

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
LABORATOIRE DE COMMANDE DES PROCESSUS



DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

## PROJET DE FIN D'ETUDES

En Vue De L'obtention Du Diplôme  
D'INGENIEUR D'ETAT EN AUTOMATIQUE

### THEME

**Commande moderne d'une lampe à  
décharge destinée à la stérilisation des eaux**

**Réalisé par :**

MOKRANI Nassim

HAMAZ Tahar

**Encadré par :**

Pr. M.S. BOUCHERIT

Dr. K. BENMANSOUR

**Promotion Juin 2010**

*“Puisqu'on ne peut être universel en sachant tout ce qui se peut savoir sur tout, il faut savoir peu de tout, car il est bien plus beau de savoir quelque chose de tout que de savoir tout d'une chose. Cette universalité est la plus belle. Si on pouvait avoir les deux encore mieux, mais s'il faut choisir il faut choisir celle-là. Pensées, Et le monde le sait et le fait, car le monde est un bon juge souvent”*

*[Blaise Pascal (1623-1662)]*

*“En essayant continuellement, on finit par réussir, donc : plus on rate, plus on a de chances que ça marche”*

*[Les Shadocks.]*

# Résumé

---

### الملخص

العمل المعروف في هذه المذكرة يتمحور حول انجاز أنظمة تحكم متطورة لمصباح التفريغ المغذى عبر محول الطاقة المتعدد الخلايا المتسلسلة لغرض تعقيم الماء. أنظمة التحكم التي استدعينا إليها هي التحكم الغامض و التحكم بالشكل الانزلاقي ذو درجة عالية "خوارزمية سوبرتويستين"؛ و فيما يتعلق بالمحول اعتمدنا على نظامين للتحكم وهما التحكم المباشر والتحكم المشكل للنسب الدورية. تقييم مدى نجاعة أنظمة التحكم المقدمة كان بإحداث عدة اختبارات الصلابة في الحلقة المغلقة.

كلمات مفتاحية: تعقيم، مصباح التفريغ، التحكم الغامض، التحكم بالشكل الانزلاقي، التحكم المشكل للنسب الدورية، التحكم المباشر.

### Résumé

---

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur la l'élaboration de lois de commande moderne pour une lampe à décharge alimentée par un convertisseur multicellulaire série destiné à la stérilisation des eaux. Les commandes aux quelles nous avons fait appel sont la logique floue et les modes glissants d'ordre supérieure « algorithmes du super twisting », et pour ce qui est du convertisseur, nous avons adopté deux commandes à savoir la commande modulant des rapports cycliques et la commande directe. L'évaluation des performances des régulateurs proposés, s'est faite en effectuant plusieurs tests de robustesse en boucle fermée.

**Mots clés:** Stérilisation, lampe à décharge, logique floue, super twisting, commande modulant des rapports cycliques, commande directe, ballast électronique.

### Abstract

---

This survey focuses on designing modern laws control of a discharge lamp alimented by a serial multi-cell converter aimed for the sterilization of water. The controls used in this paper are fuzzy logic and High order sliding mode control « super twisting algorithm », for the converter we used two controls; direct control and cyclic rapports modulated control. The evaluation of the controller's performance proposed was done with performing several robustness tests in closed-loop.

**Key words:** Sterilization, discharge lamp, fuzzy logic, super twisting, modulated cyclics rate control, direct control and electronic ballast.

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à :*

- ❖ *Mes très chers parents ;*
- ❖ *Mes très chères grandes mères ;*
- ❖ *Mes très chers frères et sœur ;*
- ❖ *Toute ma famille ;*
- ❖ *Mon binôme Tahar et toute sa famille ;*
- ❖ *Tous mes amis.*

*MOKRANI Nassim*

# Dédicace

**Je dédie ce travail à :**

**A ma très chère mère, qui a tout sacrifié pour ses enfants, qui a veillé à notre éducation.**

**A mon cher père, qui m'a toujours soutenu et m'a été le conseiller, à qui je dois ma place maintenant pour ses sacrifices.**

**A mon grand frère Hachemi et petit frère Idir**

**A mes grands parents.**

**A mes tantes et mes oncles.**

**A Ghania, Louiza, et Lydia.**

**A Tahar HADJAM et toute sa famille.**

**A toute la famille HAMRI.**

**A mes amis, Mouhand Ameziane, Yacine, et khirdine.**

**A mes amis de Bouraoui avec qui j'ai partagé de bons moments.**

**A Nassim avec qui j'ai partagé ce travail ainsi que toute sa famille.**

**Et à toute les personnes que je connais et que je n'ai pas citées.**

**HAMAZ Tahar**

# Remerciement

*Nous remercions avant tout Dieu, le tout puissant, pour nous avoir donné, le courage, la patience, la volonté et la force nécessaire, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles qui se sont hissés au travers de notre chemin, tout au long de ce travail.*

*Nous exprimons nos remerciements à nos deux promoteurs Monsieur M.S. Boucherit et Monsieur K. Benmansour pour l'assistance qu'ils nous ont témoignée, pour leur disponibilité, pour leurs orientations et conseils sans lesquels ce travail ne verra pas le jour, qu'ils trouvent ici l'expression de notre gratitude.*

*Nous adressons nos vifs remerciements à Monsieur Mohamed Tadjine pour son aide et ses précieux conseils.*

*Nous souhaitons également remercier H. Chekireb et Monsieur O. Benzineb pour leurs conseils et orientations.*

*Nous adressons nos vifs remerciements aussi à Monsieur G. ZISSIS du laboratoire Plasma et Conversion d'Energie de l'université de Toulouse, France pour son aide et sa générosité de répondre à nos questions que nous lui envoyons par e-mail.*

*Nous remercions tout particulièrement les membres de jury qui ont accepté de juger notre travail ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.*

*Enfin, Nous remercions aussi tous nos amis et collègues qui nous ont soutenu et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

# Table Des Matières

---

<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
------------------------------------	----------

## **Chapitre I: Stérilisation des eaux par rayonnement UV**

Introduction.....	4
I.1. Traitement des eaux.....	5
I.2. Stérilisation UV.....	5
I.3. Présentation des rayonnements UV : definition et historique.....	6
I.4. Actions générales des rayonnements UVsur les microorganismes.....	7
I.5. L'action sterilisante.....	8
I.6. Source des radiations UV.....	9
I.6.1. Lampes basse pression.....	10
I.6.2. Lampes moyenne et haute pression .....	11
I.7. Les réacteurs UV.....	11
I.8 principe de stérilisation UV .....	12
I.9. Dose UV.....	13
I.10. Facteurs d'influence de la désinfection UV.....	14
I.10.1 Transmission UV.....	15
I.10.2 Solides en suspension.....	15
I.10.3 Carbone organique dissous total.....	16
I.10.4 Dureté totale.....	16
I.10.5 La turbidité .....	16
I.10.6 Propreté de la gaine.....	16
I.10.7 Débit.....	16
I.11. Mécanismes de réduction des micro-organismes.....	16
I.11.1. Virus et bactéries.....	17
I.11.2. Poliovirus et reovirus.....	17
I.11.3. La taille du génome.....	17
I.12. Domaines d'application des UV.....	18
I.13. Avantage et inconvénients.....	19

Conclusion..... 19

## **Chapitre II: Alimentation et modélisation de la lampe à décharge**

Introduction..... 20

II.1 Décharge électrique..... 21

II.2 Lampes à décharge, l'état de l'art..... 21

II.3 Principe de fonctionnement d'une lampe à décharge..... 22

II.4 Conditions d'alimentation d'une lampe à décharge..... 23

    II.4.1. Emploi d'une électrode auxiliaire..... 24

    II.4.2. Chauffage préalable des électrodes..... 24

II.5. Caractéristique et couplage..... 25

    II.5.1 Couplage entre l'alimentation et la décharge..... 25

        II.5.1.1. Source de tension..... 26

        II.5.1.2. Source de courant..... 27

II.6. Nécessite d'une stabilité..... 27

    II.6.1. Ballasts électromagnétiques..... 28

    II.6.2. Ballasts électroniques..... 39

II.7. Intérêt de la haute fréquence pour la lampe à décharge..... 30

II.8. Effet de la température..... 32

II.9. Influence de courant électrique sur l'émission de la raie 253.7 nm du Hg..... 34

II.10. Modélisation de la lampe à décharge..... 35

    II.10.1. La fonction de transfert en boucle ouvert..... 37

Conclusion..... 38

## **Chapitre III: Modélisation et commande du convertisseur multicellulaire série**

Introduction..... 39

III.1. Les convertisseurs multicellulaires..... 40

III.2. Intérêt des convertisseurs multicellulaires..... 41

III.3. Les convertisseurs multicellulaires série ou a cellules imbriquées..... 42

III.4. Fonctionnement du convertisseur multicellulaire..... 42

    III.4.1. Tension bloquée par une cellule..... 42

    III.4.2. Courant commute par une cellule..... 44



## Notations

---

III.5. Modélisation des convertisseurs multicellulaires.....	45
III.5.1. Le modèle instantané.....	45
III.5.2. Modèle moyen.....	47
III.5.3. Modèle harmonique.....	48
III.6. Architecture du convertisseur utilise pour notre application.....	49
III.7. La commande par MLI.....	51
III.8. Le control proportionnel des tensions de sortie.....	52
III.9. Commande directe des convertisseurs multicellulaires série.....	54
Conclusion.....	60

## Chapitre IV: Commande de la lampe à décharge

Introduction.....	61
IV.1. Commande en boucle ouverte .....	62
IV.1.1. Simulation du système convertisseur lampe en boucle ouverte.....	62
IV.1.1.1. Commande modulant des rapports cycliques.....	62
IV.1.1.2. Résultats de simulation en boucle ouverte.....	62
IV.2. Commande en boucle ferme .....	65
IV.2 .1. Régulateur PI.....	66
IV.2.1.1. Calcul des gains avec la méthode de placement des pôles.....	66
IV.2.1.2. Résultats de simulation pour un régulateur PI.....	68
IV.2.1.2.1. Commande modulant des rapports cycliques.....	68
IV.2.1.2.2. Commande directe pour le convertisseur.....	71
IV.2.1.3. Test de robustesse.....	73
IV.2 .2. Commande moderne.....	77
IV.2.2.1. Commande par la logique floue.....	77
Introduction.....	77
IV.2.2.1.1. Bases de la logique floue.....	77
IV.2.2.1.1.1 Généralités sur la logique floue.....	78
IV.2.2.1.1.1.1. Ensemble flou et fonction d'appartenance.....	78
IV.2.2.1.1.1.2. caractéristiques d'un ensemble flou .....	78
IV.2.2.1.2. Contrôleur flou.....	80
IV.2.2.1.2.1. Structure classique d'un contrôleur flou .....	81

IV.2.2.1.2.2. Principe du contrôleur flou.....	81
IV.2.2.1.3. Application.....	84
IV.2.2.1.3.1. Régulateur floue de type Mandani .....	84
IV.2.2.1.3.1.1. La table d'inférence .....	85
IV.2.2.1.3.1.2. La caractéristique du régulateur .....	85
IV.2.2.1.3.2. Régulateur floue de type Sugeno .....	86
IV.2.2.1.3.2.1. La table de décision .....	87
IV.2.2.1.3.2.2. La caractéristique du régulateur .....	87
IV.2.2.1.3.3. Schémas de commande .....	88
A) Commande modulant des rapports cycliques pour le convertisseur.....	88
B) Commande directe pour le convertisseur.....	88
IV.2.2.1.3.4. Résultats de la simulation .....	88
IV.2.2.1.3.4. 1. Résultats de simulation pour le régulateur type Mandani .....	89
IV.2.2.1.3.4.1.1. Commande modulant des rapports cycliques .....	89
IV.2.2.1.3.4.1.2. Commande directe pour le convertisseur .....	91
IV.2.2.1.3.4.2. Test de robustesse.....	94
IV.2.2.1.3.4.3. Résultats de simulation pour le régulateur type Sugeno .....	98
IV.2.2.1.3.4.3.1. Commande modulant des rapports cycliques .....	98
IV.2.2.1.3.4.3.2. Commande directe pour le convertisseur.....	101
IV.2.2.1.3.4.4. Test de robustesse .....	104
IV.2.2.2. Commande par super-twisting.....	108
Introduction.....	108
IV.2.2.2.1. Algorithme de la commande super twisting .....	108
IV.2.2.2.2. Application à la lampe à décharge.....	109
IV.2.2.2.3. Résultat de simulation pour le régulateur super twisting.....	110
IV.2.2.2.3.1. Commande modulant des rapports cycliques.....	110
IV.2.2.2.3.2. Commande directe pour le convertisseur .....	113
IV.2.2.2.4. Test de robustesse.....	117
Conclusion.....	121
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>122</b>
<b>Bibliographies .....</b>	<b>125</b>
<b>Annexe.....</b>	<b>128</b>

# Notations

---

## Abréviations

---

MOSFET	MOS Controlled Thyristors
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
ADN	Acide desoxyribonucleique)
ARN	Acide ribonucleique
UV-A	Rayons ultraviolet classe A
UV-B	Rayons ultraviolet classe B
UV-C	Rayonnement ultraviolet classe C
THD	Taux de distorsion harmonique
MLI	Modulation de la largeur d'impulsion
PI	Proportionnel intégrateur
BO	Boucle ouverte
BF	Boucle fermée

## Grandeurs et symboles

---

D	La dose uv ( $\text{mj}/\text{cm}^2$ )
S	La surface du cylindre entourant la lampe ( $\text{cm}^2$ )
t	Le temps d'irradiation (s)
kx	Coefficient d'absorption des uv dans le liquide a traité.
DA	La dose uv en un point A ( $\text{mj}/\text{cm}^2$ )
n	Le nombre de lampes
di	La distance entre la surface de la lampe et le point A
SiA	La surface du cylindre entourant la lampe i et passante par le point A.
c	L'épaisseur de la lame de liquide utilisée
t	Le temps d'exposition d'un ml de liquide aux UV.
Pi	La puissance germicide des lampes en fin de vie
- $\Delta I$	Augmentation de la valeur efficace du courant <i>i</i>
+ $\Delta I$	Diminution de la valeur efficace du courant <i>i</i>
$\Delta V_{\text{électrode}}$	Chute de tension aux bornes des électrodes

## Notations

---

$\eta(U,V)$	Rendement du rayonnement UV
$C_p$	Capacite du condensateur d'amorçage
$C_r$	Capacite du condensateur du circuit résonnant du ballast
$L_r$	Inductance du circuit résonnant du ballast
$f_{dec}$	Fréquence de découpage (commutation) des interrupteurs
$U_{arc}$	Valeur efficace de la tension du régime d'arc de la lampe
$I_{arc}$	Valeur efficace du courant du régime d'arc de la lampe
$i_{arc}$	Valeur instantanée du courant du régime d'arc de la lampe
$V_{arc}$	Valeur instantanée de la tension du régime d'arc de la lampe
$R_{arc}$	Resistance du régime d'arc de la lampe
$P_{arc}$	Puissance du régime d'arc de la lampe
$r_f$	Resistance du filament de la lampe
$i_{cp}$	Courant instantané dans le circuit parallèle
$Z_{cp}$	Réactance du condensateur parallèle du ballast
$I_{lampe}$	Courant efficace de la lampe
$V_{lampe}$	Tension efficace de la lampe
$P(U,V)$	Puissance du rayonnement UV
$P$	Puissance des lampes (watts) (rendement germicide en fin de durée de vie)
$P_{arc}$	Puissance du régime d'arc de la lampe
$P_{arc}$	Puissance instantanée du regimbe d'arc de la lampe
$R$	Résistance
$f_0$	Fréquence du fondamental
$f_p$	Fréquence de la porteuse
$f_{mod}$	Fréquence de la modulant
$r$	Taux de modulation
$m$	Indice de modulation
$K_p$	Gain proportionnel
$K_i$	Gain integrateur
$\omega_n$	Fréquence propre du système
$\zeta$	Amortissement
$i_{ch}$	Courant instantané à la sortie du convertisseur
$v_{ch}$	Tension instantané à la sortie du convertisseur
$S_k$	Interrupteur du haut de la kème cellule
$V_{ck}$	La tension aux bornes du kème condensateur
$P$	Le nombre de cellules d'un convertisseur multicellulaire
$u_k$	La commande appliquée à l'interrupteur du haut de la kème cellule

## Notations

---

$E$	La tension d'entrée du convertisseur
$\langle \cdot \rangle$	La valeur moyenne de la variable ( $\cdot$ )
$\Phi$	Le vecteur de déphasage
$\Phi_k$	L'angle de déphasage
$S$	Surface de glissement
$e$	L'erreur
$\Delta e$	Variation de l'erreur
$\mu_F$	Fonction d'appartenance à l'ensemble $F$
$C_i$	sont des constantes constituant la table des règles

# **Introduction générale**

---

Les eaux utilisées pour la consommation sont vulnérables. Menacées par les activités humaines (agriculture, élevage, zones d'activités...), les eaux sont exposées à diverses sources de pollution difficilement contrôlables. Or, la présence dans l'eau de micro organismes pathogènes peut constituer un risque pour la santé des consommateurs. Pour éliminer ces micro-organismes pathogènes (bactéries et virus), on procède à la stérilisation de l'eau en utilisant pour cela soit un désinfectant chimique comme le chlore ou l'ozone, soit des rayonnements ultraviolets.

La stérilisation de l'eau par les rayons Ultra Violet a débuté depuis 1910, mais ce n'est véritablement qu'à partir des années 70 qu'elle s'est effectivement développée principalement en Amérique du Nord. Aujourd'hui, elle est considérée comme la meilleure alternative à la chloration. En effet ce traitement physique par UV ne modifie pas les caractéristiques organoleptiques de l'eau. Les UV-c ont pour propriété de bloquer la duplication de l'ADN, et donc inactivent ou détruisent les germes pathogènes. Ils ont aussi un pouvoir germicide puissant. Les UV-c généralement produits par les lampes à décharge contenant la vapeur de mercure, l'argon ou les halogènes de métal, où la libération d'énergie crée par l'excitation des molécules métalliques entraîne l'émission de la lumière UV-c.

L'alimentation de la lampe à décharge nécessite l'utilisation d'un dispositif spécial connu sous le nom de ballast. Ceci est dû à la forme décroissante des caractéristiques  $V(i)$  des lampes à décharges et a pour objectif la limitation du courant de la lampe afin d'éviter sa détérioration ou celle du circuit d'alimentation.

Il semble que pour les lampes à décharges, en augmentant la fréquence d'alimentation, les électrodes s'usent plus lentement et la durée de vie de la lampe augmente [BEZ03]. dans ce contexte, les progrès technologiques des convertisseurs statiques ont mené à la mise en œuvre de convertisseurs modernes constitués d'interrupteurs à base de composants à semi conducteurs à fréquence de commutation élevée (supérieure à 50 KHz pour les MOSFET) et légèrement supérieure à 20KHz pour les IGBT)[LEF05].

Une nouvelle topologie de convertisseurs est apparue au début des années 90, les convertisseurs multicellulaires série, permettant d'envisager un champ d'application beaucoup plus vaste. En effet, cette nouvelle topologie facilite la mise en série en assurant un équilibrage des tensions aux bornes des interrupteurs en régime statique. De plus, le fractionnement de la fonction interrupteur (présence de degrés de liberté supplémentaires liés au nombre d'interrupteurs en série) permet d'améliorer les formes d'ondes en sortie du convertisseur en terme de contenu harmonique [TAC98]. Les convertisseurs multicellulaires série mettent en œuvre des condensateurs flottants dont les tensions doivent être maîtrisées. Cette maîtrise peut être assurée sous certaines conditions en boucle ouverte.

Pour ce qui est de la stratégie de commande, nous avons opté pour la commande par logique floue, en effet, cette nouvelle commande a connu un intérêt important dans la communauté scientifique au cours des dernières années, la popularité des régulateurs flous dans la pratique réside dans le fait qu'il est possible d'incorporer des connaissances linguistiques sur la manière de commander des processus non linéaires difficiles à modéliser .

Nous avons proposé dans ce travail un régulateur floue de type Mandani, cette approche conduit tout d'abord à un nombre de règles très important, mais également à une synthèse très difficile, dans le souci d'améliorer le temps de calcul de l'algorithme, nous avons proposé un régulateur de type Sugeno qui présente l'avantage d'être plus facile à implanter.

Récemment apparus, les modes glissants d'ordre supérieur sont une généralisation des modes glissants classiques (d'ordre un) à des ordres de dérivées supérieurs de la variable de glissement. En effet, dans le cas des modes glissants d'ordre supérieur et contrairement aux modes glissants classiques, la commande discontinue agit sur une dérivée supérieure de la variable de glissement, ce qui permet d'éliminer le phénomène de chattering qui constitue un inconvénient majeur des modes glissants classiques. Dans cette optique, nous allons proposer un régulateur à mode de glissement d'ordre supérieur à la commande des convertisseurs multicellulaires.

Le premier chapitre introduit l'environnement lié à la problématique de notre travail et permet de dresser l'état actuel de la désinfection de l'eau par le rayonnement ultraviolet. Les différentes sources permettant de générer ce rayonnement ainsi que leurs caractéristiques

seront présentées. Le moyen d'action du rayonnement ultraviolet et les paramètres qui influent sur la désinfection seront mis en évidence afin de permettre une bonne désinfection.

Dans le second chapitre, nous faisons une introduction au décharge électrique et au principe de fonctionnement des lampes à décharge. Nous rappelons les conditions d'alimentation de la lampe à décharge qui nécessite l'utilisation d'un dispositif pour la limitation et la stabilisation du courant des lampes à décharge en raison de la présence de la pente négative dans la caractéristique statique de ces lampes: le ballast électronique. Nous présentons ensuite les résultats de recherche trouvés dans la littérature [COS00] et dans lesquels ils ont constaté que l'efficacité lumineuse augmente avec l'augmentation de la fréquence, et qu'il valait mieux alimenter la lampe avec un courant de 0,65 A en valeur efficace. La fréquence adoptée dans ce travail est de 50KHz. Un modèle électrique destiné à la simulation de ce type de circuit et à la validation des lois de commande est présenté.

Le troisième chapitre est consacré aux convertisseurs multicellulaires série: apparition, principe de fonctionnement et les différents modèles mathématiques utilisés pour décrire le fonctionnement. Nous donnerons ensuite la structure de l'onduleur qui sera utilisé dans notre application, ainsi que deux lois de commande assurant le contrôle des tensions des condensateurs flottants et la tension de sortie du convertisseur, la première est basée sur la modulation des rapports cycliques avec un contrôle proportionnel des tensions des bras, tandis que la deuxième est une commande directe. Cette commande devra maintenir l'équilibrage des tensions des bras quelque soit le sens du courant tout en poursuivant la tension de référence qu'elle devra générer à la sortie du convertisseur.

Dans le dernier chapitre, nous développons dans un premier lieu une commande classique de type proportionnel-intégral, ensuite nous proposons deux commandes modernes tolérantes à l'imprécision et à l'incertitude (car le modèle de la lampe n'est pas précis) à savoir la commande par la logique floue et la commande par le mode glissant d'ordre deux (algorithme de super- twisting) pour améliorer d'avantage les performances de la lampe à décharge.



# Chapitre I

---

## STERILISATION DES EAUX PAR RAYONNEMENT UV

*“La science restera toujours la satisfaction  
du plus haut désir de notre nature, la curiosité ;  
elle fournira à l'homme le seul moyen qu'il ait  
d'améliorer son sort”*  
*[Ernest Renan]*

### **Introduction**

Par sa simplicité et son efficacité, la stérilisation de liquides par rayonnement UV s'est développée au cours des dernières années. En effet, il ne fait plus de doute aujourd'hui que les UV constituent une technologie de choix en matière de désinfection : ils ne modifient pas la composition chimique du liquide, n'induisent ni toxicité, ni corrosion et ne nécessitent pas la manipulation de produits chimiques plus ou moins dangereux.

## I.1. Traitement des eaux

Il est désormais scientifiquement prouvé que l'eau courante prévenant du robinet n'est pas aussi pur quelle n'y paraît. De nombreuses analyses ont révélé qu'elle pouvait contenir plus d'une soixantaine de composants chimiques différents tels que nitrates, pesticides, chlore, soufre ainsi que des métaux lourds comme le plomb, zinc, cuivre, aluminium sans oublier des micro-organismes, bactérie, pesticides, au virus potentiellement dangereux. La présence dans l'eau de ces organismes présente un risque sur la santé de consommateur.

Pour obtenir une eau désinfectée, il existe deux principaux types de procédés [MAR86] [BER85] :

- Les procédés chimiques
- Les procédés physiques

Les procédés chimiques font appel à des oxydants comme le chlore, brome l'ozone ou autre désinfectant. Il génère tous des effluents chimiques de plus en plus contestés par les services nationaux de l'environnement en raison de leurs aspects polluants.

Mis à part l'utilisation des ultrafiltrations assez coûteuse et encore au stade expérimental, le seul procédé physique employé pour la désinfection de l'eau fait appel aux radiations UV. La décontamination par UV-C se contente de « tuer » ou « d'inactiver » des germes sans générer des effluents chimiques gênants pour l'environnement, d'où son avantage incontestable.

## I.2. Stérilisation UV

La stérilisation par rayonnement ultraviolet est un procédé de potabilisation physique détruisant les micro-organismes susceptibles de provoquer des maladies ou d'affecter un processus de fabrication.

L'eau est un élément vital dont la qualité se dégrade régulièrement depuis de nombreuses années. La traiter est aujourd'hui une priorité, la respecter une nécessité. C'est pourquoi la technologie UV répond parfaitement à ces deux exigences: le concept bactéricide UV a pour principe de générer des rayons ultra-violets au sein d'une chambre de traitement. Ces rayons irradient les cellules vivantes contenues dans le liquide traversant l'appareil, sans modifier les critères physico-chimiques et sans générer de solutions résiduelles.

### I.3. Présentation des rayonnements UV : définition et historique

L'existence de rayons UV est mise en évidence en 1801 par J. W. RITTER, physicien et physiologiste allemand. « Ultraviolet » est le nom donné aux rayonnements électromagnétiques s'étendant dans la gamme des longueurs d'ondes situées entre 100 et 400 nm. De manière conventionnelle, 100 nm a été choisi comme la limite entre les radiations non-ionisantes et les radiations ionisantes de longueurs d'ondes inférieures. Le rayonnement ultraviolet est habituellement classé en trois régions, les limites ayant été déterminées arbitrairement : UVA (315-400 nm), UVB (280-315 nm) et UVC (100-280 nm). [AFS05] [MAS00] Ces limites ont été récemment confirmées par la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE).

Ces rayons UV ont une action photochimique sur les corps, action qui se manifeste par des réactions très diverses telles que :

- Pigmentation de la peau (UV-A).
- Vitamination des produits alimentaires (UV-B).
- Destruction des micro-organismes (UV-C).
- Formation d'ozone (pour des longueurs d'onde de l'ordre de 185 nm).

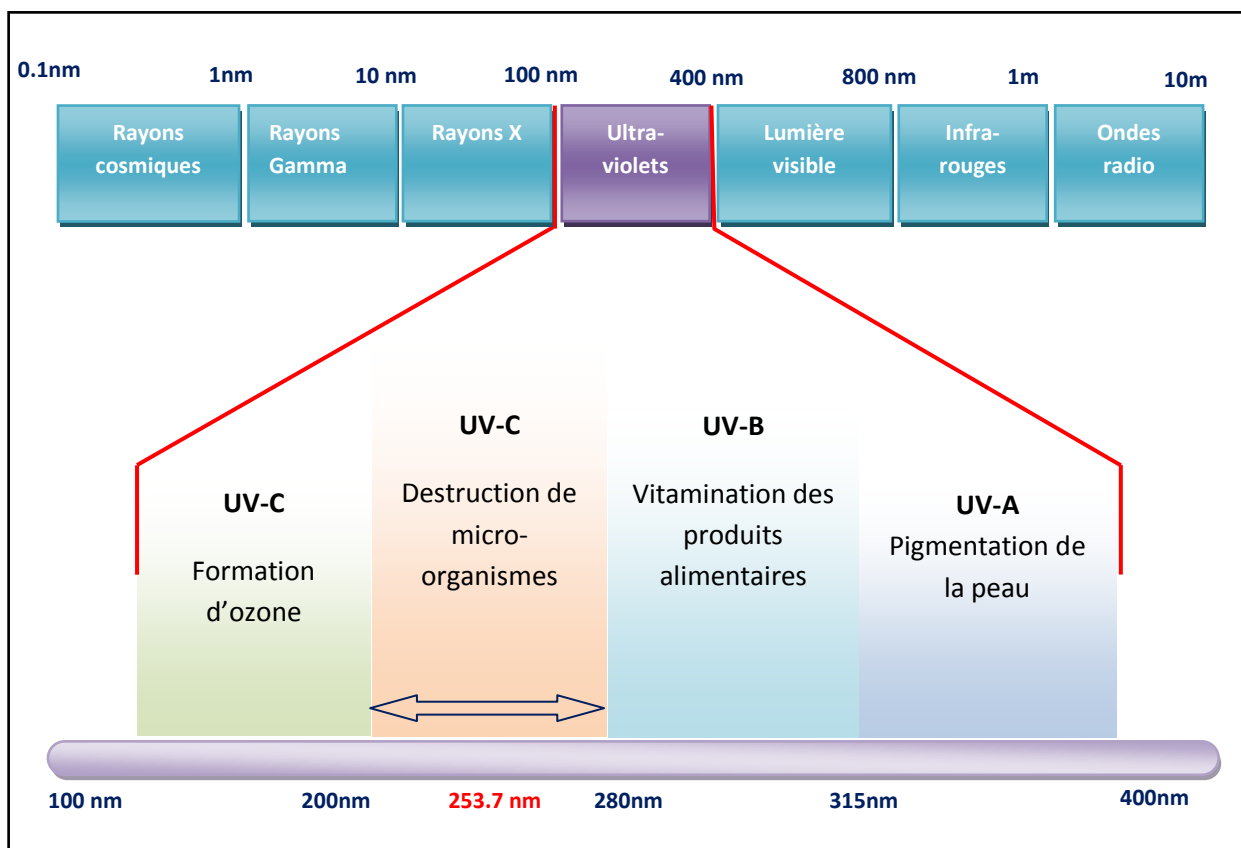


Figure I.1 : Spectre de rayonnement ultraviolet

Le premier appareil de production d'UV est construit en 1910 à Marseille, mais ses lampes en quartz ne sont pas encore sûres, la conception comme le fonctionnement et la maintenance de l'installation sont compliqués et onéreux.

La situation change dans les années 40 lorsque les premières lampes à vapeur de mercure haute et basse pression arrivent sur le marché. Grâce au remplacement du verre par du quartz, ces lampes sont optimisées pour l'application à la désinfection de l'eau. Par la suite, des études sur le comportement des microorganismes soumis aux rayonnements UV conduisent à de nouvelles possibilités dans le domaine de la purification de l'air, de l'eau et des surfaces des matériaux. La décontamination devient ainsi réalisable sans recourir à des additifs [CRI07].

#### I.4. Actions générales des rayonnements UV sur les microorganismes

En raison de leur longueur d'onde élevée, les UV sont très réactifs vis-à-vis de la matière. D'une manière générale, ils rendent inactif les microorganismes et les virus en provoquant des modifications physico-chimiques irréversibles des acides nucléiques, principalement de l'ADN.

Les rayonnements UV traversent la membrane cytoplasmique de la cellule, pénètrent dans le noyau et modifient la chromatine par effet photochimique. Les éléments de la reproduction sont ainsi inhibés et la division cellulaire bloquée, directement par modification du code génétique ou indirectement par erreurs de réplication. Si l'action est suffisamment prolongée ou renforcée, le noyau se dilate jusqu'à son propre éclatement et/ou celui de la cellule [MAS00].

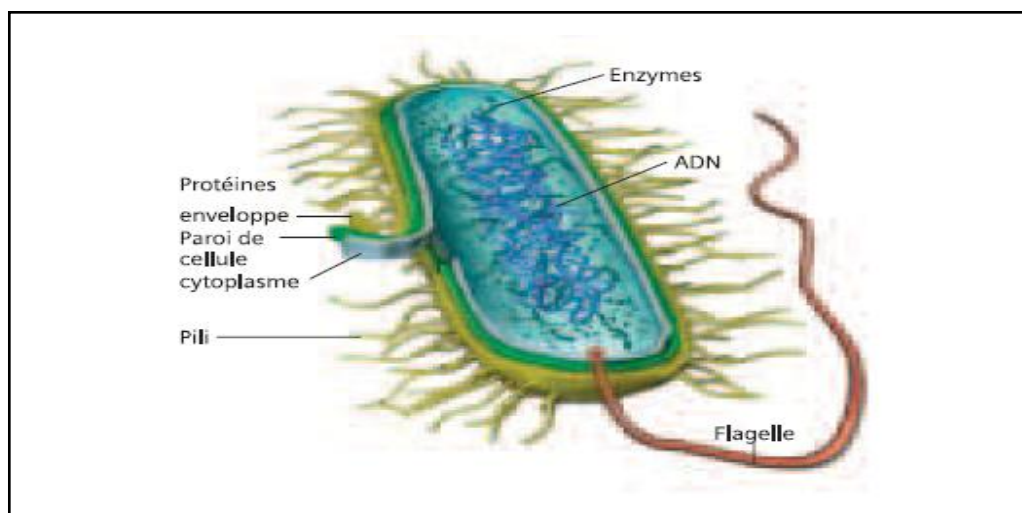
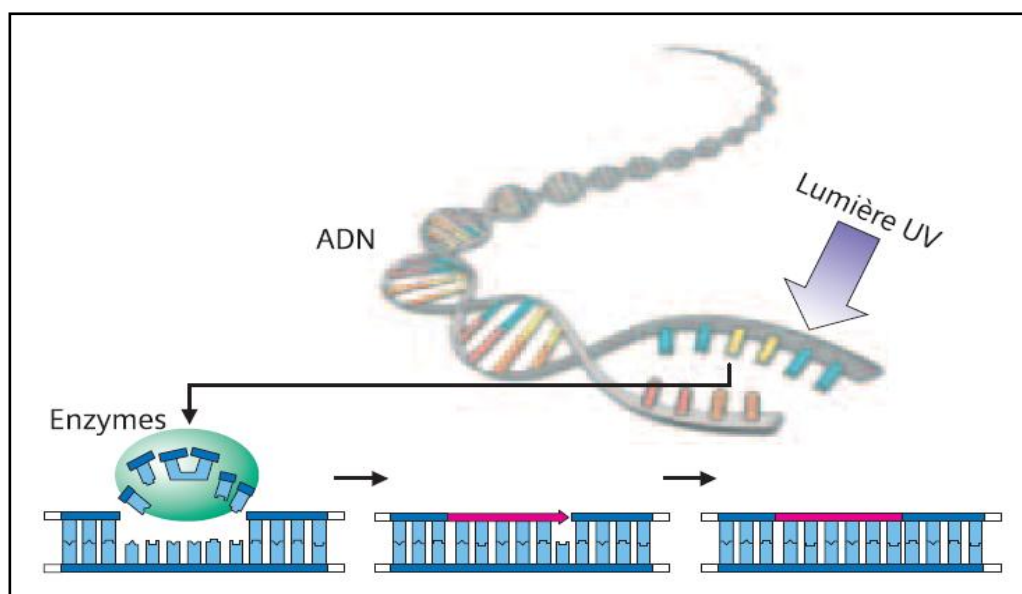


Figure I.2: bactérie [SIE06]

Deux stades successifs d'action sont à distinguer :

- un effet bactériostatique : la fonction de réplication cellulaire est inhibée par dissociation des doubles liaisons insaturées des acides nucléiques du noyau,
- un effet bactéricide : le rayonnement UV entraîne la désorganisation de la cellule par éclatement des membranes nucléaires et/ou cellulaire.



**Figure I.3:** Réactivation des micro-organismes [SIE06]

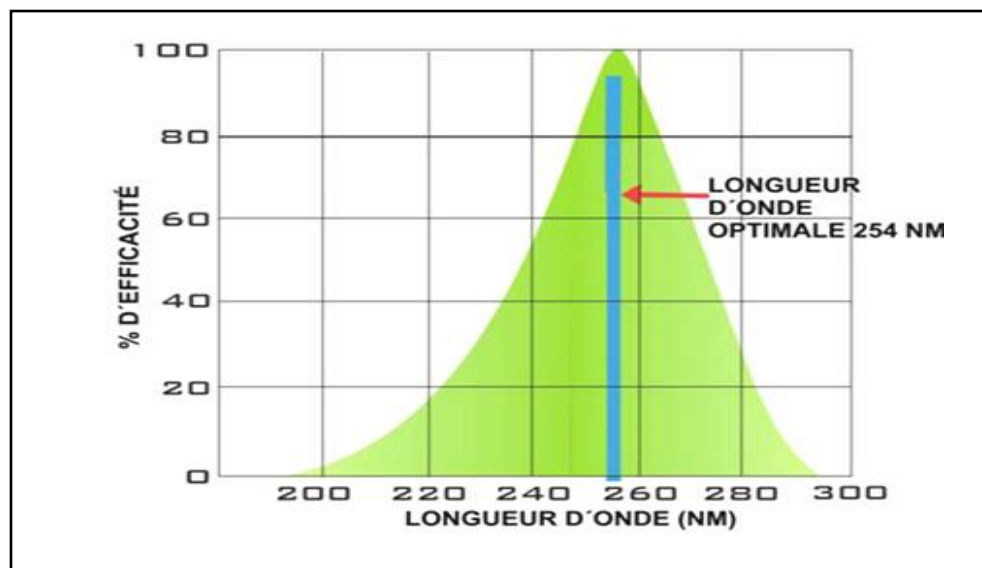
La viabilité des microorganismes soumis aux rayonnements UV dépend de la capacité de leurs ADN et ARN à rester intact. Leur résistance vis à vis des UV varie donc considérablement en fonction de la forme et de la complexité de leurs composants intracellulaires. Ainsi, pour chaque microorganisme, correspond un quantum donné d'énergie UV assurant sa destruction. Ce seuil, appelé dose létale, correspond à la réduction d'un logarithme du nombre de germes, rapporté au cm ou au ml, c'est à dire la dose nécessaire pour détruire 90% de la flore microbienne.

En général, les dispositifs de traitement par rayonnement UV doivent, pour être efficaces, détruire au moins 99% (2 unités log) de la population microbienne. Par contre, on considère qu'un procédé est bactéricide s'il est apte à détruire 99,99% de la population (4 unités log).

### **I.5. L'action stérilisante**

L'action stérilisante, est due à la perturbation apportée par le rayonnement ultraviolet dans la structure chimique des constituants de la cellule vivante, et par suite, de leur

fonctionnement. La courbe d'absorption de l'ADN (acide désoxyribonucléique), véritable support de l'information génétique dans le noyau des cellules, pour des longueurs d'onde comprises entre 200 et 285 nm met en évidence un pic à la longueur d'onde de 253.7 nm. Le meilleur effet bactéricide est obtenu pour des longueurs d'onde entre 250 et 260 nm.



**Figure I.4:** Spectre d'absorption moyen de rayonnement électromagnétique par les micro-organismes [MAS00].

Suivant la quantité d'énergie UV reçue, la cellule vivante sera soit stérilisée (effet bactériostatique) soit détruite (effet bactéricide). L'effet bactériostatique dans le cas d'une absorption modérée d'énergie UV, permet à la cellule de continuer à vivre, mais sans avoir la possibilité de se reproduire. Cette cellule est donc condamnée à disparaître. L'effet bactéricide, dans le cas d'une absorption d'énergie supérieure à une certaine dose, permet la destruction de la cellule [MAS00].

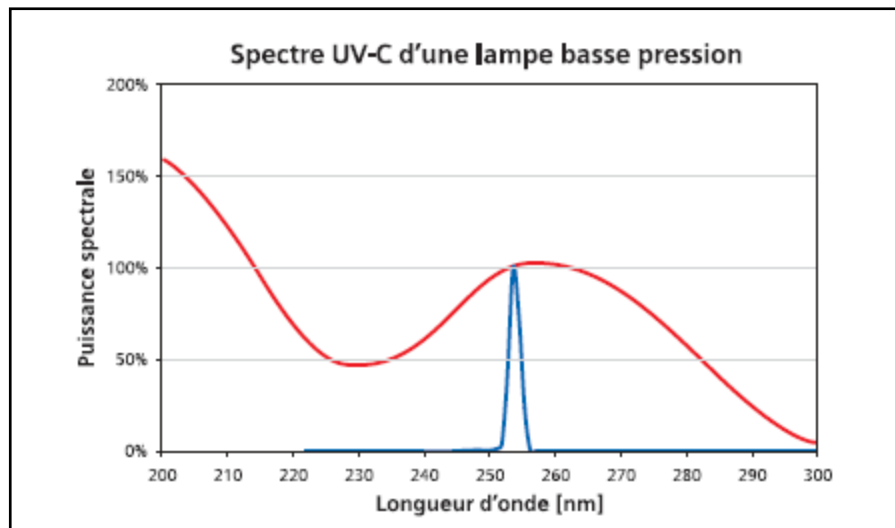
## I.6. Source des radiations UV

Les rayons UV sont produits par des lampes à vapeur de mercure qui émettent à la longueur d'onde de 254 nm, très proche de la longueur d'onde de 253.7 nm à haut pouvoir germicide.

Deux types de lampes existent : lampes basse pression et moyenne et haute pression.

### I.6.1. Lampes basse pression

Les lampes à vapeur de mercure basse pression émettent une lumière quasi-monochromatique à 254 nm, qui correspond à la bande optimale de l'effet germicide. Elles se présentent sous la forme de longs tubes de 1,5 à 2 cm de diamètre. Les longueurs standards sont de 91,4 et 162,6 cm pour des longueurs d'arc respectives de 76,2 et 147,3 cm. Les lampes sont généralement insérées à l'intérieur d'un manchon de quartz, ce qui permet de les immerger directement dans l'eau à traiter. Le quartz transmet jusqu'à 90% de la radiation provenant de la lampe. L'intensité transmise est également dépendante du voltage, de la température autour de la lampe, de son âge (les lampes basse pression ont une durée de vie d'environ 3500 heures), et de son degré d'encrassement. Les lampes à vapeur de mercure sont très sensibles aux variations de température ; l'optimal se situerait autour de 50°C [MAS00].



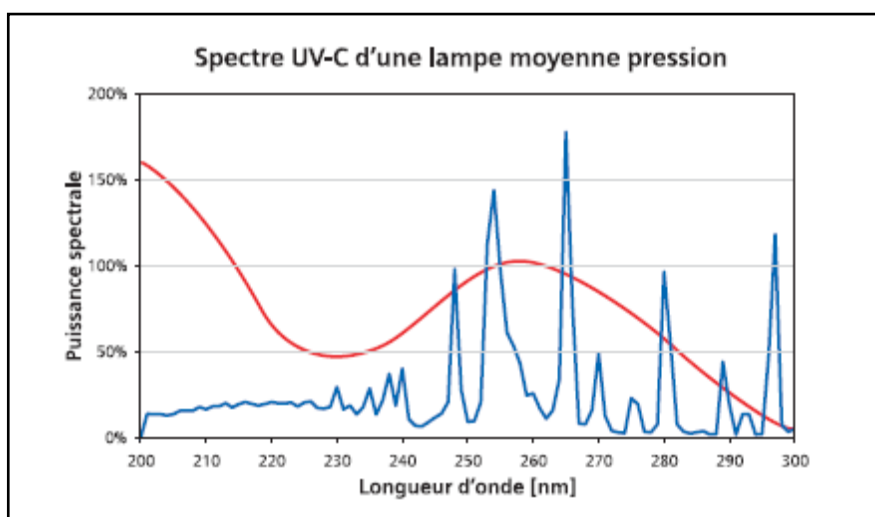
**Figure I.5:** Courbe d'absorption de l'ADN et d'émission des lampes basse pression [MAU07]

La température influence la pression qui peut être maintenue au niveau de la lampe. Lorsqu'elle est trop basse, elle provoque une chute de pression, les atomes de mercure s'en trouvent moins comprimés donc plus difficilement excitable donc diminution de la quantité électrique transformée. A l'inverse, une augmentation de la température augmentera la pression, l'excitation des électrons des atomes de mercure sera très grande mais l'énergie lumineuse sera libérée dans un spectre beaucoup plus étendu que 254 nm. C'est le cas des lampes moyennes pression.

### I.6.2. Lampes moyenne et haute pression

A pression supérieure, l'intensité de la décharge électrique est augmentée mais le facteur de dispersion de la lumière générée n'est pas limité à la zone germicide : il s'étend jusque dans le visible [MAS00].

En pratique, l'énergie perdue par la production de chaleur est beaucoup plus grande pour les lampes moyennes pression que pour les lampes basses pression mais du fait de la très haute intensité de la décharge, moins de lampes sont requises pour fournir une dose donnée.



**Figure I.6:** Courbe d'absorption de l'ADN et d'émission des lampes moyenne pression [MAU07]

Les lampes à moyenne pression coûtent cependant beaucoup plus chères que celles à basse pression et ont des durées de vie plus courtes; elles ne sont utilisées que pour des stations à gros débit. Du fait de leur rendement énergétique plus faible, elles posent des problèmes d'entartrage qui ne se posent pas avec les lampes basses pression.

### I.7. Les réacteurs UV

Il existe deux types de réacteurs: les réacteurs fermés sous pression et les réacteurs ouverts ou canal ouvert, les lampes y sont regroupées par module avec un alignement vertical des lampes. Le type de réacteur est classé suivant la position des lampes. Les lampes peuvent être placées verticalement ou horizontalement.



Dans toutes ces considérations, les lampes sont immergées. Un dispositif de maintien du niveau d'eau au dessus des lampes est nécessaire [BUZ00].

Quelle que soit la configuration, son but est de maximiser l'utilisation de l'énergie UV émise par les lampes et de fournir les conditions hydrauliques favorables à une bonne désinfection.

## I.8 Principe de stérilisation UV

Les systèmes types de désinfection par traitement UV comprennent la circulation de l'eau à travers un récipient contenant une lampe UV, comme l'illustre la figure (I.7). Durant le passage de l'eau dans le récipient, les micro-organismes sont exposés à une énergie lumineuse ultraviolette intense qui endommage les molécules génétiques (c.-à-d. les acides nucléiques, soit l'ADN et l'ARN) nécessaires à la reproduction. Ces lésions empêchent le micro organisme de se multiplier ou de se reproduire chez un hôte humain ou animal. Comme le micro organisme ne peut plus se multiplier, aucune infection n'a lieu. La désinfection de l'eau par rayons ultraviolets se fait par *inactivation des micro-organismes* [MAS00].

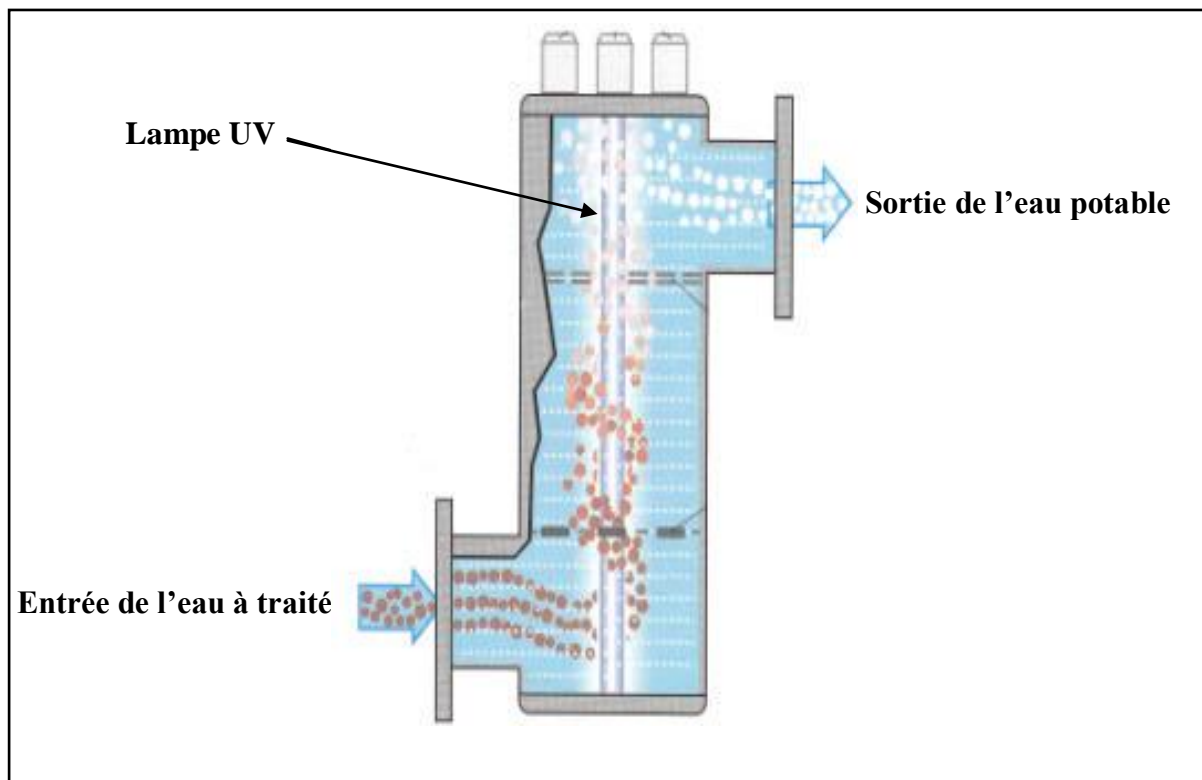


Figure I.7: Principe d'une lampe à rayons ultraviolets [FND99]

## I.9. Dose UV

Le calcul de la dose UV est régit par l'équation (Eq-I.1) :

$$D = (P/S)e^{-kx} t \quad (\mathbf{mJ/cm^2}) \quad (\text{Eq-I.1})$$

Dans laquelle :

- D est la dose UV (mJ/cm<sup>2</sup>).
- P est la puissance germicide (mW).
- S est la surface du cylindre entourant la lampe (cm<sup>2</sup>).
- t est le temps d'irradiation (s).
- kx : coefficient d'absorption des UV dans le liquide à traiter.

