



HAL
open science

Fluctuations de l'arc et du jet de plasma liées au mouvement du pied d'arc dans des plasmatoms

A. Kaminska, M. Dudeck

► **To cite this version:**

A. Kaminska, M. Dudeck. Fluctuations de l'arc et du jet de plasma liées au mouvement du pied d'arc dans des plasmatoms. *Journal de Physique III*, 1995, 5 (12), pp.2043-2057. 10.1051/jp3:1995105 . jpa-00249436

HAL Id: jpa-00249436

<https://hal.science/jpa-00249436v1>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification

Physics Abstracts

52.75Hn — 52.35Py

Fluctuations de l'arc et du jet de plasma liées au mouvement du pied d'arc dans des plasmatron

A. Kaminska⁽¹⁾ et M. Dudeck⁽²⁾

⁽¹⁾ Institut d'Electroénergétique de l'Ecole Polytechnique de Poznań, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, Pologne

⁽²⁾ Laboratoire d'Aérothermique du CNRS, Université Paris 6, 4 ter Route des Gardes, 92190 Meudon, France

(Reçu le 13 Avril 1995, révisé le 19 Juillet 1995, accepté le 19 Septembre 1995)

Résumé. — L'étude présentée porte sur le comportement dynamique de l'arc électrique dans un plasmatron et du jet de plasma dans un caisson à pression réduite. La variation de la fréquence caractéristique et les écarts de tension sont étudiés et discutés en fonction de la pression, du débit gazeux et du courant d'arc. Une corrélation entre les fluctuations de la tension d'arc et les fluctuations de la pression dynamique dans les jets de plasma d'argon et d'azote créés par arc électrique a été mise en évidence.

Abstract. — A diagnostic of the dynamic behaviour of the electric arc in a plasmatron and plasma jet in a low pressure chamber was performed. The frequency and voltage rise variations with pressure, flow rate, arc current were studied and discussed. A correlation between the fluctuations of arc voltage and the dynamic pressure in argon and nitrogen plasma jet was found.

1. Introduction

Dans le comportement dynamique de l'arc électrique dans un plasmatron en courant continu, le phénomène de déplacement du pied d'arc sur l'anode est prépondérant. Ce phénomène résulte des processus gazodynamiques dans l'écoulement à l'intérieur du plasmatron [1, 2]. Pendant ce déplacement, le claquage électrique dans la couche de gaz située entre l'arc et la surface intérieure de l'anode ou entre plusieurs régions de l'arc apparaît quand le champ électrique dans cette couche dépasse son pouvoir isolant. Les fluctuations de la tension d'arc sont liées évidemment au type du claquage électrique. En effet, le claquage entre la partie cylindrique de la colonne d'arc et la paroi (Fig. 1a) est accompagné d'une chute rapide de la tension qui peut atteindre 50 % de la valeur moyenne de la tension (Fig. 2a). Cet effet est lié à la valeur importante de la tension de claquage dans la couche limite froide. En revanche, la tension de claquage des couches se trouvant entre différentes parties de l'arc (Fig. 1b) ou entre l'arc et

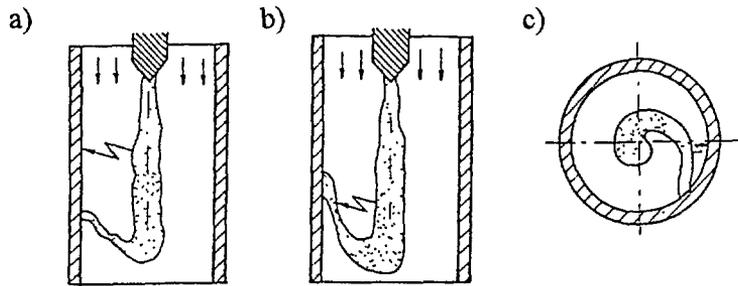


Fig. 1. — Formes de claquage a) dans la couche limite, b) dans la couche gazeuse entre les parties de l'arc, c) dans la couche limite de l'arc rotationnel.

[Type of arcing a) boundary layer, b) layer between arc zones, c) boundary layer of the rotational arc.]

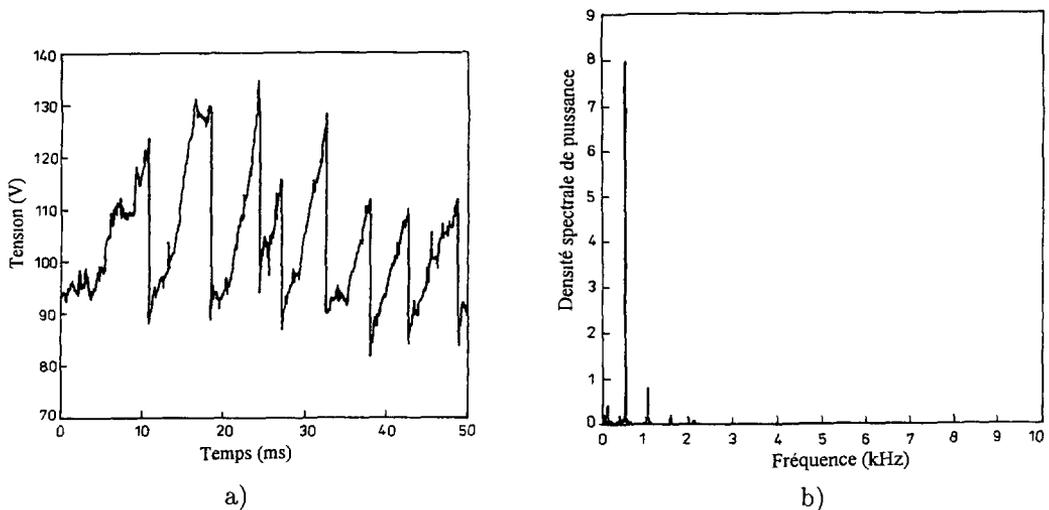


Fig. 2. — a) Oscillogramme typique de la tension d'arc. (Azote, débit $G = 0,4$ g/s, pression $p = 760$ Torr, courant d'arc $I = 55$ A). b) Densité spectrale de puissance. (Azote, débit $G = 0,4$ g/s, pression $p = 760$ Torr, courant d'arc $I = 55$ A).

