

N 85-29689  
MBA-TM-77875

Category 15 2715

paratus geometry, substrate bombardment. The effects are discussed. M.V.E.

Nondestructive testing techniques are shown to offer the most potential for the testing of components with relatively large surface areas that may be adversely affected by high temperatures. A.B.K.

electrode material is compared with the influence of a short acting circular shaped heat source. In order to obtain realistic results from such a thermal model an adequate choice of the diameter of the heat source has to be made; also, the energy going to the cathode and to the anode, respectively, has to be defined accurately. From the proposed analysis the amount of material molten during one single pulse may be derived. An attempt is also made to determine the amount of material being removed per pulse. Theoretical calculated data agree fairly well with experimental tests, yielding a better understanding of the EDM process. (Author)

process relationship. M. Blocher, Jr. (Battelle Ohio). (American Vacuum Society Transactions, San Francisco, Calif., Jan. 28-30, 1974). Technology, vol. 11, July-Aug.

A74-38919 # Some aspects of pump selection in electrochemical machining. D. K. Pramanik and A. K. De (General Mechanical Engineering Research Institute, Durgapur, India). Mechanical Engineering Bulletin, June 1973, p. 60-63.

Requirements are set forth to be met by pumps used in electrochemical machines for forcing the electrolyte through the narrow gap between the cathode and anode lest the products of the reaction settle on the cathode. Calculations are made and specifications are given for pump selection, taking into account the mean envelope thickness, the electrical resistance of electrodes, and heat absorption and dissipation. Good care is suggested in pump selection for these applications to ensure adequate performance of the machine. V.Z.

A74-39020 # A new theory aiming to define the mechanism of material removal in electroerosion (Nouvelle théorie visant à définir le mécanisme de l'enlèvement de matière en électroérosion). L. Chincholle (Paris VI, Université, Paris; Paris XI, Université, Sceaux, Hauts-de-Seine, France). In: Nonconventional machining methods; Spring Workshop on Industrial Mechanics, 4th, Paris, France, April 22-24, 1974, Proceedings. Volume 1. (A74-39017 19-15) Saint-Ouen, Seine-St.-Denis, France, Groupement pour l'Avancement de la Mécanique Industrielle, 1974. 27 p. 12 refs. In French.

Formulation of an electrohydrodynamic hypothesis to explain the mechanism of material removal in electroerosion, and results of experiments designed to verify the validity of the proposed hypothesis. A hypothesis is proposed according to which material is removed by a high-power liquid microjet which forms as a result of implosion of a vapor cavity between the two electrodes. Using a model of the implosion of a vapor cavity, a study is made of the energy dissipated in the arc zone as a function of the electrical parameters and of the total erosion as a function of the expended electrical energy. In addition, correlations are made between the weight losses of each electrode and the arc energy and between the erosion and the energy expended by Joule effect on the electrodes. A.B.K.

effective supersaturation conditions in chemical vapor deposition of silicon, pyrolytic carbon are made for research in CVD and increase in M.V.E.

A74-39017 Nonconventional machining methods; Spring Workshop on Industrial Mechanics, 4th, Paris, France, April 22-24, 1974, Proceedings. Volumes 1, 2, & 3 (Méthodes d'usinage non traditionnelles; Journées de Printemps de la Mécanique Industrielle, 4th, Paris, France, April 22-24, 1974, Proceedings. Volumes 1, 2, & 3). Workshop sponsored by CIRP, DGRST, DRME, et al. Saint-Ouen, Seine-St.-Denis, France, Groupement pour l'Avancement de la Mécanique Industrielle, 1974. Vol. 1, 174 p.; vol. 2, 190 p.; vol. 3, 156 p. In French and English.

Topics discussed include automatic and adaptive control of electrodischarge machining, a mechanism of material removal in electroerosion by a high-power liquid jet, criteria for choosing optimal controls for an electroerosion machine, criteria governing profitability of the electroerosion process in comparison with mechanical milling, the resistance of materials to electroerosion, future prospects of the electroerosion technique, recent advances in the field of electrodischarge and electrochemical machining, a variant of electrochemical machining called contact electrochemical profile grinding, the equipment required for carrying out electrochemical micromachining, hydrodynamic phenomena in electrochemical machining, properties of electrolyte-metal couples in electrochemical machining, work accuracy and surface finish in electrochemical machining, and electrochemical deburring and machining on a mass-production scale.

Individual items are announced in this issue. A.B.K.

A74-39021 # Discrimination and choice of optimal controls in electroerosion (Discrimination et choix des réglages optima en électro-érosion). J. Dunod (H. Ernault-Somua, Vélizy-Villacoublay, Yvelines, France). In: Nonconventional machining methods; Spring Workshop on Industrial Mechanics, 4th, Paris, France, April 22-24, 1974, Proceedings. Volume 1. (A74-39017 19-15) Saint-Ouen, Seine-St.-Denis, France, Groupement pour l'Avancement de la Mécanique Industrielle, 1974. 9 p. In French.

Review of the criteria governing the choice of optimal controls for a multipurpose electroerosion machine. A number of suggestions are made for the purpose of ensuring stable operation and profitability of such a machine. The recommendations made concern the possibility of controlling the current density, the machining voltage, the frequency, the operating time, the idle time, the relation of the gap between the electrode tool and the workpiece to the total time required for the machining of a finished piece, and the machining brush. A procedure for choosing optimal controls to achieve total automation is proposed. A.B.K.

relationships in deposition on gun techniques. R. J. Anapol, (Indianapolis, Ind.). (American Property Relationships in San Francisco, Calif., Jan. 28-30, 1974). Technology, vol. 11, July-Aug.

A74-39018 # Automatic control of electro discharge machining. B. L. Ten Horn (Philips' Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, Netherlands). In: Nonconventional machining methods; Spring Workshop on Industrial Mechanics, 4th, Paris, France, April 22-24, 1974, Proceedings. Volume 1. (A74-39017 19-15) Saint-Ouen, Seine-St.-Denis, France, Groupement pour l'Avancement de la Mécanique Industrielle, 1974. 21 p. 5 refs.

Review of the state of the art of electrodischarge machining with regard to the possibilities of automatic and even adaptive control of the process. A brief description is given of the closed-loop control systems used for erosion machines, distinguishing between isoenergetic and isofrequent types of generators. Estimation of the effective erosion time in isoenergetic and isofrequent types of generators by counting effective pulses is discussed, as well as the problem of controlling the ignition delay time in these two types of systems. A study is then made of the possibility of controlling the conditions in the spark gap by means of forced flushing. Particular attention is given to a problem caused by insufficient flushing of the spark gap especially when graphite is used as the electrode material - namely, the formation of an arc type discharge. A detailed description is given of a Japanese system for adaptive control of electrodischarge machining which is based on the sensing of ignition delay. A.B.K.

A74-39022 # Electroerosion profitability criteria (Critères de rentabilité de l'électro-érosion). A. Maillat (Carel Fouché Languepin, Paris, France). In: Nonconventional machining methods; Spring Workshop on Industrial Mechanics, 4th, Paris, France, April 22-24, 1974, Proceedings. Volume 1. (A74-39017 19-15) Saint-Ouen, Seine-St.-Denis, France, Groupement pour l'Avancement de la Mécanique Industrielle, 1974. 13 p. In French.

Comparative study of the processes of electroerosion and mechanical milling, and description of certain advances that have been made in the operation of electroerosion generators. The processes of electroerosion and milling are compared with respect to machining time, process cost, and need for subsequent polishing. Among the advances in electroerosion generator design discussed is a simplification in the production of machining current which appears to offer a final solution to the problem of achieving a pulsed current supply most favorable to electroerosion. Other advances concerning the machining circuits of electroerosion generators are also cited. A.B.K.

deposition processes of metallurgical applications. R. J. Anapol, (Indianapolis, Ind.). (American Property Relationships in San Francisco, Calif., Jan. 28-30, 1974). Technology, vol. 11, July-Aug.

A74-39019 # A theoretical and experimental study of the main parameters governing the electro-discharge machining process. F. van Dijk (McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada) and R. Snoeys (Leuven, Katholieke Universiteit, Louvain, Belgium). In: Nonconventional machining methods; Spring Workshop on Industrial Mechanics, 4th, Paris, France, April 22-24, 1974, Proceedings. Volume 1. (A74-39017 19-15) Saint-Ouen, Seine-St.-Denis, France, Groupement pour l'Avancement de la Mécanique Industrielle, 1974. 24 p. 30 refs.

In this contribution the effect of a single spark upon the

A74-39023 # The influence of some factors on the electric and photon erosion. K. Albinski (Instytut Obrobki Skrawaniem, Krakow, Poland). In: Nonconventional machining methods; Spring Workshop on Industrial Mechanics, 4th, Paris, France, April 22-24, 1974, Proceedings. Volume 1. (A74-39017 19-15) Saint-Ouen, Seine-

A74-39020

NOUVELLE THEORIE VISANT A DEFINIR LE MECANISME DE L'ENLEVEMENT DE MATIERE EN ELECTROEROSION

L. CHINCHOLLE

--:--:--:--:--:--

Dans le cadre des usinages non conventionnels, l'usinage par électroérosion a connu un développement important, la mise au point se faisant d'une manière purement empirique. Depuis les premiers travaux de LAZARENKO relatifs à l'action érosive d'une décharge électrique dans un diélectrique liquide, on a proposé plusieurs théories visant à définir le phénomène physique. Toutefois, aucune d'elles n'explique de façon satisfaisante, le mécanisme de l'enlèvement de matière.