A partir de cette équation (Eq-I.1), on peut déterminer la dose moyenne de rayonnement UV fournie par la lampe à décharge pour un certain débit et un certain coefficient de pénétration aux UVc du liquide à traiter. Cependant, les microorganismes ne sont pas distribués de manière uniforme dans le liquide, c'est pourquoi il est important de déterminer la dose de rayonnement aux UV minimum. Pour cela, il faut se placer dans les conditions d'exposition les plus défavorables. Ainsi, l'installation de traitement UV est réalisée en considérant que les microorganismes se situent en permanence dans les positions les plus défavorables, c'est à dire au point d'irradiation minimale pendant tout leur transfert dans l'appareil. La formule mathématique indiquant la dose UV en un point A est donné par la formule suivante (Eq-I.2) [ADI07], [BOU06]:

$$DA = \Sigma n(P_i / S_i A) e^{[(\ln \% \text{ perméabilité} / c) d_i]} t \quad (\mathbf{mJ/cm^2}) \quad (\text{Eq-I.2})$$

Avec :

- DA : la dose UV en un point A.
- n : le nombre de lampes.
- d<sub>i</sub> : la distance entre la surface de la lampe (ou de la gaine en quartz de la lampe) et le point A.
- S<sub>i</sub> A : la surface du cylindre entourant la lampe i et passante par le point A.
- c : l'épaisseur de la lame de liquide utilisée.
- t : le temps d'exposition d'un ml de liquide aux UV.
- P<sub>i</sub> : la puissance germicide des lampes en fin de vie.

Ainsi, grâce à cette méthode, le concepteur de l'installation peut déterminer la dose minimale de rayonnement UV qui assure une puissance germicide donnée (par exemple de 40 mJ/cm<sup>2</sup>) au point le plus défavorable de l'appareil [ADI07].

	Elimination	
	90%	99.99%
<b>Bactéries</b>		
Escherichia coli	<b>2.9</b>	<b>11.6</b>
Salmonella typhosa	<b>2.2</b>	<b>8.8</b>
Bacillus subtilis veg	<b>6.1</b>	<b>24.4</b>
Bacillus subtilis spr	<b>11.8</b>	<b>47.2</b>
Streptococcus lactis	<b>6.2</b>	<b>24.8</b>
Pseudomonas fluorescens	<b>3.5</b>	<b>14</b>
Staphiloccocus albus	<b>1.8</b>	<b>7.2</b>
Staphiloccocus aureus	<b>2.6</b>	<b>10.4</b>
Vibrio comman choléra	<b>3.4</b>	<b>13.6</b>
Pseudomonas tumefatiens	<b>4.4</b>	<b>17.6</b>
<b>Virus</b>		
Poliovirus poliomyelitus	<b>3.2</b>	<b>12.8</b>
Hépatite	<b>5.8</b>	<b>23.2</b>

**Tableau I.1:** Quelques exemples de doses UV nécessaires à 253.7 nanomètres pour l'élimination de x% de germes (mJ/cm<sup>2</sup>).

## I.10. Facteurs d'influence de la désinfection UV

La lumière ultraviolette tue les bactéries, les protozoaires et les virus en détruisant leur matériel génétique. La performance de désinfection de l'eau s'exprime en termes de diminution du nombre de bactéries ou "pouvoir destructeur". Chaque système a été conçu pour diminuer le nombre de micro-organismes et l'amener à un certain niveau admissible, lequel dépend des exigences d'une application spécifique ou de la réglementation. La dose disponible de lumière UV pour détruire les bactéries se mesure en Watts / mètre<sup>2</sup>, ce qui équivaut au produit de l'intensité de la lumière avec la durée d'exposition (ou durée de rétention). Tout facteur qui affecte l'intensité de la lumière ou la durée de rétention affectera la performance.

Facteurs affectant la performance		
Dose	Intensité (W/m <sup>2</sup> )	Durée de rétention (en s)
	<p><b>Qualité de l'eau</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ transmission UV</li> <li>➤ Solides en suspension</li> <li>➤ Degré de substances organiques dissoutes</li> <li>➤ Dureté totale</li> <li>➤ Turbidité</li> </ul> <p><b>État de la lampe</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Propreté de la gaine</li> <li>➤ Vieillessement</li> </ul> <p><b>Procédé de traitement</b></p>	<b>Débit</b>

### I.10.1 Transmission UV

Le taux de transmission UV est défini comme le pourcentage de la lumière UV à 254 nm de longueur d'onde qui n'est pas absorbé après avoir traversé un échantillon d'eau d'1 cm d'épaisseur. Le taux de transmission dépend de la quantité de matières dissoutes et en suspension dans l'eau. Un taux de transmission réduit diminue l'intensité de la lumière dans l'eau, avec pour conséquence, une durée d'exposition plus longue afin de délivrer la dose UV correcte. La clarté observée de l'eau n'est pas toujours un bon indicateur du taux de transmission UV car l'eau claire à la lumière visible peut absorber des longueurs d'onde ultraviolettes invisibles [MIG04].

### I.10.2 Solides en suspension

Les solides en suspension comprennent toute particule filtrable présente dans l'eau et se mesurent en mg/l ou en parties par million (ppm). Ils diminuent le taux de transmission UV par diffraction et absorption de la lumière. Ils peuvent aussi réduire le pouvoir de destruction en protégeant les bactéries de l'exposition à la lumière UV [MAS00].

**I.10.3 Carbone Organique Dissous Total (COD)**

Des composés organiques spécifiques dans l'eau de procédés absorberont une partie de l'énergie émise dans le domaine du spectre à longueur d'onde germicide [MIG04].

**I.10.4 Dureté totale**

La présence dans un écoulement d'eau de niveaux élevés de magnésium non organique ou de carbonates de calcium peut contribuer à la formation de dépôts sur la gaine de quartz.

**I.10.5 La Turbidité**

Elle quantifie la diffusion de la lumière par une particule éclairée par une source lumineuse. Elle intègre les M.E.S (matières en suspension) et les matières dissoutes. On peut conclure que plus le traitement d'épuration en amont de la désinfection est efficace, plus les performances de la désinfection seront grandes [CRI07].

**I.10.6 Propreté de la gaine**

Pour assurer une performance maximale de l'unité, il est essentiel de maintenir la propreté des gaines de quartz. Lorsqu'un dépôt s'accumule sur les gaines, la quantité de lumière UV transmise diminuera [MIG04].

**I.10.7 Débit**

Le débit déterminera la durée de rétention, laquelle en retour déterminera la dose UV délivrée pour une intensité UV donnée.

**I.11. Mécanismes de réduction des micro-organismes**

Pour qu'il y ait désinfection, les lampes doivent fournir une radiation lumineuse dont le spectre d'émission se situe dans la région de l'UVc laquelle est la plus efficace à produire un effet germicide. On observe ce dernier lorsque l'énergie de la radiation est absorbée au niveau du matériel génétique (A.R.N et A.D.N). Ce dernier contient l'information qui est transmise

d'une génération à l'autre et qui permet de perpétuer les caractères propres à l'espèce. Plus particulièrement, ce sont les nucléotides, éléments constitutifs des acides nucléiques qui absorbent le rayon, soit les bases puriques (adénosine(A) et guanine(G)) et les bases pyrimidiques (thymine(T) ou uracil(U) et cytosine(C)). Le spectre d'absorption des acides nucléiques se situe dans une longueur d'onde entre 210 et 310 nm avec un maximum à 260nm[CRI07],[MIG04].

### **I.11.1. Virus et bactéries**

Les bases pyrimidiques de l'A.R.N. des virus sont constituées de cytosine et d'uracile, au lieu de thymine et de cytosine pour l'A.D.N. des bactéries. La dimérisation de la thymine est plus facilement induite par les UV que celle de l'uracile.[MAS00] Ceci peut expliquer la plus grande résistance des virus.

### **I.11.2. Poliovirus et réovirus**

Les réovirus ont un double brin d'A.R.N., sur lequel davantage de dommages seraient nécessaires à l'inactivation ou qui permettrait la redondance des informations, ce qui est impossible sur un A.R.N. monobrin tel que celui du poliovirus. Les réovirus sont 3 fois plus grands que les poliovirus et possèdent une double membrane protéinique, qui absorberait mieux les UV [MAS00].

### **I.11.3. La taille du génome**

A l'intérieur du même genre bactérien, la réponse peut être variable selon l'espèce, en raison de la grosseur ou de la composition du génome. Pour que la résultante de l'irradiation soit l'inactivation, les micro-organismes doivent subir de multiples attaques au niveau du génome. Les acides nucléiques requièrent des dizaines voire des centaines de transformations photochimiques pour que la réplication soit rendue non fonctionnelle. En dehors de quelques exceptions, les organismes chez qui on observe une résistance sont généralement ceux qui sont le plus gros (plus de dommages nécessaires et de plus grandes chances de contenir des protéines qui absorbent le rayon). Jagger (1967) rapportait que les dimères de thymine sont plus facilement formés que les autres types. Donc, plus un génome contiendrait de thymine, plus il serait sensible [MAS00].

**I.12. Domaines d'application des UV**

Nous avons beaucoup parlé d'eau car c'est surtout pour le traitement des eaux que les UV sont utilisées. Toutefois, certaines applications spéciales concernent la décontamination de l'air dans les industries d'emballage en particulier.

Généralement, trois classes d'application sont à distinguer :

- Traitement des liquides
- Traitement des surfaces
- Traitement des ambiances

Sinon, en ce qui concerne le traitement de l'eau, le domaine d'application de la méthode est très vaste :

- Traitement de l'eau potable. Alimentation en eau potable publique et particulière, hôtels, restaurants, hôpitaux, écoles, centrales électriques, systèmes militaires, centres sportifs...
- Agriculture et aquaculture. Eau potable et d'usage général pour fermes, laiteries, et bétail...
- Lignes maritimes et chemin de fer. Eau potable sur les parcours maritimes internationaux et intérieurs, plate-forme de forage, voitures restaurant...
- Industries alimentaires et de boissons. Eau de table, eaux de process (dilutions, rinçages), sucre liquide...
- Electronique. Eau de process pour les circuits intégrés et imprimés, eau de lavage recyclée...
- Industries chimiques, pharmaceutiques, cosmétiques. Eau de production de pureté élevée, protection contre les micro-organismes se développant dans les réservoirs, eau de circulation...
- Photochimie, climatisation...

**I.13. Avantage et inconvénients**

Le système de décontamination de l'eau par UV possède de nombreux avantages notamment :

1. Effet secondaire du traitement négligeable sur l'eau, ce qui n'est pas toujours le cas avec les désinfectants chimiques habituellement utilisés (surdosage) ;
2. Rapidité du traitement (temps de contact de quelques secondes) ;
3. Simplicité des installations et la mise en œuvre, automatisation du système ;
4. Risque très limité vis-à-vis du personnel de l'établissement ;
5. Coûts de fonctionnement faibles ;

Ces avantages sont contrecarrés par quelques inconvénients majeurs tels que :

1. La faible durée de vie des lampes
2. La turbidité de l'eau
3. La nécessité de nettoyage des gains de quartz
4. Enfin, le bon fonctionnement de l'appareil nécessite une eau de bonne transmittance

**Conclusion**

Dans ce premier chapitre, nous avons abordé l'utilisation du rayonnement ultraviolet dans le domaine de la désinfection de l'eau comme alternative aux produits chimiques, après quelques comparaisons entre les deux méthodes. Il s'est avéré que l'utilisation de l'ultraviolet est l'alternative la plus respectueuse pour notre environnement de part ses caractéristiques germicide qui attaque directement l'ADN des cellules sans modification de la molécule d'eau, et sans l'ajout de produits chimiques, cependant cette facilité d'utilisation impose un certain nombre de règles à respecter pour assurer la destruction totale des micro-organismes dont la plus délicate est le maintien de la valeur efficace du courant à une valeur qui maximise le rayonnement ultraviolet, et ce par le choix d'une alimentation appropriée qui constituera l'objectif du chapitre suivant .



# Chapitre II

---

## ALIMENTATION ET MODELISATION DE LA LAMPE A DECHARGE

*“La science La science consiste à passer  
d'un étonnement à un autre”  
[Aristote]*

### **Introduction**

Les lampes à décharges sont des dispositifs où sont mis en jeu des phénomènes électriques, thermiques et chimiques, ce qui donne lieu à un système complexe très difficile à modéliser. L'alimentation de la lampe doit être capable d'initier la décharge et de contrôler ensuite l'avalanche électronique une fois déclenchée, un dispositif d'alimentation qui va répondre à ses besoins sera présenté.

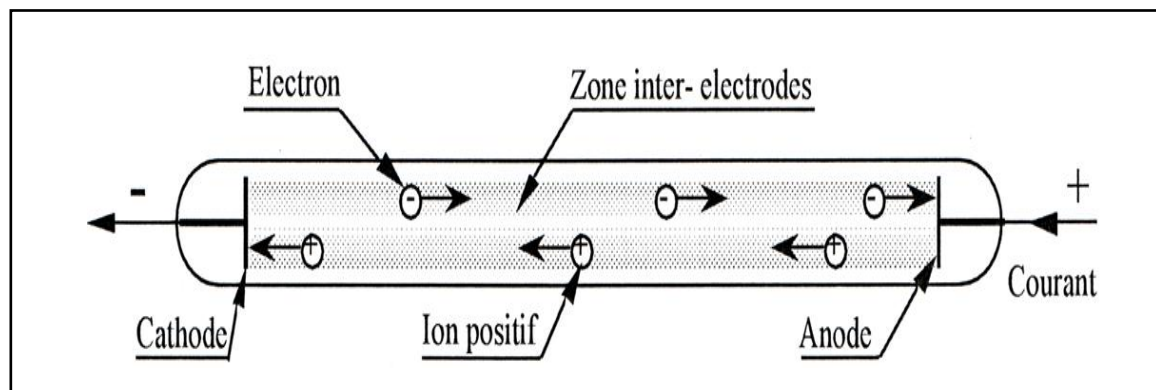
On présentera un modèle de comportement électrique de la lampe afin de reproduire et de comprendre le comportement de la lampe en hautes fréquences, et qui nous servira pour tester les différentes lois de commande sur notre lampe.

## II.1 Décharge électrique

On appelle **décharge électrique** l'ensemble des phénomènes qui résultent du passage d'un courant électrique d'un conducteur solide à un milieu gazeux ainsi que dans le milieu gazeux lui-même.

La propagation du courant n'est possible qu'après un phénomène disruptif qui produit dans le gaz les décharges nécessaires pour rendre ce milieu gazeux conducteur. En effet, aux températures et pression ordinaires, le gaz est isolant électrique qui ne contient qu'un nombre très réduit de particules chargées libres (électron, ions) par unité de volume

Cependant, sous l'action d'un champ externe, des rayons cosmique, des rayons X ou des rayons ultra-violets, on obtient une décharge en produisant des particules chargées libre par ionisation des atomes neutre du gaz. Si le gaz est suffisant, son passage entretient alors cette ionisation et conserve au milieu gazeux ces propriétés de conduction [POI98]

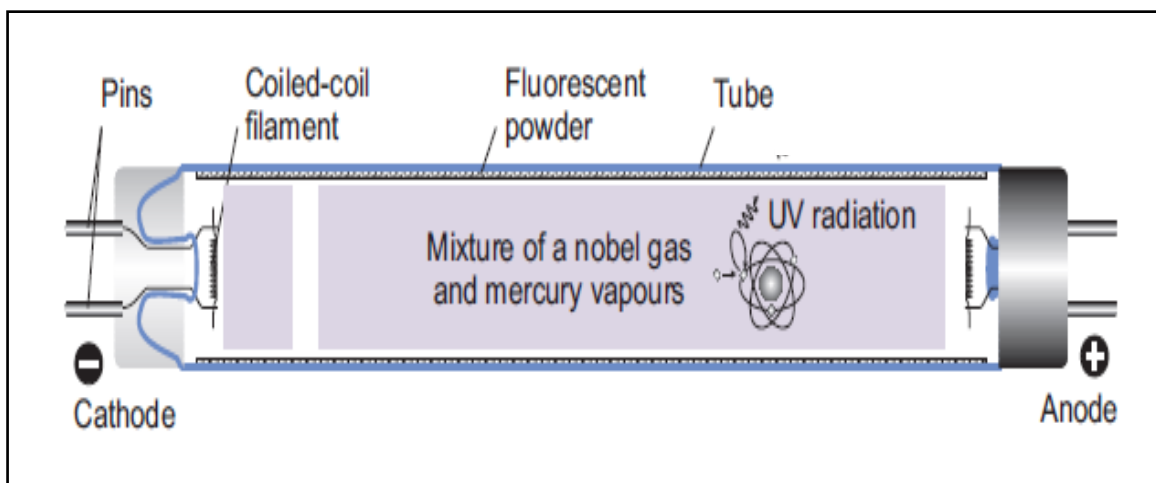


**Figure II.1:** Décharge électrique créée dans un gaz renfermé dans une enceinte

## II.2 Lampes à décharge, l'état de l'art

Bien que la lampe à décharge électrique, réalisée pour la première fois en 1814 par Sir H. Davy et M. Faraday, fût la première application des plasmas, il a fallu attendre plus d'un demi-siècle avant de connaître une réalisation commercialisable. Actuellement, à lui seul, le Japon produit et commercialise quelque 350 millions de lampes fluorescentes par an tandis que l'Europe et les États-Unis ensemble produisent plus d'un milliard de tubes par an!

Une lampe à décharge est constituée d'une enceinte étanche et transparente (ou translucide) qui confine le support gazeux de la décharge tout en laissant échapper le rayonnement que l'on veut utiliser. Cette enceinte, de forme et de dimensions très variables, contient un mélange de gaz et/ou de vapeurs métalliques, susceptibles de rayonner dans le domaine des longueurs d'onde désiré. La pression de l'élément actif peut être comprise entre quelques dizaines de pascals et quelques 106 Pa. L'excitation du mélange est assurée soit par la circulation d'un courant électrique entre deux électrodes, soit par l'injection dans l'ampoule d'un rayonnement électromagnétique haute fréquence (radiofréquences, micro-ondes...).

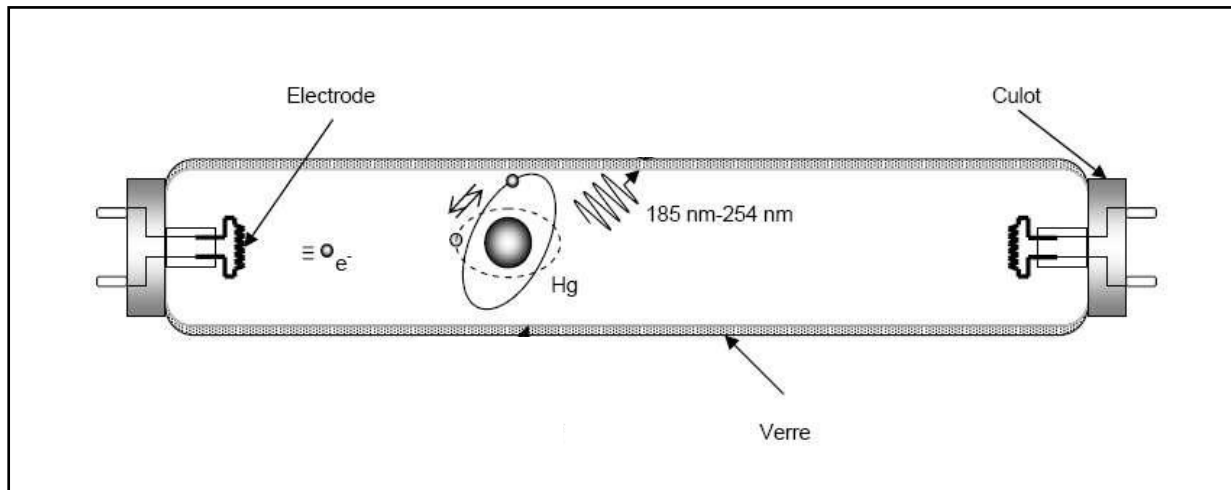


**Figure II.2:** Structure d'une lampe à décharge [WAY71], [WHA00], [KOP08]

Grâce à une meilleure compréhension des processus physiques qui régissent leur fonctionnement, les lampes à décharge se sont considérablement améliorées depuis leur apparition.

### II.3 Principe de fonctionnement d'une lampe à décharge

La Figure (II.3) représente une lampe fluorescente. Elle se compose d'une enceinte de verre recouverte de phosphores et contenant les gaz de remplissage. Aux deux extrémités, les électrodes permettent de relier la lampe au circuit extérieur



**Figure II.3 :** Coupe schématique d'une lampe fluorescente [KOP08]

Les électrons émis à la cathode sont accélérés dans le champ électrique et vont effectuer des collisions au sein d'un mélange gazeux constitué de mercure et de gaz rares. Ils vont exciter les atomes de mercure qui vont émettre un rayonnement dans l'ultra violet.

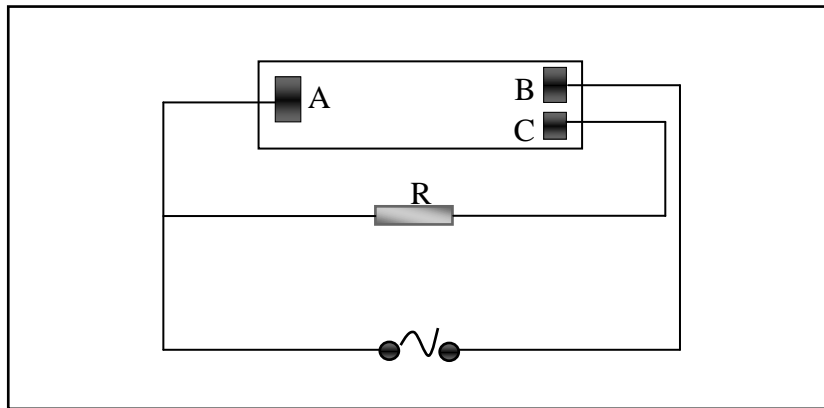
Dans ce type de décharge le mercure, à une pression de l'ordre du mtorr, est le gaz actif alors que le gaz rare (ou le mélange de gaz rares), à une pression de l'ordre du torr, a pour fonction principale de limiter le libre parcours moyen des électrons et est appelé gaz tampon. Sans la présence du gaz rare l'énergie injectée dans la décharge serait en grande partie dissipée sur la paroi du tube [KOP08].

## II.4 Conditions d'alimentation d'une lampe à décharge

L'alimentation d'un système électrique quelconque nécessite avant toutes choses la connaissance des caractéristiques électrique de la charge à alimenter. Il est donc important d'établir un cahier de charge le plus détaillé. Dans le cas bien particulier d'une lampe à décharge deux contraintes importantes doivent être prise en compte [BEN09], [AIS05].

1. La première concerne l'amorçage. Pour pouvoir passer en régime d'arc, il faut créer une décharge dans la lampe, ce qui nécessite le plus souvent l'utilisation d'un dispositif d'amorçage ou une alimentation auxiliaire.

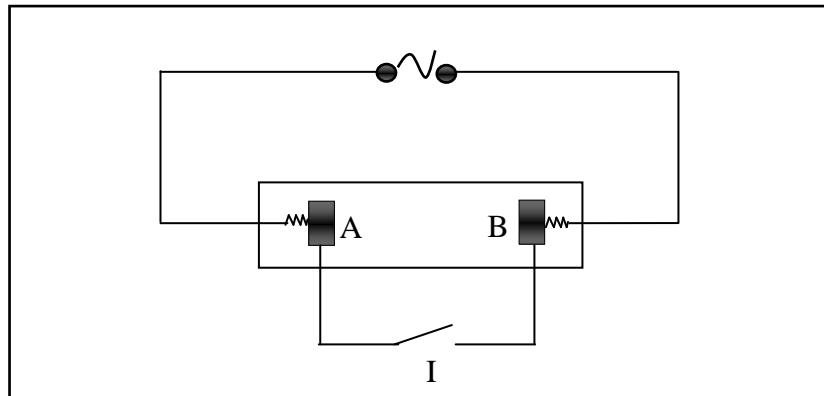
### II.4.1. Emploi d'une électrode auxiliaire.



**Figure II.4:** Electrode auxiliaire

Pour déterminer la tension d'amorçage on prévoit une électrode auxiliaire « C » rapprochée à l'électrode principale « B », et alimentée à travers une résistance R, afin de diminuer l'intensité, l'amorçage se produit d'abord entre « B » et « C », puis entre « B » et « A » ; à ce moment la résistance est shuntée.

### II.4.2. Chauffage préalable des électrodes



**Figure II.5:** Chauffage préalable des électrodes

Les électrodes « A » et « B » sont chauffés par le courant lors de la fermeture de l'interrupteur « I », après établissement de décharge on ouvre « I ».

- La seconde contrainte est la pente négative ou très faiblement positive de la caractéristique statique courant-tension au régime d'arc. Cette dernière contrainte interdit l'alimentation directe de la lampe sur une source de tension et donc sur le réseau. Elle nous impose un système permettant de trouver un point de fonctionnement stable sur la caractéristique (U, I).

## II.5. Caractéristique et couplage

Connaissant les caractéristiques statiques dans le plan tension/courant de la décharge ainsi que de son alimentation, on peut connaître quel sera le point de fonctionnement électrique obtenu par leur association.

### II.5.1 Couplage entre l'alimentation et la décharge

La caractéristique statique d'un dipôle est une courbe définie dans le plan tension/courant, qui associe, à un courant circulant dans le dipôle, la tension qu'on mesure entre ses bornes.

Une méthode, pour connaître le point de fonctionnement obtenu par l'association d'une alimentation avec une charge, est de tracer la caractéristique statique de l'alimentation en convention générateur et celle de la charge en convention récepteur. Toutes les intersections entre les deux caractéristiques sont des points de fonctionnement possibles, mais pas nécessairement stables.

La première difficulté lorsqu'on choisit une alimentation électrique pour les décharges est de savoir, d'une part quel est le point (tension/courant) que l'on cherche à atteindre, d'autre part quel type d'alimentation permet d'obtenir ce point. La connaissance du point de fonctionnement recherché sur la caractéristique statique de la charge nous permet de savoir les caractéristiques statiques de l'alimentation qui permet de l'atteindre. L'approche statique du problème n'indique pas si le point de fonctionnement est stable ou non. Or si un point de fonctionnement n'est pas stable, son obtention n'est pas réalisable. Il faut donc étudier la stabilité des points de fonctionnement trouvés. Cette stabilité peut être analysée à l'aide des caractéristiques statiques de la décharge et de l'alimentation [BUS04], [SAL05].

Considérons un montage composé d'une source de tension parfaite continue, d'une résistance  $R$  et de la lampe (charge à alimenter). L'alimentation par une source de tension correspond au cas où  $R$  très inférieure à l'impédance de la charge figure (II.6).

L'alimentation en source de courant vis-à-vis de la charge, correspond à  $R$  très supérieure à l'impédance de la charge figure (II.7).

## II.5.1.1. Source de tension

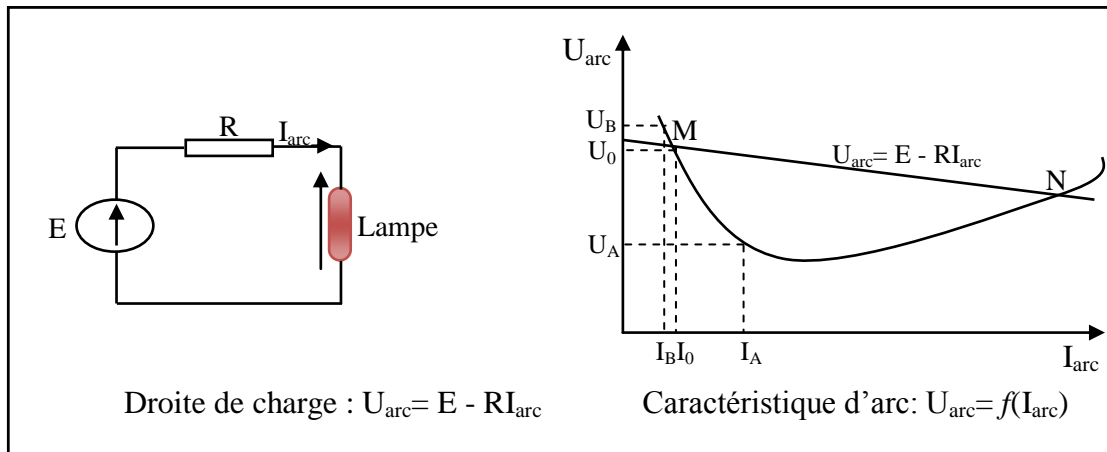
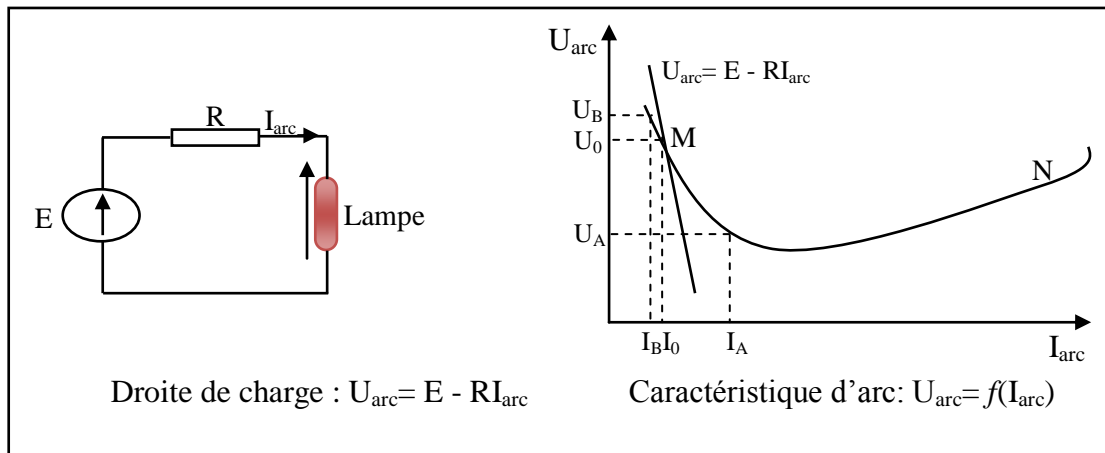


Figure II.6 : Montage en source de tension [SAL05][AIS05]

Au point M, une augmentation  $\Delta I$  entraîne une augmentation de  $I_0$  qui se déplace en  $I_A$ , il en résulte alors une diminution de  $U_0$  en  $U_A$ . Ceci entraîne que  $U_{\text{arc}} < E - RI_{\text{arc}}$  d'où pour rétablir ce déséquilibre, le courant augmente encore. On se trouve alors dans la configuration de départ avec un courant  $I + \Delta I$ . Le système est instable, le courant augmente jusqu'à ce que la zone N soit atteinte. Si la lampe est conçue pour fonctionner dans la zone M, il y a destruction de la lampe. Si la lampe est conçue pour fonctionner dans la zone N, le système atteint un état d'équilibre. Toutefois, même dans ce cas, de petites modifications de tension vont entraîner de grande variation de courant, ce qui est incompatible avec le bon fonctionnement de la lampe.

Une diminution  $-\Delta I$  entraîne une diminution de  $I_0$  qui se déplace en  $I_B$ , il en résulte alors une augmentation de  $U_0$  en  $U_B$ . Ceci entraîne que  $U_{\text{arc}} > E - RI_{\text{arc}}$  d'où pour rétablir ce déséquilibre, le courant diminue encore. On se trouve alors dans la configuration de départ avec un courant  $I - \Delta I$ . Le système est instable, le courant diminue indéfiniment jusqu'à extinction de la lampe.

### II.5.1.2. Source de courant



**Figure II.7:** Montage en source de Courant [SAL05], [AIS05]

Une augmentation  $\Delta I$  entraîne une augmentation de  $I_0$  qui se déplace en  $I_A$ , il en résulte alors une diminution de  $U_0$  en  $U_A$ . Ceci entraîne que  $U_{\text{arc}} > E - R I_{\text{arc}}$ , d'où pour rétablir ce déséquilibre, le courant diminue et tend à revenir rapidement vers le point de départ qui alors un point d'équilibre stable.

Une diminution  $-\Delta I$  entraîne une diminution de  $I_0$  qui se déplace en  $I_B$ , il en résulte alors une augmentation de  $U_0$  en  $U_B$ . Ceci entraîne que  $U_{\text{arc}} < E - R I_{\text{arc}}$  d'où pour rétablir ce déséquilibre, le courant augmente et tend à revenir rapidement vers le point de départ qui alors un point d'équilibre stable [COS00].

## II.6. Nécessité d'une stabilité

Une décharge électrique est un élément d'un circuit qui nécessite un dispositif d'alimentation complexe. Pour initier une décharge dans une enceinte gazeuse, il faut appliquer au gaz une surtension suffisante pour initier une avalanche électronique qui va permettre de rendre le milieu conducteur. De plus, une fois la décharge amorcée, le courant doit être limité pour éviter une détérioration de la lampe ou du circuit d'alimentation. Ceci est dû à la forme particulière de la caractéristique  $V(I)$  qui présente une pente négative. Pour pouvoir stabiliser de façon correcte une décharge électrique, nous devons utiliser un générateur qui se comporte plutôt comme une source de courant vis-à-vis à la charge. Dans la pratique, on choisira en générale l'impédance de telle sorte que la tension d'alimentation soit de l'ordre de deux fois la tension d'arc. Cette impédance que l'on appelle ballast, est



généralement selfique (la décharge alimentée par le courant électrique provoquerait aussitôt amorcer un court circuit si une résistance ou une impédance n'était pas intercalée entre la source de courant et le tube, c'est le ballast).

Outre le rôle de stabilisation de décharge, le ballast est aussi appelé à remplir d'autres tâches telles que [AL00] :

- Contribuer à l'amorçage de la lampe ;
- Permettre la montée en régime de la lampe ;
- Ne pas réduire la durée de vie de la lampe ;
- Ne pas générer de trop forts taux d'harmoniques sur le réseau d'alimentation ;
- Ne pas diminuer le facteur de puissance.

On trouve sur le marché deux grandes catégories de ballast :

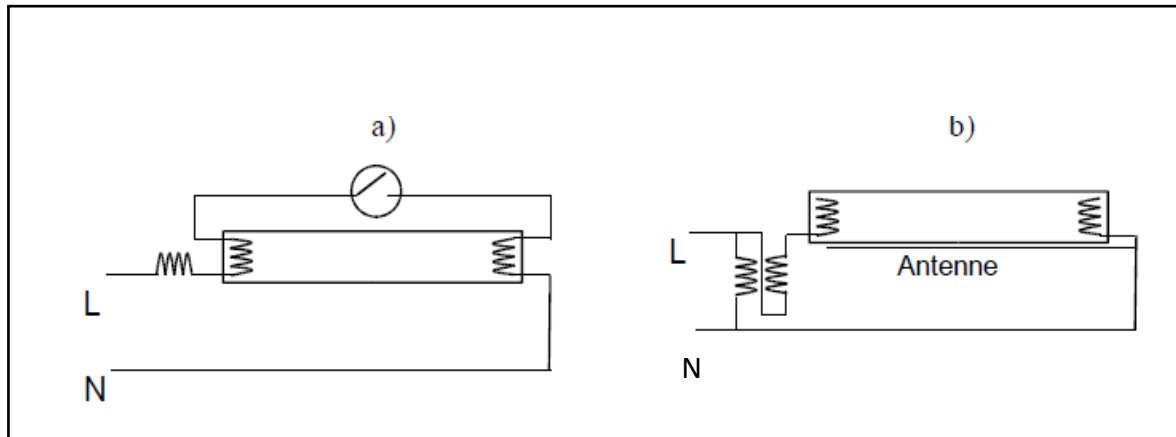
- Les ballasts ferromagnétiques (passifs) qui fonctionnent à la fréquence du réseau (50Hz-60Hz) ;
- Les ballasts électroniques (actifs) qui fonctionnent à des fréquences plus élevées (20kHz-50kHz).

### **II.6.1. Ballasts électromagnétiques**

En Europe les systèmes d'alimentation ferromagnétiques sont composés d'une inductance et d'un starter (bilame) que l'on peut voir sur le schéma de la Figure I-4a).

La lampe étant éteinte, la tension du réseau est suffisamment importante pour établir une décharge dans le starter. Le bilame étant chauffé par la décharge, sa partie mobile va se déformer et entrer en contact avec sa partie fixe. Dès lors, un courant parcourt les deux électrodes du tube qui sont donc chauffées par effet joule. En même temps, une fois la partie mobile du bilame en contact avec la partie fixe, la décharge s'éteint et le bilame se refroidit. A partir d'un refroidissement suffisant, la partie mobile revient vers sa position initiale et coupe ce circuit de nature inductive en induisant une surtension. Cette surtension est directement appliquée aux bornes du tube, et la décharge s'amorce alors si les électrodes sont suffisamment chaudes. Si ce n'est pas le cas, le cycle qui vient d'être décrit recommence jusqu'à ce que la décharge s'amorce. Une fois amorcé, l'inductance limite le courant dans la décharge à son niveau nominal. Un condensateur en parallèle sur le réseau relève le facteur de puissance de l'ensemble [BUS04].

En Amérique du nord, du fait de la faible tension de réseau généralement utilisée (120V), des systèmes à base de transformateur sont préférés. On trouve des ballasts avec (inductance + starter) ou sans (instant start) préchauffage des électrodes, qui sont présentés sur la Figure (II.8).



**Figure II.8:** Ballast ferromagnétiques + starter a) et instant start b) [BUS04]

### II.6.2. Ballasts électroniques

Le type d'alimentation basse fréquence décrit précédemment a tendance à disparaître au profit des alimentations électroniques dont les parts de marchés n'ont cessé de croître depuis leurs premières apparitions.

On trouve deux grandes familles de ballasts électroniques qui sont utilisées suivant le type d'application visé :

- Les ballasts électroniques sans préchauffage des électrodes (instant start) qui sont utilisés dans des applications où les fréquences d'allumage restent faibles (3 par jour au maximum).
- Les ballasts électroniques avec préchauffage des électrodes (rapid start ou programmed start) qui sont plus utilisés dans des applications nécessitant une fréquence d'allumage plus importante. Ces derniers offrent à l'utilisateur la possibilité de réguler le flux lumineux (dimming).

L'utilisation de hautes fréquences par rapport à la fréquence du réseau présente des avantages certains que ce soit du point de vue de la lampe ou de celui de l'alimentation. L'efficacité lumineuse des lampes est améliorée compte tenu de la disparition de la chute de tension anodique et le scintillement est inexistant. La taille des ballasts est réduite notamment par la diminution de taille des capacités et des inductances et les pertes énergétiques sont plus faibles. Côté lampe, la tension d'arc est presque sinusoïdale et les formes d'ondes sont moins déformées. Côté réseau on peut utiliser une correction active du facteur de puissance. Le contrôle est accru et permet d'offrir à l'utilisateur des fonctionnalités supplémentaires et permet d'obtenir des durées de vie plus importantes. Cette dernière remarque n'est pas toujours vraie et notamment pour les ballasts électroniques sans préchauffage des électrodes avec des fréquences d'allumage importantes ou des ballasts étant mal conçus [BUS04].

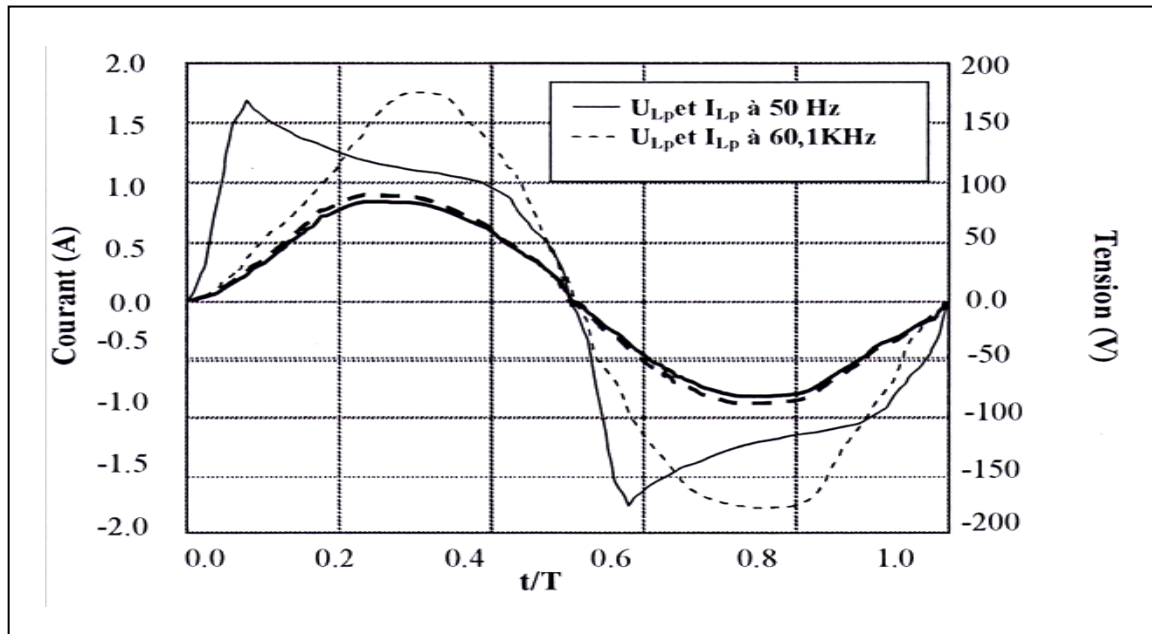
## II.7. Intérêt de la haute fréquence pour la lampe à décharge

Costache [COS00] a fait une étude comparative entre le fonctionnement de l'ensemble convertisseur-lampe à 50 Hz et 60.1 KHz. La charge étudiée est la décharge de référence (D=36 mm, Ar 3 Torr). Les résultats obtenus pour les grandeurs électriques sont résumés dans le tableau suivant :

Fréquence (Hz)	I lampe (A)	V lampe (V)	P lampe (W)	$\Delta V$ Electrode(V)	Pertes Electrodes (W)	$P_{U,V}$ (W)	$\eta_{U,V}$ (%)
<b>50</b>	0.656	112.8	67.2	15	9.84	38.8	57.7
<b>60100</b>	0.656	113	73.2	10	6.56	45.4	61.5

**Tableau :** Valeurs efficaces des courants et tensions ainsi que les différentes puissances de la lampe obtenues de la simulation pour deux fréquence d'excitation **50Hz** et **60.1KHz**

La figure (II.9) donne l'allure des tensions et des courants de lampe à 50Hz et 60.1KHz. Comme nous le remarquons sur cette figure, avec l'augmentation de la fréquence la forme d'onde de la tension aux bornes de la lampe se rapproche d'une forme quasi-sinusoïdale. Le pic de réamorçage à 50Hz à chaque demi-période, disparaît à la fréquence étudiée de 60.1KHz



**Figure II.9:** Forme d'onde des courants et des tensions aux bornes de la lampe U.V Ar 3 Torr alimentée à 50Hz et 60.1KHz [COS00], [BENA09]

Une lampe à décharge est une charge non linéaire, qui même alimentée sous une tension sinusoïdale, génère des courants non-sinusoïdaux sur le réseau. De manière générale, nous pouvons dire que, lorsque l'on passe de 50Hz à 60.1KHz, les modulations des différentes grandeurs en même diminuent considérablement. Ceci entraîne une moindre modulation du rayonnement en même temps qu'une réponse plus linéaire de la lampe.

Pour ces essais, les puissances rayonnées dans l'UV sont respectivement égales à 45.4W à 60.1KHz et 38.8W à 50Hz. Les rendements correspondants sont respectivement 61.5% et 57.7%. L'augmentation de la fréquence d'alimentation a comme effet la diminution de la modulation du flux, ainsi que l'obtention d'une meilleure efficacité (un meilleur rendement).

Notons que, pour une alimentation à fréquence élevée, l'obtention d'un régime de fonctionnement proche de l'équilibre dynamique crée des conditions favorables de fonctionnement pour les électrodes. Ceci a comme effet l'augmentation de la durée de vie de la lampe, car l'électrode est la garantie de la durée de vie du tube [COS00], [AIS05].

**Résultat:** Un maximum de rayonnement U.V, s'obtient en haute fréquence.

II.8. Effet de la température

Les caractéristiques de la lampe fluorescente dépendent de la puissance de fonctionnement et sont très sensibles à la température. Les figures (II.10 a et b) montrent la variation de la tension et du courant d'arc en fonction de la puissance d'arc de la lampe pour différentes températures ambiantes

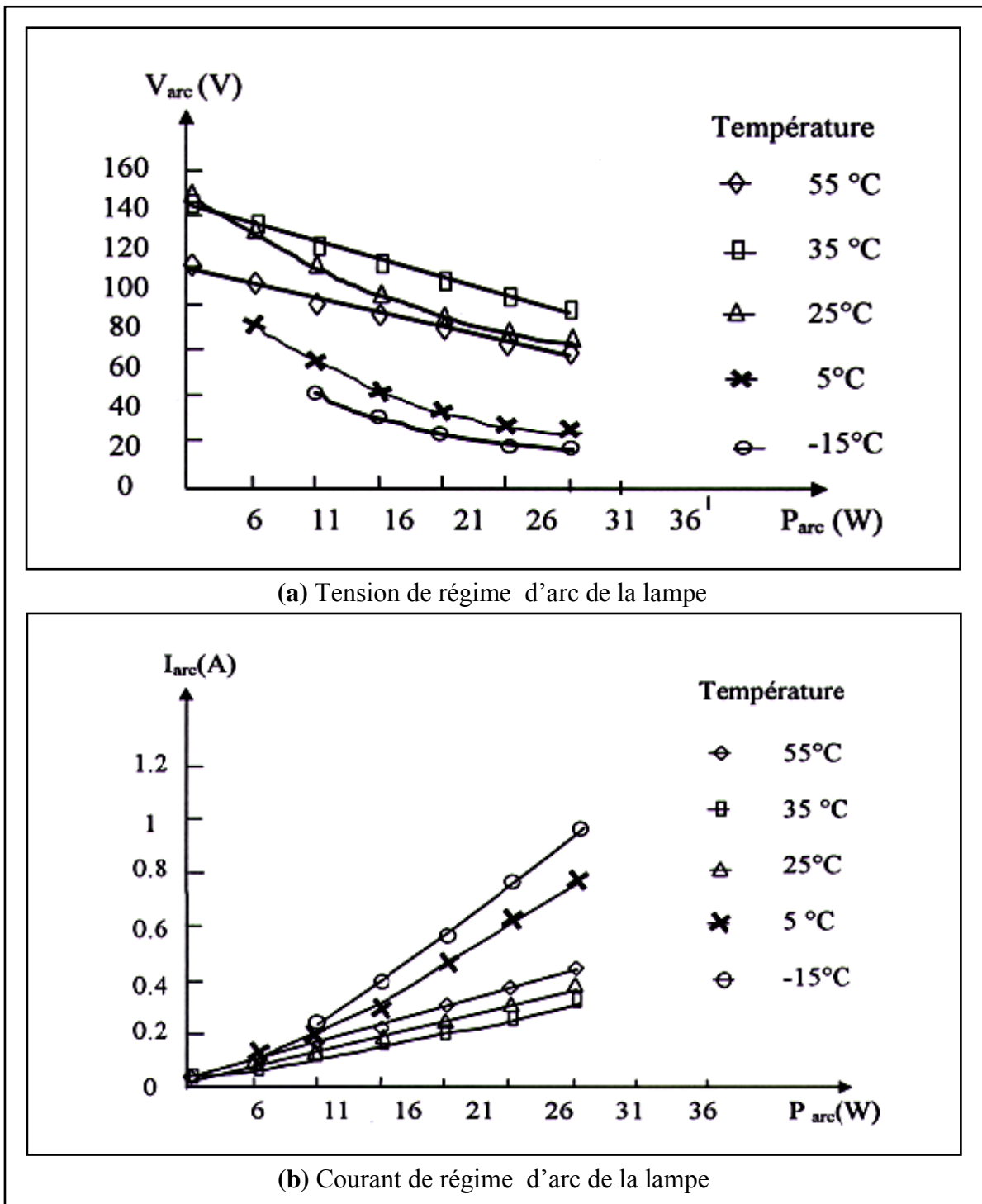


Figure II.10 (a et b): Les variations du courant et de tension de la lampe en fonction de sa puissance et de température [COS00], [BENA09]

Fonctionnement à une température ambiante fixe, le courant d'arc diminue lorsque la puissance d'arc est réduite. Par contre la tension d'arc augmente pendant que la puissance d'arc diminue. Pour une température plus élevée que la température ambiante la tension augmente presque linéairement avec la diminution de la puissance d'arc. Cependant, à une plus basse température, la tension d'arc augmente largement. En outre, la puissance d'arc est limitée à une certaine valeur quand la lampe opère à une plus basse température. Fonctionnant au dessous de ce niveau de puissance, l'arc de la lampe devient instable.

La figure (II.10) indique également que la résistance équivalente de la lampe varie intensivement avec la puissance d'arc ou les variations de la température ambiante. Quand elle opère à la même température ambiante, la résistance équivalente augmente pendant que la puissance d'arc est réduite. Pour un niveau de puissance spécifique, la lampe conçue pour l'usage à la température ambiante a une résistance équivalente maximale à une température de la paroi de l'ampoule d'environ 38°C. La déviation de cette température cause la diminution de la résistance équivalente de la lampe. Cet effet est plus significatif quand la température est diminuée. Ceci implique que le rendement de la lampe sera très différent si une variation dans la température de fonctionnement est produite.

La figure (II.11) montre les courbes caractéristiques d'une lampe fluorescente avec les lignes de charge de deux circuits de ballasts électroniques donnés pour expliquer l'effet de la température sur la puissance de la lampe.

