

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE HASSIBA BEN BOUALI DE CHLEF
FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES DE
L'INGENIEUR

Département d'Electrotechnique

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Présenté par : Aissa Boukhtache Aicha

Spécialité : Electrotechnique

Option : Commande des Machines Electriques.

Thème :

**Commande d'un Système Lampe à Décharge-Ballast
Electronique pour Epuration des Eaux**

Soutenu le 13 - 04 - 2005

Au département d'électrotechnique

Devant le jury composé de:

Mr. L. LOUKARFI	Professeur.	U.H.B. Chlef.	Président.
Mr. B.BELMADANI	Professeur.	U.H.B. Chlef.	Rapporteur.
Mr. M.S.BOUCHERIT	Professeur.	E.N.P. El Harrach.	Examineur.
Mr. M..MAHMOUDI	Maître de conférence.	E.N.P. El Harrach.	Examineur.

REMERCIEMENTS

Ce travail m'offre l'occasion propice pour remercier tous ceux qui m'ont fait découvrir le vaste monde de la commande, domaine si primordial pour l'avenir de l'électrotechnique.

*Je ne saurais exprimer ce que je dois à Monsieur **B. Belmadani**, Professeur à l'Université Hassiba Ben Bouali de Chlef, directeur de ma thèse, pour sa constante disponibilité et ses conseils précieux. Sa confiance et sa sympathie ont facilité l'aboutissement de ce travail. Qu'il trouve ici ma plus profonde reconnaissance.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Messieurs : **M.S Boucherit**, Professeur à l'école polytechnique d'El Harrach et **M. Mahmoudi**, maître de conférence à l'école polytechnique d'El Harrach qui m'ont accueillie dans le laboratoire de recherche « process control laboratory », Tout en m'accordant toutes leurs attentions pour l'élaboration de ce travail, il ont su se montrer particulièrement disponible et m'ont guidée tout au long de mes recherches. Ils ont facilité ma progression dans la jungle des procédures de calcul dans la commande des processus. Je les prie de trouver ici l'expression de mes très sincères remerciements. Que ce manuscrit soit un témoignage de ma respectueuse et très vive reconnaissance. Je les remercie vivement d'avoir accepté d'examiner ce travail*

*Je remercie aussi très sincèrement Messieurs : **Nezli, Boukhtala, Boudjemaa, Tadjine et Chékireb**, tous enseignants à l'école polytechnique d'El Harrach pour leurs orientations fructueuses, leurs confiance en moi ainsi que leurs encouragements*

*Monsieur **L. Loukarfi**, Professeur à la l'université Hassiba Ben Bouali, qui me fait l'honneur de présider mon jury de thèse. Je voudrais lui dire ici combien je suis sensible à cette marque de confiance.*

*Les conseils, la disponibilité et la fraternité de Monsieur **M. Bederrar**, durant toute la période de l'élaboration de mon mémoire, m'ont permis d'améliorer mon travail. Je lui exprime ici ma bien sincère gratitude.*

*J'exprime également ma plus sincère reconnaissance à Monsieur **Allouache**, chef du département d'électrotechnique de l'université Hassiba Ben bouali de Chlef pour ses conseils, ainsi qu'à tous mes enseignants du même institut.*

*Toute ma reconnaissance à la famille **Katache** d'Alger, pour l'accueil chaleureux, l'amitié, l'aide et la bonne humeur qu'ils m'ont toujours offerts. Je les remercie vivement.*

*Je n'oublierai pas, pour leur aide précieuse, le professeur **SAAD** de l'institut d'hydraulique, M^r **Mahmoudi** de l'institut génie des procédés de l'université Hassiba Ben Bouali de Chlef, mon frère **Abdallah Benarous**, mon frère **yassine**, ma belle sœur **Nadia**, ma sœur **Amel**, ainsi que mes collègues : **Taleb, Bounaadja, Latroche, Khadîdja** et M^r **Cherid** à qui j'adresse tous mes remerciements.*

*Je remercie très particulièrement la famille **Aissa**, pour l'amitié, l'aide et le soutien qu'ils m'ont toujours apportés.*

*Enfin, je ne saurais terminer sans remercier ceux qui m'ont encouragée à persévérer dans les moments difficiles : ma famille, mes ami(e) s notamment **Halima Chakour Djaltia** et **Nadia Zair** ainsi que mes collègues du technicum de Chlef.*

DEDICACES

*A ma mère qui a toujours été mon soutien moral ;
A mon père qui m'a toujours encouragé à progresser dans mes études ;*

*A toute ma famille;
A tou(te)s mes ami(e) s ;
A tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce travail ;*

Je dédis cet humble ouvrage.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------------	---

CHAPITRE I : ACTION PHOTOMETRIQUE ET LE TRAITEMENT DES EAUX

I-1 INTRODUCTION	4
I-2 TRAITEMENT DES EAUX	4
I-2-1 SOLUTION	4
I-2-2 LA STERILISATION DE L'EAU PAR UV	5
I-3- LE RAYONNEMENT	5
I-4- L'ACTION GERMICIDE ET LE TRAITEMENT DE L'EAU	7
I-5 MISE EN ŒUVRE DE LA DESINFECTION PAR U.V	9
I-5-1 SOURCE DE RADIATIONS (LES LAMPES)	9
I-5-1-1 Lampe basse pression	9
I-5-1-2 Lampes moyennes et haute pression	10
I-5-2 MODULE D'ALIMENTATION	10
I-5-3 LES REACTEURS	11
I-6 PARAMETRES INFLUENCANT L'EFFICACITE DE LA DESINFECTION	12
I-6-1 LE TEMPS D'EXPOSITION	12
I-6-2 L'INTENSITE U.V EMISE PAR LES LAMPES	12
I-6-3 TRANSMISSION U.V	12
I-6-4 LES MATIERES EN SUSPENSION	13
I-6-5 LA TURBIDITE	13
I-6-6 L'EFFICACITE GERMICIDE DES RAYONS U.V	13
I-7- RESISTANCE DES MICRO-ORGANISMES AUX U.V	13
I-7-1 HYPOTHESES SUR LES DIFFERENCES DE SENSIBILITES DES MICRO-ORGANISMES	13
I-7-2 MECANISMES DE REDUCTION DES MICRO-ORGANISMES	14
I-7-3 VIRUS ET BACTERIES	15
I-7-4 POLIOVIRUS ET RIOVIRUS	15
I-7-5 LA TAILLE DU GENOME	15
I-8- AVANTAGES ET INCONVENIENTS	15

CHAPITRE II : LES LAMPES A DECHARGE

II-1 RAPPEL DE NOTIONS THEORIQUES	17
II-1-1 IONISATION D'UN GAZ	17
II-1-2 EXCITATION D'UN ATOME	17
II-1-3 CAS DU MELANGE DE DEUX GAZ	18
II-1-4 PLASMA ET DECHARGE ELECTRIQUE	19
II-1-4-1 Notion de plasma	19
II-1-4-2 Degré d'ionisation	20
II-2 DECHARGE ELECTRIQUE	20
II-2-1 CLACKAGE ET DIFFERENTS TYPES DE REGIMES	21
II-2-1-1 Régime établi, répartition du potentiel	23

II-2-2 L'EMISSION LUMINEUSE.....	25
II-2-3 LAMPES A DECHARGE.....	25
II-2-4 CONDITIONS D'ALIMENTATION D'UNE LAMPE A DECHARGE.....	25
II-2-4 -1 Source de tension.....	27
II-2-4 -2 Source de courant.....	28
II-2-4 -3 Nécessite d'une stabilité.....	28
II-3 MECANISMES ELEMENTAIRES DANS LA DECHARGE.....	29
II-3-1 LES PHENOMENES COLLISIONNELS.....	29
II-3-1-1 Collisions élastiques.....	29
II-3-1-2 Collisions inélastiques.....	29
II-3-1-3 Collisions superélastiques.....	29
II-3-1-4 Collisions photoniques.....	29
II-3-2 DIFFERENTS MECANISMES QUI CONDUISENT A LA PRODUCTION DE RAYONNEMENT DANS LA DECHARGE.....	31
II-3-3 CONDITIONS D'UNE PRODUCTION EFFICACE DU RAYONNEMENT DANS LA DECHARGE	32
II-3-3-1 Séparation des fonctions gaz de travail et gaz d'emprisonnement.....	32
II-3-3-2 Gaz d'emprisonnement.....	33
II-3-3-3 Gaz de travail et émission.....	34
II-4 PLASMA ET EQUILIBRE THERMODYNAMIQUE.....	34
II-4-1 EQUILIBRE THERMODYNAMIQUE COMPLET.....	34
II-4-2 EQUILIBRE THERMODYNAMIQUE LOCAL.....	34
II-4-3 DECHARGE HORS D'EQUILIBRE.....	35
II-5 DECHARGE DANS UN MELANGE MERCURE-ARGON A BASSE PRESSION.....	35
II-5-1 CONSTITUTION.....	35
II-5-2 LE MELANGE GAZEUX IONISE.....	37
II-5-3 LE RAYONNEMENT DE LA COLONNE POSITIVE.....	38
II-5-4 EXEMPLES DE BILAN ENERGITIQUE D'UNE LAMPE A DECHAGE.....	40
II-6 MODELISATION DE LA DECHARGE.....	41
II-6-1 PROPRIETES DE LA RAIE 253.7 nm.....	43
II-6-1-1 Evolution du flux a 253.7 nm en fonction de la température du point froid.....	43
II-6-1-2 Influence du courant électrique sur l'émission de la raie 253.7 nm du Hg.....	43

CHAPITRE III : ALIMENTATION D'UNE LAMPE A DECHARGE (BALLAST ELECTRONIQUE)

III-1 ALIMENTATION D'UNE LAMPE À DECHARGE.....	45
III-2 PRINCIPE.....	46
III-2-1 INTERET DE LA HAUTE FREQUENCE POUR LA LAMPE À DECHARGE.....	46
III-3 ONDULEUR AUTONOME.....	48
III-3-1 ONDULEUR MONOPHASE EN DEMI- PONT.....	49
III-3-2 ONDULEUR MONOPHASE EN PONT.....	49
III-3-3 ONDULEURS DE TENSION MONOPHASES A MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION	50
III-3-4 COMMANDE M.L.I.....	50
III-3-4-1 Principe de la commande M.L.I.....	50
III-3-4-2 Principe de la modulation triangulo-sinusoidale.....	51
III-3-4-3 Caractéristique de la modulation.....	52
III-3-5 LES COMMUTATIONS DANS LES ONDULEURS DE TENSION.....	54
III-3-6 SPECIFICITES ET MODE D'EMPLOI DU TRANSISTOR MOSFET.....	57
III-3-6-1 Description.....	57

III-3-6-2 Principe de fonctionnement	58
III-3-6-3 Performances	60
III-4 SIMULATION DU BALLAST ELECTRONIQUE A HAUTE FREQUENCE	60
III-4-1 BALLAST ELECTRONIQUE EN PONT COMPLET	60
III-4-2 BALLAST ELECTRONIQUE EN DEMI-PONT	61
III-5 MODELE DE LA LAMPE FLUORESCENTE POUR LES BALLASTS ELECTRONIQUES A HAUTE FREQUENCE	64
III-5-1 EFFET DE LA TEMPERATURE	65
III-5-2 MODELE DU CIRCUIT ELECTRIQUE	67
III-6 TAUX DE DISTORSION HARMONIQUE	69
III-6-1 REGLEMENTATION	69
III-7 LES PARAMETRES DES CIRCUITS DES BALLASTS PROPOSES	70
III-8 RESULTATS DE SIMULATION	72
III-8-1 LES CARACTERISTIQUES DE LA LAMPE TEST	72
III-9 CONCLUSION	86

CHAPITRE IV : COMMANDE CLASSIQUE DU BALLAST ELECTRONIQUE

IV-1 COMMANDE D'UN BALLAST ELECTRONIQUE	87
IV-2 MODELISATION DU CONVERTISSEUR	87
IV-3 MODELE MATHEMATIQUE DU SYSTEME	87
IV-4 ANALYSE DE LA STABILITE DU SYSTEME	88
IV-4-1 LA FONCTION DE TRANSFERT DU SYSTEME	88
IV-5 LA COMMANDE DU BALLAST ELECTRONIQUE	91
IV-5-1 CORRECTION DU SYSTEME	91
IV-5-2 SYNTHESE DE LA COMMANDE	92
IV-5-2-1 Méthode de placement des pôles	92
IV-6 RESULTATS DE SIMULATION	93
IV-6-1 TEST DE LA ROBUSTESSE.....	96
IV-7 CONCLUSION	99

CHAPITRE V : APPLICATION DE LA LOGIQUE FLOUE POUR LA COMMANDE D'UN BALLAST ELECTRONIQUE

V-1 INTRODUCTION	100
V-1-1 HISTORIQUE	101
V-2 THEORIE DES ENSEMBLES FLOUS	102
V-2-1 ENSEMBLE BINAIRE CLASSIQUE	102
V-2-2 ENSEMBLE FLOU	102
V-2-3 FONCTION D'APPARTENANCE	104
V-2-4 UNIVERS DE DISCOURS	105
V-2-5 CARACTERISTIQUES D'UN ENSEMBLE FLOU	106
V-2-6 OPERATIONS SUR LES ENSEMBLES FLOUS	107
V-2-6-1 Egalité	107
V-2-6-2 Inclusion	107
V-2-6-3 Intersection	108
V-2-6-4 Union	108
V-2-6-5 Complément	108
V-2-7 PROPRIETES DES OPERATIONS SUR LES SOUS ENSEMBLES FLOUS	109
V-3 STRUCTURE D'UN SYSTEME BASE SUR LA LOGIQUE FLOUE	109

V-3-1 DEFINITIONS	109
V-3-1-1 Variable linguistique	110
V-3-1-2 Règles linguistiques	110
V-3-2 SYSTEME BASE SUR LA LOGIQUE FLOUE	110
V-3-2-1 Fuzzification	101
V-3-2-2 Inférence floue (conclusion, déduction ou conséquence)	113
V-3-2-3 Defuzzification	119
1- LA METHODE DU MAXIMUM	119
2- METHODE DU CENTRE DE GRAVITE	119
3- METHODE DE LA MOYENNE PONDEREE	120
V-4 REGLAGE ET COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE.....	120
V-4-1 PROCEDE LORS DE LA CONCEPTION D'UN REGLAGE PAR LOGIQUE FLOUE	120
V-4-2 PRESENTATION DE LA STRUCTURE LORS D'UN REGLAGE PAR LOGIQUE FLOUE	121
V-4-2-1 Configuration interne d'un régulateur par logique floue	121
V-4-2-2 Propriétés d'un régulateur par logique floue.....	122
V-4-3 AVANTAGES ET INCONVENIENTS	122
V-4-3-1 Avantages	122
V-4-3-2 Inconvénients	123
V-5 APPLICATION DU REGULATEUR FLOU AU BALLAST ELECTRONIQUE	123
V-5-1 PRESENTATION DU REGULATEUR FLOU UTILISE	123
V-5-1-1 Base des règles.....	124
V-5-1-2 Moteur d'inférence.....	125
V-5-1-3 Defuzzification.....	125
V-5-2 RESULTATS DE SIMULATION.....	127
V-6 TEST DE LA ROBUSTESSE.....	129
V-7 CONCLUSION.....	131
 CONCLUSION GENERALE	 132
ANNEXES	
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

Université Hassiba Ben Bouali Chlef.
Institut d'Electrotechnique.
Option : Commande des machines électriques.
Présenté par : Aissa Boukhtache Aicha.

Titre : Commande d'un système lampe à décharge-ballast électronique pour épuration des eaux.

Résumé

Les décharges électriques basse pression établies dans les mélanges mercure-gaz rare sont à la base de nombreuses applications tant dans le domaine de l'éclairage que pour les applications industrielles.

Ce présent travail présente la conception d'une alimentation de courant haute fréquence pour alimenter une lampe à décharge (U.V basse pression) destinée au traitement biologique des eaux.

L'alimentation en question est un ballast électronique constitué d'un filtre passe bas, d'un redresseur, d'un onduleur et d'un circuit résonnant. Dans le but d'avoir un ballast électronique peu encombrant et peu coûteux, on a fait l'étude de quatre ballasts, le premier en pont complet et les trois autres en demi-pont, on a choisit le meilleur d'entre eux puis on a essayé d'améliorer ses performances en jouant sur les paramètres du circuit résonant.

On a appliqué au ballast choisit une commande classique (régulateur P.I), cette dernière est une bonne stratégie de commande puisqu'elle a corrigé les formes d'ondes obtenues tout en assurant un courant d'alimentation de la lampe sinusoïdal avec un faible facteur de distorsion, mais cette stratégie de commande n'est pas robuste, car elle supporte mal les variations du courant causées par les variations de la température et celles de la puissance d'arc.

En remplaçant le régulateur P.I par un régulateur flou, notre alimentation est beaucoup plus stable, ceci se traduit par :

- ❖ Une amélioration considérable des formes d'ondes des courants et de la tension sans avoir besoin d'un modèle mathématique exact de la lampe à décharge;
- ❖ La grande robustesse de cette stratégie de commande, puisqu'elle peut supporter de grandes variations de courant.

Par conséquent, le régulateur flou peut être une excellente alternative du régulateur P.I classique.

Mots clés

- Traitement biologique des eaux.
- Lampe à décharge Mercure-Argon basse pression.
- Résonance.
- Rayonnement U.V.
- U.V-c.
- Ballast électronique.
- Commande MLI.
- Onduleur en demi-pont.
- Régulateur P.I.
- Régulateur P.I Flou.

University of Hassiba Ben Bouali Chlef.
Electrical Engineering Institute.
Option: electric machines control.
Presented by: Aissa Boukhtache Aicha.

Title: control of a system discharge lamp - electronic ballast for purification of water.

Abstract

The electric low pressure discharges established in the mercury- rare gas mixtures are at the base of many applications as well in the supply of lighting as for the industrial applications.

This present work presents the design of a high frequency current supply to drive a discharge lamp (U.V low pressure) intended for the biological treatment of water.

The question supply is an electronic ballast made up of a low passes filter, of a rectifier, an inverter and a resonant circuit. With an aim of having a compact and cheap electronic ballast, one made the study of four ballasts, the first in complete bridge and the three others in half-bridge, one have choose the best of them then one tried to improve his performances while exploiting the parameters of the resonant circuit.

One applied to the ballast chooses a traditional P.I regulator; this latter is a good control strategy since it corrected the wave forms obtained while ensuring a power supply sinusoidal current of the lamp with a weak distortion factor. But this control strategy is not robust because it supports badly the variations of the current caused by the variations in the temperature and those of the arc power.

One replace the P.I regulator by a fuzzy regulator, our system is much more stable, this results in:

- ❖ considerable improvement of the wave forms of the currents and the voltage without needing an exact mathematical model of the discharge lamp;
- ❖ the great robustness of this control strategy, since it can support great current fluctuations.

Consequently, the fuzzy regulator can be an excellent alternative of traditional P.I regulator.

Key words

- Biological treatment of water.
- Mercury-argon gas-discharge lamp low pressure.
- Resonance.
- U.V radiation.
- U.V-c.
- Electronic ballast.
- PWM
- Half-bridge inverter.
- P.I Regulator.
- Fuzzy P.I Regulator.

INTRODUCTION GENERALE

Plus personne n'oserait nier l'état dramatique de l'eau provenant des robinets, l'alarme est déclenchée. Sachant que le corps humain (cette merveilleuse machine biologique, la plus perfectionnée de l'univers connu qui renouvelle en moyenne 2 millions de cellules à la seconde), possède son propre système de défense et peut développer des anticorps contre ses attaquants et sous prétexte de s'immuniser contre les maladies dues à l'eau, certaines personnes croient encore qu'il est préférable de s'habituer à l'eau du robinet, car elle est **supposée** ne contenir aucune particule vivantes (bactérie, coliforme, virus, pyrogène etc.) parceque leur contact avec le chlore provoque leur mort. Alors que ceci n'est pas toujours vrai pour les deux raisons suivantes :

- La première est que les maladies de toutes sortes : nausées, fièvres, vomissements, diarrhées etc. sont à supporter jusqu'à ce que le corps puisse développer des anticorps et s'en guérir. Mais pire encore, plus l'attaquant est petit plus le corps s'en défend difficilement. Et en plus maintes maladies provoquées par des virus sont sans solutions.
- La seconde est qu'aucun scientifique ne peut contester que les produits chimiques sont encore plus dangereux que les pires attaquants vivants, car le corps ne développe pas d'anticorps contre les produits chimiques. Non seulement cela, mais le corps ne s'en débarrasse pas. Les produits chimiques s'accumulent dans nos graisses et tissus en permanence. Plus le corps en accumule, plus les risques d'éclatement cancérigène sont grands. Alors le choix du chlore, ce bon vieux javellisant est à éviter car lorsqu'il entre en contact avec des décompositions organiques, forme un nouveau produit chimique hautement cancérigène ; **le trihalométhane (THM)**.

Donc, le moyen de désinfection d'eau choisit doit renfermer les caractéristiques suivantes :

- ❖ Etre efficace pour la plupart des micro-organismes ;
- ❖ Ne pas engendrer la formation de sous produits indésirables ;
- ❖ Etre non dangereux pour les humains et pour la vie aquatique.

Parmi les alternatives possibles pour résoudre les problèmes de qualité bactériologiques des eaux potables non conventionnelles et des eaux usées traitées, l'utilisation de l'irradiation ultraviolette reste une technique intéressantes. Développée d'abord de façon plus ou moins empirique, de nombreux travaux ont permis d'en améliorer l'efficacité (varie entre 90% et 99.99% suivant la durée d'exposition de l'eau à traiter au rayonnement) et la sécurité tout en

diminuant le coût (l'énergie consommée se situe généralement entre 15 et 40 Wh par mètre cube d'eau traitée). Le principal avantage de ce procédé est de n'apporter aucun additif à l'eau traitée.

Les lampes à décharge contenant la vapeur de mercure, l'argon et le galium ou les halogènes de métal sont généralement employées pour produire du rayonnement ultraviolet pour traiter l'eau, les encres, les enduits, les seringues, les boîtes de conserve et d'autres produits finis. En raison de la non linéarité de la caractéristique tension, courant de ces lampes, des alimentations d'énergie spéciales connues sous le nom de **ballast** sont employés pour les commander.

Nous nous sommes attachés à aborder le problème de l'étude d'un système de traitement d'eau par rayonnement ultraviolet. Ce travail est donc largement pluridisciplinaire. Il s'intéresse en effet successivement au fonctionnement et la modélisation des sources de puissance utilisées (alimentation par ballast électronique), au fonctionnement de la décharge et au couplage de cette décharge avec les sources de puissance, au couplage thermique entre la source de chaleur que constitue la décharge et la source froide qui est le réacteur, enfin au transfert radiatif entre la décharge et l'eau traitée.

Faire tout ce travail n'était pas possible vu le facteur temps, on s'est contenté d'étudier le fonctionnement de la décharge ainsi que le fonctionnement et la modélisation du ballast électronique, pour assurer l'alimentation de la lampe à décharge mercure-argon basse pression dans les meilleures conditions dans le but de générer le maximum de rayonnement UV à 253.7 nm à haut pouvoir **germicide**.

Le mémoire de thèse est donc organisé de manière à traiter successivement les différents points du problème.

Toutefois, il nous a semblé que pour être utilisable par le plus grand nombre de lecteurs, ce mémoire devait comporter une partie introductive permettant une approche simple des différents sujets abordés et des phénomènes physiques qui les influencent. Nous pouvons considérer que les deux premiers chapitres correspondent tout à fait à cette démarche.

On a commencé au chapitre I par exposer l'action photométrique et le traitement de l'eau. Après avoir décrit dans le chapitre II ce qu'est une lampe à décharge et quels sont les différents mécanismes physiques mises en jeu dans la décharge mercure-argon basse pression utilisée, nous présenterons les résultats nécessaires à notre travail obtenus des travaux effectués par **J.J Damelin court** et **G. Zissis** sans passer par la résolution du modèle de la décharge. Ces deux chapitres qui présentent quelques caractéristiques des décharges

donneront au lecteur « électrotechnicien » les éléments nécessaires à la compréhension de la suite du mémoire.

Dans le chapitre III, on a étudié le fonctionnement du *ballast électronique*. Puis on a proposé un ballast électronique constitué d'un onduleur en pont complet et 03 autres, constitués d'onduleur en demi-pont, on a fait la simulation par « **Matlab** » et on a comparé les résultats obtenus pour choisir le meilleur d'entre eux, ce dernier va être utilisé au chapitre IV pour lui appliquer la commande classique (régulateur P.I).

Un ensemble de nouvelles techniques de commande basées sur l'analogie avec *les fonctions biologiques et humaines* est apparu ces dernières années : réseaux de neurones, algorithmes génétiques, logique floue ...etc. Ces méthodes sont tolérantes à l'imprécision et à l'incertitude, elles peuvent prendre en compte des phénomènes non linéaires, utilisant beaucoup plus de mémoire et de temps de calcul que les méthodes classiques. Le dernier chapitre (chapitre V) concerne l'application d'une technique de commande moderne qui est la commande par logique floue (car le modèle de la lampe n'est pas précis) pour mieux stabiliser notre alimentation.

Chapitre I

Action photométrique et
traitement des eaux

I-1 INTRODUCTION

Depuis de nombreuses années, protéger notre eau est devenu une nécessité. Les eaux utilisées pour la consommation sont vulnérables. Menacées par les activités humaines (agriculture, élevage, zone d'activité) les eaux sont exposées à diverses sources de pollution difficilement contrôlables. Or, la présence dans l'eau de micro-organismes pathogènes présente un risque pour la santé des consommateurs de tout âges.

Face à cela, les traitements chimiques classiques ne constituent pas toujours une bonne solution. Difficile à mettre en œuvre, ils présentent le double inconvénient de dénaturer les qualités organoleptiques de l'eau, en agissant sur sa composition physico-chimique et le rejet des eaux polluées.

I-2 TRAITEMENT DES EAUX

Le problème de l'eau se pose de façon urgente sur une grande partie de la planète et particulièrement sur tout le pourtour méditerranéen. Dans ces régions, les besoins en zone rurale sont importants et généralement plus difficile à satisfaire du fait de la dispersion de l'habitat et de plus faibles moyens énergétiques disponibles, toutes les ressources doivent être donc mobiliser, y compris au niveau de l'habitat individuel (récupération et stockage des eaux pluviales par citerne ou majel, exploration des nappes phréatiques urbaines par puits et des eaux usées par station d'épuration).

La mobilisation de ces ressources en eau non conventionnelles n'est pas sans problèmes, en effet les réservoirs d'eau familiaux, les puits, les périmètres irrigués à partir d'eau usées peuvent être vecteur de transmission de maladies lorsque leur exploitation est mal conduite et le traitement de l'eau mal adopté .

I-2-1 SOLUTION

Pour que le traitement soit bien adopté, il passe par trois étapes :

- ❖ **TRAITEMENT PRIMAIRE** : enlèvement des débris et des solides en suspension par filtration et décantation.
- ❖ **TRAITEMENT SECONDAIRE** : procédés biologiques permettant de dégager les matières organiques et d'éliminer les autres solides en suspension.
- ❖ **TRAITEMENT TERTIAIRE** : traitement avancé utilisant les procédés additionnels de filtration, chimique ou biologique, pour enlever certains composés ou éléments précis ayant échappé au traitement secondaire [90].

Donc, l'expression « traitement tertiaire » peut désigner plusieurs types de traitements ou différentes fonctions en vue d'atteindre un niveau de traitement de qualité supérieure à ce que l'on pourrait attendre d'un traitement secondaire.

Pour résoudre les problèmes de qualité bactériologiques des eaux potables non conventionnelles et des eaux usées traitées, il est généralement utilisé un traitement de chloration. L'utilisation de chloration est de plus en plus mise en retrait du fait de la production de sous produits chlorés accusés d'être cancérigènes et du peu d'action sur les virus.

En outre, le rejet d'effluents chlorés peut être toxique pour la vie aquatique dans les milieux récepteurs.

La recherche de solutions alternatives a donné lieu à divers travaux. Parmi les alternatives possibles, l'utilisation de « *l'irradiation ultraviolette* » reste intéressante.

I-2-2 LA STERILISATION DE L'EAU PAR UV

La stérilisation de l'eau par U.V a été abordée dès 1910. Ce n'est qu'à partir des années 70 qu'elle s'est effectivement développée.

La technologie de désinfection des eaux épurées par rayonnement U.V a été développée en Amérique du nord ces 10 dernières années, elle est considérée comme la meilleure alternative à la chloration [91].

I-3- LE RAYONNEMENT

L'ensemble des rayons électromagnétiques forme un spectre ininterrompu dans l'échelle de fréquence. La figure 1.1 indique les dénominations les plus courantes des radiations de ce spectre [23].

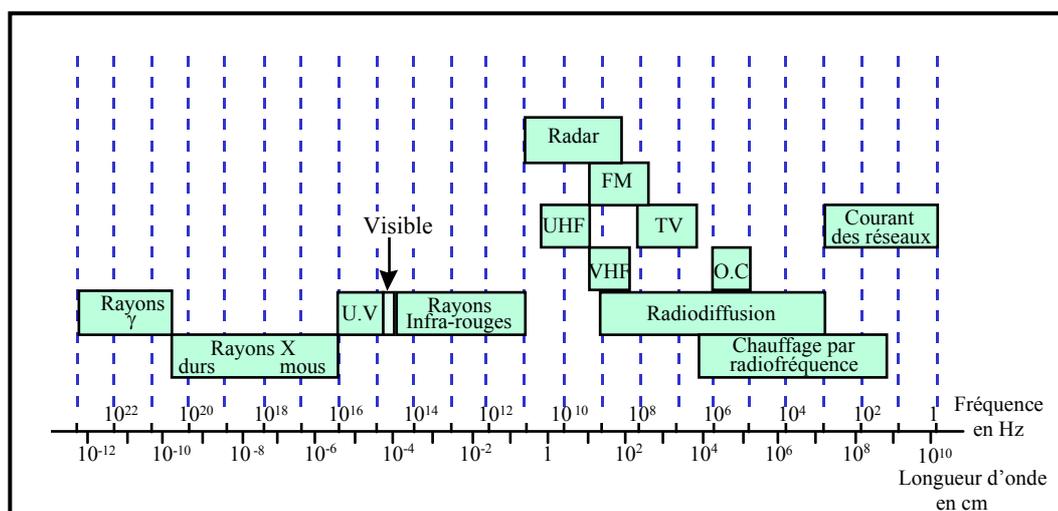


Fig.1.1 Composition du spectre électromagnétique

Donc, les rayons ultraviolets produits par les lampes à décharge, sont une onde électromagnétique et regroupent des fréquences oscillant entre 100 et 400 nm (dans les domaines allant de l'ultraviolet au proche infra-rouge).

La pratique puis la réglementation ont permis de définir plus précisément les rayons UV et visible. On utilise les subdivisions des tableaux 01 et 02. le rayonnement ultraviolet est divisé en 03 bandes correspondant à des photons de plus en plus énergétiques alors que le spectre lumineux laisse apparaître huit bandes colorés dont les limites sont codifiées par la commission internationale de l'éclairage (C.I.E) [88].

Bandes	Types d'UV	Limites des bandes
A	Mous	315 à 400 nm
B	Moyens	280 à 315 nm
C	Durs	100 à 280 nm

Tableau 01 : Définition des trois types d'UV

Bandes	Couleurs	Limites des bandes
1	Violet foncé	380 à 420 nm
2	Violet	420 à 440 nm
3	Bleu	440 à 460 nm
4	Bleu vert	460 à 510 nm
5	Vert	510 à 560 nm
6	Jaune	560 à 610 nm
7	Orange	610 à 660 nm
8	Rouge	660 à 760 nm

Tableau 02 : Définition des 08 bandes du spectre lumineux

Les radiations U.V ont une action photochimique sur les corps, action qui se manifeste par des radiations très diverses tels que :

- pigmentation de la peau pour des longueurs d'ondes U.V-A ;
- vitamination des produits alimentaires, augmentation du taux d'hémoglobine dans le sang et formation de la vitamine D nécessaire à la croissance pour une longueur d'onde U.V-B ;
- destruction des micro-organismes pour une longueur d'onde U.V-C ;
- formation d'ozone pour une longueur d'onde de l'ordre de 185 nm.

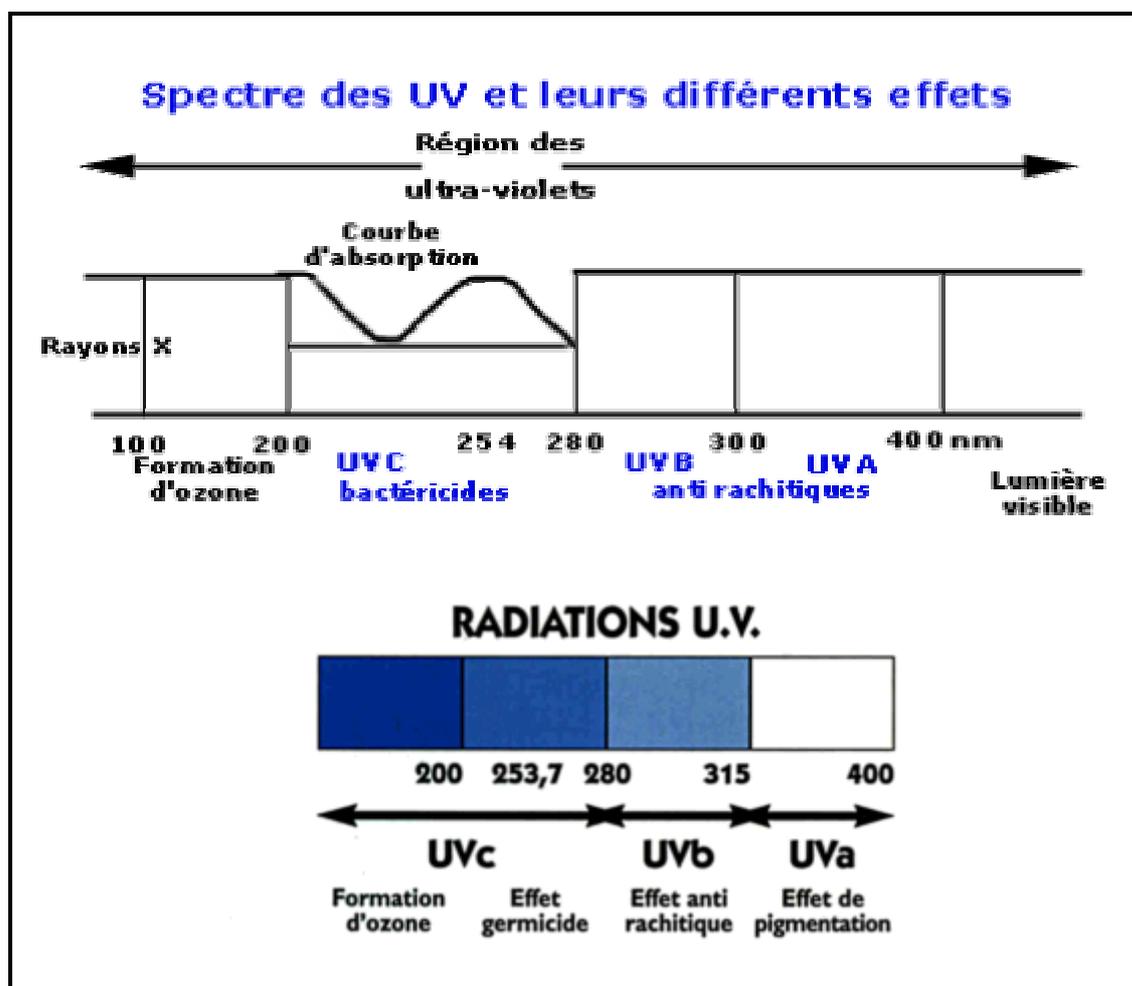


Fig.1.2 : Spectre des UV et leurs différents effets [91]

I-4 L'ACTION GERMICIDE ET LE TRAITEMENT DE L'EAU

L'action stérilisante est due à la perturbation apportée par les radiations ultraviolettes dans la structure chimique des constituants de la cellule vivante, et par suite, de leur fonctionnement. La courbe d'absorption de l'A.D.N (acide désoxyribonucléique) et de l'A.R.N (acide ribonucléique), véritable support de l'information génétique dans le noyau des cellules, pour des longueurs d'onde comprises entre 200 et 280 nm met en évidence un pic à la longueur d'onde 253.7 nm, c'est à dire un profond effet germicide à cette longueur d'onde.

Suivant la qualité d'énergie U.V reçue, la cellule vivante sera soit stérilisée (*effet bactériostatique*), soit détruite (*effet bactéricide*). L'effet bactériostatique dans le cas d'absorption modérée d'énergie U.V, permet à la cellule de continuer à vivre, mais sans avoir la possibilité de se produire. 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. La dose minimale légale selon la circulaire de 19/01/87 de la direction générale de la santé est de 25000micro watt second par centimètre carrée.

La loi de Lambert-Beer donne le calcul de l'énergie et met en évidence un certain nombre de paramètres dont dépend cette énergie :

- la puissance de la lampe, source U.V, P en watts ;
- la surface émettrice S en m² ;
- le coefficient d'absorption des rayons U.V dans le liquide à traiter K en L/m ;
- l'épaisseur de la lame d'eau Y en m ;
- le temps d'exposition d'un élément de volume T en S.

D'où la dose d'exposition : $D = \frac{P}{S} e^{-KY} T$ J/m² ou 10 micro ws/cm² (1-1)

L'action abiotique des radiations U.V sera d'autant plus efficace que la structure de l'être vivant se rapprochera de la structure monocellulaire [92].

Les microbes, virus, bactéries, seront donc particulièrement sensibles aux rayons U.V puis pour les doses plus fortes les végétaux inférieures tels que les algues, les moisissures et leurs spores.

	ELIMINATION	
	90%	99,99%
BACTERIES		
Escherichia coli	2,9	11,6
Salmonella typhosa	2,2	8,8
Bacillus subtelis veg	6,1	24,4
Bocillus subtelis spr	11,8	47,2
Streptococcus lactis	6,2	24,8
Pseudomonas aeruginosa	5,5	22
Pseudomonas fluorescens	3,5	14
Staphiloccus albus	1,8	7,2
Staphiloccus aureus	2,6	10,4
Vibrio comman choléra	3,4	13,6
Pseudomonas tumefatiens	4,4	17,6
Pseudomonas cepacias	4,5	18
VIRUS		
Poliovirus poliomyelitus	3,2	12,8
Hépatite	5,8	23,2

Tableau 03 : Quelques exemples de doses U.V nécessaire à 253.7 nm pour l'élimination de X% de germes (mJ/cm²) [95]

I-5 MISE EN ŒUVRE DE LA DESINFECTION PAR U.V

Un système de traitement des eaux par rayonnement U.V est donné comme suit [23] :

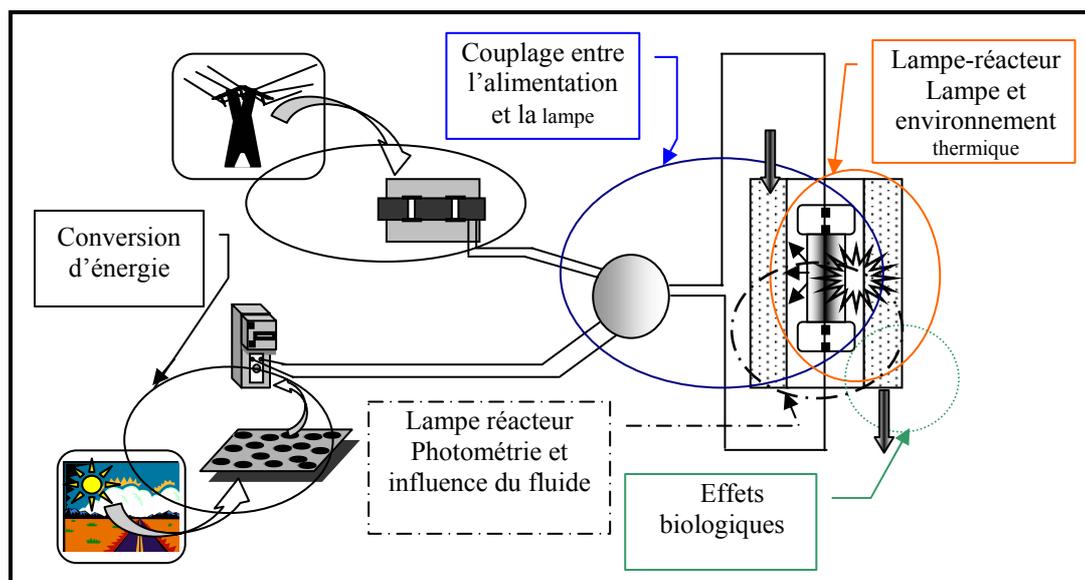


Fig.1.3 : Système de traitement mono tube
 Soit : -par le réseau.
 -par capteurs solaire.

I-5-1 SOURCE DE RADIATIONS (LES LAMPES)

La source d'émission U.V utilisé en désinfection est la lampe à vapeur de mercure. Il s'agit de lampe à arc électrique qui provoque l'excitation des atomes de mercure, puis l'émission de radiations par retour à leur état fondamental. Le spectre d'émission des lampes dépend de la pression de mercure dans les lampes.

I-5-1-1 Lampe basse pression

Lampe 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 91.4 et 162.6cm 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 ou cilice, ce qui permet de les immerger directement dans l'eau à traiter (les gaines de quartz assurent l'isolation thermique de l'eau). 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 la température influence la pression qui peut être maintenue au niveau de la lampe. Trop basse, elle provoque une chute de pression, les atomes de mercure se trouvent moins comprimés

donc plus difficilement excitables, donc diminution de la qualité 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 moyenne pression.

I-5-1-2 Lampes moyenne et haute pression

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

En pratique, l'énergie perdue par la production de chaleur est beaucoup plus grande pour les lampes moyenne pression que pour les lampes basse pression, mais du fait de la très haute intensité de la décharge, moins de lampes sont requises pour fournir une dose donnée. Les lampes à moyenne pression coûtent cependant beaucoup plus chères que celle à basse pression et ont des durées de vie plus courtes (3000 heures) ; 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 pose pas avec les lampes basse pression [96].

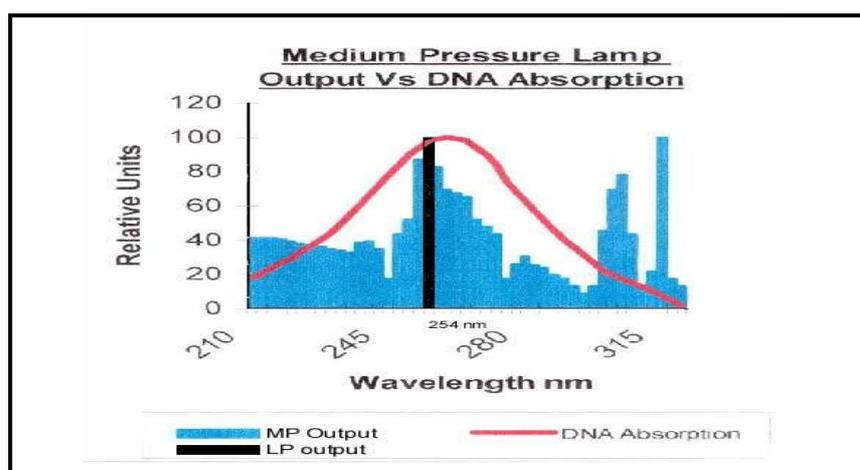


Fig1.4 : Distribution des longueurs d'ondes émises par des lampes basse pression (noir) et moyenne pression (bleu), la courbe rouge représente le spectre d'absorption de l'ADN.

I-5-2 MODULE D'ALIMENTATION

Ils fournissent la tension électrique nécessaire à l'allumage, et maintiennent la stabilité du courant électrique. Ils peuvent être des dispositifs électromagnétiques traditionnels à partir du réseau 50 HZ. Pour les petites stations d'épuration et surtout dans les pays méditerranéens où le soleil est toujours présent, reste aussi envisageable l'alimentation à partir des batteries solaire par l'intermédiaire d'un convertisseur moyenne fréquence. L'utilisation d'une alimentation électronique moyenne fréquence

permet des améliorations très significatives du rendement, d'utilisation optimale de l'énergie, de diminution des contraintes imposées aux lampes et de durée de vie. Les intensités à mettre en œuvre pour assurer la désinfection des eaux résiduaires sont de l'ordre de 100 mJ/cm^2 pour un temps de contact de 10 à 20 secondes, pour assurer une désinfection satisfaisante en permanence, l'appareil doit fournir une dose de rayonnement U.V minimale de 16 mws/cm^2 au point le plus éloigné de la chambre de contact quelque soit le débit entrant et la qualité de l'eau à désinfecter [95].

I-5-3 LES REACTEURS

Il existe deux types de réacteurs : les réacteurs fermée sous pression et les réacteurs ouvert ou canal ouvert, les lampes y sont regroupées par module avec un alignement vertical des lampes. Avec le canal ouvert un dispositif de maintien du niveau d'eau au dessus des lampes est nécessaire [18].

Nous recommandons l'utilisation des réacteurs multiples mono lampe qui permettent d'assurer un rayonnement diffusant en tout point de l'appareil.

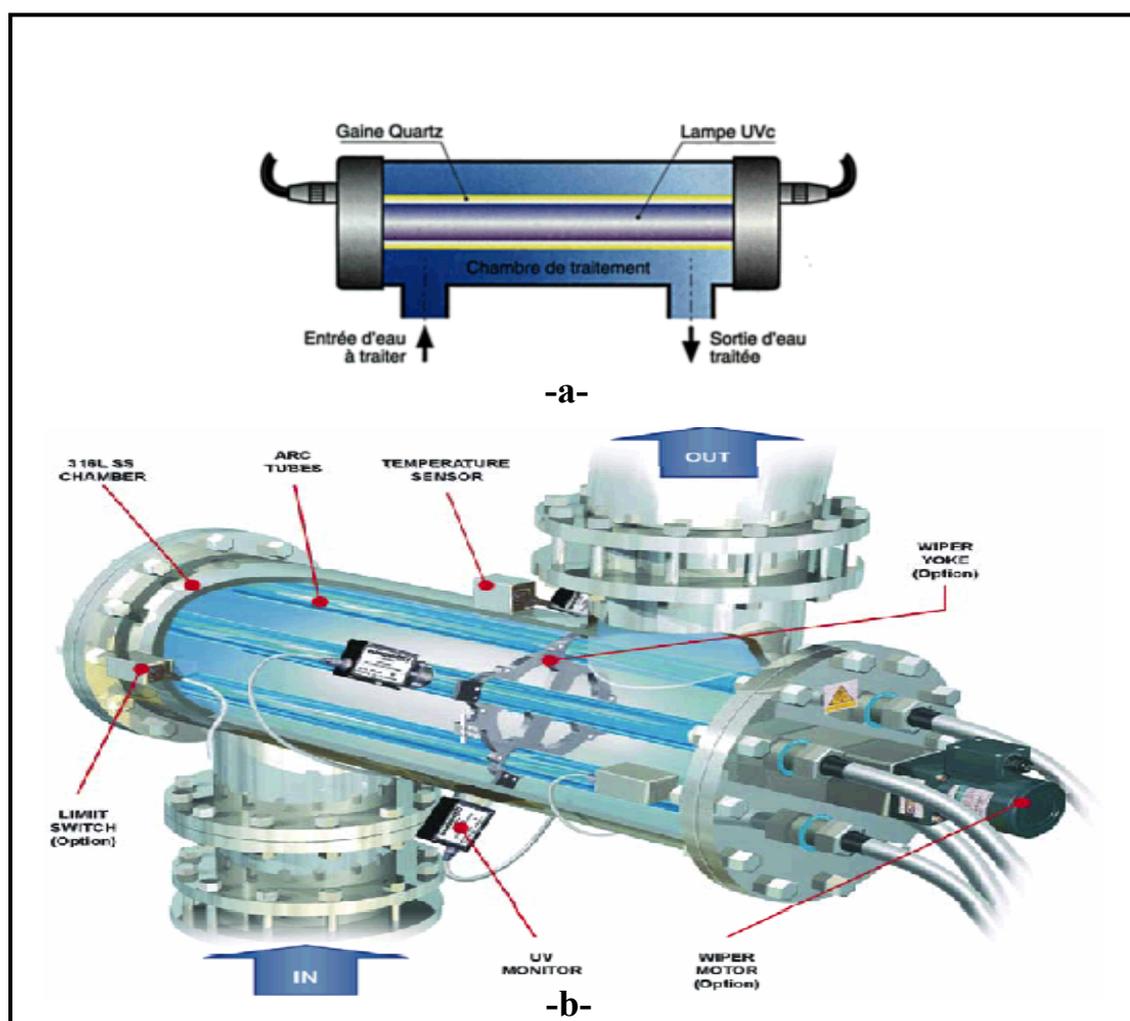


Fig.1.5 : Réacteur destiné au traitement des eaux par rayonnement U.V :

a- Mono lampe.

b- Multi lampes.

I-6 PARAMETRES INFLUENCANT L'EFFICACITE DE LA DESINFECTION

L'efficacité de la désinfection sur une installation U.V dépend des paramètres de fonctionnement et des paramètres de qualité de l'effluent [93].

Les principaux paramètres sont :

I-6-1 LE TEMPS D'EXPOSITION

Il est fonction du débit et donc de la vitesse de passage de l'effluent dans l'installation. Il faut considérer le temps d'exposition moyen au rayonnement U.V qui est fonction de la conception hydraulique du chenal, celle-ci doit remplir 03 conditions fondamentales :

- le flux doit être le plus proche du flux piston, sans dispersion axiale. Chaque élément du volume reste alors pendant la même durée dans le réacteur ;
- le flux doit permettre une dispersion radiale afin que chaque élément de volume se déplace dans des champs d'intensité lumineuse non uniforme ;
- le volume du réacteur doit être utilisé au maximum en évitant les zones mortes et les court-circuits hydrauliques pour profiter au mieux de l'énergie U.V fournie par les lampes et d'éviter que l'effluent ne passe sans être désinfecté. L'utilisation du réacteur monolampe élimine ces problèmes, l'écoulement dans un réacteur tubulaire étant bien maîtrisé.

I-6-2 L'INTENSITE U.V EMISE PAR LES LAMPES

L'intensité U.V nominale est fonction du nombre de lampes allumées. L'intensité reçue par l'effluent diminue avec l'éloignement par rapport à la lampe notamment par dissipation de l'énergie dans un volume plus grand. Ainsi l'épaisseur de la lame d'eau entre deux lampes est un paramètre de dimensionnement important pour les installations à canal ouvert

I-6-3 TRANSMISSION U.V

Les constituants contenus dans l'effluent absorbent le rayon U.V dirigé contre les bactéries. On rapporte que plusieurs composés chimique tels que les composés phénoliques, les acides humiques, les sulfonâtes, le fer ainsi que les agents de coloration interfèrent avec la transmission du rayon à 254 nm. La méthode utilisée pour quantifier cette interférence est la mesure de transmittance qui représente la qualité de lumière disponible pour irradier un micro-organisme à une distance donnée.

I-6-4 LES MATIERES EN SUSPENSION

Puisque le rayon U.V est peu pénétrant, les M.E.S (matières en suspension) peuvent fournir une protection aux micro-organismes pour les raisons suivantes :

- Le rayon n'atteint pas (déviation ou partiellement pénétration incomplète) la bactérie libre puisqu'une particule lui sert de protection ;
- La pénétration sera également incomplète ou nulle si la bactérie est adsorbée à une particule.

La protection sera favorisée pour le nombre de particules et la présence de particules de grande taille, soit de tailles égales ou supérieures à celles des bactéries.

Une augmentation de la dose n'a plus d'effets sur les germes car ils sont protégés par les M.E.S. Une teneur M.E.S supérieure à 25 mg/l limite les performances de la désinfection par U.V basse pression, par contre la filtration de l'effluent les améliore.

I-6-5 LA TURBIDITE

Elle contifie la diffusion de la lumière pour une particule éclairée par une source lumineuse. Elle intègre les M.E.S 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.

I-6-6 L'EFFICACITE GERMICIDE DES RAYONS U.V

Des essais en laboratoires ont permis de déterminer le degré de résistance des différents micro-organismes par rapport à la référence de 1 correspond à *Escherichia coli*. Les bactéries végétatives nécessitent à peu près les mêmes doses que *Escherichia coli*. Les virus tests (rotavirus et poliovirus) sont 3 à 4 fois plus résistants, les bactéries sporulées (*Bacillus Subtilis*) sont environ 10 fois plus résistants alors que les kystes de protozoaires (*Acanthamoeba Costellanu*) requièrent des doses environ 15 fois supérieures.

I-7- RESISTANCE DES MICRO-ORGANISMES AUX U.V

I-7-1 HYPOTHESES SUR LES DIFFERENCES DE SENSIBILITES DES MICRO-ORGANISMES

La réponse à l'U.V est variable selon le type de micro-organisme ciblé. En se limitant aux trois groupes principaux visés par la désinfection. La variation de sensibilité observée est difficilement dissociable de son état morphologique. Puisque le rayon doit pénétrer la cellule pour l'endommager, les organismes possédant une paroi plus épaisse ou des structures externes plus particulières seront en principe plus résistantes aux rayons [94].

I-7-2 MECANISMES DE REDUCTION 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'U.V-C 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 (ARN et ADN). 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 uracile (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 260 nm.

Suivant l'exposition aux U.V, il y'a une variété de photo produits fermés au niveau de l'ADN, dont le plus important est le dimère de pyrimidines adjacentes sur un des brins d'ADN et dont les trois types répertoriés sont : T-T (appelé le dimère de thymine et le plus fréquent), T-C et C-C. Le dimère crée une distorsion au niveau de l'ADN, rendant inefficace voire impossible la réplication du micro-organisme ; il en résulte la mort cellulaire ou l'apparition d'une génération de mutant non viables ou incapable de se produire [89].

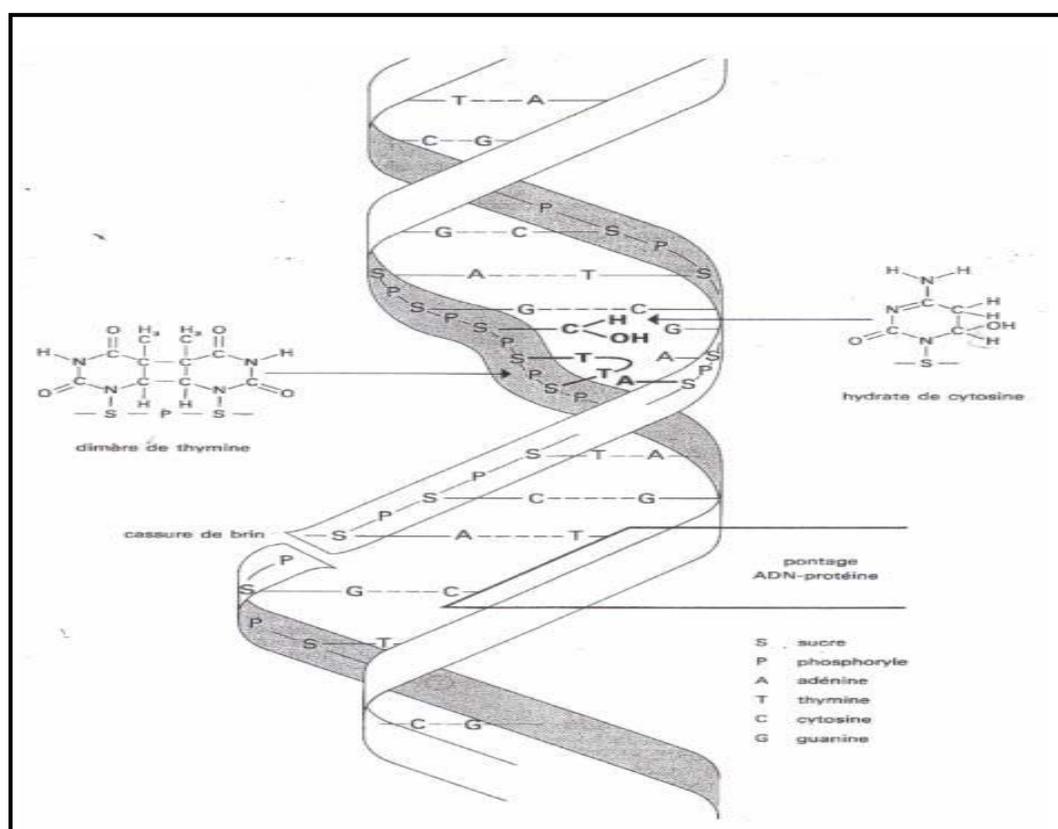


Fig.1.6 : Formation du dimère de Thymine et distorsion de l'ADN.

