UNIVERSITE DU QUEBEC

MEMOIRE

PRESENTE A

L'INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

INRS-ENERGIE

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAITRISE ES SCIENCES (ENERGIE)

PAR

PHILIPPE POISSARD

BACC. PHYS.

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA DISTRIBUTION DE LA DENSITE DE COURANT A L'ANODE D'UN ARC DIFFUS DANS LE VIDE

RÉSUMÉ

Cette étude expérimentale met en évidence que la distribution de la densité de courant à l'anode d'un arc électrique sous vide et dans le mode diffus est tres concentrée au centre de l'anode, bien plus que le laissait supposer les publications concernant ce sujet. Cette concentration du courant au centre devient moins prononcée à mesure que la séparation inter-électrodes augmente. De plus la forme géométrique de la cathode intervient d'une façon très nette sur la distribution.

Une relation basée sur une émission balistique du flux de particules émis de la cathode et une simple collection de courant à l'anode est aussi présentée; cette relation donne des résultats assez représentatifs du phénomène étudié.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier le Docteur Michel Drouet, directeur de thèse, qui m'a proposé ce sujet d'étude et qui, au travers de multiples discussions, m'a guidé quant à l'orientation du travail et la compréhension des phénomènes physiques observés.

Le montage expérimental fut accompli grâce à l'aide apportée par M. Jean-Luc Meunier, étudiant, à qui j'adresse toute ma gratitude.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS ..... i.

TABLE DES MATIÈRES ..... ii.

LISTE DES FIGURES ..... v.

LISTE DES TABLEAUX ..... xi.

INTRODUCTION ..... 1.

CHAPITRE I REVUE ..... 4.

1.1 L'arc dans le vide ..... 4.

1.2 Les deux modes anodiques ..... 5.

1.2.1 Le mode diffus ..... 6.

1.2.2 Le mode points anodiques ..... 6.

1.3 Importance des points cathodiques ..... 10.

1.4 Distribution angulaire des flux issus de la cathode ..... 11.

1.4.1 Le plasma ..... 11.

1.4.2 Les neutres ..... 13.

1.4.3 L'érosion de la cathode ..... 13.

1.5 Distribution à l'anode des flux issus de la cathode ..... 15.

1.5.1 Distribution à l'anode d'un dépôt métallique ..... 15.

1.5.2 Distribution du courant sur une anode composée de sept éléments ..... 19.

CHAPITRE II CONTEXTE THÉORIQUE ..... 21.

2.1 Distribution de la densité de courant à l'anode ..... 21.

2.2 Influence de la distance inter-électrode sur la distribution de courant à l'anode .. 25.

CHAPITRE III EXPÉRIENCE ..... 29.

3.1 Appareillage ..... 29.

3.1.1 Le choix de l'anode ..... 29.

3.1.2 La cathode ..... 31.

3.1.3 Isolation de la cathode ..... 31.

3.2 Montage expérimental ..... 32.

3.3 Diagnostics ..... 37.

CHAPITRE IV RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION ..... 40.

4.1 Distribution de la densité de courant à l'anode ..... 40.

4.2 Distribution obtenue à partir d'un flux en cosinus ..... 48.

4.3 Distribution obtenue à partir d'un flux plus concentré ..... 49.

4.4 Distribution de la densité de courant pour différentes cathodes et influence du temps de durée de l'arc ..... 64.

4.5 Caractéristique courant tension ..... 69.

4.6 Influence de la pression d'un gaz 72.

CHAPITRE V CONCLUSION ..... 76.

RÉFÉRENCE ..... 78.

ANNEXE 1: CALCUL DE L'ENVELOPPE D'UNE ELLIPSE DONT UN DES SOMMETS EST TANGENT AU POINT DE COORDONNÉES (0,0) A.1

ANNEXE 2: ÉVALUATION DE L'INTÉGRALE PORTANT SUR LA DENSITÉ DE COURANT DE FORME ELLIPTIQUE B.1

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Distribution du potentiel en fonction de la position entre les deux électrodes d'un arc dans le vide. L'anode est polarisée à $+v_a$ 5

Figure 1.2 Voltage de l'arc en fonction du courant d'arc pour une distance inter-électrodes fixée à 2.5 cm et pour une anode de 1.3 cm de diamètre [3]. La formation des points chauds à l'anode commence à 0.4 kA 7

Figure 1.3 Valeur du courant critique I_c en fonction de l'angle solide sous-tendu par l'anode par rapport à la cathode et indiquant la formation de points chauds à l'anode [7] 8

Figure 1.4 Oscillogramme typique montrant la variation dans le voltage de l'arc sous vide avec une augmentation de la spéaration des électrodes (anode en cuivre de 1.3 cm de diamètre, séparée de 3 cm à 5 cm avec une cathode en cuivre pendant 150 ms [3] 9

Figure 1.5 Valeur du flux de plasma en provenance de la cathode en fonction de l'angle alpha 12

Figure 1.6 Distribution angulaire en cosinus (côté arc) du flux ionique émis par la cathode. Dans le cas d'une cathode mince perforée durant le test, la distribution en cosinus est conservée autant à

l'avant qu'à l'arrière de la cathode [23] 14

Figure 1.7 Relation du rapport entre la masse déposée à l'anode (Δma) et la masse déposée à la cathode (Δmc) en fonction de la distance entre les électrodes [24]. La courbe en pointillé indique la masse théorique déposée sur l'anode si le flux était isotrope dans toutes les directions 18

Figure 1.8 Distribution de la densité du flux de particules neutres sur la surface anodique [24]. R représentant la distance à partir du centre de l'anode 18

Figure 1.9 Distribution du flux de particules neutres intercepté par une anode plane sous-tendant pour une distance inter-électrodes de 7 mm un angle solide αa de 65° (a) et pour une distance de 1 mm un angle solide αa de 86° (b) [24] 18

Figure 1.10 Vue de dessus de l'anode utilisée pour connaître la distribution du courant [27]. Six éléments circulaires en cuivre sont centrés sur un septième 20

Figure 2.1 Distribution en cosinus du flux de plasma émis de la cathode 23

Figure 2.2 Distribution de la densité de courant en fonction du rayon anodique pour différentes distances inter-électrodes selon le modèle 28

Figure 3.1 Schéma de l'enceinte expérimentale. La disposition présentée ici est vue du dessus. L'anode se

trouvant au centre de l'enceinte à vide est composée de neuf anneaux circulaires séparés par un isolant 33

Figure 3.2 Vue d'ensemble du montage expérimental 34

Figure 3.3 Schéma des circuits électriques de déclenchement de l'arc 35

Figure 3.4 Photographie prise en l'absence d'arc avec la caméra placée au-dessus de l'enceinte à vide. La vue présentée ici montre l'intérieur de l'enceinte où l'on voit tout le système cathode-anode. Sur la cathode est fixée un papier millimétré pour indiquer les dimensions du système 39

Figure 4.1 Distribution de la densité de courant à l'anode en fonction de l'angle alpha pour un courant de 58 Amp (a), 137 Amp (b) et 204 Amp (c) pour différentes distances inter-électrodes. Le temps de durée de l'arc est de 200 μs. Cette représentation en polaire a été choisie de préférence à la représentation cartésienne de la figure 2.2 car dans le cas présent les différentes courbes ne se coupent pas 43

Figure 4.2 Photographies typiques de l'arc électrique dans le vide pour un courant de 204 Amp. Le diaphragme de l'objectif est réglé à 8. La cathode est en haut 47

Figure 4.3 Distribution théorique de la densité de courant

obtenue à l'anode avec un flux émis en cosinus de la cathode et influencé par la distance à parcourir. Le courant d'arc est de 204 Amp 51

Figure 4.4 Distribution de la densité de courant obtenue à l'anode pour une distance entre les électrodes de 10 mm. Les courbes en pointillé représentent les résultats théoriques (flux émis en cosinus) et les courbes en trait plein représentent les résultats expérimentaux pour des courants de 58 Amp, 137 Amp et 204 Amp 53

Figure 4.5 Distribution elliptique du flux de plasma émis de la cathode 55

Figure 4.6 Distribution théorique de la densité de courant obtenue à l'anode avec un flux émis de la cathode dont la distribution est "elliptique" et influencée par la distance à parcourir. La distribution est donnée pour des courants de 58 Amp (a), 137 Amp (b) et 204 Amp (c) pour différentes distances inter-électrodes 59

Figure 4.7 Schéma représentant les différentes cathodes employées pour déterminer l'importance de la forme de la cathode sur la distribution de la densité de courant à l'anode. Le diamètre de ces cathodes est de 6 mm 65

Figure 4.8 Distribution de la densité de courant pour différentes cathodes (voir Fig. 4.7) avec un courant

de 204 Amp et une séparation inter-électrodes de 15 mm 68

Figure 4.9 Photographie de l'arc après un conditionnement de 20 essais d'arc pour un courant de 204 Amp et une distance inter-électrodes de 15 mm. La forme de la cathode est celle appelée A dans la figure 4.7 70

Figure 4.10 Distribution de la densité de courant pour un courant de 204 Amp et une distance entre les électrodes de 20 mm pour des pressions de 1, 5 et 10 torrs d'argon. Pour les mêmes conditions, la distribution à 10^{-5} torr est beaucoup plus étalée. On donne également la distribution obtenue à partir d'un courant réparti uniformément sur l'anode (J = constante) 74

Figure 4.11 Photographies typiques de l'arc électrique pour un courant de 204 Amp et une séparation de 15 mm entre les électrodes pour des pressions de 1, 5 et 10 torrs d'argon. L'anode est à la partie inférieure de la figure. Le diaphragme de l'objectif est réglé à 8 75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I Valeur de l'excentricité (E) en fonction du courant d'arc et de la distance inter-électrodes 57

Tableau II Valeurs expérimentales, valeurs obtenues avec les distributions en forme de cosinus et elliptique pour un courant de 204 Amp en fonction de la séparation des électrodes 63

Tableau III Valeurs expérimentales obtenues sur la tension d'un arc dans le vide en fonction du courant et de la séparation inter-électrodes 71

INTRODUCTION

Dans la littérature, on considère souvent que la densité du courant collecté à l'anode d'un arc électrique dans le vide est simplement uniforme. L'objectif de ce travail de thèse est de vérifier cette hypothèse. Dans ce but, la densité de courant a été mesurée expérimentalement à l'anode en fonction du rayon anodique, de la distance inter-électrodes et pour différents courants d'arc.

Le premier chapitre présente une revue de la littérature sur ce sujet.

On considère en premier lieu l'établissement et le maintien d'un arc électrique dans le vide. On délimite ensuite la partie traitée par ce sujet parmi les différents états de l'arc dans le vide tels que caractérisés par la courbe de la tension en fonction du courant d'arc.

Une fois l'arc établit, il existe à la cathode des points chauds appelés points cathodiques ou cratères d'émission. On entend par point chaud une très faible surface de l'électrode où la température locale est très élevée. Cette température est proche de celle de la température d'ébullition du matériel à une atmosphère. L'électrode, en ce point chaud, est une source importante de vapeur métallique et d'ions énergétiques. Il y a plusieurs points d'émission à la cathode et de ces points un plasma métallique jaillit et se répand dans tout l'espace inter-électrodes.

On finit ce chapitre en présentant la distribution angulaire des produits issus de la cathode telle que rapportée par d'autres auteurs.

Dans le deuxième chapitre on analyse la distribution à l'anode du flux émis de la cathode.

À faible courant d'arc, l'anode se comporte comme un élément passif dans le circuit de l'arc: elle semble être un simple collecteur de courant. Dans ce contexte on propose un modèle simple pour la collection du courant à l'anode basé sur la distribution du flux de plasma issu de la cathode.

Dans le troisième chapitre on décrit l'appareillage utilisé pour la création et le contrôle de l'arc ainsi que le montage expérimental et les instruments nécessaires à la prise des mesures. L'accent est mis sur le choix des électrodes.

Le quatrième chapitre présente les résultats expérimentaux qui portent sur la collection du courant à l'anode. Ces résultats seront confrontés au modèle proposé dans le deuxième chapitre.

Pour terminer ce chapitre, on regarde l'influence de la cathode sur la distribution à l'anode et celle du temps de durée de l'arc. La variation de la tension de l'arc en foncion de la séparation des électrodes et du courant d'arc est également présentée. Enfin le

rôle joué par la pression sur le comportement de l'arc au niveau de la distribution de la densité de courant à l'anode est indiqué.

Pour terminer ce chapitre, on regarde l'influence de la cathode sur la distribution à l'anode et celle du temps de durée de l'arc. La variation de la tension de l'arc en foncion de la séparation des électrodes et du courant d'arc est également présentée. Enfin le rôle joué par la pression sur le comportement de l'arc au niveau de la distribution de la densité de courant à l'anode est indiqué.

Au dernier chapitre on présente une conclusion générale portant sur la distribution de la densité de courant d'un arc dans le vide.

1. Revue

Pour amorcer un arc dans le vide, il faut nécessairement un agent extérieur. Ceci est d'autant plus difficile que l'arc est sous "vide", que la distance inter-électrodes grande et que le matériau constituant la cathode est plus émissif [1].

Considérons deux électrodes, séparées par une distance d, dans une enceinte sous vide ayant une différence de potentiel (d.d.p.) de V volts entre-elles. Pour une géométrie donnée, le champ électrique $\vec{E}$ prend une certaine configuration. En créant un plasma métallique venant d'une des deux électrodes, on établit l'arc électrique. La configuration du champ électrique précédente est totalement modifiée. Une diffusion ambipolaire se crée du fait que les électrons diffusent beaucoup plus rapidement à cause de leur petite masse. Avec la perte des électrons, une charge d'espace est formée, qui essaie de retenir les électrons et de rejeter les ions devant l'anode et la cathode [2]. On retrouve donc un fort champ électrique devant la cathode due à la différence de polarité entre cette dernière et celle du nuage de plasma dans l'espace inter-électrodes (Fig. 1.1).

Devant l'anode la même chose se produit aussi, vue que la charge d'espace est légèrement supérieure au potentiel positif de la source d'alimentation de l'arc.

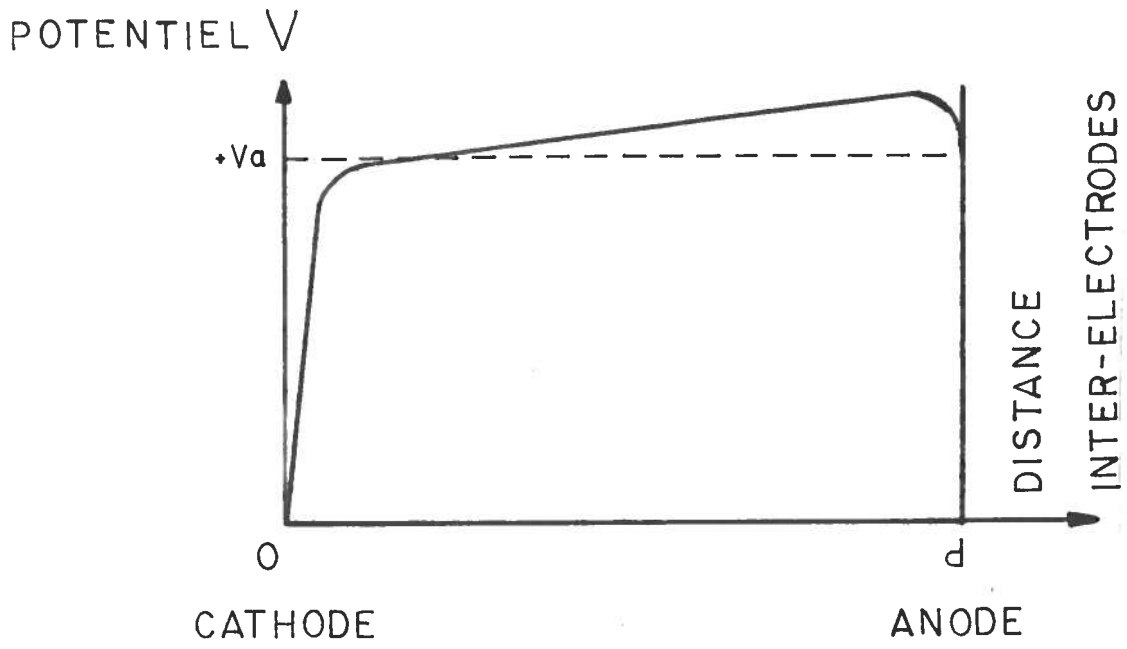


Figure 1.1 Distribution du potentiel en fonction de la position entre les deux électrodes d'un arc dans le vide. L'anode est polarisée à $+V_a$

1.2 Les deux modes anodiques

La courbe la plus caractéristique de l'arc électrique sous vide est celle de la tension en fonction du courant [3]. En observant la

figure 1.2 on observe deux zones très distinctes qui divisent le fonctionnement de l'arc dans les deux modes suivants [3,4,5]:

- Le mode diffus (anode passive).
- Le mode points anodiques (anode active).

1.2.1 Le mode diffus

Ce mode de fonctionnement de l'arc est caractérisé par un courant assez faible et une pente positive, linéaire et très prononcée de la courbe courant-tension [3,6]. La température de l'anode dans ce mode est bien en dessous de son point de fusion. L'arc est très étendu et son émission lumineuse semble remplir tout l'espace entre les électrodes.

Dans cette étude portant sur la répartition du courant à l'anode, on se situera seulement dans le mode de fonctionnement diffus dont la limite est fixée par le courant critique I_c qui une fois atteint mène au mode suivant [7]. La figure 1.3 représente la valeur du courant critique en fonction de l'angle solide sous-tendu par l'anode par rapport au centre de la cathode.

1.2.2 Le mode points anodiques

Pour un certain angle solide sous-tendu par l'anode par rapport à la cathode, si on atteint la valeur de transition du courant critique I_c de l'arc donnée par la courbe de la figure 1.3, le voltage

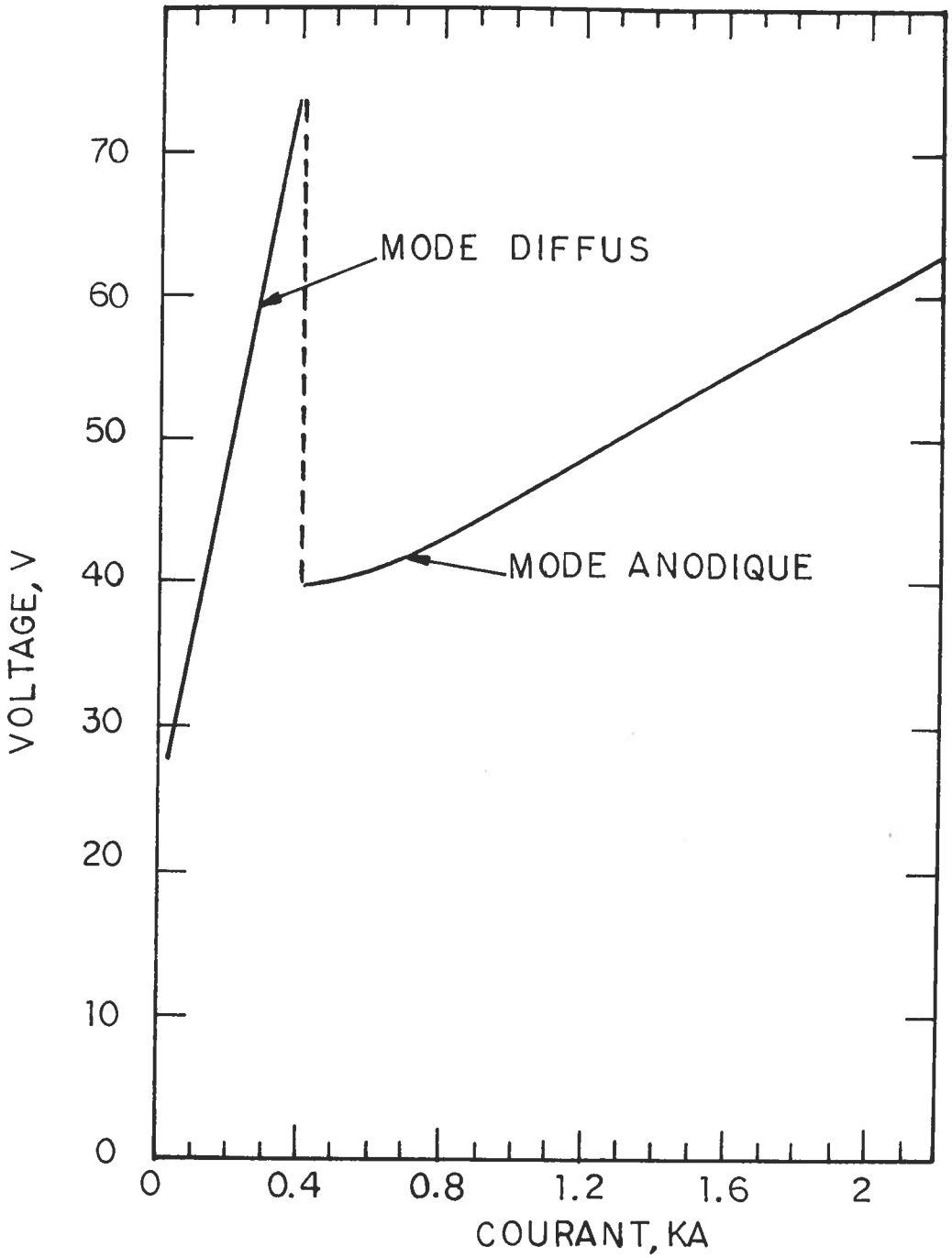


Figure 1.2 Voltage de l'arc en fonction du courant d'arc pour une distance inter-électrodes fixée à 2.5 cm et pour une anode de 1.3 cm de diamètre [3]. La formation des points chauds à l'anode commence à 0.4 KA

