

Janvier 1984

INT 113/84

LE PHENOMENE D'ARCAGE : PRINCIPE ET OBSERVATIONS DANS LE TOKAMAK TCA

Wolfgang Christian SIMM

Centre de Recherches en Physique des Plasmas
Association Euratom - Confédération Suisse
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

I. INTRODUCTION

Depuis la mise en évidence de traces d'arcage dans les tokamaks, de nombreuses études ont été faites pour comprendre les mécanismes et les effets de ce phénomène. Il s'avère que l'arcage pourrait être l'une des causes prédominantes de l'introduction d'impuretés métalliques dans le plasma [1].

Des études récentes ont montré que les arcs sont produits principalement lors de la phase de montée du courant dans la décharge, ainsi que lors de l'extinction du plasma [2,3,4]. Durant la phase stable de la décharge, l'arcage n'apparaît qu'en coïncidence avec des disruptions et des augmentations de l'activité MHD [5]. De ces observations, il est possible de déduire des méthodes de réduction du taux d'arcage. Ce rapport développera tout d'abord les aspects théoriques du phénomène, puis décrira les observations effectuées sur le tokamak TCA.

II. THEORIE

Dans un plasma dans lequel $T_e > T_i$, on peut montrer par la théorie des couches limites [6], que le courant ionique vers une sonde est de la forme :

$$j_i = \alpha n_0 e \left(\frac{k T_e}{m_i} \right)^{1/2} \quad (1)$$

α étant un facteur inférieur à l'unité. Le courant ionique dépend donc de la température électronique, et un calcul approprié permet d'établir l'équation du potentiel qu'acquiert une surface métallique isolée électriquement en présence d'un plasma [7,8] :

$$V_f = \frac{k T_e}{e} \left[-\frac{1}{2} \ln \left(\frac{m_i}{2\pi m_e} \right) + \ln \left(\frac{1 + \delta_i}{1 + \delta_e} \right) \right] \quad (2)$$

où m_i = masse des ions

m_e = masse des électrons

T_e = température électronique

$\delta_{i,e}$ = coefficients d'émission secondaire pour les ions,
respectivement les électrons

Le second terme de l'équation (2) exprime l'influence des effets de réémission de charge sur le potentiel, il est cependant négligé par la plupart des auteurs. Dans un plasma d'hydrogène, l'équation (2) s'écrit :

$$V_f \text{ [V]} \approx -3 * T_e \text{ [eV]} \quad (3)$$

Ce potentiel étant négatif, la surface métallique va attirer les ions et repousser les électrons trop peu énergétiques : à l'équilibre, le courant de particules des deux espèces sera égal [9].

L'amorçage d'un arc

Lors des phases instables d'un plasma dans un tokamak (début, fin, disruption, etc), il y a production d'un flux d'électrons découplés qui s'échappent du confinement. A cause de leur grande énergie, ces "runaways" surmontent la barrière de potentiel V_f , et vont heurter les limiteurs, les antennes et les parois du tore. Ils augmentent ainsi le champ électrique dans la couche limite, respectivement le potentiel flottant négatif V_f .

Si l'énergie de ces électrons est suffisamment élevée, V_f dépasse la valeur critique du potentiel nécessaire pour amorcer et maintenir un arc ($=V_C$). Dans un plasma d'hydrogène, cela correspond à une température électronique d'environ 3.5 eV, en supposant une valeur typique $V_C = 10$ volts [9,10].

Le maintien d'un arc

Dès l'amorçage d'un arc sur une surface métallique, une forte émission locale d'électrons va diminuer le potentiel flottant V_f . De ce fait, un plus grand nombre d'électrons du plasma pourront atteindre la cathode et une circulation de courant est établie.