I-7-3 VIRUS ET BACTERIES

Les bases pyrimidiques de l'ARN des virus sont constituées de cytosine et d'uracile, au lieu de la thymine et de cytosine pour l'ADN des bactéries. La dimérisation de la thymine est plus facilement induite par les U.V que celle de l'uracile, ceci peut expliquer la plus grande résistance des virus [18].

I-7-4 POLIOVIRUS ET RIOVIRUS

Les réovirus ont un double brin d'ARN, sur lequel d'avantage de dommages soient nécessaires à l'inactivation ou qui permettrait la redondance des informations, ce qui est impossible sur un ARN monobrin tel que celui du poliovirus. Les réovirus sont trois fois plus grand que les poliovirus et possèdent une double membrane protéinique, qui absorberait mieux les U.V.

I-7-5 LA TAILLE DU GENOME

A l'intérieure du même gène 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 transformation photochimiques pour que la réplication soit rendue non fonctionnelle. En dehors de quelques exceptions, les organismes chez qui on observe une résistance sont généralement qui sont les plus gros (plus de dommages nécessaires et de plus grandes chances de contenir des protéines qui absorbent le rayon). Jogger (1967) rapporterait que les dimères de thymine sont plus facilement formés que les autres types. Donc plus un génome contiendrait de thymine, plus il serait sensible.

I-8- AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Le système de décontamination de l'eau par U.V possède de nombreux avantages :

- le plus intéressant est que la désinfection ne s'accompagne de la formation d'aucun produit de réaction avec les matières organiques de l'eau ;
- L'utilisation de l'appareil est simple, il est adoptable sur un circuit de distribution d'eau déjà en place ;
- l'entretien de l'appareil est réduit et son coût de fonctionnement est relativement bas.

Ces avantages sont contrecarrés par quelques inconvénients majeurs :

- il n'y a pas de possibilité d'apprécier de façon immédiate l'efficacité du traitement par la mesure d'un résiduel comme dans le cas d'un oxydant chimique ;
- il n'y a pas d'effet rémanent, l'emploi de la désinfection par U.V est donc réservé à la désinfection des eaux dont le circuit de distribution est court et bien entretenu ;
- enfin, le bon fonctionnement de l'appareil nécessite une eau de bonne transmittance, c à d une turbidité inférieure à 1 NTU.



Fig.1.7: Dispositif réel de traitement des eaux par rayonnement U.V. [90]

Chapitre II

Les lampes à décharge

II-1 RAPPEL DE NOTIONS THEORIQUES

II-1-1 IONISATION D'UN GAZ

Sous l'action d'un champ électrique intense, d'un rayonnement (rayons X, rayon U.V, etc...) ou de choc d'une particule (photon, électron, etc.), un ou plusieurs électrons peuvent être arrachés d'un atome ; il en résulte un ion positif, formé du noyau et des électrons qui subsistent, et des ions négatifs, formés par les électrons arrachés de l'atome.

Pour arracher cette extraction, une certaine énergie est nécessaire, laquelle varie avec la nature chimique du gaz ; parmi les corps simples les alcalino-terreux, tels que le sodium, potassium, lithium, césium, etc., ont une énergie d'extraction faible, d'où ionisation facile de ces corps [17].

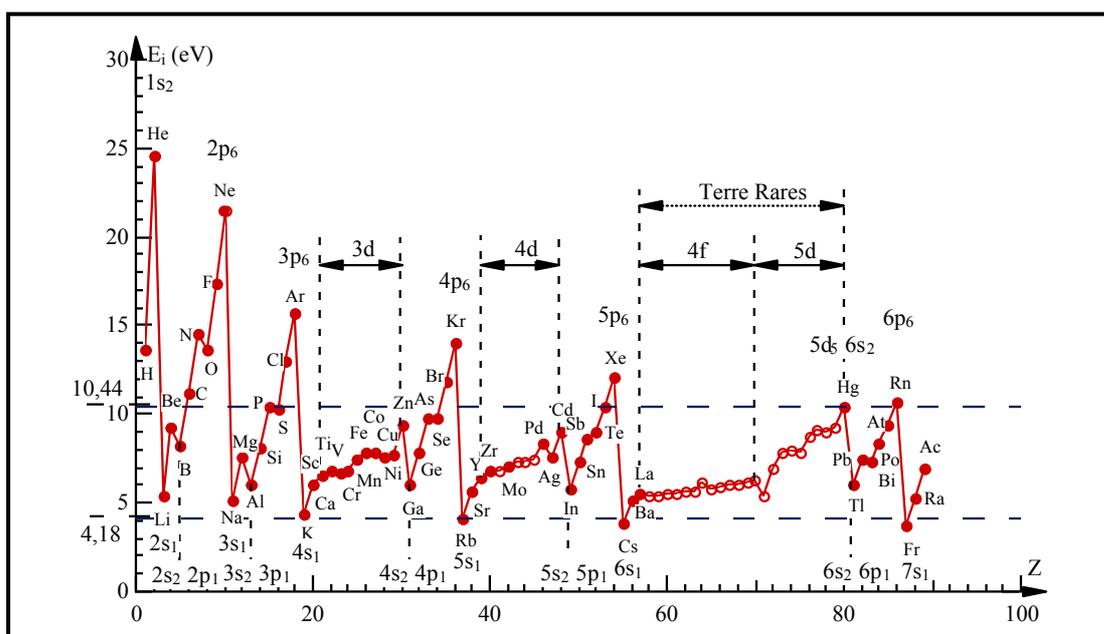


Fig. 2.1 : Energie d'ionisation pour quelques corps

II-1-2 EXCITATION D'UN ATOME

Si l'atome reçoit une quantité d'énergie inférieure à l'énergie d'extraction un électron placé sur une couche externe peut passer sur une couche plus extérieure et normalement vide d'électrons ; on dit que l'atome est passé de son niveau normal d'énergie à un niveau (ou état) d'excitation ; l'ionisation est évidemment la limite maximale d'excitation de l'atome, avec expulsion de l'électron. Inversement si l'électron revient à son niveau normal, il perd de l'énergie sous forme de rayonnement (photon).

Or, un atome ne peut recevoir que des quantités déterminées d'énergie, l'atome de mercure par exemple ne peut recevoir que 4.64 – 4.86 – 5.43 – 6.66 – 7.61 – 10.83 électron-volts ; de même quand il revient à son état normal, l'atome ne peut céder que l'une des quantités définies d'énergie, correspondant au passage d'un atome de l'un des niveaux d'excitation au niveau normal, à chaque une de ces quantités d'énergies correspond une radiation d'une certaine longueur d'onde (la longueur λ est liée à l'énergie perdue W par la relation :

$$\lambda = \frac{hc}{W} \quad (2-1)$$

h : étant la constante de Planck.

C : la vitesse de lumière.

Si la radiation est visible, à la quantité d'énergie perdue correspond une lumière monochromatique.

II-1-3 CAS DU MELANGE DE DEUX GAZ

Si un atome excité du 1^{er} gaz rencontre un atome du 2^{ème} gaz, il revient à son état normal et excite (ou ionise) l'atome du 2^{ème} gaz ; celui ci revient à son état normal en émettant une ou plusieurs radiations ; c'est ce qu'on appelle un **choc du second espèce**, ce phénomène s'accompagne de dégagement de chaleur.

Soit un mélange de vapeur de Mercure et de l'Argon, par exemple le potentiel d'ionisation de l'argon étant supérieur à celui du mercure ; rencontrant les atomes de mercure, les atomes d'argon excités à **l'état métastable** reviennent à leur état normal sans émettre de radiations, et transmettent leur énergies aux atomes de mercure qui sont ionisés ou excités ; revenant à leur état normal, ces derniers émettent seuls un rayonnement. Il en est ainsi pour tous les mélanges d'un gaz rare de l'air avec un autre gaz ou une vapeur métallique.

Le gaz rare facilite l'ionisation ou l'excitation de l'autre gaz par choc de second espèce ; mais il n'émet pas lui même de radiations.

II-1-4 PLASMA ET DECHARGE ELECTRIQUE

II-1-4-1 Notion de plasma

Dans les années 1920, LANGMUIR et TONKS ont introduit le mot « *plasma* » pour désigner un gaz ionisé, électriquement neutre, dans des tubes à décharge. On a continué à utiliser ce mot, particulièrement en astrophysique, pour désigner un état de la matière globalement neutre comportant des particules chargées. On peut considérer que le plasma constitue un quatrième état de la matière faisant suite aux trois états : solide, liquide, gaz [23].

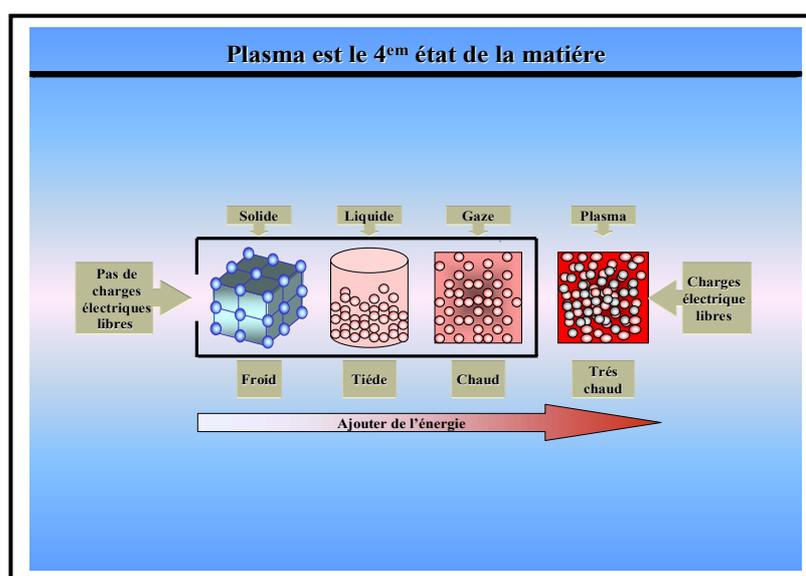


Fig.2.2 : Plasma, 4^{ème} état de la matière

Les propriétés des plasmas viennent des forces coulombiennes : une particule chargée interagit avec beaucoup d'autres. Néanmoins, les plasmas conservent certaines propriétés des gaz (compressibilité, pression proportionnelle à la température absolue).

Le plasma est caractérisé par un coefficient dit degré d'ionisation. En général le gaz à l'état macroscopique est électriquement neutre, cette neutralité est due aux forces électrostatiques énormes qui résulteraient dans le cas contraire [97].

II-1-4-2 Degré d'ionisation

Le résultat d'une décharge dans un gaz est la production d'un gaz ionisé contenant un nombre d'électrons n_e , d'ion n_i et de molécules neutres n_0 par unité de volume.

On caractérise tout plasma par son degré d'ionisation donné par :

$$\alpha = \frac{n}{n+n_0} \quad (2-2)$$

avec : n : densité des électrons ou des ions
 n_0 : densité des molécules neutres.

Les valeurs du degré d'ionisation dans les divers types de gaz ionisés varient en pratique depuis des valeurs très faibles, de l'ordre de 10^{-10} par exemple jusqu'à l'unité. Quand le degré d'ionisation est égale à l'unité, c'est à dire d'une autre manière la densité des molécules neutres est nulle, on dit que le gaz est totalement ionisé ou qu'il constitue un plasma[81].

II-2 DECHARGE ELECTRIQUE

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 pressions ordinaires, le gaz est isolant électrique qui ne contient qu'un nombre très réduit de particules chargées libres (électrons, ions) par unité de volume.

Cependant, sous l'action d'un champ externe, des rayons cosmiques, des rayons X ou des rayons ultra-violetes, on obtient une décharge en produisant des particules chargées libres par ionisation des atomes neutres du gaz. Si le courant est suffisant, son passage entretient alors cette ionisation et conserve au milieu gazeux ces propriétés de conduction [71].

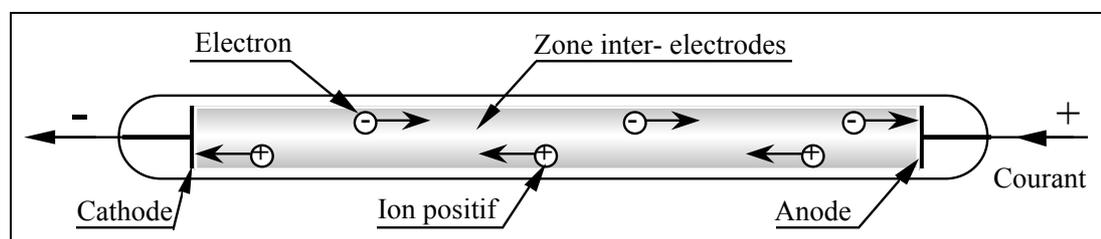


Fig.2.3: Décharge électrique créée dans un gaz renfermé dans une enceinte.

II-2-1 CLACKAGE ET DIFFERENTS TYPES DE REGIMES

Quand on applique aux deux extrémités d'un tube muni de deux électrodes et rempli de gaz, une tension continue croissante, on constate que le courant qui traverse le tube est d'abord faible, jusqu'au moment où une certaine tension étant atteinte, une décharge apparaît brusquement entre les électrodes. L'étude de ce phénomène nécessite l'emploi d'un dispositif limiteur de courant : le ballast. On relève alors la caractéristique courant-tension dont la figure (2.4) donne l'allure générale. Il est illusoire de croire qu'un même dispositif expérimental permet de tracer la courbe $V=f(I)$ entre 10^{-12} et 10 A par exemple. Pour obtenir la courbe ci-dessous en totalité, il est nécessaire de faire varier tantôt V , tantôt I , tantôt les deux à la fois.

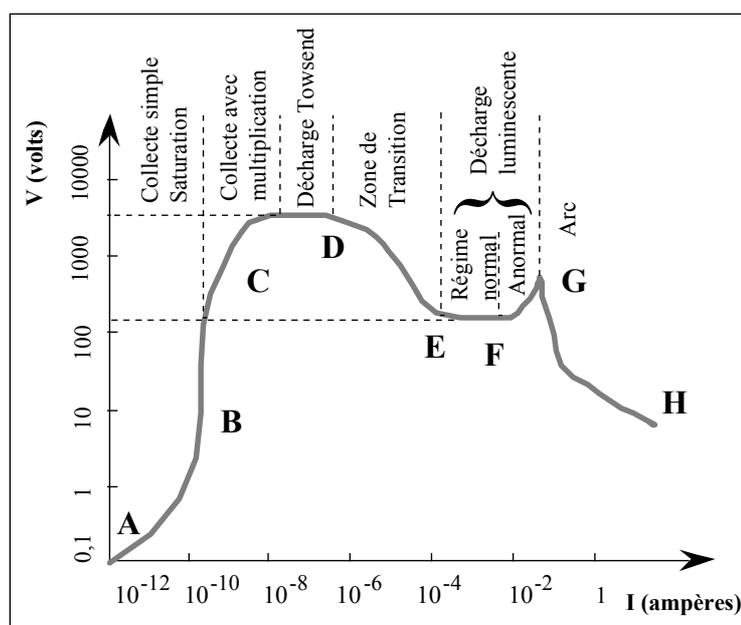


Fig. 2.4 : Caractéristique schématique courant - tension d'une décharge électrique [23].

La figure (2.4) n'a aucune réalité physique dans son ensemble, mais permet de donner un aperçu des mécanismes conduisant des décharges non-autonomes aux arcs. Elle est découpée en plusieurs parties que nous allons décrire brièvement :

- Décharge non autonome, collecte simple sans saturation : appliquons une tension entre les électrodes et provoquons une émission thermoélectronique ou photo-

électronique près de la cathode, par un procédé extérieur thermique ou par un rayonnement ultra-violet. Un courant circule. En augmentant la tension, on arrivera à collecter une partie des électrons (partie A). Ensuite, suivra un phénomène de saturation pour le courant (partie B). Si nous arrêtons le processus extérieur, donc la production d'électrons, alors le courant cesse. La décharge est non autonome.

- Zone de collecte avec multiplication : Continuons à augmenter la tension. Le champ interélectrode va accélérer les électrons qui ont maintenant une énergie suffisante pour provoquer l'ionisation des atomes ou molécules du gaz de remplissage. Un phénomène d'avalanche se produit, les chocs entre électrons (ou ions) et atomes créent de nouveaux ions et de nouveaux électrons libres en arrachant des électrons aux atomes. Ces électrons (et ces ions), eux-mêmes accélérés, amplifient le phénomène, etc. De ce processus résulte une augmentation rapide du courant (partie C).

- Décharge Townsend : Lorsque la tension continue de croître, les électrons très légers et par conséquent très mobiles acquièrent une vitesse élevée et ionisent de plus en plus les atomes ou les molécules du gaz. Les ions interagissent avec la cathode et provoquent l'émission d'électrons. Les caractéristiques de la décharge sont maintenant très dépendantes de la nature des électrodes. Le courant peut se maintenir ou croître, il ne dépend plus d'un agent extérieur et n'est limité que par le circuit extérieur. On parle alors de décharge de Townsend, qui est une décharge autonome. La tension correspondant à ce phénomène est la tension d'amorçage V_D .

- Décharge luminescente : Lorsque le courant augmente à partir de la décharge de Townsend, la tension commence par diminuer. C'est une zone de transition pour accéder à une décharge luminescente. Cette décharge est caractérisée par une différence de potentiel constante entre les électrodes. Seuls des changements situés au niveau de la cathode différencient cette décharge de la décharge en régime d'arc. A ce niveau, le champ électrique décroît et tous les électrons de la cathode sont émis sous l'effet d'un bombardement ionique. La région cathodique se comporte comme une décharge de Townsend. Bien que le courant continue de croître, la tension reste constante. La densité de courant à la cathode, invariante jusqu'alors, va augmenter

lorsque la totalité de la surface de la cathode va être envahie par la décharge, on dit que la lueur cathodique présente un caractère anormal.

- Régime d'arc : Par la suite, les ions perdent moins d'énergie par collisions et en fournissent d'avantage à la cathode. En un point de la cathode, la densité de courant et la température s'élèvent plus que sur le reste de la surface, l'émission tend à se concentrer. Lorsque l'émission thermoélectronique devient importante, la pente $V=f(I)$ redevient négative. On est en régime d'arc. La transition entre le régime de décharge lumineuse anormale et le régime d'arc est due à l'apparition de nouveaux phénomènes d'émission électronique à la cathode quand la tension et le courant augmentent et au chauffage du gaz. L'émission s'effectue alors à partir d'une région très localisée sur la cathode et souvent très mobile appelé spot cathodique [9].

II-2-1-1 Régime établi, répartition du potentiel

La constitution générale de la lampe et la répartition des potentiels en régime établi (luminescent ou arc) entre les différentes zones de la lampe sont représentées sur la figure (2.5). En faisant circuler un faible courant (de quelques 10^2 mA) entre les électrodes qui se trouvent aux extrémités du tube, on produit une décharge électrique.

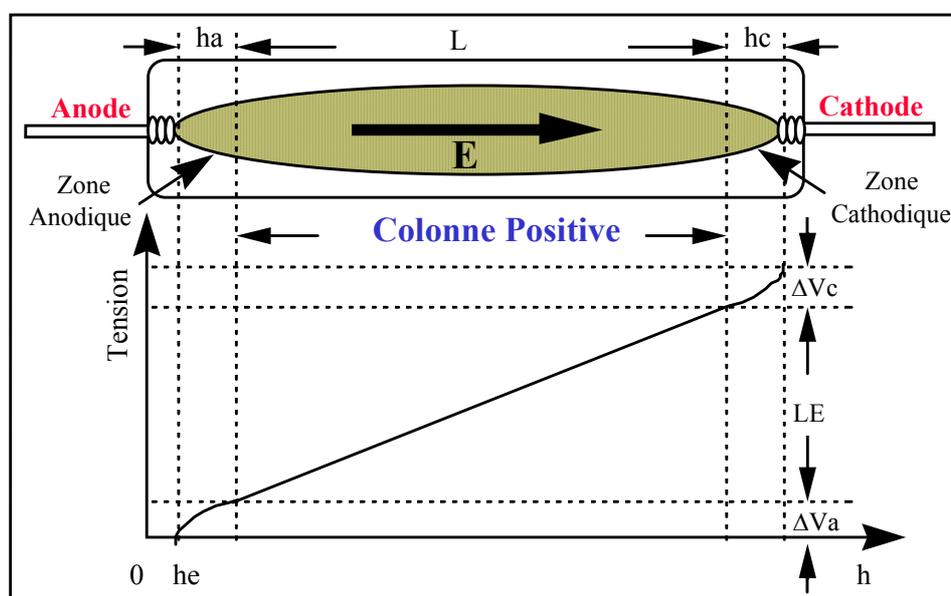


Fig.2.5 : Schématisation d'une lampe à décharge et répartition du potentiel

On remarque la nécessité d'une double zone de transition permettant le passage du courant électrique du circuit au gaz ou à la vapeur métallique, puis du gaz au circuit. Cette double transition est assurée par les électrodes. On distinguera donc trois zones principales dans une lampe à décharge : la zone cathodique, la zone anodique et une zone intermédiaire qui s'étend pratiquement sur toute la longueur de la décharge. C'est principalement dans cette partie qu'est produit le rayonnement. Cette zone est appelée colonne positive.

Lorsque la lampe est alimentée en courant alternatif, ce qui correspond à la majorité des applications, les deux électrodes jouent alternativement le rôle d'anode et de cathode. Ceci impose, pour éviter tout phénomène de redressement, la symétrie de la lampe à décharge et implique, pour les électrodes, des compromis entre les impératifs liés au rôle anode et ceux liés au rôle cathode.

- **La cathode** : son rôle est d'émettre des électrons. En régime d'arc, l'émission est concentrée en un point unique très chaud appelé *spot*. Pour ce mode de fonctionnement, la chute de tension nécessaire au maintien de l'arc est de 10 Volts environ, pour les électrodes habituellement utilisées. L'énergie nécessaire à l'entretien de la température élevée du spot (2300 K), nécessaire à l'émission des électrons est apportée par le bombardement des ions, accélérés par la chute de tension cathodique. On parle alors, d'émission thermoïonique.

- **L'anode** : à l'inverse de la cathode, elle n'est pas normalement une électrode "active". Elle collecte seulement les électrons, et elle pourrait le faire sans une chute de tension supplémentaire, mais pour des raisons de symétrie, ses dimensions sont identiques à celles de la cathode. En régime d'arc, la chute de tension totale aux électrodes est comprise entre 10 et 20 Volts.

- **La colonne positive** : occupe la majeure partie du volume. La charge électrique du nuage de particules y est nulle macroscopiquement, le champ électrique y est donc constant. C'est par l'intermédiaire de celui-ci que la majeure partie de l'énergie fournie par le générateur est transférée aux particules chargées, puis aux particules neutres pour être ensuite transformée en rayonnement. Les électrons, du fait de leur faible inertie, jouent un rôle prépondérant dans ce transfert [20].

II-2-2 L'EMISSION LUMINEUSE

Dans une lampe à décharge, l'émission lumineuse est due à l'excitation des atomes du gaz traversé par le courant électrique.

En effet, un atome peut se trouver excité, il peut alors revenir à l'état fondamental par désexcitation radiative. C'est ainsi que se forme le spectre de raies caractéristiques de l'atome. Selon l'énergie des niveaux excités, nous obtenons des raies dans différents domaines spectraux.

Les atomes de tous corps sont susceptibles d'émettre un rayonnement lorsqu'ils sont portés dans un état excité. Parmi les corps employés comme gaz conducteur et émetteur dans la réalisation des lampes à décharge, le mercure reste un de ceux les plus utilisés. Ceci est en partie dû au fait qu'il possède tant dans l'ultra-violet que dans le visible un nombre restreint de raies dans lesquelles se concentre l'énergie. Le thallium et le sodium sont également très sollicités.

II-2-3 LAMPES A DECHARGE

Les lampes à décharge sont sans doute la première application des plasmas. Historiquement, la production de la lumière dans un gaz raréfié est plus ancienne que la production de la lumière par l'échauffement d'un fil. C'est en 1813 que l'anglais *Sir Humphry Davy* découvrit l'arc électrique (œuf électrique). Ce n'est réellement qu'à partir de 1932, après la mise au point industrielle des lampes à décharge à haute pression, que l'on assiste à un développement spectaculaire des sources d'éclairage général par décharge électrique [57].

II-2-4 CONDITIONS D'ALIMENTATION D'UNE LAMPE A DECHARGE

L'alimentation d'un système électrique quelconque nécessite avant toutes choses la connaissance des caractéristiques électriques de la charge à alimenter. Il est donc important d'établir un cahier de charges le plus détaillé possible concernant le récepteur, afin de déterminer le type de générateur à utiliser [17]. Dans le cas bien particulier d'une lampe à décharge deux contraintes importantes doivent être prises en compte :

- 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.

➤ Emploi d'une électrode auxiliaire :

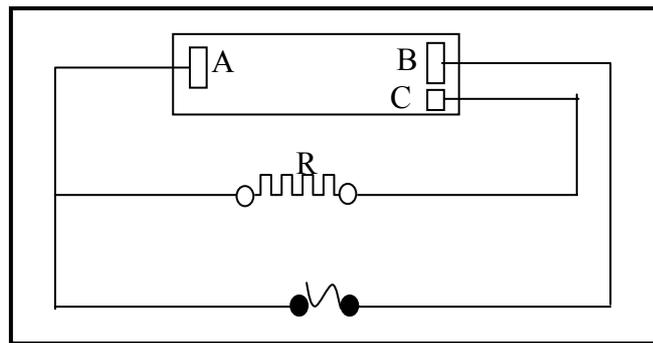


Fig.2.6 : Electrodes auxiliaires

Pour déterminer la tension d'amorçage, on prévoie 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.

➤ chauffage préalable des électrodes :

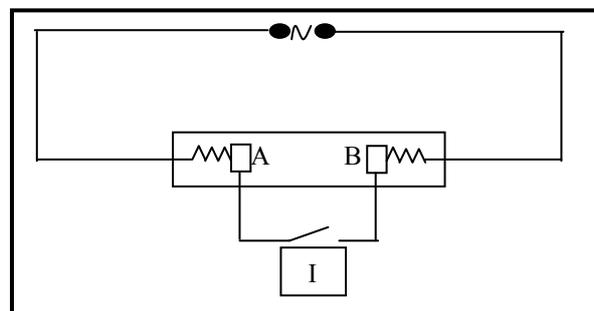


Fig.2.7 : Chauffage préalable des électrodes

D'où émission thermoïonique qui accélère l'amorçage ; les électrodes « A » et « B » sont chauffés par le courant lors de la fermeture de l'interrupteur « I », après établissement de décharge on ouvre.

2- 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 direct 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).

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 (2.8). L'alimentation en source de courant vis à vis de la charge, correspond à R très supérieure à l'impédance de la charge Figure (2.9).

II-2-4 -1 Source de tension

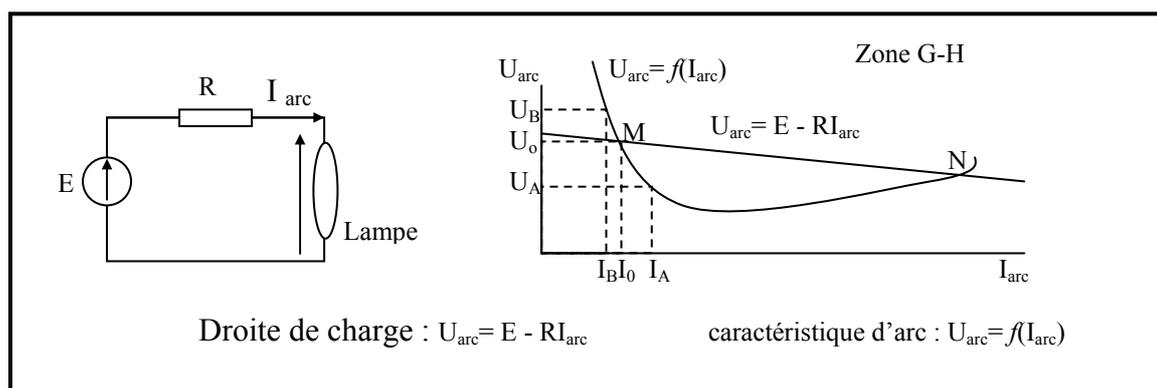


Fig. 2.8 : Montage en source de tension

Au point M, une augmentation ΔI 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 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 tensions vont entraîner de grandes variations 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 $U_{\text{arc}} > E - R I_{\text{arc}}$, 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-2-4 -2 Source de courant

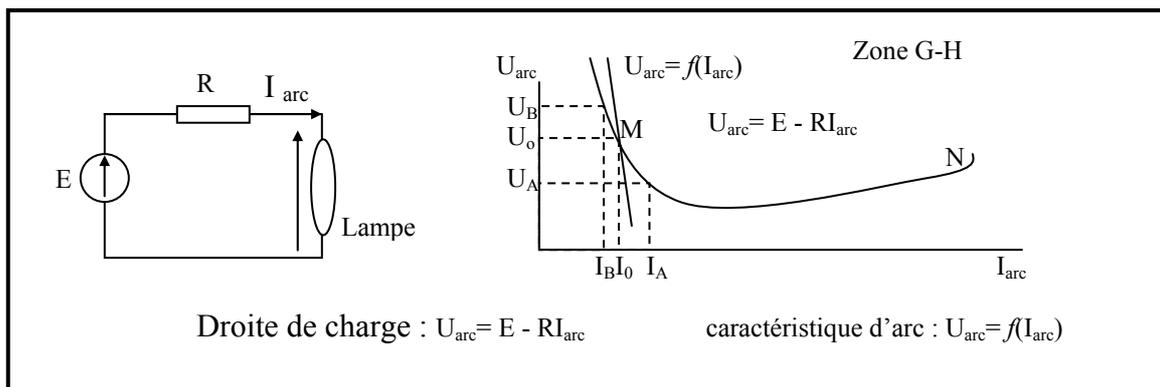


Fig. 2.9 : Montage en source de courant

Une augmentation ΔI 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 $U_{\text{arc}} > E - R I_{\text{arc}}$, pour rétablir ce déséquilibre le courant diminue et tend à revenir rapidement vers le point de départ qui est 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 une augmentation de U_0 en U_B . Ceci entraîne que $U_{\text{arc}} < E - R I_{\text{arc}}$, pour rétablir ce déséquilibre le courant augmente et tend à revenir rapidement vers le point de départ qui est alors un point d'équilibre stable [23].

II-2-4 -3 Nécessite d'une stabilité

Par suite de la caractéristique négative des lampes à décharge, aussi bien en régime de décharge autonome qu'en régime d'arc, il est nécessaire de limiter l'intensité et de stabiliser la tension après amorçage. 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 général 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 :

- 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 accentuer le phénomène de papillotement ;
- ne pas générer de trop forts taux d'harmoniques sur le réseau d'alimentation ;
- ne pas diminuer le facteur de puissance ; on y remédie soit par l'emploi de condensateurs, soit par les montages spéciaux.

II-3 MECANISMES ELEMENTAIRES DANS LA DECHARGE

Les différentes particules du plasma ne sont pas complètement libres, surtout si la pression est élevée. Dans ce cas les collisions entre particules sont inévitables en raison de l'agitation thermique de chacun de ses constituants, de multiples collisions se produisent au sein du plasma, permettant des transferts de quantités de mouvement et des échanges d'énergie entre les particules. Ces effets ont une importance capitale, puisqu'ils permettent au plasma d'atteindre un état d'équilibre.

II-3-1 LES PHENOMENES COLLISIONNELS

II-3-1--1 Collisions élastiques

Ces collisions ne changent pas la nature des particules, elles n'interviennent donc pas dans les mécanismes de peuplement et de dépeuplement de différents niveaux [98].

II-3-1-2 Collisions inélastiques

Les collisions inélastiques directes ou inverses changent aussi bien l'énergie interne des particules concernées que leur énergie cinétique, elles sont donc susceptibles de créer ou de faire disparaître des particules dans le gaz.

II-3-1-3 Collisions superélastiques

L'électron peut modifier l'état interne d'une particule excitée en provoquant sa désexcitation collisionnelle. Il s'agit alors de collisions superélastiques, dans lesquelles l'énergie cinétique finale de l'électron se trouve augmentée [49].

II-3-1-4 Collisions photoniques

Il y a, comme nous l'avons vu, émission de rayonnement lorsqu'un atome excité avec un état d'énergie E_H passe dans un état inférieur E_B . Le photon émis a une énergie $h\nu_0$ telle que

$$E_H - E_B = h\nu_0 \quad (2-3)$$

Avec : h : constante de Planck

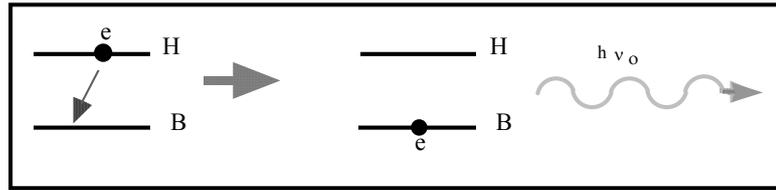


Fig.2.10 : Emission spontanée.

Il y a absorption d'un photon d'énergie $h\nu_0$ dans le cas contraire : cela entraîne un passage de l'état E_B à l'état E_H .

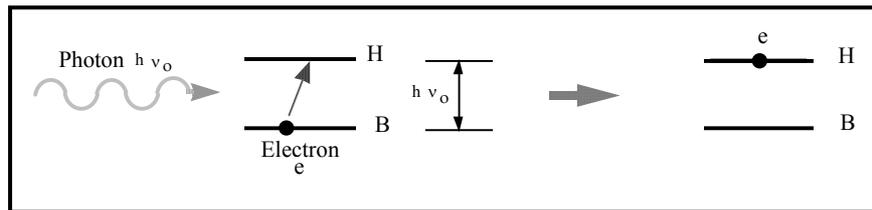


Fig. 2.11 : Absorption du photon.

Soient N_H et N_B les densités de population des deux niveaux précédemment décrits. Si l'atome est dans l'état excité H, il y a une probabilité A_{HB} dt pour que dans l'intervalle de temps dt l'atome passe spontanément d'un état d'énergie E_H à un état d'énergie E_B avec émission d'un photon $h\nu_0$, A_{HB} est la probabilité d'émission spontanée.

Le nombre de transitions ayant lieu de H vers B par de tels processus est, par unité de temps et de volume :

$$N_{H \rightarrow B} = N_H A_{HB} \tag{2-4}$$

Supposons maintenant l'atome excité dans l'état B, placé dans un champ de rayonnement isotrope et homogène. Cet atome pourra absorber un rayonnement de fréquence ν_0 et passer dans un état d'énergie E_H . Le nombre de transition par unité de volume et par seconde ayant lieu par absorption de rayonnement peut s'écrire sous la forme suivante:

$$N_{B \rightarrow H} = N_B B_{BH} u_{\nu_0} \tag{2-5}$$

où u_{ν_0} est la densité du champ de rayonnement ; B_{BH} est la probabilité d'absorption (Coefficient d'Einstein).

Nous soulignons aussi la présence d'un troisième mécanisme qui doit être pris en compte: l'émission induite (ou stimulée) d'un photon d'énergie $h\nu_0$ par l'onde électromagnétique attachée à un photon incident de même nature.

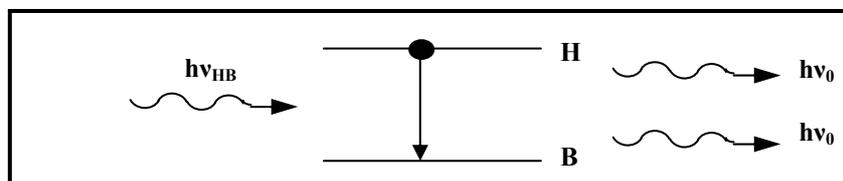


Fig.2.12 : *Emission induite (stimulée)*

Le nombre de transitions engendrées par unité de temps et de volume

$$N_H \longrightarrow_B = B_{HB} N_H u\nu_0 \quad (2-6)$$

Où B_{HB} : est le coefficient d'EINSTEIN d'émission induite.

Les trois processus cités sont liés par la relation :

$$N_B B_{BH} u\nu_0 = N_H (B_{HB} u\nu_0 + A_{HB}) \quad (2-7)$$

où B_{BH} est la probabilité d'absorption, B_{HB} la probabilité d'émission stimulée et A_{HB} la probabilité d'émission spontanée.

II-3-2 DIFFERENTS MECANISMES QUI CONDUISENT A LA PRODUCTION DE RAYONNEMENT DANS LA DECHARGE

Il est possible de classer les mécanismes menant à la production de rayonnement en deux groupes :

- lorsque les niveaux d'énergie sont discrets, on parle de transition « lié-lié » et on observe un spectre de raies. Le spectre de raies correspond à des transitions entre deux milieux liés à des atomes ou à des ions.
- Lorsque l'un des niveaux d'énergie ou les deux sont distribués de manière continue, le spectre résultant est alors un continuum (limité ou non). Le spectre continu est généralement la combinaison de plusieurs phénomènes tels que la recombinaison radiative (transition « libre-liée »), le rayonnement de freinage électron-ion (transition « libre-libre »), certains rayonnement moléculaire....

Ces deux types de mécanismes coexistent dès que la pression s'élève et le rayonnement émis par un plasma résulte alors de la superposition du spectre de raie et d'un fond continu plus au moins intense. Les importances relatives des mécanismes

menant à la production de rayonnement (raie ou continuum) dépendent des propriétés locales du plasma.

La Fig. (2.13) résume les types de transitions possibles dans le diagramme d'énergie d'un atome.

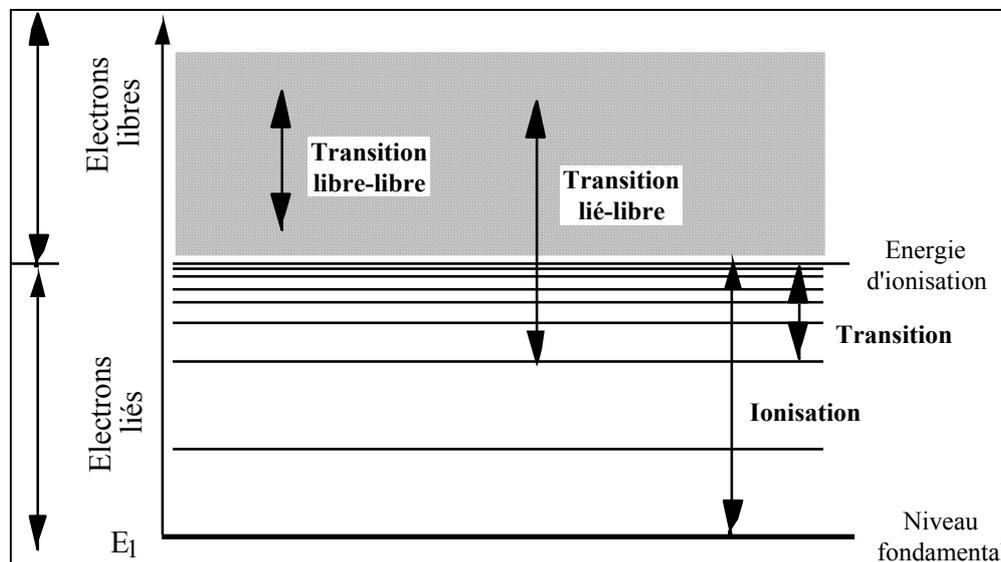


Fig.2.13 : Différentes possibilités de transition d'un électron entre les niveaux atomiques

De façon générale, le rayonnement dépend non seulement de la structure de l'atome qui rayonne, mais aussi des propriétés du plasma dans le voisinage de l'atome [74].

II-3-3 CONDITIONS D'UNE PRODUCTION EFFICACE DU RAYONNEMENT DANS LA DECHARGE

Pour qu'une décharge puisse produire du rayonnement efficacement, le milieu et le mode d'injection de la puissance doivent favoriser les processus conduisant à la production du rayonnement, tout en minimisant l'effet des autres processus. Par ailleurs, ce rayonnement doit présenter une bonne efficacité vis à vis du processus concerné (action chimique, action germicide, vision, etc..), ce qui dépendra essentiellement du choix des corps gazeux utilisés.

II-3-3-1 Séparation des fonctions gaz de travail et gaz d'emprisonnement

Pour la production efficace du rayonnement, un des principaux problèmes à résoudre consiste donc, tout en limitant l'emprisonnement des photons, à piéger à la fois les particules chargées et les neutres excités qui ont tendance, à diffuser vers les

zones les plus froides où les densités sont les plus faibles. L'utilisation d'un seul composant comme gaz de remplissage n'assure généralement pas cette double nécessité. Une solution très largement employée consiste à dissocier la fonction d'emprisonnement que remplira un gaz d'emprisonnement. Appelé aussi gaz tampon, de celle de production de rayonnement et de support d'ionisation que remplira un gaz de travail, appelé aussi gaz actif. On utilisera donc, dans beaucoup de cas, un mélange gazeux à deux corps réalisant chacun une fonction bien précise. A ces deux composés, on peut (et on doit souvent) en ajouter un troisième permettant de réaliser l'amorçage.

Le gaz de travail devra produire le rayonnement utile et assurer la source d'ionisation sous la densité optimale du point de vue bilan émission/ emprisonnement.

La densité du gaz d'emprisonnement devra être telle que les particules actives soient efficacement piégées. Pour diminuer le rayonnement et l'ionisation du gaz tampon, on doit utiliser un gaz ayant des niveaux d'excitations élevées par rapport à ceux du gaz émetteur présent en grandes quantités dans le tube. Etant donné que sa pression sera également très supérieure à celle du gaz émetteur, le gaz tampon participera activement à la thermalisation de la décharge par l'intermédiaire des collisions élastiques.

Les exigences précisées plus se traduit en terme de pression et de niveau d'énergie pour les différents gaz, par les relations suivantes :

- pression du gaz de travail < pression du gaz d'emprisonnement ;
- énergie d'excitation du gaz de travail < énergie d'excitation du gaz d'emprisonnement.

Examinons les combinaisons possibles des corps susceptibles de répondre simultanément aux conditions présentées. Compte tenu de leurs propriétés émissives, les vapeurs métalliques ou les terres rares sont intéressantes comme gaz de travail. Encore faut il que l'on puisse le vaporiser dans les conditions compatibles avec la durée de vie des enceintes (dont la température est autours de 1000 à 1400 K).

On peut alors, selon le cas, utiliser soit le métal lui même soit un composé halogène, en général un iodure.

II-3-3-2 Gaz d'emprisonnement

Relativement peu de corps peuvent jouer le rôle de gaz tampon soit pour des raisons pratiques (difficilement vaporisables, chimiquement agressifs) soit par leur nature même (potentiel d'ionisation trop faible). Ce dernier critère ne jouant

évidemment pas pour une décharge à un seul composant. On constate que les gaz rares sont de bons candidats.

II-3-3-3 Gaz de travail et émission

Les faibles potentielles d'ionisation et d'excitation des alcalins, ceux des éléments correspondants au peuplement des niveaux 3d et 4d, ceux des terres rares font de ces différents corps des candidats potentiels au rôle de gaz de travail. Malheureusement les probabilités de vaporisation interdisent l'emploi d'un grand nombre d'entre eux. Il faut ensuite que leur spectre soit utilisable pour l'une ou l'autre des applications possibles, industrielle ou éclairagiste.

En définitive est utilisé le mercure du fait de la très faible durée de vie et de la valeur du potentiel d'excitation de son premier niveau de résonance (correspond à la raie 253.7 nm) [23].

II-4 PLASMA ET EQUILIBRE THERMODYNAMIQUE

II-4-1 EQUILIBRE THERMODYNAMIQUE COMPLET

Il existe une situation où les fonctions de distributions sont indépendantes du temps et de l'espace (elles sont donc homogène, isotrope et stationnaire). Elles ne dépendent que de la température, unique, du milieu. On dit qu'un tel système est en équilibre thermodynamique complet (E.T.C). A tout instant, il y a micro réversibilité de tous les processus élémentaires dus aux collisions et au rayonnement. Cela signifie que chaque processus est exactement contrebalancé par le processus inverse.

L'E.T.C implique donc l'absence de gradient de température et une réabsorption totale du rayonnement. Toutes les propriétés du plasma y compris le rayonnement sont décrites à l'aide d'une température unique par des lois bien précises ($T=T_{\text{par}}=T_{\text{ion}}=T_{\text{exc}}=T_{\text{dis}}=T_{\text{rad}}$ avec T_{par} : la température de la paroi de l'enceinte et T_{dis} : température de dissociation et $\overline{\nabla T} = 0$).

II-4-2 EQUILIBRE THERMODYNAMIQUE LOCAL

La situation d'E.T.C. est, en pratique, irréalisable dans une décharge, du fait du gradient de température entre la décharge et le milieu ambiant. La température unique locale T du sous système est : $T=T_{\text{par}}=T_{\text{ion}}=T_{\text{exc}}=T_{\text{dis}}$. Ceci se produit quand les processus collisionnels sont prépondérants par rapport aux processus radiatifs.

Toutefois, les mécanismes radiatifs ne sont plus micro-réversibles ($T \neq T_{\text{rad}}$ et $\vec{\nabla}T \neq 0$). On parle alors de plasma en équilibre thermodynamique local (E.T.L.).

II-4-3 DECHARGE HORS D'EQUILIBRE

Lorsque les densités sont faibles (pression faible, quelque 10^2 pa – courant faible, quelques 10^{-1} A), les électrons subissent peu de collisions et restent beaucoup plus énergétiques que les neutres (température électronique $T_e \approx 10^4 \text{ à } 10^5 \text{ K}$, température du gaz : $T_g \approx \text{quelques } 10^2 \text{ K}$). La décharge est dite hors d'équilibre. Il s'agit généralement de décharges dites basse pression [40].

Dans le cas des systèmes hors d'équilibre aucune des lois de l'E.T.C. ne reste valable, les « températures » sont toutes différentes (exception faite, dans la limite des champs électriques faibles, de la température ionique qui est presque égale à la température atomique) [12].

II-5 DECHARGE DANS UN MELANGE MERCURE-ARGON A BASSE PRESSION

II-5-1 CONSTITUTION

Un tube généralement cylindrique, préalablement vidé et dégagé, est rempli de gaz rare, par exemple de l'argon, à une pression de l'ordre de 10^2 pa (de 1 à quelques torr) et une faible quantité de mercure (quelques dizaines de milligrammes) initialement sous forme d'une petite gouttelette sur la paroi du tube. Dans ce type de décharge, le rôle de gaz de travail est rempli par le mercure. Le gaz rare est présent pour : réduire le libre parcours moyen des électrons et pour augmenter leur chances de collisions avec les atomes de mercure, faciliter l'amorçage de la décharge par abaissement de la tension d'amorçage. Protéger la matière émissive des cathodes (pour les lampes à cathodes chaudes) en diminuant la vitesse des ions positifs qui la bombardent et en réduisant son taux d'évaporation. Il remplit donc le rôle de gaz tampon.

Le mercure se condense dans le point le plus froid de la paroi. En général, sauf construction spéciale des électrodes, ce point se situe sur le tube, dans la zone centrale de la colonne positive. La température aux extrémités du tube est généralement plus élevée à cause de la concentration dans un faible volume d'une puissance assez

grande qui correspond aux pertes aux électrodes. La zone froide où le mercure est condensé est caractérisé par la température du point froid, T_{PF} . Il s'agit de la température de fonctionnement de la lampe, un paramètre très important dont dépend fortement la production du rayonnement. Comme le mercure est toujours introduit en excès dans le tube à décharge, même pendant le fonctionnement il y a un peu de mercure liquide au point le plus froid du tube. La pression de vapeur dépendra alors de la température du point froid qui, pour la pression optimale, est d'environ 40°C. Après l'amorçage de la lampe, le mercure présent sur la paroi se vaporisera et sa pression atteindra la valeur correspondant à la température de l'interface liquide/vapeur (voir annexe A).

La figure (2.14) décrit cette dépendance pour les températures comprises entre -20 et 100°C.

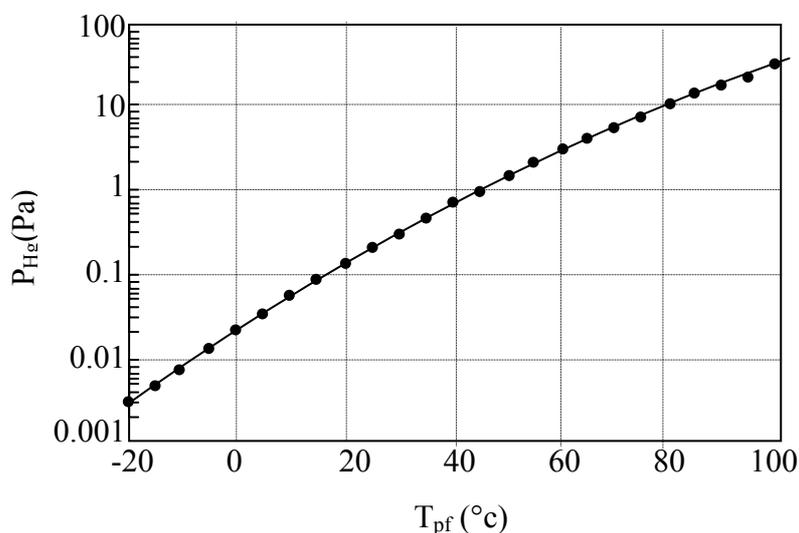


Fig.2.14 : Pression de vapeur saturante du mercure en fonction de la température du point froid.

En régime établi, pour obtenir un rendement maximal de la raie de résonance, donc un rendement énergétique élevé la pression de vapeur saturante de mercure doit être proche d'une valeur optimale d'environ 1pa ($\approx 7.10^{-3}$ mmHg) pour cette lampe.

Lorsque la paroi est froide, par exemple avant l'application du champ électrique par le générateur externe, seulement une faible quantité de mercure est vaporisée (pression de vapeur saturante correspondant à la température ambiante). On trouve alors dans le gaz quelques 10^{-1} pa de mercure. On établit une décharge électrique en faisant circuler un faible courant (de l'ordre de quelques 10^2 mA) entre les électrodes qui se trouvent aux extrémités du tube. Dans ces conditions, juste après la mise en

route, la colonne positive est composée d'un mélange contenant peu de mercure. Ce mélange va s'enrichir au fur et à mesure que la lampe s'échauffe [23].

II-5-2 LE MELANGE GAZEUX IONISE

Dans le mélange d'atomes neutres d'Argon, d'atomes neutres de mercure, d'ions et d'électrons, les particules lourdes ont une température légèrement supérieure à celle de l'environnement (40°C à 60°C par exemple). Par contre les électrons, de par leur faible masse, gagnent plus d'énergie dans le champ électrique. Ce qui se traduit par une température électronique de l'ordre de 8000 à 2000K. C'est donc un plasma à deux températures où les lois de la thermodynamique ne sont pas valables. Malgré la valeur élevée de l'énergie moyenne des électrons, relativement très peu d'électrons de la distribution possèdent une énergie suffisante pour provoquer une ionisation ou même une excitation de l'argon. On peut considérer que la majorité des collisions entre les électrons et l'Argon sont des collisions élastiques et qu'elles contribuent à l'augmentation de la température du gaz en même temps qu'elles contrôlent les phénomènes de transport de la matière.

Les collisions les plus énergétiques conduiront de façon presque exclusive soit à l'ionisation soit à l'excitation des atomes de mercure beaucoup plus facilement excitables que ceux de l'argon. Ces atomes de mercure excités pourront alors se désexciter en émettant un photon à une fréquence correspondant à l'énergie de transition. La figure (2.15) donne les longueurs d'onde de quelques raies qui caractérisent le mercure [74].

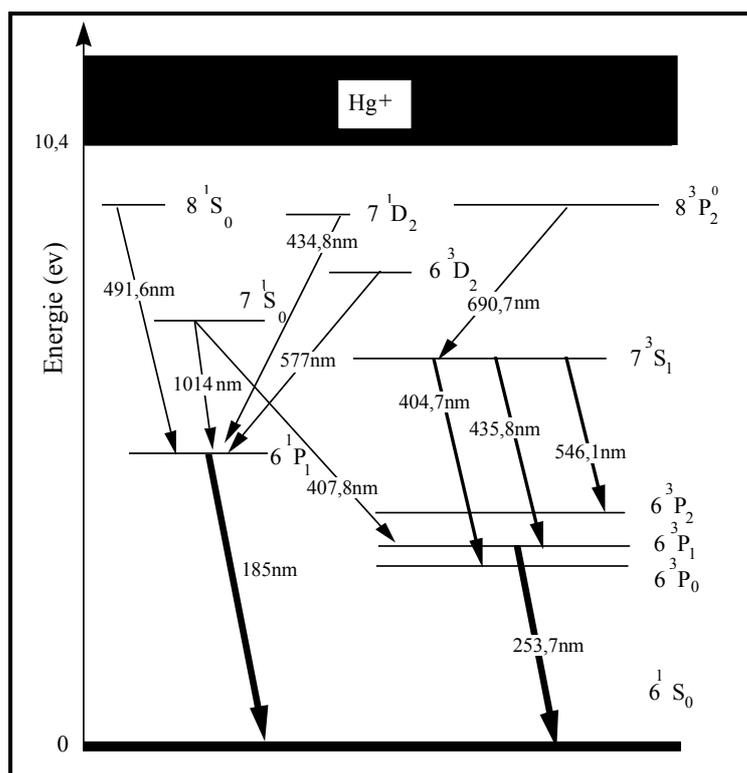


Fig.2.15 : Diagramme des niveaux d'énergie du mercure (λ (nm)).

II-5-3 LE RAYONNEMENT DE LA COLONNE POSITIVE

On remarque sur la figure (2.15) la présence de deux raies 253.7 nm et 185 nm fortement couplés au niveau fondamental, elles sont appelées raies de résonance. Leur niveau de départ, en particulier celui de la raie 253.7 nm, sont facilement excitables. La raie 253.7 nm sera la plus intense de la décharge. Elle a pour niveau émettant le niveau Hg ($6^3 P_1$). Cependant, un photon émis quelque part au centre de la décharge pourra sur son parcours vers les parois du tube, entrer en collision avec des atomes de mercure dans l'état fondamental et donc être réabsorbé plusieurs fois avant de sortir de la décharge.

Le mécanisme correspond au phénomène d'emprisonnement du rayonnement. La raie 253.7 nm présente une faible probabilité de transition et, de ce fait, elle est fortement piégée.

Au total, le spectre d'une décharge dans le mercure à basse pression est surtout composé de raies dans le domaine de l'ultraviolet. Ce type de décharge présente une très bonne efficacité de conversion de l'énergie électrique en rayonnement ultraviolet. Les pertes par rayonnement dominent les deux autres pertes d'énergie importantes dans le plasma : les pertes par ionisation et les pertes par collision.

L'efficacité de la conversion est en particulier liée à la température très supérieure du nuage électronique par rapport à celle du gaz. Cette valeur élevée de la température électronique permet d'obtenir une excitation sélective des états 6^3P du mercure.

La production du rayonnement dépend fortement de la température du point froid de la lampe. Ainsi, en augmentant cette température, on augmente la densité du mercure et donc celle du niveau rayonnant. La production de la raie 253.7 nm croît alors, mais au delà d'une pression optimale, l'absorption et donc l'emprisonnement augmente et la partie du rayonnement qui s'échappe de la décharge diminue.

Comme nous l'avons vu, la pression de vapeur de mercure à laquelle le rendement ultraviolet est le plus élevé, se situe vers 7.10^{-3} torr, ce qui correspond à une température du point froid de 40°C et à une température du gaz de l'ordre de 330 K, tandis que la température électronique atteint 11000 K. On conçoit donc qu'il est nécessaire d'utiliser un tube long dont la température reste basse pour ne pas élever la pression du mercure.

