

# Caractérisation électrique de la torche plasma couplée à une alimentation de type convertisseur à résonance.

## 3.1 - Introduction

Ainsi qu'il a été exposé précédemment, la problématique principale de la décharge : contrôle de la puissance du plasma et de son homogénéité, nous a conduit à choisir et spécifier une source de type "convertisseur à résonance" qui assure le contrôle du courant moyen dans la décharge. Les différents prototypes de torche à plasma développés ont permis d'évoluer vers une géométrie favorisant la stabilité de l'arc et son homogénéité. La figure [Fig.70] présente la torche plasma basse puissance. Elle est très similaire aux torches plasma thermiques classiques. Un arc électrique s'établit entre une électrode centrale (1) et une tuyère (2). Ces deux électrodes concentriques sont séparées par un isolant électrique céramique (3). Une décharge haute tension, de faible intensité est soufflée par un débit de gaz dans la tuyère. Le gaz plasmagène est injecté tangentiellement au niveau de l'électrode centrale afin d'obtenir un écoulement vortex.

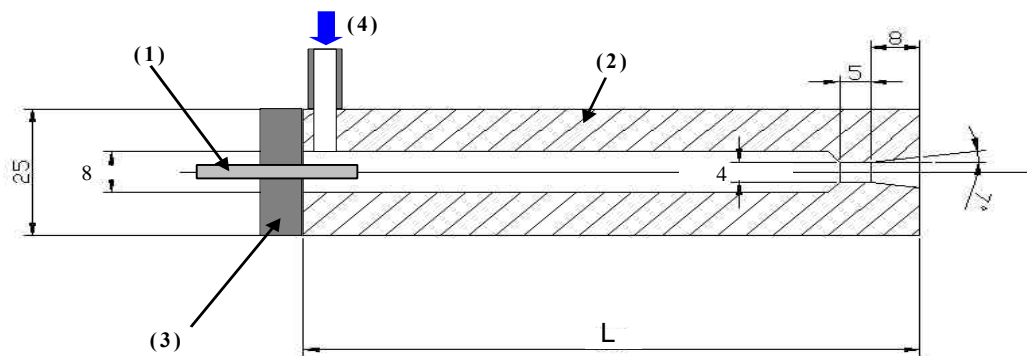


Fig.70 - Schéma de la torche plasma

Le couplage entre une source à résonance et une torche plasma permet d'obtenir des décharges très stables. Afin d'utiliser la torche plasma pour notre application spécifique, la caractérisation préalable des différents paramètres de la torche en milieu non réactif, est nécessaire. Ces essais ont été effectués en utilisant l'air comme gaz plasmagène.

## Analyse électrique

Les valeurs de courant et de tension ont été mesurées avec un oscilloscope numérique (HP-54615B) connecté à une boîte d'acquisition. La mesure de tension est réalisée à l'aide d'une sonde haute tension (Elditest, GE3830), la mesure du courant est effectuée soit par l'intermédiaire d'un Shunt de faible valeur ohmique ( $10 \Omega$ ), soit en utilisant une pince ampère-métrique (LEM, PR 30). Le débit de gaz est régulé par un débitmètre massique (BROOKS, 5831 ES).

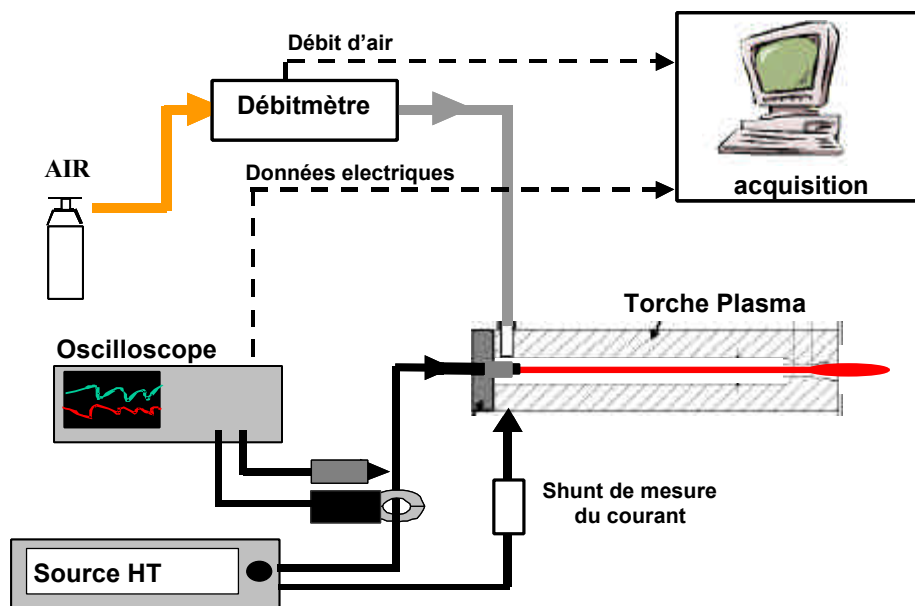


Fig.71 - Schéma de principe du dispositif alimenté en écoulement non réactif

Les débits d'air varient entre  $0.5 \text{ Nm}^3/\text{h}$  et  $4 \text{ Nm}^3/\text{h}$ . Chaque acquisition est enregistrée dans un fichier correspondant à 2 voies (tension et courant dans l'arc) de 5000 points chacune, traduit par une feuille Excel identique à celle présentée en annexe. Chaque feuille Excel comporte :

- les valeurs moyennes et efficaces de la tension, du courant et de la puissance
- la fréquence de la décharge
- la caractéristique (U, I) avec la pente "R" et l'ordonnée à l'origine "U<sub>0</sub>"
- les différents graphes : tension, courant, puissance, caractéristique dynamique U(t) / I(t) sur l'ensemble de l'acquisition et durant une période : "finger print"

Ainsi que des indications sur les conditions expérimentales :

- Débit d'air
- Pression
- Géométrie de la torche (diamètre, longueur...)
- Résistance de ballast
- Alimentation électrique

### 3.3 - Rappel sur la physique de l'arc

Afin de pouvoir interpréter le comportement de la décharge nous présentons les principaux paramètres d'une décharge de type arc. La source fournit un courant supposé constant. L'arc est modélisé par un canal conducteur de section " $S_{arc}$ ", de longueur " $L_{arc}$ " et de résistivité " $r_{arc}$ ".

Une fois le milieu ionisé, la tension aux bornes de l'arc est fonction du courant et de la résistance propre de l'arc [Eq. 22]. La résistance de l'arc " $R_{arc}$ " dépend de sa géométrie (longueur et section) et de sa résistivité " $r_{arc}$ " [Eq. 23]. Pour un gaz donné, la résistivité de l'arc " $r_{arc}$ " dépend principalement de sa température et de la pression [Eq. 25]. La résistivité électrique diminue lorsque la température de l'arc augmente et réciproquement.

$$U_{arc} = R_{arc}.I \quad (\text{loi d'Ohm}) \quad [\text{Eq. 22}]$$

$$R_{arc} = \frac{r_{arc}.L_{arc}}{S_{arc}} \quad [\text{Eq. 23}]$$

Dans le cas des plasmas faiblement ionisés où les espèces neutres sont majoritaires par rapport aux espèces ionisées, la théorie cinétique des gaz exprime la résistivité électrique comme présentée dans l'équation [Eq. 24].

$$r_e = \frac{n.s_{en}\sqrt{2.p.T.m_e}}{n_e.e^2} \quad [\text{Eq. 24}]$$

Avec  $n$  la concentration d'espèces neutres et  $s_{en}$  la section efficace de collision entre espèces neutres et électrons

En considérant la loi des gaz parfaits :

$$P = n.k_b.T$$

$$r_e = \frac{P.s_{en}\sqrt{2.p.m_e}}{n_e.e^2.k_b\sqrt{T}} = cste.\frac{P}{n_e\sqrt{T}} \quad [\text{Eq. 25}]$$

Pour des plasmas faiblement ionisés ( $T < 6000$  K) la résistivité est proportionnelle à la pression " $P$ " et inversement proportionnelle au produit " $n_e\sqrt{T}$ ". La densité électronique " $n_e$ " varie elle-même exponentiellement avec la température [33]. Au paramètre de pression est opposé un paramètre thermique. Du point de vue thermique l'augmentation de la pression entraîne un confinement de la chaleur au cœur du canal de décharge. La température dans l'arc croît avec la pression et sa section diminue.

Dans la suite de ce chapitre nous allons mettre en évidence le fait que la décharge, qui est essentiellement régie par les lois de l'électricité dans le cas de la source électrotechnique, change radicalement avec la source électronique à résonance. Nous allons observer que les paramètres ( $R_{arc}$  et  $U_{arc}$ ) de la décharge sont fonction de la température d'arc elle-même dépendante de la thermique de la torche.

### 3.3.1 - Les différentes zones de l'arc

J.M Cormier et ses collaborateurs [108-110] ont montré que l'arc peut être divisé en deux zones : Le canal conducteur de l'arc et la zone de flamme.

