

Revue de  
21/12/92

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère Délégué aux Universités

UNIVERSITE DE BLIDA  
Institut National d'Enseignement Supérieur de Mécanique

**THESE  
DE  
MAGISTER**

PRESENTEE PAR :

IBRIR BRAHIM

Spécialité : Construction Mécanique

SUJET DE LA THESE

Recherche de l'Influence des Caractéristiques  
Géométriques des Eprouvettes sur la Position  
du Noyau Fondu en Soudage par Resistance

SOUTENUE LE 25 JANVIER 1990 DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

32-530-62-1

32-530-62-1

جمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère Délégué aux Universités

UNIVERSITE DE BLIDA  
Institut National d'Enseignement Supérieur de Mécanique

**THESE  
DE  
MAGISTER**

PRESENTEE PAR :

**IBRIR BRAHIM**

Spécialité : Construction Mécanique

SUJET DE LA THESE

**Recherche de l'Influence des Caractéristiques  
Géométriques des Eprouvettes sur la Position  
du Noyau Fondu en Soudage par Resistance**

SOUTENUE LE 25 JANVIER 1990 DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

MESSIEURS : RECHAK SAID

SOULAMANIDZE ARTHUR

HERING JOSEF

ZELINSKI VICTOR

BELHADEF IKHLEF

PRESIDENT

RAPPORTEUR

EXAMINATEURS

INVITE

RECHERCHE DE L'INFLUENCE DES CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES  
DES EPROUVETTES SUR LA POSITION DU NOYAU FONDU EN SOUDAGE  
ELECTRIQUE PAR RESISTANCE

Directeur de Recherche : A. SOULAMANIDZE

Critique : S. RECHAK

## AVANT-PROPOS

Cette thèse a été réalisée à l'institut de mécanique de Blida.

Mes remerciements les plus sincères s'adressent à Monsieur A. Soulamani, Maître de conférence à l'institut de mécanique de Blida pour tous les conseils qu'il m'a prodigués et pour tout le temps qu'il m'a consacré.

Je suis particulièrement touché par l'honneur de Monsieur S. Rechak, Chef de département de mécanique à l'école Polytechnique d'Alger de présider ce Jury. Je le prie de bien vouloir trouver le témoignage de ma profonde gratitude.

Je remercie également tous les enseignants de l'institut de mécanique de Blida pour m'avoir permis de bénéficier de leur compétence à développer ce travail.

Je remercie Messieurs B. Benbouzid, S. Nader et O. Nedjemi de l'institut de mécanique de Blida pour leur encadrement efficace.

Je remercie également tous mes camarades enseignants pour leur soutien moral.

## SOMMAIRE

Liste des figures

Préface

But du travail

### PREMIER CHAPITRE :

#### POSITION DU SOUDAGE DANS L'INDUSTRIE EN GENERAL

|   |    |
|---|----|
| 1.1 - Généralités   | 9  |
| 1.2 - Le soudage électrique par résistance                  | 13 |
| 1.3 - Différents types de soudage par résistance électrique | 17 |

### DEUXIEME CHAPITRE :

#### PROBLEMES ET PERSPECTIVES DU SOUDAGE PAR RESISTANCE

|   |    |
|---|----|
| 2.1 - Exigences principales du soudage par résistance | 24 |
| 2.2 - Problèmes rencontrés en soudage par résistance  | 26 |
| 2.3 - Condition de formation d'un noyau fondu         | 33 |
| Conclusion  | 43 |

### TROISIEME CHAPITRE :

#### RECHERCHE DES CRITERES QUI FONT QUE LE NOYAU FONDU SE DEPLACE DANS LA PIECE EPAISSE

|   |    |
|---|----|
| Introduction  | 45 |
| 3.1 - Caractéristiques du soudage de pièces de différentes épaisseurs                 | 46 |
| 3.2 - Phénomènes qui influent sur la position du noyau fondu                          | 49 |
| 3.3 - Détermination approximative de la résistance dans le volume de métal considéré. | 53 |
| 3.4 - Recherche des directions des lignes de courant dans la zone de soudage          | 55 |
| Conclusion  | 59 |

## QUATRIEME CHAPITRE

### INFLUENCE DES PARAMETRES GEOMETRIQUES SUR LE VOLUME DE METAL CONSIDERE

|   |    |
|---|----|
| Généralités   | 61 |
| 4.1 - Influence du diamètre des électrodes sur la position du noyau fondu                   | 62 |
| 4.2 - Influence des épaisseurs sur le champ des lignes de courant                           | 65 |
| 4.3 - Relation des lignes de courant extrêmes pour différentes épaisseurs.                  | 69 |
| 4.4 - Influence du matériau des pièces à souder sur le diamètre des lignes de courant.      | 72 |
| 4.5 - Influence de la relation des épaisseurs sur la chaleur dégagée dans la pièce épaisse. | 74 |
| Conclusion  | 75 |

## CINQUIEME CHAPITRE

### RESULTATS OBTENUS ET LES RECOMMANDATIONS PRATIQUES

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 5.1 - Résultats obtenus         | 77 |
| 5.2 - Recommandations pratiques | 78 |
| CONCLUSION GENERALE             | 81 |
| BIBLIOGRAPHIE.                  | 84 |

## CHAPITRE : I

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| fig. 1.1. | assemblage par rivetage                          | 10 |
| fig. 1.2. | assemblage par collage                           | 10 |
| fig. 1.3. | brasage  | 12 |
| fig. 1.4. | circuit électrique de soudage à l'arc            | 12 |
| fig. 1.5. | principe du soudage par résistance               | 14 |
| fig. 1.6. | cyclogramme de soudage par résistance électrique | 15 |
| fig. 1.7. | soudure bout à bout                              | 18 |
| fig. 1.8. | soudage par point                                | 19 |
| fig. 1.9. | soudage à la molette                             | 21 |

## CHAPITRE : II

|            |   |    |
|------------|---|----|
| fig. 2.1.  | a. noyau liquide normal   | 25 |
|            | b. noyau liquide déplacé  | 25 |
| fig. 2.2.  | soudage avec pièces de différentes épaisseurs<br>(résultat des études bibliographiques)   | 27 |
| fig. 2.3.  | soudage des pièces avec différentes épaisseurs<br>(résultats de l'étude métallographique) | 28 |
| fig. 2.4.  | soudage avec électrodes de différents diamètres   | 31 |
| fig. 2.5.  | soudage avec avec pièces de différentes matières  | 31 |
| fig. 2.6.  | soudage en utilisant un courant unipolaire  | 32 |
| fig. 2.7.  | changement de résistance de contact pendant<br>le cycle de soudage                        | 34 |
| fig. 2.8.  | pont métallique entre deux surfaces de contact  | 35 |
| fig. 2.9.  | formation du noyau fondu  | 35 |
| fig. 2.10. | dépendance entre la résistance et le temps  | 35 |
| fig. 2.11. | dépendance entre la résistance et la pression   | 35 |
| fig. 2.12. | zone de soudage   | 4  |

### CHAPITRE III

- fig. 3.1. schéma de soudage avec écran métallique 47
- fig. 3.2. schéma avec différentes formes et différentes matières des électrodes 47
- fig. 3.3. a. court circuit pour un conducteur unique  
b. court circuit pour la zone de soudage par résistance 50
- fig. 3.4. schéma pour calculer la résistance d'un conducteur conique sans sommet 54
- fig. 3.5. schéma de la zone de soudage 54
- fig. 3.6. schéma d'un modèle plat 56
- fig. 3.7. les filets de courant ont tendance à s'étaler dans les tôles 58
- fig. 3.8. choix de l'électrode en fonction de l'épaisseur. 58

### CHAPITRE IV

- fig. 4.1. influence du diamètre de l'électrode sur les lignes de courant 64
- fig. 4.2. influence des épaisseurs des pièces sur les lignes de courant 67
- fig. 4.3. influence de la relation des épaisseurs sur les lignes de courant 70
- fig. 4.4. dépendance du diamètre des lignes de courant et les matières des pièces à souder. 73

### CHAPITRE V

- fig. 5.1. déplacement de l'électrode par rapport à l'axe initial 79



## P R E F A C E

Le soudage en général est l'un des moyens d'assemblages les plus utilisés dans l'industrie. C'est une opération qui consiste à joindre des pièces métalliques en les amenant à une température déterminée avec ou sans métal d'apport, avec ou sans application d'effort de façon à réaliser une union moléculaire totale, une étanchéité permanente et une absence de possibilité de jeu.

Les applications du soudage touchent pratiquement tous les domaines industriels de la production, de la réparation et de l'entretien dans les secteurs de l'industrie automobile, l'industrie aérospatiale et nucléaire, l'industrie électrique et électronique etc...

Les assemblages soudés assurent une excellente rigidité de liaison par des joints peu encombrants et économiques.

Dans tous ces domaines d'application, les épaisseurs à souder varient de quelques microns à plusieurs millimètres. Les matières en liaison peuvent être de même nature ou de nature différente pour un même assemblage.

A l'heure actuelle la demande d'assemblage par soudage électrique par résistance des pièces à épaisseurs égales et à épaisseurs différentes exige des solutions pratiques pour obtenir un noyau fondu symétrique.

## BUT DU TRAVAIL

Les importants développements dans les industries de la construction, dans les nouveaux procédés de fabrication et dans l'introduction de nouveaux matériaux, font que les recherches pour l'amélioration de la technique du soudage, sont à un niveau avancé. Le but de ce travail est consacré à l'analyse de l'influence des épaisseurs de tôles sur la position du noyau fondu dans le soudage électrique par résistance.

L'étude expérimentale est basée sur une recherche de détermination du champ des lignes de courant traversant les tôles pendant la formation du point de soudure.

Nous avons considéré dans ce cas l'influence des caractéristiques géométriques des éprouvettes sur la position du noyau fondu.

**PREMIER CHAPITRE**

**POSITION DU SOUDAGE DANS L'INDUSTRIE EN GENERAL**

## 01.1 - GENERALITES

Dans les différents domaines de l'industrie, beaucoup d'assemblages sont indémontables. Ce moyen d'assemblage peut se réaliser par les différentes méthodes suivantes :

- Le rivetage
- Le collage
- Le brasage
- Le soudage

### 1.1.1 - LE RIVETAGE (voir fig.1.1)

Le rivetage est un procédé d'assemblage indémontable pour des épaisseurs limitées et pour les constructions non précises. Ce procédé demande un travail supplémentaire comme par exemple le perçage, la préparation et l'installation du rivet. Cet assemblage est limité dans son application qui est uniquement l'assemblage par recouvrement avec des épaisseurs faibles.

### 1.1.2 - LE COLLAGE (voir fig.1.2)

Le collage ou assemblage par adhésif est également classé comme assemblage permanent. Il s'est développé rapidement grâce au progrès réalisé dans la composition des adhésifs (résines + additions). Ce procédé est devenu un procédé utilisé en construction mécanique, mais cette technique est limitée au mode de répartition des contraintes dans le joint ainsi qu'aux efforts subis.

### 1.1.3 - LE BRASAGE (voir fig.1.3)

Le brasage est une opération qui consiste à assembler deux pièces métalliques à l'aide d'un matériau dont le point de fusion est inférieur à celui des pièces à assembler. Le brasage se distingue par le fait que les matériaux à unir ne participent pas à la formation du joint de soudure. Ce procédé ne peut être retenu lorsque des phénomènes tel que la corrosion spécifique et la

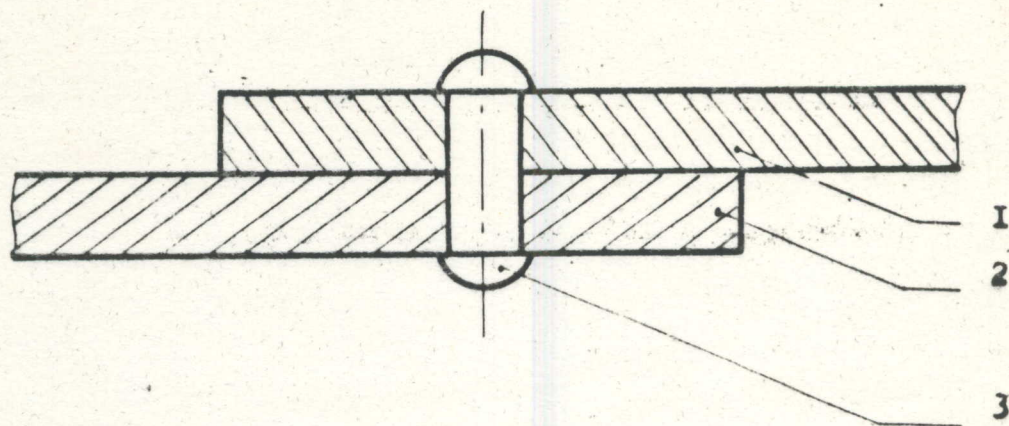


Fig.1.1: Assemblage par rivetage.

I et 2 : Pièces à assembler

3 : Rivet

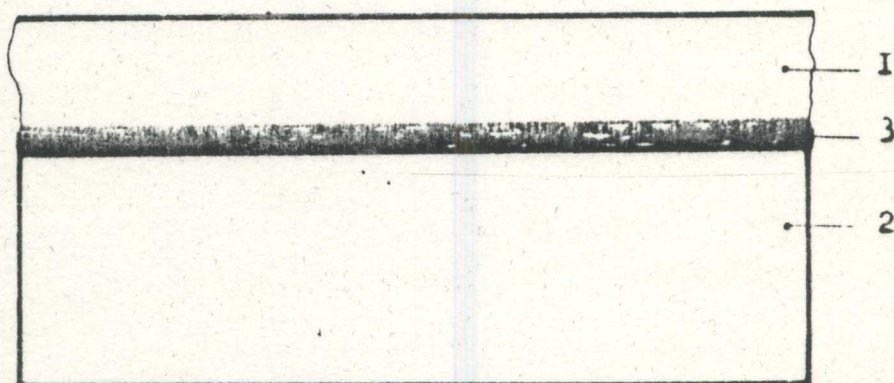


Fig.1.2 : Assemblage par collage.

I et 2 : Pièces à assembler

3 : Matière adhésive

chaleur sont des facteurs importants, c'est également le cas pour les constructions qui nécessitent une technologie de précision.

#### 1.1.4 - LE SOUDAGE (voir fig.1.4)

Le soudage est un mode d'assemblage indémontable par la cohésion des forces interatomiques. L'utilisation du soudage est assez répandue dans les différents domaines de l'industrie. Le pourcentage d'utilisation de ce mode d'assemblage est supérieur à 92 %. Le soudage s'applique aux métaux et aux matériaux non métalliques (matières plastiques, verres, caoutchouc, organes biologiques etc...). Les propriétés du matériau sont fonction de sa structure intérieure, c'est à dire de sa structure atomique.

Pour obtenir une seule pièce à partir des éléments à souder, il faut rapprocher leur particules élémentaires (ions, atomes) jusqu'à ce que l'on voit s'établir entre-elles des liaisons interatomiques.

Cela s'obtient par un échauffement et par déformation plastique ou bien par l'action simultanée de ces deux facteurs.

Les procédés essentiels du soudage sont les suivants :

- Soudage par flamme oxyacétylénique
- Soudage à l'arc électrique
- Soudage électrique par résistance
- Soudage par réaction chimique
- Soudage par ultra-son
- Soudage par faisceau électrons
- Soudage au laser
- Soudage au laitier fondu, etc...

Dans tous ces procédés, le métal fondu sous l'action de la chaleur établit une liaison interatomique.

Le but de notre étude nous mène vers une considération détaillée du procédé de soudage par résistance électrique.

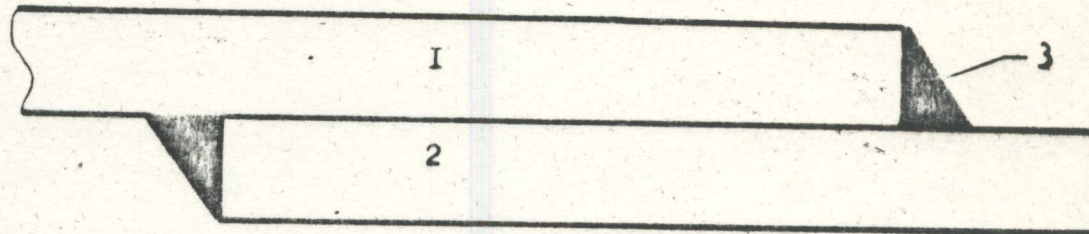


Fig.1.3: Brasage.

1 et 2 : Pièces

3 : Métal d'appert

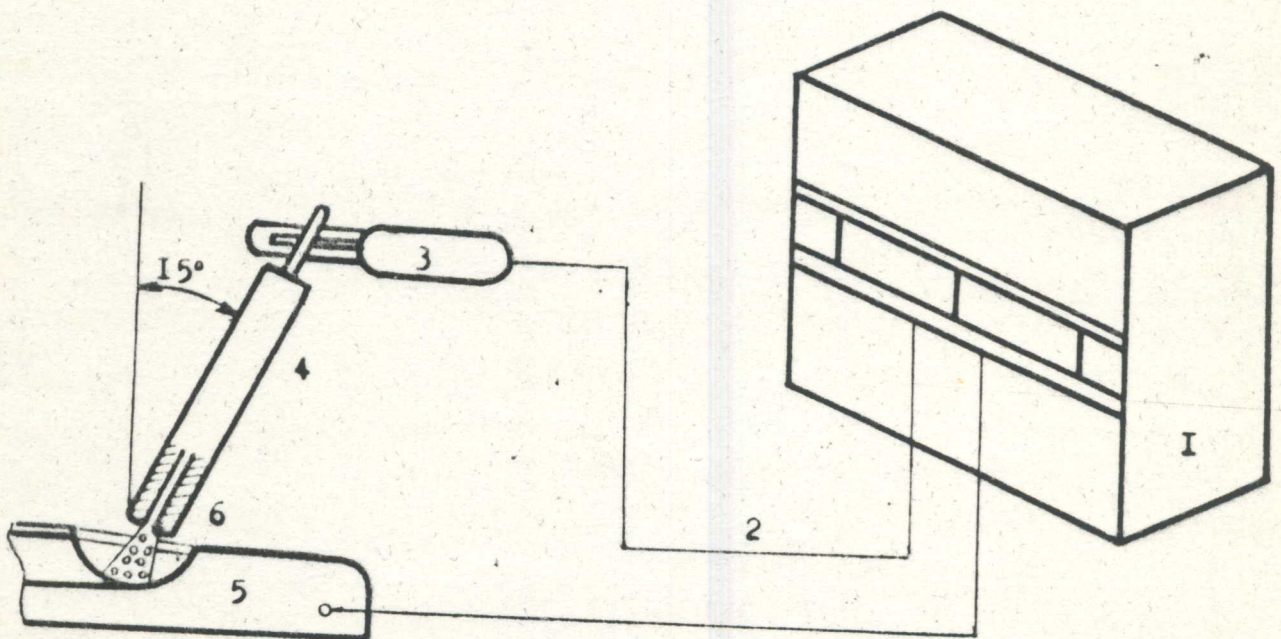


Fig.1.4 : Circuit électrique de soudage à l'arc.

