



HAL
open science

Détermination acoustique de la transition à l'écoulement laminaire du gaz plasmagène d'une torche à plasma

J. Badie, J. Bresson, A. Daïf, Bruno Granier

► **To cite this version:**

J. Badie, J. Bresson, A. Daïf, Bruno Granier. Détermination acoustique de la transition à l'écoulement laminaire du gaz plasmagène d'une torche à plasma. *Journal de Physique III*, 1996, 6 (10), pp.1423-1433. 10.1051/jp3:1996194 . jpa-00249534

HAL Id: jpa-00249534

<https://hal.science/jpa-00249534>

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.

Détermination acoustique de la transition à l'écoulement laminaire du gaz plasmagène d'une torche à plasma

J.M. Badie ⁽¹⁾, J. Bresson ⁽²⁾, A. Daïf ^(2,*) et B. Granier ⁽¹⁾

⁽¹⁾ I.M.P., C.N.R.S., BP. 5, Odeillo, 66125 Font-Romeu Cedex, France

⁽²⁾ L.M.A.I., Université de Perpignan, 52 avenue de Villeuneuve, 66860 Perpignan Cedex, France

(Reçu le 21 décembre 1995, révisé le 17 avril 1996, accepté le 19 juin 1996)

PACS.52.35.Dm – Sound waves

PACS.47.27.Sd – Noise (turbulence generated)

PACS.43.35.Kp – Plasma acoustics

Résumé. — Le fonctionnement d'une torche à plasma admet au moins deux régimes d'écoulement distincts plus ou moins bruyants : un régime turbulent et un régime laminaire possédant chacun des propriétés particulières. La transition entre ces deux modes est obtenue en modifiant les paramètres de contrôle de la torche (débit de gaz plasmagène, courant appliqué à la torche et diamètre de la buse) et est accompagnée par un changement de niveau acoustique. Cette étude traite de la caractérisation de cette transition par des moyens acoustiques. L'analyse temporelle et spectrale des signaux de contrôle, de l'énergie rayonnée et de la pression acoustique engendrée par le fonctionnement de la torche à plasma font apparaître un pic de fréquence dont l'amplitude et la fréquence évoluent avec les conditions de fonctionnement. Cette composante fréquentielle de la pression acoustique caractérise bien le changement de régime à la fréquence où l'amplitude du signal détecté est maximum.

Abstract. — A plasma torch allows two flow regimes: either a laminar (silent mode) or a turbulent mode (noisy mode) which have different properties. The transition of regime is controlled by parameter change (gas flow rate, current arc and anode diameter) and followed by a noise degree change. This study deals with the characterization of this transition by acoustic methods. Wave and spectral analysis of control information, radiative energy and acoustic pressure show a frequency peak. The amplitude and frequency of which vary with the running conditions. This frequential component of acoustic pressure characterizes accurately the regime transition.

1. Introduction

Les plasmas thermiques présentent de fortes enthalpies volumiques et des propriétés de transports particulières (conductivité thermique, viscosité très élevées...). Ces avantages sont mis à profit dans des processus industriels qui nécessitent des transferts thermiques importants : soudage, métallurgie, synthèse chimique, vaporisation, traitement de surface, etc.

De nombreux travaux théoriques et expérimentaux ont été réalisés afin de mieux cerner et modéliser le fonctionnement des générateurs à plasma [1–8]. Il est couramment admis qu'une

(*) Auteur auquel doit être adressée la correspondance (e-mail : daif@lisa.univ-perp.fr)

