



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



**Université Amar Telidji- Laghouat**

**FACULTE: DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE**

**MEMOIRE DE MASTER**

**Réalisé par :**

**Rezzoug Mohammed Idris**

**Dehina Idriss**

**DOMAINE : Science et Technologie**

**FILIERE : Automatique**

**OPTION : Automatique et Informatique Industriel**

**Thème**

**Commande d'un moteur à courant continue alimenté par un panneau photovoltaïque via un convertisseur DC-DC**

**Jury de soutenance :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
KAMRI Djekidel	MCA	Encadrant
Benmiloud Mohammed	MCB	Président
Ameur Khaled	MCB	Examineur

**Promotion : 2021/2022**

## **Remerciements**

Nous tenons tout d'abord à remercier dieu le tout puissant qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail. Nous tenons à remercier aussi notre encadreur Docteur KAMRI Djekidel pour ses précieux conseils et son aide, durant toute la période du travail. Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions. Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la simulation de ce travail.

Merci.

## **Dédicace**

Je dédie ce modeste travail. A ma très chère mère, source de tendresse. A mon très cher père, qui m'encourage dans les instants délicats. A mes chers frères. A mes tantes et oncles. A toute ma famille. A tous mes amis.

Rezzoug Mohammed Idris

## **Dédicace**

Je dédie ce modeste travail. A ma mère et mon père dieu accorde la paix à son âme et ma grand-mère Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leur, encouragements. A mon frère. A ma sœur. A mes tantes et oncles Et mes cousins. A toute ma famille. A mes amies et mes camarades.

Dehina Idriss

# Résumé

---

## Abstract:

The use of power converters is becoming more and more important. We are interested in this work in the modeling of DC-DC converters and the development of control laws. For this reason, various control strategies are tested in this work to regulate DC motor output voltage with DC-DC converters. And we have seen that PI control applied to DC electric motors is a regulator that can provide good performance. We have made a study and simulation of the LRCM method for PV systems and its application to control a DC motor via a Buck converter and under variable radiation and temperature conditions.

**Keywords:** DC-DC converter, photovoltaic, LRCM method, PI regulation.

## Résumé :

L'utilisation des convertisseurs de puissance devient de plus en plus importante. Nous intéressons dans ce travail à la modélisation des convertisseurs DC-DC et à l'élaboration des lois de commande. Pour cette raison, diverses stratégies de commande sont testées dans ce travail afin de réguler la tension de sortie de moteur DC avec des convertisseurs DC-DC. Et nous avons vu que la commande PI appliquée aux moteurs électriques à courant continu était un régulateur qui pouvait offrir de bonnes performances. Nous avons fait une étude et simulation de la méthode LRCM pour les systèmes PV et son application pour commander un moteur à courant continu via un convertisseur Buck et sous des radiations et des conditions de température variables.

**Mots clés :** convertisseur DC-DC, photovoltaïque, méthode LRCM, Régulation PI.

## الملخص

أصبح استخدام محولات الطاقة أكثر أهمية. في هذا العمل نحن مهتمون بنمذجة محولات DC-DC وتطوير قوانين التحكم. لهذا السبب، تم اختبار استراتيجيات التحكم المختلفة لتنظيم جهد خرج محرك التيار المستمر باستخدام محولات DC-DC. وقد رأينا أن التحكم في PI المطبق على المحركات الكهربائية DC هو منظم يمكنه توفير أداء جيد. لقد قمنا بدراسة ومحاكاة طريقة LRCM للأنظمة الكهروضوئية وتطبيقها للتحكم في محرك DC عبر محول خفض الجهد وتحت إشعاع.

**الكلمات الرئيسية :** محول DC-DC، الخلايا الكهروضوئية، طريقة LRCM، تنظيم PI

## **Liste des abréviations**

DC-DC : convertisseur courant-continue.

DC: courant-continue.

PWM: pulse width modulation.

PV: photovoltaïque.

LRCM: coordonnées linéaires réorientées méthode.

PPM : point de puissance maximale.

MCC : machine à courant continu.

PID : proportionnel-intégral-dérivée.

PI : proportionnel-intégral.

MPP: maximum power point.

MPPT: maximum power point tracking.

MOSFET: metal oxide semi-conductor field effect transistor.

(P&O): perturb and observe.

f.é.m.: force électromotrice.

GPV : un générateur photovoltaïque.

CCM : mode de conduction continu.

## Liste des symboles

$u$ : fonction de commande.

$R$ : résistance.

$L$ : inductance.

$C$ : condensateur.

$E$ : la tension d'entrée.

$i$ : le courant dans la bobine.

$v$ : la tension de sortie.

$D$ : le rapport cyclique.

$A$ : matrice d'état.

$B$ : matrice d'entrée.

$K$ : matrice de dimension  $(1 \times n)$  matrice de gain.

$\varepsilon$ : erreur.

$P_{max}$ : la puissance maximale produite.

$G(s)$ : fonction de transfert.

$\tau$ : la constante de temps.

$I_e$ : courant d'excitation.

$\vec{B}$ : champ magnétique.

$R_a$ : résistance d'induit.

$I_a$ : courant d'induit.

$L_a$ : inductance d'induit.

$V_a$ : le tension d'induit.

$E$ : force contre électromotrice du moteur.

$B_m, f$ : coefficient de frottement.

$J$ : moment d'inertie de l'axe du moteur.

$C_r$ : couple résistant.

$C_{em}$ : couple électromagnétique.

$K_i$ : gain intgral.

$K_p$ : gain proportionnel.

$u_e$ : tension d'alimentation nominale de l'induit.

$R_L$ : résistance de bobine.

$R_M$ : résistance de moteur.

$L_M$ : inductance de moteur.

$K_e$ : constante de vitesse.

$s$ : operateur de Laplace.

$V_{ap}$ : la tension du panneau photovoltaïque.

$I_{ap}$ : le courant du panneau photovoltaïque.

$\omega_m$ : vitesse angulaire.

$\omega_0$ : vitesse angulaire initial

## Liste de figure

Figure 1.1 : convertisseur Buck.....	4
Figure 1.2 : schéma idéal du convertisseur Buck.....	4
Figure 1.3 : caractéristique statique du convertisseur Buck.....	6
Figure 1.4 : convertisseur Boost.....	7
Figure 1.5 : schéma idéal de convertisseur Boost.....	7
Figure 1.6 : caractéristique statique du convertisseur Boost.....	8
Figure 1.7 : convertisseur Buck-Boost.....	9
Figure 1.8 : schéma idéal de convertisseur Buck-Boost.....	10
Figure 1.9 : caractéristique statique du convertisseur Buck-Boost.....	11
Figure 1.10 : systèmes en boucle ouverte.....	12
Figure 1.11 : système en boucle fermée avec $u = -Kx$ .....	13
Figure 1.12 : retour d'état avec action intégrale.....	14
Figure 1.13 : Convertisseur Buck on boucle ouverte.....	15
Figure 1.14 : Mesure de courant d'un convertisseur Buck on boucle ouverte.....	16
Figure 1.15 : Mesure de voltage d'un convertisseur Buck en boucle ouverte.....	16
Figure 1.16 : Convertisseur Buck avec retour d'état avec action intégrale.....	17
Figure 1.17 : Mesure de courant d'un convertisseur Buck avec retour d'état avec action intégrale.....	17
Figure 1.18 : Mesure de voltage d'un convertisseur Buck avec retour d'état action intégrale.....	18
Figure 1.19 : Mesure de $u_{av}$ d'un convertisseur Buck avec retour d'état action intégrale.....	18
Figure 1.20 : Convertisseur Boost en boucle ouverte.....	19
Figure 1.21 : Mesure de courant d'un convertisseur Boost en boucle ouverte.....	19
Figure 1.22 : Mesure de voltage d'un convertisseur Boost en boucle ouverte.....	20
Figure 1.23 : Convertisseur Boost avec action intégrale.....	20
Figure 1.24 : Mesure de courant d'un convertisseur Boost avec retour d'état action intégrale.....	21
Figure 1.25 : Mesure de voltage d'un convertisseur Boost avec retour d'état action intégrale.....	21
Figure 1.26 : Mesure de $u_{av}$ d'un convertisseur Boost avec retour d'état action intégrale.....	22
Figure 1.27 : Convertisseur Buck-Boost en boucle ouverte.....	22
Figure 1.28 : Mesure de courant d'un convertisseur Buck-Boost en Boucle ouverte.....	23
Figure 1.29 : Mesure de voltage d'un convertisseur Buck-Boost en Boucle ouverte.....	23
Figure 1.30 : Convertisseur Buck-Boost avec retour d'état action intégrale.....	24
Figure 1.31 : Mesure de courant d'un convertisseur Buck-Boost avec retour d'état action intégrale.....	24
Figure 1.32 : Mesure de voltage d'un convertisseur Buck-Boost avec retour d'état action intégrale.....	25
Figure 1.33 : Mesure de $u_{av}$ d'un convertisseur Buck-Boost avec retour d'état action intégrale.....	25
Figure 2.1 : Moteur à courant continu.....	29
Figure 2.2 : Inducteur (Stator) de la MCC.....	30
Figure 2.3 : Schéma équivalent de l'inducteur (Stator).....	30
Figure 2.4 : l'induit.....	30

Figure 2.5 : schéma électrique équivalent de l'induit.....	31
Figure 2.6 : Collecteur.....	31
Figure 2.7 : Balais et porte balais.....	32
Figure 2.8 : Schéma Principe de fonctionnement de MCC.....	32
Figure 2.9 : Distribution de flux.....	33
Figure 2.10 : Fonctionnement en moteur.....	34
Figure 2.11 : Fonctionnement en Génératrice.....	34
Figure 2.12 : Schéma d'excitation indépendante.....	35
Figure 2.13 : Excitation Shunt.....	35
Figure 2.14 : Excitation série.....	36
Figure 2.15 : Excitation composée (compound).....	36
Figure 2.16 : Schéma électrique de la MCC à excitation indépendante.....	37
Figure 2.17 : Une grue de chantier naval et des ponts de levage.....	37
Figure 2.18 : Remontées mécaniques.....	38
Figure 2.19 : Chaîne de tréfilage de câbles et Machine rotative d'imprimerie.....	38
Figure 2.20 : Machine d'enroulage pour film plastique transparent.....	38
Figure 2.21 : Schéma de commande utilisant la structure PI.....	38
Figure 2.22 : Description du système de moteur à courant continu entraîné par convertisseur Buck.....	42
Figure 2.23 : structure de contrôle PI.....	42
Figure 2.24 : Diagramme de Bode du système non compensé moteur à courant continu / convertisseur Buck.....	43
Figure 2.25 : Tracé de Bode du système moteur DC/convertisseur Buck avec compensateur PI.....	43
Figure 3.1 : Cellules monocristallines.....	47
Figure 3.2 : Cellules poly cristalline.....	47
Figure 3.3 : Cellules amorphes.....	48
Figure 3.4 : Cellule solaire ; module solaire ; panneau solaire ; champ solaire.....	48
Figure 3.5 : fonctionnement de MPPT.....	49
Figure 3.6 : la valeur de $I_x$ .....	51
Figure 3.7 : la valeur de $V_x$ .....	51
Figure 3.8 : la valeur de $V_{ap}$ et $I_{ap}$ .....	51
Figure 3.9 : la valeur de $P_{max}$ .....	52
Figure 3.10 : la valeur de $\omega_m$ .....	52
Figure 3.11 : la valeur de $D$ .....	53
Figure 3.12 : schéma Simulink pour trouver les courbes de (I-V et P-V).....	54
Figure 3.13 : Caractéristique de (I-V et P-V) de PV.....	54
Figure 3.14 : Interface DC/DC.....	55
Figure 3.15 : Représentation symbolique et notation pour le MOSFET à canal N.....	56
Figure 3.16 : Structure d'une cellule de MOSFET de faible puissance.....	56
Figure 3.17 : rapport cyclique.....	57

Figure 3.18 : Courbes de puissance moteur DC avec différents couples de vitesse.....	59
Figure 3.19 : Courbes de puissance moteur DC et PVM.....	59
Figure 3.20 : la puissance maximale.....	60
Figure 3.21 : pour comparer la puissance maximale idéale et la puissance approximée par LRCM.....	60
Figure 3.22 : Simulink de LRCM.....	61
Figure 3.23 : $P_{\max}$ idéal et $P_{\max}$ app.....	62
Figure 3.24 : Simulink de LRCM avec autre signal.....	63
Figure 3.25 : $P_{\max}$ idéal et $P_{\max}$ approximée avec autre signal.....	64
Figure 3.26 : circuit pour calculer rendement.....	64
Figure 3.27 : le rendement de LRCM.....	65
Figure 3.28 : l'efficacité globale.....	65
Figure 3.29 : l'efficacité de LRCM avec différents signaux.....	66
Figure 3.30 : commande DC-DC par convertisseur BUCK.....	67
Figure 3.31 : la vitesse de moteur DC.....	68
Figure 3.32 : la vitesse de moteur DC.....	69
Figure 3.33 : la vitesse de moteur avec $\omega_0$ .....	69
Figure 3.34 : vitesse du moteur.....	70
Figure 3.35 : la vitesse de moteur avec $\omega_0$ constant de référence.....	70

# Sommaire

Introduction générale :.....	1
------------------------------	---

## *Chapitre 1 : convertisseur DC/DC.*

1.1. Introduction :.....	4
1.2. Convertisseur Buck :.....	4
1.2.1. Modèle commuté :.....	5
1.2.2. Modèle moyen :.....	5
1.2.3. Point d'équilibre et caractéristique statique :.....	5
1.3. Convertisseur Boost :.....	6
1.3.1. Modèle commuté :.....	7
1.3.2. Modèle moyen :.....	8
1.3.3. Point d'équilibre et caractéristique statique :.....	8
1.3.4. Modèle linéarisé :.....	9
1.4. Convertisseur Buck-Boost :.....	9
1.4.1. Modèle commuté :.....	10
1.4.2. Modèle moyen :.....	10
1.4.3. Point d'équilibre et caractéristique statique :.....	10
1.4.4. Modèle linéarisé :.....	11
1.5. Rappel sur la commande par retour d'état :.....	12
1.5.1. Placement de pôles par retour d'état :.....	12
1.5.2. Retour d'état avec action intégrale :.....	14
1.6. Application aux convertisseurs DC-DC :.....	15
1.6.1. Convertisseurs Buck :.....	15
1.6.1.1. Boucle ouverte :.....	15
1.6.1.2. Retour d'état avec action intégrale :.....	17
1.6.2. Convertisseur Boost :.....	19
1.6.2.1. Boucle ouverte :.....	20
1.6.2.2. Retour d'état avec action intégrale :.....	20
1.6.3. Convertisseur Buck-Boost :.....	22
1.6.3.1. Boucle ouverte :.....	22
1.6.3.2. Retour d'état avec action intégrale :.....	24
1.7. Comparaison :.....	26
1.8. Conclusion :.....	27

## *Chapitre 2 : Association convertisseur / moteur*

2.1. Introduction :.....	29
2.2. Définition Moteur à courant continu :.....	29
2.3. Description et principe de fonctionnement de la MCC :.....	29
2.3.1. Constitution :.....	29

2.3.1.1. Inducteur :	30
2.3.1.2. Induit :	30
2.3.1.3. Collecteur :	31
2.3.1.4. Balais :	31
2.3.2. Principe de fonctionnement :	32
2.3.3. Circulation de flux magnétique :	33
2.3.4. Régime de fonctionnement d'une MCC :	33
2.5. Modes d'excitation :	34
2.5.1. Excitation indépendante (ou séparée) :	34
2.5.2. Excitation dérivation (ou shunt) :	35
2.5.3. Excitation série :	35
2.5.4. Excitation composée (compound) :	36
2.6. Moteur excitation indépendante :	36
2.7. Applications industrielles des machines à courant continu :	37
2.8. Structure de la commande PI :	38
2.9. Régulateur PID :	39
2.9.1. Effets et actions de base des régulateurs PID :	39
2.10. Convertisseur/ Moteur :	39
2.10.1. Système de moteur DC entraîné par convertisseur Buck:	39
2.10.2. Modélisation du système de moteur à courant continu à convertisseur Buck :	40
2.10.3. Algorithme de contrôle :	41
2.11. Conclusion :	44

## **Chapitre 3 : Commande d'un moteur à courant continu par un module PV via un convertisseur Buck.**

3.1. Introduction :	46
3.2. Technologies des cellules solaires photovoltaïques :	46
3.2.1. Cellules monocristallines :	46
3.2.2. Cellules poly cristalline :	47
3.2.3. Cellules amorphes :	47

3.3. Notion de cellule, module, panneau et champs photovoltaïque :	48
3.4. C'est quoi le MPPT :	48
3.5. Comment fonctionne le MPPT :	48
3.6. Commande du moteur et utilisation de la méthode de LRCM :	49
3.7. Trouver les valeurs de $I_x$ et $V_x$ avec Simulink :	51
3.8. Trouver la valeur de $V_{ap}$ et $I_{ap}$ avec Simulink :	51
3.9. Trouver la valeur de $P_{max}$ avec Simulink :	52
3.10. Trouver la valeur $\omega_m$ avec Simulink :	52
3.11. Trouver la valeur de $D$ avec Simulink :	53
3.12. L'identification de PV array (I-V et P-V) avec Simulink :	54
3.12.1. Caractéristiques électriques d'une cellule PV :	54
3.13. Interface DC/DC :	55
3.13.1. Composition du convertisseur :	55
3.13.2. C'est quoi le signal PWM ?	56
3.13.3. Définition du rapport cyclique :	57
3.14. L'identification d'une machine DC :	58
3.15. La poursuite de $P_{max}$ avec LRCM :	60
3.16. La poursuite de $P_{max}$ avec LRCM avec autre signal :	62
3.17. Calcule de rendement de LRCM :	64
3.18. La commande du moteur avec Buck :	67
3.19. Fonctionnement à une vitesse constante $\omega_0$ :	69
3.20. Fonctionnement à une vitesse angulaire constante de référence ( $\omega_0$ ) :	70
3.21. Conclusion :	71
<b>Conclusion générale :</b>	<b>73</b>
Bibliographies	75
Annexes	76

# ***INTRODUCTION GENERALE***

# INTRODUCTION GENERALE

---

## **Introduction générale :**

Les convertisseurs statiques sont circuits électriques utilisant des semi-conducteurs de puissance en régime de découpage pour traiter l'énergie électrique à haut rendement et assurer les fonctionnalités suivantes : Transformation : génération d'une tension alternative à partir d'une source continue et vice versa, régulation : alimentation constante d'une charge basse tension à partir d'une source variable, adaptation : alimentation d'une charge basse tension à partir d'une source haute tension et vice versa ; adaptée au besoin de l'utilisateur

Les convertisseurs continu-continu (dc-dc) occupe de plus en plus une place très importante dans le domaine du génie électrique, leur présence est indispensable grâce à leurs rendements, leurs faibles encombrements ainsi que leurs poids et couts réduite, ils ont occupé une place importante dans les sources d'alimentation. Les convertisseurs DC-DC les plus répons sont de plusieurs type, parmi lesquels Buck-Boost, Buck et le Boost.

Dans le chapitre 1 nous présentons les différents types des convertisseurs : Buck, Boost et le Buck-Boost, l'étude portera sur le fonctionnement, modélisation et les performances de ces convertisseurs ainsi que les perturbations qui peuvent y existées.

L'objectif du deuxième chapitre est consacré à la modélisation et régulation de système convertisseur/moteur à courant continu avec régulateur PI. L'évaluation des performances du contrôleur est basée sur les résultats obtenus en simulation.

Nous nous sommes intéressés dans ce travail par les applications de faibles puissances pouvant être alimentées par des panneaux photovoltaïque. Ces derniers sont des systèmes électronique qui produisent de l'électricité à partir de radiation solaires et doivent être exploités et adaptés aux conditions climatique variables telles que quantité d'insolation, température du panneau, fluctuation de charge, etc. par conséquent, des technique de suivi du point de puissance maximale (PPM) sont nécessaires pour contrôler le rapport cyclique des convertisseurs DC/DC afin d'assurer un fonctionnement optimal des générateurs photovoltaïques sous différentes conditions de fonctionnement. Plusieurs études ont abordé le problème de la recherche de points de fonctionnement pour obtenir le maximum d'énergie des modules PV en utilisant différentes méthodes. La non-linéarité de la courbe caractéristique du module PV, la température, la dépendance à l'irradiation et le degré de dégradation de la courbe caractéristique rendent la mise en œuvre de ces méthodes très compliquée. Ces méthodes montrent également une convergence ou des vibrations inadéquates autour des points de performances optimales dans des conditions de fonctionnement normales lors de fluctuations des conditions météorologique. Si le transfert de puissance entre la source d'énergie renouvelable et la charge n'est pas optimal, le rendement global du système sera sérieusement affecté. C'est l'objet du dernier chapitre qui traite la problématique d'optimisation énergétique d'un système PV. Ou nous présentons un suivi de puissance maximum pour un procédé de moteur à courant continu alimenté par des modules photovoltaïques (PVM) via un convertisseur de puissance abaisseur. Cette méthode utilise une rétroaction positive de la vitesse du moteur ; donc, seule la mesure de la vitesse du moteur DC est nécessaire. La loi de commande conçue est

## INTRODUCTION GENERALE

---

basée sur le modèle mathématique du moteur à courant continu et du convertisseur de puissance, en considérant les variations du point de puissance maximale optimal (MPP) à différentes valeurs d'éclairement. Dans ce travail, nous avons opté pour une approximation du point optimal MPP par la méthode connue sous le nom méthode de coordonnées réorientées linéaires (LRCM).

## ***Chapitre 1 : convertisseur DC/DC.***

# Chapitre 1 : convertisseur DC/DC.

## 1.1. Introduction :

Les convertisseurs de puissance DC-DC sont un domaine d'étude très actif. L'augmentation de la complexité des convertisseurs pour répondre aux exigences industrielles nécessite des modèles mathématiques capables de représenter le comportement statique et dynamique. Dans ce chapitre, nous allons déterminer les modèles nécessaires pour analyser et contrôler les convertisseurs DC/DC.

Après avoir paramétré les points d'équilibre obtenus par rapport à la valeur moyenne de la tension de sortie, nous commençons par acquérir le modèle de commutation et le modèle moyen, établir des lois de commande qui peuvent donner au système les performances requises autant que possible. On suppose ici que toutes les composantes du vecteur d'état sont mesurées et utilisées par le procédé de commande. L'objectif de ce chapitre est de faire une présentation de convertisseur DC/DC classiques, leurs fonctionnements en mode de conduction continu (CCM) et leurs modélisations en vue de leurs commandes. Nous décrivons seulement le contrôle direct et celui avec retour d'état par régulateur PI.

## 1.2. Convertisseur Buck :

Le convertisseur Buck est un convertisseur statique abaisseur qui permet de transformer une tension continue fixe en une tension plus faible contrôlable [6].

Le schéma du convertisseur Buck est présenté par la figure 1.1 :

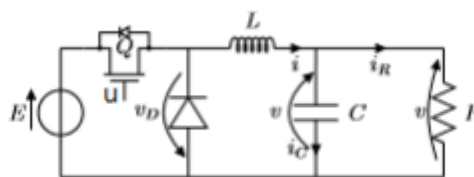


Figure 1.1 : Convertisseur Buck.

### u: Fonction de commutation

$u = 1$  Le transistor est passant --- étape de charge

$u = 0$  Le transistor est bloqué --- diode passante, étape de décharge

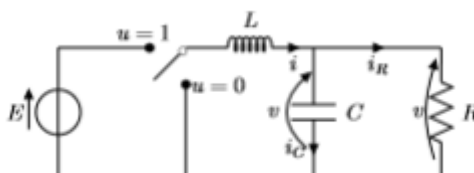


Figure 1.2 : Schéma idéal du convertisseur Buck.

Interrupteur = diode + transistor

Si on considère que l'interrupteur est dans la position  $u = 1$ , en appliquant les lois de Kirchhoff au circuit, on obtient les équations suivantes [6] :

## Chapitre 1 : convertisseur DC/DC.

---

$$L \frac{di}{dt} = -v + E \quad (1.1)$$

$$C \frac{dv}{dt} = i - \frac{v}{R}$$

$i$  est le courant dans la bobine ( $L$ ),  $E$  est la tension d'entrée,  $v$  est la tension de sortie et  $u$  est la commande.

Lorsque l'interrupteur est en position  $u = 0$ , alors la diode est passante, ce qui nous donne :

$$L \frac{di}{dt} = -v \quad (1.2)$$

$$C \frac{dv}{dt} = i - \frac{v}{R}$$

### 1.2.1. Modèle commuté :

En comparant les deux situations, on peut obtenir un seul modèle unifié, qui est :

$$L \frac{di}{dt} = -v + uE \quad (1.3)$$

$$C \frac{dv}{dt} = i - \frac{v}{R}$$

Ce modèle est souvent appelé modèle commuté avec la fonction binaire de commutation  $u \in \{0,1\}$

### 1.2.2. Modèle moyen :

**Le modèle moyen de ce convertisseur est donné par :**

$$L \frac{di}{dt} = -v_{av} + u_{av} E \quad (1.4)$$

$$C \frac{dv}{dt} = i_{av} - \frac{v_{av}}{R}$$

Soit  $x_1 = i$  et  $x_2 = v$  alors les équations d'état deviennent :

$$\dot{x}_1 = -\frac{x_2}{L} + u \frac{E}{L} \quad (1.5)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{x_1}{C} - \frac{x_2}{RC}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} E u \quad (1.6)$$

### 1.2.3. Point d'équilibre et caractéristique statique :

Le but du contrôleur est le plus souvent d'ajuster la tension de sortie à la tension d'équilibre moyenne souhaitée. Ceci est réalisé en sélectionnant la règle de contrôle  $u$  qui commande la position du commutateur par rapport à la valeur moyenne.

## Chapitre 1 : convertisseur DC/DC.

---

$$0 = -\bar{v} + \bar{u}_{av}E \quad (1.7)$$

$$0 = \bar{i} - \frac{\bar{v}}{R}$$

En résolvant le système d'équation de point d'équilibre, on obtient les états moyens du convertisseur à l'équilibre :

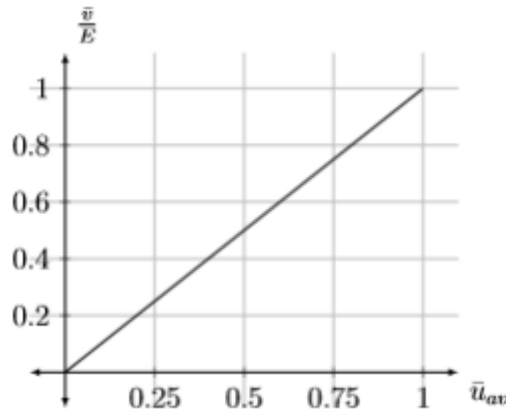
$$\bar{v} = \bar{u}_{av}E \quad (1.8)$$

$$\bar{i} = \bar{u}_{av} \frac{E}{R}$$

La valeur de la commande moyenne  $\bar{u}_{av} \in [0,1]$ , et la tension de sortie sera une fraction de  $E$ , donc le convertisseur ne peut pas amplifier la tension d'entrée.

*La caractéristique statique du convertisseur Buck est :*

$$\bar{u}_{av} = \frac{\bar{v}}{E} \quad (1.9)$$



**Figure 1.3 : Caractéristique statique du convertisseur Buck.**

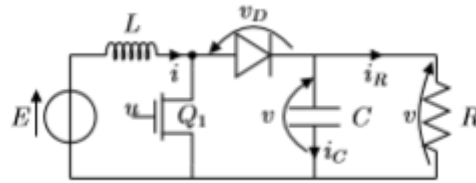
Il est clair que le gain maximum du convertisseur est de 1. la figure 1.3 montre les caractéristique fonctionnelles de la valeur d'équilibre  $u_{av}$ .

Selon cette caractéristique, le convertisseur Buck est un convertisseur linéaire.

### 1.3. Convertisseur Boost :

Le circuit du convertisseur Boost ou bien (élévateur) est représenté par la figure 1.4. Lorsque le transistor est passant. D'où, la source  $E$  n'est pas connectée à la charge  $R$ . Lorsque le transistor est bloqué, la diode est polarisée en direct et conduit. Ce qui rend la charge  $R$  connecté à la source  $E$  [6].