La puissance rayonnée ne dépend pas que de la pression de vapeur saturante de mercure, directement liée à la température du point froid, mais aussi de plusieurs autres paramètres. Les principaux sont : le diamètre de la lampe, la pression du gaz rare, le courant dans la décharge.

Lorsque le diamètre augmente, on peut s'attendre à une augmentation de l'émission car le volume émissif augmente mais ceci n'est vrai que dans le domaine des faibles diamètres. Au delà d'un certain diamètre, une diminution de la température électronique apparaît, entraînant ainsi une diminution de la population du niveau d'énergie rayonnant. Parallèlement, le temps effectif d'emprisonnement qui chiffre donc la proportion de rayonnement piégé dans le plasma, augmente avec le diamètre. Dans ce cas la production de rayonnement utile diminue. Le système restant hors d'équilibre, les tendances d'évolution sont les suivantes : pour les forts courants les processus collisionnels sont majoritaires, le système se rapproche de l'équilibre thermodynamique local et l'efficacité de production du rayonnement diminue. Par contre pour les faibles valeurs du courant, les processus radiatifs sont importants et le système s'éloigne de l'équilibre thermodynamique ; la production du rayonnement croît. En effet la densité de courant optimale est relativement basse.

La décharge dans la vapeur de mercure à basse pression sert de sources d'excitation aux lampes fluorescentes et est utilisée directement dans les lampes germicides. Si le tube à décharge des lampes fluorescentes est en verre tendre, on

utilise pour les lampes germicides du verre dur transmettant l'ultraviolet ou du quartz. Ainsi, la très forte émission ultraviolette (45 à 60% de la puissance électrique) peut être directement utiliser pour son action germicide (raie 253.7 nm).

Le spectre de rayonnement émis à haute pression est différent du spectre à basse pression, l'intensité du rayonnement 253.7 nm diminue au profit des raies visibles et proche ultraviolet du spectre. En effet, lorsque la pression augmente, la raie 253.7 nm ne sort que très difficilement de la décharge.

II-5-4 EXEMPLES DE BILAN ENERGITIQUE D'UNE LAMPE A DECHAGE

De la puissance électrique P (W) absorbée par une lampe, seule une partie est transformée en flux énergétique F_T (W) rayonnée par la colonne positive. Le reste se retrouve sous forme de pertes thermiques (P_{Th}).

La figure (2.16) donne à titre d'exemple le bilan énergétique d'une lampe fluorescente de 40W. Ces pertes sont dues à la chute de tension aux électrodes et à l'échauffement du gaz par les électrons lors des chocs élastiques mais aussi, dans le cas de lampes fluorescentes, au bilan de conversion ultra-violet-visible.

Par ailleurs, la totalité de l'énergie rayonnée ne l'est malheureusement pas dans le domaine utile pour l'œil ou pour l'application envisagée. Seulement une partie est émise dans le domaine souhaité. Dans le cas des applications éclairagistes, c'est le flux énergétique visible, le reste (rayonnements ultra-violet et infrarouge) ne pouvant pas être directement utilisé. Par contre, il faut noter que pour d'autres applications, ce sont au contraire les flux ultra-violets ou infrarouge qu'il faudra privilégier [96].

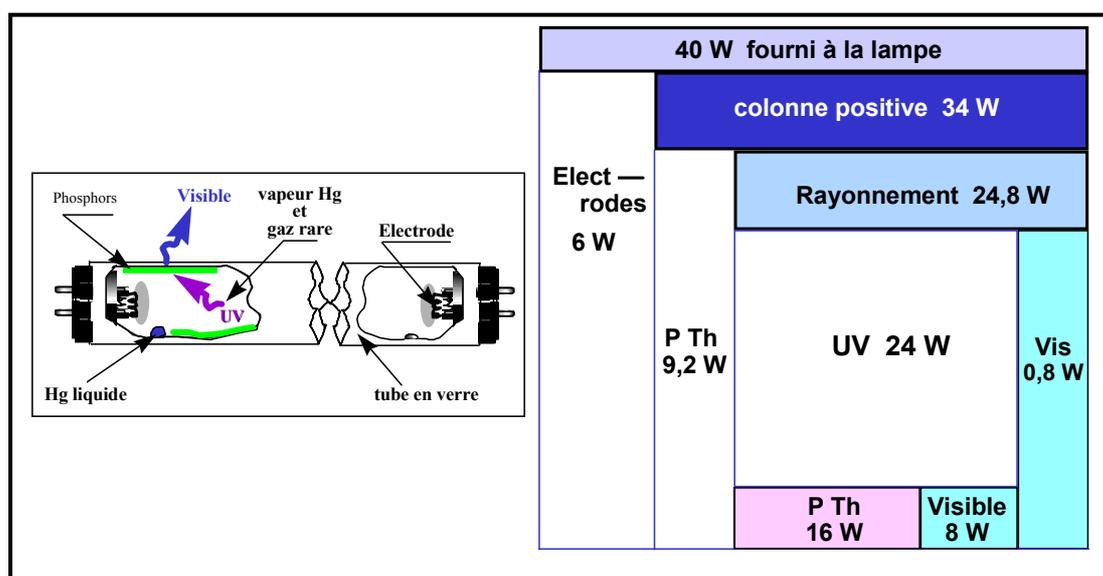


Fig.2.16 : Bilan énergétique d'une lampe U.V mercure basse pression.

II-6 MODELISATION DE LA DECHARGE

Le but de la modélisation (complètement indispensable à l'étude expérimentale) des lampes à décharge basse pression remplies de mélange gaz rare-vapeur métallique, est de prédire les conditions optimales de fonctionnement de ces lampes. Ces dernières dépendent de plusieurs paramètres tel que le diamètre de la lampe, le courant de décharge, la pression partielle de la vapeur métallique, et également la composition et la pression partielle du ou des gaz rares porteurs.

On peut considérer la structure atomique des éléments à l'intérieur de la décharge :

- Pour la structure énergétique du mercure, seuls les niveaux 6^1S_0 , $6^3P_{0,1,2}$, 6^1P_1 , 7^3S_1 et Hg^+ interviennent. Ils sont représentés sur la figure (2.17) avec les notations simplifiées utilisées. Lors des collisions entre les niveaux, on a négligé à la fois la formation de l'ion moléculaire Hg_2^+ et les recombinaisons volumiques.

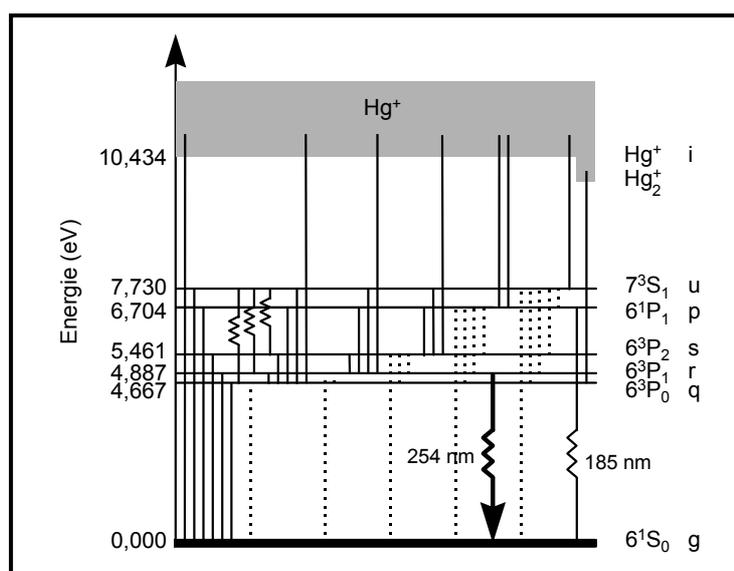


Fig. 2.17: Structure énergétique simplifiée du mercure (traits continus : excitation et ionisation ; traits pointillés : désexcitations ; courbes : désexcitation radiatives) [74].

Energie	Niveau	Indices
0.000 eV	Hg(6^1S_0)	g
4.667 eV	Hg(6^3P_0)	q
4.887 eV	Hg(6^3P_1)	r
5.461 eV	Hg(6^3P_2)	s
6.704 eV	Hg(6^1P_1)	p
7.730 eV	Hg(7^3S_1)	u
10.434 eV	Hg ⁺	i

Tableau 2.1 : Désignation et énergie des différents niveaux atomiques considérés du mercure.

- Pour la structure énergétique de l'argon et contrairement aux autres modèles, l'argon existe de façon non négligeable sous forme excitée et ionisée

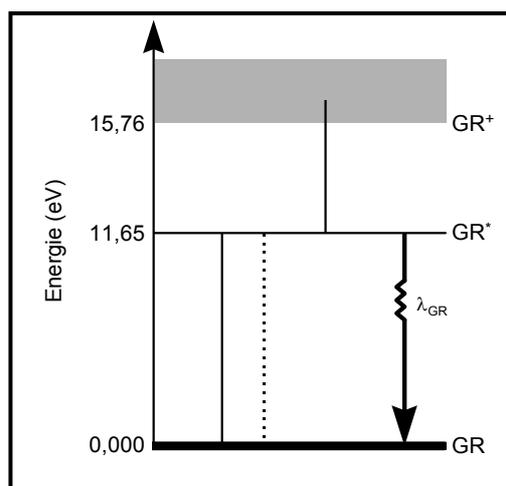


Fig. 2.18 : Structure énergétique simplifiée du gaz rare (traits continue : excitations et ionisations ; traits pointillés : désexcitation ; courbes : désexcitation radiatives).

La figure (2.18) donne la structure simplifiée d'argon considérée dans ce modèle. Le niveau fictif Ar* représente le regroupement des deux premiers niveaux radiatifs et des deux niveaux métastables (l'énergie du niveau fictif est la moyenne pondérée par leur multiplicité des énergies des quatre niveaux qu'il représente). Il émet une raie de résonance (104,8 nm) considérée comme partiellement emprisonnée. L'ionisation directe à partir du niveau fondamental qui nécessite une énergie de 15,76

eV, est considérée comme pratiquement impossible. De plus, l'argon, dans les différents états ionisé et excité, n'interagit pas avec le mercure.

II-6-1 PROPRIETES DE LA RAIE 253.7 nm

II-6-1-1 Evolution du flux a 253.7 nm en fonction de la température du point froid

Les résultats obtenus par *Zissis* [87] pour les calculs effectués dans les mélanges **Ar-Hg** basse pression, avec des conditions de la décharge correspondant au cas d'une lampe classique caractérisée par :

- ❖ rayon du tube = **18 mm** ;
- ❖ courant électrique = **400 mA** ;
- ❖ pression d'Argon **3 Torr** à la température **0°C** ;
- ❖ pression partielle de la vapeur métallique du mercure variant entre **1.26×10^{-3} Torr** à **90.62×10^{-3} Torr**, ce qui correspond à des valeurs de température du point froid variant de **20°C à 80°C** ;

Sont les suivants :

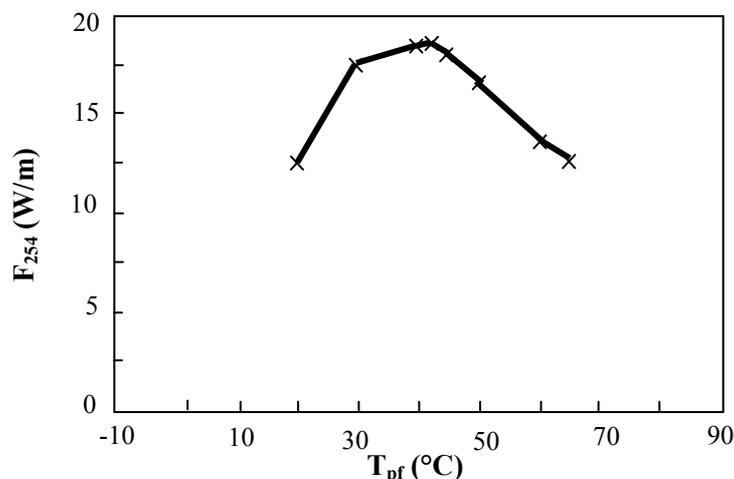


Fig.2.19 : Evolution du flux à 254 nm en fonction de la température du point froid

On remarque que le maximum d'émission se situe entre 35 °C et 45 °C (42 °C).

II-6-1-2 Influence du courant électrique sur l'émission de la raie 253.7 nm du Hg

La densité électronique 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 conduisent à l'état rayonnant. La population du niveau augmente et donc la production du rayonnement croît.

Les résultats obtenus par *Saroukh* [74] sont les suivants :

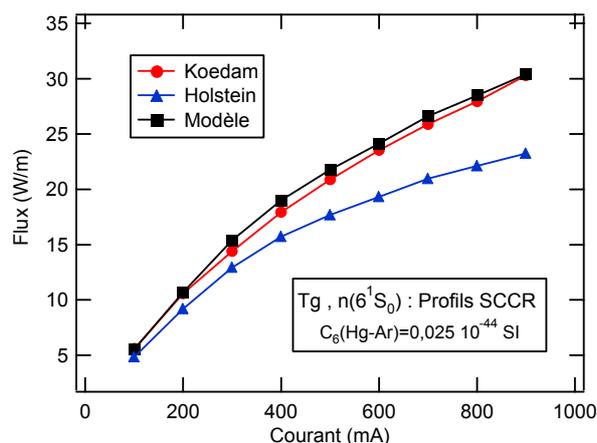


Fig.2.20 : Flux de la raie 253.7 nm de mercure en fonction du courant

Costache [23] 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 650 mA. En effet, pour une température d'eau de 20°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 ($42 < T_{PF} < 53$).

Chapitre III

Alimentation de la lampe à décharge (Ballast électronique)

III-1 ALIMENTATION DE LA LAMPE À DÉCHARGE

Dans le mode de fonctionnement normal (régime d'arc), la lampe à décharge montre une résistance différentielle négative. Donc le moyen de limiter le courant de lampe est essentiel. Les décharges électriques ne sont pas autostabilisatrices, car l'ionisation du milieu gazeux, et par suite l'intensité du courant admise tend à croître sans limite. L'explication est que la probabilité des chocs ionisants augmente avec le nombre d'électrons en circulation. Une lampe à décharge soumise directement à une tension suffisante pour l'amorçage, est mise hors d'usage instantanément par l'avalanche électronique déclenchée. La présence nécessaire d'un ballast pour limiter le courant est une caractéristique générale. L'ensemble lampe ballast est indissociable et la qualité du ballast intervient dans celle de la lampe.

Afin de limiter le courant de lampe, il est dans les habitudes courantes d'employer une bobine fonctionnant sous les hautes fréquences, offrant une solution économique et simple.

La qualité des caractéristiques radiatives est liée à la nature du mélange gazeux mais dépend également beaucoup de la géométrie de la décharge et des caractéristiques électriques de l'alimentation telles que la fréquence et la forme du signal.

Les conditions à réaliser sont essentiellement les suivantes :

- ❖ Assurer un fonctionnement à courant moyen nul.
- ❖ Assurer un temps de commutation rapide.
- ❖ Pouvoir imposer à la décharge des réamorçages rapides à courants sensiblement constant.
- ❖ Pouvoir fonctionner comme une source de courant à rapport cyclique et fréquence variable [65].

Ces dernières années, les ballasts électroniques à haute fréquence pour les lampes à décharge ont été présentés comme un produit de remplacement pour le ballast magnétique en raison de leurs qualités supérieures telles que le rendement élevé du système (amélioration du facteur de puissance), le poids léger, l'intensité lumineuse produite par watt, la longue durée de vie, la fonction de régulation d'éclairage (dimmable), le non clignotement, la non présence de bruit audible et en plus des aspects techniques et exigences, une particulière attention doit être donnée aux coûts d'un ballast électronique (voir annexe B).

III-2 PRINCIPE

Une réalisation possible de cette source est montrée dans la figure (3.1) :

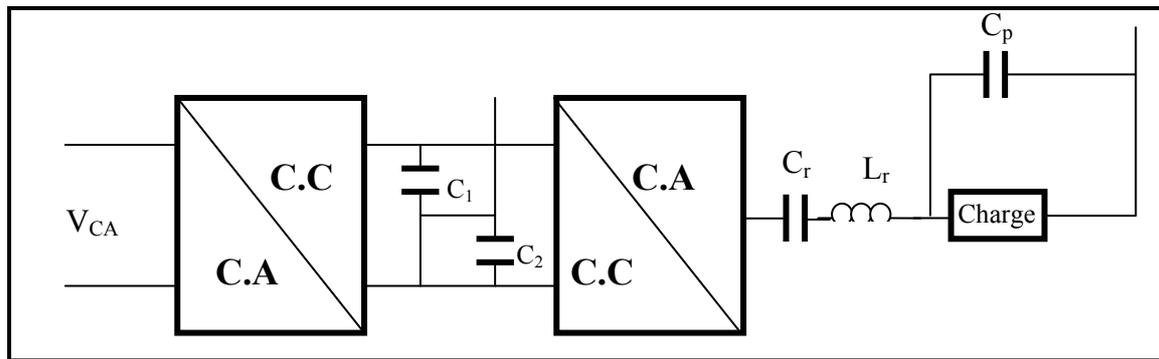


Fig.3.1 : Diagramme block d'un ballast électronique constitué d'un onduleur en demi-pont.

Cette source est constituée :

- D'un redresseur monophasé.
- D'un circuit de lien (maille à courant continu).
- D'un onduleur à transistors (pont complet ou demi pont) produisant 25 KHz à 100KHz à la sortie.
- Un circuit résonnant formé de L_r et C_r pour réaliser l'allumage de la lampe.
- Un filtre est normalement ajouté entre les bornes principales et le redresseur pour accomplir les régulations (E.M.C electromagnetic compatibility).
- Pour éviter d'endommager les filaments un circuit de préchauffage additionnel est exigé [44].

III-2-1 INTERET DE LA HAUTE FREQUENCE POUR LA LAMPE À DECHARGE

Costache a fait une étude comparative entre le fonctionnement de l'ensemble convertisseur - lampe à 50Hz et 60.1KHz. La décharge 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 :

Fréquences (HZ)	I lampe (A)	V lampe (V)	P lampe (W)	ΔV Electrodes (V)	Pertes électrodes (W)	$P_{U,V}$ (W)	$\eta_{U,V}$ (%)
50	0.656	112.8	67.2	15	9.84	38.8	57.7
60100	0.656	113	73.2	10	6.56	45.4	61.5

Tableau 3.1 : Valeurs efficaces des courants et tensions ainsi que les différentes puissances de la lampe obtenues à partir de la simulation pour deux fréquences d'excitation 50Hz et 60.1 KHz

La figure (3.2) donne l'allure des tensions et des courants de lampe à 50Hz et 60.1 KHz. 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 présent à 50Hz à chaque demi période, disparaît à la fréquence étudiée de 60.1 KHz.

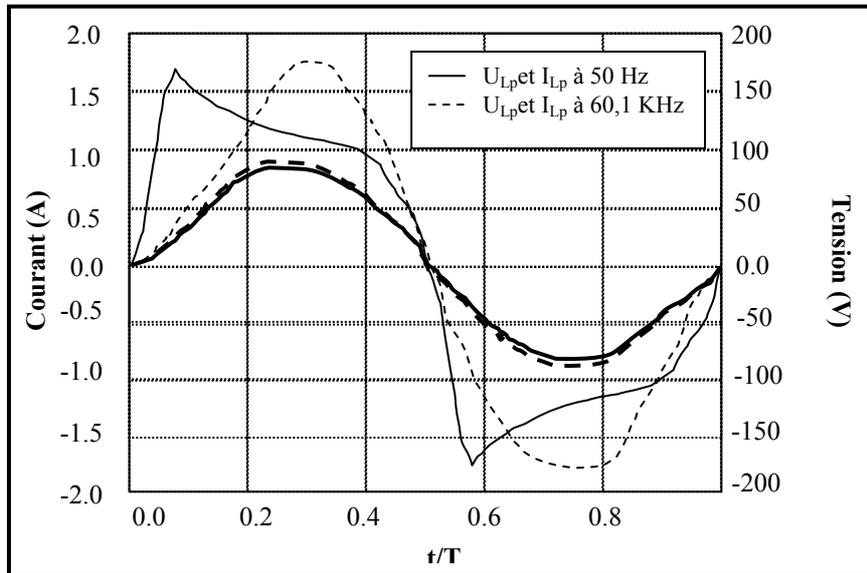


Fig.3.2 : Forme d'ondes des courants et des tensions aux bornes de la lampe U.V Ar 3 torr alimentée à 50 HZ et 60.1 KHz.

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 50 Hz à 60.1 KHz, les modulations des différentes grandeurs 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'U.V sont respectivement égales à 45.4 W à 60.1 KHz et 38.8 W à 50 Hz. Les rendements correspondantes 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 [23].

Conclusion

Donc, en haute fréquence on a un maximum de rayonnement U.V.

La figure suivante présente le schéma bloc du circuit d'alimentation avec la commande M.L.I qui rend l'onduleur comme un générateur à haute fréquence [35] :

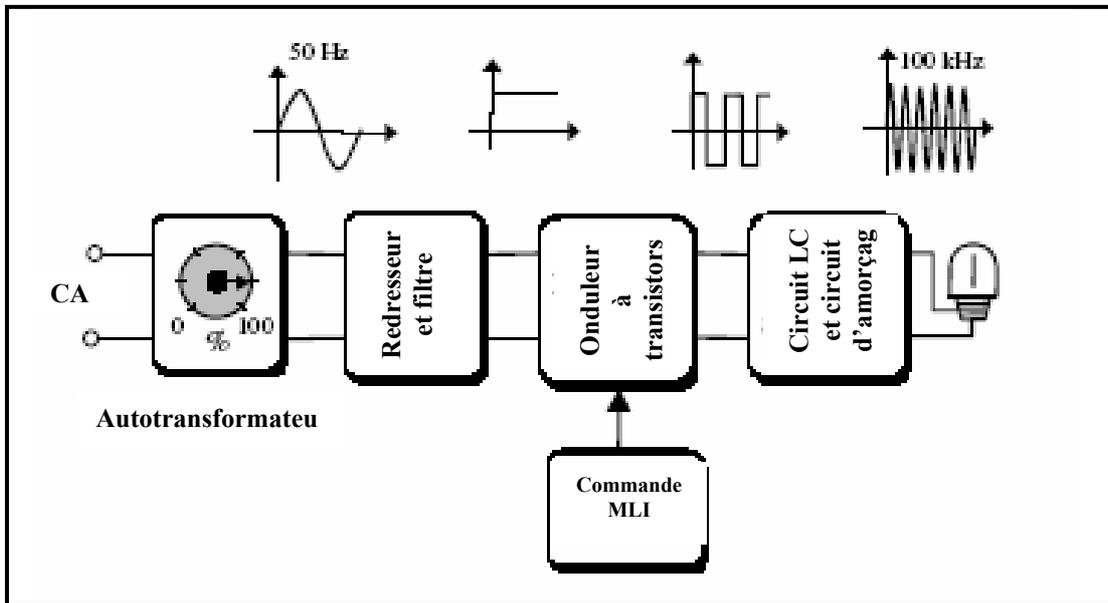


Fig.3.3 : Schéma bloc de l'alimentation.

III-3 ONDULEUR AUTONOME :

Un onduleur est un convertisseur statique permettant de transformer une énergie de source continue en une énergie à tension et fréquence variable, il modifie de façon périodique les connections entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie. Il est schématisé par la figure (3.4).

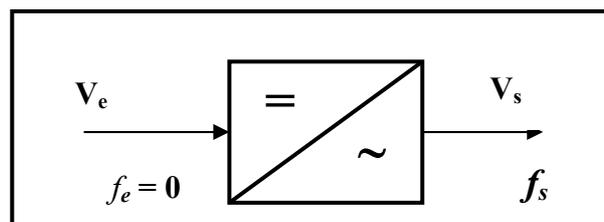


Fig.3.4 : Schéma représentatif d'un onduleur

Il existe deux grandes catégories d'onduleurs :

- **Onduleurs autonomes** qui génèrent leur propre fréquence et leur propre tension alternative fournie au récepteur.
- **Onduleurs non autonomes (assisté)** dont la fréquence et la forme d'onde de la tension sont imposées par le réseau qu'il alimente.

III-3-1 ONDULEUR MONOPHASE EN DEMI-PONT

L'onduleur monophasé en demi-pont utilise deux interrupteurs bidirectionnels en courant, et une source de tension à point milieu.

On obtient d'ordinaire ce point milieu à l'aide de deux condensateurs de même capacité C , si celle-ci est suffisante, on obtient deux tensions sensiblement constantes et égales à $E/2$ figure

(3.5). Il permet d'obtenir à sa sortie soit $v = \frac{E}{2}$, soit $v = -\frac{E}{2}$ selon que K_1 ou K_2 fermé [55].

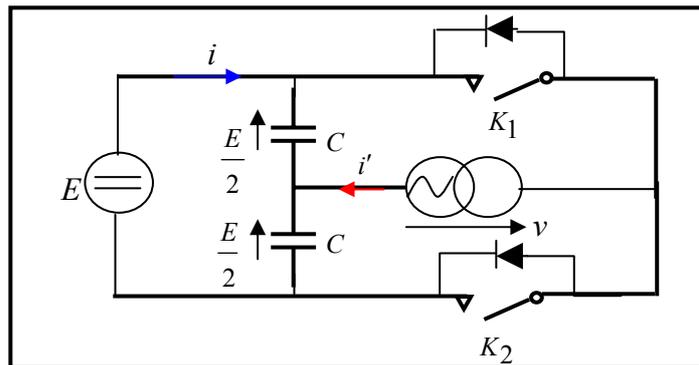


Fig.3.5 : Onduleur monophasé en demi-

III-3-2 ONDULEUR MONOPHASE EN PONT

Pour que la source de tension ne soit jamais en court-circuit et la source de courant jamais en circuit ouvert, la seule condition indispensable est que les commandes de K_1 et K_1' soient complémentaires, ainsi que celles de K_2 et K_2' . Il est donc possible de décaler l'une par rapport à l'autre la commande des deux demi-ponts pour faire varier la valeur de la tension v [55].

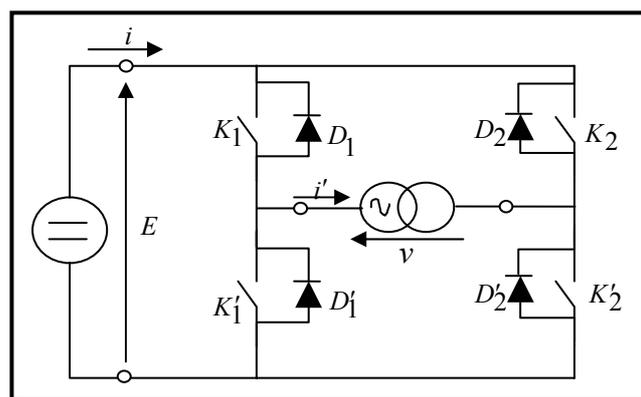


Fig.3.6 : Onduleur monophasé en pont.

On utilise deux stratégies de commandes :

- ❖ Commande *adjacente* (pleine-onde, à un créneau par alternance, commande de 180°) ;
- ❖ Commande à *M.L.I* (modulation de largeur d'impulsion) [82].

III-3-3 ONDULEURS DE TENSION MONOPHASES A MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION

Les harmoniques sont la superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental, actuellement les équipements de l'électronique de puissance constituent la principale source de perturbations harmoniques susceptibles de générer la pollution harmonique dans les réseaux d'alimentations électriques. Ce sont des appareils dont les caractéristiques varient avec la valeur de la tension à circuit non linéaire : appareils d'éclairage fluorescent, variateurs électronique de vitesse, fours à arcs, redresseurs.

Le filtrage de la tension ou du courant de sortie d'un onduleur ne délivrant qu'un créneau de tension ou de courant par alternance est difficile et onéreux car le premier harmonique à éliminer (harmonique 3 ou harmonique 5) a une fréquence trop voisine de celle du fondamental.

Ainsi on utilise de plus en plus la modulation de largeur d'impulsion (M.L.I) ou pulse width modulation (P.W.M) en anglais. On forme chaque alternance de la tension ou du courant de sortie de plusieurs créneaux rectangulaires de longueurs convenables.

La multiplication du nombre des impulsions formant chaque alternance présente deux avantages :

- elle repousse vers des fréquences plus élevées les harmoniques de la tension ou du courant de sortie, ce qui facilite le filtrage ;
- elle permet de faire varier la valeur du fondamental de la tension ou du courant de sortie avec les montages à deux interrupteurs (valeur efficace $\frac{rE}{2\sqrt{2}}$).

Les schémas des onduleurs de tension ou du courant restent les mêmes, c'est la commande des interrupteurs qui est modifiée : la fréquence des commutations est supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie. L'essor de la M.L.I est lié au progrès sur les semi conducteurs, en réduisant les pertes à chacune des commutations, on peut augmenter la fréquence de celle ci.

III-3-4 COMMANDE M.L.I

III-3-4-1 Principe de la commande M.L.I

La modulation de largeur d'impulsion (M.L.I en français et PWM en anglais) consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et à former chaque alternance d'une section de créneaux de largeurs convenables.

Le plus souvent on détermine en temps réel les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs à l'aide d'une électronique de commande analogique ou numérique. Pour assurer cette détermination, lorsque l'objectif est d'approcher mieux une tension sinusoïdale, on utilise les techniques suivantes :

- ❖ La modulation triangulo-sinusoïdale pour la commande analogique, qui consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante, généralement sinusoïdale, avec une onde de modulation ou porteuse, généralement triangulaire.
- ❖ En utilisant un système à microprocesseur pour la commande numérique on met en œuvre la loi de la variation de la tension à obtenir [78].

III-3-4-2 Principe de la modulation triangulo-sinusoïdale

On cherche à approximer une tension de sortie sinusoïdale en faisant varier sinusoïdalement sa « valeur moyenne ». Les instants de fermeture des « interrupteurs » complémentaires K_1 et K_2 sont déterminés par les intersections d'un signal sinusoïdal de référence v_r , représentant la tension de sortie désirée de fréquence f_r , avec l'onde triangulaire de modulation ou porteuse v_p . Les intersections de v_r avec v_p croissante commandent la fermeture de $K_2 \Rightarrow v = -\frac{E}{2}$, les intersections de v_r avec v_p décroissante commandent la fermeture de $K_1 \Rightarrow v = \frac{E}{2}$.

L'onde de modulation, dont la fréquence f_p est un multiple de f_r , est une onde d'amplitude $E/2$;

- L'interrupteur K_1 reste fermé lorsque v_r est supérieure à v_p , et la tension de sortie v égale à $+E/2$;
- L'interrupteur K_2 reste fermé lorsque v_r est inférieure à v_p , et la tension de sortie v égale à $-E/2$.

Calculons la valeur moyenne de la tension de sortie v pendant une période T_p de l'onde de modulation, on suppose cette période suffisamment brève pour qu'on puisse, pendant cette durée, négliger les variations de la tension de référence v_r .

$$v_p = -\frac{E}{2} + 2E \frac{t}{T_p} ;$$

Elle coupe v_r pour $t = t_1$ tel que:

$$t_1 = \left(v_r + \frac{E}{2} \right) \frac{T_p}{2E}$$

La partie descendante de M à pour équation:

$$v_p = \frac{3E}{2} - 2E \frac{t}{T_p} ;$$

Elle coupe v_r pour $t = t_2$ tel que:

$$t_2 = \left(\frac{3E}{2} - v_r \right) \frac{T_p}{2E}$$

La partie ascendante de v_p a pour équation:

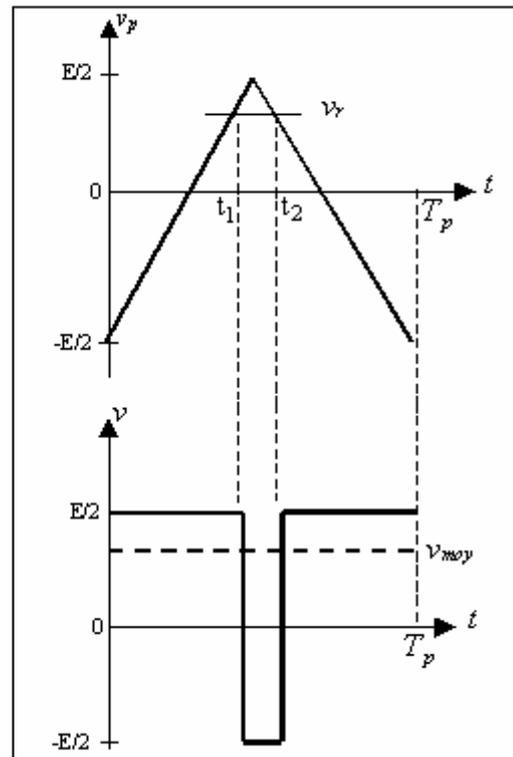


Fig.3.7 : Modulation sinus-triangle

$$v_{moy} = \frac{1}{T_p} \left[\frac{E}{2} T_p - E(t_2 - t_1) \right] \quad (3-1)$$

La tension de sortie a pour valeur moyenne au cours de cette période de v_p :

En remplaçant t_1 et t_2 par leurs valeurs, on obtient:

$$v_{moy} = v_r \quad (3-2)$$

Si la référence varie sinusoïdalement, “la valeur moyenne” de v variera suivant la même loi.

III-3-4-3 Caractéristique de la modulation:

Si la référence est sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la commande:

- **L'indice de modulation « m »**, égal au rapport $\frac{f_p}{f_r}$ des fréquences de la porteuse et de la référence, (on appel aussi rapport de fréquences);
- **Le taux de modulation « r »** (coefficient de réglage en tension), est défini par le rapport des amplitudes de la tension de référence et de la porteuse $r = \frac{V_{pm}}{V_{rm}}$, (appelé aussi rapport d'amplitudes).

Pour avoir le maximum de points d'intersections entre les deux signaux (porteuse et référence), le taux de modulation doit être inférieur à 1 ($r < 1$) (figure3. 8.a).

Lorsque r est supérieur à 1 ($r > 1$) on obtient une surmodulation, c'est-à-dire la disparition de certaines intersections entre l'onde sinusoïdale et l'onde triangulaire. (Figure3. 8.b).

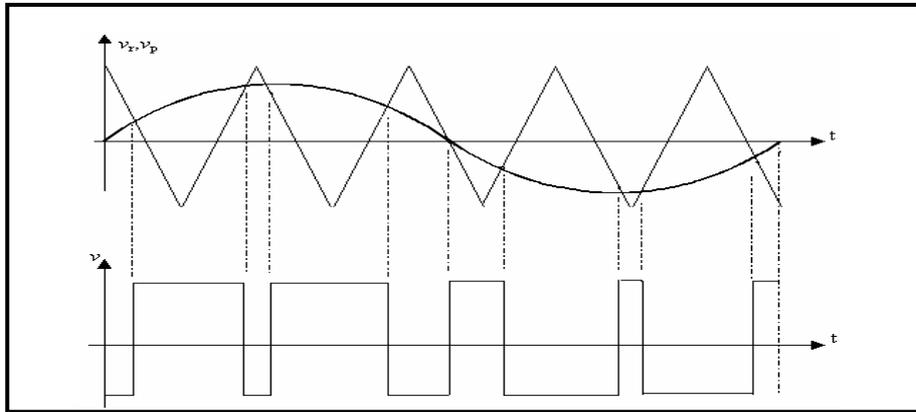


Fig.3.8.a: Sous modulation ($r < 1$).

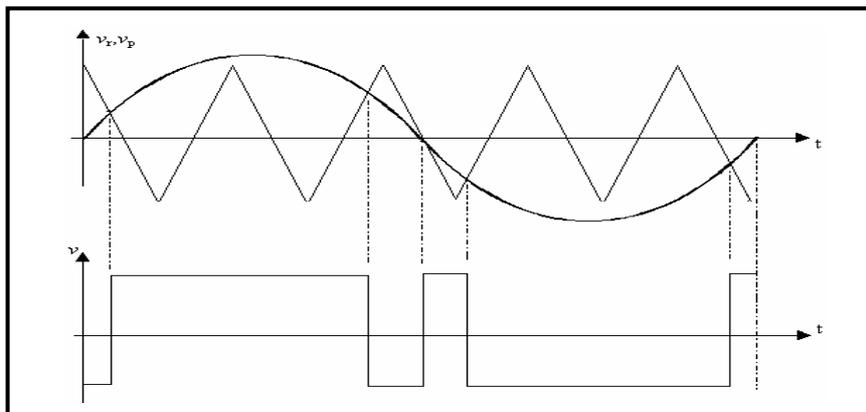


Fig.3.8.b: Surmodulation ($r > 1$).

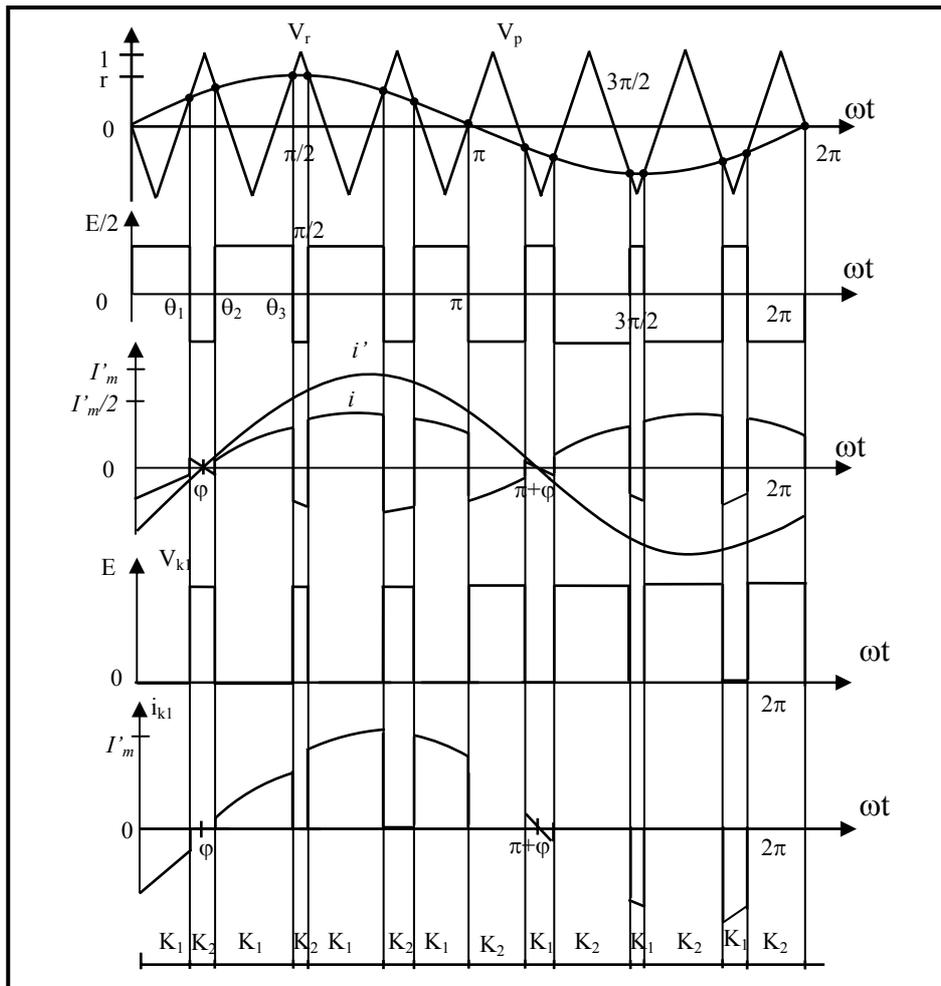


Fig.3.9 : Tracé des formes d'ondes.

III-3-5 LES COMMUTATIONS DANS LES ONDULEURS DE TENSION

Les onduleurs de tension utilisent les interrupteurs réversibles en courant, formés de semi-conducteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture associés à des diodes montées en parallèle inverse.

On utilise de préférence :

- ❖ le transistor à effet de champ ou MOSFET pour les faibles puissances ;
- ❖ le transistor bipolaire ou l'IGBT pour les courants moyens ;
- ❖ le thyristor GTO pour les forts courant.

Le thyristor classique avec circuit auxiliaire d'extinction n'est plus guère utilisée dans les équipements récents.

Les commutations des semi-conducteurs commandés peuvent être dures ou douces suivant qu'elles engendrent ou non des pertes de commutations significatives.

On peut distinguer trois types de commutation à la fermeture et à l'ouverture :

- ❖ **commutation dure** : le courant dans l'interrupteur et la tension à ses bornes varient simultanément, ce qui provoque une importante pointe de puissance instantanée dissipée dans l'interrupteur ;
- ❖ **commutation dure adoucie** : une inductance en série avec l'interrupteur à la fermeture ou un condensateur en parallèle à l'ouverture ralentit la montée du courant ou de la tension et réduit les pertes de commutation du composant semi-conducteur de tels circuits sont appelés « *snubbers* » ou circuits d'aide à la commutation (CALC) ;
- ❖ **commutation douce** : si, à la fermeture, la montée du courant se fait après l'annulation de la tension (*ZVS zéro voltage switching*) ou si, à l'ouverture, la montée de la tension se fait après l'annulation du courant (*ZCS zéro current switching*), la commutation se fait virtuellement sans pertes.

La figure (3.10) donne les formes d'onde simplifiées du courant « *i* » dans les semi-conducteurs commandés et la tension *v* à ses bornes pour les différents types de commutation [11].

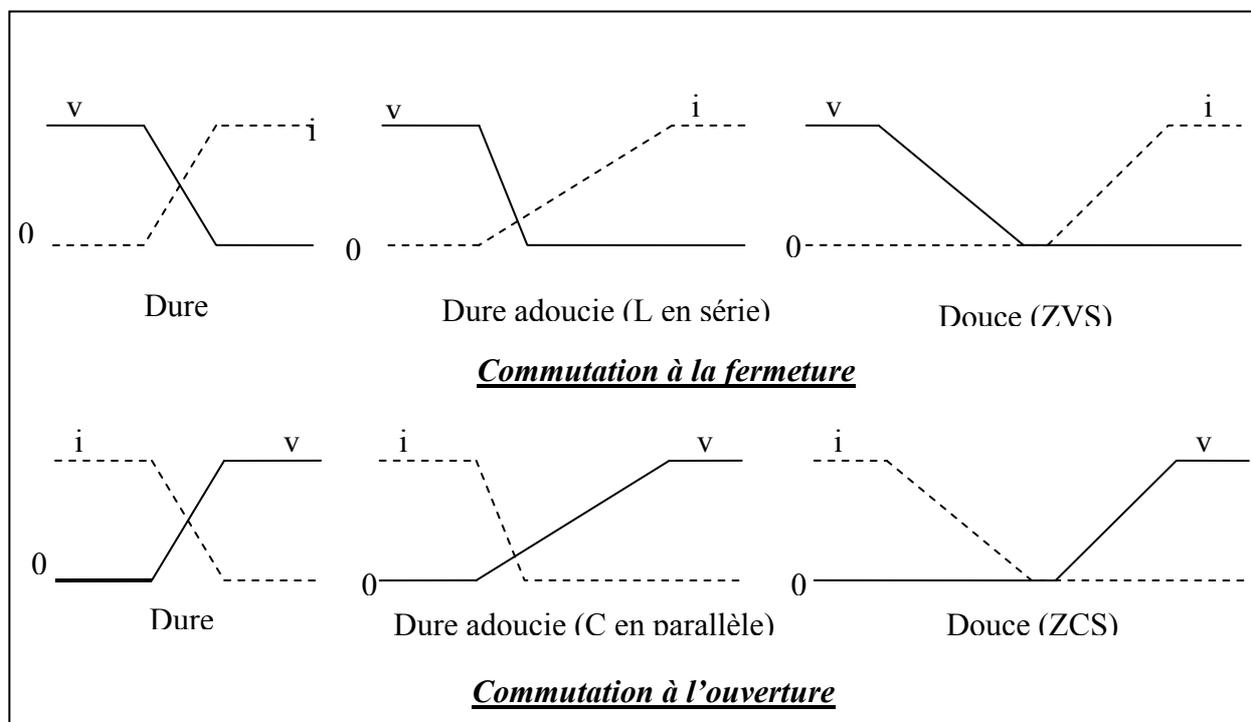


Fig.3.10 : Forme d'ondes simplifiées du courant *i* et de la tension *v* aux bornes des semi-conducteurs commandés pour les différents types de commutation.

Chaque transistor doit être protégé à la fois contre les $\frac{di}{dt}$ et les $\frac{dv}{dt}$ excessifs.

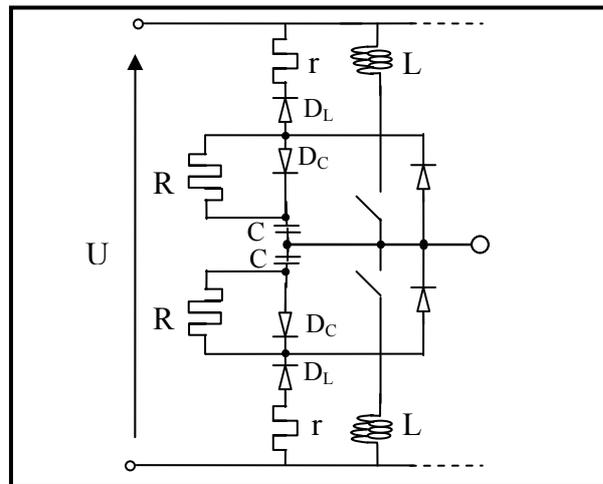


Fig.3.11 : Les snubbers (CALC)

- les *snubbers* capacitifs destinés à la protection contre les $\frac{dv}{dt}$ comportent, chaque'un outre la capacité une résistance « R » destinée à limiter le courant de décharge de « C » à la fermeture du transistor.
- les *snubbers* inductifs destinés à la protection contre les $\frac{di}{dt}$ comportent chaque'un, outre l'inductance « L » une résistance « r » de décharge de « L » à l'ouverture du transistor et une diode D_L qui met cette résistance en circuit ouvert pendant la fermeture du transistor.

La résistance « R » des *snubbers* capacitifs doit être suffisante pour que la constante du temps RC soit assez grande devant le temps de mise en conduction du transistor commuté et que la pointe initiale du courant U/R soit réduite.

Par contre pour les *snubbers* inductifs, on utilise une résistance « r » assez faible pour limiter les surtensions « $r i_L$ » produite par interruption du courant « i_L » dans le transistor.

Enfin, les constantes, RC et L/r sont d'ordinaire voisines pour que le temps de récupération des snubbers à la fermeture et à l'ouverture soient sensiblement les mêmes.

Les valeurs maximales du courant et de la tension admissibles pour le transistor à effet de champ limitent son emploi aux onduleurs de faible puissance qui ne nécessitent pas de circuits de protection contre les $\frac{di}{dt}$ et $\frac{dv}{dt}$. Le principal problème des onduleurs à transistors à effet

de champ est lié à leur rapidité de commutation qui nécessite de les utiliser avec des diodes suffisamment rapides.

III-3-6 SPECIFICITES ET MODE D'EMPLOI DU TRANSISTOR MOSFET

Le transistor MOSFET (*Metal oxide semi-conductor Field effect transistor*) est un composant plutôt adopté aux applications de faible ou moyenne puissance (inférieur à quelques dizaines de kilowatts). En effet c'est un dispositif à effet de champ dont la résistance apparente en conduction croit fortement avec la tenue en tension directe. Il en résulte que pour obtenir des composants industriellement viables, la tenue en tension ne dépasse pas 1000v et les courants admissibles sont de l'ordre de quelques centaines d'ampères (pour des tenues en tension de 50 à 200v). Parallèlement, l'absence de mécanismes bipolaire en fait un composant intrinsèquement très rapide en commutation, pour que sa commande de grille soit performante. Cette dernière est en statique, une commande en tension (impédance d'entrée très élevée), ce qui est très intéressant sur le plan de la mise en œuvre.

Il est souvent utilisé dans les applications à basse tension d'alimentation avec des fréquences de découpage qui peuvent éventuellement dépasser 100KHz.

III-3-6-1 Description

Le transistor MOSFET ou TEC à grille isolée a une source, une grille et un drain. La tension grille contrôle le courant drain. On peut appliquer à la grille des tensions positives et encore avoir un courant grille pratiquement nul [41].

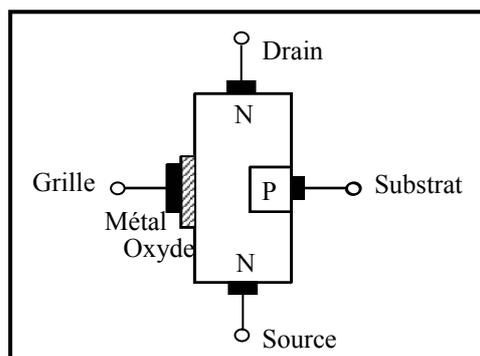


Fig.3.12 : Elements d'un TEC à grille isolée.

Le TEC à grille isolée a une seule région « P » que l'on appelle **le substrat**. Cette région « P » étrangle le canal entre la source et le drain pour ne laisser qu'un étroit passage du côté gauche. Les électrons qui circulent entre la source et le drain le font par cet étroit canal. On dépose une fine couche isolante (généralement d'oxyde de silicium ou de silice quelques nm) sur le côté gauche du canal). Cet oxyde est isolant. Finalement on dépose sur l'isolant une électrode métallique qui sera la grille (on forme ainsi un condensateur dont les deux armatures

sont la grille et le canal et le diélectrique est l'oxyde de silicium ou le silice), on aura donc une très grande résistance à l'entrée et le courant de grille sera nul.

Remarque : les transistors à effet de champ possèdent par construction une diode intégrée D_A en parallèle inverse, ce n'est pas une diode rapide. L'utilisation des MOS de puissance, réputés robustes, a montré un certain nombre de défauts catastrophiques, inexplicables par une surtension, une oscillation ou une surcharge thermique. Une étude approfondie faite par **Pierre Aloisi** a démontrée que ce type de défauts apparaissait au moment de la récupération de la diode interne.

- si on branche une diode rapide D_B en parallèle inverse avec le transistor, il peut être nécessaire d'empêcher la conduction de la diode lente intégrée, en branchant une diode à faible chute de tension directe D_C en série avec le transistor [7].

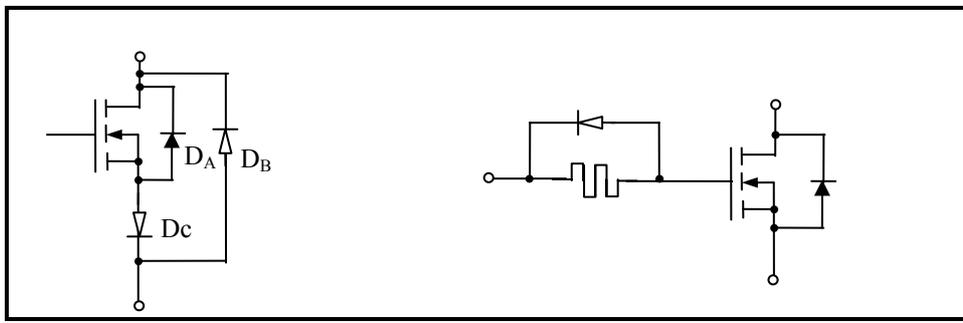


Fig.3.13 : Diode parallèle inverse d'un transistor MOSFET

- Pour utiliser la diode intégrée comme diode de roue libre, il faut ralentir la commutation à la fermeture en branchant une résistance en série avec la grille, ou faire fonctionner l'interrupteur en thyristor duel.

III-3-6-2 Principe de fonctionnement

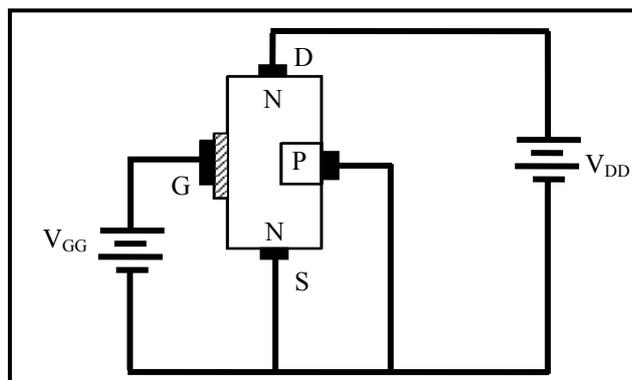
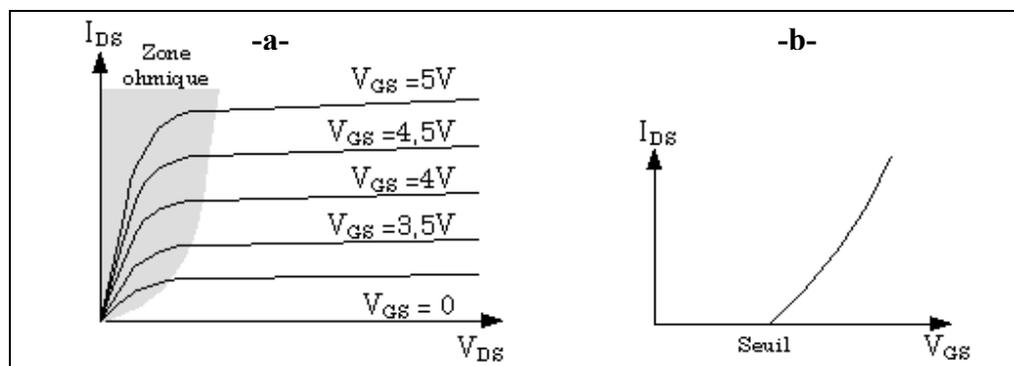


Fig.3.14 : Principe de fonctionnement.

- la tension d'alimentation V_{DD} force les électrons libres à circuler de $S \rightarrow D$. les électrons passent par le canal étroit à la gauche du substrat.

- La tension grille contrôle la résistance du canal, comme la grille est isolée du canal, on peut lui appliquer une tension tantôt positive tantôt négative.
- 1- **Phénomène de déplétion** : si on applique une tension grille négative, celle ci amènera des électrons sur la grille (première armature du condensateur), ces charges négatives repoussent les électrons libres dans le canal N et laisse une couche d'ions positives sur une partie du canal (l'autre armature du condensateur), autrement dit, les électrons libres du canal N ont diminué en nombre. Plus la tension grille est négative, plus la déplétion des électrons dans le canal N est grande.
 - 2- **Régime d'enrichissement** : comme la grille du transistor décrit est isolée du canal, on peut lui appliquer une tension positive. La grille se comporte de nouveau comme l'armature d'un condensateur, mais les charges positives de la grille induisent cette fois des charges négatives dans le canal N. Les charges négatives sont des électrons libres qui s'ajoutent à ceux qui étaient déjà dans le canal. Autrement dit, une tension grille positive enrichit le canal et augmente sa conductivité. Donc, plus la tension grille est positive, plus le courant drain sera grand.



**Fig.3.15 : a- Caractéristique de sortie du MOSFET.
b- Caractéristique de transfert. [7].**

- ❖ la caractéristique (a) montre que le courant de drain pourra atteindre plusieurs ampères pour des composants de puissance. On note que la zone en fonctionnement ohmique, est tout à fait similaire à celle des JFETs, et permet les mêmes applications.
- ❖ la caractéristique de transfert (b) est appelée la transconductance du MOS, et est exprimée en siemens (S). Pour des MOS de puissance, elle vaut plusieurs siemens (1 à 10 typiquement). La tension de seuil atteint plusieurs volts (1 à 3 typiques). Ce seuil varie avec la température.

III-3-6-3 Performances

- Ce composant jouit de la double réputation de composant rapide et facile à commander.
- Ne mettant pas en jeu de mécanismes bipolaires, il n'est pas le siège de charges stockées en raison de sa grille isolée.
- On parle souvent d'un composant dont le courant de commande est nul.

Cependant, les valeurs importantes de sa capacité C_{GS} entre grille et source, mais aussi, et surtout, de sa capacité grille-drain à faible tension (pour les états proche de la conduction), peuvent conduire à l'apparition de courants capacitifs de grille importants lors des commutations.