Le canal conducteur de l'arc est caractérisé par une grande quantité d'espèces ionisées et d'électrons, et par des champs électriques élevés. Ce canal est entouré par une zone où les molécules sont excitées mais pas ionisées : la zone de flamme. Cette zone est caractérisée par une faible concentration d'espèces ionisées, des taux de radicaux libres élevés et un rayon important. Cette caractéristique est intéressante pour des applications chimiques, puisque le "glidarc" peut fournir à la fois de la chaleur dans le canal conducteur de l'arc et les radicaux libres nécessaires à la cinétique de réactions dans la zone de flamme [108]. Ces deux régions peuvent être observées par spectroscopie [108] pour un mélange d'air et d'eau, le canal conducteur est clairement caractérisé par le pic de  $N_2^+$  et la zone de flamme correspond au pic plus large de OH [Fig.72]

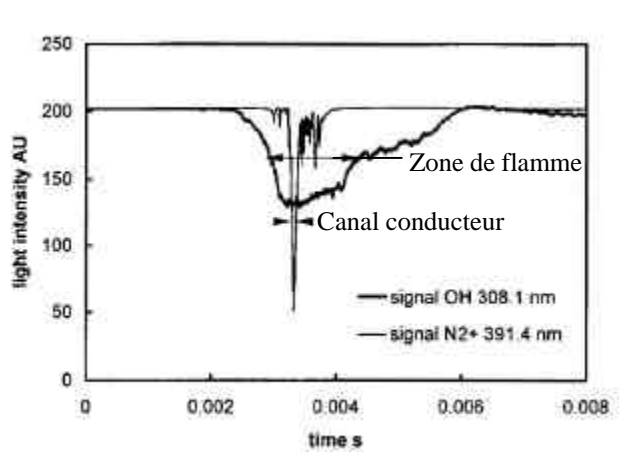


Fig.72 – Mesure spectroscopique des espèces OH et  $N_2^+$  durant le déplacement d'une décharge [108]

### 3.3.2 - L'effet de balayage : "sweeping effect"

Dans les réacteurs à décharges glissantes, la vitesse de la décharge est légèrement inférieure à la vitesse du gaz. Une augmentation du débit de gaz améliore l'échange thermique entre le gaz et l'arc, et accélère le glissement de l'arc. L'arc est mieux refroidi et sa vitesse augmente avec le débit de gaz. Comme nous pouvons l'observer sur la [Fig.73], le débit de gaz déplace l'arc le long des électrodes. La vitesse relative (différence entre la vitesse du gaz et la vitesse de l'arc) est à l'origine d'un phénomène appelé "sweeping effect" ou effet de balayage. Ce phénomène est très intéressant puisqu'il permet au gaz de passer à travers l'arc et de le refroidir.



Fig.73 - Décharge glissante le long d'électrodes planes parallèles [109]

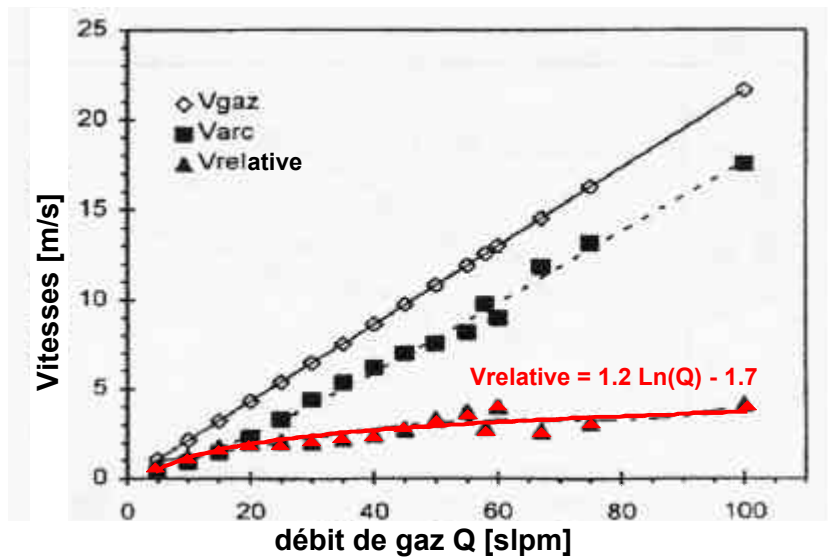


Fig.74 - Vitesse de l'arc et vitesse relative en fonction du débit de gaz [108]

La figure [Fig.74] représente les différentes vitesses de l'arc en fonction du débit de gaz. La vitesse relative suit une loi de type logarithme du débit de gaz.

### Les différents régimes de décharge observés à pression atmosphérique

La figure [Fig.75] représente les régimes de décharge obtenus en faisant varier l'intensité de la source et le débit d'air. Ils sont au nombre de trois :

- Régime filamentaire pour de faibles courants
- Régime glidarc pour des courants moyens
- Régime continu pour des courants élevés

Les domaines d'existence de ces régimes sont délimités par les courbes représentant les "courants de transition" en fonction du débit gazeux.

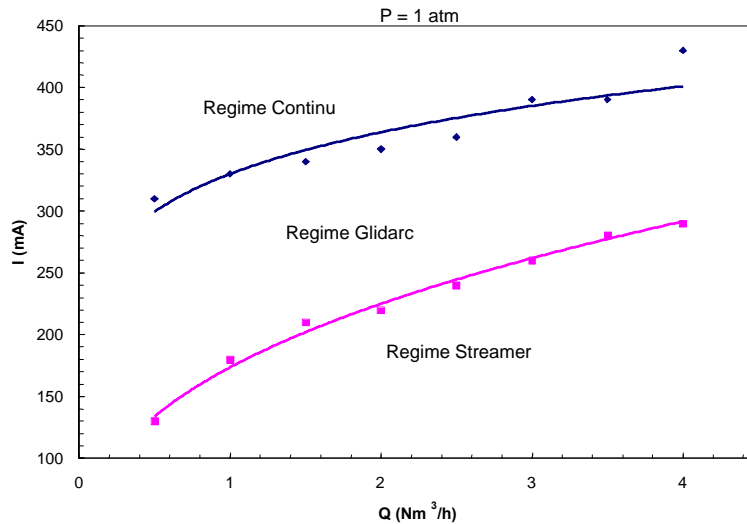


Fig.75 - Régimes de décharge en fonction du débit de gaz et du courant

Les courants de transition entre les différents régimes augmentent avec le débit de gaz. A pression atmosphérique, pour un faible débit de gaz ( $0.5 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ), les courants de transition entre régime filamentaire et glidarc d'une part et entre glidarc et continu d'autre part sont respectivement de 130 mA et 300 mA. Pour un fort débit de gaz ( $4 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ) les transitions ont respectivement lieu pour des courants de 290 mA et 400 mA.

### 3.5 - Régime filamentaire

Ce régime, qui a lieu aux faibles courants, se caractérise par des décharges haute fréquence (supérieure à 2000 Hz). Ce régime est facilement identifiable par le bruit engendré par les hautes fréquences.

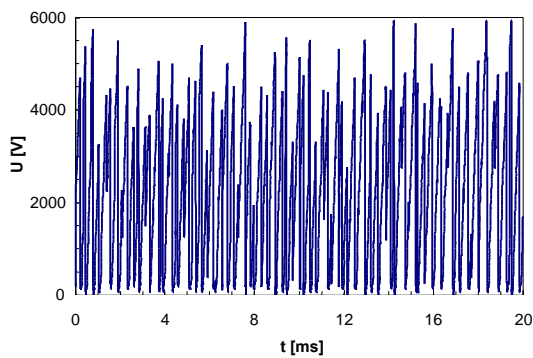


Fig.76 – Evolution temporelle de la tension en régime filamentaire

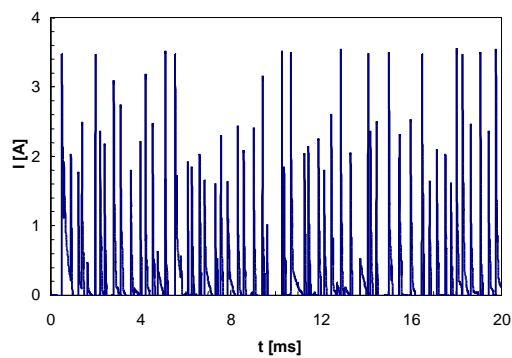


Fig.77 - Evolution temporelle du courant en régime filamentaire

La figure [Fig.78] représente un agrandissement de l'évolution temporelle de la tension [Fig.76] et du courant [Fig.77] en régime filamentaire.

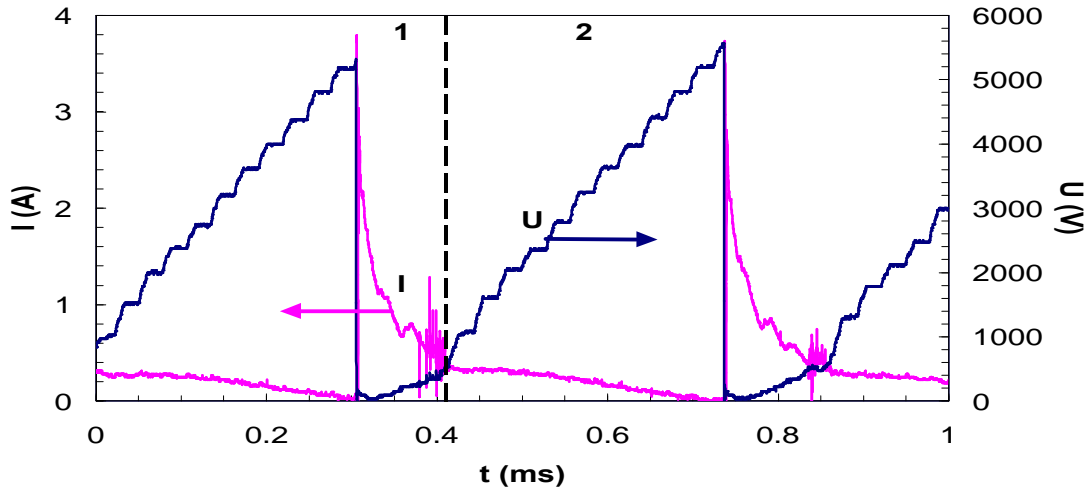


Fig.78 – Evolution temporelle de la tension et du courant en régime filamentaire, différentes zones observées

Deux zones apparaissent :

- Une première zone caractérisée par une impulsion de courant, correspond au phénomène de claquage situé au niveau de l'espace inter-électrodes de plus faible dimension.
- Une seconde zone où la tension augmente linéairement et le courant diminue jusqu'à s'annuler, amorçant ainsi un nouveau claquage.