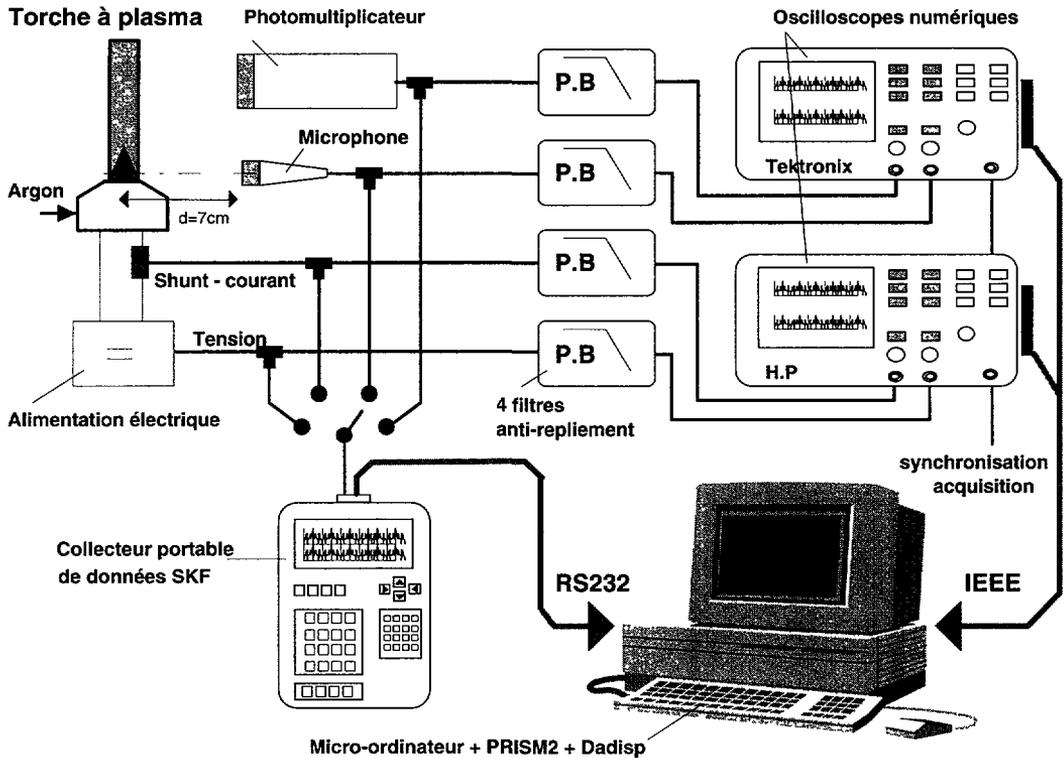


Fig. 1. — Dispositif expérimental.

[Experimental set-up.]

torche à plasma d'arc soufflé peut fonctionner selon divers régimes d'écoulement, du laminaire au turbulent. Compte tenu de la spécificité de la structure d'un jet de plasma (fortes variations des propriétés thermophysiques), il n'est pas possible de caractériser ces divers régimes de façon classique à partir d'un nombre de Reynolds calculé en considérant les valeurs moyennes des propriétés physiques de l'écoulement. Le régime laminaire est généralement obtenu pour de faibles débits de gaz plasmagène ; il a un fonctionnement silencieux. Le jet à la sortie de la torche est alors très étroit, brillant et se termine par un panache de recombinaison pouvant atteindre une dizaine de centimètres. Aux forts débits, l'écoulement est très bruyant : on dit de ce régime qu'il est turbulent : la flamme a alors la forme d'un dard étalé et court. La transition entre ces deux régimes de fonctionnement est obtenue en modifiant les paramètres de contrôle de la torche : débit du gaz, intensité du courant de la torche ou diamètre de l'anode.

Dans une étude de caractérisation des flux échangés entre un écoulement plasmagène d'argon et une cible, Badie *et al.* [7] montrent que la puissance thermique reçue par une cible située face à la torche croît lorsque l'on passe au régime laminaire. Ceci est essentiellement dû au panache de recombinaison très allongé qui lèche la cible, assurant ainsi un meilleur transfert thermique. Pour se placer dans ces conditions optimales en vue d'applications particulières, il est nécessaire de déterminer la transition au régime laminaire par une méthode autre que visuelle.

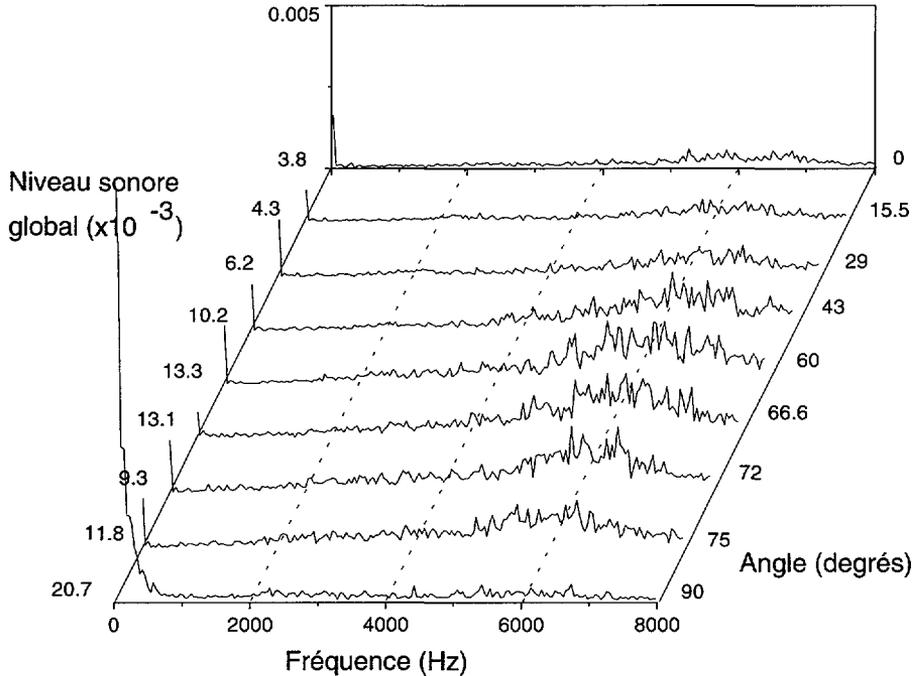


Fig. 2. — Spectres de la pression acoustique obtenus dans un plan médian de la torche à plasma (débit de gaz = 22,4 l min⁻¹, buse de 4 mm de diamètre).

[Acoustic pressure spectra obtained in a medium plane of a plasma torch (gas flow rate = 22.4 l min⁻¹, 4 mm anode diameter).]

L'éjection du gaz plasmagène s'effectue, comme décrit ci-dessus, d'une façon bruyante en créant un champ de pression acoustique important autour du jet. L'évolution de cette pression suit les variations du régime de fonctionnement. La présente étude se propose de caractériser le régime de fonctionnement d'une torche à plasma par moyens acoustiques (en particulier de caractériser le passage d'un écoulement turbulent à un écoulement laminaire). L'analyse des quatre signaux temporels les plus significatifs (énergie rayonnée, intensité et tension électrique appliquées à la torche, pression acoustique) et de leurs spectres fréquentiels respectifs permet de mieux cerner le phénomène étudié.