Le schéma du convertisseur Boost est présent dans la figure suivant:



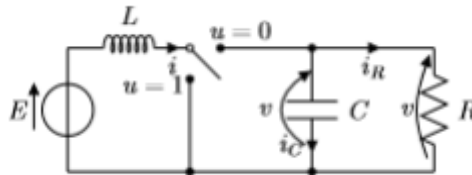
**Figure 1.4 : Convertisseur Boost.**

$u$ : Fonction de commutation

$u = 1$  Le transistor est passant --- étape de charge

$u = 0$  Le transistor est bloqué --- diode passant, étape de décharge

Interrupteur = diode + transistor



**Figure 1.5 : Schéma idéal de convertisseur Boost.**

Si on considère que l'interrupteur est dans la position  $u = 1$  [6].

$$L \frac{di}{dt} = E \quad (1.14)$$

$$C \frac{dv}{dt} = -\frac{v}{R}$$

Lorsque l'interrupteur est en position  $u = 0$ , alors la diode est passant, ce qui nous donne :

$$L \frac{di}{dt} = -v + E \quad (1.15)$$

$$C \frac{dv}{dt} = i - \frac{v}{R}$$

### 1.3.1. Modèle commuté :

En comparant les deux situations, on peut obtenir un seul modèle unifié, qui est :

$$L \frac{di}{dt} = -(1 - u)v + E \quad (1.16)$$

$$C \frac{dv}{dt} = (1 - u)i - \frac{v}{R}$$

## Chapitre 1 : convertisseur DC/DC.

### 1.3.2. Modèle moyen :

Le modèle moyen de ce convertisseur est donné par :

$$L \frac{di}{dt} = -(1 - u_{av})v_{av} + Eav \quad (1.17)$$

$$C \frac{dv}{dt} = (1 - u_{av})i_{av} - \frac{v_{av}}{R}$$

### 1.3.3. Point d'équilibre et caractéristique statique :

A l'équilibre, les déviées des états moyens sont nulles et la commande moyenne du  $u_{av}$  est égale à une valeur constante  $\bar{u}_{av}$ .

$$0 = -(1 - \bar{u}_{av})\bar{v} + E \quad (1.18)$$

$$0 = (1 - \bar{u}_{av})\bar{i} - \frac{\bar{v}}{R}$$

En résolvant le système d'équation de point d'équilibre, on obtient les états moyens du convertisseur à l'équilibre:

$$\bar{v} = \frac{E}{(1 - \bar{u}_{av})} \quad (1.19)$$

$$\bar{i} = \frac{1}{(1 - \bar{u}_{av})^2} \frac{E}{R}$$

A partir de cette équation, la caractéristique statique normalisée pour le convertisseur Boost est donnée par :

$$\frac{\bar{v}}{E} = \frac{1}{(1 - \bar{u}_{av})} \quad (1.20)$$

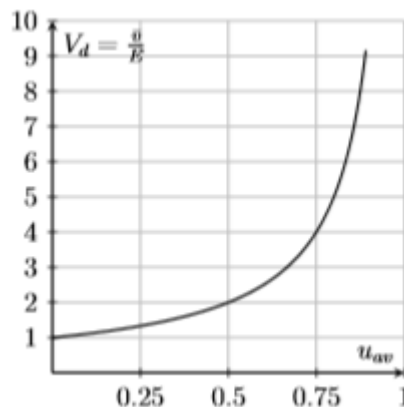


Figure 1.6 : Caractéristique statique du convertisseur Boost.

Il est clair que le gain du convertisseur est toujours supérieur à 1. Les caractéristiques sont présentées dans la figure 1.6.

# Chapitre 1 : convertisseur DC/DC.

## 1.3.4. Modèle linéarisé :

Si la tension moyenne désirée à l'équilibre est  $\bar{v} = D \times E, D > 1$  alors nous avons :

$$\bar{u}_{av} = \frac{(D-1)}{D} \quad (1.21)$$

$$\bar{i} = D^2 \frac{E}{R}$$

Le modèle moyen du convertisseur Boost peut être décrit par la forme d'état [6]:

$$\begin{bmatrix} \frac{di}{dt} \\ \frac{dv}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{DL} \\ \frac{1}{DC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D \frac{E}{L} \\ -D^2 \frac{E}{RC} \end{bmatrix} u_{av} \quad (1.22)$$

La linéarisation du modèle moyen autour du point d'équilibre décrit donne :

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{DL} \\ \frac{1}{DC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} e + \begin{bmatrix} D \frac{E}{L} \\ -D^2 \frac{E}{RC} \end{bmatrix} e_u \quad (1.23)$$

Avec :

$$e = \begin{bmatrix} i - \bar{i} \\ v - \bar{v} \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

$$e_u = u_{av} - \bar{u}_{av}$$

## 1.4. Convertisseur Buck-Boost :

Ce convertisseur est obtenu en inter-changeant les positions de la bobine et la diode dans le modèle Buck. Le schéma du convertisseur Buck-Boost est présenté dans la figure 1.7 [6]:

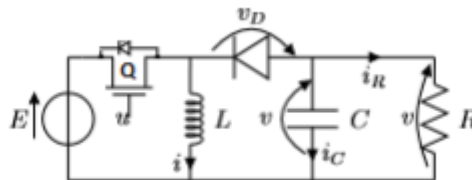


Figure 1.7 : Convertisseur Buck-Boost.

Lorsque le transistor conduit, la diode est polarisée en inverse. Cette période est appelée période de charge. Si le transistor est éteint la diode sera polarisée en direct. Ce temps est le temps de décharge lorsque l'énergie stockée dans la bobine est transférée à la charge R. le gain de ce convertisseur peut être supérieur ou inférieur à 1 changeant la polarité.

$u$ : Fonction commutation

$u = 1$  Le transistor est passant ---étape de charge

$u = 0$  Le transistor est bloqué --- diode passant, étape décharge

Interrupteur = diode + transistor

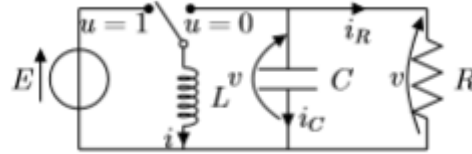


Figure 1.8 : schéma idéal de convertisseur Buck-Boost.

Si on considère que l'interrupteur est en position  $u = 1$ , et en appliquant les lois de Kirchhoff au circuit, on obtient les équations suivantes [6]:

$$L \frac{di}{dt} = E \quad (1.25)$$

$$C \frac{dv}{dt} = -\frac{v}{R}$$

Lorsque la diode est passante, alors l'interrupteur est en position  $u = 0$ , ce qui nous donne :

$$L \frac{di}{dt} = v \quad (1.26)$$

$$C \frac{dv}{dt} = -i - \frac{v}{R}$$

### 1.4.1. Modèle commuté :

En comparant les deux situations, on peut obtenir un seul modèle unifié, qui est :

$$L \frac{di}{dt} = (1 - u)v + uE \quad (1.27)$$

$$C \frac{dv}{dt} = -(1 - u)i - \frac{v}{R}$$

### 1.4.2. Modèle moyen :

Avec  $u = u_{av}$ , on obtient alors le modèle moyen suivant :

$$L \frac{di}{dt} = (1 - u_{av})v + u_{av}E \quad (1.28)$$

$$C \frac{dv}{dt} = -(1 - u_{av})i - \frac{v}{R}$$

### 1.4.3. Point d'équilibre et caractéristique statique :

A l'équilibre, on obtient, pour les valeurs en régime permanent des états moyens, le système d'équations linéaires :

$$0 = (1 - \bar{u}_{av})\bar{v} + \bar{u}_{av}E \quad (1.29)$$

$$0 = -(1 - \bar{u}_{av})\bar{i} - \frac{\bar{v}}{R}$$

En résolvant le système de point d'équilibre, on obtient les états moyens du convertisseur à l'équilibre :

$$\bar{v} = -\frac{\bar{u}_{av}}{(1 - \bar{u}_{av})} E \quad (1.30)$$

## Chapitre 1 : convertisseur DC/DC.

$$\bar{i} = \frac{\bar{u}_{av} E}{(1-\bar{u}_{av})^2 R}$$

A partir de cette équation, la caractéristique statique normalisée pour le convertisseur Buck-Boost est donnée par :

$$\frac{\bar{v}}{E} = -\frac{\bar{u}_{av}}{(1-\bar{u}_{av})} \quad (1.31)$$

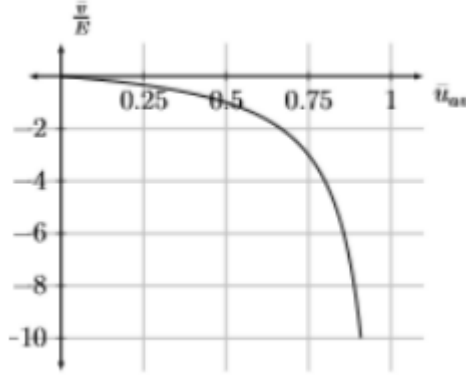


Figure 1.9 : Caractéristique statique du convertisseur Buck-Boost.

Il est clair que le gain du convertisseur Buck-Boost peut augmenter ou diminuer la tension d'entrée en inversant la polarité de la tension de sortie. La courbe caractéristique est représentée sur la figure 1.9.

### 1.4.4. Modèle linéarisé:

Si la tension moyenne désirée à l'équilibre est  $\bar{v} = D \times E, 0 > D$  alors avons :

$$\bar{u}_{av} = \frac{D}{(D-1)} \quad (1.32)$$

$$\bar{i} = D(D-1) \frac{E}{R}$$

Le modèle moyen du convertisseur Buck-Boost peut être décrit par la forme d'état [6]:

$$\begin{bmatrix} \frac{di}{dt} \\ \frac{dv}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{(D-1)L} \\ \frac{1}{(D-1)C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (1-D)\frac{E}{L} \\ -D(1-D)\frac{E}{RC} \end{bmatrix} u_{av} \quad (1.33)$$

La linéarisation du modèle moyen autour du point d'équilibre décrit donne :

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{(D-1)L} \\ \frac{1}{(D-1)C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} e + \begin{bmatrix} (1-D)\frac{E}{L} \\ -D(1-D)\frac{E}{RC} \end{bmatrix} e_u \quad (1.34)$$

Avec :

$$e = \begin{bmatrix} i - \bar{i} \\ v - \bar{v} \end{bmatrix} \quad (1.35)$$

$$e_u = u_{av} - \bar{u}_{av}$$

## Chapitre 1 : convertisseur DC/DC.

### 1.5. Rappel sur la commande par retour d'état :

Le retour d'état est la manière la plus classique de contrôler un système modélisé par représentation d'état.

Le contrôle par retour d'état est une technique plus avancée qui également utilisée pour le Contrôle dynamique des processus. Ceci est basé sur le placement de pôles avec retour D'état. Cela est particulièrement vrai pour les processus linéarisés qui sont stationnaires autour d'un point de fonctionnement.

#### 1.5.1. Placement de pôles par retour d'état :

Le but de contrôle par placement des pôles est d'imposer un comportement spécifique ou des performances souhaitées au système en appliquant des règles de contrôle qui placent les pôles du système en boucle fermée selon des critères de réponse temporelle (transistor) et/ ou de réponse en fréquence.

Le principe est de déterminer la consigne pour que les pôles de la fonction de transfert du système bouclé soient situés dans le plan complexe gauche.

Puisque les pôles de la fonction de transfert sont les valeurs propres de la matrice d'état, le but est de fournir un contrôle sur la matrice d'état du système. La commande par retour d'état consiste à examiner le modèle du processus décrit par l'équation d'état suivante [6]:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1.36)$$

$$y = Cx$$

Il suppose que toutes les composantes  $x_i$  du vecteur d'état  $x$  sont accessibles à la mesure. Une loi de commande possible est alors

$$u = -Kx \quad (1.37)$$

$K$  Est une matrice de dimensions  $(1 \times n)$  est appelée matrice de gain.

Si le processus est contrôlable, le choix des composants de  $K$  permet de placer les  $n$  pôles du système en boucle fermée comme on le désire.

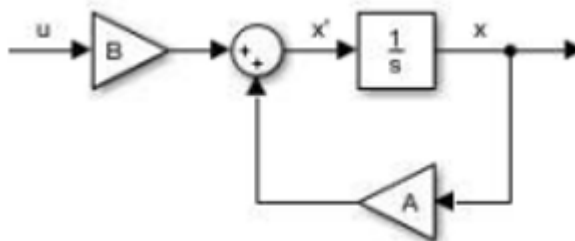


Figure 1.10 : Systèmes en boucle ouverte.

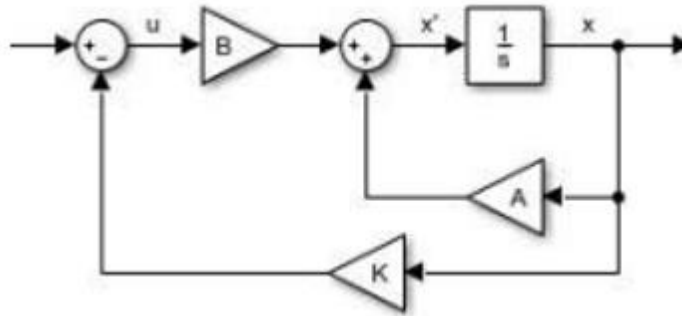


Figure 1.11 : Système en boucle fermée avec  $u = -Kx$ .

Une condition nécessaire et suffisante pour le placement arbitraire de pôles est que le système soit complètement contrôlable.

Soit un système d'état linéaire dont l'état initiale a une valeur  $x_0 = x(t_0)$

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1.38)$$

$$y = Cx + Du$$

Si on suppose  $D = 0$  on dit qu'il est contrôlable si pour tout instance  $x_i$  du vecteur d'état, il existe un signal d'entrée  $u(t)$  d'énergie finie qui permet au système de passer de l'état  $x_0$  à l'état  $x_i$  en un temps fini.

En représentation d'état, il s'agira de déterminer le signal de commande  $u(t)$  entre deux instants donnés,  $t_0$  et  $t_1$ , pour amener le système de l'état  $x(t_0)$  vers un état  $x(t_1)$  souhaité. Donc l'étude de la contrôlabilité ne dépend que des matrices  $A$  et  $B$ . Pour cette raison, on dit parfois que c'est la paire  $(A, B)$  qui est contrôlable.

➤ **Critère de Kalman :**

Ce système admet  $n$  états solutions, pour être commandable il faut  $n$  équations linéairement indépendantes, ce qui implique :

$$\text{rang}(M) = [B \ AB \ \dots \ A^{n-1}B] = n, \text{ M est la matrice de commandabilité}$$

On rappelle que le rang d'une matrice donne le nombre maximum de lignes indépendantes et le nombre maximum de colonnes indépendantes.

## Chapitre 1 : convertisseur DC/DC.

### 1.5.2. Retour d'état avec action intégrale :

Comme nous l'avons dit, le contrôle par retour d'état peut atténuer les pôles d'une boucle fermée. Cependant, ce dernier ne garantis pas une erreur de position nulle.

Une façon de résoudre ce problème consiste à ajouter un intégrateur directement a la chaine, comme le montre la figure 1.12.

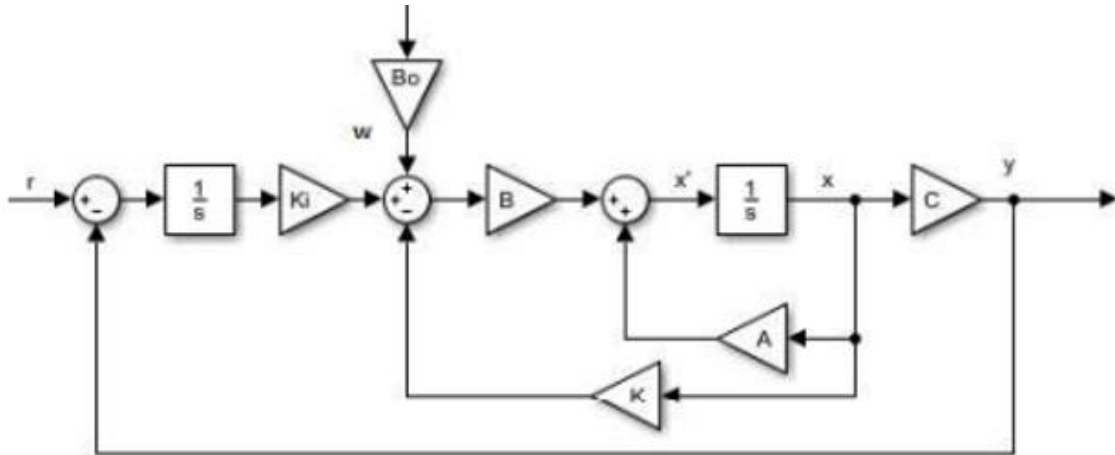


Figure 1.12 : Retour d'état avec action intégrale.

Avec le système [6]:

$$\dot{x} = Ax + Bu + B_0W \quad (1.39)$$

$$y = Cx$$

Ou  $v$  est une perturbation externe qui agit sur les états du système à travers la matrice  $B_0$ . La commande conçue au paravent ne peut annuler l'effet de cette perturbation sur le suivi de la référence. On introduit une action intégrale : une variable d'état notée  $x_i$  placée à la sortie de l'intégrateur avec :

$$x_i = \int (r - y) = \int (r - Cx) \quad (1.40)$$

Ce qui donne :

$$\dot{x}_a = A_a x + B_a u + B_{0a} v \quad (1.41)$$

$$y = C_a x_a$$

Avec les matrices :

$$A_a = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}, \quad B_a = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_{0a} = \begin{bmatrix} B_0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_a = [C \quad 0]$$

La loi de commande est donnée par :

$$u = -K_a x_a = -[K \quad K_i] \begin{bmatrix} x \\ x_i \end{bmatrix} \quad (1.42)$$

## Chapitre 1 : convertisseur DC/DC.

$$u = -Kx - K_i x_i$$

Ce qui donne en boucle fermée :

$$\dot{x}_a = [A_a - B_a K_a] x_a + B_{0a} v \quad (1.43)$$

Enfin le vecteur gain est égale au polynôme désiré :

$$|sI - (A_a - B_a K_a)| = \left| \begin{bmatrix} sI - (A_a - B_a K_a) & BK_i \\ C & s \end{bmatrix} \right| \quad (1.44)$$

D'après la linéarisation :

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} e_{u1} \\ e_{u2} \end{bmatrix} \quad (1.45)$$

L'action intégrale introduite par  $e_3 = \int e_2$  donc  $\dot{e}_3 = e_2$

L'équation augmentée devient :

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \end{bmatrix} = A_a \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} + B_a \begin{bmatrix} e_{u1} \\ e_{u2} \\ e_{u3} \end{bmatrix} \quad (1.46)$$

Avec :

$$A_a = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \quad (1.47)$$

### 1.6. Application aux convertisseurs DC-DC :

Par simulation, nous présentons les commandes des convertisseurs Buck, BOOST, et BUCK-BOOST d'abord en boucle ouverte puis en utilisant un retour d'état avec action intégrale [6].

#### 1.6.1. Convertisseurs Buck :

##### 1.6.1.1. Boucle ouverte :

✓ Schéma Simulink :

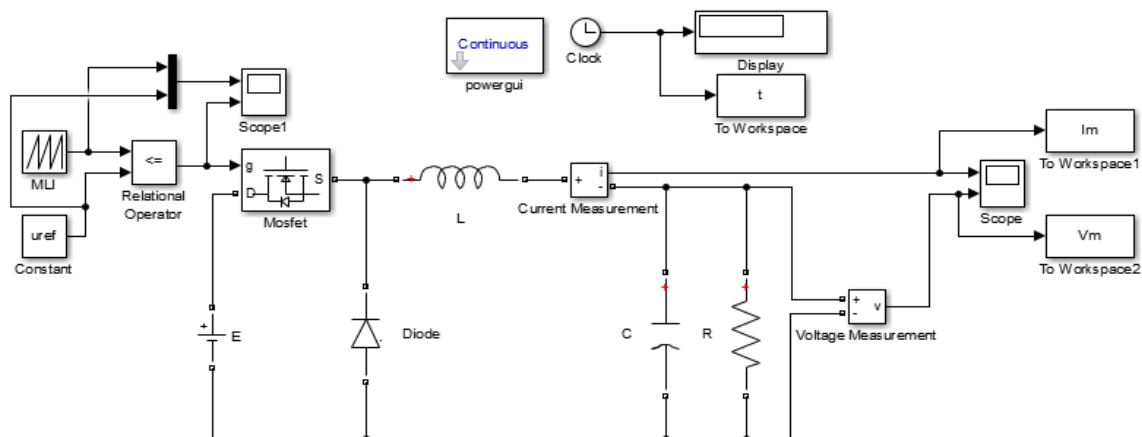


Figure 1.13 : Convertisseur Buck on boucle ouverte.

## Chapitre 1 : convertisseur DC/DC.

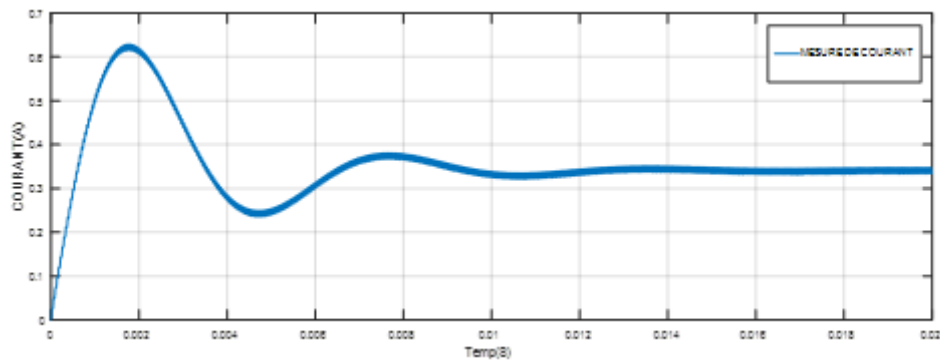
---

Le convertisseur est contrôlé par la technique PWM (porteuses et modulation) connecté en boucle ouverte au commutateur Mosfet.

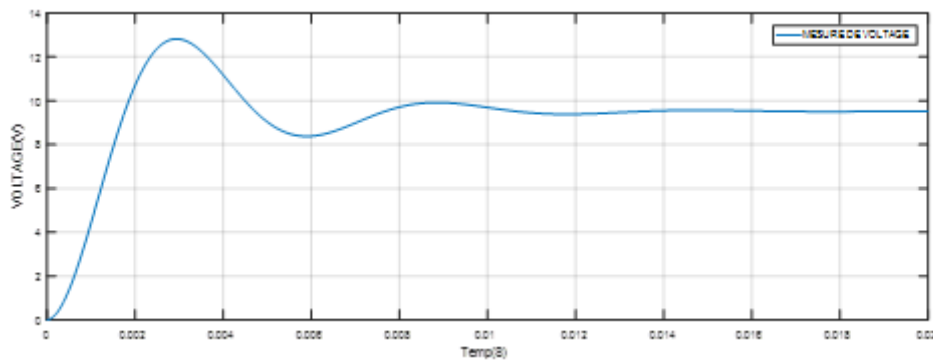
En régulation, un système en boucle ouverte ou un contrôle directe et une forme de contrôle d'un système qui ne tient pas compte de la réponse de ce système.

✓ *Résultat de simulation :*

Pour  $R = 28 \Omega$



*Figure 1.14 : Mesure de courant d'un convertisseur Buck en boucle ouverte.*



*Figure 1.15 : Mesure de voltage d'un convertisseur Buck en boucle ouverte.*

La réponse de système présente des oscillations avec des dépassements importants, des temps de réponse lents, des temps montés courts et des erreurs statiques. Les perturbations de charge augmentent les erreurs statiques.

# Chapitre 1 : convertisseur DC/DC.

## 1.6.1.2. Retour d'état avec action intégrale :

✓ Schéma Simulink :

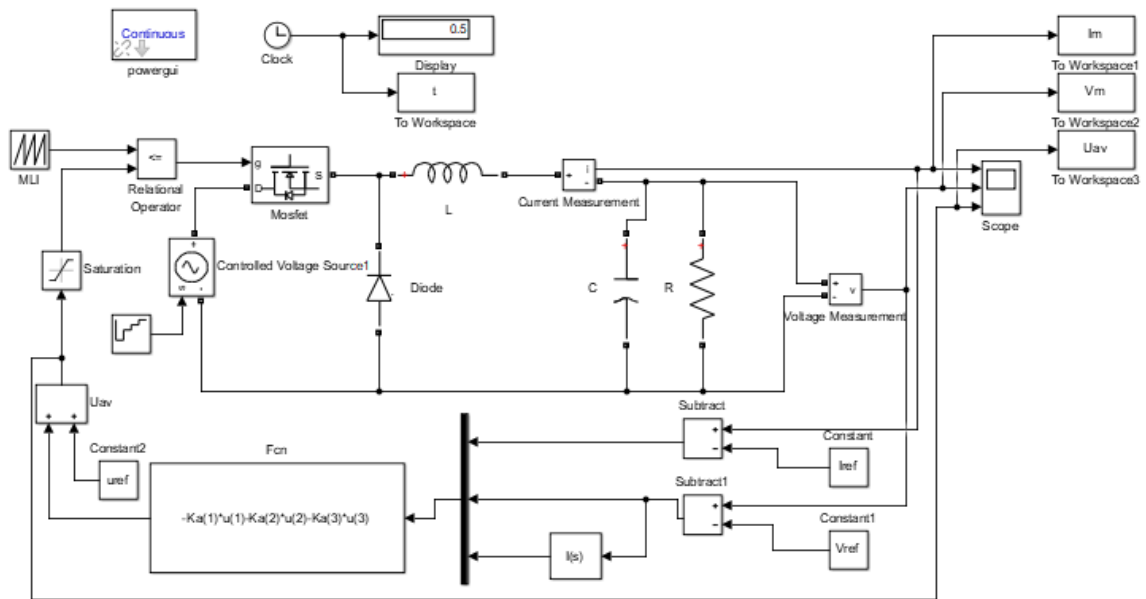


Figure 1.16 : Convertisseur Buck avec retour d'état avec action intégrale.

Pour tester la robustesse de notre régulateur « action intégrale », il faut perturber notre système et pour ça nous avons plusieurs méthodes, dans notre travail nous avons utilisé la méthode qui est basé sur "un signal d'entrée variable".