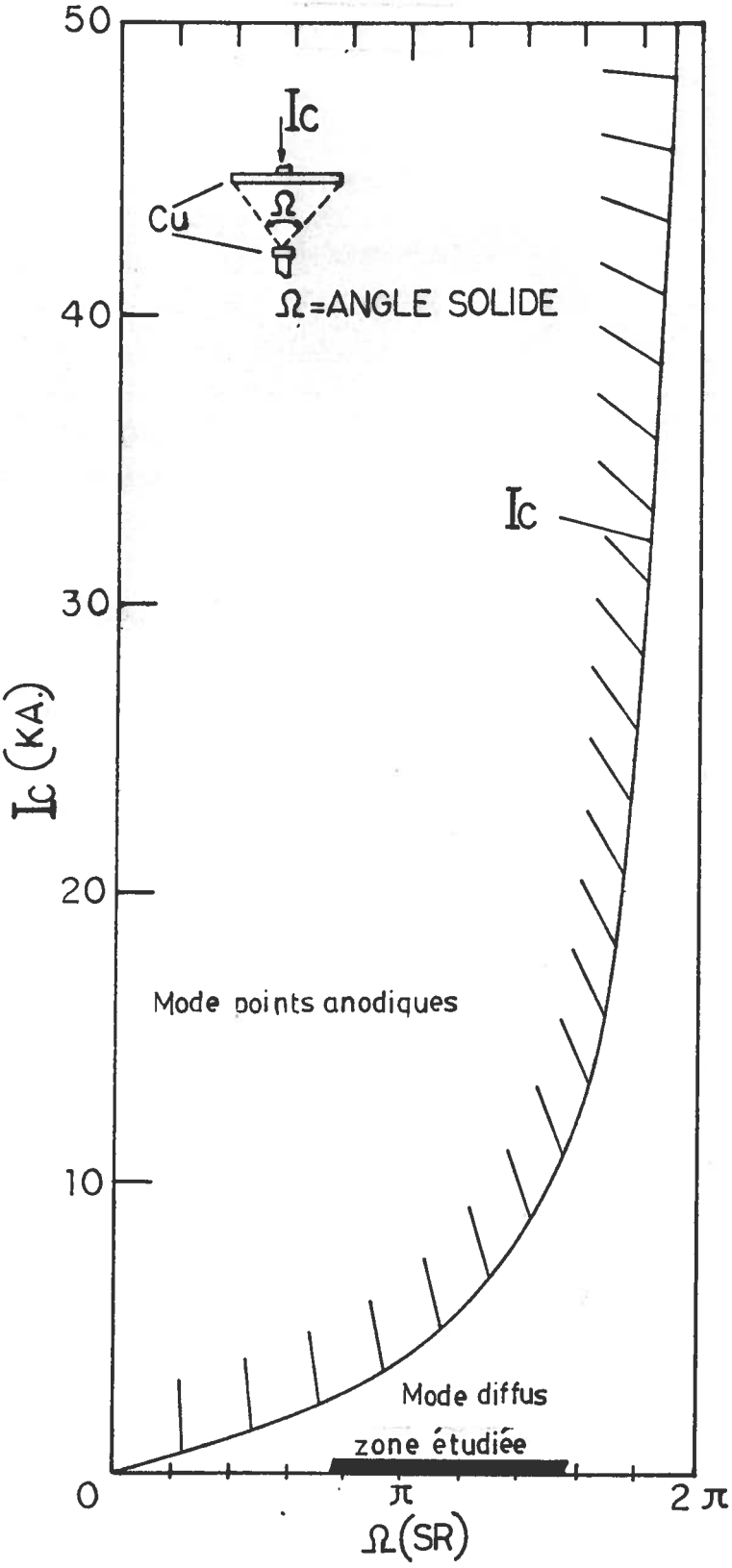


Figure 1.3 Valeur du courant critique I_c en fonction de l'angle solide sous-tendu par l'anode par rapport à la cathode et indiquant la formation de points chauds à l'anode [7]

d'arc baisse radicalement d'une façon subite [8,9]. À cette baisse du voltage moyen est associée des oscillations très importantes de la tension d'arc (Fig. 1.4). On attribue ceci à une variation locale très prononcée de la densité du plasma juste devant l'anode [7].

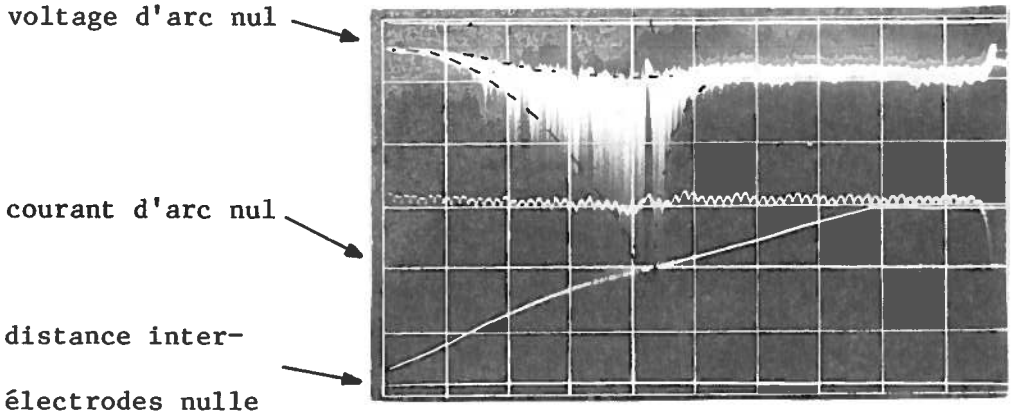


Figure 1.4 Oscillograme typique montrant la variation dans le voltage de l'arc sous vide avec une augmentation de la séparation des électrodes (anode en cuivre de 1.3 cm de diamètre, séparée de 3 cm à 5 cm avec une cathode en cuivre pendant 150 ms) [3]

À ce stade, on observe à l'anode des points lumineux qui commencent à créer une érosion du matériau la constituant.

En augmentant encore le courant d'arc, la tension de l'arc croît d'une façon constante. Le taux d'érosion à l'anode devient de plus en plus prononcé, l'anode participe à la conduction du courant d'arc au même titre que la cathode [3,10,11,12].

Le passage du mode "diffus" au mode "points anodiques" se fait très rapidement. L'espace occupé par l'arc est devenu très restreint, l'arc semble filamenteux.

Les mécanismes principaux qui contrôlent l'arc sous vide dans sa transition du mode diffus au mode points anodiques dépendent de la géométrie des électrodes, de la constitution des électrodes, de la forme du courant et du vide particulier considéré. Dans ces conditions expérimentales, les phénomènes qui mènent au mode points anodiques peuvent être une constriction magnétique du plasma dans l'espace inter-électrodes, une fusion partielle ou une évaporation locale de l'anode ou une combinaison de ces différents effets [13,14,15].

Notre étude portant sur la collection du courant à l'anode dans le mode diffus peut aider à faire le choix ou à mettre l'accent sur le phénomène qui amène à la formation de points chauds à l'anode. La constriction magnétique imposerait un resserrement du courant vers le centre de l'anode tandis qu'une fusion à l'anode favoriserait une uniformité de la collection du courant.

1.3 Importance des points cathodiques

Le courant émis de la cathode n'est pas réparti uniformément sur la surface cathodique. Le courant est au contraire, émis à partir d'un certain nombre de sites microscopiques: les points cathodiques. La valeur du courant par site peut être de l'ordre d'un ampère pour un diamètre du point d'émission inférieur au micron; cette haute

densité de courant entraîne un échauffement local intense qui mène à une évaporation du matériau et à la formation d'un microcratère.

Chaque microcratère émet des ions qui créent un champ magnétique qui réagit avec les microcratères environnants, la tendance est que ceux-ci s'écartent [16]. Cet effet est aussi accentué par le degré de contamination de la cathode [17]. Ces phénomènes sont d'autant plus importants que le courant d'arc est fort.

Cela implique que les microcratères occupent tout l'espace cathodique disponible.

De ce fait la forme géométrique des électrodes conditionne la distribution des produits d'érosion issus de la cathode [18].

1.4 Distribution angulaire des flux issus de la cathode

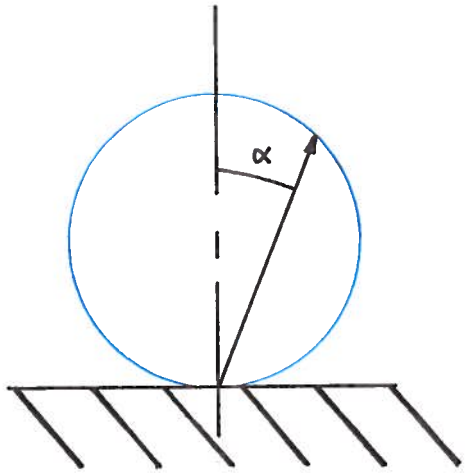
Les points chauds cathodiques, d'un arc sous vide, sont donc la source d'électrons, d'atomes neutres et ionisés et de macroparticules. Les distributions spatiales de ces différents flux, constituant les produits d'érosion, sont très différentes.

1.4.1 Le plasma

Il a été observé que la distribution angulaire du flux de plasma composé d'électrons et d'atomes ionisés, issue des points cathodiques correspond de façon approximative à une distribution en cosinus

[9,19,20,21,22]: comme l'illustre la figure 1.5, la valeur du flux $\Gamma(\alpha)$ dans une direction donnée (α) est proportionnelle au cosinus de l'angle alpha par rapport à la normale à la surface cathodique.

$$\Gamma(\alpha) = n\ v_i \cos(\alpha)$$



Cathode

Figure 1.5 Valeur du flux de plasma en provenance de la cathode en fonction de l'angle alpha

De plus une expérience se servant d'une cathode plane très mince, a permis de montrer que la distribution est encore en cosinus [23]. Au cours de l'essai la cathode est perforée et on retrouve la même forme de distribution de part et d'autre du plan cathodique (Fig. 1.6).

1.4.2 Les neutres

Il a été observé que les neutres émis des points chauds cathodiques, composés d'atomes métalliques et de particules métalliques, possèdent une distribution totalement différente de celle du plasma [19,20,21,24,25]. Le flux des neutres a sa distribution essentiellement concentrée près du plan de la cathode. Une partie importante des neutres peut donc retourner se condenser sur la cathode.

L'émission du flux d'atomes neutres venant de la cathode représente moins de 1% du flux total [20]. Ils sont émis des points cathodiques et peuvent être ionisés au voisinage de la cathode.

On constate de nombreux dépôts métalliques sur la cathode. Ce sont des macroparticules qui peuvent être émises de la cathode. Elles représentent un très gros pourcentage du taux d'érosion cathodique. La distribution de la grosseur des particules émises des points cathodiques donne une décroissance de leur nombre avec l'augmentation de leur grosseur [26].

1.4.3 L'érosion de la cathode

L'érosion à la cathode est surtout due aux particules neutres. La masse perdue à la cathode par ces particules constitue approximativement 80% du taux total d'érosion [20].

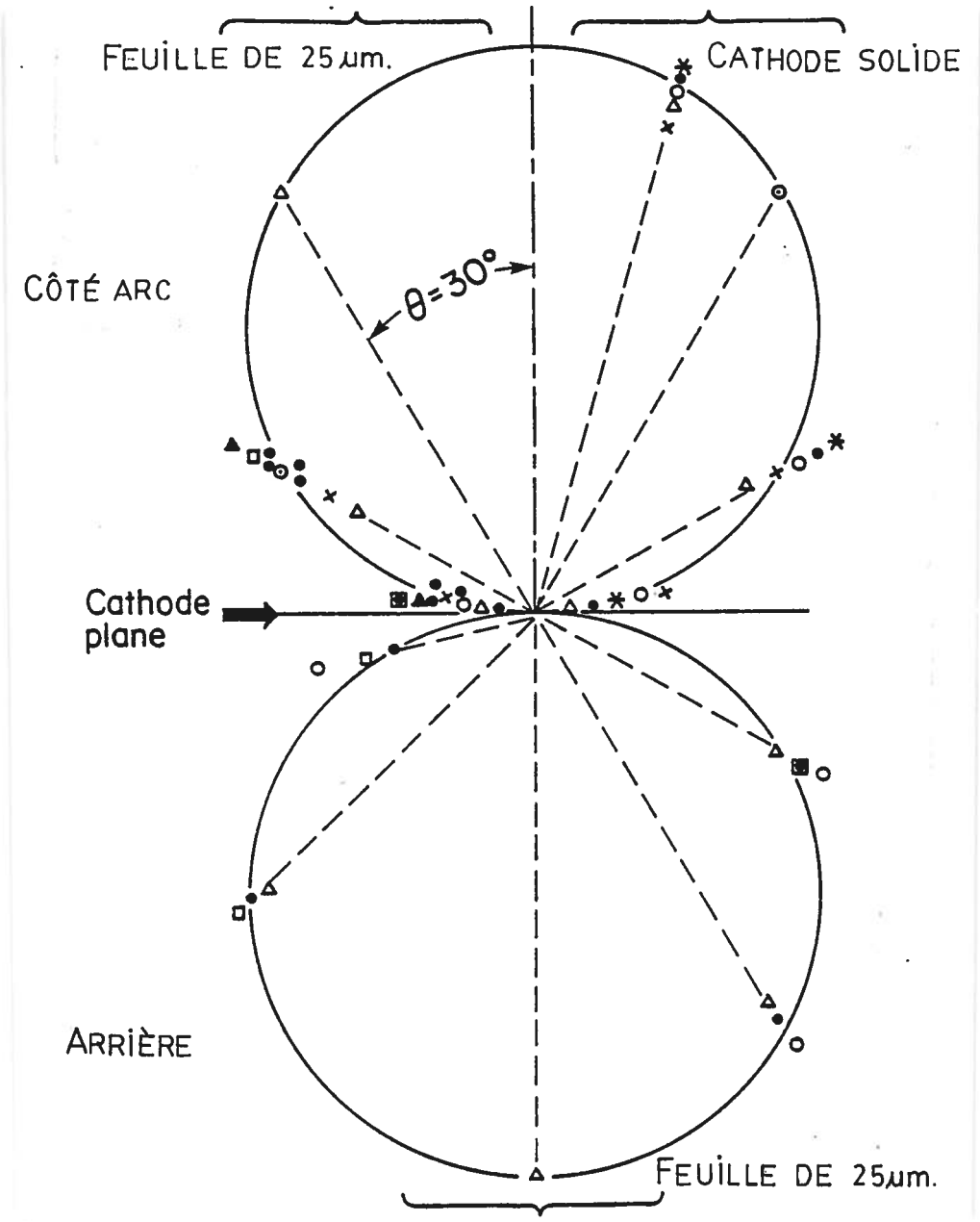


Figure 1.6 Distribution angulaire en cosinus (côté arc) du flux ionique émis par la cathode. Dans le cas d'une cathode mince perforée durant le test, la distribution en cosinus est conservée autant à l'avant qu'à l'arrière de la cathode [23]

C'est donc une faible fraction des produits d'érosion qui intervient dans le phénomène de conduction du courant d'arc.

Ceci donne que le flux total émis a une distribution pointée dans le plan de la cathode.

1.5 Distribution à l'anode des flux issus de la cathode

Une certaine quantité du métal perdue à la cathode se retrouve à l'anode et possède une distribution qui est le reflet de la façon dont est déposée le flux de particules émises par les points cathodiques.

1.5.1 Distribution à l'anode d'un dépôt métallique

Une étude sur les particules émises par la cathode et déposées sur l'anode a été effectuée par Kutzner et al, en 1970 [24]. La cathode utilisée est en cuivre avec un diamètre de 15 mm et une anode cylindrique de 30 mm de diamètre. Le courant d'arc est de 150 Amp et le vide à l'intérieur de l'enceinte d'environ 10^{-5} torr.

Les résultats suivants sont rapportés:

a) Le flux de particules émises par la cathode n'est pas diffusé uniformément dans toutes les directions. La figure 1.7 montre que le rapport entre la masse déposée à l'anode et celle émise de la cathode en fonction de la dis-

tance inter-électrodes est très différent entre le flux réel et un flux isotrope (courbe pointillée); une cathode munie d'un écran à hauteur variable montre l'existence d'une diffusion importante tangentiellement à la surface de la cathode soit de 18 à 28% de la perte de la masse cathodique.

b) La distribution de la densité de masse déposée sur l'anode est déterminée au moyen de la spectrographie par fluorescence de rayon X. Sur la figure 1.8 sont représentées toutes les valeurs relatives de densité de flux pour deux distances inter-électrodes. On constate la diminution de la pente et l'augmentation de la surface de condensation lorsque la distance inter-électrodes augmente. La densité du flux condensé sur l'anode dans l'axe de l'arc décroît très rapidement et pour cette expérience on trouve que pour une distance inter-électrodes passant de 1 à 7 mm la densité de flux central sur la surface de l'anode passe de 1086,5 à 38,05 $\mu g/C\ cm^2$.

c) On peut représenter graphiquement la densité de flux des particules émises par la cathode et condensées sur l'anode en fonction de l'angle alpha déjà défini précédemment. La figure 1.9 représente la distribution du flux pour deux distances inter-électrodes, on constate que le flux principal est dirigé le long de l'axe de l'arc et que pour les

Figure 1.7 Relation du rapport entre la masse déposée à l'anode (Δma) et la masse déposée à la cathode (Δmc) en fonction de la distance entre les électrodes [24]. La courbe en pointillé indique la masse théorique déposée sur l'anode si le flux était isotrope dans toutes les directions

Figure 1.8 Distribution de la densité du flux de particules sur la surface [24]. R représentant la distance à partir du centre de l'anode

Figure 1.9 Distribution du flux de particules intercepté par une anode plane sous-tendant pour une distance inter-électrodes de 7 mm un angle solide αa de 65° (a) et pour une distance de 1 mm un angle solide αa de 86° (b) [24]

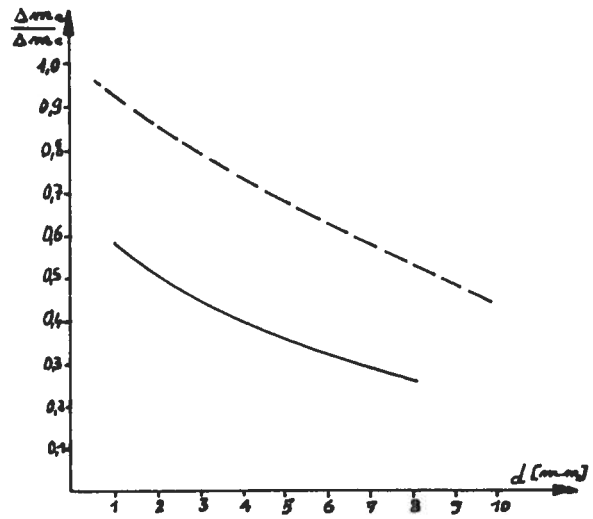


Fig. 1.7

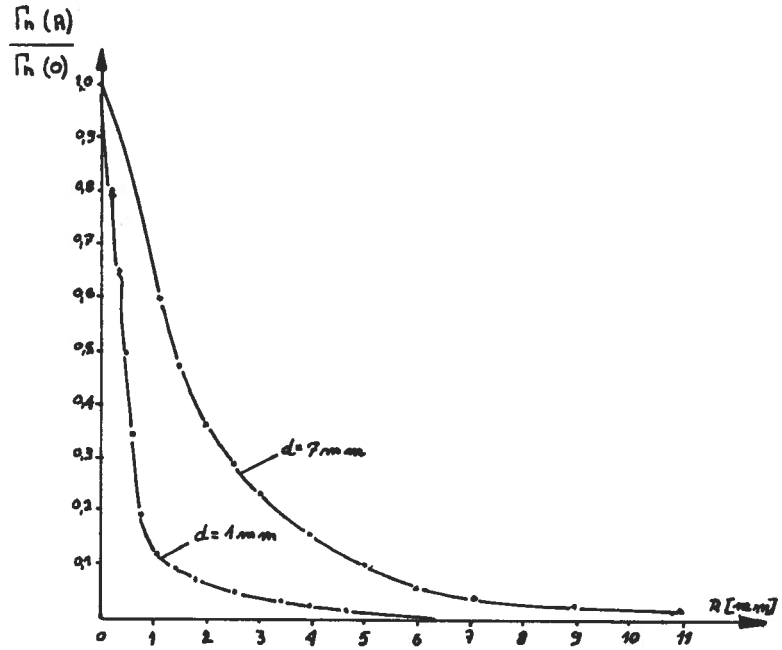


Fig. 1.8

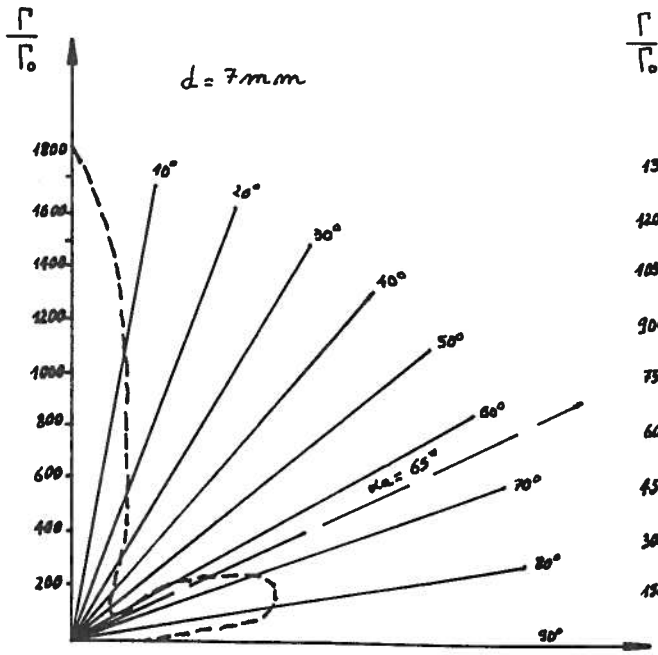


Fig. 1.9a

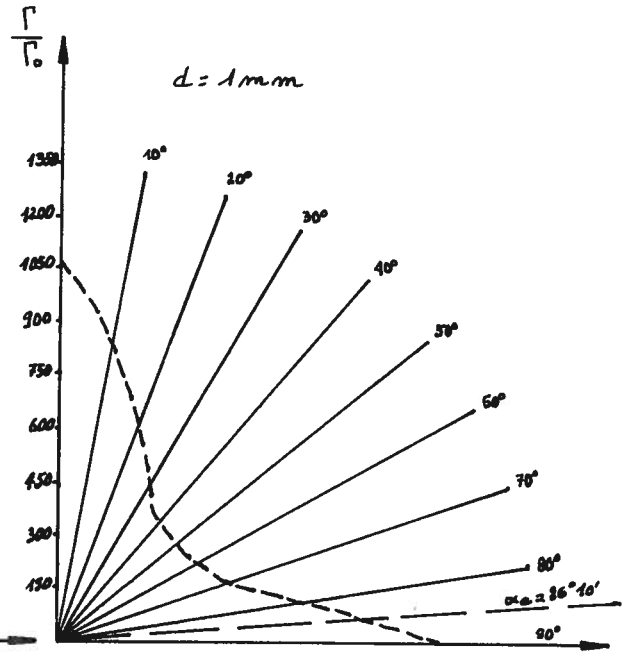


Fig. 1.9 b

plus grandes distances inter-électrodes ce flux augmente au détriment du flux tangentiel à la cathode.