2. Dispositif et conditions d'expérimentation

La torche à plasma utilisée dans ce dispositif (Fig. 1) est alimentée par de l'argon "pur". Elle est équipée d'une cathode constituée d'un barreau en tungstène ($\phi = 8$ mm) et d'une buse interchangeable en cuivre formant l'anode (diamètre de 3 mm et 4 mm), terminée par un canal cylindrique de 10 mm de longueur.

Pour l'ensemble des essais, la tension d'arc est comprise entre 20 V et 24 V. L'intensité électrique consommée par la torche est, quant à elle, réglable dans une gamme de 100 à 400 A. Le shunt coaxial mis en série sur le circuit d'alimentation délivre une information (accessible par la chaîne d'acquisition) qui permet de suivre les fluctuations à hautes fréquences du courant. L'énergie thermique issue de la flamme est représentée par la mesure du rayonnement émis par

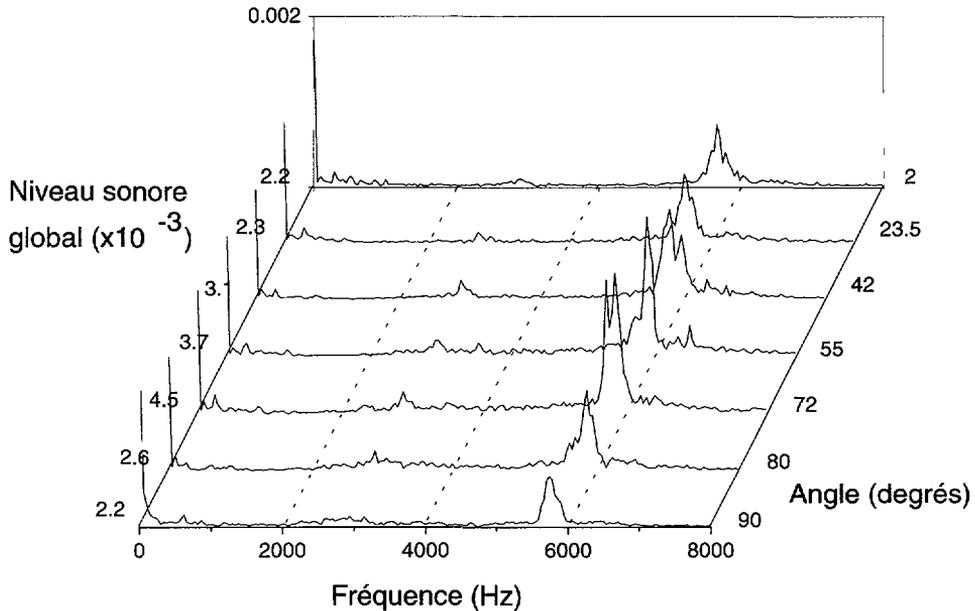


Fig. 3. — Spectres de la pression acoustique obtenus dans un plan médian de la torche à plasma (débit de gaz = $4,2 \text{ l min}^{-1}$, buse de 4 mm de diamètre).

[Acoustic pressure spectra obtained in a medium plane of a plasma torch (gas flow rate = 4.2 l min^{-1} , 4 mm anode diameter).]

cette dernière. Pour cela, un photomultiplicateur (temps de réponse 2,3 ns), pointé en direction de la torche à 3 cm de la sortie de la buse, délivre un signal dont la composante continue correspond à l'énergie moyenne rayonnée, alors que la composante alternative provient des fluctuations d'énergie. Le microphone (bande passante 0-20 kHz) installé près de l'embout de la torche à plasma détecte les variations de la pression acoustique engendrées par l'éjection du gaz plasmagène. Le débit de ce gaz, contrôlé par un débitmètre massique, peut évoluer de quelques litres par minute à plus de 25 litres par minute.

Les quatre signaux temporels qui caractérisent le fonctionnement de la torche à plasma, sont simultanément enregistrés par deux oscilloscopes numériques (dans la bande spectrale 0-20 kHz), précédés de filtres passe-bas (fréquence de coupure = 20 kHz) ; leurs déclenchements sont synchronisés. Lors de chaque acquisition, le débit du gaz plasmagène est relevé. Chaque signal, d'une durée de 20 ms, est échantillonné (fréquence d'échantillonnage de 100 kHz soit 2000 points pour l'un, fréquence d'échantillonnage de 50 kHz soit 1000 points pour l'autre) et numérisé sur 8 bits. Après chaque acquisition, une procédure de transfert par liaison IEEE488, transfère les valeurs numériques à un micro-ordinateur. Les données sont exploitées par un logiciel de traitement du signal (logiciel DADISP) qui calcule, par Transformée de Fourier Rapide (T.F.R), le spectre de chacun des signaux. L'incrément de fréquence dans chaque spectre est de 50 Hz, ce qui correspond à 400 points pour une gamme de fréquences allant de 0 à 20 kHz. Ces mêmes informations sont saisies par un collecteur de données industriel qui calcule directement par T.F.R les spectres des signaux enregistrés que l'on récupère sur le micro-ordinateur par transfert à travers une liaison série RS232. Chaque spectre présente 400 points sur la gamme de fréquences ($0-16 \text{ kHz} \rightarrow \Delta F = 40 \text{ Hz}$ ou $0-8 \text{ kHz} \rightarrow \Delta F = 20 \text{ Hz}$).