Dans ces conditions, l'arc est de petite dimension et reste localisé au voisinage de l'électrode centrale, comme représenté dans les figures [Fig.79] et [Fig.80].

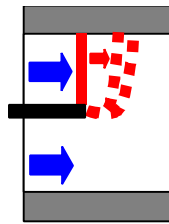


Fig.79 - Schéma de l'arc en régime filamentaire



Fig.80 - Photographie de la décharge en régime filamentaire

Ce régime correspond, en fait, aux limites de la source qui n'arrive pas à assurer le contrôle dynamique du courant dans la décharge pour les faibles consignes de courant et les hautes tensions. Ceci tient surtout au fait que le temps de réponse de la source n'est pas adapté à la fréquence de la décharge et que le courant instantané s'annule.

### 3.6 - Régime Glidarc :

#### 3.6.1 - Description

Le régime de glidarc est un régime intermédiaire entre le régime filamentaire et le régime continu. Il se caractérise par des fréquences inférieures à 250 Hz. Comme dans le cas du régime filamentaire, l'évolution temporelle [Fig.81] présente un pic de courant à chaque nouveau claquage. Cependant, à la différence du régime filamentaire, la source électrique assure le contrôle dynamique du courant, qui est maintenu quasi-constant autour de la valeur de consigne entre deux claquages successifs.

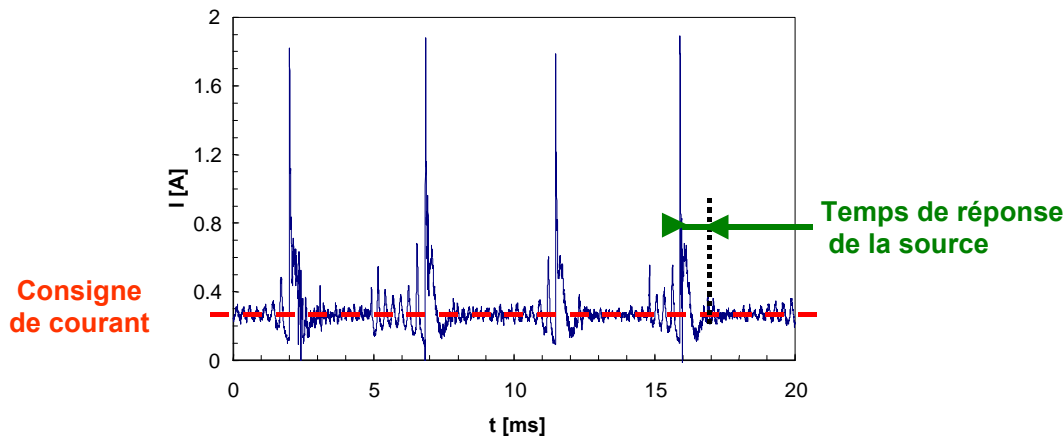


Fig.81 – Evolution temporelle du courant en régime “glidarc”

Le mécanisme de glidarc se décompose en plusieurs étapes [108-110] :

Après le claquage (ionisation du milieu) qui a lieu au niveau de l'espace inter-électrodes le plus faible, l'arc est soufflé par le flux gazeux et s'allonge le long de l'électrode cylindrique. Lors de son allongement, la résistance de l'arc et la tension à ses bornes augmentent simultanément jusqu'à ce que cette dernière atteigne la tension de claquage. Une fois la tension de claquage atteinte, l'arc s'éteint, donnant naissance à un nouvel arc qui apparaît au niveau de l'espace inter-électrodes minimal. Ce phénomène est périodique [Fig.82]. Dans certains cas l'extinction de l'arc peut être provoquée par la tension limite que peut fournir l'alimentation électrique. Pour un courant de consigne constant, la tension évolue en dents de scie entre la tension minimale et la tension maximale [Fig.82].

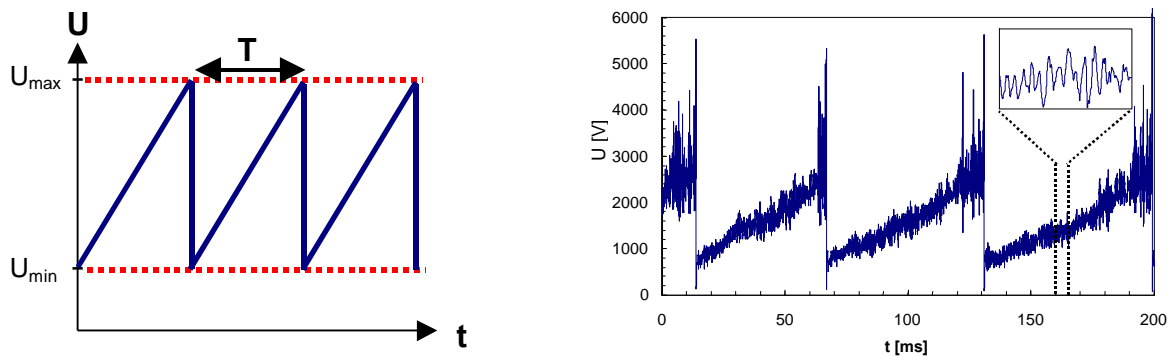


Fig.82 - Schéma et graphe de l'évolution temporelle de la tension en régime glidarc



Le bruit visible sur le graphe représentant l'évolution temporelle de la tension aux bornes de l'arc [Fig.82], provient du système de régulation du courant de l'alimentation électrique qui fonctionne à des fréquences supérieures à 2000 Hz. Les hautes fréquences du système de régulation de courant de la source ne perturbent pas la fréquence du phénomène de glidarc qui est généralement inférieure à 250 Hz [Fig.90]. En régime glidarc, l'alimentation fournit un courant moyen constant. Avant chaque claquage les fluctuations de tension par rapport au signal moyen augmentent fortement ce qui rend difficile la distinction entre la tension de claquage réelle et l'effet de surtension lié à la source. Les paramètres du régime glidarc  $U_{\min}$ ,  $U_{\max}$  et la fréquence du signal glidarc ont été évalués en linéarisant, les valeurs de la tension [Fig.83].

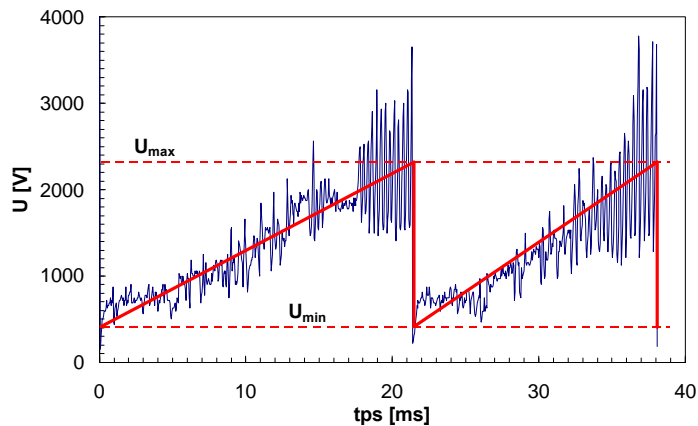


Fig.83 - Linéarisation de l'évolution temporelle de la tension d'arc en régime glidarc

Comme nous le verrons par la suite, le régime glidarc dépend de nombreux paramètres : température de l'arc, géométrie de la torche, débit de gaz, pression, courant, ...

### 3.6.2 - Influence de la géométrie de la torche

Le régime glidarc est fortement dépendant de l'hydrodynamique dans la torche. Pour une géométrie de torche donnée [Fig.70], trois régimes de glidarc ont pu être distingués selon la zone d'évolution de l'arc.

- **Régime "Glidarc 1"**

Ce cas est illustré par la [Fig.84]. La tension aux bornes de l'arc varie entre la tension de claquage (approximativement 3500 V) et la tension minimale qui apparaît aux bornes de l'arc une fois l'espace inter-électrodes ionisé (A) (approximativement 500 V), l'arc s'allonge en fonction du débit de gaz jusqu'à ce que la tension à ces bornes atteigne la valeur de la tension de claquage. Les conditions hydrodynamiques restant à peu près constantes entre (A) et (B) [Fig.85], la longueur de l'arc et la tension à ses bornes augmentent linéairement au cours du temps [Fig.84].

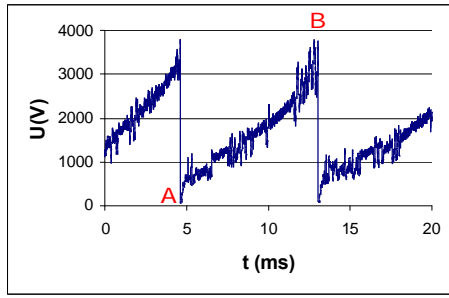


Fig.84 – Evolution temporelle de la tension d'arc en régime "glidarc 1"

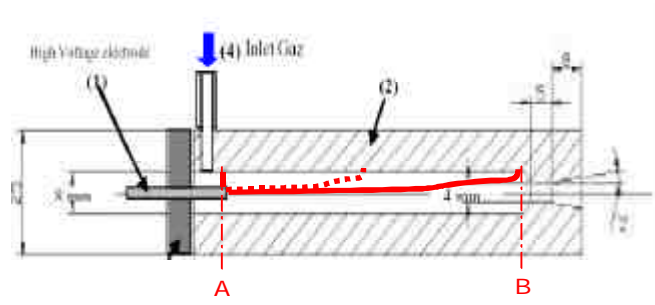


Fig.85 - Schéma de l'arc en régime "glidarc 1"

• Régime "Glidarc 2"

Lorsque, pour un débit de gaz donné, le courant est suffisamment élevé, l'arc atteint le col de la torche (B) avec une tension inférieure à la tension de claquage [Fig.86]. Au niveau du col (B) la section de la torche diminue et la vitesse du gaz augmente fortement. L'arc est simultanément accéléré et refroidi ce qui conduit à une forte augmentation de la pente de la tension aux bornes de l'arc (section [BC] dans la [Fig.86]). La tension de claquage et la tension minimale restent néanmoins inchangées.