La difficulté de l'étude provient de la multiplicité des paramètres qui interagissent entre eux rendant ainsi toute synthèse difficile. Finalement, les travaux de recherche se bornent souvent à l'étude technologique d'une machine particulière ce qui ne donne aucune portée générale aux conclusions.

Au lieu de tenter d'établir directement une synthèse à partir des résultats publiés, nous avons préféré formuler une hypothèse de travail puis essayer de la vérifier expérimentalement.

C'est à la suite de travaux que nous avons effectués sur la mécanique des bulles [1] [2] [3], que nous avons pu proposer un modèle physique définissant un mécanisme d'enlèvement de matière. Ensuite, nous avons organisé la recherche suivant ces idées.

Comme on ne pouvait pas aborder directement cette étude sur une machine industrielle, nous l'avons d'abord effectuée sur un modèle expérimental simple. Puis à l'aide des enseignements tirés, nous avons tenté d'interpréter les résultats obtenus avec la machine. C'est par des études successives du modèle et du dispositif réel que nous espérons définir avec précision le mécanisme de l'enlèvement de matière en électroérosion et faire progresser cette technique d'usinage industriel tant dans l'utilisation que dans la construction des machines.

Ce travail abordé il y a quelques années a ouvert un champ de recherches assez important que je vais résumer.

## 1 - ETUDE DU MECANISME DE L'EROSION PAR DECHARGE ELECTRIQUE DANS UN DIELECTRIQUE LIQUIDE

### 1.1. Rappel du phénomène physique

La figure 1 représente le schéma simplifié du dispositif expérimental d'étude de l'électroérosion. A partir de la décharge d'un condensateur par exemple, il permet d'obtenir un arc entre les deux électrodes qui baignent dans un liquide diélectrique en général du pétrole. Le rôle de ce liquide est prépondérant car une décharge électrique dans un gaz est très peu érosive.

### 1.2. Rappel des travaux effectués

Les publications relatives à l'électroérosion sont de deux types : les unes développent des aspects technologiques à partir de résultats empiriques et visent à l'amélioration de machines existantes. Les autres tentent d'expliquer le phénomène physique proprement dit et élaborent des théories controversées sinon contradictoires.

Lors du Symposium International sur les techniques d'usinage électrique à Vienne en 1970, 31 exposés concernent l'électroérosion : 18 traitent de technologie, 5 s'intéressent à des questions économiques et 8 seulement abordent des recherches plus ou moins théoriques en analysant l'influence des paramètres physiques.

Parmi les phénomènes physiques étudiés, on relève le plus souvent l'initiation de l'arc, la formation et l'évolution du plasma ou d'une bulle gazeuse, les effets thermiques à la surface des électrodes et les effets hydrodynamiques. Très souvent ces différents aspects sont considérés d'une manière trop indépendante notamment lorsqu'il s'agit d'expliquer l'enlèvement de matière ou l'inversion d'érosion.

HOCHENBERRY [4] a publié une série de photos intéressantes montrant l'évolution de bulles provoquées par une décharge électrique entre une pointe et une plaque. L'axe de prise de vue est celui de la pointe ce qui ne permet pas d'observer une éventuelle séparation de la bulle en deux cavités. Il mentionne l'existence de particules de matière enlevées au cours de l'explosion. ZOLOTYCH a observé le même effet. Tous deux supposent qu'il s'agit d'une vaporisation explosive du métal.

HASHIGUCHI [5] présente également une série de photos sur l'évolution de la bulle provoquée par une décharge dans un liquide. On voit nettement l'explosion suivie de l'implosion de la cavité gazeuse. L'auteur parle d'une "force impulsive" qui aurait un effet destructeur.

ZOLCZYCH [6] s'oriente vers une théorie phénoménologique de l'électroérosion et tente une approche expérimentale. D'après lui, il existe quatre étapes successives. Il y a d'abord un apport d'énergie sur les électrodes, puis propagation de la chaleur à la surface. Ensuite, il parle d'une phase aéro et hydrodynamique d'explosion suivie par des effets thermomécanique conduisant à une vaporisation métallique intense consécutive à la dépression qui règne dans la cavité.

ZELIŃSKI [7] s'est préoccupé également de l'influence de la dépression à l'intérieur de la bulle formée au voisinage du plasma. Il mentionne des vitesses d'expansion de l'ordre de 1650 m/s pendant 2 à 3 microsecondes.

SCHULMACHER [8] pense que, pour les impulsions de courte durée, l'augmentation de l'usure de l'électrode-outil est due à une vaporisation du métal et que l'enlèvement de métal liquide se fait uniquement sur la pièce. L'auteur ne propose pas de processus physique de cet enlèvement.

Dans son étude des décharges par impulsions ALBINSKI [9] regroupe dans une relation empirique différents paramètres qui lui paraissent importants tels que la température de fusion du métal de l'électrode-outil, son module d'élasticité et son coefficient de dilatation. Il tient compte également d'un coefficient de puissance qui est le rapport entre la puissance moyenne d'une impulsion et le rapport cyclique. Aucune interprétation physique n'est proposée.

DIVERS [10] recherche un modèle mécanique de l'érosion. Après une analyse de photos il a trouvé que le diamètre du cratère croît proportionnellement à la durée de "développement de l'étincelle" et qu'il correspond à la pénétration plus ou moins importante d'un "cône fictif" dans le métal de la pièce. D'après lui, les pertes Joule constituent la seule source de chaleur à la surface des électrodes.

D'autres essais font état d'ondes de choc qu'on peut détecter en étudiant la déformation d'une feuille d'aluminium et en faisant varier, éventuellement, la viscosité du liquide utilisé.

Enfin on peut signaler l'approche originale du problème d'électroérosion qui a été faite par RHYNER [11]. Un système d'acquisition de données relève les valeurs des paramètres qui régissent les décharges électriques (gap, tension d'amorçage, tension d'arc, nombre de décharges érosives, etc...).

Ensuite un ordinateur les exploite et établit des corrélations entre eux.

L'analyse des publications fait apparaître l'ignorance dans laquelle on est vis à vis du phénomène physique que constitue l'électroérosion. Deux problèmes, par ailleurs liés entre eux, se posent. Ce sont d'une part, le mécanisme de l'enlèvement de matière proprement dit, d'autre part l'érosion sélective des électrodes.

Nous avons abordé l'étude de l'électroérosion de la façon la plus générale possible.

### 1.3. Nouvelle théorie définissant un mécanisme d'érosion

#### 1.3.1. Processus mécanique d'enlèvement de matière [12]

Lors de la décharge électrique dans un liquide, il se crée une cavité de vapeur entre les deux électrodes (figure 2). Cette cavité explose (figure 2a) puis implose par condensation de la vapeur quand l'arc est désamorcé (figure 2b). Nous avons montré [1][2][3] que cette implosion s'accompagne d'un très puissant microjet liquide susceptible d'entraîner une érosion dans un matériau très dur. Si l'on songe que ce microjet vient heurter du métal fondu durant le passage du courant, on comprend qu'il puisse y avoir une érosion intense.

Cette hypothèse de travail suppose également que la cavité de vapeur formée entre les électrodes se scinde en deux cavités hémisphériques de volumes inégaux, la plus grande correspondant à la température la plus élevée (figure 2c).

Dès lors, on conçoit que le plus grand volume donnera le microjet le plus puissant qui enlèvera sur la surface de l'électrode, la plus grande quantité de métal.

#### 1.3.2. Etude des pertes de poids consécutives à l'électroérosion

Suivant l'hypothèse ci-dessus, le volume de la cavité de vapeur initiale déterminera la perte de poids totale des deux électrodes. Un premier sujet de travail sera donc l'étude des variations de l'érosion totale en fonction des différents paramètres de la décharge. Ceci sera d'autant plus juste que les érosions seront égales sur les deux électrodes.

Le deuxième sujet de travail sera l'étude des variations des pertes de poids relatives de ces deux électrodes :  $\gamma = \frac{\text{pertes anode}}{\text{pertes cathode}} = \frac{P_a}{P_c}$ . Suivant notre hypothèse, ce rapport dépendra de leurs températures de surface et de leurs diamètres respectifs.

## 2 - RESULTS

### 2.1. Etude sur modèle de l'implosion d'une cavité de vapeur

Il semble logique de vérifier d'abord expérimentalement le bien fondé de l'hypothèse avancée au sujet de la cavité de vapeur. Nous y avons songé mais la complexité de cette étude nous a conduit à **sérier** les difficultés pour progresser par paliers successifs.

Le but final est de suivre, grâce au cinéma rapide, l'évolution de la cavité. Les problèmes qui se présentent sont d'ordre géométrique (vu les dimensions mises en jeu) et d'ordre temporel (à cause de la faible durée de la décharge).

Avant d'aborder le phénomène physique réel dans toute sa complexité, nous tentons, ici également, de réaliser un modèle expérimental plus abordable à la fois dans l'espace et dans le temps.

D'autres chercheurs ont déjà imaginé de tels modèles mais nous pensons que ceux qu'ils ont choisis ne sont pas conformes à la réalité. Tantôt ils utilisent comme électrodes, deux pointes ou une pointe et un plan, tantôt ils considèrent deux plans trop espacés si bien que la cavité devient filiforme.

Il est nécessaire que la cavité de vapeur sur le modèle évolue de la même façon que celle du système réel. Ceci implique de bien définir la géométrie du dispositif expérimental.