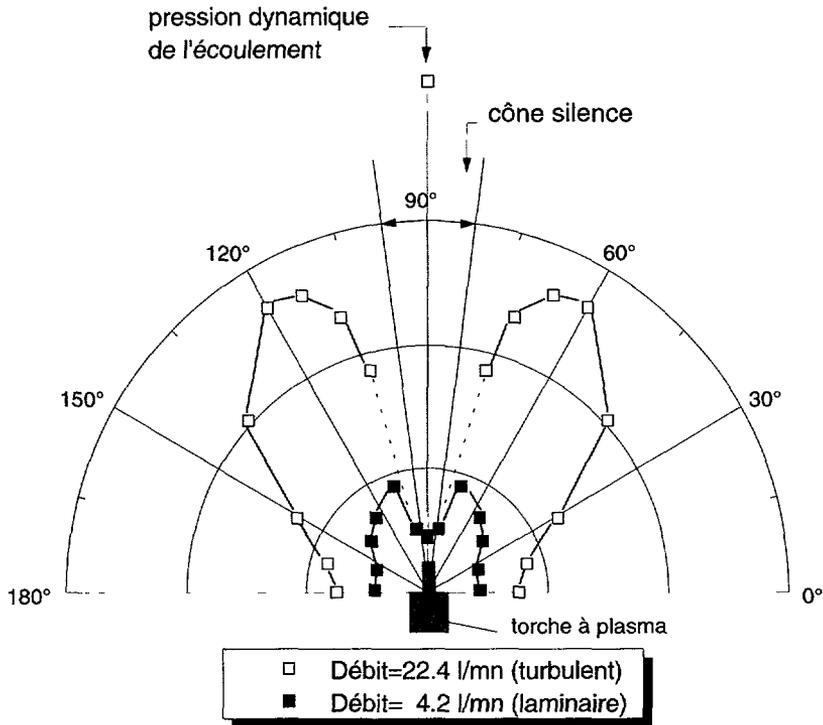


Fig. 4. — Diagramme de rayonnement acoustique dans un plan médian de la torche à plasma.
[Acoustic reponse pattern in a medium plane of a plasma torch.]

3. Exploitation des résultats et commentaires

3.1. ÉTUDE DE LA RÉPARTITION SPATIALE DE LA PRESSION ACOUSTIQUE AUTOUR DE LA TORCHE. — Le bruit émis par la torche à plasma n'est pas réparti uniformément autour de celle-ci. Pour le vérifier, des mesures sont effectuées en déplaçant le microphone dans un plan médian du jet autour de la buse de 4 mm de diamètre et pour deux valeurs du débit ($22,4 \text{ l min}^{-1}$ · régime manifestement turbulent (Fig. 2) ; $4,2 \text{ l min}^{-1}$ · régime manifestement laminaire (Fig. 3)). Ces résultats font apparaître deux domaines différents :

- une zone, centrée autour de 6000 Hz où l'on trouve soit un spectre à large bande dû au régime turbulent (Fig. 2) soit le pic de transition au régime laminaire (Fig. 3). Dans ce domaine, le niveau sonore passe par un maximum pour un angle proche de 60° ;
- dans l'axe du jet, une zone de composantes fréquentielles proches de zéro qui présente un niveau sonore global très important et qui correspond à la pression dynamique de l'écoulement. Ce phénomène est moins visible sur la figure 3 du fait de l'étroitesse du jet et de la difficulté de se positionner exactement dans l'axe de ce dernier.

Dans l'axe du jet, la pression dynamique de l'écoulement est maximum et le niveau sonore faible. Ceci est dû à la présence du jet de plasma (matière "dense" à haute température) qui fait obstacle à la propagation des ondes acoustiques issues de la buse. Cette zone de silence