Cette forme d'arcage, qui ne nécessite qu'une seule électrode, est appelée "unipolaire". L'arc est entretenu par l'énergie thermique des électrons du plasma. Le courant circulant est donné par [11] :

$$I_c = A n e \left(\frac{k T_e}{2 m_e} \right)^{1/2} \left[\exp \left(- \frac{e V_c}{k T_e} \right) - \exp \left(- \frac{e V_f}{k T_e} \right) \right] \quad (4)$$

où n = densité du plasma

A = aire de la surface métallique exposée au plasma

III. CONSEQUENCES DE L'ARCAGE

Le taux d'érosion

Un arc unipolaire isolé a une durée d'environ 50 μ s et transporte un courant pouvant atteindre 20 A [5]. Il produit une érosion de la surface de la cathode, à laquelle il arrache du métal sous forme de vapeur neutre (par vaporisation), de ions, ainsi que de particules solides et fondues [10]. La quantité de matériaux érodée est directement proportionnelle à la charge transportée par l'arc, et atteint sa valeur maximale pour des métaux à faible conductivité thermique et basse température de fusion.

Pour des électrodes de 2.5 cm de diamètre en acier inoxydable - matériau dans lequel ont été construits le tore, les antennes et les premiers limiteurs du TCA - le taux d'érosion par arcage est d'environ $5 \cdot 10^{-5}$ g/C, ce qui correspond à quelques 10^{17} atomes/C [5,12]. Mais il est à noter que ces chiffres dépendent de l'état de surface de la cathode : à une épaisse couche d'oxyde par exemple, correspondra un autre taux d'érosion qu'à une surface métallique propre. De plus, ces

mesures ont été effectuées en absence de champ magnétique extérieur : l'arc étant de ce fait stationnaire, l'érosion est différente de celle produite par un arc dans un tokamak, qui se déplace sous l'effet des champs appliqués.

Le taux d'arcage

Divers essais ont été effectués pour déterminer les taux d'arcage de différents matériaux usuels [9,13]. Des échantillons ont été exposés à 10'000 décharges dans l'hydrogène, d'une durée de 800 μ sec chacune, en étant portés à un potentiel négatif de 1 kV. Il s'avère que l'acier inoxydable présente le taux d'arcage le plus faible (en nombre d'arcs par décharge), soit 7 % au début et 0.3 % à la fin des essais.

Il existe donc un effet de conditionnement des surfaces par arcage qui se retrouve pour tous les matériaux. De plus, un traitement préalable des pièces par nettoyage chimique et dégazage réduit le nombre d'arcs durant la période de conditionnement d'un ordre de grandeur. Le taux final d'arcage cependant reste inchangé.

IV. METHODES DE REDUCTION DE L'ARCAGE

Quatre méthodes principales sont préconisées pour réduire l'arcage unipolaire sur des surfaces métalliques.

- il a été observé empiriquement que le choix du matériau de la cathode et le conditionnement de sa surface pouvaient avoir un effet important sur le taux d'arcage. Comme mentionné précédemment, diverses techniques telles que le nettoyage chimique ou le dégazage par chauffage des surfaces peuvent nettement diminuer le taux d'arcage initial. Tous ces traitements ne semblent cependant pas modifier notablement le taux d'arcage final; c'est-à-dire celui mesuré après la fin du conditionnement.

- la seconde méthode est appelée "principe de la surface minimum" : un courant minimum I_a est requis pour maintenir un arc, il faut par conséquent que la surface de l'électrode soit suffisante pour

collecter ce courant. Expérimentalement, il a été déterminé que $I_a \approx 10$ A pour l'acier inoxydable; cette valeur dépend du matériau de l'électrode en étant proportionnelle à sa conductivité thermique [10,13]. En admettant $T_e = 30$ eV, $n = 10^{13}$ cm^{-3} et $I_c = 3$ A, la formule (4) donne une valeur de la surface minimum de $A \approx 1$ cm^2 .

Il devrait donc être possible d'éliminer l'arcage en divisant la surface métallique en parties isolées électriquement, d'aire inférieure à la surface minimum. Cette solution est difficilement réalisable dans la pratique, mais son efficacité a été vérifiée expérimentalement [13].

- une réduction du taux d'arcage peut également être obtenue en diminuant la densité et/ou la température des bords du plasma. Un tel refroidissement pourrait être obtenu par injection de gaz au bord (gas puffing), alors que l'abaissement de densité pourrait être réalisé à l'aide de diverteurs [1].
- il a été montré récemment [14] qu'il existait une corrélation entre les arcages du début de la décharge et les valeurs entières du facteur de sécurité $q(a)$ au limiteur. En diminuant le temps de montée du courant plasma d'un facteur $3 \frac{2}{3}$, c'est-à-dire en empêchant le développement des instabilités responsables de l'arcage, le taux d'arcage mesuré par une sonde ad'hoc a pu être réduit d'un facteur 5.

