

# وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF

Faculté de Technologie

Département d'électrotechnique



جامعة فرحات عباس سطيف

كلية التكنولوجيا

قسم الالكتروتقنية

## Mémoire de Master

No. Réf. : ...../...../2012

Présenté au Département d'électrotechnique

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Automatique

Réalisé par :

Mr. DJAMAI Khadir

Thème

***Eude et commande d'une torche électrique.***

*Soutenu le 11/09/2012 devant la commission d'examen composée de :*

M.	HARMAS Med.najib	à l'Université de Sétif	Président
M.	SAIT Belkacem	à l'Université de Sétif	Directeur du Mémoire
M.	REFFOUFI Salim	à l'Université de Sétif	Examineur
M.	BELKHIRE K.Salim	à l'Université de Sétif	Examineur

## ***Dédicaces***

---

A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.

Je dédie ce modeste travail

A mes chers frères :

**Omar, Rachid, Rabeh, Mourad et Mabrouk**

A mes sœurs :

**Razika, Zahra, Hadria, Rabia, Houria et Amira**

A mes chers amis

A mon promoteurs et enseignants

A la promotion de l'année 2011/2012 option « automatique »

A tous qui nous ont aidés de loin ou de près à faire ce modeste travail.

khadir

---

## ***Remerciements***

---

Je tiens à remercier, en tout premier lieu, Dr. **SAIT Belkacem** Directeur de ce mémoire. Pour lequel je tiens à exprimer mes plus profondes reconnaissances pour sa disponibilité, son aide et ses conseils précieux ; je serai lui exprimer ma profonde gratitude.

Je remercie infiniment monsieur **BABAS Badr Eldin** qui m'a aidé à mon travail.

Je remercie également tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail :

Mr HARMAS.M.N

Mr. REFFOUFI .S

Mr. BALKHIR .K S

Serif, le 05/09 /2012

# Sommaire

INTRODUCTION GENERALE .....	IX
<i>Chapitre 01</i> .....	<i>1</i>
GENERALITE SUR TORCHE A PLASMA .....	1
1.1. Introduction .....	1
1.2. Le plasma.....	1
1.2.1. Plasma réactif : .....	1
1.2.2. Plasma relativiste : .....	2
1.2.3. Plasma collisionnel : .....	2
1.2.4. Plasma non collisionnel : .....	2
1.2.5. Plasma thermique : .....	2
1.3. La torche à plasma .....	3
1.3.1. Les dimensions de torche : .....	4
1.4. Les rôles des composants de la torche : .....	4
1.4.2. Amorçage de l'arc.....	5
1.4.3. L'injection du gaz plasmagène.....	5
1.4.4. -Système de refroidissement.....	5
1.5. Fonctionnement de la torche .....	6
1.6. Alimentation électrique de la torche.....	7
1.7. L'influence de champ magnétique : .....	8
1.7.1. Les avantages exprimés par les constructeurs .....	8
1.7.2. Les problèmes connus à ce jour .....	8
1.8. Les applications des plasmas .....	9
1.9. Conclusion.....	10
<i>Chapitre 02</i> .....	<i>11</i>
ALIMENTATION ELECTRIQUE DE LA TORCHE .....	11
2.1. Introduction .....	11
2.2. La torche dans un circuit.....	11
2.3. Les différents types de source de courant.....	11
2.4. Caractéristiques électriques des torches à plasma linéaires.....	11
2.5. Configuration de l'alimentation électrique .....	12
2.6. La régulation .....	14

2.7. Amorçage d'un arc électrique.....	14
2.7.1. Transition continue.....	14
2.7.2. Contact.....	14
2.7.3. Surtension.....	15
2.8. Arc dans un circuit électrique : .....	15
2.8.1. Caractéristique statique de L'arc.....	16
2.8.2. Extinction de l'arc .....	18
2.9. Conclusion.....	19

## *Chapitre 03.....20*

### COMMANDE DE LA TORCHE .....20

3.1. Introduction .....	20
3.2. Redresseur à commande ML: .....	20
3.2.1. Structure générale du redresseur MLI : .....	21
3.3. Les techniques de commande MLI .....	21
3.3.1. MLI à Bande d'hystérésis.....	21
3.3.2. MLI à échantillonnage périodique .....	22
3.3.3. MLI à porteuse triangulaire .....	23
3.3.4. MLI vectorielle.....	23
3.4. Modélisation du redresseur MLI : .....	24
3.4.1. Représentation fonctionnelle du redresseur MLI dans le référentiel triphasé .....	28
3.4.2. Contrôle par hystérésis de courants prélevés.....	29
3.4.3. Structure du contrôle de courant par hystérésis.....	30
3.4.4. Boucle de régulation de la tension du bus continu .....	30
3.4.5. SIMULATION .....	33
3.4.6. Les blocs de simulations.....	33
3.5. Conclusion.....	37

### CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES.....38

## Liste des figures

Figure 1-1. Représentation générale de la torche à plasma.....	3
Figure 1-2. Dimension de la torche.....	4
Figure 1-3. Coupe de la chambre DE DE GAZ d'injection d'air.....	5
Figure 1-4. Système de refroidissement de la torche .....	6
Figure 1-5. Coupe d'une torche à plasma à arc électrique [2] .....	7
Figure 1-6. Arc stabilisé par champ magnétique .....	8
Figure 2-1. Schéma de principe de l'alimentation électrique d'une torche plasma [8].....	13
Figure 2-2. Caractéristique de la diode .....	13
Figure 2-3.alimentation de l' arc.....	15
Figure 2-4. En Courant contenu et en courant alternative .....	15
Figure 2-5 en courant contenu et en courant alternative .....	16
Figure 2-6. Caractéristiques statiques d'arc pour trois longueurs différentes d'arc.....	17
Figure 3.1. Schéma de principe du redresseur MLI.....	21
Figure 3.2. Principe de fonctionnement de Modulateur MLI à bande d'hystérésis.....	22
Figure 3.3. Modulateur MLI à échantillonnage périodique .....	22
Figure 3.4. Modulateur MLI à porteuse triangulaire.....	23
Figure 3.5. Redresseur à MLI triphasé de structure tension.....	24
Figure 3.6. Schéma unifilaire d'un pont de redresseur connecté au réseau.....	24
Figure 3.7. Pont redresseur.....	25
Figure 3.8. Différents états de commutation des interrupteurs du redresseur MLI.....	26
Figure 9.11 Schéma bloc de la boucle de régulation du carrée de la tension du bus continu.....	32

## ***Liste des tableaux***

---

Tableau 1. Les différentes pièces du dispositif expérimental [3] .....	4
Tableau 2. Les huit états possibles des interrupteurs .....	27

## ***Listes des Acronymes et Symboles***

---

### **Acronymes**

### **Symboles**

# INTRODUCTION GENERALE

---

Une torche à plasma a été réalisée au niveau du laboratoire QUERE [1]. Sa conception est basée sur deux électrodes cylindriques coaxiales en cuivre séparées par un passage d'injection d'air. Un jet de plasma à plus 6000°C est créé par l'intermédiaire d'un arc électrique continu établi entre deux électrodes et de l'air sec basse pression, l'air est ionisé dans l'arc et se transforme en plasma. Des bobines créent un champ magnétique axial pour faire tourner les pieds d'arc, répartissant ainsi l'érosion et prolongeant la vie des électrodes. Un système de refroidissement classique basé sur le pompage de l'eau froide est installé pour diminuer la température. L'alimentation en énergie électrique du système est effectuée par un redresseur en pont à diodes. Ce montage a l'avantage de la simplicité, et en coût faible mais il ne permet pas la régulation de la tension et du courant. Le dispositif fonctionne actuellement en faible puissance sans régulation et sans surveillance.

Dans le but d'améliorer les performances de ce système en puissance et commande. Nous nous intéressons dans ce travail à la stabilité du courant et de la tension sur une large gamme de puissance, ces éléments sont très importants pour le bon fonctionnement de la torche. Cette stabilité est rendue possible par l'utilisation des redresseurs MLI. En effet le développement des méthodes de contrôle des redresseurs MLI est possible grâce au développement des dispositifs semi-conducteurs et aux techniques numériques, qui permettent un fonctionnement rapide avec coût réduit. Ce qui offre la possibilité de l'implémentation des algorithmes de contrôle. Un contrôle approprié peut provoquer l'amélioration des performances du redresseur et la réduction des composants passifs. Contrairement aux redresseurs à diodes classiques. Les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, par ce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée. Il y a deux manières de mettre en application des redresseurs MLI ; comme redresseur à source de courant, et redresseur à source de tension.

Dans ce travail nous allons décrire le fonctionnement de la torche d'arc à plasma et sa modélisation et nous nous intéressons à la commande de l'association de convertisseur MLI avec la torche d'Arc à plasma et la simulation des modèles obtenus sous le logiciel matlab/simulink.

Le mémoire de ce travail comporte trois chapiters.

Dans le premier chapitre nous allons présenter des généralités sur les torches à plasma d'arc en particulier la torche déjà réalisé au laboratoire QUERE.

Dans le second chapitre nous décrire les différentes alimentations électriques de la torche et la modélisation de la torche à plasma réalisé déjà au laboratoire.

Dans le troisième chapitre : nous allons développer la commande de la torche par le redresseur MLI, puis la simulation de fonctionnement sous matlab/simulink.

Enfin nous terminons notre travail par une conclusion.

# Chapitre 01

## GENERALITE SUR TORCHE A PLASMA

---

### 1.1. Introduction

La technologie des torche à plasma maîtrisée appartient à la catégorie des générateurs de plasma thermique, plus communément appelés torches à plasma.

Les torches à plasma, dont la gamme s'étend de quelques dizaines de kW à plusieurs MW, produisent un plasma très chaud à très forte densité énergétique : le plasma thermique.

Ces torches trouvent leur application d'une façon générale dans le domaine de la thermique lorsque des températures très élevées doivent être atteintes et que les moyens de chauffage conventionnels sont inadaptés.

### 1.2. Le plasma

Le plasma ou "quatrième état de la matière, est un milieu ionisé, c'est-à-dire constitué d'un mélange d'ions, d'électrons et d'espèces neutres, excités ou non. Cet état est l'état normal pour plus de 99 % de la matière de l'Univers. Selon le degré d'ionisation du milieu et sa densité, Le degré d'ionisation d'un plasma est la proportion d'atomes qui ont perdu (ou gagné) des électrons, et est commandé la plupart du temps par la température. Même un gaz partiellement ionisé en lequel aussi peu que 1% des particules sont ionisés peut avoir les caractéristiques d'un plasma (c.-à-d. répondez aux champs magnétiques et soyez fortement électriquement conducteur).

On peut distinguer schématiquement les types de plasmas suivantes:

- les plasmas de fusion :
- les plasmas "froids" :
- Plasma d'Ultra froid
- les plasmas thermiques ou intermédiaires [1]

#### 1.2.1. Plasma réactif :

Dans certains plasmas, les rayons ultraviolets, où les flux d'électrons énergétiques ne contribuent pas seulement à l'ionisation. Ils engendrent des réactions chimiques (par intervention

comme constituants, ou par effet catalytique. Ces réactions chimiques peuvent concerner des molécules neutres, ou bien des molécules ionisées. [2]

### **1.2.2. Plasma relativiste :**

Plus un plasma est chaud, plus les écarts de vitesse entre les particules qui le composent peuvent atteindre de grandes valeurs. Lorsque les vitesses de certaines particules deviennent relativistes, de nouveaux effets se produisent. On dit que ces plasmas sont relativistes. [2]

### **1.2.3. Plasma collisionnel :**

Un plasma collisionnel est un plasma où, comme dans les gaz ordinaires, les collisions entre particules sont extrêmes fréquentes. On mesure la quantité de collisions soit en comptant le nombre de collisions qu'une particule subira en moyenne à chaque seconde (c'est la fréquence de collisions), ou par la distance moyenne parcourue entre deux collisions (c'est le libre parcours moyen). [2]

### **1.2.4. Plasma non collisionnel :**

Un plasma non collisionnel est un plasma où les collisions sont si rares qu'elles peuvent être négligées. Cela se produit par exemple lorsque le libre parcours moyen est de l'ordre ou plus grand que les dimensions caractéristiques du plasma. Le plasma du vent solaire, le plasma de la magnétosphère, et le plasma qui s'échappe de l'ionosphère sont non collisionnel.

Pour qu'un plasma soit réactif ou thermique, il faut qu'il y ait des collisions entre les particules. Un plasma non collisionnel n'est donc ni réactif, ni thermique. [2]

### **1.2.5. Plasma thermique :**

Les collisions entre particules peuvent provoquer de l'ionisation si la différence d'énergie entre les particules est assez grande (de l'ordre de quelques eV), ou bien de la recombinaison, si la différence d'énergie est assez faible. Comme dans un même gaz ionisé, les deux formes de collisions peuvent se produire, un équilibre peut s'établir. Le plasma peut alors se maintenir, sans qu'il soit nécessaire d'envoyer des UV, des faisceaux d'électrons ou bien des arcs électriques. Il suffit pour maintenir cet équilibre que le plasma soit assez chaud.

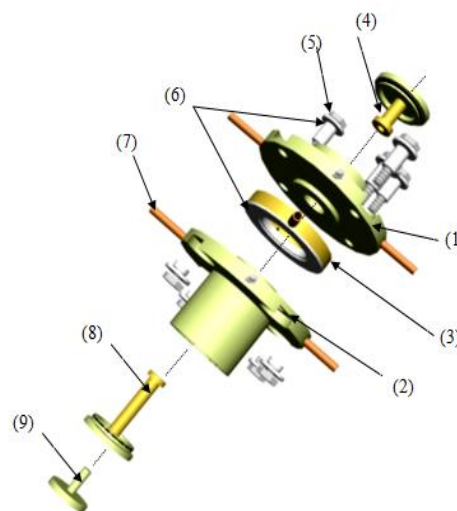
Les plasmas thermiques sont essentiellement générés par trois types de dispositifs:

- Les arcs électriques.