✓ Résultat de simulation :

Pour  $R = 28 \Omega$

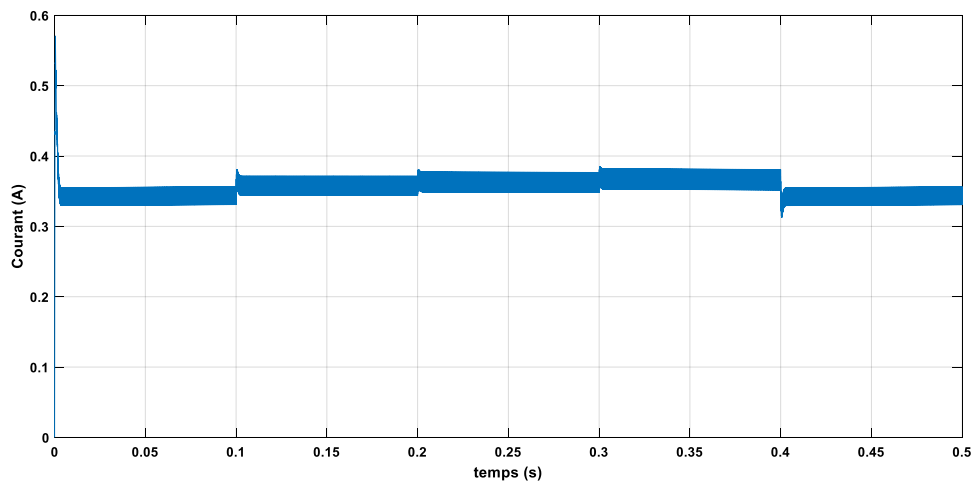
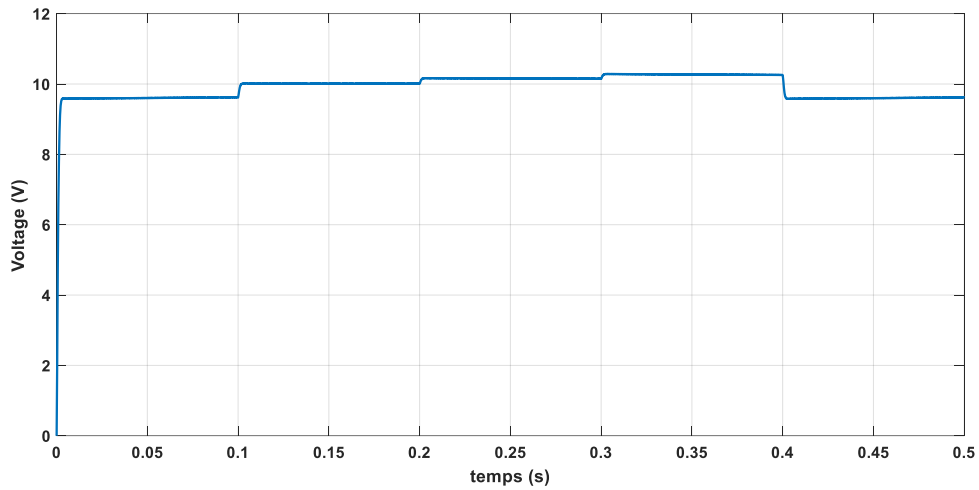
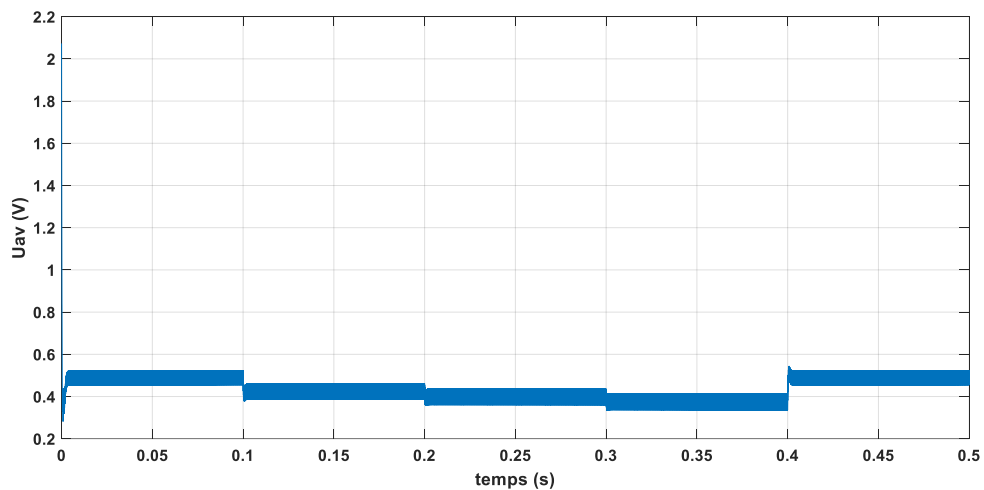


Figure 1.17 : Mesure de courant d'un convertisseur Buck avec retour d'état action intégrale.



**Figure 1.18 : Mesure de voltage d'un convertisseur Buck avec retour d'état action intégrale.**



**Figure 1.19 : Mesure de  $u_{av}$  d'un convertisseur Buck avec retour d'état action intégrale.**

Dans le cas du convertisseur Buck : on a un signal d'entrée qui varié entre 45(v) et 55(v) et 60(v) et 65(v) chaque 0.1(s).

# Chapitre 1 : convertisseur DC/DC.

## 1.6.2. Convertisseur Boost :

### 1.6.2.1. Boucle ouverte :

✓ Schémas Simulink :

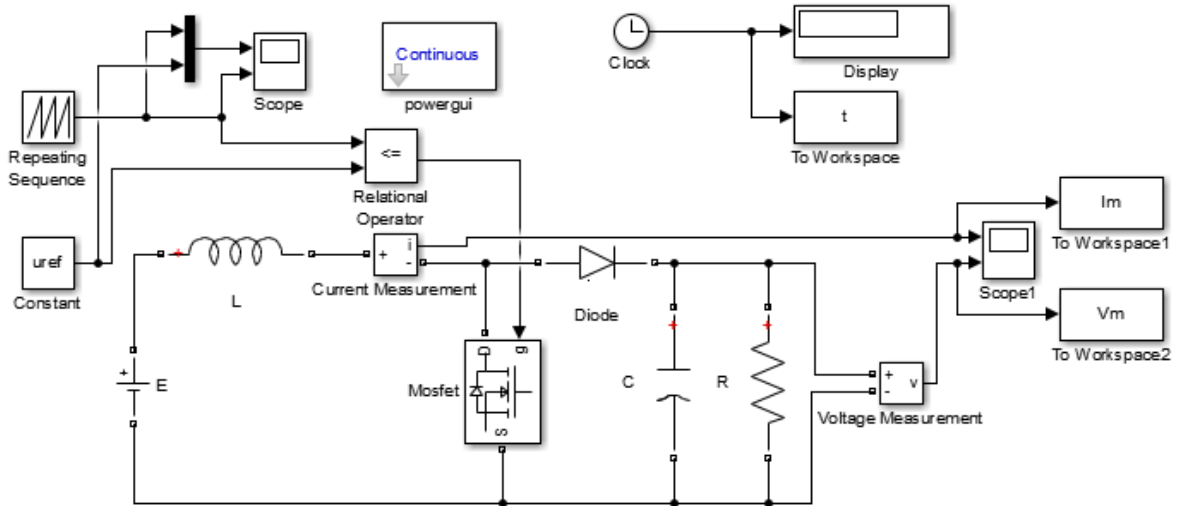


Figure 1.20 : Convertisseur Boost en boucle ouverte.

✓ Résultat de simulation :

Pour  $R = 52 \Omega$

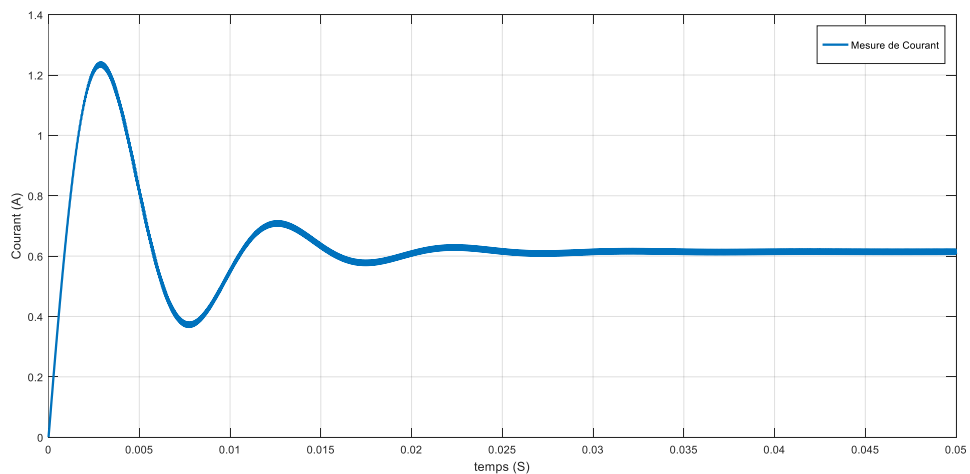
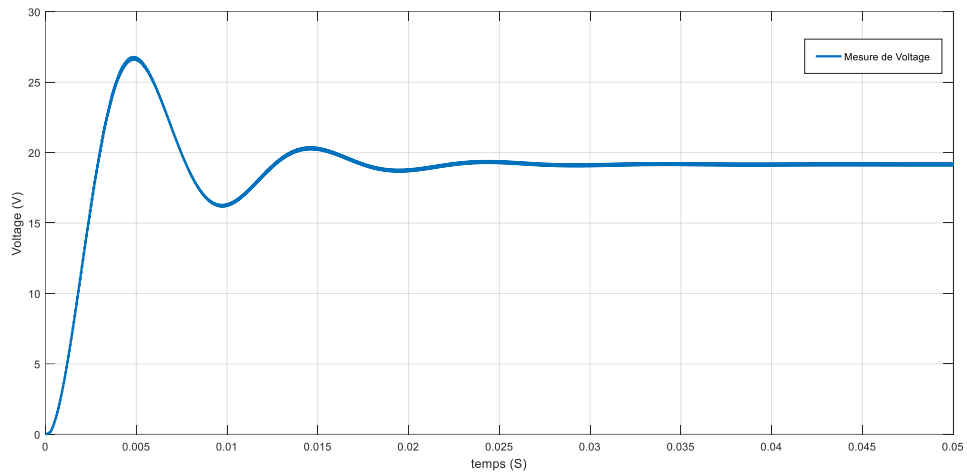


Figure 1.21 : Mesure de courant d'un convertisseur Boost en boucle ouverte.

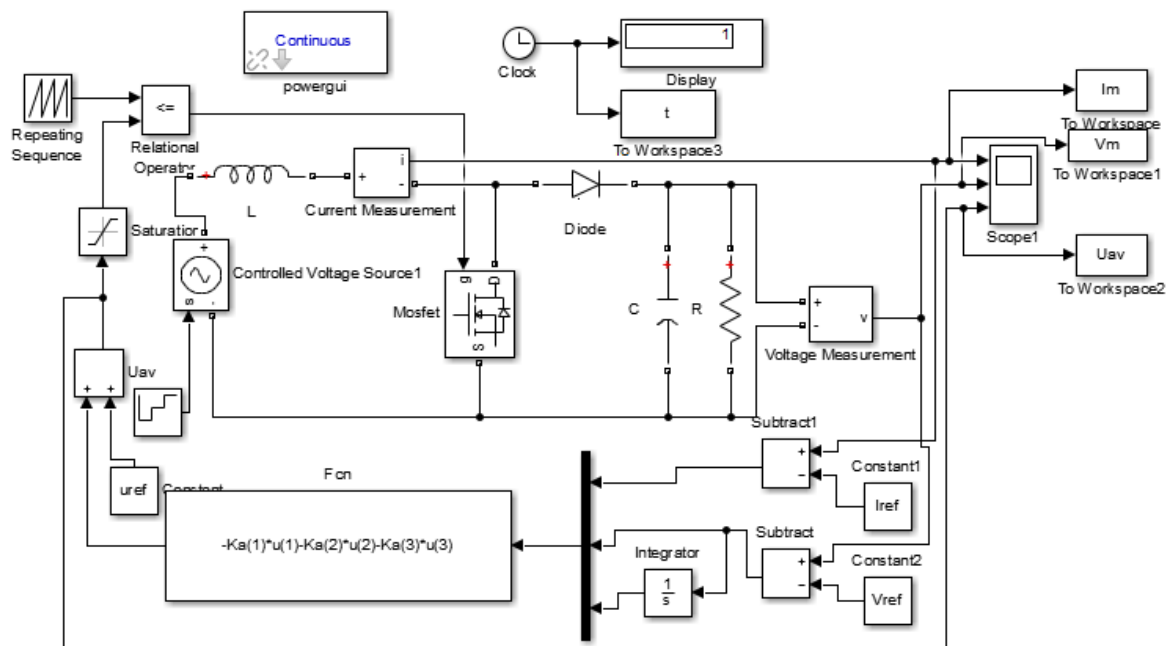


**Figure 1.22 : Mesure de voltage d'un convertisseur Boost en boucle ouverte.**

Comme le montre les figures (1.21,1.22), il y a un dépassement avec long temps de réponse, erreur de tension se trouve également être 0.2V. Cela fait osciller le système.

### 1.6.2.2. Retour d'état avec action intégrale :

✓ Schéma Simulink :



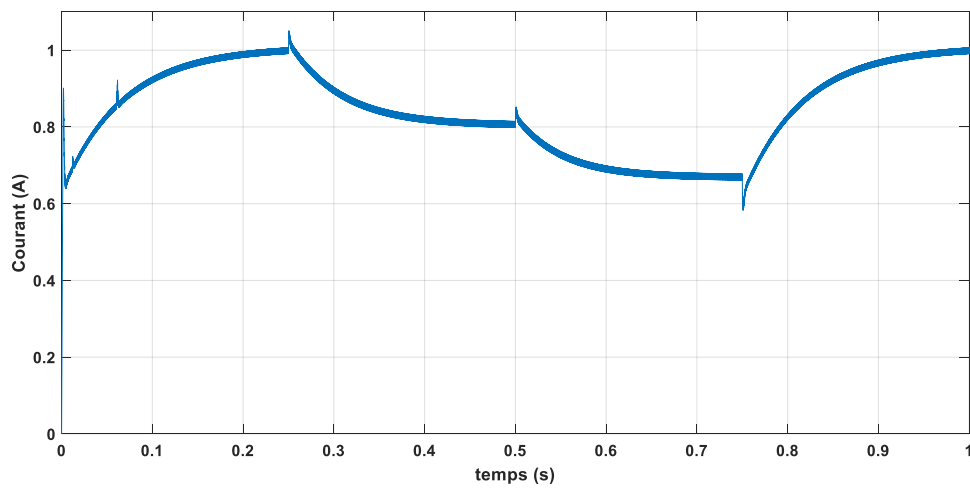
**Figure 1.23 : Convertisseur Boost avec action intégrale.**

## Chapitre 1 : convertisseur DC/DC.

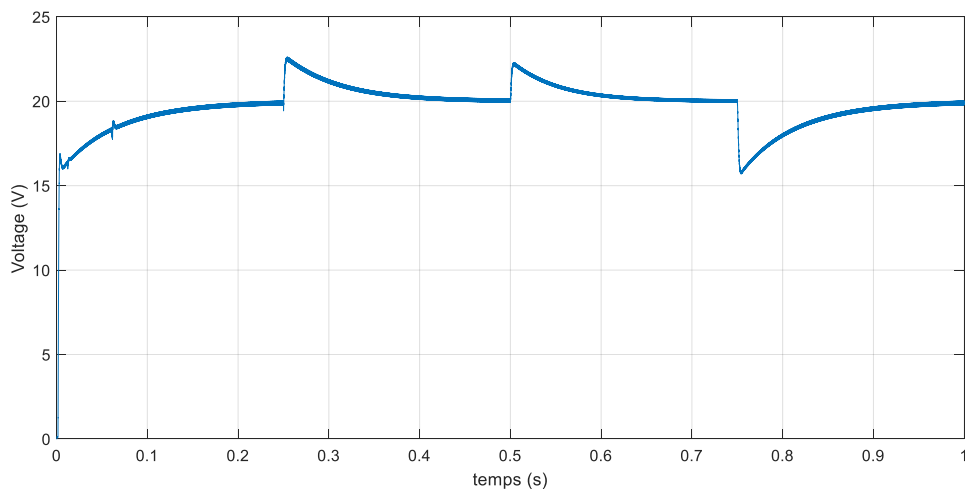
---

✓ *Résultat de simulation :*

Pour  $R = 52 \Omega$



**Figure 1.24 : Mesure de courant d'un convertisseur Boost avec retour d'état action intégrale.**



**Figure 1.25 : Mesure de voltage d'un convertisseur Boost avec retour d'état action intégrale.**

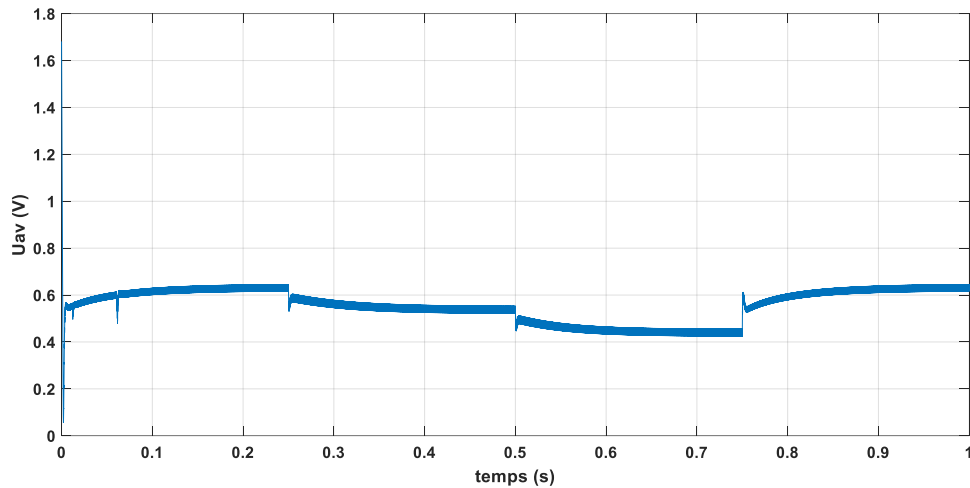


Figure 1.26 : Mesure de  $u_{av}$  d'un convertisseur Boost avec retour d'état action intégrale.

Dans le cas du convertisseur Boost : On a un signal d'entrée qui varié entre 8(v) et 10(v) et 12(v) chaque 0.25(s).

### 1.6.3. Convertisseur Buck-Boost :

#### 1.6.3.1. Boucle ouverte :

✓ Schéma Simulink :

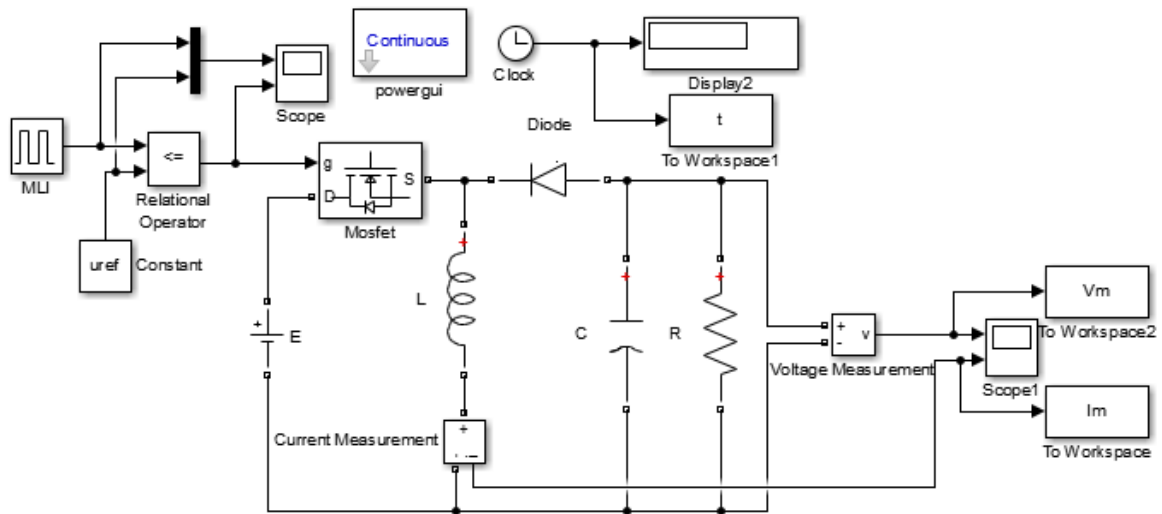


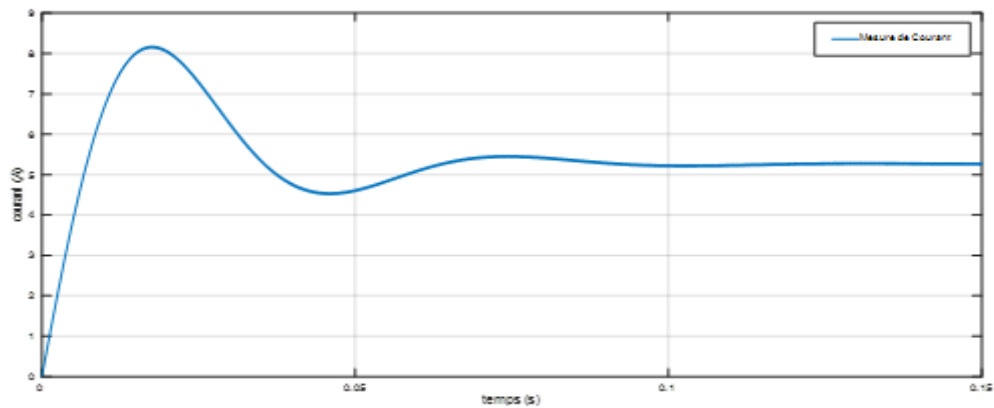
Figure 1.27 : Convertisseur Buck-Boost en boucle ouverte.

## Chapitre 1 : convertisseur DC/DC.

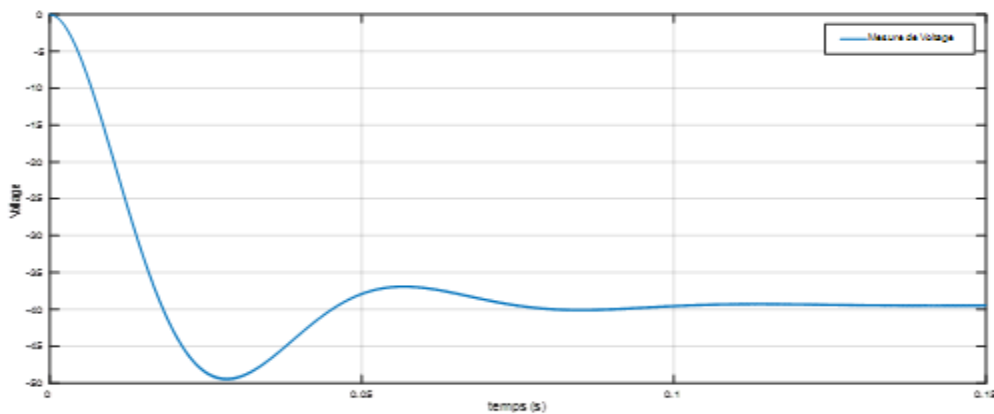
---

✓ *Résultat de simulation :*

Pour  $R = 23 \Omega$



**Figure 1.28 : Mesure de courant d'un convertisseur Buck-Boost en Boucle ouverte.**



**Figure 1.29 : Mesure de voltage d'un convertisseur Buck-Boost en Boucle ouverte.**

Notez que la réponse en tension de sortie de ce convertisseur est négative, comme illustré aux figures (1.28,1.29). Ces réponses se traduisant par de très longues de montées, des temps de réponse longs et des erreurs importantes.

# Chapitre 1 : convertisseur DC/DC.

## 1.6.3.2. Retour d'état avec action intégrale :

✓ Schéma Simulink :

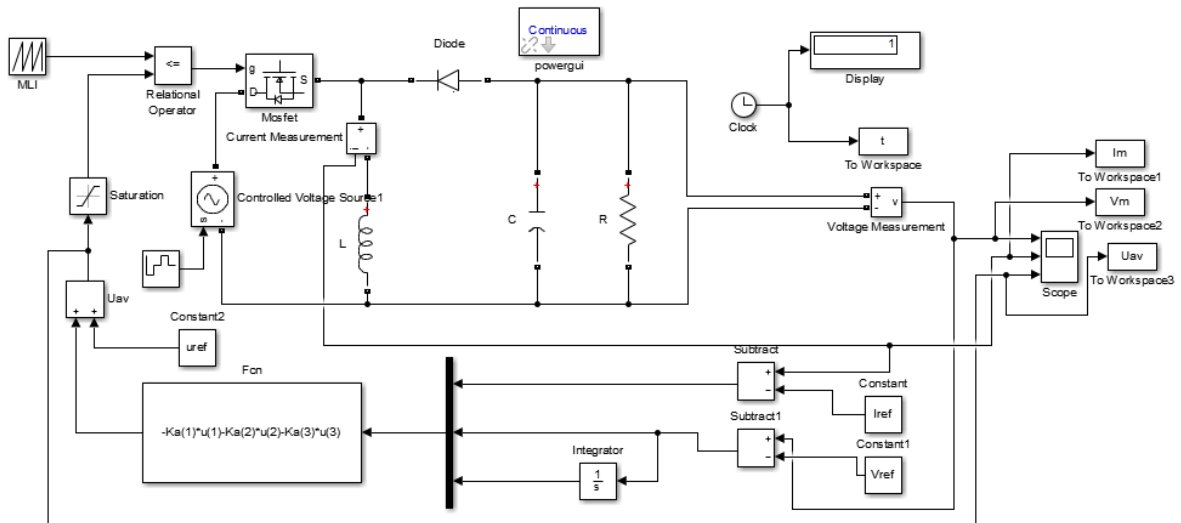


Figure 1.30 : Convertisseur Buck-Boost avec retour d'état action intégrale.

✓ Résultat de simulation :

Pour  $R = 23 \Omega$

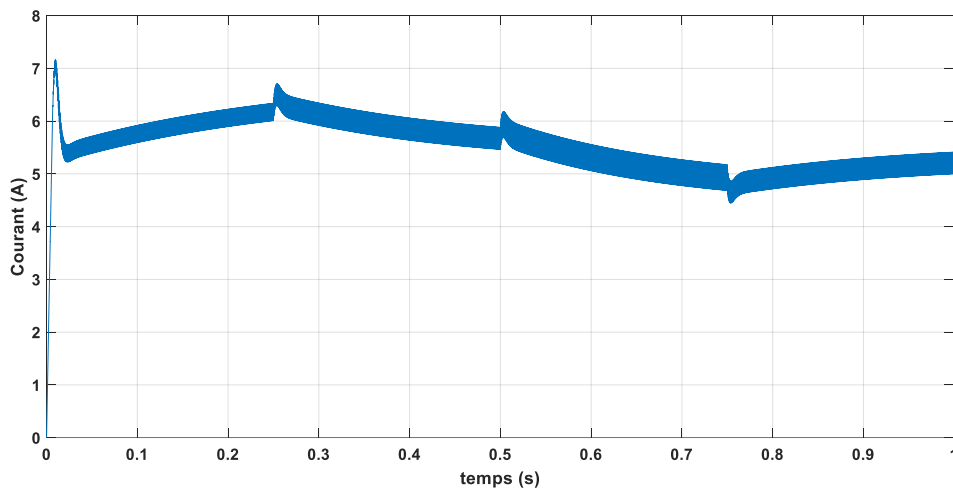
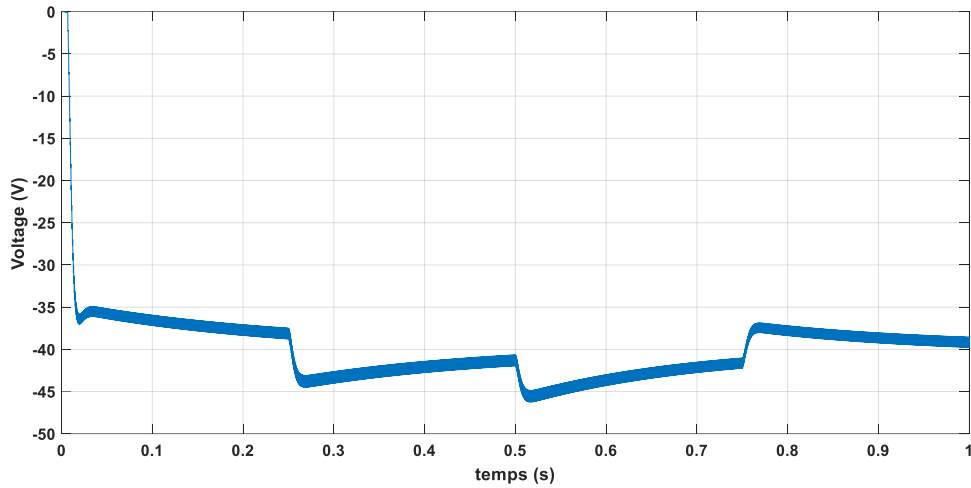
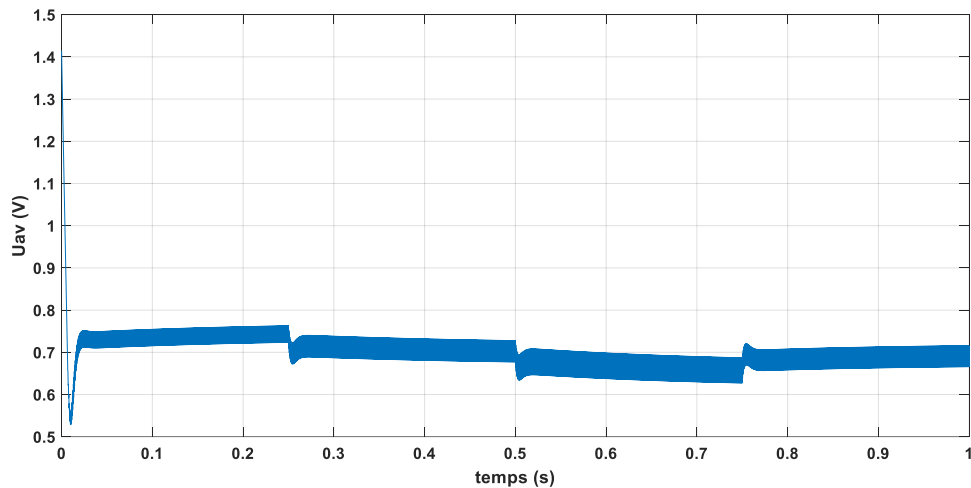


Figure 1.31 : Mesure de courant d'un convertisseur Buck-Boost avec retour d'état action intégrale.