III-4 SIMULATION DU BALLAST ELECTRONIQUE A HAUTE FREQUENCE

III-4-1 BALLAST ELECTRONIQUE EN PONT COMPLET

On peut utiliser un ballast électronique formé d'un onduleur en pont complet [65] comme suit :

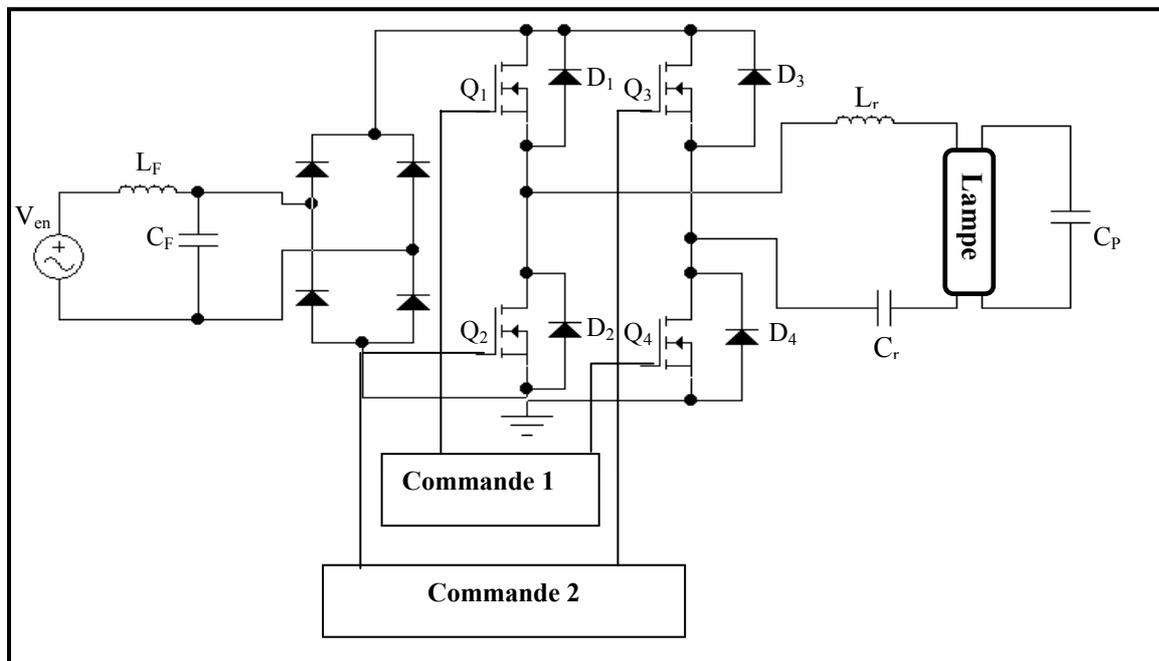


Fig. 3.16 : Ballast électronique avec onduleur en pont complet.

III-4-2 BALLAST ELECTRONIQUE EN DEMI-PONT

On propose 03 types de ballasts électroniques en demi-pont

1^{er} Circuit[54]

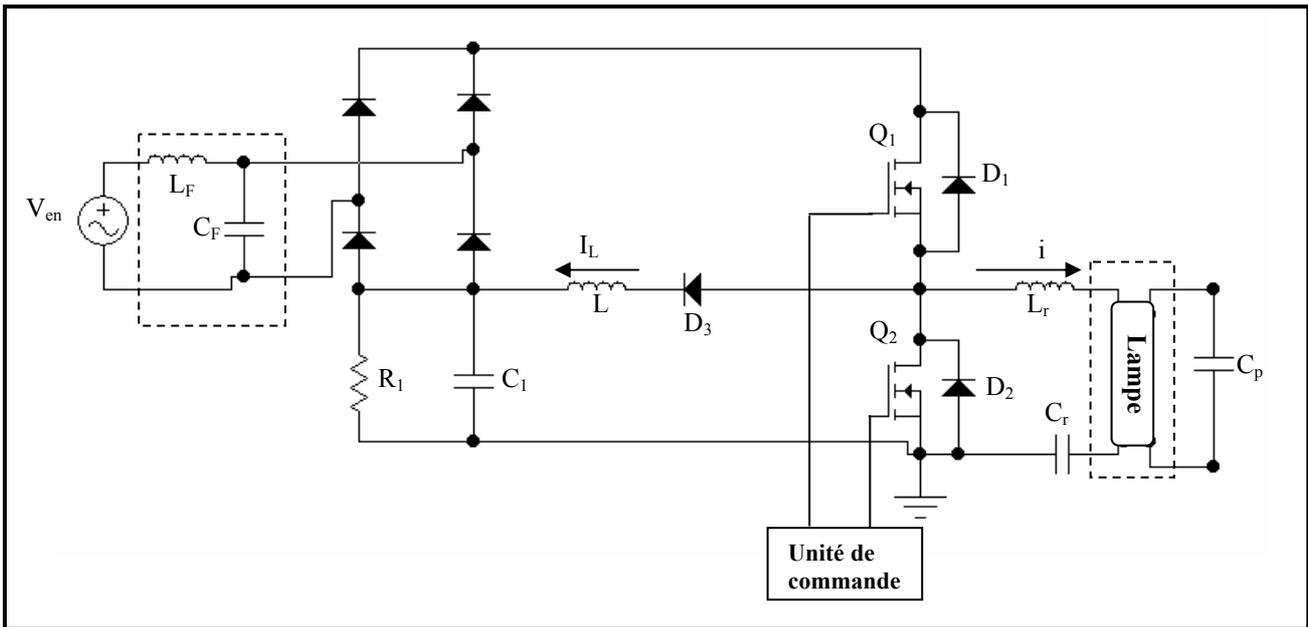


Fig.3.17 : Circuit réduit du ballast électronique

Le principe d’opération de l’état d’équilibre du ballast proposé est décrit pour des modes incluant du mode 1 au mode 4. Le circuit équivalent de chaque mode est montré dans la figure (3.17). Pour illustrer l’opération du circuit d’état d’équilibre de ce ballast, tous les composants incorporés sont supposés être idéaux. Cette opération est décrite comme suite :

Mode 1 $t_0 < t < t_1$: avant le mode Q_1 et Q_2 sont tous les deux à l’état d’arrêt. Quand Q_1 est allumé à l’instant t_0 , un courant d’entrée i_{en} traverse Q_1 et est divisé en i_{ch} et i_L . i_L traverse D_3 et L et i_{ch} traverse L_r , la lampe fluorescente et C_r . i_L et i_{ch} augmentent jusqu’à la crête positive (figure (3.19)).

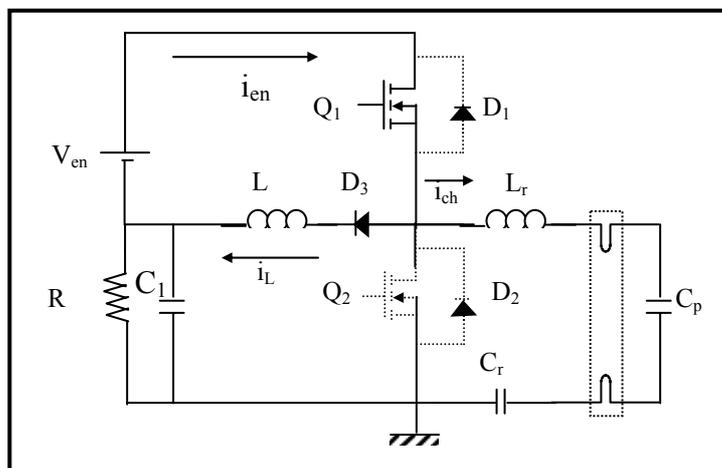


Fig.3.18 a : Circuit équivalent du mode 1 $t_0 < t < t_1$

Mode 2 $t_1 < t < t_2$: quand Q_1 est éteint à t_1 et Q_2 reste dans l'état arrêt pour la période de t_1 à t_2 , i_L traverse C_1 , D_2 , D_3 , L et R . i_{ch} traverse D_2 , L_r , la lampe fluorescente et C_r . les courants i_L et i_{ch} diminuent de leurs crêtes positives (figure (3.19)).

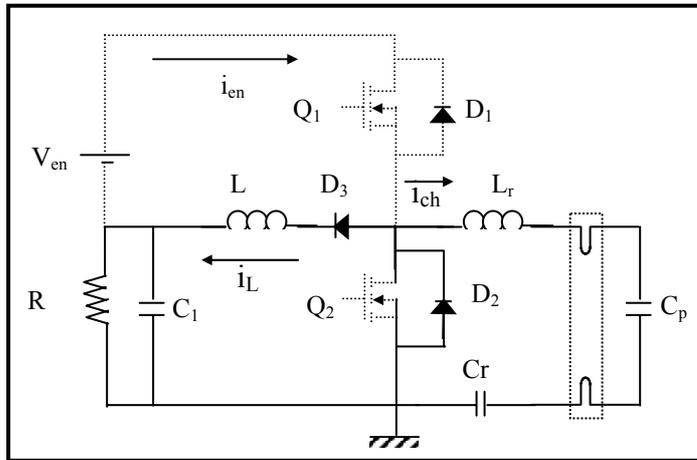


Fig.3.18 b : Circuit équivalent du mode 2 $t_1 < t < t_2$

Mode 3 $t_2 < t < t_3$: à t_2 Q_2 est allumé. i_L atteint 0 entre t_2 et t_3 . Après i_{ch} atteint 0. Il entre dans la direction opposée par rapport à l'état marche de Q_1 et diminue à la crête négative (figure (3.19)).

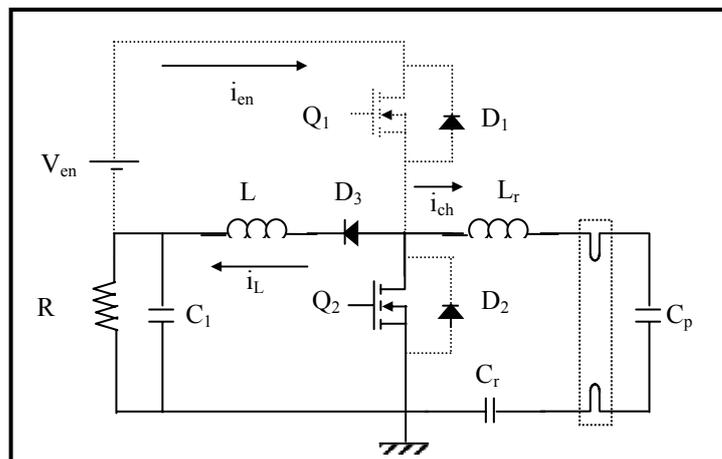


Fig.3.18c : Circuit équivalent du mode 3 $t_2 < t < t_3$

Mode 4 $t_3 < t < t_4$: quand Q_2 est arrêté à t_3 et Q_1 reste à l'état arrêt pour la période de t_3 à t_4 , i_L traverse D_3 . A t_4 Q_1 est en marche. Le prochain mode est le mode 1.

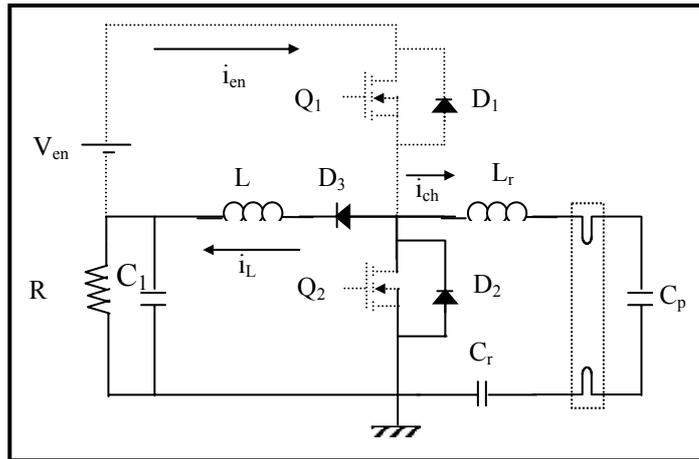


Fig.3.18d : Circuit équivalent du mode 4 $t_3 < t < t_4$

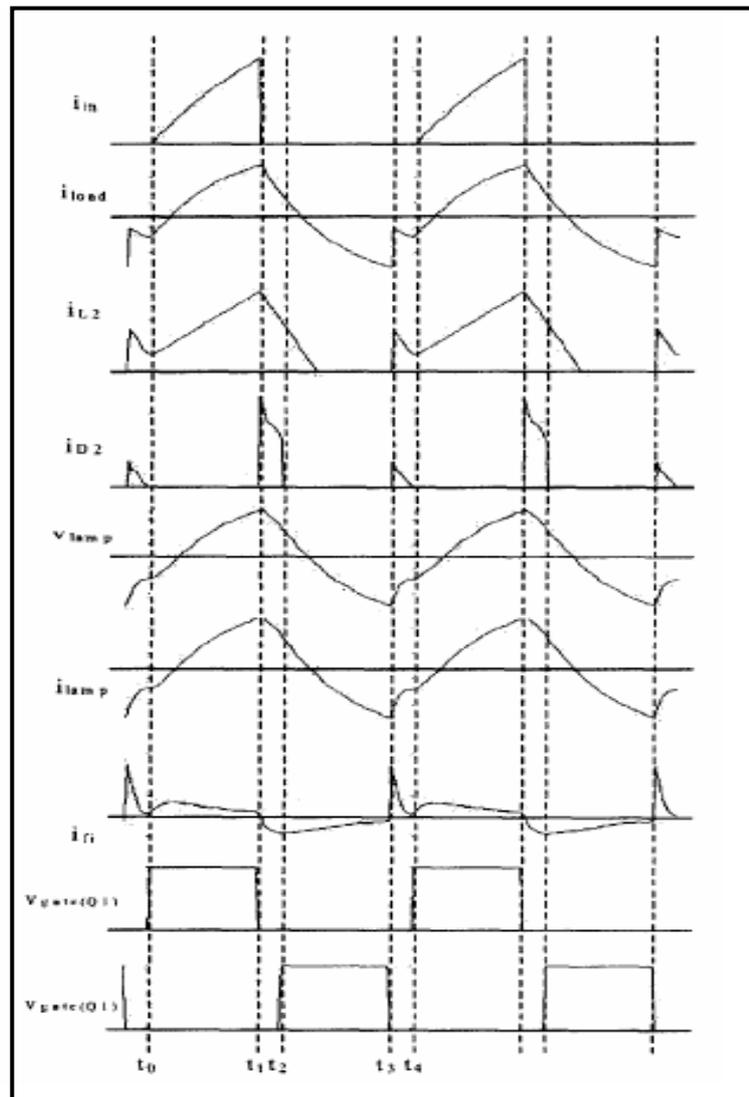


Fig.3.19: Les formes d'ondes des tensions et des courants du ballast proposé.

On propose d'autres circuits de ballast électroniques :

2^{er} circuit [16]

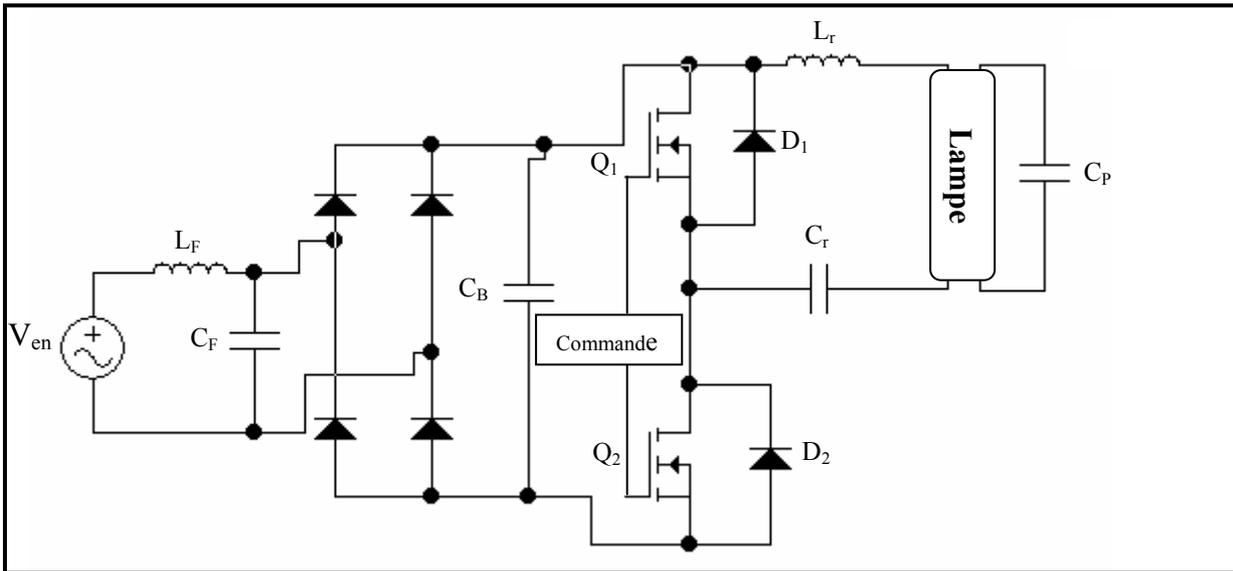


Fig. 3.20 : Ballast électronique avec onduleur en demi-pont.

3^{ème} circuit [31]

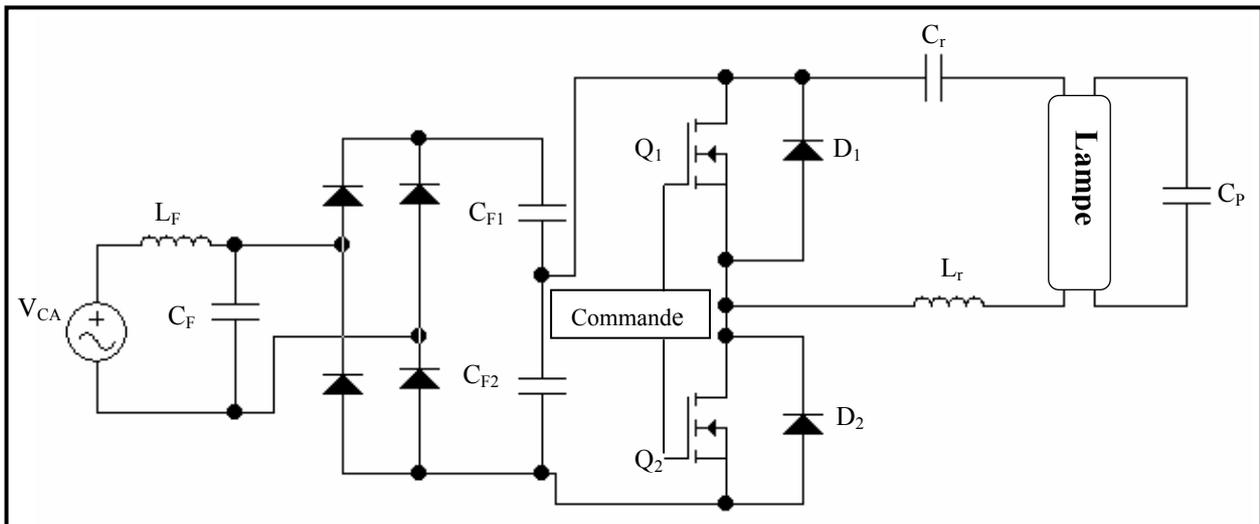


Fig. 3.21: Ballast électronique conventionnel.

III-5 MODELE DE LA LAMPE FLUORESCENTE POUR LES BALLASTS ELECTRONIQUES A HAUTE FREQUENCE

Dans la pratique, une lampe fluorescente fonctionnant en haute fréquence est approximativement résistive. Les caractéristiques de fonctionnement du circuit du ballast électronique peuvent être calculé en modélisant simplement la lampe comme une résistance

constante. Cependant, la résistance équivalente de la lampe n'est pas conormée sous différentes conditions de fonctionnement, mais en effet est sensiblement affectée par la puissance d'arc et la température ambiante [62].

III-5-1 EFFET DE LA TEMPERATURE

Les caractéristiques de la lampe fluorescente dépendent de la puissance de fonctionnement et sont très sensibles à la température. Les figures (3.22 a et b) montrent la variation de la tension et du courant d'arc de la lampe en fonction de la puissance d'arc de la lampe pour différentes températures ambiantes.

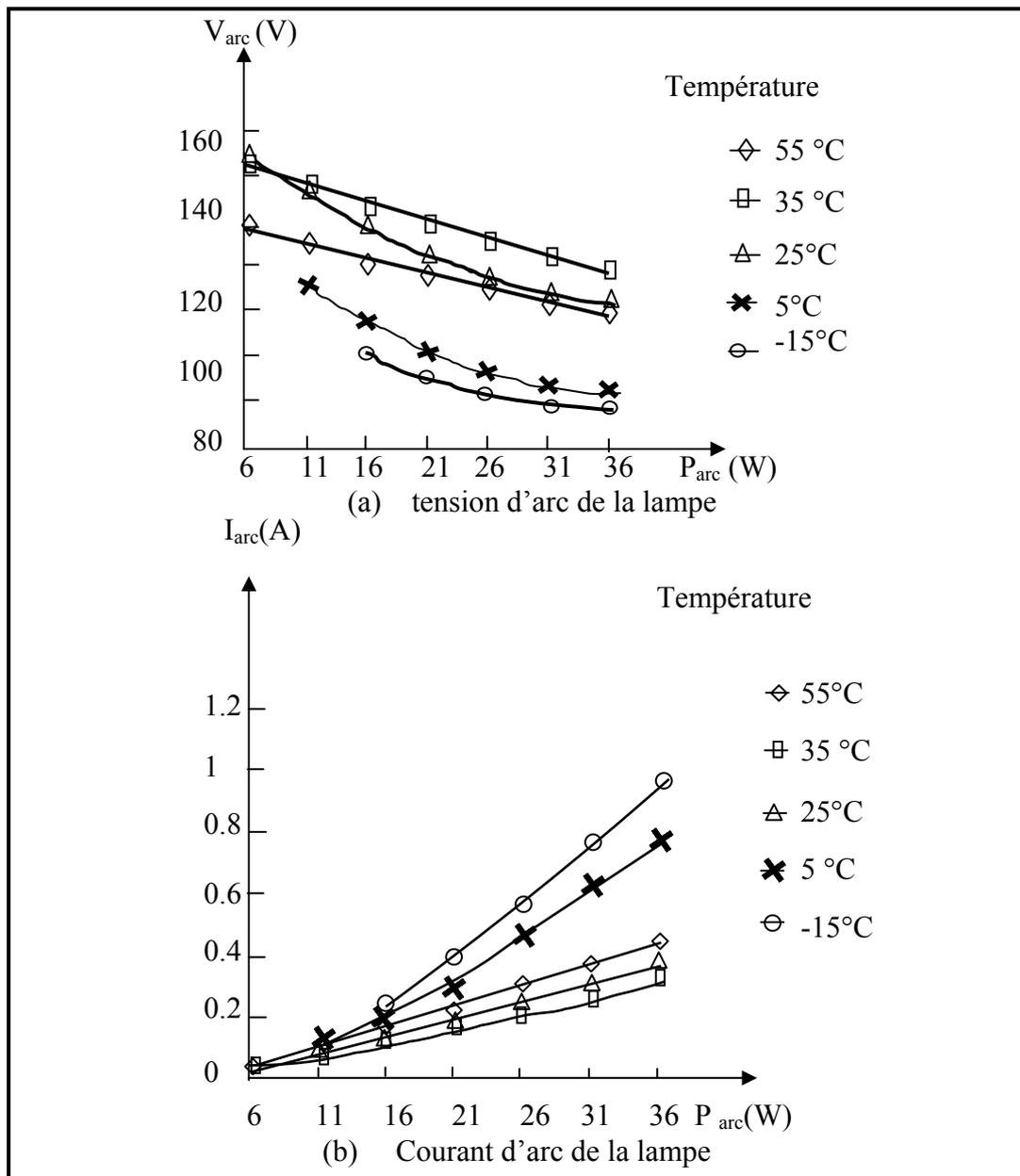


Fig.3.22: Les variations du courant et de la tension de lampe en fonction de sa puissance et de sa température [62].

Fonctionnant 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 (3.22) 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 de la lampe est réduite. Pour un niveau de puissance spécifique, la lampe conçue pour l'usage à 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 (3.23) montre les courbes caractéristiques d'une lampe fluorescente avec les droites de charge de deux circuits de ballasts électroniques donnés pour expliquer l'effet de la température sur la puissance de la lampe.

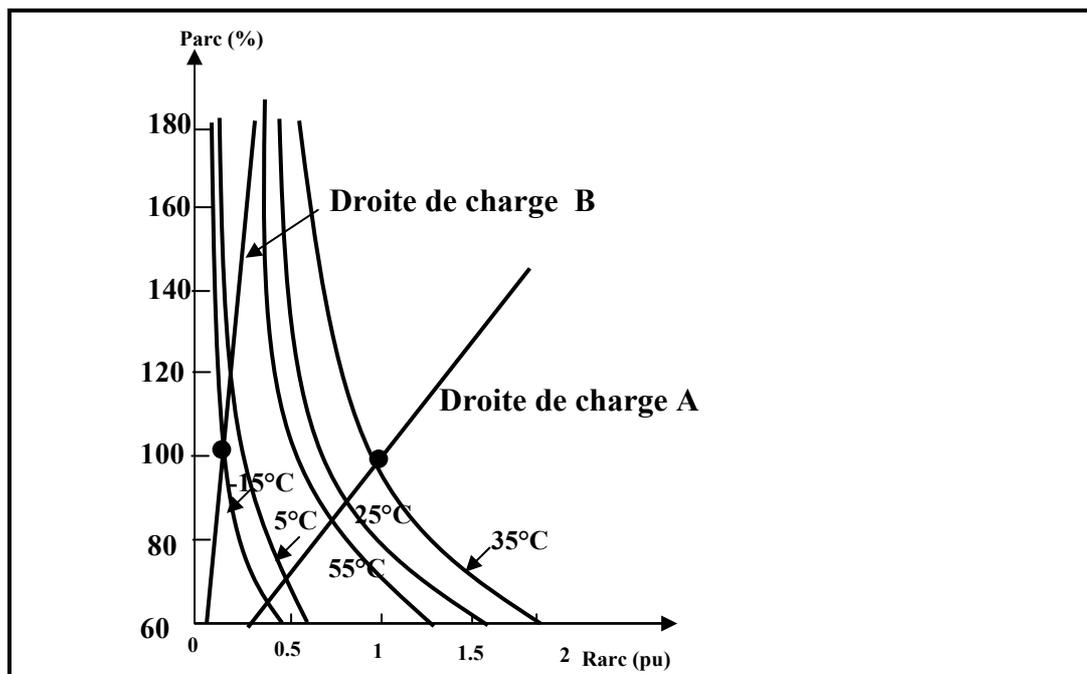


Fig.3.23 : Effets de la température sur la puissance de la lampe.

Comme illustré par la droite de charge A, la lampe fluorescente ne pourra pas être capable de produire assez d'intensité lumineuse à une basse température quand le ballast est conçu avec des paramètres du circuit consacrés pour la température ambiante. D'autre part, comme illustré par la droite 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°C .

III-5-2 MODELE DU CIRCUIT ELECTRIQUE

Un modèle du circuit électrique comme montré dans la figure (3.24) a été proposé pour la comptabilité pour le comportement électrique 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 résistances, qui peut être obtenu du fabricant. Pour des calculs plus précis la résistance équivalente d'arc est reliée entre les points médians des deux filaments de cathodes. La résistance du 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 ne fera traité aucune erreur influente de traiter la résistance du filament comme constante.

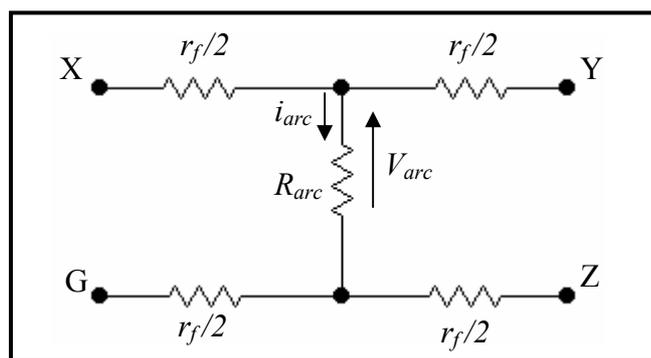


Fig. 3.24 : Modèle du circuit électrique de la lampe fluorescente.

Donc :

$$R_{arc} = \frac{V_{arc}}{i_{arc}} \quad (3-3)$$

et $P_{arc} = V_{arc} i_{arc}$ (3-4)

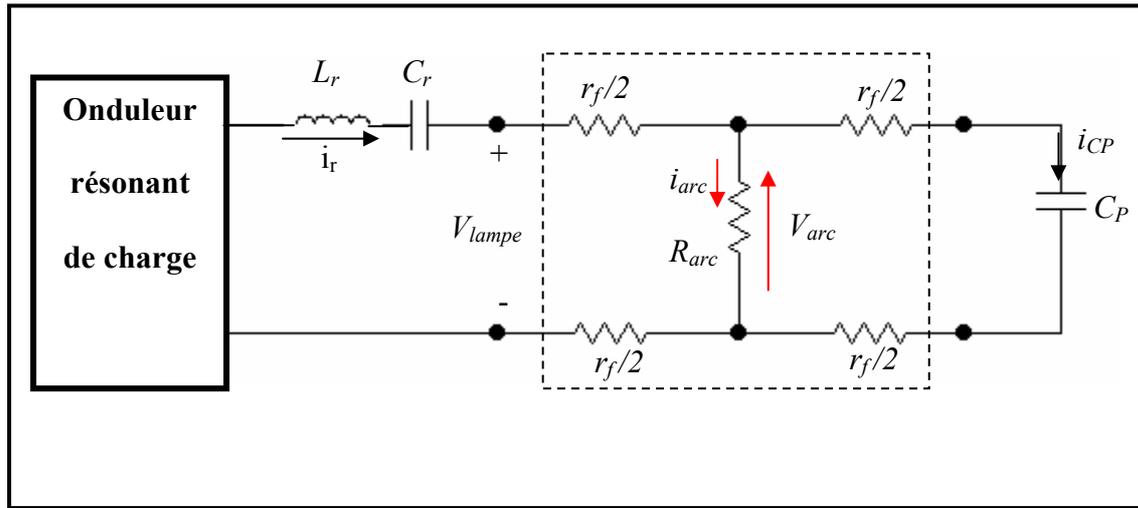


Fig. 3.25 : Circuit équivalent du ballast électronique avec un onduleur charge parallèle résonant série.

La tension de la lampe peut être calculée comme suit :

$$\vec{V}_{lampe} = \vec{V}_{arc} + 2 \left[\frac{r_f}{2} (\vec{i}_{arc} + \vec{i}_{Cp}) \right] = V_{arc} + i_{arc} r_f + \frac{r_f V_{arc}}{r_f - j Z_{Cp}} = \left[\left(1 + \frac{r_f^2}{r_f^2 + Z_{Cp}^2} \right) V_{arc} + r_f i_{arc} \right] + j \frac{r_f Z_{Cp}}{r_f^2 + Z_{Cp}^2} V_{arc}$$

$$\text{Donc } \vec{V}_{Lampe} = \left[\left(1 + \frac{r_f^2}{r_f^2 + Z_{Cp}^2} \right) V_{arc} + r_f \frac{P_{arc}}{V_{arc}} \right] + j \frac{r_f Z_{Cp}}{r_f^2 + Z_{Cp}^2} V_{arc} \quad (3-5)$$

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

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

$$\vec{i}_r = \vec{i}_{arc} + \vec{i}_{Cp} = \left(i_{arc} + \frac{r_f}{r_f^2 + Z_{Cp}^2} V_{arc} \right) + j \frac{Z_{Cp}}{r_f^2 + Z_{Cp}^2} V_{arc} \quad (3-6)$$

Alors la puissance totale de la lampe est obtenue par :

$$P_{Lampe} = \text{Re} \left[\vec{V}_{Lampe} \vec{i}_r \right]$$

$$P_{Lampe} = \frac{2r_f^3}{(r_f^2 + Z_{Cp}^2)} V_{arc}^2 + \left(1 + \frac{2r_f^2}{(r_f^2 + Z_{Cp}^2)} \right) P_{arc} + r_f \left(\frac{P_{arc}}{V_{arc}} \right)^2 \quad (3-7)$$

III-6 TAUX DE DISTORSION HARMONIQUE

Le taux de distorsion est un paramètre qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative. La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique. Deux taux de distorsion harmonique sont distingués :

- le taux de distorsion harmonique en tension, noté TDH_v .
- le taux de distorsion harmonique en courant, noté TDH_i .

Le premier s'exprime sous la forme:

$$THD_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{V_{sh}^2}{V_{s1}^2}} \quad (3-8)$$

Avec

V_{s1} : valeur efficace de la fondamentale de la tension (V).

V_{sh} : valeur efficace de la tension harmonique de rang h (V).

Le deuxième s'exprime sous la forme:

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{I_{sh}^2}{I_{s1}^2}} \quad (3-9)$$

I_{s1} : valeur efficace de la fondamentale de courant (A).

I_{sh} : valeur efficace du courant harmonique de rang h (A).

III-6-1 REGLEMENTATION

Au niveau international, les normes 1000 de la Commission Electrotechnique Internationale (C.E.I) définissent le niveau des courants et de la tension d'harmonique à ne pas dépasser. La norme C.E.I-1000-3-2 (Tableau 3.2) fixe la limitation des courant injectés dans le réseau public pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16 A.

Il s'agit là des appareils du domaine domestique. Aussi, du fait de leur puissance, les équipements industriels sont exclus du champ d'application de cette norme. Par ailleurs, un projet de norme (C.E.I-1000-3-4) est en cours d'élaboration pour les appareils dont le courant consommé est supérieur à 16 A.

Harmoniques impairs		Harmoniques pairs	
Rang	Courant harmonique admissible maximal (A)	Rang	Courant harmonique admissible maximal (A)
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	$8 \leq h \leq 40$	$0.23 \cdot 8/h$
11	0.33		
13	0.21		
$15 \leq h \leq 33$	$0.15 \cdot 15/h$		

Tableau 3.2 : Limite des composantes harmoniques en courant

Les normes C.E.I-1000-2-2 et C.E.I-1000-2-4 précisent le niveau des harmoniques en tension à respecter au point de raccordement sur les réseaux de distribution basse tension, public et industriel respectivement (tableau 3.3).

Harmoniques impairs non multiple de 3		Harmoniques impairs multiple de 3		Harmoniques pairs	
Rang	V_h (%)	Rang	V_h (%)	Rang	U_h (%)
5	6	3	5	2	2
7	6	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
> 25	$0.2 + 0.5 \cdot 25/h$				

Tableau 3.3 : Limite des composantes harmoniques en tension

III-7 LES PARAMETRES DES CIRCUITS DES BALLASTS PROPOSES

Les paramètres du filtre d'entrée sont calculés comme suit :

La fonction de transfert du filtre passe bas est donnée par :

$$FT = \frac{1}{L_F C_F S^2 + R_F C_F S + 1} \quad (3-10)$$

$$FT = \frac{1}{S^2 + \frac{R_F}{L_F} S + \frac{1}{L_F C_F}} \equiv \frac{\omega_0^2}{S^2 + 2\zeta\omega_0 S + \omega_0^2} \quad (3-11)$$

Donc la fréquence de coupure

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_F C_F}} \quad (3-12)$$

Le choix des valeurs de L_F et de C_F peut être obtenu en posant la condition qui consiste à éliminer les harmoniques d'ordre supérieur ou égal à 2.

$$f_C \leq 2f' \quad \text{tel que} \quad f' = 2f \quad (f \text{ est la fréquence d'alimentation de la lampe à décharge})$$

donc

$$\frac{1}{\sqrt{L_F C_F}} \leq 4f \Rightarrow L_F C_F \geq 25 * 10^{-12} \quad (3-13)$$

Le filtre de sortie série-parallèle-résonnant à haute fréquence, élimine les composantes harmoniques d'ordre supérieur du courant de sortie. Ce circuit résonant fonctionnant au dessus de la fréquence de résonance pour fournir un ZVS est conçu pour établir le courant évalué de la lampe à l'état d'équilibre. A l'allumage il fonctionne avec un haut facteur de qualité (la lampe a une résistance infinie) et ceci assure une tension d'amorçage élevée pour attaquer la lampe.

Du tableau (3.1) on a vu que le rendement lumineux de la lampe augmente lorsque la fréquence augmente. D'autre part on sait que les dimensions des composants diminuent et que les pertes dans les circuits magnétiques et celles dues à la commutation des transistors augmentent lorsque la fréquence croît. De plus l'effet des radiations électromagnétiques augmente. Tenant compte de ces considérations, nous pouvons choisir la fréquence de résonance du convertisseur entre 30 KHz et 50KHz. Le convertisseur en question est caractérisé par une fréquence de résonance de 42 KHz.

La raison principale du choix des différentes structures des ballasts électroniques étudiés dans ce chapitre réside dans leurs caractéristiques de sortie illustrées par la figure (3-26) donnée par *Corina costache*. Nous constatons sur cette figure que la pente des caractéristiques varie fortement avec le rapport f/f_0 où f_0 est la fréquence propre du circuit oscillant et f est la fréquence de fonctionnement. Pour $f=f_0$, le système se comporte comme une source de tension qui peut être de valeur élevée. Il est alors tout a fait impropre à alimenter une lampe dans de bonnes conditions de stabilité. Au contraire, lorsque f devient supérieur à f_0 , le système se comporte plutôt comme une source de courant dont la valeur peut être ajustée en jouant sur la valeur de la fréquence f . La fréquence de fonctionnement du convertisseur doit être au dessus de la limite audible. Donc Le convertisseur devra fonctionner à partir d'une fréquence de 50 KHz supérieure à la fréquence propre du circuit résonnant qui est de 42 KHz, f/f_0 dans notre cas sera 1.19 [26].

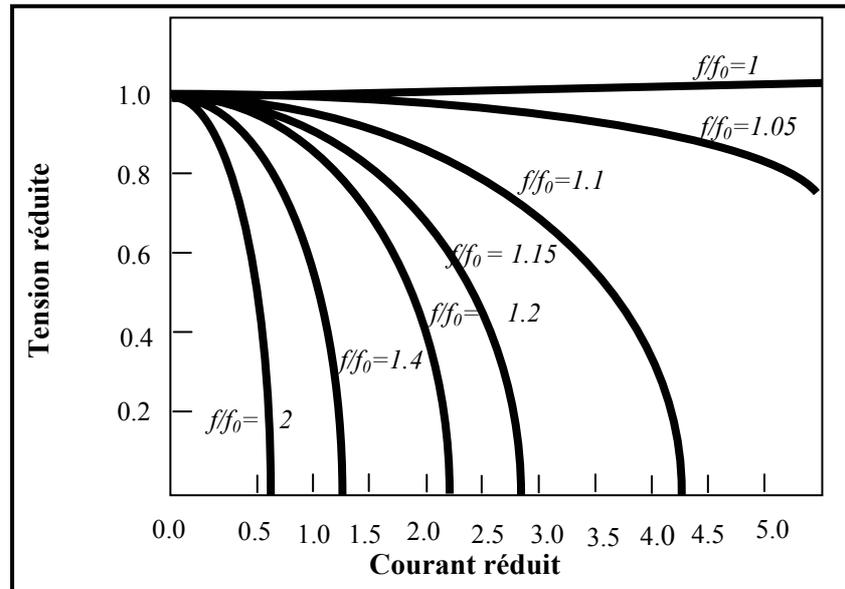


Fig.3.26: Caractéristiques de sortie de l'onduleur en demi-pont.

Sur ce, on peut choisir les paramètres du circuit résonant de telle manière à obtenir une fréquence de résonance de 42 KHz pour le circuit LC_{eq} avec $C_{eq} = \frac{C_r C_p}{C_r + C_p}$ (les deux condensateurs en série).

III-8 RESULTATS DE LA SIMULATION

III-8-1 LES CARACTERISTIQUES DE LA LAMPE TEST

- Tension d'amorçage : 300 à 350 v.
- Tension d'arc efficace : 111 v.
- Courant d'arc efficace : 0.65 A.
- La résistance d'arc : $R_{arc} = 170.769 \Omega$.
- Résistance du filament de la lampe : $r_f = 5 \Omega$
- Puissance électrique : 65 W.

Autres caractéristiques

- longueur du tube de la lampe : 1500 mm de long.
- Diamètre intérieur : 36 mm.
- Type de gaz : Argon.
- Pression du gaz rare : 3 Torr.

Les formes d'ondes obtenues sont les suivantes :

1 –Ballast de la figure (3.16) : ses paramètres sont représentés dans le tableau (3-4) :

V_{CA}	325 v, 50 Hz			L_r	1.3 mH
f	50 KHz	L_F	1.5 mH	C_r	10 nF/630V
Puissance de sortie	65 W	C_F	220 nF / 630 V	C_P	4.7 nF/1600V

Tableau 3.4: Paramètres du circuit du ballast électronique.

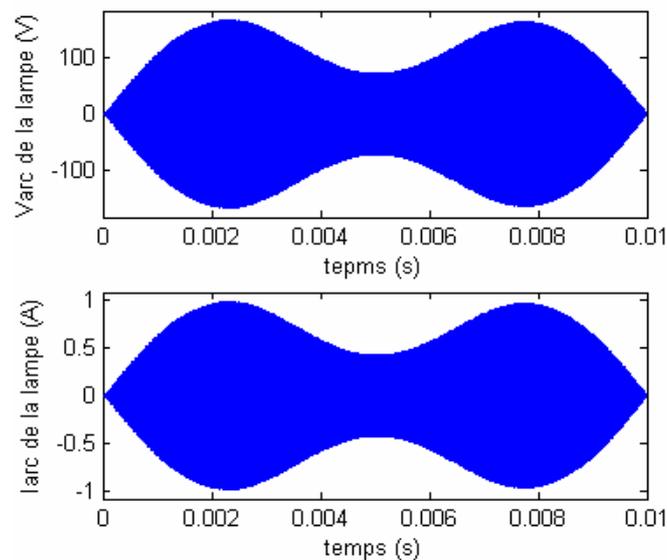


Fig.3.27: Tension et courant d'arc de la lampe à décharge.

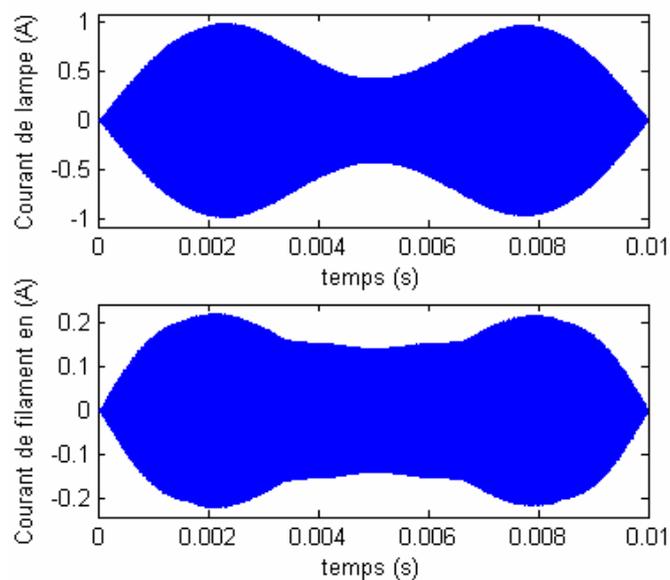


Fig.3.28: Courant total et courant de filament de la lampe à décharge.

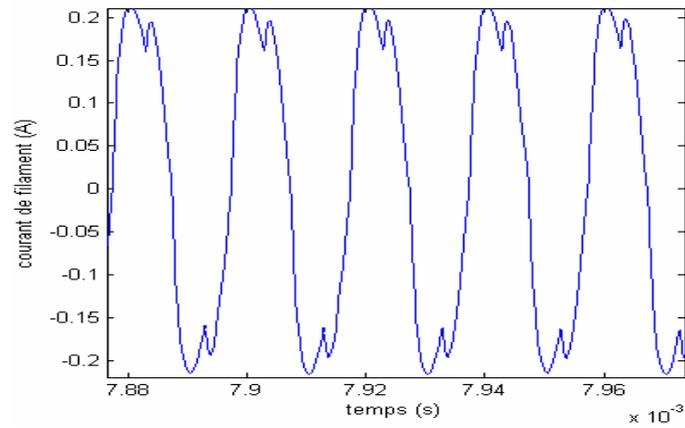


Fig.3.29 : Forme d'onde du courant de filament de la lampe à décharge.

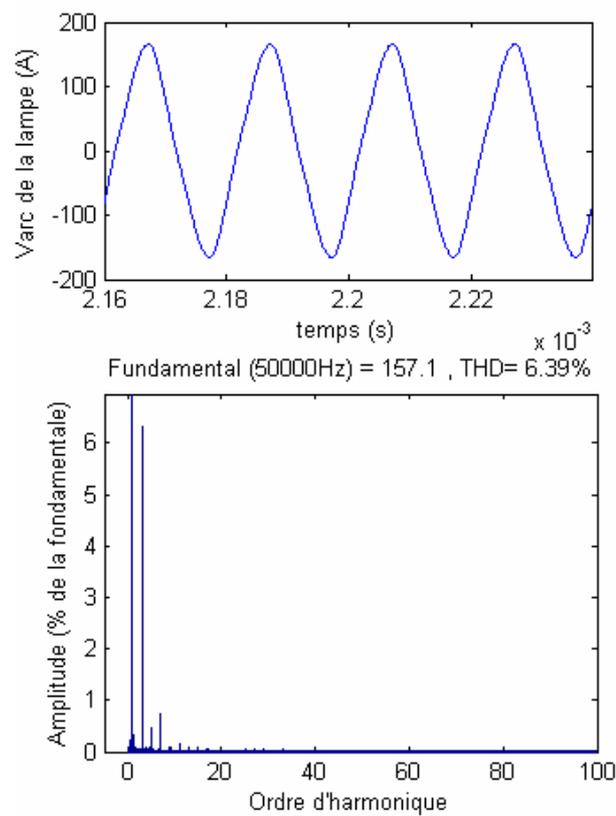


Fig.3.30 : THD de la tension d'arc de la lampe à décharge.

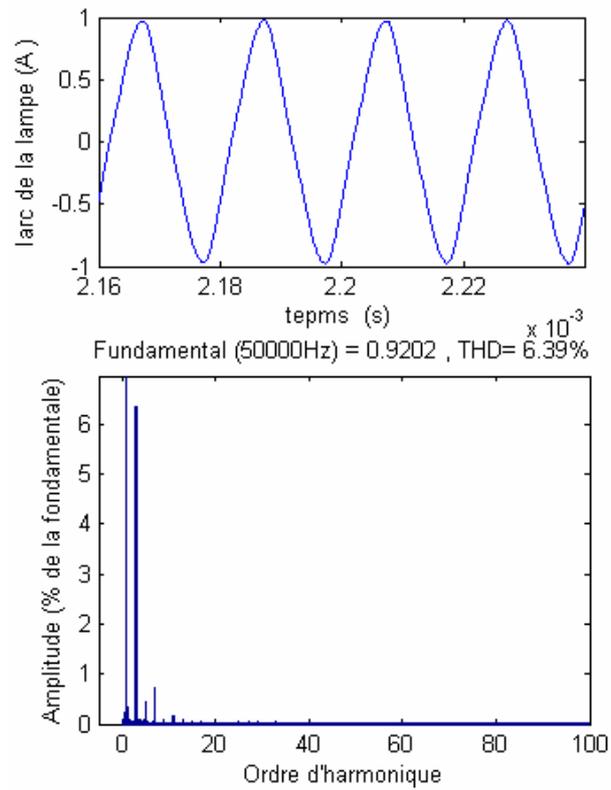


Fig.3.31: THD du courant d'arc de la lampe à décharge.

Des figures (3.30) et (3.31), on remarque que les formes d'ondes de la tension et du courant sont presque sinusoïdales (THDs sont de 6.39%).

Commençant d'abord par une comparaison entre les trois ballasts électroniques en demi-pont.

2- Ballast de la figure (3.17) : ses paramètres sont représentés dans le tableau (3-5) :

V_{en}	500V, 50Hz	C_1	33 μF	L_F	1.5 mH
L_r	0.9 mH	C_r	0.47 μF	C_F	220 nF
L	1.27 mH	C_p	3900 PF	f	50 KHz

Tableau 3.5: Paramètres du circuit du ballast électronique.

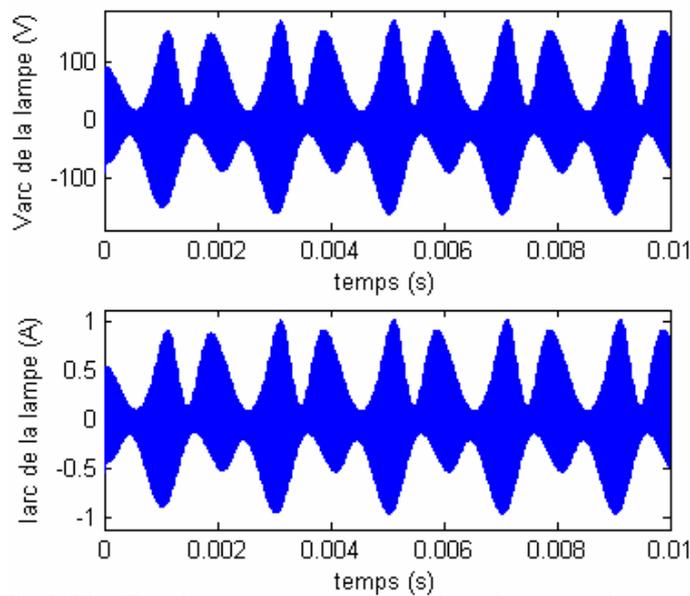


Fig.3.32 : Tension et courant d'arc de la lampe à décharge.

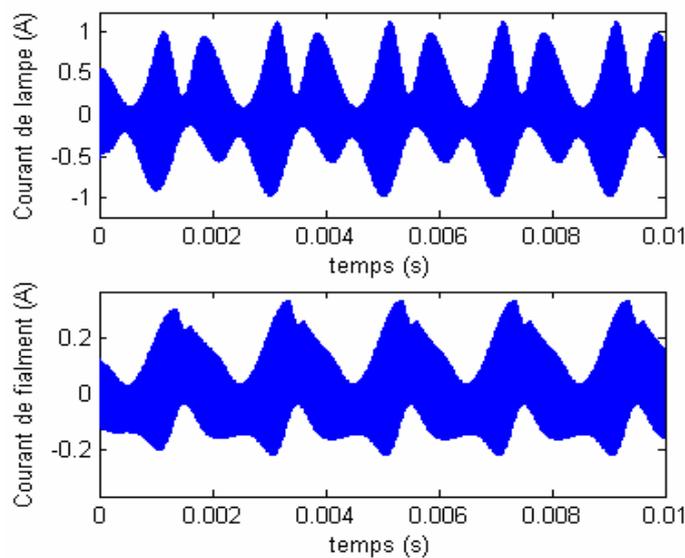


Fig.3.33 : Courant total et courant de filament de la lampe à décharge.

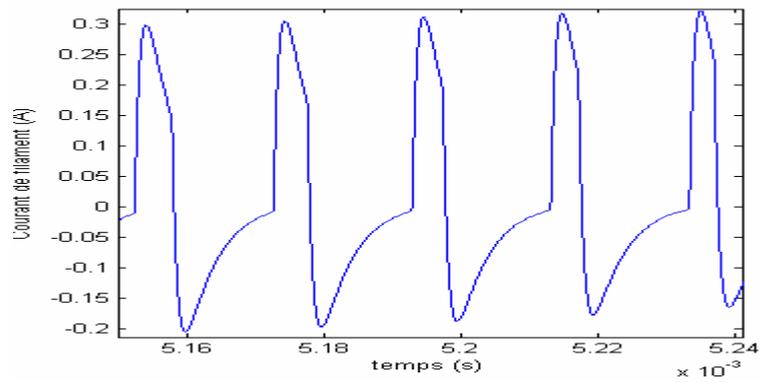


Fig.3.34: *Forme d'onde du courant de filament de la lampe à décharge.*

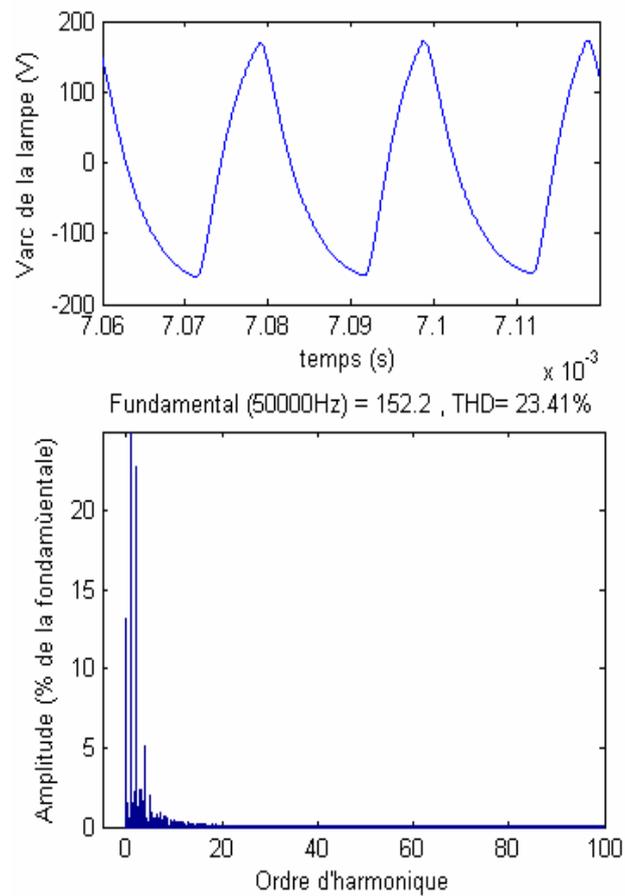


Fig.3.35 : *THD de la tension d'arc de la lampe à décharge.*

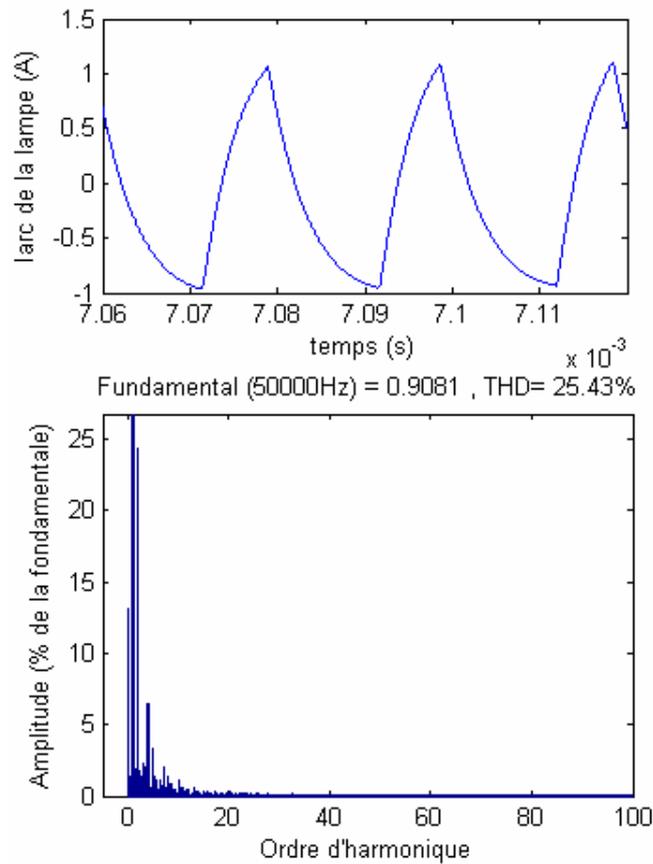


Fig.3.36 : THD du courant d'arc de la lampe à décharge.

3-Ballast de la figure (3.20) : ses paramètres sont représentés dans le tableau (3-6) :

C_r	147 nF/ 250 Vc.a	C_B	220 μ F/ 350 V c.c	L_F	1.5 mH
C_P	8.2 nF/ 600 Vc.a	V_{en}	420 v, 50 Hz	C_F	220 nF/630 V
L_r	1.08 mH	f	50 KHz		

Tableau 3.6 : Paramètres du circuit du ballast électronique.