V. CARACTERISTIQUES DE L'ARCAGE

La "retrograde motion"

En principe, si un arc est plongé dans un champ magnétique, la force $\vec{i} \times \vec{B}$ agira sur lui dans la direction perpendiculaire au courant. Cette force non seulement courbera la colonne de l'arc, mais dans le cas d'une pression ambiante > 1 torr ("haute pression"), elle déplacera également sa base dans la même direction.

A basse pression cependant, il a été découvert [15] que le mouvement de l'arc s'effectue dans le sens rétrograde, c'est-à-dire opposé à la force de Lorentz. Ce phénomène surprenant, qui est également observé dans les tokamaks, a fait l'objet de nombreuses études [16]. Néanmoins, aucune des théories avancées à ce jour ne fait l'unanimité.

Robson et von Engel [17] expliquent le mouvement rétrograde de la façon suivante. Le champ magnétique dévie la colonne de l'arc dans la direction $\vec{i} \times \vec{B}$ par rapport à sa base. Cette déviation, par ailleurs observable visuellement, provoque une distortion de l'arc. Elle génère ainsi un champ magnétique local B_{self} dans la région à forte courbure, proche de la base de l'arc. Le champ résultant qui agit sur cette région s'écrit alors :

$$B' = B - B_{\text{self}} \quad (5)$$

où $B_{\text{self}} \sim i/R$

R = rayon de courbure de l'arc

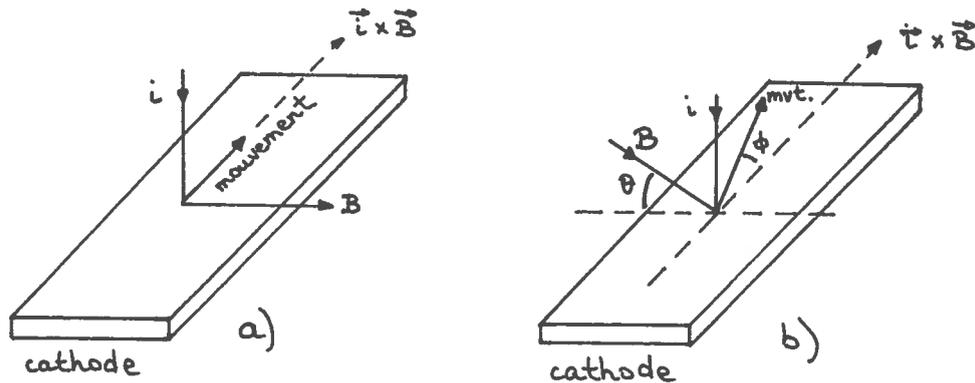
Il est à noter que la notion de rayon de courbure est difficilement applicable à une distortion de l'arc aussi complexe. En fait, il serait souhaitable de traiter le problème en utilisant le concept de pression magnétique de chaque côté de la base. Néanmoins, cela ne sera pas développé ici, le raisonnement restant valable avec l'approche utilisée.

A basse pression, c'est-à-dire lorsque l'arc est fortement courbé, le champ résultant donné par (5) peut être en sens contraire du champ appliqué et provoquer un déplacement de la base de l'arc dans la direction rétrograde. A haute pression par contre, lorsque l'arc est peu courbé, B_{self} est petit et l'arc se déplace dans la direction $\vec{i} \times \vec{B}$.

Auweter-Ming et Schrade [18] ont proposé en 1980 une nouvelle approche théorique du phénomène d'arcage. Elle est basée sur une application rigoureuse de la théorie de stabilité d'un cylindre de plasma, traversé par un courant, et dont l'une des extrémités est fixée sur une surface métallique. Elle permet de dériver un critère de stabilité pour l'arc.

La dérive de l'arc

Lorsque le champ magnétique n'est pas parallèle à la surface de la cathode, l'arc subit une dérive comme indiqué sur la figure ci-dessus [19] :



mouvement rétrograde avec

a) champ magnétique parallèle à la cathode

b) champ B incliné par rapport à la cathode

La théorie du mouvement rétrograde telle qu'exposée plus haut admet implicitement l'existence d'une composante parallèle du courant (i_{\parallel}) près de la base de l'arc. L'interaction de ce courant avec la composante verticale B du champ incliné donne lieu à une force dans la direction $\vec{i}_{\parallel} \times \vec{B}$, direction de dérive de l'arc.