- 1 : source d'énergie
- 2 : cables de soudage
- 3 : porte électrode
- 4 : électrode
- 5 : pièce à souder
- 6 : arc électrique

## 1.2 - LE SOUDAGE ELECTRIQUE PAR RESISTANCE

Le soudage électrique par résistance est un procédé fondé sur l'application de la compression et de l'effet JOULE en chauffant les pièces à souder jusqu'à l'état plastique ou jusqu'à la fusion [ 8;12;15 ] , voir (fig. 1.5 et 1.6).

La compression rend l'interpénétration des atomes d'une pièce dans l'autre plus facilement. Le soudage électrique par résistance se distingue par le réchauffement rapide (aux endroits de soudage) et il dure de 1/100 à 1/1000 de seconde grâce à l'emploi d'un courant puissant ( de 1000 à 120000 Ampères ) , de nos jours, l'intensité d'utilisation est de l'ordre de 200000 A.

Ce procédé à rendement très élevé, peut être facilement mécanisé et automatisé et il est très employé dans plusieurs domaines de l'industrie .

Le domaine d'utilisation du soudage électrique par résistance n'est pas limité par les matériaux métallique ni par les sections des pièces. Les épaisseurs à souder peuvent varier de 0,03 mm à 10 mm et plus. A titre d'exemple, on peut citer l'application du procédé dans l'aéronautique où l'on compte plus d'un million de points de soudure dans un avion de ligne, en construction automobile plus de 15000 points de soudure sur un modèle de voiture récente.

Pour bien caractériser ce mode de soudage, il n'est pas inutile d'ajouter la notion de rapidité d'exécution. En effet ce procédé est inconstestablement le plus rapide.

Il est donc intéressant de justifier cette affirmation par quelques chiffres.

Le soudage par point de deux tôles d'acier de 1 mm d'épaisseur s'exécute en soudage rapide dans les temps qui sont de l'ordre de 8 à 14/100 de seconde. Lorsque ces épaisseurs atteignent deux fois 2 mm , les temps sont de l'ordre de 20 à 30/100 de seconde.



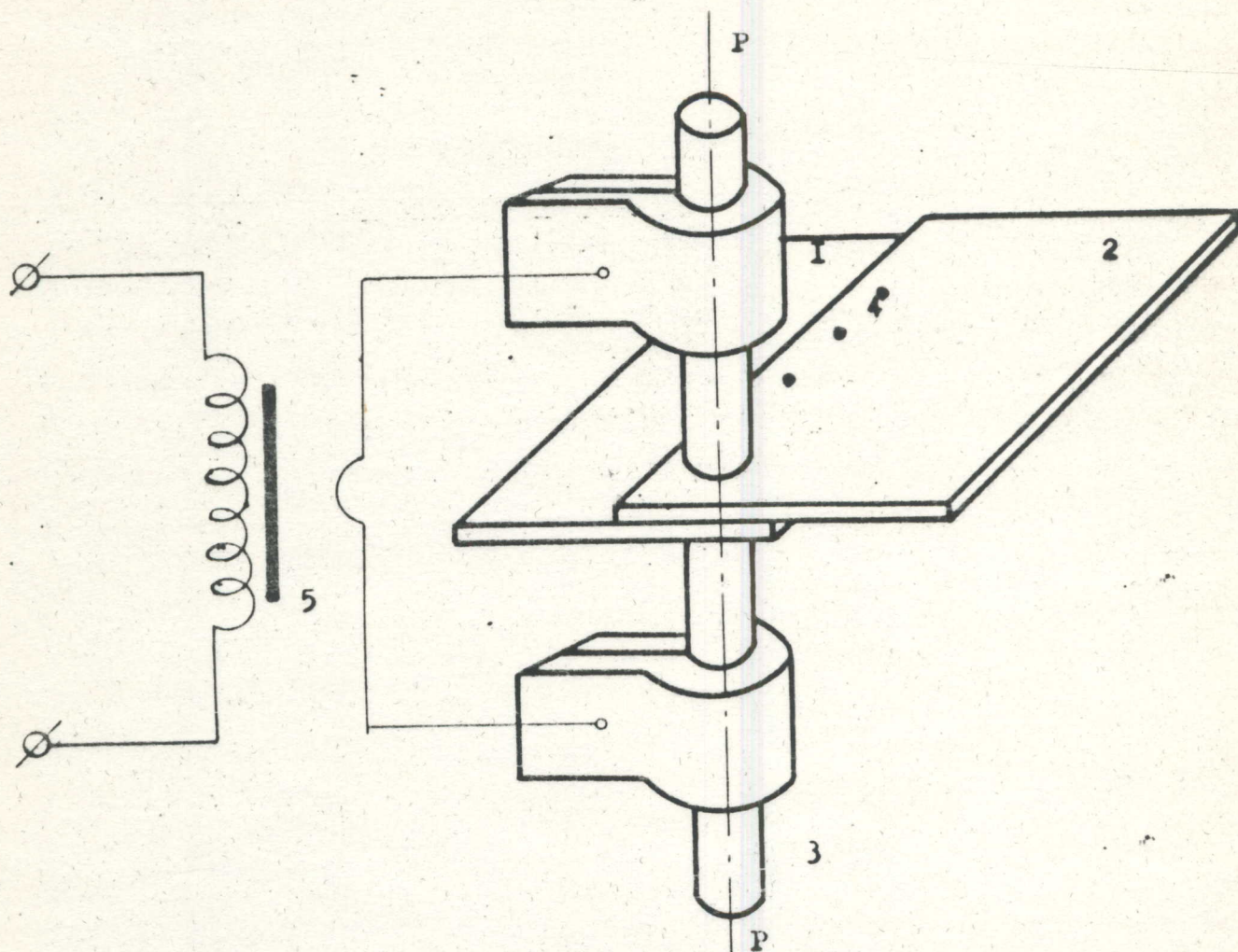


Fig.1.5 : Principe du soudage par résistance.

- I et 2 : Pièces à souder
- 3 : Electrodes en cuivre
- 4 : Joints à souder
- 5 : Transformateur de soudage
- P : Effort d'application

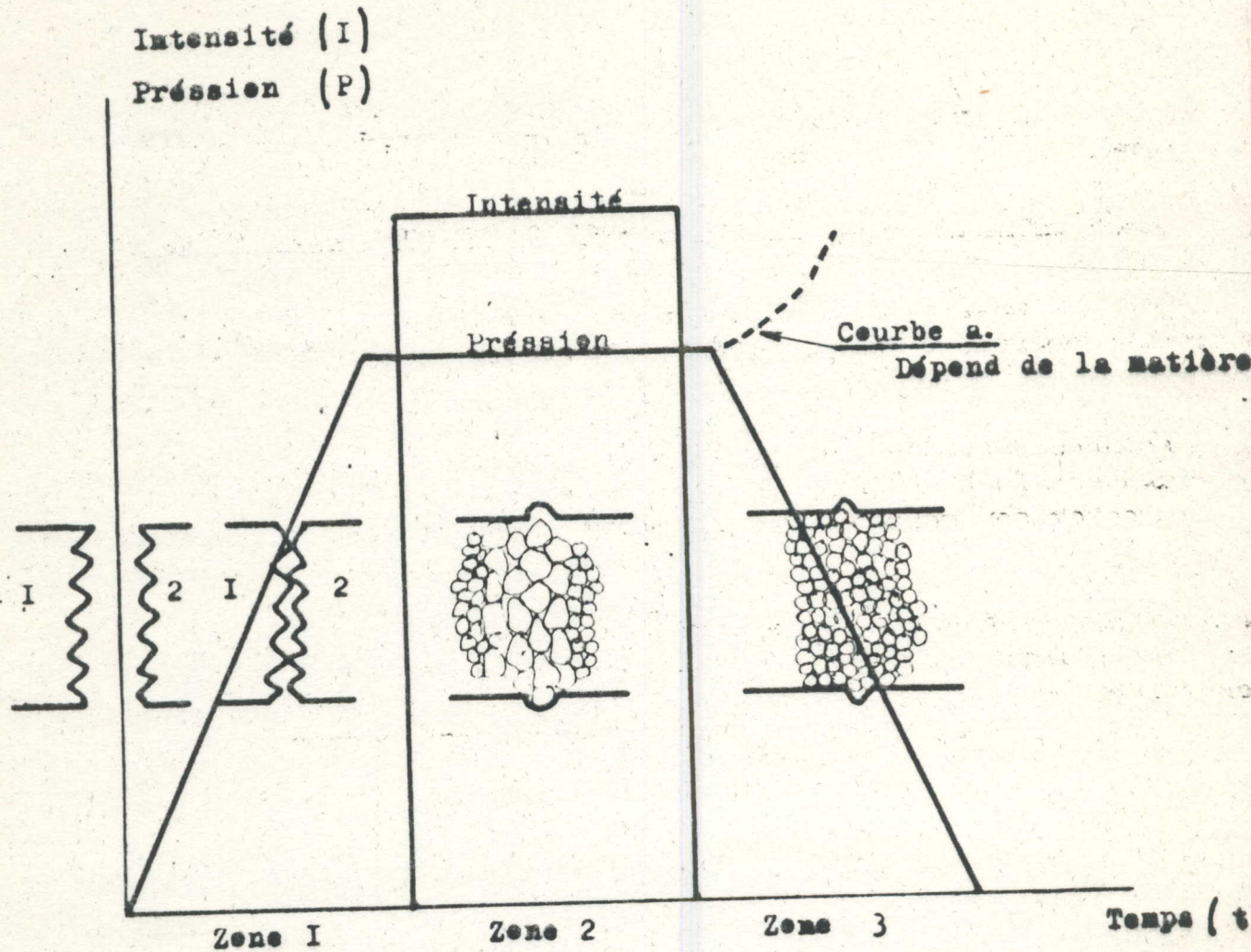


Fig.1.6 : Cyclegramme de soudage par résistance électrique.

- Zone 1:** Est appelée zone de préparation de contact.  
Zone de stabilité de la résistance de contact électrique.  
Il n'y a pas de courant.
- Zone 2:** Zone de soudage. La pression est maintenue constante et le courant passe. Il y a formation de la soudure et obtention du joint par la cohésion des forces interatomiques.
- Zone 3:** Zone de traitement thermique de la soudure. Les grains de soudure redeviennent plus petits. Ce traitement est possible uniquement pour le soudage par résistance appelé traitement thermique automatique.

Pour les tôles d'acier inoxydable les temps de soudage varient entre 2 et 20/100 de seconde. Les alliages légers se soudent avec des temps encore beaucoup plus faible [ 2;14 ].

Le soudage électrique par résistance se distingue par :

- Le soudage bout à bout
- Le soudage par point
- Le soudage à la molette. [8;17;18]

### 1.3 - DIFFERENTS TYPES DE SOUDAGE PAR RESISTANCE ELECTRIQUE

#### 3.3.1 - LE SOUDAGE BOUT A BOUT (voir fig.1.7)

Lors du soudage en bout par résistance électrique les bords des pièces en contact sont réchauffés par un courant jusqu'à l'état plastique, ensuite le courant est débranché et les bords des pièces serrés par l'action d'une forte pression [ 10 ]. Ce soudage est appliqué assez largement dans l'industrie lourde ( fabrication de tube de gros diamètre, montage des rails de chemin de fer, chaudière, outillage ) ainsi que dans l'industrie électrique et électronique, etc...

#### 3.3.2 - LE SOUDAGE PAR POINT (voir fig.1.8 )

Lors du soudage par points, les pièces sont placées de façon à recouvrir l'une par l'autre. Elles sont alors serrées entre deux rondins métalliques formant les électrodes qui sont connectées au bobinage secondaire du transformateur . Après le branchement, le courant effectue l'échauffement local des pièces, la chaleur fait fondre la couche superficielle de la partie centrale la plus rechauffée du métal en contact avec les électrodes. On coupe ensuite le courant et on exerce une compression des pièces par les électrodes. Le point de soudage formé a l'aspect d'une lentille. La conductibilité électrique et thermique des électrodes doit être élevée et garder la résistance requise jusqu'à 400°C.

Les électrodes sont fabriquées à partir du cuivre électrolytique étiré à froid, d'alliages à base de tungstène et du bronze au cadmium.

En outre, elles présentent une canalisation pour la circulation du liquide nécessaire au refroidissement pendant le soudage.

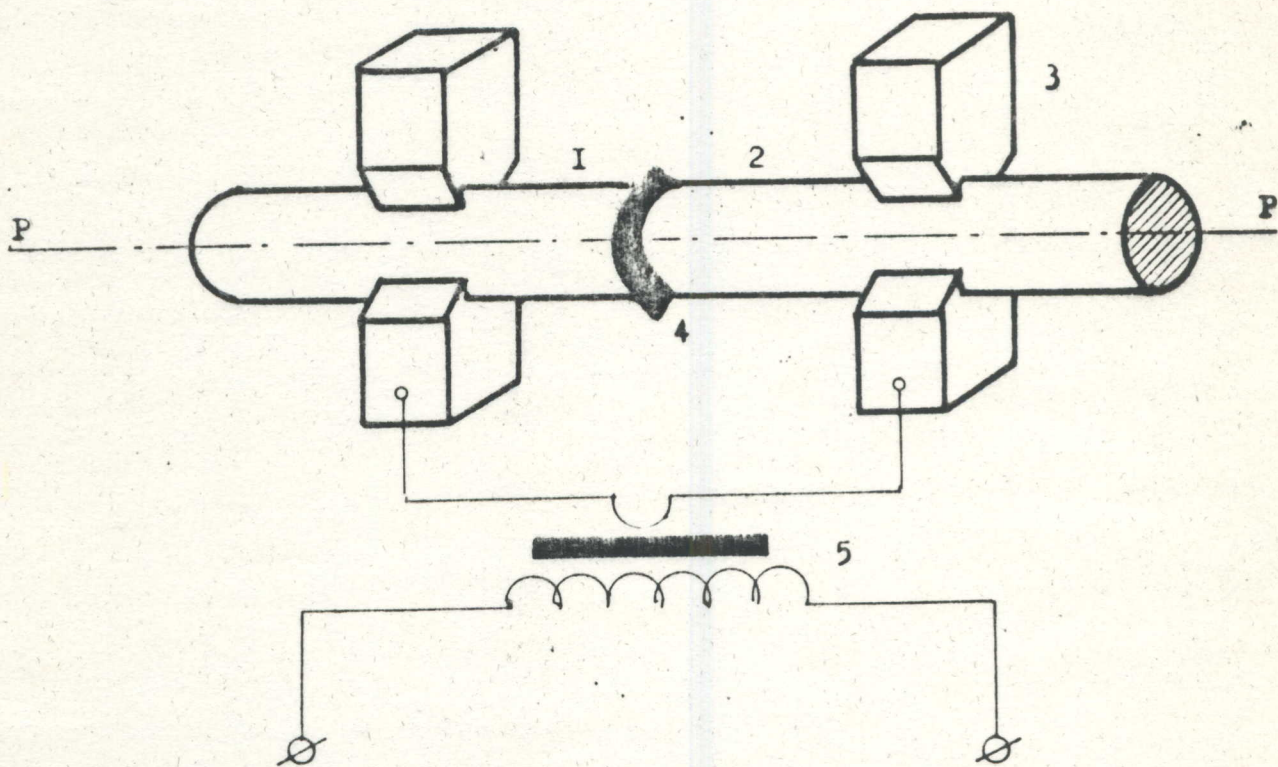


Fig.1.7: Soudure bout à bout.

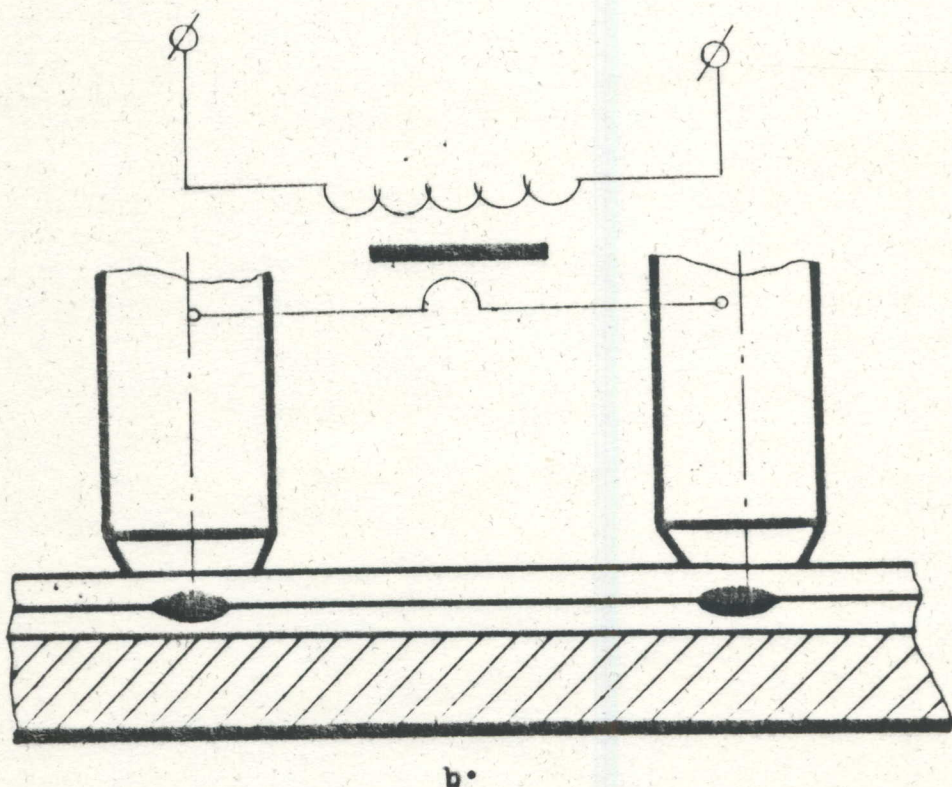
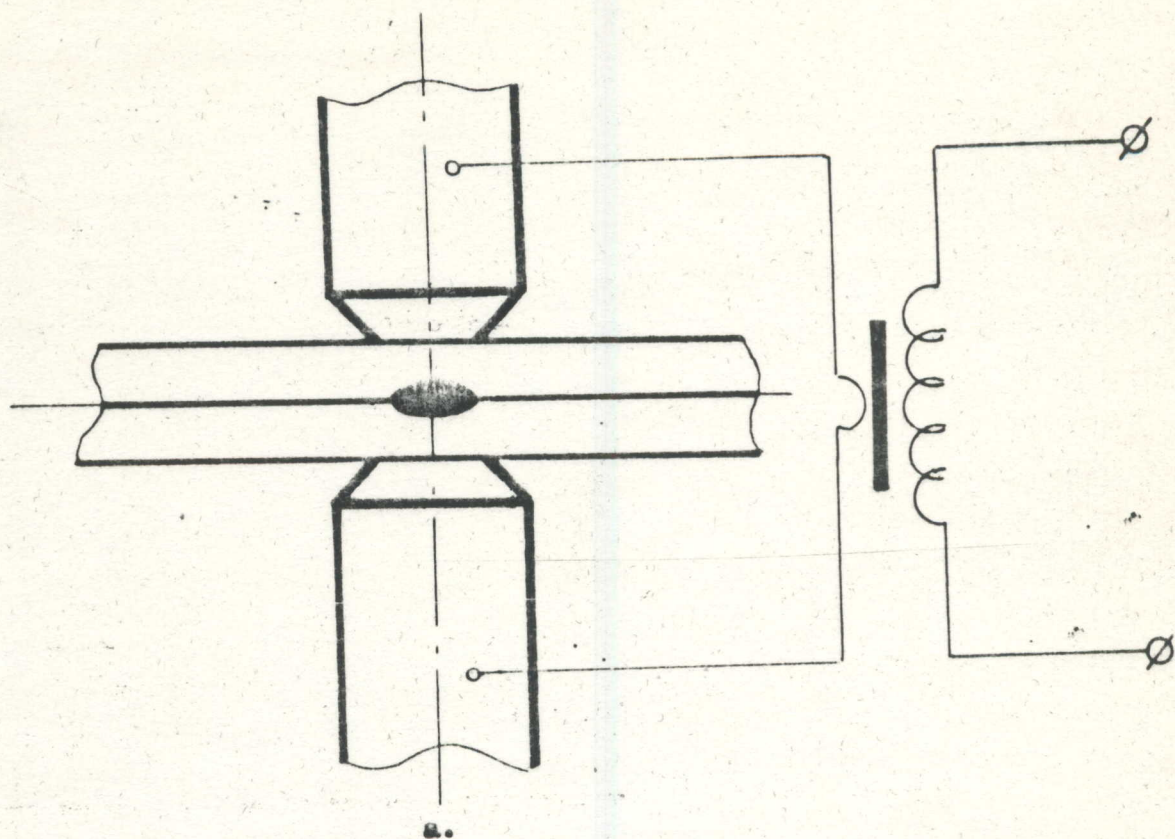
I et 2 : Pièces à souder

3 : Electrodes en cuivre

4 : Joint à souder

5 : Transformateur de soudage

P : Effert d'application



**Fig. 1.8 . Soudage par point.**

- a. Obtention d'un point
- b. Obtention d'un double point

La productivité des machines de soudage par points s'élève jusqu'à 500 points de soudage par minute pour des tôles de 8/10 de mm. La puissance des machines atteint 600 KVA, la densité de courant ne doit pas être inférieure à 120 A/mm<sup>2</sup>, la tension secondaire est de 1 à 12 volts, la pression entre les électrodes est de 2 à 12 kg/mm<sup>2</sup>. [ 7;15 ].

