

Développement d'une torche plasma fonctionnant à haute tension et faible courant

1.1 - Les différents prototypes

Dans les procédés de type “arc glissant”, l’arc est mis en mouvement par l’écoulement gazeux. Les précédents travaux effectués au Centre Energétique et Procédés avaient conduit à la réalisation d’un réacteur plasma à électrodes planes de type “Glidarc” [54], dans lequel l’arc se déplace dans le plan des électrodes.

Cette géométrie, bien que largement utilisée, n’est pas optimale, notamment en terme d’homogénéité, car seule une fraction des réactifs est balayée par la zone d’arc. L’analyse des différentes géométries envisageables, nous a amené à opter pour une géométrie de type pointe-cylindre, largement utilisée dans les torches plasma thermiques à courant continu.

Le développement d’une torche plasma fonctionnant à haute tension et faible courant, nous a amené à développer un certain nombre de prototypes successifs. L’alimentation électrique de ces différents prototypes a été réalisée à partir d’un générateur haute tension développé au CEP dans le cadre d’études antérieures et qui est présentée dans la suite de ce chapitre.

1.1.1 - Prototype 0

Le prototype 0 est constitué d’un tube en cuivre de diamètre intérieur 16 mm et de 18 mm de diamètre extérieur, dans lequel on introduit une bougie de moteur à explosion à laquelle l’électrode de masse a été enlevée. Le tube est pincé à proximité de la pointe de la bougie, pour réduire l’espace inter-électrodes et permettre l’amorçage de l’arc. Ce pincement crée par ailleurs une réduction de section de l’écoulement gazeux, l’air étant injecté tangentiellement en amont du pincement. Ce prototype, nous a permis de valider le concept et de visualiser le comportement d’un arc électrique soufflé par un écoulement vortex. Ces premiers essais ont permis d’évoluer vers une géométrie plus soignée correspondant au prototype 1.

1.1.2 - Prototype 1

Le prototype 1 est constitué d’une tuyère réalisée en acier inoxydable de 12,7 mm de diamètre intérieur et 20 mm de diamètre extérieur, qui possède un filetage pour accueillir l’électrode centrale et un col de 7 mm de diamètre intérieur, localisé au voisinage de la pointe de l’électrode. Comme dans le cas précédent, ce prototype comporte une entrée d’air unique et tangentielle.

Ce prototype a montré une très grande stabilité de fonctionnement pour des débits de gaz (de l’air en l’occurrence) compris entre 0.5 Nm³/h et 4 Nm³/h. Par ailleurs ce prototype a permis de mettre en évidence l’existence de différents régimes de fonctionnement :

- Pour des débits de gaz élevés, on observe un régime filamentaire caractérisé par la présence de nombreux filaments de couleur violette, localisés à proximité du col. Dans le cas de ce régime la puissance dissipée par l'arc est très faible.
- Pour de faibles débits de gaz, on observe un régime plus "homogène". Le volume du plasma et la puissance dissipée dans la décharge sont plus importants. Dans certaines conditions nous avons pu constater que l'arc atteignait l'extrémité de la tuyère et se déplaçait sur le disque constituant sa section terminale. Dans le but d'allonger l'arc, nous avons évolué vers le prototype 2.

1.1.3 - Prototype 2

La géométrie intérieure de ce prototype est voisine de celle du prototype 1 mais le col de la tuyère est situé légèrement plus en aval de l'électrode centrale et la longueur totale de la tuyère a été rallongée. Contrairement à ce qui était prévu les essais réalisés à partir de ce prototype ont montré que l'arc restait confiné dans un tout petit volume localisé en amont du col, ce qui a permis de mettre en évidence l'importance critique de la position axiale de l'électrode par rapport au col.

1.1.4 - Prototype 3

Le prototype 3, conçu dans un souci de modularité, est constitué de deux composants :

- une premier composant constitué d'une tête d'injection comprenant quatre entrées tangentielles de gaz
- une tuyère constituée d'un col et d'une extrémité post col cylindrique qui vient s'insérer à l'intérieur de la tête d'injection.

Ce prototype a permis de tester différentes géométries de tuyères et d'étudier l'influence : du diamètre de col, de la longueur et du diamètre de la tuyère.

1.1.5 - Prototype 4

Le prototype 4 a été conçu pour permettre d'une part, l'injection de 3 fluides différents sans déséquilibrer l'écoulement vortex dans la torche. Pour cela, chaque fluide est injecté par deux entrées diamétralement opposées ce qui assure la symétrie de l'écoulement indépendamment des débits de chaque fluide. D'autre part, assurer l'étanchéité du réacteur afin de pouvoir opérer sous pression.

Les prototypes décrits précédemment sont constitués de deux électrodes : une électrode centrale située sur l'axe d'une seconde électrode cylindrique. Les tuyères utilisées, étaient initialement basées sur la géométrie représentée en [Fig.50].