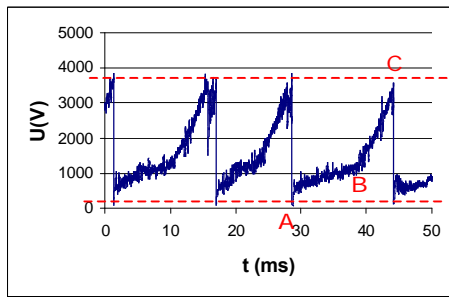


Fig.86 - Evolution temporelle de la tension d'arc en régime "glidarc 2"

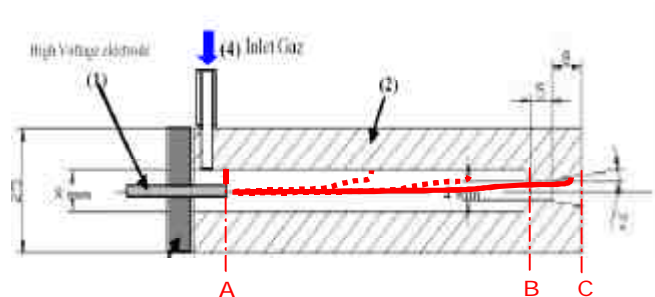


Fig.87 - Schéma de l'arc en régime "glidarc 2"

Dans certaines conditions, un troisième régime le "glidarc 3", peut apparaître. Le "glidarc 3" est un régime intermédiaire entre le "glidarc 2" et le régime continu.

• Régime "Glidarc 3"

Si une densité d'espèces ionisées est suffisante entre (A) et (B), l'arc s'amorce directement en (B). Dans ce cas, la tension minimale aux bornes de l'arc initialement de 500 V, est alors égale à 1000 V [Fig.88]. Cette tension correspond approximativement à la tension de transition observée dans le régime "glidarc 2" (point (B) de la [Fig.86]).

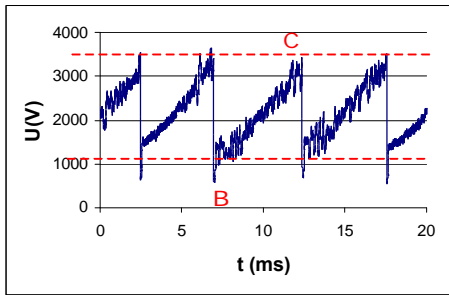


Fig.88 - Evolution temporelle de la tension d'arc en régime "glidarc 3"

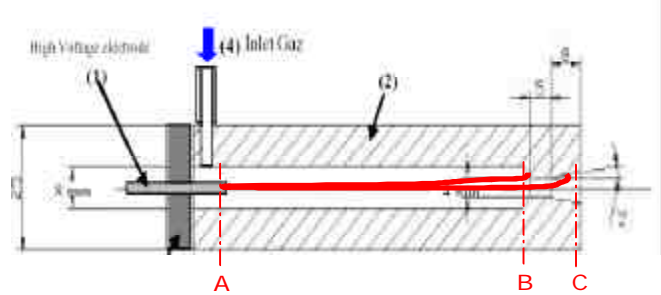


Fig.89 - Schéma de l'arc en régime "glidarc 3"

• **Fréquences des régimes glidarc**

Les trois régimes glidarc peuvent également être distingués en fonction de leurs fréquences [Fig.90]. Alors que la fréquence évolue de manière continue entre le régime "glidarc 1" et le régime "glidarc 2", le régime "glidarc 3" se caractérise par des fréquences plus élevées. Ce qui s'explique par la zone d'évolution de l'arc dans les différents régimes, entre [A-B], [A-C] et [B-C] pour les régimes glidarc 1, 2 et 3 respectivement.

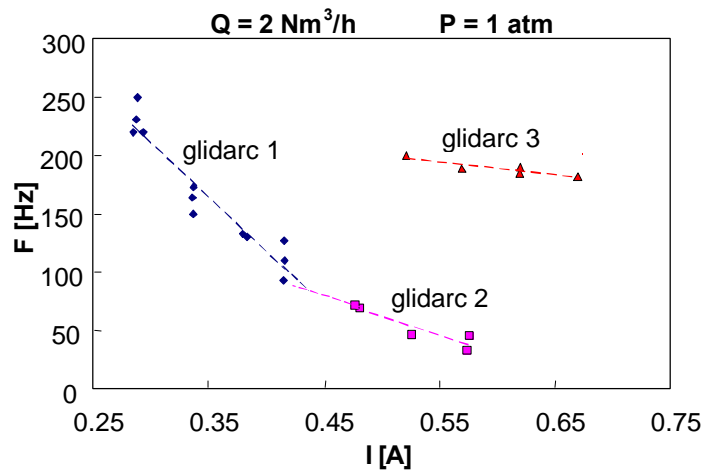


Fig.90 – Evolution des fréquences du signal des différents régimes glidarc en fonction du courant

Le changement de pente entre le régime "glidarc 1" et le régime "glidarc 2" provient du changement d'hydrodynamique entre les points B et C. Au niveau du col, les vitesses sont plus importantes, l'arc est plus refroidi, sa résistivité augmente.

Tous les régimes glidarc sont gouvernés par la géométrie et l'hydrodynamique de la torche. La source régule le courant autour de la valeur de consigne. Dans ce régime la tension de claquage est atteinte aux bornes de l'arc à chaque période.

### 3.7 - Régime continu

#### 3.7.1 - Description

Le régime continu est favorisé par de faibles débits de gaz, des pressions et des courants élevés. Si l'arc atteint l'extrémité (C) de la torche sans que la tension à ses bornes n'ait atteint la tension de claquage, un arc continu s'établit [Fig.92]. C'est le régime continu, caractérisé par une tension et un courant fluctuant légèrement autour d'une valeur constante [Fig.91].

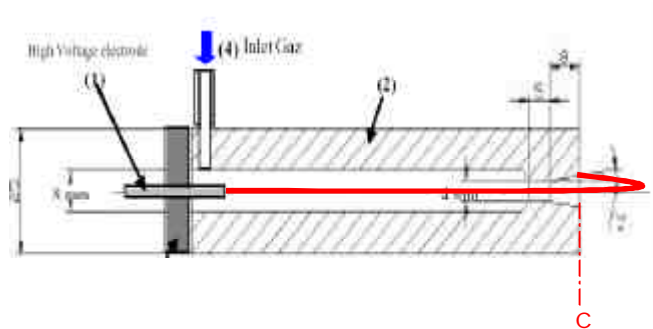
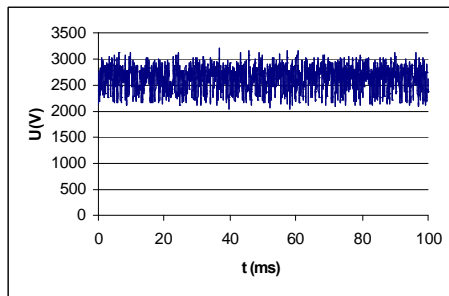


Fig.91 - Evolution temporelle de la tension d'arc en régime continu

Fig.92 - Schéma de l'arc en régime continu

Une fois l'arc établi entre l'électrode centrale et l'extrémité de l'électrode cylindrique, la longueur de la torche apparaît comme le principal paramètre géométrique.

#### 3.7.2 - Influence de la longueur de la torche

En régime continu, pour un débit de gaz et un courant constant, la tension aux bornes de l'arc est directement fonction de la longueur de la torche [Fig.93].

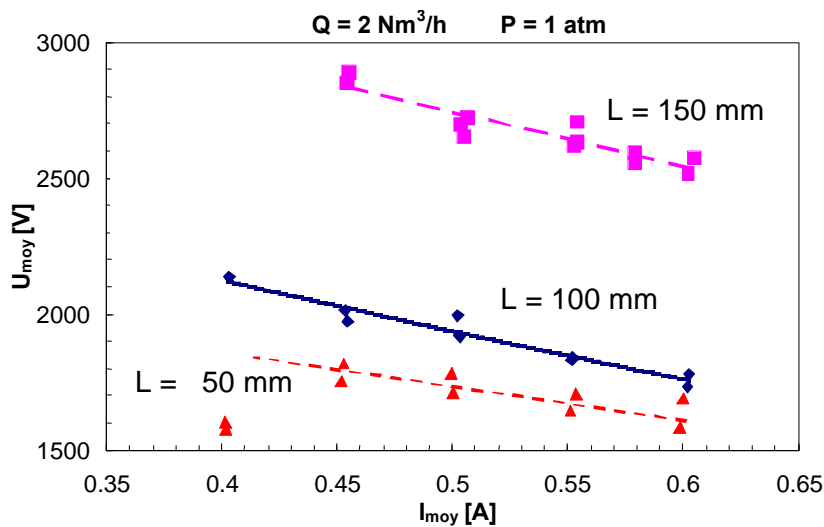


Fig.93 - Evolution de la tension moyenne en régime continu en fonction du courant moyen pour différentes longueurs de torches "L"

La longueur de la torche peut être augmentée jusqu'à ce que la tension aux bornes de l'arc atteigne la tension de claquage de l'espace inter-électrodes minimal. Au-delà, le régime continu n'est plus accessible.