*Figure 1.32 : Mesure de voltage d'un convertisseur Buck-Boost avec retour d'état action intégrale.*



*Figure 1.33 : Mesure de  $u_{av}$  d'un convertisseur Buck-Boost avec retour d'état action intégrale.*

Dans le cas du convertisseur Buck-Boost : On a un signal d'entrée qui varié entre 15(v) et 20(v) et finalement 20(v) chaque 0.25(s).

## **Chapitre 1 : convertisseur DC/DC.**

---

### **1.7. Comparaison :**

Boucle ouverte	Retour d'état avec action intégrale
<ul style="list-style-type: none"><li>-un système aveugle.</li><li>-Un temps de montée court.</li><li>-Un long temps de réponse avec des oscillations.</li><li>-une erreur importante.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Compense l'erreur que la variation de la charge (perturbation) crée.</li><li>-Améliorer les performances du système.</li><li>-Le retour d'état action intégrale c'est intervention en cas d'une perturbation.</li></ul>

**Tableau 1.1 comparaison de la commande en boucle ouverte et retour d'état avec action intégrale.**

## ***Chapitre 1 : convertisseur DC/DC.***

---

### ***1.8. Conclusion :***

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation des trois convertisseur DC-DC (Buck, Boost, Buck-Boost) et leurs principes de fonctionnement. EN examinant l'état stable, nous pouvons déterminer les fonctions de transfert statique du convertisseur et comprendre leurs relation E/S. La linéarisation autour du point d'équilibre souhaité nous a permet de définir des caractéristiques locales, montrant les bases de l'application de techniques de la commande linéaires. Nous avons présenté le principe de la régulation par retour d'état avec action intégrale pour annuler les erreurs statiques, son application en ingénierie de contrôle des convertisseur DC-DC, puis le résultat de chaque régulation.

# ***Chapitre 2 : Association convertisseur / moteur***

### 2.1. Introduction:

Les moteurs à courant continu sont largement utilisés dans de nombreuses applications industrielles, telles que les tâches d'asservissement et de traction, en raison de leur efficacité, de leur robustesse et de leur facilité relative et traditionnelle à concevoir des schémas de contrôle, en particulier de type PI et PID. Ce chapitre présente une introduction sur le contrôle de moteur à courant continu avec un convertisseur abaisseur de type Buck et régulateur de type PI.

*Dans ce chapitre, on s'intéresse aux points suivants :*

- ✓ Description générale et principe de fonctionnement de la machine à courant continu.
- ✓ Types d'excitation de la machine à courant continu (MCC).
- ✓ Régulateur PI et PID.
- ✓ Commande d'un Moteur a courant continue par un convertisseur Buck.

### 2.2. Définition Moteur à courant continu :

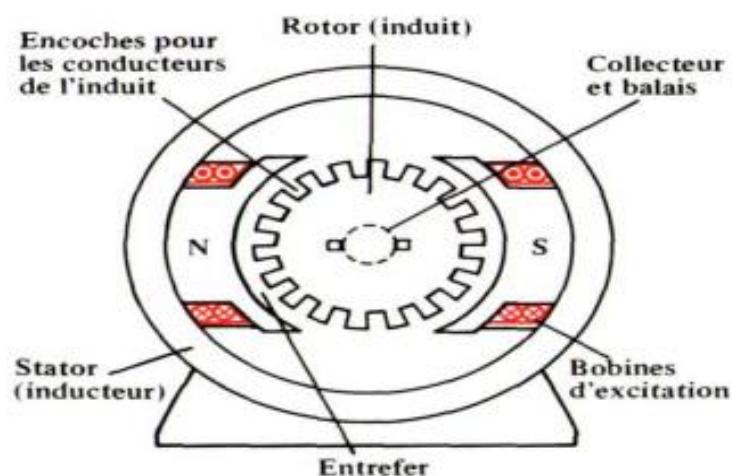
Une machine à courant continu est une machine électrique. Il s'agit d'un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant continu et un dispositif mécanique ; selon la source d'énergie.

### 2.3. Description et principe de fonctionnement de la MCC :

- En fonctionnement moteur : l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique.
- En fonctionnement générateur : l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique et la machine se comporte comme un frein. [7]

#### 2.3.1. Constitution :

Les principaux éléments de la MCC sont présentés sur la Figure 2.1 [7]:



*Figure 2.1 : Moteur à courant continu.*

**2.3.1.1. Inducteur :**

C'est la partie fixe du moteur, dont la fonction principale consiste à créer le champ magnétique d'excitation.

Il est constitué, soit par un aimant permanent, soit par un électro-aimant (voir Figure 2.2) dont les enroulements sont parcourus par le courant continu d'excitation [7].

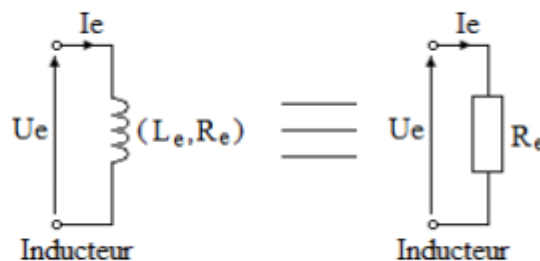


**Figure 2.2 : Inducteur (Stator) de la MCC.**

Lorsque l'inducteur n'est pas à aimants permanents, il est constitué de bobine alimentée par un courant continu ( $I_e$ ), appelé courant d'excitation. Elle est alors équivalente à sa résistance en série avec la bobine (Figure 2.3).

**En régime variable**

**En régime établi**



**Figure 2.3 : Schéma équivalent de l'inducteur (Stator).**

**2.3.1.2. Induit :**

C'est la partie mobile, qui comporte une ou plusieurs bobines tournant dans le champ magnétique (Figure 2.4) [7].



**Figure 2.4 : l'induit.**

Le Modèle équivalent de l'induit est présenté sur la Figure 2.5 :

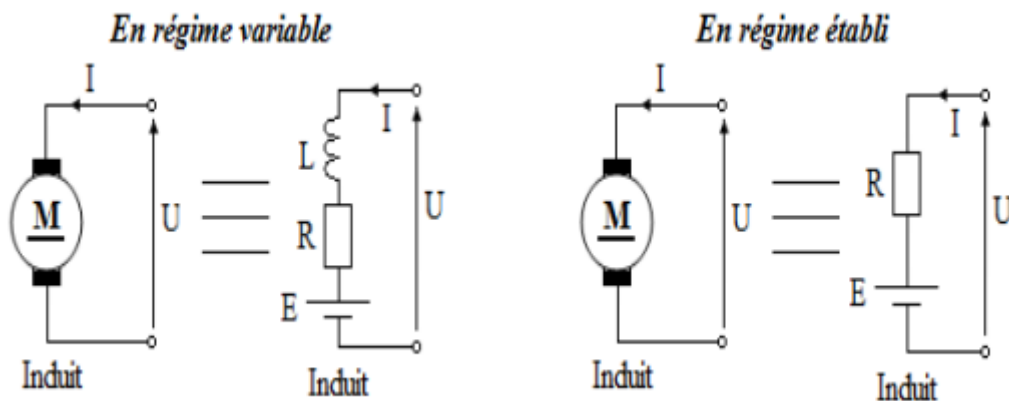


Figure 2.5 : schéma électrique équivalent de l'induit.

### 2.3.1.3. Collecteur :

Le collecteur est le constituant critique des machines à courant continu. C'est un ensemble de lames de cuivre, isolées latéralement les unes des autres et disposées suivant un cylindre, en bout de rotor. Ces lames sont réunies aux conducteurs de l'induit. Le collecteur a pour fonction d'assurer la commutation du courant d'alimentation dans les conducteurs de l'induit [5].



Figure 2.6 : Collecteur.

### 2.3.1.4. Balais :

Fixés sur la carcasse par le biais de portes balais, ils sont en carbone ou en graphite permettent l'alimentation de l'induit (partie en rotation) grâce à un contact glissant entre les lames du collecteur reliées aux conducteurs de l'induit et le circuit électrique extérieur. Ils sont constitués de petits cubes ayant une surface de contact de quelques  $\text{mm}^2$  à quelques  $\text{cm}^2$ , en graphite pur ou en alliage, qui doivent résister à des conditions d'utilisation sévères (courants élevés, températures élevées, frottements, arc, atmosphères chargées ou très sèches).

Ils sont équipés d'une tresse de raccordement et maintenus en place par un porte-balais solidaire du stator. Un ressort exerce une pression constante sur la partie en graphite quel que soit le degré d'usure du balai et frottent sur le collecteur grâce à des ressorts [5].

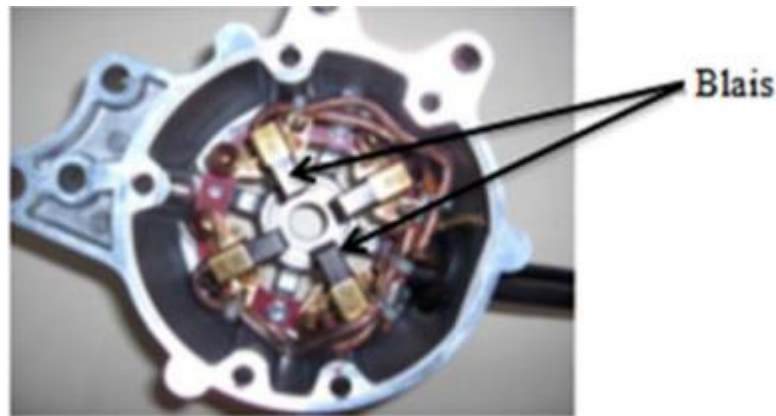


Figure 2.7 : Balais et porte balais.

2.3.2. Principe de fonctionnement :

L'inducteur (ou Stator) crée un champ magnétique  $\vec{B}$ . Ce stator peut être constitué des aimants permanents ou d'électroaimants.

L'induit (ou Rotor) porte des conducteurs, sous forme de spire (voir Figure 2.4) parcourus par un courant continu; ces spires soumises aux forces de Laplace entraînent la rotation. En effet, la variation du flux de champ à travers les spires, engendre une f.é.m. induite dans le rotor, qui est redressée par l'ensemble (collecteur-balais). La valeur moyenne de cette f.é.m. est proportionnelle à la vitesse de rotation mécanique de la MCC ( $\Omega$ ) et le flux magnétique ( $\varphi$ ) et elle est exprimée comme suit [5-7]:

$$E = K\Omega\varphi \tag{2.1}$$

$E$  : La f.é.m. en Volts.

$K$  : est une constante propre à la machine.

$\Omega$  : vitesse mécanique ( $rd/s$ ).

$\varphi$  : est le flux magnétique (Webers).

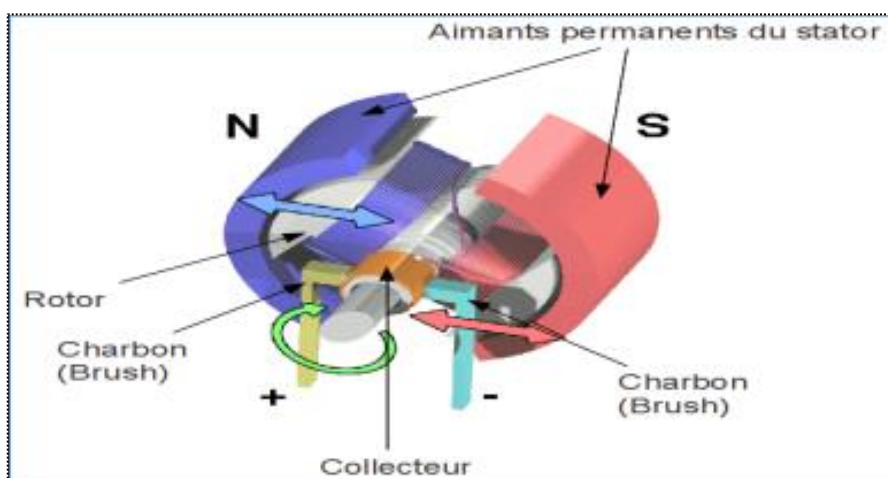


Figure 2.8 : Schéma Principe de fonctionnement de MCC.

### 2.3.3. Circulation de flux magnétique :

Le flux sort du pôle nord (N), s'épanouit un peu dans l'entrefer, traverse l'induit et entre dans le pôle sud (S). Il retourne au pôle nord (N) par les deux culasses est donc égale à la moitié du flux sous un pôle. La perpendiculaire à l'axe des pôles est appelée ligne neutre [5].

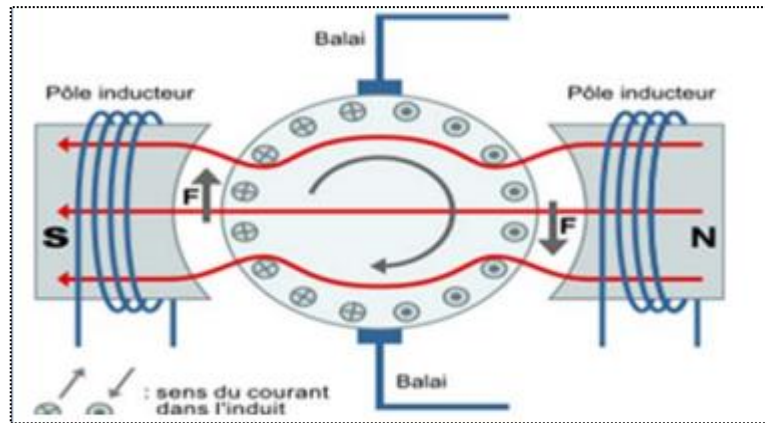


Figure 2.9 : Distribution de flux.

Dans l'entrefer, les épanouissements polaires ne sont pas tout à fait concentriques à l'induit, l'entrefer est plus large sous les cornes polaires. Les lignes de force y sont moins serrées et l'induction décroît quand on va de l'axe vers les extrémités. Elle est nulle sur la ligne neutre. L'épanouissement polaire est donc le siège de courant de Foucault, c'est pourquoi il est quelque fois feuilleté.

### 2.3.4. Régime de fonctionnement d'une MCC :

La machine à courant continu est une machine réversible qui peut fonctionner en deux régimes [5]:

#### ➤ Fonctionnement en moteur :

Un conducteur traversé par un courant, placé dans un champ magnétique est soumis à une force de  $\vec{F} = I \cdot \vec{l} \wedge \vec{B}$ . Partant de ce principe de base, on peut comprendre la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique dans le moteur à courant continu, lorsque l'inducteur est alimenté, il crée un champ magnétique (flux d'excitation) dans l'entrefer, dirigé suivant les rayons de l'induit. Ce champ magnétique rentre dans l'induit du côté du pôle Nord de l'inducteur et sort de l'induit du côté du pôle Sud de l'inducteur, en même temps, l'induit est alimenté, ses conducteurs situés sous un même pôle inducteur (du même côté des balais) sont parcourus par des courants de même sens et sont donc, d'après la loi de Laplace, soumis à une force. Les conducteurs situés sous l'autre pôle sont soumis à une force de même intensité et de sens opposé. Les deux forces créent un couple qui fait tourner l'induit du moteur.

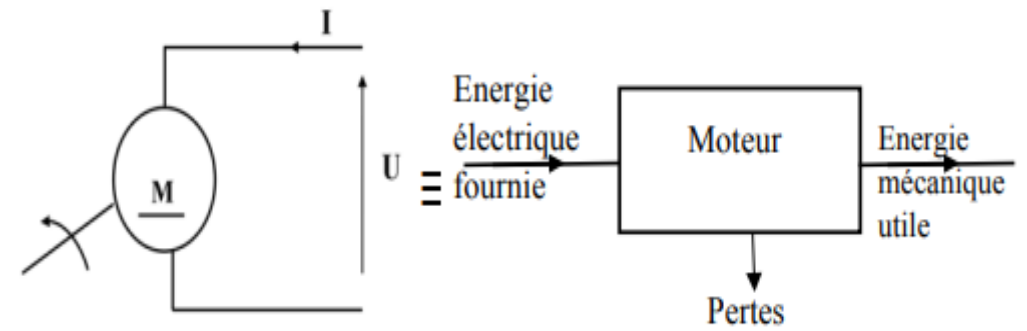


Figure 2.10 : Fonctionnement en moteur.

➤ **Fonctionnement en Génératrice :**

Un conducteur se déplaçant dans un champ magnétique va être le siège d'une f.é.m. induite. Il s'agit donc d'une conversion de sens inverse, d'énergie mécanique en énergie électrique.

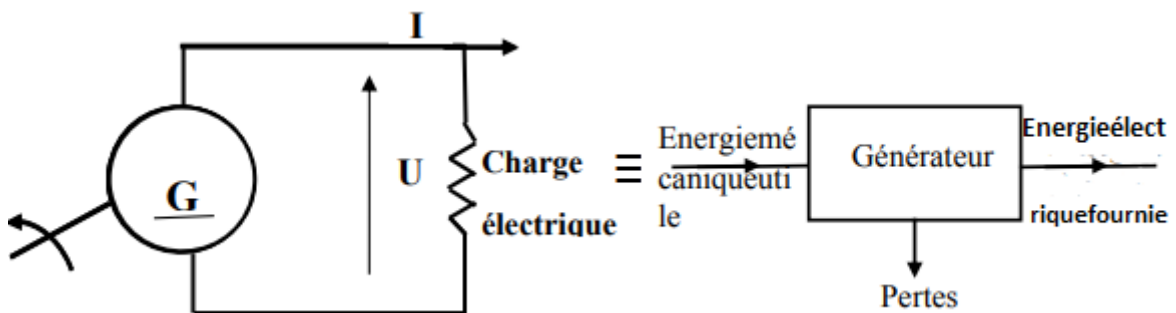


Figure 2.11 : Fonctionnement en Génératrice.

**2.5. MODES D'EXCITATION :**

Suivant la façon dont est alimenté le circuit inducteur (Stator), on distingue quatre types d'excitation [5-7]:

**2.5.1. Excitation indépendante (ou séparée) :**

➤ **Définitions et Caractéristiques :**

- L'inducteur est alimenté par une source indépendante ;
- Grande souplesse de commande ;
- Large gamme de vitesse.
- Utilisé en milieu industriel, associé avec un variateur électronique de vitesse et surtout sous la forme moteur d'asservissement.

➤ **Domaine d'application :**

Machines-outils: moteur de broche, d'axe. Machines spéciales.

➤ Schéma équivalent :

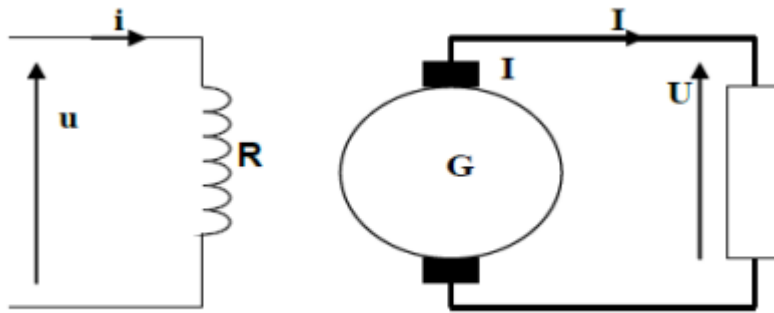


Figure 2.12 : Schéma d'excitation indépendante.

### 2.5.2. Excitation dérivation (ou shunt) :

➤ Définitions et Caractéristiques :

- L'inducteur et l'induit sont branchés en parallèle ;
- Vitesse constante quel que soit la charge ;
- Le moteur shunt est un autorégulateur de vitesse.

➤ Domaine d'application :

Machines-outils, appareil de levage (ascenseur).

➤ Schéma équivalent :

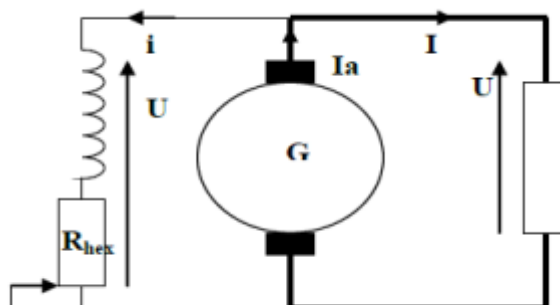


Figure 2.13 : Excitation Shunt.

### 2.5.3. Excitation série :

➤ Définitions et Caractéristiques :

- L'inducteur connecté en série avec l'induit, le flux d'excitation y est donc implicitement asservi au couple fourni ;
- Le bobinage inducteur comporte, dans ce cas, peu de spires, mais il est réalisé avec du fil de gros diamètre (robustesse) ;
- Le moteur série est un autorégulateurs de puissance ;
- Possède un fort couple de démarrage mais risque l'emballement à vide ;
- Le couple du moteur série ne dépend pas de la tension d'alimentation ;

- Le couple résistant croît rapidement avec la vitesse ;
- La vitesse décroît quand la charge augmente ;
- Supporte bien les surcharges.

➤ **Domaine d'application :**

Engins de levage (grues, palans, ponts roulants) ventilateurs, pompes, centrifuges; traction.

➤ **Schéma équivalent :**

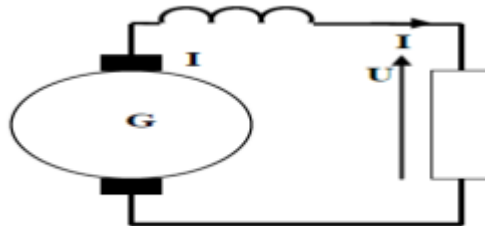


Figure 2.14 : Excitation série.

2.5.4. Excitation composée (compound) :

➤ **Définitions et Caractéristiques :**

- L'inducteur est divisé en deux parties, l'une connectée en série et l'autre en parallèle.
- Entraînements de grande inertie ;
- Couple très variable avec la vitesse.

➤ **Domaine d'application :**

Petit moteur à démarrage direct, ventilateur, pompes, machines de laminoirs, volants d'inertie

➤ **Schéma équivalent :**

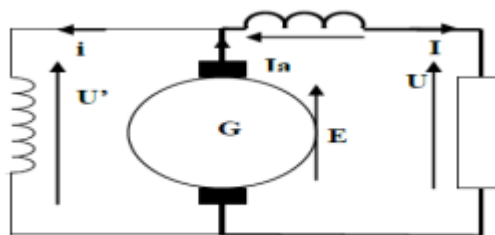


Figure 2.15 : Excitation composée (compound).

2.6. Moteur excitation indépendante :

Effectivement, en combinant les modèles équivalents de l'inducteur et de l'induit établis ci-dessus, on obtient le modèle électrique équivalent de la MCC à excitation séparée (Figure 2.10) [5]:

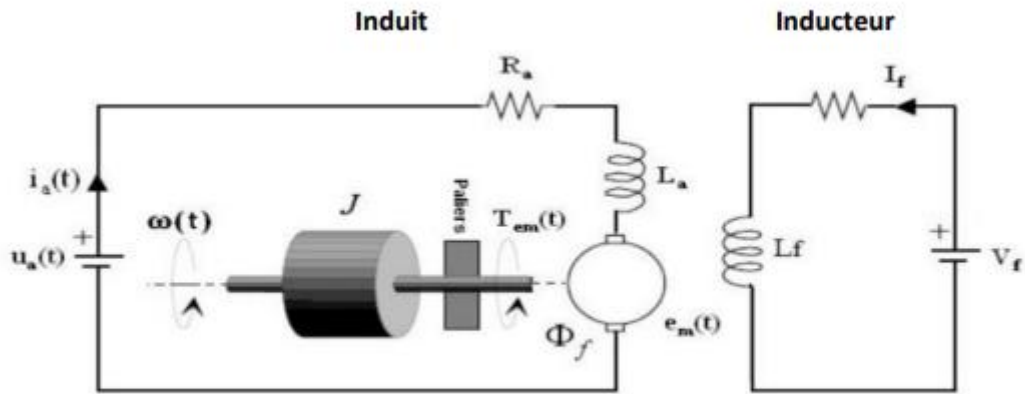


Figure 2.16 : Schéma électrique de la MCC à excitation indépendante.

✓ Les équations mathématiques décrivant le fonctionnement de la MCC sont les suivantes :

❖ Equations électriques:

➤ Equation d'Induit :  $u_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + E(t)$  (2.2)

➤ Equation d'Inducteur :  $V_f(t) = R_f I_f(t) + L_f \frac{dI_f(t)}{dt}$  (2.3)

❖ Equation électromécanique:

$E(t) = K\Phi(t)\Omega(t)$  (2.4)

❖ Equation mécanique:

$J \frac{d\Omega(t)}{dt} + f\Omega(t) + C_r = C_{em}$  (2.5)

2.7. Applications industrielles des machines à courant continu [5]:

<p>Application nécessitant des puissances et des couples beaucoup plus élevés (Moteur à Excitation série, Moteur à Excitation composée)</p>	<p>Figure 2.17 : Une grue de chantier naval et des ponts de levage.</p>
---	---




<p>Application nécessitant couple de démarrage important et capacité de freinage (Moteur à Excitation parallèle (shunt))</p>	 <p><b>Figure 2.18 : Remontées mécaniques.</b></p>
<p>Trois exemples d'applications typiques de la variation de vitesse à courant continu (Moteur à Excitation séparée, Moteur à Excitation parallèle (shunt))</p>	 <p><b>Figure 2.19 : Chaîne de tréfilage de câbles et Machine rotative d'imprimerie.</b></p>  <p><b>Figure 2.20 : Machine d'enroulage pour film plastique transparent.</b></p>

Tableau 2.1. Différents Applications des machines à courant continu.

2.8. Structure de la commande PI :

Lorsqu'une boucle de régulation est dotée d'un régulateur proportionnel intégral PI classique, présenté sur la figure 2.21, il comporte une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité avec laquelle la régulation doit avoir lieu et une action intégrale qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur régulée et sa propre consigne.

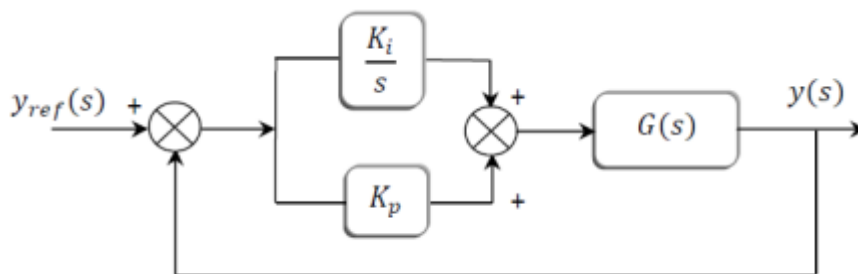


Figure 2.21 : Schéma de commande utilisant la structure PI.

**2.9. Régulateur PID :**

L'avantage d'un régulateur PID est sa performance dynamique, sa précision de réglage et sa stabilité. Les éléments de ce régulateur sont une combinaison d'actions P (Proportionnelle), I (Intégrale) et D (Dérivée) choisies en fonction du type d'application [10].