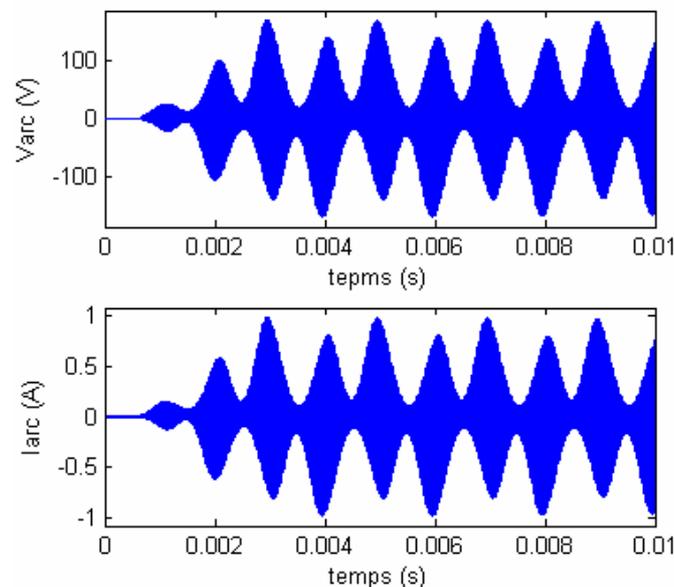


Fig.3.37 : Tension et courant d'arc de la lampe à décharge.

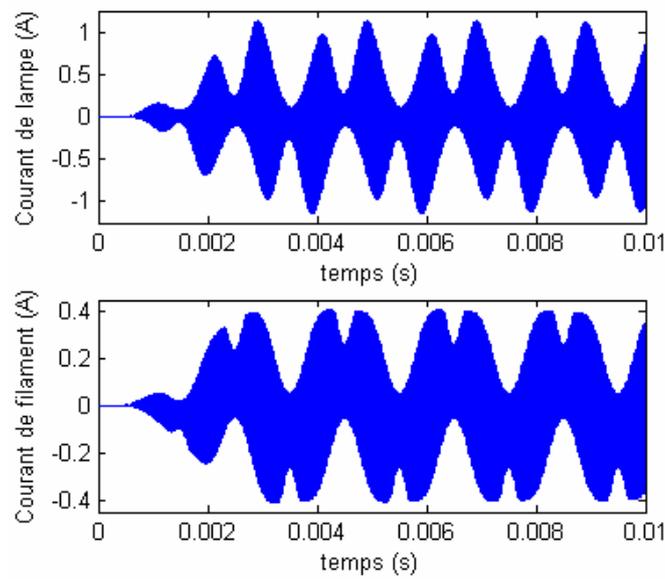


Fig.3.38: Courant total et courant de filament de la lampe à décharge.

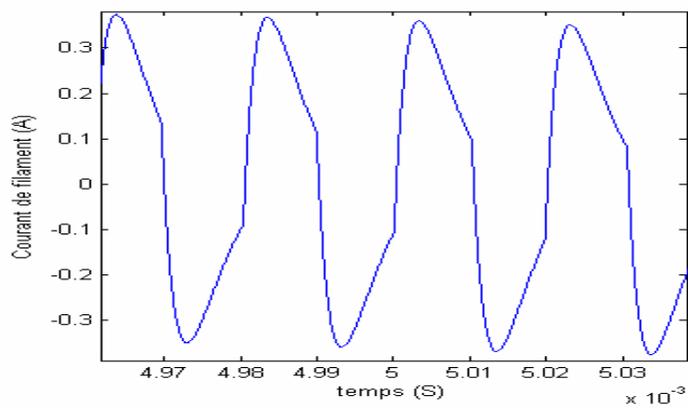


Fig.3.39 : Forme d'onde du courant de filament de la lampe à décharge.

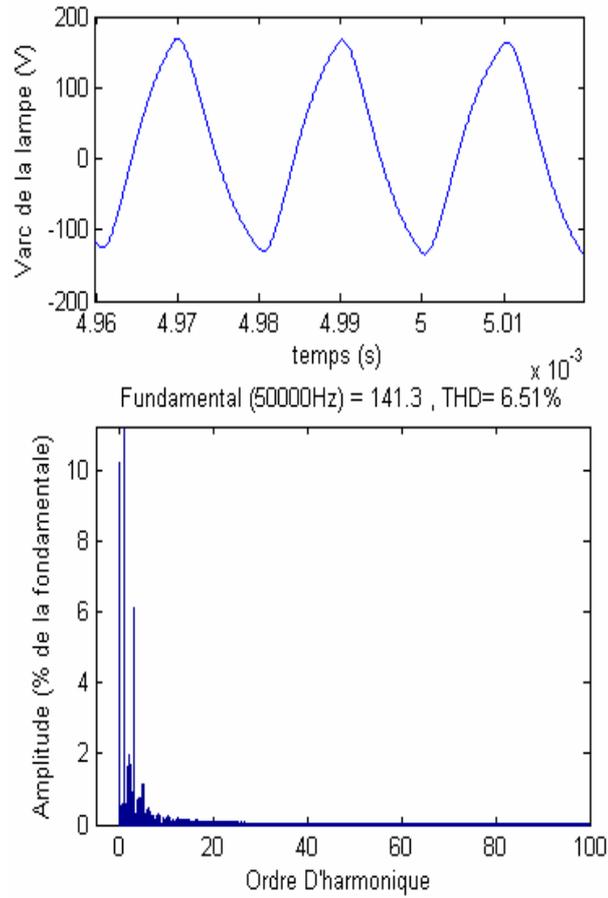


Fig.3.40 : THD de la tension d'arc de la lampe à décharge.

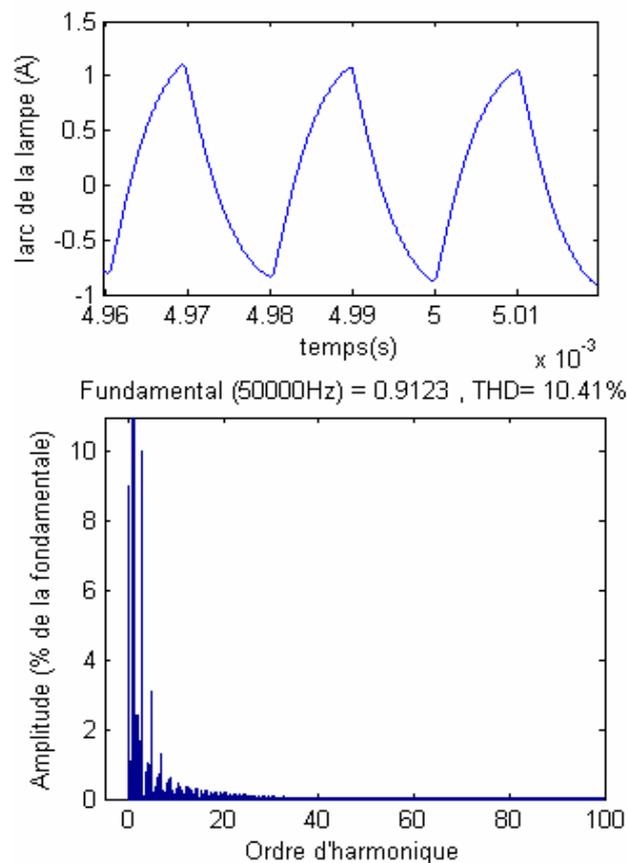


Fig.3.41: THD du courant d'arc de la lampe à décharge.

4-Ballast de la figure (3.21) : ses paramètres sont représentés dans le tableau (3-7) :

V_{CA}	2000 v, 50 Hz	$C_{F1}=C_{F2}$	47 μ F/ 250 V	L_r	2 mH
f	50 KHz	L_F	1.5 mH	C_r	100 nF/630V
Puissance de sortie	65 W	C_F	220 nF / 630 V	C_P	10 nF/1600V

Tableau 3.7 : Paramètres du circuit du ballast électronique.

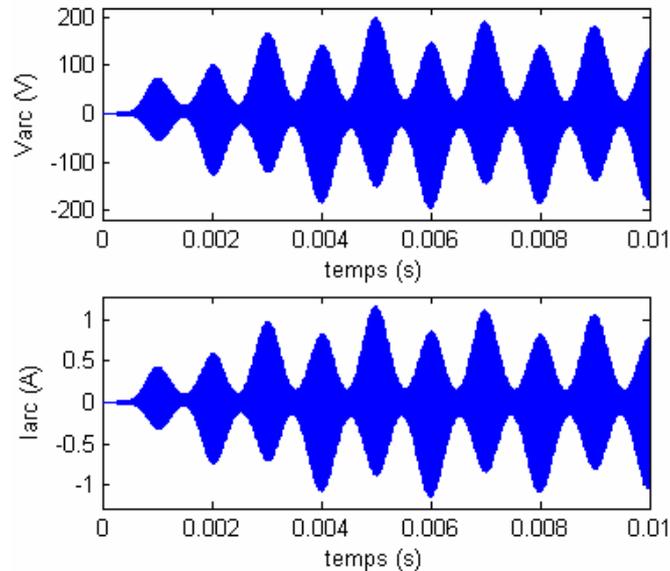


Fig.3.42: Tension et courant d'arc de la lampe à décharge.

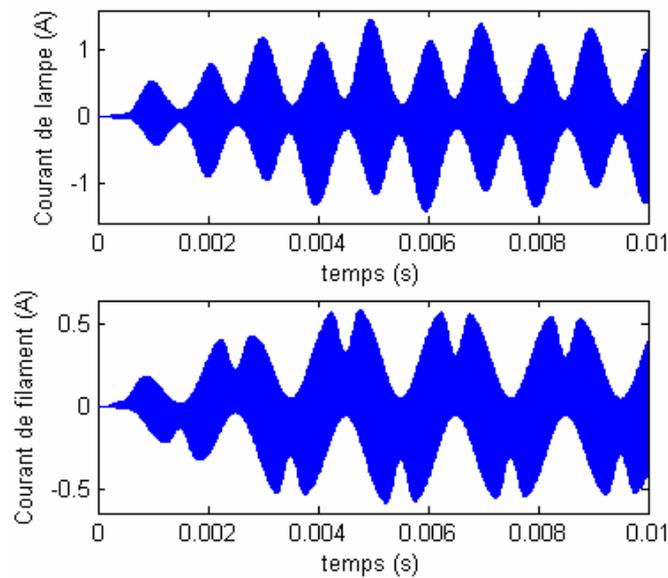


Fig.3.43: Courant total et courant de filament de la lampe à décharge.

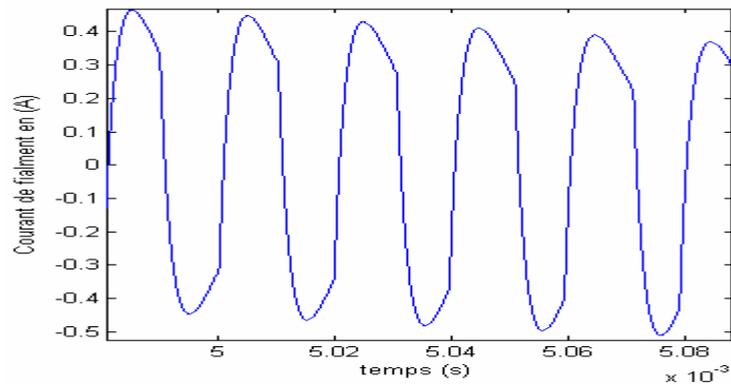


Fig.3.44: *Forme d'onde du courant de filament de la lampe à décharge.*

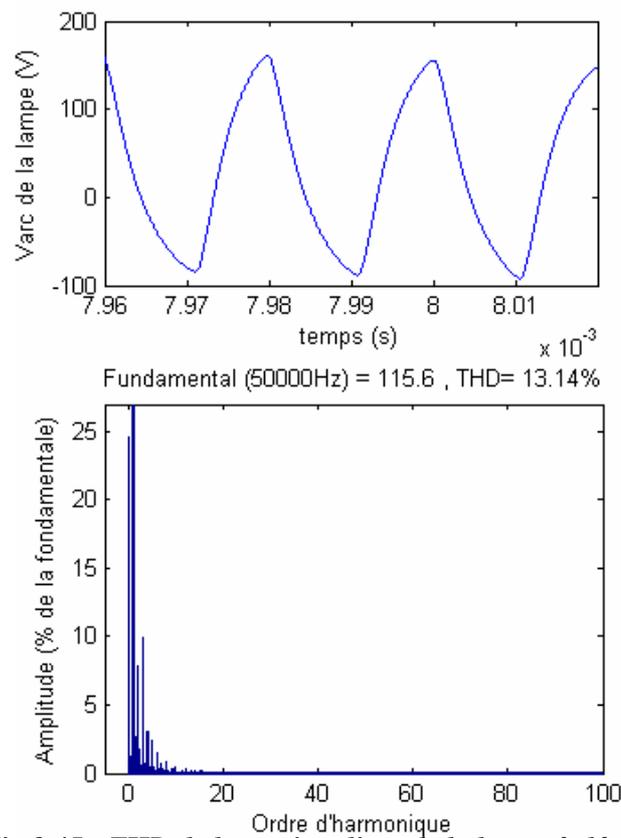


Fig.3.45 : *THD de la tension d'arc de la lampe à décharge.*

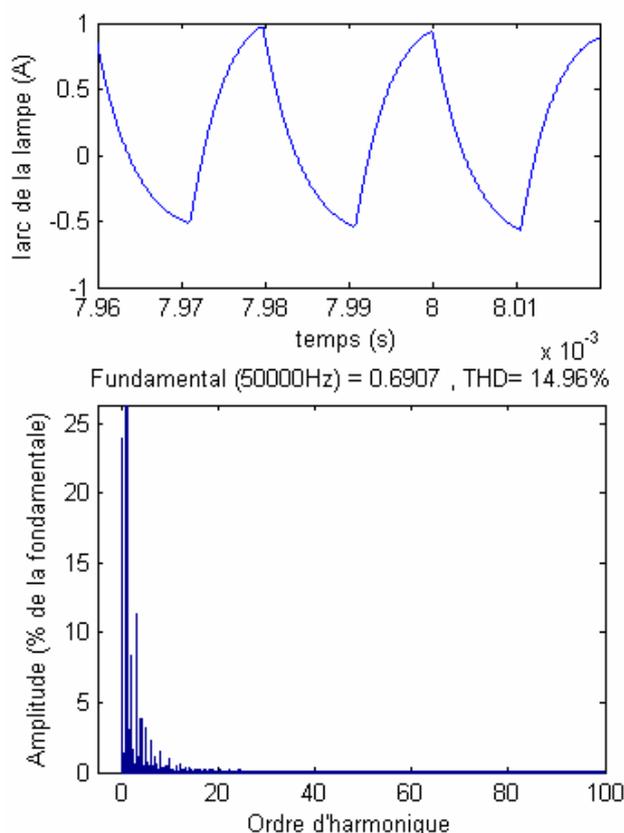


Fig.3.46: THD du courant d'arc de la lampe à décharge.

En comparant les résultats des trois ballasts étudiés, on remarque ce qui suit :

- Pour les mêmes conditions de fonctionnement, les 29 composants du ballast de la figure (3.17) et les 27 composants du ballast de la figure (3.21) sont réduits à 26 composants pour le ballast électronique de la figure (3.20).
- La tension d'alimentation est réduite à 420V pour le ballast de la figure (3.20), (elle était 500 V pour le ballast de la figure (3-17) et 2000 V pour celui de la figure (3.21)).
- Parmi les taux d'harmoniques THD des courants et des tensions ci-dessus, ceux du ballast électronique de la figure (3.20) sont les plus petits.
- Une certaine dissymétrie dans les formes d'ondes du courant et de la tension alimentant la lampe à décharge est détectée pour les ballasts des figures (3.17), (3.20) et (3.21).

En comparant les résultats du ballast en pont complet figure (3.16) avec ceux du meilleur ballast en demi-pont choisit de la comparaison faite précédemment (figure (3.20)), on remarque que :

- ❖ La tension d'alimentation est réduite à 325 V pour le ballast en pont complet.
- ❖ Les THDs de la tension ainsi que du courant du ballast en demi-pont qui étaient respectivement 6.51% et 10.41% sont réduits à 6.39% pour le ballast du pont complet.
- ❖ Mais le nombre de composants du ballast en pont-complet est 33 tandis que celui du ballast en demi pont choisit était de 26.

Pour améliorer les performances du ballast en demi pont de la figure (3-20), on a appliqué les paramètres du circuit résonant du tableau (3-4). On a obtenu les formes d'onde suivantes :

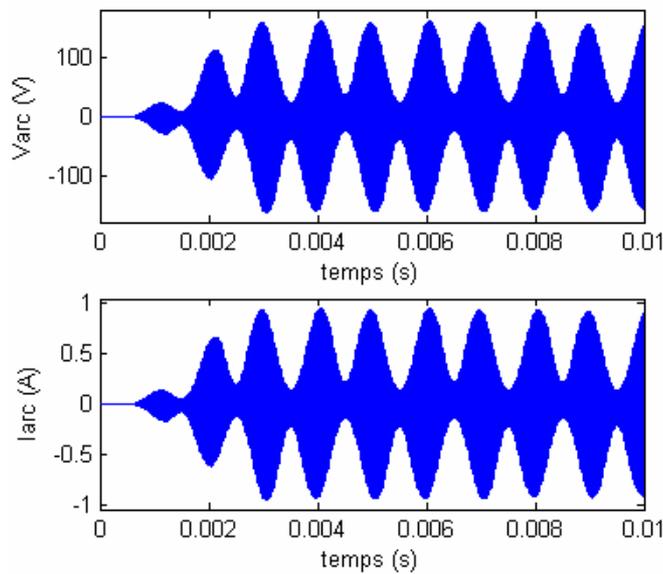


Fig.3.47: Tension et courant d'arc de la lampe à décharge.

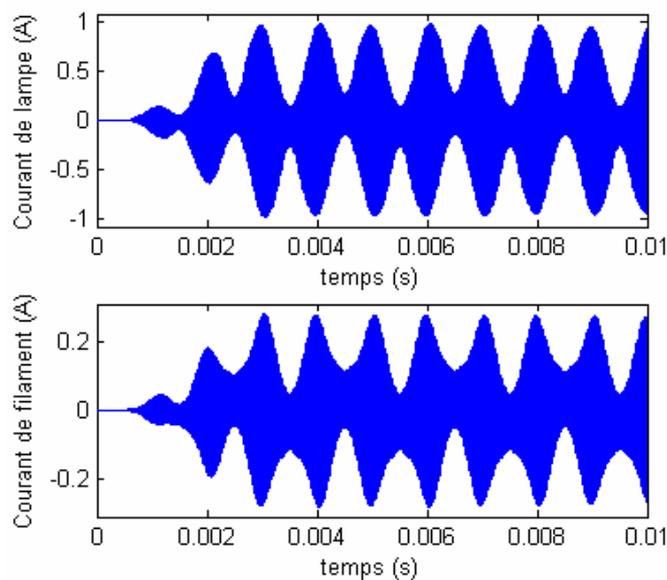


Fig.3.48: Courant total et courant de filament de la lampe à décharge.

On remarque une certaine symétrie dans les formes d'onde (on a éliminé les variations dans les amplitudes).

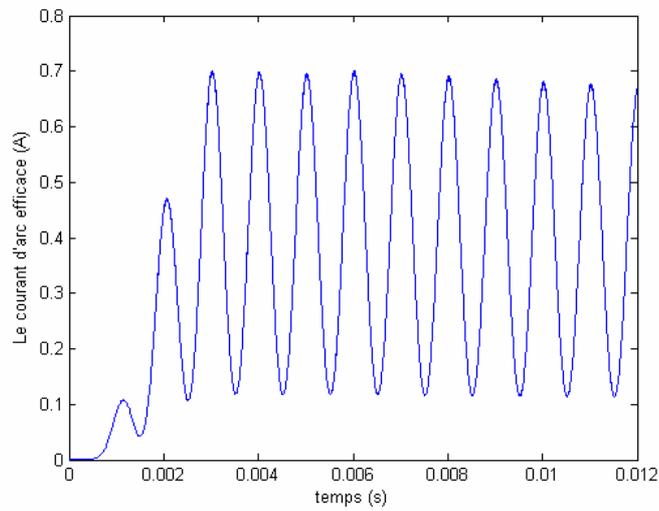


Fig.3.49 : Courant d'arc efficace de la lampe à décharge.

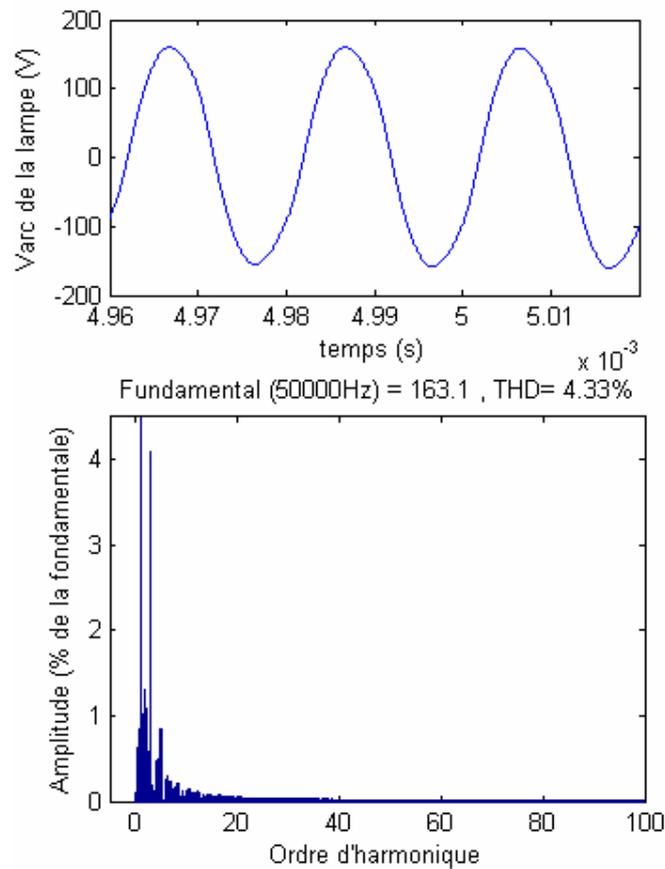


Fig.3.50 : THD de la tension d'arc de la lampe à décharge.

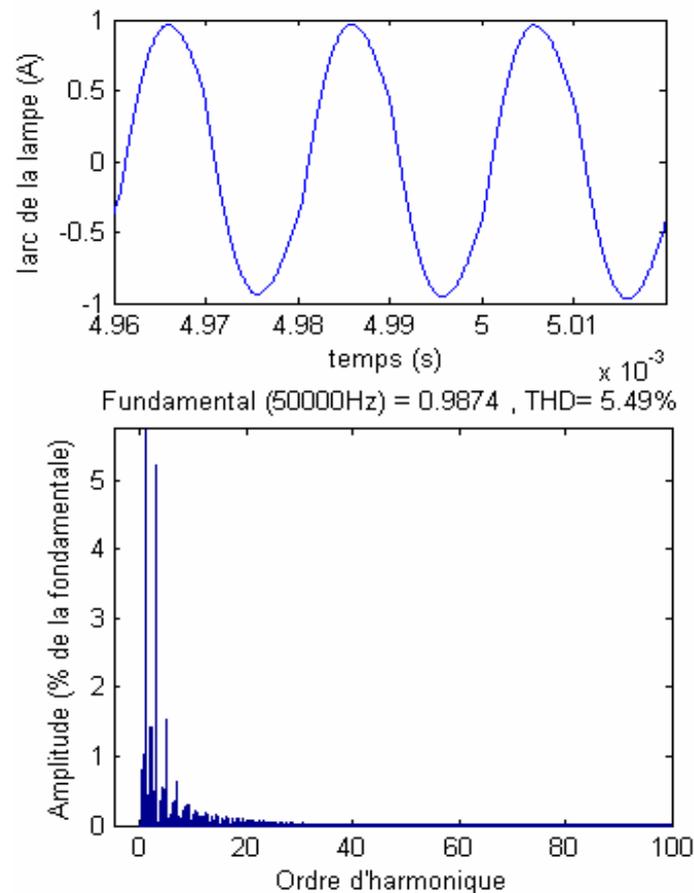


Fig.3.51: THD du courant d'arc de la lampe à décharge.

Les THDs sont considérablement réduits (4.33% pour la tension et 5.49% pour le courant).

III-9 CONCLUSION

Donc pour satisfaire les limites de la classe C de la norme C.E.I et pour minimiser le nombre de composants électronique (réduire le coût) on choisit le ballast de la figure (3.20) avec les paramètres du circuit résonant du tableau (3-4) pour alimenter notre lampe à décharge et sur ce on l'utilise pour l'étude de la stabilité et de la commande dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

Commande classique du ballast électronique

IV-1 COMMANDE D'UN BALLAST ELECTRONIQUE

Toute approche de commande d'un onduleur doit prendre en compte les deux contraintes suivantes :

- la réduction de la distorsion harmonique globale en régime transitoire et en régime permanent ;
- l'accès au réglage du fondamental de la tension de sortie à une valeur de référence [24].

IV-2 MODELISATION DU CONVERTISSEUR

L'onduleur en demi pont qui alimente la lampe à décharge à travers un circuit résonant formé de L_r et C_r est considéré comme un générateur de tension carrée $\pm E = V_{en}$.

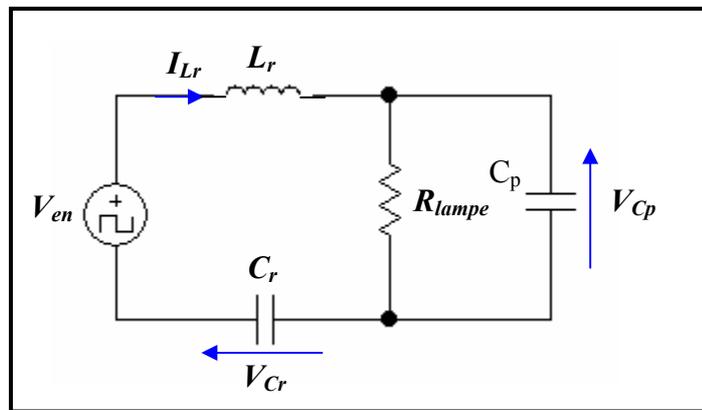


Fig.4.1 : Circuit équivalent du ballast électronique.

IV-3 MODELE MATHEMATIQUE DU SYSTEME

En se basant sur le circuit de la figure (4.1), on constate qu'il y a trois variables d'état I_{Lr} , V_{Cr} et V_{Cp} . Le système d'équations différentielles peut être écrit dans l'espace d'état comme suit [15] :

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial I_{Lr}}{\partial t} \\ \frac{\partial V_{Cr}}{\partial t} \\ \frac{\partial V_{Cp}}{\partial t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{-1}{L_r} & \frac{-1}{L_r} \\ \frac{1}{C_r} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_p} & 0 & \frac{-1}{RC_p} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{Lr} \\ V_{Cr} \\ V_{Cp} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{V_{en}}{L_r} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4-1)$$

$$\text{et } I_R = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{R} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{Lr} \\ V_{Cr} \\ V_{Cp} \end{pmatrix} \quad (4-2)$$

IV-4 ANALYSE DE LA STABILITE DU SYSTEME

IV-4-1 LA FONCTION DE TRANSFERT DU SYSTEME

La fonction de transfert peut être obtenue en utilisant la conception d'un diviseur de courant classique [50] :

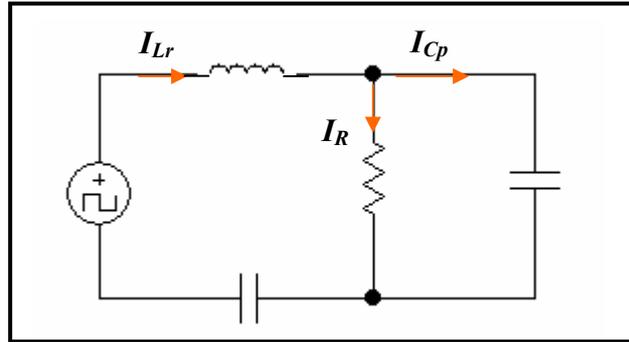


Fig.4.2 : Diviseur de courant

Le courant de la lampe est donné par :

$$I_R = I_{Lr} \left(\frac{\frac{1}{C_p S}}{R + \frac{1}{C_p S}} \right) \quad (4-3)$$

On aura alors

$$I_{Lr} = \frac{\left(R + \frac{1}{C_p S} \right)}{\frac{1}{C_p S}} I_R \quad (4-4)$$

L'équation de la maille donne :

$$V_{en} = \left[L_r S + \frac{1}{C_r S} + \frac{\frac{R}{C_p S}}{R + \frac{1}{C_p S}} \right] I_{Lr} \quad (4-5)$$

En injectant (4-4) dans (4-5) on aura la fonction de transfert suivante :

$$\frac{I_R}{V_{en}} = \frac{C_r S}{RL_r C_r C_p S^3 + L_r C_r S^2 + R(C_r + C_p)S + 1} \quad (4-6)$$

Et qui peut être écrite dans le domaine fréquentiel comme suit :

$$\frac{I_R}{V_{en}} = \frac{1}{\left[1 + \frac{C_p}{C_r} - \omega^2 L_r C_p + j \left(\frac{\omega L_r}{R} - \frac{1}{\omega C_r} \right) \right]} \quad (4-7)$$

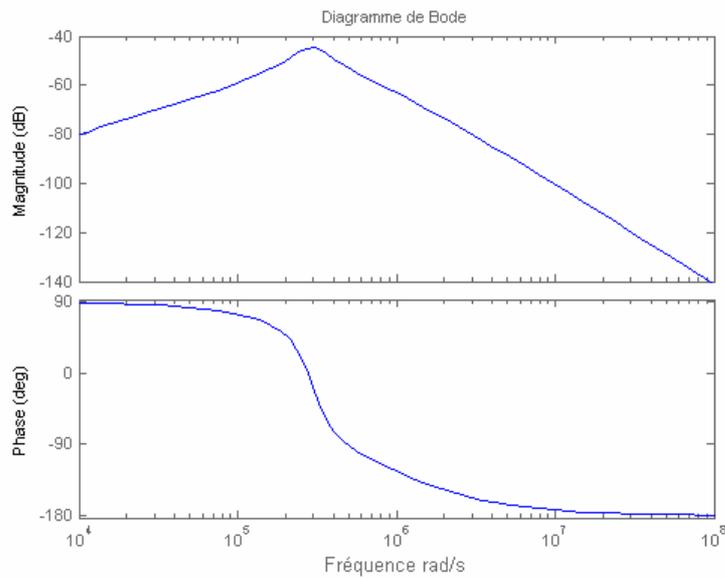


Fig. 4.3 : Diagramme de Bode du système en boucle ouverte.

Le diagramme de Bode en boucle ouverte de la figure (4.3) montre que le système a les caractéristiques d'un filtre passe bande.

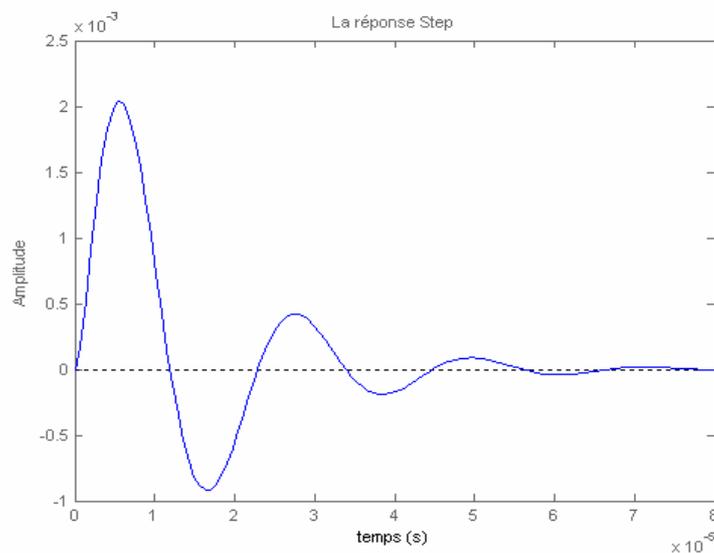


Fig. 4.4 : Réponse indicielle du système en boucle ouverte.

La réponse Step de la figure (4.4) montre que la présence du condensateur du circuit résonnant C_r ne laisse pas la courbe atteindre la valeur de référence (0.65), car ce condensateur ne laisse le courant circuler que pendant un temps minime (le temps qu'il se charge), puis il devient un interrupteur ouvert, ce qui explique le retour à zéro de la courbe.

Basé sur le circuit unifié [43], la fonction de transfert peut être écrite dans la représentation « per unit » comme suit :

$$\frac{I_R}{V_{en}} = \frac{\frac{1}{X_r \omega} S}{\frac{X_{Lr}}{\omega^3 X_r X_p} S^3 + \frac{X_{Lr}}{\omega^2 X_r} S^2 + \frac{1}{\omega} \left(\frac{1}{X_r} + \frac{1}{X_p} \right) S + 1} \quad (4-8)$$

Où :

$$R_b = R_{lampe}$$

$$X_{Lr} = \frac{L_r \omega}{R_b} = \begin{cases} 1.85 pu & \text{pour } f = 40KHz \\ 2.32 pu & \text{pour } f = 50KHz \end{cases}$$

$$X_r = \frac{1}{C_r \omega R_b} = \begin{cases} 2.26 pu & \text{pour } f = 40KHz \\ 1.8 pu & \text{pour } f = 50KHz \end{cases}$$

$$X_p = \frac{1}{C_p \omega R_b} = \begin{cases} 4.8 pu & \text{pour } f = 40KHz \\ 3.85 pu & \text{pour } f = 50KHz \end{cases}$$

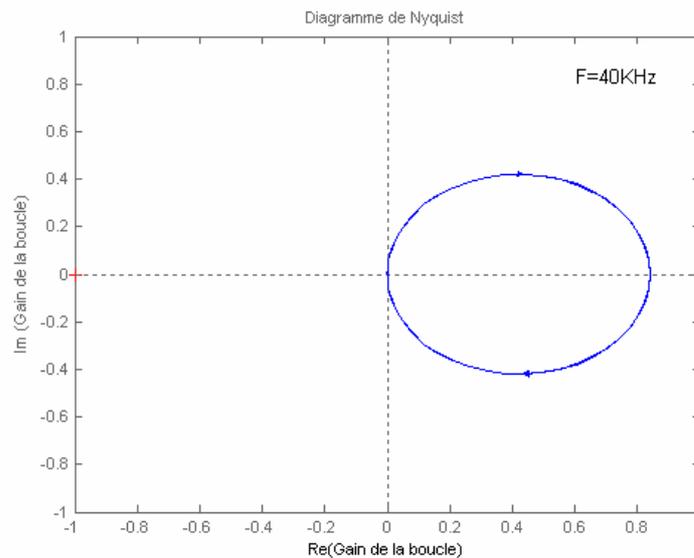


Fig. 4.5: Diagramme de Nyquist du système en boucle ouverte pour une fréquence de 40KHz.

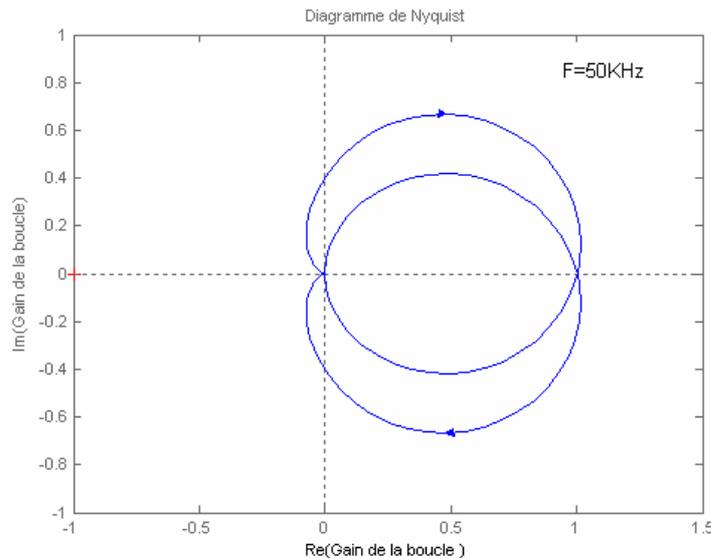


Fig. 4.6: Diagramme de Nyquist du système en boucle ouverte pour une fréquence de 50KHz.

La fréquence de résonance du ballast à l'étude est 42 KHz. Aux fréquences proches de la fréquence de résonance le ballast représente une basse impédance et l'instabilité peut se produire. On peut observer ceci dans les résultats de simulation, le diagramme de Nyquist de la figure (4.5) indique que le système est oscillant à 40KHz et celui de la figure (4.6) indique qu'il est stable à 50 KHz.

IV-5 LA COMMANDE DU BALLAST ELECTRONIQUE

IV-5-1 CORRECTION DU SYSTEME

La correction consiste à introduire un élément compensateur dans la boucle tel que la structure réalisée possède les caractéristiques désirées [21]. Une correction doit assurer :

- **Bonne précision** : le système doit opérer avec un minimum d'erreurs.
 - *) Erreur statique → introduire un intégrateur dans la chaîne directe.
 - *) Erreur dynamique → large bande passante, en introduisant un gain pour certaines fréquences.

Un correcteur intégral est rarement utilisé seul, car son effet ne devient sensible que lorsque l'erreur dure un certain temps. Pour obtenir une réponse initiale plus rapide, on l'utilise avec un correcteur proportionnel.

- **Bon amortissement** : la sortie doit suivre la fréquence sans larges dépassements et oscillations.

- **Robustesse** : les performances des correcteurs ne doivent pas être affectées par les variations des paramètres, ni par les perturbations.
- **Un bon degré de stabilité** :
 - *) gain faible en boucle ouverte → BP faible.
 - *) déphasage faible → minimum de 1/S.

IV-5-2 SYNTHÈSE DE LA COMMANDE

La régulation du courant est imposée par le projet qui demande une valeur constante du courant alimentant la lampe sur une plage de courant de 0.5 A à 1 A. Si on impose un courant constant, le flux lumineux de la lampe restera sensiblement constant. Pour obtenir un courant de valeur constante on doit mesurer en permanence la valeur du courant qui circule dans le circuit et le comparer avec la valeur de consigne du courant de la lampe. La différence sera transformée en fréquence de commande des transistors. Il existe une relation entre la fréquence et le courant passant dans la lampe et on peut modifier la valeur du courant en modifiant la valeur de la fréquence.

La sortie d'un régulateur P.I est de la forme :

$$U = U_0 + K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt \quad (4-9)$$

Sa transformée de Laplace est :

$$F_R(S) = \frac{U(S)}{E(S)} = K_p + \frac{K_I}{S} \quad (4-10)$$

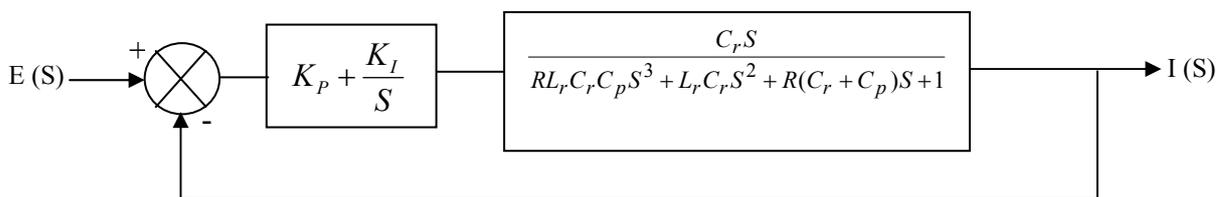


Fig. 4.7: Boucle fermée du système avec régulateur P.I.

IV-5-2-1 Méthode de placement des pôles

La dynamique de la réponse à un changement de consigne à une perturbation dépend du polynôme $Q(S) = 1 + C(S)G(S)$ (équation caractéristique du système), 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 Q . La

méthode qui consiste à calculer les coefficients du régulateur de façon à obtenir les pôles s'appelle *Synthèse par placement des pôles*. Le réglage des performances de la boucle s'effectue au travers du choix des pôles en boucle fermée [37].

- On calcule l'équation caractéristique du système :

$$RLC_r C_p S^3 + L_r C_r S^2 + [R(C_r + C_p) + K_P C_r] S + K_I C_r + 1 = 0$$

$$S^3 + \frac{1}{RC_p} S^2 + \left[\frac{1}{L_r C_p} + \frac{1}{L_r C_r} + \frac{K_P}{RL_r C_p} \right] S + \frac{K_I}{RL_r C_p} + \frac{1}{RL_r C_r C_p} = 0 \quad (4-11)$$

- On choisit trois pôles sur la même verticale avec un $\zeta = 0.7$

$$S_1 = -\alpha - j\alpha, \quad S_2 = -\alpha + j\alpha \quad \text{et} \quad S_3 = -\alpha$$

et on calcule ensuite l'équation caractéristique pour ces trois pôles, on aura :

$$S^3 + 3\alpha S^2 + 4\alpha^2 S + 2\alpha^3 = 0 \quad (4-12)$$

par identification entre (4-11) et (4-12) on aura :

$$K_P = 4RL_r C_p \alpha^2 - R \left(1 + \frac{C_p}{C_r} \right) \quad (4-13)$$

$$K_I = 2RL_r C_p \alpha^3 - \frac{1}{C_r}$$

IV-6 RESULTATS DE LA SIMULATION

Les formes d'ondes obtenues de la simulation du système après introduction du P.I sont les suivantes :

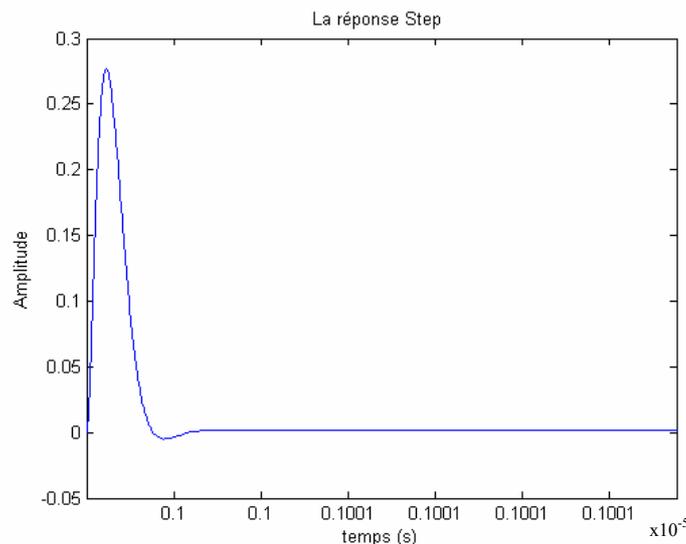


Fig. 4.8 : Réponse indicielle du système en boucle fermée avec P.I.

On constate une amélioration dans la réponse indicielle. Les oscillations sont éliminées et le régime statique est rapidement atteint.

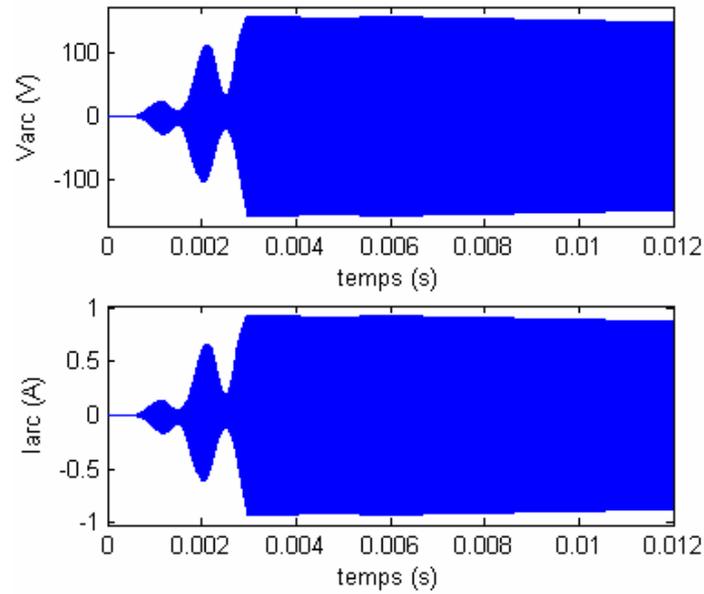


Fig. 4.9 : Tension et courant d'arc de la lampe à décharge.

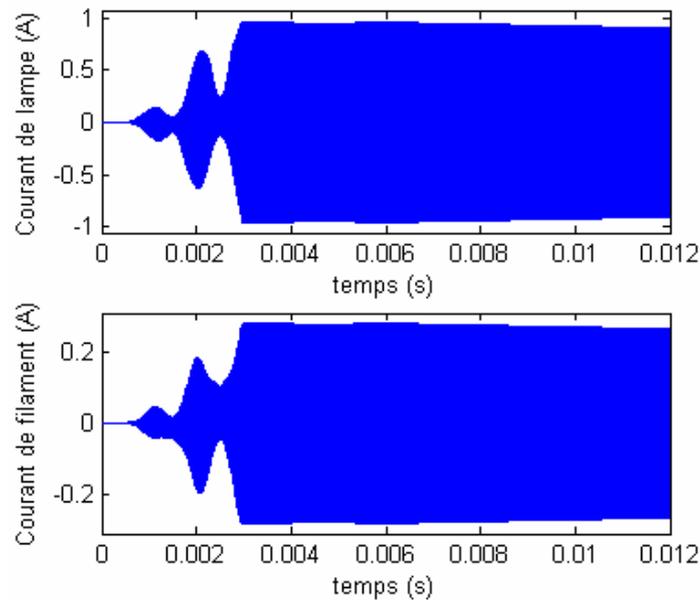


Fig. 4.10 : Courant total et courant de filament de la lampe à décharge.

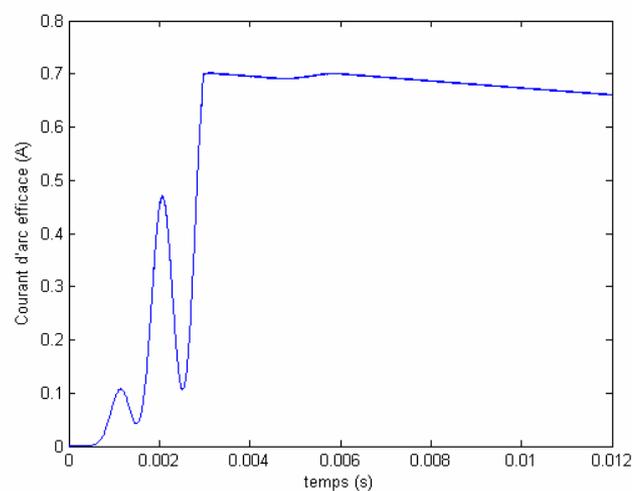


Fig. 4.11: Courant d'arc efficace de la lampe à décharge.

Les figures (4.9), (4.10) et (4.11) montrent clairement les améliorations apportées aux formes d'ondes comparées avec celles du chapitre III (figures (3.47), (3.48) et (3.49)). En effet l'introduction du P.I dans la boucle fermée a éliminé les oscillations des enveloppes, on constate qu'après le régime transitoire, les amplitudes deviennent constantes et le système est plus stable.

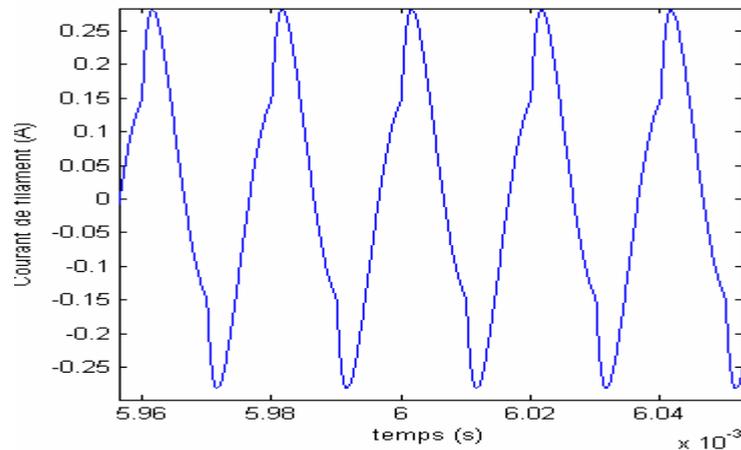


Fig. 4.12: Courant de filament de la lampe à décharge.

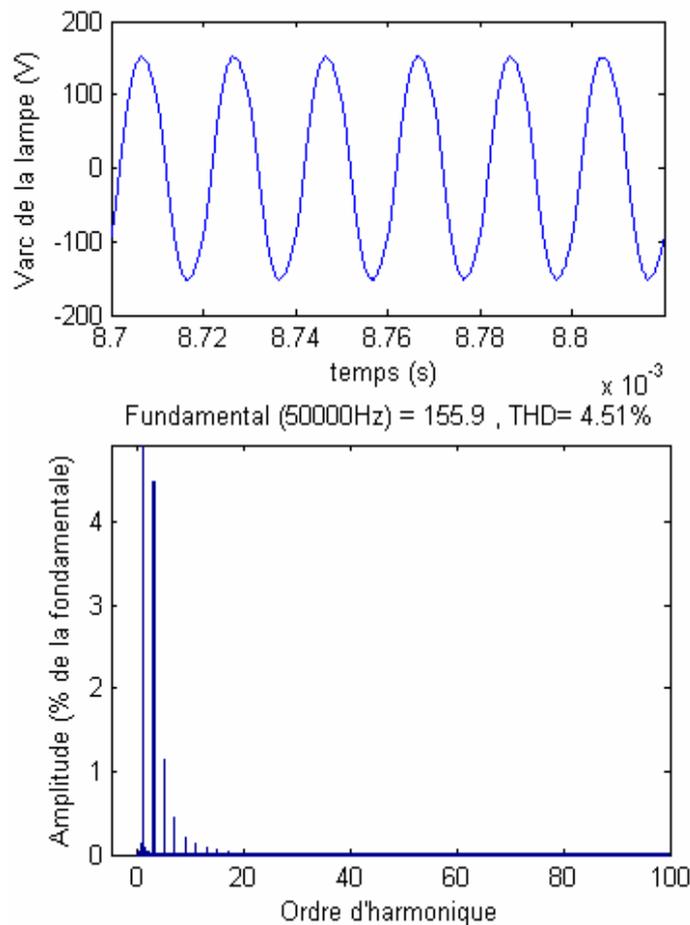


Fig. 4.13: THD de la tension d'arc de la lampe à décharge.

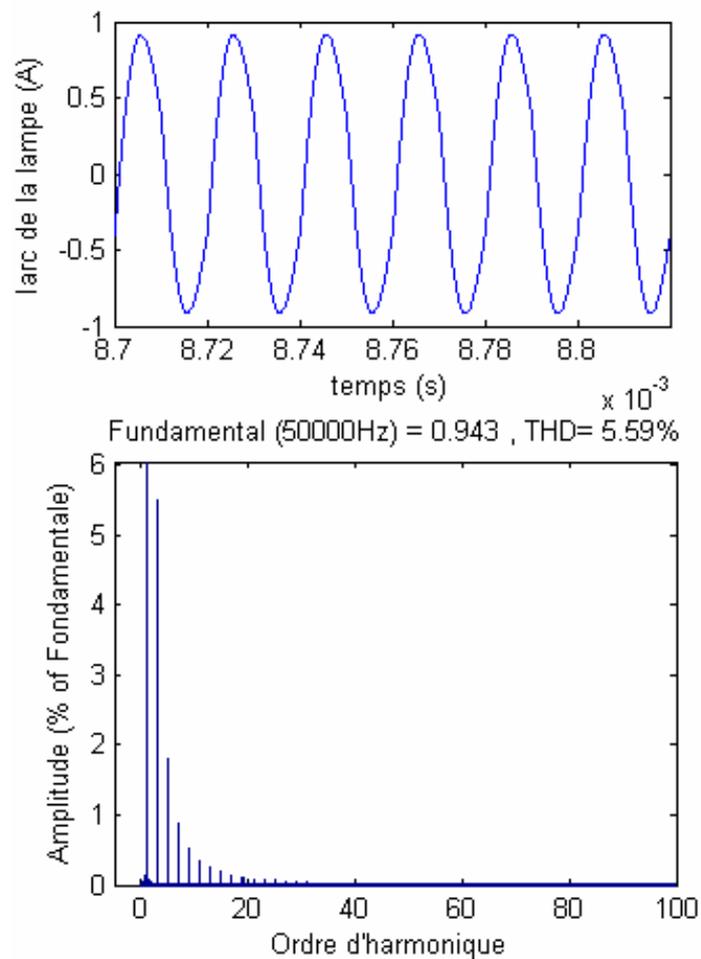


Fig. 4.14: THD du courant d'arc de la lampe à décharge.

Les figures (4.13) et (4.14), montrent respectivement les formes d'ondes de la tension et du courant d'arc de la lampe ainsi que leurs spectres d'harmoniques. Ces formes d'ondes sont presque sinusoïdales, ceci est justifié par les THDs calculés (4.51% pour la tension et 5.59% pour le courant).

IV-6-1 TEST DE LA ROBUSTESSE

Comme on a vu au chapitre III, la résistance de la lampe à décharge ainsi que son courant varient fortement avec la variation de la température ambiante du bassin dans lequel elle est immergée et avec sa puissance d'arc.

La figure (4.15) montre clairement la dépendance entre le courant, la température et la puissance d'arc de la lampe.

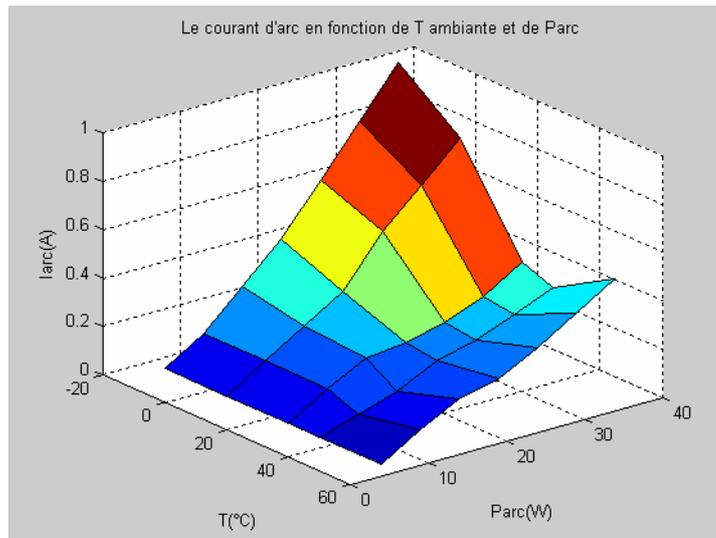


Fig. 4.15: Courant d'arc en fonction de la température et de la puissance d'arc de la lampe à décharge.

En introduisant une perturbation de -20% dans le courant à l'instant 0.005 S on obtient les formes d'ondes suivantes :

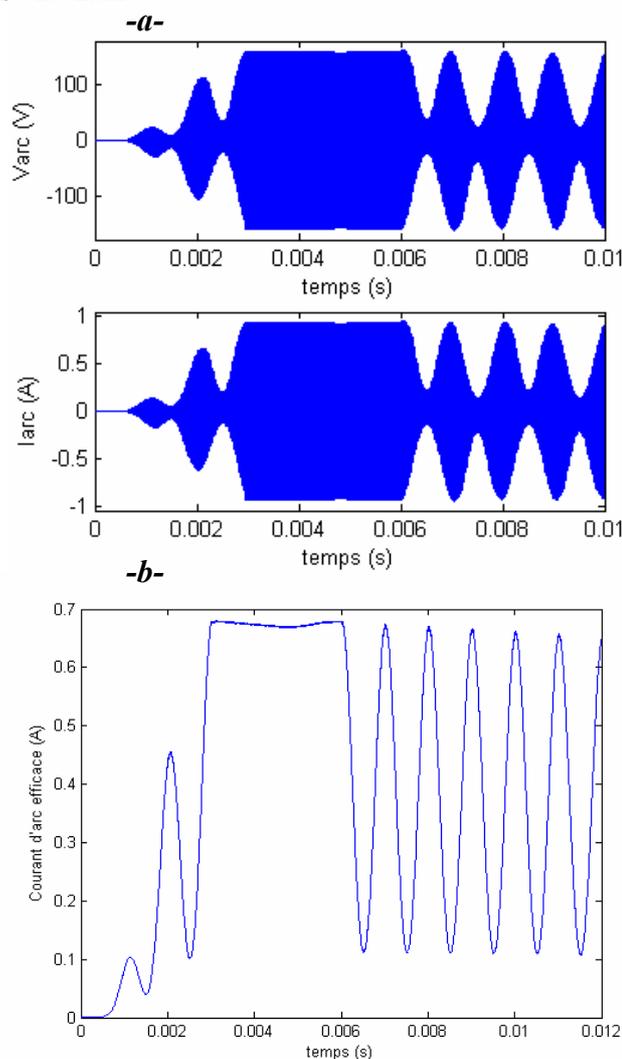


Fig. 4.16: Formes d'ondes obtenues lors de l'introduction d'une perturbation de -20%.

