

ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE, EN TUBE A CHOC, DES PHENOMENES ACCOMPAGNANT LA MISE HORS D'EQUILIBRE DANS UN GENERATEUR MHD EN CYCLE FERME

J.P. PETIT, J.P. CARESSA ET J. VALENSI
INSTITUT DE MECANIQUE DES FLUIDES,
UNIVERSITE D'AIX-MARSEILLE,
MARSEILLE, FRANCE

Abstract — Résumé

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY, USING A SHOCK TUBE, OF THE PHENOMENA ACCOMPANYING EQUILIBRIUM BREAKDOWN IN A CLOSED-CYCLE MHD GENERATOR. The study presented in this paper concerns binary mixtures of rare gases, the choice of the ionization potentials of the two gases being such that one gas can serve as seed and the other as carrier. In such combinations, the high ionization potential of the seed (compared with the ionization potential of an alkali metal) and the high percentage of seed which that implies combine to increase the characteristic time associated with the establishment of the electrothermal instability. Calculations determined the optimum composition of such mixtures and the temperature and pressure conditions most favouring equilibrium breakdown. It should be noted that to achieve equilibrium conductivities comparable with those of helium + alkaline metal mixtures, it is necessary to operate at relatively high temperatures (6000-7000°K). Two mixtures appeared to be suitable: helium-argon and helium-xenon. Since the Ramsauer effect is less pronounced in argon than in xenon, a mixture of 70% helium and 30% argon was selected for the first tests. These were carried out in a combustion shock tube consisting of a Faraday duct with segmented electrodes. Oscillograph recordings of the pressures at the electrode terminals for open circuit and low load factor conditions, and measurements of the electron density by laser interferometry in the infra-red region were made. Non-equilibrium ionization was observed, in particular for $T(\text{gas}) = 6400^\circ\text{K}$, $P(\text{gas}) = 0,55 \times 10^5$ pascal, and $n(\text{equilibrium, calculated}) = 3,3 \times 10^{13}/\text{cm}^3$. The burst duration was 120 μs . The mean current density measured for the first pair of electrodes was 280 A/cm², while the measured electron density was $1,7 \times 10^{16}$ electrons/cm³. It appears that, under the chosen conditions, the phenomenon of non-equilibrium ionization becomes rapidly established, since it is observed at the first pair of electrodes. As expected, the addition of a small percentage of CO₂ (with a high inelastic loss coefficient) to the rare gas mixture destroys this phenomenon. No instabilities were observed during transit of the plasma in the duct or during the burst.

ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE, EN TUBE A CHOC, DES PHENOMENES ACCOMPAGNANT LA MISE HORS D'EQUILIBRE DANS UN GENERATEUR MHD EN CYCLE FERME. L'étude présentée porte sur des mélanges binaires de gaz rares. Le choix des potentiels d'ionisation des deux gaz est tel que l'un peut jouer le rôle de semence et l'autre de porteur. En principe, dans de telles combinaisons, le fort potentiel d'ionisation de la semence (comparativement au potentiel d'ionisation d'un alcalin) ainsi que le fort pourcentage de semence que cela implique, concourent à accroître le temps caractéristique d'établissement de l'instabilité électrothermique. Des calculs ont été effectués pour déterminer la composition optimale de tels mélanges ainsi que les conditions de température et de pression propices à la mise hors d'équilibre. Il y a lieu de noter que, pour atteindre des conductivités à l'équilibre comparables à celles de mélanges hélium + alcalin, il est nécessaire d'opérer à des températures relativement élevées (6000 à 7000°K). Deux associations sont apparues convenables: hélium-argon, hélium-xénon. L'effet Ramsauer étant moins prononcé dans l'argon que dans le xénon, un mélange 70% hélium, 30% argon, a été retenu pour les premiers essais. Ceux-ci ont été effectués dans un tube à choc à combustion comportant une tuyère de Faraday à électrodes segmentées. Les mesures ont porté sur l'enregistrement sur oscillographe des tensions aux bornes des électrodes en circuit ouvert et avec un facteur de charge faible, et sur la densité électronique par interférométrie laser dans l'infrarouge. Le phénomène d'ionisation hors d'équilibre a été observé en particulier pour les conditions $T_g = 6400^\circ\text{K}$, $P_g = 0,55 \cdot 10^5$ pascal, et $n_{eq} = 3,3 \cdot 10^{13}/\text{cm}^3$ (calculé). Le temps de rafale était alors de 120 μs . Dans ces conditions, la densité moyenne de courant mesurée sur la première paire d'électrodes est