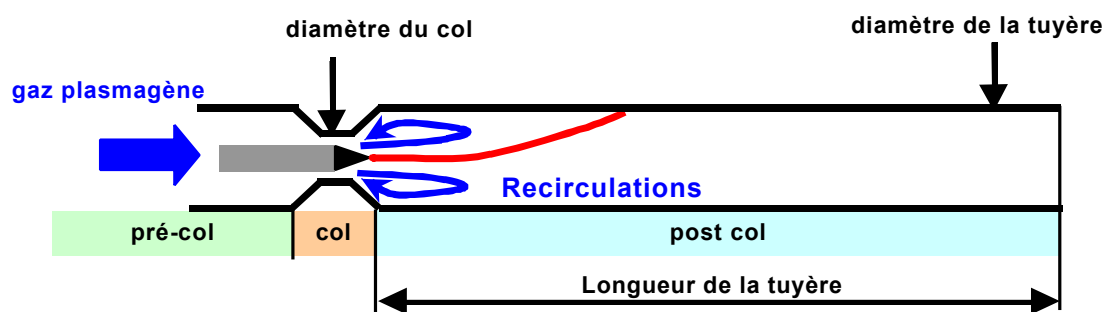


Fig.50 – Schéma de principe d'une configuration pointe cylindre

Le rétrécissement au niveau du col permet l'amorçage de l'arc et engendre des vitesses élevées qui soufflent l'arc et l'empêchent de passer en régime thermique. Après le col, les vitesses diminuent avec l'augmentation de diamètre. L'arc est soufflé et peut atteindre l'extrémité de la tuyère. En sortie de tuyère, l'arc suit les lignes de champs électriques et vient reboucler sur le disque terminal de la tuyère dans une zone favorable du fait des faibles vitesses d'écoulement tangentiels [Fig.51]. Le pied de l'arc situé sur l'extrémité de la tuyère se déplace sous l'effet des turbulences locales de l'écoulement et du champ électromagnétique induit par l'arc sur lui même.

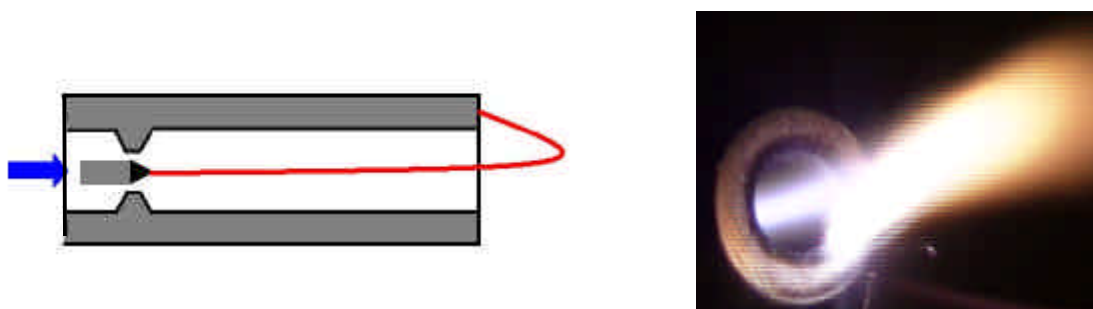


Fig.51 – Schéma et photographie d'un arc sortant de la tuyère

Les essais effectués avec différents diamètres de tuyère et différents diamètres de col ont mis en évidence que les fortes recirculations et les forts gradients de vitesse rendent l'arc instable. Celui-ci atteint l'extrémité de la tuyère avec une tension à ses bornes inférieure à la tension de claquage mais ne parvient pas à s'établir en continu. Nous avons alors évolué vers une géométrie qui confine le plasma au niveau de l'axe de la tuyère [Fig.52].

1.2 - Principe de la torche plasma

1.2.1 - Description de la Tuyère

Le diamètre de la tuyère (2) est égal au diamètre du col pour supprimer les phénomènes de recirculation, et permettre à l'écoulement d'être le plus laminaire possible. Au final, l'arc est stabilisé par deux procédés bien connus dans le domaine des arcs thermiques [103] :

- la “stabilisation par tourbillon”, provoquée par l'écoulement vortex du gaz.
- la “stabilisation par parois”, engendrée par le faible diamètre de la tuyère et les effets thermiques.

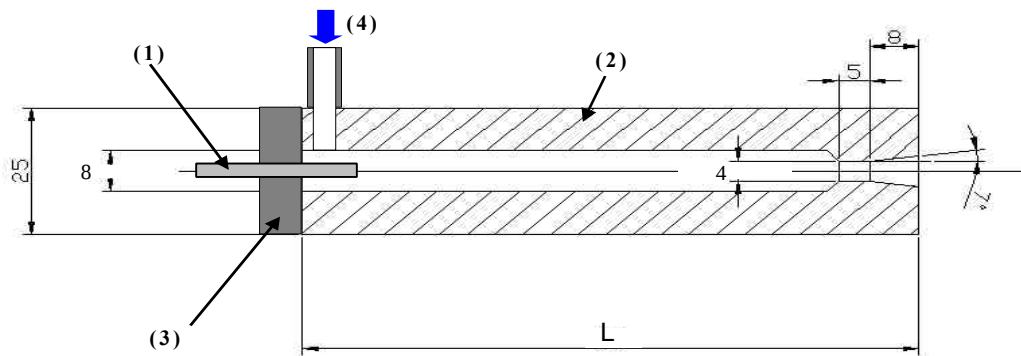


Fig.52 - Schéma de principe de la géométrie pointe cylindre retenue

Un convergent-divergent est placé à l'extrémité de l'électrode cylindrique. Cette géométrie est proche des géométries de torches plasma utilisées dans les arcs thermiques. L'électrode centrale (1) est située à une distance importante du convergent-divergent ce qui permet de maintenir une haute tension aux bornes de l'arc.