[a) Typical time evolution of the arc voltage. (Nitrogen, mass flow rate $G = 0.4$ g/s, pressure $p = 760$ Torr, arc current $I = 55$ A). b) Power spectral density. (Nitrogen, mass flow rate $G = 0.4$ g/s, pressure $p = 760$ Torr, arc current $I = 55$ A).]

la paroi dans le cas de la rotation de l'arc (Fig. 1c) est inférieure à celle de la couche limite en raison d'une température plus élevée, c'est pourquoi pour ce type de claquage, on observe une variation de la tension plus faible. Sur la figure 2a, cet effet correspond aux fluctuations superposées à la partie croissante de la tension. La structure fréquentielle de la tension décrite par la densité spectrale de puissance (Fig. 2b) obtenue en utilisant une transformée de Fourier rapide montre la présence importante d'harmoniques dans le signal.

Les mouvements du pied d'arc sur l'anode dépendent principalement du régime d'écoulement : laminaire ou turbulent [3-5]. Avec une entrée axiale du gaz, le caractère de l'écoulement dans le plasmatron est fonction essentiellement du débit gazeux [3]. Pour de faibles débits

(inférieur à 10 g/s), des diamètres du canal cylindrique de 10 à 20 mm, des courants d'arc de 50 à 200 A et pour de l'argon et de l'azote, l'écoulement est laminaire et des claquages réguliers entre la colonne cylindrique d'arc et la paroi sont observés, ils sont accompagnés d'écartes importants de la tension. Au fur et à mesure que le débit augmente, des claquages supplémentaires apparaissent provoquant des écarts de tension faibles par rapport à ceux dans l'écoulement laminaire. Ce comportement est lié à l'apparition de turbulences. Dans les écoulements à grands débits (supérieur de 10 g/s) des claquages accompagnés de faibles écarts de tension sont seulement observés.

Pour une entrée tangentielle du gaz dans la chambre du plasmatron imposant un effet de vortex, l'écoulement diffère de celui ayant une entrée axiale. Le vortex contient un noyau dans lequel l'écoulement est laminaire tandis qu'autour, le gaz a une grande vitesse de rotation et un gradient de pression apparaît dépendant du carré de la vitesse de rotation et de la densité du gaz. Par conséquent, le pouvoir isolant de la couche limite augmente avec le débit du gaz. Un autre phénomène à signaler dans cet écoulement est le mouvement de rotation de l'arc accompagné de faibles écarts de tension.

Les mouvements du pied d'arc sur l'anode dépendent aussi des paramètres de fonctionnement tels que la pression dans la chambre du plasmatron, l'intensité du courant électrique et le débit gazeux. Les différentes formes des relations entre la fréquence des fluctuations de la tension et ces paramètres ont été présentées précédemment [3, 6, 8]. Ces relations ont la forme générale suivante :

$$f = \text{Cste} \cdot I^\mu \cdot G^\eta \cdot d^\varepsilon$$

où : I est le courant d'arc, G le débit massique du gaz, d le diamètre du canal du plasmatron, μ , η , ε sont des paramètres déterminés à partir d'approximations des mesures expérimentales.

Il faut noter que les coefficients μ , η et ε dépendent fortement du régime d'écoulement, de la pression et de la géométrie du plasmatron, c'est pourquoi la fonction $f(I, G, d)$ n'est valable que pour des conditions déterminées et ne peut donc pas être généralisée.

Dans l'étude présentée, un écoulement de type de vortex dans un plasmatron ayant un canal cylindrique est considéré. L'étude a porté essentiellement sur l'influence de la pression statique sur la fréquence des fluctuations de la tension et sur les écarts de tension d'arc. La pression statique est mesurée dans le canal du plasmatron, en dehors de l'arc et au travers du disque isolant situé entre les deux derniers segments (Fig. 3). Des relations pour la fréquence caractéristique et les écarts de tension en fonction de la pression, du débit gazeux et du courant sont proposées à partir de l'analyse de l'écoulement de vortex et en utilisant des résultats expérimentaux.

Une corrélation entre les fluctuations de la tension d'arc et les fluctuations de la pression dynamique dans le jet de plasma, créées par le mouvement du pied d'arc électrique, a été mise en évidence.

2. Installation expérimentale et diagnostics

Le moyen d'essais comprend un plasmatron à anode segmentée (Fig. 3). Dans ce plasmatron, l'arc électrique se forme entre une cathode en tungstène thorié à 3 % et un des segments de l'anode en cuivre refroidi par une circulation d'eau. Les segments sont de forme cylindrique avec un diamètre intérieur constant de 12 mm et une longueur de 30 mm. L'isolation électrique entre les segments est réalisée par des disques, traversés par une injection du gaz qui s'effectue de manière à provoquer un effet de vortex dans la chambre du plasmatron. Le débit principal est injecté au travers du premier segment isolant situé entre la cathode et le premier segment