- Les décharges hautes fréquences inductives.
- Les décharges hautes fréquences capacitatives. [2]

### 1.3. La torche à plasma

La torche a été réalisée au niveau de l'Entreprise Nationale des Appareils de Mesure et de Contrôle unité de El Eulma. Le schéma du dispositif expérimental est représenté sur la figure 1.1. Une torche à plasma transforme l'énergie électrique fournie par un générateur de courant en énergie thermique développée par effet Joule au sein d'un gaz plasmagène en contact avec un arc électrique. Le démarrage de la torche est réalisé par un fusible, l'arc électrique est ensuite maintenu sous faible tension et fort courant entre l'anode et la cathode. Les différents éléments qui constituent une torche et son principe de fonctionnement sont représenté sur la Figure 1-1 avec : (8) est la cathode cylindrique, (4) est l'anode cylindrique (3) est la chambre d'injection de gaz d'air et la colonne d'arc principale, peut être définie comme la zone conductrice de gaz ionisé contenant les d'électrons libres. Le pied d'arc est soumis à deux types de forces aérodynamiques et électromagnétiques qui le font déplacer le long de les électrodes. Le jet plasma sort de la tuyère et rencontre l'atmosphère ambiante. Dès la sortie du jet, on aura un début de vorticité qui va se traduire par un phénomène d'engouffrement et un entraînement d'air par la suite.



**Figure 1-1.** Représentation générale de la torche à plasma

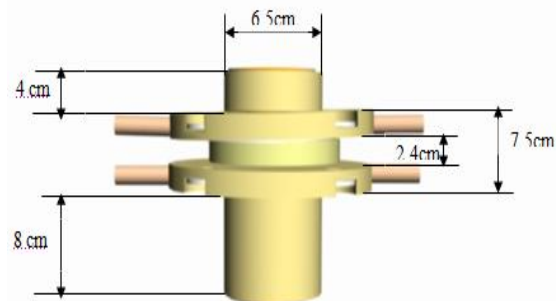
Le matériau les différentes éléments constituant la torche à plasma d'arc est donnée sur le tableau 1.1 suivant.

Pièce N°	Matériau
1	Bronze
2	Bronze
3	Bronze
4	Cuivre
5	Acier
6	Polyamide (PTFE)
7	Cuivre
8	Cuivre
9	Bronze

**Tableau 1.** Les différentes pièces du dispositif expérimental [3]

### 1.3.1. Les dimensions de torche :

Les dimensions de torche comme il est montré sur la figure suivant :



**Figure 1-2.** Dimension de la torche

### 1.4. Les rôles des composants de la torche :

#### 1.4.1.1. - La cathode

Le rôle de la cathode est de fournir les électrons à l'arc.

#### 1.4.1.2. L'Anode

L'anode joue le rôle de collecteur d'électrons. Elle est soumise à des flux thermiques très élevés en particulier au point d'accrochage de l'arc. Ces flux sont approximativement de l'ordre du

carré du courant d'arc,  $I^2$ . Ils peuvent être supérieurs à ceux subis par la cathode qui est refroidie par l'émission des électrons. Aussi l'anode est elle réalisée dans un matériau très bon conducteur thermique comme le cuivre (conductibilité thermique :  $358 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  et diffusivité thermique :  $114 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$  à  $25^\circ\text{C}$ ) et énergiquement refroidie par circulation d'eau [3].

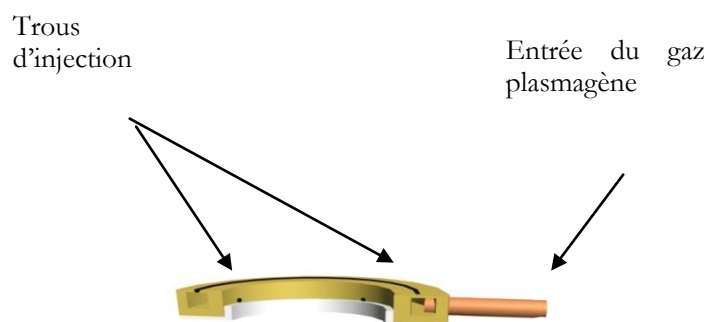
Le déplacement continu du pied d'arc contribue aussi à limiter l'érosion de la tuyère.

#### 1.4.2. Amorçage de l'arc

Les gaz étant généralement de bons diélectriques, l'amorçage de l'arc est assuré par un fusible placé entre les deux électrodes.

#### 1.4.3. L'injection du gaz plasmagène

Le gaz plasmagène est en général l'air, l'admission de l'air dans la torche se fait à partir d'un compresseur 10 bares équipé d'une vanne et un filtre et un régulateur. Il fournira à la torche l'air nécessaire qui est injecté en vortex c-à-d la bague d'injection est percée par des trous tangentiels comme montre la figure 1.3, de manière à créer une composante de rotation des gaz plasmagènes. La vortécité représente le rapport entre les quantités de mouvement angulaire et axial. L'effet de vortex participe à la stabilisation de la colonne d'arc [3].



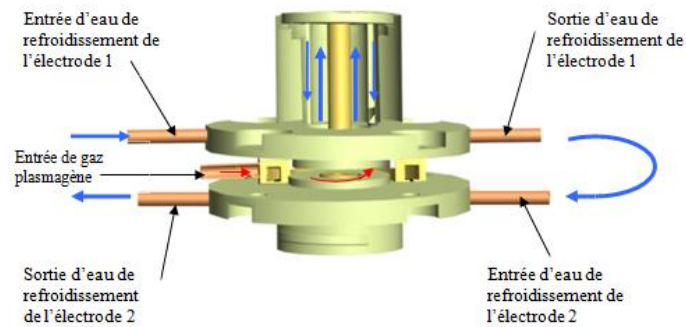
**Figure 1-3.** Coupe de la chambre

#### 1.4.4. -Système de refroidissement

Le refroidissement des électrodes est assuré par l'eau courante du robinet. Elle entre à travers dans un réservoir de 150 litres qui à son tour alimente une pompe à eau, le débit de l'eau est contrôlé par une valve. L'eau va retourner vers le réservoir après son passage à travers les deux

électrode de torche, donc le système de refroidissement fonctionne avec un circuit d'eau fermé. Le refroidissement est très important est nécessaire pour plusieurs raisons, tel que :

- La déformation rapide des électrodes lorsqu'elles ne sont pas refroidies.
- Le refroidissement parfait évite toute ébullition locale qui peut entraîner une destruction quasi instantanée des électrodes [3].



**Figure 1.4.** Système de refroidissement de la torche

### 1.5. Fonctionnement de la torche

Une torche à plasma à arc non transféré est constituée :

- deux électrodes tubulaires coaxiales
- connectées à une alimentation électrique,
- séparées par une chambre d'injection du gaz plasmagène.

**NB :** Le gaz plasmagène est choisi en fonction des caractéristiques attendues du plasma final. Dans le cas du traitement des résidus d'incinération d'ordures ménagères ou de l'amiante, le gaz utilisé est de l'air.

L'ouverture d'un court-circuit amorce un arc électrique entre les deux électrodes tandis que le gaz plasmagène est introduit en vortex dans la torche par la chambre d'injection.

Au contact de l'arc, le gaz s'échauffe rapidement et se transforme en un plasma de très haute température.

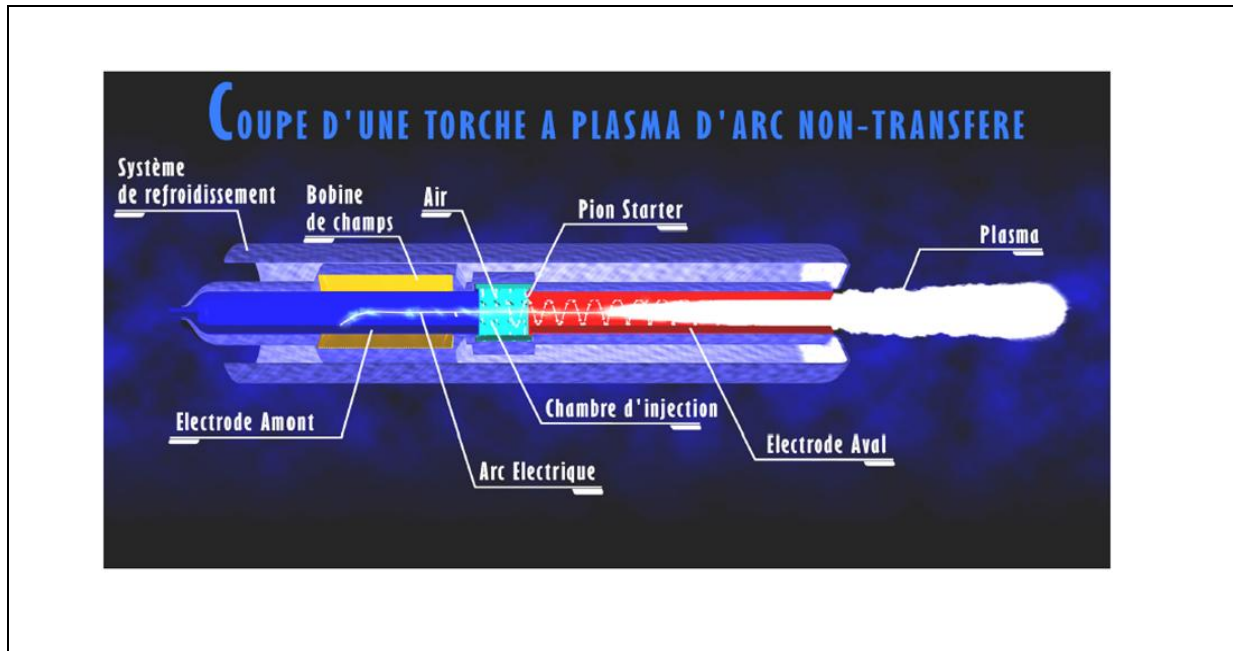
Le plasma produit est expulsé au fur et à mesure par l'extrémité aval de la torche. Il résulte un jet de plasma (autrement appelé dard plasma) à très haute température (2000 à 5 000 °C selon la puissance de la torche).

- Ces torches disposent d'une bobine de champ magnétique pour renforcer la stabilité de l'arc et faire varier la zone d'accrochage. Ceci permet d'améliorer le contrôle de la plage d'usure et

d'augmenter la longévité des électrodes.

- Une circulation d'eau à haut débit assure le refroidissement des pièces exposées à l'arc ou au plasma.

Le pilotage de la torche est réalisé en contrôlant simultanément le courant d'arc délivré par l'alimentation électrique et le débit de gaz plasmagène introduit dans la torche.



**Figure 1-5.** Coupe d'une torche à plasma à arc électrique [2]

## 1.6. Alimentation électrique de la torche

Le comportement de l'arc est fortement influencé par de nombreux paramètres tels que la nature des électrodes et celle du gaz plasmagène et aussi les transferts avec l'écoulement environnant, eux-mêmes régis par la géométrie de la torche et le débit de gaz plasmagène.

De façon schématique, l'arc a tendance à se comporter naturellement comme un court-circuit.

Comme la tension d'arc est fonction de sa longueur, le caractère dynamique du mouvement du pied d'arc et les changements de la longueur d'arc doivent être pris en compte dans la conception de l'alimentation électrique, puisque celle-ci devra répondre aux fluctuations extrêmement rapides de celle-ci. Une alimentation triphasée de faible puissance a été utilisée temporairement pour des tests préliminaires. Cette alimentation est constituée d'un convertisseur statique de six diodes au silicium montées en pont sur des plaques de refroidissement [4].

Elle alimente la torche à une résistance variable et une inductance. L'inductance assure une excellente stabilité de l'arc.

### 1.7. L'influence de champ magnétique :

L'influence de champ magnétique qui provoqué par l'inducteur diffère selon les types des plasmas et selon le diamètre de l'inducteur et la dimension de la torche donc leurs performances est éventuellement modifiable. Dans les plasmas thermiques, l'influence de champ magnétique est très importante, tel que dans les plasmas d'arc le champ magnétique a l'influence de stabiliser et contrôler l'arc électrique comme montre la figure 1. 6, et dans les plasmas inductifs le champ magnétique sert pour ioniser les atomes (puisque les dipôles des atomes sont susceptibles d'être excité dans le champ magnétique). Dans quelques atomes symétries aucun dipôles n'est susceptible d'être excité dans le champ magnétique, il est nécessaire qu'il soit crée une ionisation initiale par une décharge électrique obtenue par exemple à partir d'une bobine tesla, (donc l'influence de champ magnétique aussi). [2]

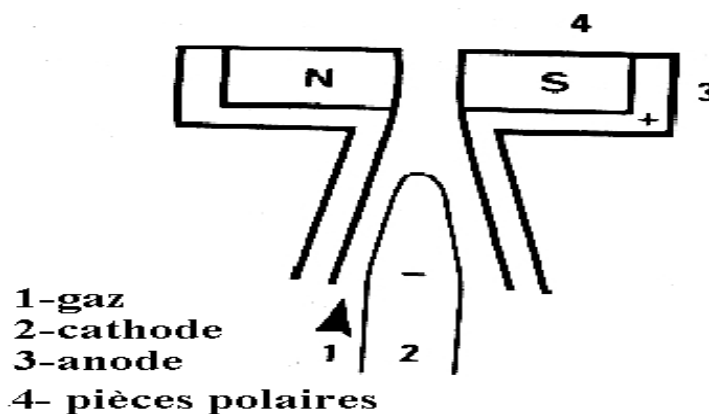


Figure 1-6. Arc stabilisé par champ magnétique

#### 1.7.1. Les avantages exprimés par les constructeurs

- 1 Production de températures très élevées
  - 2 Assurance d'inertage complet des matières traitées
  - 3 Indépendance complète entre l'arc électrique, à l'intérieur de la torche, et l'intérieur du four.
  - 4 Souplesse d'utilisation, facilité de démarrage, modularité dans le concept
  - 5 Gamme de torches étendue : adaptabilité aux matières et volumes à traiter
  - 6 Respect total de l'environnement : pas de combustion lors de la phase de gazéification
- [5].