La figure (4.16) montre qu'au moment où la perturbation intervient le système perd complètement sa stabilité.

La perturbation introduite à présent est de -10% dans le courant à l'instant 0.005 S on obtient les formes d'ondes suivantes :

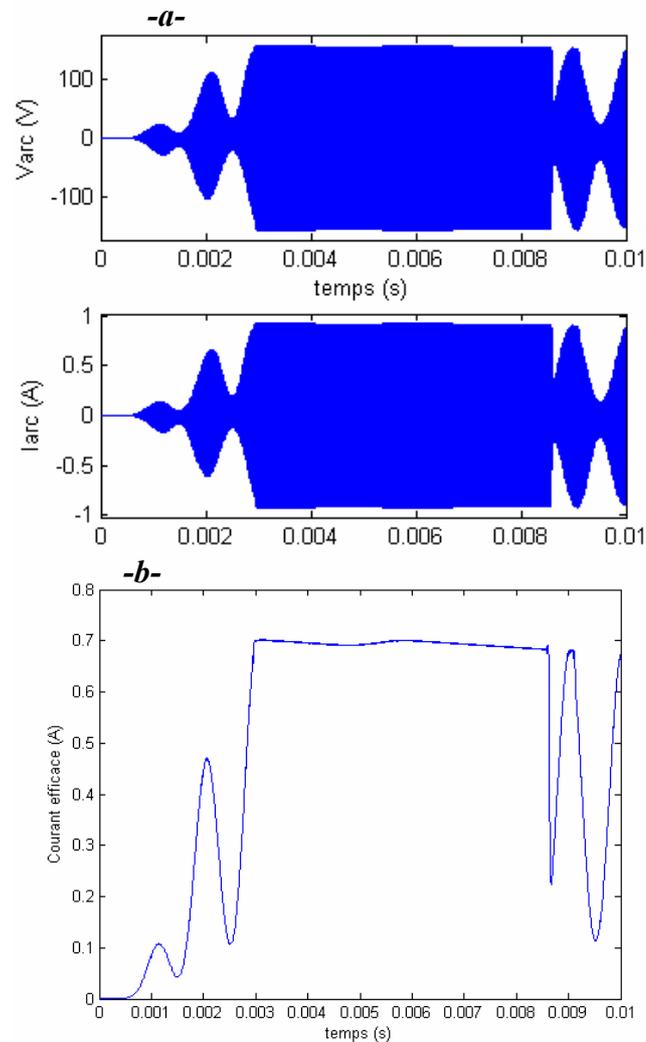


Fig. 4.17: Formes d'ondes obtenues lors de l'introduction d'une perturbation de -10%.

De la figure (4.17) on remarque que la perturbation a été introduite à l'instant 0.005 S tandis que le système conserve sa stabilité jusqu'à l'instant 0.0085 S où il reprend ses oscillations.

Enfin, la dernière perturbation introduite est de -5% dans le courant à l'instant 0.005 S on obtient les formes d'ondes suivantes :

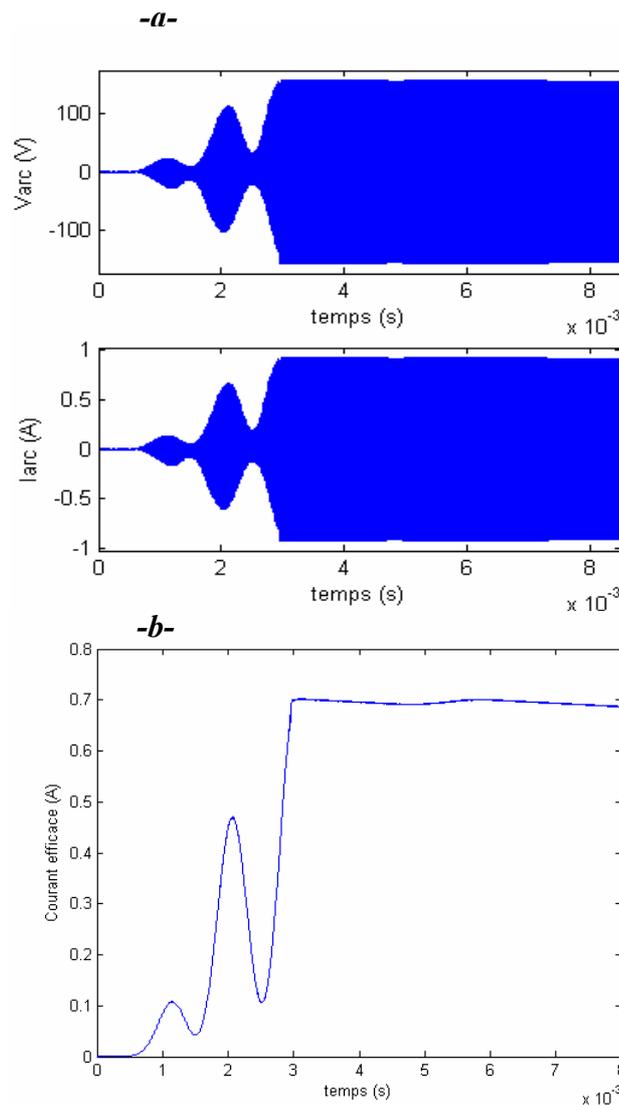


Fig. 4.18: Formes d'ondes obtenues lors de l'introduction d'une perturbation de -5%.

De la figure (4.18), on remarque que le système ne répond pas à cette perturbation, et maintient sa stabilité. Le système ne fait donc pas preuve d'une grande robustesse car il ne supporte que des variations allant jusqu'à -5%.

Remarque : le système conserve sa stabilité pour des perturbations de +20%, +10% et +5%.

IV-7 CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis d'analyser les performances de la stratégie de commande appliquée au ballast électronique utilisé pour alimenter la lampe à décharge destinée au traitement biologique de l'eau par rayonnement ultraviolet. L'analyse des résultats de simulation, montre que cette stratégie de contrôle a de bonnes performances statiques et dynamiques, et garantit un courant de sortie sinusoïdal avec un faible facteur de distorsion mais elle n'est pas très robuste.

Chapitre V

Application de la logique floue
Pour la commande d'un ballast
électronique

V-1 INTRODUCTION

Un processus est généralement caractérisé par un ensemble d'entrées ou grandeurs de commande et un ensemble de sorties ou grandeurs à commander. La commande d'un processus consiste à faire évaluer les entrées pour obtenir un comportement souhaité des sorties. La loi d'évolution des entrées qui tient compte de l'évolution des observations effectuées sur le processus est appelée loi de commande. Le contrôleur est l'organe chargé d'engendrer la loi de commande. Un des rôles de l'automaticien est de synthétiser la loi de commande qui permet de garantir les performances dynamiques désirées.

L'automatique fournit une large famille de méthodes pour synthétiser les lois de commande lorsqu'on dispose d'un modèle suffisamment précis du processus (généralement un ensemble d'équations algébriques et différentielles reliant les entrées aux sorties).

Lorsqu'on ne dispose pas d'un modèle, le concept de la logique floue peut être considéré comme une solution adoptée. Elle met en œuvre un jeu de règles pour représenter la loi de commande en se basant sur les connaissances expertes.

EXEMPLE :

Considérons l'exemple de la conduite automobile à l'approche d'un carrefour contrôlé par des feux tricolores. Le processus de conduite met en œuvre par les quelques règles élémentaires suivantes :

SI *le feu est rouge* **ET SI** *ma vitesse est élevée* **ET SI** *le feu est proche* **ALORS** *je freine fort ;*

SI *le feu est rouge* **ET SI** *ma vitesse est faible* **ET SI** *le feu est loin* **ALORS** *je maintiens ma vitesse ;*

SI *le feu est rouge* **ET SI** *ma vitesse est moyenne* **ET SI** *le feu est loin* **ALORS** *je freine doucement ;*

SI *le feu est rouge* **ET SI** *ma vitesse est faible* **ET SI** *le feu est proche* **ALORS** *j'accélère ;*

- Le conducteur contrôle le véhicule sans avoir recourt à un modèle mathématique, un algorithme ou la connaissance du processus physique impliqué.
- Le modèle implicite de nature qualitative est une représentation descriptive du fonctionnement du processus plutôt qu'une base de connaissance ou une description entrées/sorties.
- La logique floue formalise la représentation d'un processus ne pouvant être décrit de manière systématique et logique exactement comme le fait votre cerveau.

- Elle apprécie les variables d'entrées de façon approximative (faible, élevée, loin, proche), fait de même pour les variables de sorties (freinage léger ou fort) et édicte un ensemble de règles permettant de déterminer les sorties en fonction des entrées.

La logique floue a connue un intérêt important dans la communauté scientifique au cours des dernières années. L'une des raisons principales est l'énorme succès des équipements domestiques produits par l'industrie Japonaise, utilisant des régulateurs flous : ce marché atteignait 2 milliards de dollars en 1990.

Les systèmes flous appartiennent à la classe des « *systemes à base de connaissance* ». Leur but principal consiste à implémenter un savoir faire humain, ou des règles heuristiques, sous la forme d'un programme informatique. La logique floue fournit un formalisme mathématique pour réaliser ce but. Les régulateurs flous modélisent l'expérience humaine sous la forme de règles linguistiques « si...alors... » ; un moteur d'inférences calcule les actions de commande pour chacune des situations données. Les algorithmes basés sur la logique floue sont considérés comme une solution très intéressante pour le réglage des systèmes non linéaires ou les systèmes pour les quels il n'existe pas de modèles mathématique.

V-1-1 HISTORIQUE

Au début des années 30, le logicien Polonais **Jan Lukasiewicz** a développé le système logique avec trois valeurs puis l'a étendu à tous les nombres rationnels entre 0 et 1. Il a défini la logique floue comme logique qui définit la fonction générale de vérité, laquelle associe à une affirmation un niveau de vérité qui peut prendre toutes les valeurs entre 0(faux) et 1(vrai).

Dans les années 30, **Max Black** a appliqué la logique floue aux ensembles d'éléments ou de symboles. Il a appelé imprécision l'incertitude de ces ensembles. Il a dessiné la première fonction d'appartenance « *membership function* » d'un ensemble flou.

En 1965, **Lotfi Zadeh**, de l'université de Berkeley en Californie (USA), a publié l'article « *Fuzzy sets* » dans lequel il a développé la théorie des ensembles flous et introduit le terme « *Fuzzy* » dans la littérature technique. C'est le début des tentatives de modélisation de systèmes par les relations floues. Les premières investigations de **Zadeh** étaient l'utilisation de la logique floue pour représenter le langage naturel. Il a été le premier à formaliser les règles floues « *Fuzzy rules* » et a suggérer une approche « *système expert* » au réglage automatique, où la règle de commande est remplacée par des règles floues.

Les premiers résultats en commande floue ont été publiés par **Mamdani** et **Assilian** en 1975, ce qui a encouragé différentes activités en Angleterre, au Danemark et en France.

Après 1980, les recherches s'arrêtent en Europe mais les Japonais les reprennent. Leur industrie a lancé de nombreux produits basés sur la logique floue (plus de 2000), notamment des appareils électroménagers et du matériel audio-visuel. En 1983, la compagnie **Fuji Electric** utilise la logique floue pour la conduite de procédés de purification d'eau. En 1987, les Japonais ont réalisé une commande d'un métro avec un fonctionnement plus confortable et économique et une précision d'arrêt. La mise en œuvre de la logique floue est maintenant facilitée par la disponibilité de microprocesseurs dédiés et d'outils puissants de développement.

Actuellement, la logique floue est considérée comme un outil de base, et les principales directions de recherche sont la combinaison de la logique floue, des algorithmes génétiques et des réseaux de neurones [37].

V-2 THEORIE DES ENSEMBLES FLOUS

V-2-1 ENSEMBLE BINAIRE CLASSIQUE

Soit un ensemble U continu ou non, fini ou infini, tel que « $u \in U$ » désigne un ensemble de U . A est un sous ensemble binaire ou ordinaire de U lorsque $A \subset U$. L'ensemble ordinaire A est défini par sa fonction caractéristique (ou fonction d'appartenance) telle que :

$$\chi_A : U \rightarrow \{0,1\}$$

$$\chi_A(u) : \begin{cases} 1 & ; & \text{si } u \in A \\ 0 & ; & \text{sinon} \end{cases} \quad (5-1)$$

U représente l'ensemble de référence (référentiel) ou *univers de discours*.

V-2-2 ENSEMBLE FLOU

La notion d'ensemble flou permet des graduations dans l'appartenance d'un élément à une classe, c'est-à-dire autorise un élément à appartenir plus au moins fortement à cette classe.

Soit un référentiel U dénombrable ou non et u un élément de U , alors un ensemble flou A de U est un ensemble de couples tel que :

$$A = \{(u, \mu_A(u)) \mid u \in U\} \quad (5-2)$$

$\mu_A(u)$ est le degré d'appartenance de u à A . $\mu_A(u)$ est attribué à u par la fonction d'appartenance de A qui prend ses valeurs dans un ensemble totalement ordonné M , l'ensemble d'appartenance généralement pris comme l'intervalle $[0,1]$.

La fonction d'appartenance d'un ensemble flou A est définie par :

$$\begin{aligned} \mu_A : U &\rightarrow \{0,1\} \\ u &\rightarrow \mu_A(u) \end{aligned} \quad (5-3)$$

EXEMPLE

Considérons le terme « chaud » qui définit l'ensemble de toutes les températures plus élevées que 30°C . Alors la fonction caractéristique de cet ensemble est dénotée par « χ_{chaud} » peut être décrite comme montrée dans la figure (5-1).

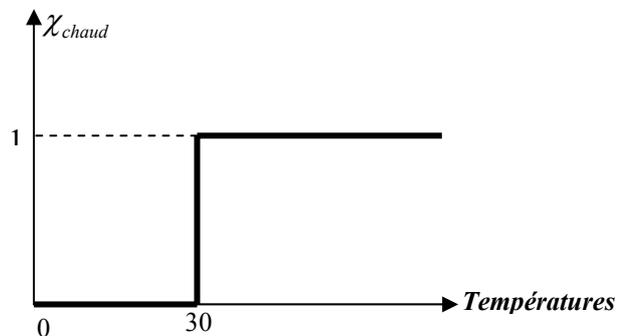


Fig.5.1 : Fonction caractéristique de l'ensemble précis température chaude.

Ainsi, la température mesurée de 29.999°C est considérée comme pas chaud ! donc elle n'appartient pas à l'ensemble des températures chaudes et ainsi, $\chi_{chaud}(29.999)=0$.

Si on considère dans le même exemple que la fonction caractéristique appelée aussi fonction d'appartenance du terme « chaud » dénotée par « μ_{chaud} » est définie en se basant sur l'opinion humaine.

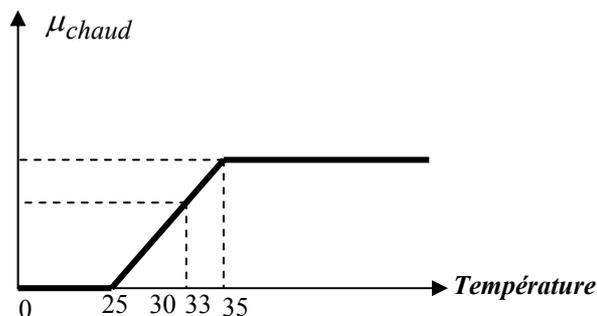


Fig.5.2 : Fonction d'appartenance de l'ensemble flou température chaude.

On peut considérer que 29°C est toujours assez chaud et que 31°C est toujours chaud mais pas autant que 35°C et plus. Ceci résulte dans une transition graduelle d'une appartenance (complètement juste) à une non appartenance (pas juste du tout) [75].

V-2-3 FONCTION D'APPARTENANCE

Une fonction d'appartenance est constituée de 03 parties :

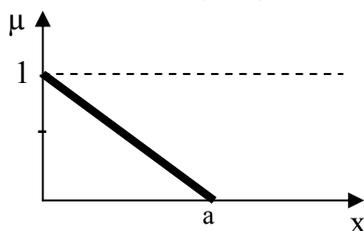
- Une zone telle que $\mu_A(x) = 0 \rightarrow$ non appartenance.
- Une zone telle que $\mu_A(x) = 1 \rightarrow$ appartenance totale (noyau).
- Une zone telle que $\mu_A(x) \in]0, 1[\rightarrow$ transitoire.

Son rôle est de préciser numériquement sur un support donné, la signification d'un ensemble flou, énoncé en principe sous forme linguistique. Elle peut être définie analytiquement pour l'ensemble du support, ou sous forme discrète (expertise humain).

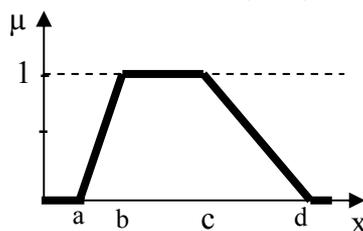
L'allure de la fonction d'appartenance est à choisir selon l'application traitée. Cependant, pour un ensemble flou, ce qui importe est moins la valeur précise des degrés d'appartenance des éléments du support que l'ordonnement de ces règles d'appartenances entre eux.

Les fonctions d'appartenances les plus utilisées sont en forme de trapèze ou de triangle, et permettent de respecter cette contrainte tout en gardant une forme analytique très simple. Dans certaines applications, où l'on doit dériver la fonction d'appartenance, on choisira plutôt des fonctions en S ou des fonctions de type Gaussienne continûment dérivables sur leurs supports.

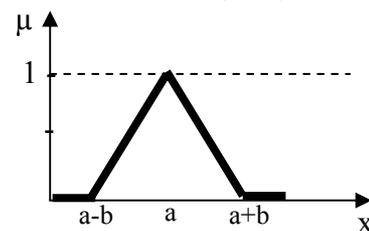
Linéaire Zimmerman (1978)
Sakawa (1986)



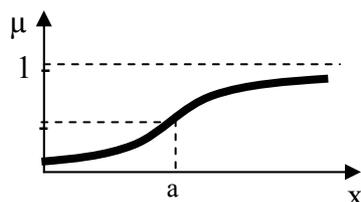
Linéaire par parties Bortolan (1985)
Chen (1985)



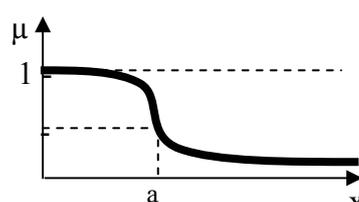
triangulaire Heshmaty (1985)
Tanaka (1982)



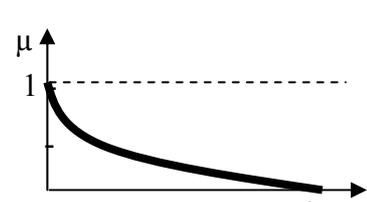
En forme de S Krusinska (1986)



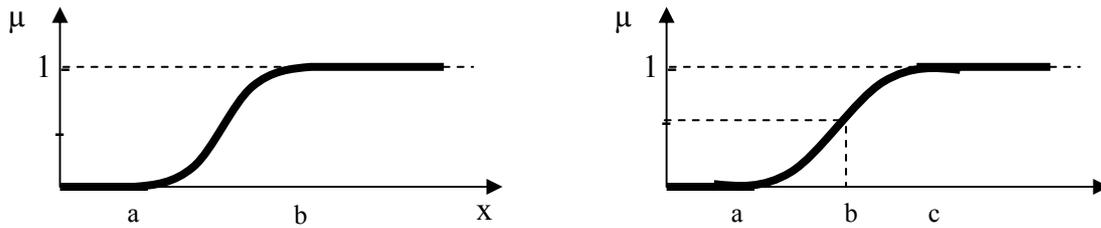
Dimitru (1982)



Dimitru (1986)



Svarowski (1987)



Zadeh (191975) En forme de P(deux courbes en S symétriques)

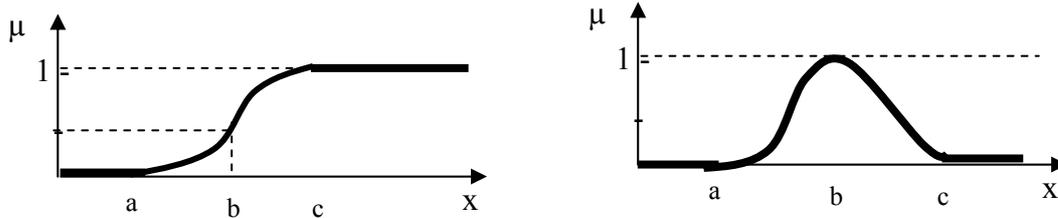


Fig.5.3 : Forme des fonctions d'appartenance.

V-2-4 UNIVERS DE DISCOURS

Les éléments d'un ensemble flou sont pris à partir d'un *univers de discours* ou *univers* tout court. L'univers contient tous les éléments possibles y compris les éléments de l'ensemble flou en question.

EXEMPLE

L'ensemble des nombres $x \gg 10$ (nombre très grand devant 10) peut avoir comme univers de discours l'ensemble des nombres positifs.

PRESENTATION DISCRETE ET CONTINUE :

Lorsque cet intervalle se réduit aux valeurs $\{0,1\}$, la fonction d'appartenance, prend alors les valeurs binaires 0 et 1 et l'ensemble A est un ensemble ordinaire.

Si A est un ensemble flou discret fini, il peut être exprimé par :

$$A = \mu_A(u_1)/u_1 + \dots + \mu_A(u_n)/u_n = \sum_{i=1}^n \mu_A(u_i)/u_i \tag{5-4}$$

Où « + » représente l'opérateur union et non l'addition arithmétique et « / » symbolise une certaine fonction d'appartenance à une valeur sur l'univers de discours.

On peut l'écrire aussi sous la forme suivante :

$$A = \int \mu_A(u) / u \tag{5-5}$$

EXEMPLE

Soit l'univers de discours : $U = \{0,1,2,\dots,10\}$

-l'ensemble flou « A_1 » des entiers proches de « 0 » est exprimé par :

$$A_1 = 1.0/0 + 0.9/1 + 0.75/2 + 0.5/3 + 0.2/4 + 0.1/5$$

-l'ensemble flou « A_2 » des « entiers approximativement égaux à 5 » est exprimé par :

$$A_2 = 0.17/0+0.25/1+0.35/2+0.56/3+0.83/4+1.0/5+0.83/6+0.56/7+0.35/8+0.25/9+ 0.17/10.$$

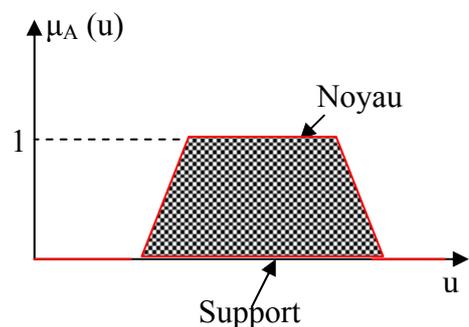
V-2-5 CARACTERISTIQUES D'UN ENSEMBLE FLOU

Soit A un sous ensemble flou de U . On définit les caractéristiques suivantes propre à cet ensemble flou.

❖ **Support :**

Le support de A est la partie de U sur laquelle la fonction d'appartenance de « A » n'est pas nulle.

$$Supp(A) = \{u \in U / \mu_A(u) \neq 0\} \quad (5-6)$$



Exemple : soit l'ensemble flou « jeune » définit par :

$$A = \{1/10, 0.8/20, 0.6/30, 0.2/40, 0.1/50, 0/70, 0/80\}$$

alors $Supp(A) = \{10, 20, 30, 40, 50\}$

Fig.5.4 : Caractéristiques d'un ensemble flou.

❖ **Noyau :**

Le noyau de A est l'ensemble des éléments de U pour les quelles la fonction d'appartenance de A vaut 1.

$$Noy(A) \{u \in U / \mu_A(u) = 1\} \quad (5-7)$$

Autrement dit le noyau est constitué des éléments qui satisfont pleinement la caractéristique vague définie par A . Lorsque le noyau n'est pas vide, on dit que l'ensemble flou A est normal ou normalisé, sinon on dit qu'il est sous-normal. Si A est classique alors :

$$Noy(A) = A.$$

Exemple: soit l'ensemble « vieux » définit par :

$$B = \{0/10, 0.1/20, 0.3/30, 0.5/40, 0.7/50, 0.9/60, 1/70, 1/80\}$$

alors $Noy(B) = \{70, 80\}$

❖ **Hauteur :**

La hauteur d'un ensemble flou A dans U est la valeur maximale de la fonction d'appartenance ; c'est le plus grand degré d'appartenance de A .

$$H(A) = \max (\mu_A(u) ; u \in U) \quad (5-8)$$

Si $\text{Noy}(A) \neq \emptyset$ alors la hauteur $H(A) = 1$

❖ **α –coupe ou coupe de niveau α :**

On appelle coupe de niveau α ou α -coupe de l'ensemble flou A pour une valeur donnée de $\alpha \in [0, 1]$, le sous ensemble A_α de U défini par :

$$A_\alpha = \{x ; \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (5-9)$$

Une α -coupe telle que $\mu_A(x) \geq \alpha, \forall x \in A_\alpha$ est dite stricte.

On appelle α -niveau ou α -coupe telle que $\mu_A(x) = \alpha$ pour tout $x \in A_\alpha$ et on note par :

$$A^\alpha = \{x ; \mu_A(x) = \alpha\} \quad (5-10)$$

On remarque qu'une α -coupe définit un seuil de satisfaction du caractère flou énoncé par A .

Exemple : soit l'ensemble flou A définit par :

$$A = \{0/10, 0.1/20, 0.3/30, 0.5/40, 0.7/50, 0.9/60, 1/70, 1/80\}$$

- Supposons qu'on s'intéresse uniquement aux individus d'au moins 40 ans, on définit alors une coupe de niveau 0.5 ou $A_{0.5}$ telle que $A_{0.5} = \{40, 50, 60, 70, 80\}$.
- Dans le cas des individus de plus de 40 ans, on a une 0.5-coupe stricte $A_{0.5} = \{50, 60, 70, 80\}$.
- Maintenant supposant qu'on cherche les individus de 50 ans, on a alors un 0.7-niveau

$$A^{0.7} = \{50\}$$

V-2-6 OPERATIONS SUR LES ENSEMBLES FLOUS

Soit A et B les deux sous ensembles flous dans un univers U et u est un élément de U .

V-2-6-1 Egalité

$B=A$ si et seulement si $\mu_A(u) = \mu_B(u)$ pour tout $u \in U$.

V-2-6-2 Inclusion

$B \subset A$ si et seulement si $\mu_A(u) \geq \mu_B(u)$ pour tout $u \in U$.

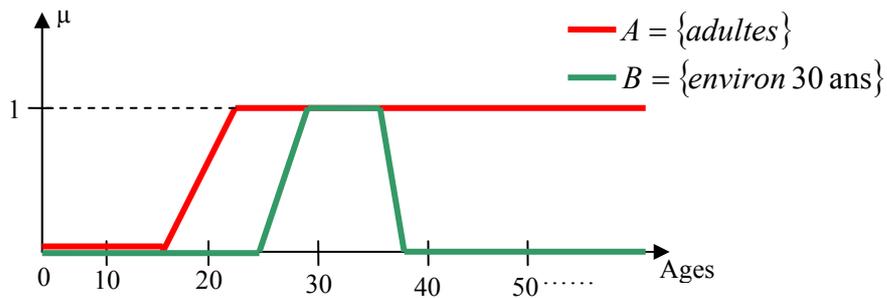


Fig.5.5 : Inclusion.

V-2-6-3 Intersection

$C = B \cap A$ si et seulement si pour tout u de U :

$$\mu_C(u) = \min(\mu_A(u), \mu_B(u))$$

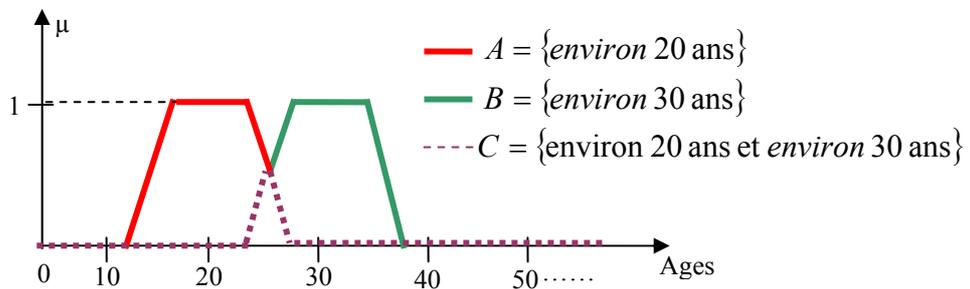


Fig.5.6 : Intersection.

V-2-6-4 Union

$C = B \cup A$ si et seulement si pour tout u de U :

$$\mu_C(u) = \max(\mu_A(u), \mu_B(u))$$

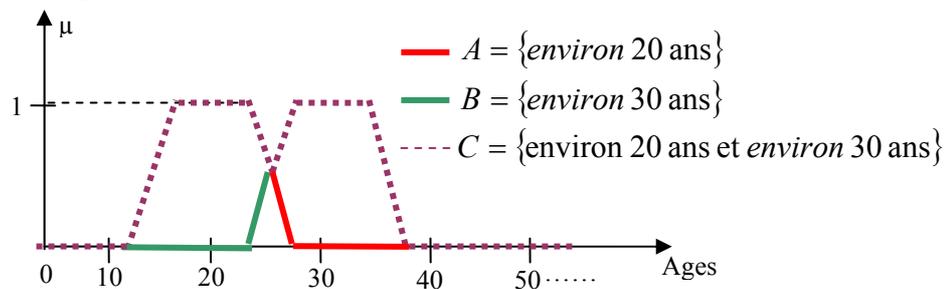


Fig.5.7: Union.

V-2-6-5 Complément

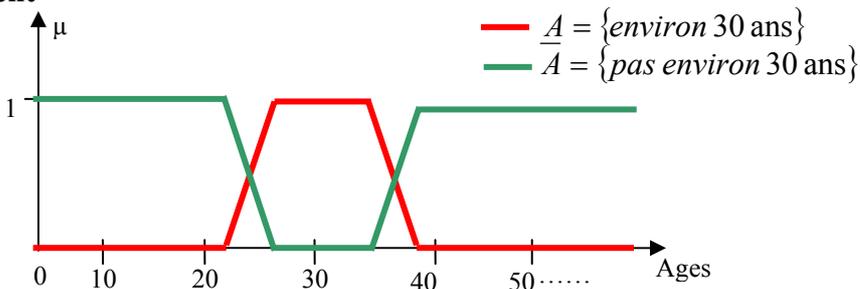


Fig.5.8: Complément.

Le complément est défini par : $\mu_{\bar{A}}(u) = 1 - \mu_A(u)$ pour tout $u \in U$.

Attention ne pas confondre le complément et l'antonyme d'un sous ensemble flou !

Non jeune ne signifie pas forcément vieux.

V-2-7 PROPRIETES DES OPERATIONS SUR LES SOUS ENSEMBLES FLOUS

La plupart de ces propriétés sont les mêmes que celles des opérations correspondantes sur les ensembles classiques [47].

- **Commutativité** : $A \cap B = B \cap A$ et $A \cup B = B \cup A$.
- **Associativité** :
 $A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C$ et $A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C$.
- **Distributivité** :
 $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$ et $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$.
- **Idempotence** : $A \cap A = A$ et $A \cup A = A$.
- **Identité** : $A \cap \phi = \phi$ (ϕ est l'élément absorbant pour \cap)
 $A \cup \phi = A$ (ϕ est l'élément neutre pour \cup).
- **Involution** : $\overline{\overline{A}} = A$.
- **Lois de De Morgan** : $\overline{A \cup B} = \bar{A} \cap \bar{B}$ et $\overline{A \cap B} = \bar{A} \cup \bar{B}$.
- **Absorption** : $A \cap (A \cup B) = A$ et $A \cup (A \cap B) = A$.

V-3 STRUCTURE D'UN SYSTEME BASE SUR LA LOGIQUE FLOUE

V-3-1 DEFINITIONS

V-3-1-1 Variable linguistique

Une variable linguistique est caractérisée par un ensemble tel que : $(x, T(x), U)$

où :

- x est le nom de la variable.
- U est l'univers de discours associé avec la valeur de base.
- $T(x)$ est l'univers des termes de x .

Exemple : la variable linguistique $x =$ température peut être défini par l'ensemble des termes suivants $T(x) = \left\{ \text{froid, chaud, très chaud} \right\}$.

Chaque terme de $T(x)$ est caractérisé par un sous ensemble flou dans l'univers de discours

$$U = [0, 40]$$

V-3-1-2 Règles linguistiques

Une règle linguistique se met sous la forme Sialors.....et s'exprime de la manière suivante :

Si (un ensemble de conditions est satisfait)

Alors (un ensemble d'actions doit être exécuté).

Une règle est composée de deux parties :

- ❖ partie antécédente appelée « *prémisse* » ou condition qui est exprimée par « si... » donne la description de l'état du système.
- ❖ Partie conséquente « *conclusion* » qui est exprimée par « alors..... » exprime l'action qui doit être exécutée.

Chaque règle floue est basée sur une implication floue.

V-3-2 SYSTEME BASE SUR LA LOGIQUE FLOUE

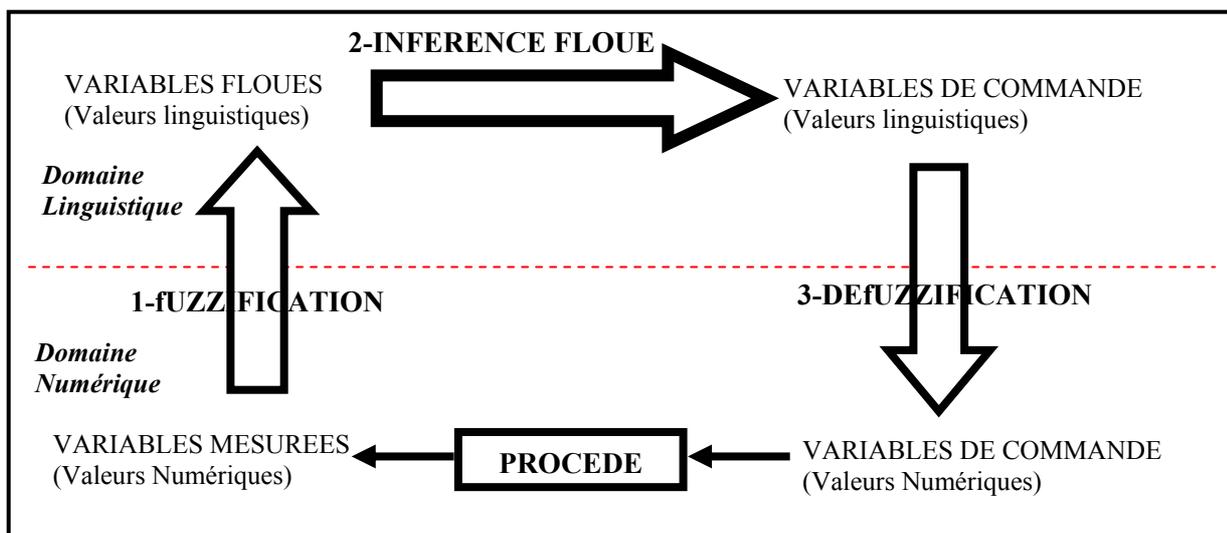


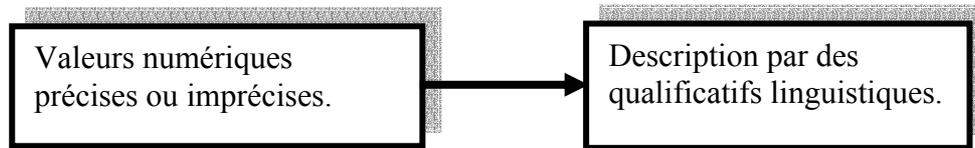
Fig.5.9: Système base sur la logique floue.

Un système basé sur la logique floue est composé de trois blocs principaux :

- ❖ Fuzzification.
- ❖ Inférence floue.
- ❖ Défuzzification.

V-3-2-1 Fuzzification

La fuzzification est l'étape de passage du domaine numérique au domaine symbolique.



Elle comprend :

- Les mesures des variables d'entrées.
- La conversion A/N et le traitement des grandeurs mesurées.
- L'attribution d'un ensemble de degré d'appartenance à chaque valeur d'entrée pour permettre le passage des grandeurs physiques aux variables linguistiques.

Avant de fuzzifier les grandeurs physiques, il faut construire les sous-ensembles d'appartenance c'est-à-dire choisir :

- ❖ **le nombre** (trois, cinq ou sept) : le nombre de sous ensembles flous n'a pas besoin d'être élevé. Une division plus fine de l'exécution n'apporte aucune amélioration de la dynamique du contrôleur mais par contre compliquerait la formulation des règles d'inférences.
- ❖ **Leurs formes** : les courbes d'appartenance prennent différentes formes en fonction de la nature de la grandeur à modéliser. Elles peuvent être symétriques, régulièrement distribuée ou avoir une distribution non uniforme.

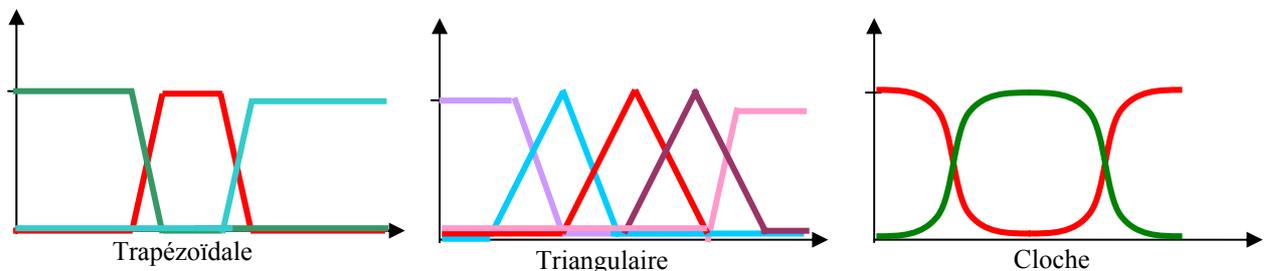


Fig.5.10: Forme des fonctions d'appartenance.

Pour éviter les zones de non intervention du régulateur (zones mortes) conduisant à une instabilité du réglage, il faut s'assurer qu'il n'y a pas de lacunes ou de chevauchements insuffisants entre deux ensembles voisins. Il faut aussi éviter les chevauchements trop importants. Le recouvrement des sous-ensembles flous permet d'éviter les transitions brutales entre un sous-ensemble et un autre.

- ❖ Les variables linguistiques associées.
- ❖ L'univers de discours correspondant à chaque variable.

La désignation standard des ensembles flous est :

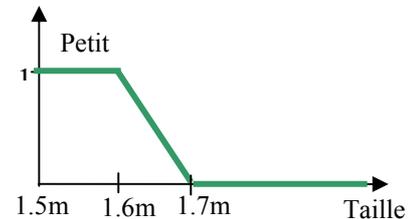
- NG ———> Négatif grand
- NM ———> Négatif moyen.
- NP ———> Négatif petit.
- EZ ———> Environ zéro (ou zéro).
- PP ———> Positif petit.
- PM ———> Positif moyen.
- PG ———> Positif grand.

Exemple :

Prenons l'exemple de la taille d'un homme. On peut classer les hommes suivant leur tailles en petit, moyen et grand. Avec la logique floue on peut déterminer les limites entre chaque catégorie.

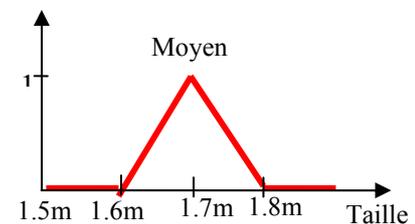
1- la catégorie « petit » : peut être défini comme suit :

- un homme est vraiment petit en dessous de 1.6m.
- à 1.65 m, il n'est qu'à « moitié » petit.
- il ne l'est plus du tout au-delà de 1.70m.



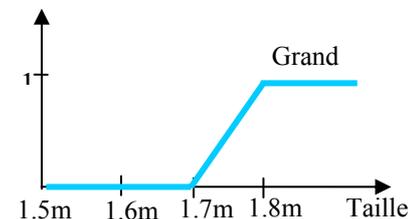
2- la catégorie « moyen » : elle est défini comme suit

- un homme est tout à fait moyen à 1.70m.
- au dessus de 1.6 m, il n'est pas assez grand pour être moyen.
- au-delà de 1.8 m, il ne l'est plus non plus.

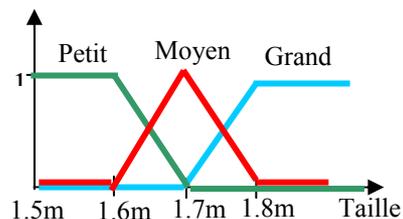


3- la catégorie « grand » :

- un homme est vraiment grand au dessus de 1.8m.
- à 1.75m il n'est qu'à moitié grand.
- il ne l'est pas du tout au-delà de 1.70m.



Si l'on superpose les trois graphiques précédents on obtient.



On constate que les courbes se recouvrent. Ce chevauchement est tout à fait logique, il montre que lorsque notre taille grandit nous ne passons pas brutalement d'une catégorie à l'autre, mais progressivement. A l'âge de l'adolescence, notre degré d'appartenance au groupe des petits décroît au profit de notre degré d'appartenance au groupe des moyens, et bientôt à celui des grands. Ce chevauchement sera en outre une garantie de stabilité des asservissements basés sur la logique floue.

V-3-2-2 Inférence floue (conclusion, déduction ou conséquence)

Le but de l'inférence floue (ou évaluation des règles) est de déterminer, à partir des entrées floues issues de la fuzzification des grandeurs mesurées les grandeurs de sortie. Ces règles linguistiques sont combinées en utilisant les connections « et » et « ou ».

1-PROPRIETES D'UN ENSEMBLE DE REGLES

- ❖ un jeu de règles doit être complet c'est-à-dire que toutes les combinaisons d'entrées doivent donner une valeur de sortie.
- ❖ **Consistance** : un jeu de règles est inconsistant s'il existe deux règles ayant la même prémisse et des conséquences différentes.
- ❖ **Continuité** : les règles voisines doivent avoir des sous-ensembles de sortie avec des intersections non vides.
- ❖ Les règles doivent être interactives.

2-REPRESENTATION DES INFERENCE FLOUES « MATRICE D'INFERENCE »

Supposons que le système flou ait deux entrées convenablement transformées en variables linguistiques « X_1 et X_2 » et une sortie « Y ». Chaque variable est subdivisée en 5 sous-ensembles en utilisant la désignation standard.

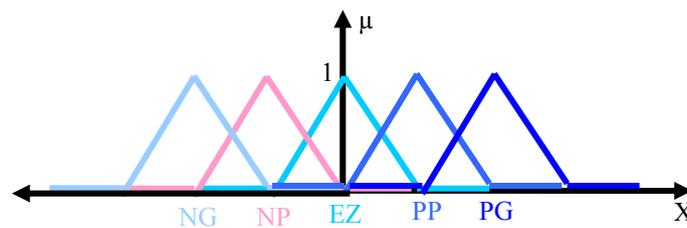


Fig.5.11: Sous ensembles d'une variable linguistique.

On a défini les 9 règles linguistiques suivantes :

- Si X_1 est NG et X_2 est EZ alors Y est PG
- Si X_1 est NP et X_2 est EZ alors Y est PP
- Si X_1 est EZ et X_2 est EZ alors Y est EZ
- Si X_1 est PP et X_2 est EZ alors Y est NP
- Si X_1 est PG et X_2 est EZ alors Y est NG

- Si X_1 est EZ et X_2 est NG alors Y est PG
- Si X_1 est EZ et X_2 est NP alors Y est PP
- Si X_1 est EZ et X_2 est PP alors Y est NP
- Si X_1 est EZ et X_2 est PG alors Y est NG.

La matrice d'inférence correspondante est représentée ci-dessous :

Y

$X_2 \backslash X_1$	NG	NP	EZ	PP	PG
NG			PG		
NP			PM		
EZ	PG	PM	EZ	NM	NG
PP			NM		
PG			NG		

3-ACTIVATION DES REGLES LINGUISTIQUES

Considérons un système flou avec « n » règles linguistiques [47] :

Si $X_1 = A_1$ et $X_2 = B_1$ alors $Y = C_1$

Si $X_1 = A_2$ et $X_2 = B_2$ alors $Y = C_2$

.

.

.

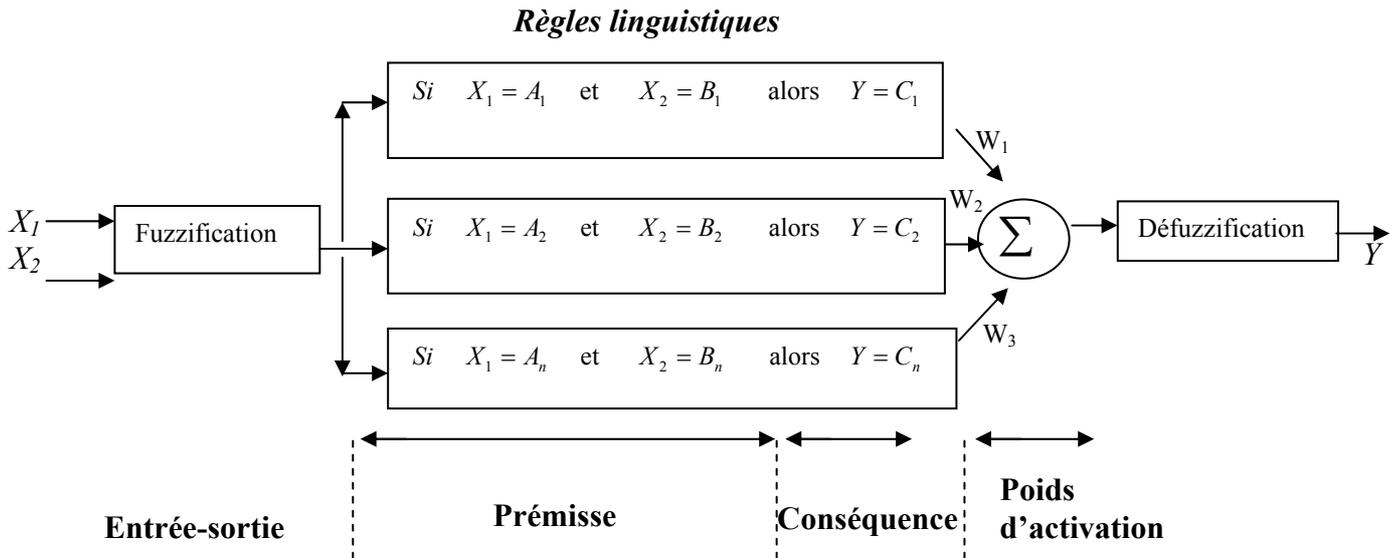
Si $X_1 = A_n$ et $X_2 = B_n$ alors $Y = C_n$.

Où

X_1 , X_2 et Y sont des variables linguistiques qui représentent les variables d'état du processus et les variables du contrôle.

A_i , B_i et C_i ($i = 1, 2, \dots, n$) sont des sous ensembles flous définis dans les sous ensembles de référence pour X_1 , X_2 et Y respectivement.

Le schéma de ce système est représenté sur la figure.



Dans le cas du système de la figure, le poids W_i obtenu de la $i^{\text{ème}}$ règle est :

$$W_i = \mu_{A_i}(x_1) \quad \text{et} \quad \mu_{B_i}(x_2)$$

où $\mu_{A_i}(x_1)$ et $\mu_{B_i}(x_2)$ sont des valeurs d'appartenance de X_1 et X_2 respectivement aux

sous ensembles A_i et B_i . Cela veut dire que la partie conséquente de la $i^{\text{ème}}$ règle ($Y=C_i$) doit être activée avec un niveau de vérité W_i (poids d'activation, niveau d'activation).

Il existe différentes méthodes d'inférence qui dépendent des implications utilisées et de la forme de la fonction d'appartenance. En commande floue les méthodes les plus couramment employées sont les méthodes de :

- **Mamdani** (basée sur le minimum des fonctions d'appartenance)
- **Larsen** (basée sur le produit des fonctions d'appartenance)

MAX-MIN

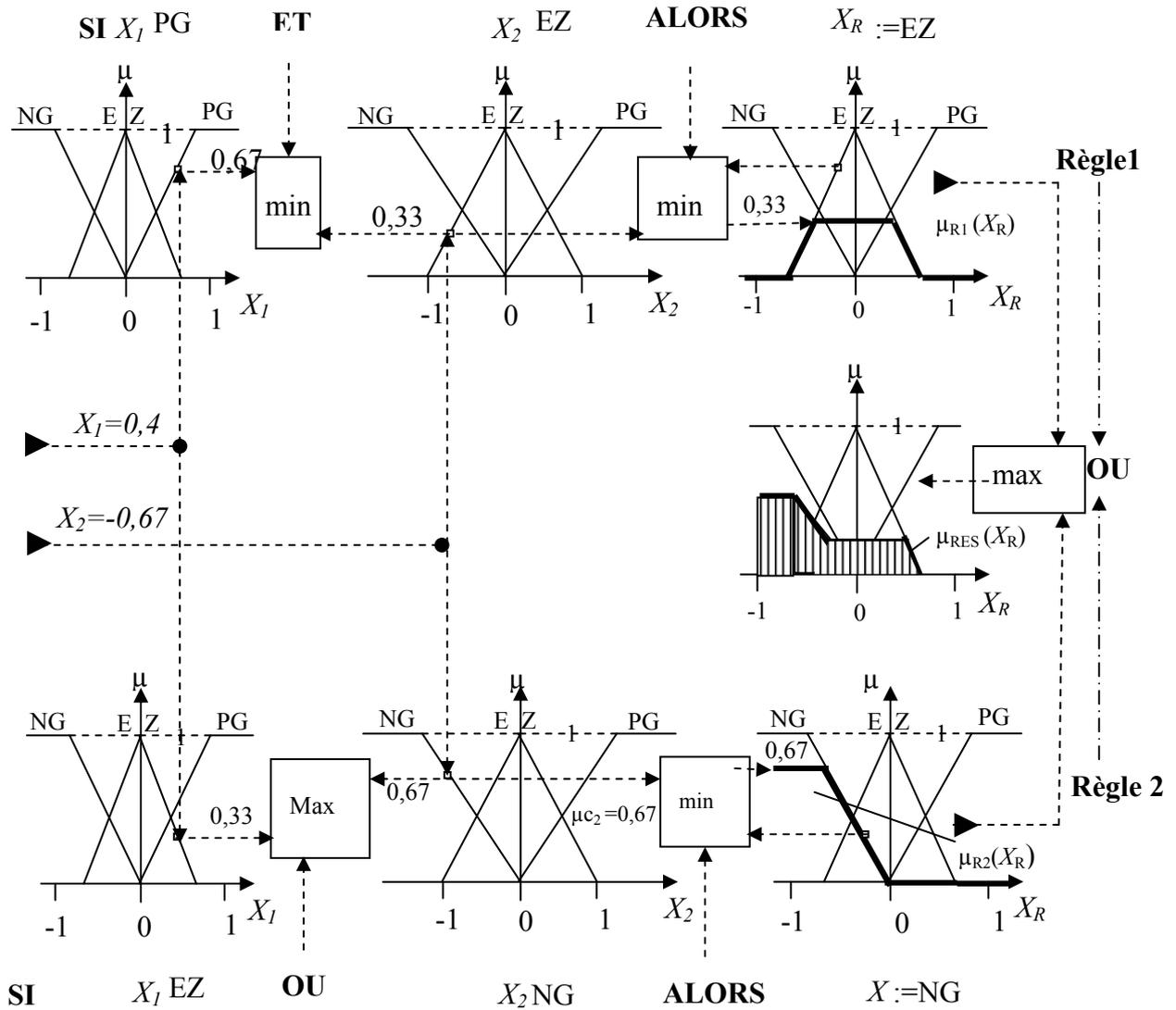


Fig.5.12: Méthode du max-min.

$$\mu_{Ri}(x_R) = \min [\mu_{Ci}, \mu_{O_i}(x_R)] \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (5-10)$$

$$\mu_{RES}(x_R) = \max [\mu_{R1}(x_R), \mu_{R2}(x_R), \dots, \mu_{Rm}(x_R)] \quad (5-11)$$

MAX-PROD

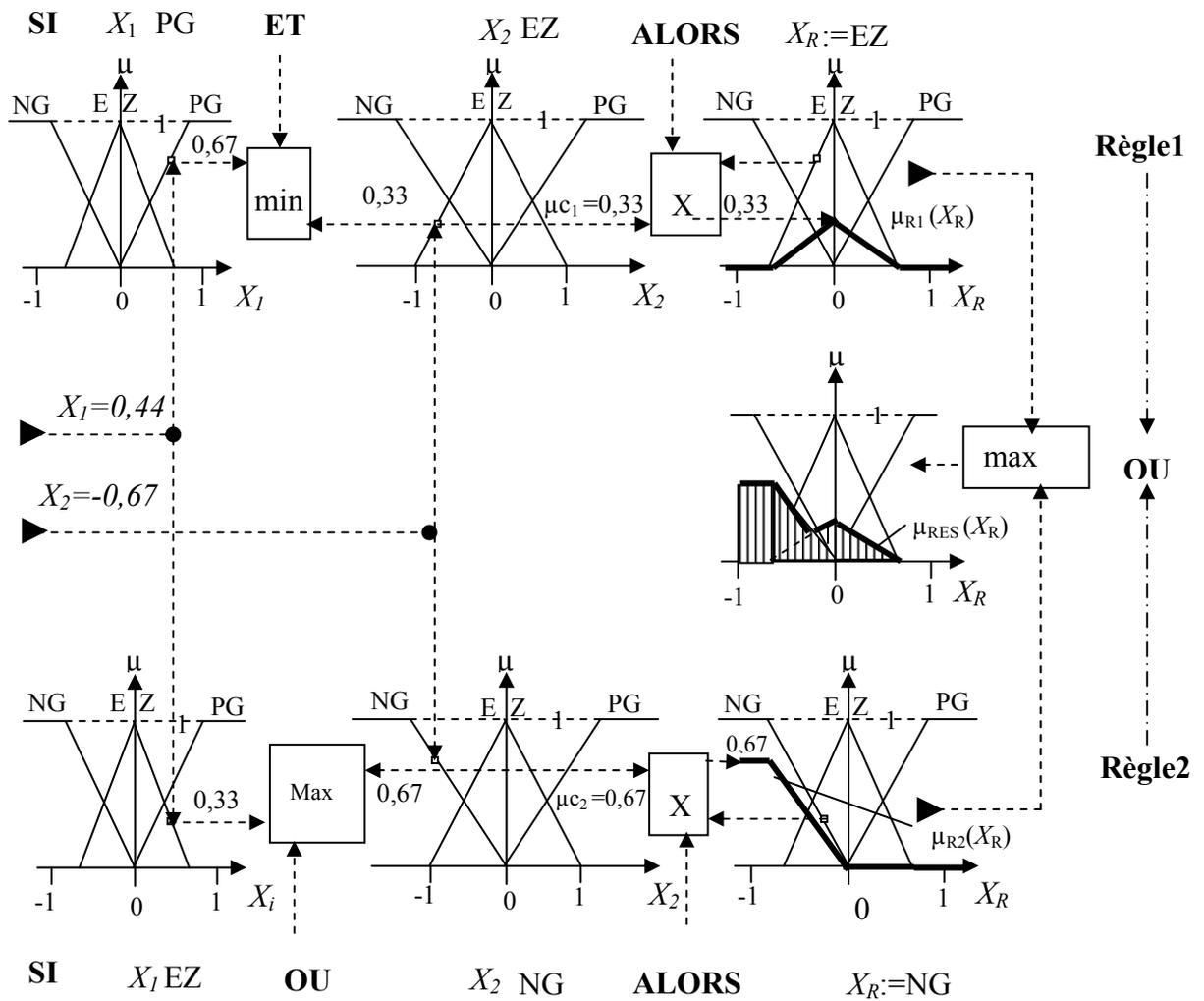


Fig.5.13: Méthode du max-prod.

$$\mu_{Ri}(x_R) = \mu_{Ci} \cdot \mu_{Oi}(x_R); \quad i = 1, 2, \dots, m \tag{5-12}$$

$$\mu_{RES}(x_R) = \max [\mu_{R1}(x_R), \mu_{R2}(x_R), \dots, \mu_{Rm}(x_R)] \tag{5-13}$$

SUM-PROD

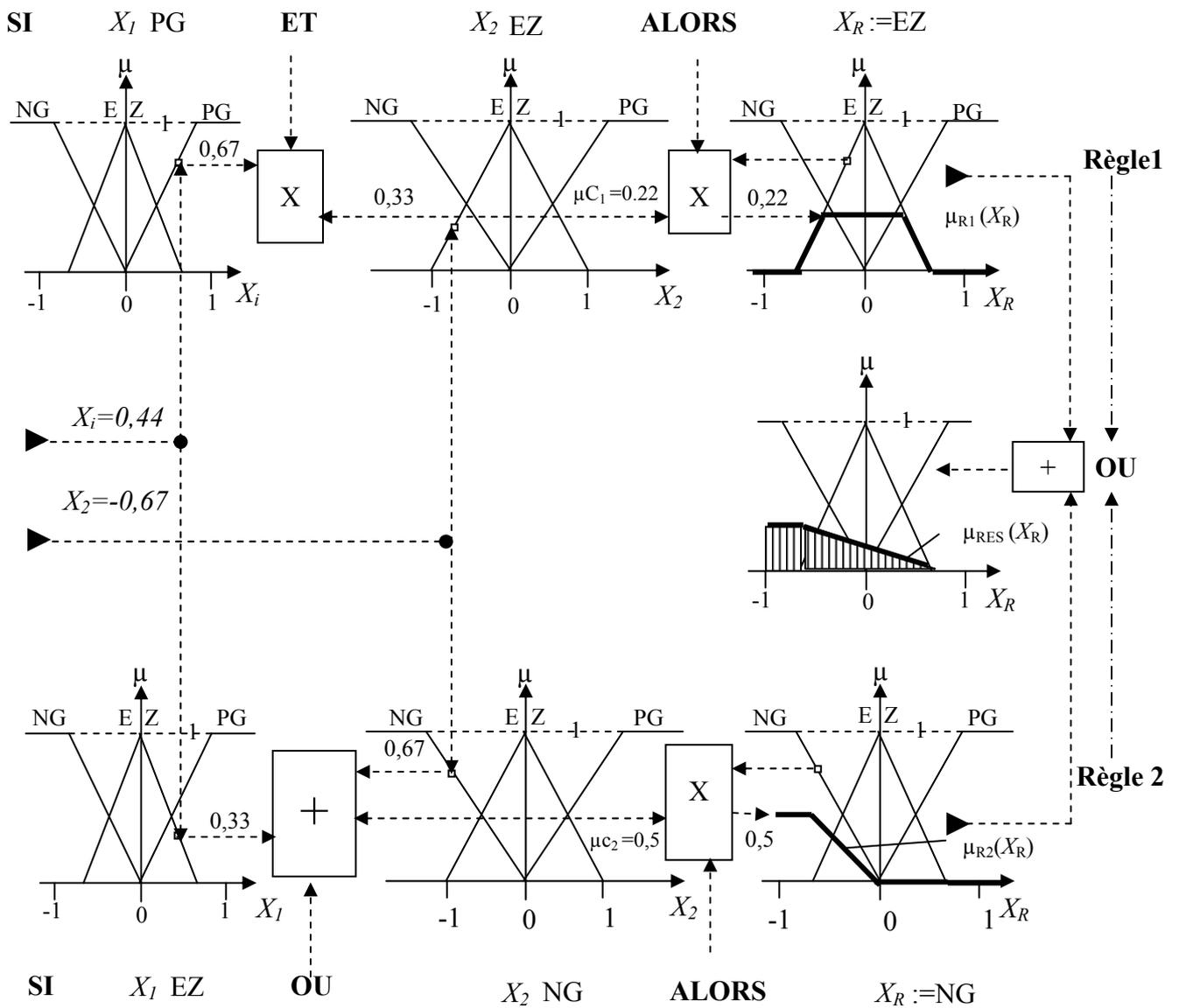


Fig.5.14: Méthode du sum-prod.

$$\mu_{RES}(x_R) = [\mu_{R1}(x_R) + \mu_{R2}(x_R) + \dots + \mu_{Rm}(x_R)] / m \quad (5-14)$$

$$\mu_{Ri}(x_R) = \mu_{Ci} \cdot \mu_{Oi}(x_R); \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5-15)$$

V-3-2-3 Defuzzification

C'est l'opération qui permet de passer d'une représentation sous forme de variables linguistiques à une variable numérique applicable physiquement.