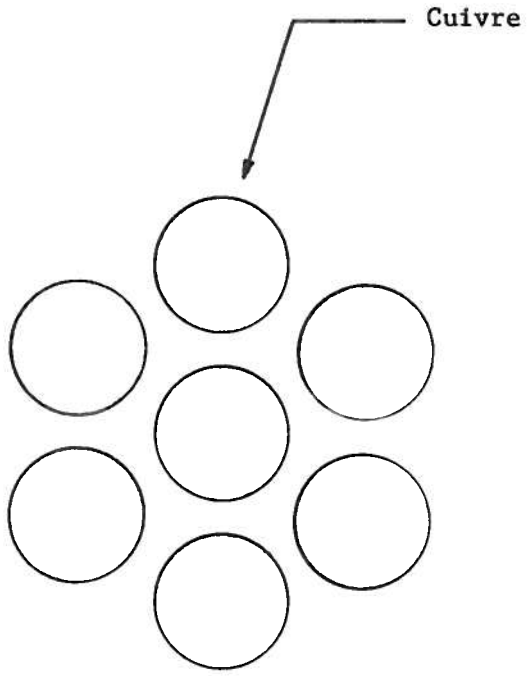
On constate donc de cette recherche que le flux de particules n'est pas diffusé uniformément: il existe un flux perpendiculaire et un autre tangentiel au plan de la cathode; de plus sur l'anode la répartition est plus uniforme si la distance inter-électrodes croît, par contre le flux tangentiel est atténué.

1.5.2 Distribution du courant sur une anode composée de sept éléments

Une expérience portant sur la distribution du courant à l'anode a déjà été effectuée [27]. L'anode utilisée était composée de sept éléments circulaires dont un placé au centre comme l'indique la figure 1.10. Les résultats obtenus dans le mode diffus ont montré que l'électrode centrale qui ne correspond qu'à environ 15% de la surface totale collecte néanmoins environ 30% du courant total le reste étant partagé assez équitablement entre les six autres éléments.

La conclusion de l'auteur [27] est que la distribution de la densité de courant est plus forte au centre qu'à la périphérie de l'anode.

Figure 1.10 Vue de dessus de l'anode utilisée pour connaître la distribution du courant [27]. Six éléments circulaires en cuivre sont centrés sur un septième



2. Contexte théorique

Dans le chapitre précédent nous avons indiqué que la distribution du flux de plasma en cosinus venant de la cathode a été observée par plusieurs auteurs et il a été observé aussi que la trajectoire du plasma est balistique: en effet cette distribution en cosinus est conservée dans le vide de la chambre expérimentale quelque soit la distance à partir de la cathode. Nous allons donc faire l'hypothèse que cette distribution en cosinus est également préservée dans l'espace inter-électrodes, c'est-à-dire qu'elle n'est pas perturbée par l'existence de l'arc et le passage du courant.

Cette hypothèse étant faite, nous allons pouvoir calculer la distribution du plasma à la surface de l'anode et en considérant que cette dernière se comporte comme un simple collecteur de courant nous allons en déduire la distribution du courant collecté à la surface anodique.

2.1 Distribution de la densité de courant à l'anode

Le flux de plasma émis de la surface cathodique a sa distribution en cosinus. Si ce flux est simplement balistique, c'est-à-dire s'épand d'une manière non collisionnelle en direction de l'anode, on peut imaginer le modèle suivant:

le flux de plasma émis se propage sans interaction avec l'arc et donc se retrouve entièrement devant l'anode sans avoir eu de perturbation

dans sa distribution. Dans ce cas la distribution de la densité du plasma $n(\alpha)$ devant l'anode est de la même forme que la distribution du flux ionique mis de la cathode. On retrouve donc une dépendance seulement sur le cosinus de l'angle par rapport à la normale à la surface cathodique.

$$n(\alpha) = n_o \cos(\alpha)$$

avec $n\alpha$ proportionnel au flux émis de la cathode.

De notre première hypothèse, le flux de plasma est purement balistique et donc se rend devant l'anode en conservant sa distribution d'origine et donne ainsi le plasma dans lequel l'anode tirera un courant. Cependant une deuxième hypothèse est nécessaire pour connaître la distribution de la densité de courant sur l'anode. On considère que l'anode dans le mode diffus est un simple collecteur passif de plasma qui ne perturbe pas l'arc (comme c'est le cas dans le mode points anodiques). Cette hypothèse permet de supposer que chaque unité de volume de plasma adjacent à l'anode est capté par cette dernière sans qu'il y ait aucune interaction avec le plasma limitrophe. Dans ce cas la densité de courant à l'anode est donnée par:

$$J(\alpha) = Jo \cos(\alpha)$$

avec J_o proportionnel au courant total dans l'arc lui même.

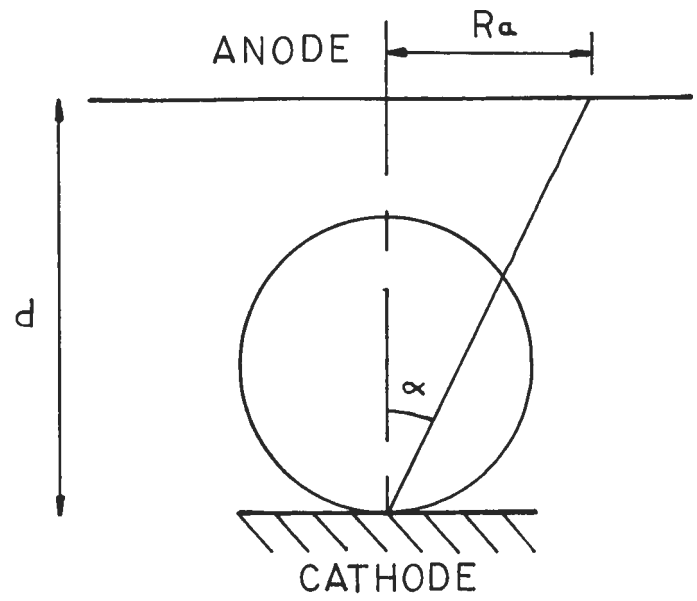


Figure 2.1 Distribution en cosinus du flux de plasma émis de la cathode

Pour une anode concave sphérique centrée sur une cathode de faible dimension, toutes les distances cathode-anode à parcourir par le flux de plasma avant de se retrouver devant l'anode sont identiques et l'influence de la distance parcourue n'intervient pas. Par contre, pour une anode plane, la densité du flux émis de la cathode subit l'effet de cette distance supplémentaire à parcourir par rapport à celle de l'axe de l'arc. Elle est inversément proportionnelle au carré de la distance parcourue. On obtient donc pour la distribution de la densité de courant pour une anode plate en fonction de l'angle alpha (Fig. 2.1):

$$J(\alpha) = J_o \left(d^2/(R_a^2 + d^2)\right) \cos(\alpha)$$

$$J(\alpha) = J_o \left(\cos(\alpha)\right)^3$$

avec R_a la valeur du rayon anodique où on évalue la densité et d la distance inter-électrodes.

La distribution de la densité de courant à l'anode en fonction ou rayon anodique est donnée par l'expression suivante:

$$J(R_a) = J_o d^3/(R_a^2 + d^2)^{3/2}$$

La correction avec la distance joue un rôle important. Si elle est négligeable pour les distances cathode-anode fortes, son rôle devient prépondérant, avec celui de la distribution spatiale, pour la densité de courant à la périphérie de l'anode pour de faibles séparations.

Nos hypothèses nous ont amenés à supposer que la distribution de la densité du plasma devant l'anode est semblable à la distribution du flux émis de la cathode et qu'ainsi la distribution du courant collecté à l'anode est en relation avec la densité du plasma devant l'anode. Nous relions donc ainsi le flux de plasma émis de la cathode et le courant collecté par l'anode.

2.2 Influence de la distance inter-électrode sur la distribution de courant à l'anode

Considérons une anode plane et circulaire de rayon a pour laquelle nous désirons estimer la répartition du courant d'arc. Les paramètres agissant sur la distribution de la densité de courant sont a, d et le courant d'arc sur lesquels nous avons un contrôle, la distribution en cosinus du plasma et l'inverse carré de la distance parcourue qui affecte la densité du plasma.

Nous supposons que le courant collecté en un point de l'anode est proportionnel à la densité du plasma existant devant ce point de l'anode; ce plasma originaire de la cathode comme nous l'avons vu plus haut permet d'établir la relation suivante:

$$I(\alpha) \propto n(\alpha)$$

qui est soutenue par les deux hypothèses précédemment citées dans le paragraphe 2.1 et qui nous permet de définir l'interaction cathode-anode.

Comme il n'existe pas de dépendance azimutale vue la symétrie du système, en intégrant on obtient:

$$I(\alpha) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\alpha} J(\rho)\rho \, d\rho \, d\theta$$

$$I(\alpha) = J_o \, 2\pi \, d^2 \left(1-\cos(\alpha)\right)$$

En intégrant sur toute la surface on doit obtenir le courant total d'arc. Ceci permet de déterminer la valeur du paramètre J_o nécessaire pour un courant donné.

On obtient:

$$Itotal = J_o \, 2\pi \, d^2 \left(1-\cos(\alpha_m)\right)$$

avec α_m égal à arctg(a/d), représentant l'angle maximum sous-tendu par l'anode pour une distance d donnée et d'où on extrait J_o en fonction du courant total appelé I_o.

Ceci donne:

$$I(\alpha) = I_o \left(1-\cos(\alpha)\right)/\left(1-\cos(\alpha_m)\right)$$

La figure 2.2 nous donne la distribution de la densité de courant en fonction du rayon anodique pour différentes distances inter-électrodes. On constate que pour de faibles distances la distribution est piquée. La densité est faible pour les anneaux extérieurs, mais dès que la distance croît, un gain a lieu pour les anneaux extérieurs au détriment de ceux de l'intérieur et la distribution s'uniformise.

Ces résultats théoriques obtenus, en considérant que le flux ionique émis de la cathode est balistique et que l'anode tire son courant du plasma comme un simple collecteur, vont exactement dans le même sens que ceux observés expérimentalement par Kutzner et al,: la collection à l'anode n'est pas uniforme. Cependant la distribution s'uniformise à mesure que la distance inter-électrodes croît mais elle n'est jamais existante.

L'expérience portant sur la distribution du courant à l'anode effectuée par Mitchell appuie aussi notre modèle [27]. Ce résultat va dans le même sens que celui indiqué par la distribution en cosinus, c'est-à-dire que le courant au centre de l'anode est plus important. Il faut noter qu'une émission isotrope (et non en cosinus) du plasma cathodique donne également une collection de courant non uniforme ($J = J_o \cos^2 \alpha$) à l'anode. Cependant nous avons choisi la distribution en cosinus car elle a été observée expérimentalement.

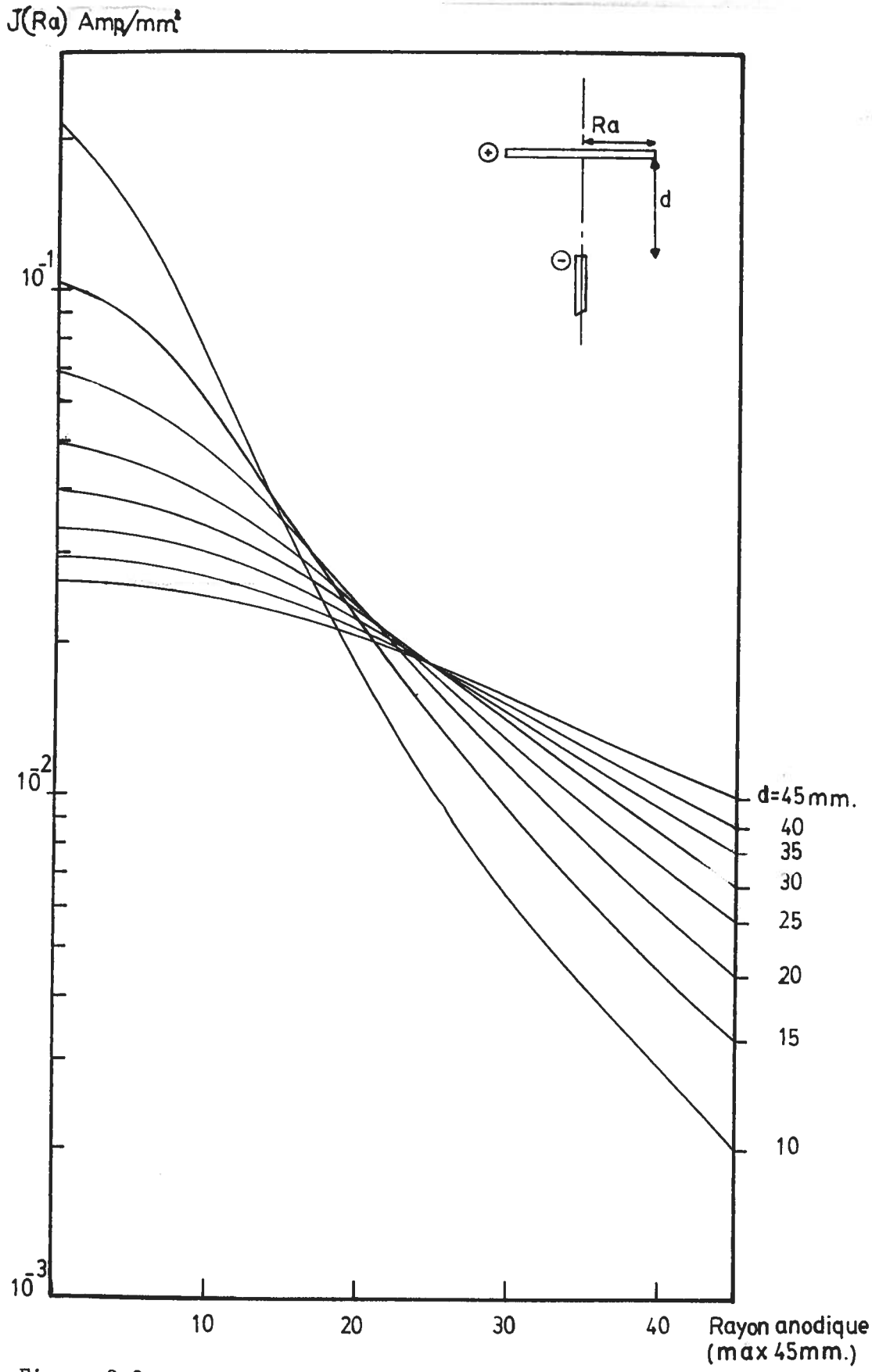


Figure 2.2 Distribution de la densité de courant en fonction du rayon anodique pour différentes distances inter-électrodes selon le modèle

3. Expérience

Ce chapitre est composé de trois sections. En premier lieu nous présentons et discutons du choix de l'équipement qui a été utilisé pour la mesure de la répartition du courant à l'anode d'un arc électrique dans le vide. Dans la deuxième partie nous décrivons le montage expérimental utilisé et les relations entre les différents équipements. Dans la dernière section nous présentons les instruments utilisés pour la prise et l'enregistrement des mesures expérimentales.

3.1 Appareillage

Il est très important de rester pendant toute l'expérience dans le mode diffus. Les études faites démontrent que la valeur du courant critique I_c est inversement proportionnelle à d, la séparation inter-électrodes et proportionnelle au diamètre de l'anode. Ces deux paramètres réunis ensemble indiquent, que pour de petits angles sous-tendus par l'anode par rapport à la cathode, le courant critique est faible [8]. Sur la figure 1.3 la zone sombre indique notre plage d'opération. On voit que l'on est bien en dehors du mode points anodiques.

3.1.1 Le choix de l'anode

L'anode est circulaire et pour les raisons suivantes, est choisie de grande taille:

- En choisissant un diamètre de grande taille on augmente la valeur du courant critique pour la formation de points chauds à l'anode et on est plus libre sur la distance inter-électrodes.

- L'anode est composée de nombreux anneaux. Chaque anneau doit être suffisamment grand pour deux raisons. Ceci évite tout échauffement aux endroits où la densité est importante et permet la collection d'un courant notable aux endroits où elle est faible. Pour les anneaux centraux et périphériques cela rentre en ligne de compte pour de meilleurs résultats.

- L'anode en plus devra être massive. Cette masse empêche toute élévation notable de température pendant l'essai.

L'anode est composée d'une tige centrale et de huit anneaux concentriques séparés par des feuilles de mylar de 1/1000 de pouce d'épaisseur assurant l'isolation entre chaque couronne. Les diamètres extérieurs des anneaux sont en partant du centre de l'anode de 3;10;20;30;40;50;60;70 et 90 mm.

La surface de l'anode a été sablée avec du papier fin. Le flanc de l'anneau extérieur est isolé pour éliminer toute collection de courant sur le bord de l'anode.

3.1.2 La cathode

La cathode est une tige en cuivre de 3 mm de diamètre. Ce faible diamètre de l'électrode négative est bien important pour être certain de la localisation de l'origine du plasma. Le cuivre est choisi car ce matériau a été le plus employé et il est bien connu. Le taux d'érosion du cuivre dans le vide est de $1.15*10^{-4}$ g par coulomb d'électricité issu de la cathode [3].

Pendant l'expérience, diverses cathodes seront essayées et on notera l'importance de leur géométrie. Pour l'expérience les distances inter-électrodes sont faibles. Cela facilitera l'amorçage de l'arc et évitera la formation de points chauds anodiques qui compromettrait l'isolation entre chaque anneau.

3.1.3 Isolation de la cathode

La cathode est recouverte sur toute sa longueur par de la céramique afin d'éviter que le pied de l'arc ne soit ailleurs que sur l'extrémité de la cathode.

Les caractéristiques techniques de la céramique sont les suivantes:

- Résistivité : 10^{-10} ohm/cm
- Tension de claquage: 270 V/mm
- Température maximum: 1538°C

Sachant que la température de fusion du cuivre dans des conditions normales est de 1084°C et de 2567°C pour la température de vaporisation, la céramique peut intervenir dans la constitution du plasma si la température de vaporisation est atteinte. Pour éviter de polluer le plasma la durée de l'arc sera très brève: elle sera limitée à 200 μs.

3.2 Montage expérimental

L'expérience a lieu dans une enceinte cylindrique de 150 mm de rayon et de hauteur 450 mm. Cette grande taille s'avère nécessaire car en mode diffus l'arc se répand énormément. L'enceinte possède quatre fenêtres de tailles différentes réservées aux différents équipements comme l'indique la figure 3.1. Une cinquième fenêtre est située sur le dessus de l'enceinte.

De la première fenêtre de grande taille, une tige isolante supporte l'anode composée d'une tige centrale et de huit anneaux. Chaque anneau est relié par un fil électrique à une prise BNC permettant la communication avec l'extérieur. Cette technique a déjà été employée avec succès pour la mesure de la distribution du courant à l'anode d'un arc en mouvement [28]. Chaque fil passe par un transformateur de courant et est connecté à un point commun qui est relié à la source d'alimentation (Fig. 3.2).