Traces d'arcage observées

L'observation fréquente de traces d'arcage dans les tokamaks est attestée par l'abondante littérature parue sur le sujet. Toutes les parties de la chambre à vide semblent concernées : celles qui sont proches du plasma tels que les limiteurs, mais aussi les autres, plus éloignées, telles que les antennes, les sondes et les parois du tore. Les traces d'arcage, observées sur toutes sortes de matériaux - acier inox, carbone, aluminium, or, etc - peuvent se classer en deux catégories : la forme linéaire et la forme dite en "fougère" (fern-like

arcs). Grâce au microscope électronique à balayage, la largeur de ces traces a pu être estimée à 10-50 μm , et leur profondeur à 1/10e - 1/20e de la largeur. Longues parfois de plusieurs centimètres, les traces sont en principe discontinues avec des petits cratères à intervalles irréguliers, mais peuvent aussi consister en une série de régions fondues superposées [1].

REFERENCES

- [1] Mc Cracken G.M. et Goodall D.H.J., Nucl. Fusion 18/4 (1978) 537
- [2] Maeno M. et al., J. Phys. Soc. Japan 48/6 (1980) 2177
- [3] Maeno M. et al., Nucl. Fusion 20/11 (1980) 1415
- [4] Ohtsuka H. et al., Nucl. Fusion 22/6 (1982) 823
- [5] Mioduszewski P. et al., J. Nucl. Mat. 85 & 86 (1979) 963
- [6] Bohm D. et al., The characteristics of electrical discharges in magnetic fields, chap.2, ed. by Guthrie & Wakerling, Mc Graw Hill 1949
- [7] Allen J.E., Plasma Physics, chap. 5, ed. by B.E. Keen, The Institute of Physics, London 1974
- [8] Karlan J. et al., J. Nucl. Mat. 76 & 77 (1978) 504
- [9] Craston J.L. et al., Proc. 2nd Int. Conf. Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva 1958, vol.32, p.414, paper P/34
- [10] Mc Cracken G.M. et Stott P.E., Nuclear Fusion 19/7 (1979) 928
- [11] Robson A.E. et Thonemann P.C., Proc. Phys. Soc. 73 (1959) 508
- [12] Kimblin C.W., J. Appl. Phys. 44/7 (1973) 3074
- [13] Robson A.E. et Hancox R., Proc. IEEE 106 A, suppl.2 (1959) 47, paper 2948
- [14] Goodall D.H.J., J. Nucl. Mat. 93 & 94 (1980) 154
- [15] Stark J., Phys. Z. 4 (1903) 440

- [16] Weichel H., thesis, Air Force Institute of Technology, Wright Patterson AFB, Ohio (1965)

- [17] Robson A.E. et von Engel A., Phys. Rev. 93 (1954) 1121

- [18] Auweter-Ming M. et Schrade H.O., J. Nucl. Mat. 93 & 94 (1980) 799

- [19] Robson A.E., Proc. 4th Int. Conf. Phenomena in Ionized Gases, Uppsala 1959, vol.1 (1959) 346