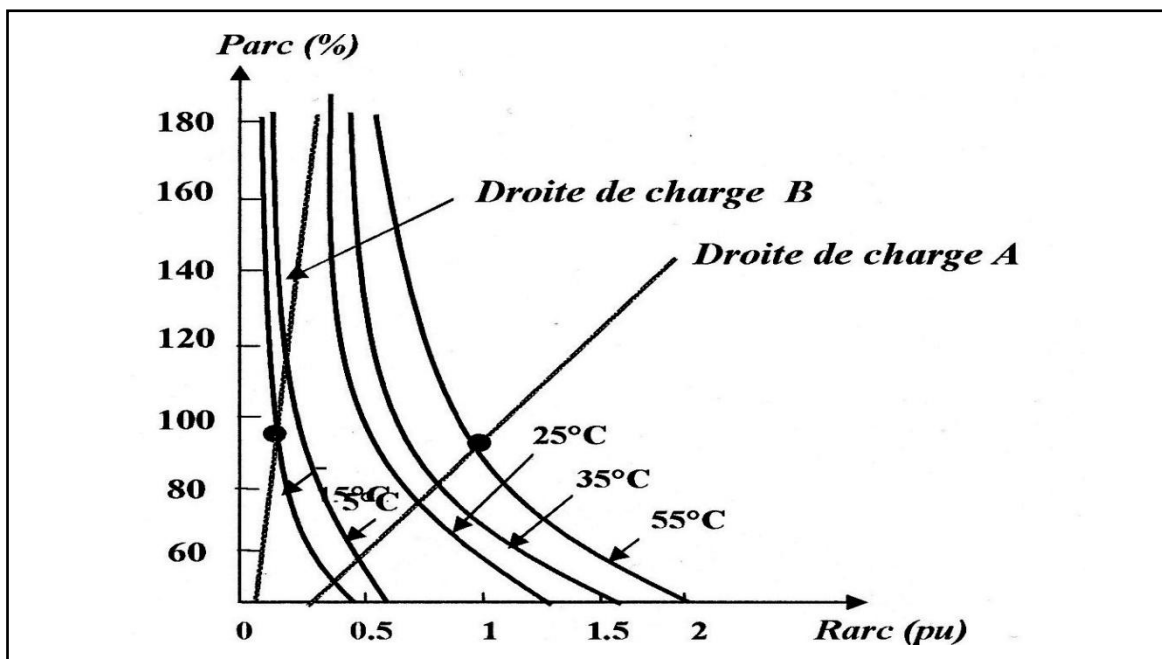


Figure II.11: Effet de la température sur la puissance de la lampe [COS00], [AIS05], [BENA09]

Comme illustré par la ligne de charge A, la lampe fluorescente ne pourra pas être capable de produire assez d'intensité lumineuse à basse température quand le ballast est conçu avec des paramètres du circuit consacrés pour la température ambiante. D'autre part, comme illustré par la ligne de charge B, la lampe sera détruite au dessus d'une autre puissance à la température ambiante quand elle est prévue à l'origine pour l'usage à une température  $-15^{\circ}\text{C}$

## II.9. Influence de courant électrique sur l'émission de la raie 253.7 nm du Hg

La densité électrique dans le plasma est sensiblement proportionnelle au courant électrique. Donc en augmentant le courant la croissance de la densité électronique provoquera tout d'abord une augmentation du nombre de collisions qui conduise à l'état rayonnant. La population du niveau augmente et donc la production du rayonnement croit.

Les résultats obtenus par Sarroukh [SAR99] sont les suivants :

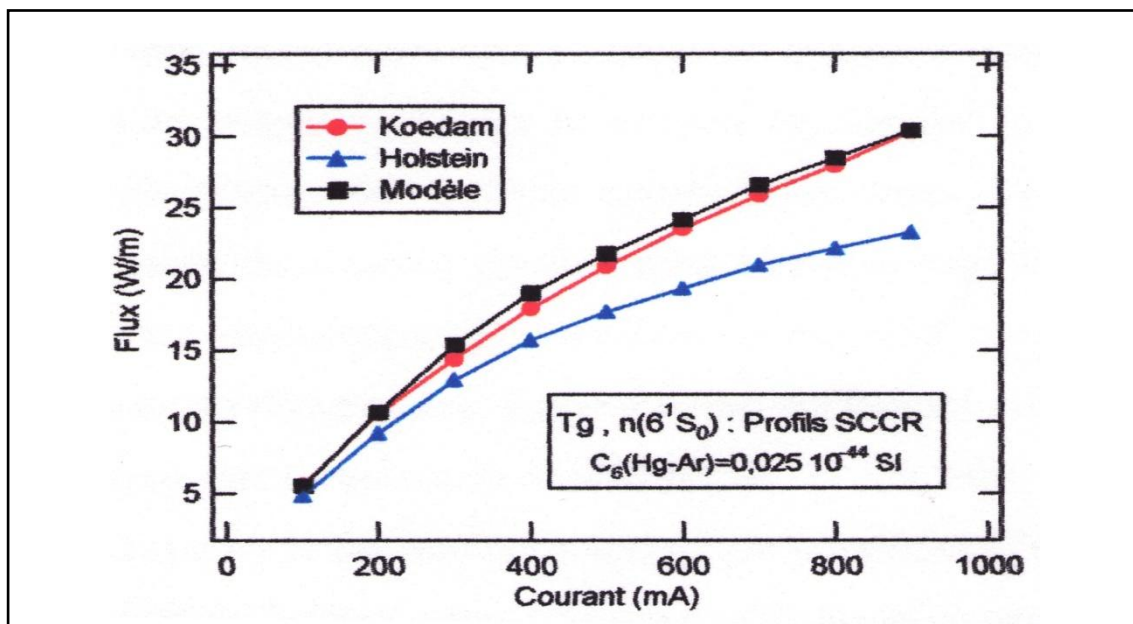


Figure II.12: Flux de la raie 253.7 nm de mercure en fonction du courant [SAR99]

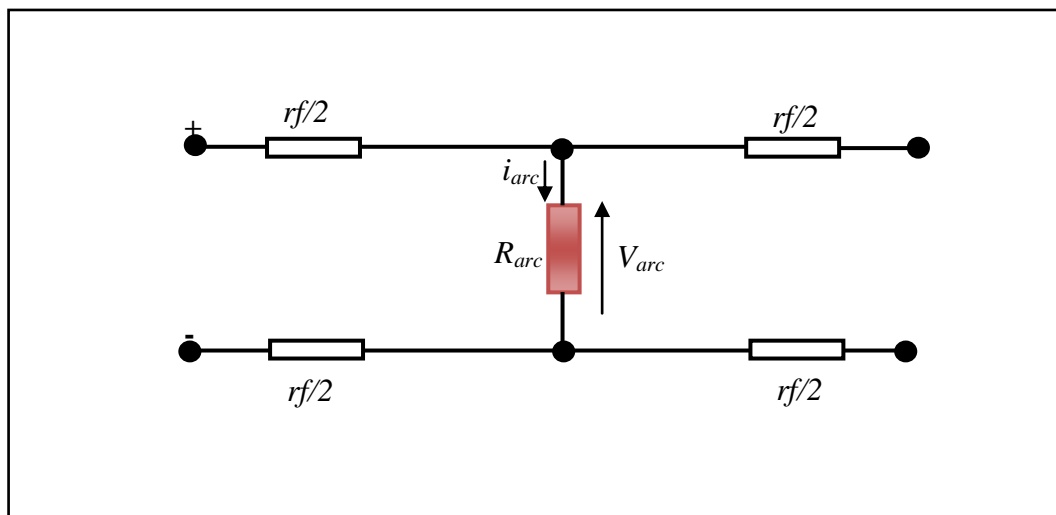
Costache [COS00] confirme ces résultats par ses expériences, en concluant que pour un remplissage à 3 Torr d'argon, il valait mieux alimenter la lampe avec un courant de 0.65 A. En effet, pour une température d'eau de  $20^{\circ}\text{C}$ , valeur fréquemment rencontrée, un gain important en flux ultraviolet est réalisé (plus de 36.4%) en alimentant la lampe à un courant plus fort que d'habitude (400 mA) sans que l'efficacité soit notablement diminuée (moins de 1.1%), avec une augmentation de la température du point froid ( $42 < T_{PF} < 53$ ).

## II.10. Modélisation de la lampe à décharge

Un modèle du circuit électrique comme montré dans la figure (II.13) a été proposé en compatibilité avec le comportement de la lampe fluorescente alimentée par un ballast électronique à haute fréquence.

Le modèle de la lampe est représenté par une résistance dépendante de la puissance et de la température de l'arc de la lampe «  $R_{arc}$  » et une résistance «  $r_f$  » pour chaque filament de cathode. Physiquement la résistance du filament distribue d'une extrémité à l'autre. Dans ce modèle, pour la simplicité, chaque filament de cathode est représenté par un bloc de résistance, qui peut être obtenu du fabricant. Pour des calculs bien précis la résistance équivalente d'arc est reliée entre les points médians des deux filaments de cathode.

La résistance de filament dépend certainement de la température. Cependant, pour un ballast bien conçu, il est désiré de maintenir une température d'émission appropriée pour la cathode. Par conséquent, il n'y aura aucune erreur influente de traiter la résistance du filament comme constante.



**Figure II.13:** Modèle du circuit électrique de la lampe fluorescente

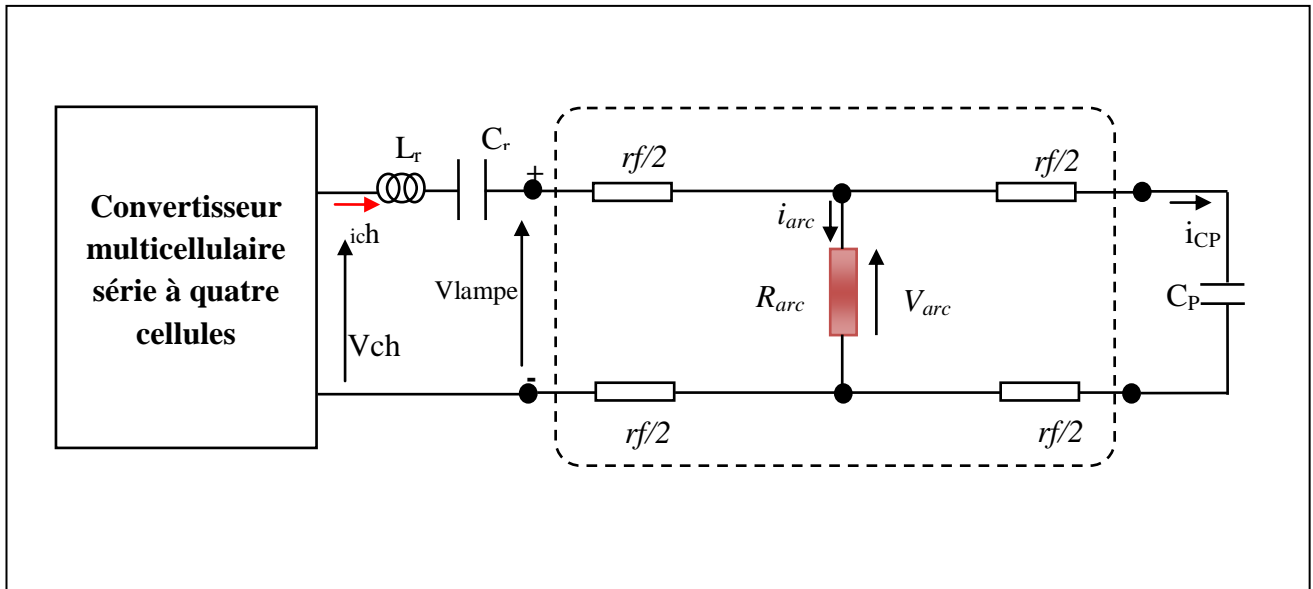
Donc :

$$R_{arc} = \frac{V_{arc}}{i_{arc}} \quad (\text{Eq-II.1})$$

Et

$$P_{arc} = V_{arc} * i_{arc} \quad (\text{Eq-II.2})$$





**Figure II.14:** Circuit équivalent du ballast électronique-lampe à décharge avec convertisseur multicellulaire série à quatre cellules

La tension de la lampe peut être comme suit :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{V_{lampe}} &= \overrightarrow{V_{arc}} + 2\left[\frac{rf}{2}(\overrightarrow{i_{arc}} + \overrightarrow{i_{Cp}})\right] = V_{arc} + i_{arc} * rf + \frac{rf V_{arc}}{rf - jZ_{Cp}} \\ &= \left[\left(1 + \frac{rf^2}{rf^2 + Z_{Cp}^2}\right) V_{arc} + i_{arc} * rf\right] + j\frac{rf * Z_{Cp}}{rf^2 + Z_{Cp}^2} V_{arc} \end{aligned}$$

Donc 
$$\overrightarrow{V_{lampe}} = \left[\left(1 + \frac{rf^2}{rf^2 + Z_{Cp}^2}\right) V_{arc} + rf * \frac{P_{arc}}{V_{arc}}\right] + j\frac{rf * Z_{Cp}}{rf^2 + Z_{Cp}^2} V_{arc} \quad (Eq. II-3)$$

Ou  $i_{Cp}$  est le courant traversant le condensateur parallèle  $C_p$  et  $Z_{Cp}$  est la réactance de  $C_p$

Le courant résonnant de la charge est la somme du courant d'arc et le courant du filament :

$$\vec{i} = \vec{i}_{arc} + \vec{i}_{Cp} = \left(i_{arc} + \frac{rf}{rf^2 + Z_{Cp}^2}\right) V_{arc} + j\frac{Z_{Cp}}{rf^2 + Z_{Cp}^2} V_{arc} \quad (Eq. II-4)$$

Alors la puissance totale de la lampe est obtenu par :

$$P_{lampe} = \text{Re}[\overrightarrow{V_{lampe}} * \vec{i}_r]$$

$$P_{lampe} = \frac{2rf^3}{rf^2 + Z^2 C_p} V_{arc}^2 + \left(1 + \frac{2rf^2}{rf^2 + Z^2 C_p}\right) P_{arc} + rf \left(\frac{P_{arc}}{V_{arc}}\right) \quad (Eq .II-5)$$

### II .10.1. La fonction de transfert en boucle ouvert

La fonction de transfert peut être obtenue en utilisant la conception d'un diviseur de courant classique au circuit électrique (figure II.14).

L'impédance totale du système est donnée par :

(Eq .II-6)

$$Z(s) = \frac{(R_{arc} + rf)L_r C_r C_p s^3 [(2R_{arc} + rf)L_r C_r C_p + L_r C_r] s^2 + (R_{arc} + rf)(C_r + C_p)s + 1}{[(R_{arc} + rf)C_p s + 1]C_r s}$$

Où s l'opérateur de Laplace

$$L'équation de la maille donne : \quad V_{ch}(s) = Z(s).I_{ch}(s) \quad (Eq .II-7)$$

Par suite, la fonction de transfert du système en boucle ouvert ( **FTBO**) est :

$$\frac{I_{ch}}{V_{ch}} = \frac{(R_{arc} + rf)C_r C_p s^2 + C_r s}{(R_{arc} + rf)L_r C_r C_p s^3 [(2R_{arc} + rf)L_r C_r C_p + L_r C_r] s^2 + (R_{arc} + rf)(C_r + C_p)s + 1} \quad (Eq .II-8)$$

Nous tenons à exprimer la fonction de transfert du système vis-à-vis du courant d'arc de la lampe  $I_{arc}$  dans le but de réguler ce courant plus loin. En appliquant le théorème du diviseur de courant, on aura :

$$I_{arc}(s) = \frac{\frac{1}{C_p s} + rf}{R_{arc} + rf + \frac{1}{C_p s}} \cdot I_{ch}(s) \quad ; \quad \text{soit} \quad ; \quad I_{arc}(s) = \frac{rf \cdot C_p s + 1}{(R_{arc} + rf) C_p s + 1} \cdot I_{ch}(s) \quad (Eq .II-9)$$

Par suite, le courant de la lampe  $I_{ch}(s)$  est :

$$I_{ch}(s) = \frac{(R_{arc} + rf) C_p s + 1}{rf \cdot C_p s + 1} \cdot I_{arc}(s) \quad (Eq .II-10)$$

En injectant (Eq .II-9) dans (Eq .II-7), on aura la fonction de transfert suivante : (Eq .II-11)

$$\frac{I_{arc}}{V_{ch}} = \frac{rf C_r C_p s^2 + C_r s}{(R_{arc} + rf) L_r C_r C_p s^3 [(2R_{arc} + rf) L_r C_r C_p + L_r C_r] s^2 + (R_{arc} + rf)(C_r + C_p) s + 1}$$

## Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons mis en évidence l'intérêt d'alimenter la lampe à décharge par une source de courant afin d'obtenir un point de fonctionnement stable dans la zone d'arc, ainsi que les différents paramètres qui l'influencent.

Un modèle électrique simplifié de la lampe avec le ballast électronique en considérant que la conductance du gaz est constante selon [COS00] a été présenté en vu de la commande, or dans la réalité la conductance du gaz peut varier en fonction de la puissance et de la température, pour pallier aux imperfection du modèle et rejeter les perturbations qui peuvent survenir sur le courant d'arc une commande robuste vis-à-vis des variations paramétriques et des perturbations va être présenter dans le chapitre 4.

# Chapitre III

---

## MODELISATION ET COMMANDE DU CONVERTISSEUR MULTICELLULAIRE

*“On fait la science avec de faits, comme  
on fait une maison avec des pierres :  
mais une accumulation de  
fait n'est pas plus une science qu'un  
tas de pierres n'est une maison”*  
[Henri Poincaré]

### **Introduction**

Depuis de nombreuses années, dans le domaine de l'électronique de puissance, nous assistons à une augmentation sans cesse des puissances commutées par les convertisseurs statiques afin de répondre aux exigences industrielles.

Ces convertisseurs de puissance sont utilisés comme des interfaces entre la source et la charge. Ils permettent d'adapter la puissance nécessaire à celle consommée.

Cette dernière décennie a été marquée par des avancés technologiques sans précédents dans le domaine de l'électronique de puissance : apparition de nouveaux interrupteurs capables de commuter rapidement et supportant une grande tension et un grand courant, apparition de nouvelles structures de conversion multiniveaux, et développement de nouvelles stratégies de commande.

### III.1. Les convertisseurs multicellulaires

La structure multicellulaire est une topologie de conversion d'énergie. Elle est apparue au début des années 1990 à la suite d'un brevet déposé par *A. Meynard et H. Foch*. Cette structure a été imaginée dans le but de générer une tension de sortie multiniveaux.

Son principe repose sur la mise en série ou la superposition de cellules de commutation afin de répartir la tension totale au niveau de chaque cellule et ainsi faire partager les contraintes en tension sur plusieurs composants semi-conducteurs. On reste ainsi à des amplitudes de tension supportables par les interrupteurs de puissance.

### III.2. Intérêt des convertisseurs multicellulaires

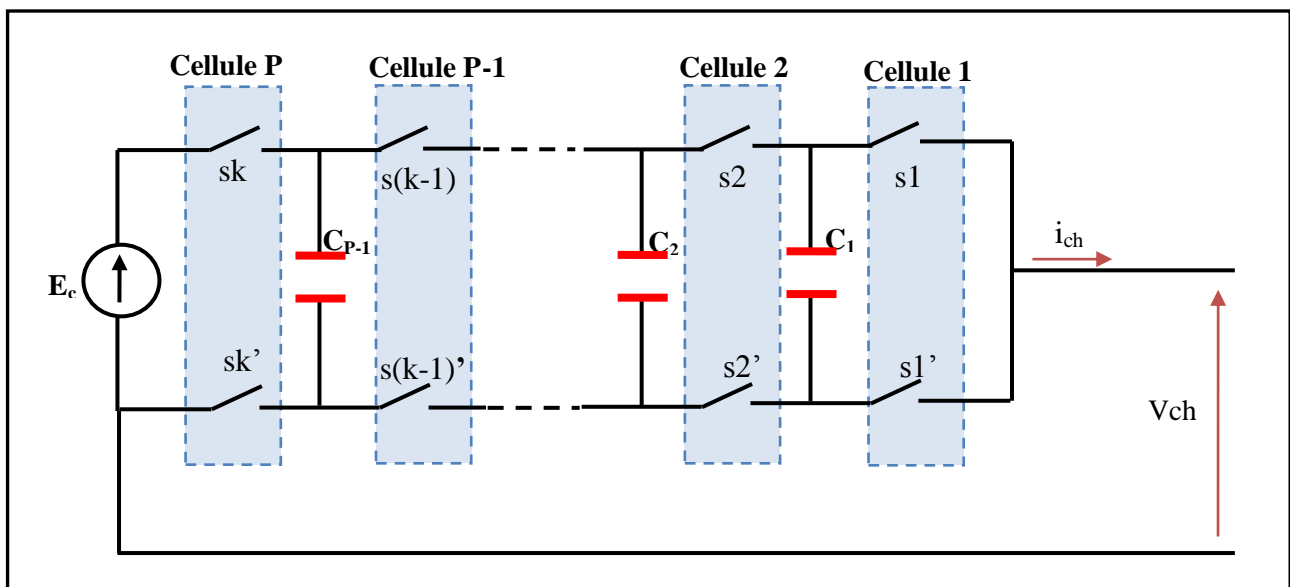
Le fonctionnement de ce type de convertisseur est alors basé sur l'idée de répartir les contraintes de tension (mise en série) ou sur les interrupteurs de puissance de façon à fournir en sortie des valeurs tensions plus élevées. C'est là où réside l'un des majeurs avantages de l'utilisation des convertisseurs multiniveaux.

En plus, la tension de sortie multiniveaux délivrée par ce type de convertisseur présente d'intéressantes qualités spectrales. Le fait de multiplier le nombre de niveaux intermédiaires permet de réduire l'amplitude de chaque front montant ou descendant de la tension de sortie. L'amplitude des raies harmoniques est par conséquent d'autant moins élevée. Dans le cas d'un fonctionnement en modulation de largeur d'impulsion, cette structure permet de supprimer certaines familles de raies harmoniques.

En plus de ces deux grands avantages, les convertisseurs multicellulaires offre la possibilité de partitionnement vis-à-vis de la défaillance la plus courante : interrupteur en cours circuit. L'utilisation efficace de cette propriété nécessite un choix convenable des composants de la structure, de même qu'une réaction rapide tant de point de vue de la détection et l'isolation du défaut que du point de vue de la reconfiguration des cellules saines restantes.

### III.3. Les convertisseurs multicellulaires série ou à cellules imbriquées

Au début des années 90, une nouvelle structure de convertisseurs multiniveaux a été inventée [GAT97][PIN00][TLE07]. Cette structure est basée sur la mise en série de cellules de commutation entre lesquelles une source de tension flottante est insérée. Ces sources de tension flottantes sont réalisées par des condensateurs. La structure multicellulaire série peut être adaptée à toutes les configurations : montage en hacheur ou en onduleur (avec un point milieu capacitif), en demi pont ou en pont complet. La figure III.1 montre le schéma d'un bras d'un convertisseur multicellulaire série à N niveaux, constitué de  $p=N-1$  cellules.



**Figure III.1:** Bras d'un convertisseur multicellulaire série à N niveaux.

Le premier avantage de ces convertisseurs est la réduction des contraintes en tension sur les interrupteurs. Les sources de tension flottantes imposent sur chaque cellule une contrainte en tension égale à  $E/P$ . Par contre, le calibre en courant des interrupteurs est identique à celui d'une structure classique : c'est le courant de la charge [PIN00]. Les convertisseurs multicellulaires série permettent aussi d'améliorer la forme d'onde de la tension de sortie et permettent plus de flexibilité pour obtenir des différents niveaux de tension [GUT01].

### III.4. Fonctionnement du convertisseur multicellulaire

Avant de développer les propriétés des convertisseurs multicellulaires série en régime établi, nous allons faire un certain nombre d'hypothèses sur les interrupteurs et les sources qui sont utilisées.

- les interrupteurs sont idéalisés (tension de saturation, courant de fuite et temps de commutation nuls).
- Les interrupteurs étant parfaits, les temps morts sont supposés nuls.
- Les sources de tension et courant sont supposées parfaites. Cela signifie que l'impédance série d'une source de tension est nulle et que celle d'une source de courant est infinie.
- Le courant est considéré comme constant pendant une période de commutation. [BEN09]
- Les deux interrupteurs de chaque cellule ne doivent en aucun cas être passants en même temps pour éviter de court-circuiter les sources de tension. Ceci est obtenu grâce au contrôle des deux interrupteurs avec des signaux quasi-opposés en intégrant des temps morts à chaque commutation [TAI08].

#### III.4.1. Tension bloquée par une cellule

Chaque cellule ( $Cell_k$ ,  $k=1$  à  $p$ ) est encadrée par deux sources de tensions flottantes intermédiaires  $V_{Ck}$  et  $V_{Ck-1}$ , avec  $V_{C0}=0$  et  $V_{Cp}=E$ , ainsi, les tensions appliquées aux cellules de commutation sont imposées par ces sources de tensions.

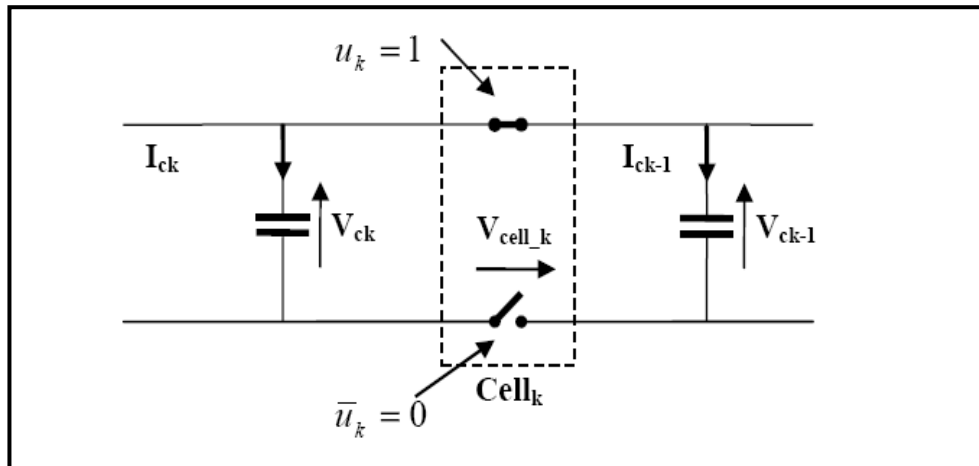


Figure III.2: Cellule élémentaire de commutation.

Chaque interrupteur bloqué doit maintenir à ses bornes une tension maximum égale à :

$$V_{\text{cell}_k} = \frac{E}{p} \quad k \in \{1, \dots, p\} \quad (\text{Eq. III-1})$$

Le courant circule à travers le composant complémentaire qui est dans un état passant. Cette condition est assurée si la tension aux bornes des condensateurs flottants de chaque cellule vérifie la relation suivante :

$$V_{\text{ck}} = k \cdot \frac{E}{p} \quad k \in \{1, \dots, p\} \quad (\text{Eq. III-2})$$

Néanmoins, cette valeur théorique évolue en pratique, car il y a circulation de courant dans les condensateurs en fonction des signaux de commande. L'ondulation résultante est stable si la valeur moyenne du courant est nulle sur une période de découpage :

$$\langle i_{\text{ck}} \rangle = 0 \quad k \in \{1, \dots, p\} \quad (\text{Eq. III-3})$$

Ce critère de stabilité est vérifié à partir du moment où les ordres de commande des cellules de commutation ont un rapport cyclique identique, peu importe leur déphasage relatif  $\Phi_k$ . Ce dernier a cependant une influence conséquente sur le spectre harmonique de la tension de sortie [MEY91], [MEY92]. Si les signaux de commande de chaque cellule sont régulièrement déphasés, tel que :



$$\Phi_k = (k-1) \cdot \frac{2\pi}{p} \quad k \in \{1, \dots, p\} \quad (\text{Eq. III-4})$$

Les variations de la tension de sortie sont limitées à  $E/p$  et la fréquence apparente en sortie est proportionnelle à la fréquence de découpage instantanée des semi-conducteurs :

$$f_{\text{apparente}} = p \cdot f_{\text{découpage}} \quad (\text{Eq. III-5})$$

De fait, les premiers harmoniques du spectre de sortie apparaissent à cette fréquence et possèdent une amplitude  $p$  fois plus faibles que celle d'un onduleur 2 niveaux classique. Les raies harmoniques se situent ensuite aux fréquences de valeurs entières multiples de  $p$  [GAT3]. Cette commande est obtenue en comparant des porteuses décalées de  $2\pi/p$  avec une modulant sinusoïdale.

Un onduleur multicellulaire série avec  $p$  cellules peut générer :

$$N_{\text{niveau}} = p + 1 \quad (\text{Eq. III-6})$$

Niveaux de tension en sortie et possède :

$$N_{\text{configuration}} = 2^p \quad (\text{Eq. III-7})$$

### III.4.2. Courant commuté par une cellule

Le courant  $i_{ch}$  prélevé par la source de courant aval est une variable continue dans le temps, quelles que soient les commutations des cellules, il doit pouvoir circuler. En l'occurrence, en partant de  $i_{ch}$  et en remontant vers la source de tension  $E$ , on remarque que le courant passant par l'interrupteur du haut de la  $k^{\text{ème}}$  cellule est [BOU08]:

$$i_{\text{TA}_k} = u_k \cdot i_{ch} \quad (\text{Eq. III-8})$$

Courant passant par l'interrupteur du bas est :

$$i_{\text{TB}_k} = (1 - u_k) \cdot i_{ch} \quad (\text{Eq. III-9})$$

Selon l'état des interrupteurs des deux cellules adjacentes  $cell_{k+1}$  et  $cell_k$ , le courant passe ou pas dans le condensateur séparant ces deux cellules :

$$i_{ck} = (u_{k+1} - u_k) * i_{ch} \quad (Eq. III-10)$$

$u_k$  : la commande appliquée à l'interrupteur du haut de la  $k_{\text{ème}}$  cellule [0 : ouvert, 1 : fermé].

### III.5. Modélisation des convertisseurs multicellulaires

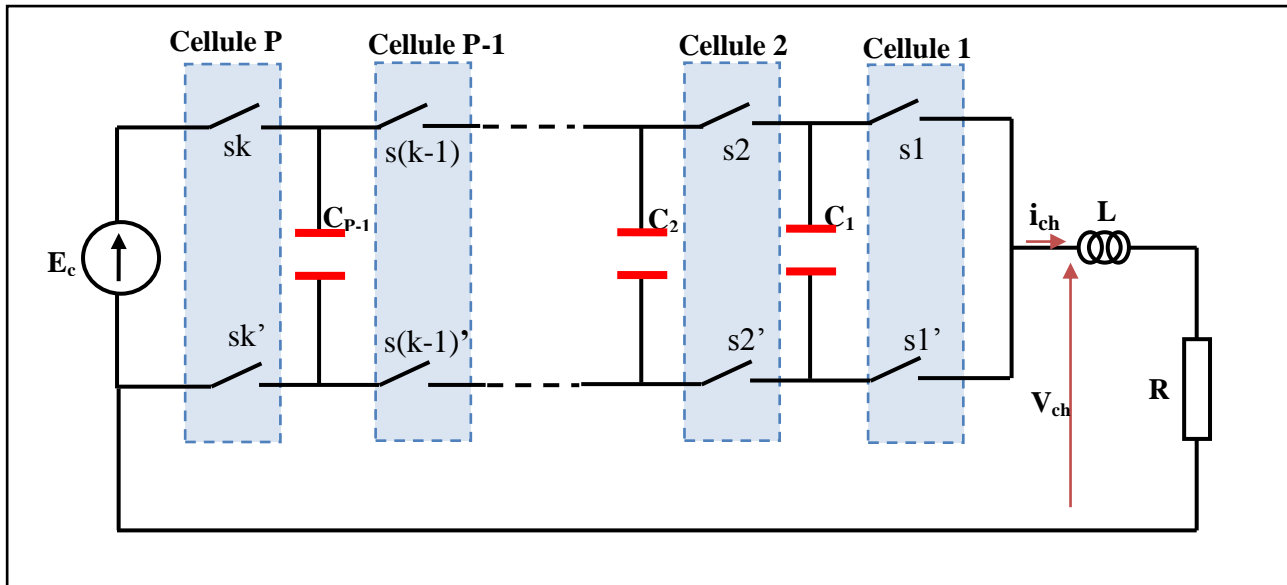
La modélisation est une étape très importante dans la simulation, la synthèse de lois de commande, et la conception d'observateurs. La précision de la modélisation est définie selon l'objectif visé.

Un convertisseur multicellulaire série possède  $p$  interrupteurs à commander pour régler  $p$  grandeurs d'état qui sont les tensions flottantes et le courant de charge. Ces interrupteurs fournissent  $2p-1$  degrés de libertés ( $p$  rapports cycliques et  $p-1$  déphasages). Selon les degrés de liberté utilisés pour la définition d'une stratégie de commande, trois types de modèles ont été développés: Le modèle instantané, le modèle moyen et le modèle harmonique [BOU08].

#### III.5.1. Le modèle instantané

Le modèle exact ou instantané prend en compte les commutations des interrupteurs et les grandeurs instantanées des variables d'état du convertisseur. Il permet de représenter l'état de chacune des cellules de commutation du convertisseur à l'échelle de la période de découpage et les phénomènes harmoniques liés à la commutation des interrupteurs [TAC98]. Ce modèle est utilisé pour valider en simulation des lois de commande mises en œuvre à partir du modèle moyen.

La figure présente un convertisseur multicellulaire série fonctionnant en hacheur associé à une charge R-L. Ce convertisseur représente une association de  $p$  cellules de commutation.



**Figure III.3:** Hacheur à  $p$  cellules associé à une charge R-L.

Le modèle instantané représentant un bras multicellulaire série à  $p$  cellules fonctionnant en hacheur associée à une charge R-L est regroupé dans le système d'équation (Eq. III-17).

L'évolution de la tension aux bornes du condensateur  $C_k$  est liée à l'évolution du courant  $i_{Ck}$ , ce dernier étant fonction des deux cellules adjacentes et du courant  $i_{ch}$ , le courant de charge d'un condensateur  $C_k$  est fonction des signaux de commande  $u_{k+1}$  et  $u_k$  :

$$i_{ck} = (u_{k+1} - u_k) * i_{ch} \tag{Eq. III-11}$$

La tension aux bornes du condensateur  $C_k$  est liée au courant  $i_{Ck}$  par :

$$i_{Ck} = C_k \frac{dv_{Ck}}{dt}$$

Donc, il vient :

$$\frac{dv_{Ck}}{dt} = \frac{(u_{k+1} - u_k) * i_{ch}}{C_k} \tag{Eq. III-12}$$

Cette équation est généralisée aux  $(p-1)$  condensateurs flottants.

D'après la loi des mailles, la tension de sortie  $v_{ch}$  est la somme des tensions aux bornes des interrupteur  $s_k'$ . Ces tensions sont définies par :

$$v_{sk}' = (v_{Ck} - v_{C(k-1)}) * u_k \quad (Eq. III-13)$$

D'ou la tension aux bornes de la charge  $V_{ch}$  devient :

$$V_{ch} = \sum_{k=1}^p v_{sk}' = \sum_{k=1}^p (v_{Ck} - v_{C(k-1)}) * u_k \quad (Eq. III-14)$$

Avec  $v_{C0} = 0$  et  $v_{Cp} = E$ .

$$V_{ch} = (u_1 - u_2) * V_{C1} + (u_2 - u_3) * V_{C2} + \dots + (u_{p-1} - u_p) * V_{Cp-1} + u_p * E \quad (Eq. III-15)$$

Dans le cas d'une charge RL, l'évolution du courant dans la charge est donnée par :

$$\frac{di_{ch}}{dt} = \frac{Vs}{L} - \frac{R}{L} i_{ch} \quad (Eq. III-16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv_{c1}}{dt} = \frac{1}{C_1} * (u_2 - u_1) * i_{ch} \\ \frac{dv_{c2}}{dt} = \frac{1}{C_2} * (u_3 - u_2) * i_{ch} \\ \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ \frac{dv_{cp-1}}{dt} = \frac{1}{C_{p-1}} * (u_p - u_{p-1}) * i_{ch} \\ \frac{di_{ch}}{dt} = \frac{1}{L} * (u_1 - u_2) * V_{C1} + \frac{1}{L} * (u_2 - u_3) * V_{C2} + \dots + \frac{1}{L} * (u_{p-1} - u_p) * V_{Cp-1} + \frac{u_p}{L} * E - \frac{R}{L} * i_{ch} \end{array} \right. \quad (Eq. III-17)$$

### III.5.2. Modèle moyen

L'inconvénient majeur de la représentation des convertisseurs multicellulaires série par le modèle exact est qu'elle est discontinue puisque avec les hypothèses posées (interrupteurs parfait), l'état des cellules passe de 0 à 1 en un temps nul [Gat97][TLE07].

Pour contourner ce problème, il est possible d'effectuer une modélisation aux valeurs moyennes du système en supposant faible la période de découpage par rapport aux constantes de temps mises en jeu dans le système.

Dans le modèle aux valeurs moyennes, chaque grandeur, dans le modèle exact, est remplacée par sa valeur moyenne sur la période de découpage. Ce modèle est continu et permet de faire la synthèse des lois de commande. Ainsi nous posons  $V_{Ck}=\langle v_{Ck} \rangle$ ,  $I_{Ck}=\langle i_{Ck} \rangle$ ,  $I_{ch}=\langle i_{ch} \rangle$ ,  $V_{ch}=\langle v_{ch} \rangle$  et  $\alpha_k=\langle u_k \rangle$ , avec  $\langle v_{Ck} \rangle$ ,  $\langle i_{Ck} \rangle$ ,  $\langle i_{ch} \rangle$ ,  $\langle v_s \rangle$  et  $\langle u_k \rangle$  sont respectivement les valeurs moyennes sur une période de découpage des grandeurs  $V_{Ck}$ ,  $i_{Ck}$ ,  $i_{ch}$ ,  $V_{ch}$  et  $S_k$ . Le modèle aux valeurs moyennes devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv_{c1}}{dt} = \frac{1}{C_1} * (\alpha_2 - \alpha_1) * I_{ch} \\ \frac{dv_{c2}}{dt} = \frac{1}{C_2} * (\alpha_3 - \alpha_2) * I_{ch} \\ \vdots \\ \frac{dv_{cp-1}}{dt} = \frac{1}{C_{p-1}} * (\alpha_p - \alpha_{p-1}) * I_{ch} \\ \frac{di_{ch}}{dt} = \frac{1}{L} * (\alpha_1 - \alpha_2) * V_{C1} + \frac{1}{L} * (\alpha_2 - \alpha_3) * V_{C2} + \dots + \frac{1}{L} * (\alpha_{p-1} - \alpha_p) * V_{Cp-1} + \frac{\alpha_p}{L} * E - \frac{R}{L} * I_{ch} \end{array} \right. \quad (Eq. III-18)$$

Cette méthode a l'avantage de la simplicité et de la maîtrise de la fréquence de découpage mais présente l'inconvénient d'être basée sur la valeur moyenne donc de privilégier des évolutions lentes. Elle fut la première à être utilisée pour définir des commandes pour le convertisseur multicellulaire.

### III.5.3. Modèle harmonique

Le modèle harmonique repose sur la décomposition en série de fourrier des signaux de commande. Il permet d'obtenir une représentation dynamique d'un convertisseur multicellulaire série en prenant en compte tous les phénomènes harmoniques. Son principe est de déterminer à partir de la connaissance des signaux de commande ( $\alpha_i$  et  $\varphi_i$   $i=1, \dots, p$ ) la phase et l'amplitude des harmoniques aux bornes des interrupteurs du bas. L'harmonique de

la tension de sortie est donc obtenue en sommant ces tensions. En fonction des caractéristiques de la charge et en supposant que le courant est en régime permanent (constante de temps de la charge inférieure à la période de découpage), on détermine les harmoniques du courant dans la charge qui permettent de déterminer l'évolution des tensions des condensateurs.

L'équation d'état s'écrit alors sous la forme :

$$\dot{X} = A(\alpha, \varphi)X + B(\alpha, \varphi)E \quad (\text{Eq. III-19})$$

Où  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p)^T$  correspond au vecteur des rapports cycliques,  $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p)^T$

vecteur de phase et  $X = (V_{c1}, V_{c2}, \dots, V_{c(p-1)})^T$  le vecteur d'état.

Chacun d'entre ces trois modèles peut être utilisé pour synthétiser des lois de commande. Les deux premiers modèles, basés sur une analyse des équations régissant l'évolution des grandeurs d'état en fonction de l'état des interrupteurs du convertisseur, se différencient par la nature de leurs entrées : les rapports cycliques pour le modèle moyen et les signaux de commande pour le modèle instantané. Le modèle harmonique permet quant à lui d'agir sur les  $p$  rapports cycliques et sur les  $(p - 1)$  déphasages inter-cellules simultanément.

### III.6. Architecture du convertisseur utilisé pour notre application

L'onduleur à point milieu de la source de tension, est un cas intéressant puisqu'à partir d'une structure hacheur, on alimente la charge par une entrée à point milieu ce qui nous permet de fonctionner en onduleur. Pour établir le modèle instantané on suppose que le point milieu est idéal (Ondulation de tension nulle).

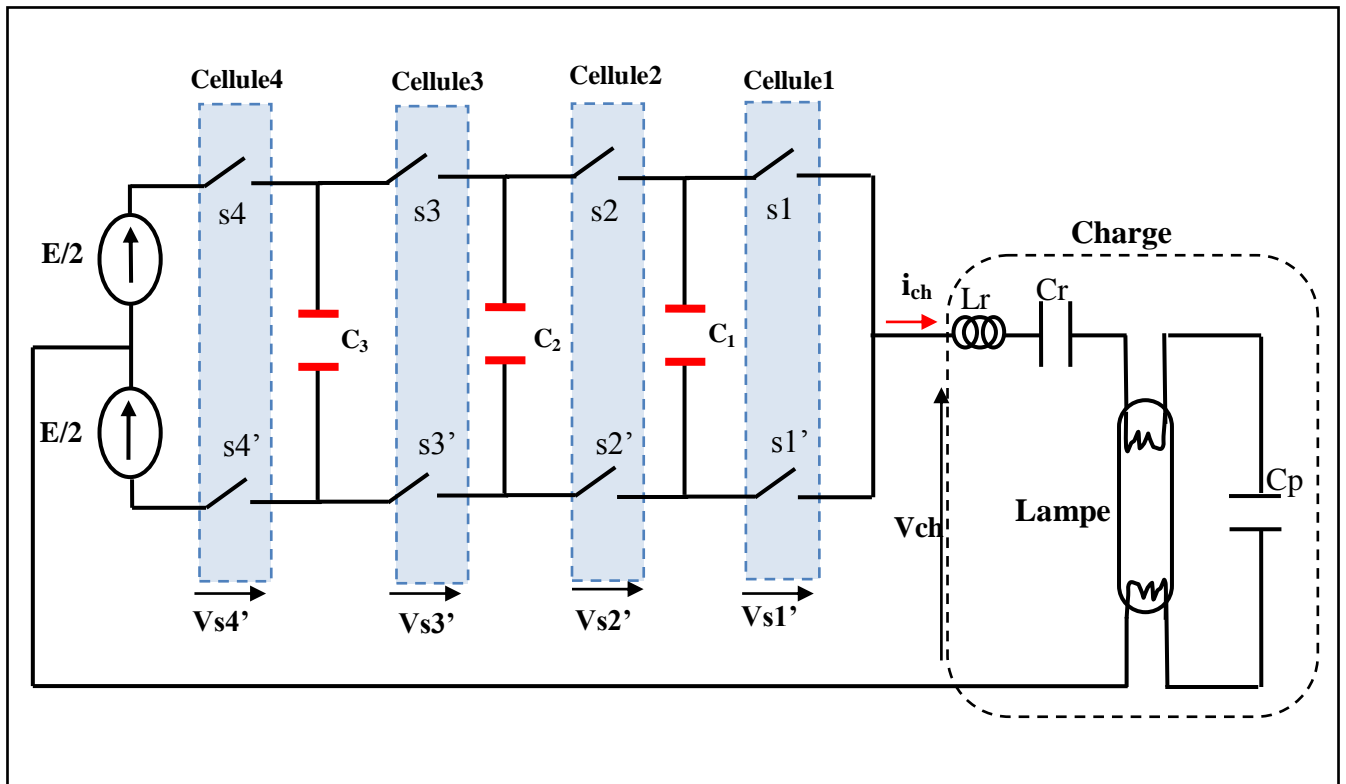


Figure III.4: Onduleur quatre cellules série à point milieu de la source de tension,

La modélisation instantanée du convertisseur nous donne le système d'équations suivant :

Cette fois ci, la tension aux bornes de la charge s'écrit :

$$V_{ch} = \sum_{k=1}^p V_{sk}' - \frac{E}{2} \quad (Eq. III-20)$$

$$V_{ch} = (u_1 - u_2) * V_{C1} + (u_2 - u_3) * V_{C2} + \dots + (u_{p-1} - u_p) * V_{C_{p-1}} + u_p * E - \frac{E}{2}.$$

dans notre cas p = 4

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv_{c1}}{dt} = \frac{1}{C_1} * (u_2 - u_1) * i_{ch} \\ \frac{dv_{c2}}{dt} = \frac{1}{C_2} * (u_3 - u_2) * i_{ch} \\ \frac{dv_{c3}}{dt} = \frac{1}{C_3} * (u_4 - u_3) * i_{ch} \\ V_{ch} = (u_3 - u_4) * V_{C3} + (u_2 - u_3) * V_{C2} + (u_1 - u_2) * V_{C1} + u_4 * E - \frac{E}{2} \end{array} \right. \quad (Eq. III-21)$$

### III.7. La commande par MLI

Nous devons générer les ordres de commande pour les différentes cellules de l'association. Ces ordres de commande devront être déphasés entre eux de  $2\pi/p$  (pour avoir un fonctionnement optimal). Plusieurs solutions sont à notre disposition et nous allons présenter la plus simple et la plus facile d'utilisation en pratique, c'est la MLI naturelle.

Dans la MLI naturelle, les ordres de commande de chaque cellule sont générés par l'intersection entre une porteuse triangulaire de fréquence  $f_p$  et le signal modulant sinusoïdal de fréquence  $f_{mod}$ .

Les équations permettant de générer les signaux triangulaires notés  $p_k$  évoluant sur l'intervalle  $[0,1]$  sont :

$$P_k = 1/2 * [2/\pi * \text{Arcsin} [\sin(2 * \frac{p_i}{p} * t - \Phi_k + \frac{p_i}{2})] + 1] \quad (\text{Eq. III-22})$$

$$\begin{cases} P_1 = 1/2 * [2/\pi * \text{Arcsin} [\sin(2 * p_1 * f_p * t - \Phi_1 + \frac{p_1}{2})] + 1] \\ P_2 = 1/2 * [2/\pi * \text{Arcsin} [\sin(2 * p_2 * f_p * t - \Phi_2 + \frac{p_2}{2})] + 1] \\ \vdots \\ P_p = 1/2 * [2/\pi * \text{Arcsin} [\sin(2 * p_p * f_p * t - \Phi_p + \frac{p_p}{2})] + 1] \end{cases}$$

L'angle  $\Phi_k$  sera choisi égale  $\Phi_k = (k-1) * \frac{2 * \pi}{p}$ , Ou  $p$  représente le nombre de cellule

La comparaison entre les signaux triangulaires  $p_k$  et les modulantes, notées  $mod_k$ , permet d'obtenir les ordres de commande  $u_k$ .

- si  $mod_k \geq p_k$  alors  $u_k = 1$
- si  $mod_k \leq p_k$  alors  $u_k = 0$

Les signaux de commande sont obtenus par modulation de largeur d'impulsions par la technique MLI naturelle et le modulant  $mod_k$  est sinusoïdal:



$$mod_k = r \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{mod} \cdot t) \quad (Eq. III-23)$$

Avec  $r$  représente la profondeur de modulation comprise entre 0 et 1.

Le choix d'un déphasage régulier de  $2 \cdot \pi / p$  entre les différentes cellules apporte une amélioration significative en niveau du spectre de la tension de sortie, on constate ainsi que les harmoniques se regroupent en familles centrées autour des fréquences multiples de  $p \cdot m \cdot f_{mod}$ , où  $m = \frac{f_p}{f_{mod}}$  représente l'indice de modulation.

### III.8. Le contrôle proportionnel des tensions de sortie

Nous présentons dans ce paragraphe une commande proportionnelle prenant en compte uniquement la régulation des tensions condensateurs, cette méthode, correspondant à une commande en durée, est basée sur une modulation des rapports cycliques.

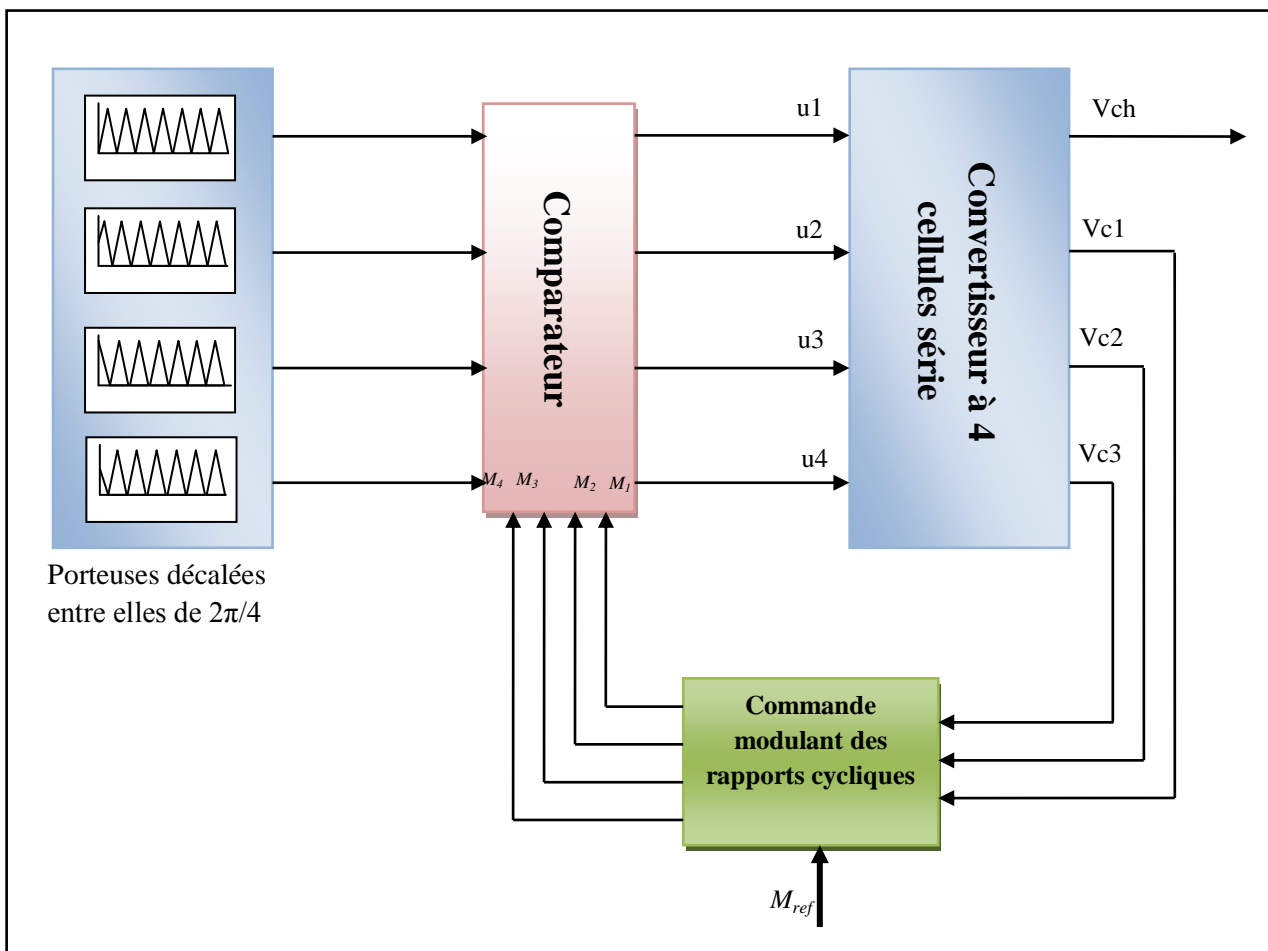


Figure III.5: Schéma de principe du contrôle proportionnel des tensions flottantes

Dans le cas d'un fonctionnement en onduleur à p cellules en demi-pont capacitif, la loi de commande doit prendre en compte le signe du courant de charge qui est sinusoïdal [TAC98]

$$M_p = M_{ref}$$

$$M_k = M_{k+1} - \text{sign}(i_{ch}) * G * \left( \frac{C_k}{T_{dec} * I_{chmax}} \right) * \left( \frac{k * E}{p} - V_{C_k} \right) \quad (\text{Eq. III-24})$$

$M_{ref}$  s'exprime par :

$$M_{ref} = \frac{p_{mod}}{2} * \sin(2 * \pi * f_{mod} * t) + 1/2 \quad (\text{Eq. III-25})$$

Ou  $\text{sign}(i_{ch})$  représente le signe de  $i_{ch}$ .