Nous avons réalisé un modèle constitué par deux surfaces métalliques ayant une section de  $2 \text{ cm}^2$  environ, distantes de 5 mm et plongées dans de l'eau. Dans l'espace interélectrodes, on crée artificiellement une cavité de vapeur dont on provoque l'implosion par refroidissement ou par surpression.

Les premiers résultats expérimentaux ainsi établis semblent confirmer notre hypothèse soit la rupture de la cavité de vapeur initiale en deux cavités dont la plus grande correspond à l'électrode la plus chaude (figure 3).

## 2.2. Etude de l'énergie dissipée dans la zone de l'arc en fonction des paramètres électriques

La technique de l'usinage par électroérosion utilise deux types de générateurs l'un dit "à relaxation" ainsi que le montre la figure 1, l'autre dit "à impulsions contrôlées". Comme nous avons généralement utilisé un dispositif du premier type il était nécessaire de bien connaître la valeur de l'énergie effective dissipée dans la zone de la décharge.

L'analyse du bilan énergétique du circuit de décharge, nous a permis de mieux comprendre le passage de l'énergie électrique nominale du condensateur ( $1/2 CV^2$ ) à ce que nous appelons l'énergie électrique effective.

La conclusion de ce travail est que la notion d'énergie nominale n'a aucun sens vis à vis de l'érosion et qu'on ne doit pas établir de corrélation entre ces deux grandeurs.

D'autre part, il apparaît un maximum de rendement énergétique (1)  $\frac{\text{énergie effective dans l'arc}}{\text{énergie nominale}}$  lorsque la tension d'alimentation égale deux fois la tension d'arc soit environ 40 volts (figure 4).

Certes, dans la technique d'usinage par électroérosion, la recherche d'un maximum de rendement électrique n'a guère d'importance, toutefois, on voit pour un circuit électrique donné, ce serait maladroît d'augmenter la tension d'alimentation pour obtenir une énergie effective plus grande.

Pratiquement, nous n'utiliserons pas la notion d'énergie nominale. Les paramètres électriques importants semblent être la tension de claquage, la forme de l'onde de courant et l'énergie qui apparaît sur les électrodes sous forme de chaleur au voisinage des tâches anodique et cathodique.

## 2.3. Etude de l'érosion totale en fonction de l'énergie électrique dépensée

### 2.3.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental du type à relaxation a été réalisé au laboratoire (figure 5). Il permet d'opérer coup par coup. On réalise ainsi de 1000 à 10000 décharges et, par pesées des électrodes, on évalue l'érosion moyenne relative à une décharge.

Cet ensemble comprend, d'une part un bloc d'alimentation qui fournit les valeurs désirées des condensateurs et de la tension continue, d'autre part la partie mécanique soit deux électrodes dont l'une mobile, avance et recule automatiquement. On utilise le kérosène comme liquide diélectrique.

Parmi les accessoires, nous citerons un compteur d'impulsions, un oscilloscope donnant l'onde de courant de décharge et une balance dont la précision est de l'ordre du centième de milligramme.

### 2.5.2. Résultats expérimentaux

La valeur C du condensateur d'alimentation constitue le paramètre variable mais, comme la tension de charge est fixe, ceci revient à faire varier le courant de décharge. La forme de celui-ci reste approximativement une demi-sinusoïde de valeur maximale et de durée variables. On peut caractériser ce courant soit par ses valeurs moyenne, efficace ou maximale, soit par l'intégrale

$\int_0^{t_d} i dt$  mesurable expérimentalement.

Nous tentons d'établir une corrélation entre l'érosion et ce courant.

### CORRELATION ENTRE LES PERTES DE POIDS DE CHAQUE ELECTRODE ET L'ENERGIE D'ARC $W_a$

Nous appellerons  $u_a$  la tension d'arc et nous supposons ce qui est pratiquement vrai, qu'elle est constante et égale à 20 volts.

L'énergie électrique dépensée dans l'arc de durée  $t_d$  s'écrit :

$$W_a = \int_0^{t_d} u_a i dt = u_a \int_0^{t_d} i dt$$

Pour une décharge donnée nous pouvons donc représenter (figure 6) les variations des pertes de poids à l'anode et à la cathode en fonction de l'énergie d'arc avec comme paramètre la durée de la décharge.

On relève que l'érosion dépend peu de la valeur de la capacité dans la gamme de 10 à 150  $\mu F$  mais qu'elle est fonction de l'énergie d'arc donc de l'onde de courant.

La figure 7 représente les variations de l'érosion totale ( $S = p_a + p_c$ ) en fonction de l'énergie d'arc.

Ceci n'est qu'une corrélation entre deux grandeurs. Le phénomène physique qui la détermine n'apparaît pas encore.

Toutefois on peut dire que l'érosion dépend d'abord du courant et ensuite qu'elle est modulée par la valeur de la capacité celle-ci intervenant à la fois sur l'intensité maximale du courant et sur la durée  $t_d$  de la décharge.

Comme le temps joue un rôle important dans l'hypothèse de l'évolution de la cavité de vapeur nous avons pensé qu'il serait intéressant d'étudier l'érosion en fonction de la durée de la décharge pour une énergie donnée.

CORRELATION ENTRE L'EROSION ET L'ENERGIE DEPENSEE PAR EFFET JOULE SUR LES ELECTRODES

D'après le mécanisme d'érosion que nous proposons c'est un microjet liquide qui enlève essentiellement du métal fondu. Les deux paramètres importants sont donc la grosseur de la cavité gazeuse et la quantité de métal fondu.

On peut imaginer que le microjet liquide enlève tout ou partie du métal fondu ce qui amène à faire des études différentes. C'est pourquoi nous définirons deux coefficients d'efficacité de l'érosion que nous appellerons successivement  $k_1$  et  $k_2$ .

a - Définition du coefficient d'efficacité  $k_1$

$$k_1 = \frac{\text{métal enlevé}}{\text{énergie fournie}} = \frac{S}{W_j} = \frac{S}{\int_0^{t_d} R I^2 dt}$$

Ceci représente l'érosion totale par unité d'énergie électrique due à l'effet Joule. La quantité de métal enlevé est obtenue par pesée des électrodes. Ensuite on évalue l'énergie Joule en admettant que la résistance R au voisinage de la tache de la décharge reste constante et en mesurant le courant efficace I ce qui donne :

$$k_1 = \frac{S}{R I^2 t_d}$$

La figure 8 représente les variations du coefficient d'efficacité  $k_1$  en fonction de la durée de la décharge  $t_d$  pour des valeurs constantes de  $I^2 t$ .

Pour des valeurs de  $t_d$  supérieures à 90 microsecondes on voit nettement que les différentes courbes tracées à énergie  $R I^2 t_d$  constante sont confondues ce qui établit une relation bien définie entre  $k_1$  et  $t_d$ . Soit une valeur  $t_d$  donné. Quelle que soit la valeur  $R I^2 t_d$  on a le même coefficient d'efficacité donc :  $k_1 = \frac{S}{R I^2 t_d} = \text{constante}$ . On peut donc dire que dans la zone où  $t_d$  est supérieur à 90 microsecondes la perte de poids est proportionnelle à la puissance électrique fournie par effet Joule dans les électrodes ou encore qu'elle est proportionnelle à  $I^2$ . Pour une durée de décharge inférieure à 90 microsecondes cette conclusion n'est plus valable. Nous pensons qu'il faut alors faire intervenir la notion de métal fondu.

b - Définition du coefficient d'efficacité  $k_2$  de la bulle

$$k_2 = \frac{\text{métal enlevé}}{\text{métal fondu}}$$

Ceci représente la fraction de métal fondu qui est enlevé par le microjet. On peut mesurer cette quantité de métal enlevé mais il faut faire appel au calcul pour déterminer la quantité de métal fondu par effet Joule au voisinage de la tache de décharge. On obtient ainsi pour la masse de métal fondu une expression de la forme :

$$\text{masse de métal fondu} = A(I^2 t)^{0,75}$$

Le coefficient A fait intervenir les paramètres électriques et thermiques du matériau des électrodes. Le coefficient d'efficacité de la bulle s'écrit donc :

$$k_2 = \frac{\text{métal enlevé}}{\text{métal fondu}} = \frac{S}{A(I^2 t)^{0,75}} = \frac{1}{A} \frac{S}{I^{1,5} t^{0,75}}$$

La figure 9 représente les variations du coefficient d'efficacité  $k_2$  en fonction de la durée de la décharge  $t_d$  pour des valeurs constantes de  $I^{1,5} t^{0,75}$ .

Contrairement au cas précédent, c'est dans la zone où  $t_d$  est inférieure à 30 microsecondes que les courbes tendent à se superposer montrant ainsi le bien fondé de cette notion d'efficacité de la bulle. On voit que pour une valeur  $t_d$  donnée, l'érosion est proportionnelle au métal fondu environ quelle que soit la valeur de  $I^{1,5} t^{0,75}$  c'est-à-dire quel que soit le métal fondu.

c - Remarque

Nos travaux visent actuellement à expliquer les variations de l'efficacité de la bulle dans chacun des trois intervalles suivants :

- $t_d < 30$  microsecondes
- $30 < t_d < 90$  microsecondes
- $t_d > 90$  microsecondes

Il est à remarquer que les différentes courbes ( $k_2$ ), obtenues pour des valeurs de  $I^{1,5} t^{0,75}$  données, se superposent par glissement.