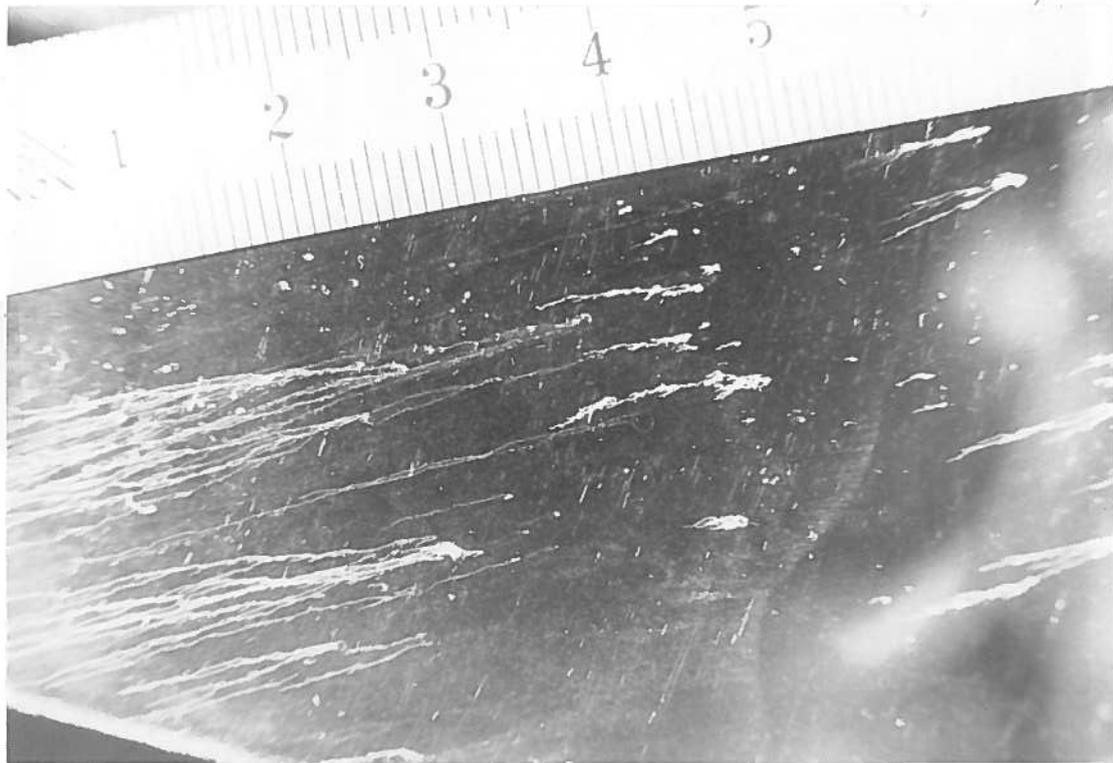


Fig. 1 Traces d'arcages sur l'ancien limiteur extérieur en acier inoxydable.

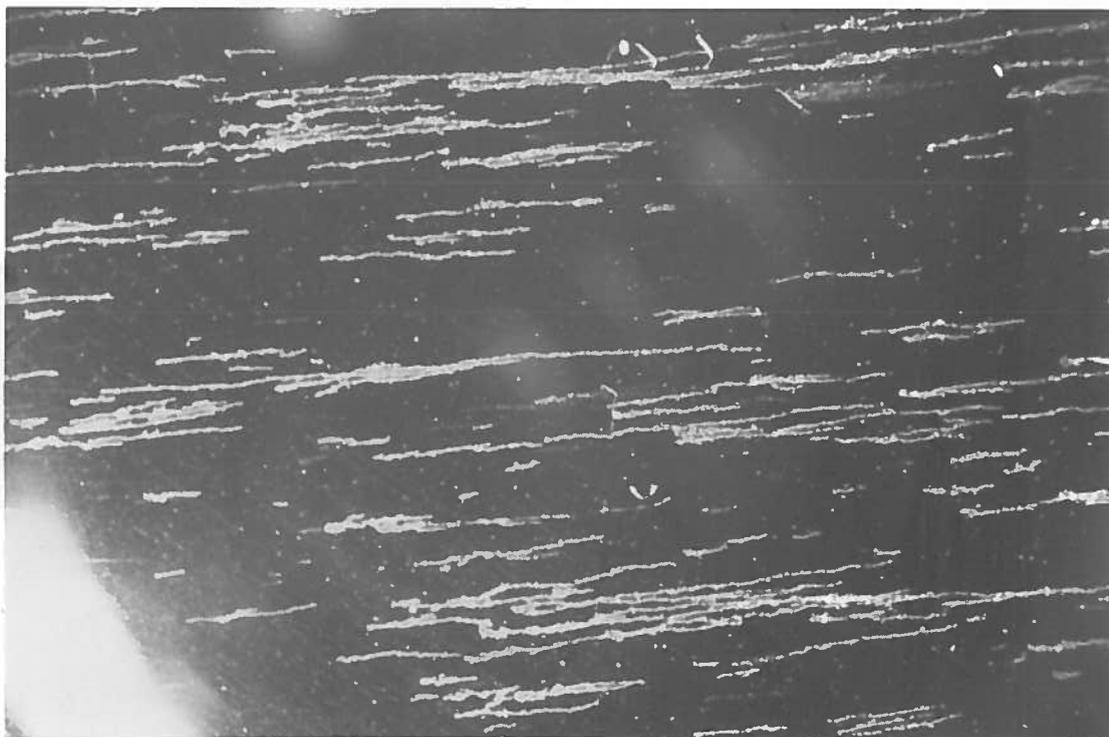


Fig. 2 Traces d'arcages sur une des antennes pour le chauffage d'Alfvén.