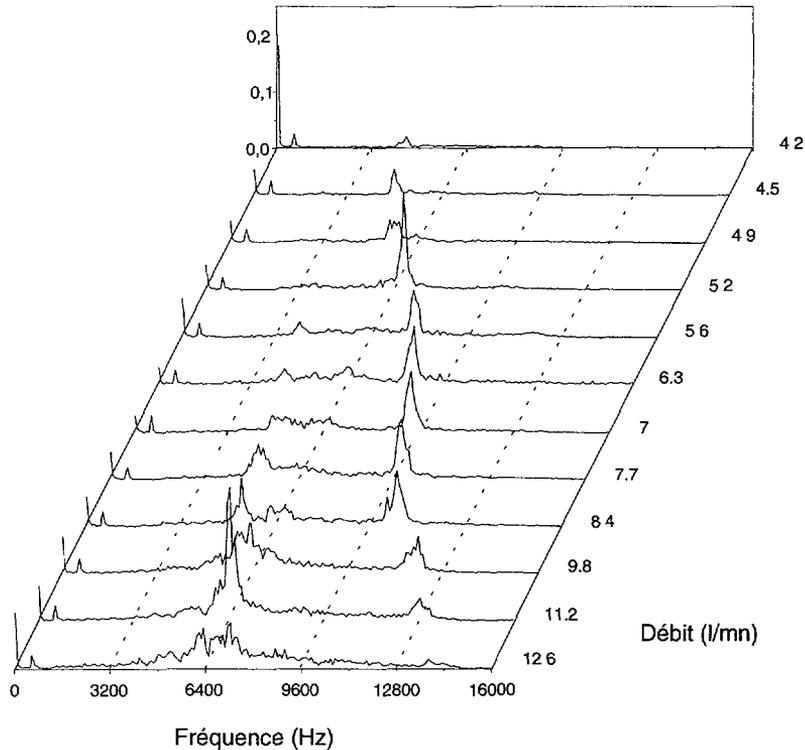


Fig. 5. — Spectres de la pression acoustique en fonction du débit de gaz plasmagène (buse de 4 mm de diamètre, 300 A).

[Acoustic pressure spectra *versus* flow rates of plasma gas (4 mm anode diameter, 300 A).]

dépend de la géométrie du jet plasmagène et augmente à mesure que l'on s'approche du régime turbulent [4]. On retrouve ce phénomène sur le diagramme de rayonnement (Fig. 4) où le maximum de pression acoustique est concentré suivant deux directions proches de 30° autour de l'axe du jet. L'analyse globale des signaux sonores et du diagramme permet de caractériser le régime d'écoulement.

3.2. ÉTUDE PARAMÉTRIQUE DU RÉGIME D'ÉCOULEMENT. — Pour la buse de 4 mm de diamètre et pour un courant constant (300 A), nous avons relevé les spectres de la pression acoustique en fonction du débit d'argon (Fig. 5). On voit apparaître sur cette figure :

- la présence permanente de 2 pics à 100 et 600 Hz (ondulation résiduelle de l'alimentation électrique) ;
- la présence, à fort débit, d'un spectre à large bande centré autour de 6000 Hz dont l'amplitude globale diminue avec le débit (régime turbulent) ;
- l'émergence d'une raie dont la fréquence décroît avec le débit et dont l'amplitude présente un maximum pour un débit de $5,2 \text{ l min}^{-1}$. Quand l'amplitude de la raie est maximum, on observe un allongement notable du jet de plasma dont la longueur peut atteindre 10 cm, ainsi qu'un fonctionnement silencieux de la torche. Ce pic, dont l'évolution est présentée figure 6, délimite la zone d'écoulement laminaire (faible débit).

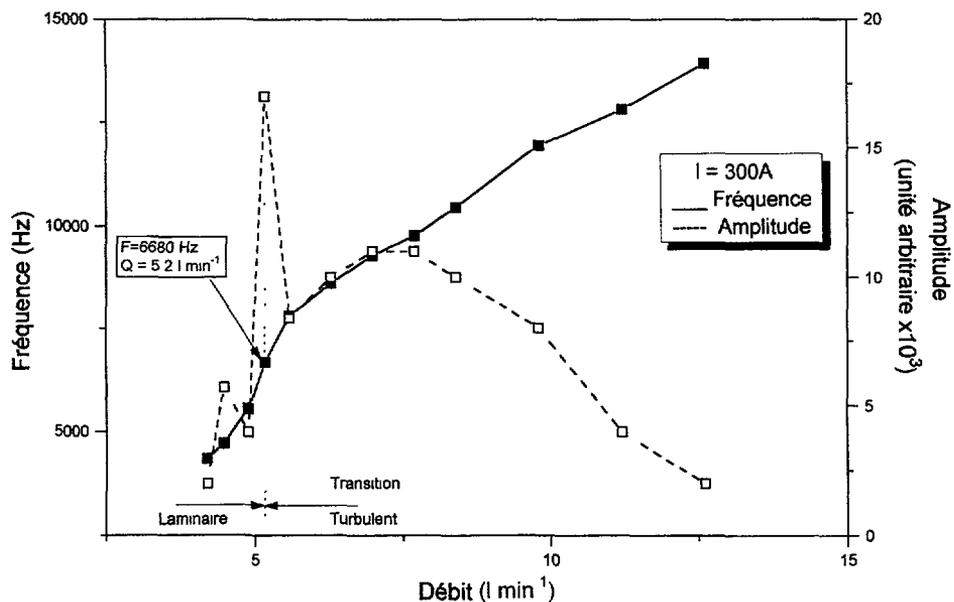


Fig. 6. — Évolution de la fréquence et de l'amplitude du pic de transition en fonction du débit.
[Evolution of frequency and amplitude of transition peak *versus* gas flow rate.]