Le soudage par point est largement utilisé dans l'industrie automobile et l'industrie aéronautique.

### 3.3.3 - SOUDAGE A LA MOLETTE (voir fig.1.9)

Le soudage à la molette est utilisé pour l'assemblage avec étanchéité très élevée des tôles d'une épaisseur pouvant atteindre 4 mm pour chaque pièce [ 13 ].

Les pièces à souder passent entre deux électrodes en forme de molettes qui tournent et par lesquelles on fait passer un courant électrique.

Les soudures peuvent être exécutées par points ou en continu; dans le premier cas on emploie des contacteurs.

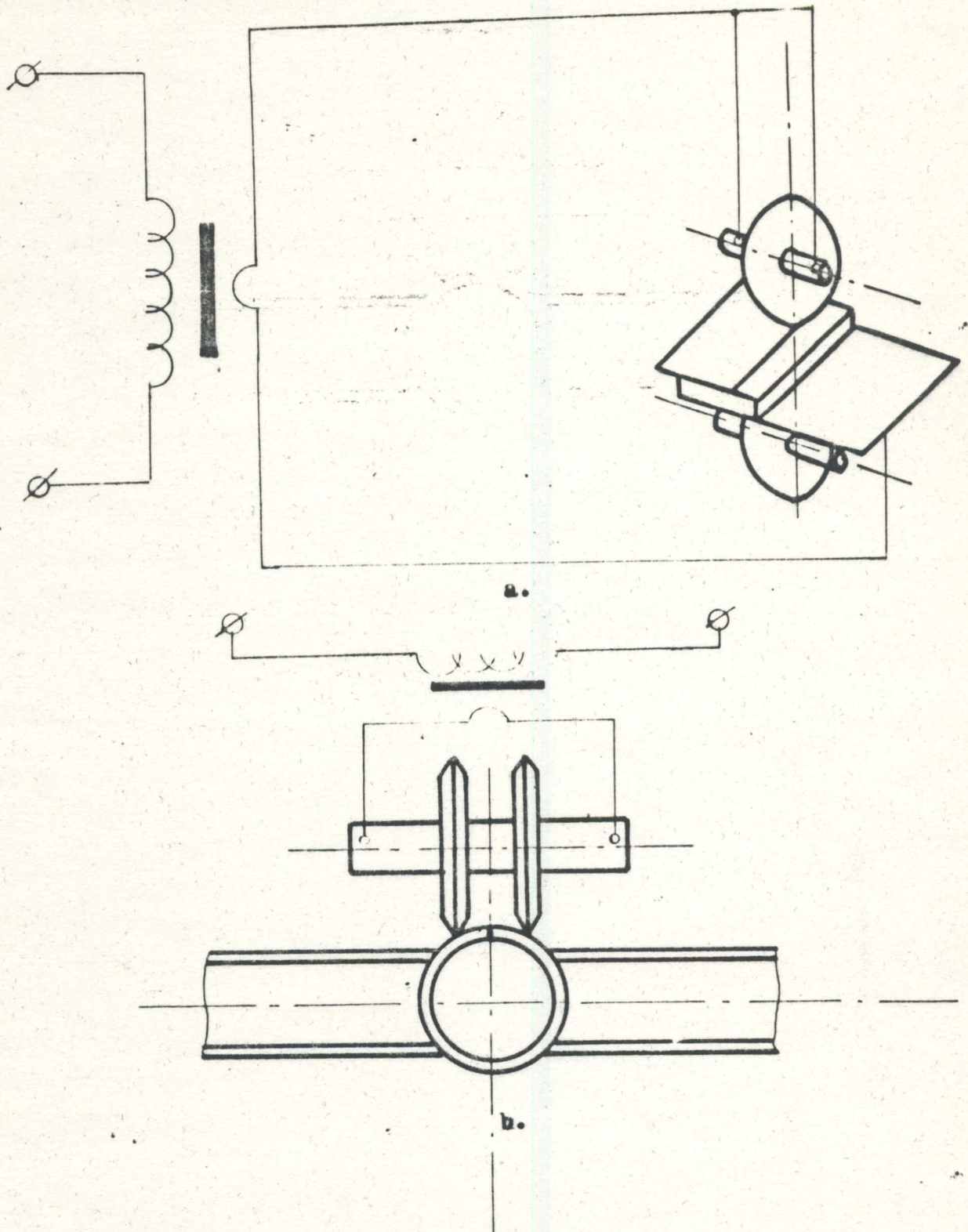
Le matériau des molettes est le même que celui utilisé pour le soudage par points.

L'intensité du courant varie de 2000 à 5000 A. L'effort appliqué aux molettes s'élève à 600 kgf. La vitesse du soudage est de 0,5 à 3,5 m/min.

Le soudage à la molette est utilisé pour le soudage des réservoirs, des tubes et autres pièces en acier ou en alliages non ferreux.

En exemple dans un avion on peut compter jusqu'à 100 mètres de soudure, dans un vaisseau spatial il y a près de 200 mètres de soudure.

Le soudage à la molette est également utilisé dans les composants électronique.



**Fig. 1.9 : Soudage à la molette.**

- a. soudage de toles
- b. soudage de tubes



Le soudage électrique par résistance, est sans aucun doute le procédé le plus moderne des assemblages métalliques.

Ce procédé est entré dans l'industrie vers le début du xx siècle; sa technique à évoluée avec une rapidité surprenante et devient en quelques années, l'auxiliaire indispensable des plus importantes fabrications.

Enfin pour caractériser ce procédé de soudage, il est nécessaire d'ajouter à cet assemblage la notion de rapidité d'exécution, la qualité optimale dans toutes ces applications.

**DEUXIEME CHAPITRE**

**PROBLEMES ET PERSPECTIVES DU SOUDAGE PAR RESISTANCE**

## 02.1 - EXIGENCES PRINCIPALES DU SOUDAGE PAR RESISTANCE

Pour obtenir une soudure de haute qualité et de stabilité, le joint doit assurer les conditions suivantes [ 19 ]

1 - Le joint de soudure appelé également noyau fondu doit être symétrique au contact des pièces à souder, voir (fig. 2.1 a).

2 - Il faut maintenir la relation entre la largeur du noyau et l'épaisseur des pièces à souder suivant la figure 2.1 a .

3 - Maintenir la longueur du noyau sur le plan de joint;

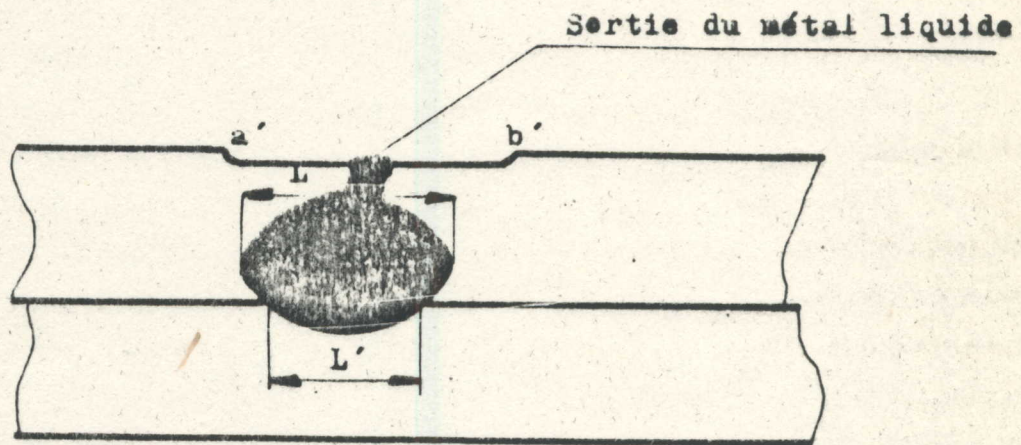
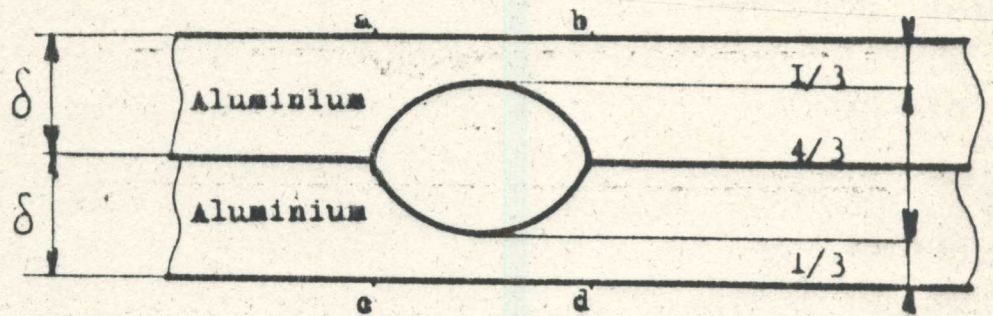
4 - Les propriétés mécaniques du joint de soudure doivent être égales ou supérieures aux propriétés du matériau des pièces à souder :

5 - Il faut maintenir les surfaces extérieures a-b et c-d de la zone de soudage à l'état initiale c'est à dire:

- éviter la sortie du métal liquide du noyau sur la surface extérieure .
- éviter l'empreinte de l'électrode sur les surfaces;
- éviter la sortie du métal liquide sur la ligne de contact des pièces à souder voir (fig. 2.1 b)
- maintenir les propriétés mécaniques et thermiques de la zone des pièces autour du noyau
- éviter que la longueur L soit différentes de L' voir (fig. 2.1 b)

Mais ces conditions sont difficiles à maintenir vu que les épaisseurs à souder sont différentes, les matériaux différents, les formes des électrodes différentes et leurs matériaux différents, les sources d'alimentation : les types de courants différents etc ...

En pratique, il est évident [7;15;22] que les résultats ne sont pas toujours satisfaisant avec les exigences de la figure 2.1a



b.

Fig. 2.1 a- Noyau liquide normal.

b- Noyau liquide déplacé, a'b' est l'empreinte de l'électrode.

## 2.2 - PROBLEMES RENCONTRES EN SOUDAGE PAR RESISTANCE

Il est nécessaire de voir quelques exemples pour définir les problèmes rencontrés en soudage par résistance

1 - En prenant des pièces de même épaisseur et de même matière, la position du noyau fondu se situe au milieu du joint de soudage voir (fig. 2.1 a)

2 - Dans le cas du soudage avec épaisseurs des pièces à souder différentes, on constate que l'expérience donne les résultats suivants:

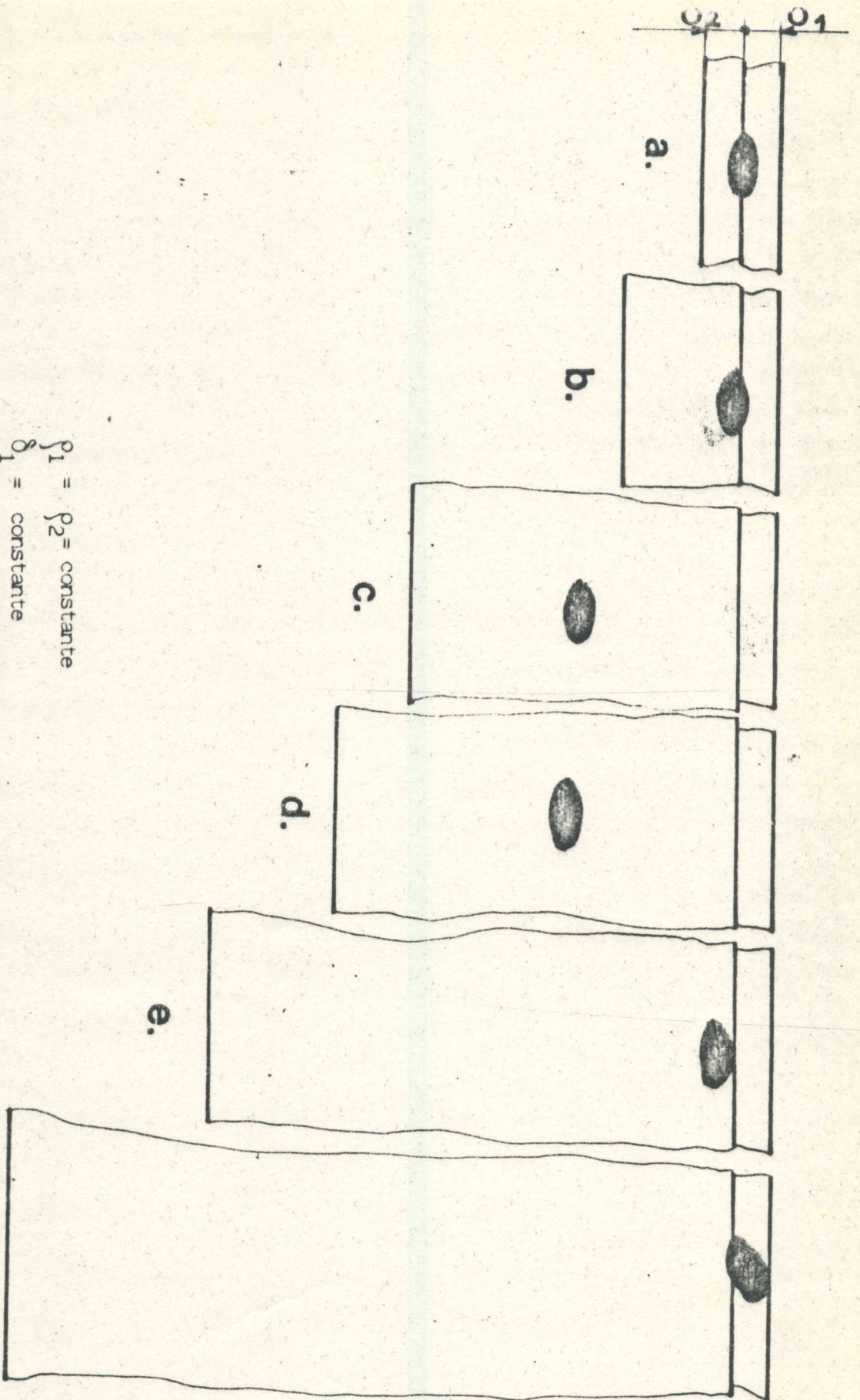
- lorsque le rapport des épaisseurs est compris entre 1/1 et 1/10 le noyau fondu se déplace vers la pièce la plus épaisse.

Ce phénomène s'explique par le fait que la chaleur dégagée dans la pièce la plus épaisse est plus importante. La chaleur qui se dégage dans la pièce mince est absorbée plus rapidement par l'électrode et cela empêche le noyau de se former dans cette pièce d'après l'analyse bibliographique [ 11; 22; 25 ] , voir (fig. 2.2b, 2.2c, 2.2d) et l'étude métallographique que nous avons effectuée voir fig. ( 2.3 a et 2.3 b ).

Par contre, si le rapport des épaisseurs est supérieur à 1/12, on constate que le noyau fondu tend à se déplacer vers l'électrode qui est en contact avec la pièce mince [ 11; 22 ] voir (fig. 2.2e et 2.2 f) et l'étude métallographique effectuée voir (fig. 2.3c ; 2.3 b ; 2.3 e )

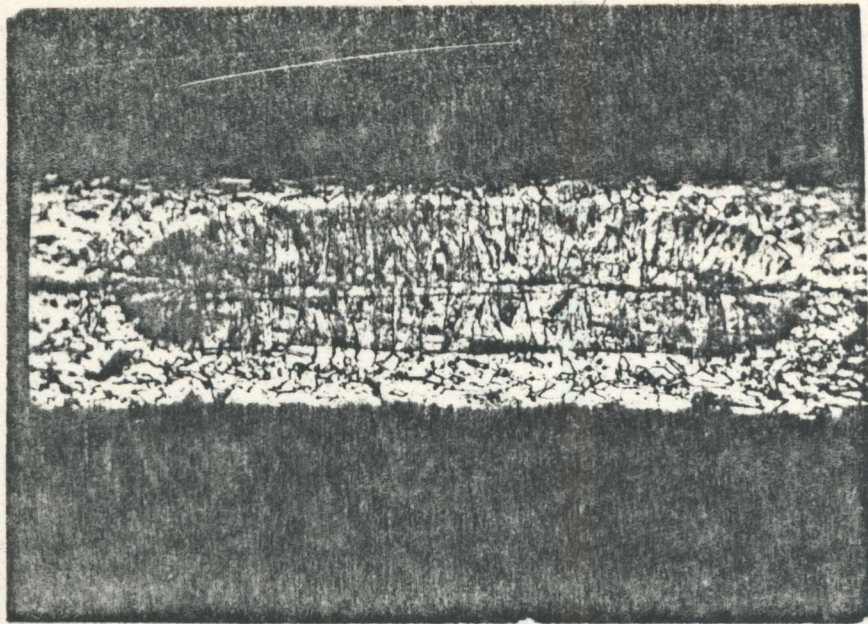
3 - Pour le cas du soudage avec des électrodes de diamètres différents, l'expérience a montrée que le noyau fondu se déplace vers l'électrode qui a le plus petit diamètre, vu que la résistance de contact est plus grande, car la section de contact est plus petite.

