énergie finie et sa taille est mesuré en norme L_2 d'un vecteur coût $z(t)$. IL s'agit donc de synthétiser une loi de commande $u(t)$ qui minimise l'impact de $w(t)$ sur $z(t)$. On mesure cet impact par le rapport $\frac{\|z(t)\|_2}{\|w(t)\|_2}$. La stabilité interne de système bouclé devra bien sûr être assuré [100].

Définition 4.4

Sur l'espace L_2 des signaux de carré sommable sur $(0, \infty)$, on définit le produit scalaire :

$$\langle x(t), y(t) \rangle = \int_0^{\infty} x(t)y(t) \quad (4.35)$$

qui induit la norme de l'énergie :

$$\|x(t)\|_2 = \left(\int_0^{\infty} x(t)^T x(t) dt \right)^{1/2} \quad (4.36)$$

on veut minimiser le critère suivant :

$$J(x) = \dot{V}(x) + zz^T - \sigma^2 w^T w \quad (4.37)$$

Le système PV avec convertisseur Boost s'écrit sous la forme suivante :

$$\dot{x}(t) = A_i^u + B_i^u u + w \quad (4.38)$$

Le modèle de référence de système PV est :

$$\dot{x}_r(t) = A_r^u x_r + r \quad (4.39)$$

L'erreur est la différence entre le système est la référence, donné par l'équation suivante :

$$e = x - x_r \quad (4.40)$$

qui implique :

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{x}_r \quad (4.41)$$

En remplaçant (4.30) et (4.31) dans (1.33), on trouve :

$$\dot{e} = A_i^\mu (e + x_r) + B_i^\mu k e + w - A_r x_r - r \quad (4.42)$$

Maintenant, on prend l'erreur ainsi son intégrale et le vecteur d'état de système de référence comme un nouveau vecteur d'état, donc d'après (4.34) et (4.31) on obtient :

$$\begin{bmatrix} \dot{e} \\ \dot{x}_r \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i^\mu + B_i^\mu K & A_i^\mu - A_r^\mu & 0 \\ 0 & A_r^\mu & 0 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ x_r \\ \int e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ r \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

$$\text{Si : } \tilde{X} = \begin{bmatrix} \dot{e} \\ \dot{x}_r \\ e \end{bmatrix}, \tilde{A} = \begin{bmatrix} A_i^\mu + B_i^\mu K & A_i^\mu - A_r^\mu & 0 \\ 0 & A_r^\mu & 0 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}, \tilde{B} = \begin{bmatrix} B_i^\mu \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \tilde{E} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ et } \tilde{w} = \begin{bmatrix} w \\ r \end{bmatrix}$$

Afin d'assurer la poursuite de point maximum, nous proposons la loi de commande suivante :

$$u(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(z(t)) (K_i e(t) + L_i \int e(t)) = \tilde{K} \tilde{X} \quad (4.44)$$

$$\tilde{K} = [K^\mu \quad 0 \quad L^\mu]$$

$$\dot{V}(x) = \tilde{X}^T P \tilde{X} + \tilde{X}^T P \tilde{X} \quad (4.45)$$

En utilisant la formule (4.45) et le remplaçant dans (4.29), on trouve :

$$J(x) = \left((\tilde{A} + \tilde{B} \tilde{K}) \tilde{X} + \tilde{E} \tilde{w}^T P \tilde{X} + \tilde{X} \right)^T P \left((\tilde{A} + \tilde{B} \tilde{K}) \tilde{X} + \tilde{E} \tilde{w} \right) + z^T z - \sigma^2 w^T w \quad (4.46)$$

$J(x) < 0$ implique que :

$$\begin{bmatrix} \tilde{X} \\ \tilde{w} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} P(\tilde{A} + \tilde{B} \tilde{K}) + (\tilde{A} + \tilde{B} \tilde{K})^T P & P \tilde{E} \\ \tilde{E}^T P & -\sigma I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{X} \\ \tilde{w} \end{bmatrix} + z^T z < 0 \quad (4.47)$$

Si on prend en considération que z est l'erreur, donc :

$$z = C\tilde{X}, C = [1 \ 0] \quad (4.40)$$

En appliquant le complément de Schur sur (4.39), on obtient :

$$\Sigma_{\mu} = \begin{bmatrix} P(\tilde{A} + \tilde{B}\tilde{K}) + (\tilde{A} + \tilde{B}\tilde{K})^T P & * & * \\ \tilde{E}^T P & -\gamma^2 I & * \\ C_{1\mu} & 0 & -I \end{bmatrix} \prec 0 \quad (4.48)$$