#### 2.4. Etude de l'érosion relative des électrodes

L'étude précédente concerne la somme des érosions. Nous allons maintenant considérer leur rapport soit :

$$\gamma = \frac{\text{perte de poids de l'anode}}{\text{perte de poids de la cathode}} = \frac{P_a}{P_c}$$

Notre hypothèse de travail fait intervenir l'implosion préférentielle de la cavité de vapeur sur l'électrode la plus chaude. Ceci suppose une dissymétrie thermique des électrodes qui peut exister pour plusieurs raisons. Dans le cas où les électrodes sont constituées par le même matériau l'échauffement dépend notamment de leur polarité et de leur diamètre.

Nous rappelons que, pour le cuivre par exemple, la température de la tache anodique ( $T_a$ ) est supérieure à celle de la tache cathodique ( $T_c$ ) ce qui crée une première dissymétrie thermique ( $\Delta T = T_a - T_c > 0$ ). De plus, deux électrodes de diamètres différents ne s'échauffent pas de la même façon, ce qui se traduit par les pentes différentes des courbes 1 et 2 sur la figure 10.

Les variations du rapport  $\gamma$  en fonction de l'énergie des décharges, sont représentées également sur la figure 10.

##### 2.4.1. Variations de $\gamma_i$ en fonction de l'énergie

L'indice  $i$  représente le diamètre de l'électrode supérieure, celui de l'électrode inférieure étant toujours égal à 10 mm. De la comparaison des figures 10 et 11 on déduit que la valeur maximale  $\gamma_{ni}$  correspond, d'après le modèle proposé à une différence de température des électrodes  $\Delta T$  maximale. Les parties (R) et (S) de la courbe sont relatives à un  $\Delta T$  réduit, correspondant soit à une faible énergie mise en jeu (R) soit à une température limite (S).

##### 2.4.2. Variations de $\gamma_i$ en fonction de la polarité des électrodes

En inversant le sens de la tension d'alimentation, on obtient les courbes  $\gamma'_i$ . Le point d'intersection de ces courbes et de la droite  $\gamma = 1$  (inversion d'érosion) correspond à l'égalité des températures sur les électrodes et à celle des volumes des cavités gazeuses. La courbe en tirets de la figure 10 fait apparaître le changement de signe de  $\Delta T$ .

### 2.4.3. Variations de $\gamma_i$ en fonction du diamètre des électrodes

Les valeurs maximales  $\gamma_{mi}$  dépendent de la valeur relative des diamètres des électrodes. Pour une cathode donnée, une diminution du diamètre de l'anode entraîne une augmentation de  $\Delta T$ , donc de  $\gamma_{mi}$ .

Enfin, nous remarquons bien, que pour deux diamètres identiques, il n'y a plus d'inversion d'érosion.

Ainsi le modèle proposé rend compte des résultats expérimentaux que nous avons obtenus ; signalons qu'il permet également d'interpréter des résultats obtenus par ailleurs et qui pouvaient auparavant sembler contradictoires.

### CONCLUSION

A partir de connaissances nouvelles sur la mécanique des bulles, nous avons formulé une hypothèse électrohydrodynamique en vue d'expliquer le mécanisme de l'enlèvement de matière en électroérosion. Ceci nous a permis d'établir un plan de recherches expérimentales parallèlement sur des modèles et sur des dispositifs réels.

Jusqu'à maintenant, tous les résultats obtenus sont en accord avec nos idées qui se précisent au fur et à mesure qu'avancent les travaux.

Dans le cas particulier de l'électroérosion avec un circuit à relaxation fonctionnant au coup par coup, il semble qu'on puisse obtenir une courbe générale valable quels que soient les paramètres de fonctionnement. Nous tentons de rattacher ces résultats avec ceux qu'on obtient en utilisant une machine industrielle.

La connaissance parfaite du mécanisme de l'érosion avec ce type de machine est difficile à atteindre car le fonctionnement permanent fait intervenir des problèmes d'échauffement qu'il faut d'abord résoudre.

Certes, le mécanisme d'enlèvement de matière qui a été proposé ne constitue pas, à nos yeux, la seule cause d'érosion, mais nous pensons que son rôle est prépondérant dans la plupart des cas et que nous avons fait un pas en avant dans sa définition.

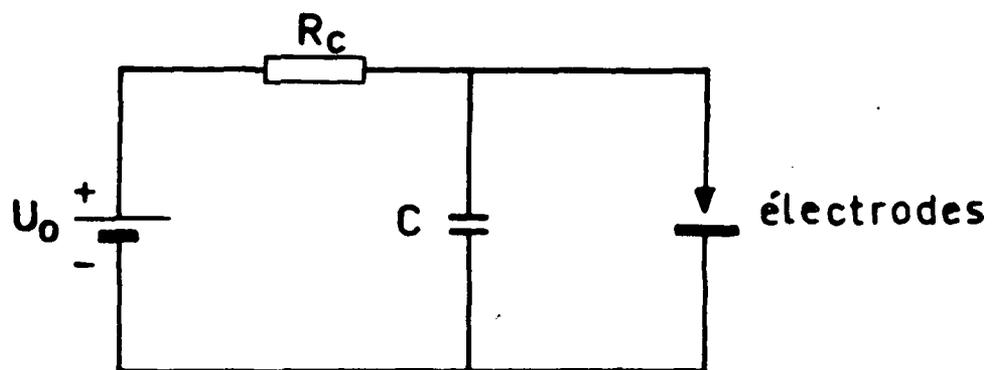




## LISTE DES FIGURES

--:--:--:--:--:--:--:--:--

- FIGURE 1 - Schéma du dispositif expérimental utilisé dans l'étude de l'électroérosion
- FIGURE 2 - Implosion de la cavité de vapeur
- FIGURE 3 - Allure de l'implosion d'une cavité, d'après des vues cinématographiques
- FIGURE 4 - Etude des variations du rendement électrique en fonction de la tension appliquée aux bornes du condensateur. La tension d'arc  $u_a$  est supposée constante
- FIGURE 5 - Dispositif expérimental permettant de travailler coup par coup
- FIGURE 6 - Etude des variations des pertes de poids de l'anode ( $p_a$ ) et de la cathode ( $p_c$ ) en fonction de l'énergie d'arc  $W_a$ .
- FIGURE 7 - Etude des variations de l'érosion totale ( $S = p_a + p_c$ ) en fonction de l'énergie  $W_a$
- FIGURE 8 - Etude de l'efficacité  $k_1$  de l'érosion en fonction de la durée de la décharge  
$$(k_1 = \frac{S}{R I^2 t})$$
- FIGURE 9 - Etude de l'efficacité  $k_2$  de la bulle en fonction de la durée de la décharge  
$$(k_2 = \frac{S}{A I^{1,5} t^{0,75}})$$
- FIGURE 10 - Elévation de la température estimée des électrodes en fonction de l'énergie des décharges au cours d'un essai coup par coup.
- FIGURE 11 - Etude des variations de l'érosion relative des électrodes en fonction de la valeur du condensateur (énergie des décharges).



- $C$  : Condensateur
- $R_c$  : Résistance de charge
- $U_0$  : Source de tension continue

Figure 1

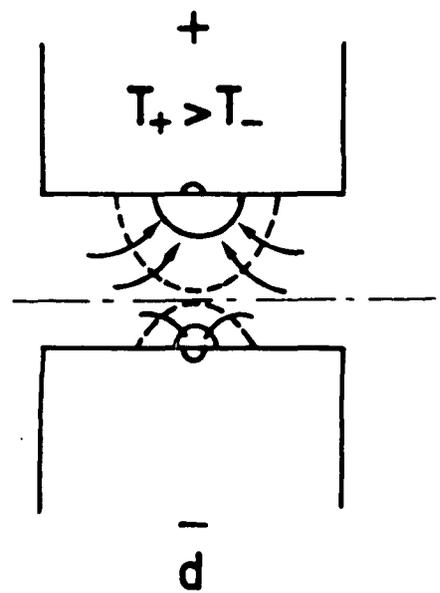
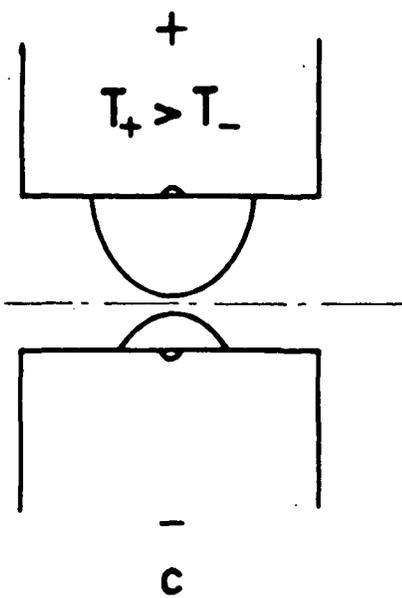
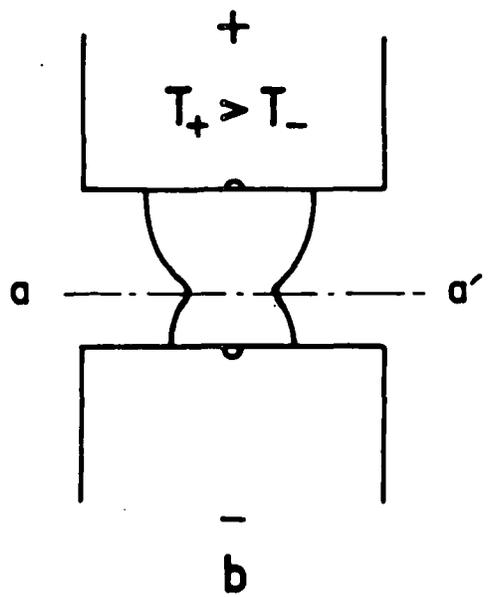
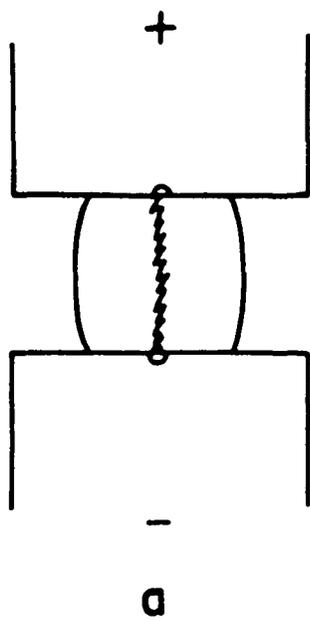