Le noyau se déplace donc à l'endroit où se dégage beaucoup de chaleur voir (fig.2.4)

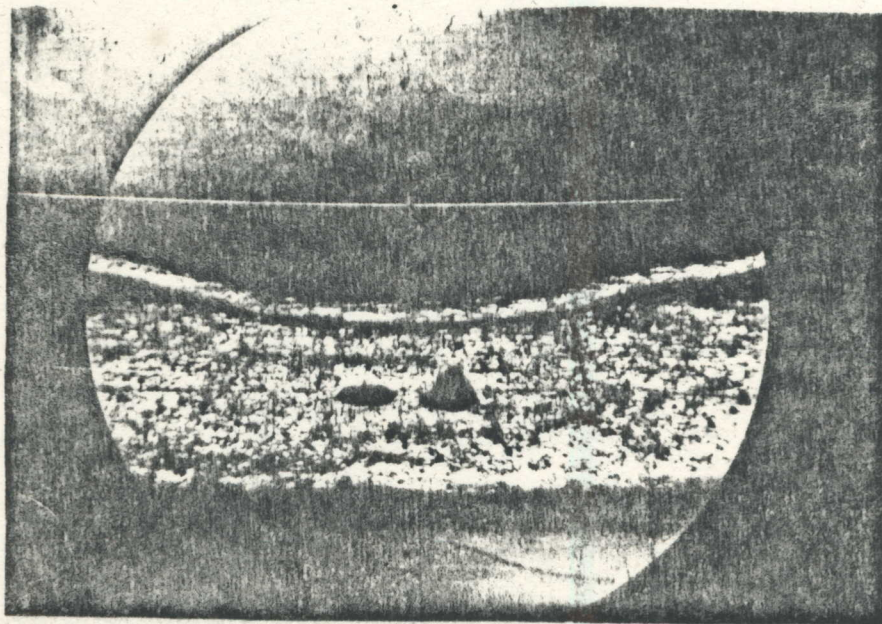


$\rho_1 = \rho_2 = \text{constante}$   
 $\delta_1 = \text{constante}$   
 $\delta_2 = \text{variable}$

Fig.2.2 : Soudage avec pièces de différentes épaisseurs .  
 ( Résultats des études Bibliographiques ).

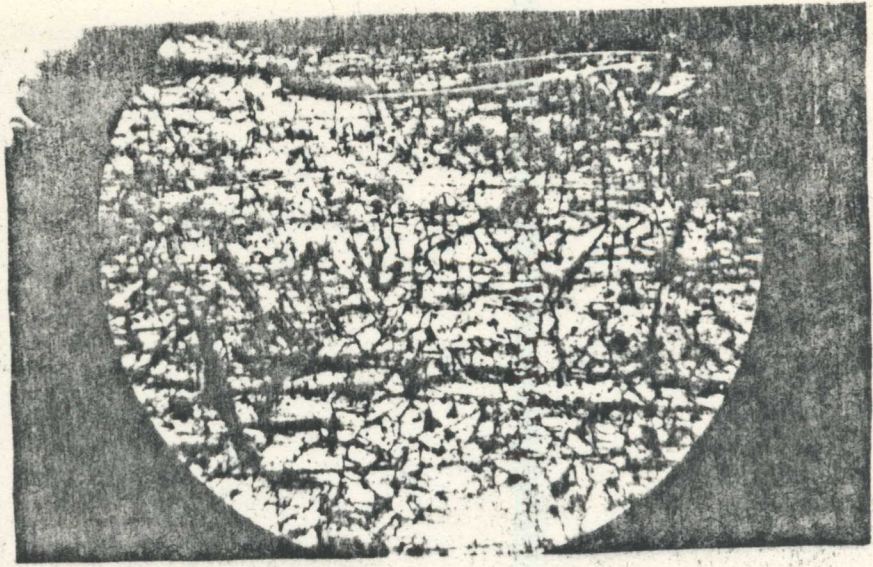


a.  
1:1



b.  
1:6

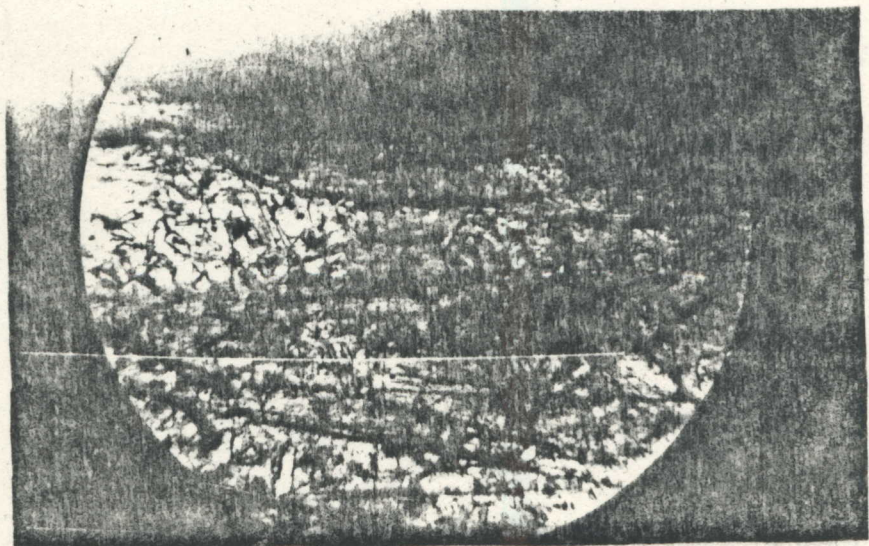
Fig.2.3 : Soudage de pièces avec différentes épaisseurs.  
(Résultats de l'étude métallographique  $\times 84$ ).



c.  
1:16



d.  
1:20



e.  
1:25



4 - Dans le cas du soudage de pièces de différentes matières, l'expérience montre que le noyau fondu se déplace par rapport à la ligne de contact des deux pièces, vers la pièce où la résistance métallique est la plus grande. voir (fig. 2.5)

5 - En utilisant un courant unipolaire, on constate par expérience que le noyau fondu se déplace vers le pôle positif [21], voir (fig. 2.6)

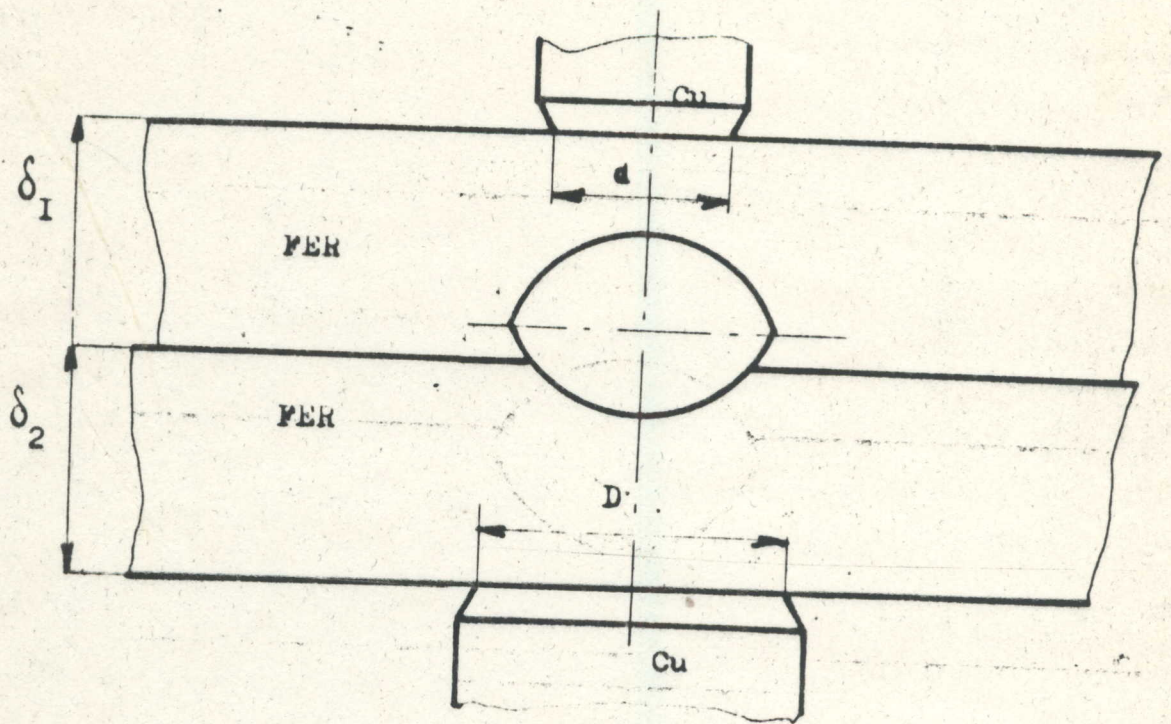


Fig. 2.4 : Soudage avec électrodes de différents diamètres  
 $D \neq d$        $\delta_1 = \delta_2$

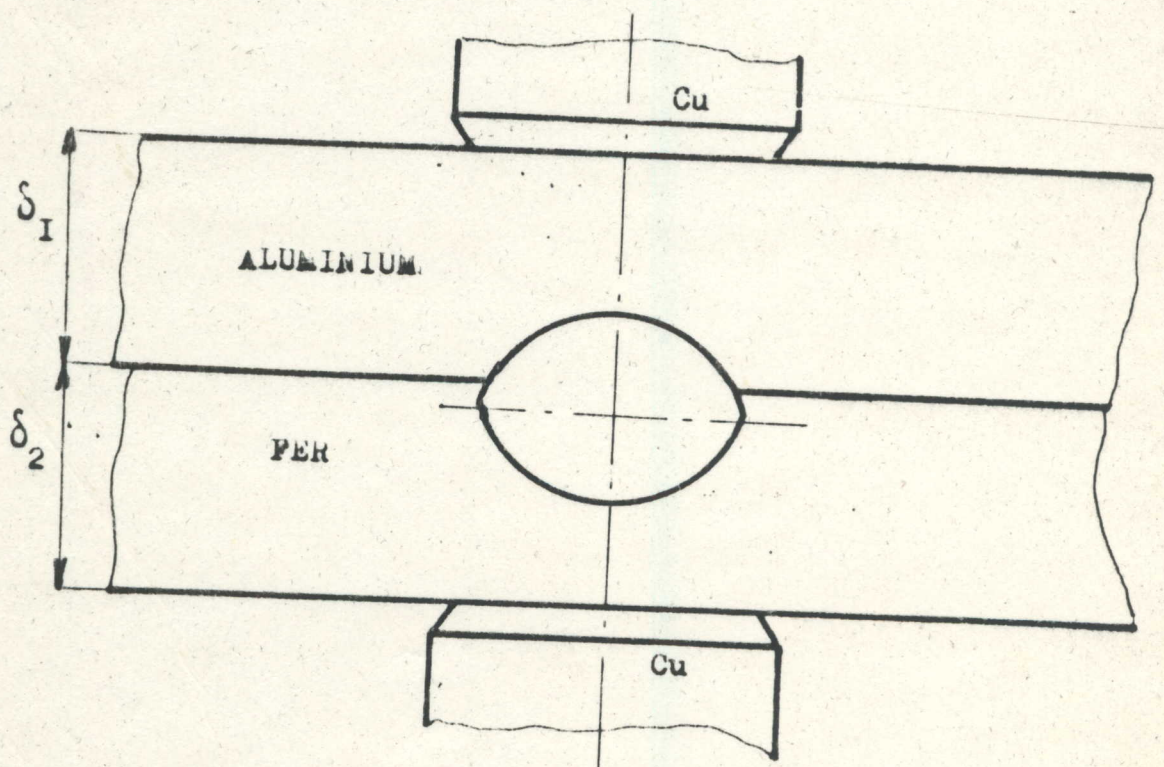


Fig. 2.5. Soudage avec pièces de différentes matières .

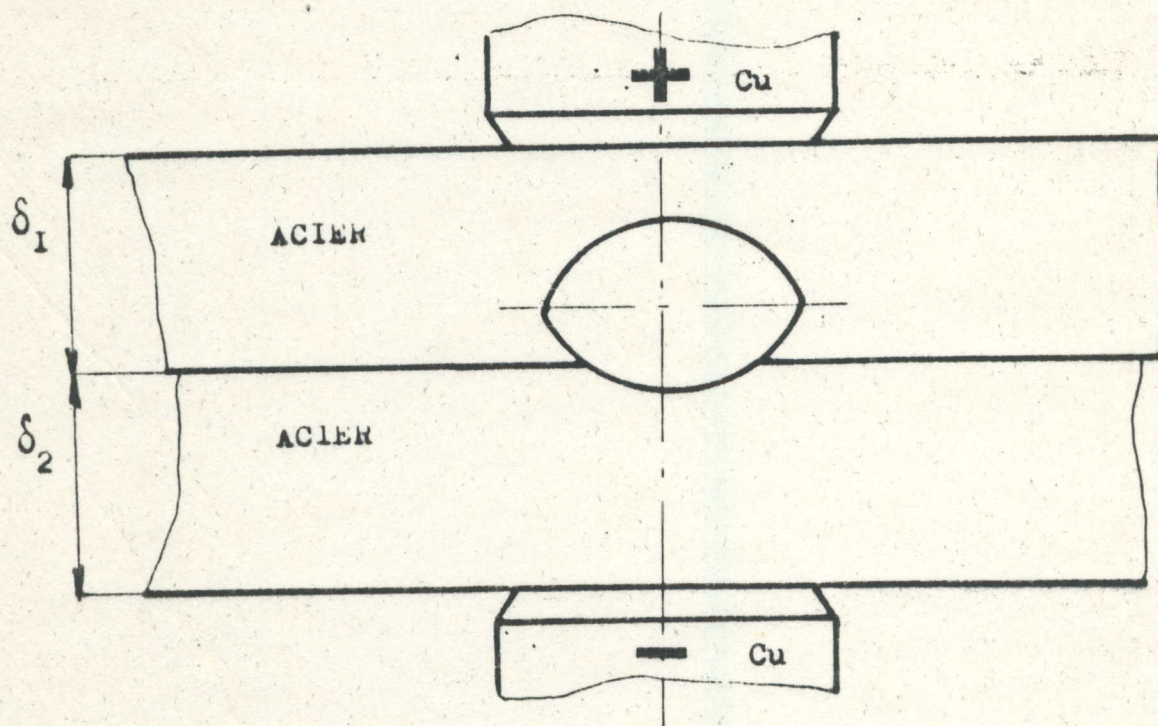


Fig. 2.6: Soudage en utilisant un courant unipolaire.

$$\delta_1 = \delta_2$$

## 2.3 - CONDITION DE FORMATION D'UN NOYAU FONDU

### 2.3.1 - Résistance de contact. voir (fig. 2.7)

Comme nous l'avons déjà montré, deux facteurs interviennent sur les pièces à souder :

- la pression
- l'intensité voir (fig. 1.6)

La chaleur dégagée à ce moment est calculée par la formule de Joule qui est la suivante :

$$Q = R_T I^2 t \quad (1)$$

où  $Q$  : est la chaleur dégagée en Joules

$R_T$  : est la résistance électrique en Ohms

$I$  : est l'intensité du courant de soudage en Ampères

$t$  : est le temps du passage du courant en seconde

mais la surface des pièces à souder n'est jamais propre, il y a toujours une rugosité et de différentes pellicules sur les surfaces de contact. [ 13 ]

Voilà pourquoi la résistance de contact pendant le cycle de soudage change brusquement.

D'après la fig. 2.8, il est évident de constater que la résistance au début du cycle joue un grand rôle au cycle de soudage, c'est à dire à la formation du noyau fondu. Pour cette raison, il est nécessaire de considérer la résistance électrique entre les pièces à souder qui est appelée la résistance de contact  $R_c$  [ 8; 13 ]

Il est établi par expérience la relation entre ces deux types de résistances électrique comme suit :

$$\frac{R_c}{R_m} \approx 100 \quad (2)$$

où  $R_m$  est la résistance métallique, elle dépend de la température

$R_c$  est la résistance de contact, [9] elle est égale à :

$$R_c = r_1 + r_2 + r_3 + r_4 \quad (3)$$

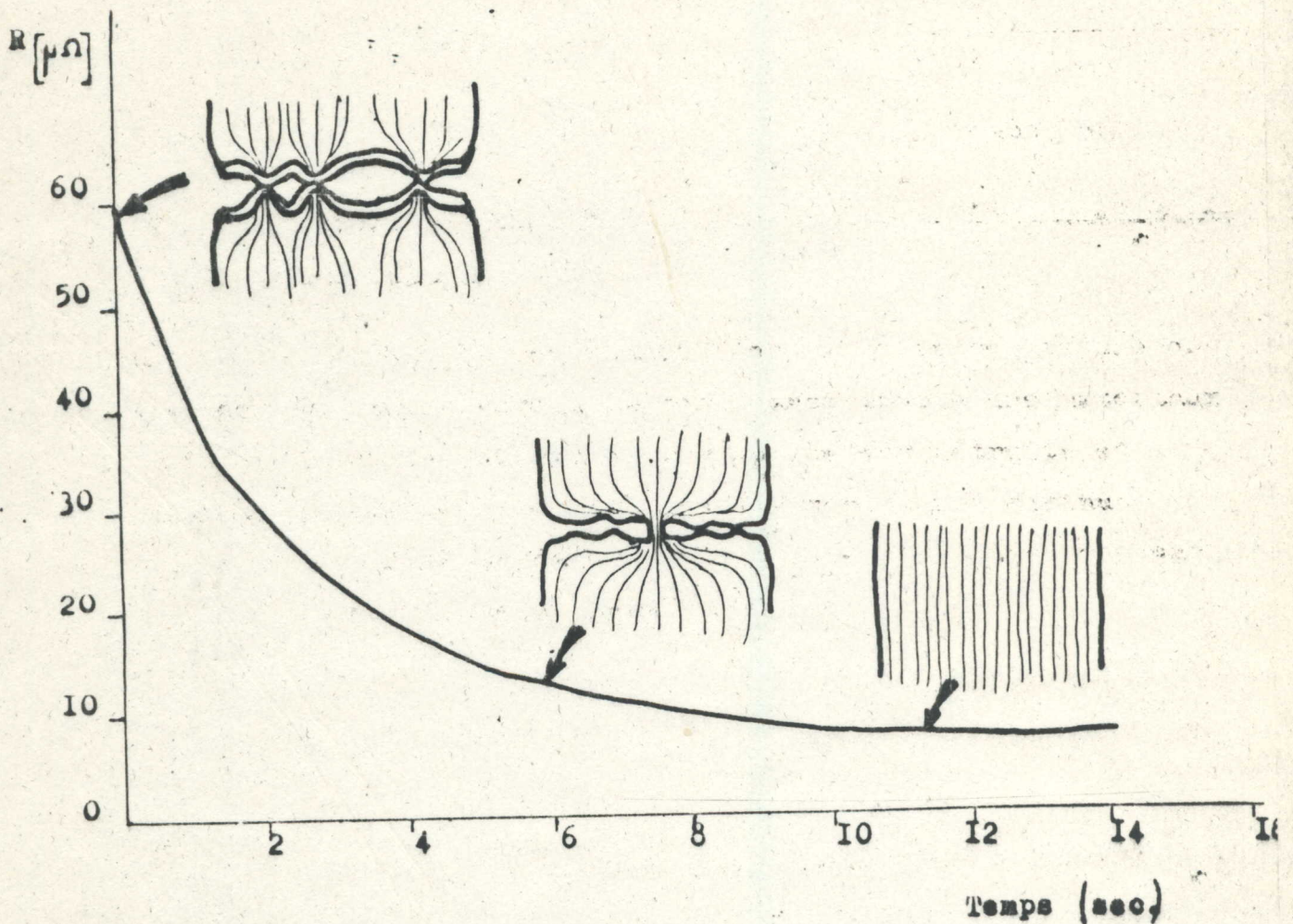


Fig. 2.7: Changement de résistance de contact pendant le cycle de soudage.