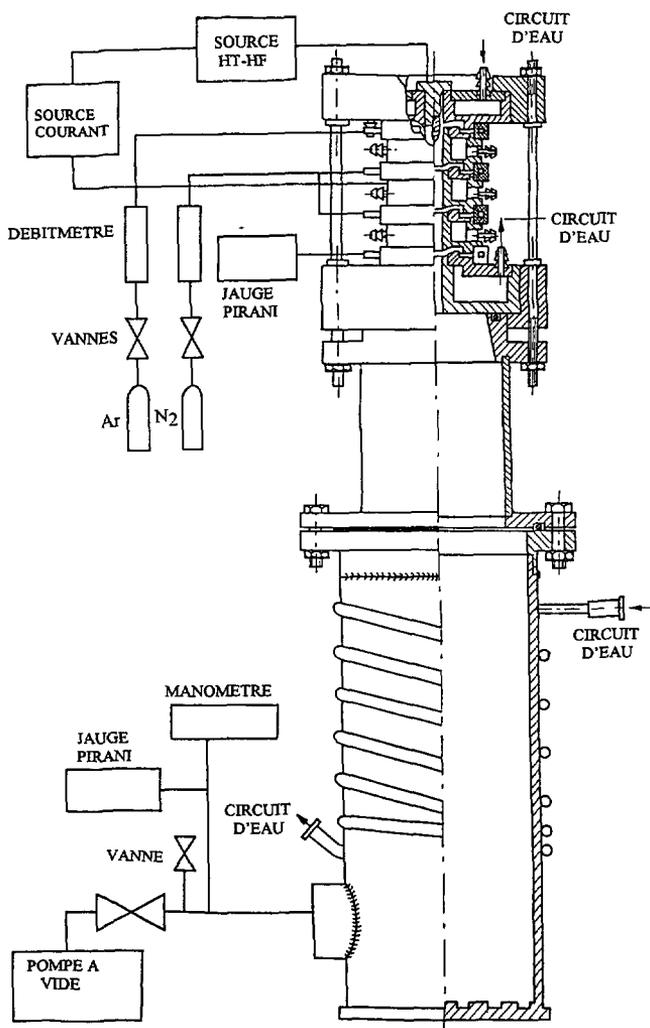


Fig. 3. — Schéma du dispositif expérimental.

[Experimental plasma source set-up.]

anodique. Huit pour cent du débit massique total est injecté au travers des autres segments isolants avec un sens inverse de celui de l'injection principale afin d'améliorer la stabilisation du jet. Dans chaque disque isolant, huit orifices d'un diamètre de 2 mm permettent d'injecter le gaz tangentiellement à la surface intérieure du plasmatron. L'arc électrique, dont l'intensité régulée est comprise entre 30 et 300 A pour une tension comprise entre 20 et 180 V est amorcé par décharge à haute tension (8 kV) et à haute fréquence (10 kHz).

Le plasmatron est placé à l'extrémité d'une chambre à pression réduite cylindrique de diamètre intérieur de 152 mm et de hauteur de 450 mm. La chambre est reliée à une pompe à vide d'un débit de 30 m³/h. La pression statique dans le caisson est comprise entre 10 et 500 Torr (1 Torr = 133 Pa). Le plasmatron est utilisé avec de l'argon, de l'azote ou des mélanges argon-azote.

Les mesures de fluctuations de pression sont effectuées à l'aide d'un capteur piézo-électrique dont la sensibilité est de $0,72 \text{ mV/ms}^{-2}$ avec une fréquence de résonance de 51 kHz. Ce capteur est placé dans la chambre à pression réduite à une distance de 400 mm du plan de sortie du plasmatron.

La tension d'arc et le signal du capteur sont mesurés par un oscilloscope Philips à mémoire numérique PM3350A. Les signaux sont traités en utilisant une transformée de Fourier rapide. La fréquence ne dépasse pas $f_{\text{max}} = 12 \text{ kHz}$, le temps d'échantillonnage minimal est de l'ordre de $10/f_{\text{max}}$ et la durée choisie permet l'enregistrement d'environ 100 cycles.

3. Fluctuations de la tension d'arc

3.1. ANALYSE DE LA FRÉQUENCE. — Dans l'écoulement de vortex, l'arc est stabilisé dans le noyau où la composante axiale de la vitesse est prépondérante. Ce type de configuration assure un écoulement quasi-laminaire dans le noyau du vortex, mais pour de faibles courants (inférieur à 80 A avec le plasmatron utilisé) et pour de faibles débits, des pulsations modifiant la forme de la colonne d'arc avec une composante radiale de vitesse sont aussi possibles.

Nous supposons que dans l'écoulement de vortex, la fréquence est liée à la vitesse axiale qui peut être déterminée approximativement par la relation :

$$v_z \approx \frac{G}{\pi r_c^2 \rho}$$

où : r_c est le rayon du canal du plasmatron, ρ la masse volumique du gaz calculée à la température du cœur de l'arc.

Le débit G est le débit principal car la vitesse v_z concerne l'arc qui est formé entre la cathode et le premier segment anodique.

En admettant que la distance s du déplacement du pied d'arc sur l'anode est constante, on obtient pour le temps t de déplacement du pied d'arc et pour la fréquence f associée :

$$t = \frac{s}{v_z} \quad \text{et} \quad f = \frac{1}{t} = \frac{v_z}{s}$$

Il s'en suit que la fréquence des fluctuations de la tension d'arc dépend du débit gazeux par l'intermédiaire de la densité du gaz, du courant et de la pression.

Les mesures effectuées montrent que la relation entre la fréquence et le débit pour l'argon et pour l'azote (Fig. 4) est quasi-linéaire ce qui justifie l'hypothèse concernant la corrélation entre la fréquence et la vitesse axiale. On remarque aussi que la variation de la fréquence en fonction du débit (de 0,2 g/s à 0,8 g/s) est plus importante pour l'argon (de 0,4 à 10,8 kHz) que pour l'azote (de 5,8 à 7,8 kHz).