L'alimentation en courant est assurée par la décharge d'un condensateur de 0.033 F et de constante de temps de 60 ms. Le courant

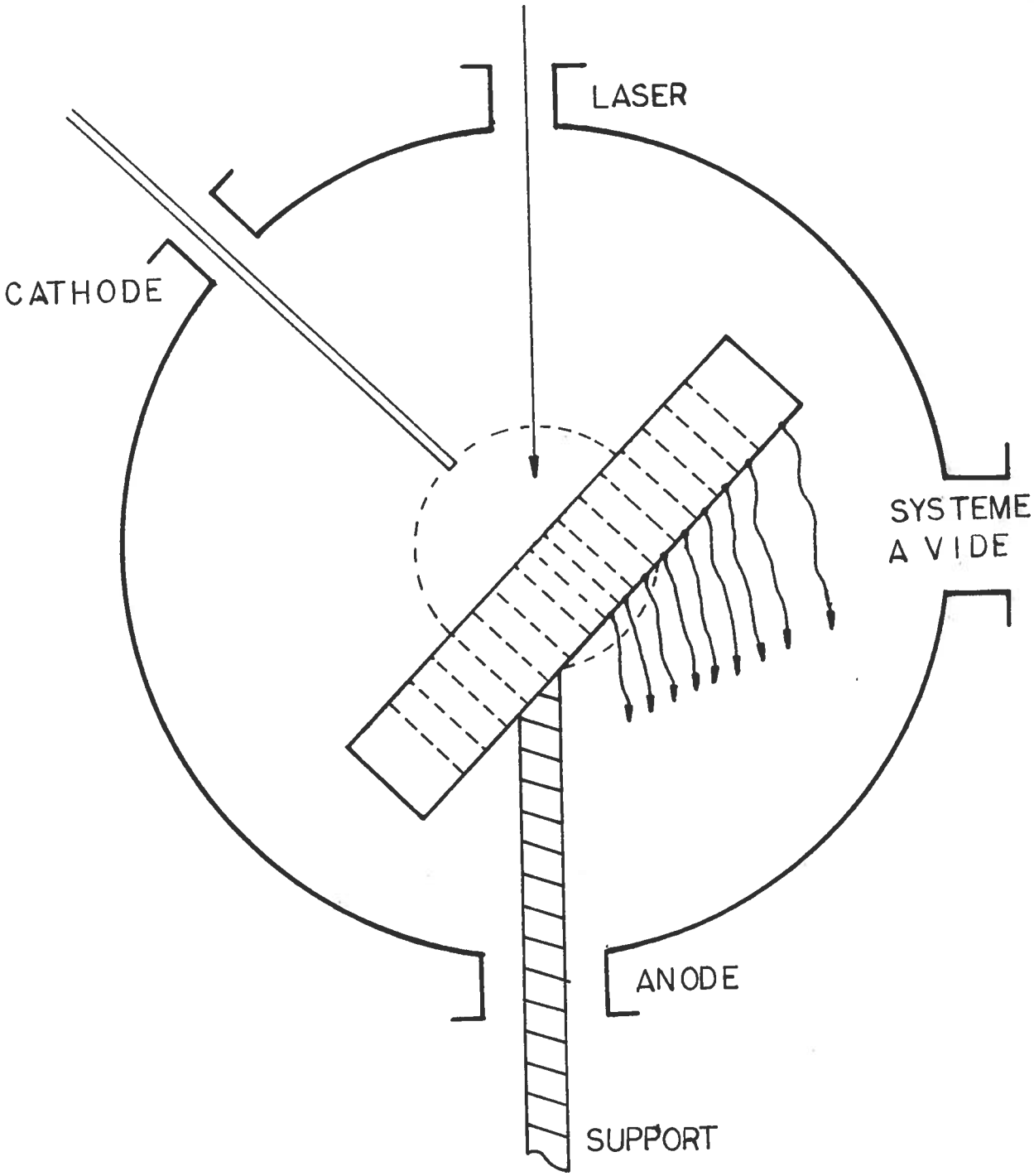


Figure 3.1 Schéma de l'enceinte expérimentale. La disposition présentée ici est vue du dessus. L'anode se trouvant au centre de l'enceinte à vide est composée de neuf anneaux circulaires séparés par un isolant

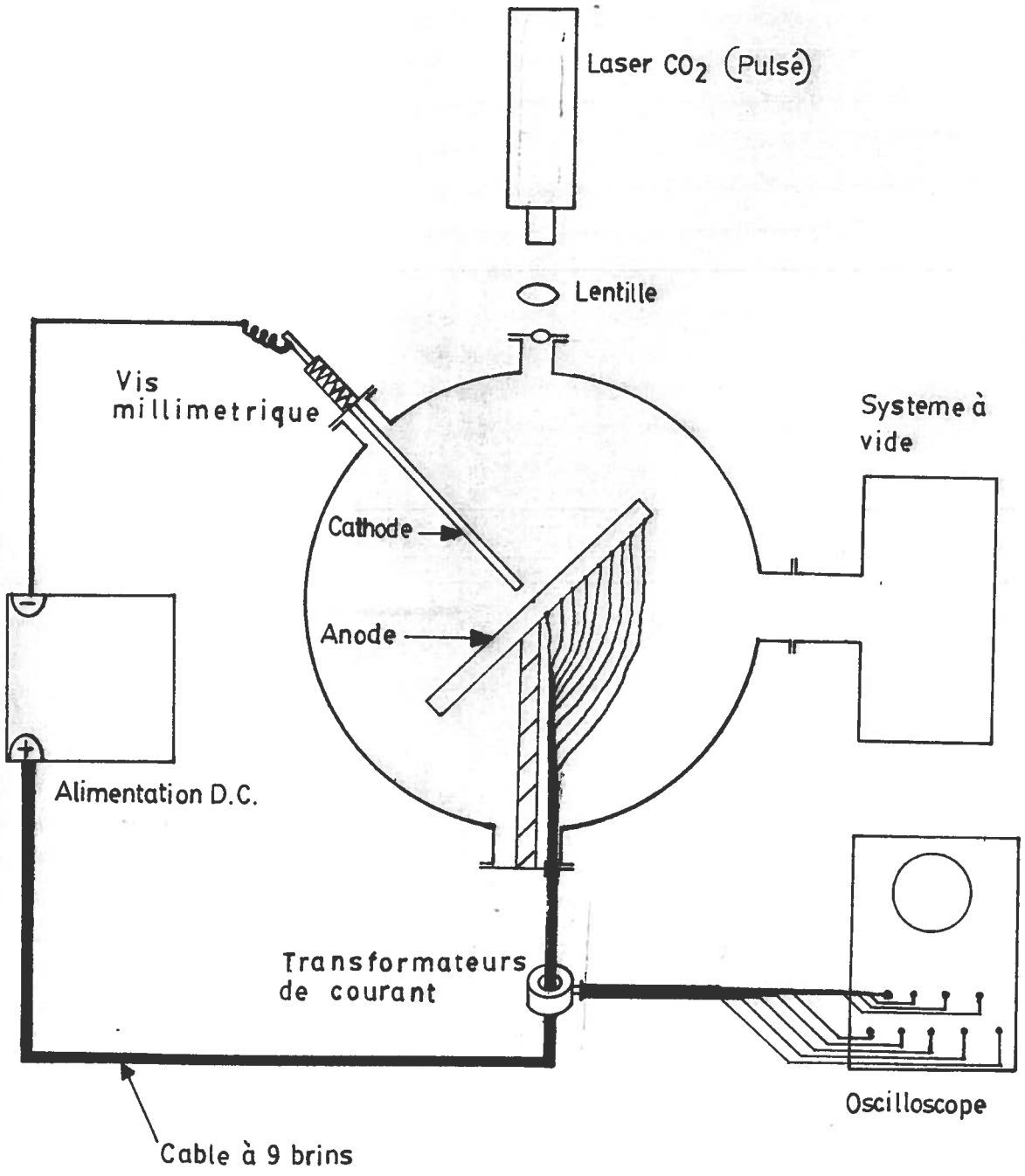
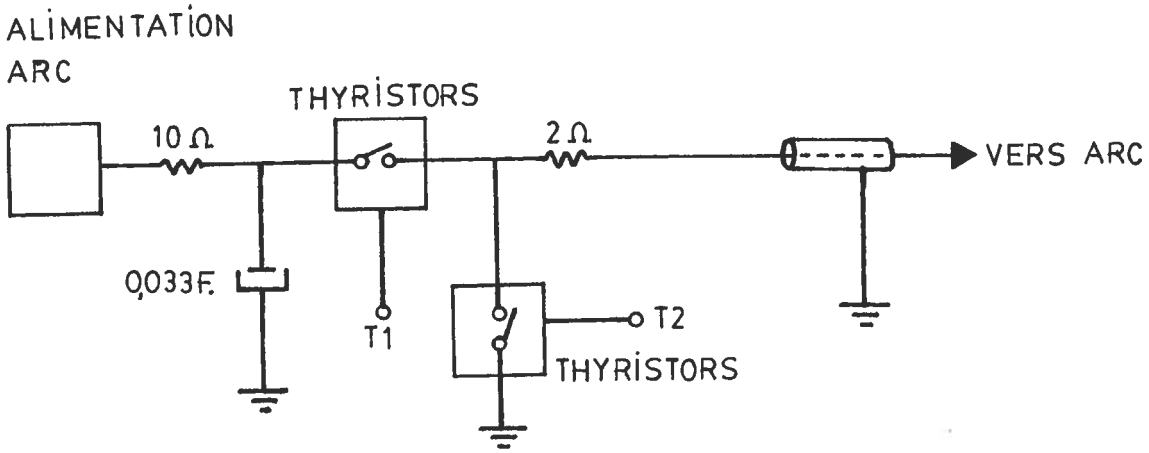


Figure 3.2 Vue d'ensemble du montange expérimental

d'arc peut aller jusqu'à un maximum de 250 Amp en chargeant le condensateur à 450 V. La mesure du courant total de l'arc est réalisée à l'aide de deux transformateurs de courant afin de vérifier si l'anode collecte tout le courant passant par la cathode. L'unique impulsion de courant est mise en forme carrée à l'aide de thyristors (Fig. 3.3).



T1: étalissement du courant d'arc

T2: rupture du courant d'arc

Figure 3.3 Schéma des circuits électriques de déclenchement de l'arc

Au cours de l'expérience la durée de la décharge peut être variée de 25 μs à 1 ms avec un temps de montée de 50 μs et un temps de descente inférieur à 10 μs. Cette courte durée permet quasiment de maintenir le courant d'arc constant durant l'essai, la constante de temps de décharge du condensateur étant beaucoup plus grande que la durée de l'arc. Elle évite également une détérioration trop rapide des électrodes.

L'anode se trouvant au centre de l'enceinte est inclinée à 45° par rapport au plan de la fenêtre d'entrée.

Perpendiculaire au plan de l'anode, une fenêtre de petite taille sert de support à la cathode. L'axe de symétrie de la cathode et celui de l'anode sont confondus. Le prolongement de la cathode à l'extérieur de l'enceinte donne sur une vis millimétrique servant à faire varier de 0 à 45 mm la distance inter-électrodes.

L'étanchéité est assurée par un joint torique. Cela a l'avantage de permettre, sans ouvrir la chambre à vide, de faire varier la position de la cathode. On évite ainsi de reconditionner les électrodes à chaque ouverture de l'enceinte et d'obtenir une série de résultats où la distance inter-électrodes varie de façon quasi continue.

L'incertitude sur le positionnement et le centrage de la cathode vis-à-vis de l'anode est ainsi minimisée.

Dans le prolongement de l'axe de la fenêtre de l'anode se trouve une ouverture supportant une fenêtre de sel par où le faisceau d'un laser pulsé au Co_2 pénètre. L'amorçage de l'arc sous vide est fait par claquage d'une impulsion de ce laser. Entre le laser et la fenêtre de sel se trouve une lentille au germanium dont la longueur focale est de 200 mm. Le point de focalisation doit être dans l'épaisseur d'un anneau et près du centre pour que le plasma métalli-

que créé par le laser se rapproche le plus possible de la cathode et évite une liaison entre deux anneaux.

Pour éviter la réflection du faisceau laser sur l'anode polie, on y a effectué un trou de faible dimension. Ce dernier sert de cratère au plasma laser ce qui facilite l'amorçage de l'arc sous vide.

Une caméra est en regard sur une fenêtre de verre neutre de grande section. L'objectif de la caméra est au foyer sur le plan de l'axe cathode-anode. L'ouverture de la fenêtre ayant lieu sur le haut de l'enceinte à vide permet d'obtenir une vue totale de l'intérieur et ainsi d'avoir une idée sur la forme de l'arc.

La dernière fenêtre est de grande taille et donne l'accès à un système à vide qui évacue, dans les conditions de l'expérience, l'enceinte jusqu'à une pression de 10^{-5} torr.

3.3 Diagnostics

En jouant sur la charge du condensateur on obtient différents courants d'arc. On peut ainsi voir l'influence du courant et de la distance inter-électrodes. En faisant varier le courant d'arc, et en fixant la distance inter-électrodes, on doit obtenir une série de courbes et cela jusqu'au courant critique. En faisant varier la distance inter-électrodes, et en fixant le courant, on doit obtenir une autre série de courbes.

Le système des anneaux concentriques est simple et permet une lecture instantanée du courant. La lecture des courants s'effectue au moyen de neuf transformateurs de courant "Pearson". Ces transformateurs ont une précision de plus ou moins 1% avec une bande passante de 100 Mhz et un courant maximum possible de 5 KAmp. Ils saturent si la charge nette les traversant devient supérieure à 0.19 Amp. s.

À l'aide d'un générateur de signal il a été établi que pour une onde sinusoïdale de 1 Mhz l'interaction entre les anneaux adjacents est moins de 1%. Le temps de durée de l'arc étant de 150 μs minimum et une fois l'arc établit sa variation instantanée étant faible, aucune correction de la lecture du courant n'est requise.

Chaque transformateur de courant est relié à une des multiples entrées de deux oscilloscopes. La synchronisation des oscilloscopes a lieu en même temps que le déclenchement du laser. Les bases de temps des oscilloscopes sont en rapport avec la durée de l'arc et le balayage du point lumineux sur l'écran est enregistré sur photo.

Des mesures qualitatives peuvent être fournies par la caméra. Les temps d'exposition sont très longs de façon à intégrer toute la décharge. Un film panchromatique polaroid (type 57) à haute rapidité (3000 ASA) est utilisé. On ne peut pas faire correspondre directement la densité de plasma à la luminosité enregistrée sur le film, celle-ci étant fonction de plusieurs paramètres. On peut quand même obtenir une indication sur la forme de l'expansion entre les deux électrodes.

La figure 3.4 montre l'image obtenue par la caméra en l'absence d'arc. Sur la cathode est fixé un papier millimétré, on a ainsi les dimensions du système cathode-anode.

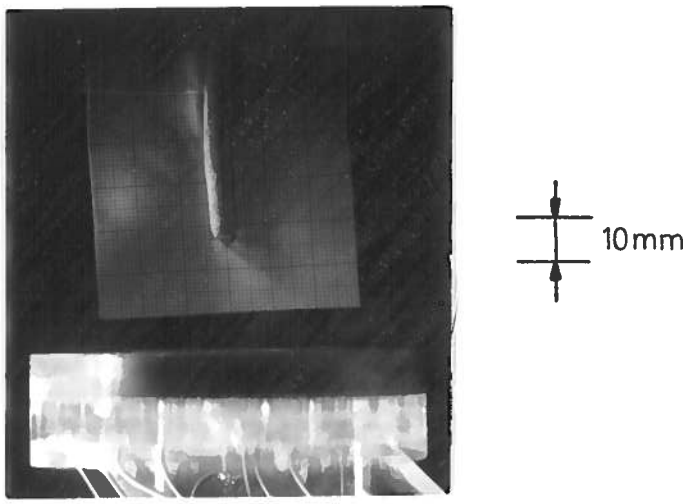


Figure 3.4 Photographie prise en l'absence d'art avec la caméra placée au-dessus de l'enceinte à vide. La vue présentée ici montre l'intérieur de l'enceinte où l'on voit tout le système cathode-anode. Sur la cathode est fixée un papier millimétré pour indiquer les dimensions du système

4. Résultats et interprétation

Chaque fraction d'anode est reliée à un transformateur de courant qui par le biais d'un oscilloscope indique la distribution du courant à l'anode en fonction de la pression, de la distance inter-électrodes, de la tension d'arc et du courant total de l'arc. Le contrôle de cette chaîne d'appareils est effectué avant chaque nouvelle expérience.

Sauf avis contraire, pendant toutes les expériences, les temps d'enregistrement sont de 200 µs. Les oscillographes montrent que ceci donne suffisamment de temps à l'arc pour s'équilibrer. Le système n'a pas le temps de s'échauffer et on évite ainsi une usure de l'isolant de la cathode. À chaque essai la mesure a lieu simultanément pour les neuf anneaux et dans la partie où l'arc a largement atteint son équilibre soit pendant les derniers 150 µs. On évite ainsi toute influence possible du laser. Chaque résultat indiqué sur les graphiques correspond à la moyenne de cinq mesures. De plus sur les graphiques la dimension des points présentés est supérieure aux fluctuations des valeurs rattachées à ces points. Par conséquent, nous ne représenterons pas de marge d'erreur. Pour conditionner la cathode vingt essais d'arc sont effectués avant la prise d'une série de mesures.

4.1 Distribution de la densité de courant à l'anode

Une série de mesures pour différents courants d'arc a été

effectuée. Ces courants sont de 58, 137 et 204 Amp. La pression à l'intérieur de l'enceinte est de 10^{-5} torr. Pour un courant d'arc I_o donné le paramètre est la séparation entre les électrodes. Tant que l'on a pu amorcer l'arc on a augmenté la distance inter-électrodes. Pour de forts courants la distance de séparation atteinte est plus importante. Cela tient du fait que le voltage aux bornes du condensateur d'alimentation est plus élevé pour de forts courants et facilite ainsi l'amorçage.

Les résultats sont présentés à la Fig. 4.1 a,b,c. Les courbes données représentent la valeur de la densité de courant $J(\alpha)$ en fonction de l'angle alpha. Les densités sont calculées en divisant le courant indiqué par le transformateur de courant par la surface de l'anneau correspondant. La valeur obtenue est attribuée au centre de l'épaisseur de l'anneau en question.

La distribution de la densité de courant à l'anode s'échelonne au minimum sur trois ordres de grandeur et sa chute en fonction de l'angle alpha est très prononcée. Cela implique que le gros du courant passe par les anneaux centraux de l'anode, ce que l'on constate pour de faibles distances inter-électrodes, il est plus réparti lorsque la séparation croît comme l'indique les graphiques.

Ainsi quel que soit le courant considéré, la différence dans la densité du courant entre le premier anneau et le dernier est nettement plus marquée plus la distance inter-électrodes est faible et ce phénomène est accentué avec l'amplitude du courant. Un autre fait

Figure 4.1 Distribution de la densité de courant à l'anode en fonction de l'angle alpha pour un courant de 58 Amp (a), 137 Amp (b) et 204 Amp (c) pour différentes distances inter-électrodes. Le temps de durée de l'arc est de 200 μs.

Cette représentation en polaire a été choisie de préférence à la représentation cartésienne de la figure 2.2 car dans le cas présent les différentes courbes ne se coupent pas.