Au début du cycle la résistance électrique entre les pièces à souder est supérieure à la résistance propre des matériaux à souder. Au milieu du cycle la rugosité est détruite et augmente la surface de contact et la résistance diminue. En fin de cycle de soudage la résistance de contact devient égale à la résistance du métal.

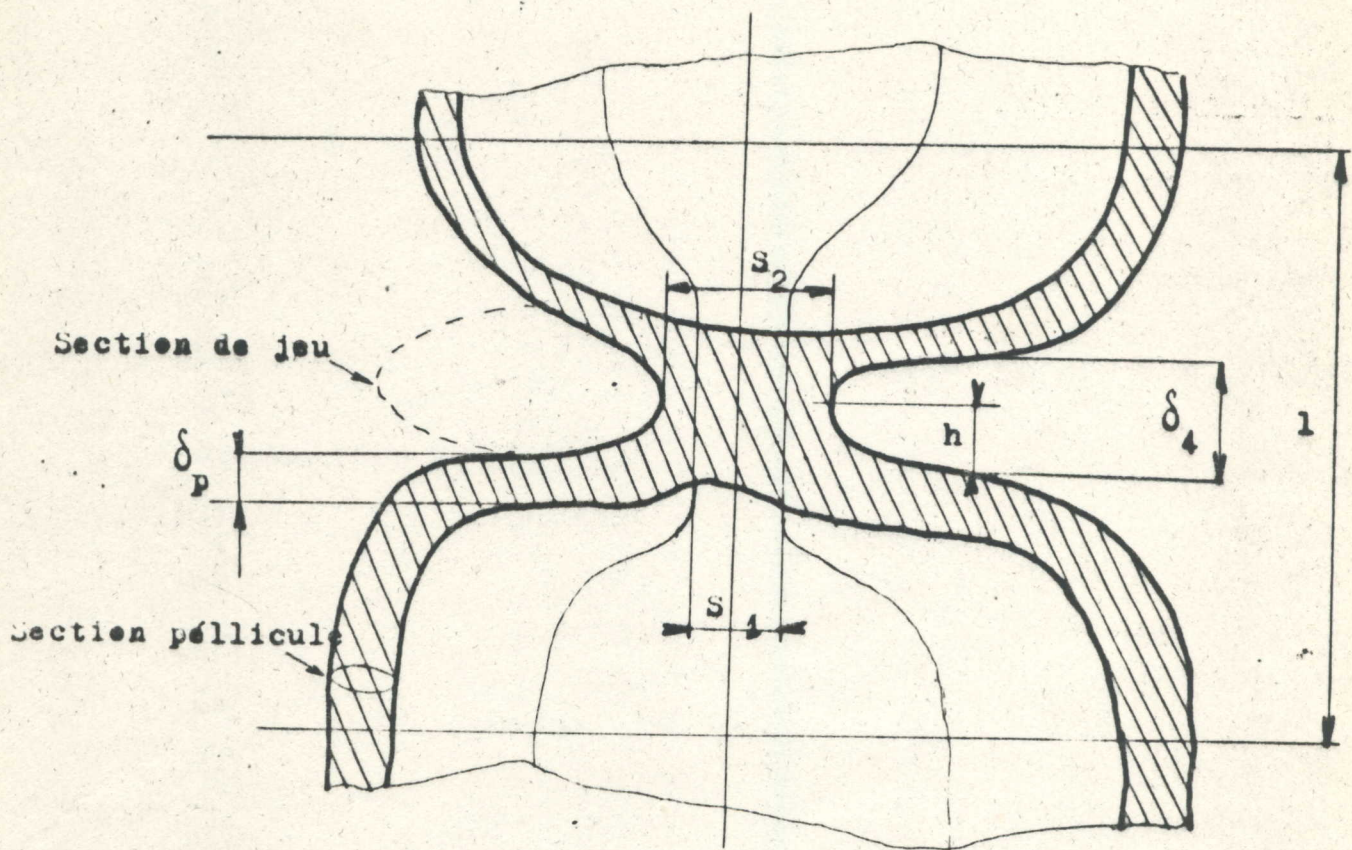


Fig. 2.8 : Pent métallique entre deux surfaces de contact.

- $l$ : longueur de la concentration des lignes de courant
- $h$ : hauteur de rugosité
- $\delta_p$ : épaisseur de pellicule
- $s_1$ : section des lignes de courant
- $s_2$ : section moyenne de rugosité
- $\delta_4$ : hauteur de jeu

où  $r_1$  est la résistance de concentration des lignes de courant et peut être déterminée par :

$$r_1 = \mu \frac{l}{s_1} \quad (4)$$

$l$  : est la longueur de concentration des lignes de courant

$s_1$  : est la section des lignes de courant

où  $r_2$  est la résistance de rugosité, elle est égale à :

$$r_2 = \mu_{\text{rug}} \frac{\delta_2 \text{ rug}}{s_2 \text{ rug}} \quad (5)$$

$\mu_{\text{rug}}$  est la résistivité de la matière de rugosité

$\delta$  est la hauteur de rugosité

$s_2 \text{ rug}$  section moyenne de rugosité

où

$$r_3 = \mu_{\text{pell}} \frac{\delta_3 \text{ pell}}{s_3 \text{ pell}} \quad (6)$$

$\mu_{\text{pell}}$  : est la résistivité de la pellicule

$s_3$  : section de la pellicule

où

$$r_4 = \mu_{4\text{jeu}} \frac{\delta_{4\text{jeu}}}{s_{4\text{jeu}}} \quad (7)$$

$\mu_4$  : résistivité du jeu

$\delta_4$  : épaisseur du jeu

$s_4$  : section du jeu

### 2.3.2 - FACTEURS QUI INFLUENT SUR LA RESISTANCE DE CONTACT

Il est établi que la température et la pression influent sur la résistance de contact. Pendant le soudage électrique par résistance, la section de contact est petite et par suite la densité de courant est grande. Ce courant atteint parfois 100 à 1000 Amp./mm<sup>2</sup>, dans ce cas le métal chauffe brusquement au contact jusqu'à la température de fusion voir (fig.1.6 zone 2). Entre les pièces on produit un petit "pont" liquide voir (fig.2.9)

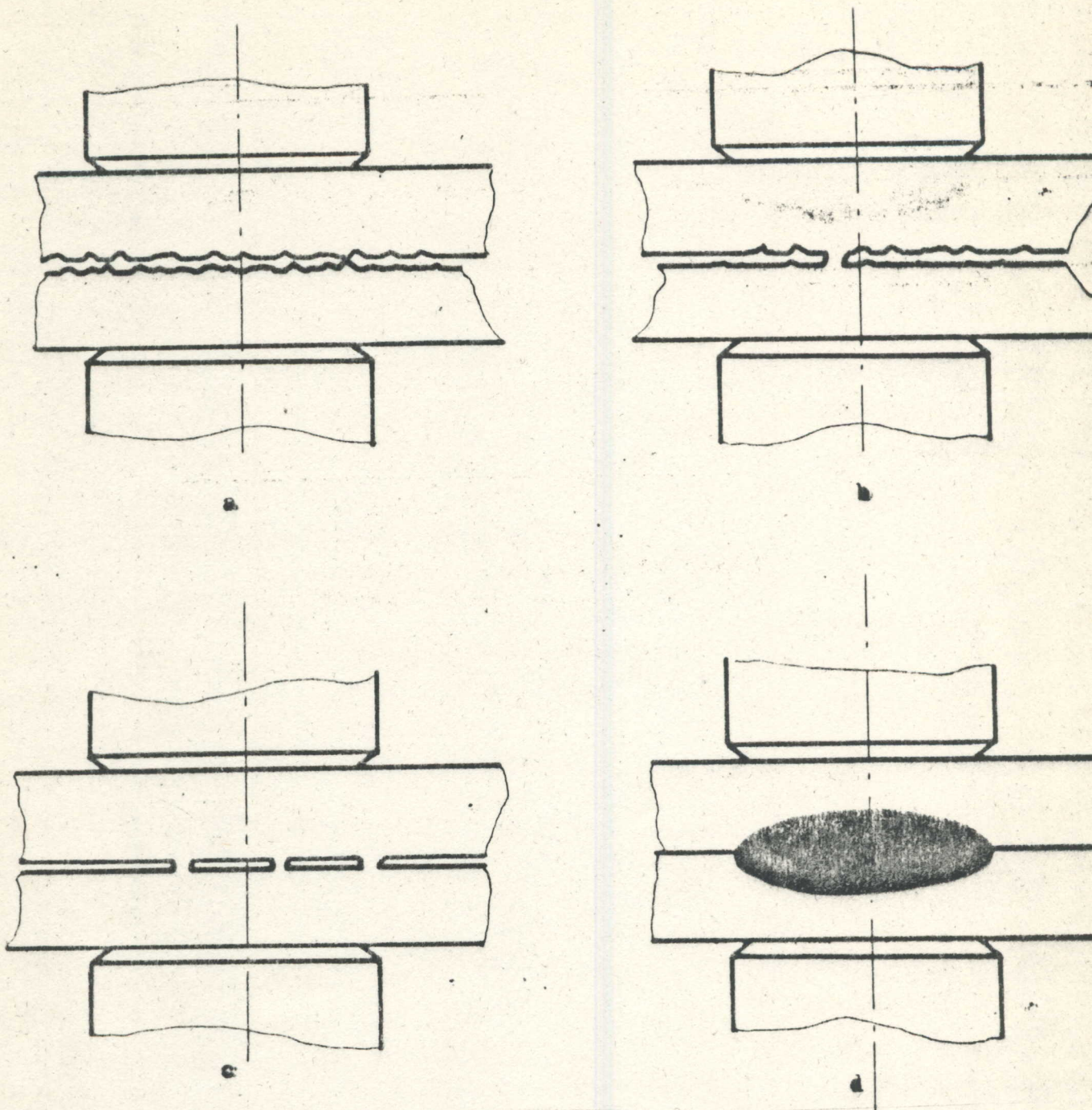


Fig. 2.9 : Formation du noyau fendu.

- a : début du cycle
- b : formation d'un pont
- c : formation de plusieurs ponts
- d : formation du noyau fendu



A partir de ce moment disparaît la résistance de rugosité, Restent seulement les résistances de concentrations des lignes de courant

$$R_c = r_1 + r_2 + r_3 + r_4$$

$$R_c = r_1$$

(8)

$r_1$  est la résistance de concentration des lignes de courant

Ce procédé continu pour les autres rugosité et la résistance de contact change par l'influence de la température de la manière décrite sur la fig. 2.10. Au point A, si le pont n'est pas établi, la résistance de contact augmente (en ligne discontinue) selon la formule

$$\mu = \mu_0 (1 + \alpha T \dots\dots) \quad (9)$$

Mais pendant le procédé de soudage, à partir du point A, la résistance de contact devient la résistance métallique grâce à l'existence d'un pont et elle diminue. Egalement à partir du point A disparaît la résistance de concentration des lignes de courant C'est à dire  $R_c$  devient  $R_m$  et on obtient le point de soudage.

Le deuxième facteur qui influe sur la résistance de contact est la pression qui est un paramètre important qu'on exprime par la formule suivante : [9]

$$R_c = \frac{r_c}{P^\alpha} \quad (10)$$

où  $r_c$  : densité de la résistance de contact égale à :

$$0,003 \div 0,006 \text{ } \Omega/\text{kg}$$

$\alpha$  : coefficient dépendant de la matière = 0,65 : 0,85

on exprime ces dépendances par la fig. 2.11

### 2.3.3 - CHALEUR DEGAGEE

En tenant compte des résistances de contact, la chaleur dégagée dans le contact électrique des pièces sera calculée par :

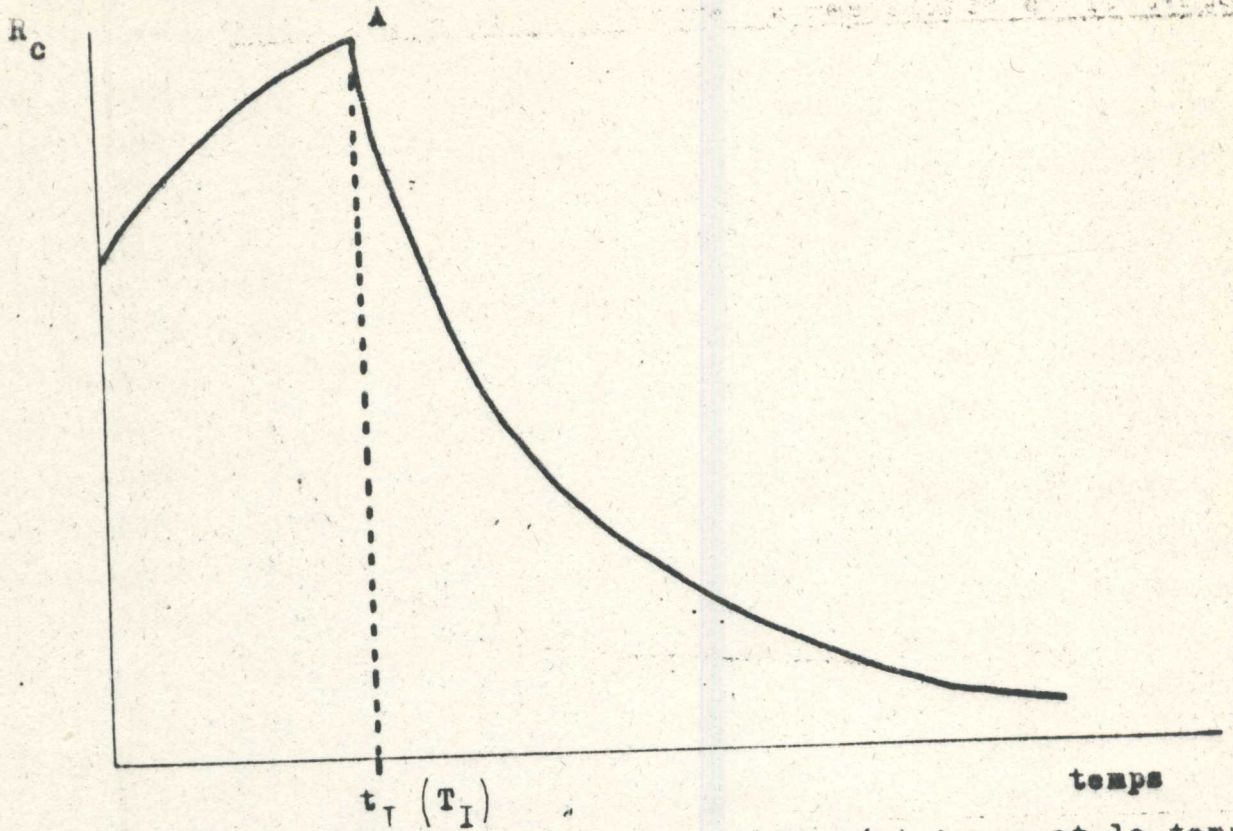


Fig. 2.10: Dépendance entre la résistance et le temps.

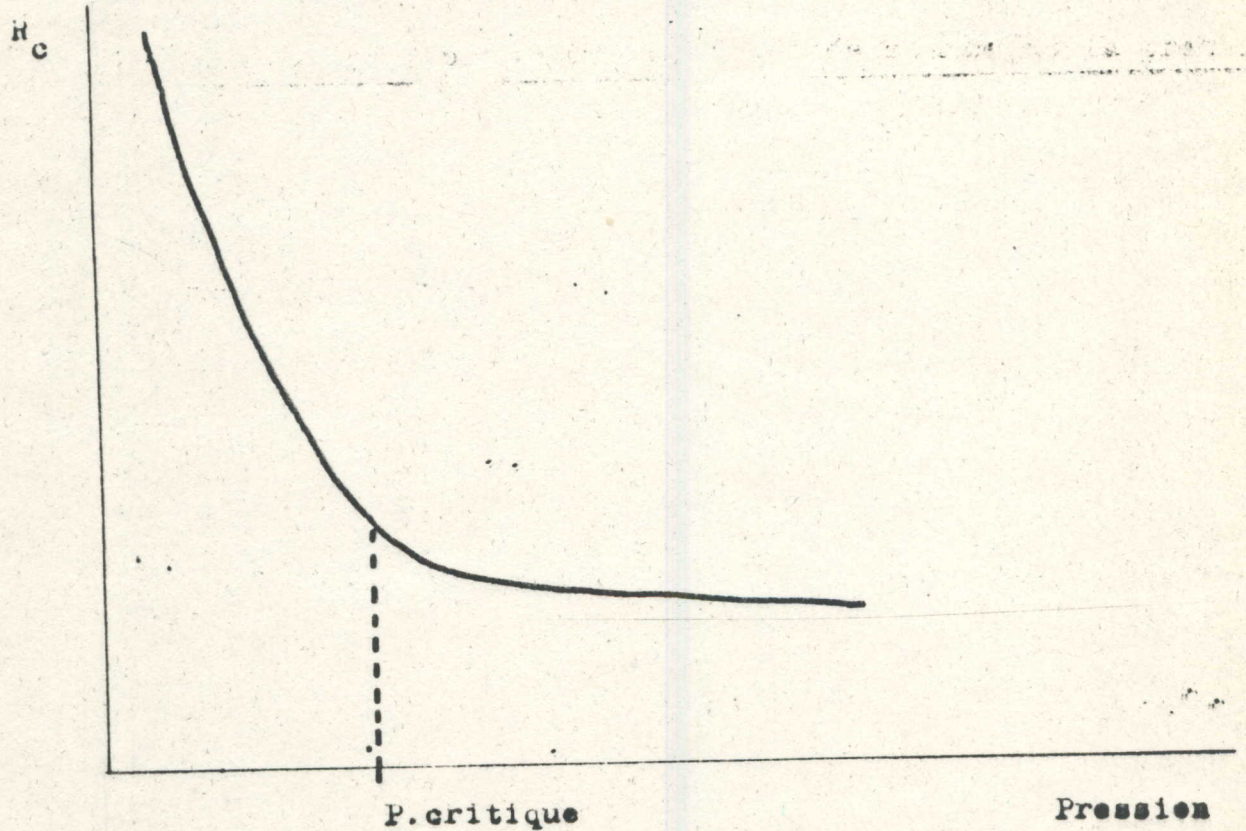


Fig. 2.II: Dépendance entre la résistance et la pressio

$$Q = I^2 R_c t$$

$$Q = I^2 (100 R_m) t$$

$$Q = I^2 (r_1 + r_2 + r_3 + r_4) t \quad (11)$$

Dans la zone de soudage, nous avons trois résistances de contact voir (fig.2.12)

1,3 : contact électrique entre l'électrode et les pièces.