Figure 2

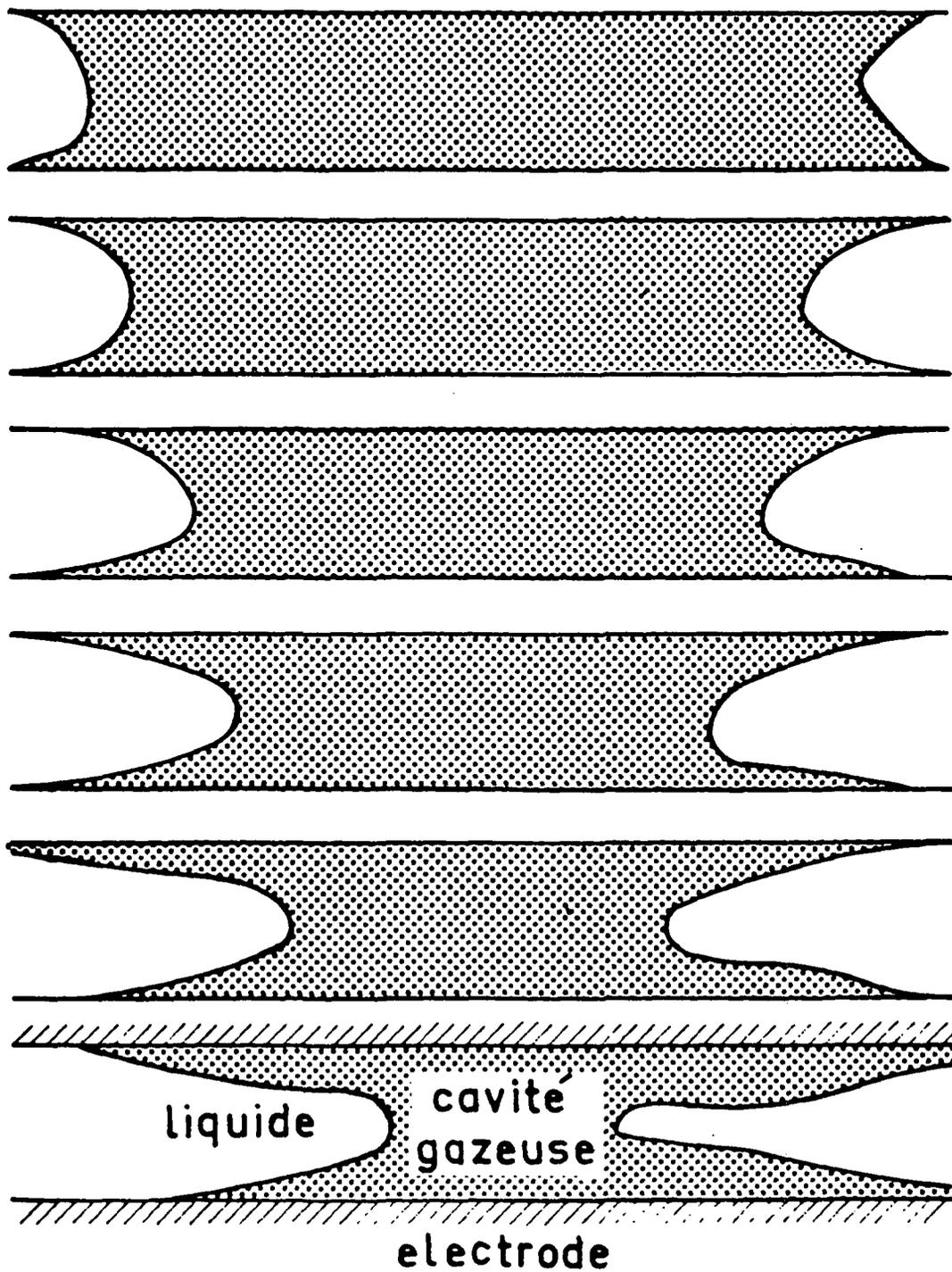


Figure - 3a



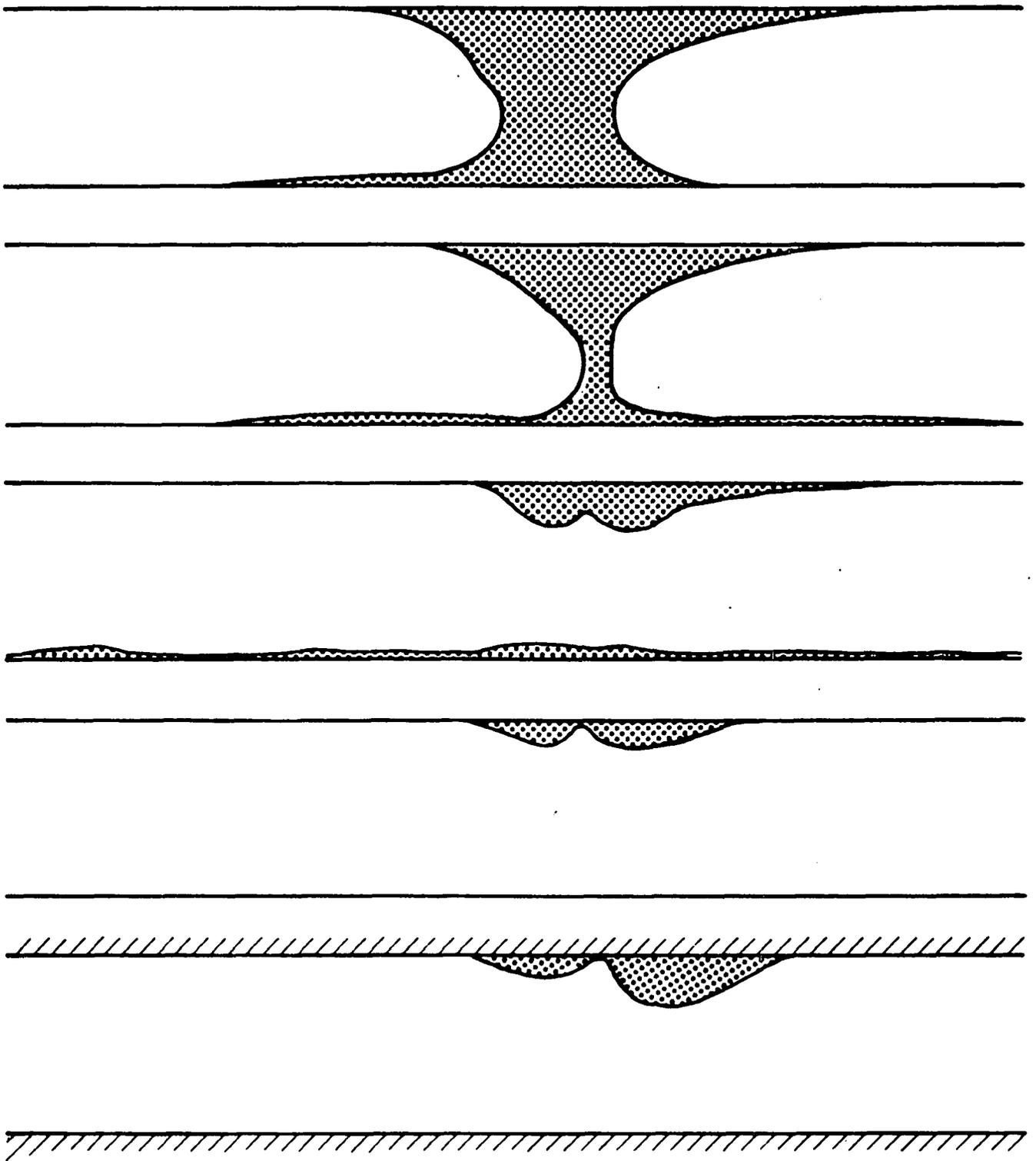


Figure - 3 c