La multiplication à gauche et à droite de Σ_{μ} par $\Gamma = \text{diag}(Q, I, I)$, donne :

les LMI qui stabilisent le système :

$$\Sigma_{\mu} = \begin{bmatrix} (\tilde{A} + \tilde{B}\tilde{K})Q + Q(\tilde{A} + \tilde{B}\tilde{K})^T & * & * \\ \tilde{E}^T & -\gamma^2 I & * \\ C_{1\mu}Q & 0 & -I \end{bmatrix} \prec 0 \quad (4.49)$$

Introduisons les changements de variables suivants :

$$\tilde{F}_j = \tilde{K}_j Q \quad (4.43)$$

L'inégalité (4.42) peut s'écrire sous la forme LMI comme suit :

$$\Sigma_{\mu} = \begin{bmatrix} \tilde{A}_i Q + \tilde{B}\tilde{F}_j + (\tilde{A}_i Q + \tilde{B}\tilde{F}_j)^T & * & * \\ \tilde{E}^T & -\gamma^2 I & * \\ C_{1i}Q & 0 & -I \end{bmatrix} \prec 0 \quad (4.44)$$

4.10 Résultats de simulation :

La résolution du problème d'optimisation (4.44) avec le ToolboxLMI_Matlab, nous donne :

$$\begin{aligned} K1 &= 10^{-4} [0.0023 \quad -0.2341 \quad 0.0004]; \\ K2 &= 10^{-4} [0.0023 \quad -0.2341 \quad 0.0004]; \\ K3 &= 10^{-4} [0.0023 \quad -0.2341 \quad 0.0004]; \\ K4 &= 10^{-4} [0.0023 \quad -0.2341 \quad 0.0004]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L1 &= [0.173514987587919 \quad -0.294150817282276 \quad 0.054158992497611]; \\ L2 &= [0.576950822155753 \quad 0.002238684966481 \quad 0.000260148347563]; \end{aligned}$$

Les figures suivantes montrent la réponse de système PV_Boost via notre loi de commande PDC