1.2.2 - L'électrode centrale

L'électrode centrale constitue un des éléments essentiels du système. Après avoir envisagé de nombreuses solutions technologiques, nous avons montré qu'il était possible d'utiliser une bougie d'allumage automobile à laquelle l'électrode de masse a été enlevée. La bougie apparaît comme une solution technologique très intéressante. En effet, la céramique assure une étanchéité, une isolation électrique et une tenue thermique qui correspondent parfaitement à nos conditions. Alors que la plupart des bougies sont dimensionnées pour fonctionner par impulsions de très faibles courants (de l'ordre de quelques milliampères), nous avons montré que certains types de bougies permettaient un fonctionnement continu avec des courants de l'ordre de l'ampère.

2 - Alimentation électrique

2.1 - Introduction

La torche plasma étudiée se caractérise par une haute tension (plusieurs milliers de volts) et un faible courant (inférieur à l'ampère). Comme dans toutes les décharges, la tension d'arc dépend fortement de la géométrie de la torche, de la composition et des conditions hydrodynamiques du gaz plasmagène. Pour une géométrie de torche et des conditions hydrodynamiques données, le contrôle de la puissance fournie à la torche s'effectue donc nécessairement par la régulation du courant.

Dans une première partie nous allons décrire les caractéristiques et la problématique générale de l'alimentation des décharges. La deuxième partie présentera les différents générateurs utilisés.

2.2 - Caractéristique de la décharge

2.2.1 - Nature de la décharge

La figure suivante [Fig.53] présente la courbe caractéristique d'une décharge. Une tension élevée (U_{claquage}) est nécessaire pour ioniser le gaz (c'est le phénomène de claquage). Une fois le gaz ionisé, le milieu devient conducteur ce qui provoque la chute de la tension aux bornes de la décharge, le milieu se comportant comme un conducteur d'impédance fortement non linéaire. Les arcs non thermiques possèdent une résistivité négative²⁶ alors que les arcs thermiques possèdent une résistivité positive²⁷.

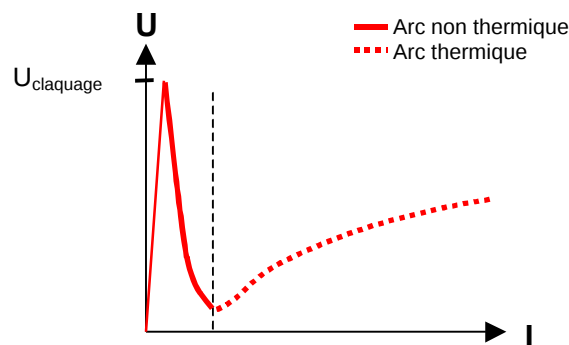


Fig.53 - Caractéristique typique tension / courant d'une décharge de type Arc

²⁶ caractéristique décroissante

²⁷ caractéristique croissante

2.2.2 - Stabilité de la décharge

Le point de fonctionnement se situe à l'intersection de la courbe caractéristique de la décharge avec celle de la source (générateur). Il peut arriver que plusieurs points de fonctionnement soient ainsi déterminés, certains sont stables et d'autres instables. On montre [103], [104] que les points où la caractéristique de la décharge possède une pente positive sont toujours stables. En revanche, les points où la caractéristique possède une pente négative, ne sont stables que si la pente de la droite de charge (générateur, source) est supérieure, en valeur absolue à celle de la caractéristique de la décharge.

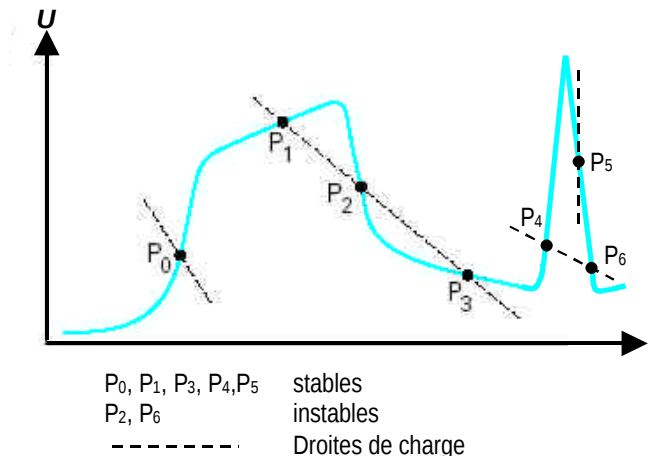


Fig.54 - Stabilité des régimes de décharge [104]

L'adaptation entre la source et la décharge apparaît d'ores et déjà d'une importance primordiale. L'alimentation d'une décharge dans la zone d'arc non thermique (points P5 et P6) est particulièrement délicate puisque la caractéristique de la source doit être quasiment verticale (source de courant idéale) et que dans ce cas l'intersection entre l'alimentation et la décharge est très mal définie²⁸.

2.2.3 - Notion de Dualité

Une règle fondamentale de l'électronique de puissance (notion de dualité) peut s'énoncer ainsi [105-106] :

Une charge à caractéristique source de tension doit être connectée à une alimentation à caractéristique source de courant et réciproquement.