**2.9.1. Effets et actions de base des régulateurs PID [10]:**

On résume les avantages et les limitations des actions de base des régulateurs PID :

action	Avantages	désavantages
P	Action instantanée	Ne permet pas d'annuler une erreur statique mais permet de la réduire
I	Annule l'erreur statique	Action lente Ralentit le système (effet déstabilisant)
D	Action très dynamique Améliore la stabilité Détruit la rapidité	Sensibilité aux bruits Forte sollicitation de l'organe de commande

**Tableau 2.1 : Synthèse sur les actions PID.**

Augmentation de	Stabilité	Précision	Rapidité
$k_p$	Diminue	Augmente	Augmente
$T_i$	Augmente	Pas d'influence	Diminue
$T_d$	Augmente	Pas d'influence	Diminue

**Tableau 2.2 : Tableau d'influence de PID.**

**2.10. Convertisseur/ Moteur :**

**2.10.1. Système de moteur DC entraîné par convertisseur Buck:**

Le modèle simplifié du moteur DC à convertisseur abaisseur global du système est illustré à la figure 2.22. Les circuits de commutations ont été remplacés par des commutateurs idéaux. Ceci est indiqué par la multiplication de  $U_e$  avec la variable de commutation  $u \in \{0,1\}$ . Une résistance supplémentaire  $R_L$  a été ajoutée au modèle afin de prendre en compte la résistance ohmique de la bobine des enroulements. Le moteur a été modélisé par une inductance  $L_M$  avec résistance ohmique  $R_M$  et une source de tension électromagnétique  $\omega K_E$ . Une tension d'entrée  $U_e$  a été utilisé dont la valeur est égale à la tension maximale du moteur à courant continu. Dans cette étude, le circuit du convertisseur Buck avec une bobine d'inductance  $L$ , résistance d'enroulement,  $R_L$  et capacitance,  $C$  est considéré [3].

2.10.2. Modélisation du système de moteur à courant continu à convertisseur Buck :

Cette section fournit une brève description de la modélisation du moteur à courant continu commandé par convertisseur Buck, comme base d'un environnement de simulation pour le développement et l'évaluation des techniques de contrôle proposées. Ainsi le système dynamique composé du convertisseur/moteur est considéré dans cette étude dont on doit dégager la fonction de transfert et les équations d'état.

Compte tenu du système dynamique du convertisseur/moteur, le système peut être modélisé comme [3]:

$$uU_e = R_L i_L + L \frac{di_L}{dt} + u_C \quad (2.23)$$

$$i_L = C \frac{du_C}{dt} + i_a \quad (2.24)$$

$$u_C = R_M i_a + L_M \frac{di_a}{dt} + K_E \omega \quad (2.25)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = K_M i_a \quad (2.26)$$

Où  $J$  est le moment d'inertie et  $K_M$  est le gain du générateur tachymétrique du moteur. Dans (2.23) et (2.25), les très faibles résistances des amplificateurs de mesure  $R_4$  et  $R_6$  ont été négligées.

A partir des équations (2.23) à (2.26), la modélisation de l'espace d'état complète avec l'équation mécanique qui décrit la dynamique de l'arbre moteur, un système linéaire du quatrième ordre est obtenu comme [3]:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.27)$$

$$y = Cx$$

Avec le vecteur  $x = [i_L u_C i_a \ \omega]^T$  et les matrices A, B et C sont données par [3]:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & -\frac{1}{L} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & -\frac{1}{C} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_M} & -\frac{R_M}{L_M} & -\frac{K_E}{L_M} \\ 0 & 0 & \frac{K_M}{J} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$B = \left[ \frac{U_e}{L} \ 0 \ 0 \ 0 \right]^T, \quad C[0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

Selon (Ortega, R., 1998), l'entrée de commande discrète  $u \in \{ 0, 1 \}$  peut être remplacée par un rapport cyclique  $\delta \in \{ 0, 1 \}$  lors de l'utilisation d'une stratégie PWM pour générer  $\delta$  à partir d'un signal d'entrée analogique. Par conséquent, pour la configuration donnée, nous pouvons nous référer à Un modèle dynamique dit moyenné, donné par [3]:

$$\dot{x} = Ax + B\delta \quad (2.29)$$

Où la nouvelle entrée est le rapport cyclique  $\delta$ . Notez que cette description de système linéaire n'est valable que tant qu'on peut assurer qu'aucun effet de saturation ne se produise dans la bobine. Sinon, l'inductance  $L$  dépendrait de manière non linéaire du courant  $i_L$ .

Dans cette étude, les valeurs des paramètres sont définies comme  $L_M = 8.9 \text{ mH}$ ,  $R_M = 6 \Omega$ ,  $K_E = 0.0517 \text{ V} \frac{\text{s}}{\text{rad}}$ ,  $K_M = 0.0517 \text{ N} \frac{\text{m}}{\text{A}}$ ,  $J = 7.95 \times 10^{-6} \text{ Kg} - \text{m}^2$ ,  $U_e = 24 \text{ V}$ ,  $L = 1.33 \text{ mH}$ ,  $R_L = 0.2 \Omega$ , et  $C = 470 \mu\text{F}$ . Pour le convertisseur, une fréquence de commutation de  $f = 45 \text{ kHz}$  a été utilisée.

### 2.10.3. Algorithme de contrôle :

➤ Schéma de contrôle proportionnel-intégral (PI) [3]:

Pour démontrer les performances du contrôleur PI dans le contrôle de la vitesse angulaire du moteur, la vitesse  $\omega(s)$  du moteur à courant continu est renvoyée et comparé à la vitesse angulaire souhaitée  $\omega_d(s)$  comme le montre la figure.

L'erreur de vitesse angulaire est régulée par les gains proportionnels et intégraux et appliquée au Buck moteur à courant continu entraîné par convertisseur en termes de rapport cyclique de commande,  $\delta(s)$ , où il peut être obtenu comme :

$$\delta(s) = G_c(s)[\omega_d(s) - \omega(s)]$$

Par conséquent, la fonction de transfert en boucle fermée est obtenue comme :

$$\frac{\omega(s)}{\omega_d(s)} = \frac{G_c(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s)}$$

Où  $G_c(s) = K_p + K_i/s$  et  $G(s) = \omega(s)/\delta(s)$ .

Avant de concevoir le contrôleur PI, la fonction de transfert du moteur à courant continu entraîné par le convertisseur abaisseur doit être obtenue. À partir de (2.27) et (2.28), la fonction de transfert de petit signal de sortie à commande de la figure 2.22 peut être obtenue comme [3]:

$$G(s) = \frac{U_e}{\frac{JL_L C}{K_M} s^4 + \frac{JC}{K_M} (R_M L + R_L L_M) s^3 + \left[ K_E L C + \frac{J}{K_M} (R_L R_M C + L + L_M) \right] s^2 + \left[ K_E R_L C + \frac{J}{K_M} (R_L + R_M) \right] s + K_E} \quad (2.30)$$

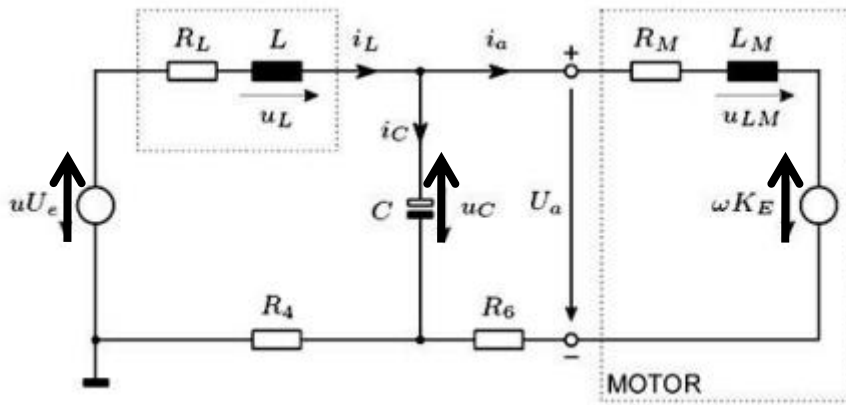


Figure 2.22 : Description du système de moteur à courant continu entraîné par convertisseur Buck.

À partir de l'équation (2.30), la fonction de transfert de la sortie à la commande du moteur à courant continu entraîné par le convertisseur Buck au point de fonctionnement nominal est obtenue comme [3]:

$$G(s) = \frac{2.805 \times 10^{13}}{s^4 + 824.5s^3 + 1.978 \times 10^6s^2 + 1.120 \times 10^9s + 6.043 \times 10^{10}} \quad (2.31)$$

La fonction de transfert dans (2.31) a des pôles conjugués complexes à  $-105,6 \pm j1343,1$  ce qui provoque une phase de  $180^\circ$  retard à la fréquence approximative de 2490 rad/s. Le diagramme de Bode du système est illustré à la figure 2.24. Le diagramme de Bode montre que la marge de gain est de  $-31,1$  dB et la marge de phase est de  $-159^\circ$ , ce qui indique l'instabilité du système.

Un contrôleur PI a été conçu pour le contrôle du moteur à courant continu entraîné par le convertisseur Buck à l'état stable afin de réduire l'oscillation d'état. Un pôle a été placé à l'origine et un zéro a été placé à 57,5 rad/s. Le gain en courant continu du contrôleur a été ajusté pour obtenir une marge de phase suffisante et une fréquence de croisement élevée. La fonction de transfert du contrôleur PI est donné par :

$$G_c(s) = 0.0069 + \frac{0.3968}{s}$$

Le diagramme de Bode pour le système compensé par PI est illustré à la figure 2.25. Le diagramme de Bode montre que la marge de gain est de 12,4 dB, la marge de phase est de  $71^\circ$  et la bande passante est de 2680 rad/s.

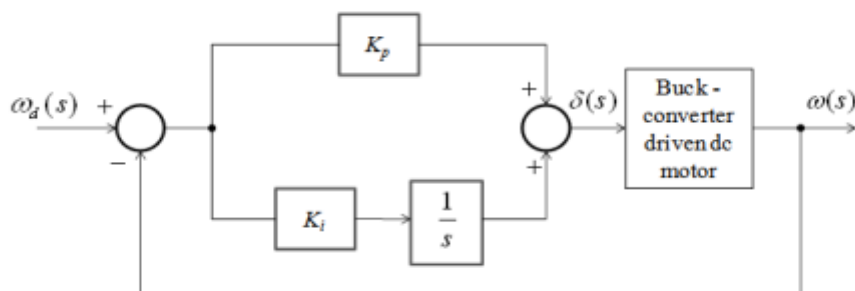


Figure 2.23 : structure de contrôle PI.

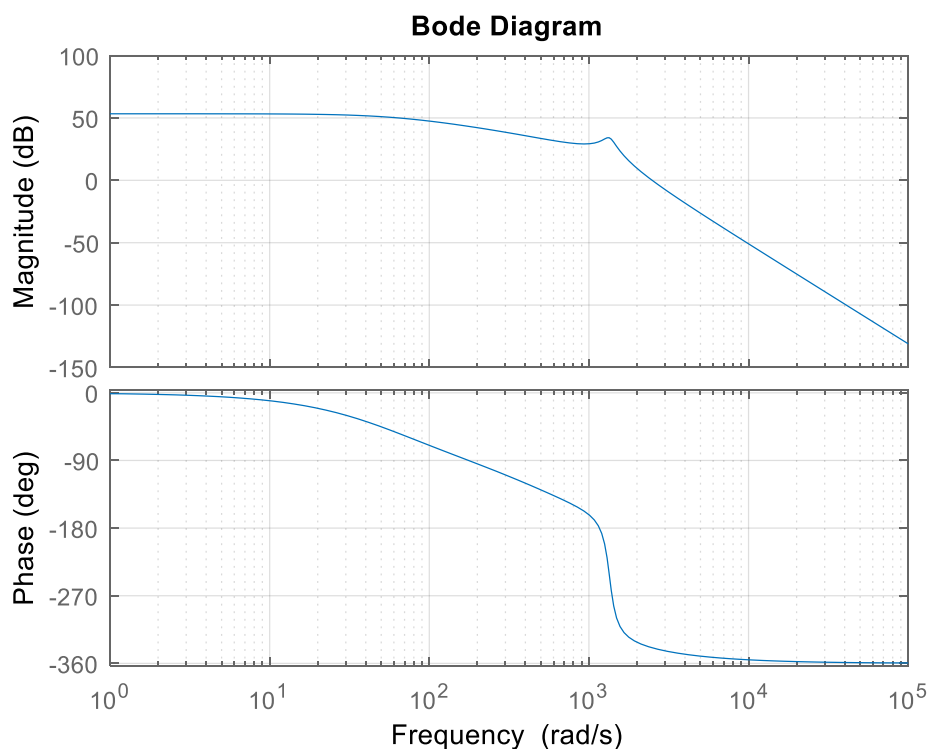


Figure 2.24 : Diagramme de Bode du système non compensé moteur à courant continu / convertisseur Buck.

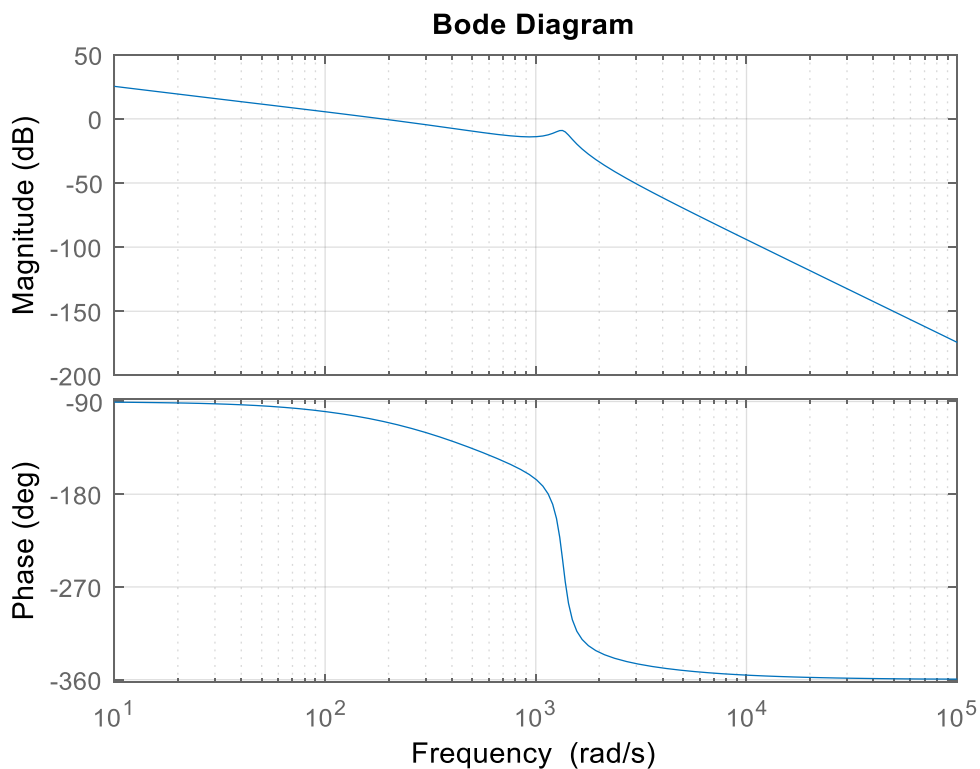


Figure 2.25 : Tracé de Bode du système moteur DC/convertisseur Buck avec compensateur PI.

**2.11. Conclusion :**

Ce chapitre était dédié au contrôle d'un convertisseur abaisseur avec un contrôleur PI pour piloter un moteur à courant continu. Nous avons vu que le choix de régulateur PI pour commander le système convertisseur (Buck) / DC moteur pourrait offrir de bonnes performances.

**Chapitre 3 : Commande d'un moteur  
à courant  
continu par un module  
PV via  
un convertisseur Buck.**

## ***Chapitre 3 : Commande d'un moteur à courant continu par un module PV via un convertisseur Buck.***

---

### ***3.1. Introduction :***

Aujourd'hui, il existe de nombreuses applications où les modules photovoltaïques (PV) peuvent être utilisés. Surtout les petites charges hors réseau telles que l'éclairage de base, les télécommunications, le pompage. Dans certains de ces cas, le moteur à courant continu est connecté au module PV en tant que charge.

Pour la plupart des moteurs à courant continu directement connectés au PVM, le point de fonctionnement donné par l'intersection des courbes I-V des moteurs et PV est très éloigné du point de puissance maximale du PVM.

Pour de meilleures performances, le point de fonctionnement d'équilibre doit être plus proche du MPP du PVM en faisant correspondre le moteur à courant continu au PVM. L'adaptation peut être réalisée de deux manières.

- Tout d'abord, sélectionnez soigneusement le moteur à courant continu en fonction de la courbe I-V du moteur, des caractéristiques de charge mécanique et des paramètres PVM, sans le circuit d'interface.
- Soit utiliser un convertisseur de puissance DC-DC comme interface de circuit pour faire correspondre un PVM avec un moteur à courant continu.

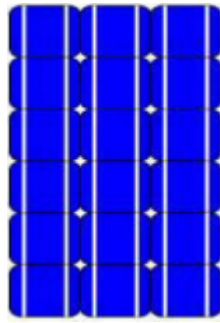
Pour cela, nous allons utiliser une méthode d'approximation pour estimer la tension et le courant PVM au point optimal, celle-ci est appelée la méthode des coordonnées de réorientation linéaire. (LRCM)

### ***3.2. Technologies des cellules solaires photovoltaïques :***

Le matériau le plus répandu dans les photopiles ou cellules solaires est le silicium. Il est dit tétravalent, cela signifie qu'un atome de silicium peut se lier avec quatre autres atomes de même nature. Il existe plusieurs types de cellules solaires [13]:

#### ***3.2.1. Cellules monocristallines :***

- Première génération de photopiles.
- Forme de plaquettes rondes, carrées ou pseudo-carrées, de surface bleu-gris uniforme.
- Rendement excellent de 15 % et jusqu'à 18 %.
- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.

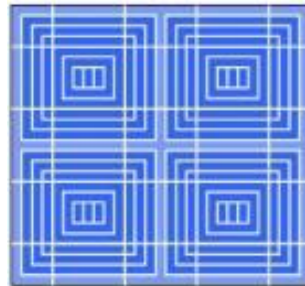


**Figure 3.1 : Cellules monocristallines.**

### **3.2.2. Cellules poly cristalline :**

Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en plusieurs cristaux dont les orientations sont différentes.

- Rendement de 12 % et jusqu'à 14 %.
- Coût de production moins élevé.
- Procédé moins gourmand en énergie.



**Figure 3.2 : Cellules poly cristalline.**

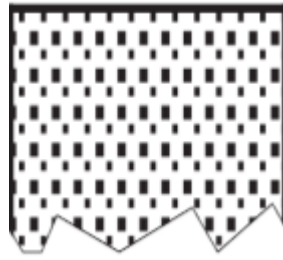
### **3.2.3. Cellules amorphes :**

Ces cellules sont composées d'un support en verre ou en matière synthétique sur lequel est disposé une fine couche de silicium (l'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal). Elles ont une surface uniformément sombre.

- Rendement de seulement 6 % par module.
- Coût de production bien plus bas.

Appliquées dans les petits produits de consommation : montres, calculatrices, mais peu utilisées dans le cadre des installations solaires.

Cependant, elles ont l'avantage de mieux réagir à la lumière diffuse et donc, elles sont plus performantes à une température élevée.

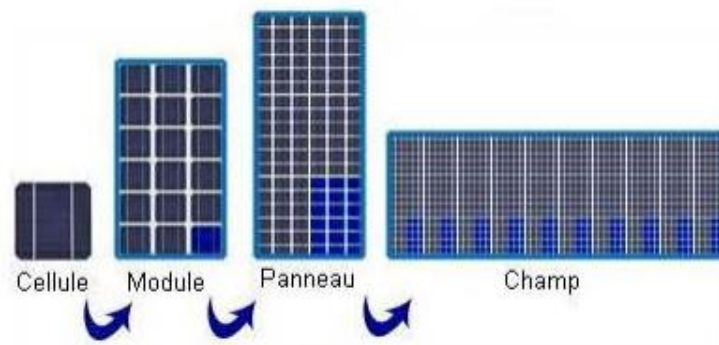


*Figure 3.3 : Cellules amorphes.*

### **3.3. Notion de cellule, module, panneau et champs photovoltaïque :**

La cellule solaire, de forme ronde ou carrée est l'élément de base, un ensemble de cellules forment un module solaire, dans un module les cellules sont reliées électriquement entre elles et encapsulées, donc protégées des agents extérieurs [13].

Plusieurs modules forment un panneau solaire. Plusieurs panneaux forment un système solaire auquel viennent s'ajouter des protections, un régulateur, un système de stockage de l'énergie (batterie) des appareils de contrôle et de mesure, un onduleur ...



*Figure 3.4 : Cellule solaire ; module solaire ; panneau solaire ; champ solaire.*

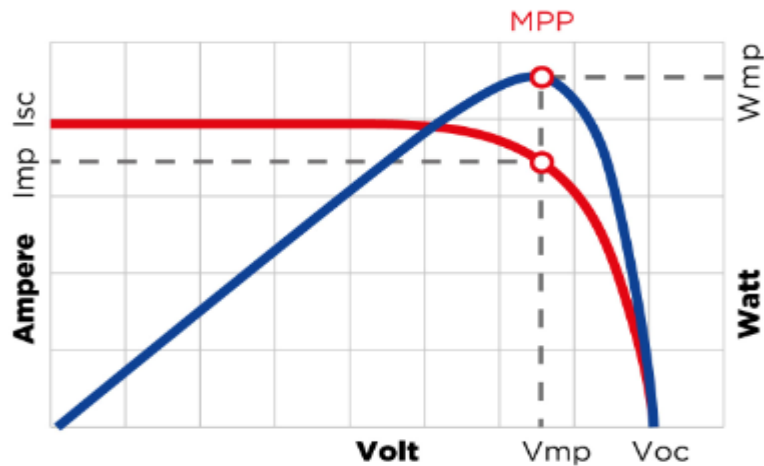
### **3.4. C'est quoi le MPPT :**

MPPT signifie Maximum Power Point Tracking. Le régulateur MPPT scanne la tension électrique produite par le panneau photovoltaïque plusieurs fois par jour. Son but est de trouver le point de sortie maximum du courant fourni par le panneau. Puis de faire en sorte de toujours utiliser cette pleine puissance [14].

### **3.5. Comment fonctionne le MPPT :**

La méthode Perturbation et Observation (P&O : Perturb and Observe)

La méthode P&O est sans doute la plus naturelle qui vient à l'esprit pour faire une recherche du point maximal de puissance (MPP, Maximum Power Point en anglais). Dans le cas d'une application photovoltaïque, il s'agit d'un algorithme qui va chercher la valeur optimale par 'essai-erreur' : en faisant varier la valeur de la tension  $U$ , et en analysant la puissance de sortie  $P$ , (ou l'intensité de sortie  $I$ ), l'objectif est de maximiser  $P$ , en augmentant au maximum la tension  $U$  sans faire baisser l'intensité  $I$  [14].



**Figure 3.5 : fonctionnement de MPPT.**

Pourquoi un régulateur MPPT ?

Avantage que procure ce régulateur de charge solaire MPPT est l'augmentation de la production d'énergie fournie par le système (20 à 30 %) [14].

Est-ce que on peut trouver MPP (Maximum Power Point) sans utiliser algorithme de MPPT ?

La seule qu'on peut utiliser c'est la méthode de LRCM c'est une méthode d'approximation de la puissance maximale

### **3.6. Commande du moteur et utilisation de la méthode de LRCM :**

Pour la méthode LRCM, on a les trois étapes ci-dessous puis on utilisera l'approximation de la puissance maximale pour commander le moteur [14].

- i. Trouver les valeur  $I_x$  et  $V_x$  :

$I_x$ : Courant de court – circuit.

$V_x$ : voltage circuit ouvert.

- ii. Trouver les valeurs d'approximation  $V_{ap}$  et  $I_{ap}$  à partir des équation suivant [1]:

$$V_{ap} = V_x + bV_x \cdot \ln\left(b - b \cdot \exp\left(-\frac{1}{b}\right)\right) \quad (3.1)$$

$$I_{ap} = I_x \cdot \frac{1 - b + b \cdot \exp\left(-\frac{1}{b}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{1}{b}\right)} \quad (3.2)$$

- iii. Trouver la valeur de  $P_{max}$  [1]:

$$P_{max} = V_{ap} * I_{ap} \quad (3.3)$$

Dans notre cas de l'association moteur à courant continu/MPV via le convertisseur Buck et afin de travailler à la vitesse maximale, il faut lier le rapport cyclique du convertisseur à la

### Chapitre 3 : Commande d'un moteur à courant continu par un module PV via un convertisseur Buck.

puissance maximale en utilisant la balance énergétique à l'équilibre bien sûr en négligeant les pertes au niveau du convertisseur [1-4].

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_e \omega_m \quad (3.4)$$

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m + T_L \quad (3.5)$$

$$I_a = \frac{B_m \cdot \omega_m + T_L}{K_e} \quad (3.6)$$

$$T_L = c_1 \cdot \omega_m + c_2 \quad (3.7)$$

$$P = R_a I_a^2 + E_a I_a = R_a I_a^2 + T_L \omega_m = P_{max} \quad (3.8)$$

A partir de ces équations, on trouvera les expressions de  $\omega_m$  et celle du rapport cyclique  $D$  comme décrit ci-dessous. Ce rapport cyclique optimal permet au moteur de tourner à la vitesse maximale. On doit d'abord trouver  $\omega_m$  à partir de  $P_{max}$  [1]:

$$P_{max} = B_m \omega_m^2 + T_L \omega_m + (B_m^2 \omega_m^2 + 2B_m \omega_m T_L + T_L^2) \frac{R_a}{K_e^2} \quad (3.9)$$

$$A \omega_m^2 + B \omega_m - C = 0$$

$$A = \left[ B_m + c_1 + B_m^2 \frac{R_a}{K_e^2} + 2 \cdot B_m \cdot c_1 \cdot \frac{R_a}{K_e^2} + \frac{R_a}{K_e^2} c_1^2 \right]$$

$$B = \left[ c_2 + 2 \cdot B_m \cdot c_2 \cdot \frac{R_a}{K_e^2} + 2 \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot \frac{R_a}{K_e^2} \right]$$

$$C = P_{max} - \frac{R_a}{K_e^2} c_2^2$$

Puis trouver  $D$  à partir de  $\omega_m$  en choisissant la valeur positive de  $\omega_m$ . (dans le cas d'un convertisseur Buck) [4]:

$$D = \frac{V_a}{V_{op}} = \frac{1}{V_{op}} \left[ K_e \omega_m + R_a \left( \frac{B_m \omega_m + T_L}{K_e} \right) \right] \quad (3.10)$$

On peut aussi faire le même travail avec un convertisseur (Boost) [4]:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (3.11)$$

$$\frac{1}{1-D} = \frac{V_a}{V_{op}} = \frac{1}{V_{op}} \left[ K_e \cdot \omega_m + R_a \left( \frac{B_m \cdot \omega_m + T_L}{K_e} \right) \right] \quad (3.12)$$

$$D = 1 - \frac{K_e \cdot V_{op}}{K_e^2 \cdot \omega_m + R_a \cdot B_m \cdot \omega_m + T_L R_a} \quad (3.13)$$

Et aussi avec le (Buck-Boost) [4]:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D}{1-D} \quad (3.14)$$

### Chapitre 3 : Commande d'un moteur à courant continu par un module PV via un convertisseur Buck.

$$\frac{D}{1-D} = \frac{V_a}{V_{op}} = \frac{1}{V_{op}} \left[ K_e \cdot \omega_m + R_a \left( \frac{B_m \cdot \omega_m + T_L}{K_e} \right) \right] \quad (3.15)$$

$$D = \frac{R_a \cdot B_m \cdot \omega_m + K_e^2 \omega_m + R_a \cdot T_L}{R_a \cdot B_m \cdot \omega_m + K_e^2 \omega_m + V_{op} \cdot K_e + R_a \cdot T_L} \quad (3.16)$$

#### 3.7. Trouver les valeurs de $I_x$ et $V_x$ avec Simulink :

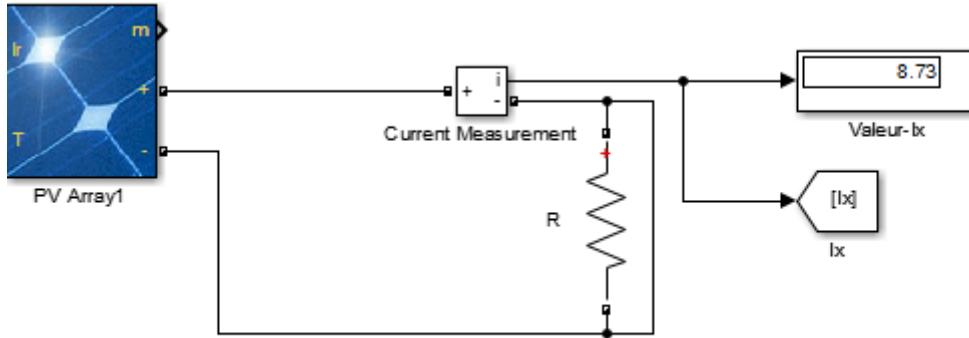


Figure 3.6 : la valeur de  $I_x$ .