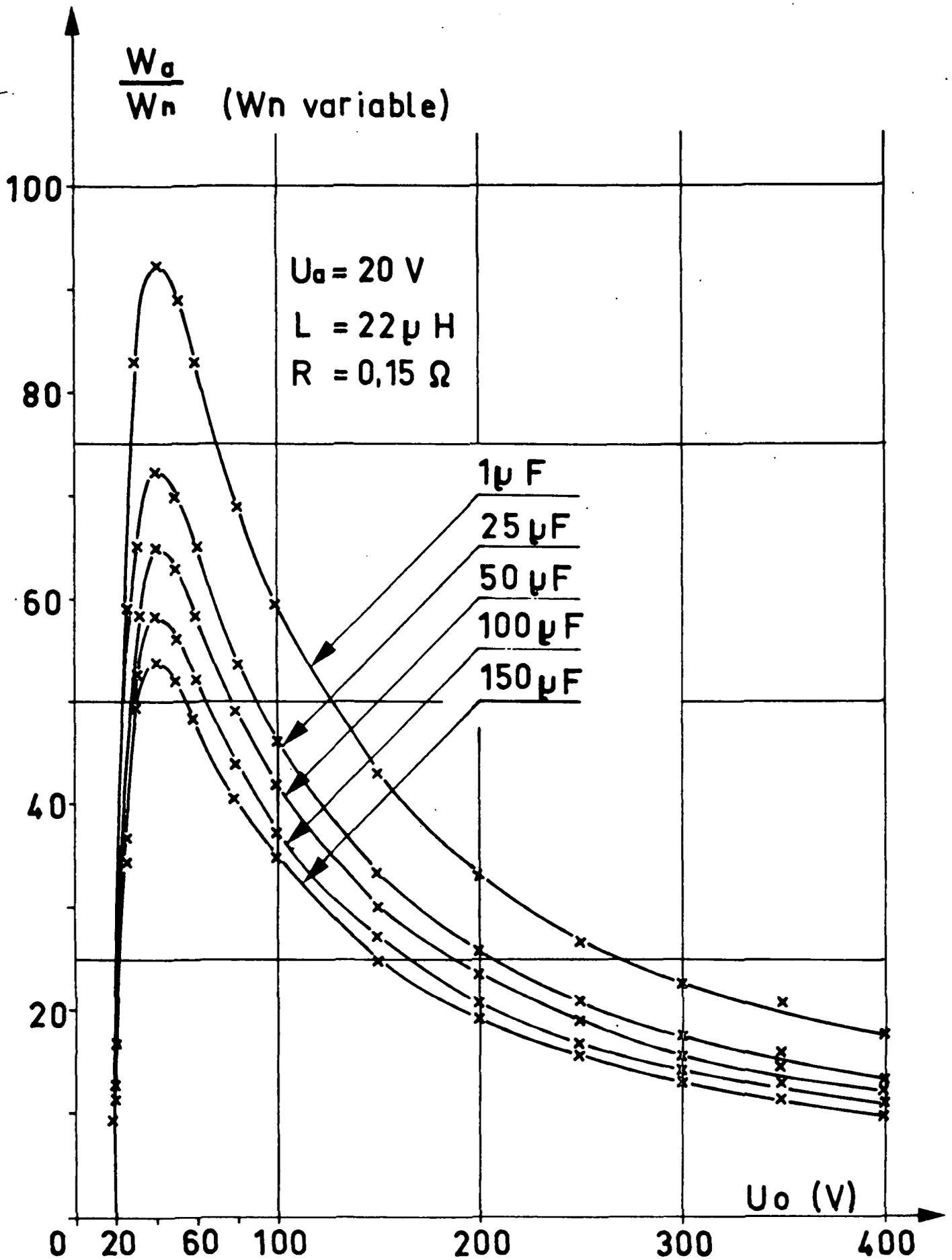


Figure 4

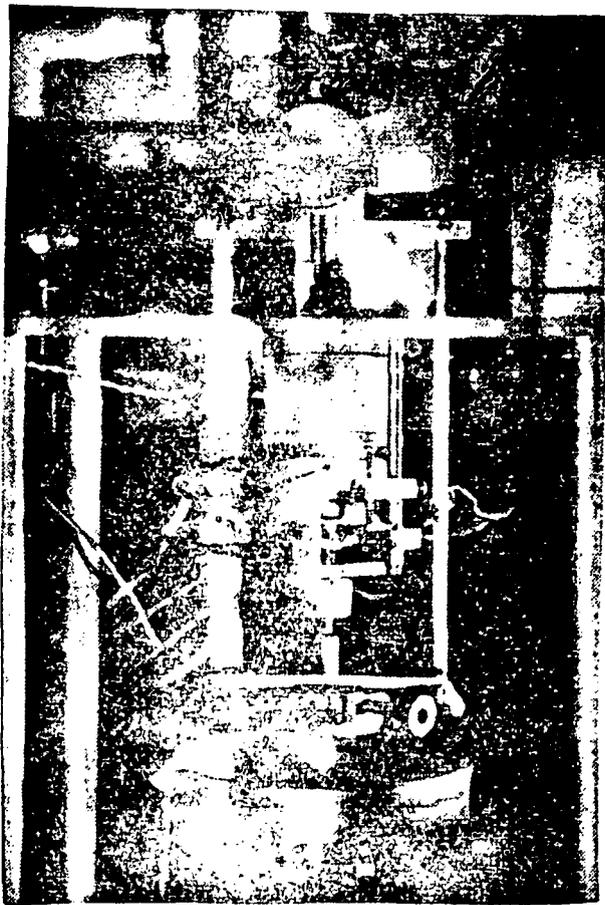
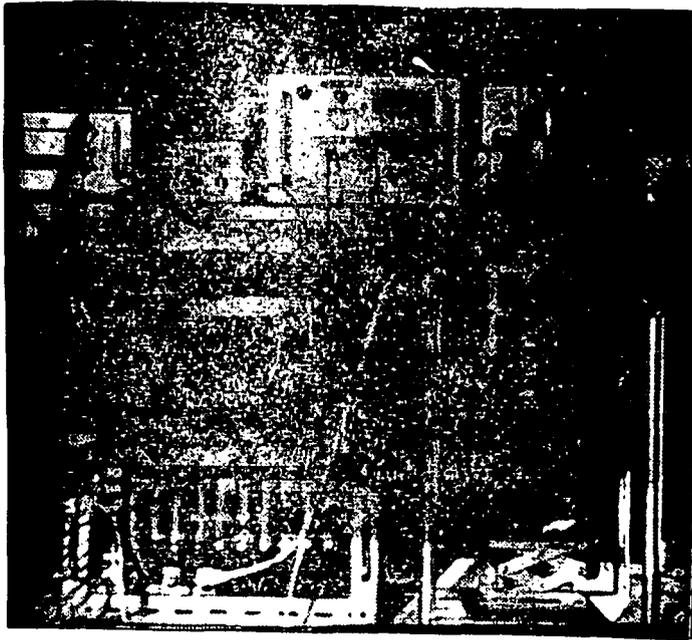