de 280 A/cm², la densité électronique de $1,7 \cdot 10^{16}$ électrons/cm³. Il semble que, dans les conditions choisies, le phénomène d'ionisation hors d'équilibre s'établisse très rapidement puisque celui-ci est observé au niveau de la première paire d'électrodes. Comme prévu, l'addition d'un faible pourcentage de CO₂ (à fort coefficient de pertes inélastiques) au mélange de gaz rare, détruit le phénomène. Apparemment, durant le transit du plasma dans la tuyère et tout au long de la rafale, on n'observe pas d'instabilités.

Dans le cadre de la conversion MHD de nombreux auteurs ont réalisé des expériences de mise hors d'équilibre sur des mélanges hélium plus semence alcaline. L'apparition de l'instabilité électrothermique apporte, en général, une limitation sévère dans l'accroissement escompté d'ionisation. Les calculs montrent que l'on peut espérer réduire l'effet de ces inhomogénéités en opérant sur des mélanges binaires de gaz rares ayant :

- un taux de croissance d'instabilité d'ionisation faible
- un temps de relaxation d'ionisation faible,

Les expériences, dont il est rendu compte ci-après, ont été menées dans un tube à choc dont le tube d'essai était rempli d'un mélange à basse pression composé de 70% hélium et 30% argon. L'onde de choc

ionisant le mélange fournit à son aval une rafale de plasma dont les caractéristiques sont les suivantes :

T_g : Température du gaz variant de 5500°K à 7500°K

P_g : Pression statique du gaz variant de 0,5 à 1 atmosphère

U : Vitesse du plasma en aval du choc variant de 3000 à 3500 ms^{-1}

n_{eo} : Densité électronique à l'équilibre
variant de 5×10^{18} à 2×10^{20} électrons/ m^3

τ : Temps de rafale de l'ordre de 120 μs

la section de la veine d'essai étant de 45 x 45 mm^2 .

Cette colonne de plasma traverse une tuyère de conversion linéaire à section constante et à électrodes segmentées. Le schéma de cette tuyère est indiqué Figure 1. Le champ magnétique utilisé est un champ pulsé de 1,2 Teslas, sensiblement uniforme sur la longueur de la tuyère et qui peut être considéré comme constant durant la rafale.

Les tensions aux bornes des électrodes ont été mesurées par un circuit ouvert et, d'autre part, avec des résistances de charge de 20 m Ω par paire d'électrodes.

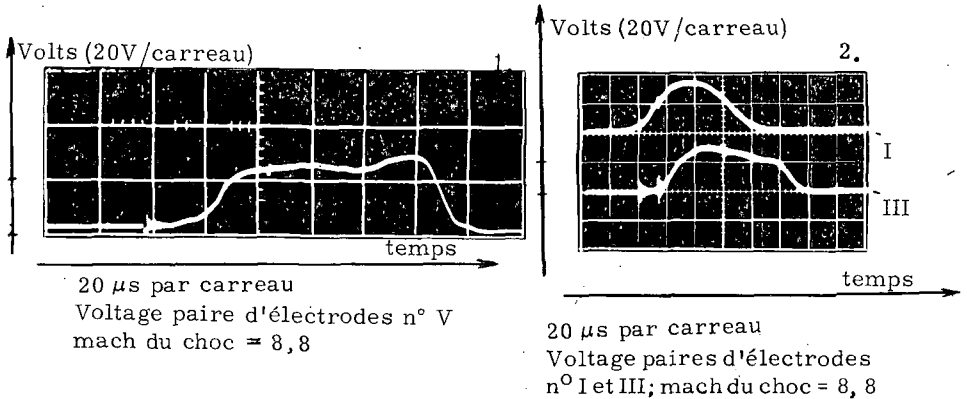
La densité électronique a été mesurée par interférométrie laser (fig. 2). La vitesse du front de choc a été mesurée à l'aide de sondes à ionisation disposées par paires, en amont et en aval de la tuyère. Les principaux résultats expérimentaux ont été consignés sur le tableau I. On note que la densité électronique mesurée semble être de un à trois ordres de grandeur plus élevée que la densité calculée à l'équilibre. La température électronique, calculée par la loi de Saha à partir de ces valeurs, est sensiblement 1,5 fois celle du gaz. On constate un bon accord qualitatif entre les mesures de tension et les mesures de densité électronique.