A la caractéristique fortement non linéaire (U/I) de la décharge doit être associée une alimentation adaptée dont la caractéristique sera également fortement non linéaire et en quadrature avec celle de la décharge. Ceci permet d'obtenir un point de fonctionnement net (intersection des caractéristiques de la source et de la décharge). La stabilité du fonctionnement est d'autant plus grande que les caractéristiques sont orthogonales. J.-P. Salanne [107] montre un exemple d'alimentation à résistance interne négative qui serait capable d'alimenter des décharges électriques dans la zone des arcs non thermiques.

²⁸ l'angle entre la caractéristique de la décharge et celle de la source est très faible

2.3 - Les générateurs de décharge

La tension aux bornes de la décharge est imposée par les paramètres thermodynamiques et géométriques (longueur d'arc, conductivité électrique, ...). Le contrôle de la puissance passe donc nécessairement par celui du courant. Il s'agit là d'une problématique générale des plasmas et en particulier des plasmas non thermiques.

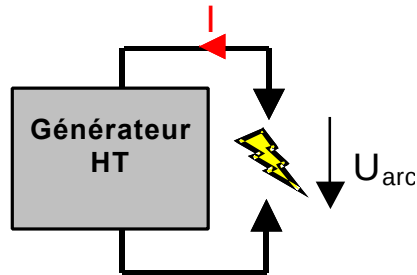


Fig.55 - Schéma général d'un système générateur de décharge

On distingue deux grandes catégories de générateurs :

- les générateurs électrotechniques qui utilisent des transformateurs haute tension
- les générateurs haute tension d'électronique de puissance

2.4 - Générateur haute tension électrotechnique

2.4.1 - Description

L'alimentation électrique est constituée d'un transformateur HT. La tension alternative (AC) au secondaire du transformateur, peut être soit utilisée en l'état (AC) soit redressée par un pont de diodes et un filtre pour fonctionner en régime continu (DC). Une source de ce type, pouvant fonctionner en courant continu ou alternatif, a été développée au Centre Energétique et Procédés dans le cadre de recherches antérieures.

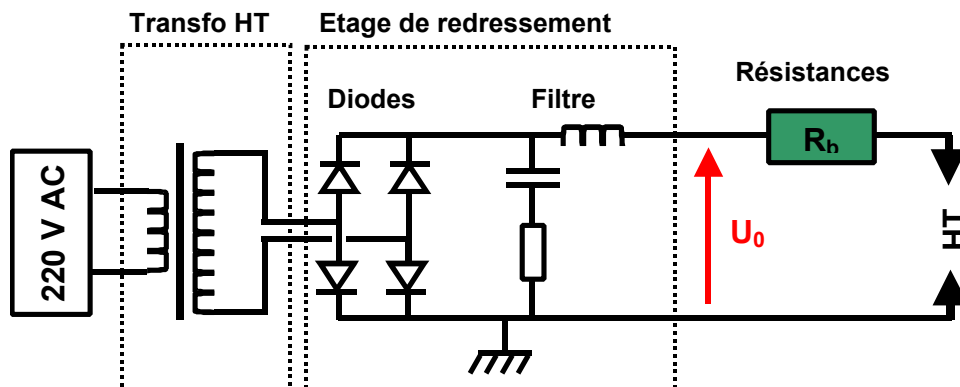


Fig.56 - Schéma électrique de la source électrotechnique (DC)

La limitation du courant est effectuée par une résistance ballast “ R_b ” placée en série avec la décharge. La valeur de la résistance limite le courant maximum fourni par la source.

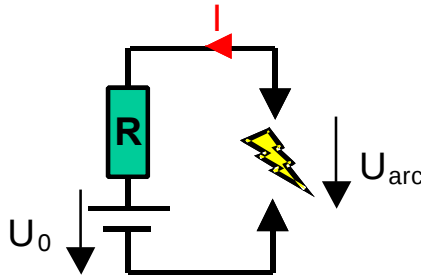


Fig.57 - Schéma du circuit électrique H.T

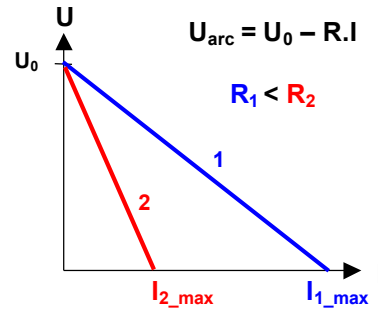


Fig.58 - Caractéristique de la source électrotechnique H.T

$$U_{arc} = U_0 - R.I \quad [\text{Eq. 18}]$$

En l'absence de décharge, le courant dans le circuit est nul ($I=0$). Les électrodes sont alors soumises à la tension maximale imposée par le générateur haute tension ($U=U_0$).