Figure 5

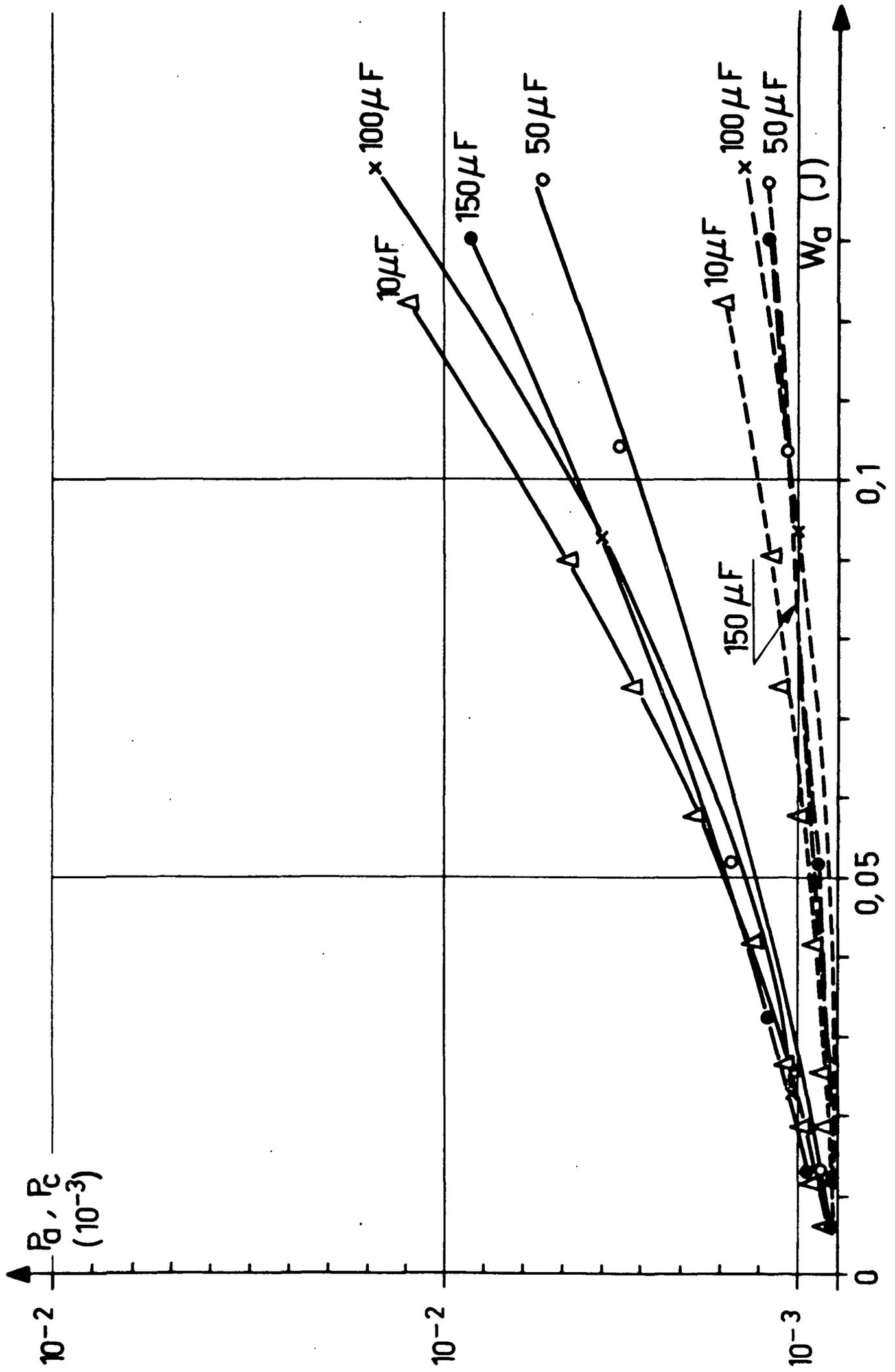


Figure 6

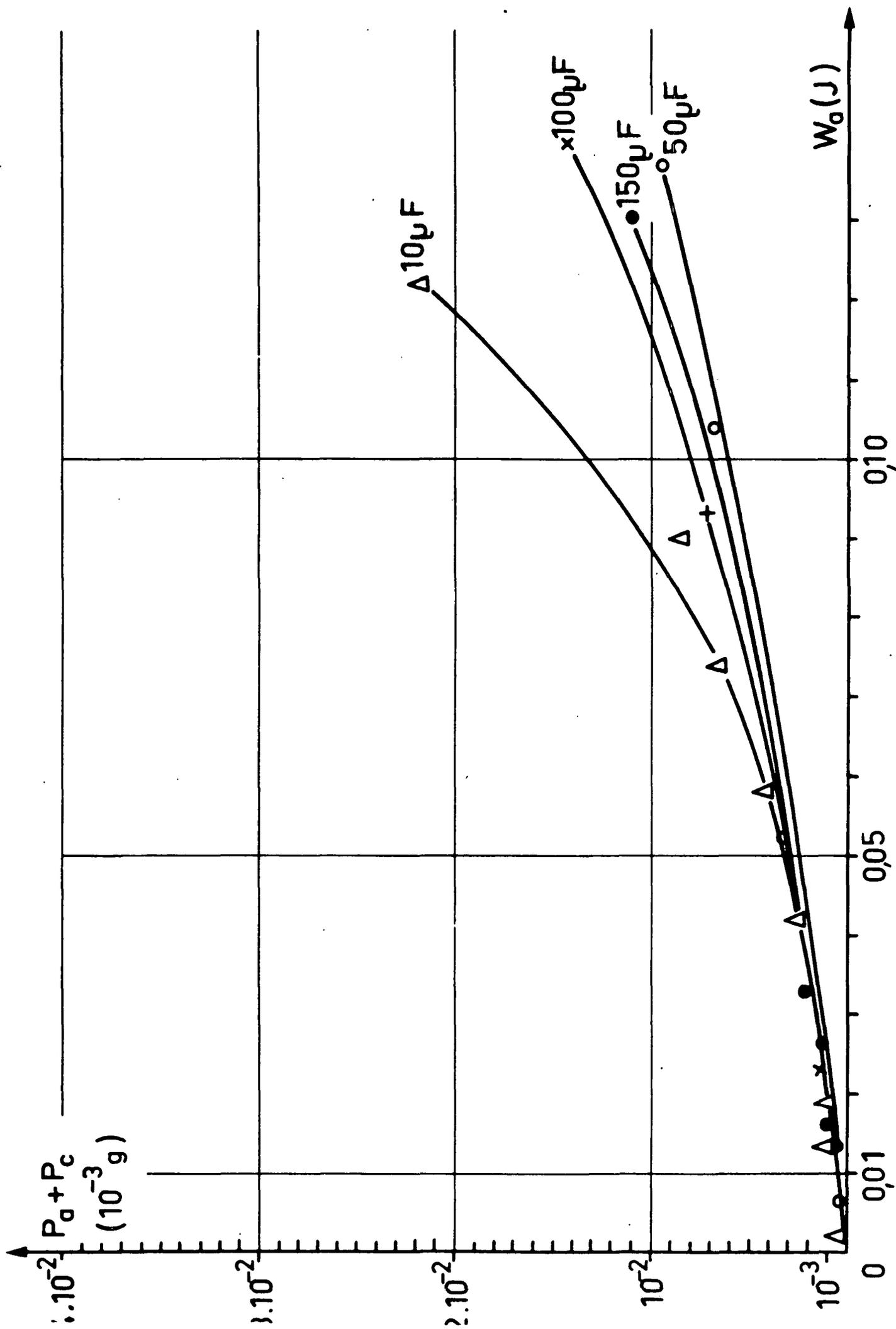


Figure 7

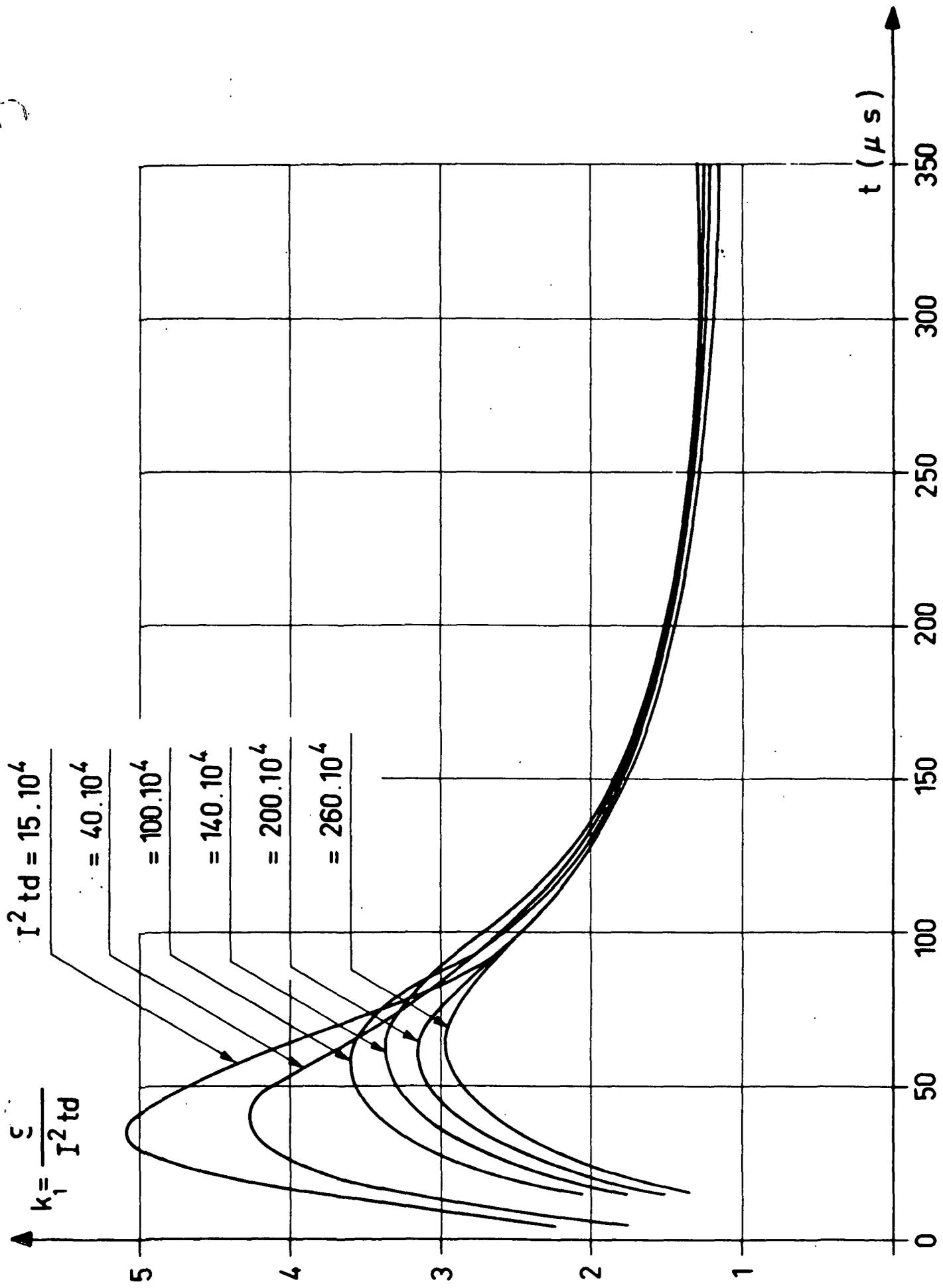


Figure 8

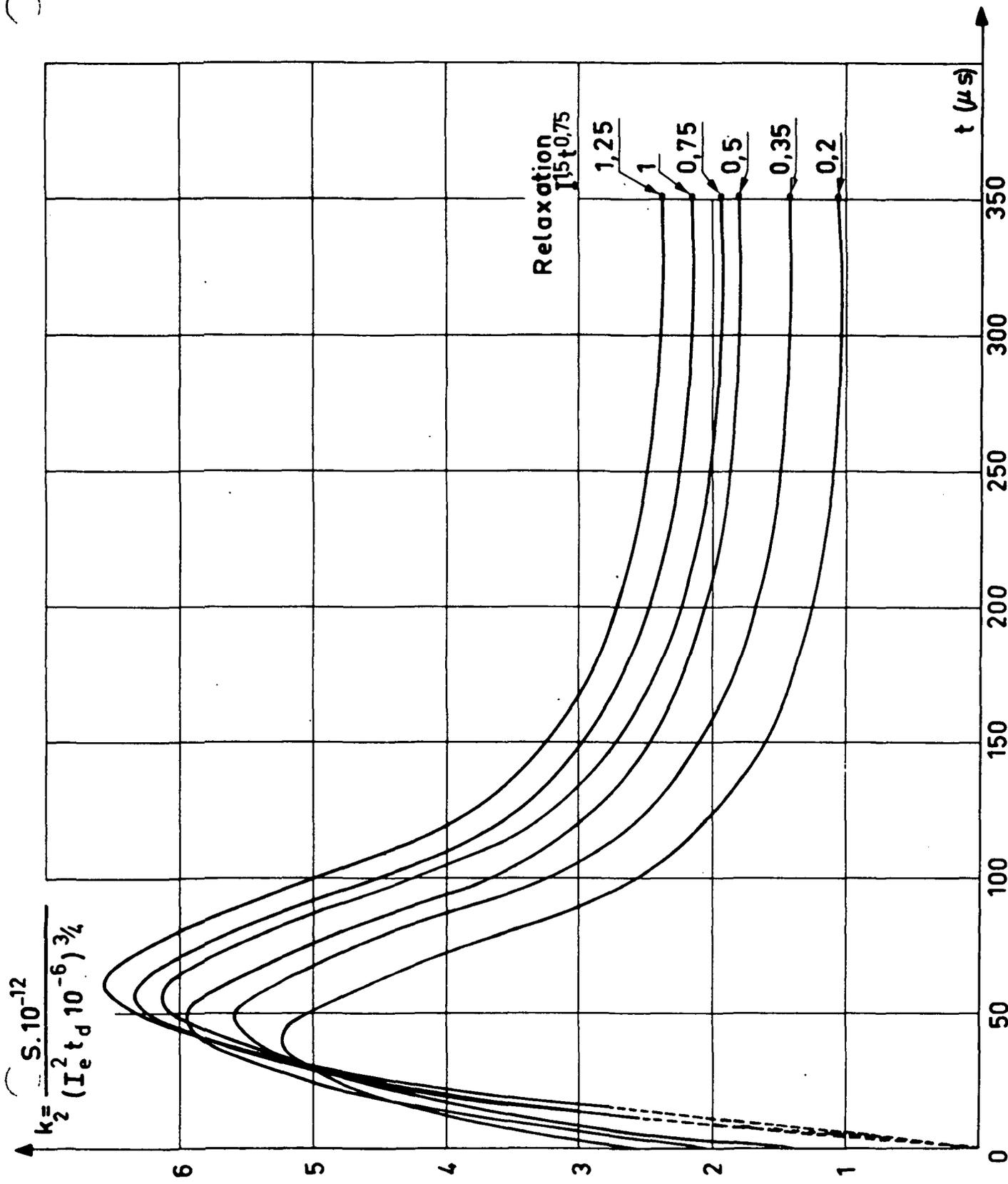
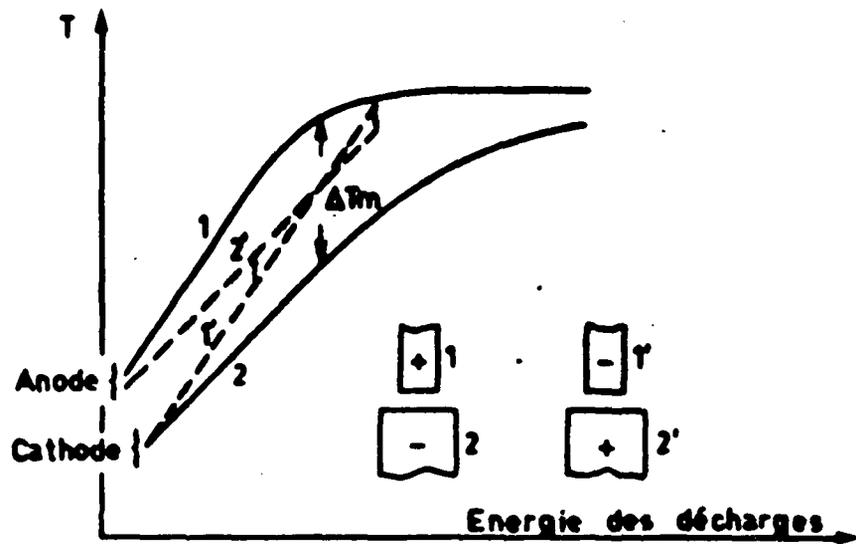


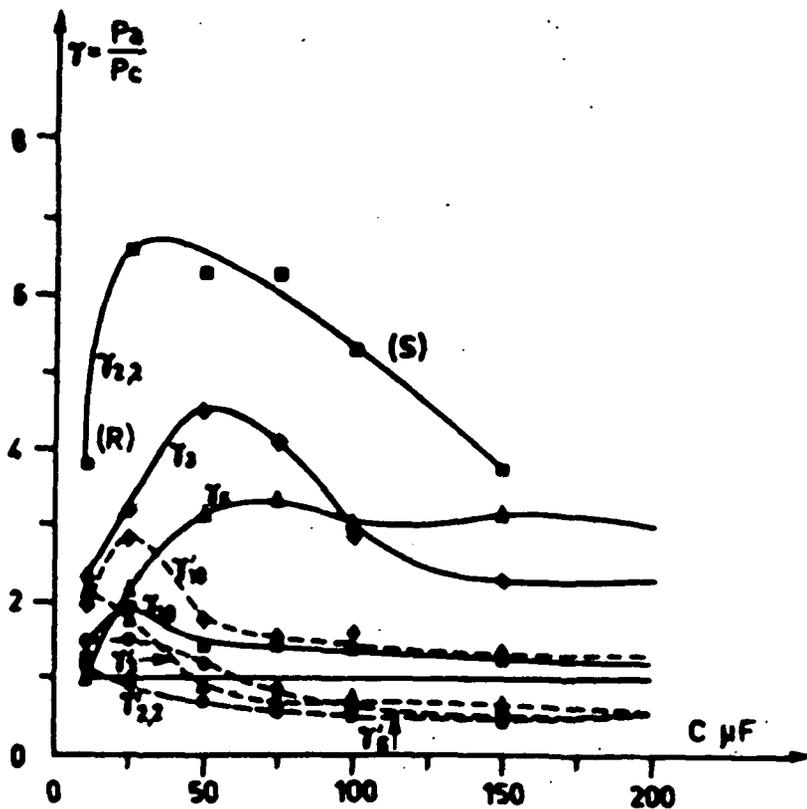
Figure 9

**“PAGE MISSING FROM AVAILABLE VERSION”**



1, 2 : diamètre anode < diamètre cathode;  
 1', 2' : diamètre cathode < diamètre anode.

Figure 11



Les variations de  $\gamma_1$ , ont été établies pour divers diamètres  $i$  de l'électrode supérieure, celui de l'électrode inférieure étant toujours égal à 10mm. L'énergie des décharges est fournie par un condensateur de capacité  $C$  variable chargé sous une tension constante de 150V.

## STANDARD TITLE PAGE

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 1. Report No.<br>NASA TM- 77875                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 2. Government Accession No.                          | 3. Recipient's Catalog No.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                 |
| 4. Title and Subtitle<br>A NEW THEORY AIMING TO DEFINE THE MECHANISMS OF MATERIAL REMOVAL IN ELECTROEROSION                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                      | 5. Report Date<br>June 1985                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 6. Performing Organization Code |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                      | 8. Performing Organization Report No.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 10. Work Unit No.               |
| 7. Author(s)<br>L. Chincholle                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                      | 11. Contract or Grant No.<br>NASW-4005                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                      | 11. Type of Report and Period Covered<br>Translation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                 |
| 9. Performing Organization Name and Address<br>Leo Kanner Associates<br>Redwood City, CA 94063                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                      | 14. Sponsoring Agency Code                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                 |