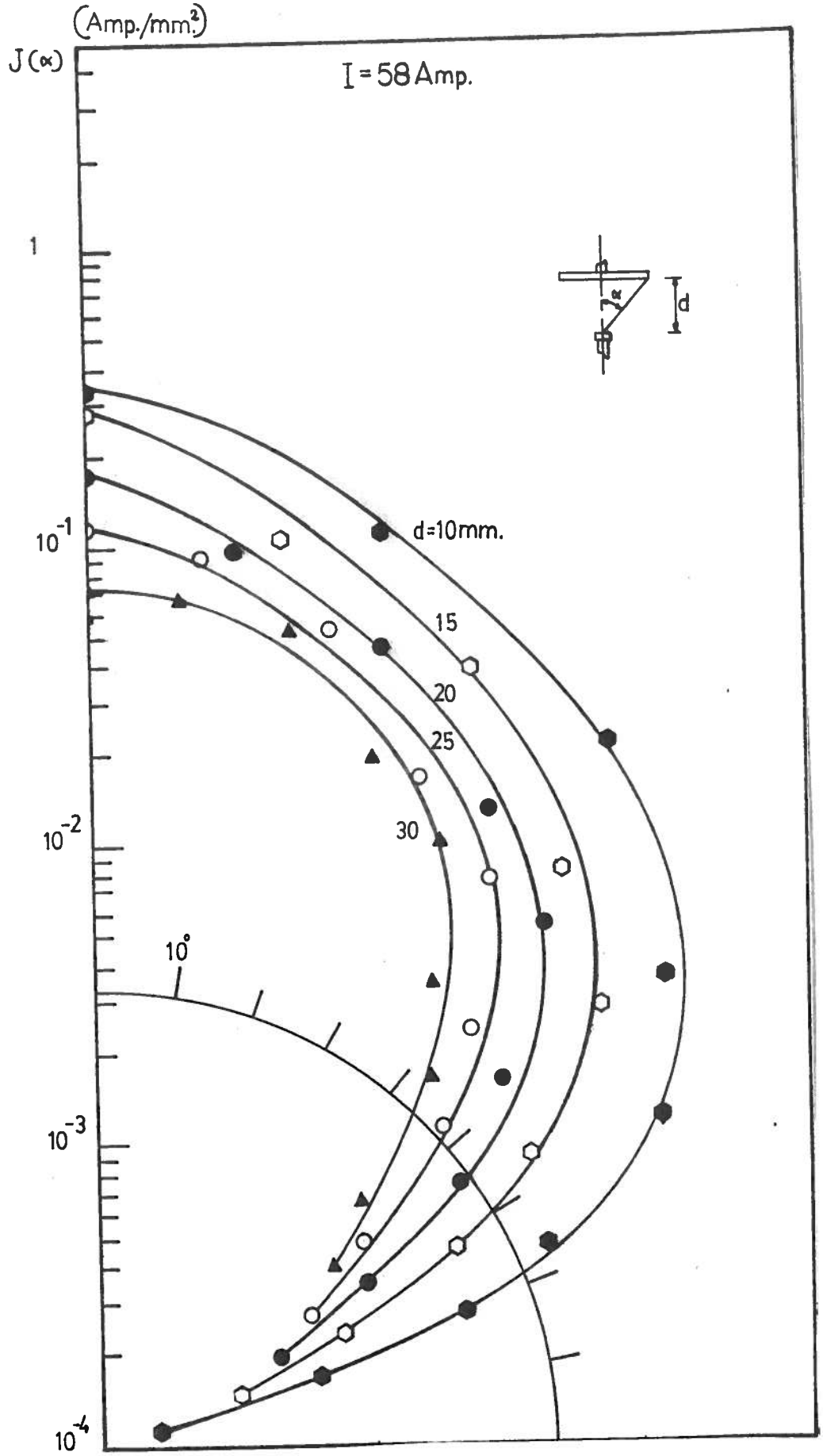


Fig.a

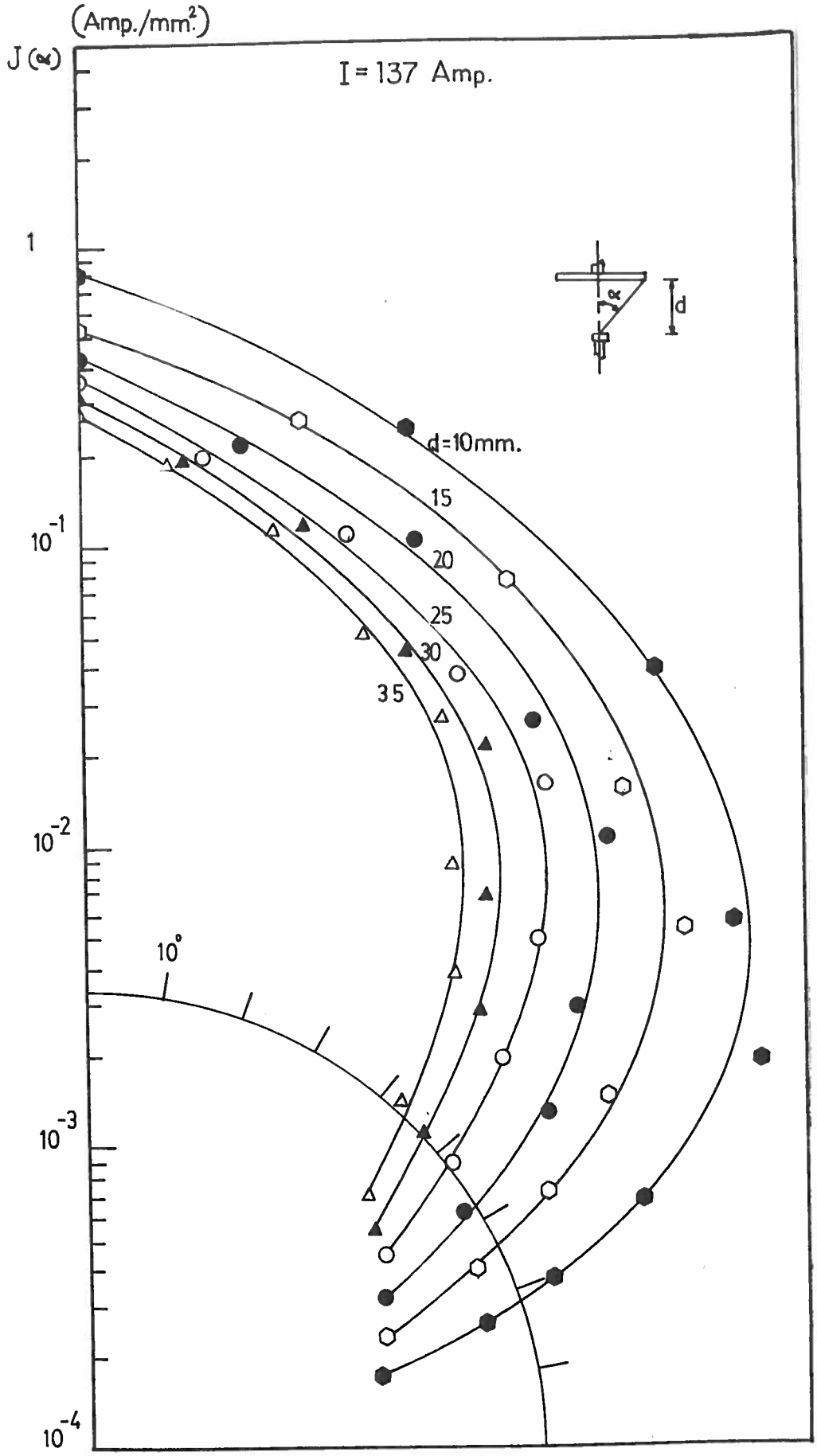


Fig. b

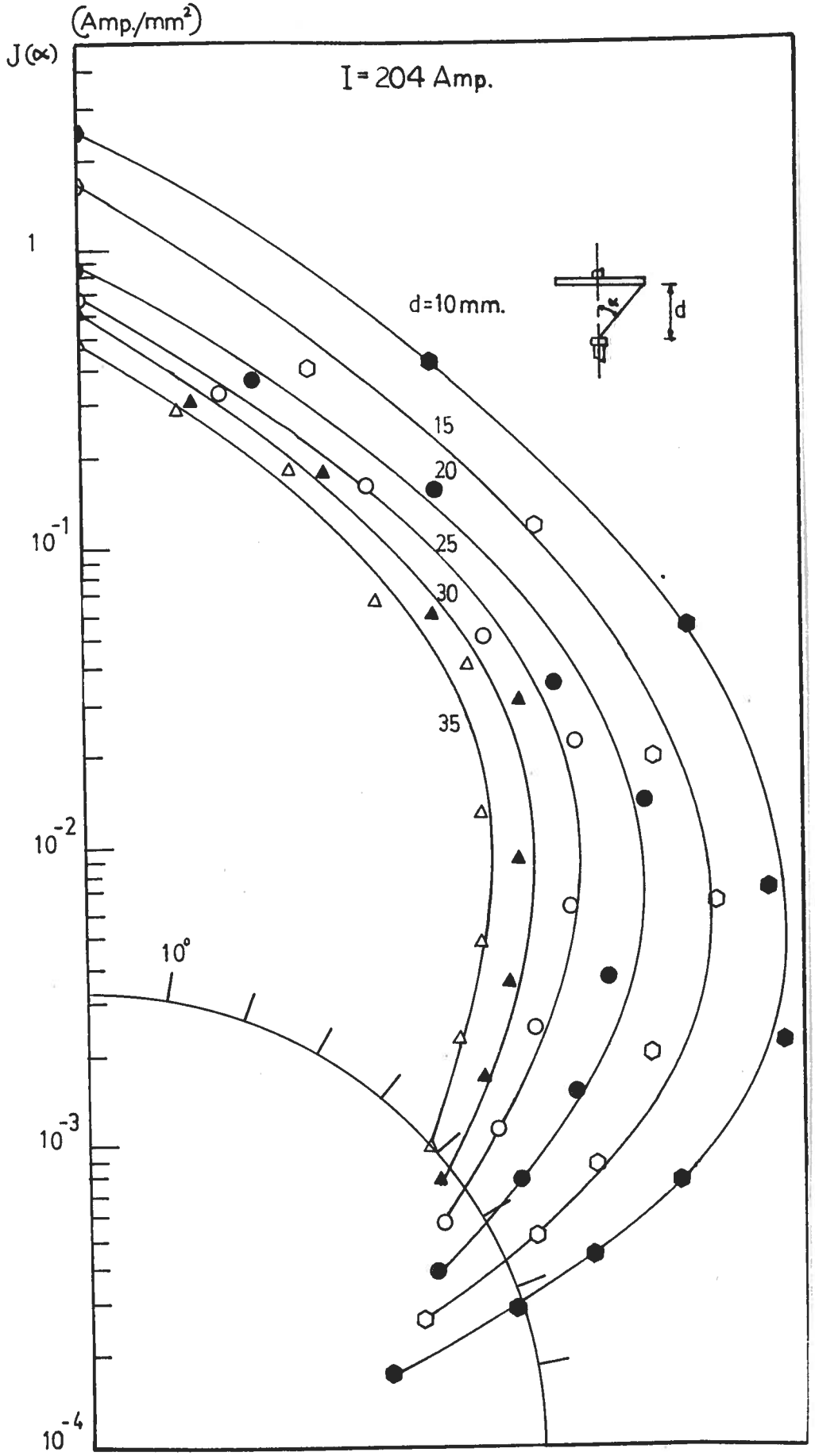


Fig. c

aussi est à souligner: plus la distance inter-électrodes devient grande et plus les courbes sont rapprochées. Ceci indique l'uniformisation de la distribution à l'anode lorsque la distance inter-électrodes est plus grande et l'influence de plus en plus faible de la séparation.

Une série de photos typiques caractérisant l'allure de l'arc pour un courant de 204 Amp est présentée à la figure 4.2. L'enveloppe de la luminosité est en forme de V, la base se situant au centre de la cathode.

En comparant ces photos avec les formes des distributions de courant on constate que le courant collecté à l'anode à l'extérieur de la partie lumineuse se situe entre 3 et 3.5% du courant total soit au maximum 7.14 Amp. Pour une petite cathode en regard d'une grande anode, en considérant graphiques et photos, l'étalement du courant d'arc est modéré. Pour une distance inter-électrodes de 35 mm, environ 77% du courant se retrouve dans les cinq premiers anneaux de l'anode ce qui ne représente que 20% de la surface anodique et le pourcentage en courant augmente si l'on diminue l'écart entre les électrodes.

Ces résultats confirment encore qu'en augmentant la distance inter-électrodes, une uniformité de la densité de courant à l'anode s'établit. Tous ces résultats expérimentaux confirment les travaux effectués par Kutzner et al, ainsi que celui de Mitchell, c'est-à-

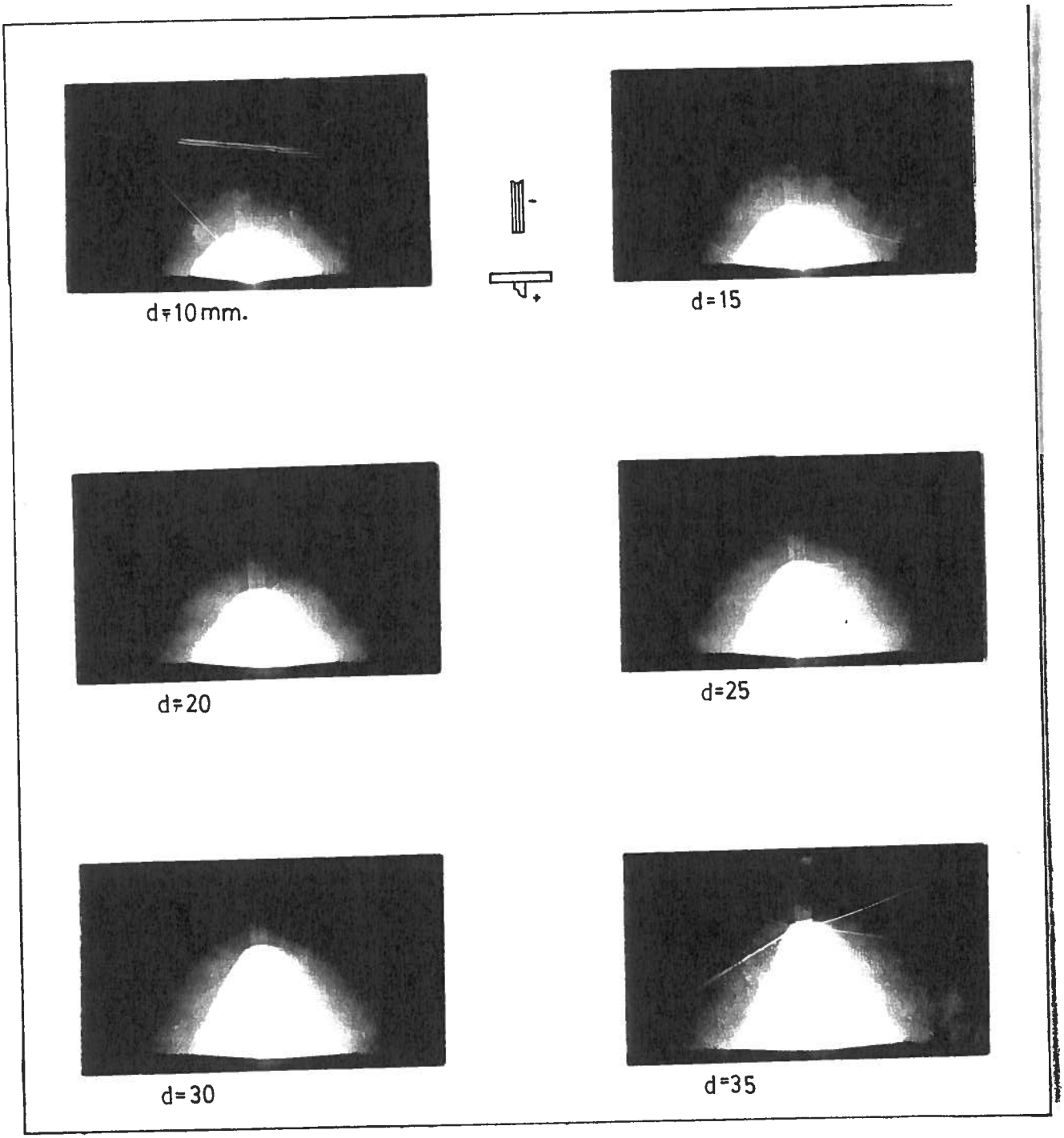


Figure 4.2 Photographies typiques de l'arc électrique dans le vide pour un courant de 204 Amp. Le diaphragme de l'objectif est réglé à 8. La cathode est en haut.

dire qu'avec une séparation plus grande des électrodes on tend vers une uniformité plus grande de la distribution.

La partie découverte de la cathode, lorsque très peu conditionnée, laisse voir les cratères d'émission seulement à sa périphérie. Une fois conditionnée, les cratères d'émission se retrouvent sur toute sa surface. La céramique, dans ces conditions d'expérience, n'est pas affectée et donc ne pollue pas le plasma émis de la cathode.

4.2 Distribution obtenue à partir d'un flux en cosinus

Dans le deuxième chapitre nous avons proposé un modèle portant sur la distribution du courant à l'anode. Le flux de plasma venant de la cathode est en cosinus et subit l'influence de la distance à parcourir avant d'atteindre l'anode.

Les résultats théoriques sont obtenus de la façon suivante. On calcule le courant collecté par chaque anneau avec l'équation suivante:

$$I(\Delta r) = \int_0^{2\pi} \int_r^{r+\Delta r} J(\rho)\rho \, d\rho \, d\theta$$

avec Δr l'épaisseur de l'anneau considéré.

On divise ensuite ce résultat par la surface de l'anneau considéré de façon à obtenir la densité de courant moyenne de l'anneau.

Sa valeur est attribuée au milieu de l'épaisseur de l'anneau comme pour les valeurs expérimentales, ce qui enlève la dépendance sur la position dans l'épaisseur de l'anneau. Des résultats théoriques sont présentés à la figure 4.3 pour un courant de 204 Amp. En comparant les résultats expérimentaux et théoriques pour cette valeur de courant anodique on constate une grande similarité. Cependant la distribution en cosinus favorise plus les anneaux extérieurs, tandis que la valeur attribuée aux anneaux intérieurs est trop faible et d'autant plus que la séparation entre les électrodes est faible. En d'autres mots, la collection du courant est déportée vers l'extérieur avec le modèle en cosinus proposé au chapitre deux (fig. 4.4).

Ce modèle comparé aux résultats expérimentaux ne tient pas compte d'un effet de resserrement plus prononcé de la distribution de la densité de courant quelque soit la séparation entre les électrodes. La distribution en cosinus ne reflète donc pas exactement le phénomène physique.

4.3 Distribution obtenue à partir d'un flux plus concentré

La distribution en cosinus comme nous l'avons vu précédemment étale la collection du courant trop vers l'extérieur. Si nous considérons que nos hypothèses portant sur un flux émis de la cathode d'une façon balistique et d'une simple collection du plasma par l'anode restent valables, la distribution du plasma en cosinus ne représente pas l'exacte réalité.

Figure 4.3 Distribution théorique de la densité de courant obtenue à l'anode avec un flux émis en cosinus de la cathode et influencé par la distance à parcourir. Le courant d'arc est de 204 Amp

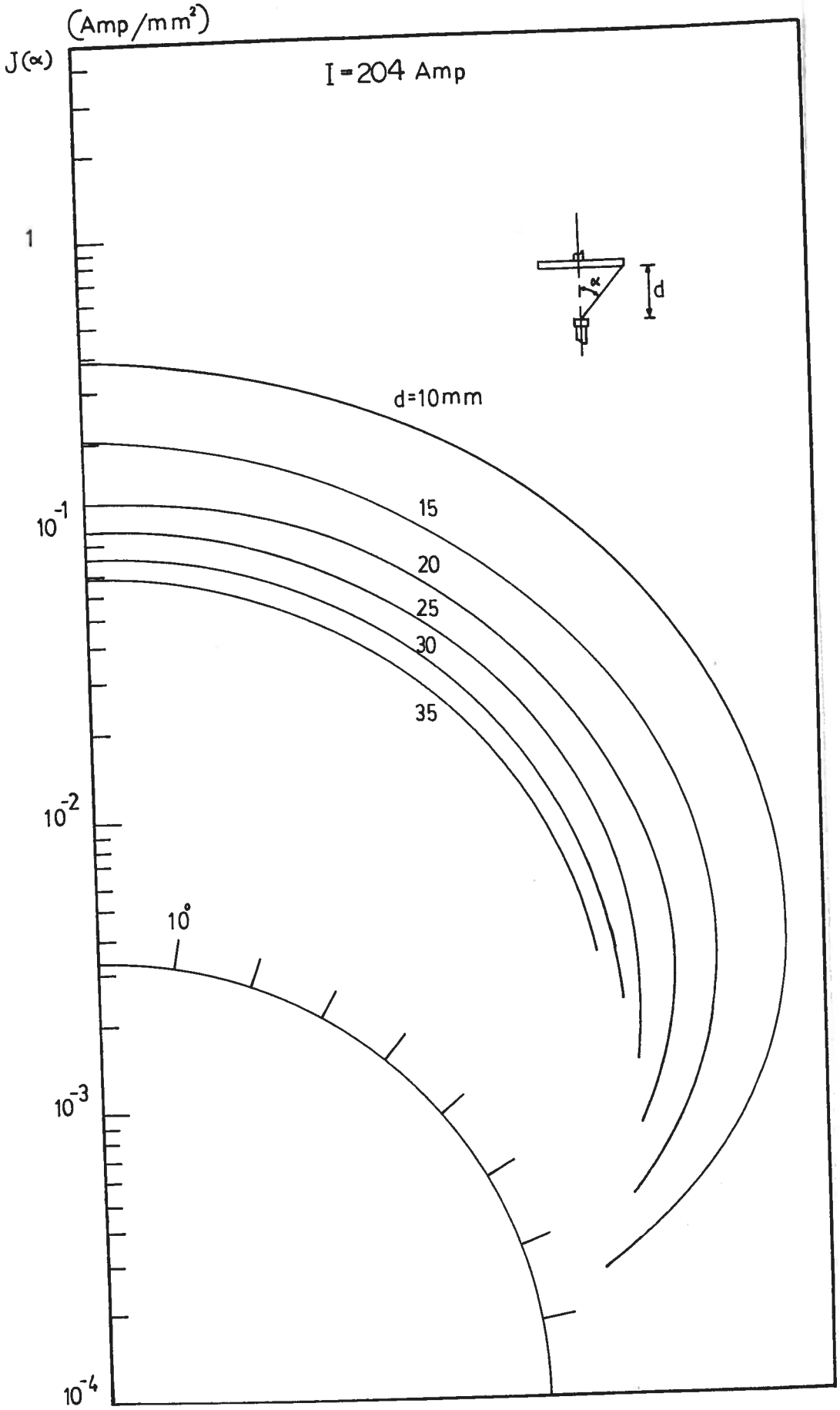
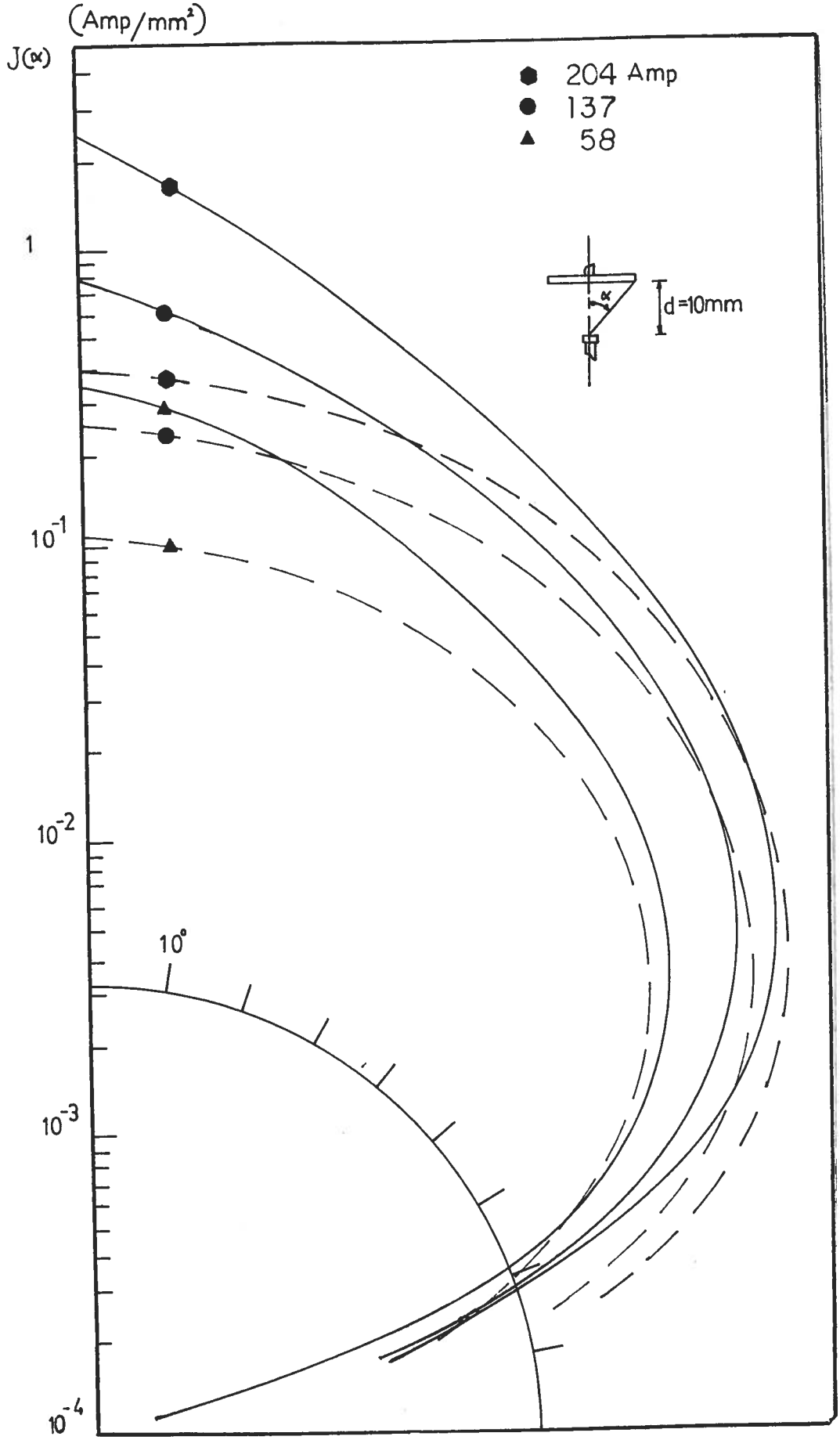