Lorsque la décharge est amorcée, un courant apparaît dans le circuit [Eq. 20]. La tension aux bornes de l'arc diminue du fait de la chute de potentiel aux bornes de l'impédance en série avec le circuit (caractéristique de la source). En raison de sa faible importance relative, la composante capacitive du circuit sera négligée. Seules les résistances seront prises en considération désormais.

$$R_{totale} = R + R_{arc} = R_s + R_b + R_{arc} \quad [\text{Eq. 19}]$$

$$I = \frac{U_0}{R_{totale}} \quad [\text{Eq. 20}]$$

La résistance totale du circuit (source et décharge) R_{totale} est la somme de :

- La résistance de la source “ R ”, elle même composée de celle du transformateur et de l'étage de redressement “ R_s ” et du jeu de résistance de ballast “ R_b ”.
- La résistance “ R_{arc} ” de la décharge

R_s est une caractéristique de la source, c'est donc une constante.

La résistance “ R_{arc} ” de l'arc dépend de sa géométrie et des conditions hydrodynamiques.

Le jeu de résistances de ballasts “ R_b ” permet d'ajuster le courant maximum “ I_{max} ” (courant de court circuit “ I_{cc} ”).

$$I_{\max} = I_{cc} = \frac{U_0}{R} = \frac{U_0}{R_b + R_s} \quad [\text{Eq. 21}]$$

Dans notre cas R_b est constituée d'un banc de huit résistances de 4700 ohms chacune, qui peuvent être connectées en série ou en parallèle. Cette opération ne peut être effectuée qu'à l'arrêt de la source, ce qui ne permet pas de réguler le courant en continu.

Cette alimentation a servi à mettre au point et à tester les différents prototypes présentés au début de ce chapitre. Elle a également permis, grâce à une analyse électrique détaillée, de spécifier les caractéristiques (tension, courant, temps de réponse,...) d'une nouvelle source électrique que nous présenterons par la suite.

2.4.2 - Arc glissant alimenté par la source électrotechnique

• Le phénomène "d'arc glissant"

Un écoulement gazeux est créé entre deux électrodes soumises à une différence de potentiel élevée. Lorsque la différence de potentiel est supérieure à la tension de claquage, qui est fonction de l'espace inter-électrodes et de la nature du gaz, un arc se crée au voisinage de la distance inter-électrodes minimale. Le gaz initialement isolant électrique, devient conducteur (présence d'ions et d'électrons). La tension aux bornes de l'arc chute de sa valeur maximale (égale à la tension de claquage) à sa valeur minimale. Le courant passe lui de sa valeur minimale à sa valeur maximale. Sous l'effet des forces hydrodynamiques, le gaz va déplacer l'arc et l'allonger ce qui provoque une diminution du courant dans l'arc et une augmentation de la tension à ses bornes. Une fois la tension de claquage atteinte, l'arc se réamorce et le phénomène se reproduit à l'identique : c'est le phénomène "d'arc glissant" [Fig.63] et [Fig.64]. Dans certains cas, il peut arriver que la tension aux bornes de la décharge devienne supérieure à la tension maximale que peut fournir la source électrique, ce qui provoque également l'extinction de l'arc.

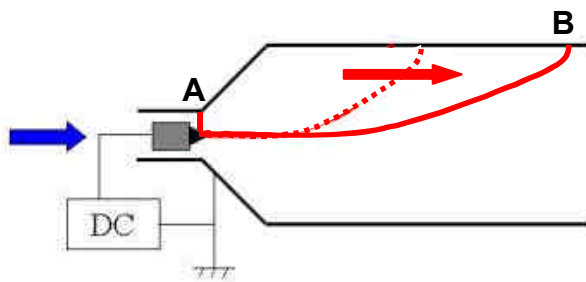


Fig.59 - Schéma du phénomène d'arc glissant

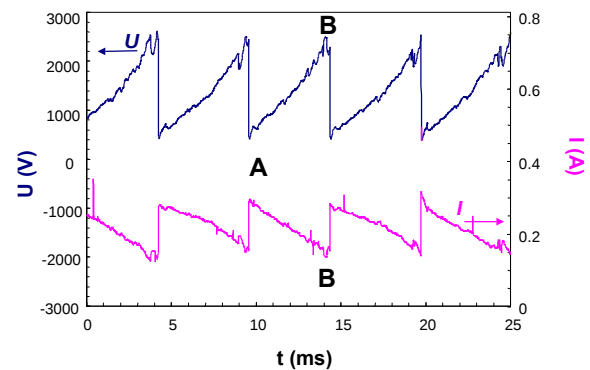


Fig.60 – Evolution temporelle du courant et de la tension dans un arc glissant (données expérimentales)

Le point de fonctionnement se situe à l'intersection des caractéristiques de la source et de l'arc. Dans l'espace "U, I" la caractéristique de la source est une droite de pente négative qui coupe l'axe des ordonnées en U_0 et l'axe des abscisses au point $I_{\max}$ [Eq. 21]. L'arc, quant à lui, a une caractéristique qui varie continuellement au cours du temps en fonction de son allongement. Les limites supérieure et

inférieure correspondent aux valeurs des tensions avant et après amorçage. Ces limites apparaissent sur les figures [Fig.61] et [Fig.62] et elles définissent la zone d'évolution de l'arc. Sur la figure [Fig.62], les deux courbes en question coupent la caractéristique de la source aux points A et B. Le segment [AB] est parcouru à chaque période par le point de fonctionnement.

