ÉTUDE D'UNE SOURCE D'IONS DE BASSE ÉNERGIE ET A FORTE DENSITÉ DE COURANT

P. LE VAGUERÈSE et D. PIGACHE

Service d'Energétique, Office National d'Etudes et de Recherches Aéronautiques,
92-Chatillon-sous-Bagneux

(Reçu le 8 décembre 1970, révisé le 5 mars 1971)

Résumé. — Une source d'ions de basse énergie (entre 5 et 100 électrons-volts) a été mise au point. La densité du courant d'ions extrait est supérieure à ce qui a été obtenu jusqu'ici dans cette gamme d'énergie. Le système d'extraction est constitué d'une grille à maille très fine. La dimension des trous est inférieure à l'épaisseur de gaine dans la chambre d'ionisation.

Abstract. — An ion source of low energy (from 5 to 100 electron-volts) has been carried out. The extracted ion current density is higher than what has been obtained so far in this energy range. The extraction system is made of a thin mesh grid. The holes dimension is smaller than the sheath thickness in the ionization chamber.

Introduction. — La simulation en laboratoire des conditions de vol d'un satellite dans l'ionosphère a exigé la mise au point de sources d'ions de vitesses comparables à celles d'un satellite. Les énergies correspondantes sont très faibles, par exemple 20 électron-volts pour des ions argon et une vitesse de 10 km/s.

Les sources Kaufman, utilisées pour la propulsion électrique [1] ont pu être adaptées à ces conditions de fonctionnement [2], [3] mais la densité de courant d'ions extrait est alors sévèrement limitée par les effets de charge d'espace dans la zone inter-grille.

L'utilisation d'une grille unique à maille très fine a permis de reculer la limite imposée par la charge d'espace et d'obtenir des densités de courant beaucoup plus élevées. Avec une grille unique, la dimension l des trous de la grille doit être inférieure à l'épaisseur d de la gaine. Les ions sont accélérés dans la gaine qui peut être considérée comme plane et tombent au hasard sur la grille ; une certaine proportion franchit les trous de la grille.

Pour les grilles Kaufman comme pour la grille unique, la densité de courant maximum est donnée en ordre de grandeur par la loi de Child-Langmuir

$$J = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \left(\frac{2q}{m} \right)^{1/2} V^{3/2} d^{-2}$$

où q et m sont la charge et la masse des ions et V la tension d'extraction. Dans le cas des grilles Kaufman la surface du plasma est voisine du plan de la première grille et d est la distance inter-grille. Dans le cas de la grille unique, d est l'épaisseur de la gaine avec la condition $d > l$. Pour des raisons technologiques, la distance inter-grille d'une source Kaufman ne peut être inférieure à environ 1 mm alors que les trous de la grille unique peuvent être aisément 10 fois plus petits, d'où la possibilité de gagner au moins deux ordres de grandeur sur la densité de courant maximum.

Des sources d'ions à grille unique ont déjà été utilisées par divers auteurs [4], [5], [6], [7], [8], mais jusqu'à présent aucune recherche de performance et d'optimisation n'a été faite.

Description du montage expérimental. — La figure 1 donne le schéma de principe de la source qui est du type Kaufman [1].

FIG. 1. — Schéma de principe de la source. U_d : Tension de décharge ; U_a : Tension de l'anode ; U_g : Tension de la grille ; U_s : Tension variable applicable entre la source et le caisson ; U_f : Tension de chauffage du filament cathode ; U_n : Tension de chauffage du neutraliseur ; I_s : Courant d'ions émis par la source ; I_e : Courant d'électrons émis par le neutraliseur ; I_d : Courant de décharge.

La chambre d'ionisation a la forme d'un cylindre de 10 cm de diamètre et de 10 cm de longueur. L'argon introduit dans cette chambre est ionisé par bombardement électronique. Les électrons sont émis par un filament de tantale chauffé et accélérés par l'anode. La tension de décharge est de 40 V. Les électrons sont réfléchis aux deux extrémités de la chambre portées à un potentiel négatif par rapport au filament émissif. Un champ magnétique de 10 à 40 G retarde le mouvement des électrons vers l'anode. Dans ces conditions, le rendement d'ionisation est satisfaisant en dépit de la pression très basse régnant dans la source (environ 3×10^{-2} Pa).

Les sources Kaufman comportent normalement deux grilles accélératrices percées d'un grand nombre de trous de quelques millimètres de diamètre. Ce système d'extraction classique qui a été utilisé dans les premières expériences de simulation du plasma ionosphérique [3] a été remplacé par une grille unique à maille très fine. Cette grille électroformée est en nickel et a une épaisseur de 10 μ . La maille de forme carrée a un pas de 100 μ et une transparence de 50 %. Accolée à cette grille, un diaphragme réduit l'ouverture de la source à un trou de 1 cm de diamètre. L'extraction des ions ne se faisant plus que dans la partie centrale, le flux d'argon neutre est très faible. La pression dans l'enceinte est comprise entre 1 et 3×10^{-3} Pa lorsque la source est en fonctionnement. La vitesse de pompage est de 100 l/s.