### 3.8 - Influence du débit de gaz

#### 3.8.1 - Transition Filamentaire / Glidarc

Comme nous l'avons déjà présenté, le régime filamentaire correspond aux limites de la source. En régime filamentaire, la source ne parvient pas à réguler le courant autour de la valeur de consigne. Le courant instantané vient à s'annuler, ce qui éteint l'arc et conduit à la création d'un nouvel arc au niveau de l'espace inter-électrodes minimal. Le régime filamentaire s'établit pour de faibles courants et des débits d'air élevés. La valeur du courant de transition dépend fortement du débit, mais apparaît peu sensible à l'effet de la pression [Fig.94].

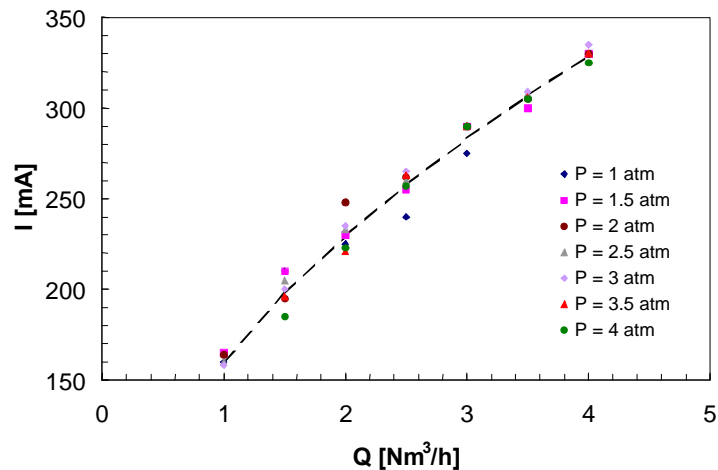


Fig.94 – Evolution du courant de transition entre le régime filamentaire et le régime de glidarc en fonction du débit massique pour différentes pressions.

Dans nos conditions, nous avons pu observer que le courant de transition du régime filamentaire au régime glidarc “ $I_{SG}$ ” variait approximativement proportionnellement à la racine carrée du débit [Fig.94].

$$I_{SG} = A \cdot (Q)^{0.5}. \quad [\text{Eq. 26}]$$

#### 3.8.2 - Transition Glidarc / Continu

Le régime continu s'établit lorsque l'arc parvient à se stabiliser en un point préférentiel de l'extrémité de la tuyère avec une tension à ses bornes inférieure à la tension de claquage. Pour différents débits ou pressions, une fois ce régime atteint, l'arc possède une longueur fixe (approximativement celle de la tuyère). Le courant de transition est fonction de la résistance de l'arc, elle-même fonction de sa

température. Le courant de transition du régime glidarc au régime continu “ $I_{GC}$ ” est lié au débit et à la pression [Fig.95].

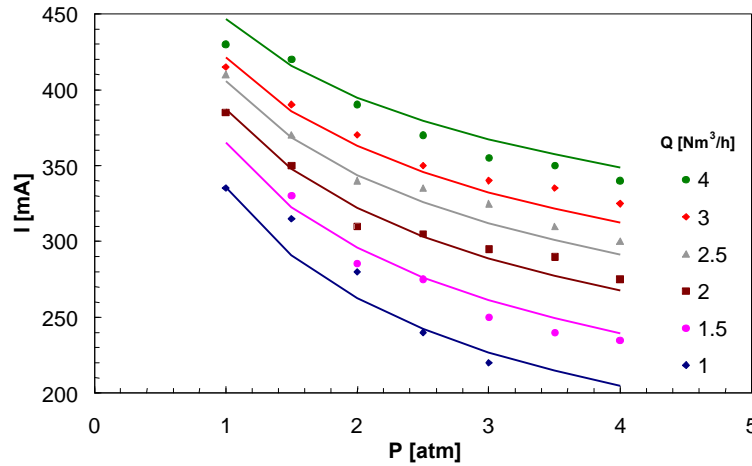


Fig.95 – Evolution du courant de transition du régime glidarc au régime continu “ $I_{GC}$ ” en fonction de la pression pour différentes valeurs de débit

Pour un débit donné, le courant de transition “ $I_{GC}$ ” décroît avec la pression alors que pour une pression donnée, le courant de transition croît avec le débit.

### 3.8.3 - Influence du débit en régime glidarc

Nous constatons que dans la gamme de débits explorée, les tensions augmentent très légèrement avec l’augmentation du débit. Par contre, nous avons pu observer expérimentalement à fort débit, que la longueur de l’arc pouvait dans certains cas être inférieure à la longueur de l’arc obtenue à faible débit. Ce phénomène peut s’expliquer par le fait que, pour un courant donné, la longueur de l’arc dépend principalement des conditions hydrodynamiques et thermiques locales. D’un point de vue hydrodynamique, l’augmentation du débit favorise l’allongement de l’arc, alors que d’un point de vue thermique l’augmentation du débit se traduit par un refroidissement de l’arc qui limite son allongement.

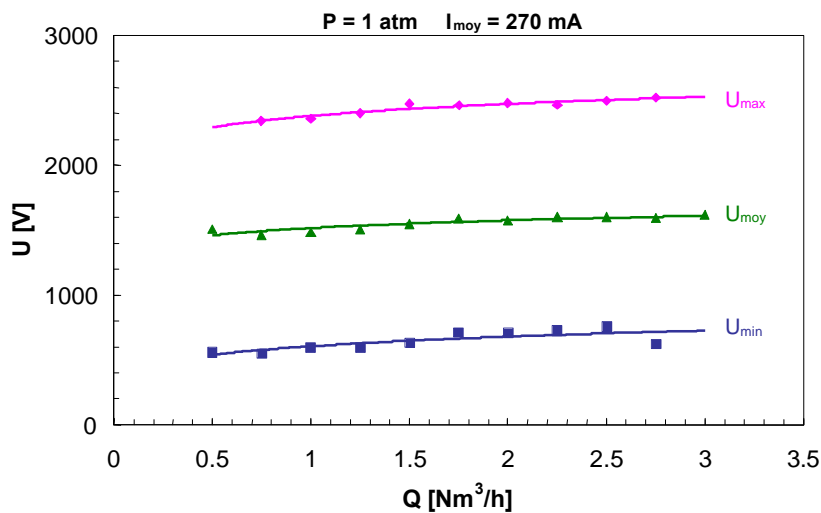


Fig.96 – Evolution des tensions aux bornes de l’arc en fonction du débit de gaz

On constate également que la fréquence est une fonction croissante du débit. Ceci s'explique par l'effet combiné de l'augmentation de la vitesse de l'arc et à la diminution de sa longueur due aux effets thermiques.

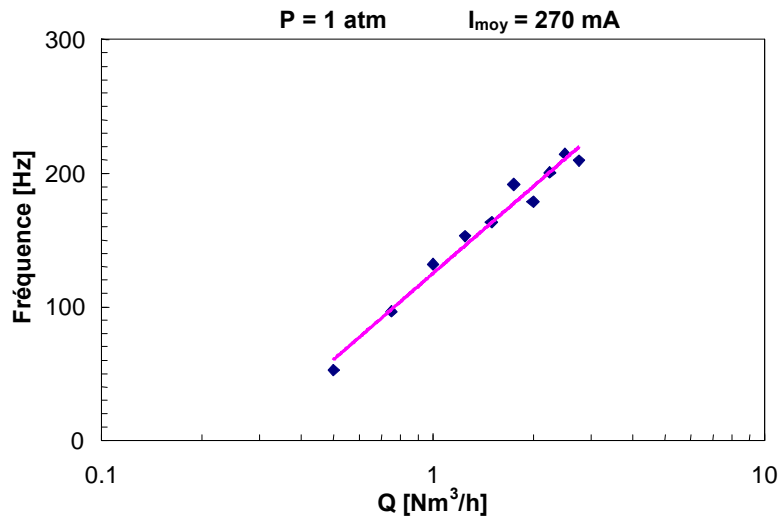


Fig.97 – Evolution de la fréquence en régime glidarc en fonction du débit d'air

Dans nos conditions, pour un courant et une pression donnée, la fréquence suit une fonction logarithme du débit de gaz [Fig.97].

$$F = c_1 \cdot \ln(Q) + c_2 \quad [\text{Eq. 27}].$$

Avec  $c_1$  et  $c_2$  des constantes qui dépendent de la pression et du courant moyen de la géométrie ...

La température de l'arc est fonction du débit de gaz qui le traverse. Dans le cas du régime glidarc, ce débit correspond au débit relatif "Q<sub>rel</sub>". Or on montre [Fig.74] que le débit relatif varie linéairement en fonction du logarithme du débit total, ce qui tend à indiquer que la fréquence est une fonction linéaire du débit relatif.

### 3.8.4 - Influence du débit en régime continu

En régime continu on observe que pour un courant et une pression donnés, la tension moyenne “ $U_{moy}$ ” aux bornes de l'arc est une fonction croissante du débit de gaz.