2 : contact électrique entre les pièces à souder

Pendant la formation du noyau fondu, sous l'influence de ces trois résistances de contact, la chaleur dégagée dans la zone de soudage par la loi Joule est égale :

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (12)$$

$$Q_1 = Q_3 \quad (13)$$

$$Q = Q_2 + 2Q_1 \quad (14)$$

Il faut tenir compte également de la chaleur dégagée dans la section des pièces à souder par le passage du courant par la résistance métallique des matériaux à souder, on détermine donc :

$$q_1 = \mu_1 \frac{l_1}{s_1} \quad (15)$$

$$q_2 = \mu_2 \frac{l_2}{s_2} \quad (16)$$

La chaleur totale dégagée est égale à :

$$Q = Q_2 + 2Q_1 + q_1 + q_2 \quad (17)$$

Si les pièces sont de même matière et de même épaisseur

$$q_1 = q_2 = q \quad (18)$$

donc :

$$Q = Q_2 + 2Q_1 + 2q \quad (19)$$

En tenant compte de la valeur de q qui est égale à 1/100 de Q et cela d'après les résistances de contact et la résistance métallique

$$R_c = 100 R_m$$

donc, tous les auteurs négligent la chaleur dégagée par les pièces:

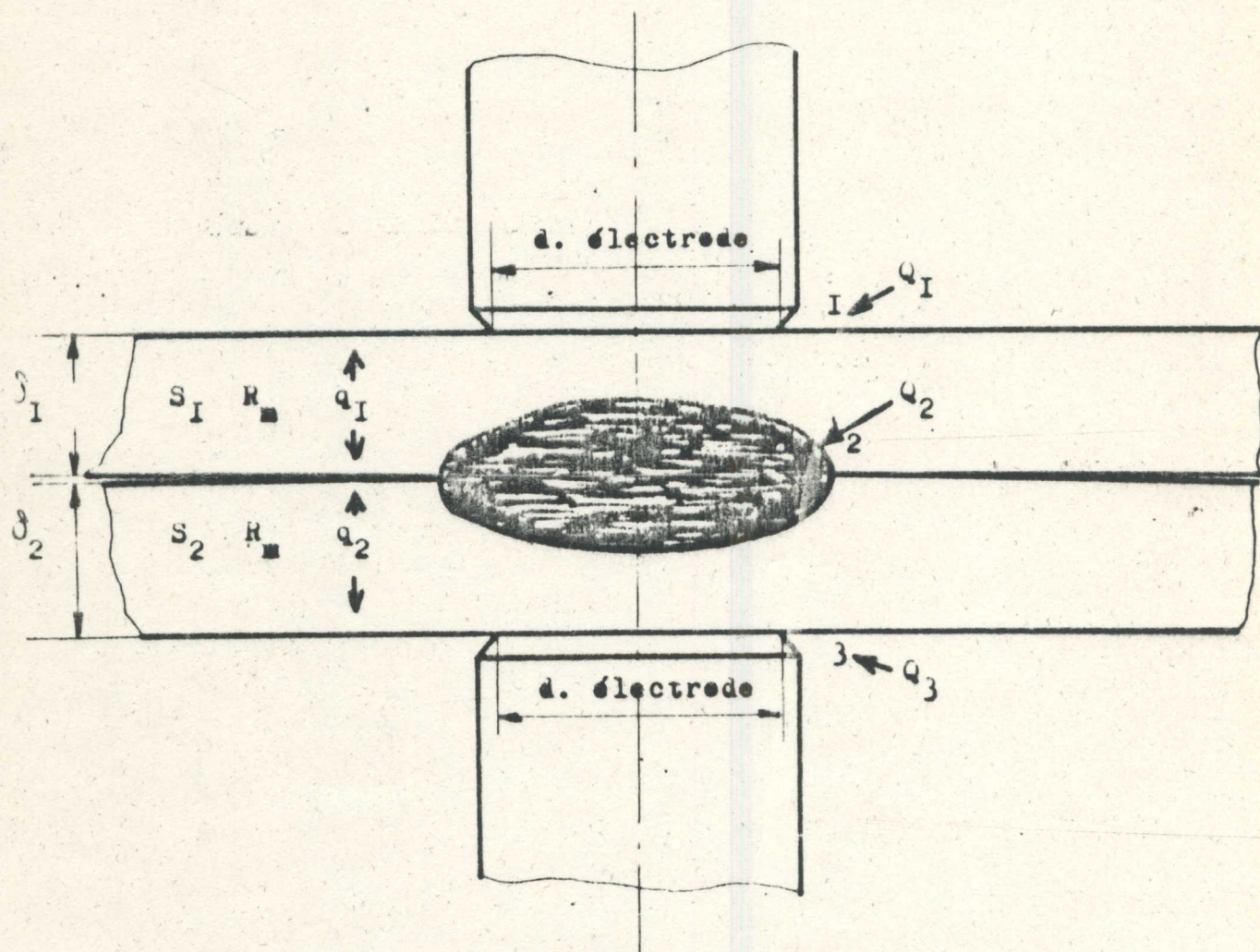


Fig.2.I2: Zone de soudage.

$d$  : diamètre des électrodes

$\delta_1$  et  $\delta_2$  : épaisseurs des pièces

$S_1$  et  $S_2$  : sections des pièces.

$R_m$  : résistance métallique

$Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  : chaleur dégagée sur les contacts 1, 2, 3

$q_1$ ,  $q_2$  : chaleur dégagée dans les matériaux

d'où :

$$Q = Q_2 + 2Q_1 \quad (20)$$

d'après la formule (20), la quantité de la chaleur dégagée est déterminée par la résistance électrique. pour le soudage des pièces à épaisseurs égales, la chaleur dégagée par les matières ne joue pas un rôle important sur la position du noyau fondu.

Mais en analysant le phénomène de l'influence de la relation des épaisseurs sur la position du noyau (fig. 2.2), nous supposons qu'il est important de ne pas négliger la chaleur dégagée dans le volume de métal considéré .

0 Après analyse des résultats existants, il est évident que la formation du noyau fondu dépend des phénomènes suivants:

- 1 - les matières des pièces à souder
- 2 - la forme et la matière des électrodes
- 3 - le type de courant de soudage
- 4 - la relation des épaisseurs des pièces.

L'influence des deux premiers phénomènes sur la formation du point de soudure est déjà maîtrisée pratiquement.

Le troisième et le quatrième phénomène sont fixés par les chercheurs. Mais les recommandations pratiques ne sont pas tout à fait satisfaisants. Concernant le type de courant, on peut substituer le courant nécessaire, mais concernant l'influence de la relation des épaisseurs des pièces, à ce jour ce phénomène n'est pas déterminé. Il est donc demandé de trouver un mécanisme de réglage pouvant résoudre ce problème.

**TROISIEME CHAPITRE**

RECHERCHE DES CRITERES QUI FONT QUE NOYAU FONDU  
SE DEPLACE DANS LA PIECE EPAISSE

## INTRODUCTION

Il est connu que pendant le soudage des pièces de différentes épaisseurs , le noyau fondu se déplace dans la pièce épaisse.

C'est ce que nous avons constaté pratiquement.

Il faut remarquer que sous la formation du noyau fondu, pendant le soudage des pièces de différentes épaisseurs, tous les facteurs (matières des pièces, dimensions et forme de la surface de l'électrode, polarité etc ...) influent.

Voilà pourquoi il faut tenir compte de ces facteurs pendant le soudage de différentes matières et différentes épaisseurs afin de déterminer la position du noyau fondu.

Dans notre cas, on considère l'analyse du soudage de pièces de même matière, mais les épaisseurs différentes. Les autres facteurs restent constants



### 3.1 CARACTERISTIQUES DU SOUDAGE DE PIÈCES DE DIFFÉRENTES ÉPAISSEURS

Le procédé de soudage par résistance de pièces de différentes épaisseurs par point ou à la molette donne une position du noyau fondu non symétrique.

Plusieurs auteurs [ 7, 16 ] expliquent ce phénomène par l'équidistance du contact des pièces à souder par rapport aux surfaces des électrodes. Pour cela, on crée dans la pièce mince un haut gradient de température  $dT/dx$  par suite du plus grand flux de la chaleur dans l'électrode. Par conséquent le noyau fondu se déplace au milieu de l'épaisseur totale des deux pièces. D'autres auteurs [ 11 ] expliquent ce phénomène de la même manière. Ils affirment que la température la plus élevée se trouve la plus éloignée de la surface de l'électrode.

En augmentant le rapport des épaisseurs, on augmente les problèmes de la qualité de soudage. Pour éliminer ces inconvénients on propose plusieurs solutions:

- A - Diminuer la dissipation de la chaleur dans l'électrode  
(diminuer la chaleur absorbée par l'électrode)
- B - Influence sur le champ de courant  
(augmenter la température dans la pièce mince).

Pour A on propose deux solutions :

1ère solution :

peut-être effectuée par la mise en place d'un écran métallique qui a une conductibilité thermique très faible (tungstène), entre l'électrode et la pièce mince voir (fig.3.1)

2ème solution :

par changement de la surface des électrodes voir (fig.3.2), et par différentes matières de l'électrode.

L'électrode du côté de la pièce mince doit avoir une faible conductibilité thermique. Cette proposition est difficile à

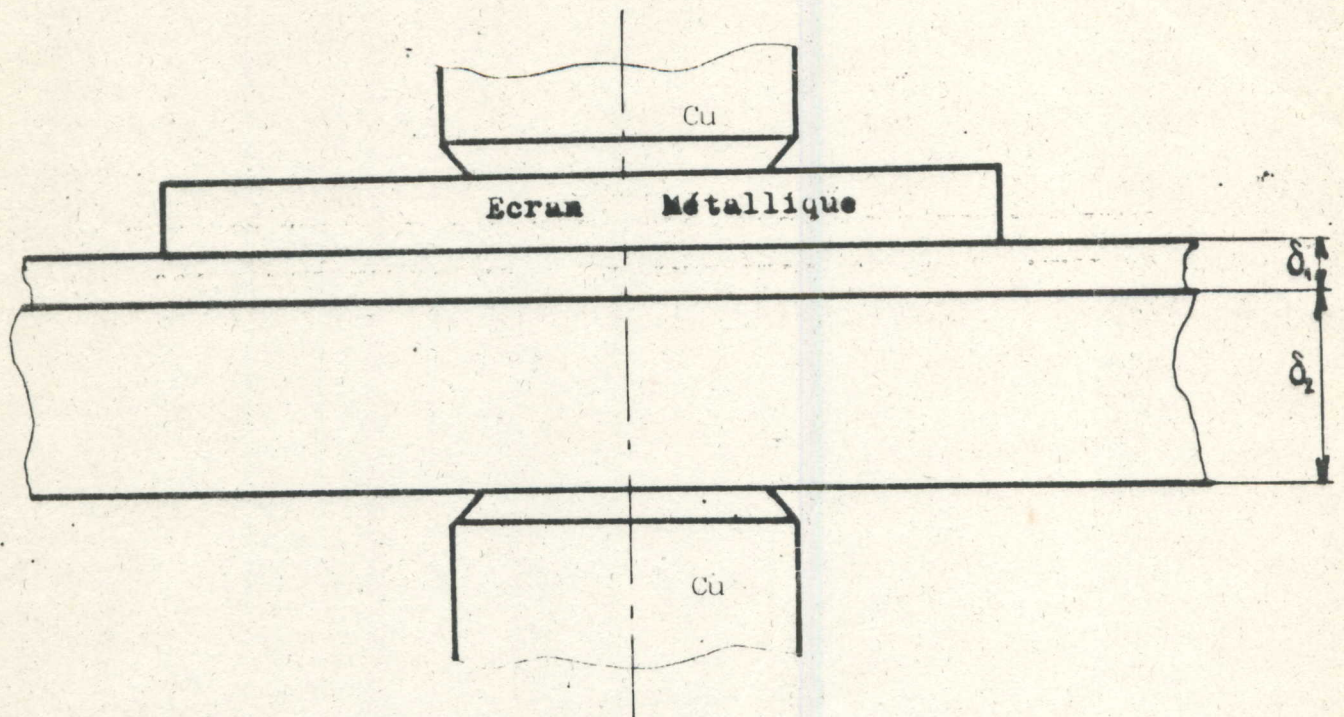


Fig. 3.1 : Schéma de soudage avec écran métallique

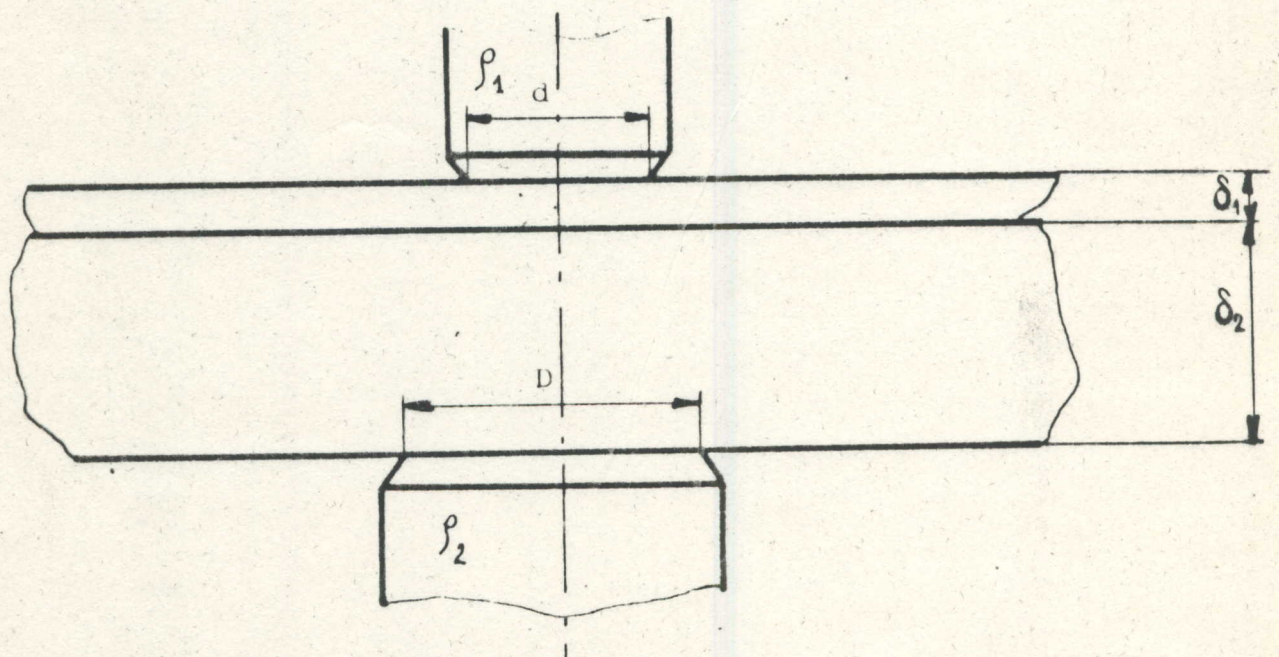


Fig. 3.2 : Schéma avec différentes formes et différentes matière des électrodes

effectuer et ne donne pas de résultat satisfaisant.

Pour B, c'est à dire l'influence sur le champ de courant, il faut changer la surface de contact de l'électrode, changer l'épaisseur des pièces, faire un relief sur les pièces minces, utiliser le courant unipolaire.

Toutes ces méthodes inscrites donnent de bons résultats pour les rapports des épaisseurs 1/2, 1/3 etc ...

Mais au delà du rapport 1/10 environ et plus, par exemple pour des pièces de  $0,1 \div 0,4$  mm avec des pièces épaisses, le noyau fondu revient vers le contact des pièces à souder, et il y a risque de crachement vers l'électrode qui est en contact avec la pièce mince et la forme du noyau fondu se déforme [ 13, 15, 16 ].

D'après cette analyse on peut conclure que par le changement de la relation entre les épaisseurs de 1/1, 1/2, 1/3, 1/4 ... le noyau fondu se déplace vers la pièce épaisse et se forme au centre des pièces à souder. Si on continue à augmenter l'épaisseur de la pièce épaisse, le noyau commence à se déplacer vers la pièce mince jusqu'à l'électrode qui est en contact avec la pièce mince et peut sortir à la surface.

D'après les hypothèses des auteurs KHOLM [ 11 ] et BALKOVETS [ 3 ], par l'augmentation de l'épaisseur d'une pièce, le noyau fondu doit se déplacer continuellement vers la pièce épaisse au centre de la somme des pièces à souder. Mais pratiquement, le noyau retourne, cela signifie que les hypothèses données ne sont pas suffisantes et le procédé de formation du noyau dans les pièces de différentes épaisseurs demande une recherche approfondie.

### 3.2 PHENOMENES QUI INFLUENT SUR LA POSITION DU NOYAU FONDU

3.2.1. Après analyse des résultats pratiques et théoriques [32], nous pouvons faire les hypothèses suivantes :

2.1.1. L'épaisseur des pièces à souder influe sur la position et sur la dimension du noyau fondu.

1 - l'épaisseur ou la section des pièces conduit le courant et sert de source thermique d'après la loi de Joule :

$$Q \text{ dég} = I^2 \mu \frac{l}{s} t \quad (1)$$

où : I = valeur affective du courant

$\mu$  = résistivité thermique du matériau

l = longueur du conducteur voir (fig. 3.3a)

pour le soudage par point et à la molette

l =  $\delta$  ou  $\delta$  est l'épaisseur des pièces

s = section métallique conduisant le courant pendant le soudage; voir (fig 3.3b).