De plus, la valeur du courant de charge prise en compte dans le gain proportionnel n'est plus la valeur moyenne mais la valeur maximale  $I_{chmax}$  du courant de charge.

Le synoptique de cette loi de commande est représenté à la figure (III.6).

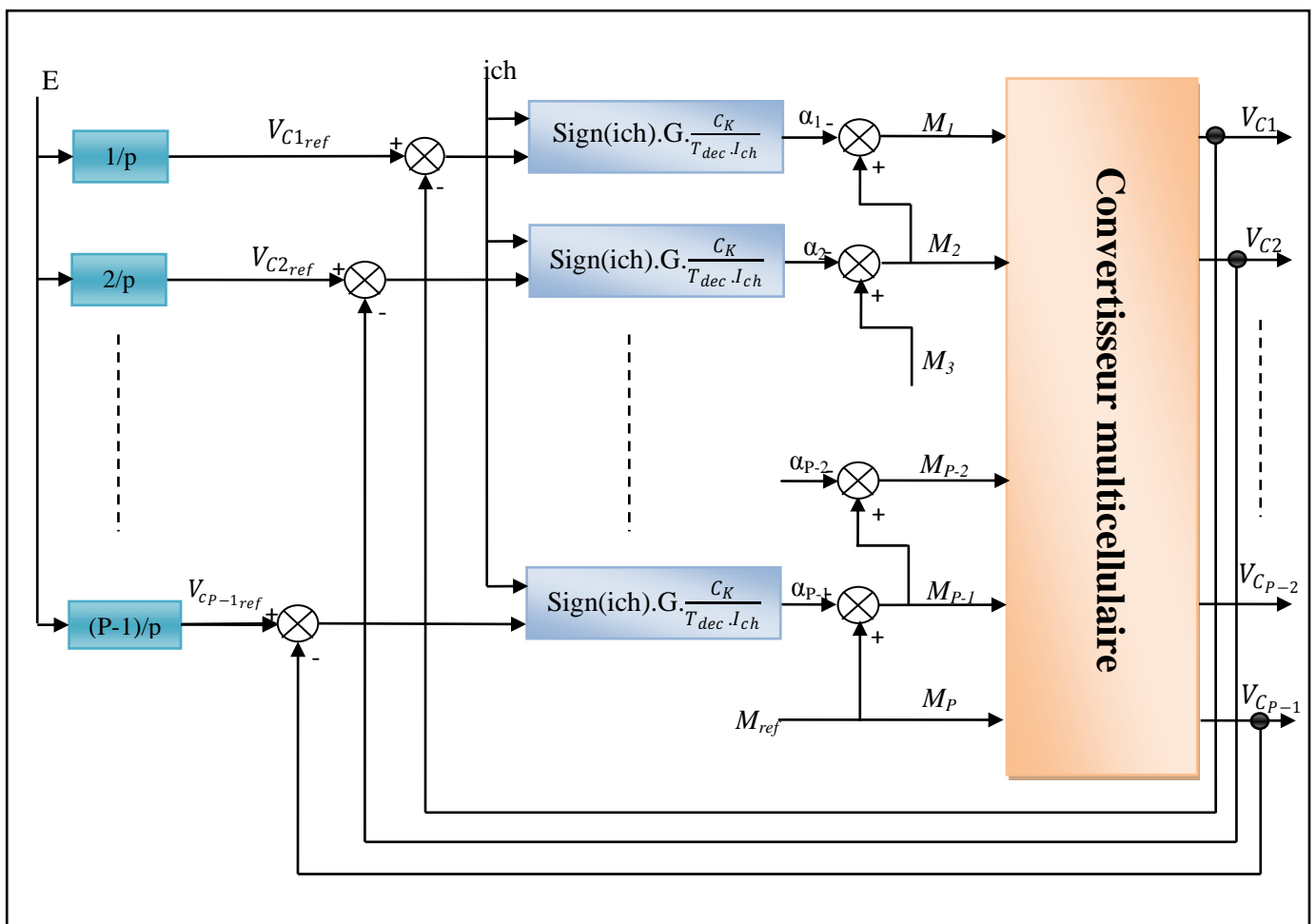


Figure III.6: Structure de la loi de commande modulant les rapports cycliques [CAR96], [TAC98]

Le choix du gain  $G$  est effectuée d'une manière à assurer une non-saturation des grandeurs de commande et une dynamique maximale [CAR96][TAC98].

Dans le cas du démarrage du convertisseur avec des tensions nulles, l'équation nous permettons d'obtenir le gain  $G$  est :

$$M_{1init} = M_{ref} - \text{sign}(ich) * \frac{p*(p-1)}{2} * \frac{G * C_k}{T_{dec} * I_{ch_{max}}} * \frac{E}{p} \quad (Eq. III-26)$$

Le gain  $G$  est alors calculé tel que  $M_{1init} = 0$ , sachant que la modulante de référence

$M_{ref} = 1/2$  et que le courant de charge est positif  $\text{sign}(ich) = 1$  alors :

$$G = \frac{T_{dec} * I_{ch_{max}}}{C_k * (p-1) * E} \quad (Eq. III-27)$$

### III.9. Commande directe des convertisseurs multicellulaires série

L'objectif de la commande directe est double. D'une part, elle doit assurer les tensions aux bornes des condensateurs flottants à leurs valeurs de référence, aussi bien en régime statique qu'en régime dynamique. D'autre part, le niveau discret de tension demandé en sortie du convertisseur doit être assuré. Ainsi, l'algorithme de commande va choisir l'état des cellules de commutation du convertisseur en se basant sur [GUT01], [TLE07]:

- La connaissance du niveau discret de tension demandé. La tension de sortie peut prendre  $(p+1)$  valeurs dont l'amplitude idéale de chaque niveau est donnée par :

$$V_j = j * \frac{E}{p} \quad j=0, 1, \dots, p \quad (Eq. III-28)$$

Où  $V_j$  représente le niveau discret  $j$  de tension et  $p$  est le nombre de cellules

- La connaissance de l'état des tensions aux bornes des condensateurs flottants par rapport à sa valeur d'équilibre. La tension aux bornes de chaque condensateur flottant peut prendre trois états :

1. Lorsque son niveau de tension se trouve dans une bande autorisée, autour de sa valeur d'équilibre. C'est l'état d'équilibre.

2. Lorsque son niveau de tension se trouve au-dessus de la bande autorisée. C'est l'état de déséquilibre supérieur.

3. Lorsque son niveau de tension se trouve au-dessous de la bande autorisée. C'est l'état de déséquilibre inférieur.

Dans ce qui suit, nous allons appliquer la méthode de commande directe sur un bras convertisseur multicellulaire série à cinq niveau (quatre cellules  $p = 4$ ).

Voici la table donnant la tension de sortie théorique ( $V_{ch}$ ), la charge ou décharge des condensateurs ( $C_1, C_2, C_3$ ) en fonction des commandes des interrupteurs ( $u_1, u_2, u_3, u_4$ ) et du sens du courant (I+, I-).

Tension de sortie					Commande des interrupteurs				Equilibrages des condensateurs						n°
					u1	u2	u3	u4	C1		C2		C3		
-E/2	-E/4	0	E/4	E/2					+I	-I	+I	-I	+I	-I	
x					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	x				0	0	0	1	0	0	0	0	+	-	2
	x				0	0	1	0	0	0	+	-	-	+	3
		x			0	0	1	1	0	0	+	-	0	0	4
	x				0	1	0	0	+	-	-	+	0	0	5
		x			0	1	0	1	+	-	-	+	+	-	6
		x			0	1	1	0	+	-	0	0	-	+	7
			x		0	1	1	1	+	-	0	0	0	0	8
	x				1	0	0	0	-	+	0	0	0	0	9
		x			1	0	0	1	-	+	0	0	+	-	10
		x			1	0	1	0	-	+	+	-	-	+	11
			x		1	0	1	1	-	+	+	-	0	0	12
		x			1	1	0	0	0	0	-	+	0	0	13
			x		1	1	0	1	0	0	-	+	+	-	14
			x		1	1	1	0	0	0	0	0	-	+	15
				x	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	16

Tableau III.1: Commande des interrupteurs

Dans les colonnes concernant l'équilibrage des condensateurs, les 0 traduisent une inutilisation du condensateur, les + correspondent à une augmentation de la charge du condensateur tandis que les – interprètent une diminution.

Grâce à cette table nous pouvons établir une loi de commande permettant de maintenir l'équilibrage des condensateurs en considérant que le courant est constant sur une période de découpage. Comme nous pouvons le voir également, si nous voulons générer une tension de  $-E/2$  ou  $E/2$  les condensateurs ne sont pas sollicités.

Par contre si nous voulons produire une tension de  $-E/4$  ou  $E/4$  pour garder l'équilibrage des condensateurs il faudra utiliser quatre cycles de commande différents. De même pour générer une tension nulle il nous faudra utiliser au minimum deux cycles (complémentés) afin de conserver l'équilibrage des condensateurs.

Comme nous pouvons le constater dans le tableau ci-dessus, ce convertisseur permet de générer cinq niveaux de tension différents. Pour avoir une meilleure précision lors de la commande de lampe à décharge nous pouvons générer dix sept valeurs de tensions (moyenne), à partir des cinq tensions de référence en appliquant quatre niveaux de tension lors d'une période de découpage. Ce choix est arbitraire, nous aurions pu en générer neuf ou plus...

Voici, sur le diagramme ci-dessous, les tensions pouvant être générées (à gauche) à partir des cinq niveaux de base et les seuils de tensions (à droite) permettant de générer la commande des interrupteurs.

Pour augmenter la précision de contrôle du courant d'arc, il faut générer d'autres niveaux intermédiaires dont la valeur moyenne sur une période de découpage est égale à la valeur de la tension, désirée à la sortie du convertisseur. Le nombre de niveaux intermédiaire est arbitraire, dans notre cas nous avons choisi dix sept niveaux de tension.

Pour générer nos dix sept valeurs de tension possibles, nous avons divisé la période découpage en quatre. De plus, sachant qu'il faut au minimum quatre cycles de commande pour garder l'équilibrage des condensateurs, nous avons de nouveau subdivisé par quatre la période de découpage du convertisseur.

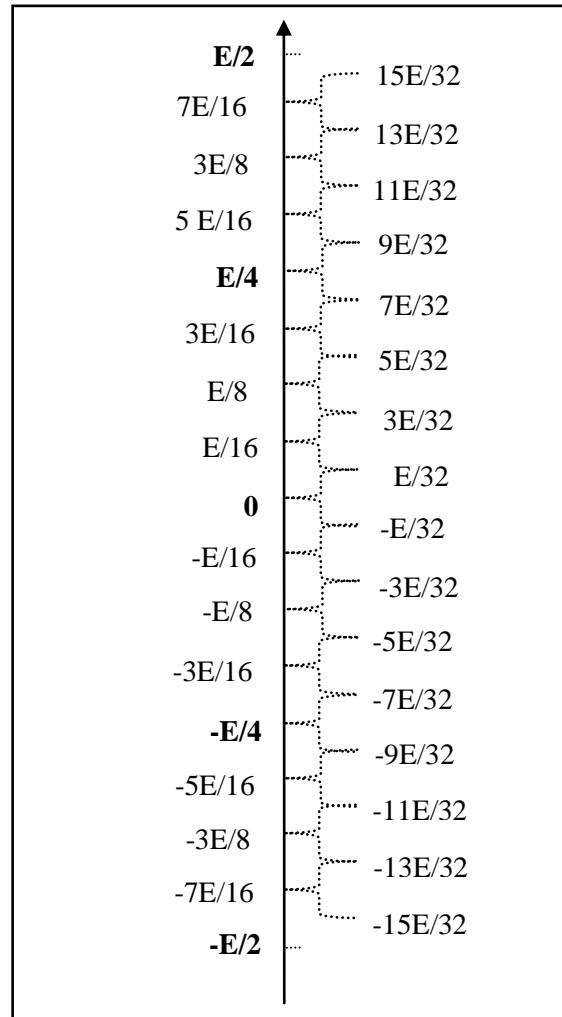


Diagramme des tensions à générer

En fait, grâce à cette division par seize de la fréquence de découpage, les interrupteurs fonctionnent à une fréquence classique de découpage du convertisseur mais la charge, elle, voit une fréquence de seize fois la fréquence de découpage ce qui a l'avantage de réduire la taille des composants de filtrage (inductance) en sortie du convertisseur et autorise donc également des dynamiques de réglage plus courtes. Par la même occasion la fréquence de découpage des interrupteurs peut être réduite afin de diminuer les pertes par commutation, il faut trouver un bon compromis entre pertes et volume du convertisseur (qui vont de pair).

La commande, que nous avons réalisée, est une commande directe et intuitive. Nous avons généré l'algorithme de façon logique, de manière à garder l'équilibrage des condensateurs tout en limitant le nombre de commutation. Voici quelques exemples des commandes successives afin de générer une tension voulue. La dernière ligne de la table fait référence au tableau 1 « Commande des interrupteurs » (p55).

Nous appliquons successivement seize commandes lors d'une période de découpage du convertisseur.

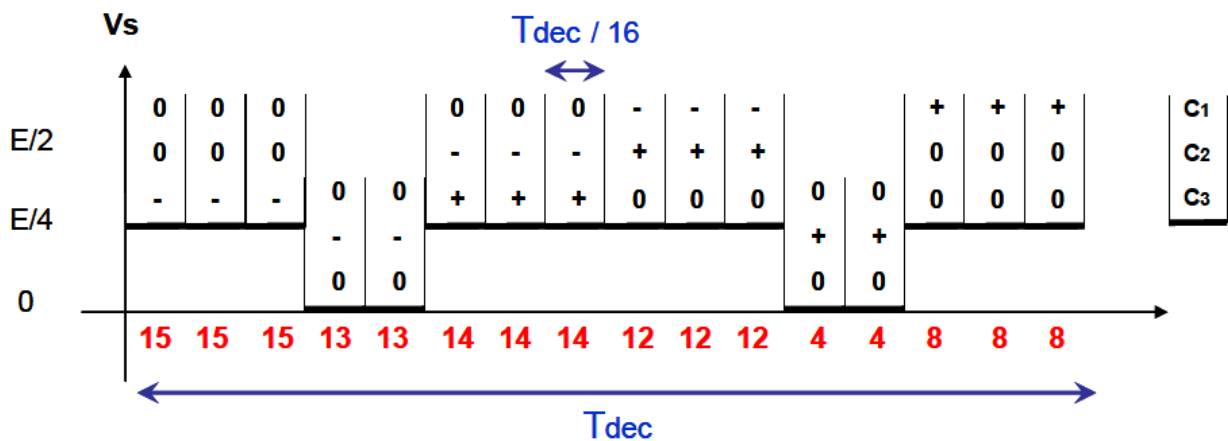
- Génération de la tension  $3.E / 16$  (si I positif ou négatif)

$T_{dec}$

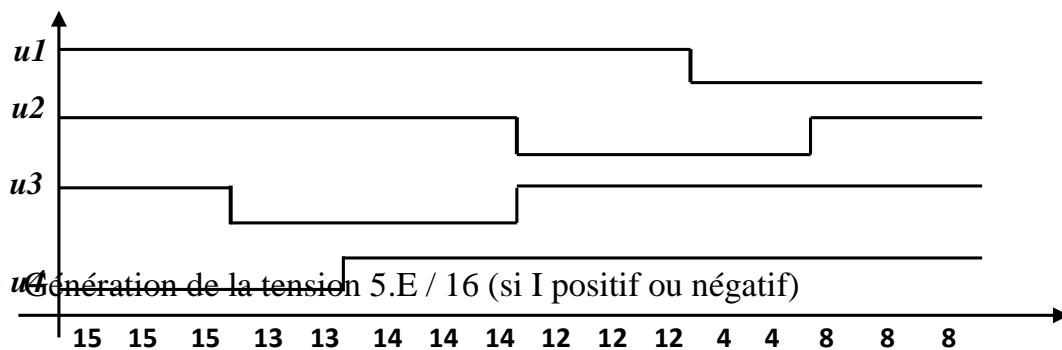
$T_{dec}/16$

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
u1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
u2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1
u3	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
u4	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
n°	15	15	15	13	13	14	14	14	12	12	12	4	4	8	8	8

Sur le premier chronogramme, nous pouvons remarquer l'équilibrage des condensateurs. Et sur le deuxième, nous visualisons la commande correspondante.



Commande



	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
u1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
u2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
u3	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
u4	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
n°	15	15	15	13	13	14	14	14	12	12	12	4	4	8	8	8

Voici le tableau récapitulatif de la succession des commandes à appliquer pour obtenir, en moyenne sur une période d'échantillonnage, la tension désirée : Le numéro dans chaque case fait référence au tableau 1 « Commande des interrupteurs »

n°	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
E/2	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
7.E/16	16	15	16	16	16	14	16	16	16	12	16	16	16	8	16	16
3.E/8	16	16	15	15	16	16	14	14	16	16	12	12	16	16	8	8
5.E/16	16	15	15	15	16	14	14	14	16	12	12	12	16	8	8	8
E/4	15	15	15	15	14	14	14	14	12	12	12	12	8	8	8	8
3.E/16	15	15	15	13	13	14	14	14	12	12	12	4	4	8	8	8
E/8	15	15	11	11	11	11	12	12	8	8	6	6	6	6	14	14
E/16	15	13	13	13	14	6	6	6	8	4	4	4	12	11	11	11
0	13	13	13	13	10	10	10	10	4	4	4	4	7	8	8	8
-E/16	2	4	4	4	3	11	11	11	9	13	13	13	5	6	6	6
-E/8	2	2	6	6	6	6	5	5	9	9	11	11	11	11	3	3
-3.E/16	2	2	2	4	4	3	3	3	5	5	5	13	13	9	9	9
-E/4	2	2	2	2	3	3	3	3	5	5	5	5	9	9	9	9
-5.E/16	1	2	2	2	1	3	3	3	1	5	5	5	1	9	9	9
-3.E/8	1	1	2	2	1	1	3	3	1	1	5	5	1	1	9	9
-7.E/16	1	2	1	1	1	3	1	1	1	5	1	1	1	9	1	1
-E/2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tableau III.2: Algorithme de Commande



**Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons vu le principe de base d'un convertisseur multicellulaire série. Il permet la mise en série de  $p$  cellules de commutation avec une répartition équilibrée de la tension. Il est alors possible d'utiliser les degrés de liberté offerts par l'accroissement du nombre d'interrupteurs mis en série. Nous avons vu qu'un déphasage régulier appliqué entre les signaux de commande des différentes cellules est l'optimum de point de vue harmonique.

Nous avons présenté deux commandes pour le convertisseur avec des objectifs différents. L'objectif de la commande directe est double, d'une part, elle doit assurer la tension aux bornes des condensateurs flottants à leurs valeurs de référence, d'autre part, le niveau discret demandé en sortie du convertisseur. Et la commande modulant des rapports cycliques est une commande en durée basée sur la modulation de largeur d'impulsion qui permet la régulation uniquement des tensions condensateurs.

# Chapitre IV

---

## COMMANDE DE LA LAMPE A DECHARGE

*“ Le commencement de toutes les sciences,  
c'est l'étonnement de ce que les choses  
sont ce qu'elles sont ”*  
*[Aristote]*

### **Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons simuler le système en boucle ouverte, ensuite nous appliquerons un régulateur classique de type PI. Dans le souci d'améliorer les performances du système deux lois de commandes modernes seront appliquées au système à savoir la logique floue et les modes glissants d'ordre deux.

## IV.1. Commande en boucle ouverte

### IV.1.1. Simulation du système convertisseur lampe en boucle ouverte

#### IV.1.1.1. Commande modulant des rapports cycliques

Sur les figures suivantes nous présentons les résultats de simulation concernant un onduleur multicellulaire série à 4 cellules à point milieu, alimentant la lampe à décharge, les caractéristiques du convertisseur sont :

- La tension d'alimentation  $E = 800 \text{ V}$
- Les valeurs des condensateurs  $C1=C2=C3= 5\text{nF}$
- La fréquence de découpage  $f_{dec} = 3,2\text{MHz}$
- La fréquence de la modulante  $f_{mod} = 50000 \text{ Hz}$

Les signaux de commande sont obtenus par la commande modulant des rapports cycliques et le modulant  $mod_k$  est sinusoïdal:

$$mod_k = r * \sin(2 * \pi * f_{mod} * t)$$

Avec  $r$  représente la profondeur de modulation comprise entre 0 et 1. Dans notre application, nous avons choisi  $r = 0.472$

#### IV.1.1.1.1. Résultats de simulation

##### a) Courant d'arc

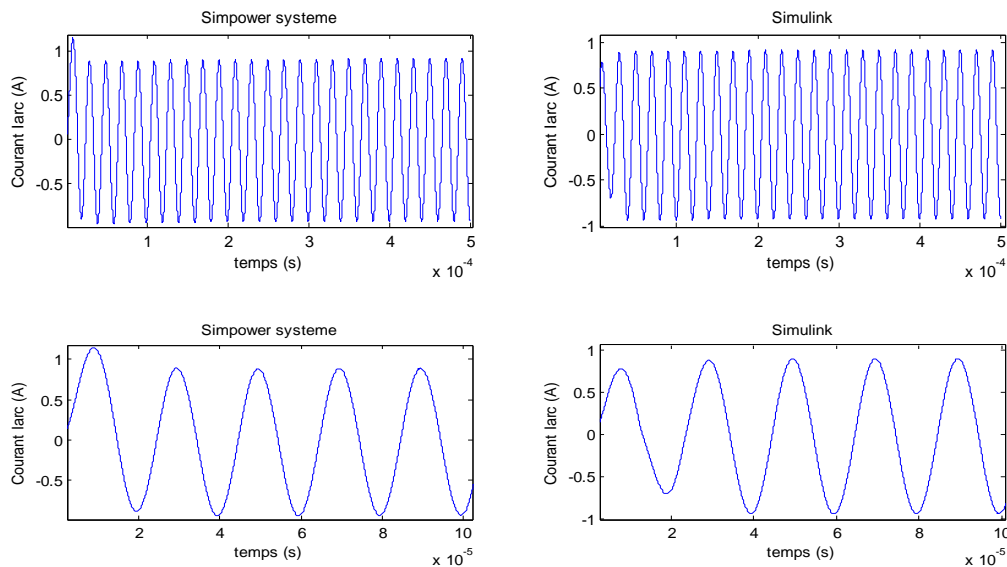


Figure IV.1-a: Forme d'onde du courant d'arc

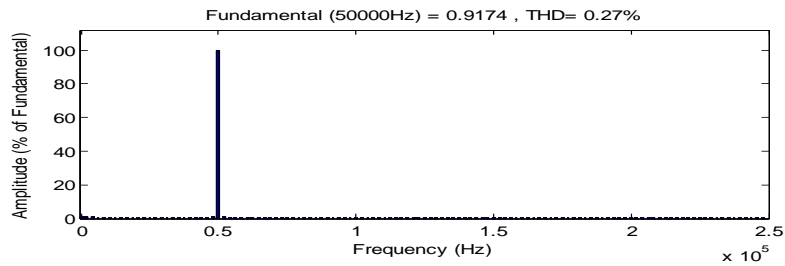


Figure IV.1-b: Spectre harmonique du courant d'arc  $i_{arc}$

b) Tension d'arc

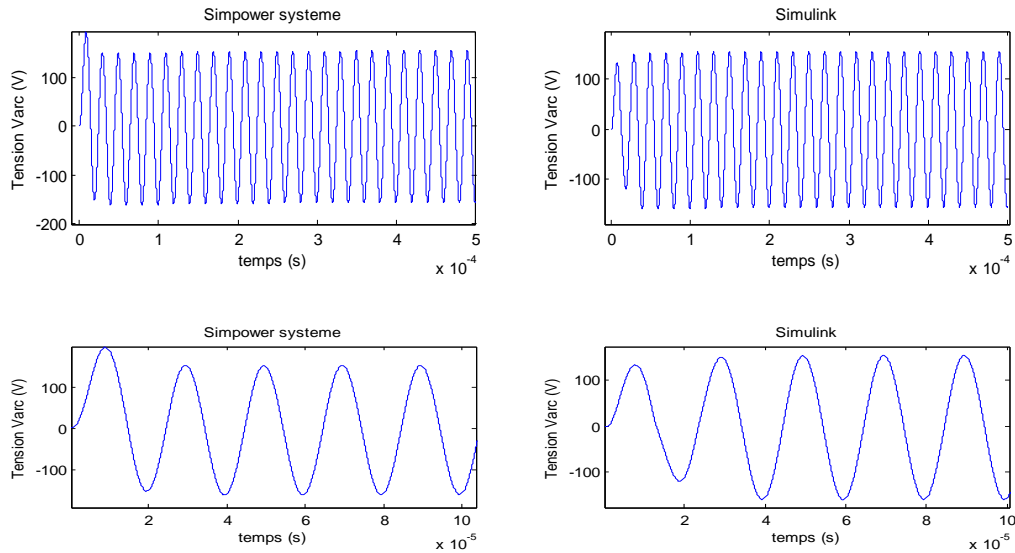


Figure IV.2-a: Forme d'onde de la tension d'arc  $v_{arc}$

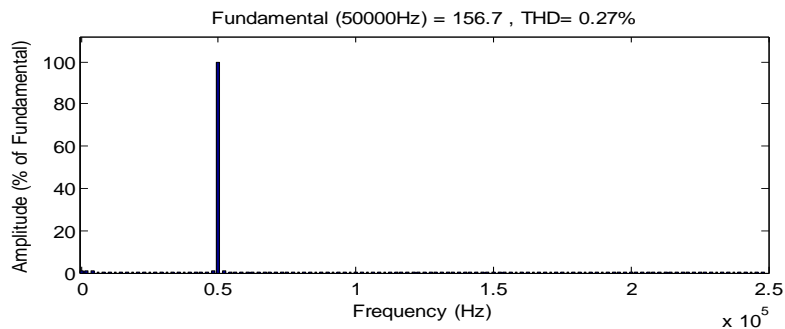


Figure IV.2-b: Spectre harmonique de la tension d'arc

c) Courant d'arc efficace

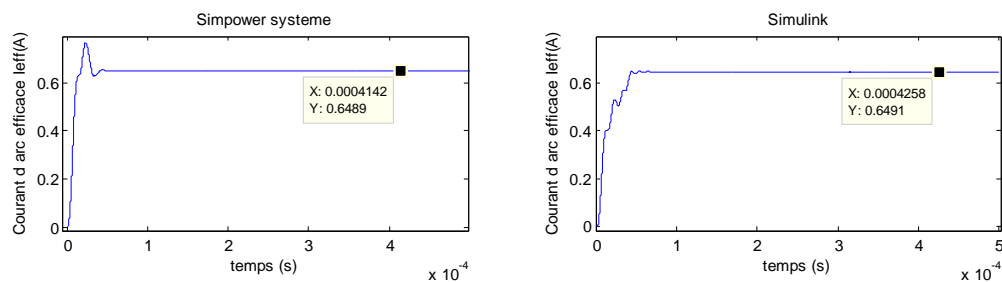
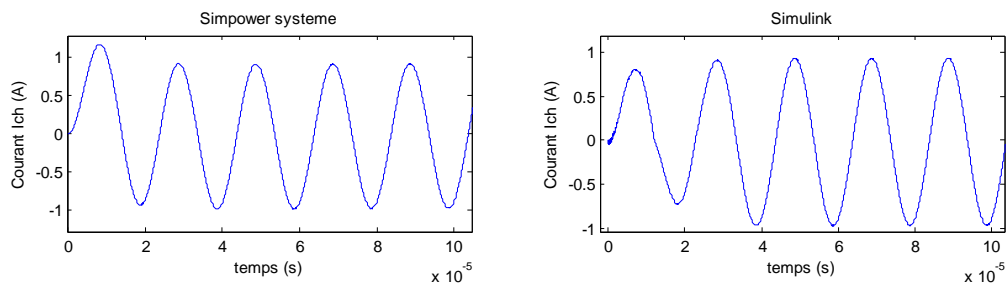
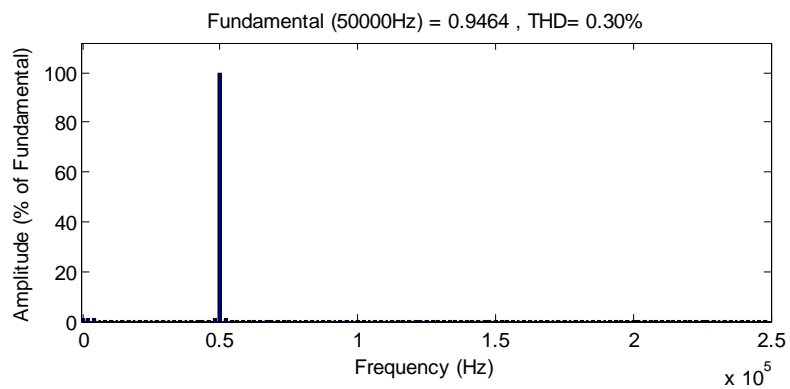


Figure IV.3 : Courant d'arc efficace  $I_{arc}$

**d) Courant de charge**

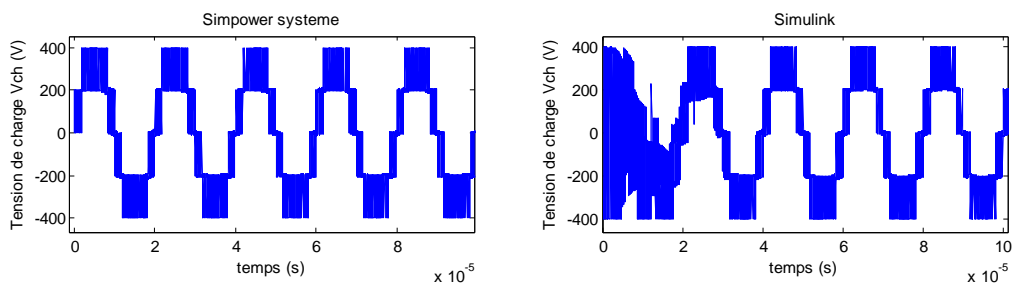


**Figure IV.4-a:** Forme d'onde du courant de charge  $i_{ch}$

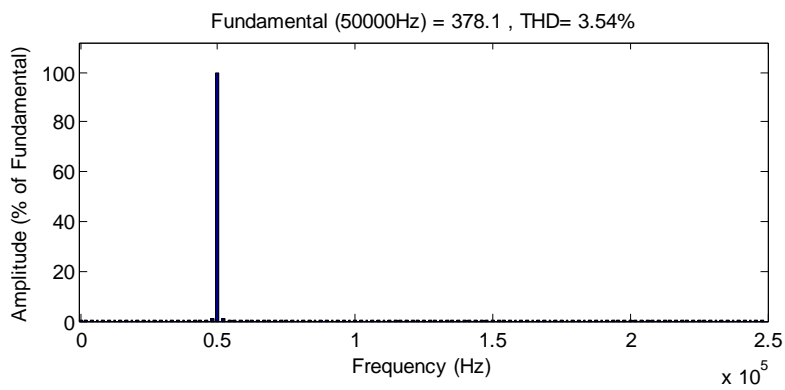


**Figure IV.4-b:** Spectre harmonique du courant de charge  $i_{ch}$

**e) Tension de charge**



**Figure IV.5-a:** Forme d'onde de la tension de charge  $v_{ch}$



**Figure IV.5-b:** Spectre harmonique de la tension de charge

## f) Tensions flottantes

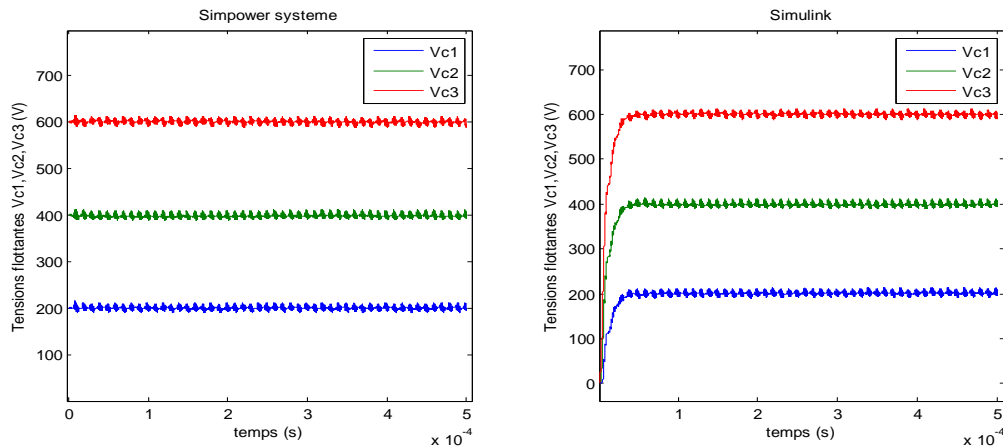


Figure IV.6 : Tensions flottantes Vc1, Vc2, Vc3

## Interprétation

D'après la figure (IV.1-a) la forme d'onde du courant d'arc est sinusoïdale, et sa fréquence identique à la fréquence de la modulante. On remarque aussi sur la figure (IV.3) que la valeur efficace du courant d'arc atteint la valeur désirée qui est de 0.65 A au bout de  $60\mu\text{s}$  avec le modèle instantané du convertisseur (sous Simulink) et  $40\mu\text{s}$  avec la simulation du convertisseur sur SimPowerSystems, avec un taux de distorsion harmonique de l'ordre de 0.27%.

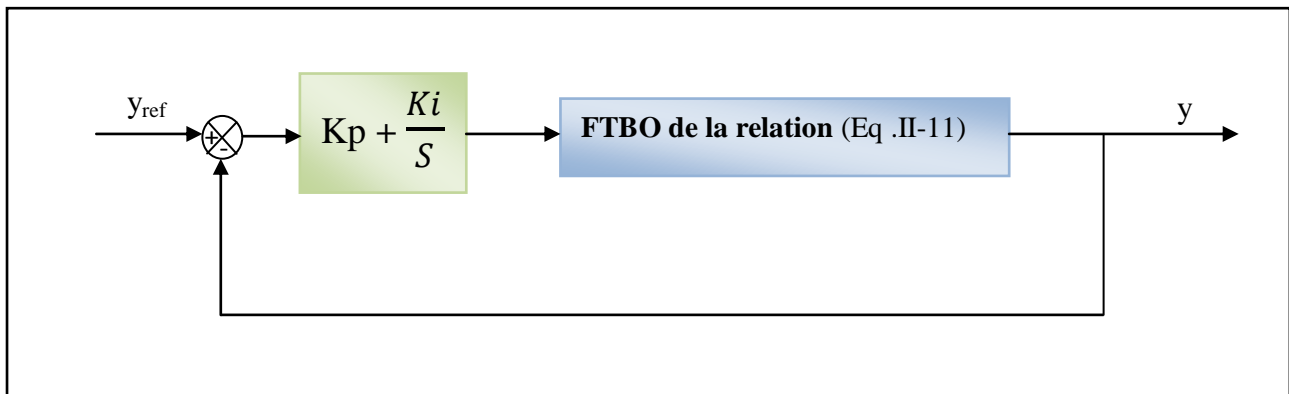
On remarque aussi sur les figures (IV.5-a, IV.6) que la tension de sortie du convertisseur évolue entre  $-E/2$  et  $E/2$  et que la tension aux bornes des condensateurs flottantes se stabilise à  $k \cdot E/P$  après  $30\mu\text{s}$ .

## IV.2. Commande en boucle fermé

Pour assurer un bon rendement de la lampe à décharge sur le plan rayonnement, nous devons maintenir le courant d'arc de la lampe rigoureusement stable autour d'une valeur constante proche de 0.65 A. nous devons donc imposer une régulation du courant d'arc avec une référence de 0.65 A. la différence sera transformée en fréquence de commutation des interrupteurs.

### IV.2 .1. Régulateur PI

Nous adoptons pour la régulation classique, un correcteur proportionnelle-intégrale PI. 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 la grandeur de la consigne, le schéma bloc du correcteur PI est illustré par la figure suivante :



**Figure IV.7:** Boucle de régulation du système avec régulateur PI

Notons que  $C(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$  est la fonction de transfert du régulateur proportionnel-intégral,  $K_p$  et  $K_i$  sont les gains du régulateur.

- La fonction de transfert du régulateur en boucle fermée est donnée par :

$$\bullet \quad \text{FTBF} = \frac{C(s) * G(s)}{1 + C(s) * G(s)} \quad (\text{Eq .VI-1})$$

Où  $G(s)$  est la fonction de transfert du système en boucle ouverte.

#### IV.2.1.1. Calcul des gains avec la méthode de placement des pôles

La dynamique de la réponse à un changement de consigne ou à une perturbation dépend du polynôme  $D(s) = 1 + C(s) * G(s)$  (dénominateur de la FTBF), et en particulier de ces zéros qui sont les pôles de la fonction de transfert. Choisir une réponse désirée en boucle fermée peut se faire au travers du choix des pôles du polynôme  $D(s)$ . La méthode qui consiste à calculer les gains du régulateur de façon à obtenir les pôles s'appelle la synthèse par placement des pôles. Le réglage des performances de la boucle s'effectue au travers du choix des pôles en boucle fermée.

L'objectif de cette synthèse est de fixer une dynamique pour le rejet de la perturbation, la dynamique de poursuite dépend du terme d'anticipation .cette dynamique est fixer avec le paramètre  $\omega_n$  qui est la fréquence naturelle du système.

L'équation caractéristique du système déduite du polynôme D(s) est :

$$\begin{aligned} & [(R_{arc} + r_f) * L_r * C_r * C_p] * s^3 + [L_r * C_r + (2 * R_{arc} + r_f) * r_f * C_r * C_p + r_f * C_r * C_p * K_p] * s^2 + \\ & [(R_{arc} + r_f)(C_p + C_r) * s + r_f * C_r * C_p * K_i + C_r * K_p] * s + C_r * K_i + 1 = 0 \end{aligned} \quad (Eq .VI-2)$$

Le polynôme D(s) est du troisième ordre, on choisit donc trois pôles sur la même verticale et avec un amortissement optimal qui correspond à un facteur d'amortissement  $\zeta=0.7$ , soient :

$$P_1 = -a - j * a \qquad P_2 = -a - j * a \qquad P_3 = -a \qquad (Eq .VI-3)$$

L'équation caractéristique d'un système du troisième ordre est de la forme :

$$Q(s) = (s + \omega_n) * (s^2 + 2 * \zeta * \omega_n * s + \omega_n^2) \quad (Eq .VI-4)$$

On faisant l'identification des deux polynômes caractéristiques, on obtient après calcul

$$\begin{cases} K_p = \frac{(2 * \zeta + \omega_n - [L_r * C_r + (2 * R_{arc} + r_f) * r_f * C_r * C_p]) * r_f * C_r * C_p}{r_f * C_r * C_p} \\ K_i = \frac{\omega_n^3 - 1}{C_r} \end{cases} \quad (Eq .VI-5)$$

Pour une erreur statique de 5% , le temps de réponse  $t_r$  est d'un système est exprime en fonction de  $\zeta$  et de  $\omega_n$  par :

$$t_{r_{5\%}} = \frac{5}{\zeta * \omega_n} \quad (Eq .VI-6)$$

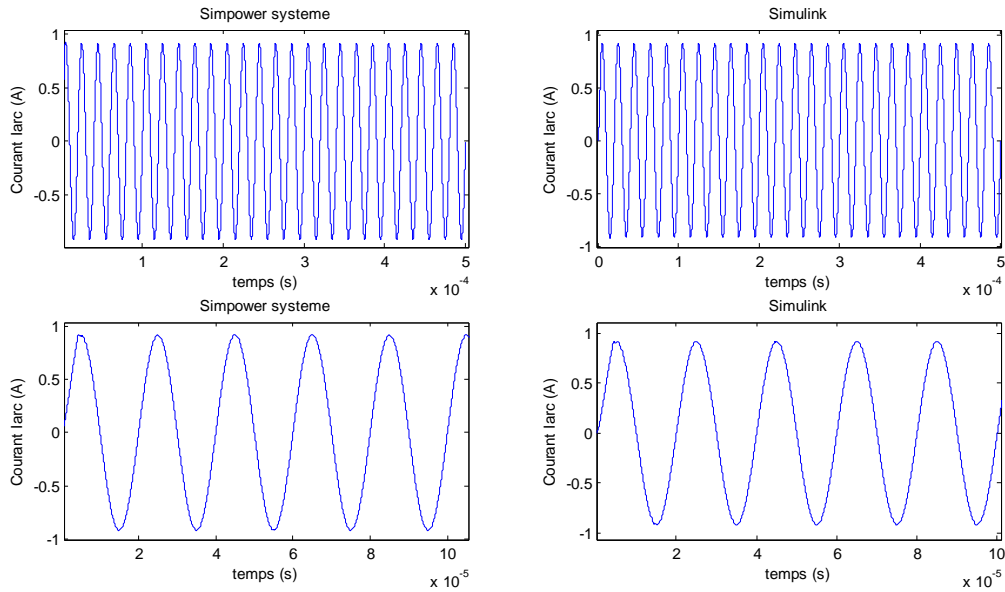
L'expression précédente nous permet de déterminer  $\omega_n$  sachant que  $t_r$  est déterminée graphiquement à partir de la réponse naturelle du système.



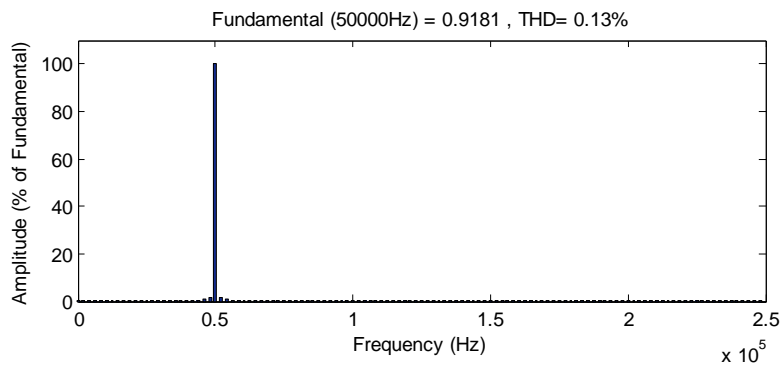
**IV.2.1.2. Résultats de simulation pour un régulateur PI**

**IV.2.1.2.1. Commande modulant des rapports cycliques**

**a) Courant d'arc**

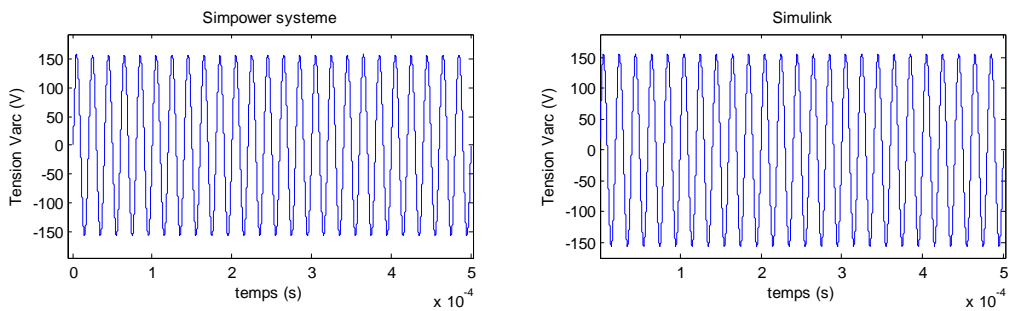


**Figure IV.8-a :** Forme d'onde du courant d'arc  $i_{arc}$  pour un régulateur PI



**Figure IV.8-b:** Spectre harmonique du courant d'arc  $i_{arc}$  pour un régulateur PI

**b) Tension d'arc**



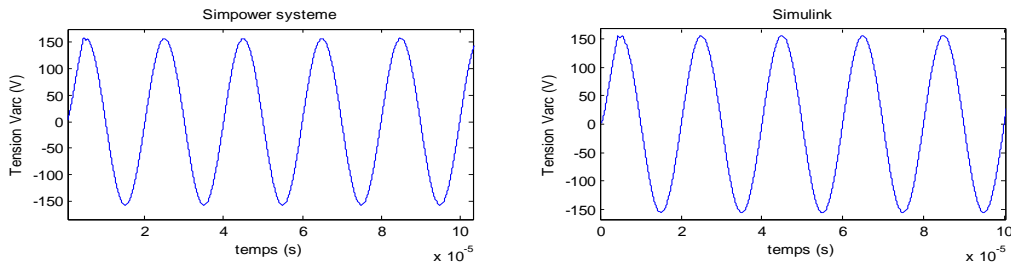


Figure IV.9-a : Forme d'onde de la tension d'arc  $v_{arc}$  pour un régulateur PI

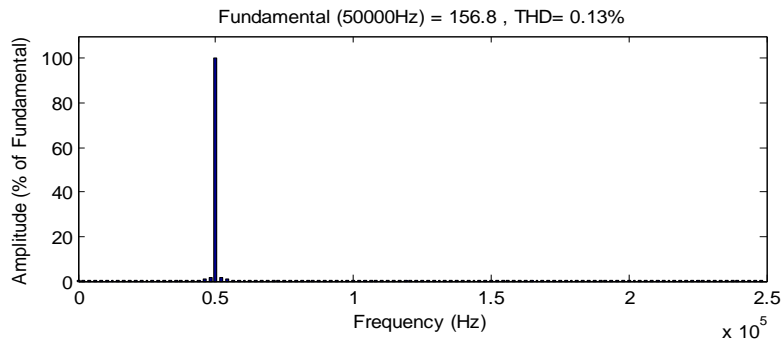


Figure IV.9-b: Spectre harmonique de la tension d'arc  $v_{arc}$  pour un régulateur PI

c) Courant d'arc efficace

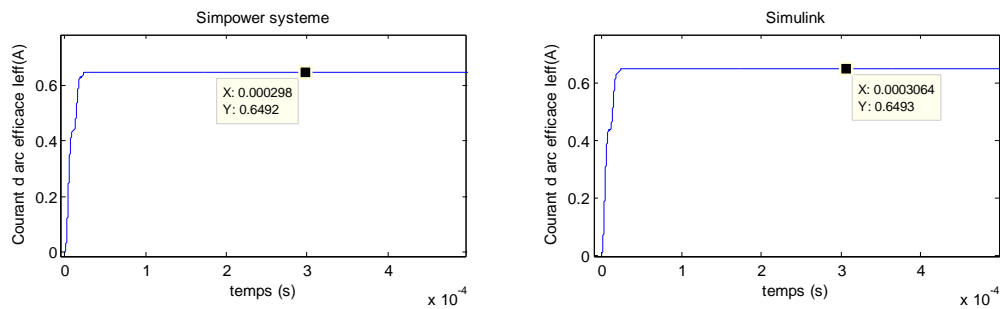


Figure IV.10: Forme d'onde du courant d'arc efficace  $I_{arc}$  pour un régulateur PI

d) Courant de charge

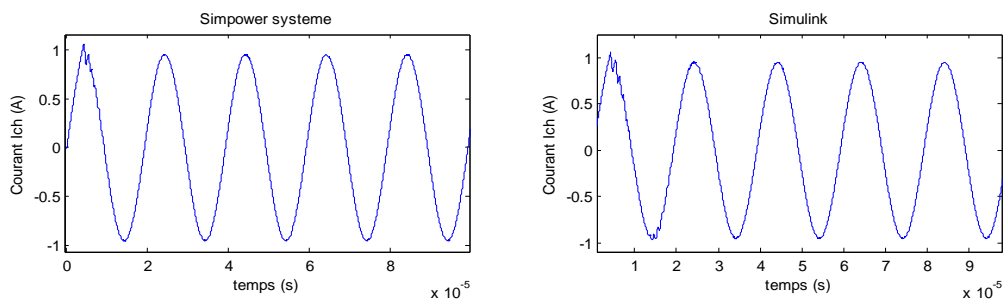


Figure IV.11-a: Forme d'onde du courant de charge  $i_{ch}$  pour un régulateur PI

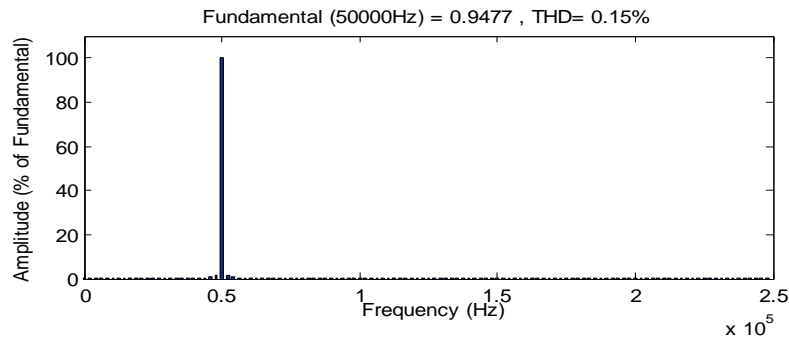


Figure IV.11-b: Spectre harmonique du courant de charge  $i_{ch}$  pour un régulateur PI

e) Tension de charge

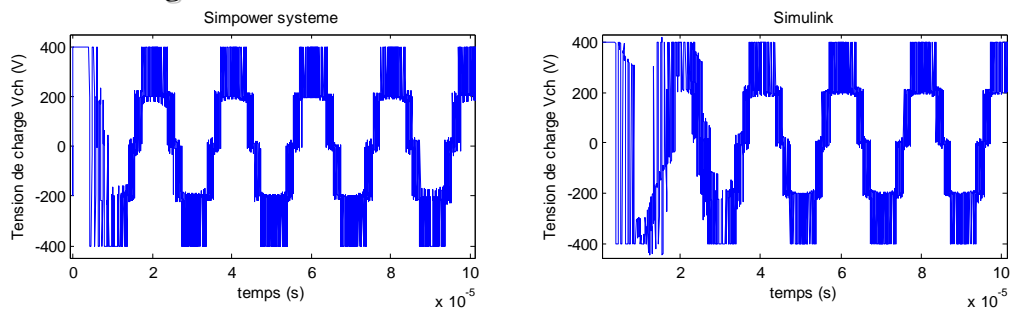


Figure IV.12-a: Forme d'onde de la tension de charge  $v_{ch}$  pour un régulateur PI

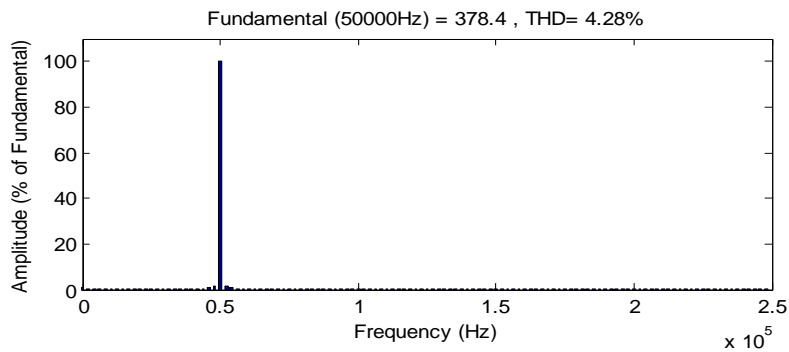


Figure IV.12-b: Spectre harmonique de la tension de charge  $v_{ch}$  pour un régulateur PI

Interprétation

Nous constatons que le courant d'arc suit parfaitement la référence sinusoïdale que nous voulons imposer à notre lampe avec cette fois ci un temps de réponse de  $2.7 \mu s$ . On remarque aussi une amélioration sur le niveau de THD qui est de 0.13% par rapport à la simulation on boucle ouverte qui est de 0.27%.