La variation de la fréquence en fonction de la pression pour différents débits est présentée sur la figure 5. Tenant compte de la relation suivante entre la masse volumique du gaz et la pression,

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma \quad \text{on obtient} \quad f = \text{Cste} \cdot p^{-1/\gamma}$$

Cette hypothèse couramment utilisée pour les plasmatrons, malgré le caractère dissipatif de l'écoulement, ne se justifie que par la validité des résultats obtenus. L'approximation des résultats expérimentaux (Fig. 5) pour l'argon par la méthode des moindres carrés montre que le paramètre γ varie de 0,53 à 1,0 et que sa valeur moyenne est de 0,81. Pour l'azote, la valeur de γ varie de 0,73 à 1,37 et sa valeur moyenne est 1,04. Il faut aussi remarquer que la valeur

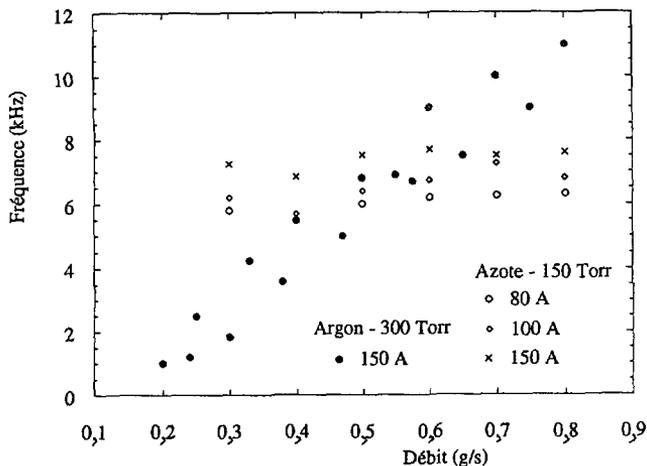


Fig. 4. — Fréquences caractéristiques en fonction du débit gazeux.

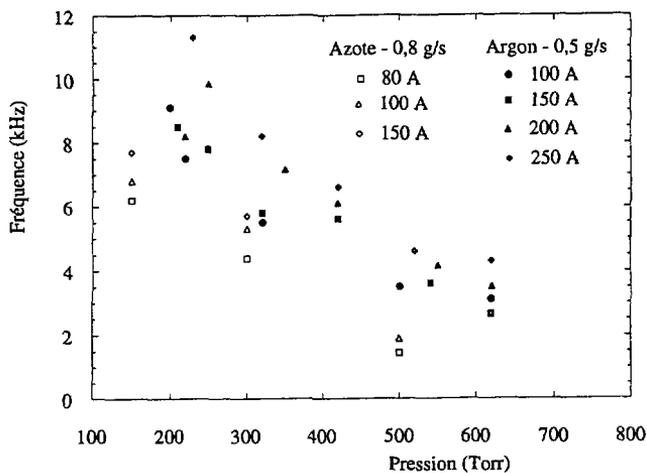
[Frequency as a function of the mass flow rate.]

de γ obtenue le plus souvent est approximativement égale à cette valeur moyenne. D'après nos calculs de c_p et c_v [9] pour l'argon, le paramètre $\gamma = c_p/c_v$ varie de 1,56 à la température de 7000 K, à 0,74 pour la température de 12 000 K. Pour l'azote, γ varie de 1,02 à la température de 7000 K à 1,09 pour la température de 12 000 K et une pression comprise entre 60 et 760 Torr. Il en résulte que la fréquence caractéristique de l'arc avec de l'azote est inférieure à celle obtenue avec de l'argon, ce qui est mis en évidence sur la figure 5a, malgré un débit d'azote supérieur.

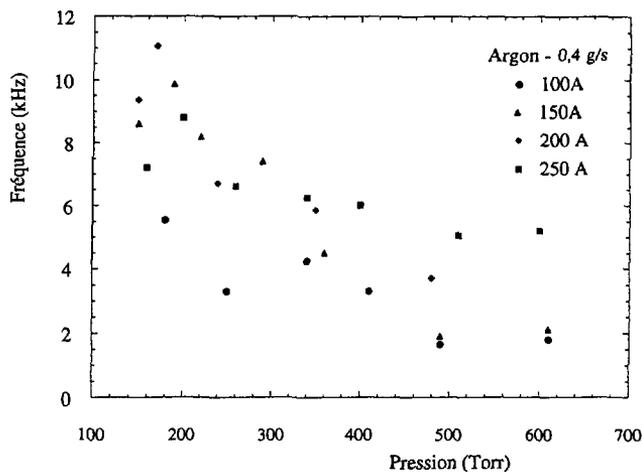
L'influence du courant sur la fréquence est plus complexe en raison de l'augmentation de la température et aussi du rayon d'arc en fonction du courant. L'augmentation du courant d'arc entraîne une augmentation de la température [10, 11] lorsque celle-ci est inférieure à environ 10 000 K en raison du faible rayonnement. On note ensuite une stabilisation de la température à environ 13 000 K avec de l'argon et à environ 12 000 K avec de l'azote. L'augmentation du rayon de l'arc est liée au courant lorsque la variation du rayon est libre. Les résultats de calculs [9] montrent que la vitesse sur l'axe dépend linéairement du courant. Le rayon d'arc est une fonction quasi-linéaire du courant jusqu'à 200 A et ensuite quasi constante, ce qui explique le comportement de la fréquence en fonction du courant présenté sur la figure 6. La différence entre les fréquences associées à l'argon et à l'azote résulte de la différence des débits. L'approximation des données expérimentales a permis d'obtenir la relation :

$$f = \text{Cste } I^\alpha.$$

Pour l'argon et l'azote et avec une pression statique à la sortie du plasmatron de 300 Torr, le coefficient α admet la même valeur de 0,46. Ce coefficient varie avec la pression de 0,4 à 1,0 pour une pression allant de 80 à 760 Torr ce qui s'explique par le changement du diamètre de l'arc en fonction de la pression. Remarquons que pour différentes géométries du plasmatron, le diamètre de l'arc ne change pas librement avec le courant ; c'est pourquoi la relation entre la fréquence et le courant (i.e. le coefficient α) sera modifiée en fonction de stabilisation de l'arc, de la géométrie du plasmatron et de la nature du gaz.



a)



b)

Fig. 5. — Fréquences caractéristiques en fonction de la pression pour différents débits gazeux.