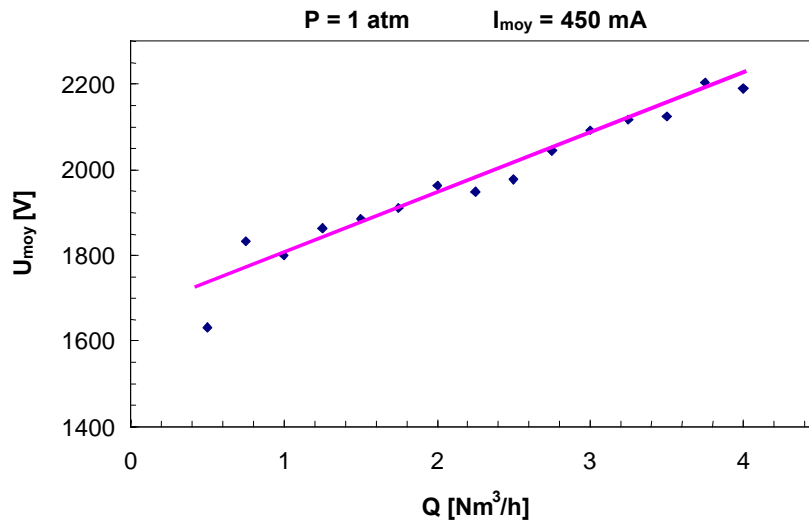


Fig.98 – Evolution de la tension moyenne en régime continu en fonction du débit d'air

L'augmentation de la tension moyenne “ $U_{moy}$ ” s'explique par l'augmentation de la résistance de l'arc qui est fonction de la résistivité, de la longueur de l'arc et de sa section. En régime continu, la longueur de l'arc est constante (proche de celle de la tuyère), seule la résistivité et la section de l'arc varient avec le débit. Dans ce régime, l'arc est refroidi par la totalité du débit de gaz. La tension moyenne dépend donc du débit total “ $Q$ ”.

## 3.9 - Influence de la pression

### 3.9.1 - Régimes de décharge en fonction de la pression

Le courant de transition entre le régime continu et le régime glidarc diminue avec la pression. A pression atmosphérique, le courant de transition entre le régime glidarc et le régime continu est de 400 mA, alors qu'il ne vaut plus que 320 mA pour une pression de 3.5 atm [Fig.99]. Le courant de transition entre le régime filamentaire et le régime glidarc ne varie pratiquement pas en fonction de la pression. Pour un débit de 4  $\text{Nm}^3/\text{h}$  la valeur de transition est voisine de 290 mA.



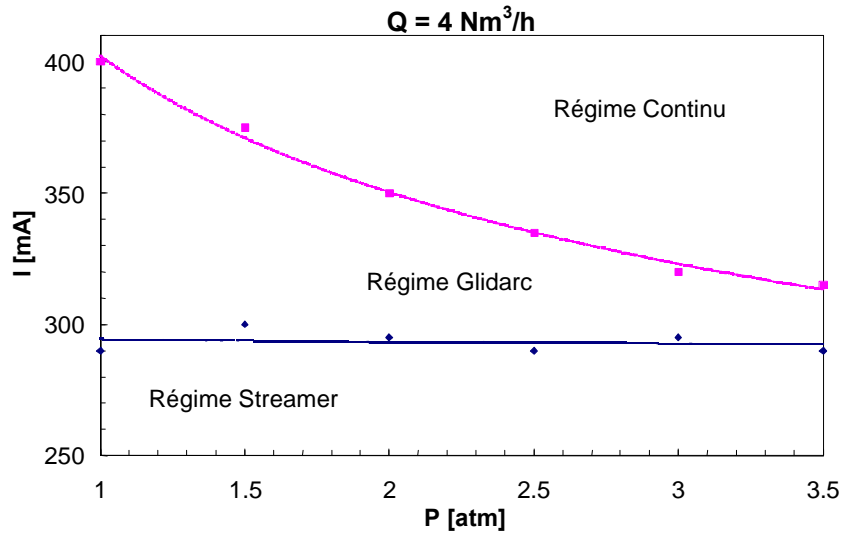


Fig.99 - Régimes de décharge en fonction de la pression

En règle générale, la transition entre les différents régimes dépend donc : du courant moyen de la décharge, de la pression et du débit d'air. Les phénomènes thermiques jouent vraisemblablement un rôle majeur vis à vis de ces transitions.

### 3.9.2 - Influence de la pression en régime glidarc

Les tensions augmentent avec la pression [Fig.100]. Pour une pression de 1 bar la tension moyenne se situe aux alentours de 1500 V et elle atteint environ 2400 V pour une pression de 3.5 atm. Par ailleurs, on remarque que l'amplitude de la tension : écart entre  $U_{\max}$  et  $U_{\min}$  augmente avec la pression. Ceci s'explique par le fait que la tension maximale  $U_{\max}$  augmente plus fortement avec la pression que la tension minimale<sup>30</sup>  $U_{\min}$ .

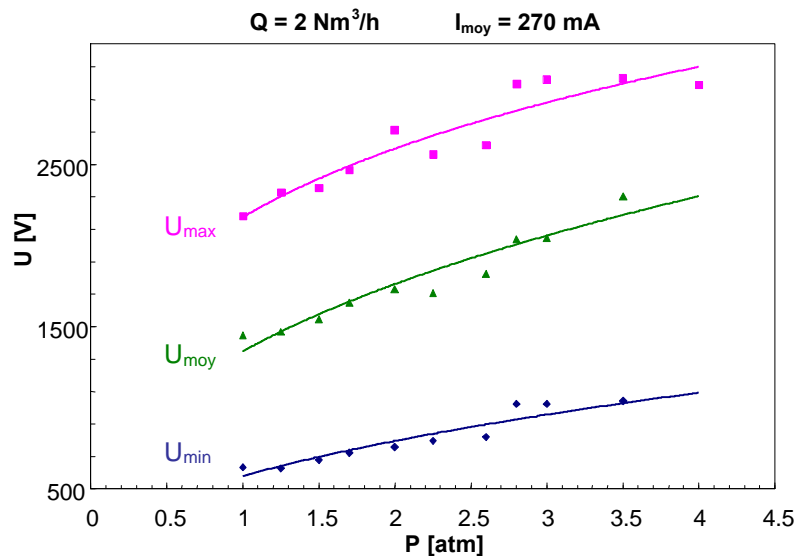


Fig.100 – Evolution des tensions aux bornes de l'arc en régime glidarc en fonction de la pression

<sup>30</sup> tension de l'arc juste après amorçage

La pression intervient sur les paramètres électriques de la décharge en régime glidarc à deux niveaux :

Lorsque le milieu n'est pas ionisé, une augmentation de pression engendre une augmentation de la tension de claquage<sup>31</sup>. On remarque néanmoins, que la tension maximale s'écarte fortement de la tension de claquage qui est supposée évoluer proportionnellement avec la pression<sup>31</sup>. Ceci s'explique vraisemblablement par un effet mémoire fortement lié à la thermique du système [Fig.100].

Lorsque le milieu est ionisé, pour un courant constant, l'augmentation de la pression entraîne une augmentation de la résistivité [Eq. 25] et donc une augmentation de la tension aux bornes de l'arc. Cette augmentation de tension correspond à l'augmentation de " $U_{\min}$ " et de " $U_{\text{moy}}$ " [Fig.100].

On remarque également que la pression agit fortement sur la fréquence du glidarc comme indiqué sur la figure [Fig.101]. Ceci peut s'expliquer par l'effet combiné de la thermique et de l'hydrodynamique. D'un point de vue hydrodynamique l'augmentation de la pression se traduit par une diminution de la vitesse de l'écoulement qui entraîne une diminution de la vitesse de l'arc qui conduit à une diminution de la fréquence. Sur un plan thermique, pour un courant donné, l'augmentation de la pression conduit à une augmentation de la température de l'arc et à son allongement.

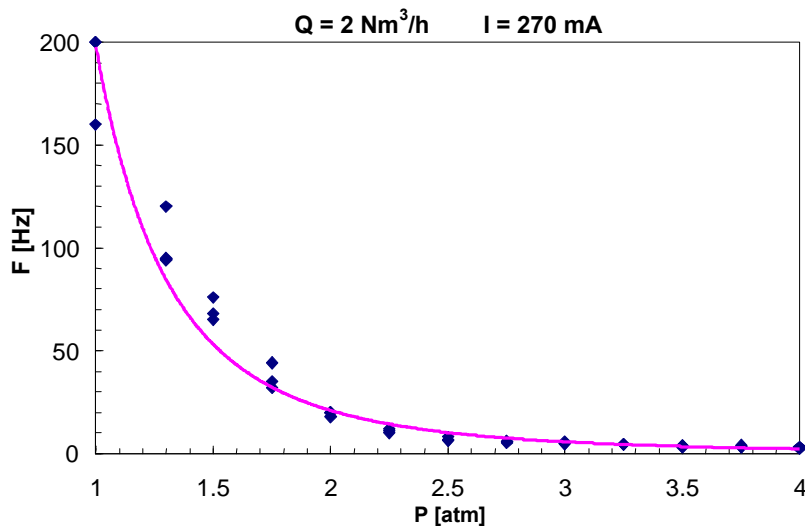


Fig.101 – Evolution de la fréquence du signal en régime glidarc en fonction de la pression

### 3.9.3 - Influence de la pression en régime continu

A courant et débit constants, on constate que les tensions moyennes qui s'établissent en régime continu, augmentent de façon significative avec la pression. Ceci peut s'expliquer par l'augmentation de la résistance de l'arc due à sa constriction sous l'effet de la pression et ce malgré la diminution de sa résistivité liée à l'augmentation de la température [Fig.102].

On constate par ailleurs, comme évoqué au paragraphe 3.8.4 que la tension moyenne est une fonction croissante du débit.