IV.2.1.2.2. Commande directe pour le convertisseur

a) Courant d'arc

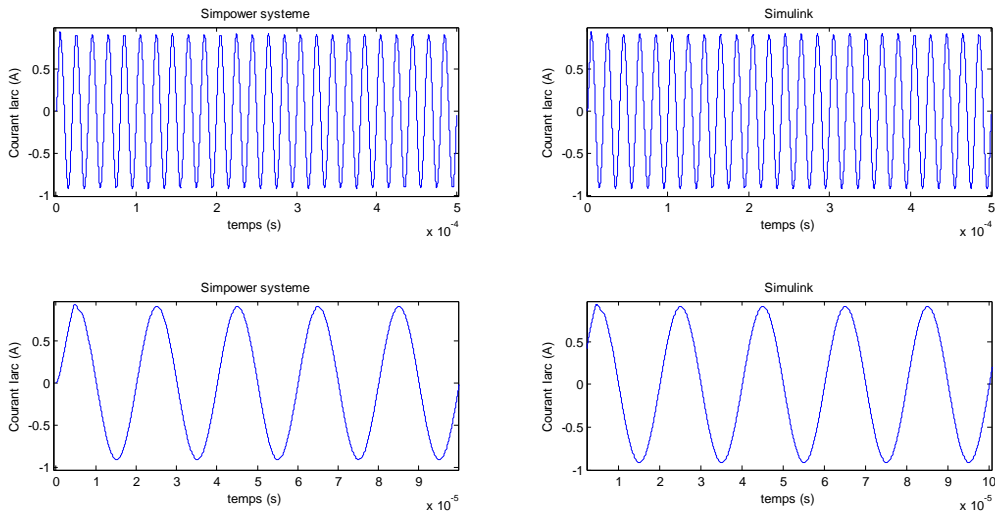


Figure IV.13-a: Forme d'onde du courant d'arc  $i_{arc}$  pour un régulateur PI

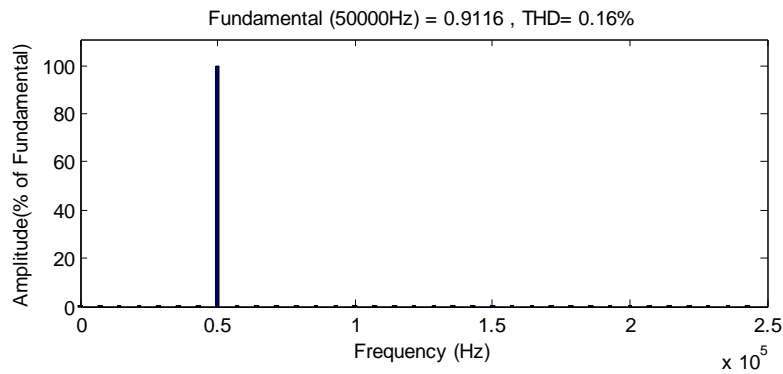


Figure IV.13-b: Spectre harmonique du courant d'arc  $i_{arc}$  pour un régulateur PI

b) Tension d'arc

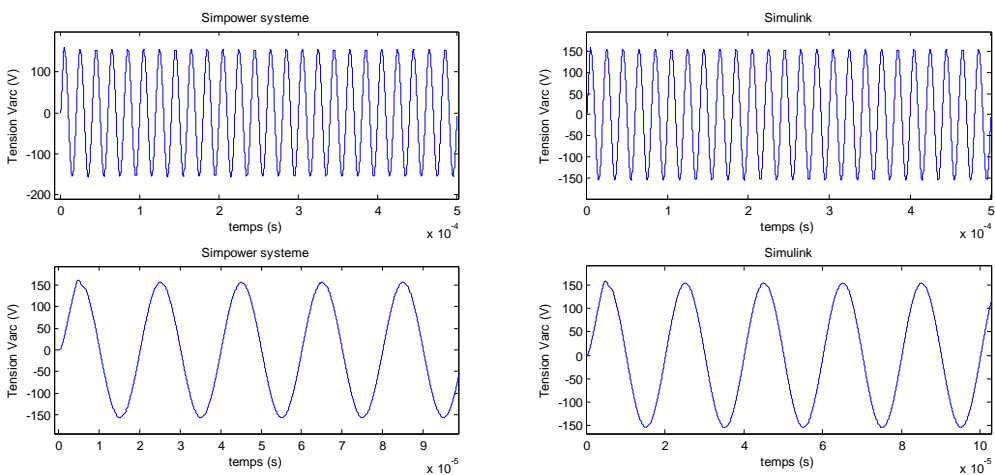


Figure IV.14-a: Forme d'onde de la tension d'arc  $v_{arc}$  pour un régulateur PI

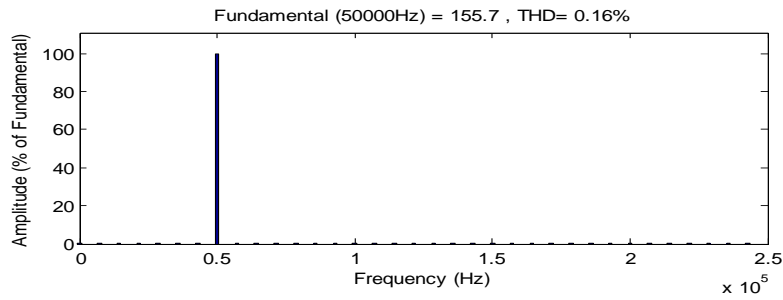


Figure IV.14-b: Spectre harmonique de la tension d'arc  $v_{arc}$  pour un régulateur PI

c) Courant d'arc efficace

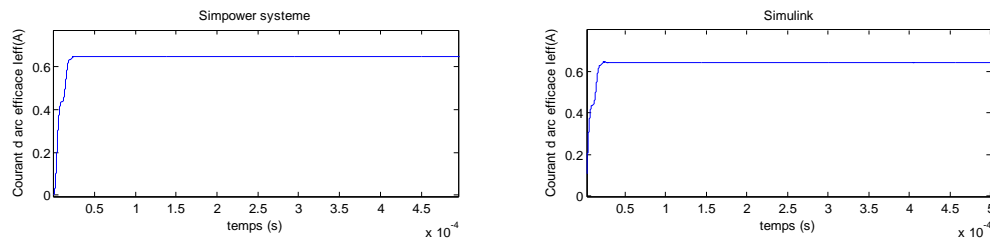


Figure IV.15: Forme d'onde du courant d'arc efficace  $I_{arc}$  pour un régulateur PI

d) Courant de charge

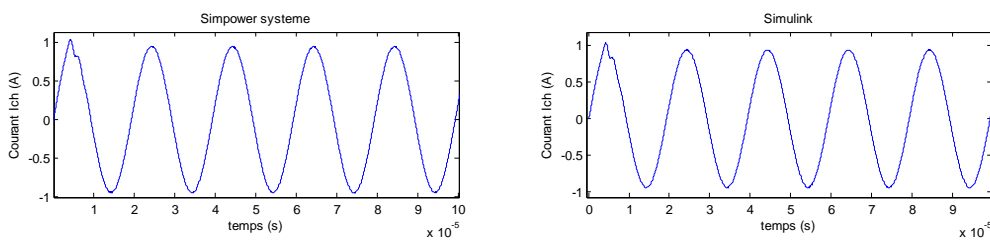


Figure IV.16-a: Forme d'onde du courant de charge  $i_{ch}$  pour un régulateur PI

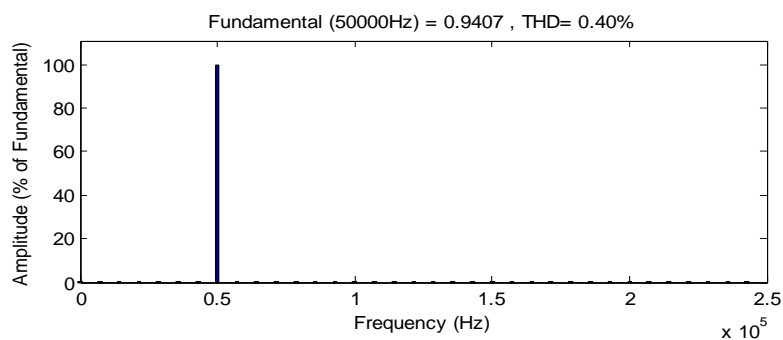


Figure IV.16-b: Spectre harmonique du courant de charge  $i_{ch}$  pour un régulateur PI

e) Tension de charge

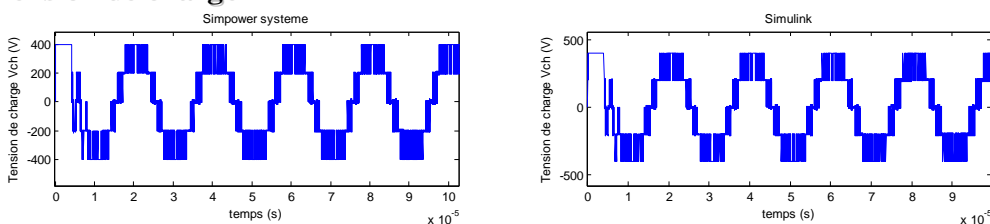
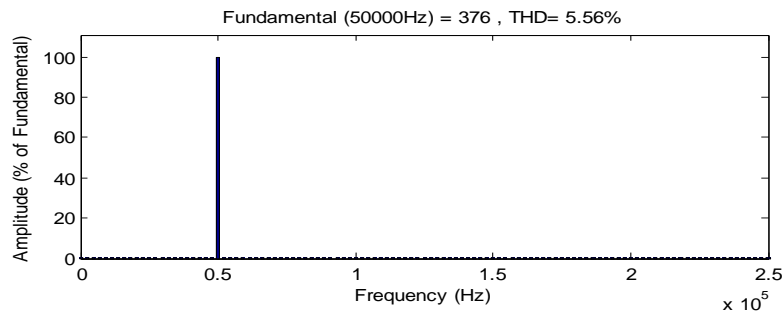


Figure IV.17-a: Forme d'onde de la tension de charge  $v_{ch}$  pour un régulateur PI



**Figure IV.17-b:** Spectre harmonique de la tension de charge  $v_{ch}$  pour un régulateur PI

### Interprétation

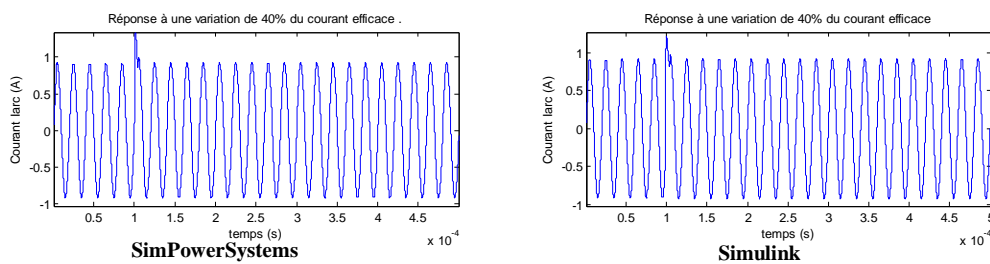
Comme dans le cas de commande modulant des rapports cyclique, le courant d'arc suit parfaitement la référence sinusoïdale mais avec une dégradation sur le plan de THD qui est 0.16 %.

#### IV.2.1.3. Test de robustesse

Dans ce qui suit nous allons tester la robustesse du régulateur PI vis-à-vis des variations paramétriques de la résistance d'arc qui varie en fonction de la puissance et de la température ainsi que sa robustesse vis-à-vis des perturbations sur le courant d'arc et la tension d'alimentation du convertisseur.

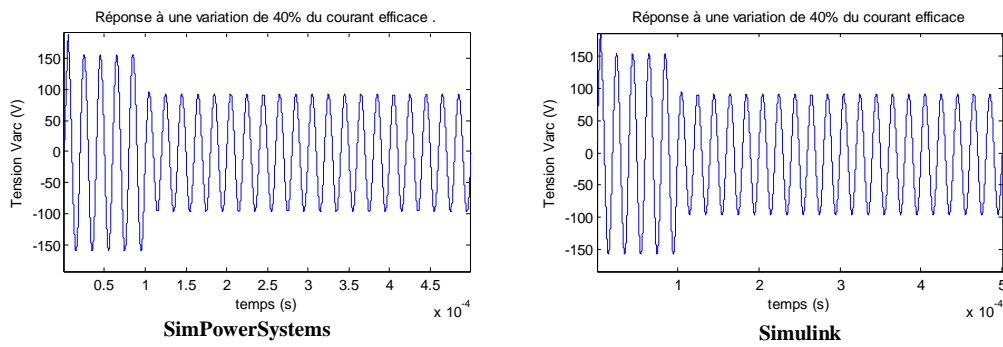
##### 1) Variation du courant d'arc efficace de 40%

###### a) Courant d'arc



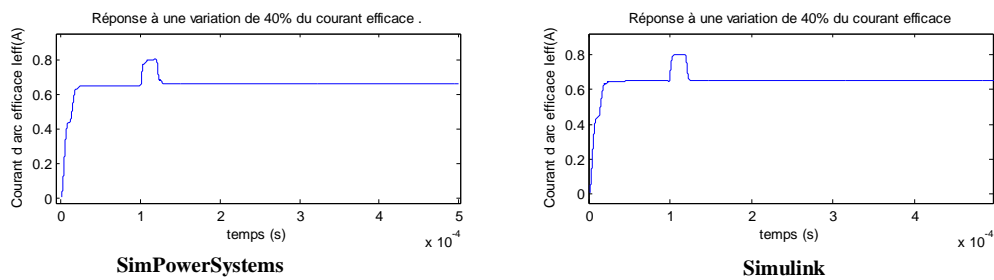
**Figure IV.18:** Courant d'arc  $i_{arc}$  soumis à une perturbation à 0.00001s

**b) Tension d'arc**



**Figure IV.19:** Tension d'arc  $v_{arc}$  soumise à une perturbation à 0.00001s

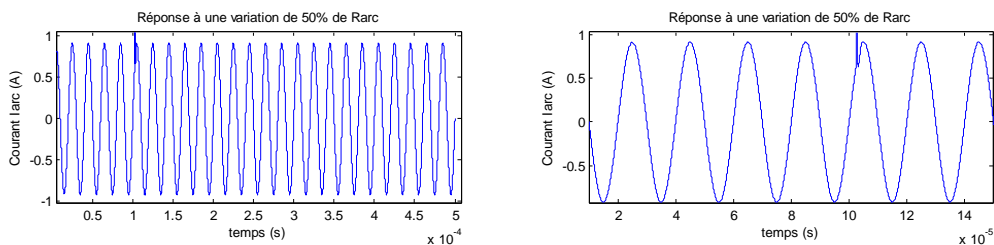
**c) Courant d'arc efficace**



**Figure IV.20 :** Courant d'arc efficace soumis à une perturbation à 0.00001s

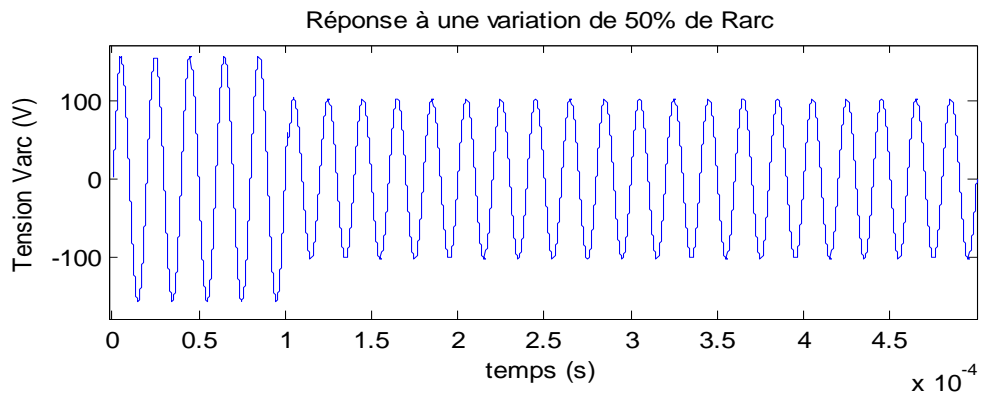
**2) Variation de Rarc de 50%**

**a) Courant d'arc**



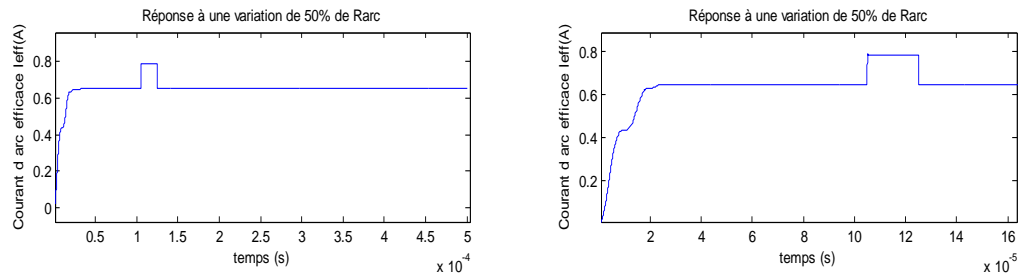
**Figure IV.21:** Courant d'arc  $i_{arc}$  soumis à une perturbation à 0.00001s

**b) Tension d'arc**



**Figure IV.22:** Tension d'arc  $v_{arc}$  soumise à une perturbation à 0.00001s

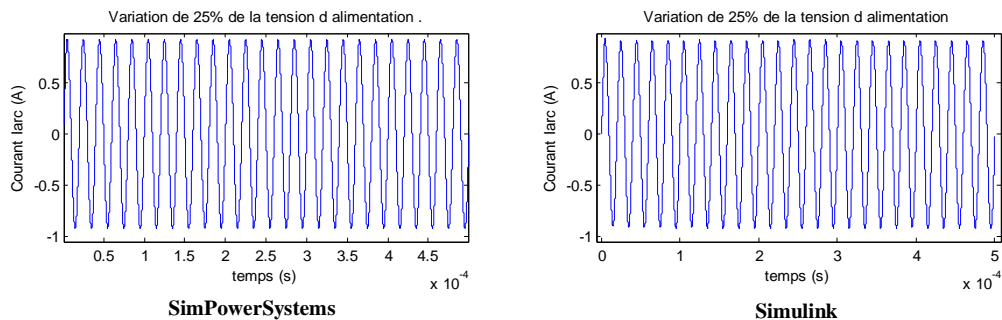
**c) Courant d'arc efficace**



**Figure IV.23:** Courant d'arc efficace soumis à une perturbation à 0.00001s

**3) Variation de 25% de la tension d'alimentation**

**a) Courant d'arc**



**Figure IV.24:** Courant d'arc  $i_{arc}$  soumis à une perturbation à 0.00001s



b) Tension d'arc

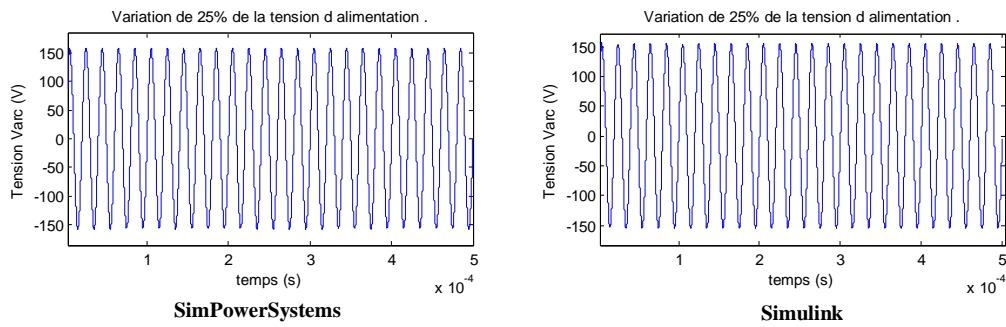


Figure IV.25: Tension d'arc  $v_{arc}$  soumise à une perturbation à 0.00001s

c) Courant d'arc efficace

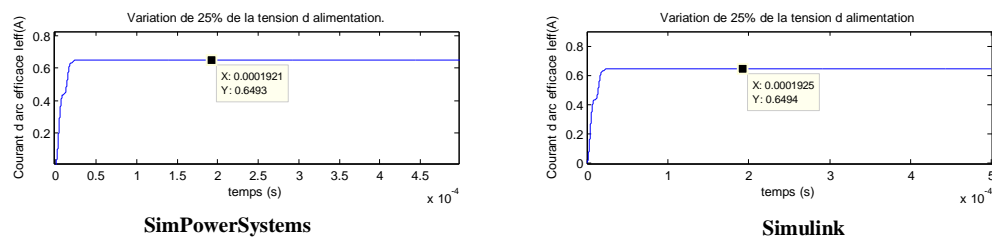


Figure IV.26: Courant d'arc efficace soumis à une perturbation à 0.00001s

d) Tension de charge

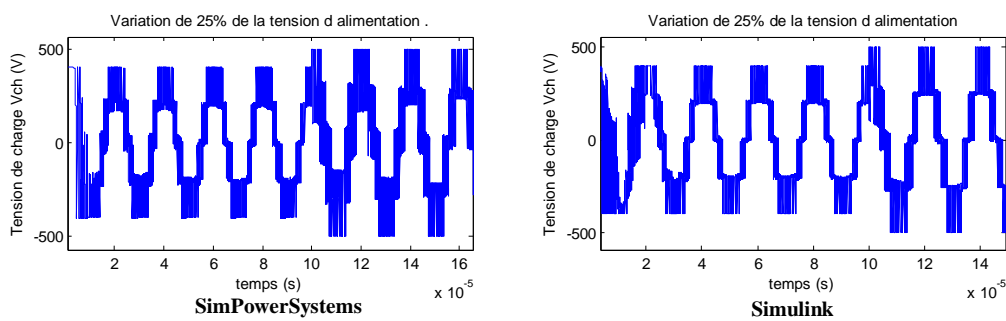


Figure IV.27: Tension de charge  $v_{ch}$  soumise à une perturbation à 0.00001s

e) Tension flottantes

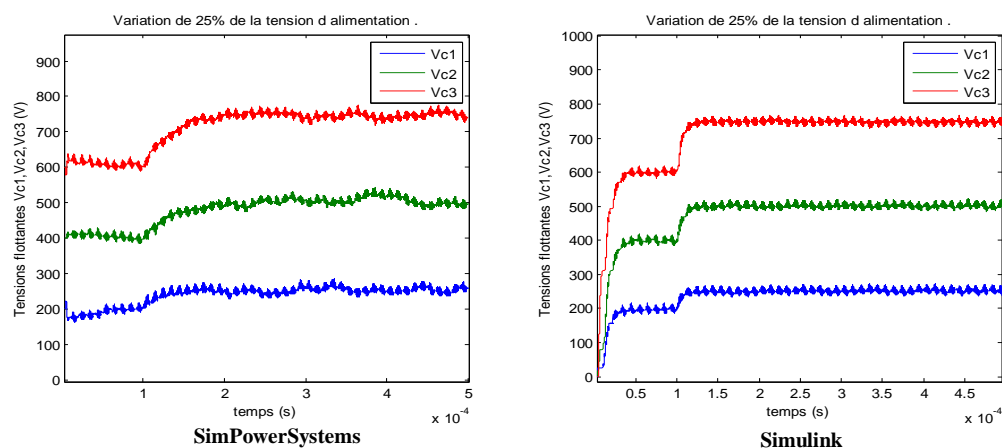


Figure IV.28: Tensions flottantes soumise à une perturbation à 0.00001s

## Interprétation

Après plusieurs essais, nous constatons que l'influence d'une perturbation sur le courant d'arc et la résistance d'arc commence à apparaître bien après injection d'une perturbation de forme d'onde sinusoïdale de valeur efficace de l'ordre de 40% pour le courant d'arc et de l'ordre de 50% pour la résistance d'arc, ces perturbations sont rejetées par le régulateur PI après 30  $\mu\text{s}$  pour le courant d'arc et 23  $\mu\text{s}$  pour  $R_{\text{arc}}$ .

Pour ce qui concerne la variation de 25% de la tension d'alimentation on remarque bien que les tensions des aux bornes des condensateurs flottantes suivent leurs nouvelle référence, sans vraiment influencer le courant d'arc.

## IV.2 .2. Commande moderne

### IV.2.2.1. Commande par la logique floue

#### Introduction

La commande floue est l'application floue de la logique floue. Ces algorithmes sont à base de règles linguistiques du type « Si...Alors ». Elle sert à prendre une décision même si l'on ne peut estimer les entrées/sorties qu'à partir de prédicats vagues ou lorsque les entrées/sorties sont entachées d'erreurs.

#### IV.2.2.1.1. Bases de la logique floue

##### Introduction

Afin de manipuler des connaissances imparfaites, la logique floue intervient comme un outil performant. Des citations conditionnelles linguistiques du type « Si – Alors » sont utilisées pour résoudre des problèmes de décision (contrôle), ou pour décrire le comportement dynamique d'un système inconnu ou mal défini (identification). La théorie des ensembles et des algorithmes flous développés dans les années 60 peut être judicieusement utilisée pour évaluer les expressions linguistiques imprécises et incertaines à l'aide d'un calculateur.

### IV.2.2.1.1.1 Généralités sur la logique floue

#### IV.2.2.1.1.1.1. Ensemble flou et fonction d'appartenance

soit un univers de discours  $U$ . Un ensemble flou  $F$  est caractérisé par une fonction d'appartenance  $\mu_F$  prenant des valeurs dans l'intervalle  $[0,1]$  qui détermine le degré d'appartenance, aussi appelé possibilité ou coefficient d'appartenance, de l'élément  $u$  à l'ensemble  $F$ .

Le degré d'appartenance représente la possibilité pour que la variable  $u$  ait la qualité associée au sous-ensemble  $U_i$  de  $U$ .

$F$  est représenté par un ensemble de paires ordonnées (élément générique, degré d'appartenance)

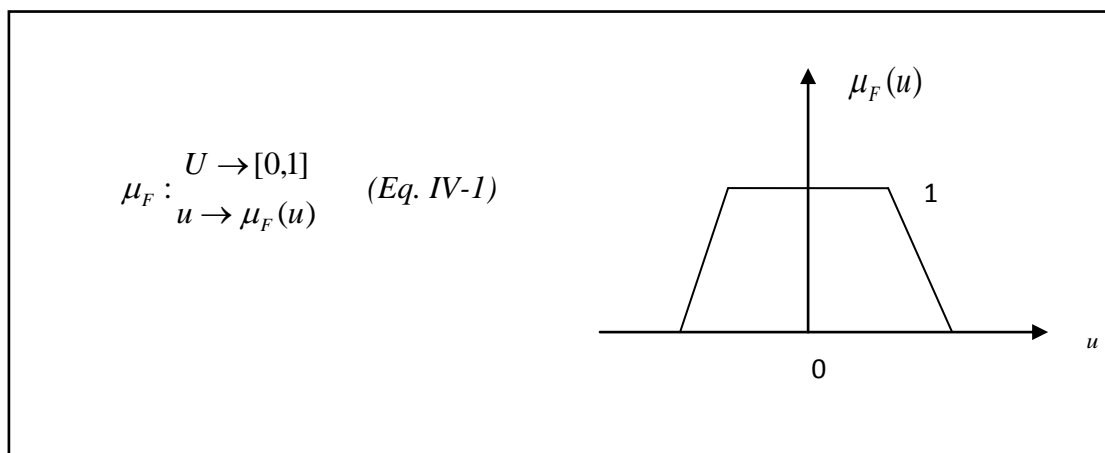


Figure IV.29: Fonction d'appartenance trapézoïdale

#### IV.2.2.1.1.1.1.2. caractéristiques d'un ensemble flou

- le support, qu'est l'ensemble des points  $u$  dans  $U$ , tels que  $\mu_F(u) \geq 0$

$$\text{supp}(F) = \{u \in U / \mu_F(u) \geq 0\}$$

(Eq. IV-7)

- le noyau, qu'est l'ensemble des points  $u$  de  $U$  tels que  $\mu_F(u) = 1$

$$\text{noy}(F) = \{u \in U / \mu_F(u) = 1\}$$

(Eq. IV-8)

- L'ensemble flou vide est noté  $\phi$ , il est défini par

$$\mu_{\phi}(u) = 0 \quad \forall u \in U \quad (\text{Eq. IV-9})$$

- Le plus grand ensemble flou sur  $U$  est noté  $1_u$ , il est défini par

$$\mu_{1_u}(u) = 1 \quad \forall u \in U \quad (\text{Eq. IV-10})$$

- Le point de commutation est le cas particulier où l'élément  $u$  de  $U$  est tel que

$$\mu_F(u) = 0.5 \quad (\text{Eq. IV-11})$$

- Un singleton a une fonction d'appartenance telle que

$$\begin{cases} \mu_F(u) = 1 & \text{qd } u = u_0 \\ \mu_F(u) = 0 & \text{qd } u \neq u_0 \end{cases} \quad (\text{Eq. IV-12})$$

c'est un ensemble flou correspondant à une variable exacte  $u_0$ .

### Remarque

Les fonctions d'appartenance peuvent avoir diverses formes selon leur définition :

- Triangulaire, trapézoïdale
- Gaussienne
- Sigmoidale...

#### a) Opérations sur les ensembles flous

Les opérations d'union, d'intersection et de complémentation dans les ensembles flous sont définies à l'aide de leur fonction d'appartenance.

#### b) La disjonction floue, 'OU' ou union

La fonction d'appartenance  $\mu_{A \cup B}$  est définie, pour tout  $u \in U$ , par :

$$\text{*Mamdani : } \mu_{A \cup B}(u) = \max\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (\text{Eq. IV-13})$$

$$\text{*Sugeno : } \mu_{A \cup B}(u) = \mu_A(u) + \mu_B(u) - \mu_A(u) \cdot \mu_B(u) \quad (\text{Eq. IV-14})$$

#### c) La conjonction floue, 'ET' ou intersection

La fonction d'appartenance  $\mu_{A \cap B}$  est définie, pour tout  $u \in U$ , par :

$$\text{*Mamdani : } \mu_{A \cap B}(u) = \min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (\text{Eq. IV-15})$$

$$*\text{Sugeno : } \mu_{A \cap B}(u) = \mu_A(u) \cdot \mu_B(u) \quad (\text{Eq. IV-16})$$

#### d) La complémentation, négation ou inverse

La fonction d'appartenance  $\mu_{\bar{A}}$  du complément d'un ensemble  $A$  est définie, pour tout  $u \in U$ , dans les deux cas par

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A(u) \quad (\text{Eq. IV-17})$$

#### e) Produit cartésien

Si  $F_1, F_2, \dots, F_n$  sont des ensembles flous dans  $U_1, U_2, \dots, U_n$  respectivement, le produit cartésien de  $F_1, F_2, \dots, F_n$  est un ensemble flou dans l'espace produit  $U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$  ayant pour fonction d'appartenance :

$$\mu_{F_1, \dots, F_n}(u_1, u_2, \dots, u_n) = \min\{\mu_{F_1}(u_1), \mu_{F_2}(u_2), \dots, \mu_{F_n}(u_n)\} \quad (\text{Eq. IV-18})$$

Ou bien,

$$\mu_{F_1, \dots, F_n}(u_1, u_2, \dots, u_n) = \prod_{i=1}^n \mu_{F_i}(u_i) \quad (\text{Eq. IV-19})$$

### IV.2.2.1.2. Contrôleur flou

#### Introduction

La commande floue est l'application floue de la logique floue. Ces algorithmes sont à base de règles linguistiques du type « Si...Alors ». Elle sert à prendre une décision même si l'on ne peut estimer les entrées/sorties qu'à partir de prédicats vagues ou lorsque les entrées/sorties sont entachées d'erreurs.

La résolution d'un problème par la logique floue comprend trois étapes :

- En premier, vient la quantification 'floue' des entrées du système
- En second, l'établissement des règles liant les sorties aux entrées à base des règles floues
- En troisième, la combinaison de ces règles pour la génération des sorties floues

#### IV.2.2.1.2.1. Structure classique d'un contrôleur flou

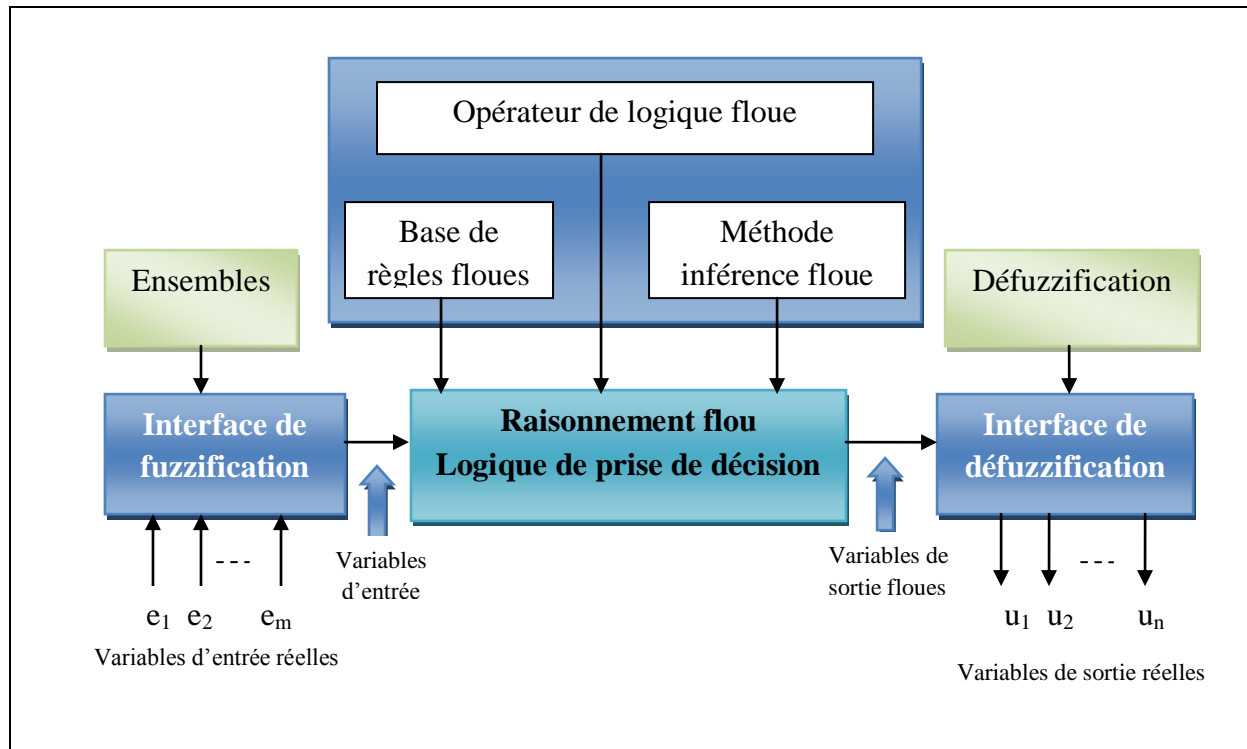


Figure IV.30: Structure classique d'un régulateur flou

#### IV.2.2.1.2.2. Principe du contrôleur flou

1. Procéder à la partition en sous ensembles flous des différents univers de discours que le système impose, et transformer les variables réelles en variables floues (fuzzification).
2. Déterminer la base de règle qui va caractériser le fonctionnement désiré du système
3. Utiliser les variables floues dans un mécanisme d'inférence qui crée et détermine les variables floues de sortie, en utilisant des opérations sur les fonctions d'appartenance
4. Opérer à la défuzzification qui consiste à extraire une valeur réelle de sortie de la fonction d'appartenance du sous-ensemble flou de sortie établi par le mécanisme d'inférence

La première étape traite les entrées du système, c'est la fuzzification, elle permet d'associer à chacune réelles, par le biais de fonctions d'appartenance, un degré d'appartenance pour chacun des sous ensembles flous définies sur l'univers de discours.

La deuxième étape, c'est la table des règles, elle est constituée de règles de type :

« Si ..., Alors ... », elle va permettre de passer des degrés d'appartenance des grandeurs d'entrées aux degrés d'appartenance des sous ensembles flous de la grandeur de commande.

La troisième partie, c'est le moteur d'inférence, il va permettre de générer une conclusion à partir des entrées et des règles actives, il calcule alors les degrés d'appartenance aux sous ensembles flous correspondant à la commande du système.

La quatrième partie, c'est l'interface de défuzzification, elle permet de transformer les degrés d'appartenance des sous ensembles de commande en grandeur numérique exploitable au niveau physique.

Il existe plusieurs méthodes de défuzzification, les plus utilisées :

### A) Méthode de Mandani

Mandani fut le premier à utiliser la logique floue pour la synthèse de commande, il utilise le minimum comme opérateur de conjonction et d'implication, les règles sont de la forme :

Si  $X_1$  est  $A_1^i$  et .....  $X_n$  est  $A_n^i$  Alors  $y$  est  $B^i$

En général les  $B^i$  sont les partitions de l'espace de sortie, l'inférence floue correspondant aux étapes suivants pour un vecteur d'entrée  $X = (X_1 \dots X_n)$

- 1) Calcul du degré d'appartenance de chaque entrée aux différents sous ensembles flous  $\mu_{A_j^i}(x_j)$  tel que  $j=1$  à  $n$  et  $i=1$  à  $N$
- 2) Calcul de la valeur de vérité de chaque règle

$$\alpha_i(x) = \min_j (\mu_{A_j^i}(x_j)) \quad j=1 \text{ à } n \quad (\text{Eq. IV-20})$$

- 3) Calcul de la contribution de chaque règle :

$$\mu_i(y) = \min(\alpha_i(x), \mu_{B^i}(y)) \quad (\text{Eq. IV-21})$$

- 4) Agrégation des règles  $\mu(y) = \max_i (\mu_i(y))$

Le résultat est donc un sous ensemble flou caractérisé par sa fonction d'appartenance. Pour obtenir une conclusion nette il faut défuzzifier, la méthode du centre de gravité donne :

$$y = \frac{\int u \cdot \mu(u) du}{\int \mu(u) du} \quad (\text{Eq. IV-22})$$

En continue cette méthode est parfois appelé « min-max-barycentre », il existe plusieurs variantes de la méthode « produit –somme-barycentre », toutes ses variantes donnent des sous ensembles en sortie, d'où la nécessité de l'étape de défuzzification.

### B) Méthode de Sugeno

La méthode de Sugeno constitue un cas particulier très important, elle est apparue en 1975 et elle est plus répandue dans la théorie de contrôle des procédés, à la différence des règles floues standards, la conclusion n'est pas représentée par un sous ensemble flou mais par une valeur constante (singleton) qui est une fonction linéaire des entrées :

$$\text{Si } X_1 \text{ est } A_1^i \text{ et } X_2 \text{ est } A_2^i \dots \dots X_n \text{ est } A_n^i \text{ Alors } y = C_0 + C_1 * X_1 + \dots C_n * X_n$$

Où les  $C_i$  sont des constantes constituant la table des règles.

Il est possible de simplifier ce régulateur en prenant les  $C_j = 0$  à partir de  $j=1$ , on obtient alors comme conséquence une valeur numérique constante correspondant à un singleton positionné en  $C_0$ .

### IV.2.2.1.3. Application

#### IV.2.2.1.3.1. Régulateur flou de type Mandani

Dans cette application, nous avons choisi comme entrées pour le régulateur l'erreur  $e$  entre la référence et la variable régulée ainsi que sa variation  $\Delta e$ . Nous avons opté pour des fonctions d'appartenance de type triangulaire car leur calcul n'est pas difficile, après plusieurs essais, il s'est avéré que le nombre de fonctions d'appartenance le plus appropriée est de sept pour l'erreur  $e$  et la sortie  $u$ , et il est de cinq pour la variation de l'erreur  $\Delta e$ :



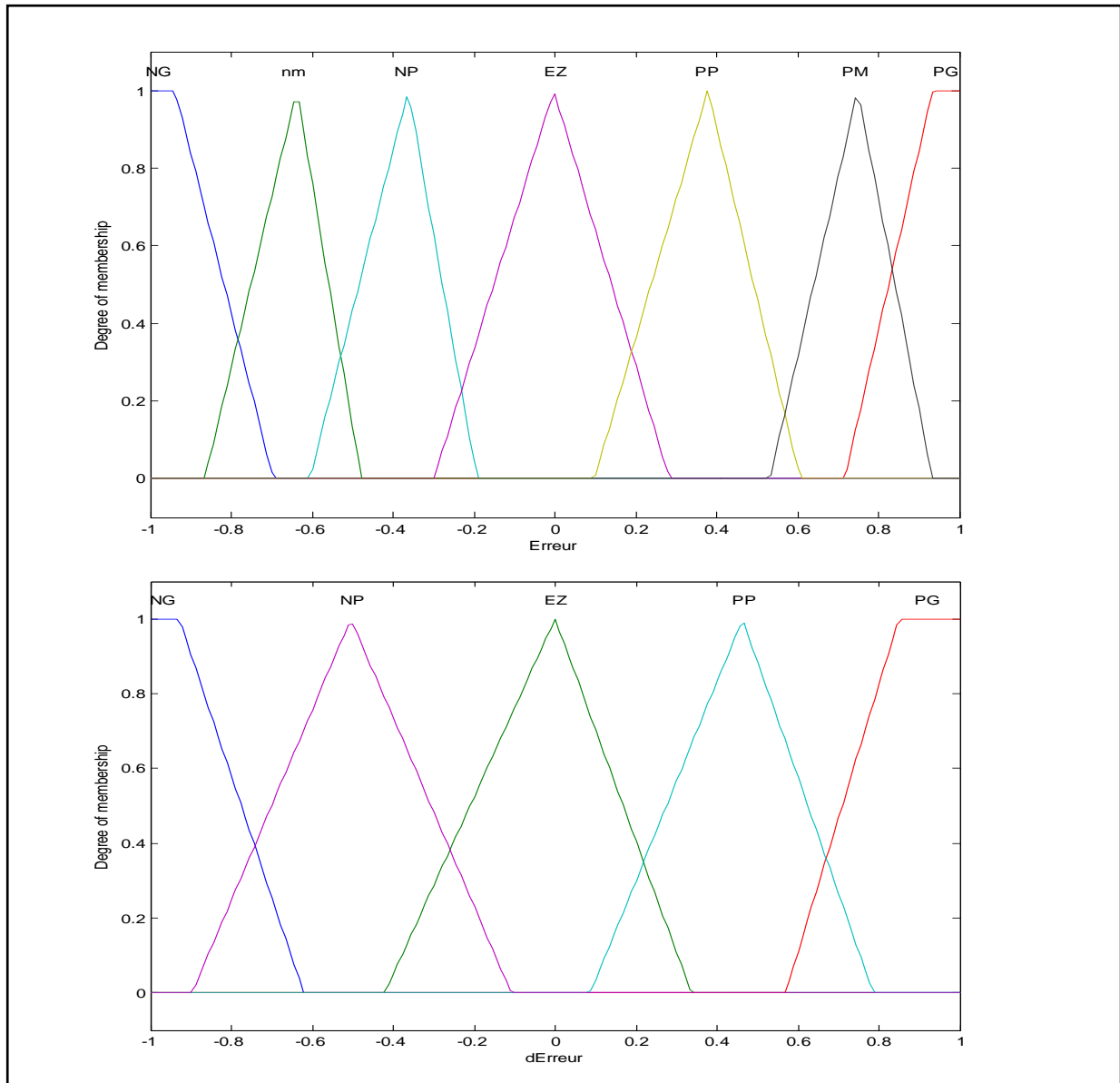


Figure IV.31: Fonctions d'appartenance pour le régulateur flou de type Mandani

IV.2.2.1.3.1.1. La table de décision

$e$ $\Delta e$	NG	NM	NP	EZ	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NM	NP	NM	NM	NP
NP	NG	NG	NM	NP	EZ	NP	EZ
EZ	NG	NM	NP	EZ	PP	NM	PG
PP	EZ	PP	ZE	PP	PM	PG	PG
PG	PP	PM	PM	PP	PM	PG	PG

Tableau IV.1: La table de décision du régulateur flou de type Mandani

#### IV.2.2.1.3.1.2. La caractéristique du régulateur

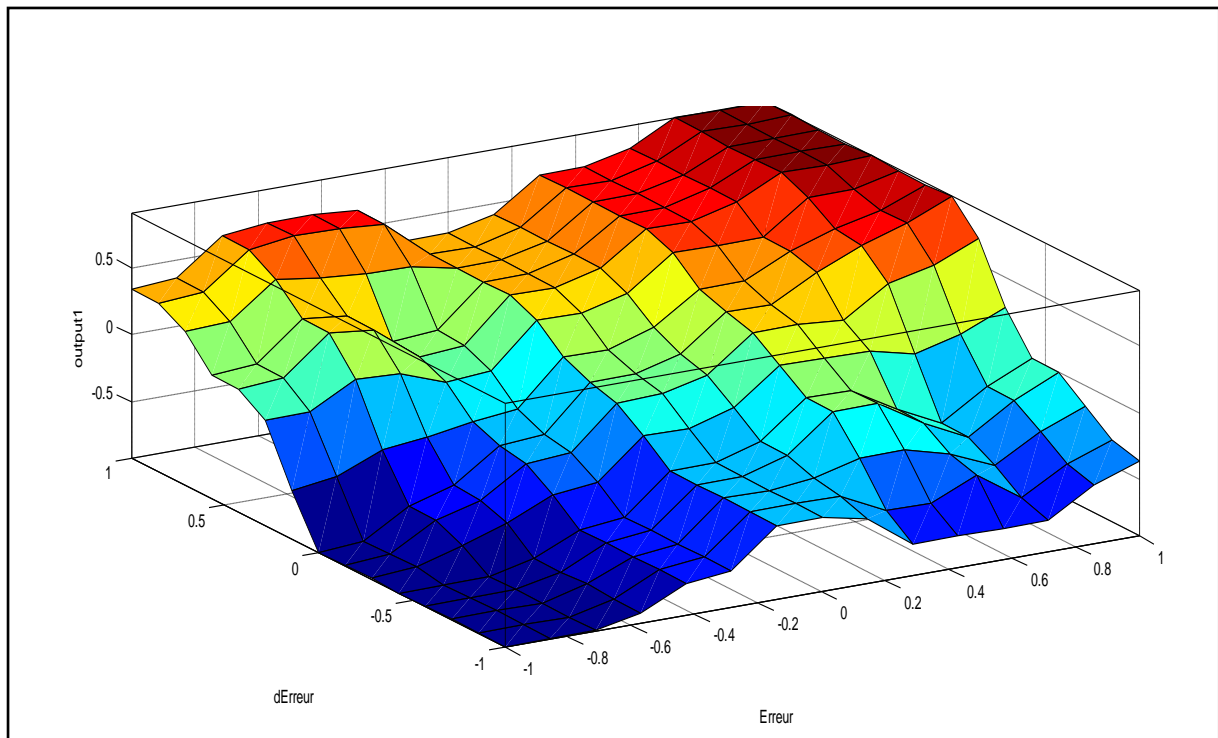


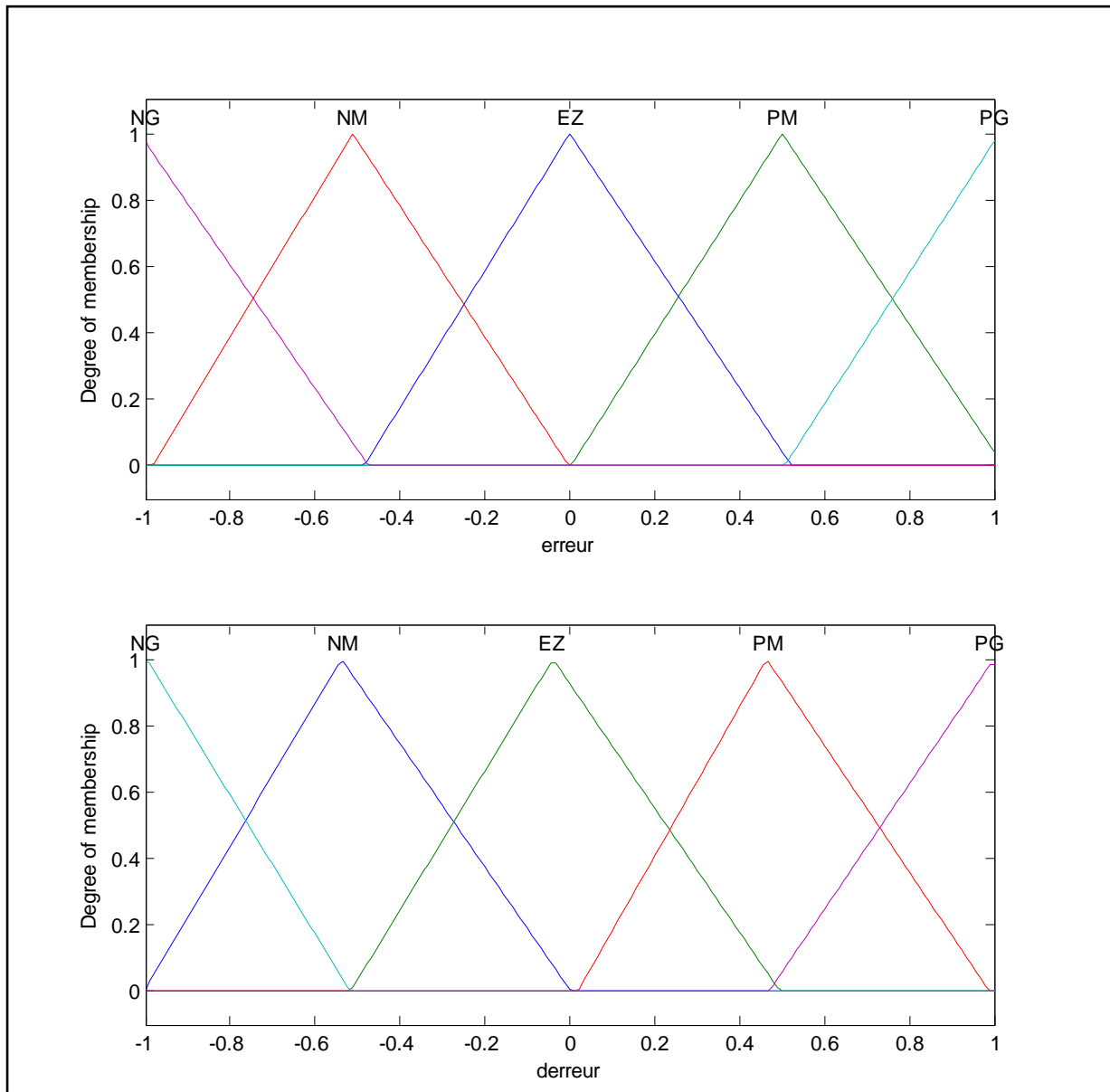
Figure IV.32: Surface de commande du régulateur flou type Mandani

#### IV.2.2.1.3.2. Régulateur flou de type Sugeno

Dans cette application, nous avons choisi des fonctions d'appartenance triangulaires pour les deux entrées erreur et derreur pour minimiser le temps de calcul de l'algorithme.