#### 1.7.2. Les problèmes connus à ce jour

- 1 Turbulence (entraînement de poussières),

- 2 Vaporisation importante de la charge,
- 3 Durée de vie faible des électrodes,
- 4 Puissance concentrée sur volume et surface faible,
- 6 Contrôle des gaz sortants et production forte de Nox
- 7 Utilisation des résidus : même problématique que les mâchefers et REFIOM [5]

### 1.8. Les applications des plasmas

Les plasmas servent couramment en soudage où en découpe des matériaux (métal, bois, plastique, etc...), et plus généralement par irradiation directe d'un matériau. Le plasma arrivant sur la surface d'un matériau permet de traiter sa surface thermiquement et par conséquent de modifier ses propriétés physico-chimiques superficielles et sa microstructure. Les applications les plus marquantes concernent la microélectronique et l'élaboration de couches minces. Les progrès obtenus par les performances des ordinateurs sont liés à la miniaturisation des circuits intégrés contenus dans les composants. Cette miniaturisation n'a été possible que par l'utilisation de traitements plasma (gravure, dépôt), où le rôle des ions est primordial. De même, des matériaux appelés métastables n'ont pu être obtenus que par l'utilisation de plasmas et du laser. On peut avoir par exemple des structures figées à partir de l'état fondu par exemple. Ceci est possible car la montée en température se produit en quelques fractions de seconde et le refroidissement se produit aussi en quelques fractions de secondes. On peut par exemple obtenir des structures amorphes comme celle du verre sur des matériaux cristallins comme les métaux. Enfin, les techniques plasmas sont aussi employées dans le traitement de la pollution de type industriel ou domestique (automobiles, etc...).[5]

## 1.9. Conclusion

Les torches à plasma ont révolutionné le monde des matériaux produisant des matériaux entièrement nouveau ayant des propriétés sans pareille. Elles ont par conséquent changé notre vision du monde en soudant par exemple des pièces métalliques épaisses et grandes en des temps record et une précision inégalable.

Les plasmas dans l'industrie ont pris une grande importance. Ils ont également pris une place importante dans les recherches scientifique moderne. Les principales recherchent sur les plasmas ont pour but de produire des collisions suffisamment violentes entre des noyaux atomiques pour provoquer la fusion nucléaire. La stabilité de plasma est l'une des propriétés les plus importantes.

# Chapitre 02

## ALIMENTATION ELECTRIQUE DE LA TORCHE

---

### 2.1. Introduction

L'objectif de cette partie est de décrire les principales caractéristiques de torche à plasma et le décharge à courant continu et d'exposer la problématique du couplage existant entre la torche et la source électrique.

### 2.2. La torche dans un circuit

La famille des plasmas thermiques regroupe deux grandes catégories de plasmas, les plasmas d'arc et les plasmas inductifs, dont les modes de production diffèrent largement. Par conséquent, les alimentations électriques des plasmas d'arc et des plasmas inductifs répondent à des contraintes différentes et ont chacune leur spécificité. Seules les alimentations des plasmas d'arc sont considérées par la suite [6]

### 2.3. Les différents types de source de courant

La conception optimisée de l'alimentation électrique d'une torche à plasma nécessite, pour assurer la sécurité et la pérennité de l'installation, une bonne connaissance de la réaction qu'aura la torche plasma lorsqu'elle sera connectée à l'alimentation. Le comportement d'un arc est fortement influencé par de nombreux paramètres tels que la nature des électrodes et du gaz plasmagène ou les transferts avec l'écoulement environnant (transfert de masse, de quantité de mouvement, d'énergie), eux-mêmes conditionnés par la géométrie de la torche, le débit masse de gaz plasmagène, etc. Toutes ces variantes sont concrétisées par des générateurs d'arcs de types différents. Seules les torches à plasma de type linéaire à stabilisation d'arc par effet vortex sont présentées ci-dessous [6].

### 2.4. Caractéristiques électriques des torches à plasma linéaires.

Ce type de torche se caractérise par deux électrodes cylindriques, l'une creuse assurant la stabilité et le confinement de l'arc généralement par effet vortex, l'autre pouvant être creuse, de type bouton ou de type tige avec l'extrémité conique. Selon la géométrie de l'anode, la caractéristique tension-courant sera plus ou moins élevée. Cependant en général pour les arcs

confinés comme dans les torches de projection, la caractéristique tension-courant a une pente négative.

. Pour une torche à anode cylindrique à section constante, tout le gaz est injecté dans l'espace inter électrode, la longueur de l'arc est auto-ajustable et la caractéristique tension-intensité est monotone décroissante.

. Pour une torche à anode avec changement brutal de section, lorsque la longueur de l'arc est inférieure à la longueur auto-ajustable, correspondant au premier diamètre de la torche, sa caractéristique tension-courant est fortement décroissante ce qui correspond aux faibles valeurs de courant, elle devient croissante lorsque le courant croît (l'accrochage se fait juste en aval du décrochement).

. Troisièmement, pour une torche à anode segmentée avec injection de gaz continue entre les segments, la longueur de l'arc est supérieure à la longueur auto-ajustable, sa caractéristique tension-courant est plus faiblement décroissante, voire croissante pour des valeurs élevées de courant.

La caractéristique tension-courant décroissante de l'arc est un problème pour les concepteurs d'alimentation électrique de torches à plasma d'arc. La pente négative de cette courbe traduit la décroissance de la résistance d'arc lorsque le courant augmente. Ainsi, lorsque le courant croît, à tension fixée, la diminution de la résistance amplifie la croissance du courant. L'arc a une tendance naturelle à se comporter en court-circuit, le courant d'arc croissant très rapidement tandis que la tension à ses bornes chute.

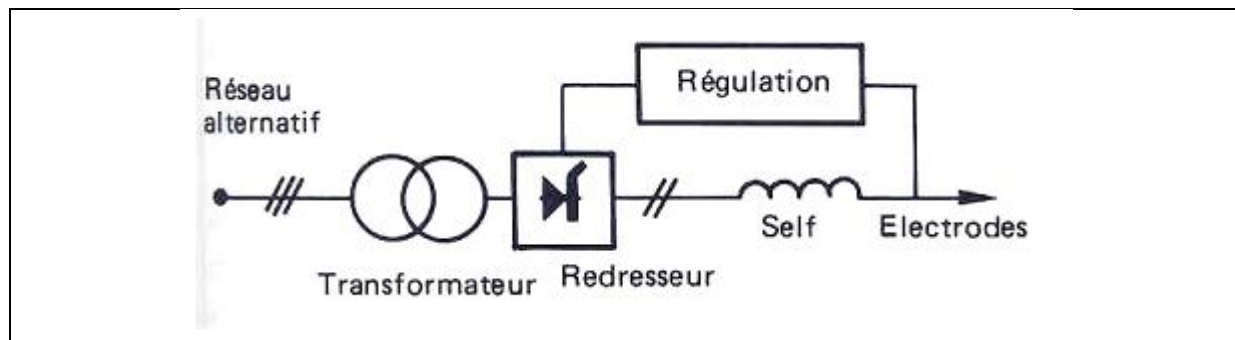
Il apparaît que la seule possibilité d'alimentation électrique pour un arc est une alimentation dont le courant est imposé à tout moment [7].

## 2.5. Configuration de l'alimentation électrique

Dans les torches à plasma d'arc industrielles, l'arc est généralement créé en appliquant un champ électrique entre les deux électrodes. L'utilisation d'un courant alternatif impose que les deux électrodes soient en cuivre et présente l'inconvénient d'accroître leur usure, celle-ci étant trois à quatre fois plus rapide qu'avec un courant continu. En outre, afin d'éviter l'extinction de l'arc à chaque demi-période, il est nécessaire de superposer une décharge haute tension haute fréquence, d'environ 15% de la puissance nominale, ou d'adopter une géométrie avec une faible distance interélectrode autorisant une auto amorçage de l'arc à chaque alternance. Cette dernière solution présente l'inconvénient de limiter la tension d'arc, ce qui, à intensité d'arc donnée, réduit la puissance de la torche. Pour ces raisons, la plupart des alimentations électriques de torches plasma utilisent actuellement du courant continu.

Ce courant continu est obtenu à partir du réseau de distribution de tension alternative (EDF

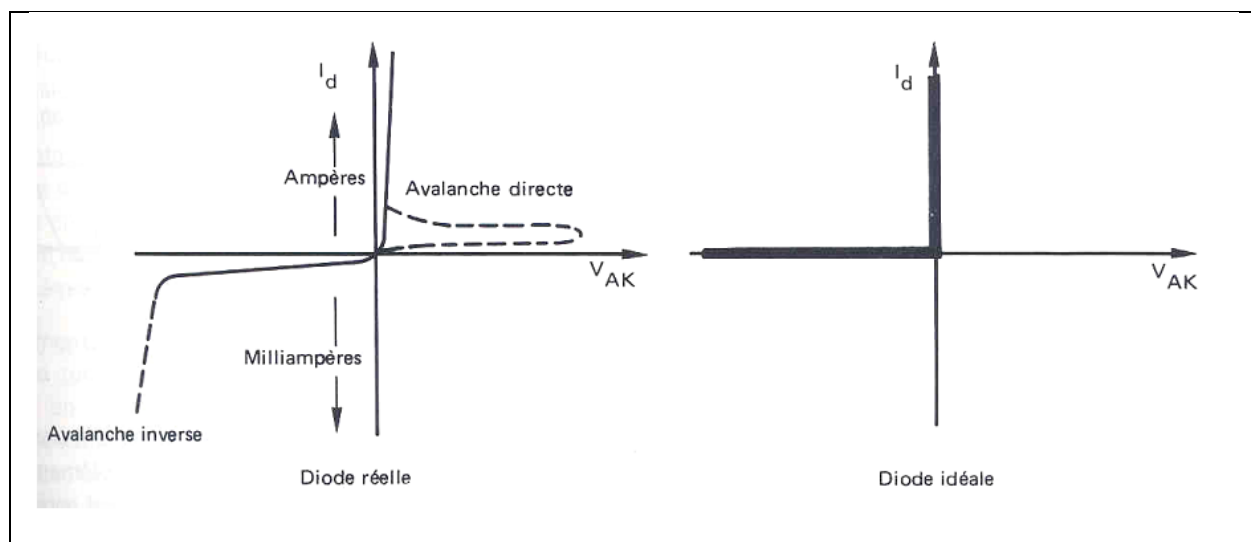
en France, où la fréquence est de 50Hz). Par utilisation d'un redresseur commandé doté d'une régulation en courant appropriée. Une inductance en série à la sortie du redresseur participe à la stabilisation du système en s'opposant aux variations rapides (quelques milliers de Hz) du courant qui peuvent être causées par diverses perturbations (variations du débit masse de gaz plasmagène, fluctuations du pied d'arc). Un transformateur de tête adapte les caractéristiques du réseau de distribution à celles du générateur de plasma. Ces différents éléments sont présentés sur le schéma suivant [8]:



**Figure 2-1.** Schéma de principe de l'alimentation électrique d'une torche plasma [8]

Les redresseurs utilisés dans les alimentations électriques de torches à plasma sont la diode ou le thyristor au silicium.

La diode est capable de laisser passer le courant dans un seul sens entre deux bornes, de l'anode (A) vers la cathode (K). La caractéristique statique est présentée ci-après



**Figure 2.2.** Caractéristique de la diode

Le thyristor est un composant dans lequel le courant ne peut passer que de l'anode vers la cathode, à condition qu'une action d'amorçage soit exercée sur sa gâchette. Tant qu'il n'y a pas eu

d'amorçage, le thyristor est bloqué et aucun courant important ne passe.

Dès que le courant a commencé de s'établir par suite d'une ou plusieurs impulsions de courant sur la gâchette, l'arrêt de celles-ci n'a plus d'effet sur le courant direct et la caractéristique statique est alors celle d'une diode.

Selon le type de puissance utilisée pour la torche, le montage redresseur ne sera pas le même. Le montage redresseur de base est le montage triphasé simple alternance où la tension redressée est fonction de  $\alpha$ , l'angle d'amorçage, qui rend compte du temps entre l'instant où l'amorçage devient possible et l'instant où le composant est mis en conduction ( $\alpha = 0$  pour une diode). Le montage triphasé double alternance (appelé généralement "pont de Graëtz") est équivalent à deux montages simples en série. En majorité, les montages utilisés associent plusieurs ponts de Graëtz pour aboutir à des ponts dodécaphasés séries ou parallèles, les ponts à commandes décalées ou les ponts mixtes.

## 2.6. La régulation

Pour nous avons un système soit stable, il faut régler le courant qui agit l'arc reste stable. Une régulation agissant sur la commande de redresseur associé à une induction est donc nécessaire

## 2.7. Amorçage d'un arc électrique

Il existe trois grandes méthodes pour amorcer un arc électrique:

- Transition continue
- Contact
- Surtension

### 2.7.1. Transition continue

Le système est au départ dans un état de décharge luminescente. La cathode est recouverte par le plasma de décharge. Si on augmente l'intensité, la tension d'extraction des électrons augmente et la température s'élève. L'émission thermo-électronique devient majoritaire. On arrive ainsi, d'une manière continue, à passer d'une décharge luminescente à un arc électrique. [1]

### 2.7.2. Contact

Il est possible (c'est une méthode fréquente), de déclencher l'arc par contact. On considère deux pastilles de métal traversées par un courant suffisant. Lorsqu'on les sépare, grâce aux irrégularités de la surface, le courant passe par un contact très fin; la température s'élève par effet joule jusqu'à la

fusion du métal. On a donc un filet de métal fondu très fin par lequel passe tout le courant. Lors de la rupture du pont fondu, on est dans les conditions de formation d'un arc électrique [1].

### 2.7.3. Surtension

Lorsque la tension dépasse la tension de claquage, une étincelle apparaît. On obtient alors un arc par phénomène d'avalanche. [1]

### 2.8. Arc dans un circuit électrique :

A la coupure d'un circuit d'impédance  $Z_c$ , naît généralement un arc électrique entre les contacts de l'organe de manœuvre (interrupteur, disjoncteur).