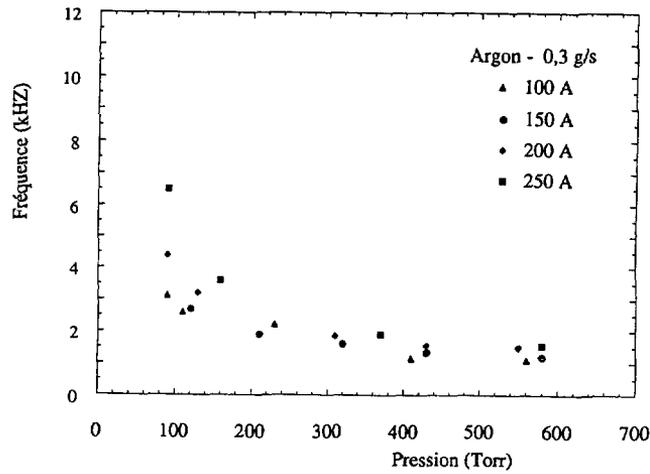
[Frequency as a function of the pressure for different mass flow rates.]

En prenant en considération les paramètres principaux du fonctionnement du plasmatron avec un écoulement de type vortex, la relation entre la fréquence et ces paramètres est :

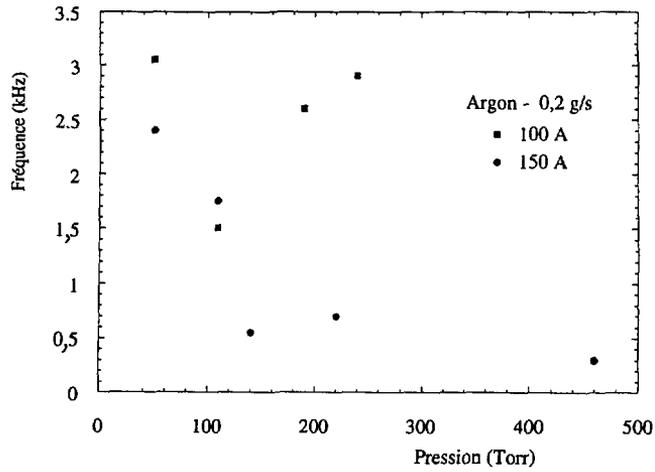
$$f = \text{Cste } p^{-1/\gamma} G I^\alpha$$

Cette expression de la fréquence caractéristique présente l'avantage de mettre en évidence l'influence de la pression.

3.2. ANALYSE DES ÉCARTS DE TENSION. — Pour établir une relation exprimant les écarts de tension, on admet qu'ils ne dépendent que du pouvoir isolant de la couche limite : $\Delta u = f(\rho a)$, où a est l'épaisseur de la couche limite. La masse volumique ρ est fonction du gradient de



c)



d)

Fig. 5. — (Suite).

pression qui dans la couche limite créée par le vortex est $\frac{dp}{dr} = \rho \frac{v_r^2}{2}$, où v_r est vitesse de rotation. Cette expression est proportionnelle à pG^2 en tenant compte des relations :

$$v_r = \frac{\Gamma}{2\pi r} ; \quad \Gamma = 2\pi r_c u_o ; \quad u_o = \frac{G}{\rho_o F_o}$$

où : u_o est la vitesse du gaz à la sortie d'un orifice d'injection, ρ_o la masse volumique du gaz à la sortie d'un orifice et F_o la section totale de tous les orifices d'injection.

Le gaz dans la couche limite est froid et sa masse volumique dépend linéairement de la pression. L'hypothèse suivante peut donc être admise :

$$\Delta u = \text{Cste } p G^2.$$

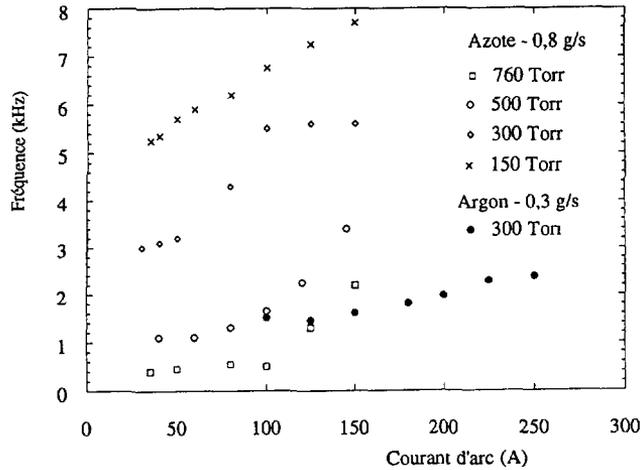


Fig. 6. — Fréquences caractéristiques en fonction du courant d'arc.

[Frequency as a function of the arc current.]

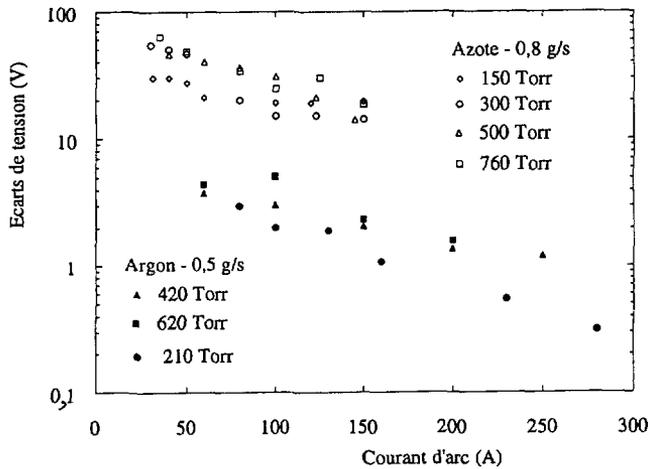
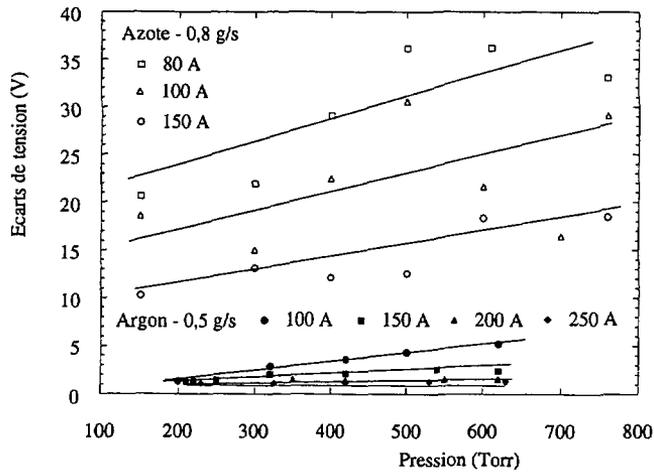