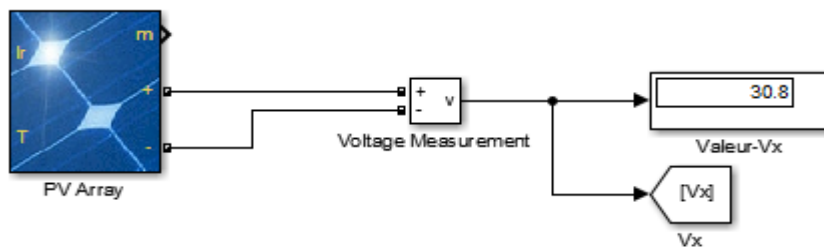


Figure 3.7 : la valeur de  $V_x$ .

Commentaire : la figure 1.6 et de la figure 3.7, nous obtenons  $I_x$  et  $V_x$  qui sont le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert afin que nous puissions continuer à calculer  $I_{ap}$  et  $V_{ap}$  pour obtenir  $P_{max}$ .

#### 3.8. Trouver la valeur de $V_{ap}$ et $I_{ap}$ avec Simulink :

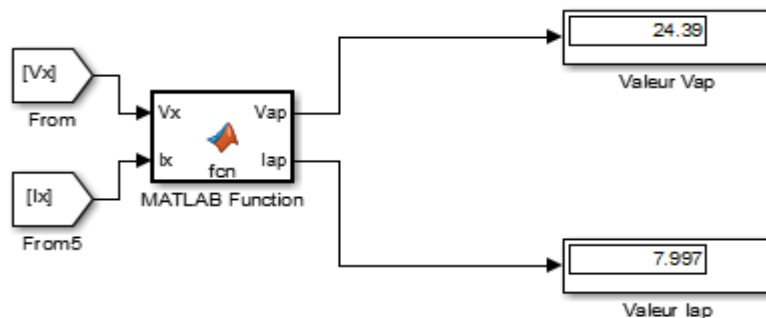


Figure 3.8 : la valeur de  $V_{ap}$  et  $I_{ap}$ .

### Chapitre 3 : Commande d'un moteur à courant continu par un module PV via un convertisseur Buck.

Matlab Fonction :

```

1  function [Vap,Iap] = fcn(Vx,Ix)
2  -  b=0.084;
3  -  Vap=Vx+b*Vx*log(b-b*exp(-1/b));
4  -  Iap=Ix*((1-b+b*exp(-1/b))/(1-exp(-1/b)));
5  -  end

```

#### 3.9. Trouver la valeur de $P_{max}$ avec Simulink :

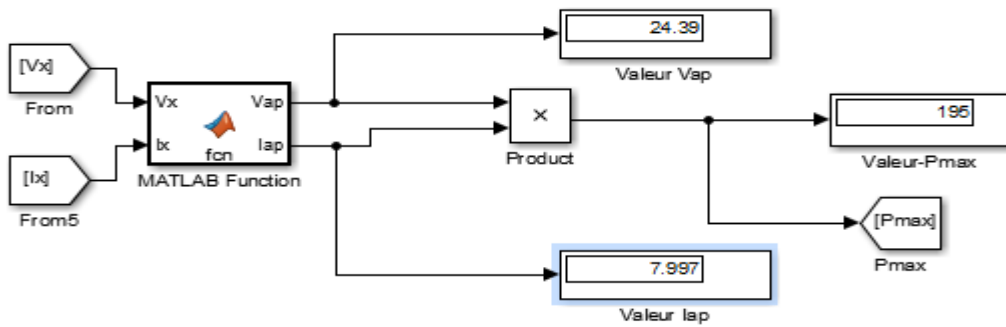


Figure 3.9 : la valeur de  $P_{max}$

Commentaire : la figure 3.9, nous obtenons le  $P_{max}$  en multipliant  $I_{ap}$  et  $V_{ap}$ .

#### 3.10. Trouver la valeur $\omega_m$ avec Simulink :

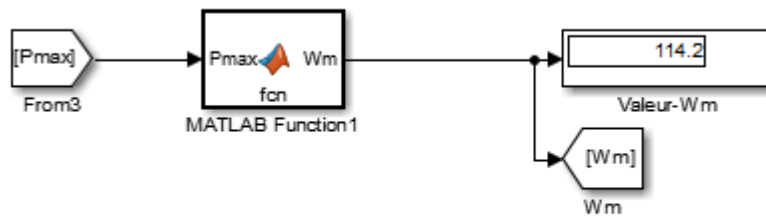


Figure 3.10 : la valeur de  $\omega_m$ .

Commentaire : A partir de la figure .10 on obtient la valeur de vitesse angulaire  $\omega_m$  par la valeur de  $P_{max}$  et on obtient deux valeurs de  $\omega_m$  une valeur positive et une valeur négative, mais il faut prendre la valeur positive.

### Chapitre 3 : Commande d'un moteur à courant continu par un module PV via un convertisseur Buck.

Matlab Fonction1 :

```
1 function Wm = fcn(Pmax)
2 - Bm=94.8e-6; c1=0.00294; c2=0.23; Ra=8.57; Ke=0.1485;
3 - A=Bm+c1+(Bm^2*Ra)/(Ke^2)+(2*Bm*c1*Ra)/(Ke^2)+(c1^2*Ra)/(Ke^2);
4 - B=c2+(2*Bm*c2*Ra)/(Ke^2)+(2*c1*c2*Ra)/(Ke^2);
5 - C=abs(Pmax)-(c2^2*Ra)/(Ke^2);
6 - Delta=(B^2)+(4*A*C);
7 - Wm=-B+sqrt(Delta)/(2*A);
8 end
```

3.11. Trouver la valeur de  $D$  avec Simulink :

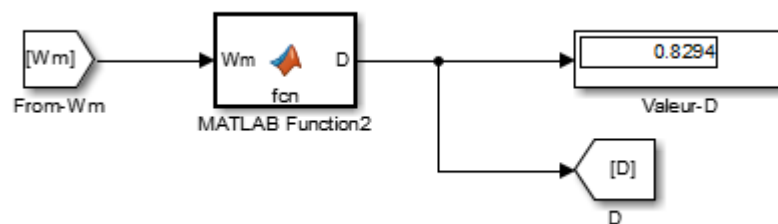


Figure 3.11 : la valeur de  $D$ .

Commentaire : la figure 3.11 nous avons obtenu la valeur du rapport cyclique via le calcul de la vitesse angulaire  $\omega_m$ .

Matlab Fonction2 :

```
1 function D = fcn(Wm)
2 - Vop=30.8; Ke=0.1485; Ra=8.57; TL=0.138; Bm=94.8e-6;
3 - D=(1/Vop)*[(Ke*Wm)+Ra*((Bm*Wm)+TL)/Ke];
4 end
```

## Chapitre 3 : Commande d'un moteur à courant continu par un module PV via un convertisseur Buck.

### 3.12. L'identification de PV array (I-V et P-V) avec Simulink :

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé 'effet photovoltaïque', a été découverte par Becquerel en 1839. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs [13].

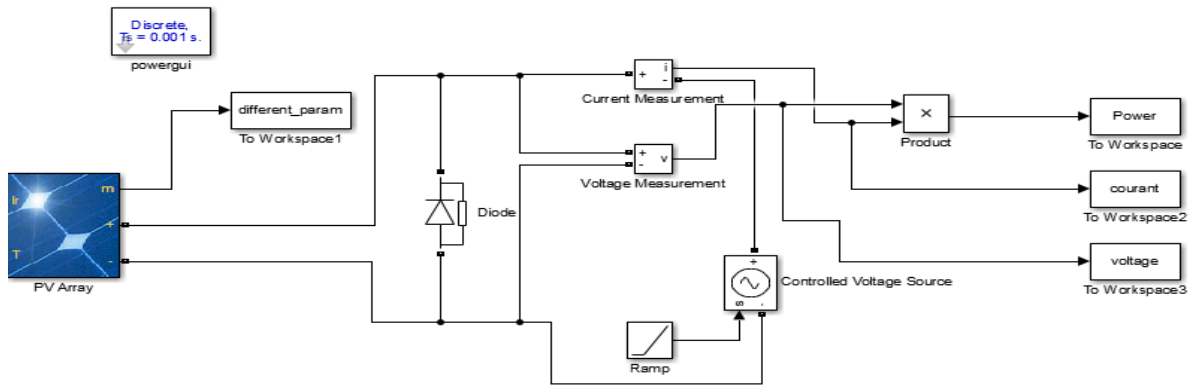


Figure 3.12 : schéma Simulink pour trouver les courbes de (I-V et P-V).

#### 3.12.1. Caractéristiques électriques d'une cellule PV :

En utilisant l'équation implicite du courant délivré par la cellule photovoltaïque, on peut tracer ses caractéristiques courant-tension  $I(V)$  et puissance-tension  $P(V)$ .

Les caractéristiques courant-tension  $I(V)$  et puissance-tension  $P(V)$  sont représentées sur la figure suivante [13]:

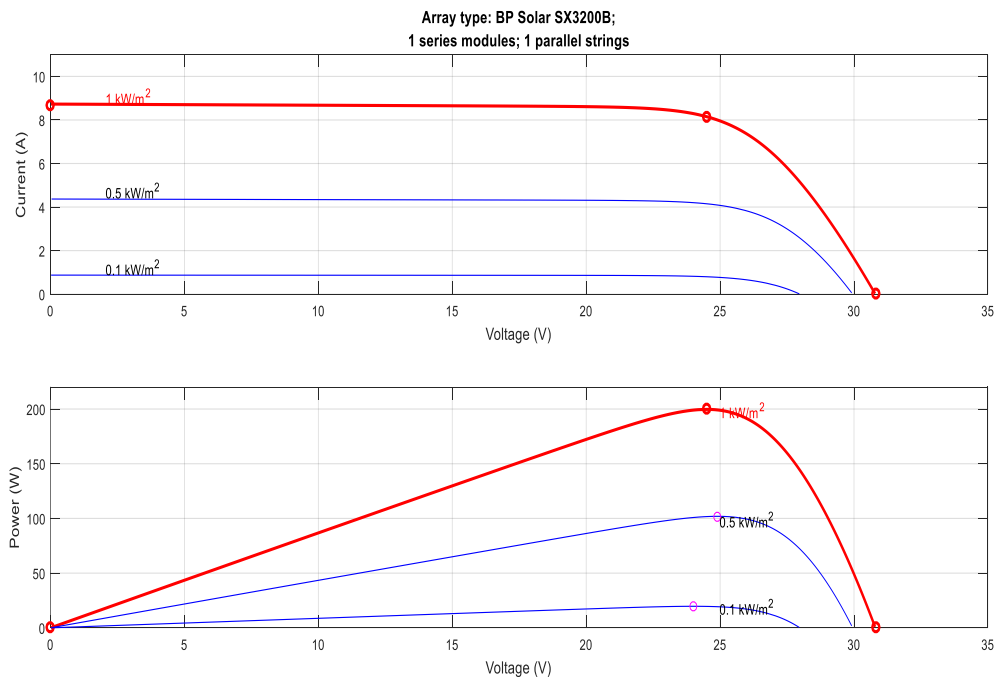


Figure 3.13 : Caractéristique de (I-V et P-V) de PV.

### Chapitre 3 : Commande d'un moteur à courant continu par un module PV via un convertisseur Buck.

La puissance débitée par la cellule dépend du point de fonctionnement de cette dernière, c'est le produit de l'intensité du courant débité et la tension entre ses bornes.

#### 3.13. Interface DC/DC :

La figure 3.14 montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge [14]:

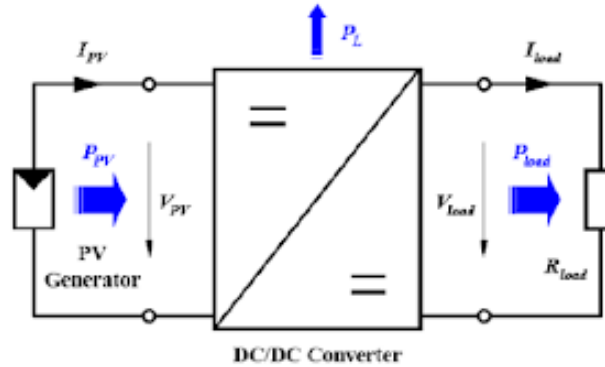


Figure 3.14 : Interface DC/DC.

Le rôle du convertisseur DC/DC (dans le cadre du PV) est de faire l'adaptation entre la source (GPV) et la charge pour un transfert de puissance maximal. Ceci est fait en maintenant le point de fonctionnement sur ou assez proche du MPP pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc.).

Contrairement au cas général où le convertisseur DC/DC est utilisé pour réguler la tension de sortie, ici c'est plutôt la tension d'entrée qui est régulée. La tension de référence (consigne) est alors constante ou imposée par un algorithme de commande.

##### 3.13.1. Composition du convertisseur :

- Le transistor MOSFET [8]:

Le MOSFET de faible puissance (Métal Oxyde Semi-conducator Field Effet Transistor). La figure (3.15.a) donne la représentation symbolique usuelle. La connexion partant de la borne reliée au substrat (Buck) B se termine par une flèche indiquant le sens passant des deux jonctions substrat - source et substrat - drain.

D'ordinaire le substrat et la source sont reliés. La figure (15.b) indique les notations utilisées.

Dans un semi-conducteur dopé de type P (figure 16), on a diffusé deux zones de type N sur les quelles sont soudés les deux contacts de source S et de drain D. Une couche d'oxyde recouvre la zone P située entre la source et le drain; sur cette couche est soudé le contact de grille (gâte) G. C'est la succession Métal-Oxyde-Semi-conducators qui donne le préfixe MOS utilisé pour caractériser ce type de transistor.

### Chapitre 3 : Commande d'un moteur à courant continu par un module PV via un convertisseur Buck.

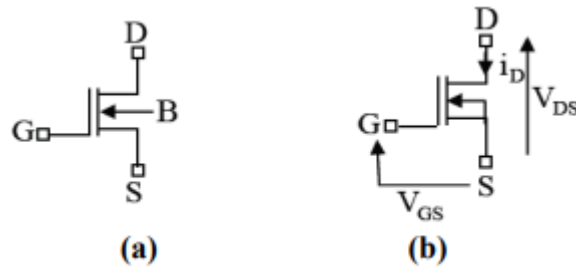


Figure 3.15 : Représentation symbolique et notation pour le MOSFET à canal N.

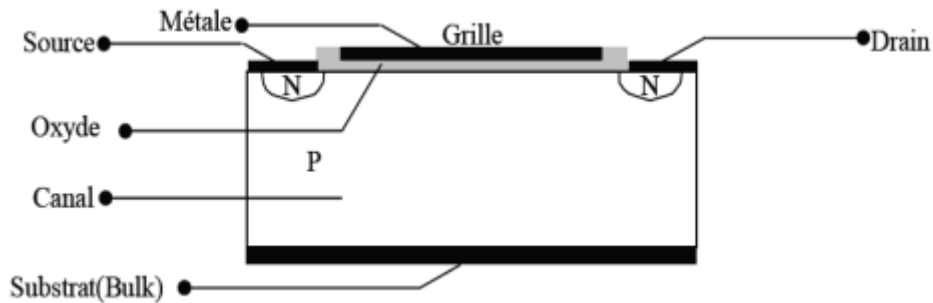


Figure 3.16 : Structure d'une cellule de MOSFET de faible puissance.

L'utilisation du transistor MOSFET offre plusieurs avantages :

- Le bruit intrinsèque est toujours très faible.
- Ce type de transistor est simple à fabriquer et par la suite peu coûteux.
- La densité d'intégration autorisée par ce type de composant est très importante : on dépasse aujourd'hui le nombre de  $10^7$  transistors sur une seule puce.

#### 3.13.2. C'est quoi le signal PWM ?

➤ **Définition :**

Un signal MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions) ou PWM en anglais (Pulse Width Modulation) est un signal dont le rapport cyclique varie. Ce type du signal est souvent utilisé dans les applications à valeur moyenne variable (Ex : Commande des moteurs, alimentation réglable...).

➤ **Applications :**

- ✓ Variateurs de vitesse des moteurs.
- ✓ Convertisseurs: AC/DC, DC/AC, DC/DC, AC/AC.
- ✓ Générateur des signaux.
- ✓ Modulateurs.
- ✓ La conversion numérique-analogique.

### Chapitre 3 : Commande d'un moteur à courant continu par un module PV via un convertisseur Buck.

✓ Les amplificateurs de classe D.

✓ Contrôle de puissance.

➤ **Fonctionnement :**

Le signal PWM (MLI, Modulation de largeur d'impulsion) est un signal de fréquence constante et de rapport cyclique variable. Il est mis en œuvre dans des fonctions telles que : La synthèse vocale ou associée à un filtre passe bas permet la synthèse de signaux audio. La commande en vitesse d'un moteur à courant continu, ou ce dernier fait naturellement office de filtre passe bas. La commande en position d'un servomoteur. La génération de signaux aléatoires ou périodiques, pour un onduleur par exemple. Courbe PWM dont la valeur moyenne est une courbe sinusoïdale. La valeur moyenne est récupérée simplement par un filtre passe bas.

#### 3.13.3. Définition du rapport cyclique :

En électronique, le rapport cyclique désigne, pour un phénomène périodique à deux états, le rapport entre la durée de l'état actif et la période.

$$\alpha = \frac{\tau}{T}$$

Où :

$\alpha$ : Est le rapport cyclique (sans dimension) ;

$\tau$ : Est le temps pendant lequel le signal est à l'état actif sur une période ;

$T$ : Est la période du signal.

Ce rapport varie de 0 à 1, ( 0 % à 100 % en pourcentage). La valeur moyenne — tension ou intensité — dans le circuit est la valeur à l'état haut multipliée par le rapport cyclique.

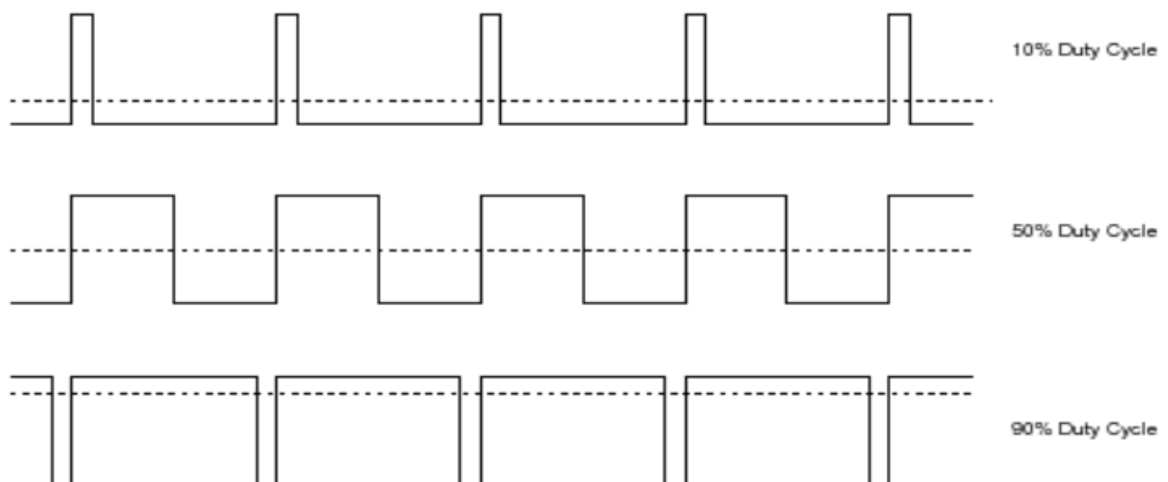


Figure 3.17 : rapport cyclique.

## Chapitre 3 : Commande d'un moteur à courant continu par un module PV via un convertisseur Buck.

### 3.14. L'identification d'une machine DC :

❖ L'équation électrique :

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_e \omega_m \quad (3.17)$$

❖ L'équation mécanique :

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m + T_L \quad (3.18)$$

Dans l'équations ci-dessus  $R_a, L_a, K_e, V_a$  et  $i_a$  sont respectivement la résistance d'induit, l'inductance d'induit, la constante de force contre-électromotrice, la tension d'induit et le courant,  $i, B_m$  et  $T_L$  sont le moment d'inertie du moteur et de la charge commentée.

La caractéristique couple de charge-vitesse est donne par  $T_L = c_1 \omega_m + c_2$ , ou  $c_1$  et  $c_2$  sont des constantes dont les valeurs dépendent de la position de l'aiment de freinage.

**Matlab Fonction :**

```

1  function Va = fcn(TL)
2  -  Bm=94.8e-6; Ra=8.57 ; Ke=0.1485; Wm=114.2;
3  -  Ia=(Bm*Wm+TL) / (Ke) ;
4  -  Va=(Ra*Ia) + (Ke*Wm) ;
5  -  end

```

**Matlab Fonction1 :**

```

1  function TL1 = fcn(Wm)
2  -  c1=0.03500; c2=0.23;
3  -  TL1=c1*Wm+c2;
4  -  end

```

**Matlab Fonction3 :**

```

1  function TL3 = fcn(Wm)
2  -  c1=0.04900; c2=0.24;
3  -  TL3=c1*Wm+c2;
4  -  end

```

**Matlab Fonction4 :**

```

1  function Wm = fcn(Pmax)
2  -  Bm=94.8e-6; c1=0.00294; c2=0.23; Ra=8.57; Ke=0.1485;
3  -  A=Bm+c1+(Bm^2*Ra) / (Ke^2) + (2*Bm*c1*Ra) / (Ke^2) + (c1^2*Ra) / (Ke^2) ;
4  -  B=c2+(2*Bm*c2*Ra) / (Ke^2) + (2*c1*c2*Ra) / (Ke^2) ;
5  -  C=abs(Pmax) - (c2^2*Ra) / (Ke^2) ;
6  -  Delta=(B^2) + (4*A*C) ;
7  -  Wm=-B+sqrt(Delta) / (2*A) ;
8  -  end

```

### Chapitre 3 : Commande d'un moteur à courant continu par un module PV via un convertisseur Buck.

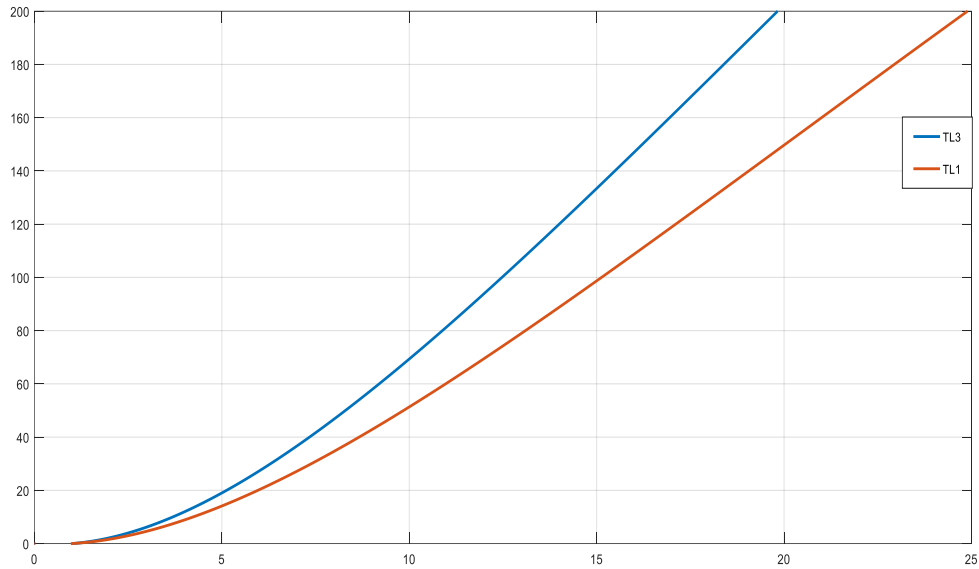


Figure 3.18 : Courbes de puissance moteur DC avec différents couples de vitesse.

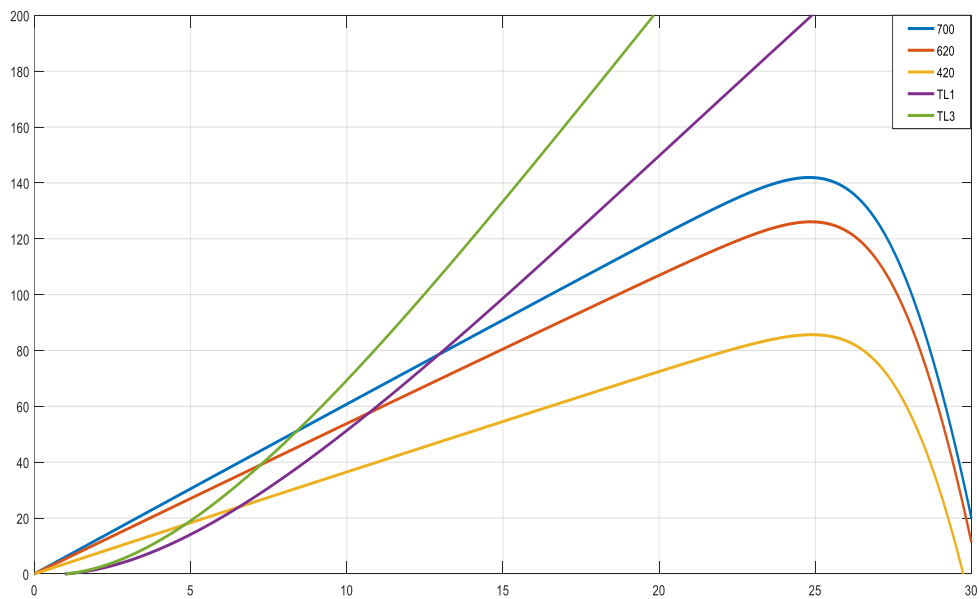


Figure 3.19 : Courbes de puissance moteur DC et PVM.

Pour différentes caractéristiques couple-vitesse, moteur à courant continu DC ; P –V les courbes sont superposées à un ensemble des courbes de PVM (P–V) ; Cela montre pour que le moteur à courant continu fonctionne à MPP avec  $T_L = 0.03500\omega_m + 0.23$  et  $T_L = 0.04900\omega_m + 0.24$  la tension du moteur doit être inférieure à la tension PVM au MPP, donc un convertisseur de puissance abaisseur, tel qu'un convertisseur Buck peut être utilisé.