2 - l'épaisseur des pièces joue le rôle de conducteur thermique vers l'électrode refroidit. On peut donner la valeur de cette chaleur par l'expression suivante :

$$Q_{\text{abs}} = qst \quad (2)$$

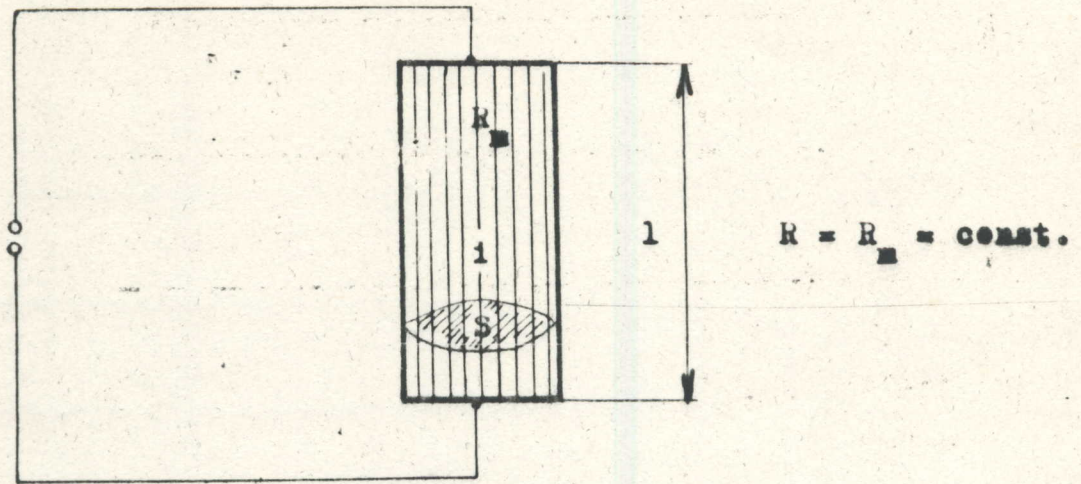
où : q = est le flux thermique, il dépend des propriétés thermo-physiques des matériaux

s = section transversale des pièces

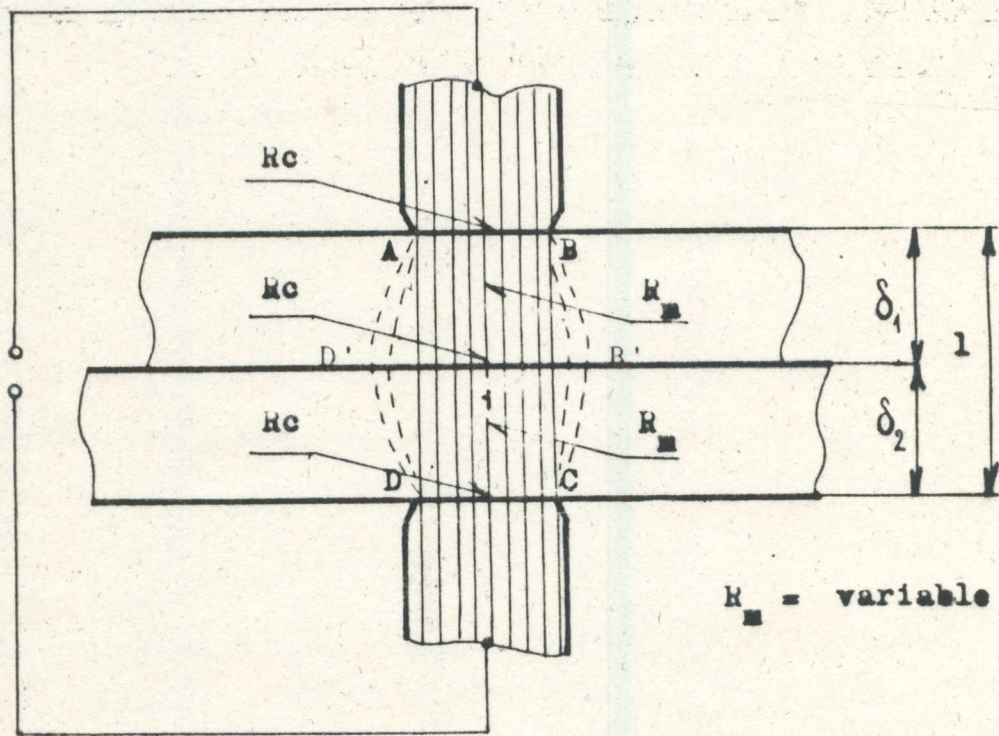
t = temps

2.1.2. Il apparait que par le changement de la relation des pièces, le rôle de chaque facteur change (source thermique, chaleur dissipée) dans la balance thermique de la zone de soudage.

1 - Pour les rapports de 1/1, 1/2, 1/3 .... la chaleur dissipée dans l'électrode, du côté de la petite épaisseur est sensiblement la même que la chaleur dissipée dans l'autre électrode



a.



b.

Fig. 3.3 : a. court circuit pour un conducteur unique.

b. court circuit pour la zone de soudage par résistar

Par contre la chaleur dégagée par la section des pièces est proportionnelle aux épaisseurs des pièces

C'est pourquoi, on augmente la quantité de chaleur dans les pièces épaisses, le noyau fondu se déplace dans la pièce épaisse.

2. - Pour les grands rapports, la précipitation de la chaleur dans l'électrode a lieu de la même manière.

La raison du retour du noyau fondu vers le contact des pièces est due à la diminution de la chaleur dégagée dans la pièce épaisse.

Cette constatation ne s'adapte pas avec l'expression de la chaleur dégagée (1) qui indique que par l'augmentation de l'épaisseur  $l$ ,  $Q$  doit augmenter. Ceci demande des précisions. A notre avis un grand rôle est joué par le volume du métal chauffé dans la zone de soudage voir (fig. 3.3b) volume BB'CDD'A qui se trouve sous l'influence des lignes de courant.

3.2.2. D'après le bilan thermique on a :

d'un côté la chaleur dégagée par effet Joule

$$Q = I^2 R_T t \quad (3)$$

de l'autre: la chaleur dépensée pour l'obtention du noyau

$$Q_{\text{dép}} = q_1 + q_2 + q_3 \quad (4)$$

où  $q_1 = GCT =$  chaleur sensible

$G =$  masse du noyau

$C =$  capacité calorifique (chaleur massique)

$T =$  température du noyau

où  $q_2 = 2 \lambda . S . \Delta T . t =$  chaleur de conduction

$\lambda :$  coefficient de conductibilité thermique

$S :$  surface du noyau

$\Delta T :$  variation de température par unité d'épaisseur à la frontière du noyau

t : temps de passage du courant

où  $q_3 = H.S.\Delta\theta .t =$  chaleur de convection

H : coefficient de convection

S : surface de convection

$\Delta\theta$  : différence de température entre l'air  
ambiant et la pièce.

t : temps de soudage

Donc, (4) devient :

$$I^2 R_T t = GCT + 2 \lambda S \Delta T t + HS \Delta \theta . t \quad (5)$$

$R_T$  est la résistance totale dans la zone de soudage, est égale à :

$$R_T = R_c + R_m \quad (6)$$

où :  $R_c$  est la résistance de contact, elle est égale à :

$$R_c = \frac{r_c}{p^\alpha}, \text{ voir chapitre II, ne dépend pas des épaisseurs}$$

des pièces à souder.

$R_m$  est la résistance métallique, elle est fonction de  
l'épaisseur  $\delta$  d'après la fig. 3.3b

La résistance métallique est donc variable suivant  
l'augmentation ou la diminution de l'épaisseur.

Il est donc indispensable de déterminer la résistance  
métallique dans le volume du métal considéré.

### 3.3 - DETERMINATION APPROXIMATIVE DE LA RESISTANCE DANS LE VOLUME DE METAL CONSIDERE

La résistance électrique du volume considéré est formulée par [1], comme la résistance d'un conducteur assimilé à un cône sans sommet voir (fig.3.4). Pour ce conducteur la résistance métallique est égale à :

$$R_m = \frac{2\mu\delta}{\pi dD} \quad (7)$$

- où :
- $\mu$  : résistivité métallique
  - $\delta$  : épaisseur du conducteur
  - $d$  : diamètre de l'électrode
  - $D$  : diamètre maximum du champ des lignes de courant

Donc l'expression (7) devient pour deux conducteurs c'est à dire pour une pièce d'épaisseur  $\delta_1$  : voir (fig.3.5)

$$R_m = \frac{4\mu\delta_1}{\pi dD} \quad (8)$$

Si deux pièces sont en contact pour une soudure par point, la résistance métallique sera égale:

- 1 - même épaisseur, même matière

$$R_{mT} = R_{m1} + R_{m2} = \frac{8\mu\delta_T}{\pi dD} \quad (9)$$

- 2 - différente épaisseur, différente matière :

$$R_{mT} = \left[ R_{m1} + R_{m2} \right] = \left[ \frac{4\mu_1\delta_1}{\pi dD_1} + \frac{4\mu_2\delta_2}{\pi dD_2} \right] \quad (10)$$

D'après l'expression (8), pour calculer la résistance métallique  $R_m$ , il faut déterminer  $D$  qui est le diamètre maximum du champ de courant. Pour cela il est nécessaire de trouver le volume de métal, qui se trouve sous l'influence des lignes de courant électrique.



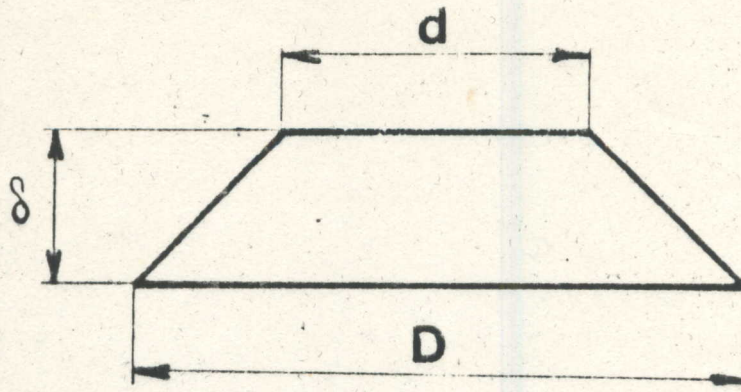


Fig. 3.4 : Schéma pour calculer la résistance d'un conducteur conique sans sommet.

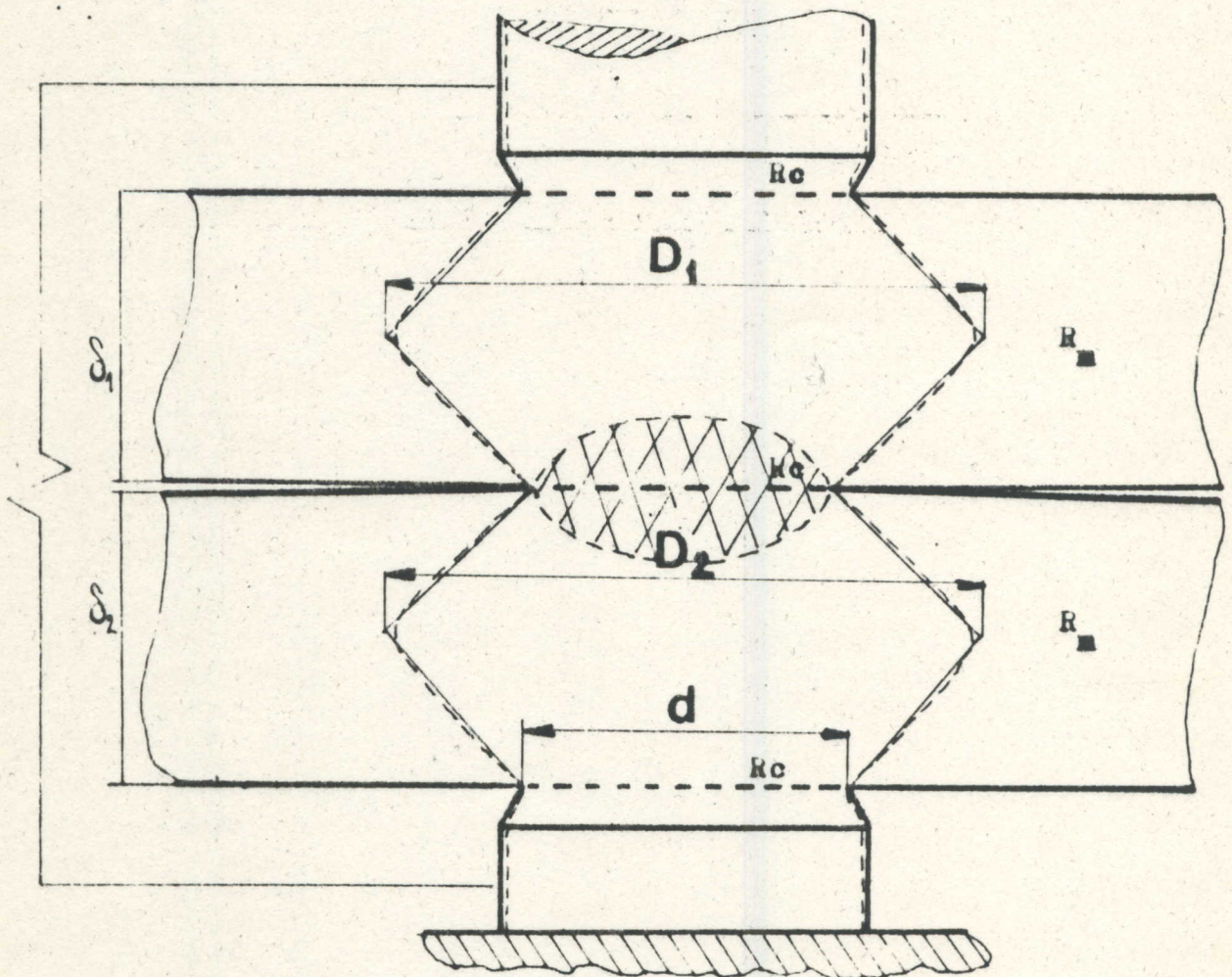


Fig. 3.5 : Schéma de la zone de soudage.

### 3.4. RECHERCHE DES DIRECTIONS DES LIGNES DE COURANT DANS LA ZONE DE SOUDAGE

Le volume de métal chauffé peut être déterminé en général par le diamètre maximum des lignes de courant d'après la section des pièces à souder.

D'après TCHOULOUCHIKOV [26]

$$D = (3 \div 3,5) \cdot d \quad (11)$$

où  $d$  : diamètre de la surface de l'électrode.

En utilisant cette formule pour calculer le volume du métal de différente épaisseur, le changement d'épaisseur ne doit pas influencer le volume si les diamètres des électrodes restent les mêmes.

Pratiquement cette constatation est valable pour les pièces de même épaisseurs.

Ce résultat demande une recherche de l'influence du rapport des épaisseurs sur le diamètre du champ des lignes de courant.

Le problème a été étudié en utilisant un modèle plat qui a été expérimenté par l'auteur [24], voir (fig 3.6).

Pour ce modèle nous avons utilisé un alliage d'aluminium d'épaisseur de quelques microns et utilisé une source d'alimentation en courant continu de 0,3 ampère et une tension de 12 volts (Bloc de Source stabilisateur 5 [220 - 12 volts]). Les résistances de contact entre les pièces et entre les pièces et les électrodes sont maintenues constantes pour les différentes épaisseurs pendant toutes les séries d'expérience.

Le modèle plat utilisé pour les expériences est branché à la source d'alimentation. Il fallait donc déterminer les surfaces équipotentiellles à l'aide de deux aiguilles en cuivres minces distantes de 2 mm entre-elles. La lecture se fait sur un millivoltmètre de type (GALVANOMETRE G. 323 A). On trace alors la ligne de courant extrême. Le voltage est

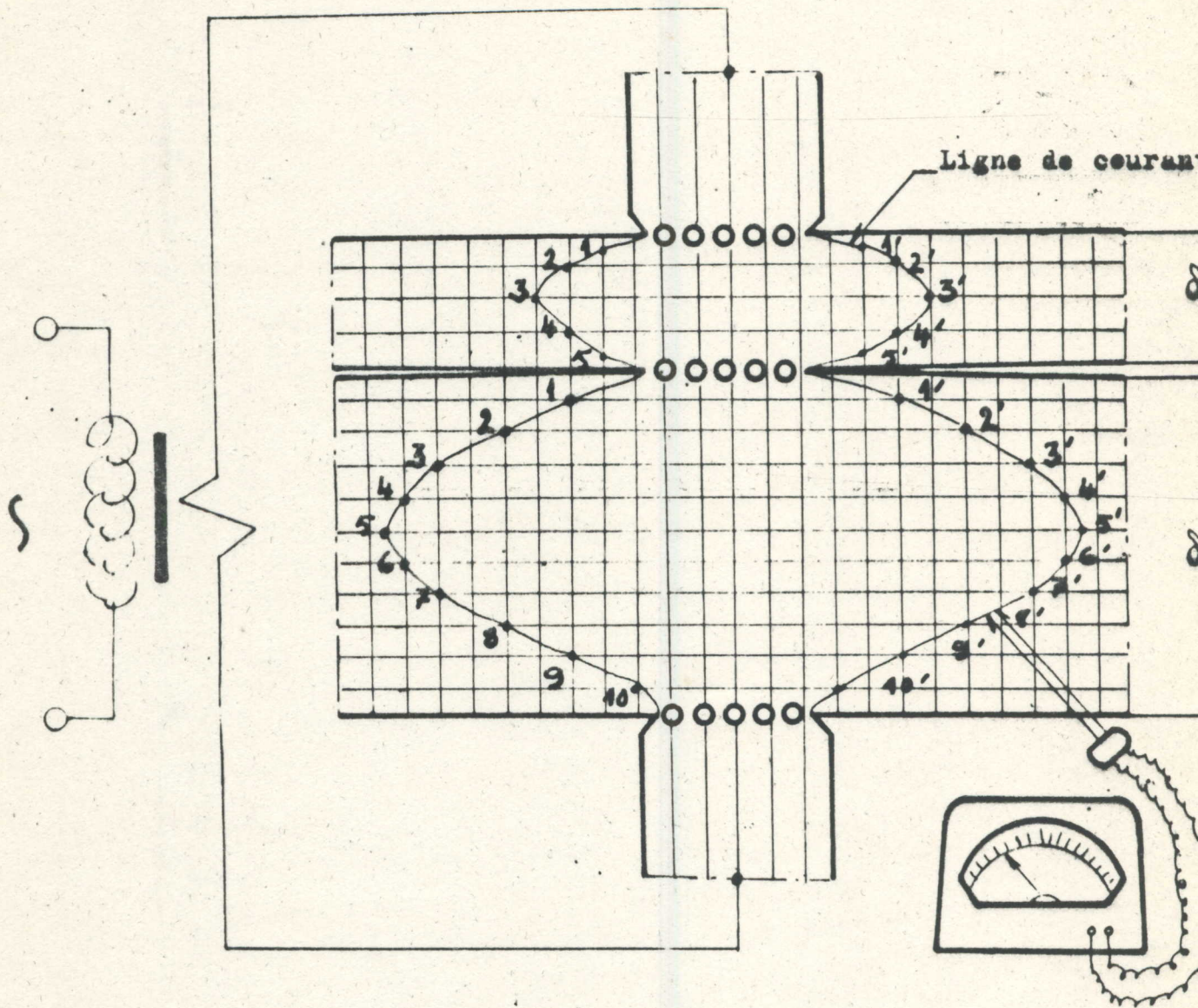


Fig.3.6: Schéma d'un modèle plat.

maintenu constant sur l'axe de symétrie des électrodes, ensuite on déplace les aiguilles de mesurage sur les lignes transversales du champ de courant jusqu'à obtenir la lecture zéro sur le millivoltmètre, qui détermine le diamètre extrême du champ de courant. Pour construire la ligne de courant, on procède de la manière suivante, on partage l'épaisseur des pièces par des parties égales et parallèles. Sur chaque ligne parallèle, on cherche le point extrême. On joint ensuite tous les points.