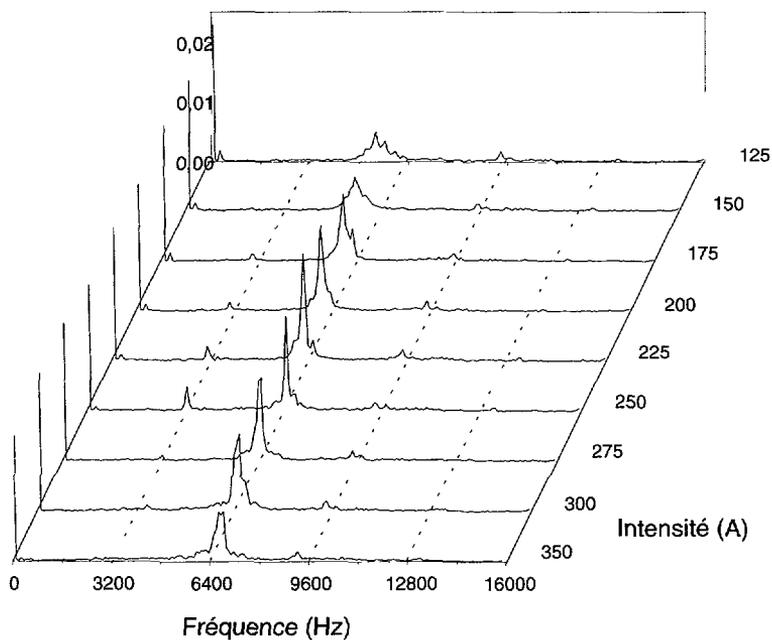


Fig. 7. — Spectres de la pression acoustique en fonction de l'intensité (débit de gaz = 4,2 l min⁻¹, buse de 4 mm de diamètre).

[Acoustic pressure spectra *versus* current arc for a 4 mm anode diameter (gas flow rate = 4.2 l min⁻¹, 4mm anode diameter).]

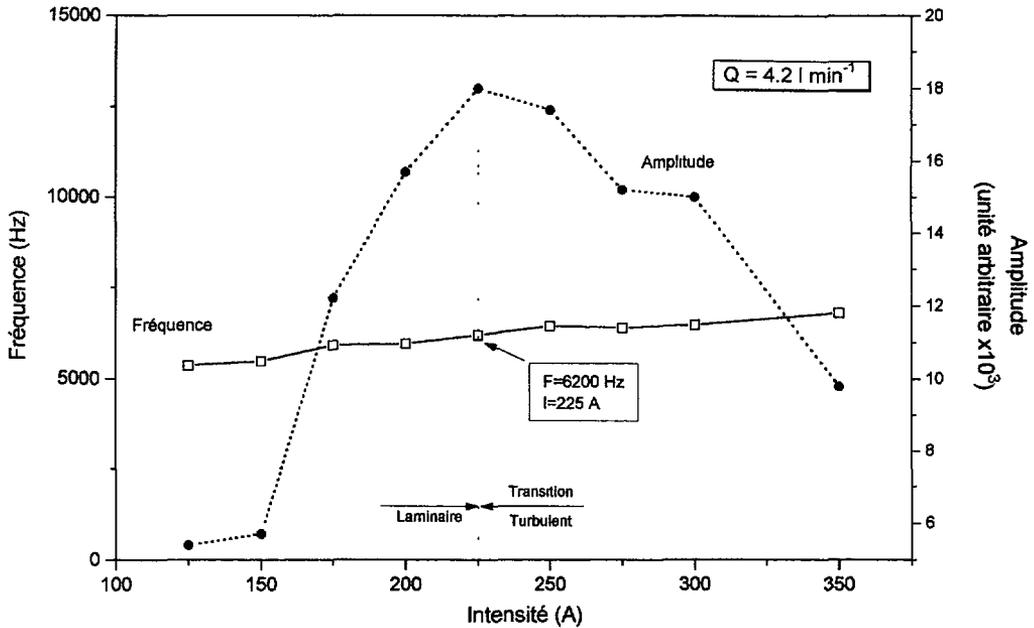


Fig. 8. — Évolution de la fréquence et de l'amplitude du pic de transition en fonction de l'intensité (débit de gaz = $4,2 \text{ l min}^{-1}$, buse de 4 mm de diamètre).

[Evolution of frequency and amplitude of transition peak *versus* current arc for a 4 mm anode diameter (gas flow rate = 4.2 l min^{-1} , 4mm anode diameter).]

La transition observée dépend du débit mais aussi de l'intensité mise en jeu. Les figures 7 et 8, mettent en évidence l'influence de l'intensité à débit constant.

L'enregistrement simultané des signaux de pression acoustique, d'énergie radiative, de courant et de tension à débit fixé permet, par comparaison, une meilleure approche du phénomène. La figure 9 donne un exemple des résultats obtenus dans des conditions de mesures similaires. Sur la même figure sont reportés les signaux temporels et leurs spectres respectifs. Pour la buse de 4 mm de diamètre et à des débits proches de la transition, nous retrouvons, dans les spectres de pression, d'énergie radiative et de tension, le pic caractéristique, précédemment observé. À basses fréquences, on retrouve les raies correspondant à l'ondulation résiduelle de l'alimentation électrique de la torche à 100 Hz et 600 Hz [3].