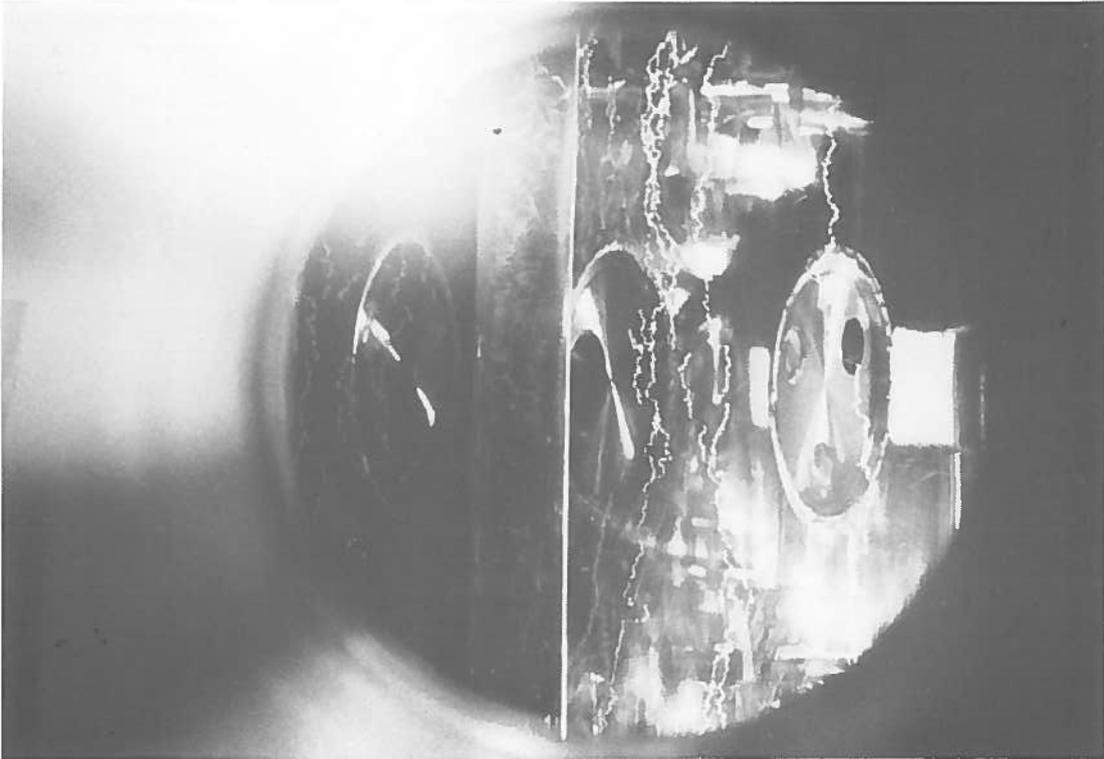


Fig. 3 Traces d'arcages sur la paroi intérieure du tore du TCA.



Fig. 4 Traces d'arcages sur les anciens écrans d'antenne. Il n'y a pas de déplacement linéaire des arcs, car les écrans sont perpendiculaires aux lignes de champ.