On a pris des fonctions d'appartenance symétriques, uniformément réparties sur l'univers de discours avec un chevauchement de 50%, elles sont symbolisées par :

PG : positif grand, PM : positif moyen, EZ : égal à zéro, NM : négatif moyen, NG : négatif grand.



**Figure IV.33:** Fonctions d'appartenance pour le régulateur flou de type Sugeno

**IV.2.2.1.3.2.1. La table de décision**

La table de règles (les coefficients  $C_j$ ) a été construite de façon très simple, le principe consiste à construire une table symétrique à diagonale nulles.

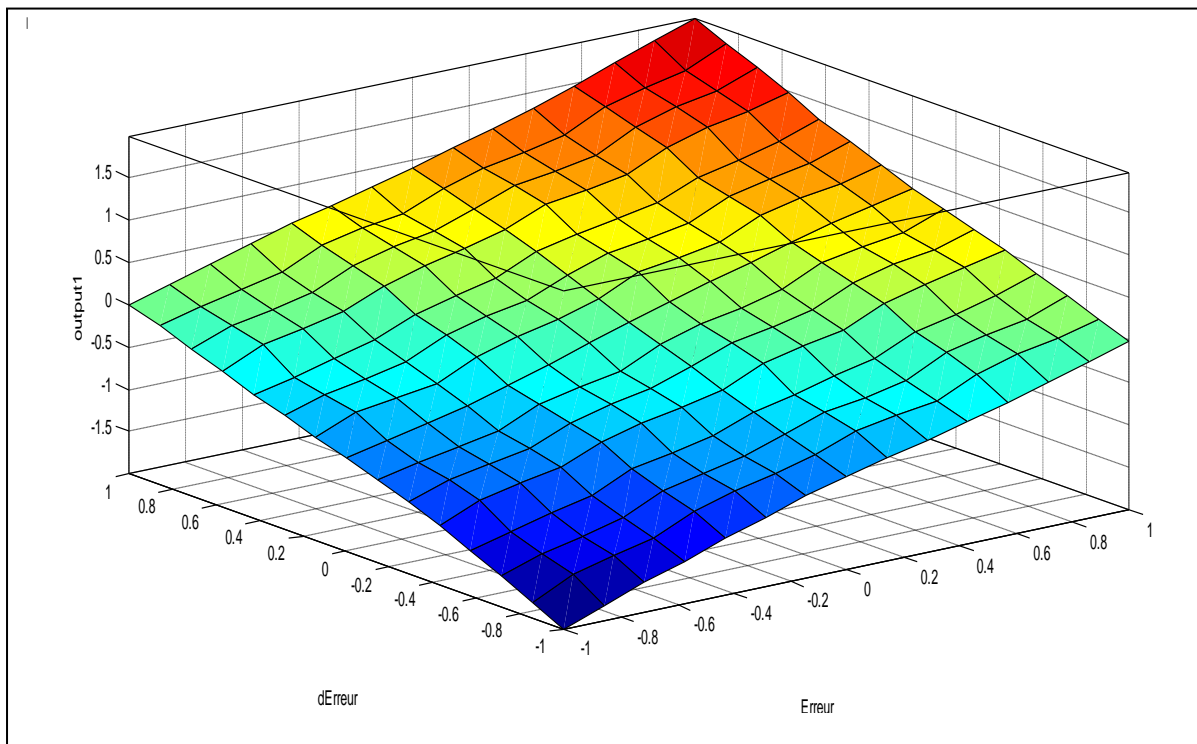
La commande alors construite cherche à faire évoluer le plus rapidement possible le système vers la diagonale de zéros en le maintenant dans cette zone jusqu'au point d'équilibre (0,0). Ce type de base de règles très simple permet d'avoir une bonne dynamique de réglage et une bonne robustesse par rapport aux variations paramétriques.

Cette table contient 25 règles décisionnelles composées par les paires situations /action de la forme : Si  $e$  est EZ et  $\Delta e$  est EZ alors  $\Delta u = 0$

$e \backslash \Delta e$	NG	NP	EZ	PP	PG
NG	-C1	-C2	-C3	-C4	0
NP	-C2	-C3	-C4	0	C4
EZ	-C3	-C4	0	C4	C3
PP	-C4	0	C4	C3	C2
PG	0	C4	C3	C2	C1

**Tableau IV.2:** La table de décision du régulateur flou de type Sugeno

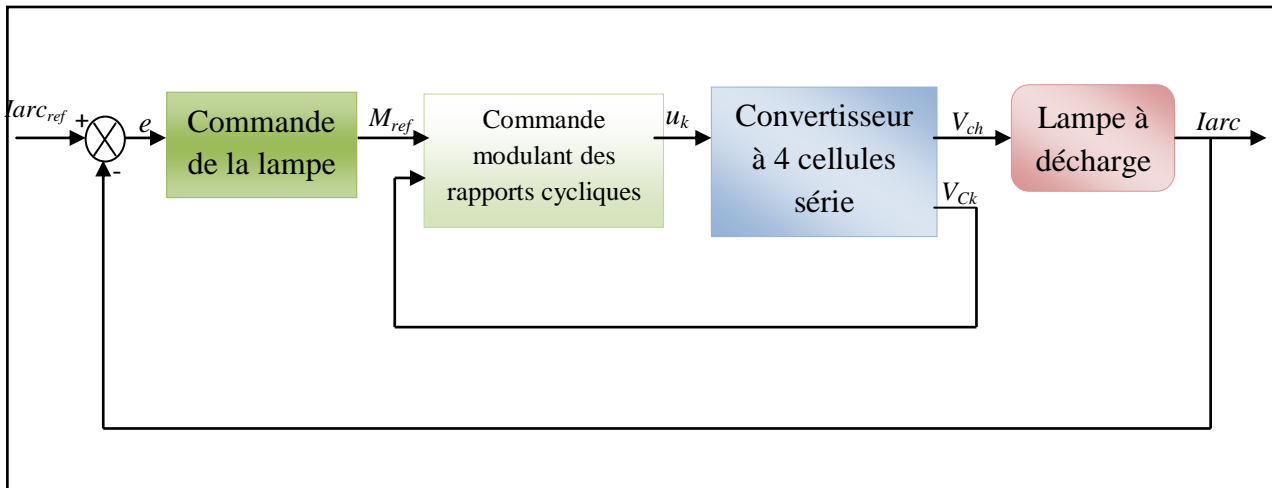
**IV.2.2.1.3.2.2. La caractéristique du régulateur**



**Figure IV.34:** Surface de commande du régulateur flou type Sugeno

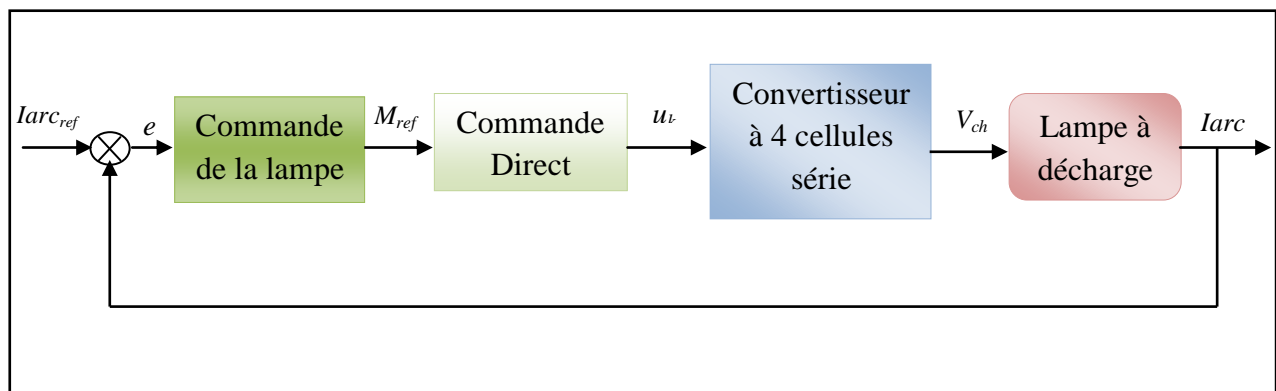
### IV.2.2.1.3.3. Schémas de commande

#### A) Commande modulant des rapports cycliques pour le convertisseur



**Figure IV.35:** Schéma de principe de la commande de la lampe à décharge avec une commande modulant des rapports cycliques pour le convertisseur

#### B) Commande directe pour le convertisseur



**Figure IV.36:** Schéma de principe de la commande de la lampe à décharge avec une commande direct pour le convertisseur

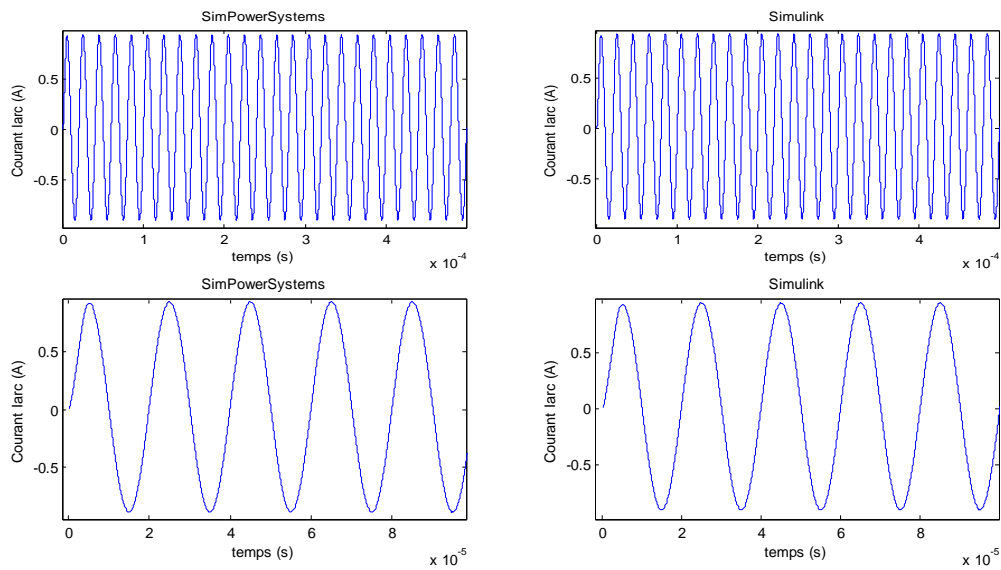
### IV.2.2.1.3.4. Résultats de la simulation

Dans ce paragraphe nous allons présenter les résultats du simulation de deux régulateurs floue en boucle fermée, un de type Sugeno et l'autre de type Mandani, par rapport aux différentes variations paramétriques et perturbation d'écrite précédemment, puis nous allons donner une comparaissant entre cette technique de commande et celle de PI.

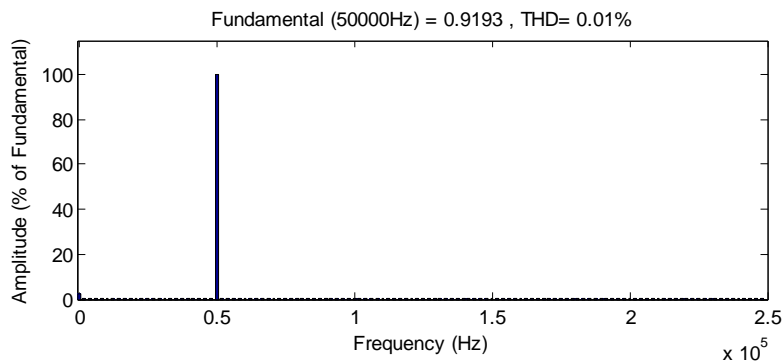
**IV.2.2.1.3.4. 1. Résultats de simulation pour le régulateur type Mandani**

**IV.2.2.1.3.4.1.1. Commande modulant des rapports cycliques**

**a) Courant d'arc**

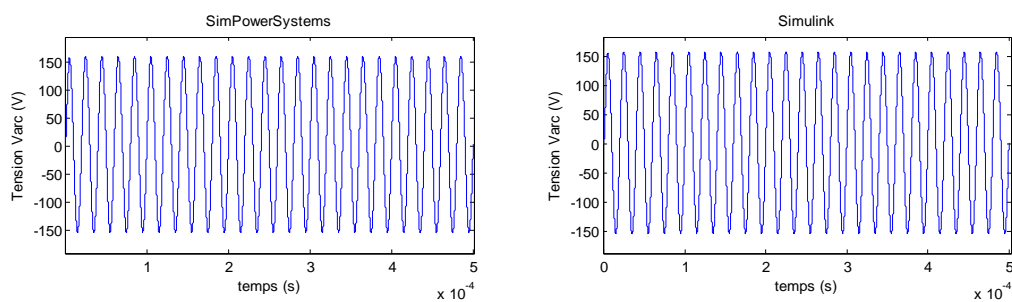


**Figure IV.37-a:** Forme d'onde du courant d'arc  $i_{arc}$  pour un régulateur flou type Mandani



**Figure IV. 37-b:** Spectre harmonique du courant d'arc  $i_{arc}$  pour un régulateur flou type Mandani

**b) Tension d'arc**



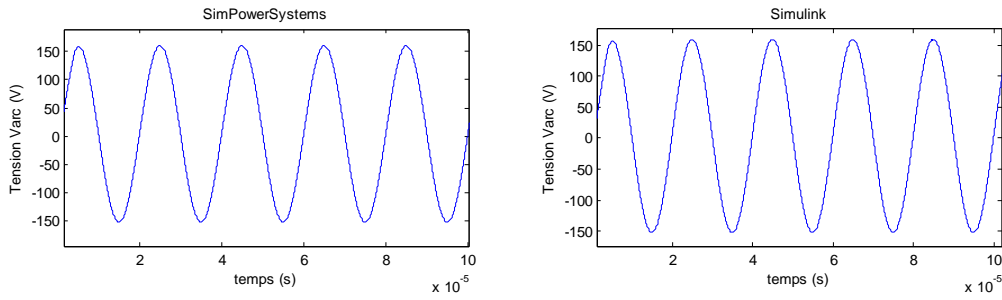


Figure IV.38-a: Forme d'onde de la tension d'arc  $v_{arc}$  pour un régulateur flou type Mandani

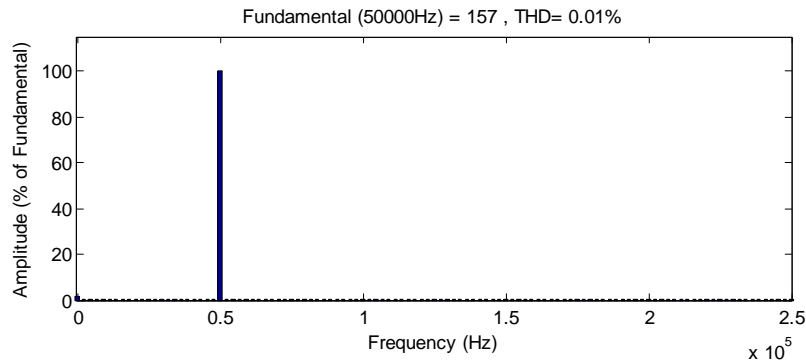


Figure IV.38-b: Spectre harmonique de la tension d'arc  $V_{arc}$  pour un régulateur flou type Mandani

c) Courant d'arc efficace

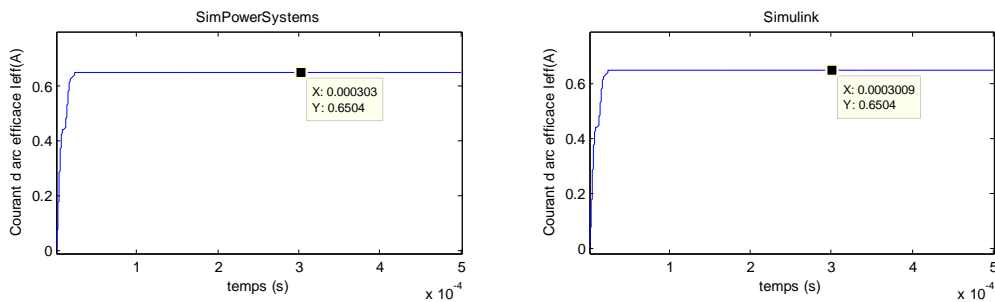


Figure IV.39: Courant d'arc efficace  $I_{arc}$  pour un régulateur flou type Mandani

d) Courant de charge

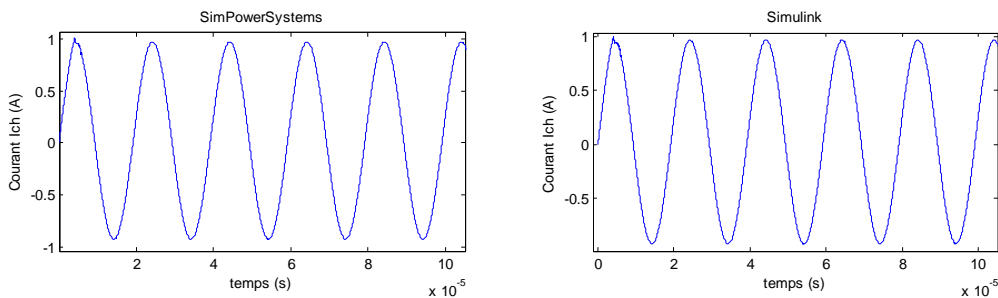


Figure IV.40-a: Forme d'onde du courant de charge  $i_{ch}$  pour un régulateur flou type Mandani

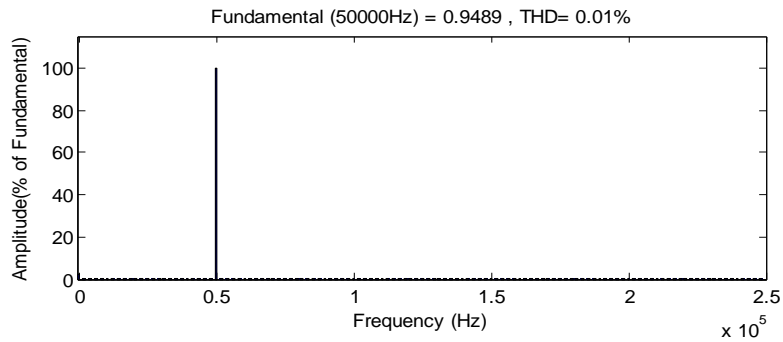


Figure IV.40-b: Spectre harmonique du courant de charge  $i_{ch}$  pour un régulateur flou type Mandani

e) Tension de charge

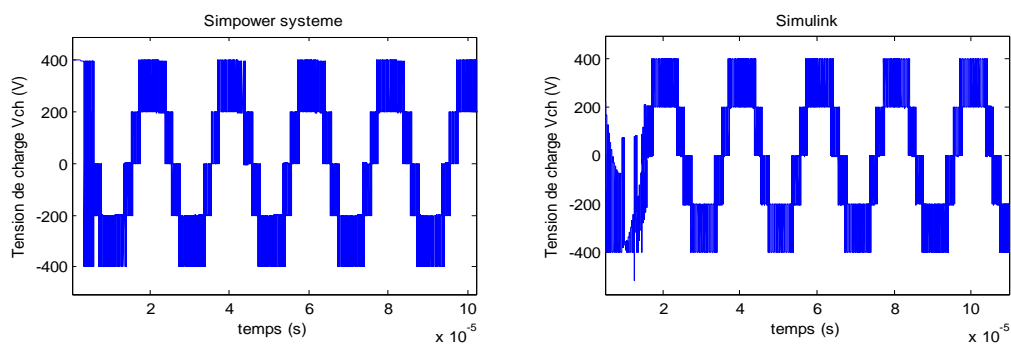


Figure IV.41-a: Forme d'onde de la tension de charge  $v_{ch}$  pour un régulateur flou type Mandani

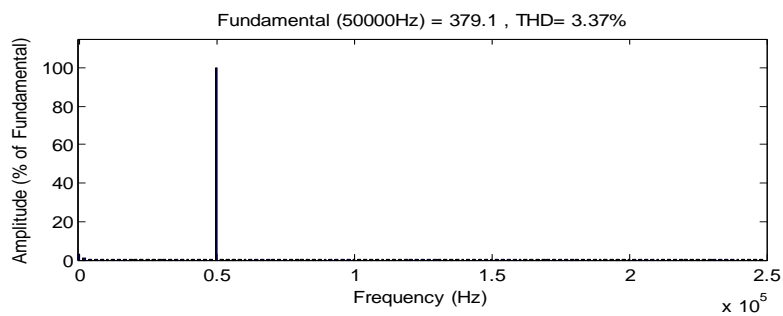
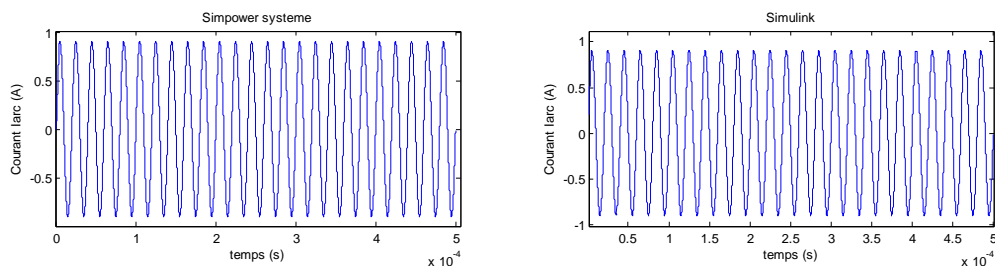


Figure IV.41-b: Spectre harmonique de la tension de charge  $v_{ch}$  pour un régulateur flou type Mandani

IV.2.2.1.3.4.1.2. Commande directe pour le convertisseur

a) Courant d'arc





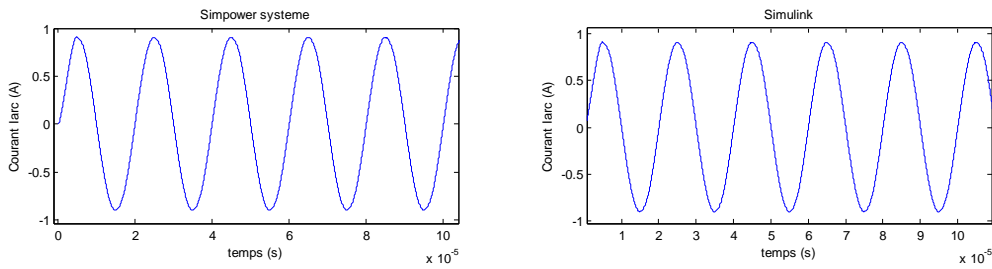


Figure IV.42-a: Forme d'onde du courant d'arc  $i_{arc}$  pour un régulateur flou type Mandani

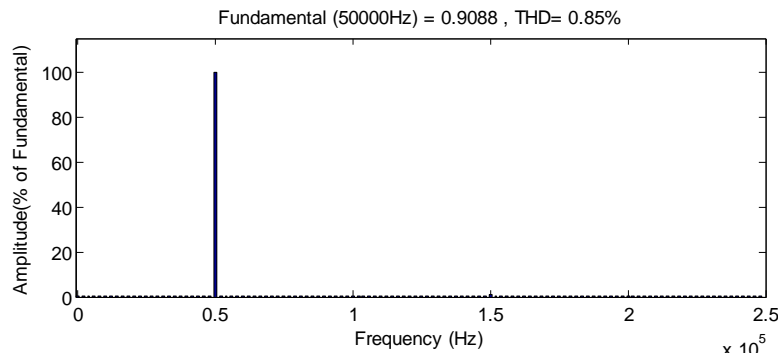


Figure IV.42-b: Spectre harmonique du courant d'arc  $i_{arc}$  pour un régulateur flou type Mandani

b) Tension d'arc

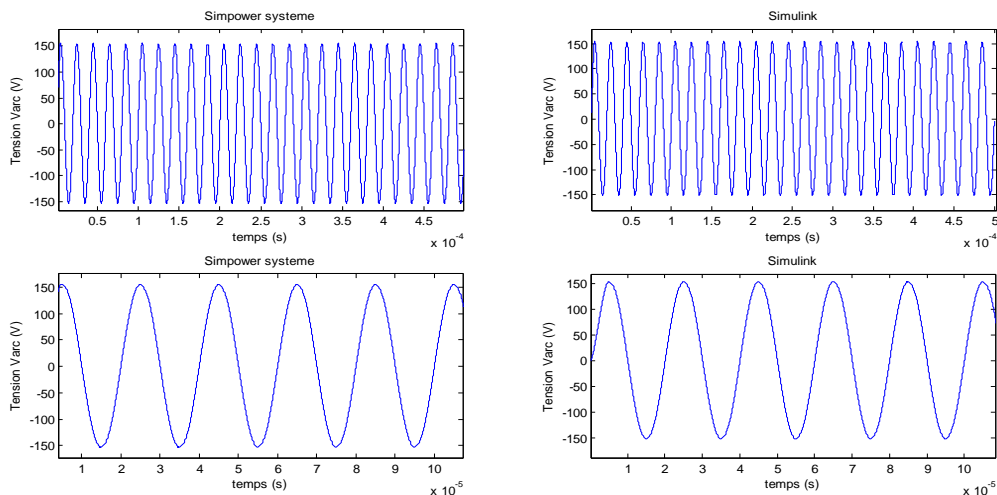


Figure IV.43-a: Forme d'onde de la tension d'arc  $v_{arc}$  pour un régulateur flou type Mandani

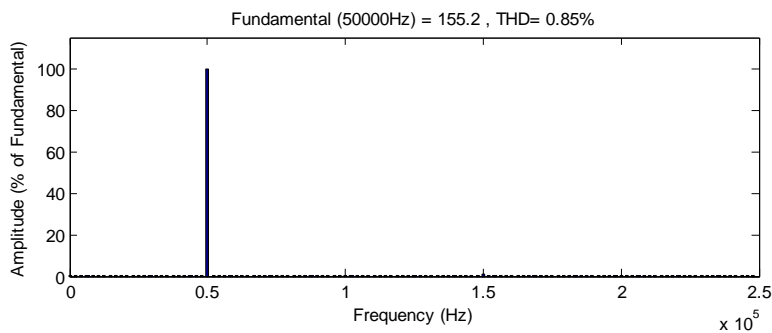


Figure IV.43-b: Spectre harmonique de la tension d'arc  $v_{arc}$  pour un régulateur flou type Mandani

c) Courant d'arc efficace

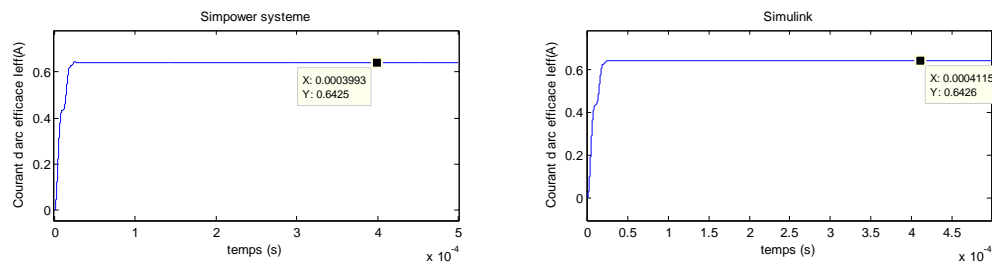


Figure IV.44: Forme d'onde du courant d'arc efficace  $I_{arc}$  pour un régulateur flou type Mandani

d) Courant de charge

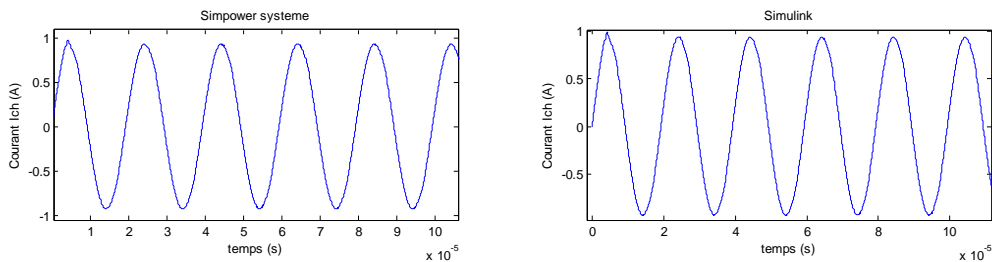


Figure IV.45-a: Forme d'onde du courant de charge  $i_{ch}$  pour un régulateur flou type Mandani

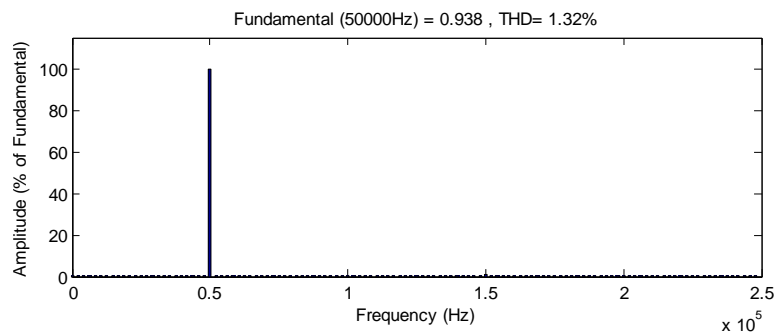


Figure IV.45-b: Spectre harmonique du courant de charge  $i_{ch}$  pour un régulateur flou type Mandani

e) Tension de charge

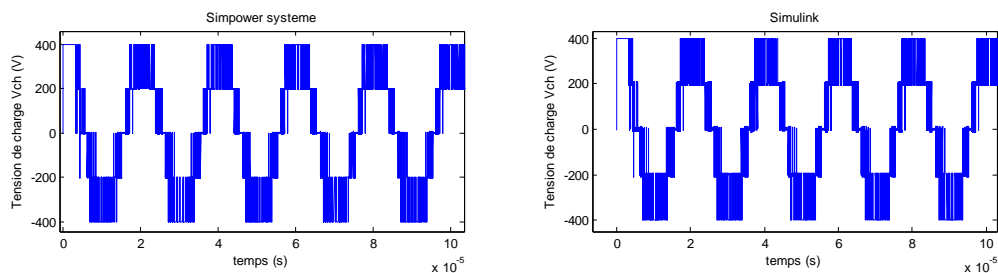
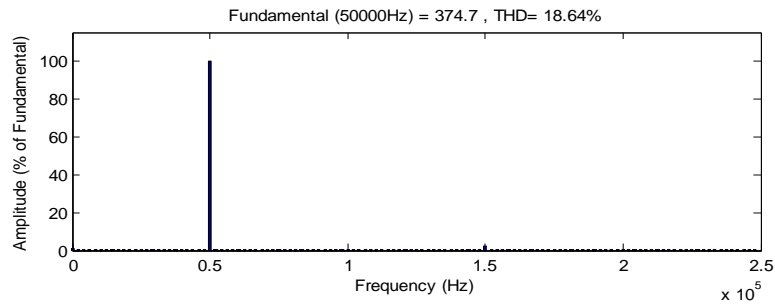


Figure IV.46-a: Forme d'onde de la tension de charge  $v_{ch}$  pour un régulateur flou type Mandani



**Figure IV.46-b:** Spectre harmonique de la tension de charge  $v_{ch}$  pour un régulateur flou type Mandani

### Interprétation

D’après les résultats simulation obtenues, on observe une réponse très rapide du courant d'arc qui atteint sa valeur de référence après  $24 \mu s$  pour les deux commande du convertisseur, a la différence que la commande modulants des rapports cycliques donne de meilleur résultat sur le plan de THD du courant d’arc et la tension de sortie du convertisseur, ces deux dernier ont atteint respectivement des valeurs trop élevés 0.84% et 18.64% en utilisant la commande directe pour le convertisseur.

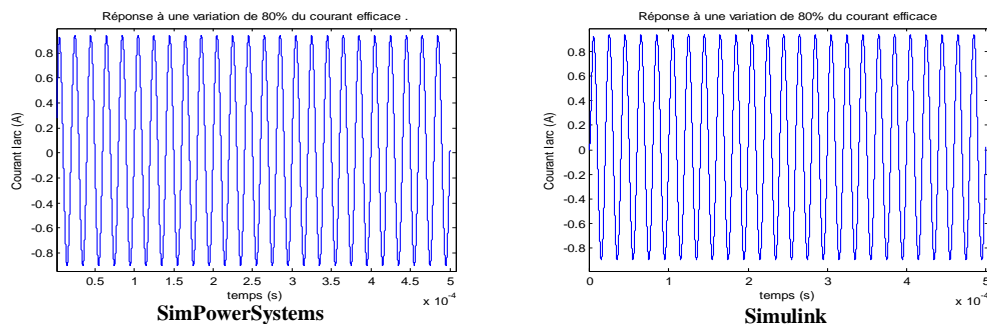
Par contre avec l’utilisation de la commande modulant des rapports cycliques, on enregistre des améliorations importantes au niveau du contenu spectral de toutes les formes d’onde des différentes grandeurs de la lampe à décharge

Dans ce qui suit, nous allons travailler avec la commande modulants des rapports cycliques vue des meilleurs performances que l’offre

#### IV.2.2.1.3.4.2. Test de robustesse

##### 1) Variation du courant d’arc efficace de 80%

##### a) Courant d’arc



**Figure IV.47:** Courant d’arc  $i_{arc}$  soumis a une perturbation à 0.0001s

b) Tension d'arc

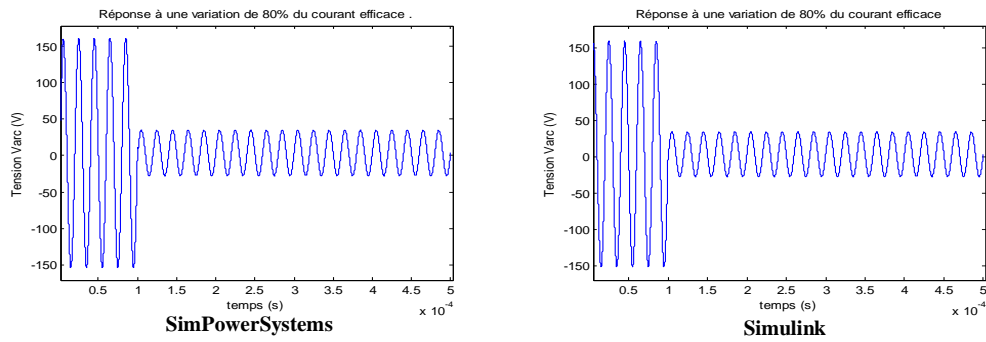


Figure IV.48 : Tension d'arc  $v_{arc}$  soumise à une perturbation à 0.0001s

c) Courant d'arc efficace

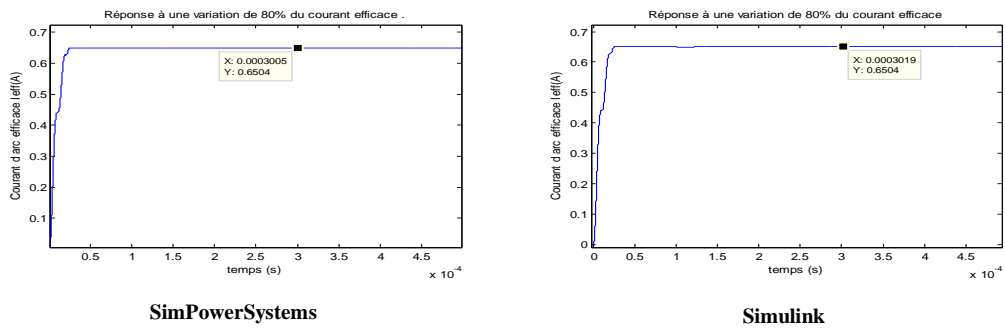


Figure IV.49 : Courant d'arc efficace soumis à une perturbation à 0.0001s

2) Variation de Rarc de 90%

a) Courant d'arc

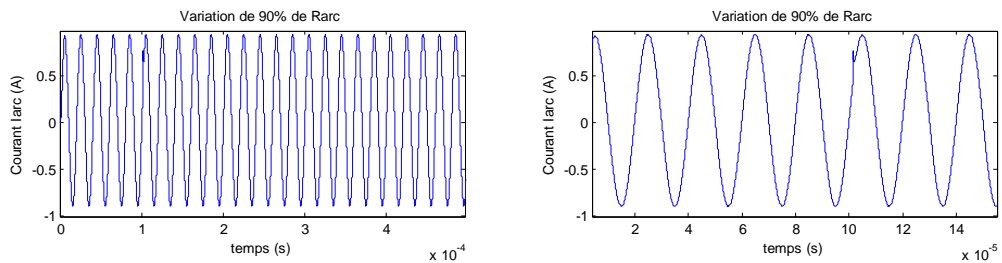
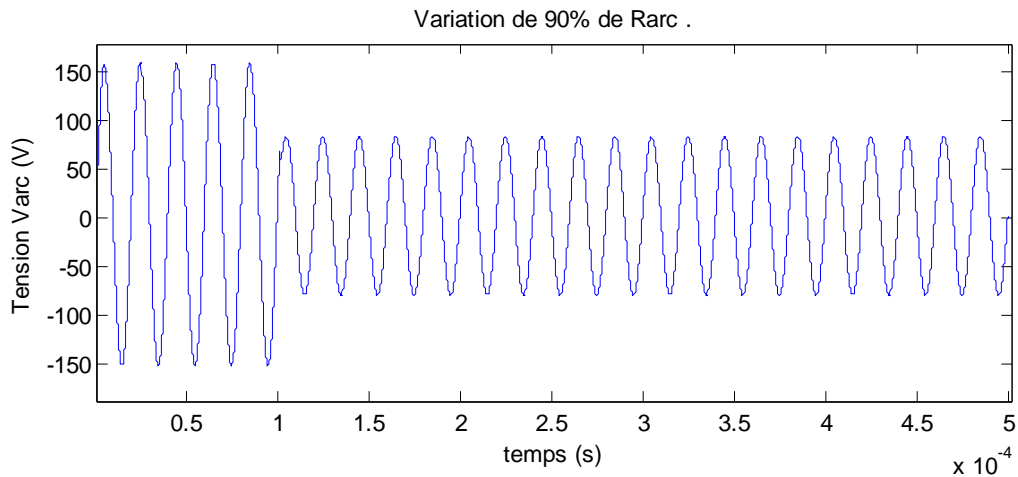


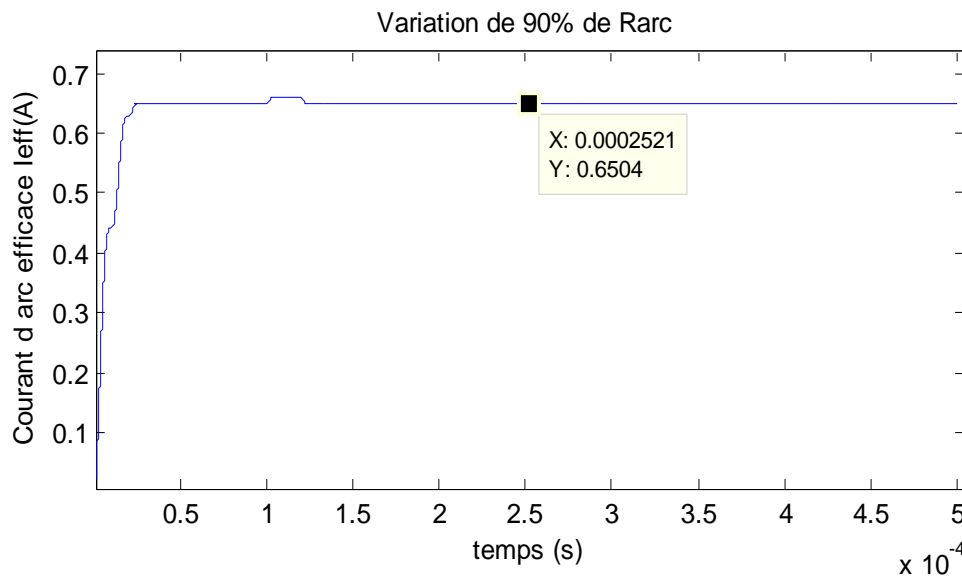
Figure IV.50: Courant d'arc  $i_{arc}$  soumis a une perturbation à 0.0001s

**b) Tension d'arc**



**Figure IV.51:** Tension d'arc  $v_{arc}$  soumise à une perturbation à 0.0001s

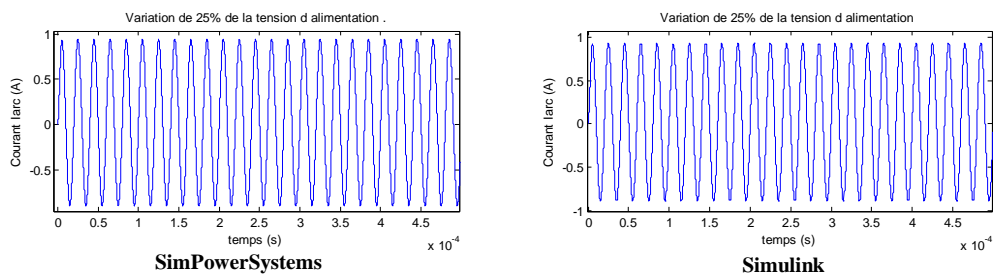
**c) Courant d'arc efficace**



**Figure IV.52:** Courant d'arc efficace soumis à une perturbation à 0.0001s

**3) Variation de 25% de la tension d'alimentation**

**a) Courant d'arc**



**Figure IV.53:** Courant d'arc  $i_{arc}$  soumis à une perturbation à 0.0001s

b) Tension d'arc

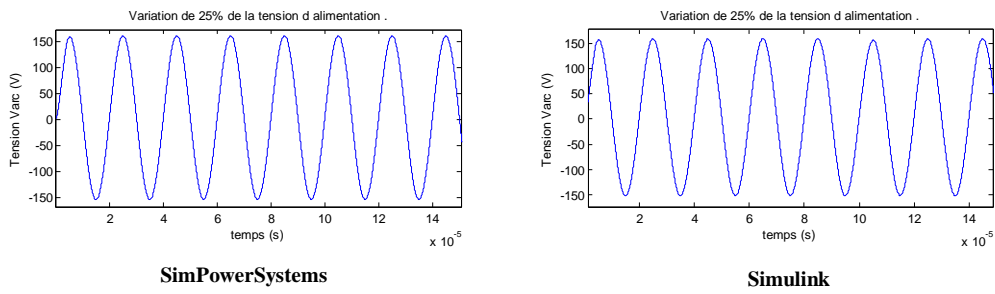


Figure IV.54: Tension d'arc  $v_{arc}$  soumise à une perturbation à 0.0001s

c) Courant d'arc efficace

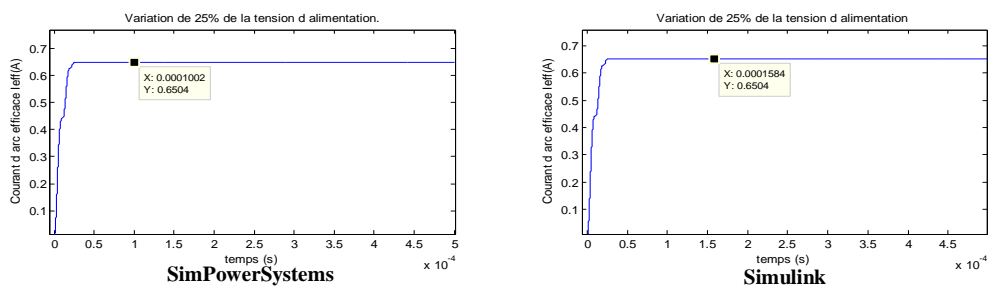


Figure IV.55: Courant d'arc efficace soumis à une perturbation à 0.0001s

d) Tension de charge

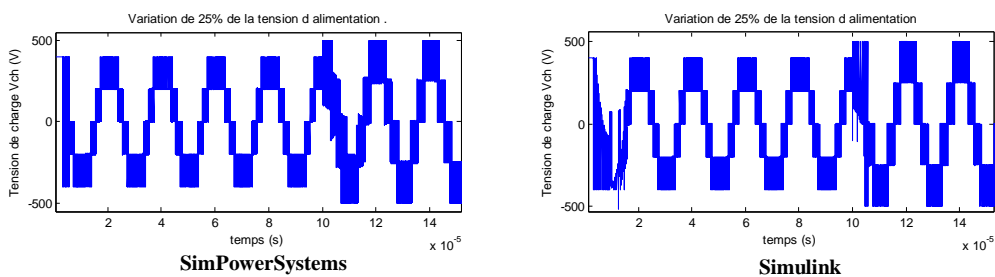


Figure IV.56: Tension de charge  $v_{ch}$  soumise à une perturbation à 0.0001s

e) Tension flottantes

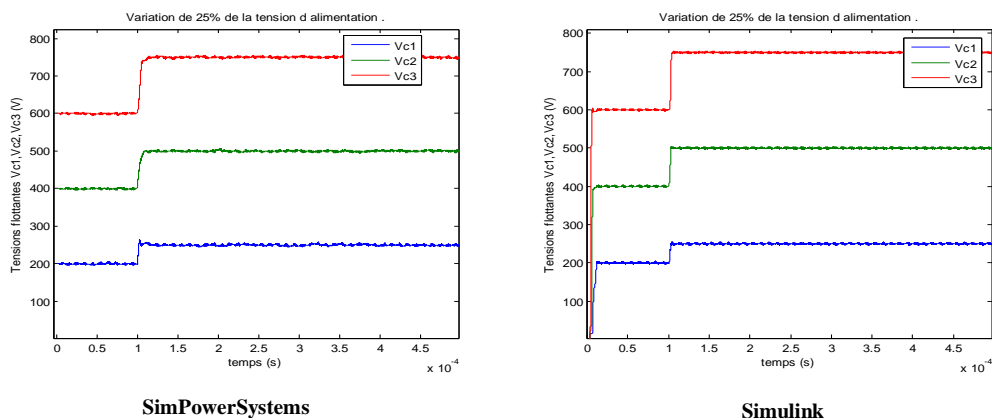


Figure IV.57: Tension flottantes soumises à une perturbation à 0.0001s

**Interprétation**

Après avoir terminé toutes la série de test on constate que le régulateur flou introduit présent une très grande robustesse vis avis les variations paramétriques et des perturbations de telle sorte qu'il arrive à rejeter des variations allant jusqu'a 80% de la valeur efficace du courant d'arc et 90% de la valeur de la résistance d'arc avec un effet insignifiant sur la valeur régulée.