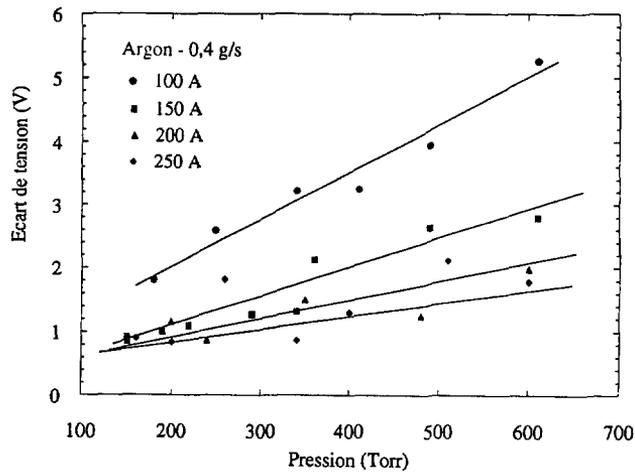
Fig. 7. — Ecart de tension en fonction du courant d'arc.

[Voltage rise as a function of arc current.]

L'épaisseur de la couche limite dépend surtout du courant en raison de l'augmentation du rayon de l'arc mais aussi du type de stabilisation de l'arc et de la géométrie du plasmatron. Les écarts de tension évoluent exponentiellement en fonction du courant dans l'intervalle compris entre 30 et 300 A (Fig. 7). Pour les courants inférieurs à 200 A, Δu décroît linéairement avec l'accroissement du courant en raison de l'augmentation linéaire du rayon d'arc. Pour les courants supérieurs à 200 A, Δu tend vers une valeur constante. Il faut remarquer que l'influence du débit gazeux sur le rayon de l'arc est faible [9] et peut être négligée. Les écarts de tension d'arc avec l'azote sont supérieurs à ceux mesurés pour l'argon en raison de la différence importante des tensions de claquage de ces gaz.



a)



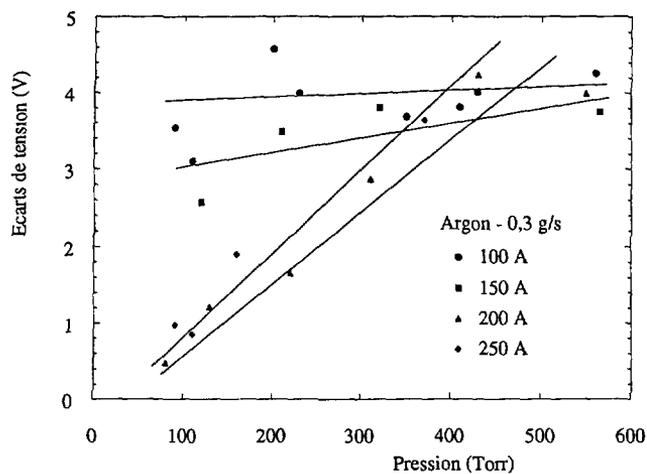
b)

Fig. 8. — Ecart de tension en fonction de la pression pour différents débits gazeux.

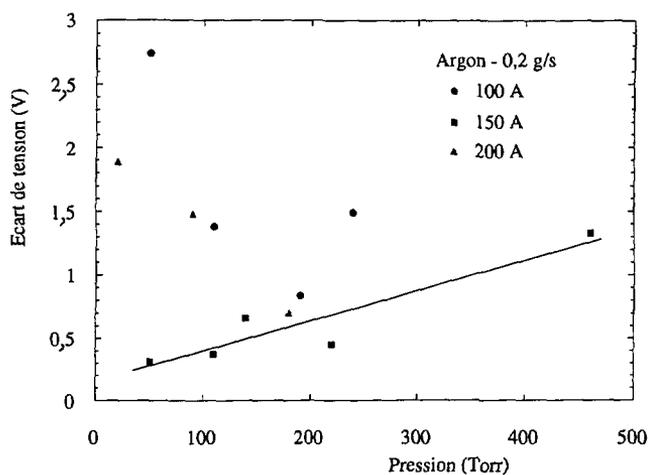
[Voltage rise as a function of the pressure for different mass flow.]

Les écarts de la tension en fonction de la pression sont présentés sur la figure 8 pour différentes valeurs du débits gazeux. Pour des débits supérieurs à 0,3 g/s, Δu est une fonction linéaire de la pression et son comportement est régulier avec la variation de l'intensité du courant, tandis que pour des débits de 0,3 et 0,2 g/s, de fortes instabilités ont été observées.