On a porté à titre indicatif, les valeurs de la conductivité calculées dans l'approximation des fréquences de collisions constantes.

Dans certains essais, un faible pourcentage de gaz carbonique a été adjoint au mélange, celui-ci présentant un coefficient de pertes inélastiques élevé. Dans ces conditions, du fait de l'absorption de

l'énergie électronique par collisions inélastiques, l'ionisation induite a été trouvée très fortement réduite.

La courbe de la Figure 3 rend compte de ce phénomène. La réduction de tension aux bornes constatée s'accompagnait d'une réduction corrélative de la densité électronique mesurée par laser.



On remarquera, sur la photo. I, que le phénomène d'ionisation hors d'équilibre semble se manifester au niveau même de la première paire d'électrodes, ce qui implique un temps de relaxation très bref. Cette ionisation rapide est peut être due à l'existence de collisions entre atomes d'hélium métastable et atomes d'argon.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé sous contrat DGRST en liaison avec les services de physique appliquée du CEA. Les mesures laser ont été réalisées par M. B. Fontaine, chercheur à l'IMFM.

Références

- B. Zauderer : Annual Technical Report 1965 General Electric investigation of magnetically induced ionisation in MHD generators
- J. F. Louis : Studies on an inert gas disk hall generator driven in a shock tunnel- Research report 267, Feb. 1967 AVCO LAB.
- A. F. Vitshas- V. S. Golubev : Etude d'une décharge électrique entretenue par la force de Lorentz -Colloque franco-soviétique 1967
- P. Ricateau : Conversion en cycle fermé, Revue de l'IFP, 1968.
- B. Fontaine, G. Inglesakis, J. Valensi: Mesure par interférométrie laser dans l'infrarouge de la densité électronique des plasmas produits en tube à choc, C. r. heb. Séanc. Acad. Sci., Paris 265, 1230-33.

TABLEAU I. RESULTATS EXPERIMENTAUX

	T_g °K	P Pascal	U ms ⁻¹	B Tesla	Tarré °K	deq mh ⁻¹	Vmesure (volt)			V _{eq} calculé volt	Ne _{eq} calculé m ⁻³	Ne _{mes} m ⁻³
							I	II	V			
A	5600	0,92.10 ⁵	3,060	1,2	9000	7,5	13	13	13	0,5	64.10 ¹⁸	8.10 ²¹
B	6400	0,55.10 ⁵	3,240	1,2	10.200	7,4	50	42	30	5,1	33.10 ¹⁹	1,7.10 ²²
C	6650	0,8.10 ⁵	3,310	1,2	10.600	9,4	21	25	19,5	6,5	7.10 ¹⁹	1,2.10 ²²
D	6750	0,59.10 ⁵	3,340	1,2	10800	140	25,5	25,5	21,5	9,2	76.10 ¹⁹	1,4.10 ²²
E	7350	0,63.10 ⁵	3,500	1,2	11700	350	45	39	28	23,7	2,3.10 ²⁰	1,5.10 ²²

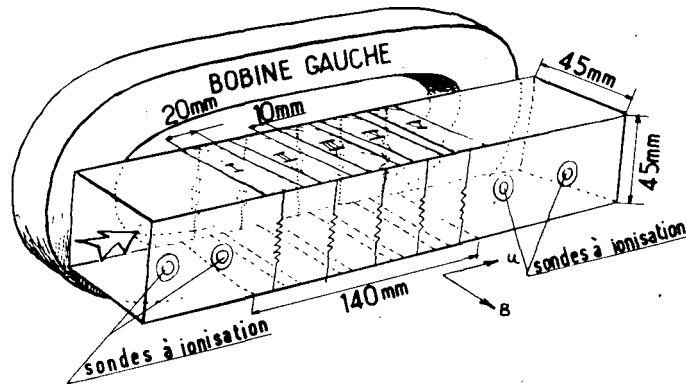


FIG.1. Schéma de la tuyère.