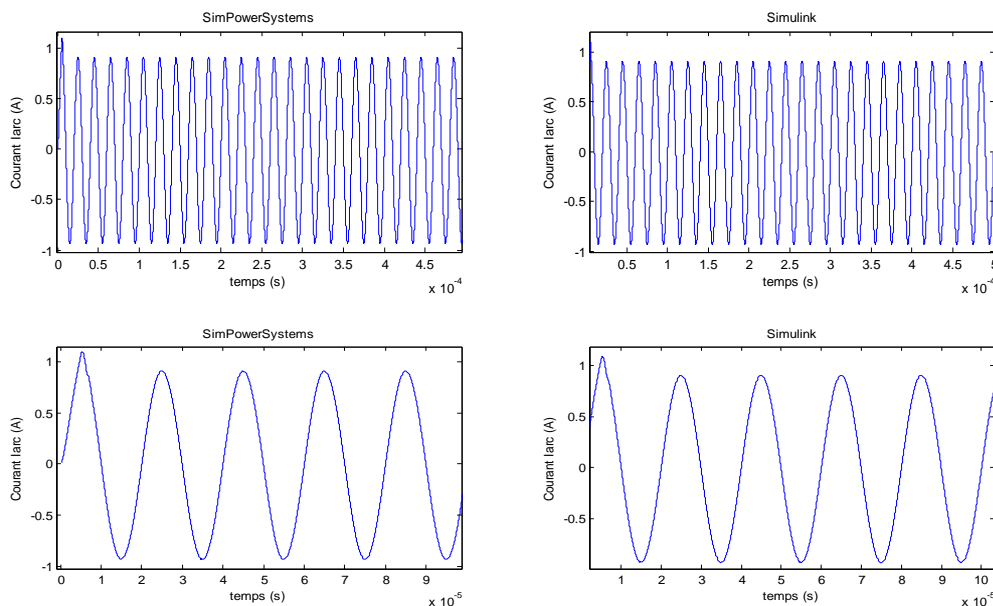
Cependant ce régulateur est très difficile a le mettre en œuvre en pratique vue le nombre important de calcul qu'il nécessite au bout d'une courte durée qui correspond à la fréquence d'échantillonnage du régulateur flou qui proche de 32MHz.

Pour palier a ce problème nous allons proposer un régulateur de type Sugeno qui nécessite pas beaucoup de calcul tout en gardant les performances

**IV.2.2.1.3.4.3. Résultats de simulation pour le régulateur type Sugeno**

**IV.2.2.1.3.4.3.1. Commande modulant des rapports cycliques**

**a) Courant d'arc**



**Figure IV.58-a:** Forme d'onde du courant d'arc  $i_{arc}$  pour un régulateur flou type Sugeno

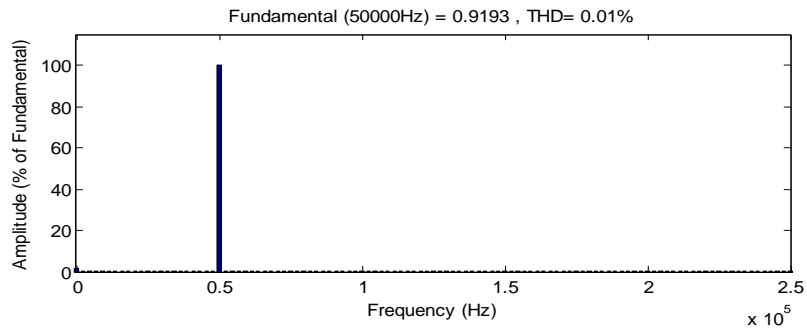


Figure IV.58-b: Spectre harmonique du courant d'arc  $i_{arc}$  pour un régulateur flou type Sugeno

b) Tension d'arc

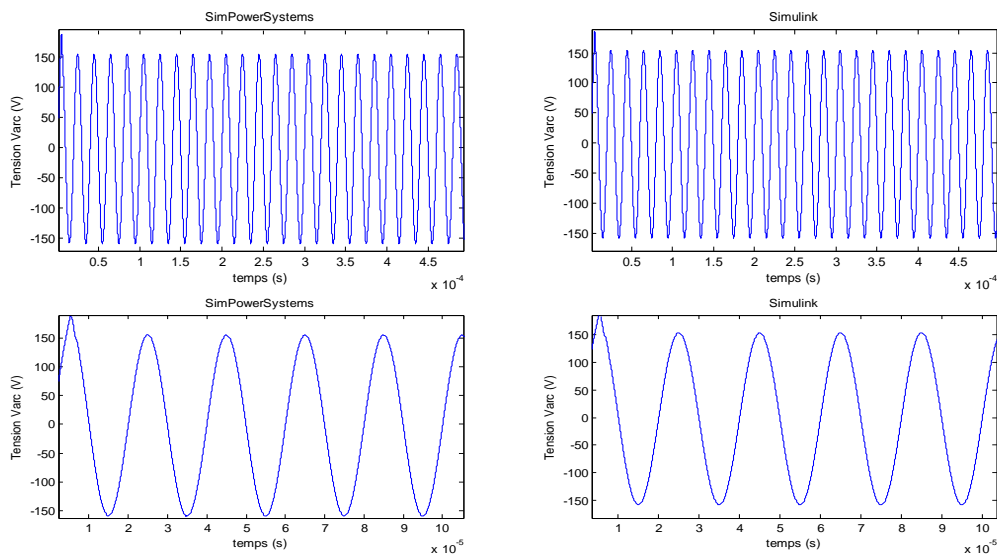


Figure IV.59-a: Forme d'onde de la tension d'arc  $v_{arc}$  pour un régulateur flou type Sugeno

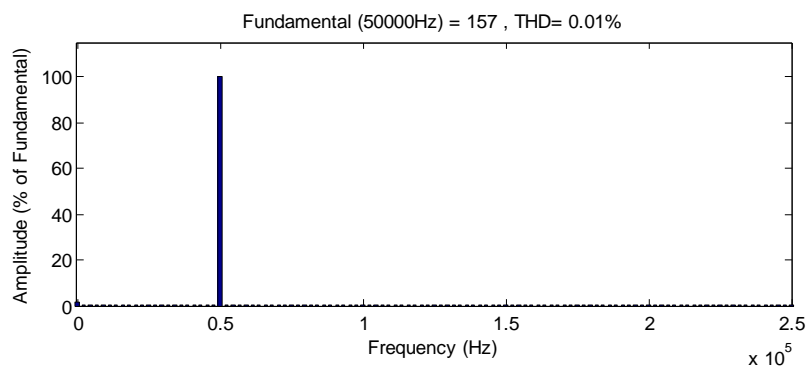


Figure IV.59-b: Spectre harmonique de la tension d'arc  $v_{arc}$  pour un régulateur flou type Sugeno



c) Courant d'arc efficace

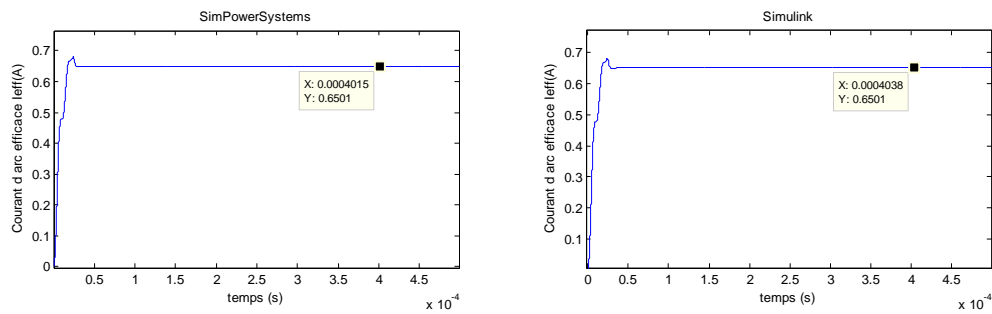


Figure IV.60 : Courant d'arc efficace  $I_{arc}$  pour un régulateur flou type Sugeno

d) Courant de charge

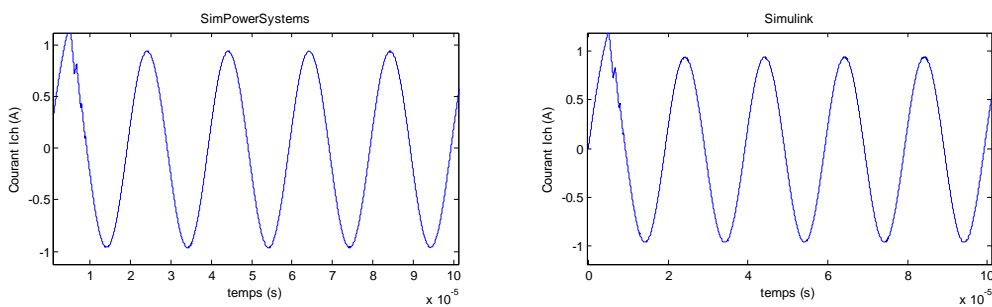


Figure IV.61-a: Forme d'onde du courant de charge  $i_{ch}$  pour un régulateur flou type Sugeno

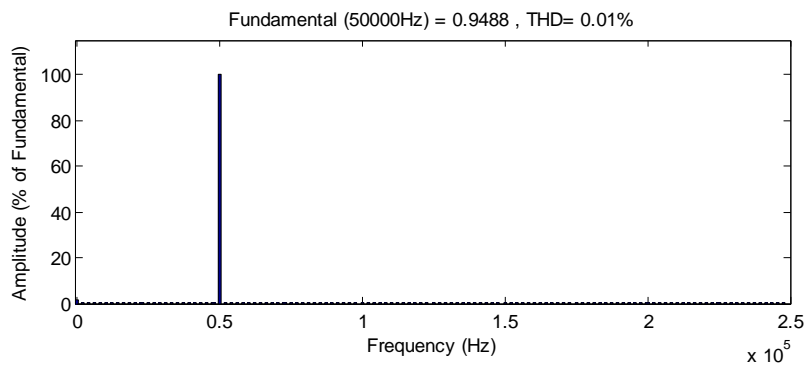


Figure IV.61-b: Spectre harmonique du courant de charge  $i_{ch}$  pour un régulateur flou type Sugeno

e) Tension de charge

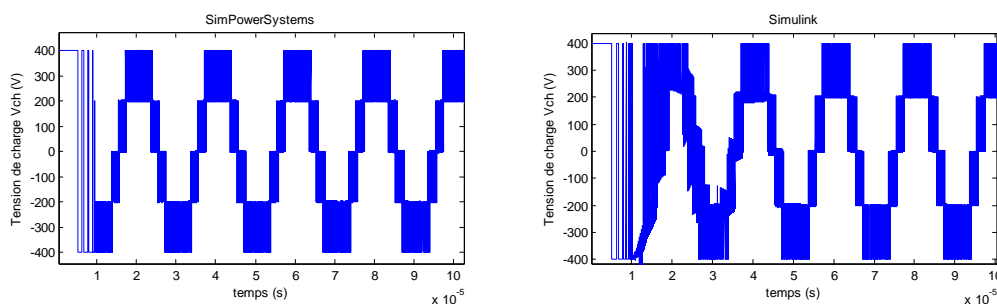


Figure IV.62-a: Forme d'onde de la tension de charge  $v_{ch}$  pour un régulateur flou type Sugeno

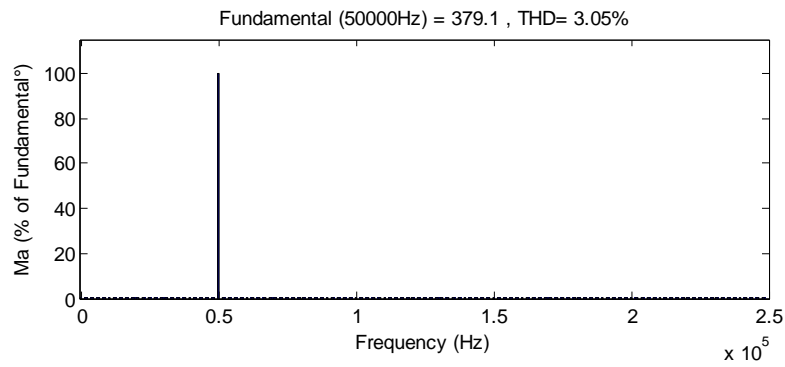


Figure IV.62-b : Spectre harmonique de la tension de charge  $v_{ch}$  pour un régulateur flou type Sugeno

IV.2.2.1.3.4.3.2. Commande directe pour le convertisseur

a) Courant d'arc

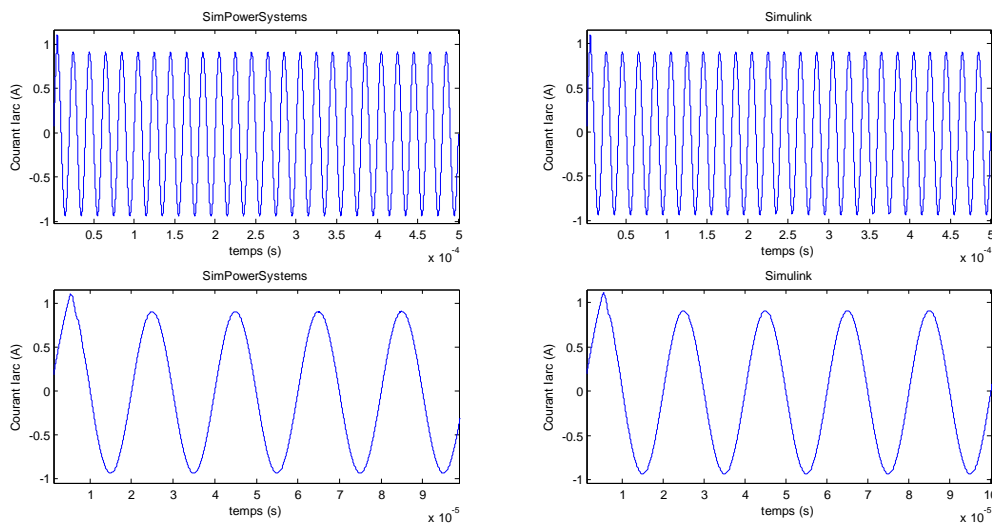


Figure IV.63-a: Forme d'onde du courant d'arc  $i_{arc}$  pour un régulateur flou type Sugeno

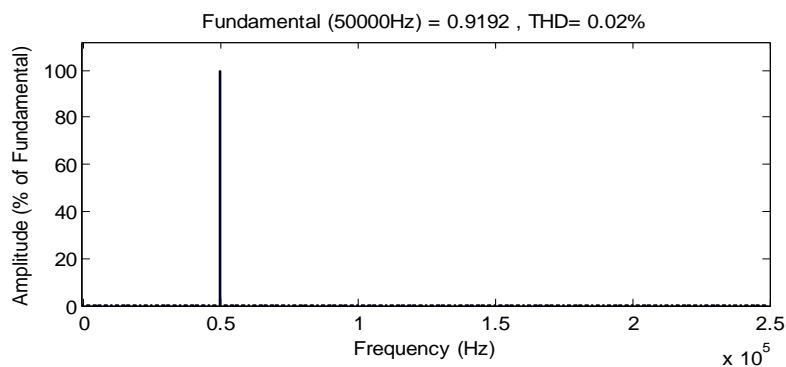


Figure IV.63-b: Spectre harmonique du courant d'arc  $i_{arc}$  pour un régulateur flou type Sugeno

b) Tension d'arc

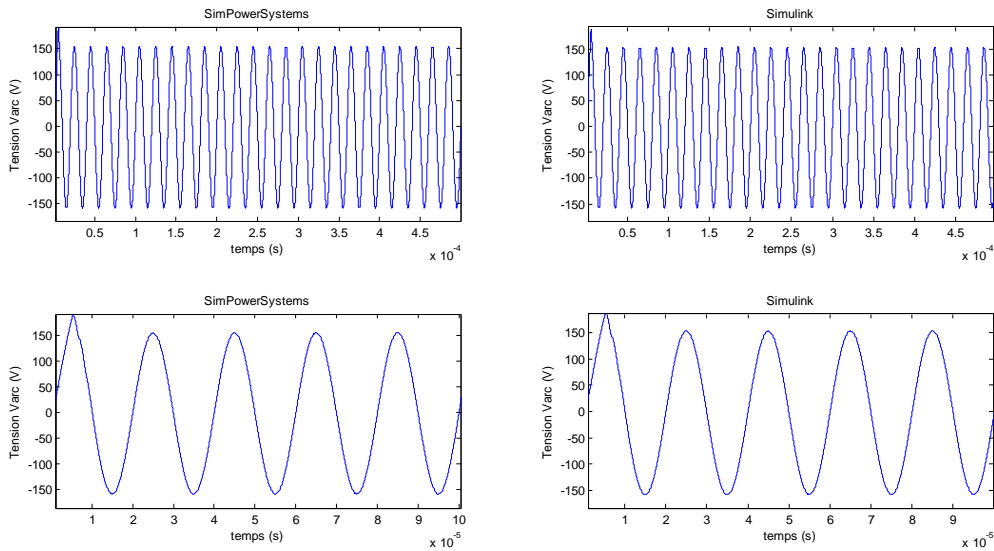


Figure IV.64-a: Forme d'onde de la tension d'arc  $v_{arc}$  pour un régulateur flou type Sugeno

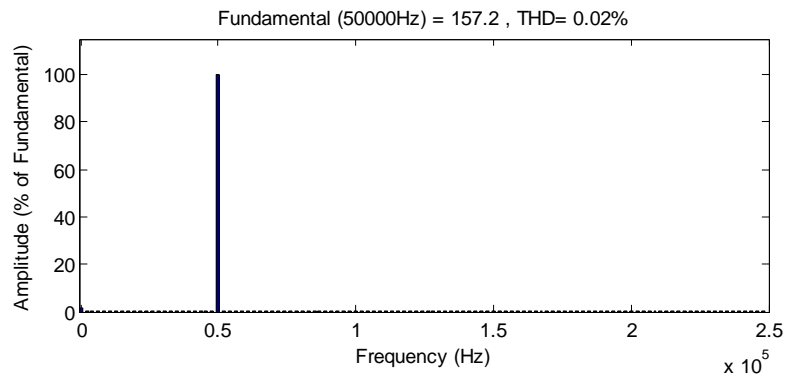


Figure IV.64-b: Spectre harmonique de la tension d'arc  $v_{arc}$  pour un régulateur flou type Sugeno

c) Courant d'arc efficace

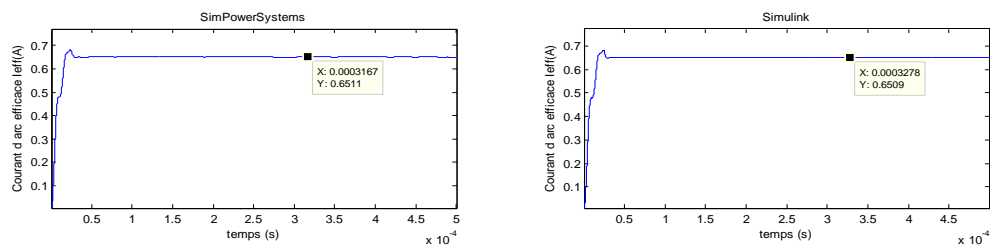


Figure IV.65: Courant d'arc efficace  $I_{arc}$  pour un régulateur flou type Sugeno

d) Courant de charge

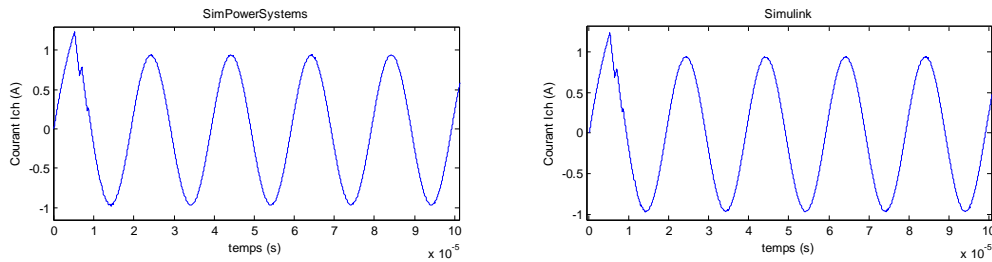


Figure IV.66-a: Forme d'onde du courant de charge  $i_{ch}$  pour un régulateur flou type Sugeno

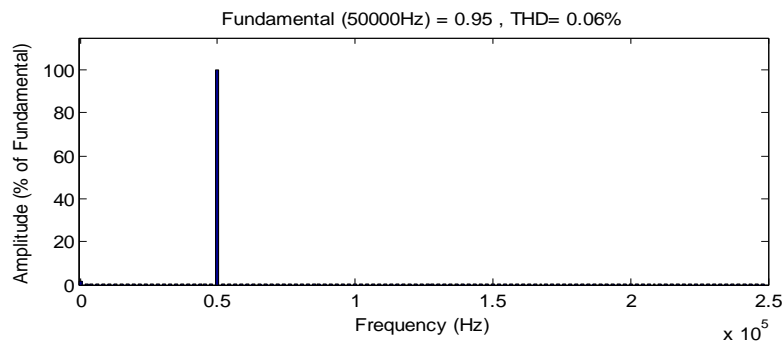


Figure IV.66-b: Spectre harmonique du courant de charge  $i_{ch}$  pour un régulateur flou type Sugeno

e) Tension de charge

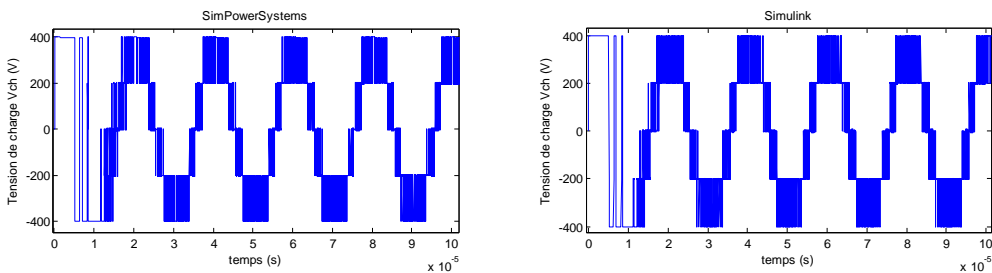


Figure IV.67-a: Forme d'onde de la tension de charge  $v_{ch}$  pour un régulateur flou type Sugeno

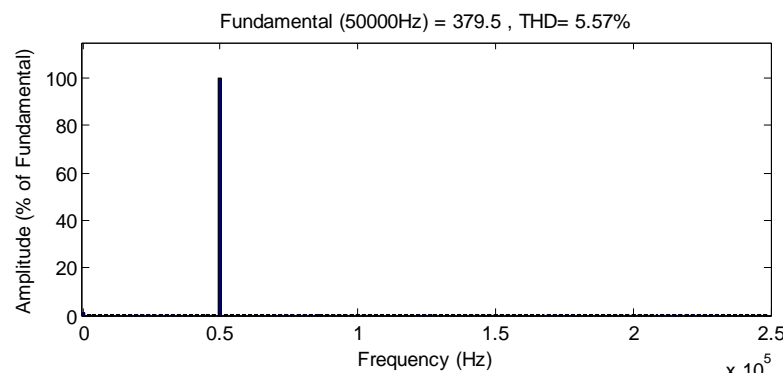


Figure IV.67-b: Spectre harmonique de la tension de charge  $v_{ch}$  pour un régulateur flou type Sugeno

**Interprétation**

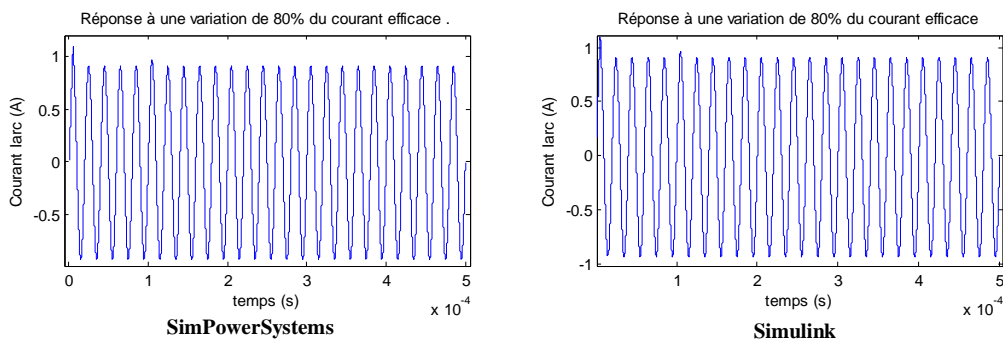
On remarque que ce régulateur apporte de très bonnes performances à la lampe sur le plan THD du courant d'arc qui est réduit à 0.01% on utilisant la commande modulants des rapports cycliques pour le convertisseur et 0.02 % on utilisant la commande directe par rapport à celui obtenu avec le régulateur PI. Les formes d'onde des courants et des tensions sont parfaitement sinusoïdales.

Nous remarquons aussi que les résultats obtenues par le modèle instantané du convertisseur (sous Simulink) sont presque identique avec ceux obtenus avec SimPowerSystems.

**IV.2.2.1.3.4.4. Test de robustesse**

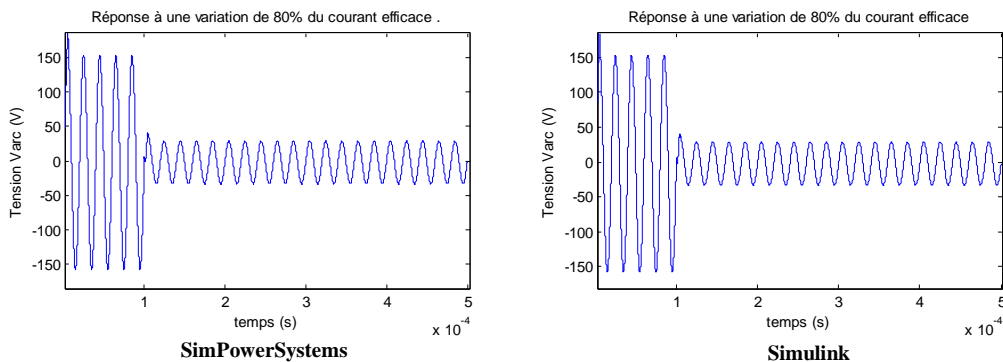
**1) Variation du courant d'arc efficace de 80%**

**a) Courant d'arc**



**Figure IV.68:** Courant d'arc  $i_{arc}$  soumis a une perturbation à 0.0001s

**b) Tension d'arc**



**Figure IV.69:** Tension d'arc  $v_{arc}$  soumise a une perturbation à 0.0001s

c) Courant d'arc efficace

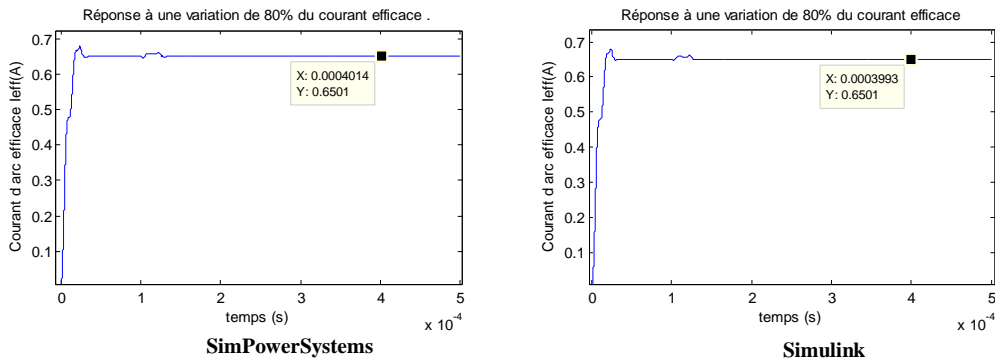


Figure IV.70: Courant d'arc efficace soumis à une perturbation à 0.0001s

2) Variation de Rarc de 90%

a) Courant d'arc

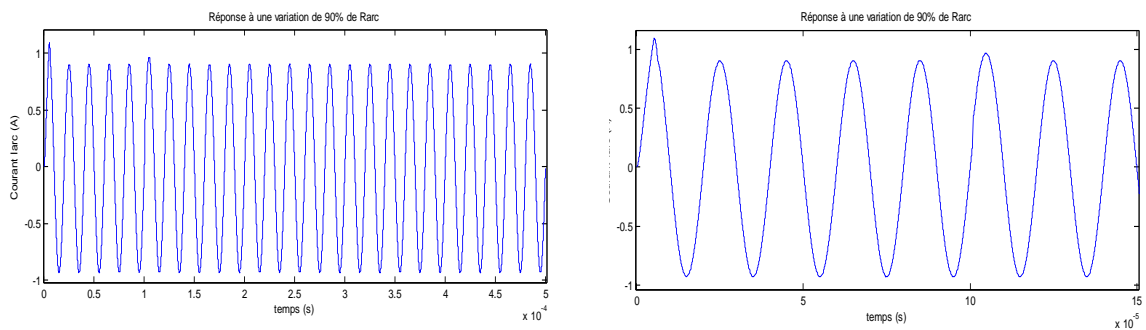


Figure IV.71: Courant d'arc  $i_{arc}$  soumis à une perturbation à 0.0001s

b) Tension d'arc

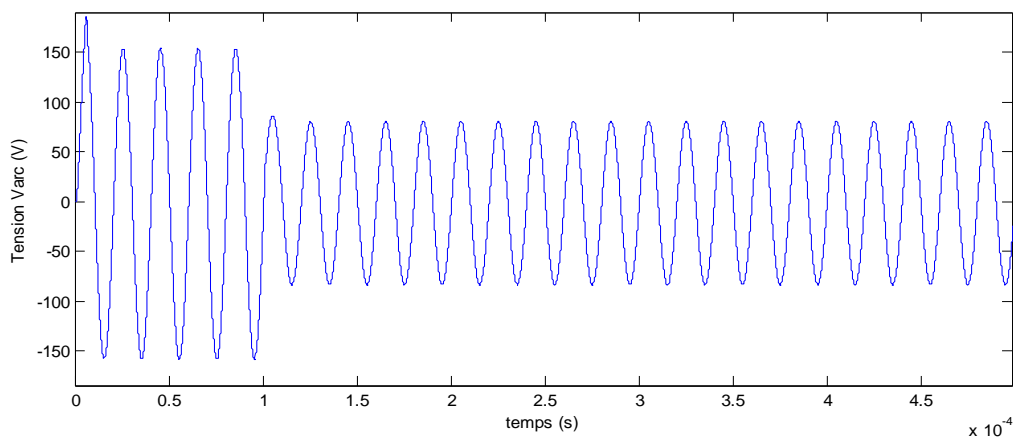


Figure IV.72: Tension d'arc  $v_{arc}$  soumise à une perturbation à 0.0001s

c) Courant d'arc efficace

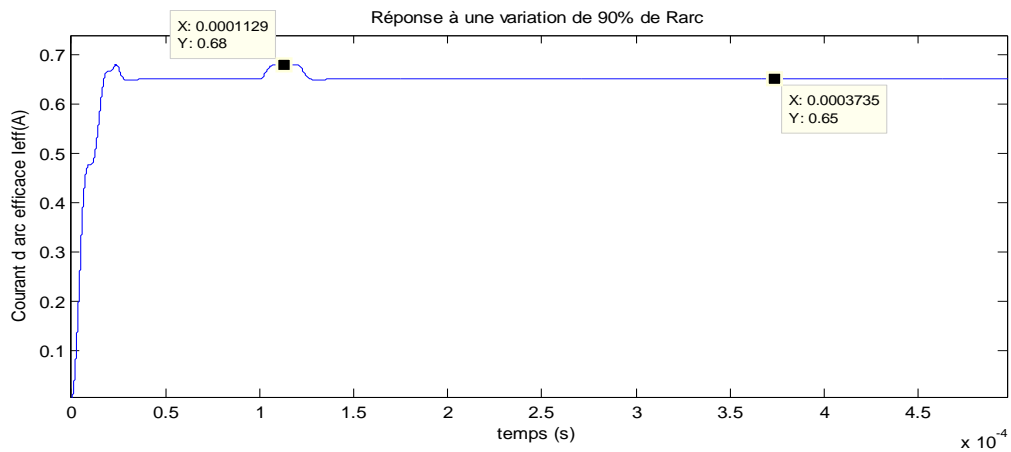


Figure IV.73: Courant d'arc efficace soumis à une perturbation à 0.0001s

3) Variation de 25% de la tension d'alimentation

f) Courant d'arc

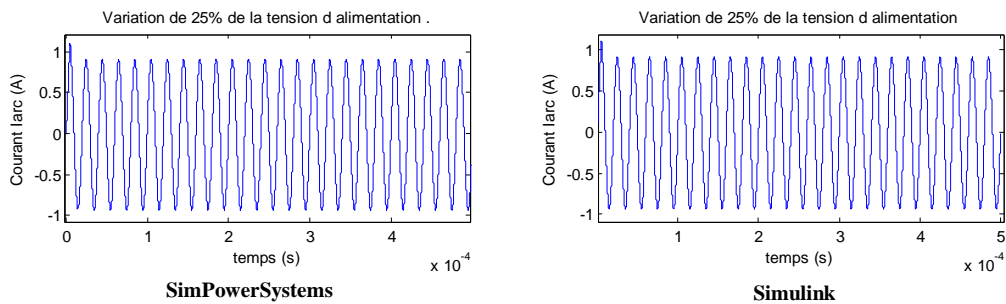


Figure IV.74: Courant d'arc  $i_{arc}$  soumis à une perturbation à 0.0001s

g) Tension d'arc

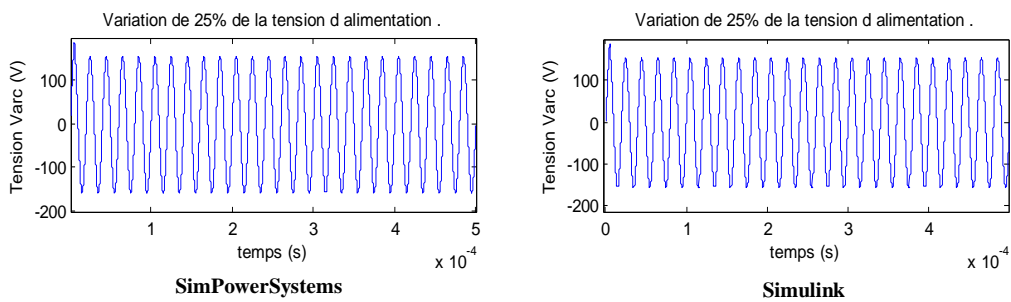
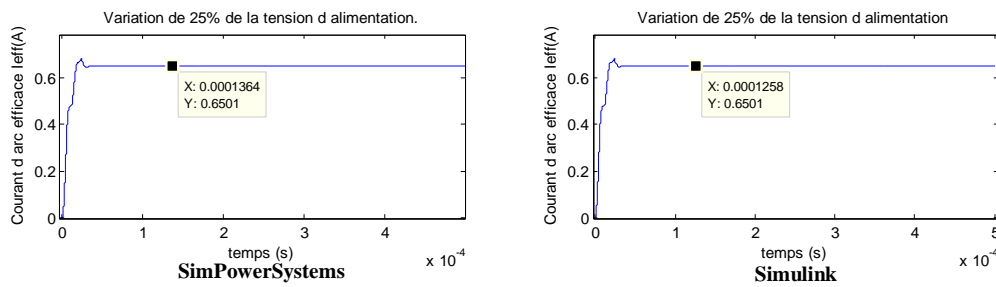


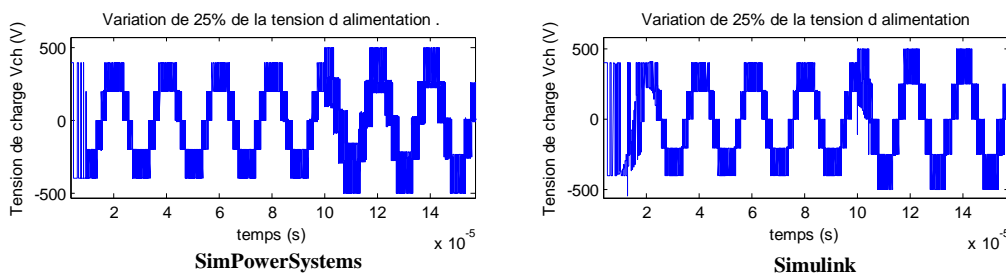
Figure IV.75: Tension d'arc  $v_{arc}$  soumise à une perturbation à 0.0001s

**h) Courant d'arc efficace**



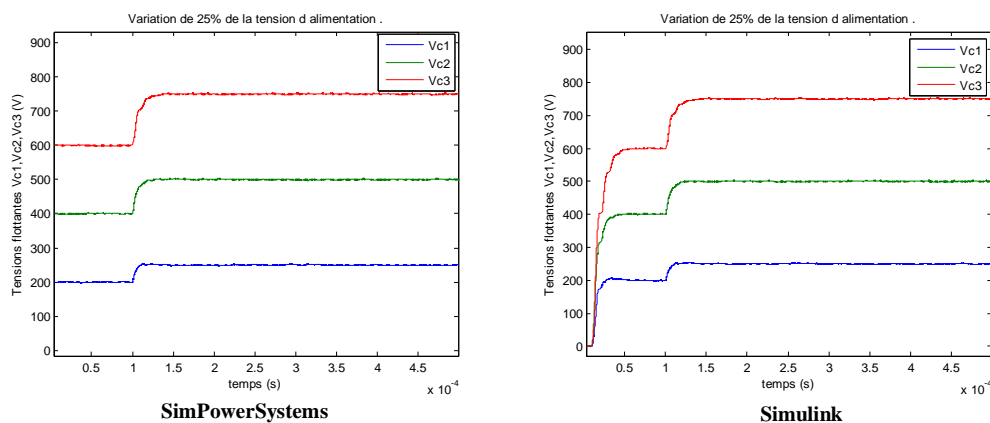
**Figure IV.76:** Courant d'arc efficace soumis à une perturbation à 0.0001s

**i) Tension de charge**



**Figure IV.77:** Tension de charge  $v_{ch}$  soumise à une perturbation à 0.0001s

**j) Tension flottantes**



**Figure IV.78:** Tension flottantes soumises à une perturbation à 0.0001s

**Interprétation**

Le régulateur que nous avons synthétisé montre une grande robustesse vis-à-vis des variations du courant d'arc et la résistance d'arc par rapport au régulateur PI.

Les dépassements ont été réduits pour les perturbations de 80% du courant d'arc et 90% pour la résistance d'arc par rapport au régulateur PI.

Il faut signaler de très faible perturbation sur le courant d'arc lors d'introduction d'une perturbation brusque sur la tension d'alimentation du convertisseur, ainsi que le suivi rapide



des tensions aux bornes des condensateurs flottantes aux variations qui surgissent sur la tension d'alimentation.

L'avantage de la commande floue du type Sugeno ne se résume pas à l'amélioration des performances mais elle présente d'autres avantages tels que la très grande robustesse, la simplicité d'implémentation.

## IV.2.2.2. Commande par super-twisting

### Introduction

La théorie sur la commande par modes glissants est née il y a une cinquantaine d'années à la suite des travaux d'**Utkin**, mais ces premiers algorithmes ne généraient pas un régime glissant idéal et pouvaient donc créer de l'instabilité locale (broutement). Une vingtaine d'années plus tard, **Emel'yanov** a repris les anciens travaux (modes glissants d'ordre 1) et les a modifiés (modes glissants d'ordres supérieurs) en gardant tous les avantages et en supprimant ce phénomène d'instabilité tout en augmentant la précision.

L'algorithme du super-twisting ne concerne que la classe des systèmes présentant un degré relatif égal à un par rapport à la variable de glissement. Par conséquent la discontinuité agit sur la première dérivée de l'entrée de commande  $u$ , cette dernière se trouve alors être une fonction continue, ce qui permet d'éviter le phénomène de chattering. Contrairement à l'algorithme du twisting, cet algorithme ne requiert pas d'information sur la dérivée de  $S$  (d'où son intérêt pratique) tout en conservant de bonnes propriétés de robustesse.

### IV.2.2.2.1. Algorithme de la commande super twisting [BEN10], [LAG04]

Considérons un système monovarié décrit par :

$$\dot{x} = f(t, x, u), S = S(t), x \in \mathfrak{R}, u = U(t), u \in \mathfrak{R} \quad (\text{Eq. IV-23})$$

Où  $x \in \mathfrak{R}^n$ ,  $f$  est une fonction de classe  $C^1$ ,  $u$  est la fonction d'entrée et la surface  $S$  est de classe  $C^2$ .

On dérive par rapport au temps  $S$  on trouve :

$$\dot{S} = \frac{\partial}{\partial t} S(t, x) + \frac{\partial}{\partial x} S(t, x)(t, x, u) \quad (\text{Eq. IV-24})$$

Et

$$\ddot{S} = \frac{\partial}{\partial t} \dot{S}(t, \mathbf{x}, u) + \frac{\partial}{\partial x} \dot{S}(t, \mathbf{x}, u) f(t, \mathbf{x}, u) + \frac{\partial}{\partial u} \dot{S}(t, \mathbf{x}, u) \dot{u}(t) . \quad (Eq. IV-25)$$

L'objectif est d'obtenir la commande  $u$  tel que la surface  $S=0$  est vérifiée et  $S=\dot{S}$  est maintenue.

La preuve d'existence d'une solution a été établie sous les conditions suivantes :

- La commande  $u$  est une fonction bornée  $|u| \leq U_M$  ;  $t$
- Il existe des constantes positives  $S_0, K_m, K_M, u_0$  avec  $u_0 < U_M$  tel que :

$$\text{Si } |S(t)| < S_0 \text{ alors } 0 < K_m \leq \frac{\partial}{\partial u} \dot{S}(t, \mathbf{x}, u) \leq K_M \quad (Eq. IV-26)$$

- Il existe une constante positive  $\Phi$  dans la région linéaire tel que :

$$\left| \frac{\partial}{\partial t} \dot{S}(t, \mathbf{x}, u) + \frac{\partial}{\partial x} \dot{S}(t, \mathbf{x}, u) f(t, \mathbf{x}, u) \right| \leq \Phi \quad (Eq. IV-27)$$

L'algorithme du super-twisting est donnée par :

$$U(t) = u1(t) + u2(t) \quad (Eq. IV-28)$$

$$u1(t) = \begin{cases} -u & \text{si } |u| > uM \\ -\alpha \text{ sign}(S) & \text{si } |u| \leq uM \end{cases} \quad u2(t) = \begin{cases} -\lambda |S_0|^\rho \text{ sign}(S) & \text{si } |S| > S_0 \\ -\lambda |S|^\rho \text{ sign}(S) & \text{si } |S| \leq S_0 \end{cases}$$

Avec  $\alpha, \rho$  vérifient les inégalités suivantes :

$$\alpha > \frac{\Phi}{K_m} \quad (Eq. IV-29)$$

$$\lambda^2 \geq 4 \frac{\Phi}{K_m^2} * \frac{K_M(\alpha + \Phi)}{K_m(\alpha - \Phi)} \quad (Eq. IV-30)$$

$$\text{Avec} \quad 0 < \rho \leq 0.5$$

#### IV.2.2.2.2. Application à la lampe à décharge

Nous allons définir  $e$  : l'erreur entre le courant d'arc de la lampe et le courant d'arc de référence.

$$e = iarc - iarc_{ref} \quad (Eq. IV-31)$$

Ensuite nous choisissons  $s$ , la surface de glissement, du type :

$$S = e(t) = i_{arc} - i_{arc_{ref}} \quad (Eq. IV-32)$$

Nous dérivons une première fois :

$$\dot{S} = \dot{i}_{arc} - \dot{i}_{arc_{ref}} \quad (Eq. IV-33)$$

Nous exprimons  $\dot{s}$  en fonction des paramètres du système :

$$\dot{S} = \frac{1}{(R_{arc} + r_f) * C_p} [r_f * C_p * \dot{i}l + i_l - i_{arc}] - \dot{i}_{arc_{ref}} \quad (Eq. IV-34)$$

Avec

$$\dot{i}l = \frac{1}{L_r} [u - \frac{1}{C_r} \int i l dt - r_f * i_l - R_{arc} * i_{arc}] \quad (Eq. IV-35)$$

Donc

$$\dot{S} = \frac{r_f}{L_r (R_{arc} + r_f)} * u + g(t) \quad (Eq. IV-36)$$

Avec

$$g(t) = \frac{1}{(R_{arc} + r_f) * C_p} [r_f * C_p * (-\frac{1}{C_r} \int i l dt - r_f * i_l - R_{arc} * i_{arc}) + i_l - i_{arc}] - \dot{i}_{arc_{ref}} \quad (Eq. IV-37)$$

$$\ddot{S} = \frac{r_f}{L_r (R_{arc} + r_f)} * \dot{u} + \dot{g}(t) \quad (Eq. IV-38)$$

Par identification de (Eq. IV-38) avec (Eq. IV-26), (Eq. IV-27), on trouve :

$$|\dot{g}(t)| \leq \Phi \quad \text{et} \quad k_m \leq \frac{r_f}{L_r (R_{arc} + r_f)} \leq K_M$$

Il suffit juste de minorer  $|\dot{g}(t)|$ , c'est-à-dire  $\Phi$  pour déterminer les paramètres  $\alpha$ ,  $\rho$  de l'algorithme du super-twisting

### IV.2.2.2.3. Résultat de simulation pour le régulateur super twisting

#### IV.2.2.2.3.1. Commande modulant des rapports cycliques

a) Courant d'arc

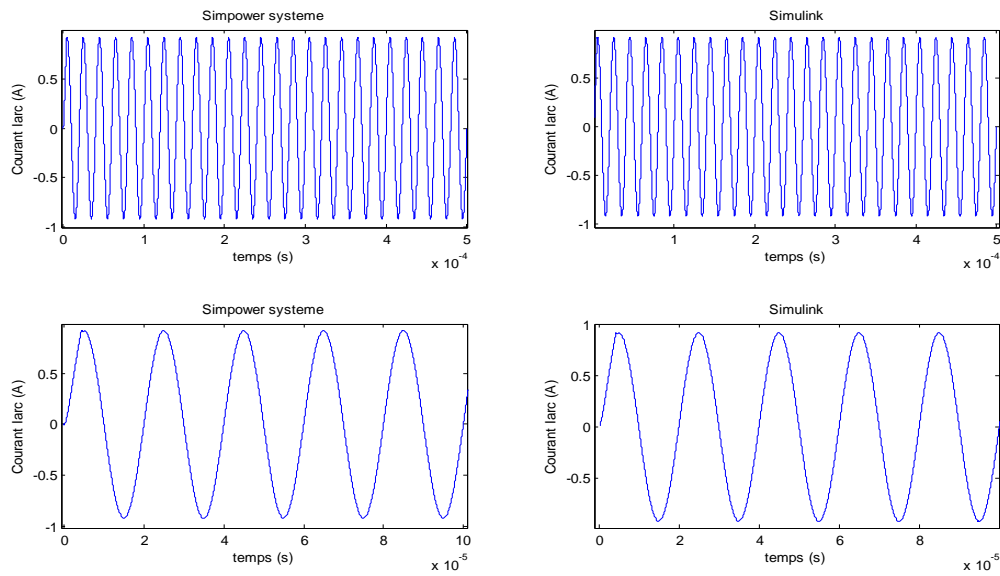


Figure IV.79-a: Forme d'onde du courant d'arc  $i_{arc}$  pour un régulateur Super-twisting

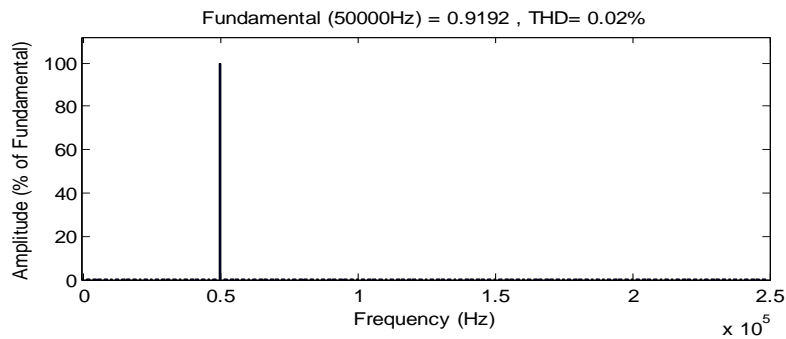


Figure IV.79-b: Spectre harmonique du courant d'arc  $i_{arc}$  pour un régulateur Super-twisting

b) Tension d'arc

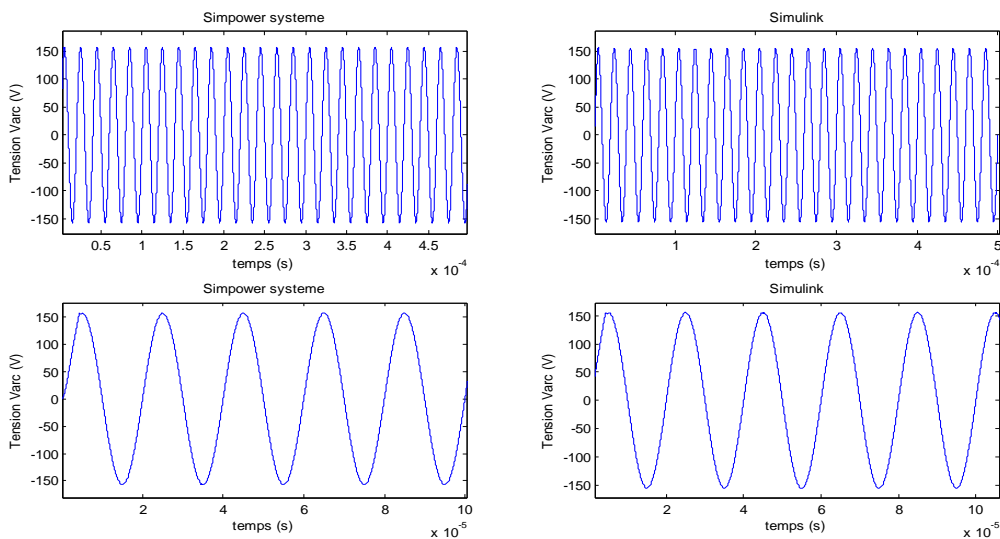


Figure IV.80-a: Forme d'onde de la tension d'arc  $v_{arc}$  pour un régulateur Super-twisting