Pour un état donné des entrées, plusieurs règles peuvent être validées simultanément et fournir des consignes différentes pour des sorties. Il faut donc disposer d'une méthode de **composition des règles** pour obtenir les valeurs finales des sorties. La composition des règles doit tenir compte de toutes les règles qui sont validées au prorata de leur poids d'activation.

Il existe au moins trois types de composition des règles :

1- LA METHODE DU MAXIMUM

La méthode du maximum est la plus simple : elle consiste à ne considérer, pour chaque sortie, que la règle présentant le maximum de validité. Cette règle simple, voir simpliste, ignore les règles secondaires qui peuvent néanmoins être importantes pour le fonctionnement et la stabilité du système. Elle est peu employée.

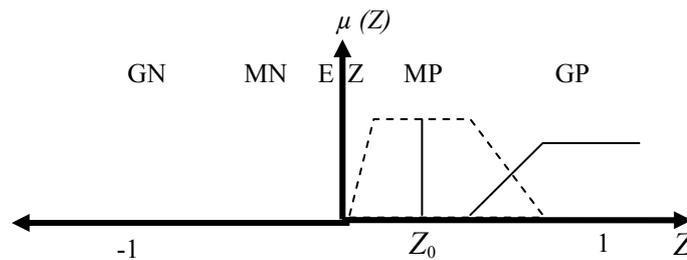


Fig.5.15: Méthode du maximum.

2- METHODE DU CENTRE DE GRAVITE

La méthode du centre de gravité est plus performante ; elle consiste à tracer, sur un même diagramme, les différentes zones trapézoïdales correspondant à chacune des règles et à calculer le centre de gravité de la zone consolidée.

$$Z^* = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i Z_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \tag{5-16}$$

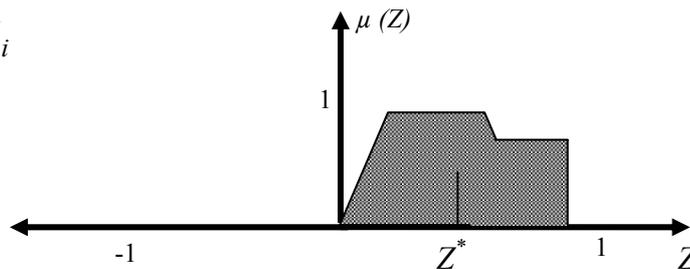


Fig.5.16: Méthode du centre de gravité

où n est le nombre des niveaux de quantisation, Z_i la valeur de sortie pour le niveau i et μ_i sa valeur d'appartenance.

3- METHODE DE LA MOYENNE PONDEREE

La méthode de la moyenne pondérée est plus évoluée. Elle considère, comme valeur de sortie, la moyenne des valeurs préconisées par chaque règle, pondérées par leurs degrés respectifs de validité.

V-4 REGLAGE ET COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE

V-4-1 PROCEDE LORS DE LA CONCEPTION D'UN REGLAGE PAR LOGIQUE FLOUE

Le procédé à suivre lors de la conception d'un réglage par logique floue est assez différent de celui d'un réglage conventionnel. La figure suivante montre les étapes principales [27].

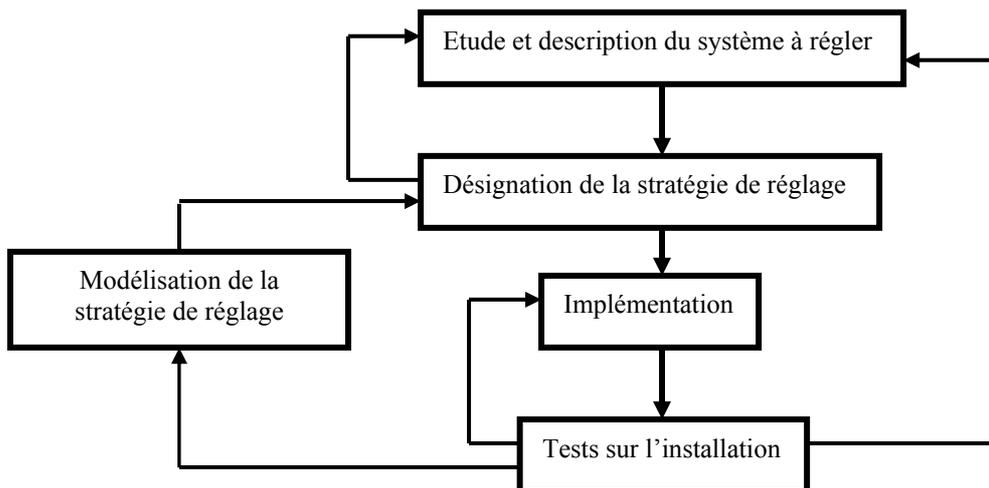


Fig.5.17: Procédé lors de la conception du réglage par logique floue

D'abord, il faut étudier le système à régler et en faire une description adéquate. Il ne s'agit pas d'une analyse proprement dite afin d'établir un modèle mathématique. On doit plutôt explorer le comportement d'un système à régler vis-à-vis de la variation de la grandeur de commande et déterminer les grandeurs mesurables caractéristiques du comportement dynamique. La description peut faire appel aux variables linguistiques et être accompagnée d'une définition par fonction d'appartenance. Si le système à régler est déjà existant, cette étude peut se faire par des mesures sur l'installation elle-même. Dans le cas contraire, il faut adopter des expériences obtenues avec des installations similaires.

On passe alors à la détermination de la stratégie de réglage qui comprend : la fuzzification, les inférences et la défuzzification.

Après l'implémentation, le plus souvent sur P.C ou microprocesseur par logiciel ou par matériel à l'aide de processeurs dédiées, on fait des tests sur l'installation, il est en général indispensable de modifier la stratégie de réglage interactivement en plusieurs passages, afin de trouver un comportement convenable. Cette modification est mise en évidence par la figure (5.17). Puisqu'il s'agit d'une étape importante dans la conception d'un réglage par logique floue.

A noter que dans le cas du réglage par logique floue il n'est pas nécessaire d'établir un modèle. Si, pour un certain système à régler, il existe tout de même un modèle mathématique convenable on peut l'utiliser pour tester et modifier la stratégie de réglage à l'aide d'une simulation numérique. Cela facilite la mise en service sur l'installation réelle.

V-4-2 PRESENTATION DE LA STRUCTURE LORS D'UN REGLAGE PAR LOGIQUE FLOUE

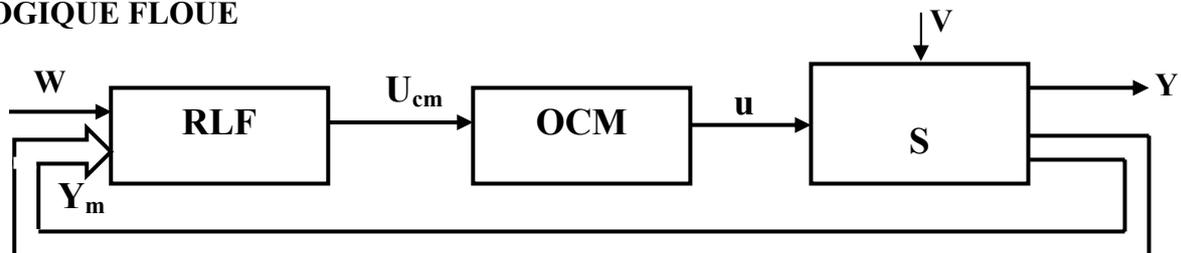


Fig.5.18 : Structure d'un réglage par logique floue.

Ainsi, il y a le système à régler **S** et l'organe de commande **OCM**. Le régulateur par logique floue **RLF** fournit le signal de commande U_{cm} . Il reçoit à son entrée la grandeur de consigne **W** et une ou plusieurs grandeurs mesurées, réunies dans le vecteur Y_m . Ce dernier contient en général la grandeur à régler **Y** et, le cas échéant, d'autres grandeurs mesurées qui sont déterminantes pour saisir l'évolution dynamique du système à régler [47].

V-4-2-1 Configuration interne d'un régulateur par logique floue

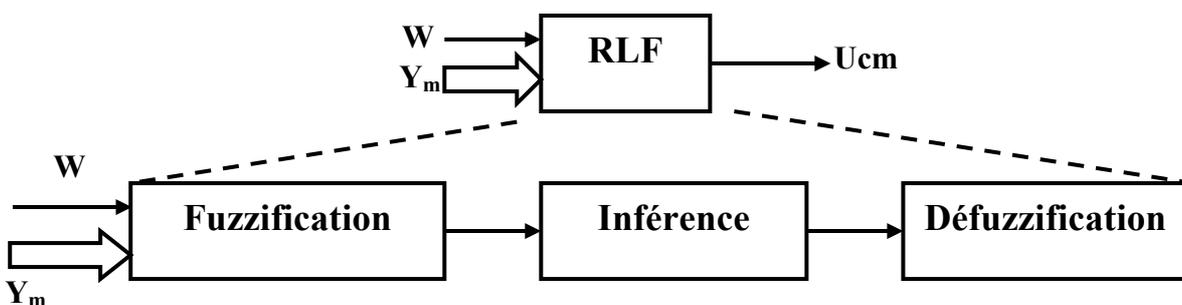


Fig.5.19 : Configuration interne d'un régulateur par logique floue.

La structure de base d'un régulateur flou est inspirée de celle du régulateur P.I discret. Rappelons que sous forme incrémentale, ce régulateur est décrit par l'équation :

$$u(k) = u(k-1) + k\Delta e(k) + k\frac{T_e}{T_i}e(k-1) \quad (5-17)$$

Où : k est le gain, T_i la constante intégrale et T_e la période d'échantillonnage. La variable $e(k)$ est l'écart entre la consigne et la mesure.

Et $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$ est sa variation entre deux instants d'échantillonnage.

$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$ est l'action à appliquer.

Un régulateur PI peut donc être vu comme une fonction qui associe une variation de variable manipulée et une erreur et à sa variation :

$$\Delta u = f(e, \Delta e) \quad (5-18)$$

Dans un régulateur flou, au lieu d'exprimer cette relation par une expression mathématique, on l'exprime par des règles manipulant des variables linguistiques décrivant e , Δe et Δu .

V-4-2-2 Propriétés d'un régulateur par logique floue

Les propriétés essentielles d'un réglage par logique floue peuvent être résumées de la manière suivante :

- Mesure de plusieurs grandeurs : la grandeur à régler et d'autres grandeurs caractérisant le comportement dynamique du système à régler.
- Comportement non linéaire sans dynamique.
- Aptitude à régler convenablement surtout des systèmes à régler avec un comportement dynamique compliqué dont la modélisation est difficile voir impossible.
- Modélisation du système à régler superflue (pouvant tout de même être utile).
- Connaissance approximative des paramètres du système à régler.

V-4-3 AVANTAGES ET INCONVENIENTS

V-4-3-1 Avantages :

- La non nécessité d'une modélisation (cependant il peut être utile d'un modèle convenable).
- La possibilité d'implémenter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur d'un processus.

- La maîtrise du système à régler avec un comportement complexe (fortement non linéaire et difficile à modéliser).
- L'obtention fréquente de meilleures prestations dynamiques (régulateur non linéaire).
- L'emploi possible des systèmes de développements efficaces. Soit pour circuits intégrés (processeurs dédiés, fuzzy processor, solution matérielle).

V-4-3-2 Inconvénients :

- Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification).
- L'approche artisanale et non systématique (implémentation des connaissances de l'opérateur souvent difficile).
- L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de réglage en toute généralité (en l'absence d'un modèle valable).
- La possibilité d'apparition de cycles limites à cause du fonctionnement non linéaire.
- La précision du réglage souvent peu élevée.
- La cohérence des inférences non garantie a priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possibles) [101].

V-5 APPLICATION DU REGULATEUR FLOU AU BALLAST ELECTRONIQUE

V-5-1 PRESENTATION DU REGULATEUR FLOU UTILISE

Comme le système contient déjà un intégrateur, les entrées du contrôleur flou sont choisies à être l'erreur ε et sa variation $\Delta\varepsilon$. La sortie "i" est la référence de ce présent contrôleur.

L'erreur est calculée comme :

$$\varepsilon(k) = i_{ref}(k) - i_0(k) \quad (5-19)$$

où, $i_0(k)$ est le courant actuel et $i_{ref}(k)$ est le courant de référence.

La variation de l'erreur est obtenue en utilisant l'équation suivante :

$$\Delta\varepsilon(k) = \varepsilon(k) - \varepsilon(k-1) \quad (5-20)$$

où, $\varepsilon(k)$ et $\varepsilon(k-1)$ sont l'erreur obtenue respectivement aux instants (k) et $(k-1)$. [34]

Le signal de contrôle $i(k)$ à appliquer est donné par l'équation (5-21), où $\Delta i(k)$ est la sortie du contrôleur logique :

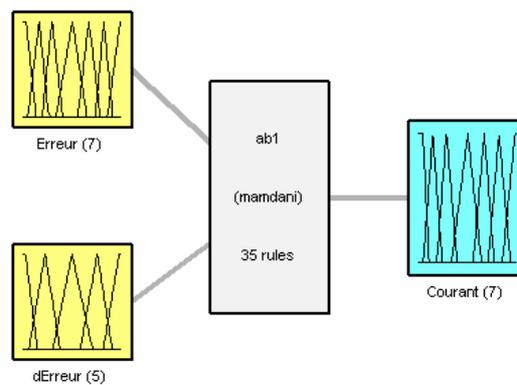
$$i(k) = i(k - 1) + \Delta i(k) \tag{5-21}$$

V-5-1-1 Base des règles

La table des règles utilisée est illustrée dans le tableau suivant et a été obtenue en utilisant les connaissances et l'intuition de l'opérateur humain au sujet du processus.

		ϵ						
		<i>NG</i>	<i>NM</i>	<i>NP</i>	<i>ZE</i>	<i>PP</i>	<i>PM</i>	<i>PG</i>
$\Delta\epsilon$	<i>NG</i>	<i>NG</i>	<i>NG</i>	<i>NM</i>	<i>NP</i>	<i>NM</i>	<i>NM</i>	<i>NP</i>
	<i>NP</i>	<i>NG</i>	<i>NG</i>	<i>NM</i>	<i>NP</i>	<i>ZE</i>	<i>NP</i>	<i>ZE</i>
	<i>ZE</i>	<i>NG</i>	<i>NM</i>	<i>NP</i>	<i>ZE</i>	<i>PP</i>	<i>NM</i>	<i>PG</i>
	<i>PP</i>	<i>ZE</i>	<i>PP</i>	<i>ZE</i>	<i>PP</i>	<i>PM</i>	<i>PG</i>	<i>PG</i>
	<i>PG</i>	<i>PP</i>	<i>PM</i>	<i>PM</i>	<i>PP</i>	<i>PM</i>	<i>PG</i>	<i>PG</i>

Sept et Cinq fonctions d'appartenance, décrivent respectivement l'erreur ϵ et sa variation $\Delta\epsilon$ (figure (5.21)). Les quantités de sortie sont décrites par 7 sous ensembles flous (figure (5.22)). Les fonctions d'appartenance des entrées et de la sortie du contrôleur flou sont choisies à être triangulaires et trapézoïdales car c'est les formes les plus simples, elles sont peu coûteuses en temps et en espace mémoire.



System ab1: 2 inputs, 1 outputs, 35 rules

Fig. 5.20 : Régulateur flou utilisant la méthode de Mamdani.

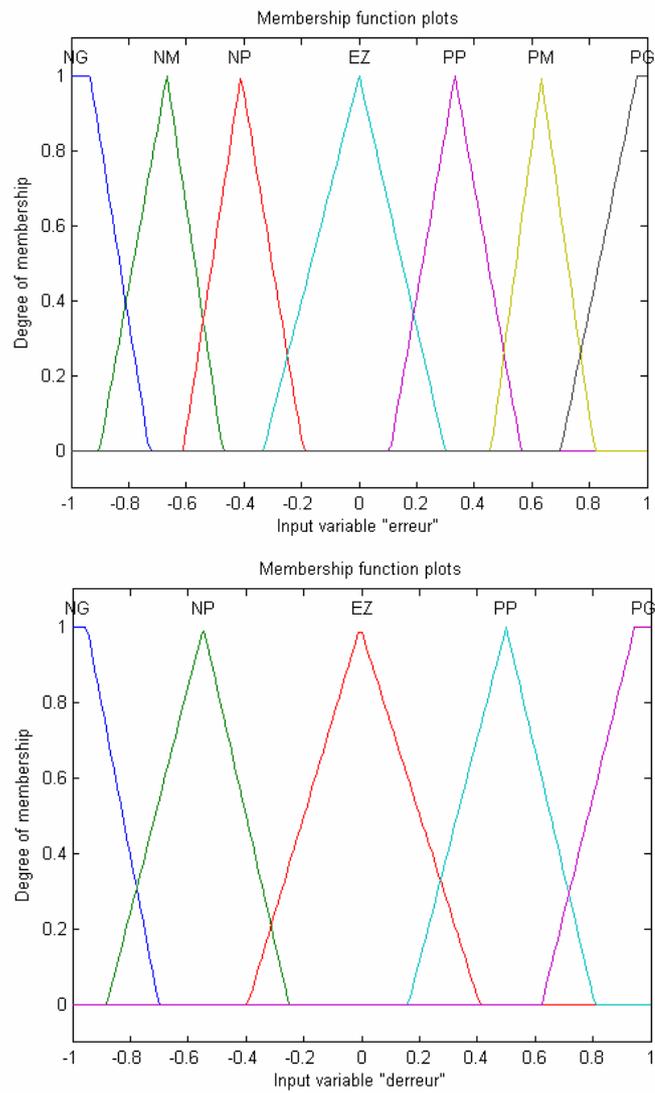


Fig. 5.21 : Fonctions d'appartenance de l'erreur et de la dérivée de l'erreur.

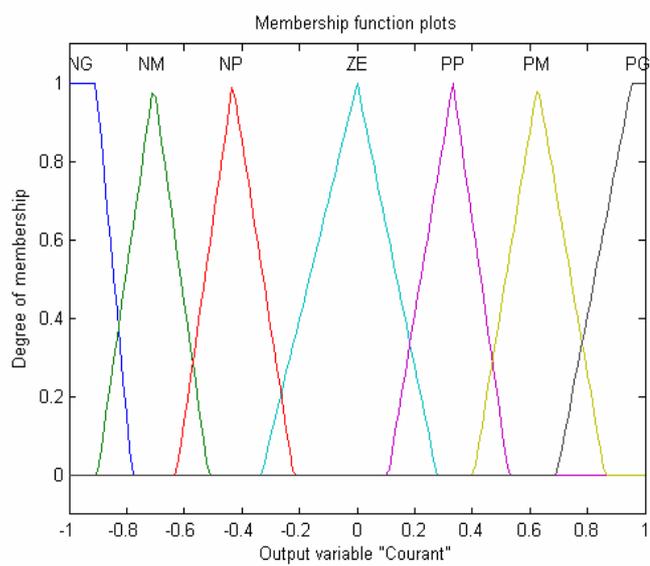


Fig. 5.22 : Fonctions d'appartenance du courant..

V-5-1-2 Moteur d'inférence

Le moteur d'inférence d'un contrôleur flou n'active que les règles de commande dont les prémisses correspondent aux termes des entrées floues disponibles issues de la fuzzification des entrées réelles. Une règle d'inférence est activée lorsque le facteur d'appartenance lié à la condition de cette règle est non nul. Pour évaluer les règles activées on utilise la méthode d'inférence de type **max-min** qui consiste pour une règle donnée à prendre comme conclusion la plus petite valeur des prémisses ; ensuite on prend le maximum de tous les minimums concernant une même caractéristique de sortie.

V-5-1-3 Defuzzification

La méthode de défuzzification utilisée est la méthode du **centre de gravité**.

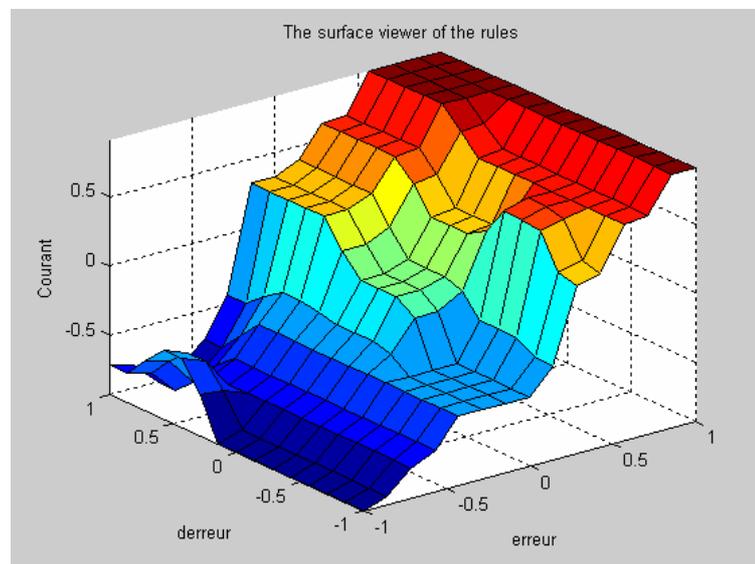


Fig. 5.23 : Surface de commande du régulateur flou.

V-5-2 RESULTATS DE SIMULATION

Les formes d'ondes obtenues sont les suivantes :

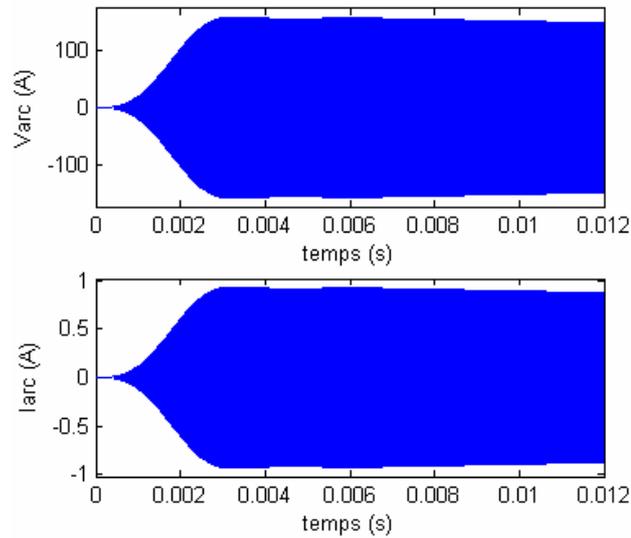


Fig. 5.24 : Tension et courant d'arc de la lampe à décharge.

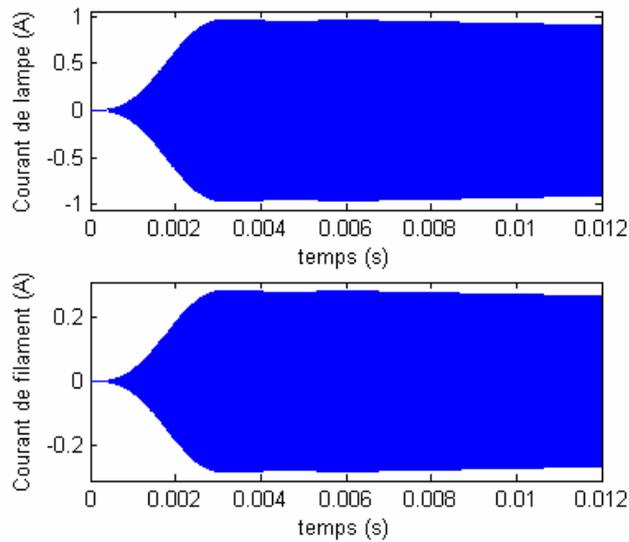


Fig. 5.25: Courant total et courant de filament de la lampe à décharge.

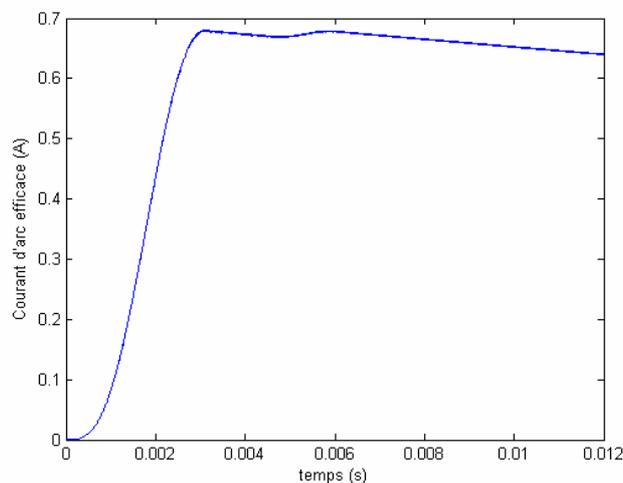


Fig. 5.26: Courant d'arc efficace de la lampe à décharge.

On remarque des Figures ci-dessus une montée en souplesse (sans oscillations) dans le régime dynamique pour atteindre le régime statique.

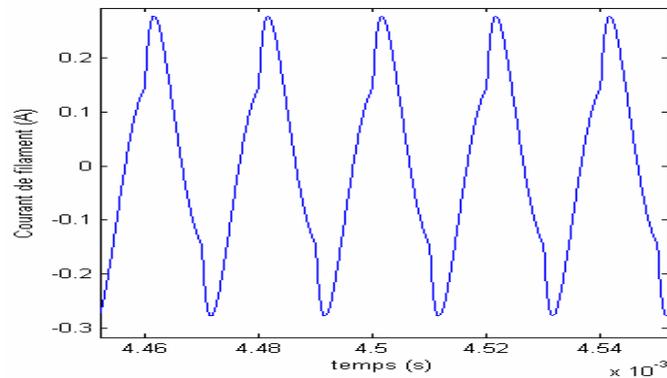


Fig. 5.27: Courant de filament de la lampe à décharge.

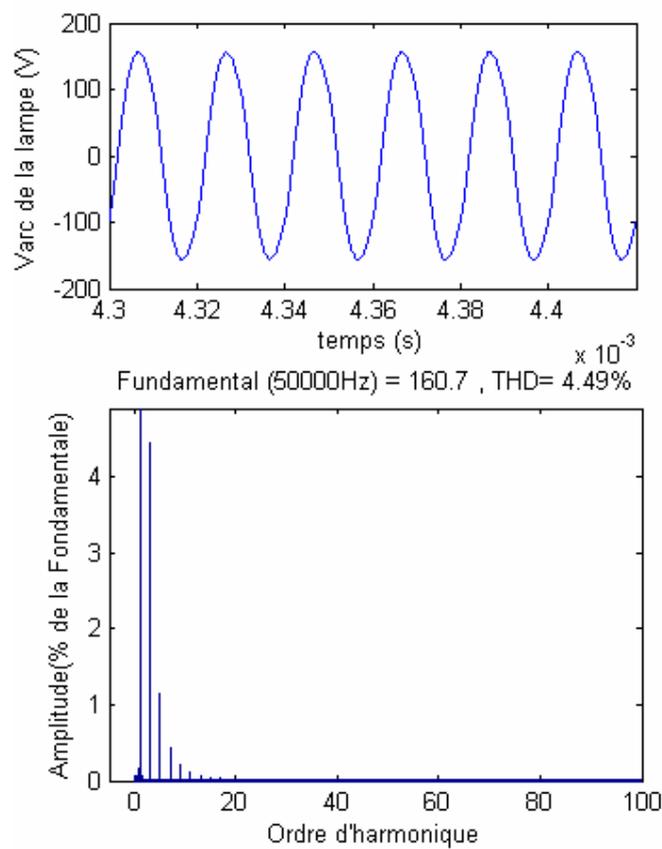


Fig. 5.28: THD de la tension d'arc de la lampe à décharge.

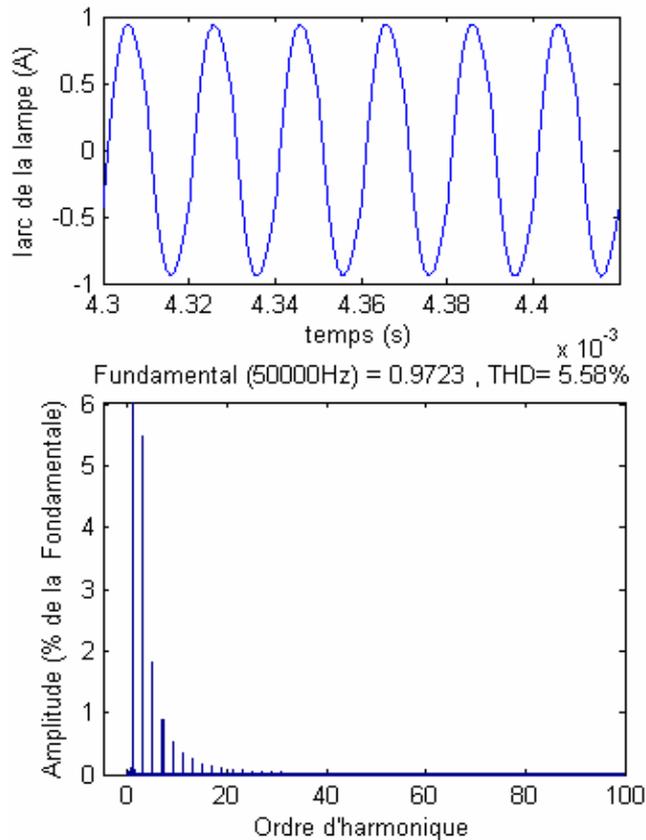


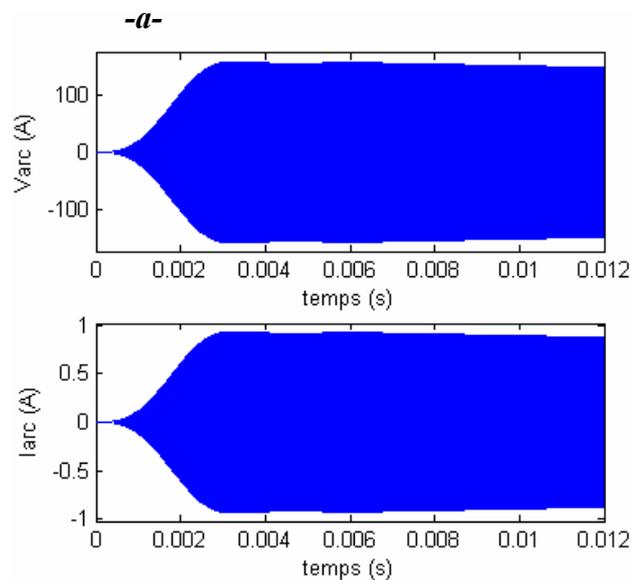
Fig. 5.29: THD du courant d'arc de la lampe à décharge.

Les THDs sont réduits (4.49% pour la tension et 5.58% pour le courant), ainsi les formes d'onde sont plus sinusoïdales.

V-6 TEST DE LA ROBUSTESSE

On a appliqué au système des perturbation, allant jusqu'à 60% à l'instant 0.005 S de la simulation.

Si on applique une perturbation de $\pm 20\%$ on obtient les résultats suivants :



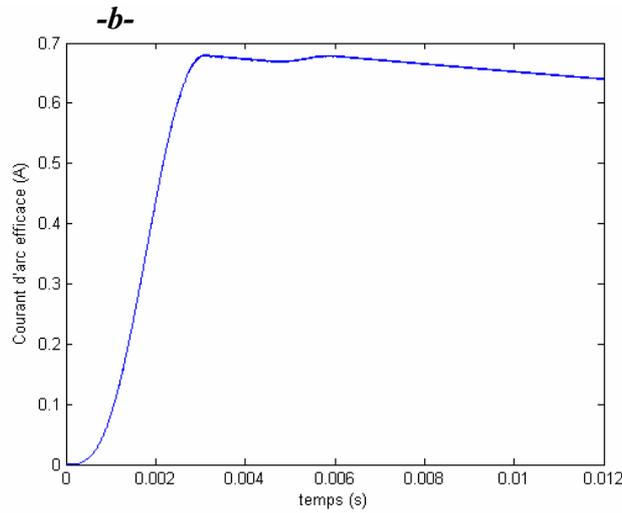


Fig. 5.30 : Forme d'ondes obtenu en appliquant des perturbations de 20%..

Si on augmente la perturbation jusqu'à $\pm 40\%$, on obtient alors les mêmes formes d'ondes que les précédents :

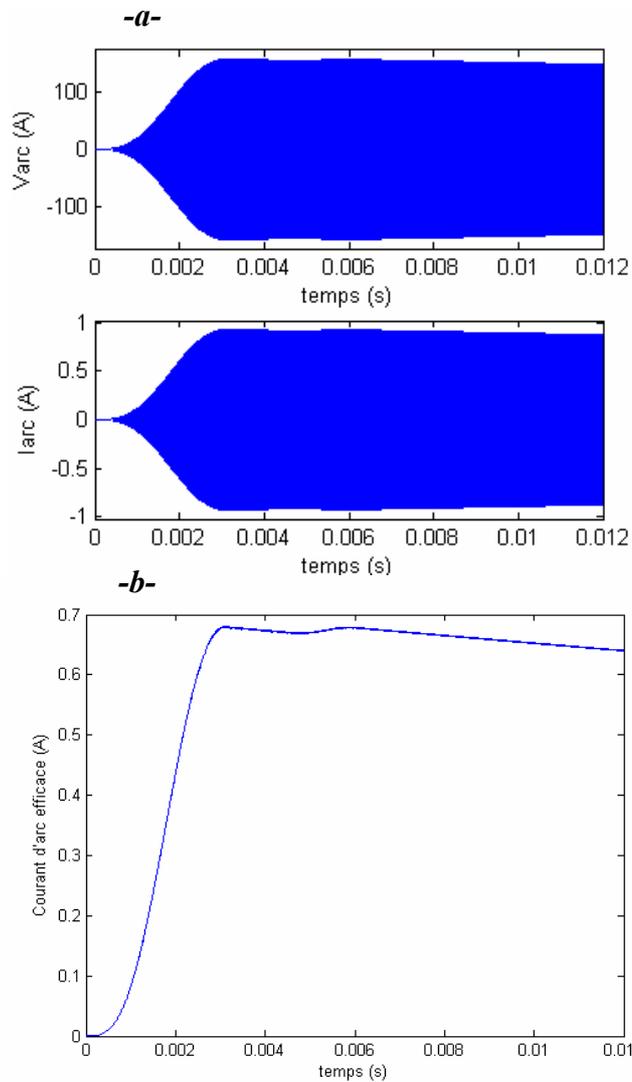


Fig. 5.31 : Forme d'ondes obtenu en appliquant des perturbations de 40%.

On augmente encore la perturbation jusqu'à $\pm 60\%$, les formes d'ondes ne changent pas :

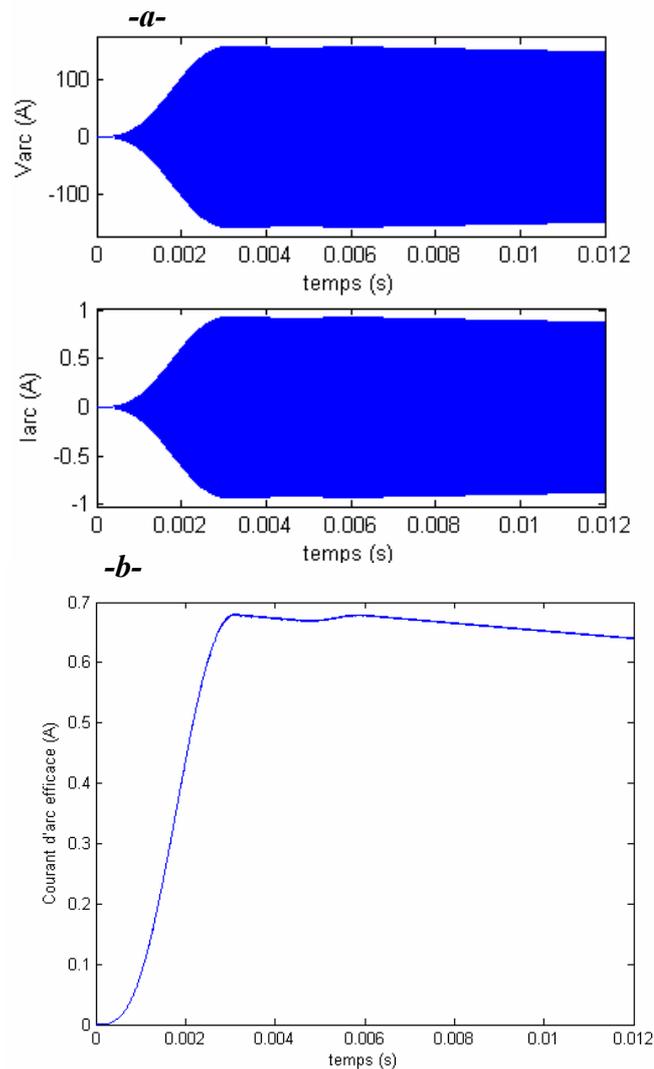


Fig. 5.32 : Forme d'ondes obtenu en appliquant des perturbations de 60%.

Des formes d'ondes obtenues figures (5.30), (5.31) et (5.32) on remarque que le régulateur flou fait preuve d'une grande robustesse et par conséquent maintient la stabilité du système quel que soit la perturbation appliquée.

V-7 CONCLUSION

Les résultats ci-dessus confirment que le régulateur flou produit une très bonne commande pour le ballast électronique (meilleure que celle obtenue par le P.I), sans avoir besoin d'un model mathématique exact de la lampe à décharge, ils montrent aussi que cette stratégie de contrôle est très robuste (comparée avec celle du P.I), ceci est du à la capacité des règles du régulateur flou (basées sur l'expertise humain) de compenser toute variation du courant. Donc, le régulateur flou peut être une bonne alternative du régulateur P.I classique.

CONCLUSION GENERALE

La mise en œuvre des lampes à décharge, que ce soit pour la réalisation d'ambiances visuelles ou des applications à vocation plus industrielles (traitement des produits finis), fait appel à des connaissances diversifiées : électrotechnique, optique, physique des plasmas, chimie. Nous nous sommes attachés, dans la première partie de ce mémoire (chapitre I et II), à rendre ces disciplines plus familières au lecteur non averti qui pourrait avoir à les utiliser dans le cadre d'une étude sur le traitement biologique de l'eau par rayonnement ultraviolet.

C'est ainsi que dans le 1^{er} chapitre, et après avoir rappelé les principales applications du rayonnement produit par les lampes à décharge mercure-argon basse pression, nous avons expliqué en détail l'action germicide de la raie 253.7 nm sur l'ADN des virus et des bactéries présents dans l'eau à traiter.

Nous avons donné au 2^{ème} chapitre une description succincte des principes de fonctionnement des lampes à décharge et leurs constitutions ainsi que les caractéristiques de la lampe utilisée pour la photochimie. Il était nécessaire de préciser dans cette présentation générale les phénomènes physiques qui assurent la transformation de la puissance électrique en puissance rayonnée utilisable pour l'application envisagée.

Le 3^{ème} chapitre constitue la charnière du mémoire, puisque nous y avons mis en place les fondements de l'étude de l'alimentation de notre lampe à décharge (*ballast électronique*). La première partie de ce chapitre a été consacrée à la présentation de la structure générale d'un ballast électronique (utilisant un onduleur en demi-pont ou en pont complet), au choix des interrupteurs et de leur caractéristiques, au modèle du circuit électrique de la lampe fluorescente ainsi qu'à la mise en évidence des influences relatives des différents paramètres des composants électroniques constituant le ballast électronique. Le comportement électrique de la lampe fluorescente alimentée par un ballast électronique à H.F peut être modélisé par une résistance dépendante de la puissance et de la température. La deuxième partie de ce chapitre a été consacrée à la simulation par **MATLAB** de 04 circuits différents de ballasts électronique, 03 d'entre eux en demi-pont et le 4^{ème} en pont complet.

On a comparé les résultats de simulation des trois ballasts en demi-pont, on a constaté que : le taux de distorsion du ballast de la figure (3.20) est le plus petit et par conséquent les formes d'onde des courants et de la tension sont plus proches de la sinusoïde, et que le nombre de composants constituant ce ballast est le plus dérisoire.

Puis on a comparé les résultats de simulation du ballast de la figure (3.16) (pont complet) avec ceux du ballast de la figure (3.20) (demi-pont), on a remarqué que les

caractéristiques électriques étaient semblables mais le taux de distorsion du 2^{ème} était meilleur que celui du 1^{er}, ainsi que le nombre de composants qui était réduit bien évidemment. Donc pour satisfaire la limite de la classe C des normes des harmoniques du C.E.I et pour diminuer le nombre des composants électronique (diminution de la pollution), on a choisit le ballast en demi-pont de la figure (3.20) pour alimenter notre lampe et par conséquent, le prix du ballast diminue considérablement.

On a essayé d'améliorer les performances de notre système en jouant sur les paramètres du circuit résonnant, tout en gardant la même fréquence propre (42 KHz). En utilisant les paramètres du tableau (3-4), une amélioration significative est apportée aux formes d'ondes des courants et de la tension (élimination de désymétrie des ondes) ainsi qu'une réduction considérable du taux de distorsion.

Le 4^{ème} chapitre a été consacré à l'application d'une commande classique (l'utilisation d'un P.I). Ce dernier a éliminé les oscillations (ondulations) des enveloppes des formes d'ondes des courant et de la tension, ainsi notre alimentation est devenue stable, avec une fréquence de 50 KHz, une valeur efficace du courant d'arc de 0.65 A et celle de la tension d'arc de 111 V. Cette stratégie de commande a amélioré les performances du système, mais elle n'est pas très robuste (elle ne supporte que des variations allant jusqu'à -5%). On peut varier le courant dans la lampe de 0.5 à 1 A, en variant la fréquence de commutation des transistors « MOSFET » (dans le cas d'une alimentation selfique traditionnelle de 50 Hz, après l'amorçage de la lampe, le réglage ne peut se faire que par modification du ballast ou diminution de la tension. L'encombrement des dispositifs à mettre en jeu est alors considérable).

Dans le 5^{ème} chapitre, on a remplacé le régulateur P.I par un régulateur flou. L'amélioration des formes d'ondes est encore meilleur surtout dans le régime dynamique (une montée plus souple sans ondulations des courants et de la tension de la lampe), le système et donc plus stable et la stratégie de commande fait preuve d'une grande robustesse (elle supporte des variations allant au delà de $\pm 60\%$).

Comme perspective, il nous reste à développer un modèle qui décrit mieux le comportement de la lampe à décharge. L'inconvénient du modèle utilisé est que le courant qui traverse le filament du coté droit n'est pas le même que celui qui circule dans le coté gauche (le premier est égal au courant de filament (i_f) et le second est égal au courant total de la lampe ($i_f + i_{arc}$)) ; alors qu'en vérité le courant dans les deux filament est le même.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] - **Abderahim Naser M. and John Quaiocoe E.**, «*Analysis and design of a multiple feedback loop control strategy for single-phase voltage-source UPS inverters*». Rev. IEEE. 1996.
- [2] - **Aissaoui A.**, «*Modélisation des décharges lumineuses radio fréquences* ». thèse de magister USTO, (2000).
- [3] - **Alex T.K. NG, Wings Hung KI, MOK Philip K.T and K.O.SIN J.**, «*Lamp modeling for design of dimmable electronic ballasts* ». The Hong Kong University of science and technology clear water bay, Hong Kong SAR China. Rev. IEEE. 1999.
- [4] - **Alonso J.M., Calleja A.J., Ribos J., Lopez E., Rico M. and Sebastian J.**, «*Investigation of a novel high-power factor electronic ballast based on the input current shopper* ». Universitat de Oviedo, Spain. Rev. IEEE. 1999.
- [5] - **Amit Mulay and Sherai Krishna.** «*Performance characterisation of MOS and bipolar devices for the development of efficient and reliable electronic ballast*». University of Illinois at Chicago USA. Rev. IEEE. 2000.
- [6] - **Alonso Marcelo et Edward J. Finn**, «*Physique générale tome II, Champs et ondes* ». Inter édition, Paris (1977).
- [7] - **Aloisi P., Motorola Toulouse.** «*The new power MOSFET safe operating areas*». Rev. Technitron (power electronics) (1994).
- [8] - **Allouache Hadj**, «*Modélisation de la propagation des streamers dans l'azote dans une géométrie uniforme* ». thèse de magister UHBC, (2001).
- [9] - **Badareu E. et Papescu I.**, «*Gaz ionisés* », édition Dunod, Paris (1965).
- [10] - **Barlier-salsi, Salsi S. et Kingler A.**, «*Lampe à rayonnement ultraviolet (qualification des risques associés à leur utilisation)* ». Service physiologique environnemental centre de recherche de l'INRS, Nancy. Hygiène et sécurité du travail N° 170 1^{er} trimestre 1998 (Internet).
- [11] - **Balkhoj Soren kjaer, Tomas Lundreng Andersen, Bjarne Sondergard Henriksen and Adalstein Olafsson.** «*A novel zero voltage switched converter for an electronic ballast*». Denmark. Rev. EPE. 2001 Lausanne.
- [12] - **B.Bauche et Bauche C. Amoult**, «*Températures dans les plasmas chauds hors ELT* ». Laboratoire Aimé Cotton, Campus d'ORSAY, Rapport LULI 1999.
- [13] - **Benyoucef Djillali**, «*Modélisation d'une décharge lumineuse- aspect microscopique* ». thèse de magister, université de Laghouat, (2002).
- [14] - **Bhosle S., Buso D., Zissis G. et Damelin court J. J.**, «*Influence of the power supply on discharge lamp color* ». Centre de physique des plasmas et leurs applications de Toulouse. Université de Paul Sabatier (1999).
- [15] - **Böhm F. and Güldner H.**, Dresden University of technology. «*Charge pump ballasts as a special type of electronic ballast for fluorescent lamps*». Rev. IEEE 2000.
- [16] - **Bor-Run .Lin and Yuen. – Chou Hseih**, national Yunlin University of science and technology, Taiwan. «*Dimming control for high intensity discharge lamp with power factor correction*». Rev. EPE. 1999- Lausanne.
- [17] - **Boyer, Norbert M. et Philippe R.**, «*construction du matériel électrique tome V, application de l'énergie électrique* ». LA CAPITELLE S.A. Editions UZES (Gard) (1981).
- [18] - **Buzoré D.**, «*Générateurs UVc. L'eau, les bactéries, les virus. Les rayons UV principe et applications* », (Internet), ISACAT, [URL:http://www.afigfoessel.fr/UV-principe.htm](http://www.afigfoessel.fr/UV-principe.htm) 1999. Révision 30 Août 2000.

- [19]- **Cagnac, J.C. Pebay-Peyroula**, « *Physique atomique tome II. Application à la mécanique quantique* ». Dunod Université. 2^{ème} édition Dunod. Bordas, Paris, (1982).
- [20]- **Chauveaux Eric, rapport de stage**, « *Caractérisation électrique d'un plasma d'induction* ». Mars - Septembre 1996. DEA diélectrique. Option génie électrique. Laboratoire de recherches en technique inductive,
- [21]- **Cambronne J.P., Le Moigne Ph. et Hautier J.P.**, « *Synthèse de la commande d'un onduleur de tension* ». Ecole centrale de Lille, reçu le 18 juillet 1995, révisé 19 Février 1996 et accepté le 13 Mars 1996. Les éditions de physique 1996.
- [22]- **Cambronne J.P. et Hautier J.P.**, « *Synthèse de la commande d'un onduleur de courant triphasé* ». Ecole centrale de Lille, reçu le 07 Novembre 1996, révisé le 17 Mars 1997 et accepté le 28 Mars 1997. les éditions de physique 1997.
- [23]- **Costache Corina Mongrang**, « *Etude d'un système lampe à décharge – Alimentation - Réacteur. Application au traitement tertiaire de l'eau* ». Thèse de Doctorat de l'université de Paul Sabatier Toulouse (2000).
- [24]- **Chouder A., Malek A. et Krim F.**, « *Modèle et simulation d'une commande en temps réel d'un onduleur de tension triphasé* ». Laboratoire photovoltaïque, centre de développement des énergies renouvelables. Laboratoire d'électronique de puissance, Université Ferhat Abbas, Sétif. Rev. Energies. Ren : valorisation (1999) 131-135,
- [25]- **Corominas E.L., Alonso J.M., Calleja A.J., Ribas J. and Secades Rico M.**, Universidad de Oviedo de Ingeniera Electrica g electronica, Area de tecnologia ELECTRONICA, campus de Viesques-Grijou (Asturias), Spain. « *Analysis of topped-inductor inverters as low-power fluorescent lamp ballasts supplied from a very low input voltage* ». Rev. IEEE. 1999.
- [26]- **Corominas E.L., Alonso J.M., Calleja A.J., Ribas J. and Secades R.M.**, Universidad de Oviedo de Ingeniera Electrica g electronica, Area de tecnologia ELECTRONICA, campus de Viesques-Grijou (Asturias), Spain. « *Estimation of electrical characteristics of low power fluorescent lamps for optimized ballast design minimizing the number of lamp tests* ». Rev. IEEE. 2000.
- [27]- **Chung Henry S.H., Eugene P.W. Tam and S.Y.R. Hui**, Department of electronic engineering, City University of Hong Kong. « *Development of a fuzzy logic controller for boost rectifier with active power factor correction* ». Rev. IEEE. 1999.
- [28]- **Chung Jim-Kuk, Gyum Chae and Gyu-Hyeong**, department of electrical engineering, Korea advanced institute of science and technology (KAIST), Korea. 1999. « *A new soft recovery pulse width modulation quasi-resonant converter with multiple order valley-fill network* ». Rev. IEEE.
- [29]- **Delcroix Jean-loup et Abraham Bers**, « *Physique des plasmas tome I et tome II* ». Inter édition/CNRS édition (1994).
- [30]- **Develey G., Felliali M. et Onladgar J.F**, groupe électrochimie-induction. Institut universitaire de technologie Saint-Nazaire. « *Les plasmas d'induction. Etude bibliographique* ».
- [31]- **Doprado Ricardo N. and Saul A. Bouldo**, Universidade Federal de Santa Maria, Brazil. « *Designing a dimmable high power factor electronic ballast for fluorescent lamps* ». Rev. IEEE. 1999.
- [32]- **Feng Feng Tao and Fred C.Lee**, Center for power electronics systems, Virginia polytechnic institute and state University and Naoki Omishi, Matsushita electric works. « *A self oscillating drive for single-stage pump-power-factor correction electronic ballast with frequency modulation* ». Rev. IEEE. 2000.
- [33]- **Feng Feng Tao and Fred C.Lee**, Center for power electronics systems, Virginia polytechnic institute and state University and Naoki Omishi, Matsushita electric works.