Ce fait marquant, qui intervient principalement sur forte surcharge (ou court-circuit) lorsque la séparation des pôles est dépendante des éléments de contrôle de la sur-intensité, se produit également sur ouverture non spontanée et -à un degré moindre- sur fermeture. [7]

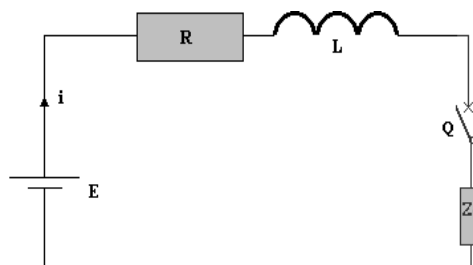


Figure 2-3.alimentation de l'arc

La différente relation à un fonctionnement sur court-circuit :

L'interrupteur (idéal) devrait assurer une coupure quasi instantanée ( $t=0$ ) avec une énergie dissipée entre ses pôles  $r \cdot i^2 \cdot t = 0$

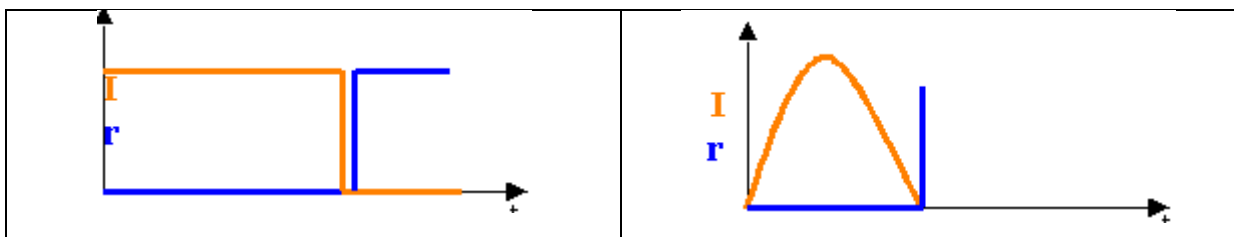
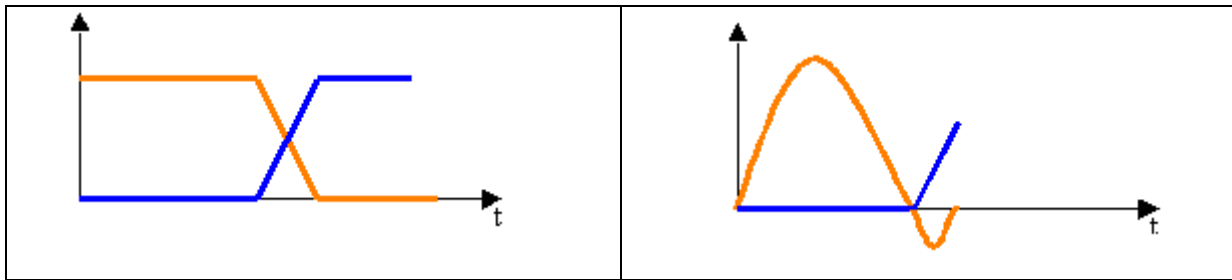


Figure 2.4. En Courant continu et en courant alternative

En réalité au moment de la coupure, la résistance  $R$  des pôles du disjoncteur  $Q$  ci-dessus va passer d'une valeur très élevée ce qui conduit au graphe suivant :



**Figure 2.5** en courant continu et en courant alternatif

L'énergie de coupure prend la forme :

$$\int ri^2 dt = \int (E - Ri)idt + \int Lidt \quad (2.1)$$

Cette relation on montre que même avec une coupure infiniment rapide, l'énergie électromagnétique  $\frac{1}{2}Li^2$  initialement contenue dans le circuit va de voir cependant être de pensée entre les contacts.

D'autre part dès les premier instant de l'écartement des pôles, la densité de courant donner par :

$$j = \frac{i}{S} \text{ Va consi durablement augmenter du fait de la diminution on de la surface de contact à ce ci}$$

Entraîne un échauffement très localisé qui à pour effet d'ioniser le fluide de isolant en abaissant sa rigidité diélectrique : un arc apparaitre avec ses effets négatifs.

### 2.8.1. Caractéristique statique de L'arc

Nous savons que, si l'on porte sur un diagramme la chute de tension  $U$  dans un arc en fonction du courant  $I$  qui le traverse (supposé stabilisé ou lentement variable), on obtient une caractéristique statique qui dépend de tous les paramètres déterminant le fonctionnement de l'arc en question :

- Nature et forme des électrodes
- Nature et pression du gaz *plasmagène* dans lequel l'arc se développe
- Conditions de fonctionnement auxquelles est soumis cet arc (soufflage, turbulence, etc.)
- Longueur de l'arc, etc.

La caractéristique statique présente généralement une allure hyperbolique, la tension passant parfois par un minimum puis croissant ensuite légèrement en fonction du courant.

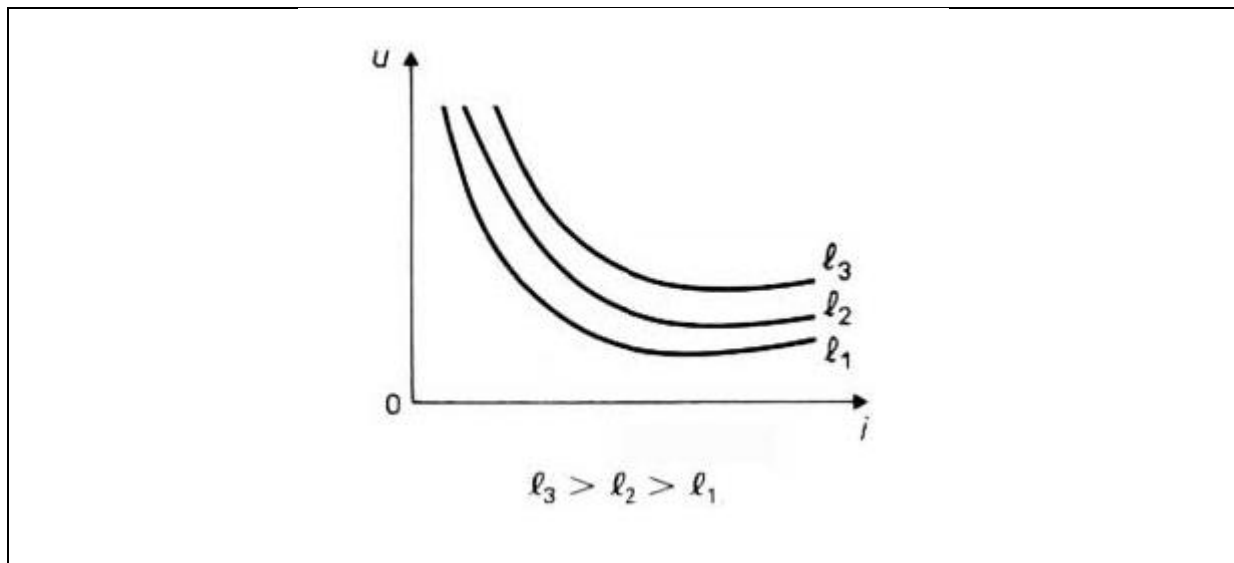
Si l'on ne fait varier que la longueur de l'arc, on obtient toute une famille de caractéristiques figure

(2.6), chacune d'elles correspondant à une longueur donnée. Pour un arc libre brûlant dans l'air à la pression atmosphérique, **Herta Ayrton** a proposé, à la fin du XIXe siècle, une formule empirique\* célèbre donnant grossièrement la chute de tension  $u$  en fonction du courant  $i$  et de la longueur de l'arc :

$$U = A + B\ell + \frac{C + D\ell}{I} = U_0 + \frac{P_0}{I} \quad (2.2)$$

Dans une représentation hyperbolique de la caractéristique,  $U_0$  constitue le seuil de tension d'arc et  $P_0$  la partie constante de la puissance de refroidissement.

Cette formule est acceptable dans une plage de courant limitée à quelques centaines d'ampères. [7]



**Figure 2.6.** Caractéristiques statiques d'arc pour trois longueurs différentes d'arc

La caractéristique statique " tension – courant " d'un arc électrique coupe une droite de charge ( $V=RI$ ) en deux points

On a en effet :

$$V_a(I) = V - RI \quad \text{d'où} \quad V = V_a + RI \quad (2.3)$$

Si le courant passe de  $I \rightarrow I + \Delta I$ , alors  $\Delta V = -L \frac{d(\Delta I)}{dt}$  (auto-induction)

$$\text{Donc :} \quad V + \Delta V = V_a + V_a + R(I + \Delta I) \quad (2.4)$$

$$L \frac{d(\Delta)}{dt} = - \left( R + \frac{dV_a}{dI} \right) \Delta I \quad (2.5)$$

Mais on a aussi, d'où :

$$\Delta V_a = \frac{dV_a}{dI} \Delta I \quad (2.6)$$

La solution de l'équation est:

$$\Delta I = \Delta I_0 \exp \left[ -\frac{1}{L} \left( R + \frac{dV_a}{dI} \right) t \right] \quad (2.7)$$

Le retour à la normale dépend donc du signe de  $R + \frac{dV_a}{dI}$ , s'il est positif, une variation de  $\Delta I$  entraîne sa diminution au fil du temps, donc un retour à la normale, s'il est négatif, la même variation entraîne son augmentation. Il n'y a donc qu'une seule solution stable. [4]

### 2.8.2. Extinction de l'arc

Le processus d'interruption contient lui-même certains composants aléatoires. Ils peuvent apparaître, soit avant le zéro du courant (parties mécaniques du disjoncteur, écoulement du gaz, position de l'arc, effets d'électrodes) ou durant la période de zéro du courant. Le traitement de cette dispersion peut être considéré comme une partie intégrale du modèle.

Quand on annule le champ électrique entre les électrodes, le courant disparaît, mais le plasma subsiste encore quelque temps. Le temps de subsistance dépend de la vitesse de recombinaison électrons - ions et du refroidissement du gaz. Au départ, on suppose que toutes les particules sont à la même température. Un bilan d'enthalpie donne, au final, (en supposant, c'est-à-dire que la pression ne varie pas dans le temps) l'équation:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p v \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \quad (2.8)$$

Avec:

$\rho$  : La masse volumique

$C_p$  : la capacité calorifique à pression constante

$T$  : la température de refroidissement

$v$  : La vitesse des particules

$\lambda$  : La conductivité thermique

$R$  : le rayon de la colonne d'arc

## 2.9. Conclusion

Dans ce chapitre, on a parlé de l'alimentation d, une torche à plasma, on a également vu que la caractéristique tension-courant sera plus ou moins élevées selon la géométrie de l'anode, ainsi que l'alimentation de la torche doit être en courant continu afin d'obtenir un arc stable ce qui nécessite l'utilisation d'un redresseur

# Chapitre 03

## COMMANDE DE LA TORCHE

---

### 3.1. Introduction

La torche à plasma réalisait au niveau du laboratoire QUERE, elle fonctionne actuellement en faible puissance sans régulation. Dans le but d'améliorer les performances de ce système en puissance et en commande. Nous nous intéressons à la stabilité du courant et de la tension sur une large gamme de puissance, ces éléments sont très importants pour le bon fonctionnement de la torche. Cette stabilité est rendu possible par l'utilisation des redresseurs MLI.

En effet le développement des méthodes de contrôles des redresseurs MLI est possible grâce au développement des dispositifs semi-conducteurs et aux techniques numériques, qui permet de fonctionner rapide avec coût réduit. Ce qui offre la possibilité de l'implémentation des algorithmes de contrôle sophistiqués. Un contrôle approprié peut provoquer l'amélioration des performances du redresseur et la réduction des composants passifs. Contrairement aux redresseurs à diodes classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée. Il y a deux manières de mettre en application des redresseurs MLI ; comme redresseur à source de courant, et redresseur à source de tension.

Nous présentons dans ce qui suit les redresseurs MLIs leur modélisation et leurs commandes puis la simulation des modèles obtenus sous matlab/sumilik.

### 3.2. Redresseur à commande ML:

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée.