## Chapitre 3 : Commande d'un moteur à courant continu par un module PV via un convertisseur Buck.

### 3.15. La poursuite de $P_{max}$ avec LRCM :

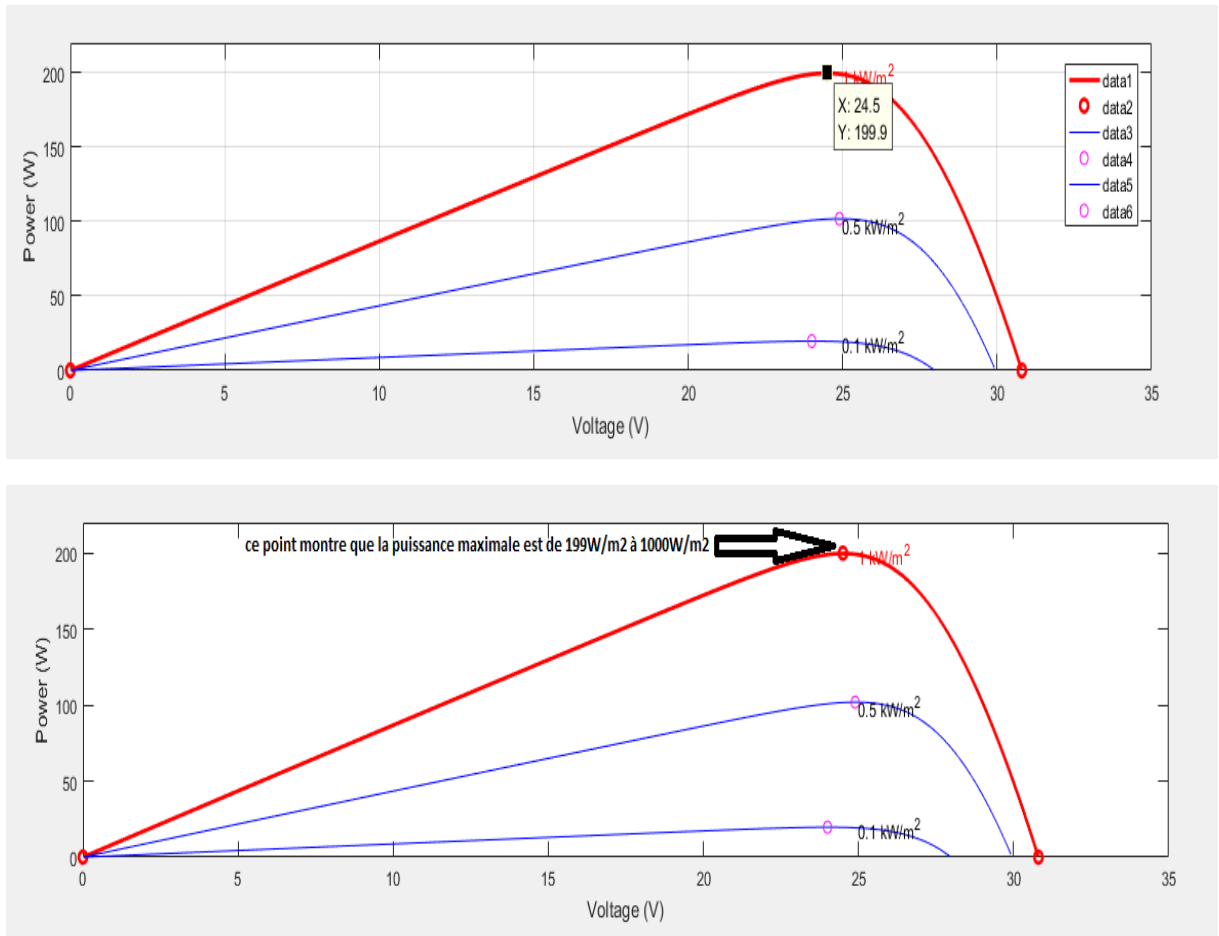


Figure 3.20 : la puissance maximale.

Commentaire : ce point montre que la puissance maximale est de 199W/m<sup>2</sup> à 1000W/m<sup>2</sup>.

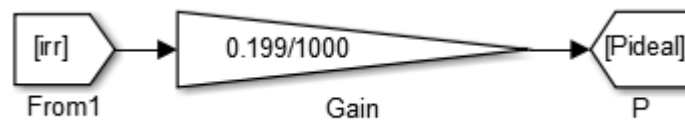


Figure 3.21 : pour comparer la puissance maximale idéale et la puissance approximée par LRCM.

## Chapitre 3 : Commande d'un moteur à courant continu par un module PV via un convertisseur Buck.

Signal1 :

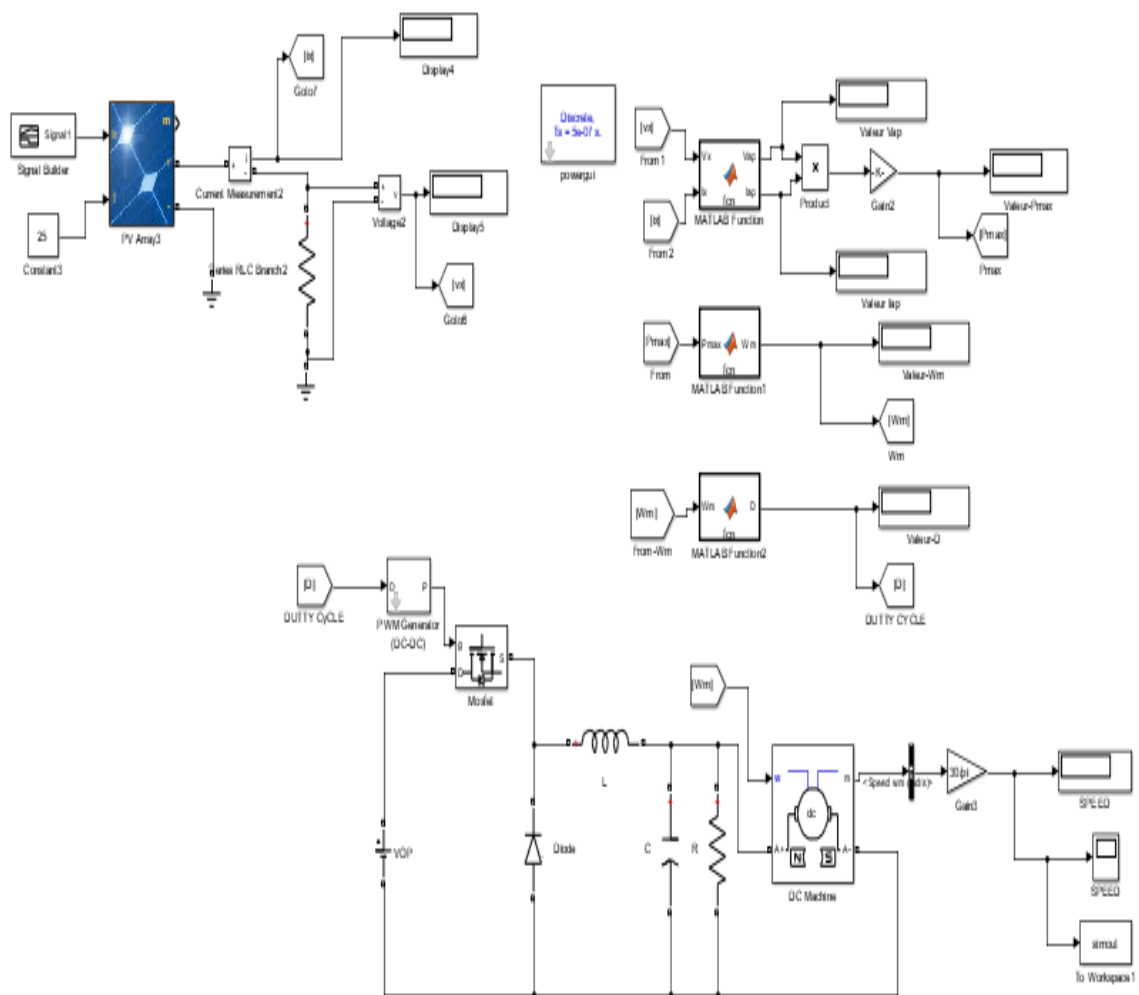
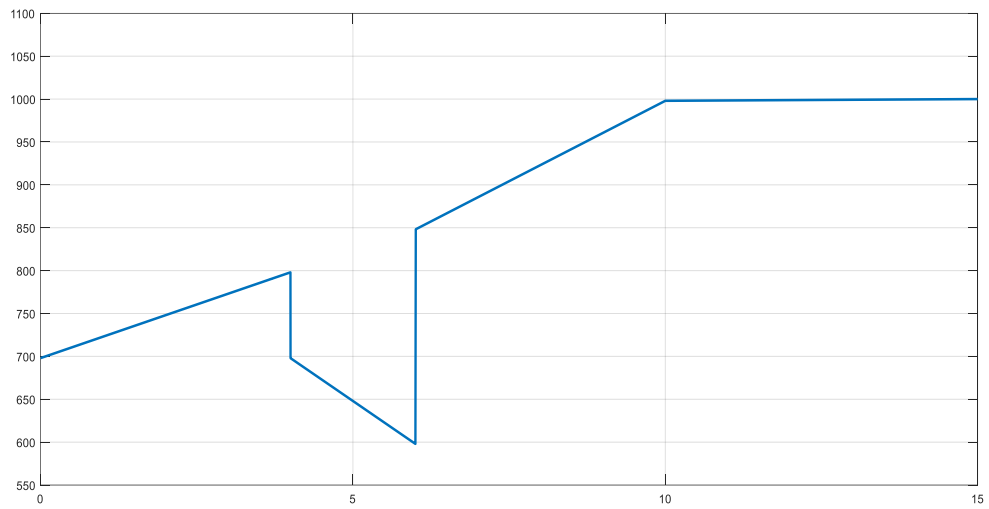


Figure 3.22 : Simulink de LRCM.

### Chapitre 3 : Commande d'un moteur à courant continu par un module PV via un convertisseur Buck.

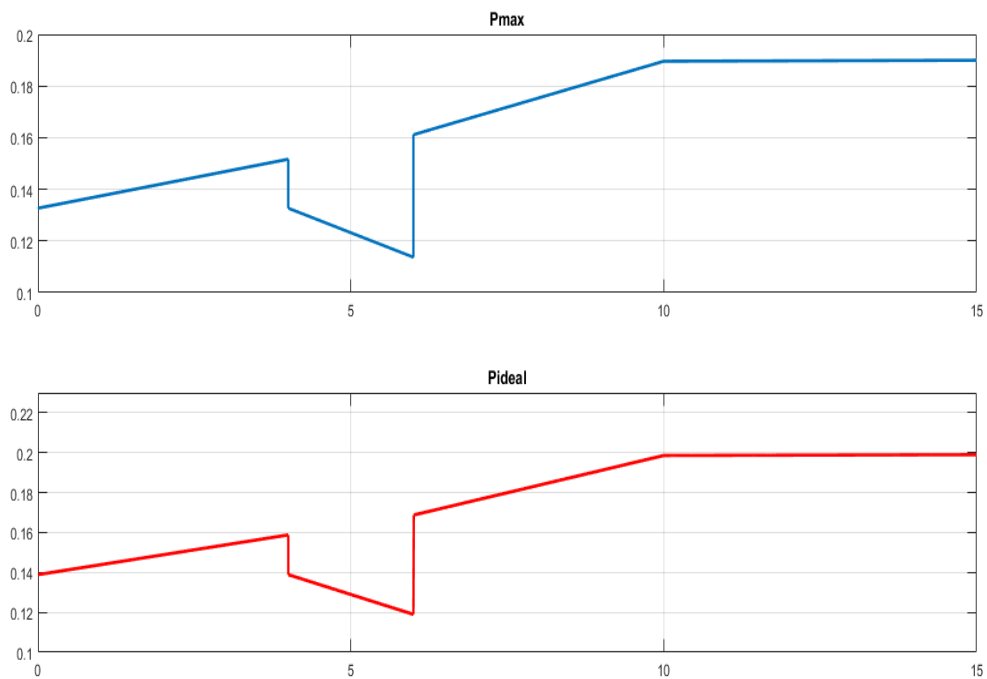
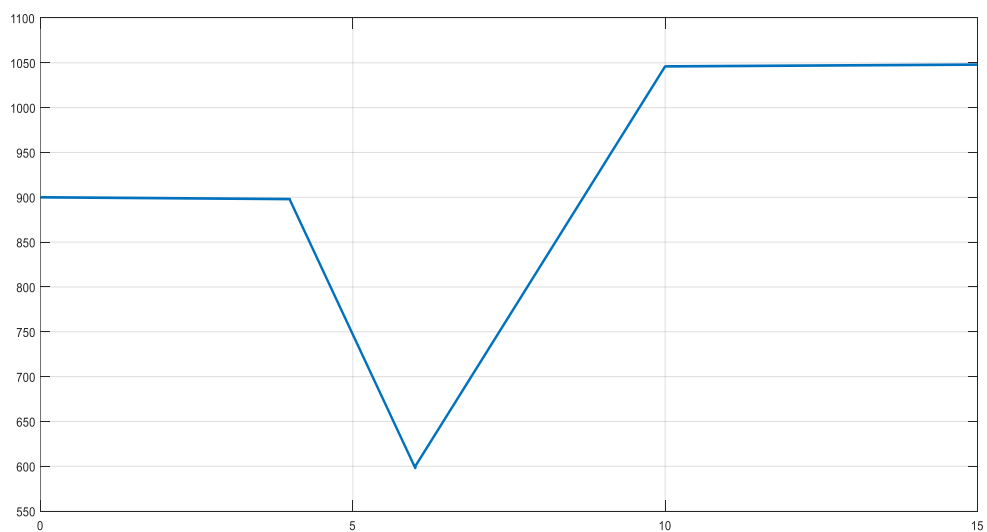


Figure 3.23 :  $P_{max}$  idéal et  $P_{max}$  app.

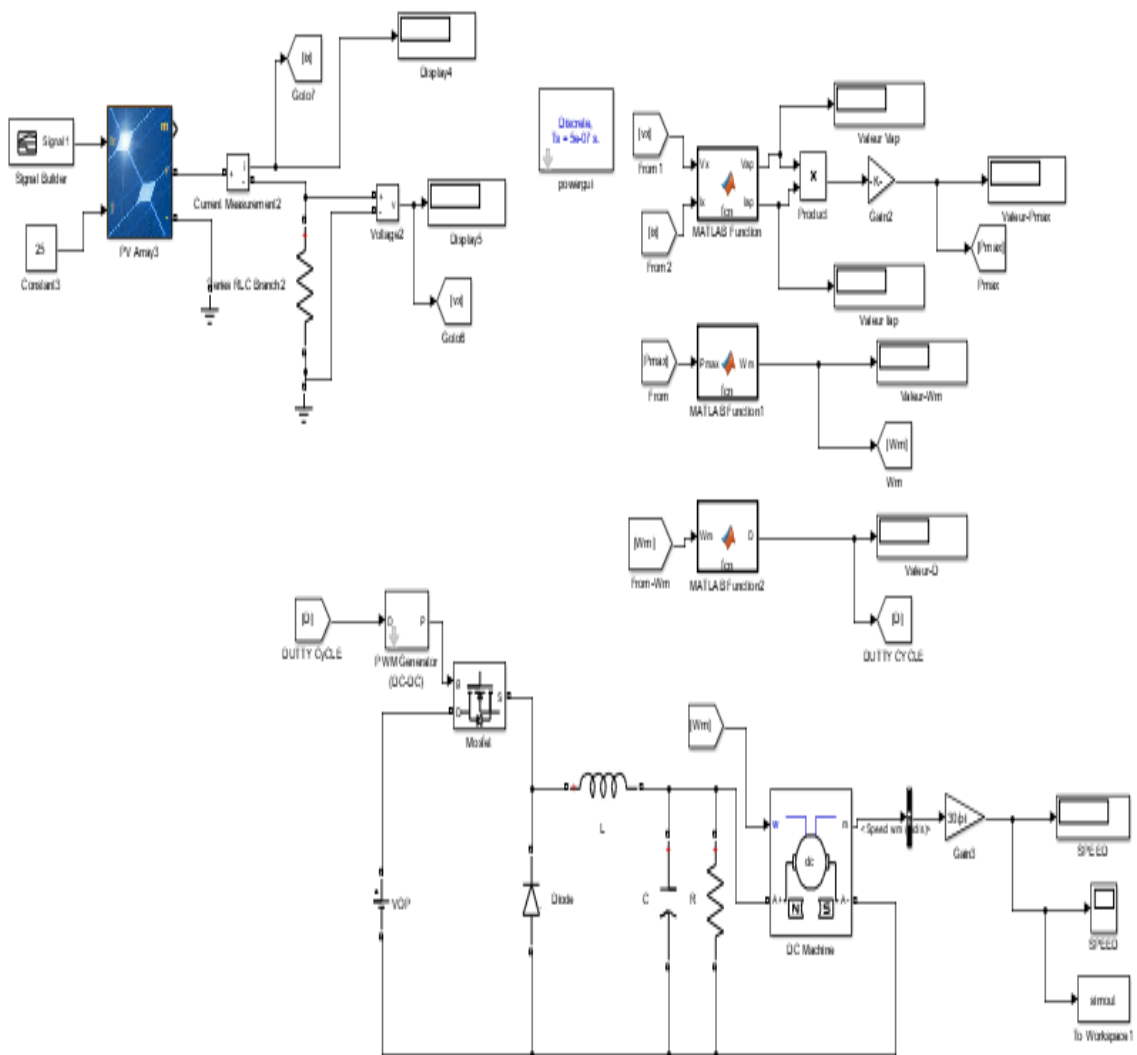
La figure 3.23 on remarque que la poursuite de  $P_{max}$  par la méthode de LRCM est réussie par rapport à la valeur  $P_{max}$  idéale.

#### 3.16. La poursuite de $P_{max}$ avec LRCM avec autre signal :

Signal 2 :



**Chapitre 3 : Commande d'un moteur à courant continu par un module PV via un convertisseur Buck.**



**Figure 3.24 : Simulink de LRCM avec autre signal.**

### Chapitre 3 : Commande d'un moteur à courant continu par un module PV via un convertisseur Buck.

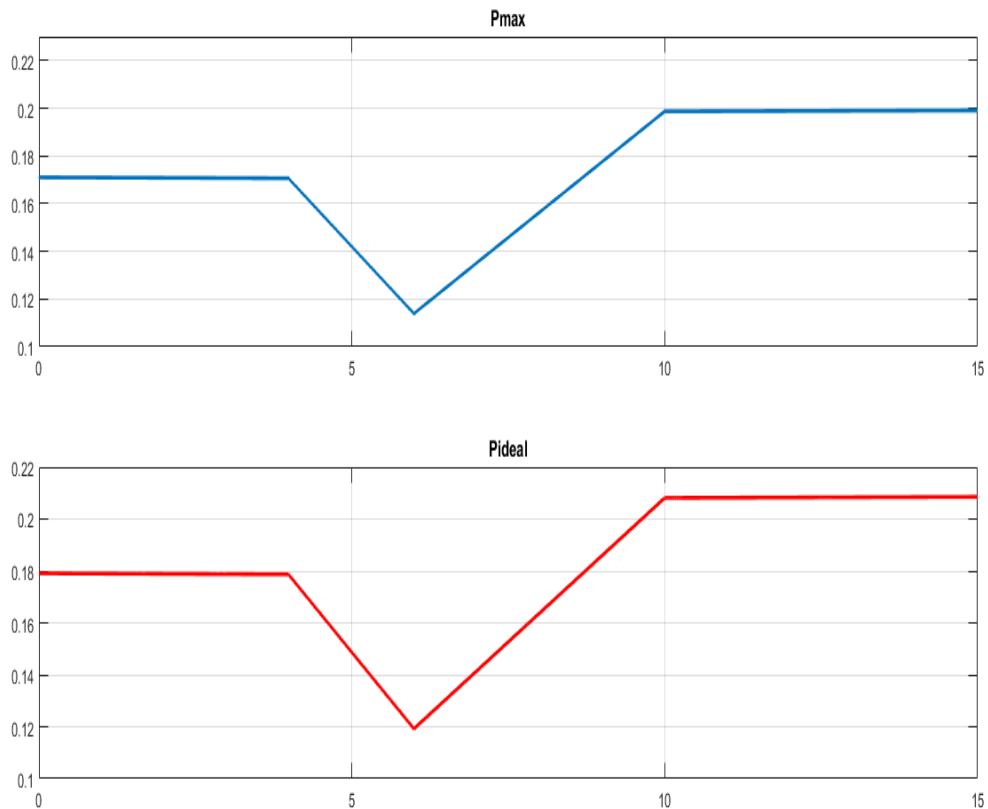


Figure 3.25 :  $P_{max}$  idéal et  $P_{max}$  approximée avec autre signal.

Commentaire : A partir de la figure 3.25 même si l'on change la forme du signal, les résultats restent de bons résultats.

#### 3.17. Calcul de rendement de LRCM :

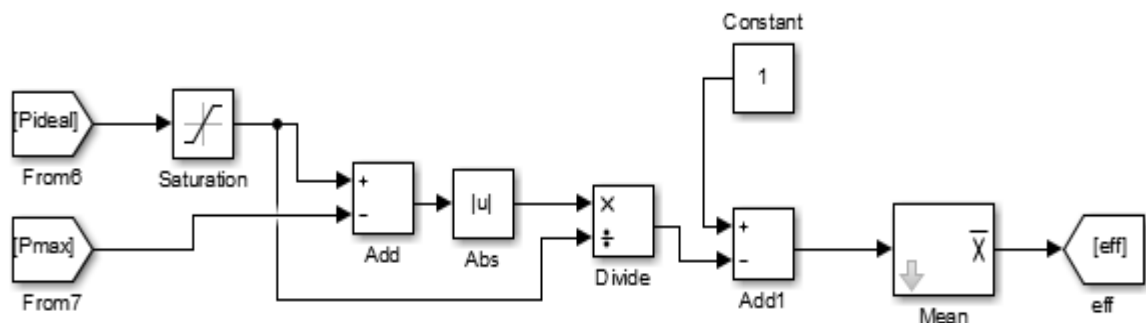


Figure 3.26 : circuit pour calculer rendement.

### Chapitre 3 : Commande d'un moteur à courant continu par un module PV via un convertisseur Buck.

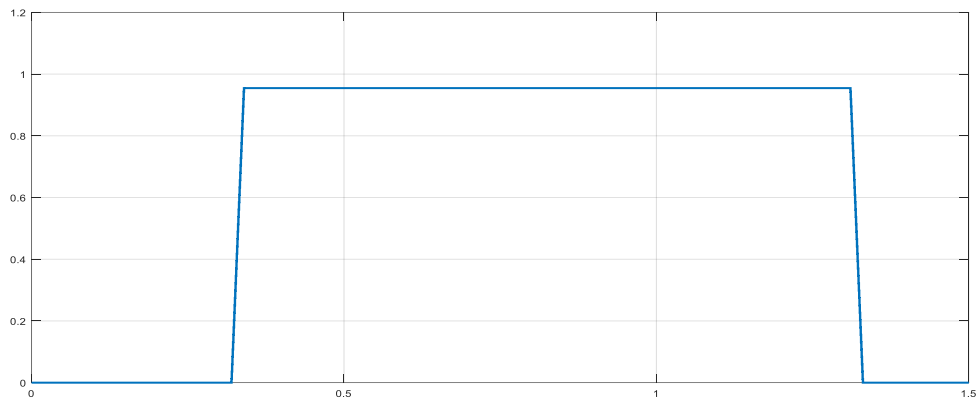


Figure 3.27 : le rendement de LRCM.

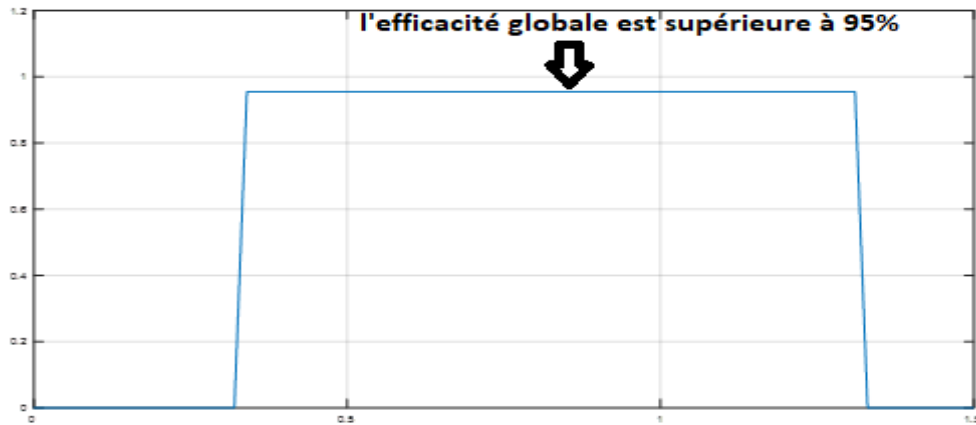
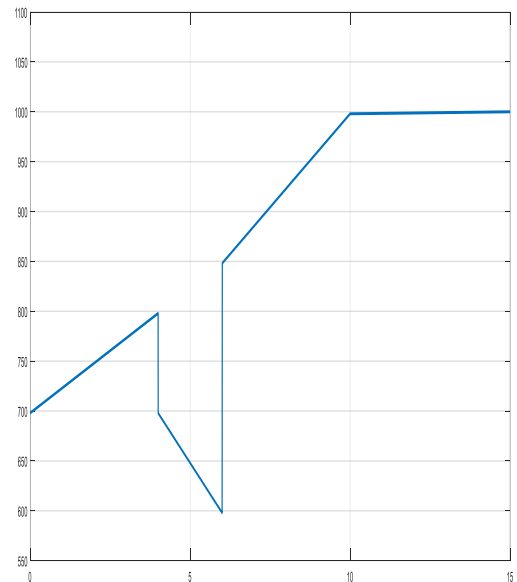
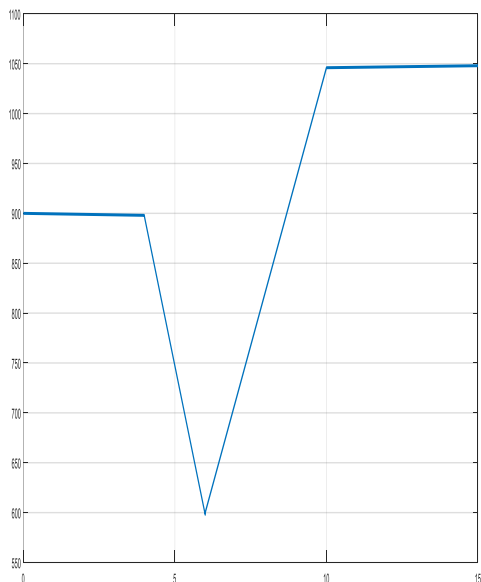


Figure 3.28 : l'efficacité globale.

Nous constatons que l'efficacité de la méthode LRCM se situe entre 95% et 95,5%, ce qui est un bon pourcentage et nous confirme que c'est une méthode efficace pour atteindre le MPP quel que soit le changement des radiations.

**Pour deux Signaux :**



### Chapitre 3 : Commande d'un moteur à courant continu par un module PV via un convertisseur Buck.

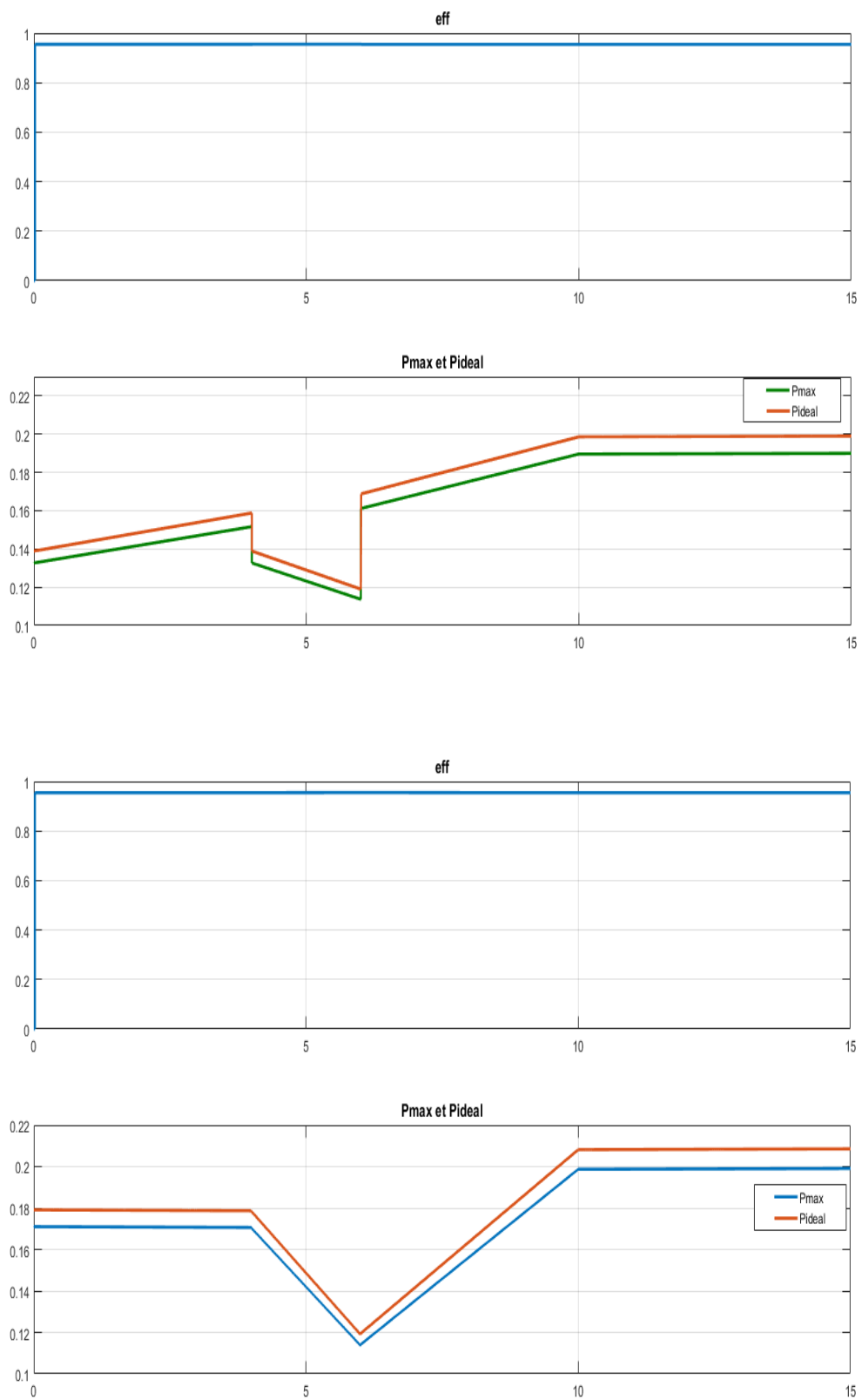


Figure 3.29 : l'efficacité de LRCM avec différents signaux.