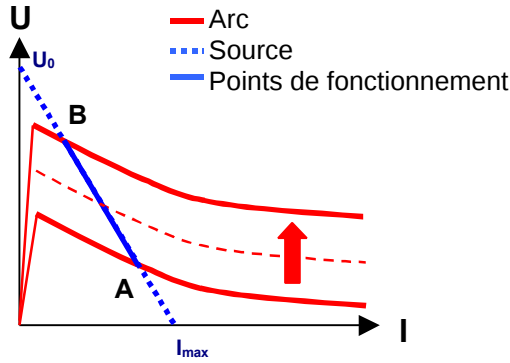


Fig.61 - Schéma de l'évolution du point de fonctionnement de la décharge

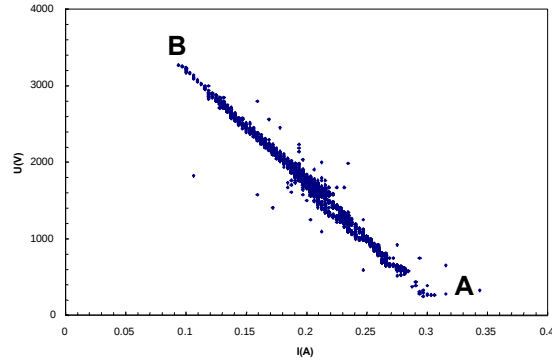


Fig.62 - Evolution dynamique du point de fonctionnement de la décharge (données expérimentales)

• Caractérisation électrique de l'arc glissant alimenté par la source électrotechnique

Nous présentons ci-après les résultats expérimentaux obtenus à pression atmosphérique sous écoulement d'air.

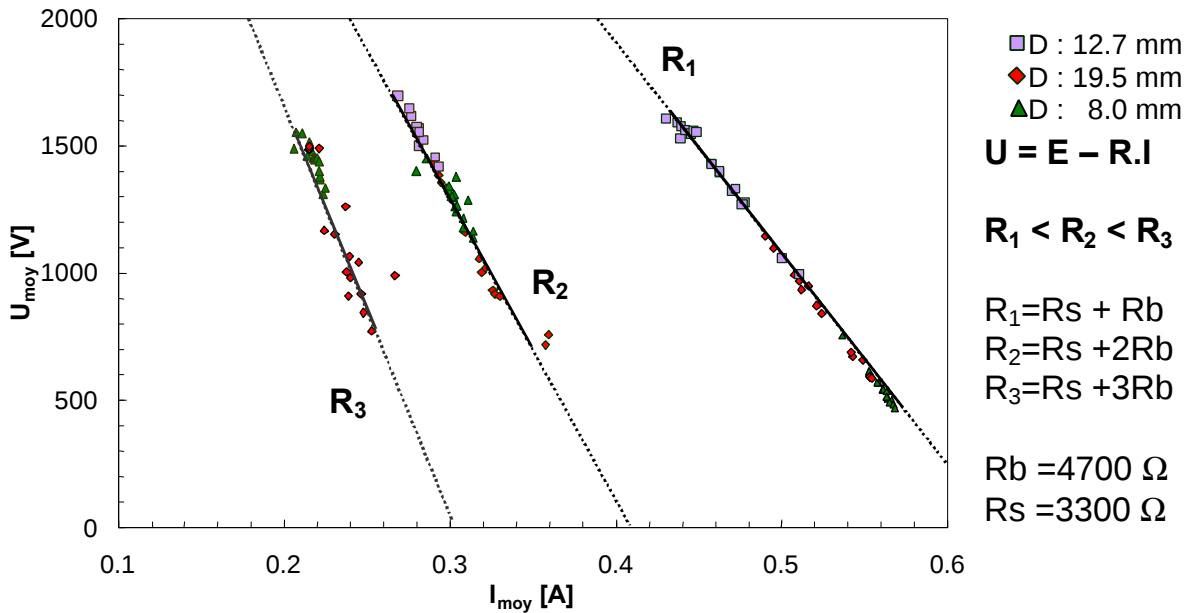


Fig.63 - Caractéristique "courant moyen-tension moyenne" de l'arc

La figure [Fig.63] présente l'évolution des valeurs moyennes²⁹ de la tension et du courant aux bornes de l'arc pour différents débits d'air, différentes géométries de torche et différentes valeurs de

²⁹ les valeurs moyennes sont obtenues par intégration numérique des mesures instantanées

résistances de ballast. Pour une valeur de résistance de ballast donnée, on remarque que les points de fonctionnement évoluent sur un segment de droite qui correspond à la caractéristique de la source. Ces résultats confirment que plus la résistance totale du circuit est élevée, plus le point de fonctionnement se situe du côté des faibles courants et plus la pente de la caractéristique est élevée. Connaissant la valeur de la résistance de ballast, ces résultats ont permis d'évaluer la valeur de la résistance interne de la source, en l'occurrence 3.3 k Ω . La géométrie de la tuyère a bien une influence sur le point de fonctionnement de la décharge, mais son interprétation se révèle complexe.

Les alimentations électrotechniques permettent d'alimenter ce type de décharge et de faire varier le courant moyen et / ou la puissance moyenne en agissant sur la résistance de ballast. Cependant, en pratique il est très difficile de faire varier cette résistance de ballast en continu car cela supposerait la mise en place d'un système de commutation haute tension. De plus ce type de système se caractérise par un très mauvais rendement puisqu'une importante fraction de la puissance consommée est dissipée dans les résistances. Afin d'assurer un contrôle actif du courant, nous nous sommes donc tournés vers l'utilisation d'une source électronique.