(Amp/mm²)
J(α)
I=204 Amp
1
10⁻¹
10⁻²
10⁻³
10⁻⁴
d=10mm
15
20
25
30
35
10°
α
d

Figure 4.4 Distribution de la densité de courant obtenue à l'anode pour une distance entre les électrodes de 10 mm. Les courbes en pointillé représentent les résultats théoriques (flux émis en cosinus) et les courbes en trait plein représentent les résultats expérimentaux pour des courants de 58 Amp, 137 Amp et 204 Amp


(Amp/mm²)
J(α)
204 Amp
137
58
d=10mm
1
10⁻¹
10⁻²
10⁻³
10⁻⁴
10°

Dans les expériences portant sur les plasmas produits par lasers haute puissance focalisés sur une paroi solide, l'énergie est concentrée en un point localisé de la cible tout comme dans le cas du pied de l'arc électrique situé à la cathode. Les vitesses d'expansion des plasmas produits par laser qui ont été mesurées sont comparables à celles des plasmas d'arc électrique [29,30]. Les distributions angulaires mesurées sont davantage allongées vers l'avant, c'est-à-dire pour de petits angles alpha. En faisant un parallèle avec le domaine des plasmas produits par lasers, on peut proposer que la distribution soit plus concentrée suivant l'axe cathode-anode. Les justifications physiques de cette nouvelle distribution ne nous sont pas très accessibles. La plus simple serait de considérer que le flux de plasma émis d'un cratère est surtout canalisé dans la direction normale au plan de la cathode.

Pour pallier à l'étalement constaté avec la distribution en cosinus, on choisit une distribution "elliptique" au lieu de la distribution "sphérique" en cosinus considérée précédemment.

En considérant que la distribution est elliptique et porte vers l'anode on obtient pour la distribution de la densité de plasma devant une anode plane (Fig. 4.5):

$$J(\alpha) = J_o \cos(\alpha)^3 / \left((E \sin(\alpha))^2 + \cos(\alpha)^2\right)$$

avec E le rapport du grand axe au peitt axe de l'ellipse (voir annexe 1).

E peut être considéré comme l'excentricité de l'ellipse. Quand E est égal à l'unité on retrouve la distribution en cosinus.

Pour E plus grand que l'unité, on obtient une diminution rapide de la densité de courant sur l'anode et cela d'autant plus qu'on s'éloigne du centre de l'anode. Pour de faibles distances inter-électrodes la distribution de la densité de courant est plus concentrée à l'anode. Par contre plus la distance croît, plus la densité de courant s'uniformise.

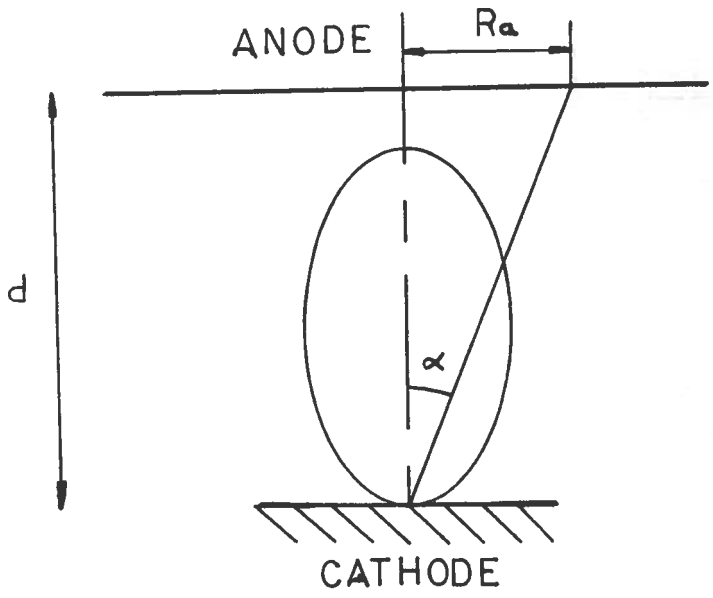


Figure 4.5 Distribution elliptique du flux de plasma émis de la cathode

Pour une anode cylindrique de rayon a, nous allons calculer la répartition du courant anodique. Il n'existe pas de dépendance azimutale. En intégrant on obtient (voir annexe 2):

$$I(\alpha) = (I_o/K_o)\ \mathrm{Ln}\left(\frac{V(2E^2 + 2E(E^2 - 1)^{\frac{1}{2}} - 1) + 1}{V(2E^2 - 2E(E^2 - 1)^{\frac{1}{2}} - 1) + 1}\right)$$

avec

$$K_o = \mathrm{Ln}\left(\frac{(\mathrm{tang}(.5\alpha_m))^2\ (2E^2 + 2E(E^2 - 1)^{\frac{1}{2}} - 1) + 1}{(\mathrm{tang}(.5\alpha_m))^2\ (2E^2 - 2E(E^2 - 1)^{\frac{1}{2}} - 1) + 1}\right)$$

$$V = \left(\mathrm{tang}\ (.5\alpha)\right)^2;\ \text{avec}\ \alpha = \mathrm{arctg}\ (R_a/d)$$

$$\alpha_m = \mathrm{arctg}\ (a/d)$$

On calcule le courant collecté par chaque anneau en variant les bornes de l'intégrale de R_a à $R_a + \Delta R_a$. On divise ensuite ce résultat par la surface de l'anneau considéré pour obtenir la densité de courant moyenne de l'anneau. Sa valeur est attribuée au milieu de l'épaisseur de l'anneau.

Le tableau I donne les valeurs de l'excentricité E en fonction du courant d'arc et de la distance inter-électrodes en mm et qui sont la meilleure correspondance entre les courbes expérimentales et celles proposées par la distribution de forme elliptique.

Ces valeurs sont obtenues par la méthode des moindres carrés.

I \ d	10	15	20	25	30	35
58 A	3.86	4.16	4.46	4.62	4.06	
137 A	2.43	3.47	3.92	4.15	5.28	5.45
204 A	4.33	4.22	4.58	4.93	5.87	5.86

Tableau I

Valeur de l'excentricité (E) en fonction du courant d'arc et de la distance inter-électrodes

On constate en premier lieu que E a une tendance à croître avec la séparation inter-électrodes pour un courant donné. Ceci s'explique par le fait que plus la séparation entre les électrodes augmente et plus l'angle sous-tendu par l'anode par rapport à la cathode diminue et pour pallier à une distribution trop rapidement uniforme, l'excentricité doit augmenter.

Pour une distance entre les électrodes fixée, la variation de l'excentricité en fonction du courant d'arc ne reflète, hormis pour les distances de 30 et 35 mm, aucun caractère progressif.

La figure 4.6 a,b,c donne la distributon de la densité de courant à l'anode pour des courants de 58, 137 et 204 Amp en fonction de l'angle alpha pour un E égale à 4.43. C'est la valeur permettant de

Figure 4.6 Distribution théorique de la densité de courant obtenue à l'anode avec un flux émis de la cathode dont la distribution est "elliptique" et influencée par la distance à parcourir.

La distribution est donnée pour des courants de 58 Amp (a), 137 Amp (b) et 204 Amp (c) pour différentes distances inter-électrodes.

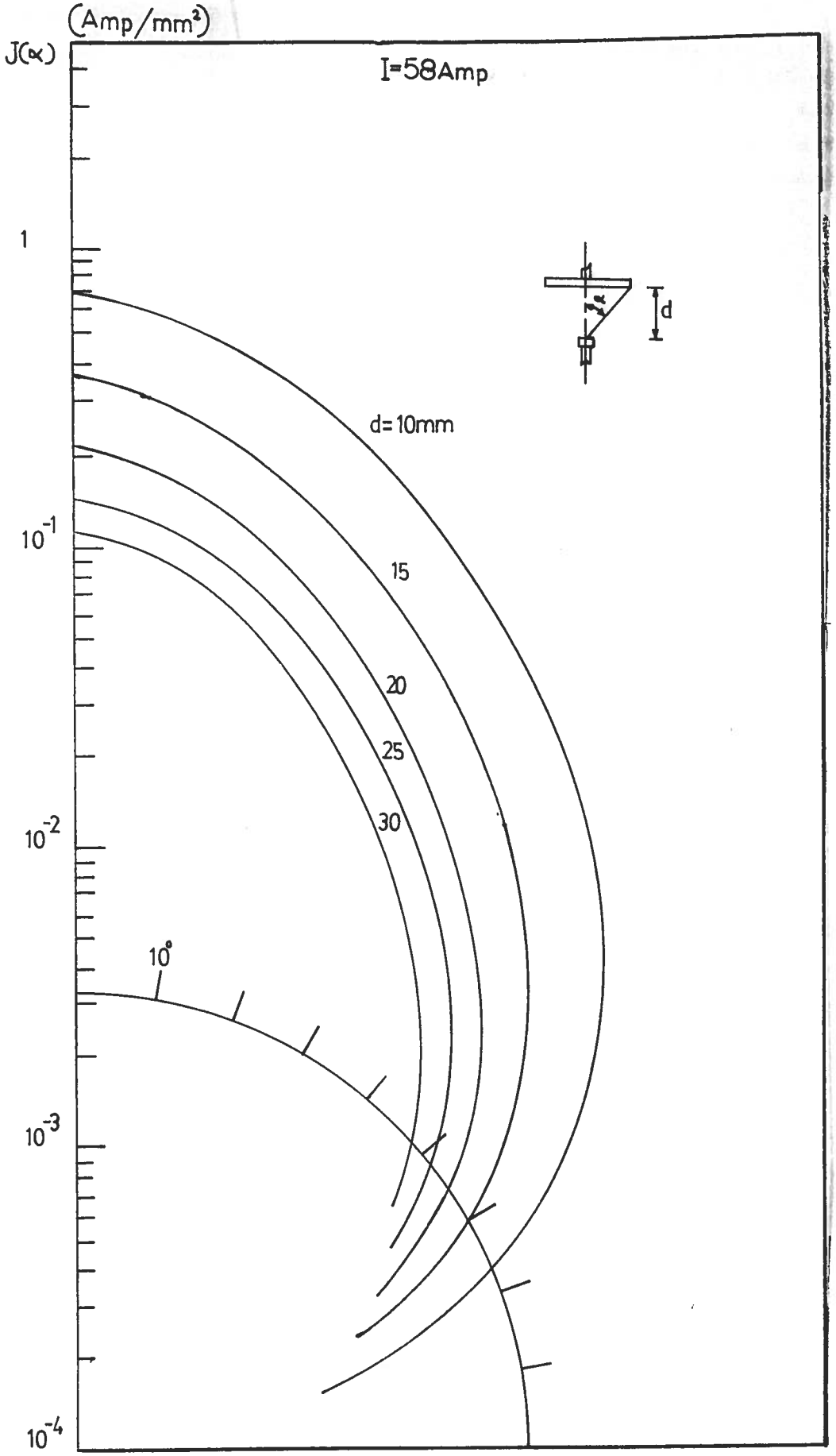


Fig. a

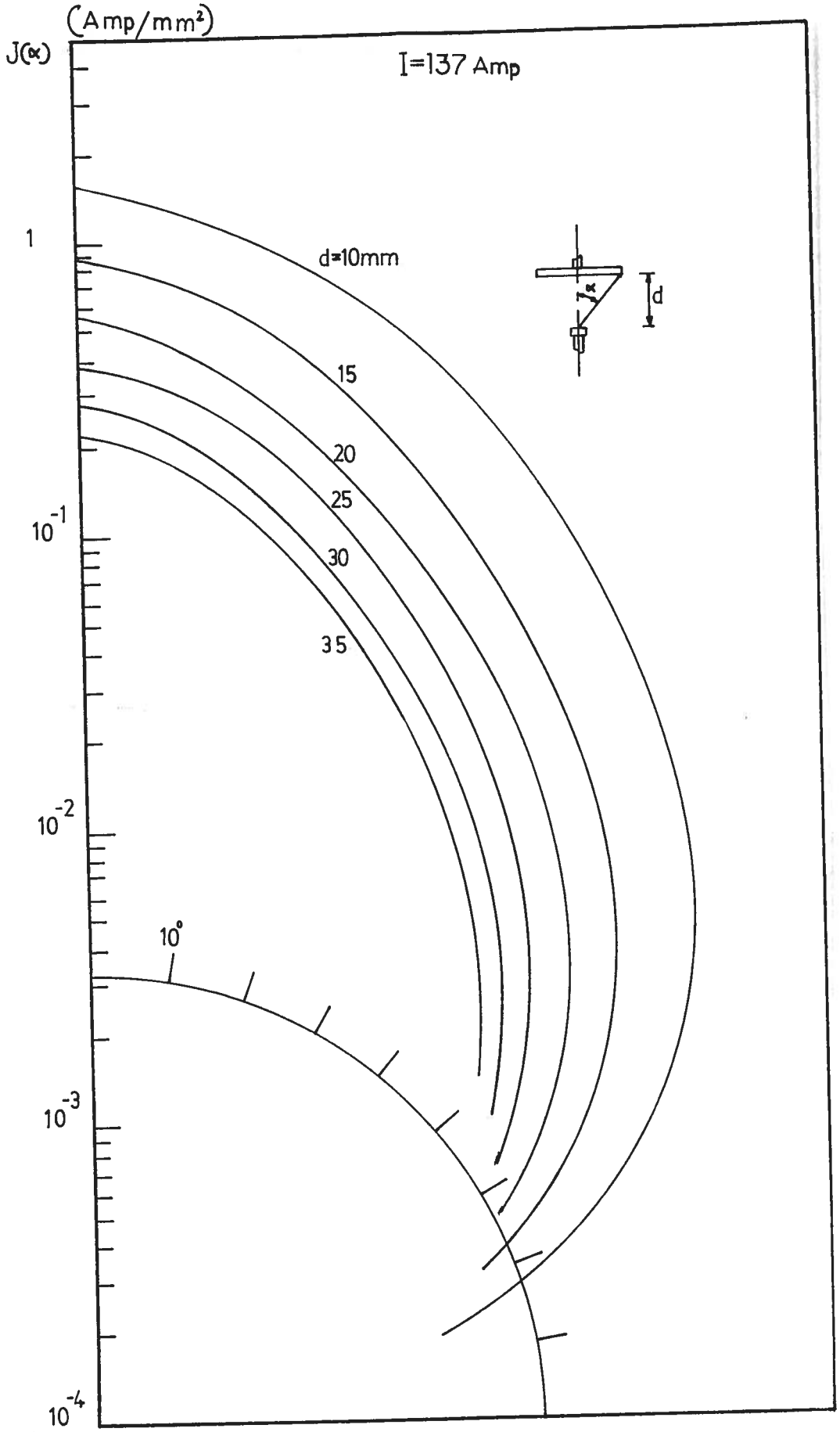


Fig. b

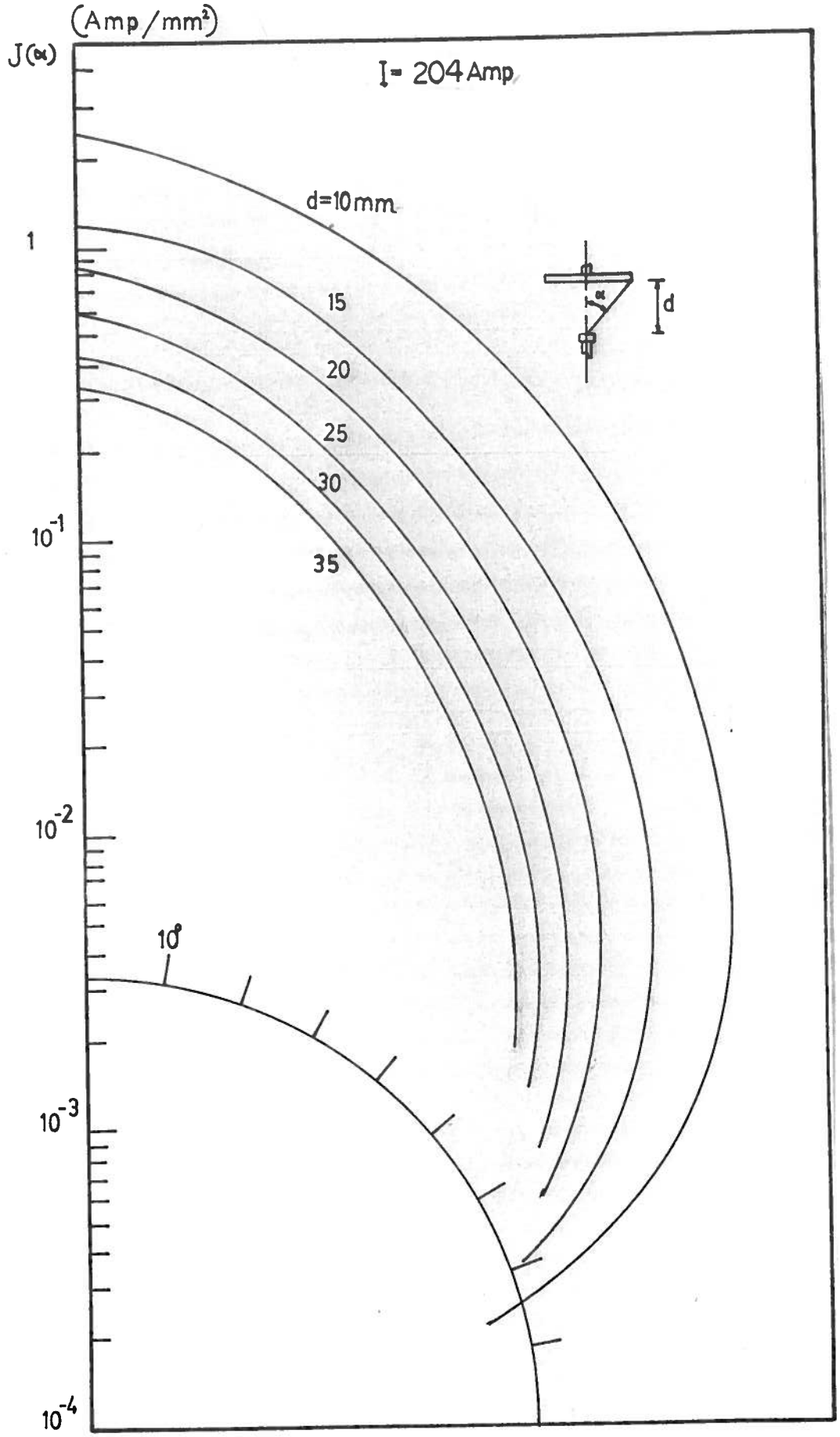


Fig. c

faire la meilleure correspondance avec tous les relevés expérimentaux. Elle est obtenue par la moyenne des résultats du tableau I.

Le tableau II proposé à la page suivante montre les valeurs expérimentales ainsi que les valeurs obtenues avec les distributions en forme de cosinus et elliptique pour un courant de 204 Amp en fonction de la séparation entre les électrodes. Pour les distributions elliptiques, on a retenu pour ce tableau les valeurs de l'excentricité donnant la meilleure correspondance entre ces points et les points expérimentaux, valeurs que l'on retrouve dans le tableau I.

On y apporte aussi l'écart en pourcentage entre les relevés expérimentaux et les deux modèles proposés.