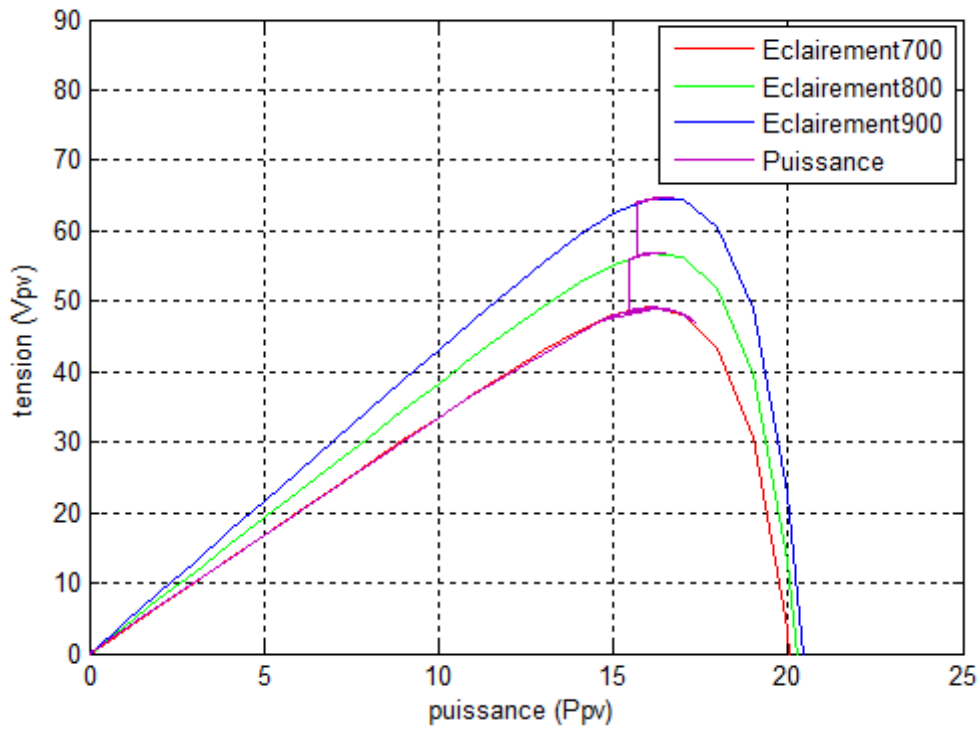


Figure 4.7 Poursuite de la tension maximale

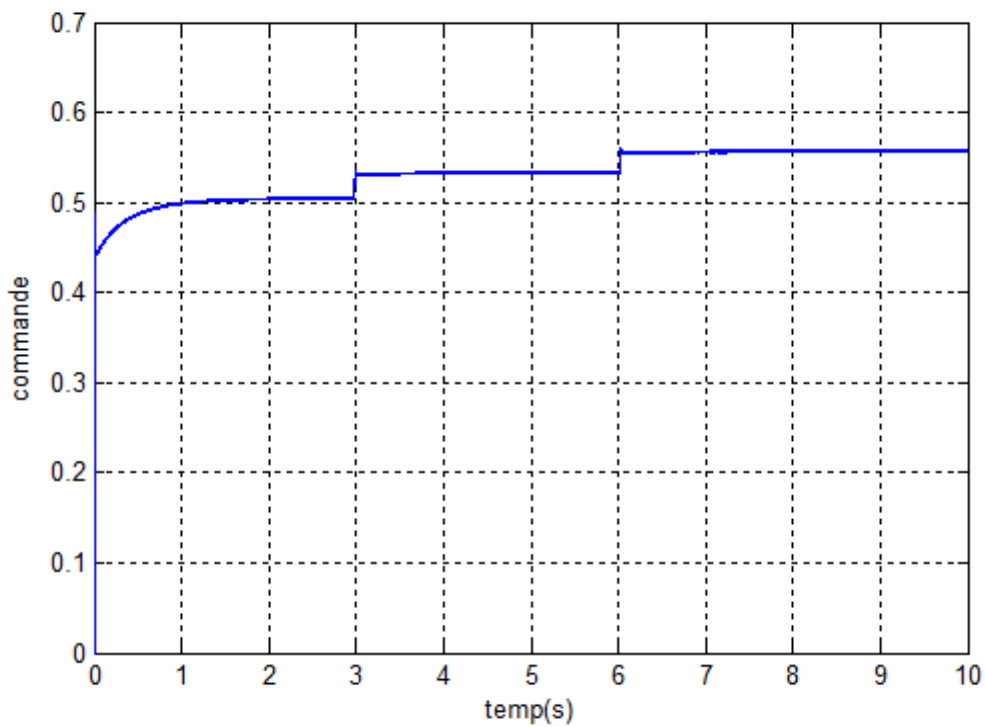


Figure 4.8 Commande $u(t)$

- Pour un éclairement constante ($\lambda = 800 \text{ w/m}^2$) et différentes valeurs de température, on trouve les graphes suivants :