2.5 - Générateurs haute tension d'électronique de puissance

La volonté de pouvoir contrôler en continu le courant dans la décharge, indépendamment de la tension, nous a amenés, dans le cadre d'une collaboration avec le LEEI CNRS [107], à identifier deux technologies potentielles :

- Technologie haute tension de type convertisseur à résonance,
- Technologie haute tension de type hacheur.

Dans le cadre de ces travaux de thèse, notre choix s'est porté sur un convertisseur haute tension à double résonance commercialisé par la société TECHNIX.

2.5.1 - Description du convertisseur à double résonance

Cette alimentation haute tension basée sur une technologie de type "convertisseur à résonance série" (LLC-SRC) est constituée des principaux éléments suivants [Fig.64] :

- Redresseur primaire
- Onduleur
- Filtre
- Transformateur HT
- Redresseur HT
- Système de contrôle électronique

L'étage de redresseur primaire permet de redresser le signal du réseau afin de fournir une tension continue à l'onduleur. Celui-ci se compose d'un pont de transistors de type IGBT (T_1 , $T_2...$), commandé par l'électronique du système. Il produit un signal créneau haute fréquence qui alimente l'étage résonnant constitué d'un filtre LLC caractérisé par deux fréquences propres. La puissance fournie par le transformateur est limitée par l'impédance du filtre. Cette impédance est fonction de la fréquence du signal fournie par l'onduleur. Le signal haute tension fourni par le secondaire du transformateur HT est redressé au niveau de l'étage de redresseur HT. Le système de contrôle adapte la fréquence du signal de l'onduleur pour que le courant moyen mesuré au secondaire soit égal au courant de consigne.

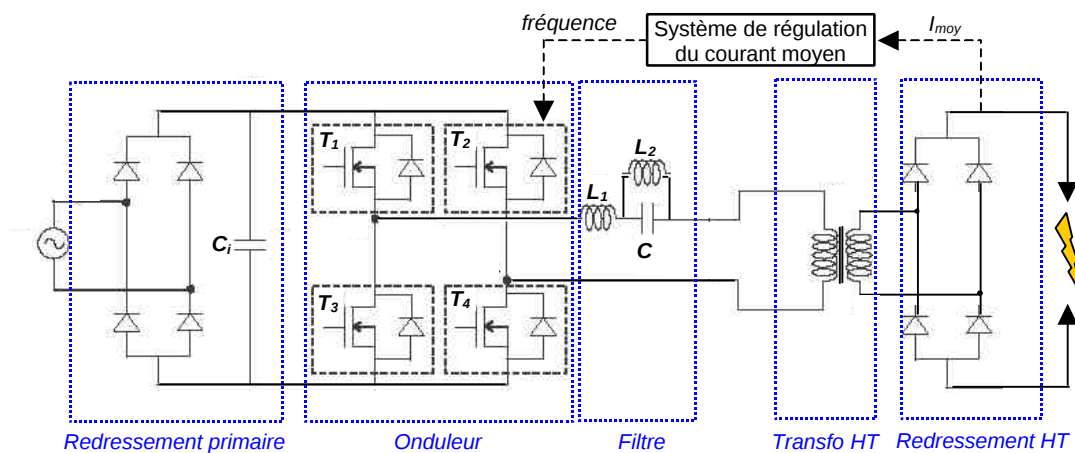


Fig.64 - Schéma du convertisseur double résonance

Le convertisseur à résonance série (LLC-SRC) se comporte comme une source de courant, ce qui signifie que le courant moyen de sortie reste constant quelle que soit la valeur de la charge et de la tension de sortie (dans les limites de l'alimentation). Cette propriété très importante persiste lorsque le convertisseur fonctionne dans des conditions sévères telles que des courts-circuits ou des arcs électriques.

La source acquise permet de contrôler le courant moyen pour des valeurs de consigne allant de 0 à 660 mA. La tension maximale en sortie est réglable entre 0 et 15 kV. La puissance maximale est de 10 kW.

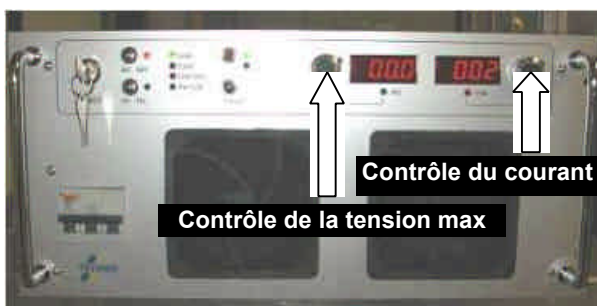


Fig.65 - Face avant de l'alimentation électrique

Fig.66 - Face arrière de l'alimentation électrique

2.5.2 - Caractérisation de la source “convertisseur à résonance”

Cette source, couplée à la torche plasma a permis d’obtenir des arcs pour de faibles valeurs de courant jusqu’à 50 mA. A titre d’exemple, la figure suivante [Fig.67] présente l’évolution du point de fonctionnement obtenu pour une tuyère de 12.7 mm de diamètre sous un écoulement d’air correspondant à un débit de 2 Nm³/h.