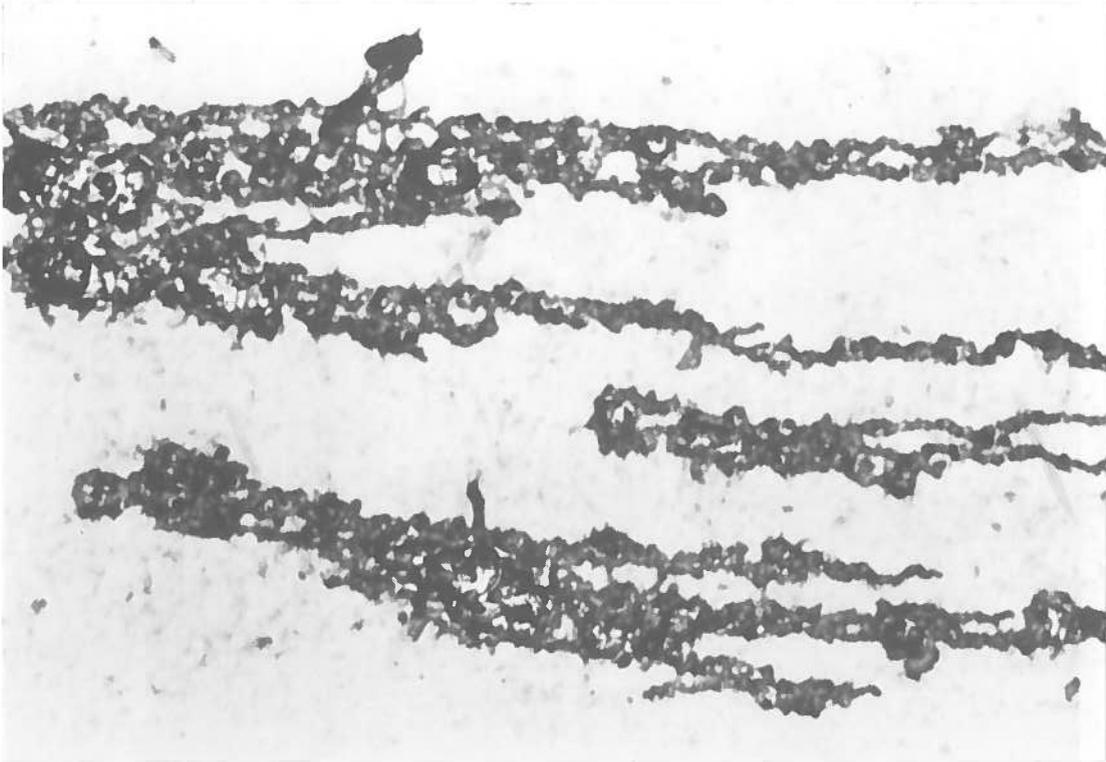


Fig. 5 Détails des traces d'arcages sur les antennes. Vue prise au microscope (grossissement x 10)