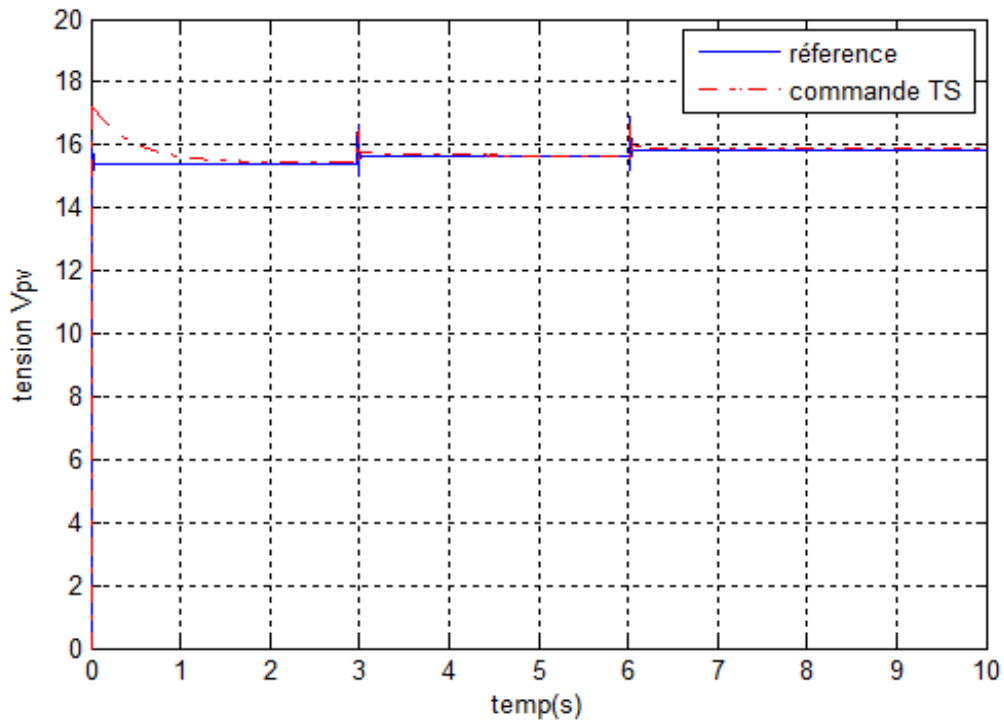


Figure 4.9 Tension V_{pv}

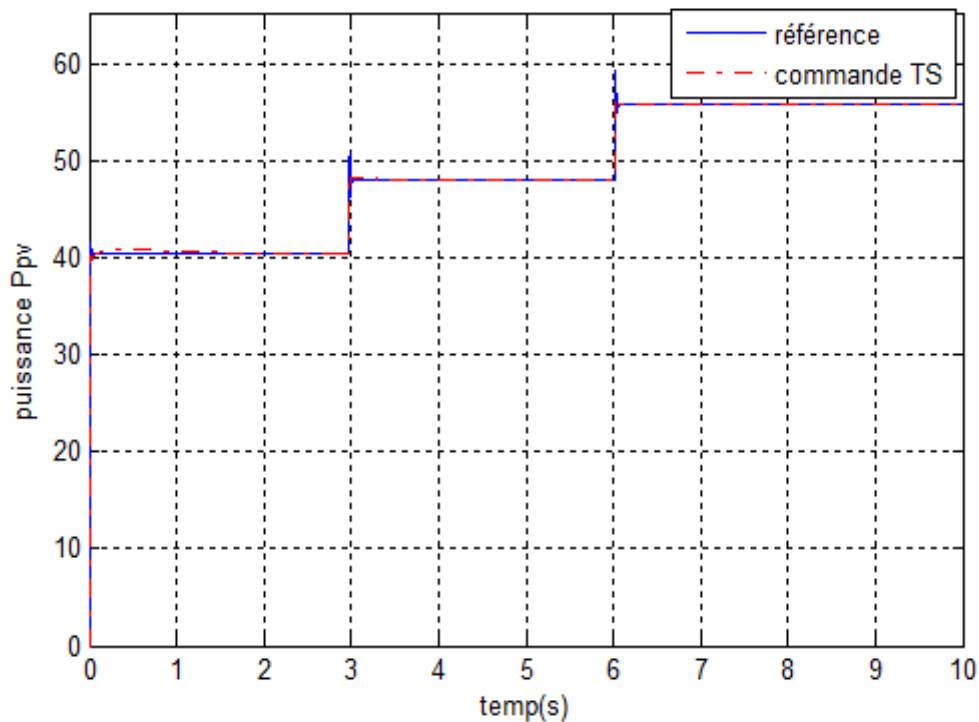


Figure 4.10 Puissance P_{pv}

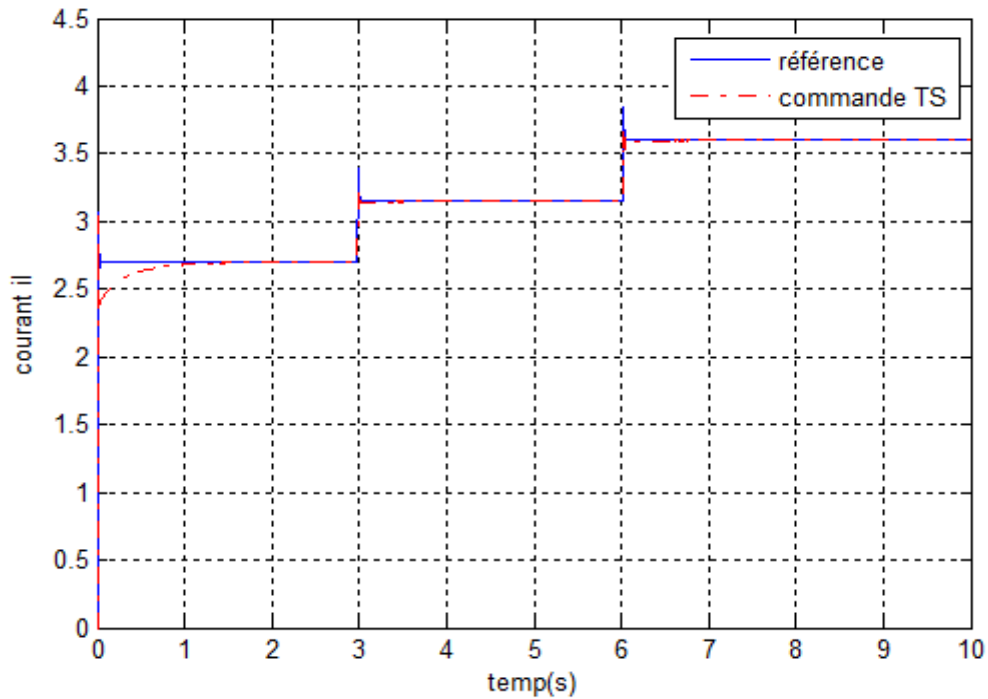


Figure 4.11 Courant i_l

- Pour une température constante ($T = 300^{\circ}k$) et différentes valeurs d'éclairement, on trouve les graphes suivants :