<sup>31</sup> loi de Paschen : pour un gaz donné, la tension de claquage est proportionnelle au produit de la pression par la distance inter-électrodes

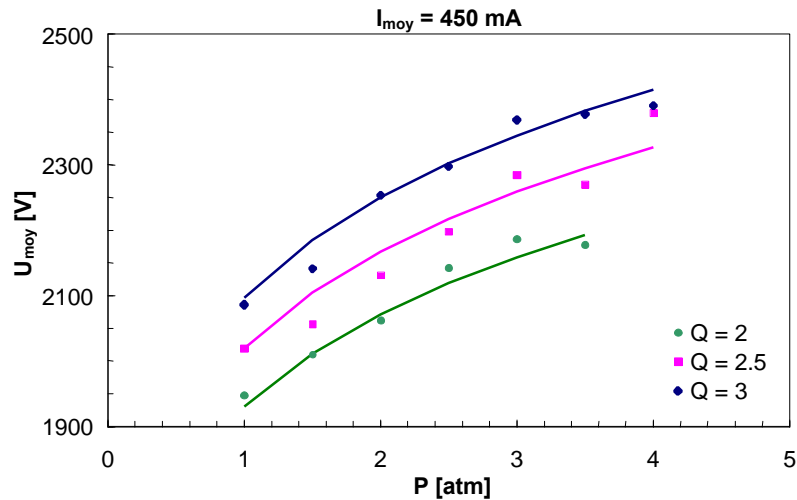


Fig.102 – Evolution de la tension moyenne aux bornes de l'arc en régime continu à différents débits

### 3.10 - Influence du courant

#### 3.10.1 - Influence du courant en régime glidarc

La figure [Fig.103] représente l'évolution de la tension en fonction du courant pour un débit d'air de  $2 \text{ Nm}^3/\text{h}$  à pression atmosphérique. On constate que les tensions sont des fonctions légèrement décroissantes du courant, ce qui s'explique par la diminution de la résistance de l'arc avec l'augmentation du courant.

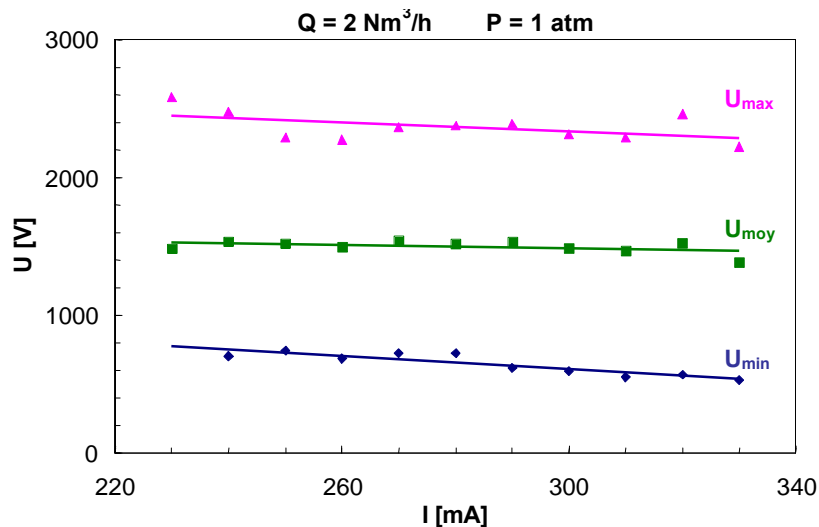


Fig.103 – Evolution des tensions en régime glidarc en fonction de l'intensité de courant

La figure [Fig.104] représente l'évolution de la fréquence en fonction du courant pour un débit d'air de  $2 \text{ Nm}^3/\text{h}$  à pression atmosphérique. On constate un changement de comportement autour de  $300 \text{ mA}$ . En dessous de  $300 \text{ mA}$  la fréquence est une fonction croissante du courant, alors qu'elle décroît au dessus de  $300 \text{ mA}$ . Cette différence de comportement, s'explique vraisemblablement par les

fluctuations de tension générées par la source [Fig.105] et [Fig.106] qui se révèlent être de plus grande amplitude aux faibles courants [Fig.105], au point que la tension instantanée atteigne prématurément le seuil de claquage.

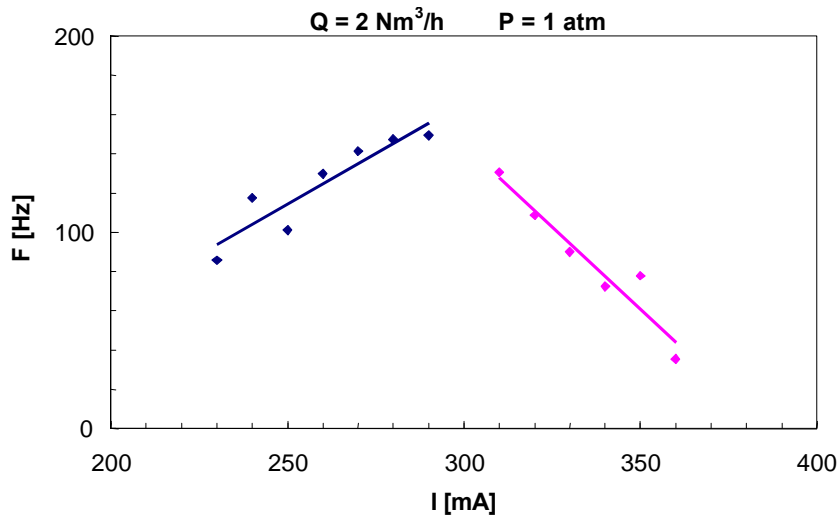


Fig.104 – Evolution de la fréquence du régime glidarc en fonction de l'intensité de courant

Pour les faibles courants, l'alimentation agit sur la fréquence de manière prépondérante. Pour des courants supérieurs à 300 mA, les fluctuations de tension liées à la régulation de l'alimentation sont moins importantes [Fig.107] et elles influencent beaucoup moins le comportement de la décharge. La fréquence de l'arc dépend alors de l'hydrodynamique et de la thermique dans la torche.

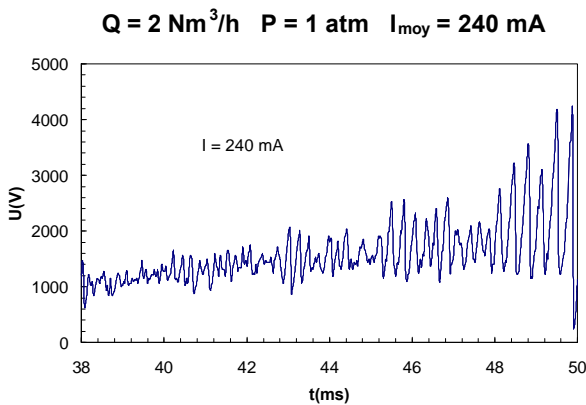


Fig.105 – Evolution temporelle de la tension à faible courant, en régime glidarc, au cours d'une période

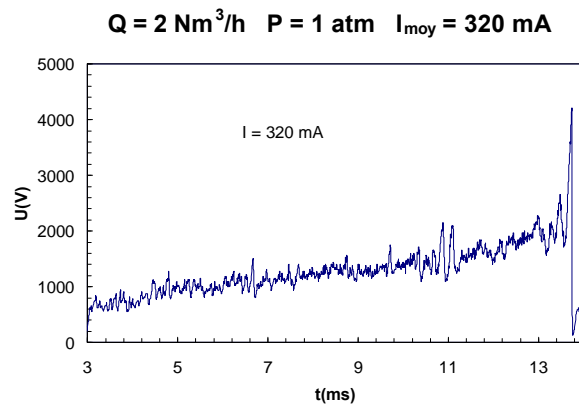


Fig.106 - Evolution temporelle de la tension à fort courant, en régime glidarc, au cours d'une période

### 3.10.2 - Influence du courant en régime continu

En régime continu, à pression constante, la tension décroît linéairement avec l'augmentation du courant. Par ailleurs, comme cela a déjà été évoqué dans le paragraphe 9.3, à courant constant, la tension augmente avec la pression [Fig.107],.

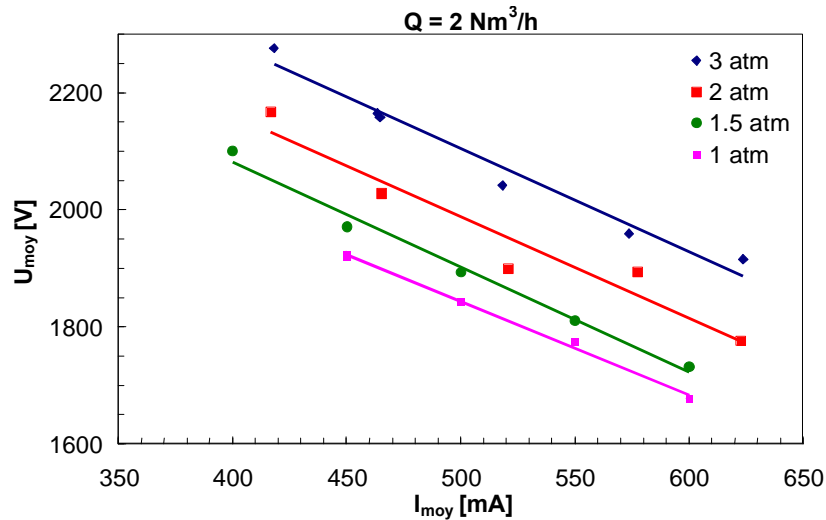


Fig.107 – Evolution de la tension moyenne en régime continu fonction du courant moyen

La décroissance de la tension s'explique par la diminution de la résistance de l'arc liée à l'effet combiné de la diminution de sa résistivité et l'augmentation de sa section<sup>32</sup> avec l'augmentation du courant. Cette décroissance est caractéristique de la résistance négative des arcs non thermiques.

### 3.11 - Influence de l'alimentation électrique

Dans cette partie nous avons comparé la tension et le courant aux bornes de l'arc dans le cas où la torche est alimentée par la source électrotechnique, et où elle est alimentée par le convertisseur à résonance. Cette étude a porté sur deux régimes de fonctionnement de la décharge (glidarc et continu) qui ont été détaillés dans la partie consacrée à la "Caractérisation électrique de la torche plasma couplée à une alimentation du type convertisseur à résonance".

#### 3.11.1 - Régime glidarc

La comparaison des deux alimentations en régime glidarc a été effectuée en utilisant une tuyère de longueur 100 mm et de diamètre 8 mm sous écoulement d'air à  $2 \text{ Nm}^3/\text{h}$ . La comparaison est effectuée pour une puissance dissipée identique correspondant à 510 W.