- «*Optimisation of combined voltage-source current-source charge-pump power factor correction electronic ballast*». Rev. IEEE. 1999.
- [34]- **Fernao V., Amarel T.G., Fernando J. Silva and Crisostomo M.**, Universidade de Coimbra Portugal. « *Fuzzy logic control of a single phase AC/DC buck-boost converter* ». Rev. EPE 1999-Lausanne.
- [35]- **Ferrero F.G., Cecilio Blanco, Perèz M.A., Manuela G.Vega and Manuel R. Secades**, Dept. of electrical, electronic, computers and systems engineering. University of Oviedo. Campus de Viesques, Spain. « *A pspice model for HPS lamps operated at high frequency* ». Rev. IEEE. 2000.
- [36]- **Feynman/Leighton/Sands**, «*Les cours de physique de Feynman. Électromagnétisme I* ». Inter édition, Paris, (1979) 1 et 2 et 3.
- [37]- **Flaus Jean-Marie**, «*traité des nouvelles technologies. Série automatique. La régulation industrielle, régulateur PID, prédictifs et flous* ». Edition Hermes, Paris (1994).
- [38]- **Foch H., Francois Forest et Thierry Meynard**, « *Onduleurs de tension. Structure. Principes. Applications.* » Technique de l'ingénieur (D3176-1- D3176-18).
- [39]- **Gerber Beat**, «*Solarium (Rayonnement et santé)* », office fédéral de la santé publique, Berne. Numéro d'article 311.324.f. (Internet) www.uv-index.ch.
- [40]- **Gilleron F., Faussurier G., Mirone A. et Gauthier I-C.**, LULI. Paris, école polytechnique, Bruyère. Le Châtel, France. « *Traitement statistique d'un plasma hors d'équilibre* ».
- [41]- **Göhler Lutz, Universität der Bundeswehr München Wenner – Heisenberg, and Klaus Kelting**, Siemens AG, HLPSE CAD, Munich, Germany. « *A united compact model for depletion MOSFETs in smart power applications* ». Rev. IEEE. 2000.
- [42]- **Glozman Stanislav and Sam Ben-Yoakov**, power electronic laboratory, department of electrical and computer engineering, Ben-Gurion, Israel. « *Dynamic interaction of high frequency electronic ballasts and fluorescent lamps* ». Rev. IEEE. 2000.
- [43]- **Guiyum Yao and Lars Norum**, department of electrical engineering and computer science, the Norwegian institute of technology. « *New transfer function for PWM power converters* ». Rev. IEEE. 1990.
- [44]- **Göldner H., Lehnert K., Böhme F.**, Dresden University of technology, and Franz Raiser, OSRAM GMBH, Hellabrennerstr, Germany. « *Principles of electronic ballasts for fluorescent lamps. An overview* ». Rev. IEEE. 1999.
- [45]- **Gyum Chae, Tae-Ha Ryoo and Gyu-Hylong Cho**, department of electrical engineering Korea advanced institute of science and technology (KAIST), Kusong-Dong, Yusong-Gu, Taejon, Korea. « *Electronic ballast with modified valley fill charge pump capacitor for prolonged filaments preheating and power factor correction* ». Rev. IEEE. 1999.
- [46]- **Hae June Lee and J.P. Verboucoem**, department of electrical engineering and computer science, University of California, USA. « *Simulation of a positive column discharge with a one dimensional radial radiation transport coupled partial-in-cell model* ». Journal of applied physics volume 90, number 10, November 15th 2001. Received 09 April 2001, accepted for publication 15 August 2001.
- [47]- **Hansruedi Bühler**, « *Collection électricité. Réglage par logique floue* ». presses polytechniques et universitaires Romandes. CH-1015 Lausanne, Suisse (1994).
- [48]- **Held B.**, « *Physique atomique* ». Edition Masson Paris, Milan, Barcelone, Bonn (1991).
- [49]- **Held B.**, « *Physique des plasmas froids* ». Edition Masson (1999).

- [50]- **Helder C. Silva, Corrêa Pinto João A., Ernane A.A.cELHO, Barreto L.H.S.C., Luiz de Freitas, Valdir J.Farias and JoãoVieira Jr.** Universidade Federal de Vbalândice, Faculdade de engenharia electrica Feelt campus, Santa Monica Brazil. « *High power factor electronic ballast for tubular fluorescent lamp* ». Rev. EPE. 2001.
- [51]- **Jongnet M.**, « *cours de physique. 4. Structure de la matière* ». école nationale des ponts et chaussées ; école nationale supérieure des télécommunications. Edition EYROLLES (1969).
- [52]- **Kandala G. Rao and Kishore Chatterjee**, « *A new current source charge pump electronic ballast having high input power factor and low crest factor* ».Rev. ISIE 2003.
- [53]- **Kassakian John G., Schlecht Martin F. and Verghese George C.** « *Principal of power electronics* ». Massachusetts institute of technology. By addition Wesley Publishing Company (1991).
- [54]- **Kazufuni Takahoshi, Masafuni Jinuno and Masaharu Aono**, electrical and electronic engineering, Ehine University, Japan. « *The study of electronic ballast for fluorescent lamp with an electronic device given two functions* ». Rev. IEEE. 2000.
- [55]- **Labrique Francis, Guy Seguiet et Robert Bausière**, « *Les convertisseurs de l'électronique de puissance volume 4, La conversion continu-alternatif* ». 2^{ème} édition, Londres Tec. and Doc. Lavoisier New York, Paris.
- [56]- **Laroche Gilles**, « *ELECTRA. Les plasmas dans l'industrie* ». sous la direction de Maurice Orfeuill. DOPEE. 85.
- [57]- **La Toison Marc**, « *Source de lumière de l'éclairage électrique. Lampe à décharge* ». Technique de l'ingénieur 3-1987 D 5810-1 à D 5810-22.
- [58]- **Malvino Albert Paul Ph.D**, « *Principes d'électronique* ». Traducteur : Nicole Daregnan Court. Consultant : Léon collet. Mc Graw-Hill, éditeur (1980).
- [59]- **Mathiew J.P., Kastler A., Fllary P.**,« *Dictionnaire de physique* ». 3^{ème} édition Masson Eyrolles.
- [60]- **Mohan Ned, Undeland Tore M. and Robbins William P.**, « *Power electronics: converters, Application and design* ». By John Willy and sons.Inc (1989).
- [61]- **Mokhtari M.**, « *Matlab 5.2 and 5.3 et Simulink 2 and 3 pour étudiants et ingenieur, Partie I/1, I/2* ». Edition Springer (2000).
- [62]- **Moo Chin S., Yen Han C., Hsien Yaw C.**, power electronics laboratory, department of electrical engineering, national Sun Yet-Sen university, Kaohsivng, Taiwan and Ching R.Lee, department of electrical engineering. Fortune institute of technology. « *A fluorescent lamp model for high-frequency electronic ballasts* ». Rev. IEEE. 2000.
- [63]- **Morel P.**, « *Cours de physique : Physique quantique et thermique* ». Collection METHODES. Hermann, Paris (1969).
- [64]- **Mostefaoui Mohamed**, « *Modélisation d'une décharge électrique dans un mélange (mercure-argon) basse pression- application aux lampes à décharge fluorescentes* ». Thèse de Magister, UHBBC. (2001).
- [65]- **Mrabat Brahim, Ghammam Abdeldjalil, Eloumi Hatem, Stambouli Mongi, J.J Damelincourt**, « *Alimentation en pseudo continu d'une lampe à décharge mercure-argon basse pression utilisée pour produire du rayonnement UV* ». Université de .Paul Sabatier de Toulouse (2003).
- [66]- **Murilo Cervi, Seidel Alysson R., Bisogno Fabio E. and Do Prado Ricardo N.**, researching group of electronic ballasts-GEDRE, Universidate Federal de Santa Maria, Brazil. « *Fluorescent lamp model employing tangent approximation* ».Henry. Rev. IEEE. 2000.

- [67]- **Ney Henry**, « *Electronique et normalisation, 3 installations électriques* ».Nathan technique, édition Fernand Nathan (1986).
- [68]-**Ouahes R. et Devallez B.**, « *Chimie générale* ». 2^{ème} édition corrigée SNED Alger (1981).
- [69]- **Persson Eric**, « *Variable power electronic ballast operates Mercury, Gallium and Iron doped UV arc lamp* ». Nicollet technologies corp., Minneapolis, USA, Rad Tech. North America, Inc (2000).
- [70]- **Persson Eric and Dong Kuusisto**, « *A performance comparison of electronic Vs. Magnetic ballast for powering gaz – discharge UV lamps* ». Nicollet Technologies Corporation. Presented at Red Tech'98, Chicago, USA.
- [71]- **Pointu Anne Marie, Jérôme Perrin et Jaques Jolly**, « *Plasmas froids de décharge* » Technique de l'ingénieur, traité génie électrique D 2830-1 à D 2830-21, 1998.
- [72] - **Purco Inc.**, « *L'eau potable.....Que faut il faire pour se protéger ?* ». [File://internet: L'eau potable et les moyens d'en obtenir.htm](#). Premier imprimé - Février 1990. Filtration Tecgnic-Eau Québec Inc.
- [73] - **Rivoire M. et Ferrier J.-L.**, « *MATLAB Simulink Stateflow avec des exercices d'automatique résolus* ». Edition TECHNIP, Paris 2001.
- [74]- **Rudolf F. Graf**, «*ELECTRONIC DATABOOK*». TAB Book Inc. Library of congress logging in publication data (1983).
- [75] - **Sarroukh Hasnaa**, , « *Modélisation du rayonnement d'une lampe à décharge mercure-argon basse pression application à un réacteur de traitement des eaux usées* ». Thèse de Doctorat, Université Abdemalek Essaadi, Faculté des Sciences Tétouan, Maroc (1999).
- [76] - **K. Sayed Jaffar Abdullah Majed**, « *Fuzzy based AVR systems* ».Senior project, University of Bahrain (1999), college of engineering, electrical engineering.
- [77] - **Secades-Rico M., Corominas E.L, Ribos J., Colleja A.J., Alonso J.M and Cordestin J.** , Technologia Electronica – Universidad de Oviedo, Campus de Viesques, Spain. « *A low cost electronic ballast for a 36 W fluorescent lamp based on current-mode-controlled boost inverter: design example for green house application with 120 DC bus power distribution* ». Rev. IEEE. 2000.
- [78] - **Séguier Guy**, 2^{ème} cycle. Ecole d'ingénieurs, « *Electronique de puissance. Les fonctions de base et leurs principales applications. Cours et exercices résolus* ». 7^{ème} édition. Edition Dunod, Paris, (1999).
- [79] - **Stöken Horst, Francis Jundt et George Guillaume**, 1^{er} et 2^{ème} cycles. Ecole d'ingénieurs, « *Toute la physique* » 2^{ème} tirage corrigé. Edition Dunod Paris, (1999).
- [80] - **Tong-Tong Jean – Raphaël**, « *La logique floue* ». Edition Hermès, Paris, (1995).
- [81] - **Trassy C. et Mermet J.M.**, « *Les applications analytiques des plasmas HF* », Technique et documentation Lavoisier 1984. CAST-centre d'actualisation scientifique et technique – INSA Delyon.
- [82] - **Wildi Théodore**, « *Electrotechnique* », avec collaboration de Gilbert Sybille 3^{ème} édition (2000). De bock université.
- [83] - **Wing – Hung K.I., Jigingshi, Elsom Yai, Mok Philip K.T and Sun Jonny K.O.**, department of electrical and electronic engineering, the Hong Kong University of science and technology. « *Phase controlled dimmable electronic ballast for fluorescent lamps* ». Rev. IEEE. 1999.

- [84]- **WV T.-F., WU Y.-C., SU J.-Y. and Chen C.r**, Power electronic applied research laboratory (PEARL), department of electrical engineering, Chung Cheng University, Taiwan. « *Design consideration for optimum dimming in single-stage electronic ballasts* ». Rev. IEEE. 2001.
- [85]- **Yavorski Boris et Detlaf Andreï**, « *Aide mémoire de physique* ». 3^{ème} édition. Edition Mir – Moscou (1975). Réimpression (1980).
- [86]- **Zelmet Mimoun**, « *Automatisation des processus industriels. Tome I. Commande classique.* ». Office des publications universitaires O.P.U 04 – 2000. Edition 2.07.4427. ISBNB 9961.0.0475.2. Dépôt légal 406/2000.
- [87]- **Zissis G.**, « *analyse des transferts d'énergie dans l'hypothèse des plasmas à deux températures. Applications aux décharges mercure à basse et haute pression* ». Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse (1990).
- [88]- « *Radiations ultraviolettes et infra-rouges* », (Internet) <File:\Radiations UV et IR.htm>.
- [89]- « *Utilisation de la stérilisation UV dans le traitement des eaux usées* », ozone.ch-les spécialistes de l'eau et de l'ozone. (Internet) <File:\traitement UV des eaux usées.htm>.
- [90]- Environnement Québec « *Guide pour l'étude des technologies conventionnelles de traitement des eaux usées d'origine domestique (traitement tertiaire)* ». (Internet) <File:\Eau-Eaux usées - désinfection des eaux usées traitées – Domestique>. Gouvernement du Québec 2002.
- [91]- « *Traitement de l'eau par rayonnement UV* ». (Internet) <File:\Traitement de l'eau par rayonnement UV.htm>.
- [92]- « *Pourquoi traiter par UV* ». (Internet) Réalisation copyright 2000 <http://www.net-creation.fr/>. <File:\ Pourquoi traiter par UV.htm>. Bordas Sarl.
- [93]- « *Vous avez dit eau potable* », Sources vitales (La revue de l'association de Bio-électronique). (Internet).
- [94]- SECRETARIAT du conseil du trésor du Canada. « *Qualité de l'eau* ». (Internet) <File:\Indicateur social.htm>. Institut national de recherche sur les eaux. Source : Environnement Canada.
- [95]- Industrie Canada, « *Solutions environnementales Canadiennes* ». Trajan technologies Inc. (mise à jour 19/02/2002). (Internet) <File:\Problèmes de l'environnement- la désinfection d'effluent.htm>.
- [96]- « *Les lampes* », (Internet) Yahoo ! encyclopédie. Copyright 2001 Yahoo ! France.
- [97]- « *Interaction ions-plasma* ». (Internet) <File://A:\ Interaction ions-plasma .htm>. Le moteur recherche-Web. Site référencé sur ilcoo.net.
- [98]- « *Couplage onde-plasma* ». (Internet) <File:\ Couplage onde-plasma.htm>.
- [99]- « *Interaction matière-rayonnement* ». (Internet).
- [100]- « *Guide de l'ingénieur électrique des réseaux internes d'usines* », Technique et documentation Lavoisier. Edition Tin .1986.
- [101]- « *Idées nettes sur la logique floue* ». 1999, première édition, presses polytechnique et universitaires romandes, CH-1015 Lausanne, Suisse.
- [102]- « *Technique de l'ingénieur D₂ II Génie électrique matériaux* », D 320-1 et D 321-1 → D 323-10.

[103] - **Desjardins R.** ; « *le traitement des eaux* ». Edition de l'école polytechnique de Montréal 1988.

[104] - **Juery C.** ; « *Définition des caractéristiques techniques de fonctionnement et domaine d'emploi des appareils de désinfection* ». Office nationale de l'eau SNIDE.
Sources : ozone.ch/librairie/gasandwater/applications/désinf.pdf/Senet-2003.

[105] - **Reboni E.** et **Robert M.** ; « *les méthodes de désinfection de l'eau* ». ozone.ch Sàrl, Novembre 2000-Juin 2001.

[106] - " **نصر الحايك** - ديوان المطبوعات الجامعية . "

Annexes

A. ELEMENTS DE FABRICATION DES LAMPES [75]

A.1 DEFINITION

Fabriquer une lampe, c'est mettre dans une enveloppe fermée des matériaux qui, sous l'action d'un courant électrique, vont permettre l'émission d'un flux énergétique. L'ensemble répond à des caractéristiques bien définies et qui constituent en quelque sorte le cahier des charges de la lampe à fabriquer.

- Caractéristiques électriques nominales : tension d'alimentation, puissance, intensité, tension d'allumage, tension de régime, etc.
- Caractéristiques photométriques : flux lumineux, rendement lumineux, spectre d'émission, rendu de couleurs, etc.
- Durée de vie nominale : durée de vie en fonction d'un certain nombre d'allumages, pourcentage de perte de flux après un temps déterminé, pourcentage admis de défaillances, etc.
- Caractéristiques dimensionnelles : forme, longueur, diamètre, distance du centre lumineux par rapport à une référence, longueur éclairante, etc.
- Conditions d'utilisation : position de fonctionnement, température d'utilisation, résistance aux chocs, résistance aux vibrations, etc.
- Caractéristiques de fixation et de raccordement électrique : nature et forme des culots température des culots, etc.
- Prix de revient (une donnée non technique qui conditionne aussi la faisabilité d'une lampe).

Ce sont tous ces critères qui déterminent la nature des matériaux à utiliser et les procédés de fabrication à mettre en marche.

A.2 MATERIAUX UTILISEES

A.2.1 ENVELOPPES (OU AMPOULES)

Les enveloppes sont essentiellement fabriquées en verre.

Il existe différents types de verre qui se caractérisent par leur viscosité en fonction de la température, leur coefficient de dilatation thermique, leur résistivité électrique ou chimique, leur pouvoir de transmission optique, leur densité, etc. On distingue deux catégories :

- le quartz qui est un verre de silice pure. Il est utilisé dans la fabrication des lampes U.V à cause de ses bonnes qualités de transmission dans l'ultraviolet, à la différence des autres verres. Il est aussi utilisé pour la réalisation des lampes dont la température dépasse 500°C sur la paroi comme les tubes halogènes, les tubes à vapeur de mercure haute pression et les tubes à halogénures

- les autres verres qui, sous leurs différents aspects des plus tendres au plus durs, sont des mélanges surtout de dioxyde de silice SiO_2 et d'autres oxydes métalliques (Na_2O , Al_2O_3 , B_2O_3 , CaO , PbO , MgO , K_2O BaO). Ces verres peuvent servir à la fabrication des ampoules des lampes à incandescence et des tubes fluorescents ; c'est le cas des verres tendres. Aussi si la résistivité du verre est grande, cas du verre au plomb, il peut être utilisé pour la fabrication des composants internes des lampes à incandescence et des tubes fluorescents. Par contre, pour des lampes dont les contraintes de température ou de résistance aux chocs sont très élevées, on utilise le verre dur.

Il existe aussi l'alumine dont la température de fusion - mais sans ramollissement préalable - est de 2050°C. Elle est utilisée pour la fabrication des tubes à vapeur de sodium haute pression (la température de paroi est de l'ordre de 1500°C).

A.2.2 PASSAGES DE COURANT

Les passages de courant permettent d'assurer la continuité électrique entre l'intérieur et l'extérieur de l'ampoule. Ils sont constitués de plusieurs éléments assemblés par soudure électrique en bout ou par point et elles doivent être scellées de façon parfaitement étanche dans le verre ou dans le quartz, ce qui exige que les coefficients de dilatation thermique du métal et du verre soient très proches.

A.2.3 FILAMENTS

Les filaments des lampes sont en tungstène, essentiellement à cause des propriétés de ce métal à savoir, un point de fusion très élevé (3400°C), un taux d'évaporation réduit par rapport à d'autres métaux réfractaires, une bonne émissivité dans le visible et une bonne résistivité à chaud (résistivité à froid 15 fois plus faible).

A.2.4 ELECTRODES

Les termes électrode et cathode sont utilisés tous deux pour désigner les éléments en tungstène situés à chaque extrémité d'un tube et à partir desquels va s'établir la décharge. La cathode est généralement considérée par les fabricants de lampes comme étant l'élément terminal d'où part la décharge, alors que l'électrode est l'ensemble entrée de courant plus cathode. Il existe plusieurs types de cathodes, les principaux sont :

- Les cathodes pour lampes fluorescentes qui sont réalisées à partir d'un filament bispiralé ou trispiralé serti sur les entrées de courant d'un pied ; ce filament est recouvert d'un produit émissif déposé par trempage qui va permettre l'amorçage de la décharge. Ce produit est constitué de carbonates de métaux alcalino-terreux qui seront transformés en oxydes (oxyde de baryum, de calcium, de césium, de strontium...) au cours de ces opérations de fabrication de la lampe. La qualité de la matière émissive et son adhérence sur le filament sont les facteurs essentiels de la durée de vie des lampes.

- Les cathodes pour lampes à décharge haute pression qui sont constituées d'un fil de tungstène enroulé sur une ou plusieurs couches autour d'un mandrin en tungstène. Leur dimension est liée à l'intensité du courant de fonctionnement de la lampe.

Le produit émissif est fixé à l'intérieur du spiralage par trempage des cathodes sous vide dans une solution liquide ; après séchage la couche extérieure est éliminée par brossage, puis les cathodes subissent un traitement thermique à 2000°C. Les oxydes utilisés sont l'oxyde de baryum, l'oxyde d'yttrium, et...

Dans le cas où le produit émissif risque d'être rapidement détérioré ou détruit, les cathodes sont fabriquées en tungstène thorié (alliage de tungstène avec 2 à 4% d'oxyde de thorium).

- Les cathodes froides qui sont constituées d'un tube en acier doux de grande surface pour éviter leur échauffement, et sont destinées à des usages particuliers comme les enseignes lumineuses. Elles ne fonctionnent qu'avec des tensions élevées.

A.2.5 CULOTS

Le culot est ce qui sert à fixer la lampe et à la relier au circuit d'alimentation électrique par l'intermédiaire d'une douille ou d'un connecteur. Il peut être entièrement en métal (laiton, laiton nickelé, aluminium...) ou tout en céramique ou en métal avec une partie isolée par la vitrite ou par de la céramique.

La forme et les dimensions des culots répondent en général à des définitions normalisées et sont liées à l'utilisation ou aux spécificités des lampes.

Les culots sont fixés par l'ampoule au moyen d'un mélange à base de résine thermodurcissable ou, dans le cas où ils devraient supporter de hautes températures, avec un ciment spécial.

La connexion des entrées de courant sur le culot est déterminée par l'intensité de courant, la température de fonctionnement et la nature des matériaux. Elle est réalisée soit par simple contact, soit par sertissage, soit par une soudure à l'étain, soit par une brasure à l'argent.

A.3 PROCESSUS DE FABRICATION DES LAMPES A VAPEUR DE MERCURE BASSE PRESSION

La décharge dans la vapeur de mercure basse pression est conçue pour produire principalement des raies de longueur d'onde 253,7 et 185 nm. Son application principale est la réalisation des lampes fluorescentes où le rayonnement émis qui se situe dans l'ultraviolet excite une ou plusieurs couches de substances fluorescentes qui restituent le rayonnement sous forme de rayonnement visible.

Ce principe de décharge est aussi utilisé pour la réalisation de lampes destinées uniquement à l'émission d'un rayonnement ultraviolet germicide. Alors que les lampes fluorescentes ont une ampoule en verre tendre, les lampes U.V sont fabriquées avec une ampoule en quartz.

Dans le marché, il existe plusieurs catégories des lampes fluorescentes :

- Les lampes tubulaires standard dont le diamètre est de 16mm pour les petites puissances et de 26mm pour les lampes les plus usuelles ; Il existe aussi des lampes de 8mm de diamètre qui ont des caractéristiques d'allumage particulières. La plupart de ces tubes sont rectilignes, mais on fabrique aussi des lampes tubulaires circulaires.

- Les lampes fluorescentes compactes qui sont des tubes de petits diamètres mais, au lieu d'être droits, elles ont une forme réduisant l'encombrement. Ces lampes étant destinées à équiper les mêmes luminaires que les lampes à incandescence, le système d'amorçage et le ballast est intégré à l'intérieur du culot.

A.3.1 LAMPES FLUORESCENTES TUBULAIRES

La fabrication des lampes fluorescentes tubulaires nécessite d'abord la préparation de matière fluorescente. Celles-ci se présentent sous forme de poudres à grains parallélépipédiques obtenus par broyage et tamisage à 10 μ . Les principaux produits de base sont les suivants :

- les halophosphates de calcium activés à l'antimoine ou au manganèse
- le silicate de calcium activé au plomb ou au manganèse
- le phosphate de strontium et de magnésium activé à l'étain
- le fluogermanate de magnésium activé au manganèse
- le vanadate d'yttrium activé à l'euporium
- les aluminates de magnésium activés au baryum, à l'euporium, au cérium ou au terbium.

Ces poudres subissent différents traitements thermiques, sont mélangées par trois ou plus de façon à obtenir une couleur de blanc bien définie puis sont préparées en suspension liquide avec un liant et un solvant.

Ensuite, la préparation des tubes commence par un rétreint des extrémités au diamètre de l'envasement du pied. Et après lavages des tubes, des couches de matières fluorescentes sont déposées par montée puis descente de la suspension liquide, suivis d'un séchage pour

éliminer le solvant, puis un passage au four pour brûler le liant enfin, un broissage interne des extrémités pour enlever les poudres situées dans la zone du scellement du tube avec les pieds.

Le montage des pieds se fait par une tige de dumet qui est insérée dans le verre entre les entrées de courant et qui sert de support.

La fabrication des électrodes et leur montage sur les pieds commence d'abord par le spiralage des filaments (dimensions suivant la puissance des lampes) puis, leur sertissage sur les fils en nickel des entrées de courant. Et après le dépôt par trempage d'un produit émissif, la fixation par soudure sur la tige en dumet d'un ruban annulaire en nickel ou en acier nickelé autour du filament (cet anneau appelé aussi coupelle permet d'éviter que le produit émissif ne se dépose trop vite sur le tube). Enfin la fixation par sertissage sur la coupelle d'une très petite capsule de verre contenant une goutte dosée de mercure ; cette capsule est entourée par un fil très fin de tantale qui est soudé sur la coupelle, un pied sur deux est ainsi équipé (Figure A-1)

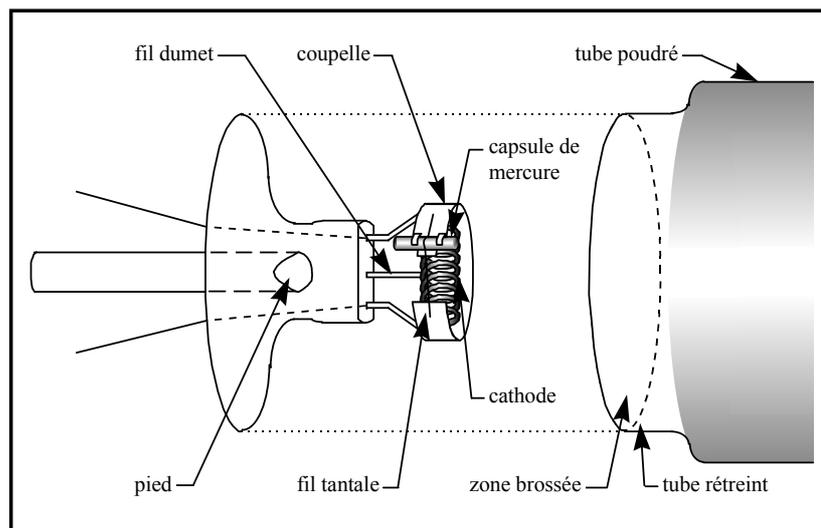


Fig. A-1 : Pied avec électrode et capsule de mercure.

Les pieds sont présentés des deux cotés du tube placé horizontalement, les évasements venant toucher les bords du tube ; le scellement se fait par ramollissement de l'ensemble (il n'y a pas étirage du tube).

Le pompage se fait par les deux queusots sur une machine à axe horizontal. Il commence par un vidage, puis une succession de rinçages avec de l'argon suivis de vidages, ensuite un remplissage final à très faible pression d'argon ou d'un mélange argon-néon ou krypton, et enfin la fermeture des queusots.

Avant le culotage et l'emballage (finition), le fil de tantale est chauffé sous l'action d'un champ haute fréquence, ce qui provoque une fissure de la capsule en verre, et le mercure se vaporise alors dans le tube.

A.3.2 LAMPES A ULTRAVIOLETS

A la fois, l'aspect général et les processus de fabrication des lampes U.V ne s'écartent pas trop de ceux d'une lampe fluorescente tubulaire standard.

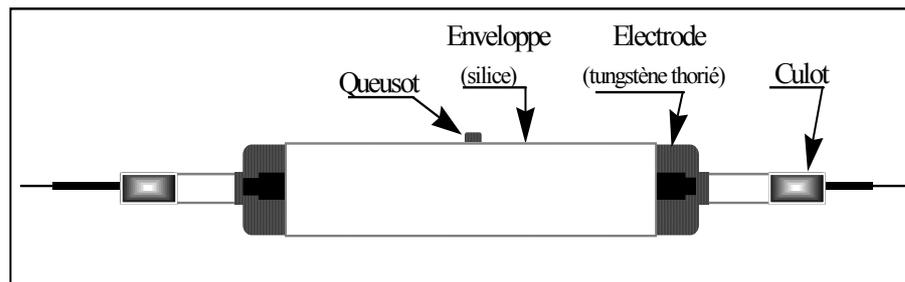


Fig. A-2 : Aspect général d'une lampe UV

Dans ce cas, la préparation des électrodes (Figure A-3) nécessite la fabrication des entrées de courant (plaquette molybdène et deux tiges molybdène) sur lesquelles sera monté le filament (soudure par points), puis trempé dans un produit émissif.

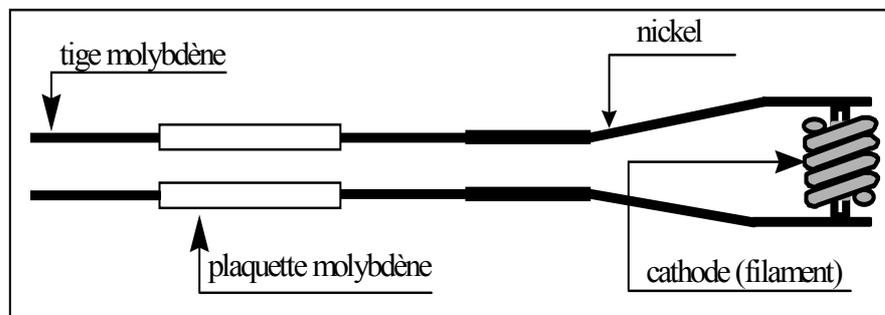


Fig. A-3 : Electrode pour lampe UV.

Le pompage du tube en quartz se fait d'abord par un vidage jusqu'à 10^{-5} mbar, puis un dégazage du tube par chauffage jusqu'à 600 à 700°C aussi un dégazage des électrodes (déjà pincées à chaque extrémité du tube sous courant d'argon) par mise sous tension des filaments sous faible pression d'argon suivie d'un vidage immédiat, ensuite un remplissage d'argon et introduction d'une goutte de mercure préalablement dosée enfin un dernier vidage, suivis d'un remplissage d'argon à très faible pression et de la fermeture de queue-sot.

B- COMPARAISON ENTRE LE BALLAST MAGNETIQUE ET LE BALLAST ELECTRONIQUE [70]

Le type le plus commun de ballast en service est le ballast magnétique traditionnel qui a été utilisé pendant plusieurs décennies. Il se compose d'un transformateur limiteur de courant et d'un condensateur résonnant série. Quand le ballast est mis sous tension, la lampe est lentement chauffée et atteint par la suite un point de fonctionnement stable. Il n'y a aucun contrôle sur la puissance de lampe autre que marche-arrêt.

Les utilisateurs de l'équipement traitant U.V, cependant veulent avoir le contrôle de la puissance de la lampe, en particulier par l'intermédiaire d'un ordinateur ou d'un contrôleur programmable tout en améliorant la fiabilité.

Il est possible d'obtenir le contrôle de la puissance produite en utilisant un ballast traditionnel en ajoutant :

- des contacteurs de mercure avec des batteries de condensateurs à haute tension ;
- des réacteurs saturables ;
- ou, un régulateur de tension ferroresonnant.

Cependant, le dispositif supplémentaire de la commande vient au dépend de la fiabilité, le rendement, le bruit acoustique, la taille et le coût concurrentiel.

B-1 TESTS DE COMPARAISON

Eric Persson et **Doug Kuusisto** ont fait une comparaison entre un ballast électronique et un ballast magnétique standard évalués tous les deux à 2.4 KW.

*) Le ballast magnétique a été équipé de la commande à trois niveaux par la commutation dans différentes valeurs du condensateur pour obtenir nominalement la puissance de 100% , 75% et 50%.

*) Le ballast électronique a eu sa commande, qui permet l'opération de 100% à 10% vers le bas de la pleine puissance.

*) Une lampe avec une longueur d'arc de 20 cm évaluée à 120 W/cm était la charge d'essai pour les deux ballasts.

Les essais suivants ont été réalisés :

- ❖ temps de démarrage ;
- ❖ régulation de la ligne ;
- ❖ la gamme de commande ;
- ❖ le facteur de puissance ;
- ❖ élévation du rendement et de la température.

B-1-1 TEMPS DE DEMARRAGE

Cet essai mesure le temps que la lampe prend pour atteindre le fonctionnement à pleine puissance démarrant à $t=0$ (la mise sous tension).

Le ballast magnétique a été installé avec sa batterie de condensateur à pleine puissance. Le ballast électronique travail à trois arrangements différents du courant de démarrage 100%, 200% et 300% du plein courant d'exécution.

Il y'a un paradoxe très intéressant dans le graphe de la puissance en fonction du temps de la figure B-1 : comment ce fait il que le ballast électronique avec un courant de démarrage de 100% (8.5 A) met en marche la lampe d'avantage qu'une minute plutôt que le ballast magnétique qui démarre à 135% du plein courant (11.5 A) ?

La réponse est que le ballast magnétique atteint la pleine puissance 20s après le ballast électronique mais prend un bon moment pour obtenir 95% à 100% parce que le courant est asymptotique à sa valeur finale. Le ballast électronique d'autre part a un système de commande en boucle fermée qui fait le réglage rapide à la valeur finale.

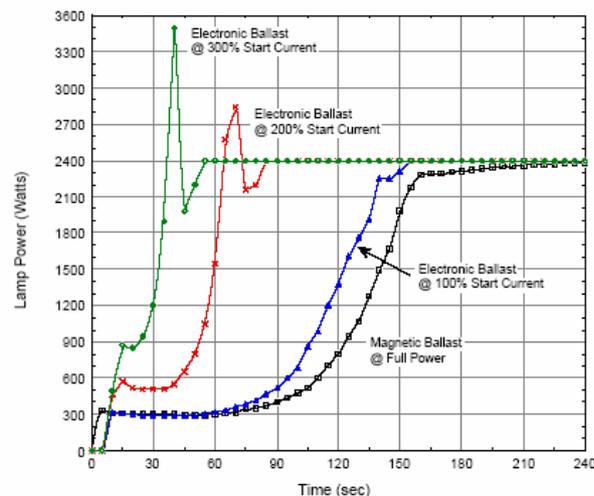


Fig.B-1 : Caractéristique du temps de démarrage d'une lampe à décharge pour les deux ballasts

B-1-2 REGULATION DE LA LIGNE

La tension de service fluctue de manière significative durant la journée. La régulation de la ligne est une mesure de combien de déviations dans la puissance de la lampe se produit quand la puissance d'entrée du ballast varie.

La figure B-2 montre la déviation de la puissance nominale, normale à 240 v, pour des variations approximativement de $\pm 15\%$ dans la tension du secteur pour les deux ballasts. Considérant que le ballast magnétique n'a aucune rétroaction directe, la régulation est

étonnement bonne. Elle a montré une déviation de l'excédent de 1.68% pour un changement de la tension du secteur de 30%.

Puisque le ballast électronique utilise la rétroaction du courant de la lampe, on compterait qu'il devrait juger le courant de lampe et donc la puissance tout à fait régulière pendant que la tension du secteur change. Les données expérimentales confirment qu'en effet, la puissance de la lampe est tenue à l'intérieur d'une déviation extraordinairement petite de seulement 0.29% excèdent la même gamme de 30% de la tension du secteur.

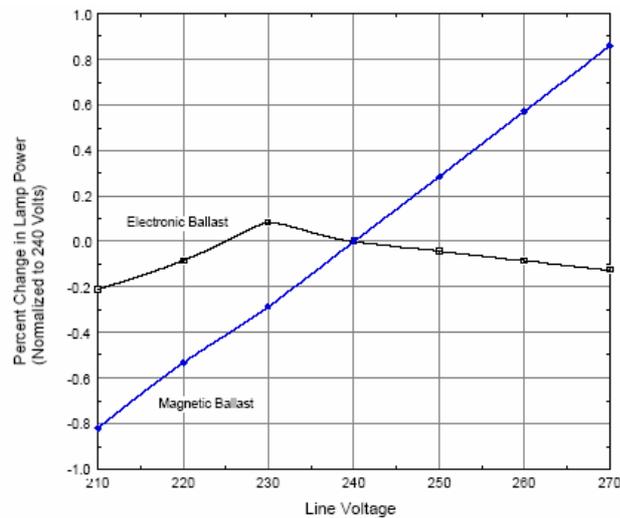


Fig.B-2 : Régulation de la ligne des ballasts électronique et magnétique.

B-1-3 LA GAMME DE COMMANDE

Dans le graphe de la gamme de commande (la puissance de la lampe en fonction de l'entrée de contrôle) figure B-3 on a pris pour le ballast magnétique trois points de repère 100%, 75% et 50% pour des valeurs des condensateurs de $24 \mu\text{F}$, $18 \mu\text{F}$ et $12 \mu\text{F}$. pour le ballast électronique la puissance de la lampe est variable sans interruption de 100% à 10%.

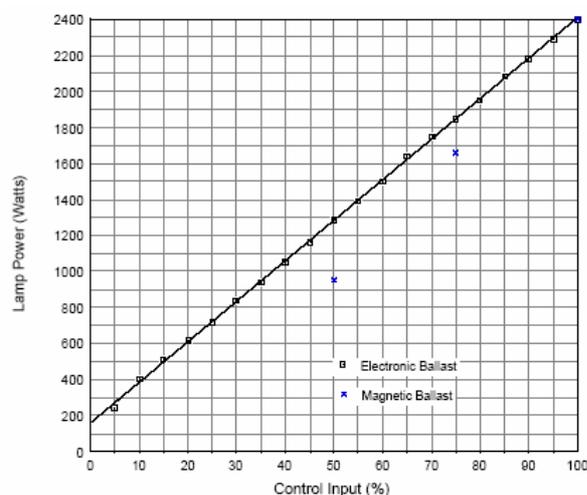


Fig.B-3 : La gamme de contrôle de la puissance de la lampe pour les ballasts magnétique et électronique

Les données du ballast magnétiques sont montrées en tant que trois points de repères discrets représentés par X. Bien que, les valeurs des condensateurs aient été mesurées pour être à moins de 5% de la plaque signalétique, la puissance de la lampe dévie de manière significative de la valeur désirée quand la lampe est supposée être à 75% et 50% de la puissance.

Le ballast électronique est représenté par de petits carrés qui dépistent étroitement une ligne droite de 100% vers le bas à 10%.

Avec un refroidissement propre de la lampe, le ballast électronique peut conduire la lampe à n'importe quel niveau de puissance dans cette marche avec un temps de réponse de 0.1 s. Le refroidissement approprié est essentiel pour obtenir la commande optimale de la lampe.

B-1-4 FACTEUR DE PUISSANCE

Les dispositifs qui tirent la grande partie du courant réactif cause la réduction du facteur de puissance. En plus, les dispositifs qui tirent de grands courants harmoniques réduisent plus loin le facteur de puissance, puisque seulement le courant qui est en phase et à la fréquence fondamentale de la tension du secteur résulte la puissance fournie. Le facteur de puissance varie de 0 (une charge purement réactive, pas de puissance active) à 1 (une charge résistive parfaitement linéaire).

Le ballast magnétique a mesuré un facteur de puissance de 0.9, celui du ballast électronique est de 0.8 pour des applications qui n'ont pas de condensateur de correction du facteur de puissance à l'entrée de service. Des condensateurs facultatifs (PFC) peuvent être appliqués à travers la ligne d'entrée du ballast électronique en rapportant vers le haut son facteur de puissance.

B-1-5 EVALUATION DU RENDEMENT ET DE LA TEMPERATURE

Dans le cas d'un ballast magnétique, toutes les pertes encourues à la batterie des condensateurs doivent être incluses avec la puissance des enroulements (fils en cuivre) et les stratifications en acier.

Pour le ballast électronique, des pertes de commutation et de conduction dans l'électronique de puissance, avec les pertes globales du circuit de commande doivent être incluses dans la mesure.

La figure B-4 montre le rendement en fonction de la puissance. Le ballast magnétique a mesuré 88.4% en pleine puissance, ce qui signifie qu'il absorberait environ 315 w de puissance en tant que chaleur dissipée. Le ballast électronique a mesuré 93.0% en pleine puissance absorbant seulement 180 w de chaleur dissipée.

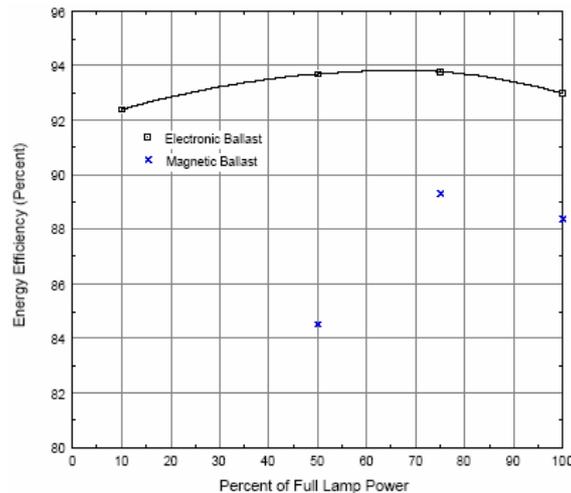


Fig.B-4 : Le rendement énergétique de la puissance de sortie des ballasts électronique et magnétique

Le ballast magnétique absorbe 75% plus de chaleur que le ballast électronique. Ceci apparaît clairement dans les mesures d'élévation de la température. Le ballast magnétique a une élévation normale de 106°C sur la surface d'enroulement et le ballast électronique a seulement 61°C d'élévation.

Un autre point important à considérer quand on évalue le rendement énergétique, l'aération et le coût de climatisation doivent également être considérés.

B-1-6 PREVISION DE FIABILITE

Le ballast magnétique quoi qu'il ait peu de composants, a une moyenne de temps de bon fonctionnement prévue de 35.160 heures. 60% du taux d'échec a été attribué aux condensateurs, presque 40% aux contacteurs de mercure et seulement quelques pour cent pour le transformateur lui-même.

Le ballast électronique est entré avec une moyenne de temps de bon fonctionnement de 160.232 heures. Le taux d'échec a été la plupart du temps distribué sur les composants électroniques sur le panneau du circuit de commande. Le transformateur de puissance compte environ 4% des échecs prévus et l'interrupteur statique moins de 1%.

B-2 CONCLUSION

Les essais de performances entre le nouveau ballast et le ballast magnétique traditionnel montrent des améliorations significatives de la capacité à commander sans interruption la puissance de la lampe sur une large gamme et de mettre en marche la lampe rapidement. Bien que, le facteur de puissance du ballast électronique soit inférieur à celui du ballast magnétique, le ballast électronique a sensiblement amélioré la régulation de la ligne et le rendement énergétique. L'application de la même méthode de prévision de la fiabilité aux deux ballasts prouve que le nouveau ballast électronique a amélioré la fiabilité par un facteur de 4.5.

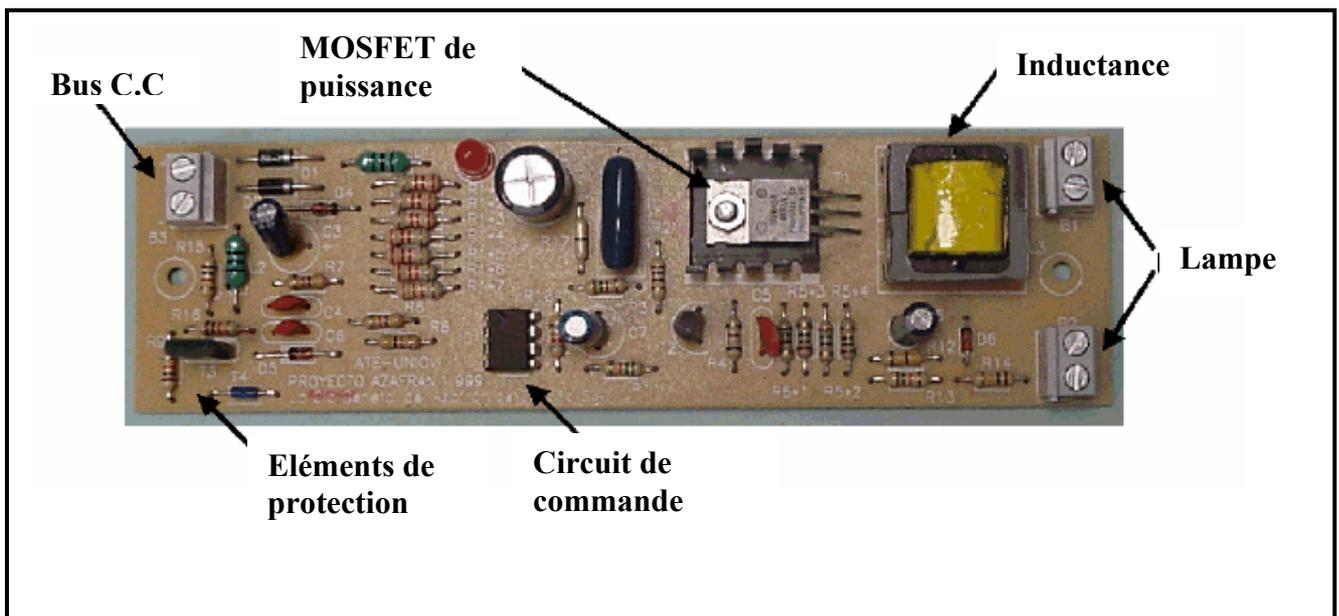


Fig.C-1 : Un prototype de ballast électronique simple [32].

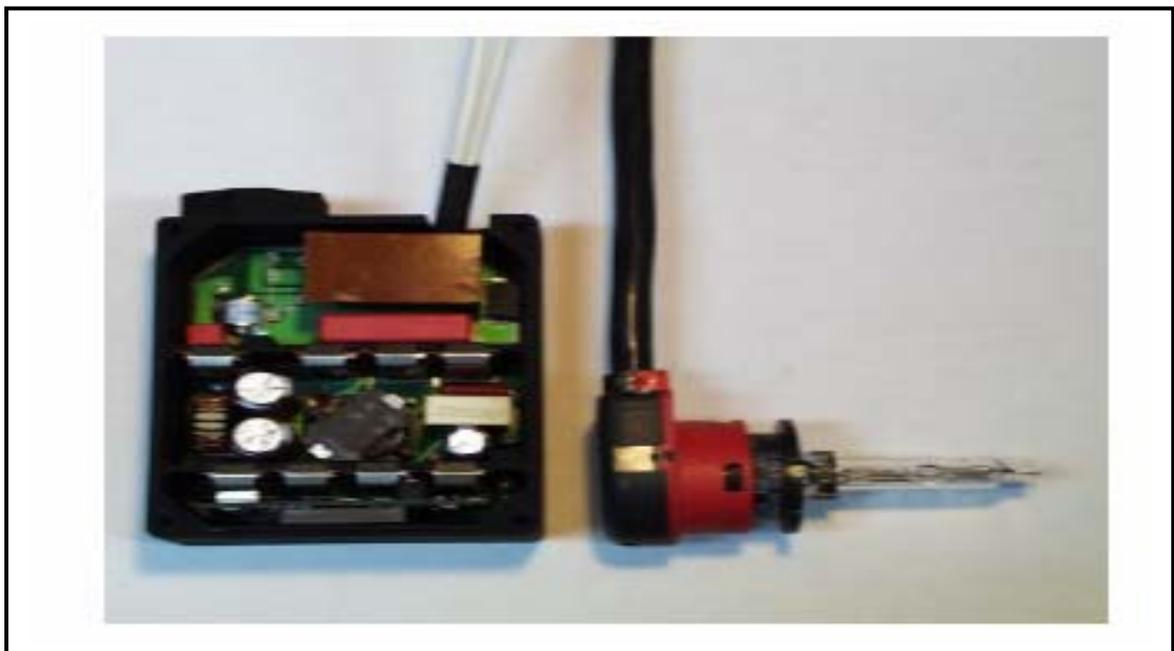


Fig.C-2 : Ballast électronique pour une lampe HID 80 mm * 30 mm. [25].



Fig.C-3 : Prototype de ballast électronique pour une lampe à 150 w [4].

D-1 COMPARAISON ENTRE LES PROCÉDES DE DESINFECTIONS

L'étape centrale de désinfection est commune à tous les traitements, et c'est la plus importante. Elle a pour but de neutraliser tous les virus et les bactéries pathogènes.

	Chlore gazeux	Eau de javel (hypochlorite de sodium) ou hypochlorite de calcium (« chlore solide)	Dioxyde de chlore	Ozone	Procédés membranaires (microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration et osmose inverse)	Ultraviolet
Avantages	<p>1-Facilement disponible.</p> <p>2- Peu coûteux.</p> <p>3-Mesures de contrôle aisées.</p> <p>4-Longues expérience dans leur pratique.</p>	<p>1-Facile d'utilisation et de manipulation.</p> <p>2-Peu coûteux.</p> <p>3-Mesures de contrôle aisées.</p> <p>4-Longues expérience dans leur pratique.</p>	<p>1-Large plage d'utilisation de PH : de 6 à 10.</p> <p>2-Ne donne pas de composés sapides avec les phénols.</p> <p>3-Permet d'oxyder fer et manganèse.</p> <p>4-ne donne pas de composés halogénés.</p> <p>5-Action intéressante vis-à-vis des algues.</p>	<p>1-Bon désinfectant.</p> <p>2-Permet d'oxyder fer et manganèse.</p> <p>3-Agit également sur les algues.</p> <p>4-facilite l'élimination les matières organiques en combinaison avec un filtre en charbon actif en grains.</p>	<p>1- Les membranes semi perméables sont utilisées pour filtrer jusqu'à 1 A° (10⁻⁴ µm) les éléments dépassant la taille de porosité.</p> <p>2-Une purification par osmose inverse, élimine à des taux très élevés soit entre 97% et + de 99% les nitrates, les pesticides, le plomb, les bactéries et les virus.</p> <p>3-Il n y a formation d'aucun sous produit indésirable.</p> <p>4-Ainsi, l'eau purifiée est une véritable source d'eau pure.</p>	<p>1-Bon bactéricide.</p> <p>2-aucun produit ajouté.</p>
Inconvénients	<p>1-La manipulation des bouteilles et containers nécessite des règles strictes de sécurité.</p> <p>2-Le chlore présente un risque de formation de sous produits nocifs, notamment les trihalométhanes par réaction avec la matière organique présente dans l'eau ou les chlorophénols</p>	<p>1-Le chlore présente un risque de formation de sous produits de la chloration, notamment les trihalométhanes par réaction avec la matière organique présente dans l'eau.</p> <p>2- Son efficacité dépend du PH (efficacité optimale si PH<7.5) et de la température de l'eau.</p> <p>3-Inefficace contre les virus.</p>	<p>1-Composé instable à produire sur place (installation d'un générateur) : mesures de sécurité adaptées.</p> <p>2-Formation de sous produits (chlorates et chlorites).</p> <p>3-n'élimine pas l'ammoniaque.</p>	<p>1-Coûteux à l'investissement et à l'exploitation car nécessite un générateur spécifique.</p> <p>2-Pas d'effet rémanent.</p> <p>3-Ne réagit pas avec l'ammoniaque.</p> <p>4- Risque de formation de bromate.</p>	<p>1-Elle nécessite une pression d'eau de 3 à 100 bars.</p> <p>2-Elle nécessite un rinçage fréquent amenant à une consommation de 3 à 6 litres d'eau rejetée à l'égout par litre d'eau traitée.</p> <p>3-L'entretien des pré-filtres et des post-filtres doit être assuré correctement afin d'éviter qu'il ne devienne un foyer de développement microbien.</p> <p>4-L'eau ainsi traitée est déstructurée*.</p> <p>5-L'eau acquiert une forte</p>	<p>1-Pas d'effet rémanent.</p> <p>2-Effet réduit si l'eau change brutalement de qualité (augmentation de la turbidité, présence d'éléments dissous absorbant le rayonnement).</p> <p>3-Pas de réaction avec</p>

	<p>en présence de phénols. Ceci donne un goût à l'eau traitée.</p> <p>3-Son efficacité dépend du PH (efficacité optimale si PH<7.5) et de la température de l'eau.</p> <p>4-Peu efficace contre les virus.</p>	<p>4-Durée limitée d'utilisation de la solution commerciale (2 mois maximum).</p>			<p>résistivité, due à la rareté des composants organiques et inorganiques et une acidité souvent inférieure à la limite autorisée de 6.5 unités PH.</p> <p>6- L'eau ainsi obtenue est <i>déminéralisée</i> avec dominance de sodium résiduel.</p> <p>7- L'eau obtenue est dite <i>agressive</i> pour les métaux**.</p> <p>8- Exigence, lors des traitements à grande échelle par osmose inverse, de <i>reminéraliser</i> l'eau obtenue.</p> <p>9- L'action du chlore sur les membranes est néfaste, il faut surveiller leur état (accident ou vieillissement).</p>	l'ammoniaque.
--	---	--	--	--	--	---------------

Tableau D.1 : Avantages et inconvénients des procédés de désinfections.

* : l'eau ainsi purifiée est déstructurée puisque la liaison la plus courte entre 2 molécules d'eau est de 2.7 Å°, en se souvenant de son passage obligé dans une porosité de 1 Å°.

** : l'eau est dite agressive pour les métaux puisque douce et acide, corrosive pour les canalisations et soudures, avec risque d'arrachement de particules métalliques (fer, cuivre, métaux lourds, donc plomb et cadmium de soudure) et donc d'intoxication en résultant.

Remarques :

- Les trihalométhanes (THM) formés par chloration des eaux de surface sont essentiellement :
 1. le chloroforme CHCl_3 ;
 2. le bromodichlorométhane CHBrCl_2 ;
 3. le dibromochlorométhane CHBr_2Cl ;
 4. le bromoforme CHBr_3 .

- La désinfection par U.V. peut être complétée par un traitement final en ajoutant une infime quantité de chlore (équivalent à une goutte dans 1000 litres) pour préserver la qualité de l'eau tout au long de son parcours dans les canalisations.

Voici un ordre de grandeur des caractéristiques de mise de mise en œuvre des différents désinfectants dans les conditions normales de PH, de température et de turbidité (<1 JTU) :

	Chlore	Dioxyde de chlore	Ozone
Conditions bactéricides	0.1 à 0.2 mg/l pendant 10 à 15 minutes	0.1 à 0.2 mg/l pendant 5 à 10 minutes	0.1 à 0.2 mg/l pendant 1 à 2 minutes
Conditions virulicides	0.3 à 0.5 mg/l pendant 30 à 45 minutes	0.3 à 0.5 mg/l pendant 30 minutes	0.3 à 0.5 mg/l pendant 4 minutes

Tableau D.2 : Grandeurs caractéristiques de mise en œuvre des désinfectants.

Critères	Eau de javel	Ozone	Chlore gazeux	Dioxyde de chlore	U.V.	Procédés membranaires
Désinfectant actif	HClO ⁻	O ₃	HClO ⁻	ClO ₂	λ=254 nm	Filtration physique
Grandeur de l'installation	Petite	Grande	Grande	Moyenne/grande	Petite/moyenne	Très petite
Adaptation aux faibles débits	Bonne	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	Bonne	Bonne
Investissement	Faible	Important	Important	Moyen	Moyen	Faible
Nécessité d'un génie civil dédié	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Oui
Entretien	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyen	Important
Technicité	Simple	complexe	Complexe	Moyen	Simple	Complexe
Autonomie en absence d'exploitation	Faible	Bonne	Bonne	Faible	Très bonne	Bonne
Rémanence	Bonne	Quasi-nulle	Bonne	Très bonne	Nulle	Nulle
Goût/odeur	Caractéristique	Nul	Caractéristique	Nul	Nul	Nul
Efficacité sur Fer/manganèse	Faible	Forte	Faible	Moyenne	Faible	Nulle
Efficacité sur l'ammoniac	Forte	Nulle	Forte	Nulle	Nulle	Nulle
Efficacité germicide	Bonne	Excellente	Bonne*	Très bonne	Très bonne mais attention aux M.E.S***	Bonne
Inefficace contre			Virus* protozoaires		Algues, Moisissures**	Virus
PH optimal	5<PH<7.5	6<PH<10	5<PH<7.5	6<PH<10		
Formation de sous produits	THM	Aldéhydes	THM	Chlorites et chlorates	?	Aucun
Influence des très basses températures	Importante	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle	Nulle

Tableau D.3 : Quelques critères de choix entre les filières.

* : dépend du PH de l'eau.

** : nécessite des doses d'exposition très élevées.

*** : matières en suspension.