La figure 9 présente l'évolution des écarts de tension en fonction du débit gazeux. Les valeurs présentées sont adimensionnées en utilisant les valeurs minimales qui sont obtenues pour le même débit de 0,4 g/s (argon : 150 Torr - 0,89 V, 300 Torr - 1,6 V ; azote : 80 A - 2,0 V, 100 A - 9,8 V, 150A - 5,4 V). Il faut noter que le même comportement de Δu présenté en fonction du nombre de Reynolds a été observé pour un écoulement créé par l'injection du gaz tangentiellement à l'axe du plasmatron [3]. La chute de Δu pour un nombre de Reynolds



c)



d)

Fig. 8. — (Suite.)

d'environ $1,4 \times 10^4$ (calculé pour le gaz froid avec la vitesse axiale, le diamètre du canal du plasmatron et la viscosité du gaz) est expliquée par le changement du régime d'écoulement ; le régime devient turbulent. Dans ce régime, l'arc n'est plus stabilisé sur l'axe mais s'approche de la paroi et la tension de claquage de la couche limite diminue considérablement.

Dans le cas de l'injection avec vortex et pour des débits assez élevés, supérieurs à $0,4 \text{ g/s}$, l'arc est stabilisé sur l'axe et le claquage de la couche limite entre la colonne d'arc et la paroi peut être considéré comme étant le claquage entre deux cylindres. Pour les faibles débits, inférieur à $0,3 \text{ g/s}$, l'arc n'est plus stabilisé par l'effet de vortex et peut présenter des pulsations radiales en s'approchant de la paroi, ce qui correspond à de fortes instabilités (Fig. 8c,d).

L'ensemble des figures 5, 8 et 9 montre que le comportement stable de l'arc dépend essentiellement du débit gazeux qui détermine la caractère laminaire ou turbulent de l'écoulement dans la zone d'arc, la pression ne jouant pas un rôle primordial dans ce phénomène.

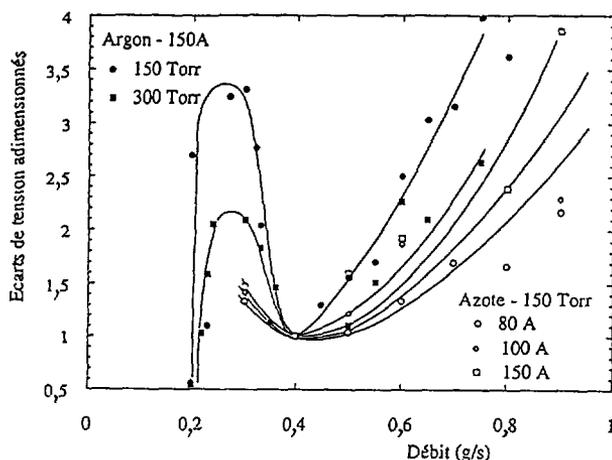


Fig. 9. — Ecart de tension en fonction du débit gazeux.

[Voltage rise as a function of the mass flow rate.]

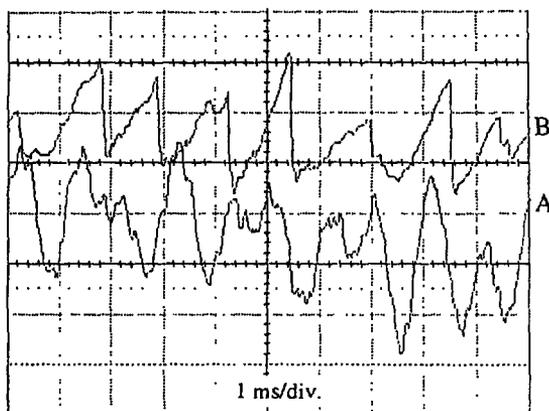


Fig. 10. — Tension d'arc "B" (5 V/div.) et pression dynamique "A" (unité arbitraire) dans le jet de plasma pour un état stable.

[Arc voltage "B" (5 V/div.) and dynamic pressure "A" (arbitrary unit) in the arc jet for a stable state.]

La relation entre les écarts de tension et les paramètres du fonctionnement du plasmatron peut s'écrire :

$$\Delta u = \text{Cste } p G^\beta I^\chi$$

Le coefficient β qui dépend du régime de l'écoulement prend la valeur 2 pour les débits assurant la stabilisation de l'arc. D'après les mesures effectuées, les valeurs $-0,84$ et $-0,94$ ont été obtenues pour le coefficient χ respectivement pour l'azote et pour l'argon.

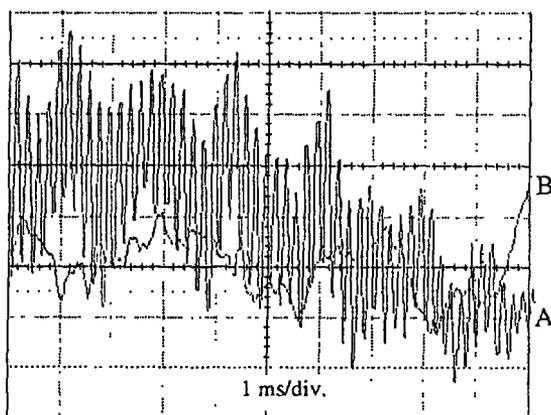


Fig. 11. — Tension d'arc "B" (5 V/div.) et pression dynamique "A" (unité arbitraire) dans le jet de plasma pour un état instable.

[Arc voltage "B" (5 V/div.) and dynamic pressure "A" (arbitrary unit) in the arc jet for a non stable state.]

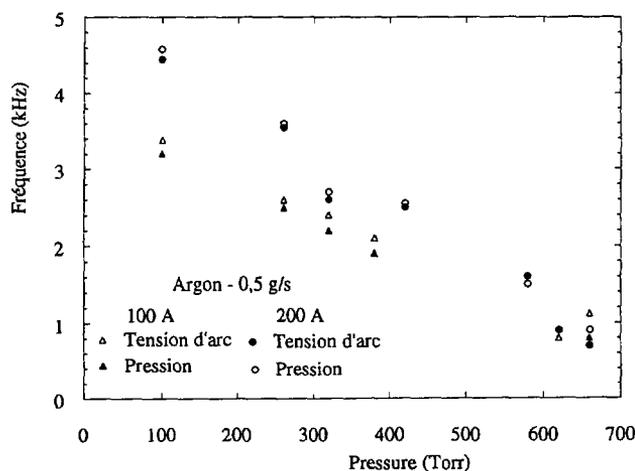


Fig. 12. — Fréquence des fluctuations de la tension d'arc et de la pression dynamique dans le jet en fonction de la pression statique du plasmatron.