## Chapitre 3 : Commande d'un moteur à courant continu par un module PV via un convertisseur Buck.

Commentaire : A partir de la figure 3.29 avec le changement des deux valeurs différentes du signal, la valeur d'efficacité reste supérieure à 95%.

### 3.18. La commande du moteur avec Buck :

Signal 1 :

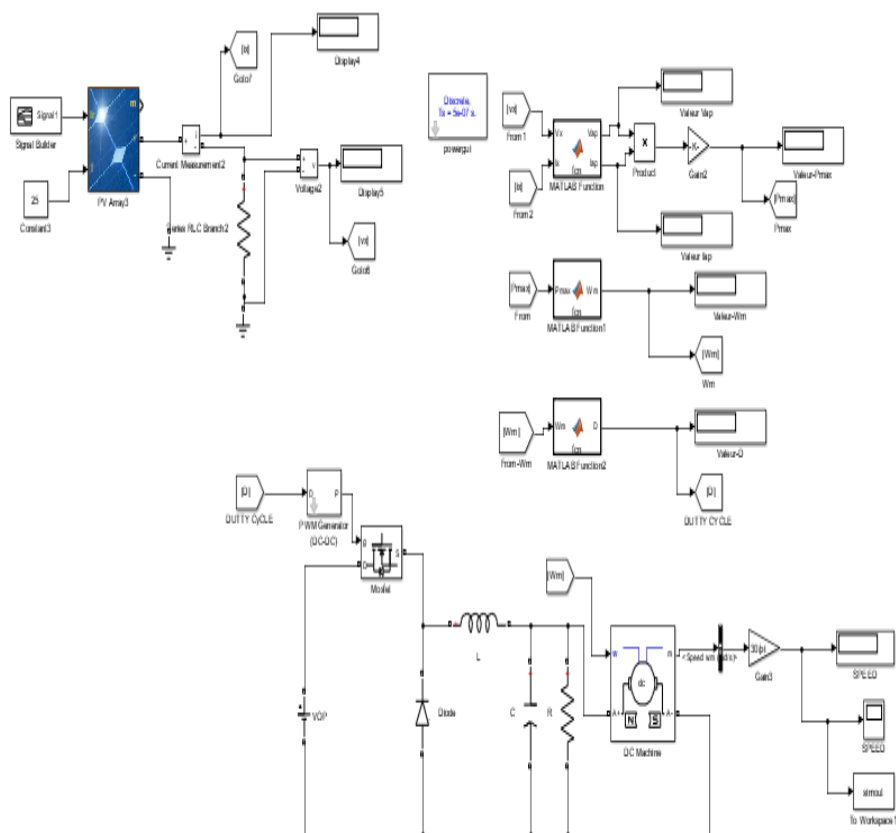
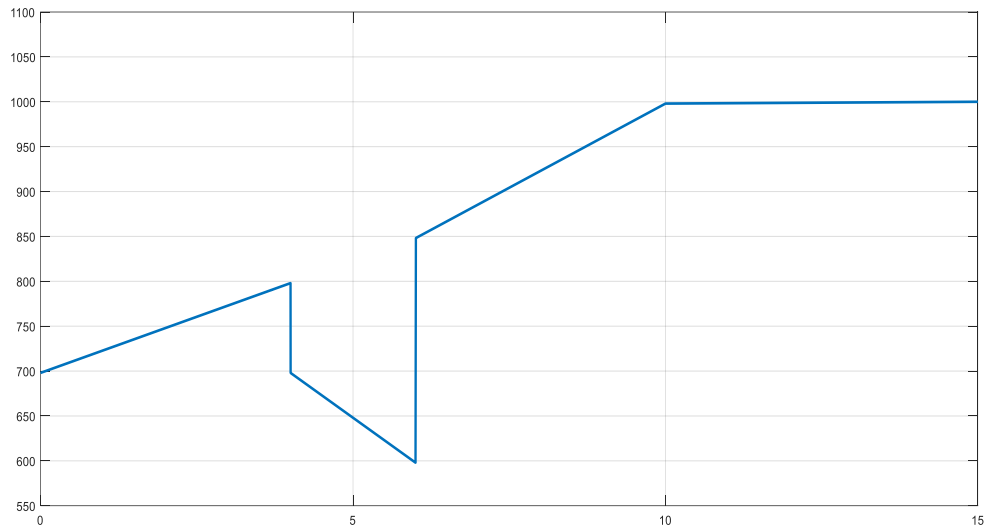
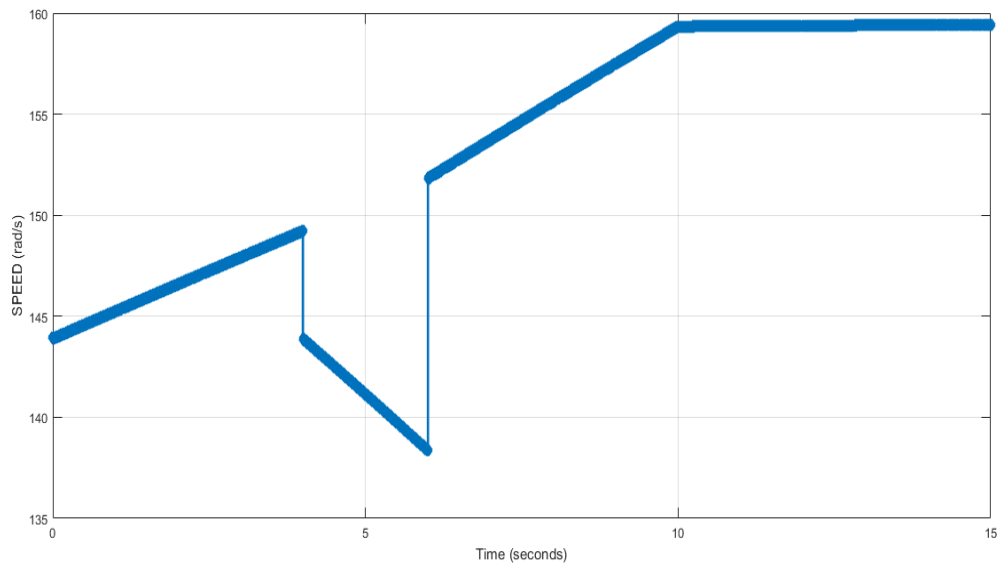


Figure 3.30 : commande DC-DC par convertisseur BUCK.

### Chapitre 3 : Commande d'un moteur à courant continu par un module PV via un convertisseur Buck.

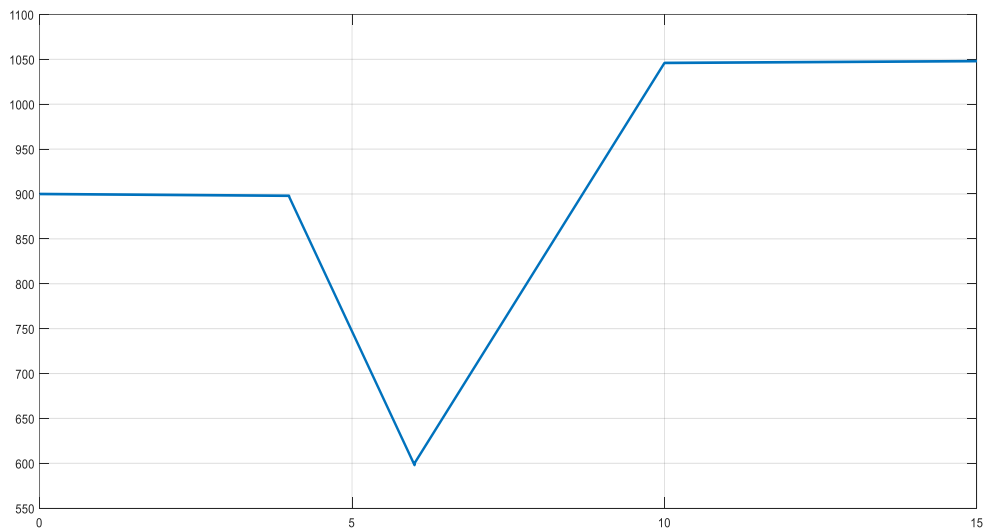
---



**Figure 3.31 : la vitesse de moteur DC.**

Commentaire : A partir des figure 3.30 et figure 3.31 après une série de calculs nous avons commandé le moteur par convertisseur Buck et nous avons gardé la vitesse optimale malgré le changement des radiations.

**Signal 2 :**



## Chapitre 3 : Commande d'un moteur à courant continu par un module PV via un convertisseur Buck.

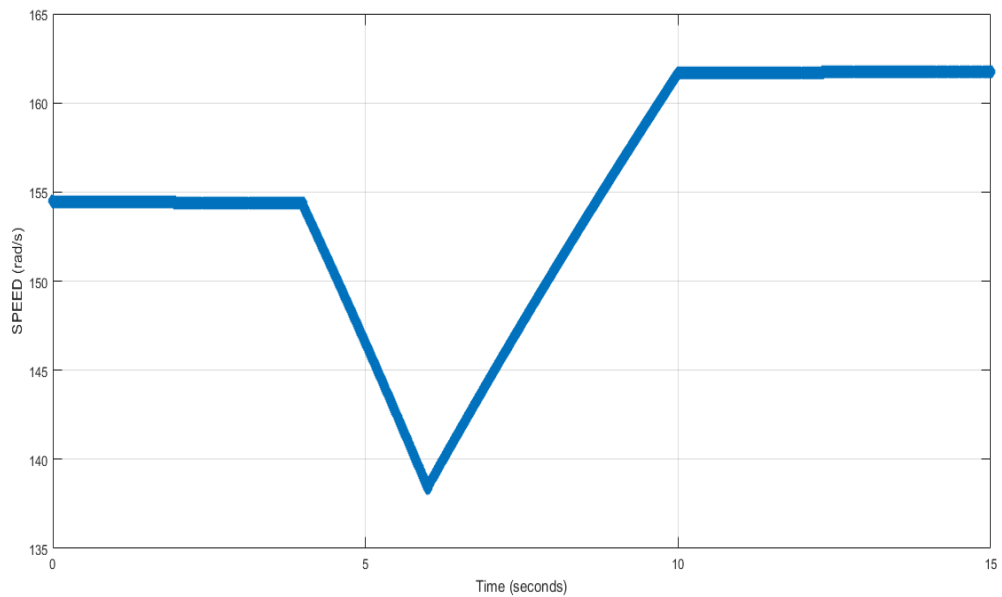


Figure 3.32 : la vitesse de moteur DC.

### 3.19. Fonctionnement à une vitesse constante $\omega_0$ :

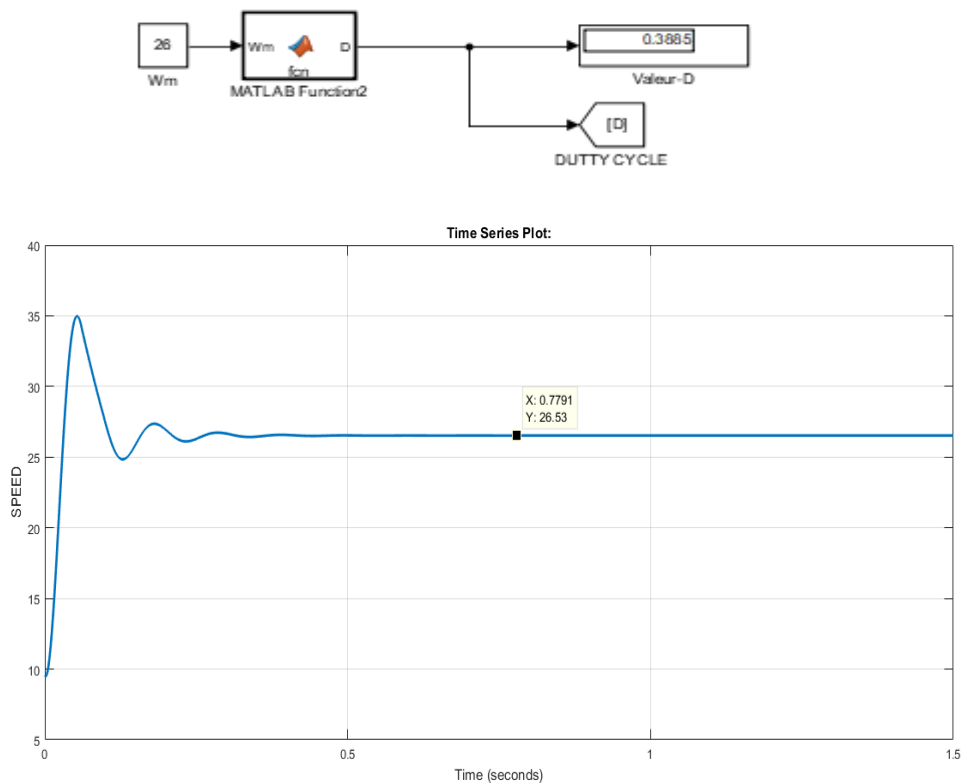


Figure 3.33: la vitesse de moteur avec  $\omega_0$ .

L'objectif du fonctionnement à une vitesse constante est d'imposer au moteur de tourner à une vitesse faible de référence  $\omega_0$ . Ceci est possible au détriment de rendement du système.

## Chapitre 3 : Commande d'un moteur à courant continu par un module PV via un convertisseur Buck.

### 3.20. Fonctionnement à une vitesse angulaire constante de référence ( $\omega_0$ ) :

Signal 1 :

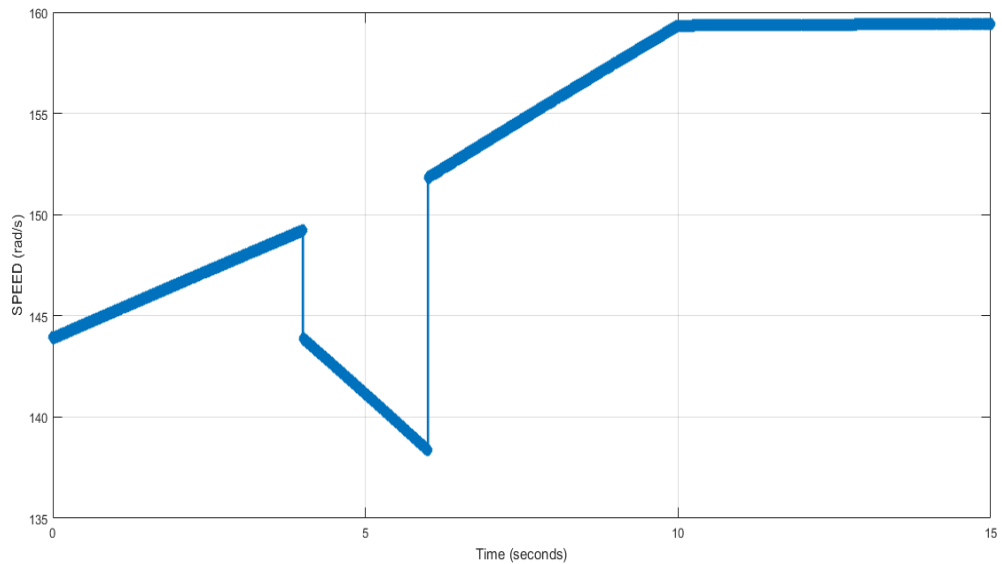


Figure 3.34 : vitesse du moteur.

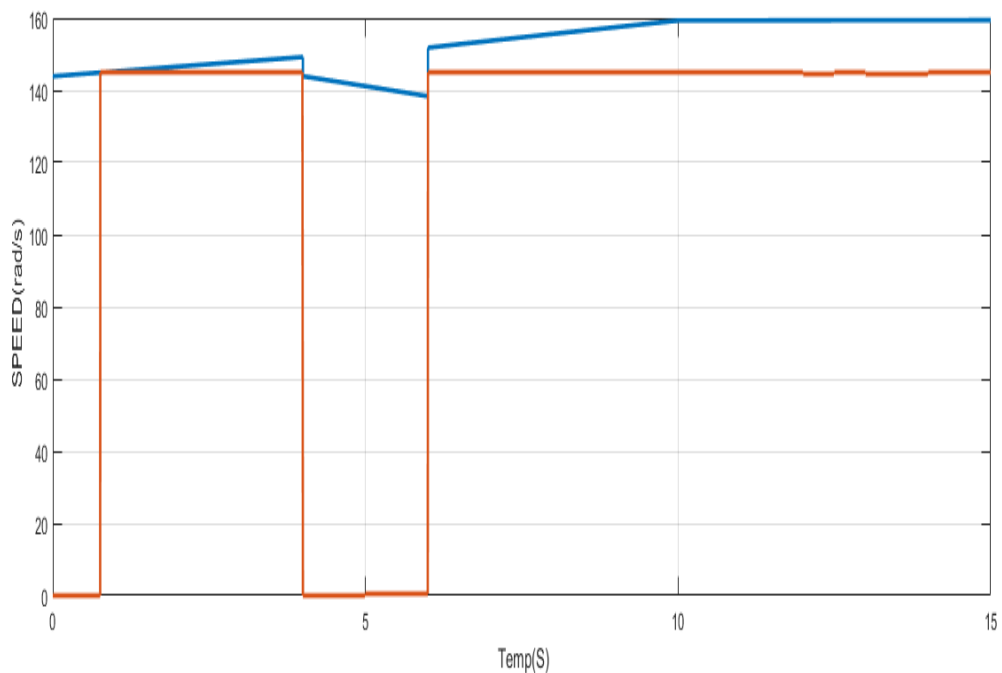


Figure 3.35 : la vitesse de moteur avec  $\omega_0$  constant de référence.

Lorsqu'on impose au système une vitesse constante  $\omega_0$  de référence, par exemple (145rad/s), nous observons que le système peut fonctionner à cette vitesse à condition de ne dépasse pas la vitesse maximale correspond à la puissance max.

### ***Chapitre 3 : Commande d'un moteur à courant continu par un module PV via un convertisseur Buck.***

---

#### ***3.21. Conclusion :***

Dans ce chapitre montré qu'il est possible de suivre la Puissance maximum avec la méthode de LRCM à différents niveaux d'éclairement à l'aide d'un convertisseur abaisseur (BUCK), seule la mesure de la vitesse est requise. En outre, on a montré les conditions nécessaires pour l'accouplement de module PV à un moteur à courant continu en appliquant un convertisseur abaisseur. En utilisant le modèle mathématique du PVM et du moteur à courant continu, une loi de commande relative au rapport cyclique du convertisseur abaisseur pourrait être dérivée pour un type particulier de charge. La loi de commande est facilement applicable.

***Conclusion générale :***

### *Conclusion générale :*

Dans notre travail, nous avons découvert le monde des convertisseurs DC/DC à commutations. Après présentation du fonctionnement et des techniques de modélisation de ces circuits, nous avons appliqué la commande en boucle ouverte et le retour d'état avec action intégrale PI sur les convertisseurs de type « Buck, Boost, Buck-Boost ». La simulation nous a permis de faire des tests de robustesse sur les différents systèmes dédiés à la commande par placement de pôle. Les résultats de la simulation ont démontré la robustesse de la commande devant les perturbations qu'a subies le système. Nous avons aussi pu faire une étude générale sur le principe de fonctionnement de la machine à courant continu et son association à un convertisseur DC/DC. Où une étude de la stabilité du système obtenu est décrite par diagramme de Bode. Nous avons appliqué une commande par régulateur PI afin d'améliorer les performances du système, le Diagramme de Bode a été encore utilisé pour présenter les performances du système compensé. Enfin, nous nous sommes arrivés à l'objectif essentiel qui consiste à commander le moteur à courant continu alimenté par un module photovoltaïque via un convertisseur Buck. Cela nous a plongé dans le domaine des énergies renouvelables et ses techniques toutes à fait nouvelles pour nous. Nous avons commencé par étudier les sources photovoltaïques et connaître leurs modèles électriques à utiliser puis comment poursuivre le point de puissance maximale. Nous nous sommes contentés de méthode d'approximation pour la détermination de ce dernier point appelée LRCM dont le rendement est acceptable pour les applications usuelles. Cette méthode permet d'assurer un transfert de puissance maximal en contrôlant le rapport cyclique du convertisseur abaisseur DC-DC

Nous avons fait une étude et simulation de la méthode LRCM pour les systèmes PV et son application pour commander un moteur à courant continu via un convertisseur Buck et sous des radiations et des conditions de température variables. Les résultats de simulation sous Matlab sont présentés et s'avèrent très bons. Ce travail nous a été très bénéfique du point de vue électronique de puissance et énergies renouvelables.

# Bibliographies

## Bibliographies

- [1] A maximum power point tracker using positive feedforward control based on the DC motor dynamics and PVM mathematical model . (n.d.). In u. o. mayaguez.
- [2] abderrauf, h. a. (2017). implémentation et test en temps réel d'un bloc régulateur RST sur le procédé industriel de régulation CE177. In u. l. m'hidi. oum el bouaghi.
- [3] ahmed, M., Ismail, R. R., & Ramli, M. (n.d.). control strategy of buck converter driven DC motor a comparative assessment. In u. m. phang.
- [4] analyzing the optimal matching of DC motors to photovoltaic modules via DC-DC converters . (n.d.). In u. o. magaguez.
- [5] boukerche, g. (2017). etude et synthese d'un controleur PI et application . In u. b. mokhtar. annaba.
- [6] eddine, k. h. (2019). analyse et commande des convertisseurs DC-DC méthodes de l'espace d'état. In u. l. m'hidi. oum el bouaghi.
- [7] Mohamed, B. (2020/2021). Association Convertisseurs Machine électriques. laghouat: universite amar telidji .
- [8] noureddine, g., & abdelkader, m. (2017). realisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaine de conversion d'energie photovoltaïque. In u. l. m'hidi. oum el bouaghi.
- [9] ouardia, K., & Karima, s. (30/11/2018). synthèse d'un régulateur optimal basée sur l'algorithme d'optimisation par essaim particulaires (PSO):application à la commande en vitesse de la machine à courant continu. In u. A. Oulhadj. Bouira .
- [12] oussama, b. k. (2016). etude comparative en simulation entre un regulateur PID classique et un regulateur PID intelligent. In u. m. boudiaf. m'sila .
- [13] reponse frequentielle des systeme dynamiques continus LTI. (n.d.). In a. d. d'information.
- [14] S.shataam, sebah, m. e., & bekut, p. (n.d.). maximum power point tracking of photovoltaic solar pump base on ANFIS tuning system. In e. r. institute.

## Annexes

- ✓ *Convertisseur Buck :*
- ✓ *Conception sous Matlab :*

```
1 - |clear all
2 - |clc
3 - |%Convertisseur Buck
4 - |%Paramètres du Convertisseur
5 - |L=15.91e-3; C=50e-6; R=28; E=24;
6 - |%Point de fonctionnement désiré
7 - |Vref=10
8 - |D=Vref/E
9 - |Iref=D*E/R
10 - |uref=D
11 - |%Modèle linéarisé du Buck
12 - |A=[0 -1/L;1/C -1/(R*C)]
13 - |B=[E/L 0]'
14 - |c=[0 1];
15 - |%test Controlabilité
16 - |M=ctrb(A,B);
17 - |rank(M)
18 - |% Wn Xi poles de A
19 - |sys=ss(A,B,c,0);
20 - |[Wn,Xi,poles]=damp(sys)
21 - |%retour d'état par placement de poles
22 - |%Critères de conception
23 - |Xsi=0.95;
24 - |Wn=2500;
25 - |%Calcul des poles désirés
26 - |dend=[1 2*Wn*Xsi Wn^2];
27 - |pol=roots(dend)'
28 - |K=acker(A,B,pol)
29 - |%retour d'état intégral par placement de poles
30 - |Aa=[0 -1/L 0;1/C -1/(R*C) 0;0 1 0]
31 - |Ba=[E/L 0 0]'
32 - |ca=[0 1 0];
33 - |pola=[-1 roots(dend)']
34 - |Ka=place(Aa,Ba,pola)
```

- ✓ *Convertisseur Boost :*
- ✓ *Conception sous Matlab :*

```
1 clear all
2 clc
3 %Convertisseur Boost
4 %Paramètres du Convertisseur
5 L=15.91e-3; C=50e-6; R=52; E=12;
6 %Point de fonctionnement désiré
7 Vref=20
8 D=Vref/E
9 Iref=D*D*E/R
10 uref=(D-1)/D
11 %Modèle linéarisé du Boost
12 A=[0 -1/(D*L);1/(D*C) -1/(R*C)]
13 B=[D*E/L -(D^2)*E/(R*C)]'
14 c=[0 1];
15 %test Controlabilité
16 M=ctrb(A,B);
17 rank(M)
18 % Wn Xi poles de A
19 sys=ss(A,B,c,0);
20 [Wn,Xn,poles]=damp(sys)
21 %retour d'état par placement de poles
22 %Critères de conception
23 Xic=0.91;
24 Wc=1500;
25 %Calcul des poles désirés
26 dend=[1 2*Wc*Xic Wc^2];
27 pol=roots(dend)
28 K=acker(A,B,pol)
29 %retour d'état intégral par placement de poles
30 Aa=[0 -1/(D*L) 0;1/(D*C) -1/(R*C) 0;0 1 0]
31 Ba=[D*E/L -(D^2)*E/(R*C) 0]'
32 pola=[-20 roots(dend)']
33 Ka=place(Aa,Ba,pola)
```

- ✓ *Convertisseur Buck-Boost :*
- ✓ *Conception sous Matlab :*

```
1 - clear all
2 - clc
3 - %Convertisseur Buck-Boost
4 - %Paramètres du Convertisseur
5 - L=15.9e-3; C=470e-6; R=23; E=20;
6 - %Point de fonctionnement désiré
7 - Vref=-40
8 - D=Vref/E
9 - uref=-D/(1-D)
10 - Iref=-D*(1-D)*E/R
11 - %Modèle linéarisé du Buck-Boost
12 - A=[0 -1/((D-1)*L);1/((D-1)*C) -1/(R*C)]
13 - B=[(1-D)*E/L -D*(1-D)*E/(R*C)]'
14 - c=[0 1];
15 - %test Controlabilité
16 - M=ctrb(A,B);
17 - rank(M)
18 - % Wn Xi poles de A
19 - sys=ss(A,B,c,0);
20 - [Wn,Xi,poles]=damp(sys)
21 - %retour d'état par placement de poles
22 - %Critères de conception
23 - Xic=0.91;
24 - Wc=300;
25 - %Calcul des poles désirés
26 - dend=[1 2*Wc*Xic Wc^2];
27 - pol=roots(dend) '
28 - K=acker(A,B,pol)
29 - %retour d'état intégral par placement de poles
30 - Aa=[0 -1/((D-1)*L) 0;1/((D-1)*C) -1/(R*C) 0;0 1 0]
31 - Ba=[(1-D)*E/L -D*(1-D)*E/(R*C) 0]'
32 - ca=[0 1 0];
33 - pola=[-5 roots(dend) ']
34 - Ka=place(Aa,Ba,pola)
```