A la sortie de la source, un filament de tantale chauffé émet des électrons qui neutralisent en charge les ions extraits (égalité des densités ioniques et électroniques dans le faisceau). Le potentiel du faisceau neutralisé s'ajuste par rapport au potentiel du filament neutraliseur de façon à ce que soit extrait le courant d'électrons nécessaire à la neutralisation du faisceau d'ions. La vitesse des électrons est très supérieure à celle des ions et il y a piégeage partiel des électrons par le faisceau d'ions.

Détermination de l'énergie des ions. — Le potentiel plasma à l'intérieur de la source est voisin de celui de l'anode. L'ensemble grille-diaphragme est porté à un potentiel négatif par rapport à celui de la cathode. Les électrons de la chambre d'ionisation étant repoussés par le potentiel de la grille, il se forme, au voisinage de celle-ci, une gaine d'ions dans laquelle les ions sont accélérés jusqu'à une énergie égale à $U_a + U_g$ en électron-volts, U_a et U_g étant les potentiels d'anode et de grille. Le potentiel du faisceau est uniforme et voisin, à quelques dixièmes de volts près, de la borne négative du filament neutraliseur. Il faut donc s'attendre à ce que les ions soient décélérés et aient une énergie finale égale à U_a qui correspond à la différence entre les potentiels plasma dans la source et dans le faisceau. La vitesse dirigée des ions a été mesurée en régime pulsé par une méthode de temps de vol et en régime continu à l'aide d'un analyseur d'énergie à potentiel retardateur. Les deux méthodes sont en parfait accord

et montrent que la vitesse la plus probable des ions est bien égale à $(2e U_a/M_i)^{1/2}$ où M_i est la masse des ions.

Si la condition $d > l$ est largement respectée, les gaines d'ions qui se forment de part et d'autre de la grille sont approximativement planes et leur présence n'a que peu d'effet sur la composante transversale de l'énergie des ions. L'ouverture du faisceau est alors définie en première approximation par la distribution d'énergie des ions issus de la chambre d'ionisation.

La figure 2 montre les spectres d'énergie relevés à l'analyseur pour des énergies de 5, 10, 20 et 40 électron-volts. La dispersion d'énergie est pratiquement indépendante de l'énergie des ions. La largeur du spectre à mi-hauteur est égale à $4 \pm 0,5$ eV. Les courbes de la

FIG. 2. — Spectres d'énergie des ions pour quatre valeurs de la tension d'anode. Courants collectés par l'analyseur en fonction de l'énergie des ions.

figure 2 ont été obtenues par différenciation graphique de la valeur du courant collecté mesurée en fonction de la tension d'analyse.

Etude de la densité du faisceau d'ions. — La densité ionique N_i du faisceau est mesurée à partir du courant collecté sur une cible polarisée à -40 V. Il n'a pas été tenu compte de l'émission secondaire qui est négligeable à ces basses énergies. Pour une intensité de décharge à 0,5 A et des ions de 20 eV, nous avons $N_i = 4 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ au centre du faisceau à 80 cm de la source ; le faisceau est homogène à 10 % près dans un cône de $\pm 6^\circ$. La densité obtenue est pratiquement indépendante de l'énergie des ions entre 20 et 100 eV.

La densité ionique est fonction de l'intensité de décharge, du champ magnétique et de la pression de gaz neutre dans la source. Pour une intensité de 1,5 A, un champ magnétique de 35 G et une pression de 3×10^{-2} Pa, la densité, à 80 cm de la source, est égale à $8 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ (valeur maximum obtenue). Le courant d'ions fourni par la source est alors $I_s = 2,7 \text{ mA}$, soit une densité de courant $j_s = 3,8 \text{ mA/cm}^2$ au niveau de la grille d'extraction pour un diamètre d'ouverture de 1 cm.

Grâce à la polarisation négative de l'écran et de la grille (voir Fig. 1) la mesure du courant I_s correspond bien à un courant d'ions émis par la source et non à un courant d'électrons reçu en provenance du filament neutraliseur ou du faisceau.

TABLEAU I

	Grille à maille fine	Grilles type Kaufman [3]	Duoplasmatron avec décélération et focalisation [9]	Source Kaufman Propulsion électrique [1]	Duoplasmatron grille à maille fine [8]
Energie des ions (eV)	20	20	200	5×10^3	20
Nature des ions	A ⁺	A ⁺	A ⁺	Hg ⁺	A ⁺
Diamètre d'ouverture (cm)	1	10	0,6	7,5	4
Densité de courant mA/ cm ²	3,8	0,015	0,25	2,3	0,039

Comparaison avec d'autres sources. — Les densités de courant obtenues avec cette source et avec d'autres sources fonctionnant à basse énergie sont données dans le tableau I.