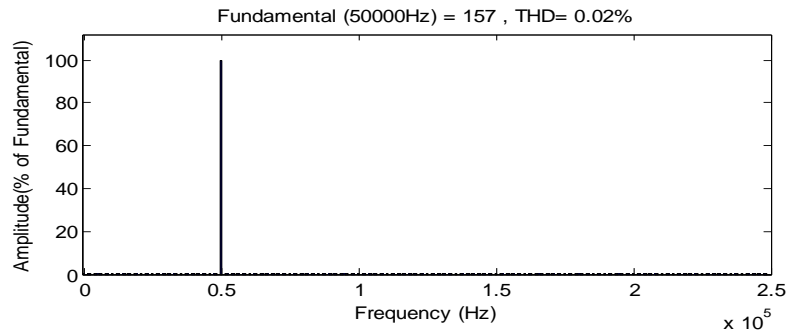


Figure IV.80-b: Spectre harmonique de la tension d'arc  $V_{arc}$  pour un régulateur Super-twisting

c) Courant d'arc efficace

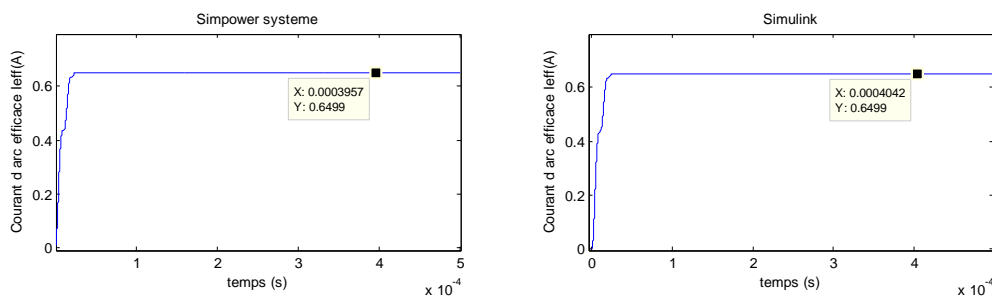


Figure IV.81: Forme d'onde du courant d'arc efficace  $I_{arc}$  pour un régulateur Super-twisting

d) Courant de charge

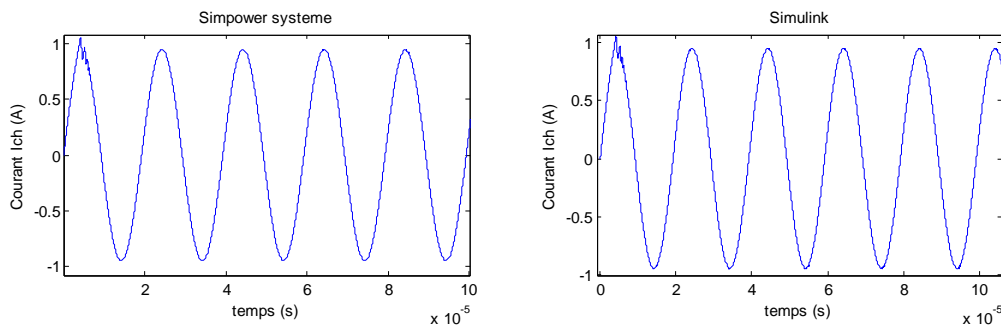


Figure IV.82-a: Forme d'onde du courant de charge  $i_{ch}$  pour un régulateur Super-twisting

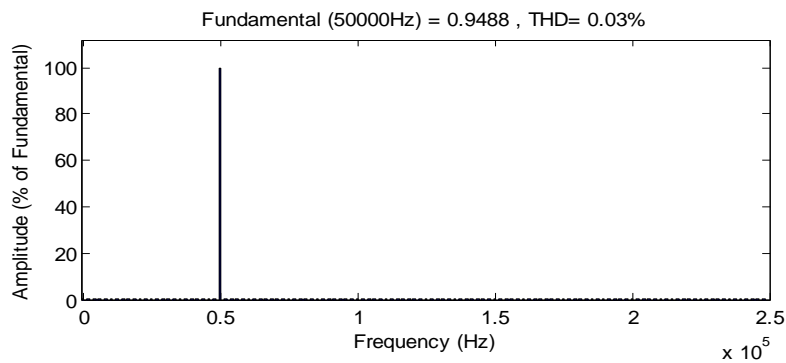


Figure IV.82-b: Spectre harmonique du courant de charge  $i_{ch}$  pour un régulateur Super-twisting

e) Tension de charge

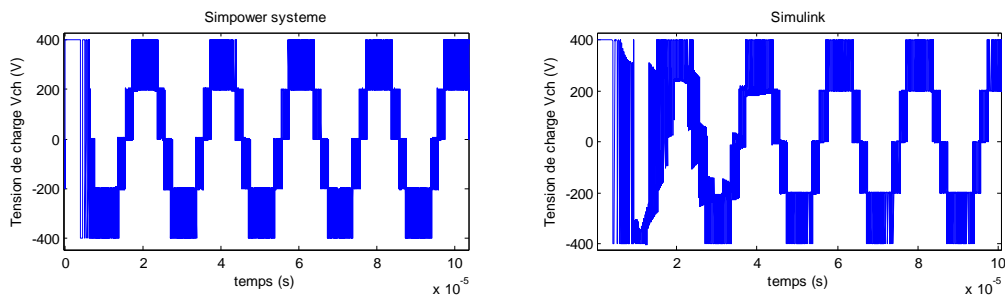


Figure IV.83-a: Forme d'onde de la tension de charge  $v_{ch}$  pour un régulateur Super-twisting

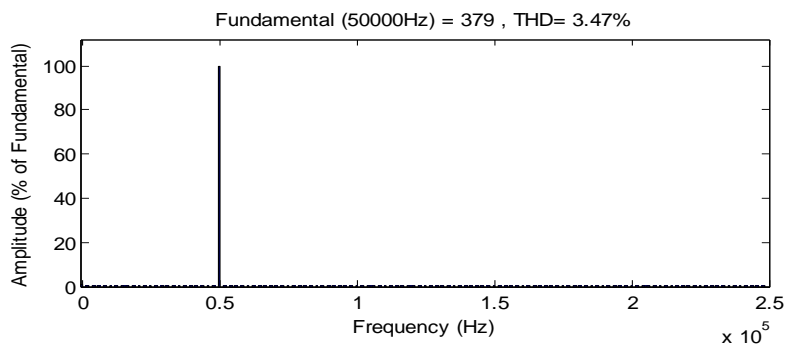


Figure IV.83-b: Spectre harmonique de la tension de charge  $v_{ch}$  pour un régulateur Super-twisting

f) Surface de glissement

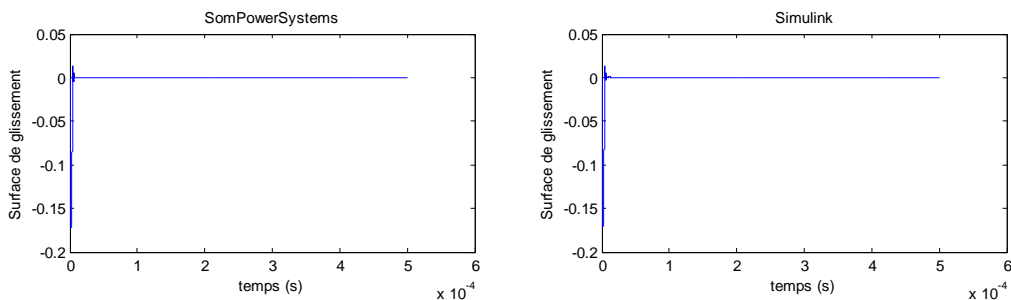
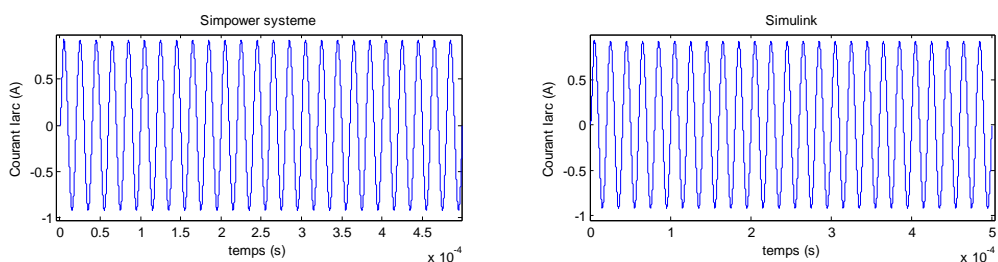


Figure IV.84: Surface de glissement

IV.2.2.2.3.2. Commande directe pour le convertisseur

a) Courant d'arc



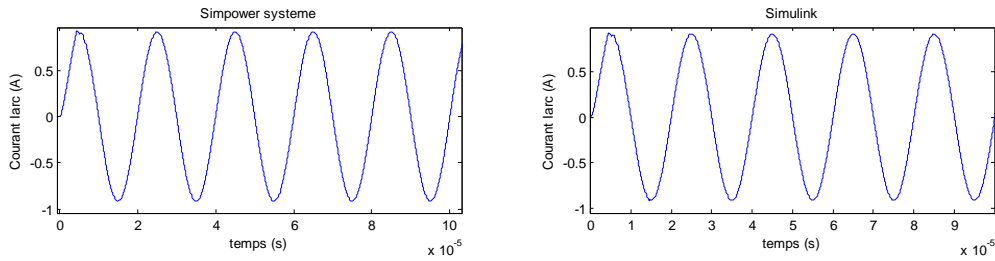


Figure IV.85-a: Forme d'onde du courant d'arc  $i_{arc}$  pour un régulateur Super-twisting

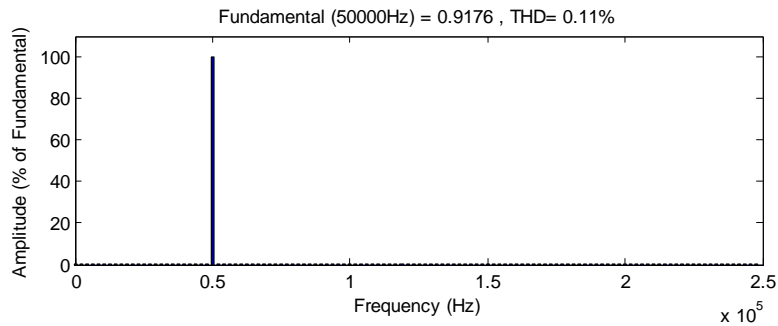


Figure IV.85-b: Spectre harmonique du courant d'arc  $i_{arc}$  pour un régulateur Super-twisting

b) Tension d'arc

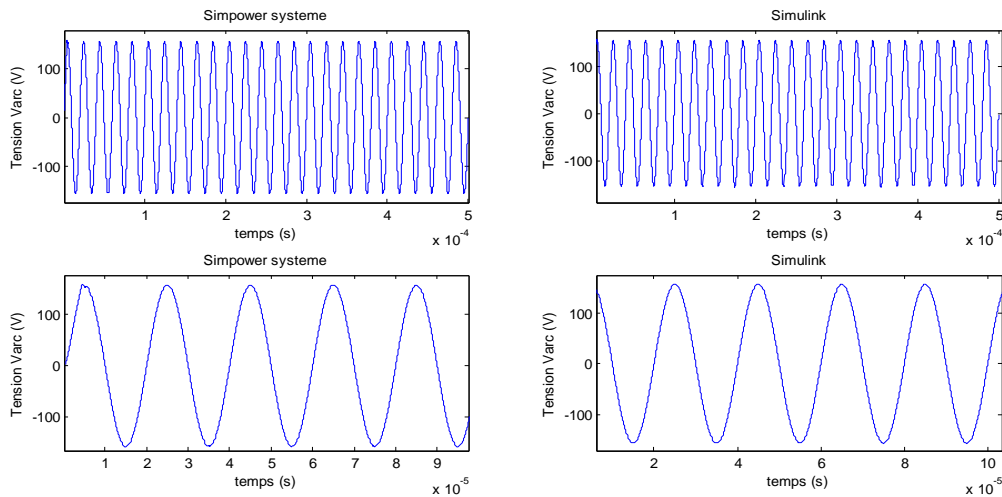


Figure IV.86-a: Forme d'onde de la tension d'arc  $v_{arc}$  pour un régulateur Super-twisting

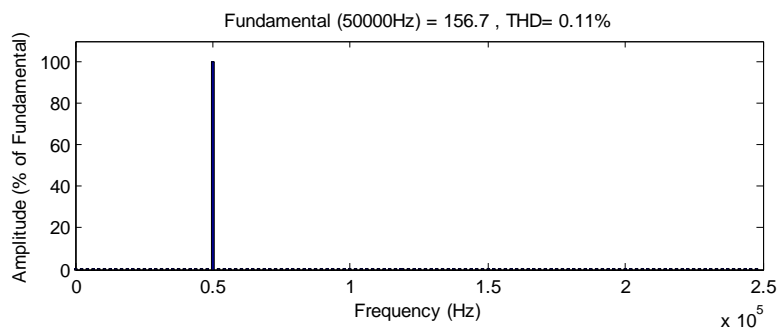


Figure IV.86-b: Spectre harmonique de la tension d'arc  $v_{arc}$  pour un régulateur Super-twisting

c) Courant d'arc efficace

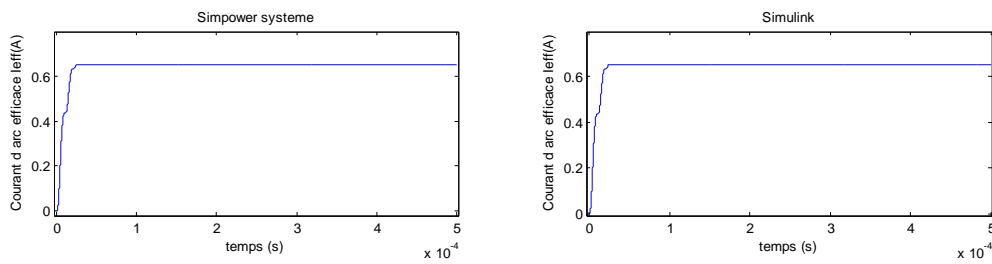


Figure IV.87: Forme d'onde du courant d'arc efficace  $I_{arc}$  pour un régulateur Super-twisting

d) Courant de charge

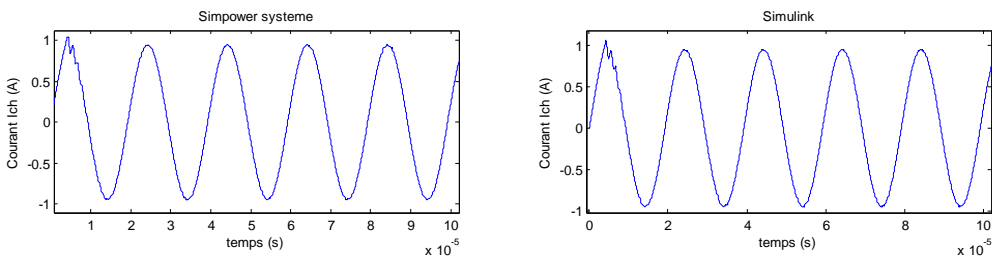


Figure IV.88-a: Forme d'onde du courant de charge  $i_{ch}$  pour un régulateur Super-twisting

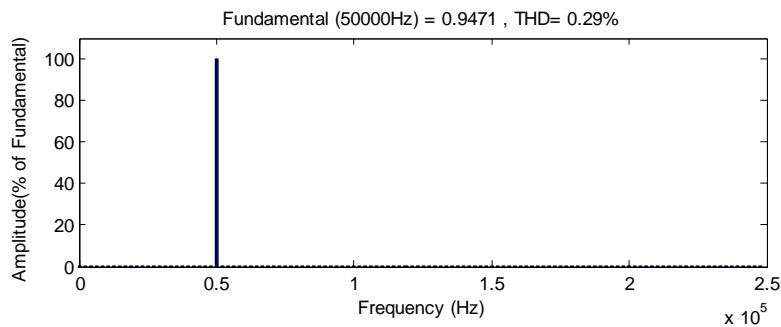


Figure IV.88-b : Spectre harmonique du courant de charge  $i_{ch}$  pour un régulateur Super-twisting

e) Tension de charge

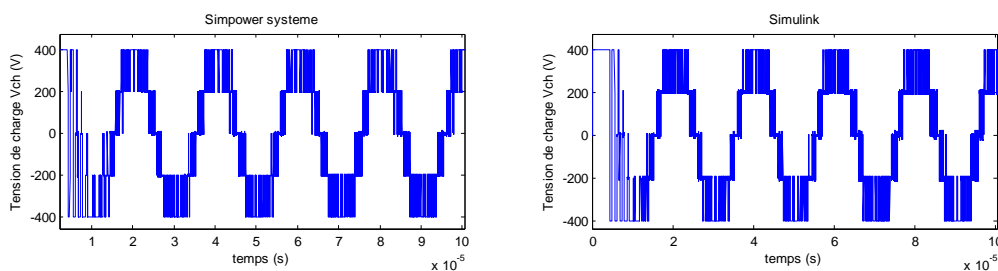
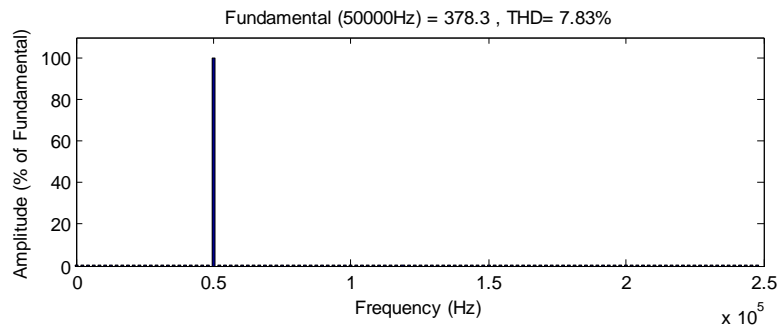


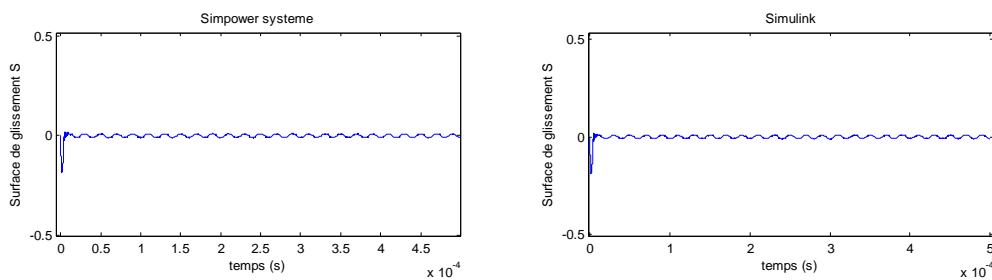
Figure IV.89-a: Forme d'onde de la tension de charge  $v_{ch}$  pour un régulateur Super-twisting





**Figure IV.89-b:** Spectre harmonique de la tension de charge  $v_{ch}$  pour un régulateur Super-twisting

#### f) Surface de glissement



**Figure IV.90:** Surface de glissement

#### Interprétation

Ces figures montrent que le courant d'arc efficace et les tensions aux bornes des condensateurs flottants convergent vers leurs valeurs de références. On regardant l'évolution de la surface en fonction du temps, nous observons bien la rapidité de convergence de  $s$  vers 0 bien quelle oscille autour de zéro on utilisant la commande directe pour le convertisseur.

Nous avons obtenu des formes d'ondes parfaitement sinusoïdales pour les différentes grandeurs de la lampe à décharge, avec un THD de 0.02% pour la commande modulant des rapports cycliques et 0.11% pour la commande directe.

Comme dans le cas de réglage par la logique floue, les performances obtenues on utilisant la commande modulant des rapports cycliques pour le convertisseur sont bien meilleures qu'avec celles obtenues par la commande directe.

On constate aussi que la commande par mode de glissement d'ordre supérieur possède des performances quasi similaires à celles des régulateurs flous mais on utilisant

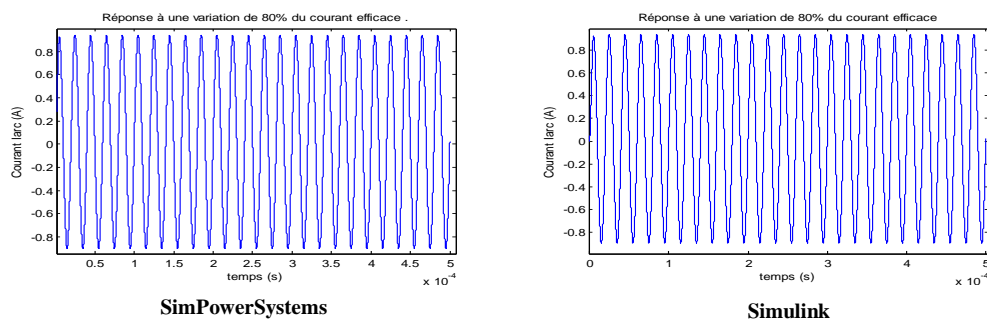
cette fois ci des fréquences d'échantillonnages beaucoup moins importantes de l'ordre de 3.2MHz alors qu'avec les autres régulateurs on dépasse les 32MHz.

Comme la commande des rapports cycliques donne des bons résultats donc on va continuer les tests de robustesse avec cette commande.

**IV.2.2.2.4. Test de robustesse**

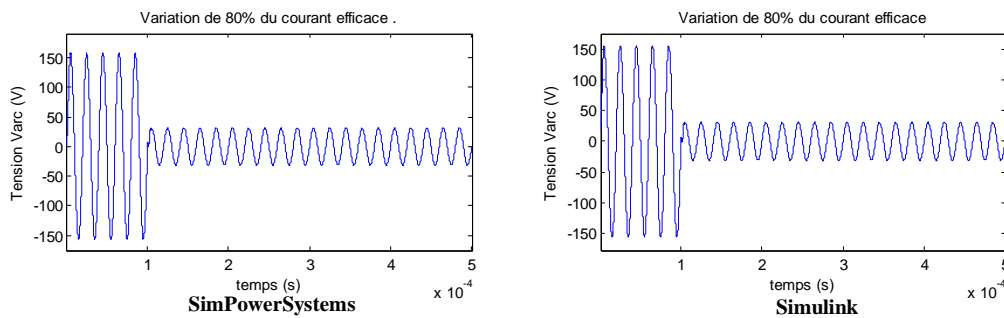
**1) Variation de 80% du courant d'arc efficace**

**a) Courant d'arc**



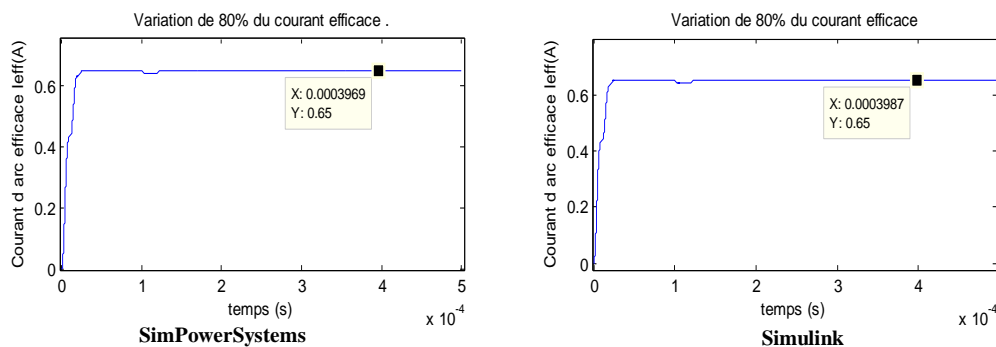
**Figure IV.91:** Courant d'arc  $i_{arc}$  soumis a une perturbation à 0.0001s

**b) Tension d'arc**



**Figure IV.92:** Tension d'arc  $v_{arc}$  soumise à une perturbation à 0.0001s

**c) Courant d'arc efficace**



**Figure IV.93:** Courant d'arc efficace soumis à une perturbation à 0.0001s

d) Surface de glissement

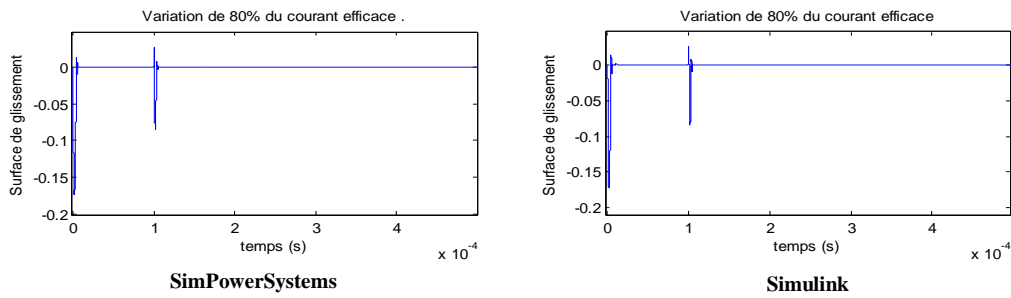


Figure IV.94: Surface de glissement soumise à une perturbation à 0.0001s

2) Variation de 90% de Rarc

a) Courant d'arc

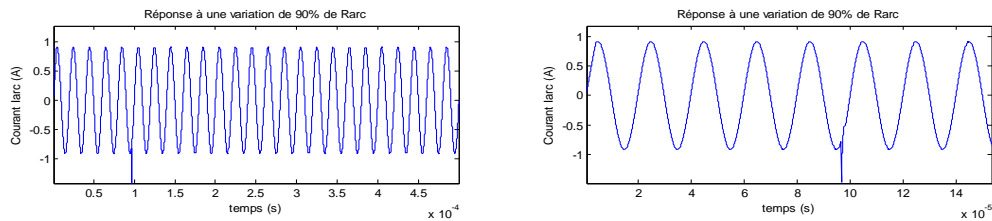


Figure IV.95: Courant d'arc  $i_{arc}$  soumis a une perturbation à 0.0001s

b) Tension d'arc

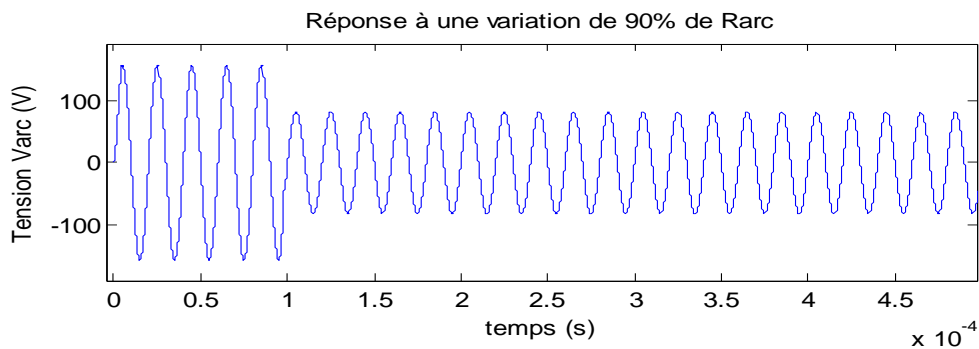


Figure IV.96: Tension d'arc  $v_{arc}$  soumise à une perturbation à 0.0001s

c) Courant d'arc efficace

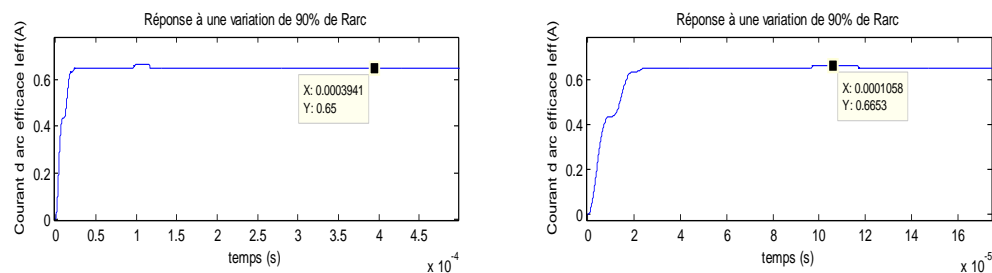


Figure IV.97: Courant d'arc efficace soumis à une perturbation à 0.0001s

d) Surface de glissement

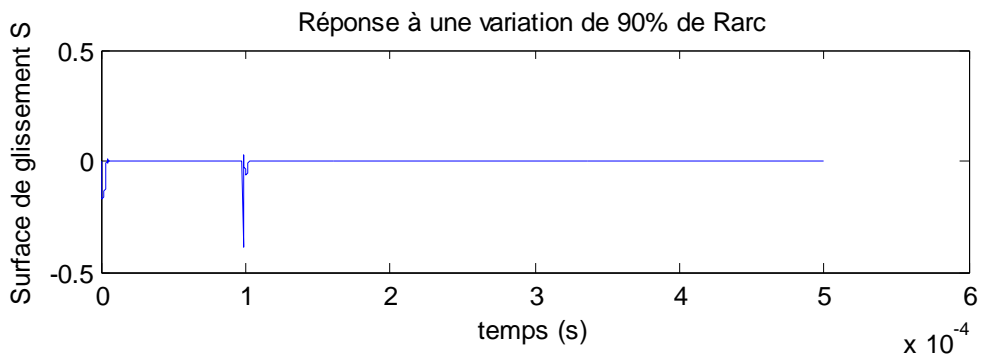


Figure IV.98: Surface de glissement soumise à une perturbation à 0.0001s

3) Variation de 25% de la tension d'alimentation

a) Courant d'arc

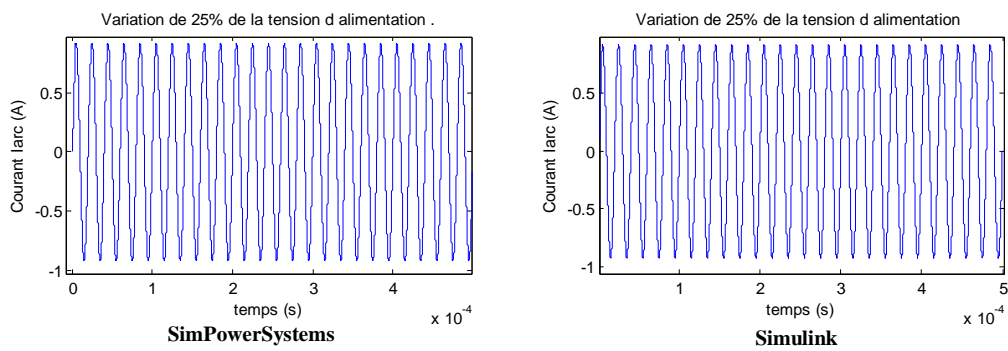


Figure IV.99: Courant d'arc  $i_{arc}$  soumis a une perturbation à 0.0001s

b) Tension d'arc

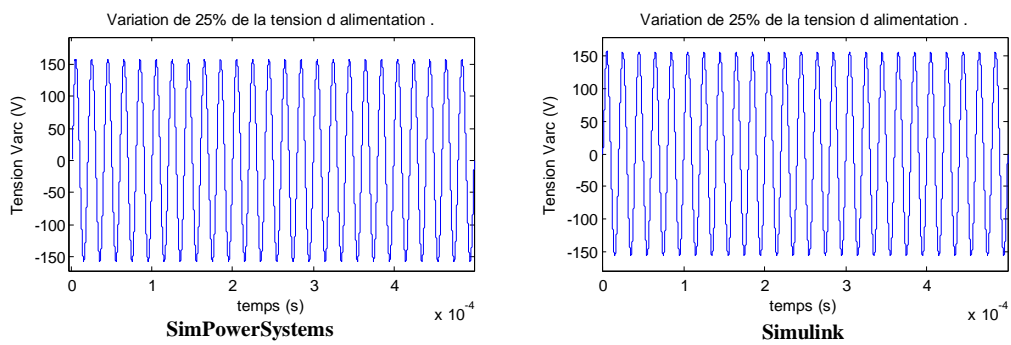


Figure IV.100: Tension d'arc  $v_{arc}$  soumise à une perturbation à 0.0001s

c) Courant d'arc efficace

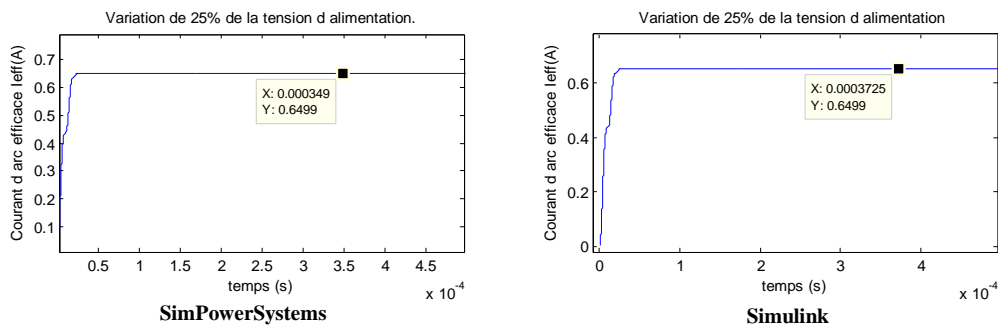


Figure IV.101: Courant d'arc efficace soumis à une perturbation à 0.0001s

d) Surface de glissement

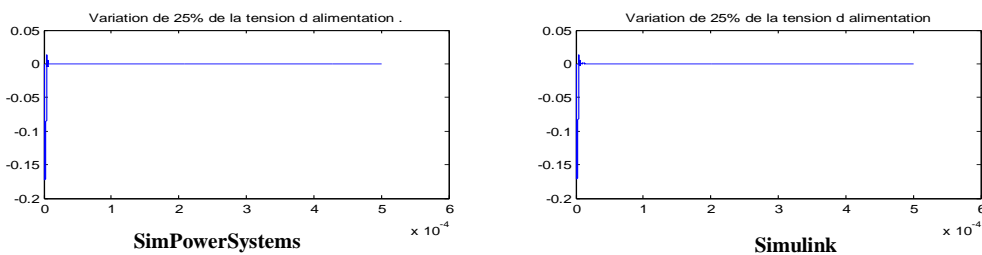


Figure IV.102: Surface de glissement soumise à une perturbation à 0.0001s

e) Tension flottantes

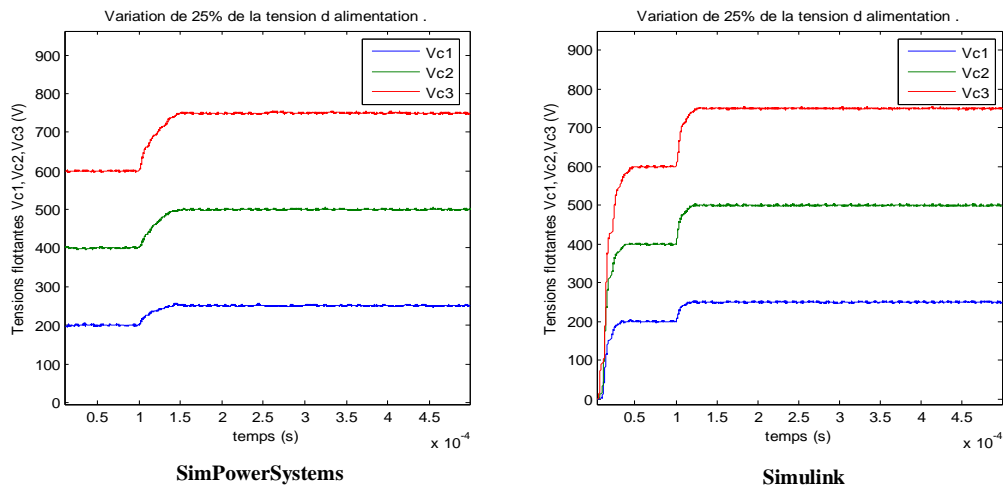


Figure IV.103: Tension flottantes soumises à une perturbation à 0.0001s

Interprétation

D'après ces résultats, on s'aperçoit que l'effet des variations paramétriques et la perturbation sur le courant d'arc n'a pas empêché le régulateur de les éliminer très rapidement sans avoir des pics importants malgré les grandes variations introduites, ce qui nous donne une idée sur le comportement robuste de la commande par modes glissants supérieurs.

## Conclusion

Le régulateur classique de type PI, rejette bien les perturbations mais présente des performances peu satisfaisantes.

Le régulateur flou de type Mandani donne des résultats satisfaisants. Néanmoins, l'implémentation de la commande floue de type Mandani nécessite un temps de calcul relativement élevée, vu qu'elle a besoin d'un nombre important de règles et de fonctions d'appartenances. Pour surmonter cet obstacle, nous avons proposé un autre de type Sugeno. Avec cette approche, nous avons réussi à réduire le nombre de fonctions d'appartenances et à éviter l'utilisation du centre de gravité pour le calcul de la commande.

Aussi, nous avons constaté que l'utilisation des modes glissants d'ordre supérieur est très bien adaptée pour la commande des convertisseurs multicellulaires car ça permet d'avoir les mêmes performances qu'un régulateur flou tout en diminuant considérablement la fréquence d'échantillonnage de la grandeur de sortie et la fréquence de découpage des porteuses, la première est d'une grande importance pour la réalisation d'un système numérique, et la seconde permet de réduire le nombre de commutation des interrupteurs donc de réduire les pertes par commutation .

La commande directe du convertisseur ne donne de bons résultats qu'avec le régulateur de type Sugeno, c'est peut être liée à la grande précision de ce régulateur.

# Conclusion générale

---

L'objectif de notre travail est l'élaboration de lois de commande moderne pour une lampe à décharge alimentée par un convertisseur multicellulaire série. Les deux premières commandes sont à base de la logique floue, nous avons proposé dans un premier temps un régulateur de type Mandani mais il s'est avéré qu'il est difficile d'implanter ce régulateur vu le nombre important de fonction d'appartenance et de règles. Alors dans le souci d'améliorer ce temps de calcul, nous avons proposé un autre de type Sugeno. Par ailleurs, nous nous sommes intéressés à la commande par les modes glissants d'ordre deux (super-twisting) qui présente l'avantage d'être très simple à mettre en pratiques sans oublier sa robustesse vis-à-vis des incertitudes et de certaines variations paramétriques. Cette technique est plus récente et fait actuellement l'objet de plusieurs travaux de recherches.

Dans le premier chapitre, il est montré que la courbe d'absorption de l'ADN support de l'information génétique des êtres vivants, atteint son maximum à 253,7 nm, cette absorption se manifeste par la création de photon-produit entre les brins d'ADN qui rendent inefficace voire impossible la réplication des micro-organismes. Nous avons aussi rappelé les différents paramètres influençant la désinfection ainsi que les avantages et les inconvénients de cette méthode de désinfection.

Dans le second chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement des lampes à décharge et leurs constitutions, ensuite, la mise en évidence des interactions entre la source de puissance et la décharge nous a permis d'établir que les topologies les mieux adaptées au contrôle du point de fonctionnement électrique sont celles qui permettent une maîtrise du courant instantané dans la décharge. Nous avons vu aussi l'intérêt de l'utilisation de la haute fréquence pour les lampes à décharges dans le but d'avoir un maximum de rayonnement UV. Le comportement électrique de la lampe à décharge alimentée par un ballast électronique à haute fréquence peut être modélisé par une résistance dépendante de la puissance électrique transmise à la lampe et de sa température. Dans ce sens, un modèle de la lampe à décharge, avec starter et circuit résonant, a été développé.

## Conclusion générale

---

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des convertisseurs multicellulaires série: fonctionnement, modélisation et commande. La structure du convertisseur que nous avons utilisé dans notre application ainsi que son modèle instantané ont été présentés. Nous avons aussi exposé deux types de commandes pour le convertisseur. La première commande de type proportionnel était dédiée au contrôle des tensions des condensateurs, elle avait pour objectif d'assurer l'équilibrage des tensions aux bornes des interrupteurs. Tandis que la seconde est la commande directe, basée sur la redondance des états, ce qui permet l'exploitation directe de chaque niveau de tension tout en assurant en même temps l'équilibrage des tensions aux bornes des condensateurs flottants.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté trois lois de commandes pour la lampe à décharge (le régulateur de courant) et deux types de commandes appliqués au convertisseur:

La première est basée sur un régulateur classique de type PI synthétisé par la méthode de placement de pôles. Il a permis d'avoir un bon suivi de consigne malgré la présence de la perturbation sur le courant d'arc et des variations paramétriques sur la résistance d'arc.

La deuxième est la commande par la logique floue, basée sur le raisonnement humain, qui nécessite la détermination de nombreux paramètres sans qu'il existe pour autant une méthode systématique pour les déterminer. Le régulateur de Madani a montré une très grande robustesse vis-à-vis des variations paramétriques de la résistance d'arc et de la perturbation sur le courant de sortie sauf que cela nécessite un calcul énorme en un temps très court. Cependant en ce qui concerne niveau du THD, il a les mêmes performances qu'un régulateur PI.

Le régulateur de Sugeno a permis de réduire le nombre de fonction d'appartenance et de paramètres de la table de décision à déterminer. Le rejet de perturbation se fait beaucoup plus rapidement avec le régulateur de Mandani cela est du considérablement au nombre important de fonction d'appartenance qu'il dispose, mais au niveau du THD, qui a une influence directe sur la durée de vie des électrodes, le régulateur de Sugeno est de loin le meilleur.

La dernière technique adoptée est la commande par les modes glissants d'ordre deux (algorithme du super-twisting), dont le principe est de trouver une surface de glissement de degré relatif égal à un, puis on détermine les différents paramètres qui conditionnent la convergence de l'algorithme en un temps fini. Cette commande qui fait partie des commandes



## Conclusion générale

---

robustes a donner des résultats très satisfaisants pratiquement identiques à ceux obtenus avec le régulateur de Sugeno à la différence que cette technique a permis de réduire considérablement la fréquence d'échantillonnage et la fréquence de découpage des porteuses. Cette dernière remarque est d'une grande utilité au niveau pratique que se soit au niveau de la commande ou au niveau du convertisseur.

Pour la commande du convertisseur, nous avons utilisé la commande directe et la commande modulant des rapports cycliques. La première est capable d'assurer deux buts en même temps, d'une part, elle assure l'équilibrage des tensions aux bornes des condensateurs flottants, et d'autre part, elle donne la tension demandée à la sortie du convertisseur, cette technique ne nécessite pas la connaissance des tensions aux bornes des condensateurs flottants, ce qui permet de minimiser le coût de réalisation (trois capteurs de tension). La deuxième est la commande modulant des rapports cycliques, cette technique est une commande en durée qui nécessite l'utilisation d'une MLI et des capteurs pour avoir les tensions des bras du convertisseur.

En guise de comparaison, la commande modulant des rapports cycliques donne de meilleurs résultats au niveau du contenu spectrale et n'exige pas de grande fréquence d'échantillonnage pour le courant et de découpage pour la commande des interrupteurs, par contre la commande directe ne donne de très bonnes performances qu'avec l'utilisation du régulateur flou de type Sugeno comme régulateur du courant et nécessite de grande fréquence, ce qui la rend difficile à implanter.

## Perspectives

- ❖ Implantation des lois de commande élaborées sur un ordinateur et les appliquées sur la lampe réelle.
- ❖ Synthèse d'un observateur pour minimiser le coût de la réalisation.

# Bibliographie

---

- [ADI07] ADIV Association. « Etude des traitements de réduction de volume des coproduits animaux par filtration, essorage, pressage », office de l'élevage janvier 2007.
- [AFN81] AFNOR. « Antiseptique et désinfectants ». Norme NF T 72 101. Mars 1981.
- [AFS05] AFSSE. « Rayonnements ultraviolets », Agence française de sécurité sanitaire environnementale Juin 2005.
- [AIS05] A. Aissa Boukhtache, « Commande d'une système lampe à décharge-ballast électronique pour épuration des eaux ». Mémoire de magister, Génie électrique, Université de Hassiba BEN BOUALI de Chlef, 2005.
- [BENA09] M. Benallou, « Commande d'un système "Convertisseur matriciel-lampe" destinée a la stérilisation des eaux ». Mémoire de magister, Génie électrique, Université de Hassiba BEN BOUALI de Chlef, 2009.
- [BEN09] K. Benmansour, « Evaluation Réalisation d'un banc d'essai pour la Commande et Observation des Convertisseurs Multicellulaires Série: Approche Hybride », Thèse de Doctorat, ENSEA. Paris, 2009.
- [BEN10] K. Benmansour, M. Djemaï, K. Busawon, « High order sliding mode control of a DC motor drive via a switched controlled multi-cellular converter » International Journal of Systems Science, Special Issue on VSS methods for hybrid systems, 2010.
- [BER85] J.J.Berson, P.Sachoux. « Stérilisation d'eau par rayonnement ultraviolet » L'eau, l'industrie, les nuisances, N°: 94. Sep1985.
- [BEZ03] T.Bezanahary. « Modélisation du comportement de la colonne positive d'un plasma de décharge dans les gaz rares purs : application a l'étude des lampes « base pression » sans mercure » Thèse de Doctorat, Génie électrique, Université Poul SABASTIER de Toulouse, 2003.
- [BOU08] F. Bounkar. « Conception de stratégies de commande et d'observation pour un convertisseur multicellulaire. Approche hybride série ». Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2008.
- [BOU06] M.Bousquet. « Traitement germicide par rayonnement UVc, Note concernant l'application des rayonnements ultraviolets "C" » Catalogue ERIES Sarl, 2006.
- [BUS04] D. Buso. « Influence des modes d'alimentation et de gestion des réseaux d'éclairage sur la performance et la fiabilité des sources de lumière » Thèse de Doctorat, Génie électrique, Université Poul SABASTIER de Toulouse,

## Bibliographie

---

Décembre 2004.

- [BUZ00] D.Buzore. « Générateurs UVc. L'eau, les bactéries, les virus.les rayons UV principe d'application » ISACAT, Révision 30 Aout 2000.
- [CAR96] P. Carrere, « Etude et réalisation des convertisseurs multicellulaires série à IGBT » Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, (INPT), 1996.
- [COS00] C. Costache. « Etude d'un système lampe à décharge alimentation réacteur. Application au traitement tertiaire de l'eau » Thèse de Doctorat, Génie électrique, Université Poul SABASTIER de Toulouse, 2000.
- [CRI07] G. Crini, Pierre-Marie Badot « Traitement épuration des eaux industrielles polluées », 2007, 356 pages.
- [GAT97] G.Gateau. « Contribution à la commande des convertisseurs statiques multicellulaires série » Thèse de Doctorat, INPT, 1997.
- [GUT01] M. F. E. Gutierrez. « Contribution à la définition de structures optimales d'onduleurs pour la commande des machines à courant alternatif » Thèse de Doctorat, Supelec, 2001.
- [KOP08] J. Koprnický. « Electric Conductivity Model of Discharge Lamps » Thèse de Doctorat, Génie électrique, l'Université Toulouse III - Paul Sabatier (France) et l'Université Technique de Liberec (Rep. tchèque), février 2008.
- [LAG04] S. Laghrouche. « Commande par modes glissants d'ordre supérieur: théorie et applications » Thèse de Doctorat, Automatique et informatique appliquée, L'école centrale de Nantes et l'Université de Nantes, 2004.
- [LEF05] P. Lefranc « Etude, conception et réalisation de circuit de commande d'IGBT de fort puissance » Thèse de Doctorat de Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Génie électrique, 2005.
- [MAU07] Marie-Thérèse Maurette, N.K.V.Leitner, F.Benoit-Marquié et Féliers, « les photos peuvent détruire directement les pathogènes et les polluants », Revue : Actualité chimique Mai-Juin 2007-n°308-309, p : 76-78.
- [MAS00] Willy J. Masschelein, « Utilisation des U. V. dans le traitement des eaux » ÉditeurEd. Cebedoc, 2000, 109 pages.
- [MEY91] T. A. Meynard, H. Foch. « Brevet français n°91.09582, dépôt international PCT (Europe, Japon, USA, Canada) n°92/00652 du 8 juillet 1992 », 1991.
- [MEY92] T. A. Meynard, H. Foch. « Multi-level conversion: high voltage choppers and voltage source inverters ». P.E.S.C'92, Toledo, Spain. Conférence proceedings, pp.397-403.
- [PIN00] D.Pinon. « Commandes des convertisseurs multicellulaires par mode de glissement » Thèse de Doctorat, INPT, 2000.

## Bibliographie

---

- [SAL05]** M. Salanne Jean-Philippe. « Contrôle du point de fonctionnement des décharges électriques par l'intermédiaire de leur alimentation » Thèse de Doctorat, Génie électrique, L'institut National Polytechnique De Toulouse, 2005.
- [SIE06]** Technologie UV, « Traitement et désinfection de l'eau sans produit chimique », Siemens Water Technologies 2006. [wtfra.water@siemens.com](mailto:wtfra.water@siemens.com).
- [TAC98]** O.Tachon. « Commande découplant linéaire des convertisseurs multicellulaires série. Modélisation, synthèse et expérimentation ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1998.
- [TAI08]** F. Taibi, M. Bouaziz. « Commande Robuste et Observateur Hybride Pour les Convertisseurs Multicellulaires ». Mémoire de fin d'études, ENP, 2008, Alger.
- [TLE07]** A.H. Tlemçani. « Contribution à l'application des commandes adaptatives par les systèmes flous à une machine synchrone à aimants permanents alimentée par un convertisseur multicellulaire série » Thèse de Doctorat, Génie électrique, Option Automatique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2007.
- [WHA00]** D. Wharnby. « Discharge lamps physics ». In IAS IEEE Annual Meeting. Roma, October 8–12 2000.
- [WAY71]** J. F. Waymouth. Electric Discharge Lamps. The M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts and London, England, 1971. ISBN 0-262-23048-8.

## Caractéristiques de la lampe.

La lampe utilisée en simulation sous MATLAB/Simulink et SimPowerSystems est une lampe à décharge réelle décrite dans les bibliographies [AIS05], [BENA09] et [COSOO] dont les principales caractéristiques sont:

- ❖ Tension d'amorçage : 300 à 350 V;
- ❖ Courant d'arc efficace: 0.65 A ;
- ❖ La résistance d'arc:  $R_{arc} = 170.769 \Omega$
- ❖ Résistance du filament de la lampe:  $r_f = 2.5 \Omega$
- ❖ Q Puissance électrique : 65 W

### Autres caractéristiques

- ❖ Longueur du tube de la lampe: 1500 mm;
- ❖ Diamètre intérieur : 36 mm ;
- ❖ Type de gaz: Argon;
- ❖ Pression du gaz: 3 Torr.

### Paramètres du circuit résonnant

- ❖ Inductance:  $L_r = 1.3 \text{ mH}$ ;
- ❖ Capacité:  $C_r = 1 \mu\text{F}/630\text{V}$
- ❖ Capacité du condensateur d'amorçage (starter) :  $C_p = 4.7 \text{ nF}/1600\text{V}$ .