On constate que les écarts des points expérimentaux par rapport aux deux modèles de cette recherche sont nettement moins importants dans le cas elliptique. En comparant les courbes de la figure 4.6 a,b,c aux courbes expérimentales ainsi que le tableau II, on remarque une meilleure correspondance pour la distribution elliptique surtout pour les anneaux intérieurs et extérieurs.

Avec cette distribution, on se rapproche davantage de la réalité, et les caractéristiques d'étalement semblent similaires.

Nous avons rejeté la distribution en cosinus et non l'hypothèse d'une expansion balistique. Puisqu'en se référant à la figure 1.1, nous voyons que le champ électrique n'est vraiment important qu'au

Anneaux	10 mm. ○	10 mm. □ E=4.33	%	10 mm. △	%	15 ○	15 □ E=4.22	%	15 △	%	20 ○	20 □ E=4.58	%	20 △	%
1	2.547	2.546	0	0.408	+84	1.273	1.27	0	0.209	+64	0.849	0.88	-4	0.136	+84
2	0.615	0.947	-54	0.344	+44	0.476	0.69	-45	0.193	+59	0.406	0.56	-38	0.13	+68
3	0.246	0.22	+10	0.207	+16	0.255	0.23	+10	0.148	+42	0.246	0.22	+11	0.11	+54
4	0.087	0.065	+25	0.101	-16	0.094	0.08	+15	0.095	-7.5	0.097	0.086	+11	0.083	+15
5	0.051	0.026	+49	0.051	0	0.062	0.036	+42	0.058	+6	0.069	0.041	+40	0.058	+16
6	0.015	0.013	+12	0.028	-88	0.02	0.019	+4	0.036	-82	0.023	0.022	+3	0.04	-77
7	0.006	0.007	-16	0.017	-161	0.009	0.01	-15	0.023	-168	0.01	0.013	-25	0.028	-167
8	0.003	0.004	-45	0.011	-238	0.004	0.007	-56	0.015	-253	0.005	0.008	-77	0.02	-302
9	0.001	0.002	-108	0.006	-402	0.001	0.004	-138	0.009	-479	0.002	0.005	-151	0.012	-518

Anneaux	25 ○	25 □ E=4.93	%	25 △	%	30 ○	30 □ E=5.87	%	30 △	%	35 ○	35 □ E=5.86	%	35 △	%
1	0.672	0.67	+3	0.1	+85	0.637	0.637	0	0.08	+87	0.495	0.49	+1	0.068	+86
2	0.549	0.46	-31	0.098	+72	0.322	0.446	-38	0.079	+75	0.294	0.37	-26	0.067	+77
3	0.233	0.21	+10	0.088	+62	0.229	0.2	+13	0.073	+68	0.221	0.19	+14	0.063	+71
4	0.099	0.089	+10	0.072	+29	0.097	0.088	+9	0.063	+34	0.096	0.09	+6	0.057	+40
5	0.073	0.044	+39	0.055	+24	0.074	0.045	+39	0.052	+30	0.078	0.048	+38	0.049	+37
6	0.025	0.025	+2	0.041	-62	0.027	0.026	+3	0.041	-54	0.029	0.028	+3	0.041	-40
7	0.012	0.015	-23	0.031	-152	0.013	0.016	-20	0.032	-143	0.014	0.018	-29	0.033	-140
8	0.005	0.01	-89	0.023	-325	0.006	0.01	-57	0.025	-297	0.007	0.012	-75	0.027	-294
9	0.002	0.006	-167	0.015	-532	0.003	0.006	-133	0.017	-530	0.003	0.007	-132	0.019	-515

○ Expérimental △ Cosinus □ Elliptique

Tableau II

Valeurs expérimentales, valeurs obtenues avec les distributions en forme de cosinus et elliptique pour un courant de 204 Amp en fonction de la réparation des électrodes

niveau proche de la cathode. Cela implique que lorsque le flux de particules a quitté la région de la cathode, ce dernier est peu influencé par le champ $\vec{E}$ entre les électrodes. Par contre, au niveau de la cathode, le champ électrique $\vec{E}$ important conditionne la distribution du flux.

4.4 Collection du courant anodique pour différentes cathodes et influence du temps de durée de l'arc

Quatre cathodes différentes ont été mises à l'essai pour déterminer l'importance de la forme et de la surface de la cathode sur la collection du courant à l'anode.

Les extrémités des cathodes A et B sont arrondies et celles des cathodes C et D sont sphériques (Fig. 4.7). Pour les électrodes B et D on ajoute une gaine pour diminuer considérablement la surface disponible à la cathode.

Aucune de ces cathodes n'a donc une forme géométrique semblable.

On peut considérer que la surface de l'électrode A où peut se trouver le pied de l'arc est très grande par rapport à l'électrode B mais quelque peu inférieure à l'électrode C. Quant à l'électrode B par rapport à D, sa surface disponible est légèrement inférieure.

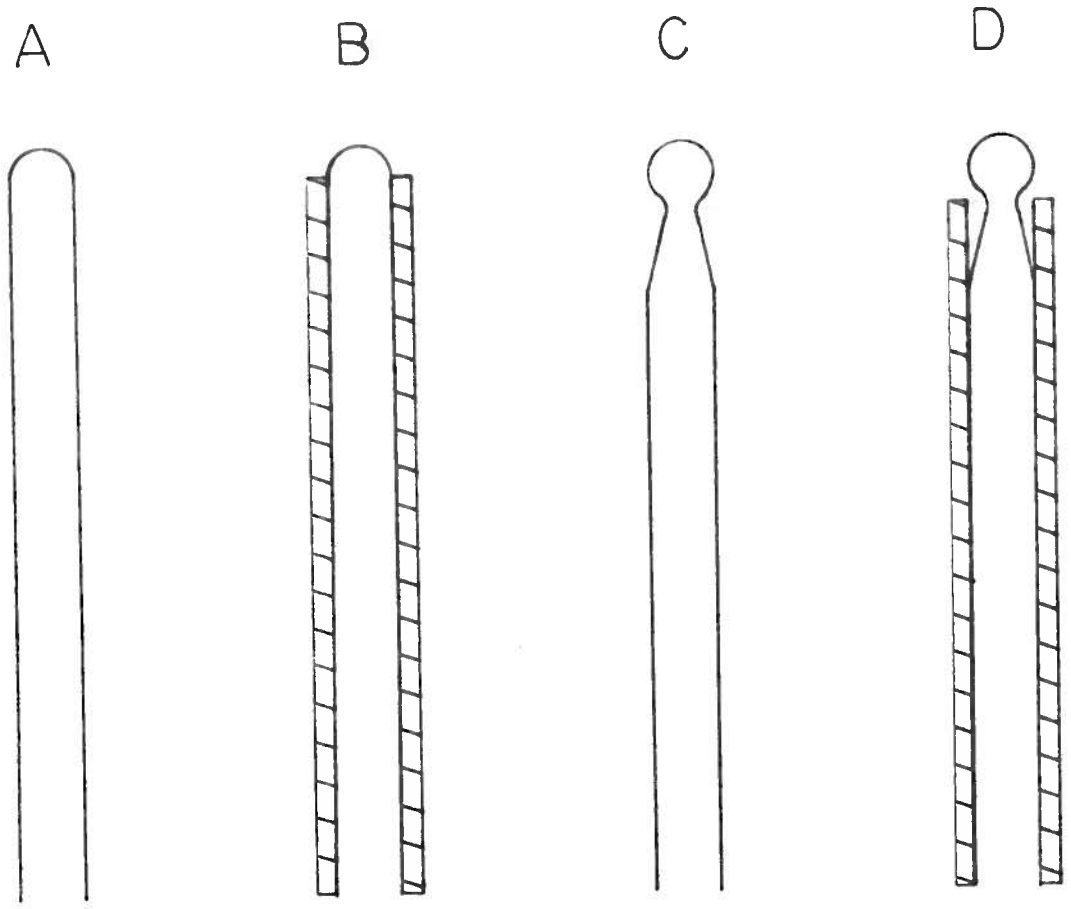


Figure 4.7 Schéma représentant les différtentes cathodes employées pour déterminer l'importance de la forme de la cathode sur la distribution de la densité de courant à l'anode. Le diamètre de ces cathodes est de 6 mm

Pour ces relevés aucun conditionnement n'a eu lieu et comme l'impulsion laser se situe à l'anode, la formation et la localisation du pied de l'arc à la cathode n'est pas importante. Le courant d'arc est de 204 Amp avec une distance inter-électrodes de 15 mm et une pression à l'intérieur de l'enceinte de 10^{-5} torr.

Les résultats sont présentés à la Fig. 4.8. Les valeurs des densités de courant obtenues sont attribuées au centre de l'anneau considéré.

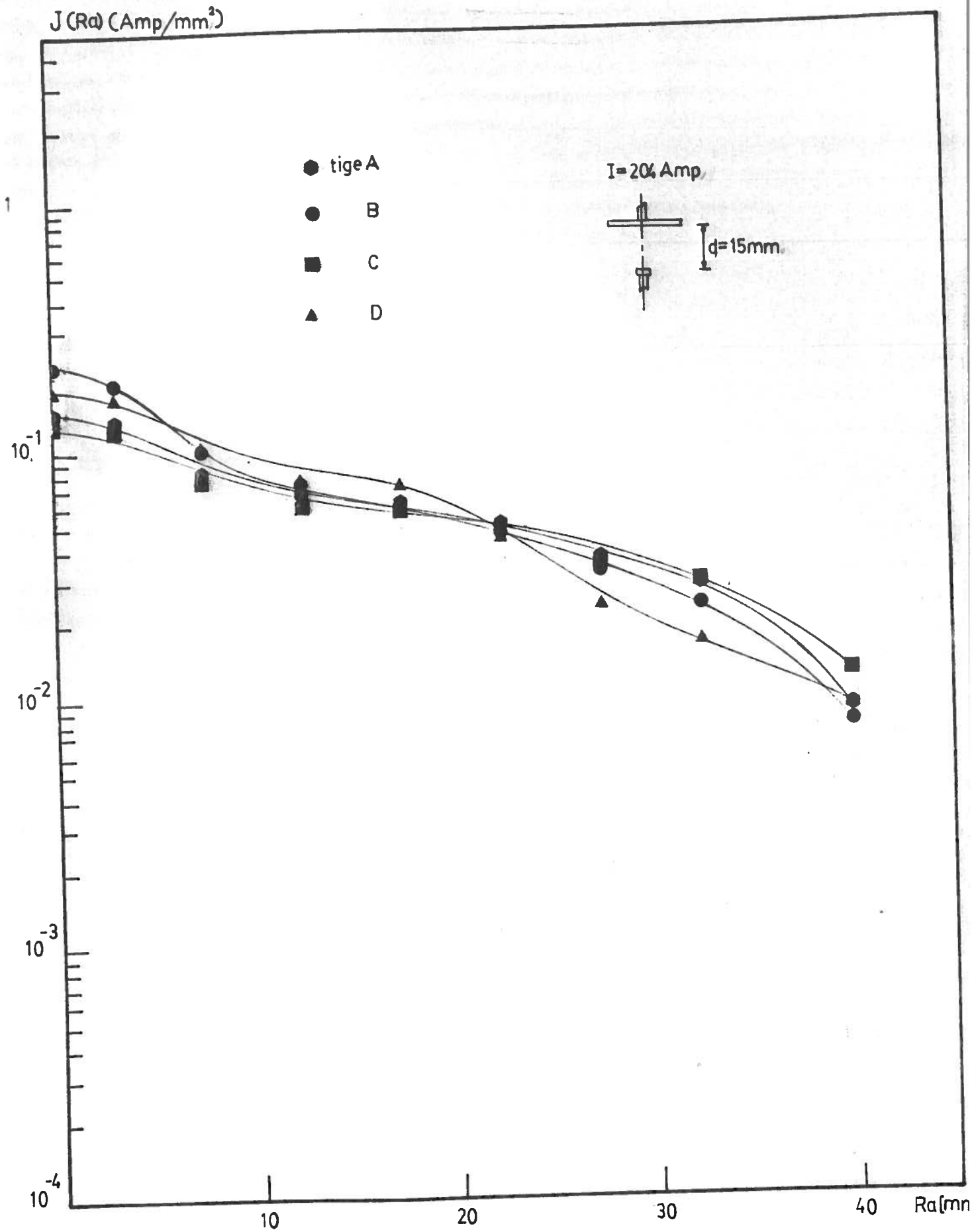
On constate que pour les mêmes paramètres les distributions de la densité de courant ne sont pas identiques. L'influence de la forme géométrique intervient donc.

On note aussi que plus la surface cathodique est faible, ce qui est le cas pour les électrodes B et D, et plus la densité au centre de l'anode est importante. L'électrode B qui possède une surface légèrement inférieure par rapport à D collecte, au centre de l'anode, un flux plus grand.

Si on compare ces résultats à ceux du paragraphe 4.1 pour la même valeur de courant et de distance inter-électrodes, on voit encore que le fait d'avoir une surface cathodique très faible entraîne une haute densité au centre de l'anode.

Le courant étant fixé, une plus grande concentration de flux doit exister pour de plus petite cathode et donc le taux d'érosion

Figure 4.8 Distribution de la densité de courant pour différentes cathodes (voir Fig. 4.7) avec un courant de 204 Amp et une séparation inter-électrodes de 15 mm


J (Ra) (Amp/mm²)
tige A
B
C
D
I=20% Amp
d=15mm
1
10⁻¹
10⁻²
10⁻³
10⁻⁴
10
20
30
40
Ra(mm

local est plus important.

Le fait d'avoir une densité de courant plus forte au centre de l'anode entraîne obligatoirement une densité plus faible sur les anneaux périphériques, ce qui est constaté sur la figure 4.8.

Tout cela implique que la forme et la surface de la cathode influencent la collection du courant à l'anode dans le mode diffus.

Une fois la cathode conditionnée, la tendance du pied de l'arc est d'occuper une surface beaucoup plus grande (Fig. 4.9). Dans ce cas la durée de vie de la cathode est beaucoup plus longue. En augmentant le temps de durée de l'arc à 1 ms. Les résultats obtenus ne correspondent pas à ceux du paragraphe 4.1. Une bosse prononcée dans la distribution de la densité de courant se trouve sur toutes les courbes. La raison de cette bosse est liée à la céramique. Sur les flancs de la cathode la céramique a été vaporisée et ce bord à nu de la cathode participe aussi à l'émission du plasma. Pour obtenir des résultats en fonction du temps de durée de l'arc la céramique utilisée ici n'a pas une température de fusion assez élevée.

4.5 Caractéristique courant-tension

Suivant le courant d'arc que l'on veut obtenir on ajuste la tension de charge du condensateur de la source d'alimentation en courant continu. Cette tension avant amorçage de l'arc est au moins dix fois supérieure à la tension d'arc. La résistance purement ohmique

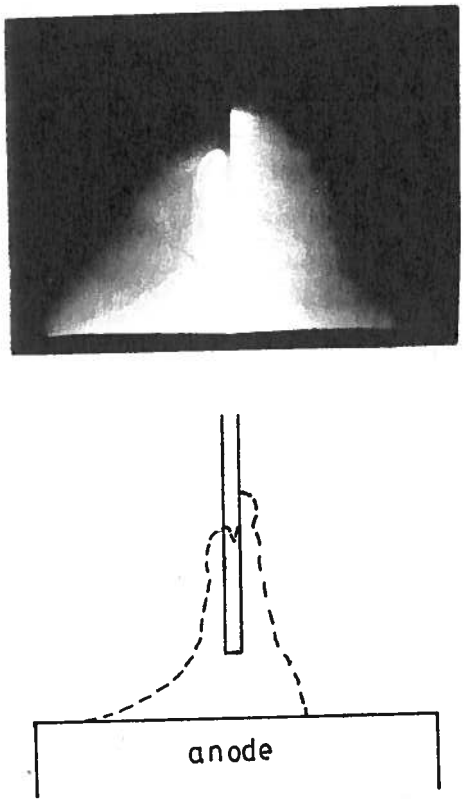


Figure 4.9 Photographie de l'arc après un conditionnement de vingt essais d'arc pour un courant de 204 Amp et une distance inter-électrodes de 15 mm. La forme de la cathode est celle appelée A dans la figure 4.7

en série qui limite le courant dans le circuit d'arc absorbe au moins 90% de la tension d'alimentation. Cette résistance en série a toujours été maintenue à la même valeur (voir Fig. 3.3).

Le tableau III donne les valeurs de la tension de l'arc en Volts en fonction du courant d'arc et de la distance inter-éelctrodes en mm.

I \ d	10	15	20	25	30	35
58 A	24,5	25	26	27,5	30	
137 A	36	36	36	36	36	37
204 A	46,5	46	45,5	45	45	46

Tableau III

Valeurs expérimentales obtenues pour la tension d'un arc dans le vide en fonction du courant et de la séparation inter-électrodes (d en mm)

On constate en premier lieu que la tension d'arc augmente en fonction du courant d'arc. Ce fait est en accord avec les résultats présentés à la figure 1.2.

Cependant la tendance à la tension d'arc d'augmenter, pour un courant donné, avec la séparation des électrodes n'est pas très marquée hormis pour le courant de 58 Amp.

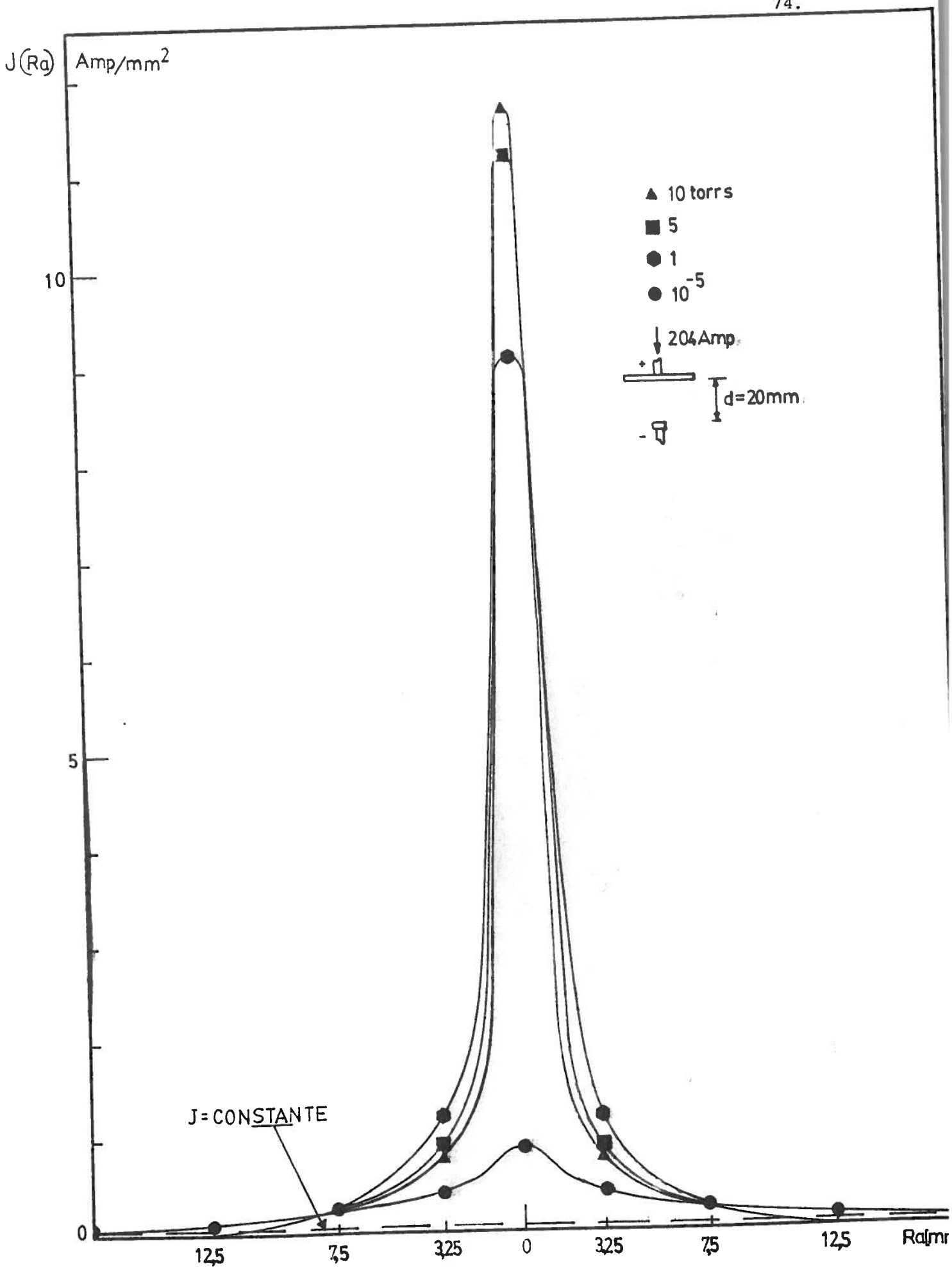
4.6 Influence de la pression d'un gaz

Des essais ont été effectués en fonction de la pression d'un gaz d'argon. Le courant a été fixé à 204 Amp et la distance inter-électrodes à 20 mm. La distribution de la densité de courant pour des pressions de 10^{-5}, 1, 5 et 10 torrs est représentée à la figure 4.10.

La distribution obtenue avec un gaz est totalement différente de celle qu'on obtient sous vide, en effet en présence d'un gaz le centre de l'anode collecte quasiment tout le courant. Le quatrième anneau, pour un torr, n'a une densité que de 2.55 10^{-3} Amp/mm^2; il est donc deux ordres de grandeur plus bas que l'anneau précédent. Pour ces trois essais le courant collecté ne se trouve pratiquement que dans les trois premiers anneaux. Sur les anneaux extérieurs aucun courant n'a été décelé. Ce qui donne une distribution de la densité extrêmement piquée. L'influence de la pression est donc de confiner l'arc le plus possible le long de l'axe cathode-anode.