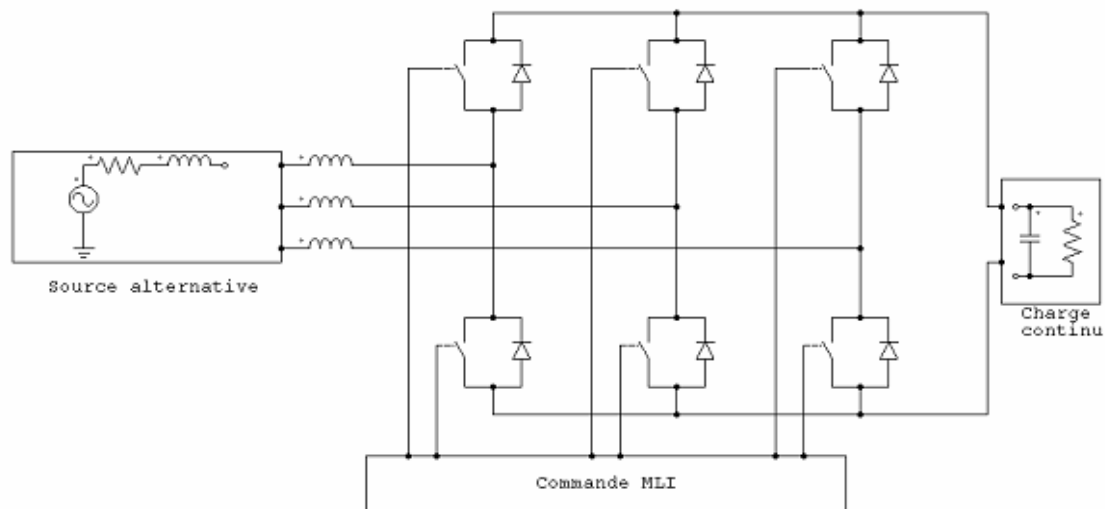
Il y a deux manières de mettre en application des redresseurs MLI ; comme redresseur à

source de courant, et redresseur à source de tension. [12]

### 3.2.1. Structure générale du redresseur MLI :

La technologie employée consiste à modifier la structure interne du redresseur en remplaçant les thyristors par des interrupteurs entièrement commandable à l'ouverture et à la fermeture : transistor MOSFET pour les moyennes et petites puissances, transistors IGBT ou thyristor GTO pour les fortes puissances, en anti parallèle avec des diodes. [13]

La figure 3. 3montre le schéma de principe d'un redresseur MLI

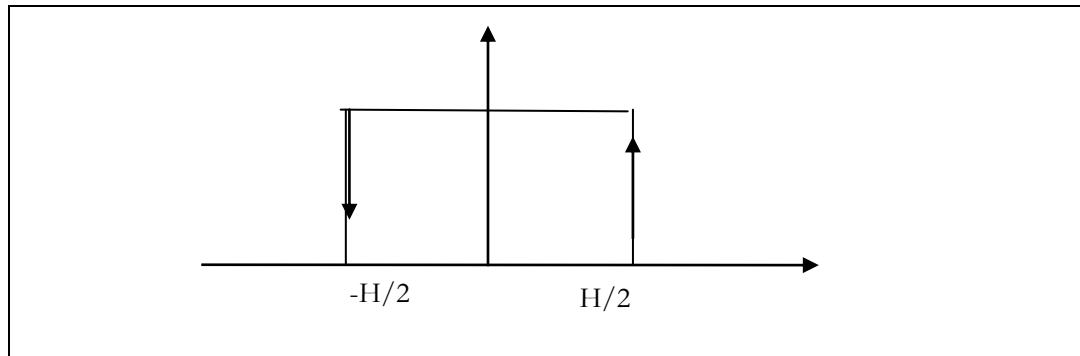


**Figure 3.1.** Schéma de principe du redresseur MLI

## 3.3. Les techniques de commande MLI

### 3.3.1. MLI à Bande d'hystérésis

La méthode de la bande d'hystérésis permet la commutation des interrupteurs du redresseur lorsque l'erreur entre le signal et sa consigne excède une amplitude fixée. Cette amplitude est communément appelée fourchette ou bande d'hystérésis cette technique ne demande qu'un comparateur à hystérésis par phase

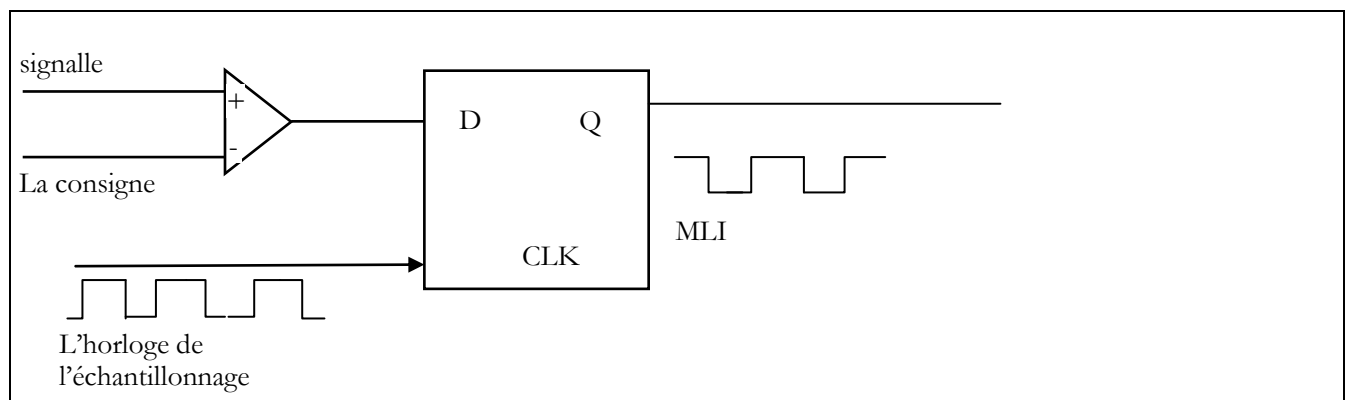


**Figure 3.2.** Principe de fonctionnement de Modulateur MLI à bande d'hystérésis

Le comparateur à hystérésis fonctionne selon le principe expliqué dans la Fig. 3.2, l'interrupteur s'ouvre si l'erreur devient inférieure à  $-H/2$ , il se ferme si cette dernière est supérieure à  $+H/2$ , où  $H$  représente la fourchette (ou largeur) d'hystérésis. Si l'erreur est maintenant comprise entre  $-H/2$  et  $+H/2$  (c à d, qu'elle varie à l'intérieur de la fourchette d'hystérésis), l'interrupteur ne commute pas [12].

### 3.3.2. MLI à échantillonnage périodique

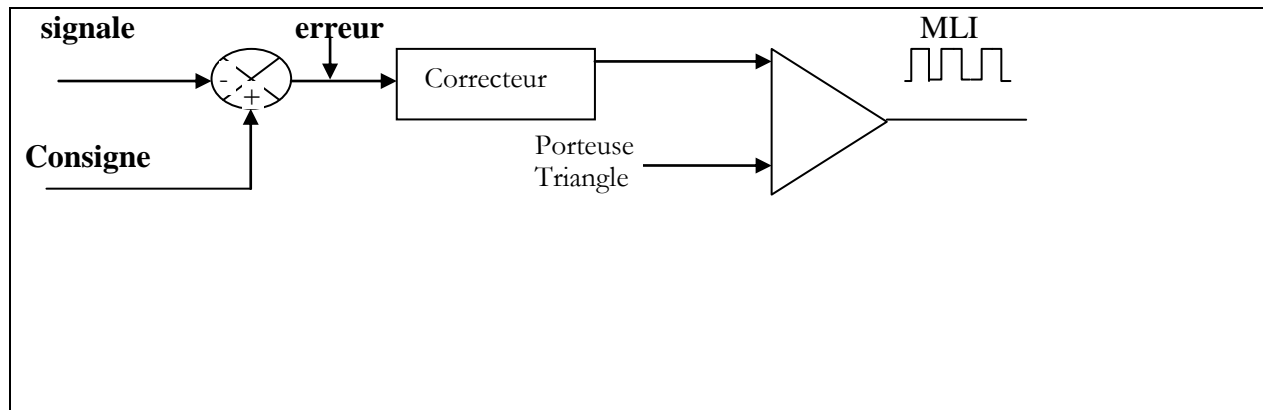
La méthode d'échantillonnage périodique permet aux semi-conducteurs constituant le filtre actif de commuter durant les transitions d'une horloge à onde carrée et à fréquence fixe (fréquence d'échantillonnage). Comme illustré à la Figure. 3.3, ce type de commande est très simple à implanter dans la mesure où il ne nécessite qu'un comparateur et une bascule D type par phase. L'avantage principal de cette méthode est que le temps minimal entre les commutations est limité par la période d'échantillonnage de l'horloge. Cependant, la fréquence de commutation actuelle n'est pas clairement définie [13].



**Figure 3.3.** Modulateur MLI à échantillonnage périodiqu

### 3.3.3. MLI à porteuse triangulaire

La méthode de la MLI à porteuse triangulaire, compare l'erreur entre le signal (courant ou tension) et sa consigne avec une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixées. L'erreur passe par un correcteur avant d'être comparée avec la porteuse triangulaire.



**Figure 3.4.** Modulateur MLI à porteuse triangulaire

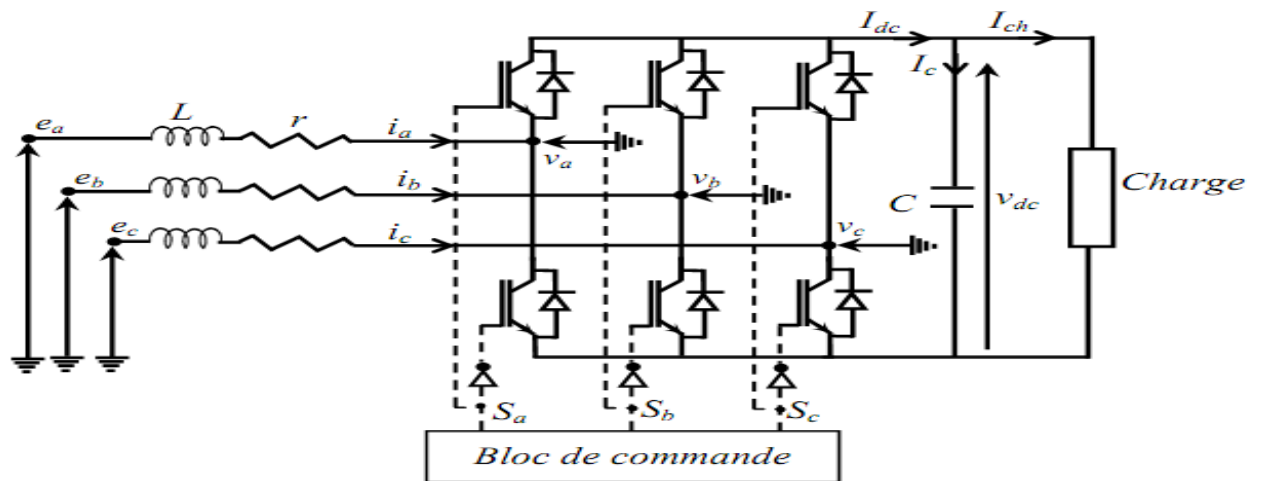
### 3.3.4. MLI vectorielle

Dans la MLI vectorielle les vecteurs à appliquer et les temps d'application de ces vecteurs sont calculés analytiquement à travers des équations mathématiques. Chacun des états possibles du convertisseur est représenté par un vecteur de tension. L'ensemble de ces vecteurs forme le diagramme vectoriel des tensions du convertisseur.

La modulation vectorielle diffère, entre d'autres techniques par le fait que les signaux de commandes sont élaborés en tenant compte de l'état des trois bras de redresseur en même temps et principe de fonctionnement d'un redresseur à MLI structure de tension.

La réversibilité en courant de l'onduleur de tension autorise son fonctionnement en redresseur à MLI. La structure de ce dernier associée à un filtre L d'entrée, illustrée par la figure 3.5, est alors celle de l'onduleur de tension où le côté continu est une source de tension (condensateur du bus continu). Afin de respecter des règles d'interconnexion des sources, l'entrée est une source de courant car ce convertisseur n'est constitué que d'interrupteurs semi-conducteurs. De plus, la présence des inductances de couplage est indispensable pour assurer le contrôle des courants absorbés par le redresseur. En effet, quelque soit la technique utilisée pour générer les ordres de commande ( $S_a$ ,  $S_b$  et  $S_c$ ), le redresseur peut imposer, de manière indirecte, la forme du courant dans ces inductances en contrôlant les tensions  $v_a(t)$ ,  $v_b(t)$  et  $v_c(t)$  mesurées par rapport au neutre du réseau. En d'autres termes, la variation du courant prélevé définie par  $di/dt$ , pour " $r$ " négligeable,

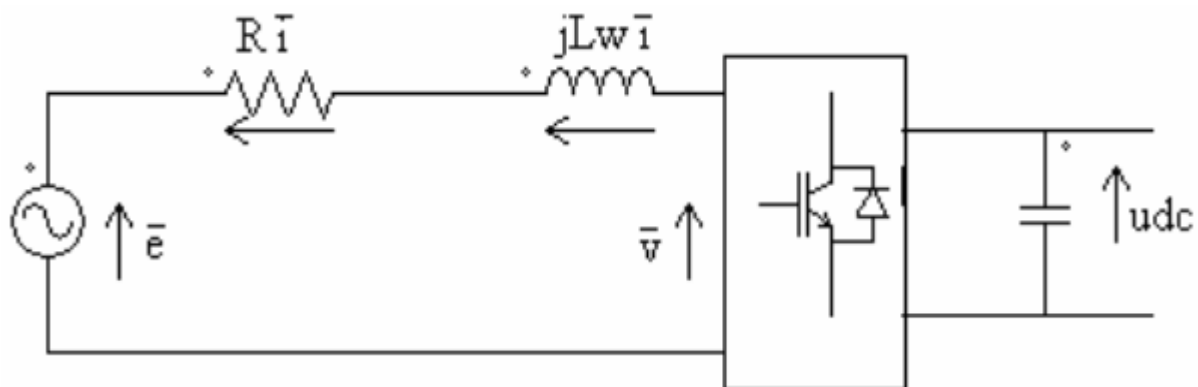
est imposée par la tension appliquée aux bornes des inductances qui est la



**Figure 3.5.** Redresseur à MLI triphasé de structure tension

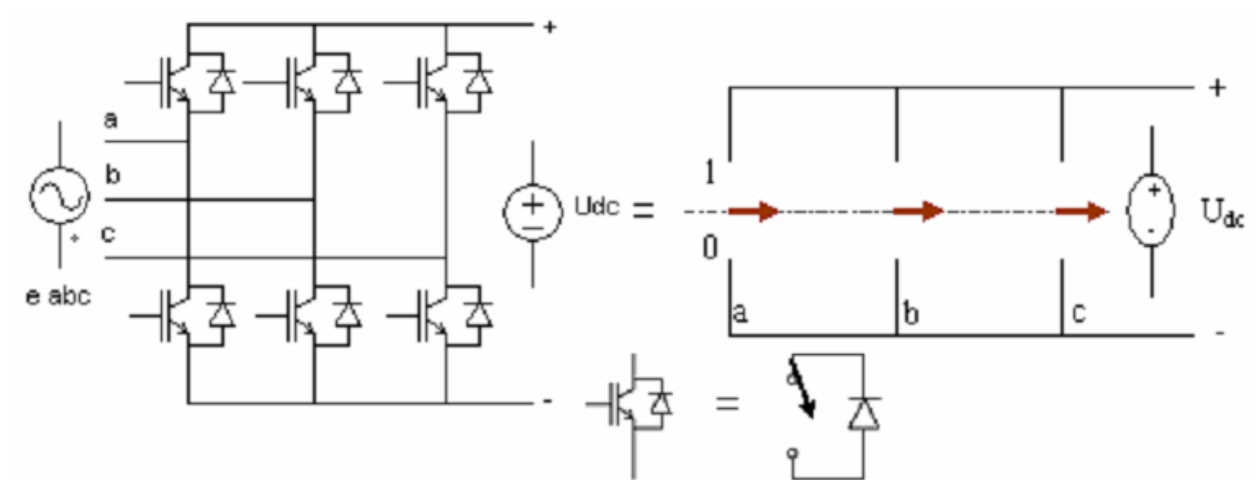
### 3.4. Modélisation du redresseur MLI :

La figure suivante présente le schéma unifilaire d'un pont de redresseur connecté au réseau,  $e$  est tension de la source et  $R, L$  sont les paramètres de la ligne,  $v$  est la tension d'entées de redresseur.