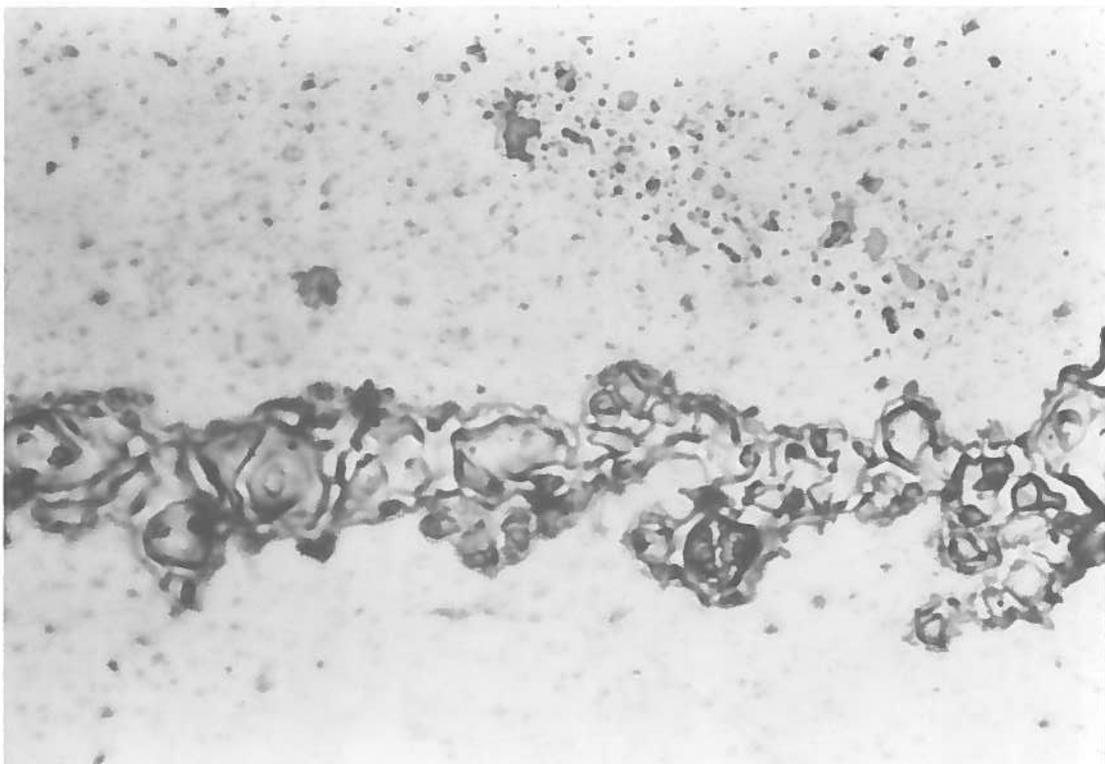


Fig. 6 Vue agrandie d'une trace d'arcage et de sa structure typique : une succession de petites surfaces fondues superposées (grossissement x 20)

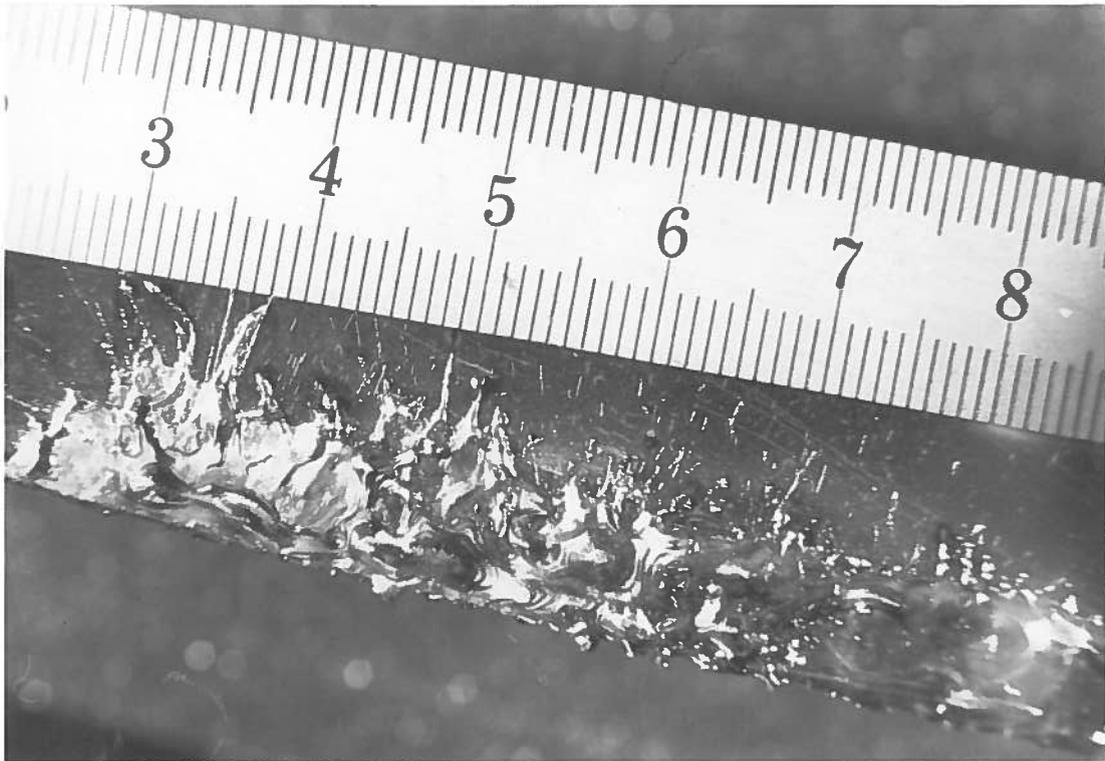


Fig. 7 Des dégâts de surface autres que l'arcage sont possibles :
vue de la surface fondue de l'ancien limiteur extérieur en
acier inoxydable.



Fig. 8 Au verso du même limiteur, la fusion de la surface est
accompagnée par l'éjection de gouttelettes de métal fondu.