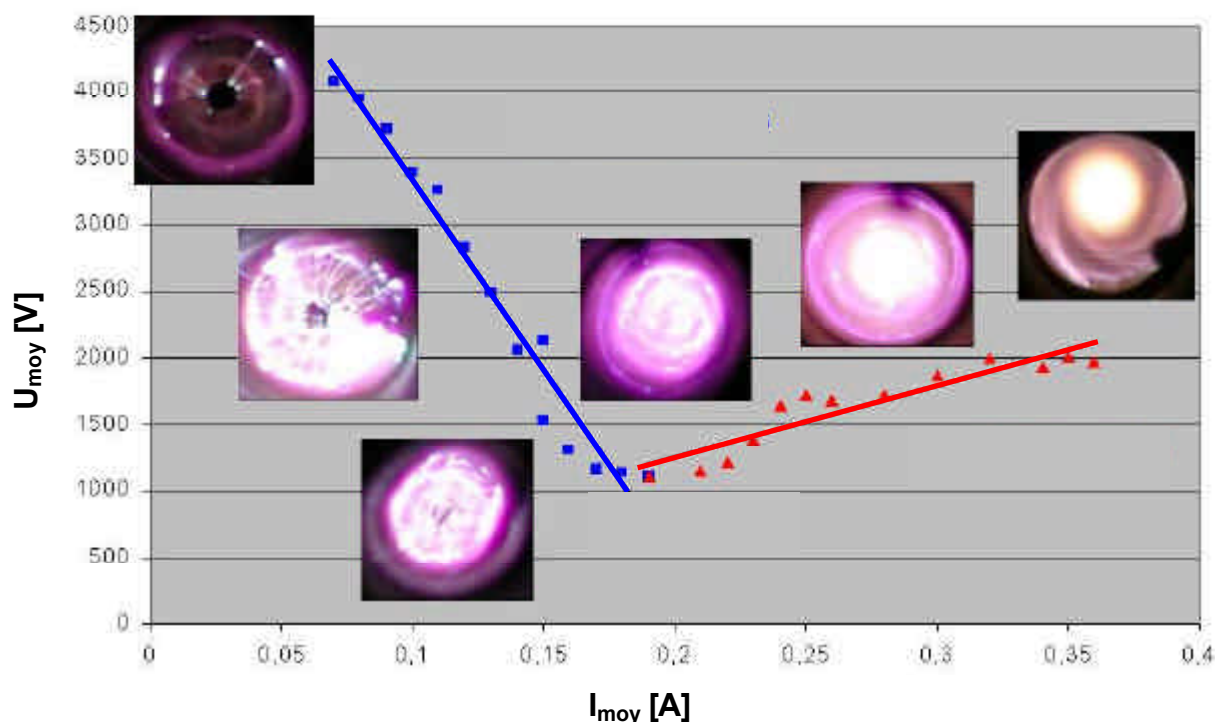


Fig.67 - Caractéristique U_{moy} / I_{moy} aux bornes de l’arc alimenté par la source électronique (air : 2 Nm³/h, diamètre de tuyère : 12.7 mm)

La figure précédente, [Fig.67] permet de mettre en évidence un changement de comportement dans la caractéristique courant moyen / tension moyenne. Ce changement de régime s’observe également sur un plan qualitatif par l’allure de la décharge qui passe d’un aspect inhomogène, filamentaire à un aspect plus homogène. Les différents régimes observés seront présentés plus en détail dans la suite de ce rapport.

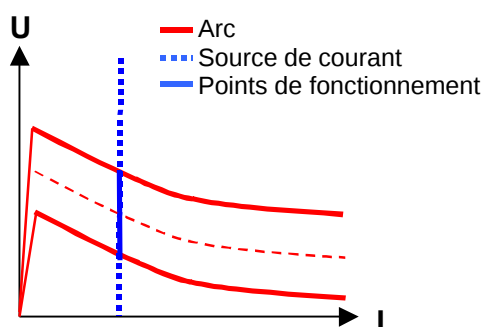


Fig.68 - Schéma de l’évolution du point de fonctionnement de la décharge dans le cas d’une source de courant idéale

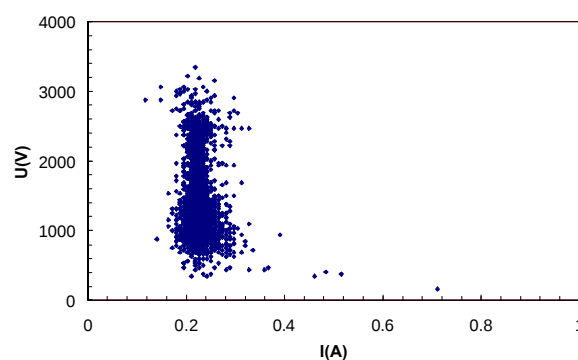


Fig.69 - Evolution dynamique du point de fonctionnement de la décharge (données expérimentales)

On remarque que l’alimentation électrique [Fig.69] se rapproche d’une source de courant idéale [Fig.68] ce qui permet de s’affranchir de la dépendance entre le courant et facilite ainsi la caractérisation des paramètres géométriques et hydrodynamiques de la torche plasma. Par ailleurs cet exemple montre le fort couplage qui existe entre une torche plasma et son alimentation électrique, chaque alimentation conduisant à l’obtention de décharges distinctes.