Les photographies présentées à la figure 4.11 confirment bien le faible étalement du plasma. Si on les compare aux photographies obtenues dans le vide (Fig. 4.2) prises avec la même ouverture de diaphragme du dispositif photographique, on note que la partie lumineuse de l'arc à l'anode est ici très faible. En augmentant la pression, la boule lumineuse à l'anode croît. Ce phénomène résulte d'une ionisation de plus en plus visible du gaz au voisinage de l'anode.

Figure 4.10 Distribution de la densité de courant pour un courant de 204 Amp et une distance entre les électrodes de 20 mm pour des pressions de 1, 5 et 10 torrs d'argon. Pour les mêmes conditions, la distribution à 10^{-5} torr est beaucoup plus étalée. On donne également la distribution obtenue à partir d'un courant réparti uniformément sur l'anode (J = constante)


J(Ra) Amp/mm2
10
5
0
10 torrs
5
1
10-5
204Amp
+
d=20mm
-
J=CONSTANTE
12,5
7,5
3,25
0
3,25
7,5
12,5
Ra(mr

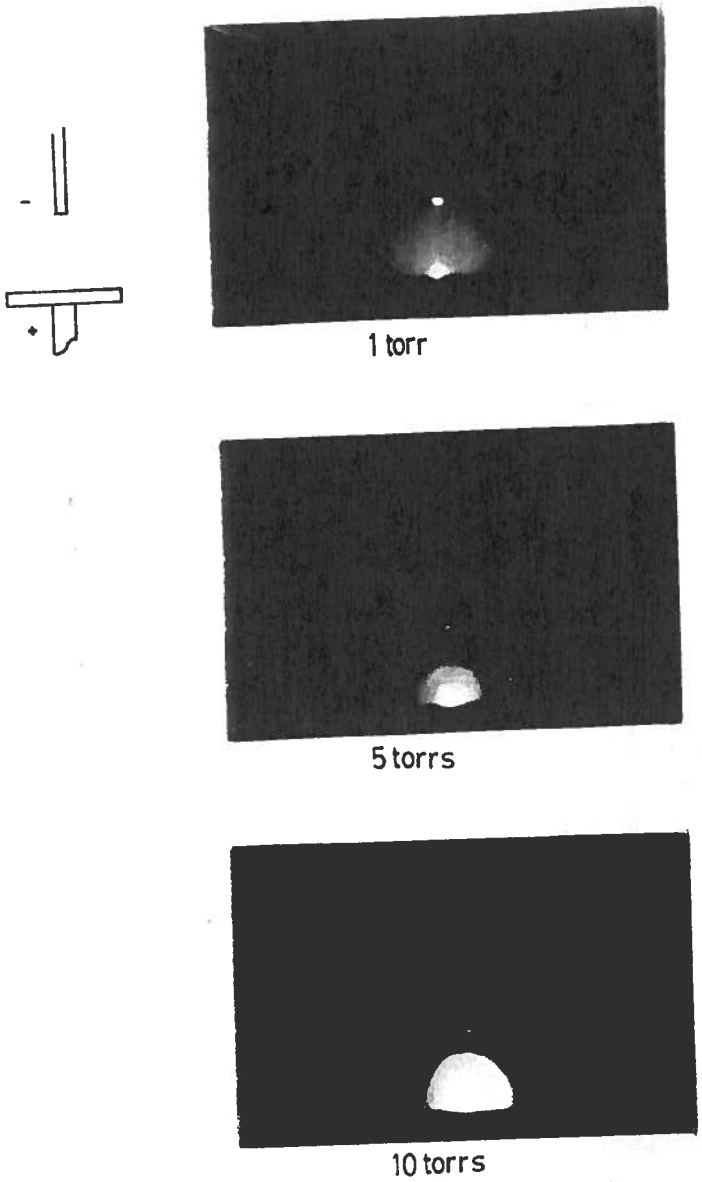


Figure 4.11 Photographies typiques de l'arc électrique pour un courant de 204 Amp et une séparation de 15 mm entre les électrodes pour des pressions de 1, 5 et 10 torrs d'argon. L'anode est à la partie inférieure de la figure. Le diaphragme de l'objectif est réglé à 8

CONCLUSION

L'arc électrique dans le vide dans le mode diffus est essentiellement caractérisé par une vive érosion à la cathode d'où est émis un plasma métallique énergétique qui se répand dans tout l'espace inter-électrodes. La distribution angulaire de ce nuage de plasma n'est pas isotrope, mais plutôt pointée dans la direction de l'anode. Beaucoup d'auteurs rapportent que le flux de plasma a une distribution angulaire proportionnelle en cosinus de l'angle par rapport à la normale au plan cathodique. La participation de l'anode dans le mode diffus semble être réduite à la simple collection du plasma qui est devant elle.

Partant de la supposition que le flux émis de la cathode est balistique, on le retrouve donc devant l'anode pour former un plasma avec une distribution identique à son émission. En considérant que l'anode est un simple collecteur de plasma, on peut de ce fait obtenir un courant qui est tiré par l'anode de son plasma limitrophe. De cette façon simple l'interaction entre l'anode et la cathode est établie.

Les résultats expérimentaux obtenus ont permis de mettre en évidence que la distribution de la densité de courant à l'anode dans le mode diffus est très piquée en son centre, de plusieurs ordres de grandeur par rapport à sa périphérie. Ceci nous démontre clairement que la distribution de la densité d'un arc sous vide dans le mode diffus n'est pas constante sur la surface de l'anode. Cet effet est

d'ailleurs accentué avec l'augmentation de la pression du gaz dans la chambre expérimentale. De plus, la distribution de la densité de courant à l'anode en fonction d'une séparation croissante entre les électrodes subit une tendance à l'uniformité, ce qui implique que le courant collecté au centre de l'anode diminue aussi avec la distance et supprime ainsi toute idée d'un phénomène de constriction magnétique et cela même en fonction d'un courant d'arc croissant. Vu ces résultats, le phénomène de la formation de points chauds à l'anode une fois le courant critique atteint semblerait être relié à un effet d'évaporation à l'anode plutôt qu'à un effet magnétique.

Le modèle que nous avons proposé sur une émission balistique du flux émis de la cathode en cosinus et d'une simple collection à l'anode pour évaluer la distribution du courant à l'anode ne correspond pas exactement au phénomène physique. La distribution théorique obtenue n'est pas assez concentrée au centre de l'anode. La deuxième distribution que nous avons proposé, c'est-à-dire concentrée ou en forme d'ellipse répond assez correctement à l'observation expérimentale. Mais la physique gouvernant cette distribution elliptique du plasma nous est inconnue. Il serait donc intéressant d'effectuer des mesures avec des sondes de Langmuir très sensibles et très rapprochées près de l'anode pour obtenir de l'information sur la distribution du flux de plasma émis de la cathode.

RÉFÉRENCES

1. Zykova, N.M., Kantsel', V.V., Rakhovskii, V.I., Seliverstvova, I.F., Ustimets, A.P., "Cathode and Anode Regions in an Electric Arc. I. Cathode and Anode Regions at Low Pressures and in Vacuum", Soviet Physics-Technical Physics, Vol. 15, No. 11, (May 1971).
2. Farral, G.A., "Vacuum Arcs-Theory and Application", J.M. Lafferty ed., John Wiley and Sons, New York 1980, p. 107.
3. Kimblin, C.W., "Erosion and Ionization at the Electrodes of Vacuum and Atmospheric Pressure Arc", Research Sci. Paper 76-1C7-ACASP-P1, Westinghouse (1976).
4. Miller, H.C., "Vacuum Arc Phenomena", IEEE Transaction on Plasma Science, Vol. PS-11, No. 2, 1983.
5. Miller, H.C., "Discharge Modes at the Anode of a Vacuum Arc", IEEE Transaction on Plasma Science, Vol. PS-11, No. 3, 1983.
6. Agarwal, MS., Holmes, R., "Arcing Voltage of the Metal Vapour Vacuum Arc", J. Phys. D: Appl. Phys., 17 (1984) 757-767.
7. Drouet, M.G., "Anode Spots and Cathodic Plasma Flow in a Vacuum Arc", J. Appl. Phys., 14 (1981) L211-4.
8. Kutzner, J., "Voltage-Current Characteristics of a Diffusion Vacuum Arc", Physica 104C (1981) 116-123.
9. Drouet, M.G., "Electric Characteristics of a Diffusion Vacuum Arc", Physica 114C (1982) 126-128.
10. Kimblin C.W., "Anode Voltage Drop and Anode Spot Formation in DC Vacuum Arcs", Journal of Applied Physics, Vol. 40, No. 4, 1969.

11. Bacon, F.M., "Vacuum Arc Anode Plasma. 1. Spectroscopic Investigation", Journal of Applied Physics, Vol. 46, No. 11, 1975.

12. Goldsmith, S., Shalev, S., Boxman, R.L., "Anode Melting in a Multicathode-Spot Vacuum Arc", IEEE Transaction on Plasma Science, Vol. PS-11, No. 3, 1983.

13. Boxman, R.L., "Magnetic Constriction Effects in High-Current Vacuum Arcs Prior to the Release of Anode Vapor", Journal of Applied Physics, Vol. 48, No. 6, June 1977.

14. Ecker, G., "Anode Spot Instability", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. PS-2, September 1974.

15. Schuocker, D., "Improved Model for Anode Spot Formation in Vacuum Arcs", IEEE Transaction on Plasma Science, Vol. PS-7, No. 4, December 1979.

16. Sherman, J.C., Webster, R., Jenkins, J.E., Holmes, R., "Cathode Spot Motion in High-Current Vacuum Arcs on Copper Electrodes", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 8, 1975.

17. Juttner, B., "On the Nature of Arc Cathode Spots in Vacuum and Plasma", Plasma Physics and Controlled Fusion, Vol. 26, No. 1A, pp. 249-258, 1984.

18. Holclajtner-Antunovic, I., Georgijevic, V., Vukanovic, V., "Influence of the Cathode Shape on the Spatial Distribution of Particles in D.C. Arc Plasma", Fresenius Z. Anal. Chem. (1982) 312: 126-130.

19. Daalder, J.E., "Erosion and the Origin of Charged and Neutral Species in Vacuum Arc", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 8, 1975.

20. Tuma, D.T., Chen, C.L., Davies, D.K., "Erosion Products from the Cathode Spot Region of a Copper Vacuum Arc", J. Appl. Phys. 49(7), 1978.

21. Daalder, .E., Wielders, P.G.E., "Angular Distribution of Charged and Neutral Species in Vacuum Arcs", Proceedings of the Twelfth International Conference on Phenomena in Ionized Gases (1975), Eindhoven, The Netherlands, Prt 1, p. 232.

22. Meunier, J.L., Drouet, M.G., "Bouncing Fxpansion of the Arc-Cathode Plasma in Vacuum along the Transverse Applied B Field", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. PS-11, No. 3, September 1983.

23. Drouet, M.G., "Expansion in Vacuum of the Cathodic Arc Plasma on Both Sides of the Cathode Plane", Conference on Phenomena in Ionized Gases, Minsk, USSR, 1981, page 481.

24. Kutzner, J., Seidel, ST., Zalucki, Z., "Distribution des flux de particules neutres de l'arc dans le vide", Proc. 4th Int. Symp. Dich. and Electr. Instr. in Vac., Waterloo (1970), p. 276.

25. Daadler, J.E., "Components of Cathode Erosion in Vacuum Arcs", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 9, 1976.

26. Daalder, J.E., "Cathode Spots and Vacuum Arc", Physica 104C (1981) 91-106.

27. Mitchell, G.R., "High-Current Vacuum Arcs. 1. An Experimental Study", PROC. INSTN. ELECTR. ENG., Vol. 117, 1970, p. 2315.

28. Drouet, M.G., Beaudet, R., Jutras, R., "Anode Current Distribution in a Moving Arc", AIAAA Journal, Vol. 13, No. 7, July 1975, pp. 929-933.

29. Ripin, B.H. et al., "Laser Plasma Interaction and Ablative Acceleration of Thin Foils at 10-10 W/cm", Phys. Fluids, 23, 5 (1980).

30. Lewis, C.L.S., Cunningham, P.F., Pina, L., Roy, A.K., Ward, J.M., "Characteristics of Ion Flows from Laser Irradiated Plane Targets", J. Phys. D: Appl. Phys., 15 (1982) p. 69.

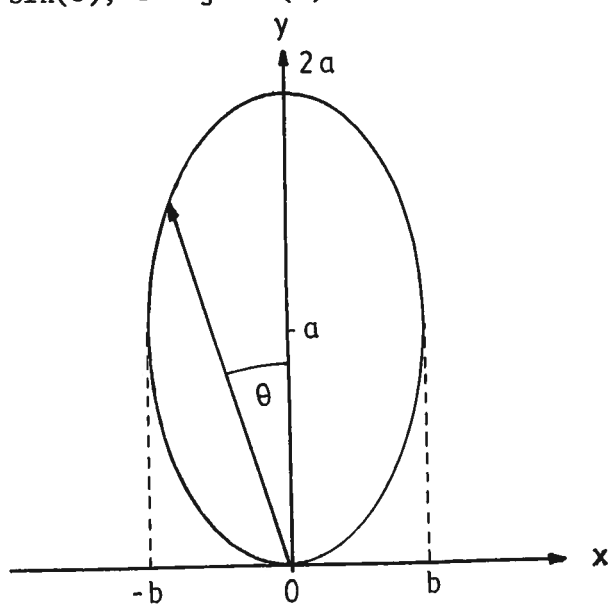
ANNEXE 1: Calcul de l'enveloppe d'une ellipse dont un des sommets est tangent au point de coordonnées (0,0)

L'équation générale d'une ellipse de centre (X_o,Y_o) et d'axes 2a et 2b est:

$$(X-X_o)^2/b^2 + (Y-Y_o)^2/a^2 = 1 \qquad (1)$$

Prenons les coordonnées polaires j,8 où 8 a un sens positif ordinaire, mais est mesuré à partir de l'axe des Y:

$$X = -j \sin(8); \quad Y = j \cos(8)$$



Dans le cas qui nous intéresse l'ellipse passe par (0,0), et donc l'équation (1) implique:

$$X_o^2/b^2 + Y_o^2/a^2 = 1 \qquad (2)$$

d'où après développement de (1) en tenant compte de (2) on obtient:

$$j^2((\sin 8)^2/b^2+(\cos 8)^2/a^2) + j(2X_o(\sin 8)/b^2) - 2Y_o(\cos 8)/a^2 = 0$$

dont les solutions sont:

$$j_1 = 0; \quad j_2 = (2Y_o b^2 \cos 8 - X_o a^2 \sin 8)/((a \sin 8)^2 + (b \cos 8)^2)$$

si $X_o = 0$ et $Y_o = a$, c'est-à-dire si l'ellipse passe par (0,0) et à un axe selon Y, on a:

$$j = 2\ ab^2 \cos 8/((a \sin 8)^2 + (b \cos 8)^2)$$

si on pose $j = J(8)/J_o$ on obtient:

$$J(8) = J_o\ 2\ ab^2 \cos(8)/((a \sin 8)^2 + (b \cos 8)^2)$$

où J_o, a et b sont trois paramètres inconnus. Réduisons les à deux. On divise le numérateur et le dénominateur par b au carré et on pose a/b égale à E. On obtient:

$$J(8) = J_o\ 2a \cos 8/((E \sin 8)^2 + (\cos 8)^2)$$

comme il s'agit de paramètres inconnus, on peut écrire J_o au lieu de $2aJ_o$:

$$J(8) = J_o \cos 8/((E \sin 8)^2 + (\cos 8)^2)$$

E est une certaine mesure de l'excentricité de l'ellipse.

Pour un cercle E = 1 et on retrouve $J(8) = J_o \cos 8$ qui est l'équation décrite dans la section 2.1.

Pour une ellipse allongée selon l'axe Y, on a E plus grand que l'unité.

Maintenant si on tient compte de la distance à parcourir on trouve que $J(R_a)$ avec R_a le rayon anodique est égale à:

$$J(R_a) = J_o \frac{d^2}{(R_a{}^2 + d^2)} \cos 8/((E \sin 8)^2 + (\cos 8)^2)$$

où encore en fonction de l'angle alpha (α) comme dans le texte on obtient:

$$J(\alpha) = J_o \cos\alpha^3/((E \sin\alpha)^2 + (\cos\alpha)^2)$$

ANNEXE 2: Évaluation de l'intégrale portant sur la densité de courant de forme elliptique

La distribution de la densité de courant est donnée par:

$$J(\alpha) = J_o \frac{d^2}{(R_a{}^2+d^2)} \cos\alpha/((E \sin\alpha)^2 + (\cos\alpha)^2)$$

où d est la distance inter-électrodes;

R_a le rayon anodique considéré;

α l'angle sous-tendu par l'anode.

Le courant collecté dans une portion d'anode est donnée par:

$$I(\Delta R_a) = \int_0^{2\pi} \int_{R_a}^{R_a+\Delta R_a} J(\rho)\rho \, d\rho \, d8$$

comme il n'y a pas de dépendance azimutale on obtient:

$$I(\Delta R_a) = J_o \, 2\pi \, d^2 \int_{R_a}^{R_a+\Delta R_a} \frac{R_a}{R_a{}^2+d^2} \frac{\cos\alpha \, dR_a}{((E \sin\alpha)^2+(\cos\alpha)^2)}$$

Ce qui donne en fonction de l'angle alpha (α) sachant que $\cos\alpha = d/(R_a{}^2+d^2)^{\frac{1}{2}}$:

$$I(\alpha) = J_o \, 2\pi \, d^2 \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\sin\alpha \, d\alpha}{((E \sin\alpha)^2 + (\cos\alpha)^2)}$$

avec $\alpha_1 = \mathrm{arctg}(R_a/d)$ et $\alpha_2 = \mathrm{arctg}\,((R_a+\Delta R_a)/d)$

Pour simplifier cette intégrale on se sert de la formule suivante:

$$F(\sin x, \cos x)dx = 2 \int F \; \frac{2U}{1+U^2}, \frac{1-U^2}{1+U^2} \; \frac{dU}{1+U^2}$$

où $U = \mathrm{tg}(x/2)$

Si l'on pose $U_1 = tg(\alpha_1/2)$ et $U_2 = tg(\alpha_2/2)$ on obtient:

$$I = J_o\ 4\pi\ d^2 \int_{U_1}^{U_2} (2U/(U^4+U^2(4E^2-2)+1))dU$$

Posons $V=U^2$

ce qui entraîne:

$dU = dV/2V^{1}/^{2}$; $V1 = U_1{}^2$; $V2 + U_2{}^2$ et $b = 4E^2-2$

alors:

$$I = J_o\ 4\pi\ d^2 \int_{V_1}^{V_2} dV/(V^2+bV=1)$$

Cette intégrale possède deux solutions suivant la valeur de b:

$$\int \frac{dx}{ax^2+bx+c} = \frac{2}{(4ac-b^2)^{1}/^{2}} \text{arctg} \frac{2ax + b}{(4ac-b^2)^{1}/^{2}} \qquad \text{(No. 1)}$$

$$= \frac{1}{(b^2-4ac)^{1}/^{2}} \text{Ln} \frac{2ax+b-(b^2-4ac)^{1}/^{2}}{2ax+b+(b^2-4ac)^{1}/^{2}} \qquad \text{(No. 2)}$$

Il y a deux cas:

$b^2 < 4ac$ et $b^2 > 4ac$

avec $a=1$; $b=4E^2-2$ et $c=1$

On utilise dans cette distribution des ellipses dont le grand axe est selon l'axe des Y, donc E 1. Ce qui implique:

$$E>1;\ E^2>1;\ 4E^2>4;\ 4E^2-2>2;\ (4E^2-2)^2>4$$

donc $b^2>4ac$ (*); on utilise la formule no. 2.

$$I(\alpha) = \frac{J_o\ d^2\pi}{E(E^2-1)^{1}/^{2}} \text{Ln} \frac{V_2+2E^2-1-2E(E^2-1)^{1}/^{2}}{V_2+2E^2-1+2E(E^2-1)^{1}/^{2}} \frac{V_1=2E^2-1+2E(E^2-1)^{1}/^{2}}{V_1+2E^2-1-2E(E^2-1)^{1}/^{2}}$$

avec $V = (tg(.5\alpha))^2$

Dans le cas où $V_1(\alpha_1 = 0) = 0$, c'est-à-dire que l'on part du centre de l'anode jusqu'à une certaine valeur de α_2, on obtient:

$$I(\alpha) = \frac{J_o\ d^2\pi}{E(E^2-1)^{1/2}}\ \mathrm{Ln}\ \frac{V(2E^2+2E(E^2-1)^{1/2}-1)+1}{V(2E^2-2E(E^2-1)^{1/2}-1)+1}$$

(*) Cas où $b^2 = 4ac$

De l'intégrale No. 2 on a la contrainte $b^2-4\quad 0$

$$b^2 > 4$$

$b \geqslant 2$	$b \leqslant -2$
$4E^2-2 \geqslant 2$	$4E^2-2 \leqslant -2$
$4E^2 \geqslant 4$	$4E^2 \leqslant 0$
$E^2 \geqslant 1$	$E \leqslant 0$
$E \geqslant 1$ où $E \leqslant -1$	$E=0$

Région interdite pour E en employant l'intégrale No. 2:

$]-1,0[$ et $]0,1[$ soit $]-1,1[$

sans quoi il faut employer l'intégrale No. 1.