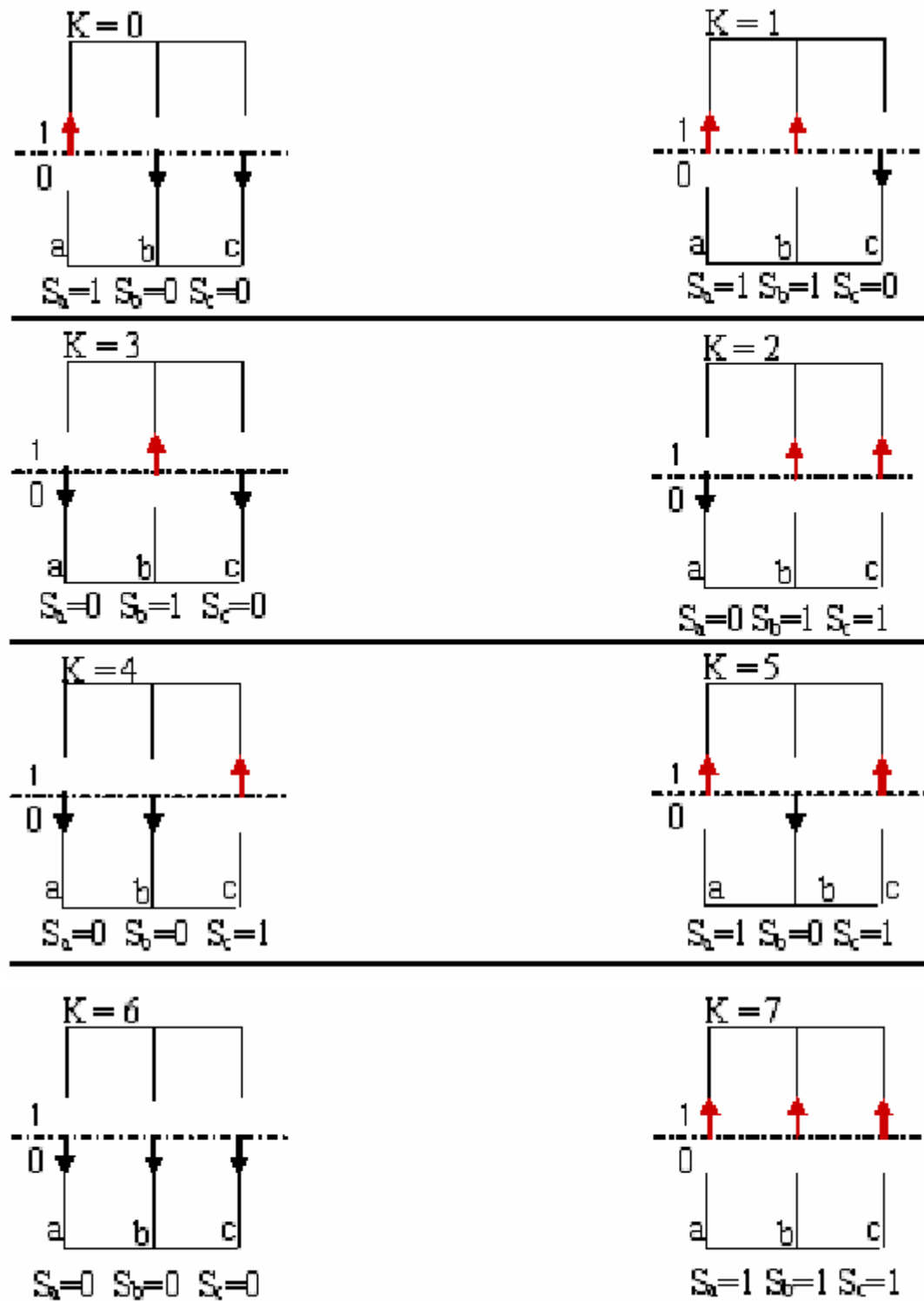


**Figure 3.6.** Schéma unifilaire d'un pont de redresseur connecté au réseau

Le courant de ligne  $i$  est commandé par la chute de tension produite par l'inductance  $L$ , et la résistance  $R$  de la ligne et la tension d'entrée de redresseur  $V$ . Le pont redresseur est constitué de trois bras avec deux transistors (thyristors) bipolaires antiparallèle avec des diodes (figure 3.7). Qui sont présentées comme des interrupteurs peuvent être commandées en ouverture '1' et en fermeture '0', et la tension d'entrée  $v$  est en fonction des états de ces interrupteurs.



**Figure 3.7.** Pont redresseur



**Figure 3.8.** Différents états de commutation des interrupteurs du redresseur MLI

K	S <sub>a</sub>	S <sub>b</sub>	S <sub>c</sub>	V <sub>ab</sub>	V <sub>bc</sub>	V <sub>ca</sub>
0	1	0	0	u <sub>dc</sub>	0	- u <sub>dc</sub>
1	1	1	0	0	u <sub>dc</sub>	- u <sub>dc</sub>
2	0	1	0	- u <sub>dc</sub>	u <sub>dc</sub>	0
3	0	1	1	- u <sub>dc</sub>	0	u <sub>dc</sub>
4	0	0	1	0	- u <sub>dc</sub>	u <sub>dc</sub>
5	1	0	1	u <sub>dc</sub>	- u <sub>dc</sub>	0
6	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	0	0	0

**Tableau 2.** Les huit états possibles des interrupteurs

De cette table on peut écrire les tensions d'entrée redresseur d'une manière générale comme suit :

$$V_{ab} = (S_a - S_b) U_{dc} \quad (3.1)$$

$$V_{bc} = (S_b - S_c) U_{dc} \quad (3.2)$$

$$V_{ca} = (S_c - S_a) U_{dc} \quad (3.3)$$

D'où on peut déduire les tensions simples :

$$V_a = f_a U_{dc} \quad (3.4)$$

$$V_b = f_b U_{dc} \quad (3.5)$$

$$V_c = f_c U_{dc} \quad (3.6)$$

Avec :

$$f_a = \frac{2S_a + (S_b + S_c)}{3} \quad (3.7)$$

$$f_b = \frac{2S_b - (S_a + S_c)}{3} \quad (3.8)$$

$$f_c = \frac{2Sc - (Sa + Sb)}{3} \quad (3.9)$$

### 3.4.1. Représentation fonctionnelle du redresseur MLI dans le référentiel triphasé

Les équations de tensions pour le système triphasé équilibré sans neutre peuvent être écrites comme (figure 3.8):

$$\bar{e} = \bar{V}i + \bar{v} \quad (3.10)$$

$$\bar{e} = R\bar{i} + L\frac{d\bar{i}}{dt} + \bar{v} \quad (3.11)$$

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Et la tension d'entrée du redresseur peut être écrit comme suit

$$v_n = U_{dc} \left( s_n - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c s_n \right) \quad (3.13)$$

Où  $s_n = 0$  ou  $1$ , sont l'état des interrupteurs, où ( $n=abc$ ),

Par ailleurs, on peut écrire le courant du bus continu comme

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = i_c \quad (3.14)$$

Le courant dans la capacité peut aussi écrire

$$i_c = i_{dc} - i_{ch} \quad (3.15)$$

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = s_a i_a + s_b i_b + s_c i_c - i_{dc} \quad (3.20)$$

Aussi, le courant  $i_c$  est la somme du produit des courants de chaque phase par l'état de son interrupteur

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = s_a i_a + s_b i_b + s_c i_c - i_{dc} \quad (3.21)$$

Donc, le coté alternatif du redresseur

$$L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = e_a - U_{dc} \left( s_a - \sum_{n=a}^c \frac{1}{3} s_n \right) = e_a - U_{dc} \left( s_a - \frac{1}{3} (s_a + s_b + s_c) \right) \quad (3.22)$$

$$L \frac{d\mathbf{i}_b}{dt} + R\mathbf{i}_b = \mathbf{e}_b - U_{dc} \left( s_b - \sum_{n=a}^c \frac{1}{3} s_n \right) = \mathbf{e}_b - U_{dc} \left( s_b - \frac{1}{3} (s_a + s_b + s_c) \right)$$

$$L \frac{d\mathbf{i}_c}{dt} + R\mathbf{i}_c = \mathbf{e}_c - U_{dc} \left( s_c - \sum_{n=a}^c \frac{1}{3} s_n \right) = \mathbf{e}_c - U_{dc} \left( s_c - \frac{1}{3} (s_a + s_b + s_c) \right)$$

Où les tensions du réseau sont exprimé par

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_a &= E_m \sin \omega t \\ \mathbf{e}_b &= E_m \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \mathbf{e}_c &= E_m \sin \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned}$$

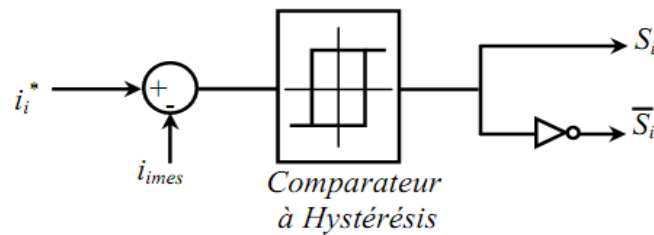
L'équation précédent peut résumé comme suit

$$L \left( \frac{d}{dt} + R \right) \mathbf{i}_n = \mathbf{e}_n - U_{dc} \left( s_n - \sum_{n=a}^c \frac{1}{3} s_n \right)$$

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \sum_{n=a}^c \mathbf{i}_n s_n - ich$$

### 3.4.2. Contrôle par hystérésis de courants prélevés

Le contrôle du courant par hystérésis (Hystérésis Current Control : HCC) consiste à maintenir le courant dans une bande enveloppant sa référence. Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation aux interrupteurs. La figure 2.11 illustre le principe de contrôle du courant par hystérésis à bande fixe à deux niveaux. La différence entre le courant de référence et celui mesuré est appliquée à l'entrée d'un comparateur à hystérésis dont la sortie fournit l'ordre de commande du bras correspondant du pont.



**Figure 3.10** Principe de contrôle du courant par hystérésis

Cette technique de contrôle fait partie des commandes non linéaires parce qu'elle

fonctionne en tout ou rien. Elle est bien connue et présente de gros avantages au niveau de la robustesse et de la simplicité de mise en œuvre. Elle possède un bon temps de réponse en régime dynamique, une bonne stabilité, une bonne précision et limite automatiquement le courant. Le seul paramètre de régulation dans cette commande est la largeur de la bande d'hystérésis qui détermine l'erreur sur les courants et la fréquence de commutation bien que cette dernière reste inconnue. La technique de régulation par bande hystérésis est une des méthodes les plus appropriées pour les différentes applications d'onduleurs contrôlés en courant telles que les entraînements électriques et les filtres actifs [12].

### 3.4.3. Structure du contrôle de courant par hystérésis

La structure globale du contrôle par hystérésis des courants prélevés sur le réseau par un pont redresseur de tension triphasé à MLI est présentée à la figure 2.13. Les trois courants à l'entrée du pont sont contrôlés à l'aide de trois comparateurs à hystérésis à bande fixe. L'ensemble des trois sorties de ces comparateurs détermine les ordres de commande des interrupteurs constituant le pont. En effet, la détermination des instants de commutation suit la logique suivante :

$$\begin{cases} i_i^* - i_i = \frac{\Delta i}{2} \Rightarrow S_i = 0 \\ i_i^* - i_i = -\frac{\Delta i}{2} \Rightarrow S_i = 1 \end{cases}$$

Les références des courants contrôlés sont de forme d'onde sinusoïdale, obtenues par la multiplication des trois signaux sinusoïdaux unitaires délivrés par le bloc PLL et la sortie du régulateur PI de la tension du bus continu (amplitude). La PLL (Phase Locked Loop ou boucle de verrouillage de phase) est utilisée pour extraire la phase de la composante fondamentale directe de la tension du réseau. Différentes structures de PLL ont été proposées dans la littérature.

### 3.4.4. Boucle de régulation de la tension du bus continu

Le rôle de la boucle de régulation de la tension du bus continu est de maintenir cette tension à une valeur de référence constante, en contrôlant le processus de chargement et de déchargement du condensateur. Les causes de sa variation sont essentiellement les pertes dans les interrupteurs du convertisseur (en conduction et en commutation), dans les inductances de couplage et la variation

de la charge connectée au bus continu. La régulation de cette tension s'effectue par ajustement de l'amplitude des références des courants prélevés pour contrôler le transit de puissance active entre le réseau et le bus continu. A cet effet, elle est destinée à compenser toutes les perturbations provenant du côté convertisseur et du côté charge, provoquant une variation de l'énergie stockée dans le condensateur. Cette boucle a comme entrée la tension de référence  $V_{dc}^*$  et la tension mesurée  $V_{dc}$ . Il est également possible de dimensionner le régulateur pour régler le carré de la tension  $v_{dc}$ . Un régulateur de type PI est souvent utilisé pour contrôler cette tension.