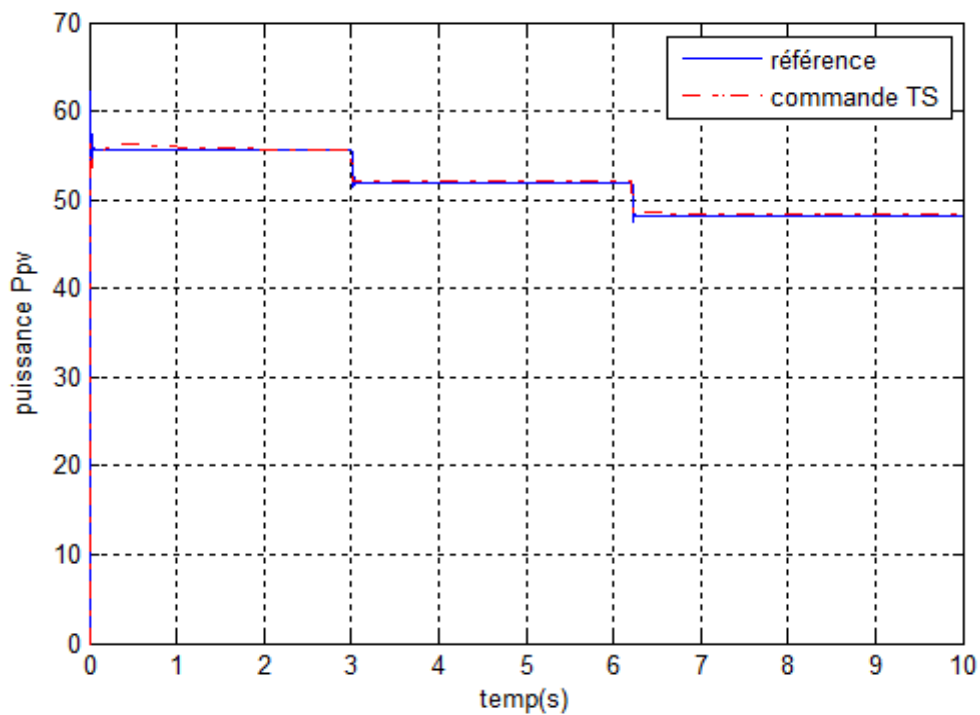


Figure 4.12 puissance P_{pv}

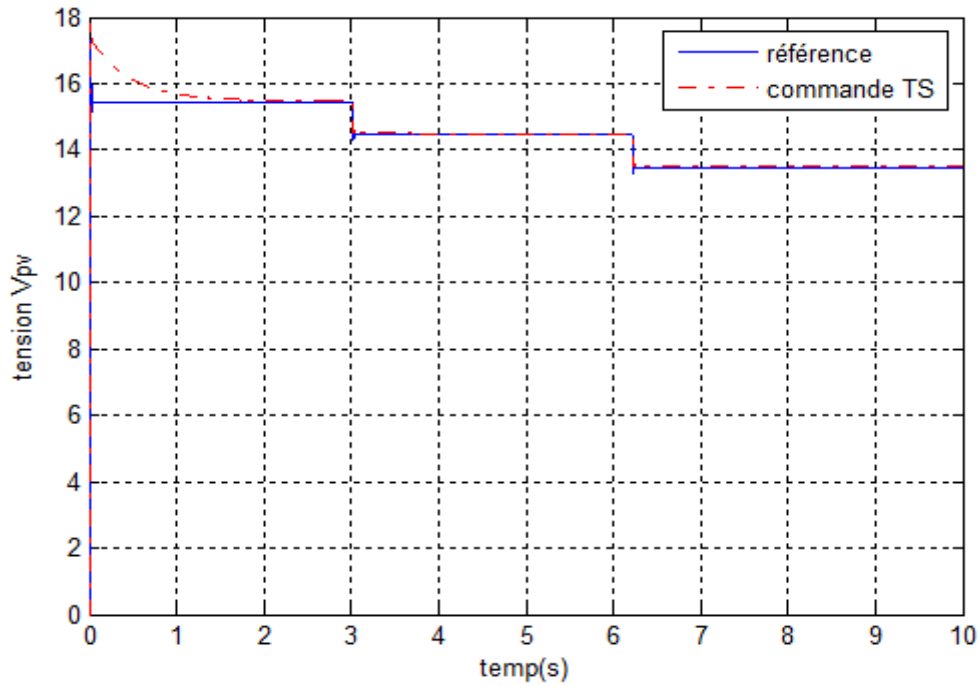


Figure 4.13 Tension V_{pv}

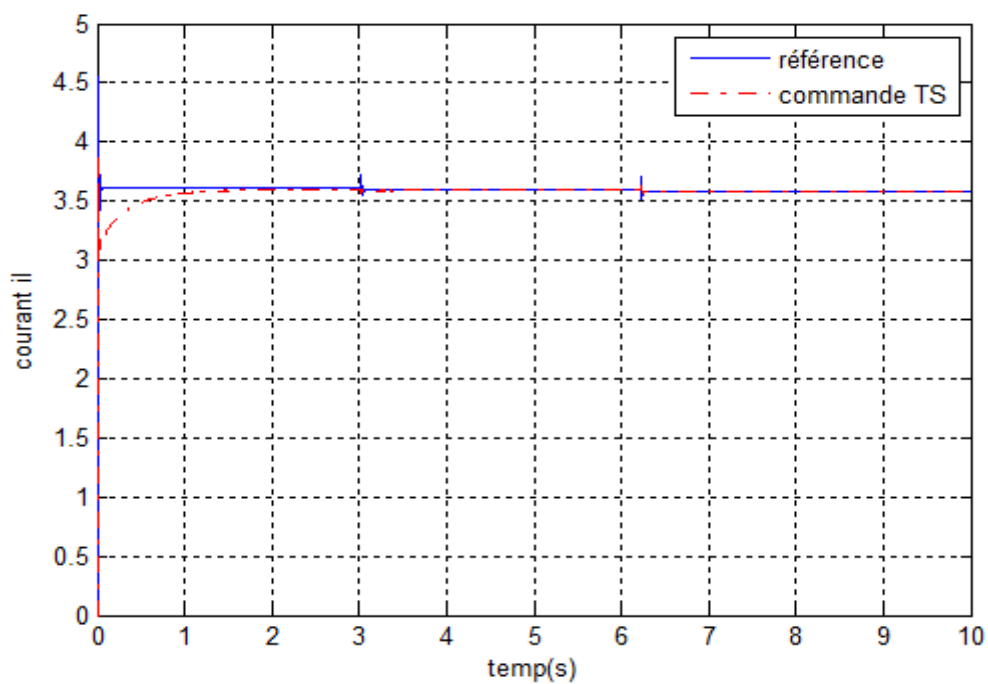


Figure 4.14 Courant i_l

D'après les résultats présents on peut dire que la commande MPPT est efficace, le système suivre le point de fonctionnement maximal générer par le modèle de référence.

Remarque :

Au démarrage, notre loi de commande est saturée à la borne inférieure (zéro) qui provoque des dégradations des performances du système en boucle fermée. Ce problème peut être résolu par la prise en compte de la saturation de commande lors de la conception de la loi de commande aux futurs travaux.

4.11 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une commande MPPT de système PV-Boost basée sur l'approche multi-modèle. En effet, une représentation multi-modèles de la dynamique de comportement référence de système PV est réalisé. Et afin de suivre cette dynamique, des conditions de stabilisation H_∞ sont dérivées et écrites sous forme LMI. L'étude de la stabilité et de la stabilisation fait appel, à la méthode directe de Lyapunov. Finalement, les résultats de simulation sont exposés pour démontrer l'efficacité de la méthode proposée.