| 12. Sponsoring Agency Name and Address<br>National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C. 20546                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                      | 13. Supplementary Notes<br>Translation of "Nouvelle théorie visant à définir le mécanisme de l'enlèvement de matière en electroerosion" IN: Nonconventional Machining Methods: Spring Workshop on Industrial Mechanics, 4th, Paris, France, April 22-24, 1974. Proceedings, Vol. 1. Saint-Ouen, Seine-St. Denis, France, Groupement pour l'Avancement de la Mécanique Industrielle, 1974, pp. 1-17.<br>(A74-39020) |                                 |
| 16. Abstract<br>Formulation of an electrohydrodynamic hypothesis to explain the mechanism of material removal in electroerosion, and results of experiments designed to verify the validity of the proposed hypothesis. A hypothesis is proposed according to which material is removed by a high-power liquid microjet which forms as a result of implosion of a vapor cavity between the two electrodes. Using a model of the implosion of a vapor cavity, a study is made of the energy dissipated in the arc zone as a function of the electrical parameters and of the total erosion as a function of the expended electrical energy. In addition, correlations are made between the weight losses of each electrode and the arc energy and between the erosion and the energy expended by Joule effect on the electrodes. |                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                 |
| 17. Key Words (Selected by Author(s))                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                      | 18. Distribution Statement<br><br>Unclassified-Unlimited                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                 |
| 19. Security Classif. (of this report)<br>Unclassified                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 20. Security Classif. (of this page)<br>Unclassified | 21. No. of Pages<br>29                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 22.                             |