En négligeant les pertes actives dans le convertisseur et dans les inductances de couplage, l'application du principe de conservation de la puissance donne la relation entre la puissance active débitée par le réseau et celle reçue en sortie du pont. Elle s'écrit sous la forme suivante :

$$P = v_{dc} \cdot I_{dc} = \frac{1}{2} C \frac{dv_{dc}^2}{dt} + \frac{v_{dc}^2}{R} \quad (3.23)$$

A partir de cette équation, nous déduisons la fonction de transfert de premier ordre suivante :

$$\frac{v_{dc}^2(s)}{P(s)} = \frac{R}{1 + \frac{R \cdot C}{2} s}$$

D'autre part, la puissance active fournie par le réseau est définie par la relation ci-dessous :

$$P = \frac{3}{2} \cdot e_{\max} \cdot I_{\max}$$

Si nous prenons comme grandeur à régler, pour raison de simplicité, le carré de la tension du bus continu, et en supposant constante l'amplitude de la tension du réseau, la fonction de transfert précédente se transforme sous la forme suivante :

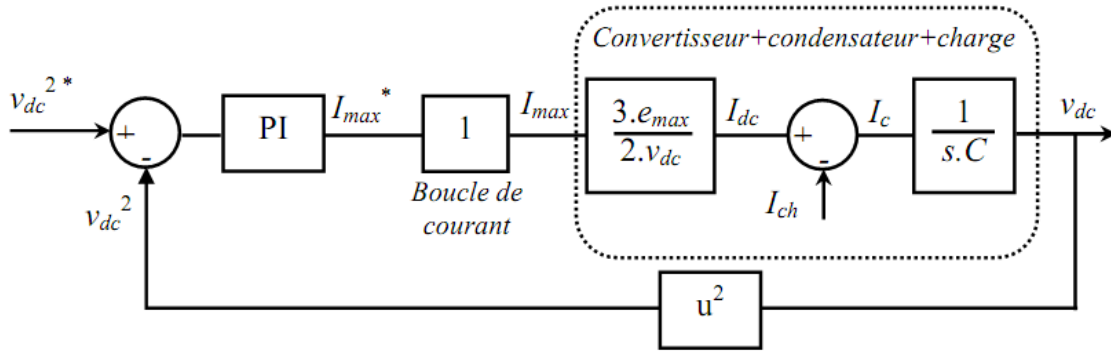
$$\frac{v_{dc}^2(s)}{I_{\max}(s)} = \frac{3}{2} e_{\max} \cdot \frac{R}{1 + \frac{R \cdot C}{2} s}$$

Le schéma bloc de la boucle de régulation du carré de la tension du bus continu est alors représenté sur la figure (3.11). Dans cette structure, la boucle de courant est considérée parfaite (unitaire) en supposant qu'elle est beaucoup plus rapide que celle de la tension et que le courant réel étant assimilé à sa valeur de référence. Il est à noter que dans ce cas, la tension continue se

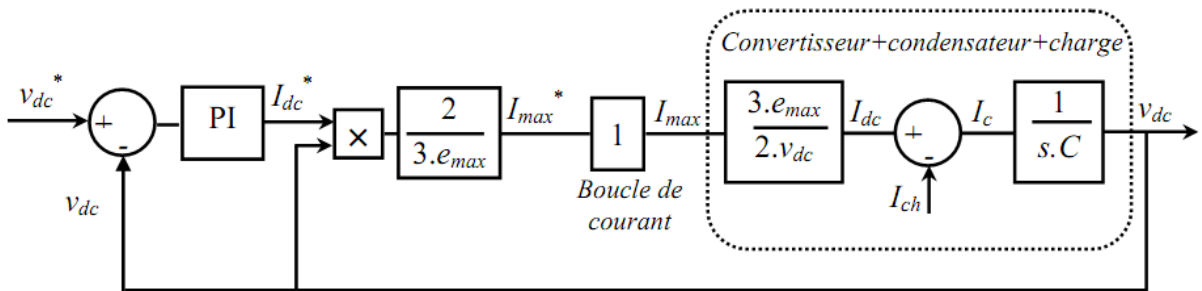
présente comme un gain variable dans la chaîne directe qui peut créer des instabilités dans la boucle de régulation. Pour éviter ceci, on propose de réaliser une compensation de cette tension en contrôlant la tension  $v_{dc}$ . Pour cette structure, nous choisissons le régulateur pour qu'il fournisse la valeur du courant du bus continu  $I_{dc}$  nécessaire pour maintenir la charge du condensateur et répand au besoin de la charge. L'amplitude des courants de référence est alors calculée sur la base de la relation ci-après :

$$\frac{3}{2} e_{\max} I_{\max} = v_{dc} \cdot I_{\max} = v_{dc} \cdot I_{dc}$$

Le schéma synoptique proposé pour le réglage de la tension  $V_{dc}$  est donné par la figure 3.11



**Figure 3.11** Schéma bloc de la boucle de régulation du carré de la tension du bus continu



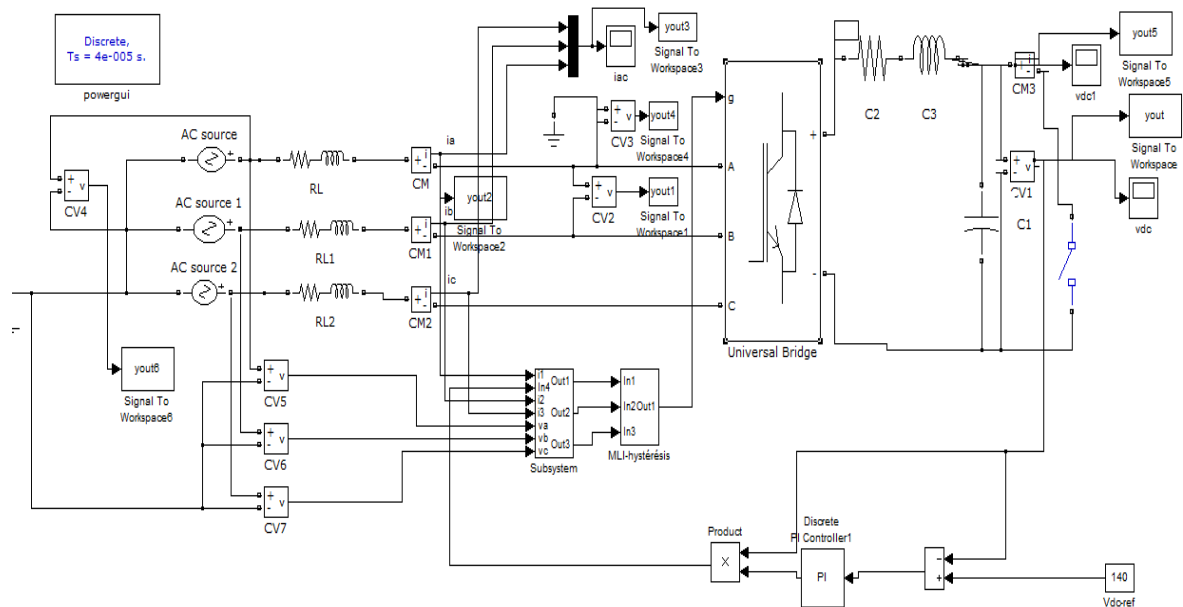
**Figure 3.12** Schéma bloc de la boucle de régulation de la tension du bus continu

Dans ce travail, nous avons utilisé la boucle de régulation dont les paramètres  $k_p$  et  $k_i$  par-dessai :

### 3.4.5. SIMULATION

La simulation est une moyenne indispensable pour la validation des modèles obtenus et avant toute réalisation pratique. Dans cette partie nous avons effectué des simulations des modèles obtenus précédemment sous le logiciel matlab/simulink.

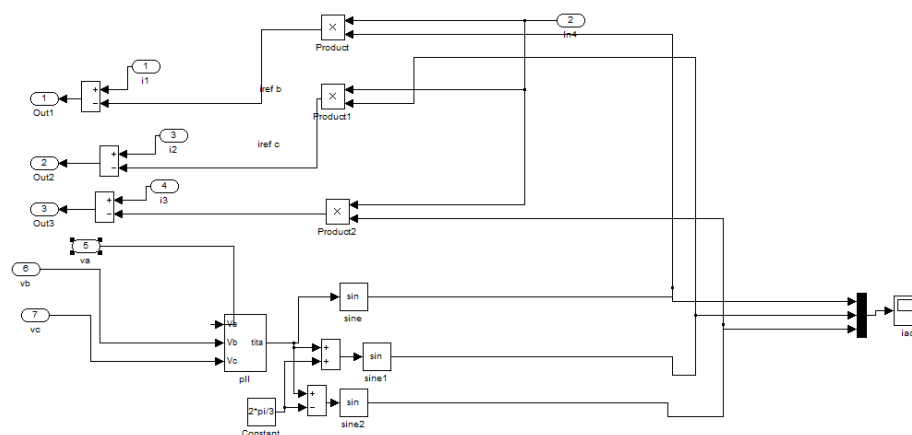
Le redresseur MLI a été étudié par simulation sous Matlab/Simulink selon le schéma de la figure 3.12.



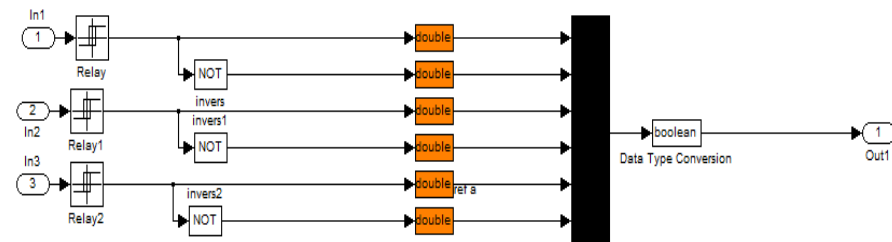
**Figure3.13** Schéma de simulation

### 3.4.6. Les blocs de simulations

#### 3.4.6.1. Le bloc de synchronisation de tension



**Figure 3.14** Schéma de synchronisation tension de la source avec la commande



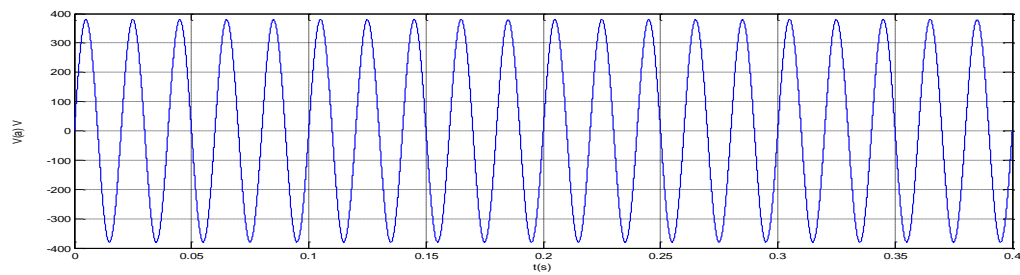
**Figure3.15** Shéma de la commande par hystérésis

### Résultat de simulation

:

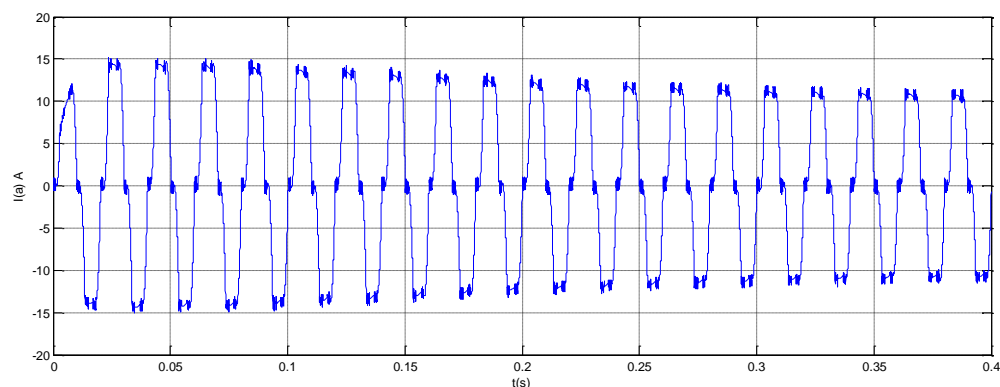
Les figures suivantes représentent les différentes grandeurs électriques