[Frequency of voltage and dynamic jet pressure as a function of the static pressure in the plasmatron.]

4. Fluctuations du jet de plasma

L'étude des fluctuations du jet de plasma créé par un arc électrique a mis en évidence une corrélation entre le comportement dynamique de l'arc et celui du jet de plasma. La figure 10 montre un enregistrement simultané de la tension d'arc et de la pression dynamique dans la chambre à pression réduite. Cette corrélation est évidente pour un comportement stable du fonctionnement de l'arc comme il a été montré dans le paragraphe 3, pour des débits supérieurs à 0,4 g/s. Pour un comportement instable, essentiellement pour de faibles débits, les

fluctuations créées par le mouvement du pied d'arc se superposent aux fluctuations provenant des turbulences du jet et un changement rapide du signal enregistré par le capteur piézo-électrique a été observé. Pour fixer les idées, pour un débit de 0,2 g/s, des fluctuations avec une haute fréquence se superposent aux fluctuations créées par le mouvement du pied d'arc (Fig.11).

La figure 12, permettant la comparaison de la fréquence des fluctuations de la tension d'arc et de la pression dynamique en fonction de la pression statique dans la chambre du plasmatron, indique que les fluctuations du jet de plasma générées par l'arc électrique dans des conditions stables sont liées aux fluctuations créées par le mouvement du pied d'arc.

5. Conclusions

Une relation entre la fréquence et les paramètres du fonctionnement d'un plasmatron a été proposée à partir de l'analyse des propriétés de l'écoulement. Nous avons montré que le comportement dynamique de l'arc dans des plasmatrons présentant un effet de vortex est comparable avec celui obtenu avec une injection axiale. Nous avons supposé et vérifié expérimentalement que la fréquence caractéristique dépendait de la pression par une loi puissance avec le coefficient adiabatique calculé pour la température du plasma d'arc. La fréquence caractéristique obtenue est une fonction linéaire du débit gazeux ; elle est aussi une fonction du courant, ce qui résulte des effets d'augmentation de la vitesse axiale et du rayon d'arc dépendant du type de stabilisation, de la géométrie du plasmatron et de la nature du gaz.

Les écarts de tension pour l'écoulement de vortex sont représentés par une fonction linéaire de la pression. Ils sont fonctions du courant par un effet de changement du rayon d'arc provoqué par l'accroissement du courant. On a constaté que les écarts de tension en fonction du débit gazeux ont le même comportement que pour un écoulement laminaire. Pour les faibles débits (inférieurs à 0,3 g/s), l'arc n'est pas stabilisé sur l'axe et peut s'approcher de la paroi ce qui a pour conséquence la diminution de la tension de claquage et des écarts de tension. De fortes instabilités sont observées pour ces débits. Pour des débits supérieurs à 0,4 g/s, la colonne d'arc est stabilisée dans le noyau de vortex et les écarts de tension sont alors fonctions du carré du débit. L'évolution des écarts de tension est régulière dans cette zone. Nous avons constaté que le comportement instable dépend essentiellement du débit gazeux et que les variations de pression dans la gamme de 50 à 760 Torr n'influence pas la stabilité de l'arc.

Les mesures de fluctuations de pression du jet de plasma ont permis de mettre en évidence qu'elles étaient générées par l'arc électrique dans des conditions stables et qu'elles étaient liées aux fluctuations créées par les mouvements du pied d'arc.

Bibliographie

- [1] Tateno H. et Saito K., Anodic phenomen in nitrogen plasma jet, *Jpn J. App. Phys.* **2** (1963) 192-193.
- [2] Yorden G.R. et King L.A., The nature of fluctuations present in d.c. plasma jets in argon and nitrogen, *British J. Appl. Phys.* **16** (1965) 431-436.
- [3] Zukov M.F., Korotjejev A.S. et Urjukov B.A., Applied Dynamics of Thermal Plasma, Nauka Ed. (Novosibirsk, 1995).
- [4] Kaminska A., Study of nitrogen arc under reduced pressure, Contributions to Plasma Physics, vol. 35, n°2 (1995).

- [5] Kaminska A. et Dudeck M., Modélisation des jets de plasmas dans un générateur à arc et étude des instabilités, Rapport RL 94-7 du Laboratoire d'Aérothermique de Meudon (France, 1994).
- [6] Brillhac I.F., Pateyron B., Coudert J.F., Fauchais P., Pasquini P., Bouvier A. et Jestin L.J., Diagnostic of the dynamic behaviour of the electric arc in a plasma torch, *J. High Temp. Chem. Processes*, Sup. au n°3, **1** (1992) 421-427.
- [7] Shaskov A.G. et Yasko O.I., Application of approximate similarity to correlating arc characteristics, Inst. of Heat and Mass Transfer of B.S.S.R. Academy of Sciences (Minsk, U.S.S.R., July 2, 1973).
- [8] de Izarra C., Pauvit R. et Vallée O., Mise en évidence de fréquences caractéristiques dans une torche à plasma d'arc soufflé, 4ème Congrès Plasma de la Société Française de Physique (Toulouse, 14-16 septembre 1994).
- [9] Kaminska A. et Dudeck M., Régimes d'écoulement de plasma créé par un arc-jet à basse pression, Rapport RL 95-7 du Laboratoire d'Aérothermique de Meudon (France, 1995).
- [10] Zukov M.F. et Korotjejev A.S., Theory of Arc Plasma, Nauka Ed. (Novosibirsk 1987) p.287.
- [11] Beulens J.J., Milojevic D., Schram D.C. et Vallinga P.M., *Phys. Fluids B3* **9** (1991) 2548-2557.