La figure [Fig.108] représente l'évolution de la tension et du courant en régime glidarc lorsque la torche est alimentée par la source électrotechnique. Dans ces conditions spécifiques la fréquence d'occurrence du glidarc est d'environ  $8 \text{ Hz}$ <sup>33</sup>, le courant efficace et la tension efficace sont respectivement de 500 mA et de 1150 V. Lorsque l'arc s'allonge, la tension à ses bornes augmente et le courant qui le traverse diminue. La stabilité de l'arc diminue avec le courant et avec l'allongement de l'arc. Par ailleurs, nous pouvons distinguer des oscillations dont la fréquence est d'environ 100 Hz qui correspond à la fréquence du 50 Hz redressé.

<sup>32</sup> expansion thermique

<sup>33</sup> ce qui correspond à une période de 125 ms

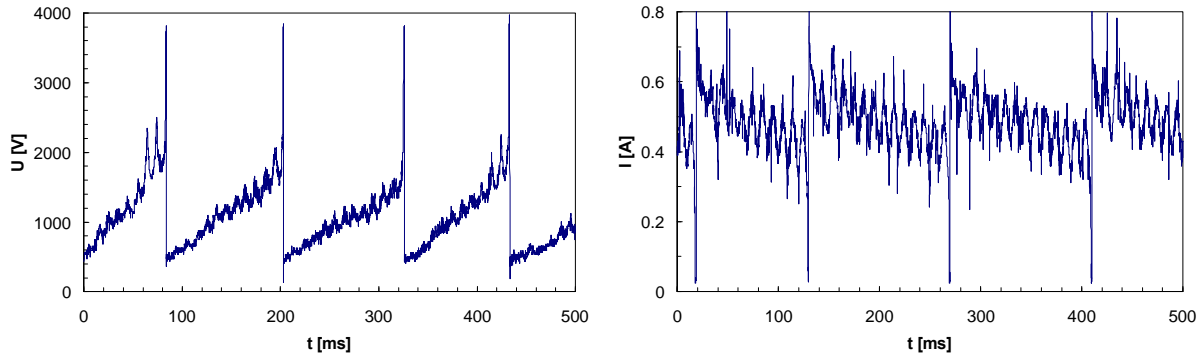


Fig.108 - Evolution de la tension et du courant en régime glidarc lorsque la torche est alimentée par la source électrotechnique

La figure [Fig.109] représente l'évolution de la tension et du courant en régime glidarc lorsque la torche est alimentée par le convertisseur à résonance. Nous remarquons que la tension évolue en dents de scie comme précédemment, mais dans ce cas le courant est régulé autour d'une valeur constante. La fréquence d'occurrence du glidarc est d'environ 36 Hz. Le courant efficace et la tension efficace sont respectivement de 335 mA et de 1594 V. Les bruits hautes fréquences d'environ 5000 Hz observés correspondent à la fréquence de régulation de l'alimentation électrique. Dans ces conditions nous sommes proches du régime continu. En effet, comme nous l'avons présenté précédemment [Fig.75], le courant de transition du régime glidarc au régime continu est de 350 mA pour un débit de  $2 \text{ Nm}^3/\text{h}$  à pression atmosphérique.

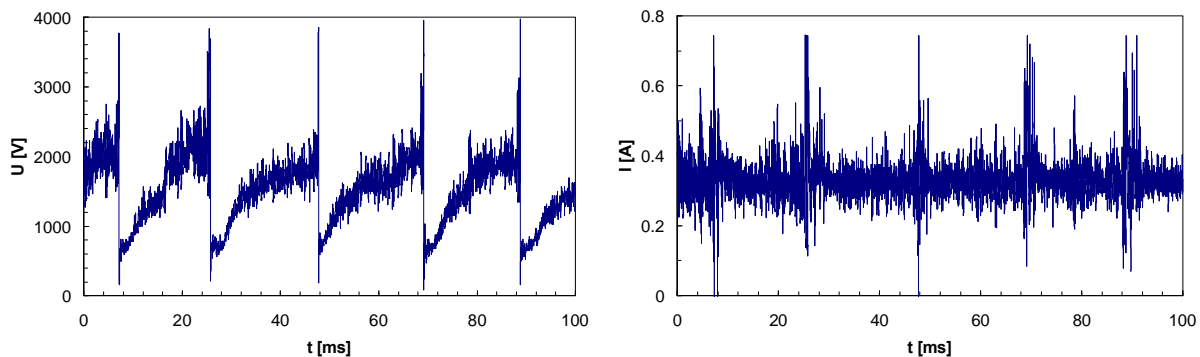


Fig.109 - Evolution de la tension et du courant en régime glidarc lorsque la torche est alimentée par le convertisseur à résonance

### 3.11.2 - Régime continu

La comparaison des deux sources a également été effectuée en régime continu en utilisant une tuyère de longueur 50 mm et de diamètre 8 mm. Le débit d'air a été fixé à  $1 \text{ Nm}^3/\text{h}$ . La comparaison est effectuée pour une puissance dissipée dans la décharge, égale à 500 W.

La figure [Fig.110] représente l'évolution de la tension et du courant en régime continu lorsque la torche est alimentée par la source électrotechnique. Nous pouvons observer comme précédemment une oscillation, de fréquence 100 Hz, qui correspond à la fréquence du 50 Hz redressé.

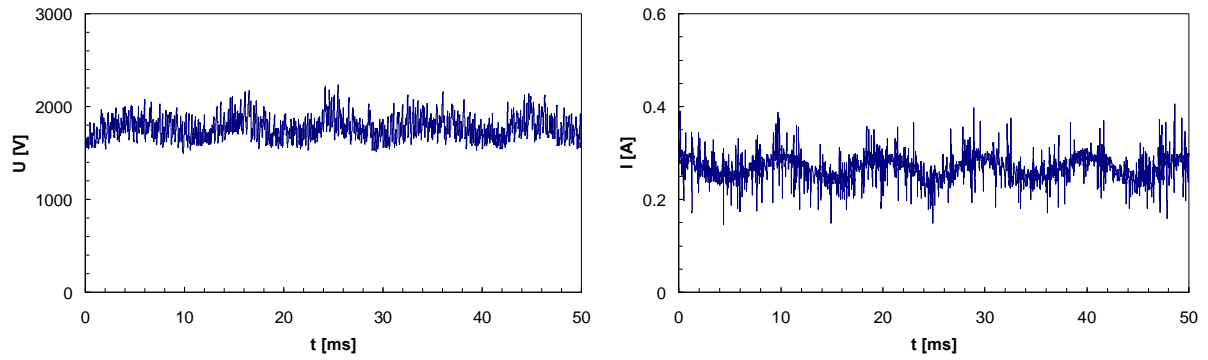


Fig.110 - Evolution de la tension et du courant en régime continu lorsque la torche est alimentée par la source électrotechnique

La figure [Fig.111] représente l'évolution de la tension et du courant en régime continu lorsque la torche est alimentée par le convertisseur à résonance. Nous remarquons dans ce cas, que comme précédemment, les oscillations induites par la source correspondent à des fréquences beaucoup plus élevées de l'ordre de 5000 Hz.

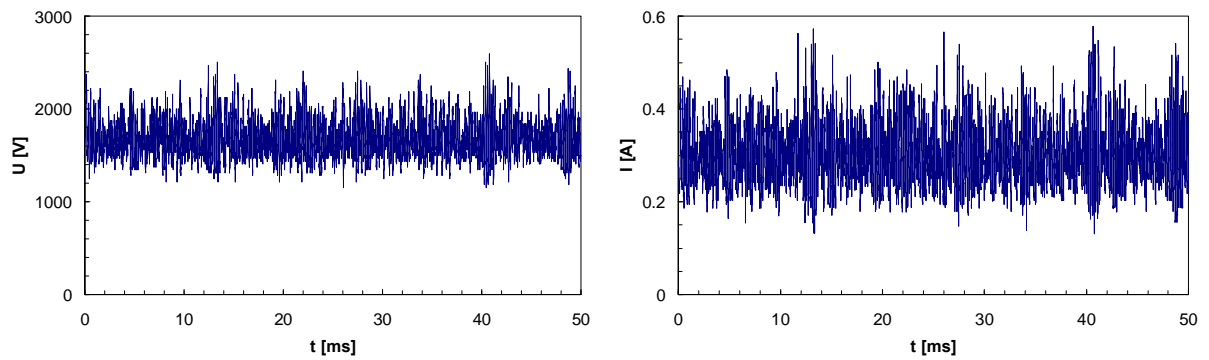


Fig.111 - Evolution de la tension et du courant en régime continu lorsque la torche est alimentée par le convertisseur à résonance

On remarque par ailleurs [Fig.71] que l'amplitude du bruit dans le cas du convertisseur à résonance est supérieure à celle obtenue dans le cas de la source électrotechnique.

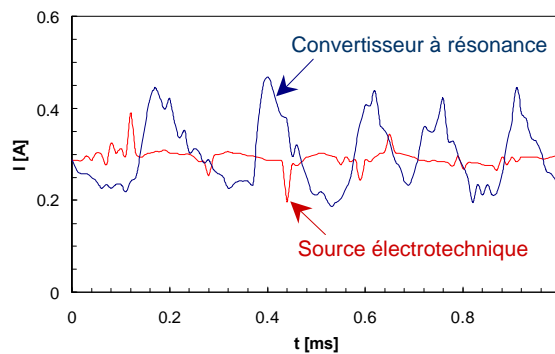


Fig.112 - Evolution du courant pour une décharge alimentée par la source électrotechnique et par la source de type convertisseur à résonance