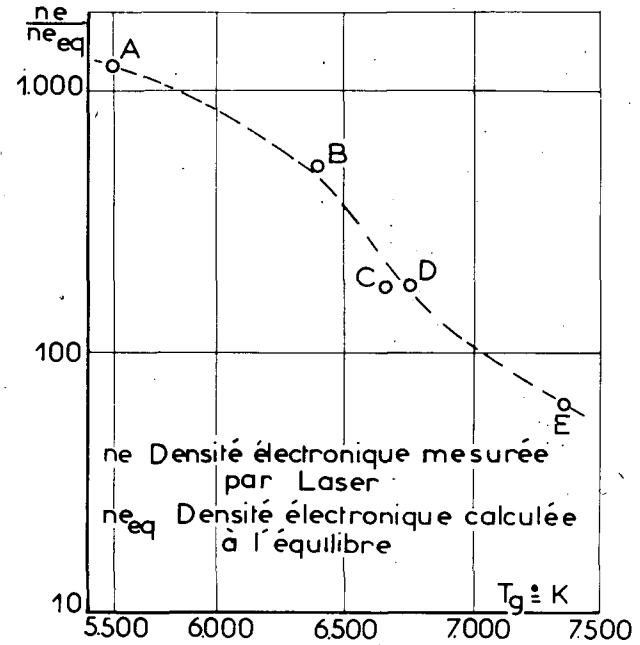


FIG.2. Mesures par interférométrie laser (voir tableau I pour tous détails sur les points expérimentaux de A à E).

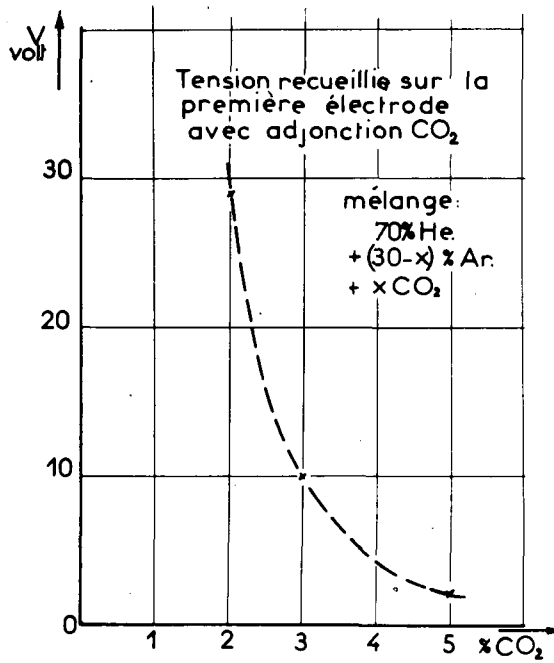


FIG. 3. Effets de l'adjonction d'un faible pourcentage de gaz carbonique au mélange hélium-argon.

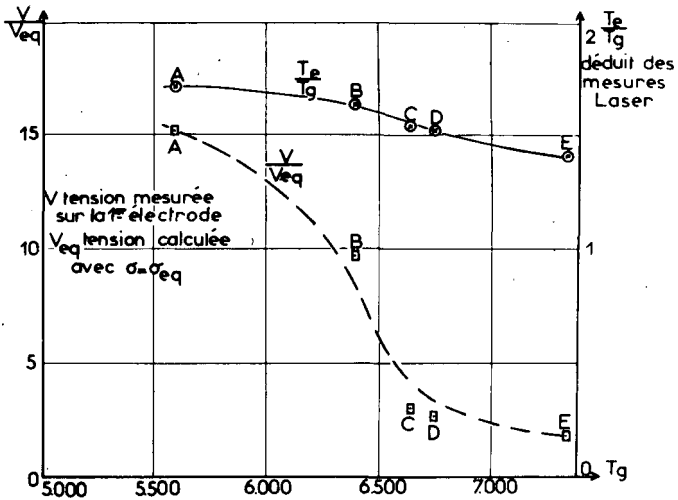


FIG. 4. Courbes de température et de voltage relatifs pour les points de A à E (voir tableau I).