Pour ce qui nous concerne, les débits étant relativement faibles, la présence de ce pic de transition est à attribuer aux oscillations naturelles qui se développent avec un arc alimenté en continu lorsque sa caractéristique courant-tension est négative, comme cela est souvent le cas. En effet, dans une gamme de fréquences voisines de la fréquence de transition, on peut remplacer l'arc électrique par un circuit résonant équivalent RLC où la résistance R représente les pertes énergétiques, l'inductance L est assimilable à l'inertie des ions (espèces lourdes) et C correspond à la capacité inter-électrodes et à l'effet de charges d'espace [8]. Ainsi, lorsque la résistance dynamique négative de la caractéristique courant-tension annule la résistance R du circuit, le système oscille à la fréquence $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

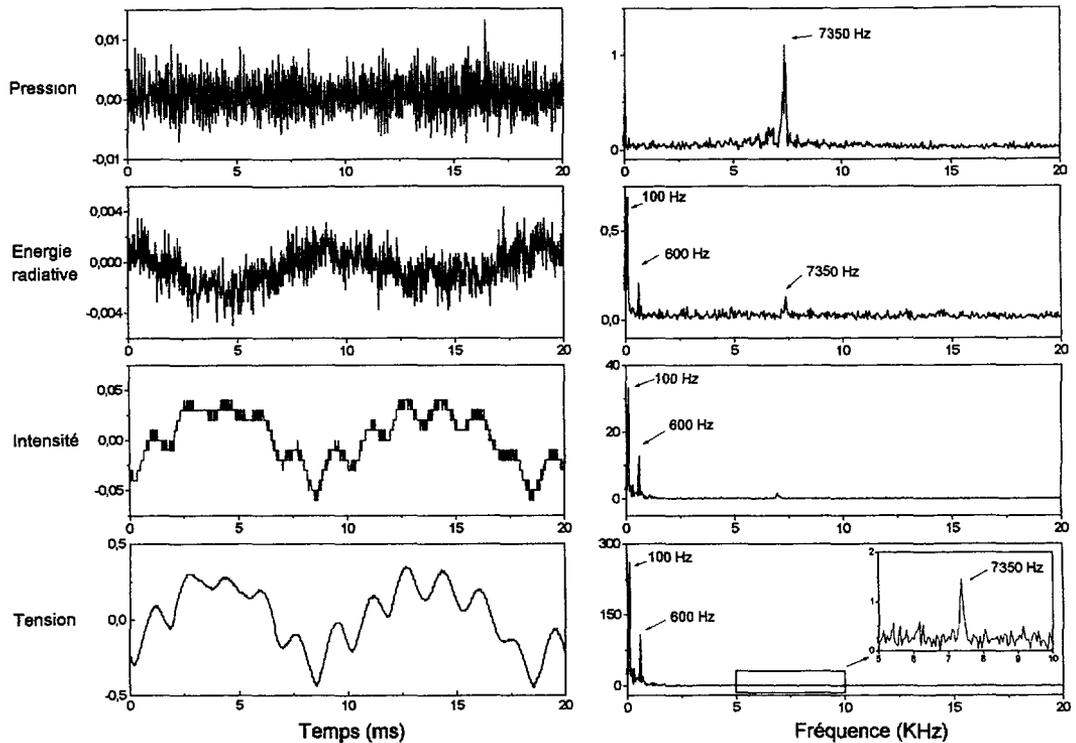


Fig. 9. — Signaux temporels (à gauche) et spectres de fréquence (à droite) obtenus pour un débit de gaz de $4,9 \text{ l min}^{-1}$ (diamètre de la buse = 4 mm - 300 A).

[Wave shapes (left) and spectra (right) obtained for 4.9 l min^{-1} gas flow rate (anode diameter = 4 mm - arc current 300 A).]

Notons par ailleurs que, comme d'autres auteurs [2,3], nous avons mis en évidence lors de ces essais de caractérisation de la transition, la présence d'instabilités d'amorçage de l'arc à très fort débit. Ces instabilités sont responsables d'émissions sonores très importantes dont un exemple est présenté figure 10 (buse $\phi = 3 \text{ mm}$, débit = $19,6 \text{ l min}^{-1}$). Une raie d'amplitude élevée émerge du spectre large bande (2100 Hz) aussi bien sur le spectre de la pression acoustique que sur celui de la tension d'alimentation. Ce phénomène est dû à l'allongement de l'arc sous l'influence de l'écoulement plasmagène (principe de l'arc glissant [6]). À mesure que le pied d'arc s'éloigne de la cathode, la différence de potentiel entre la colonne d'arc et l'anode augmente jusqu'à l'amorçage d'un nouvel arc plus court. La chute de tension anodique consécutive à l'amorçage de ce nouvel arc entraîne l'extinction de l'arc le plus long. Ce phénomène est périodique.

4. Conclusion

Au changement de régime d'écoulement correspondant à une transition d'un régime turbulent à un régime laminaire est associée une forte variation du niveau de pression acoustique résultant des fluctuations de l'arc électrique. À partir de l'analyse des signaux caractéristiques des tensions et intensités mises en jeu, ainsi que de l'énergie radiative et de la pression acoustique