Conclusion générale

Conclusion générale

Comme les systèmes photovoltaïques restent à nos jours chers, et comme le rendement des cellules de conversion photovoltaïque reste encore médiocre, une optimisation adéquate des installations photovoltaïque s'avère nécessaire. Dans ce cas, la maximisation de puissance est une tâche obligatoiresatisfaisante les demandes en énergie et les contraintes du coût. Ainsi, quelque soit la charge utilisée, le but principal de la commande MPPT, est d'extraire la puissance maximale disponible par le générateur photovoltaïque à tous instants et quelques soit les conditions de fonctionnement.

Dans ce travail, nous nous somme intéressés à la poursuite de la puissance maximale qu'on peut extraire d'un panneau photovoltaïque. Notre étude est basée sur la représentation e multi-modèle de différents systèmes PV. Par la suite, cette représentation a été utilisée dans la conception d'une loi de commande dite PDC associe d'une action intégrale permettant de maintenir le fonctionnement du système en mode de fonctionnement optimal.

Finalement, les résultats de simulation exposés montrent l'efficacité des approches proposées à améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques en tenant compte les changements climatiques.

À la lumière d'analyse développée et les résultats obtenus, nombres perspectives pourront être dégagés pour le suivi de ce travail dont les principales sont citées ci-dessous :

- La prise en considération du problème de limitation de commande (le rapport cyclique est limité entre 0 et 1).
- La prise en considération de la non mesurabilités de quelques variables d'état et de décision par la conception d'autres lois de commande basée sur le retour de sortie SOF (Static Output Feedback) ou les observateurs.

- [1] M. SLAMA Fateh. « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique. scientifique».thèse Doctorat, université Setif.2011.
- [2] D.Hiar. «Modélisation et commande d'un moteur thermique à allumage commandé», thèse de doctorat. mémoire Master, université de Tizi-Ouzou, 2007.
- [3] D.Hiar. «Modélisation et commande d'un système photovoltaïque par l'approche multi-modèle», université de Jijel,2016.
- [4] Soltane Belkehal. «Conception et Commande des machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables ».Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2010.
- [5] Document disponible sur le site: <http://www.aros-solar.com/fr/1%E2%80%99energie-solaire-une-solution-intelligente-au-service-de-1%E2%80%99environnement>.
- [6] D.Brahimi.Situation des énergies renouvelables en Algérie, conférence sur la maîtrise de l'énergie et de l'environnement dans un contexte d'économie de marche, thèse de Doctorat+, université d'Alger,2001.
- [7] C.Gueymard, «Development and performance assessment of a clear sky spectral radiation model»,Solar93-22th Annual Conf American Solar Energy Society, these de Doctorat,PFE, Washington DC, 1993.
- [8] B. Flèche, D. delagnes, «énergie solaire photovoltaïque», mémoire Magister. juin 2007.
- [9] M. Camara, «Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par super condensateurs», Université Paris-Est, Français, 2011.
- [10] M.L.Louazane. Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site Ouargla, mémoire de magister, université el hadj lakhdar-Batna, 2008.
- [11] Pr. TayebBENOUAZ,Pr et Abderrechid HELMAOUI, «Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension».thèse de doctorat, université de Tlemcen
- [12] Denis DOCHAIN, José RAGOT et Gilles MOUROT, «Analyse et synthèse de multi modèle pour le diagnostic. Application a une station d'épuration», INP, 2010.

[13] T.Bouarar.« Contribution à la synthèse de la loi de commande par les descripteurs de type T-S incertains et perturbés», thèse de doctorat, université de Reims, 2009.

[15]Yann Morère. Mise en œuvre des lois de commande pour les modèles flous de type Takagi-Sugeno. Thèse de Doctorat. Université de valenciennes. 4 Janvier 2001.

[16] Djamel OUNNAS. «Contribution au Diagnostique et à la Commande Passive Tolérante aux Défauts des Systèmes non Linéaires », Thèse de Doctorat, université de Setif.

[17] Alessandro Zin. « La commande robuste de suspensions automobiles en vue du contrôle global de châssis». Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2005.Français.

[18] Saifia Dounia . «Commande des systèmes non linéaire avec contraintes sur l'entrée». Thèse de doctorat. Université de Jijel.2013