La figure représente la tension de la source d'alimentation



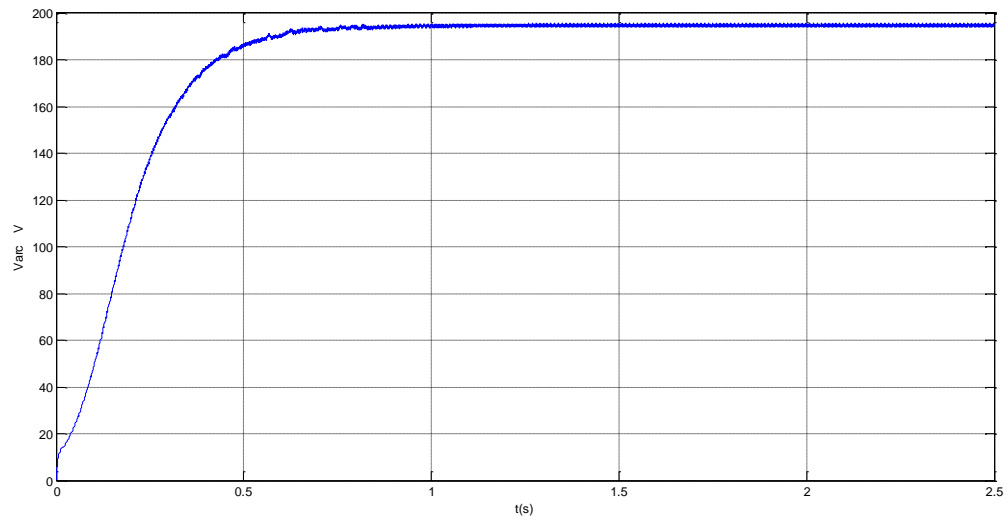
**Figure3.16** Tension de la source

La figure suivante représente le courant de la source d'alimentation

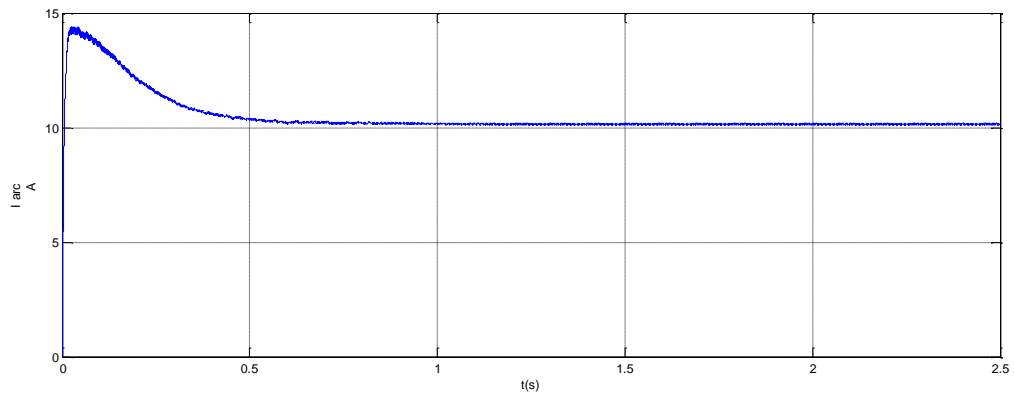


**Figure3.17** Courant de la source

Les figures suivantes représentent la tension et le courant de l'arc

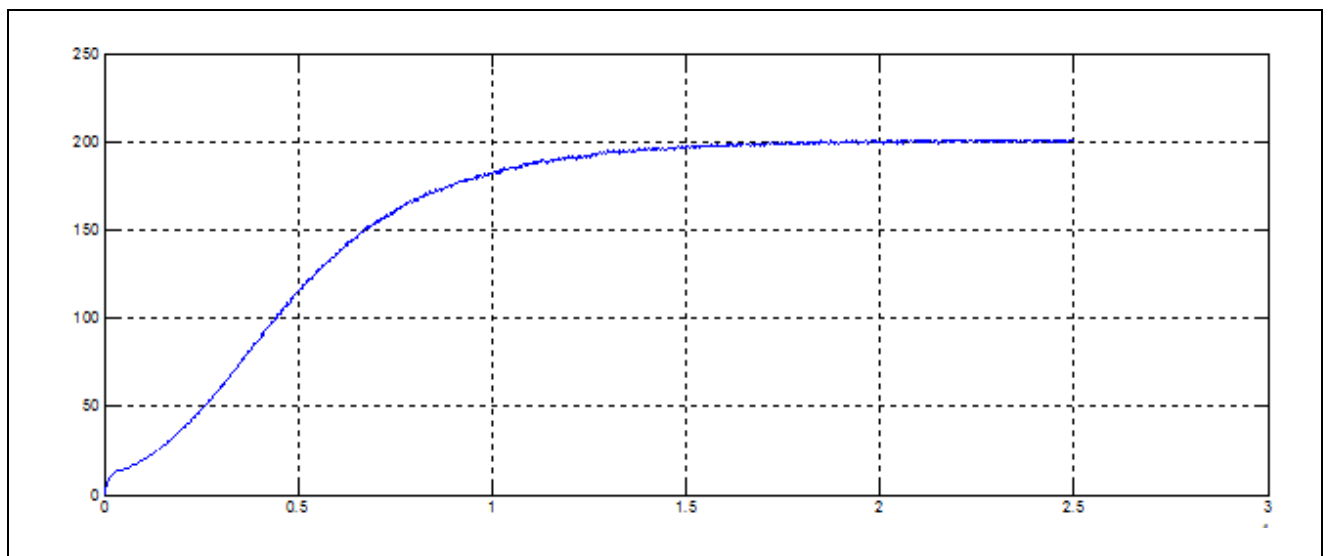


**Figure3.18** Tension de l'arc



**Figure3.19** Courant de l'arc

La figure suivante represente la tension de l'arc mais avec un changement de la concine



Tension de l'arc

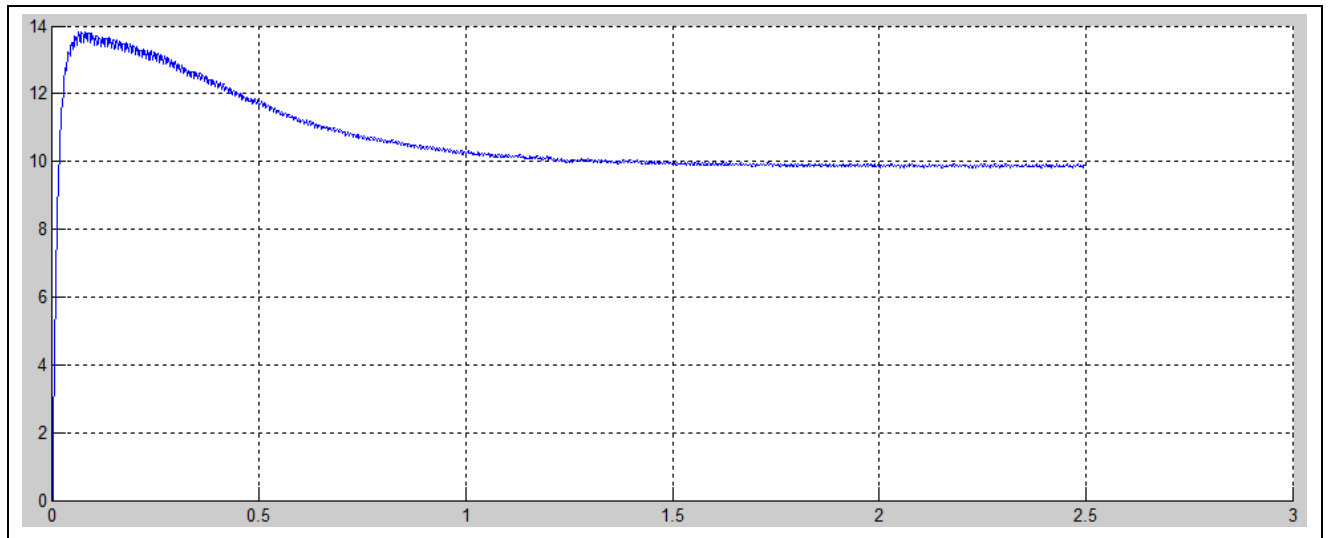
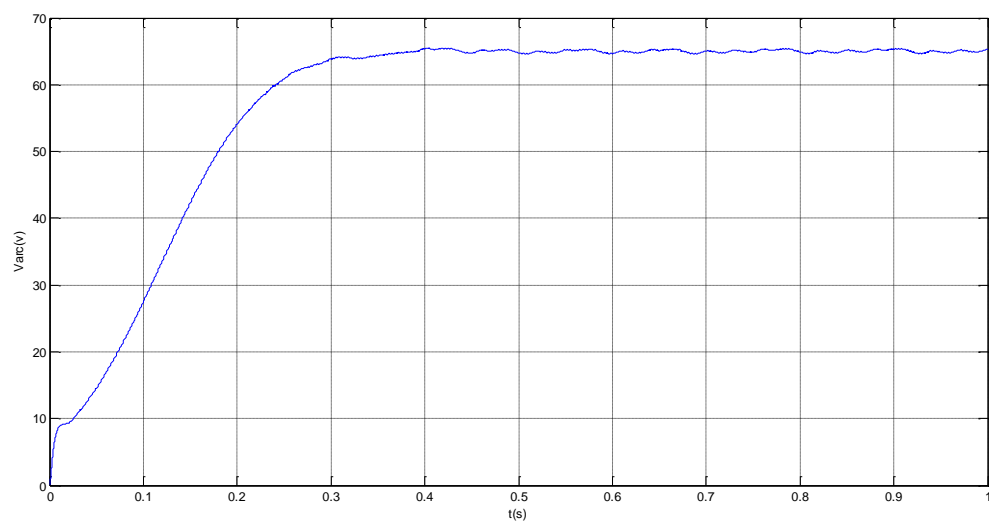
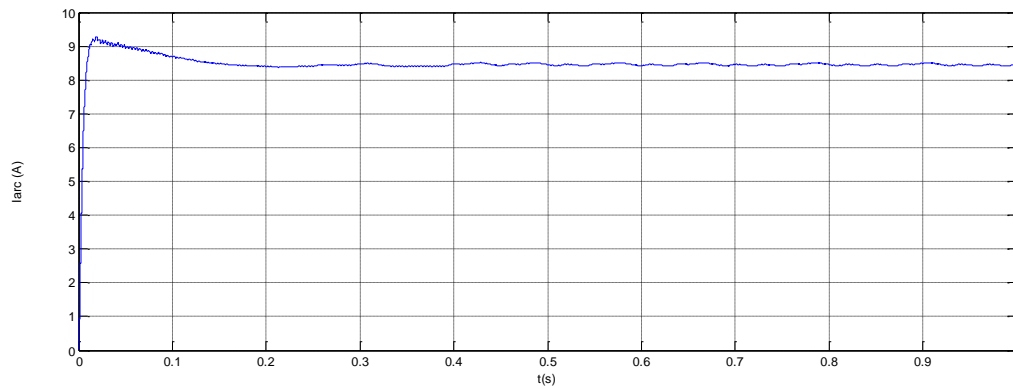


Figure courant de l'arc

Lorsque en change la consigne à la variation du courant et de tension de l'arc et présenté sur la figure suivante

**Figure3.20** Tension de l'arc



**Figure3.21** Courant de l'arc

On remarque d'après les figure tension suit le référence elle se stabilise aprï un régime transitoire. Le courant aussi se stabilise après un régime transitoire .Donc on à un arc électrique stable.

### 3.5. Conclusion

L'objet de ce chapitre été de présenter le contrôle par hystérésis des courants absorbés par le redresseur à MLI. Il débute par une description du principe de fonctionnement et des différents modes d'opération de ce convertisseur. Ensuite, un rappel bref sur la modélisation.

Le principe de contrôle de courant par hystérésis est présenté dans ce chapitre ainsi que son application à la commande du pont redresseur à MLI, pour le prélèvement de courants sinusoïdaux. Ce type de commande est simple, robuste et facile à implanter.

# CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

---

Dans ce travail nous sommes intéressés à l'étude de l'alimentation de la torche à plasma d'arc, nous avons présenté en premier temps le fonctionnement de la torche à plasma en particulier la torche qui a été réalisée au laboratoire QUER par Mr Halis. Ensuite la modélisation de la torche. Puis l'alimentation de la torche à plasma par le redresseur MLI qui permet la stabilisation de l'arc de la torche.

Enfin simulation du modèle obtenu nous a permis de vérifier le bon fonctionnement de la torche et la stabilisation de l'arc.

En perspectives nous souhaitons des tests pratiques de la commande proposée sur la plateforme d'essai de laboratoire d'automatique et un réalisateur pratique du redresseur MLI qui alimente une torche à plasma d'arc.

## *Références Bibliographiques*

---

- [1] A.HALIS, ''laconception d'une génératrice à plasma à arc souffle pour le traitement des déchets toxique'', rapport d'activité de projet recherche, agence national de déchet, N : 1,2003/2004
- [2] Ouera.[www.oura-fr coup/26plasma](http://www.oura-fr.coup/26plasma), plasmaà tout faire mis à jour 03/04/2012
- [3] [www.EROUPLASMA.com](http://www.EROUPLASMA.com) ,about plasma torches mis à jour 03/04/2012
- [4] L.échant, ''application électrique à BT'', technique de l'ingénieur, Institut national polytechnique de grenoble, 2000
- [5] [www.ense.fr /-brodhage /traitement/fich11,5.htm](http://www.ense.fr/-brodhage/traitement/fich11,5.htm).mis à jour 25/04/2012
- [6] D.RIGO, ''contribution à l'étude de l'érosion de torche à plasma d'arc pour la projection par suivi des signaux de tension et de son''these de doctorat, université de LIMOGES ,2003.
- [7] [www.stielec.arc.caix-marseille.fr/cours](http://www.stielec.arc.caix-marseille.fr/cours), mais à jour 25/04/2012.
- [8] YESPLENE, ''appareillage électrique d'interrupteur à haut tension'', technique de l'ingénieur, Institut national polytechnique de grenoble, 2000.
- [9] [www.ens-eyon.com](http://www.ens-eyon.com), mais à jour 25/04/2012.
- [10] A.BOUAFIA, ''technique de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électrrique de puissance application aux redresseur à MLI '' , université de setif, 2010.
- [11] H.HAKAGI, ''new trends inactive filter for power conditioning'', IEEE, VOL1996.
- [12] A.BOULAHYA, ''etude des convertisseurs statique destiné à la qualité de l'énergie électrique'', université de constantine, 2009.
- [13] S.MOHAMED, ''Etude comparative des redresseurs cascade de multiniveaux àcommande MLI'', thèse de doctorat, université de constantine, 2005.

**Résumé :**

Dans ce travail nous sommes intéressés à l'étude de l'alimentation de la torche à plasma d'arc, nous avons présenté en premier temps le fonctionnement de la torche à plasma en particulier la torche qui a été réalisée au laboratoire QUERE par Mr Halis. Université de Setif ensuite la modélisation de la torche. Puis l'alimentation de la torche à plasma par le redresseur MLI qui permet la stabilisation de l'arc de la torche. Enfin simulation du modèle obtenu nous a permis de vérifier le bon fonctionnement de la torche et la stabilisation de l'arc.

**Mots clés :** Torche à plasma, Modélisation, Redresseur MLI, Commande par hystérésis.

**Abstract:**

In this work we are interested in the study of the power of the plasma torch arc, we presented the first time the operation of the plasma torch in particular torch was realized in the LABORATORY QUERE by Mr. Halis. University of Setif follows the model of the torch. Then the power of the plasma torch by the PWM rectifier that allows the stabilization of the arc of the torch. Finally simulation model obtained allows us to verify the proper operation of the torch and arc stabilization.

**Word key:** plasma torch, Modelling, Rectifier PWM control by hysteresis.