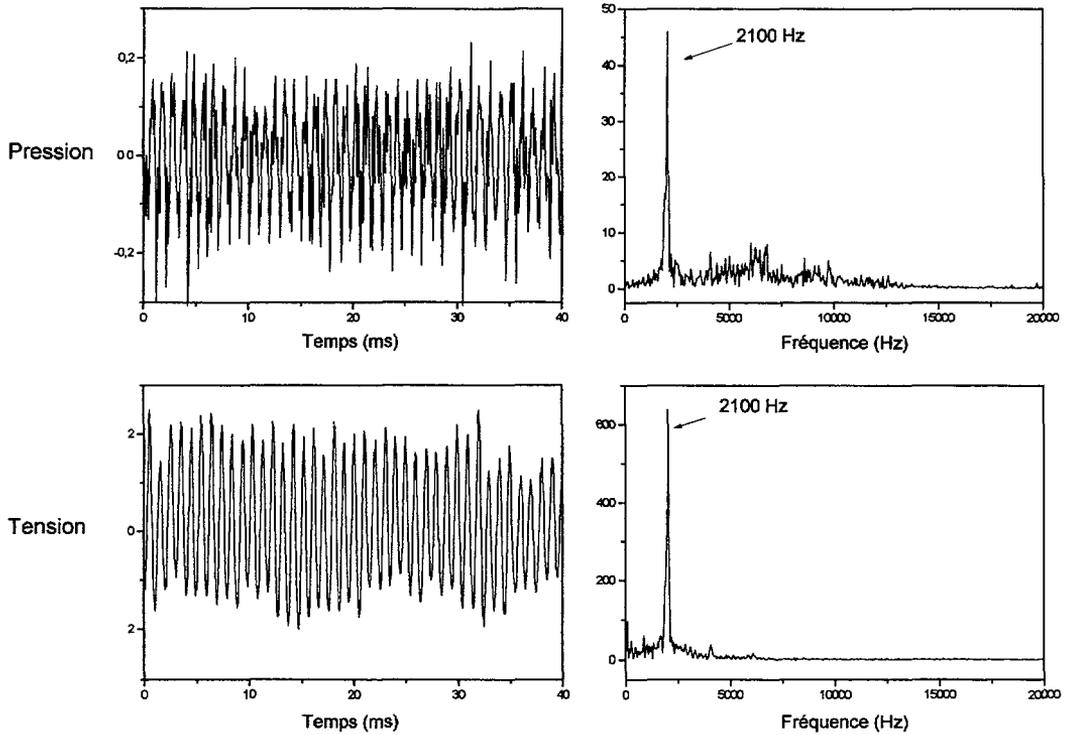


Fig. 10. — Signaux temporels (à gauche) et spectres de fréquence (à droite) obtenus lors d'instabilités de fonctionnement avec la buse de 3 mm de diamètre et un débit de $19,6 \text{ l min}^{-1}$

[Wave shapes (left) and spectra (right) obtained with important fluctuations of the plasma jet (anode diameter = 3 mm - gas flow rate = 19.6 l min^{-1})]

émises, nous mettons en évidence cette transition. Le changement de mode de fonctionnement s'accompagne d'une évolution du spectre de fréquences de la pression acoustique ; un pic de fréquence caractéristique de cette transition a une fréquence qui diminue avec le débit de gaz plasmagène alors que son amplitude passe par un maximum. Le maximum d'amplitude correspond au passage du régime laminaire où le jet devient très étroit, brillant et se termine par un panache de recombinaison de dimension importante. L'utilisation d'un filtre suiveur centré sur ce pic de transition permet, par asservissement du débit de gaz plasmagène, l'obtention d'un régime laminaire permanent. La pression acoustique émise par une torche à plasma et plus particulièrement l'une de ses composantes fréquentielles, est donc un signal utile pour la recherche d'un régime laminaire stable.

Bibliographie

- [1] Dadgar H., Fitaire M. et Pilorget A., Étude du bruit acoustique de l'arc électrique, *Revue Générale de l'Electricité* **88** (1979) 606-613.
- [2] Lemoine D., Détermination de l'origine de l'émission sonore des générateurs de plasma à courant continu de petite puissance, Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M, Paris (1983).

- [3] Brillhac J.F., Pateyron B., Coudert J.F., Fauchais P., Bouvier A. and Jestin L., Diagnostic of the dynamic behaviour of the electric arc in a plasma torch, *J. High Temp. Chem. Proc.* **1** (1992) C1-421 – C1-427.
- [4] de Izarra C., Vallee O. et Chapelle J., Étude des phénomènes de turbulence dans une torche plasma, *High Temp. Chem. Proc.* **2** (1993) 107-113.
- [5] Jacquet B. et Gély D., Étude du bruit engendré par l'impact d'un jet supersonique chaud sur un obstacle, *J. Phys. IV Colloque France* **2** (1992) C1-569 – C1-572.
- [6] Fridman A.A., Petrousov A., Chapelle J., Cormier J.M., Czernichowski A., Lesueur H. et Stevefelt J., Modèle physique de l'arc glissant, *J. Phys. III France* **4** (1994) 1449-1465.
- [7] Badie J.M., Granier B. et Bonduelle B., Caractérisation des flux échangés entre un écoulement de plasma d'argon dans l'air et une cible plane froide, *Colloq. Phys. France* **51** (1990) C5-273 – C5-279.
- [8] Dillon Cobine J., Gaseous conductors - Theory and engineering applications, Dover Publication (New York, 1941).

Commission paritaire N° 57920

© Les Éditions de Physique 1996

Directrice de la Publication : Jeanne BERGER

Saisie \LaTeX - \LaTeX : Les Éditions de Physique
Impression JOUVE, 18, rue Saint-Denis, 75001 PARIS
N° 239790B. Dépôt légal : Octobre 1996