Il s'agit des densités moyennes au niveau des grilles d'extraction. Dans le cas du duoplasmatron [9] la densité de courant moyenne est calculée au niveau du diaphragme de sortie du système de focalisation.

La source Kaufman fonctionnant à basse énergie et le duoplasmatron muni d'un système de décélération et de focalisation du faisceau donnent des densités de courant beaucoup plus faibles alors que la densité de courant obtenue avec un propulseur ionique produisant des ions mercure de 5 keV est du même ordre de grandeur. Un duoplasmatron muni d'une cuvette d'expansion et d'une grille d'extraction à maille fine donne une densité de courant 100 fois plus faible. La méthode d'extraction étant identique à celle que nous avons utilisée, il semble que la source de plasma soit moins bien adaptée à la production d'un faisceau d'ions de basse énergie.

La seule donnée expérimentale connue dans les autres études de sources utilisant une grille à maille fine est la densité d'ions en un point trop éloigné pour que la densité de courant en ce point puisse être assimilée à la densité de courant au niveau de la grille d'extraction. Une comparaison qualitative est possible en utilisant ces valeurs de la densité et en tenant compte du diamètre d'ouverture des différentes sources. Les densités de courant obtenues seraient d'un ordre de gran-

deur [5], [7] et de deux ordres de grandeur [4], [6] plus faibles que celle obtenue après optimisation des conditions de fonctionnement de la source de plasma.

Durée de vie de la grille. — A 20 eV et pour un courant de décharge de 0,5 A, la durée de vie de la grille est d'environ 50 h, ce qui est suffisant pour les besoins de la simulation ionosphérique au laboratoire. Cette durée de vie diminue quand l'énergie des ions augmente, mais ce n'est que pour des énergies de quelques centaines d'électron-volts que les grilles Kaufman reprennent l'avantage en raison de leur robustesse.

Conclusion. — La source décrite ci-dessus est particulièrement bien adaptée à la production des faisceaux d'ions de faible énergie et d'intensité importante. Elle offre dès maintenant d'intéressantes possibilités d'utilisation pour la simulation du vol ionosphérique d'un satellite et permet d'obtenir les paramètres de simulation exigés (densité de l'ordre de 10^6 cm^{-3}) sans imposer une vitesse de pompage prohibitive.

L'utilisation d'une grille à maille très fine (inférieure à l'épaisseur de gaine dans la source) a ainsi permis de reculer la limite imposée par la charge d'espace. Une augmentation importante de la densité de courant est encore possible moyennant une augmentation de la densité à l'intérieur de la source, accompagnée, s'il le faut pour conserver la condition $d > l$ d'une diminution de la dimension des trous de la grille.

Bibliographie

- [1] BONNAL (J. F.), GIACOMINI (J.), MAINFRAY (G.), MANUS (C.) et MORELLEC (J.), Etude d'une source d'ions à forte intensité et de rendement élevé, *Nuclear Instr. and Methods*, 1965, **34**, 328-340.
- [2] HALL (D.), KEMP (R.), SELLEN (J.), Generation and characteristics of plasma wind-tunnel streams, *AIAA J.*, 1965, 1490.
- [3] MARTY (D.), PIGACHE (D.), Etude d'une source d'ions à faibles énergies destinées à la simulation du vol ionosphérique. Première conférence internationale sur les sources d'ions, Saclay, 1969, 507, TP. O. N. E. R. A., n° 740.
- [4] MECKEL (B.), Experimental study of an interaction of a moving body with a plasma. *Rarefied Gas Dynamics*; L. Talbot, Academic Press New York, 1961.
- [5] CLAYDEN (W.), HURDLE (C.), Diagnosis of a plasma beam extracted from an electron bombardment source. *Agard Proceedings*, 1965, **8**, 2.
- [6] PITTS (W.), KNECHTEL (E.), Experimental investigation of electric drag on spherical satellite models. *AIAA J.*, 1964, 1148.
- [7] SAJBEN (M.), BLUMENTHAL (D.), Experimental study of rarefied plasma stream and its interaction with simple bodies. *AIAA 7th Aerospace Sciences Meeting*, AIAA Paper, 69-79.
- [8] SAUTTER (J.), MATTHIEUSSENT (G.), Production et étude d'un faisceau d'ions lents. Première conférence internationale sur les sources d'ions, Saclay, 1969, 523.
- [9] KOFOID (M.), BRAAMS (C.), ZIESKE (P.), Production of dense beams of low energy ions. *The Review of Scient. Instr.*, 1965, **36**, 1415-1417.