La température est supposée constante dans les conditions statiques pour les points du modèle, car le matériau a une bonne conductibilité thermique.

On peut dire que cette méthode permet de déterminer le volume chauffé sous l'influence du courant de passage. Aussi elle répond aux questions posées et montre que les expressions de calcul du diamètre  $D$ , établies auparavant par certains auteurs ne peuvent être généralisées pour les différentes épaisseurs.

On peut également faire certaines remarques sur la directions des lignes de courant. L'auteur [9] ne donne pas l'image réelle de ces lignes de courant pour le soudage de pièces d'épaisseurs égales, voir (fig. 3.7), et l'auteur [5] pour le soudage de pièces d'épaisseurs différentes avec électrodes différentes voir (fig.3.8) Donc l'expérience réalisée montre que pour le soudage par point, le courant  $i$  ne se déplace pas parallèlement à l'axe des électrodes, mais suivant une ellipsoïde voir (fig. 3.6).

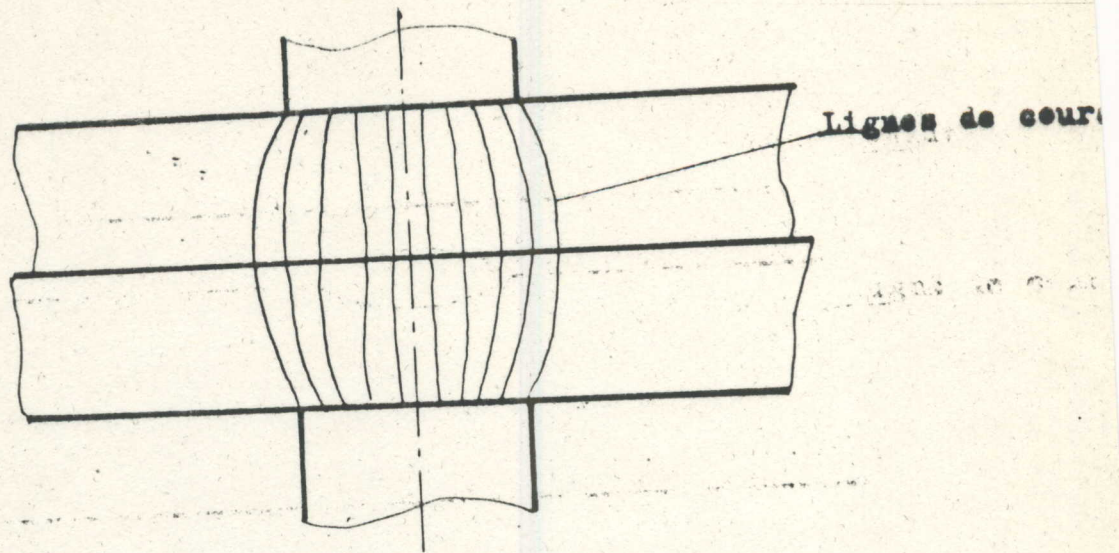


Fig. 3.7: Les filets de courant ont tendance à s'étaler dans les toles.

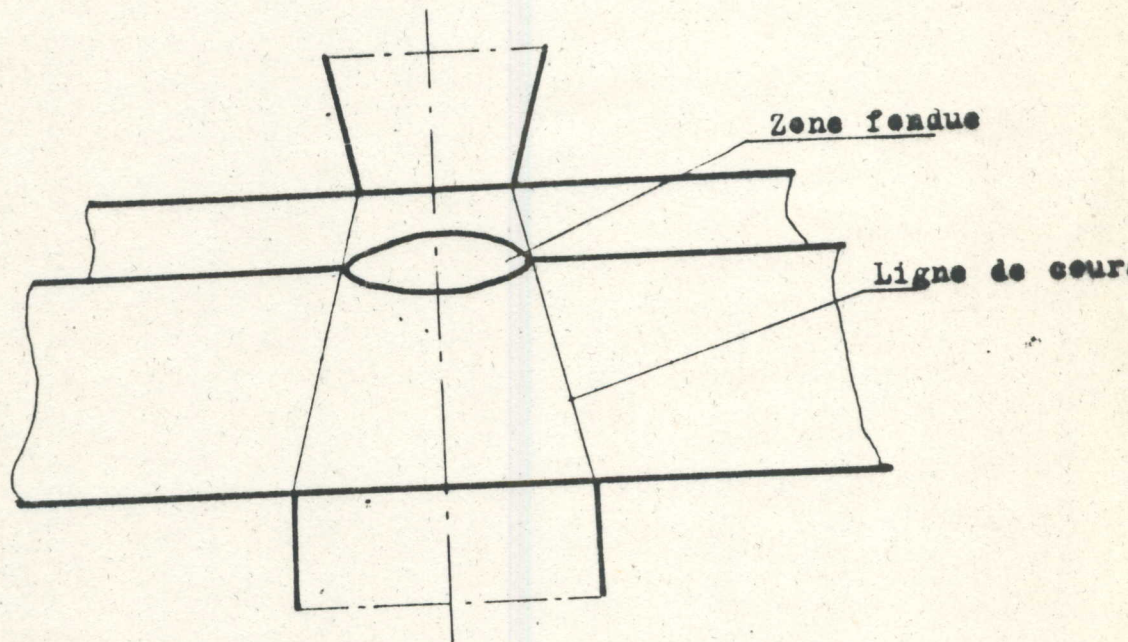


Fig. 3.8: Choix de l'électrode en fonction de l'épaisseur.

A la suite des expériences effectuées, concernant la détermination du champ des lignes de courant, on remarque que le passage de courant a tendance à s'étaler dans les épaisseurs des pièces.

La résistance joue un rôle important dans le volume chauffé, donc une expression mathématique est donnée pour le bilan thermique.

On remarque également que dans l'expression (11) il n'est pas tenu compte des paramètres géométriques des éprouvettes.

Le critère important qui influe sur la position du noyau fondu pendant le cycle de soudage avec différentes épaisseurs est le volume de métal considéré dans la pièce épaisse.

Il est indispensable de trouver une formule mathématique qui détermine  $D$  en dépendance avec les paramètres géométriques des éprouvettes.

**QUATRIEME CHAPITRE**

**INFLUENCE DES PARAMETRES GEOMETRIQUES SUR LE VOLUME  
DE METAL CONSIDERE**

## GENERALITES

Le point de soudure normal dépend des caractéristiques tels que les épaisseurs et les matériaux des pièces.

Dans l'expression (8), la détermination de D (diamètre maximum du champ des lignes de courant) nécessite quelques expérimentations sur des éprouvettes établies à partir du modèle plat expérimentale présente au chapitre III.

Les expériences confirmeront le phénomène du déplacement du noyau fondu avec le changement de la relation des épaisseurs.

Les expériences effectuées sont:

- 1 - L'influence du diamètre de l'électrode sur le champ des lignes de courant.
- 2 - L'influence des épaisseurs sur le champ des lignes de courant.
- 3 - Relation des lignes de courant extrêmes pour différentes épaisseurs.
- 4 - L'influence du matériau des pièces sur le champ des lignes de courant.
- 5 - L'influence des épaisseurs sur la chaleur dégagée



#### 4.1 - INFLUENCE DU DIAMETRE DES ELECTRODES SUR LA POSITION DU NOYAU FONDU

Le but recherché de cette expérience est la détermination du diamètre maximum des lignes de courant de passage.

L'expérimentation est menée pour chaque série d'éprouvette de la manière suivante:

Utilisation de l'installation électrique identique à celle qui a été nécessaire pour la détermination des lignes de courant.

Les résistances de contact entre les pièces entre-elles et entre les pièces et les électrodes sont maintenues constantes. La température est supposée constante dans les conditions statiques vu que le matériau utilisé a une bonne conductibilité thermique.

les conditions expérimentales sont:

- le matériau des éprouvettes est en aluminium
- l'épaisseur des pièces est maintenue constante
- on fait varier le diamètre de l'électrode

Donc pour la première série expérimentale, l'influence des électrodes sur la position du noyau fondu, les éprouvettes ont les côtes suivantes :

$$\delta_1 = \delta_2 = 5 \text{ mm}$$

$$d \text{ elect} = \text{variable} = \text{de } 5 \text{ à } 30 \text{ mm}$$

Pour la deuxième expérience les éprouvettes ont les côtes suivants:

$$\delta_1 = \delta_2 = 10 \text{ mm}$$

$$d \text{ elect} = \text{variable} = \text{de } 5 \text{ à } 30 \text{ mm}$$

Pour la troisième expérience les éprouvettes ont les côtes suivantes :

$$\delta_1 = \delta_2 = 20 \text{ mm}$$

$$d \text{ elect} = \text{variable} = \text{de } 5 \text{ à } 30 \text{ mm}$$

Pour toutes les séries d'expérience, les résultats moyens sont donnés sur le tableau 4.1

TABLEAU 4.1

| DIAMETRE<br>DE L'ELECTRODE<br>( mm ) | $\delta_1 = \delta_2 = 5\text{mm}$ |         | $\delta_1 = \delta_2 = 10\text{mm}$ |         | $\delta_1 = \delta_2 = 20\text{mm}$ |         |
|--------------------------------------|------------------------------------|---------|-------------------------------------|---------|-------------------------------------|---------|
|                                      | D1 (mm)                            | D2 (mm) | D1 (mm)                             | D2 (mm) | D1 (mm)                             | D2 (mm) |
| 5                                    | 24                                 | 24      | 40                                  | 40      | 66                                  | 66      |
| 10                                   | 28                                 | 28      | 44                                  | 44      | 70                                  | 70      |
| 15                                   | 34                                 | 34      | 48                                  | 48      | 76                                  | 76      |
| 20                                   | 40                                 | 40      | 54                                  | 54      | 80                                  | 80      |
| 25                                   | 44                                 | 44      | 57                                  | 57      | 82                                  | 82      |
| 30                                   | 50                                 | 50      | 60                                  | 60      | 86                                  | 86      |

On trace alors les courbes expérimentales de dépendance entre le diamètre de l'électrode et le diamètre maximum des lignes de courant voir (fig. 4.1, courbes en traits continus).

Pour déterminer D (diamètre maximum du champ des lignes de courant) on a donc utilisé la méthode d'interpolation de fonction [11] qui nous donne le résultat suivant:

$$D = 1,25 d + K_1 \quad (12)$$

où :  $d$  = diamètre de l'électrode

$K_1$  = coefficient dépendant de l'épaisseur des pièces.

D'après le graphe de la fig 4.1, il est évident que l'augmentation des épaisseurs entraîne une augmentation du diamètre du champ des lignes de courant.

Cette affirmation demande une recherche plus approfondie du résultat de l'expression (12)

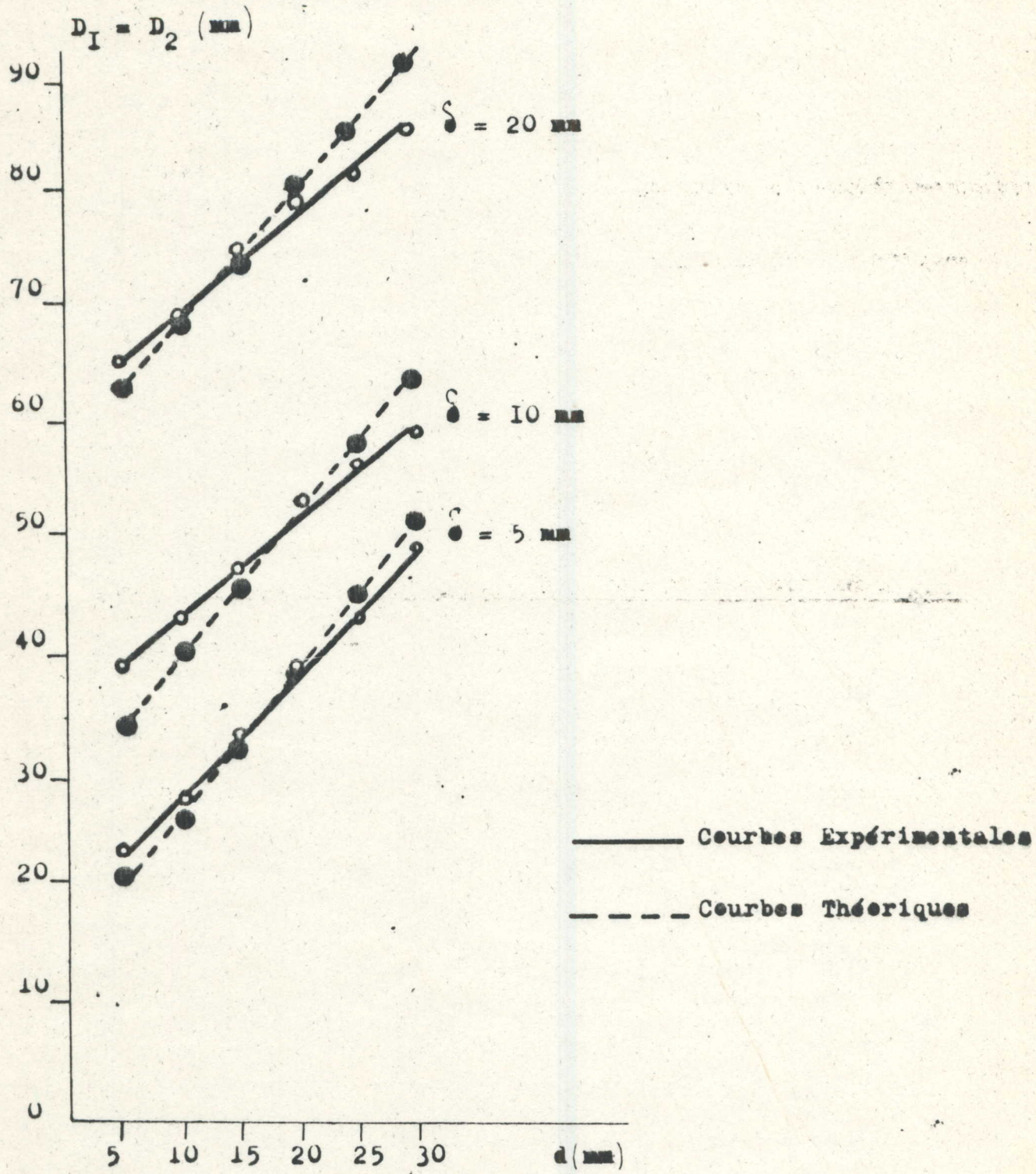


Fig. 4.1 : Influence du diamètre de l'électrode sur les lignes de courant.

#### 4.2. INFLUENCE DES EPAISSEURS SUR LE CHAMP DES LIGNES DE COURANT.

Cette seconde série d'expérience est faite pour confirmer le résultat de la première expérience. Donc l'expérience est menée avec les mêmes installations, le même matériau des éprouvettes mais on fait varier les épaisseurs des pièces et on maintient le diamètre des électrodes constant

1ere série d'expérience :

$d_{\text{elect}} = 10 \text{ mm}$

$\delta_1 = \delta_2 = \text{de } 5 \text{ à } 30 \text{ mm}$

2ème série d'expérience :

$d_{\text{elect}} = 20 \text{ mm}$

$\delta_1 = \delta_2 = \text{de } 5 \text{ à } 30 \text{ mm}$

3ème série d'expérience :

$d_{\text{elect}} = 30 \text{ mm}$

$\delta_1 = \delta_2 = \text{de } 5 \text{ à } 30 \text{ mm}$

Pour toutes ces expériences, les résultats moyens sont donnés sur le tableau 4.2.

TABLEAU 4.2

| EPAISSEURS<br>DES PIECES<br>$\delta_1 = \delta_2$<br>( mm ) | DIAMETRE DE<br>L'ELECTRODE<br>$d = 10 \text{ mm}$ |         | DIAMETRE DE<br>L'ELECTRODE<br>$d = 20 \text{ mm}$ |         | DIAMETRE DE<br>L'ELECTRODE<br>$d = 30 \text{ mm}$ |         |
|---|---|---------|---|---------|---|---------|
|   | D1 (mm)   | D2 (mm) | D1 (mm)   | D2 (mm) | D1 (mm)   | D2 (mm) |
| 5   | 32  | 32      | 44  | 44      | 50  | 50      |
| 10  | 44  | 44      | 56  | 56      | 62  | 62      |
| 15  | 56  | 56      | 65  | 65      | 75  | 75      |
| 20  | 70  | 70      | 78  | 78      | 86  | 86      |
| 25  | 80  | 80      | 88  | 88      | 94  | 94      |
| 30  | 92  | 92      | 98  | 98      | 106   | 106     |

On trace alors les courbes expérimentales de dépendance entre les épaisseurs des pièces et les lignes de courant extrêmes voir (fig. 4.2, courbes en traits continus).

Pour déterminer le diamètre maximum des lignes de courant, on utilise la même méthode d'approximation qui nous donne le résultat suivant :

$$D = 2,8 \delta + K2 \quad (13)$$

où  $\delta$  = épaisseurs des pièces

$K2$  = coefficient dépendant du diamètre de l'électrode.

Les résultats des expériences sur l'influence du diamètre des électrodes expression (12) et sur l'influence des épaisseurs expression (13) sur le champ des lignes de courant nous permettent de déduire la relation suivante:

$$D = 1,25 d + 2,8 \delta \quad (14)$$

où  $d$  = diamètre de l'électrode

$\delta$  = épaisseur des pièces

On trace alors des courbes théoriques en traits discontinus voir (fig. 4.1 et fig. 4.2). Les résultats sont sensiblement les mêmes. Ayant déterminé le diamètre maximum du champ de courant, on peut alors déterminer la résistance par l'expression suivante:

$$R_m = \frac{4\mu\delta}{\pi d(1,25d+2,8\delta)} \quad (15)$$

Mais en considérant le procédé de soudage réel, nous devons avoir deux ou plusieurs pièces. Si la condition est que les deux pièces soient de même épaisseurs et de même matière, la relation (15) devient :

$$R_{m_r} = \frac{8\mu\delta}{\pi d(1,25d+2,8\delta)} \quad (16)$$

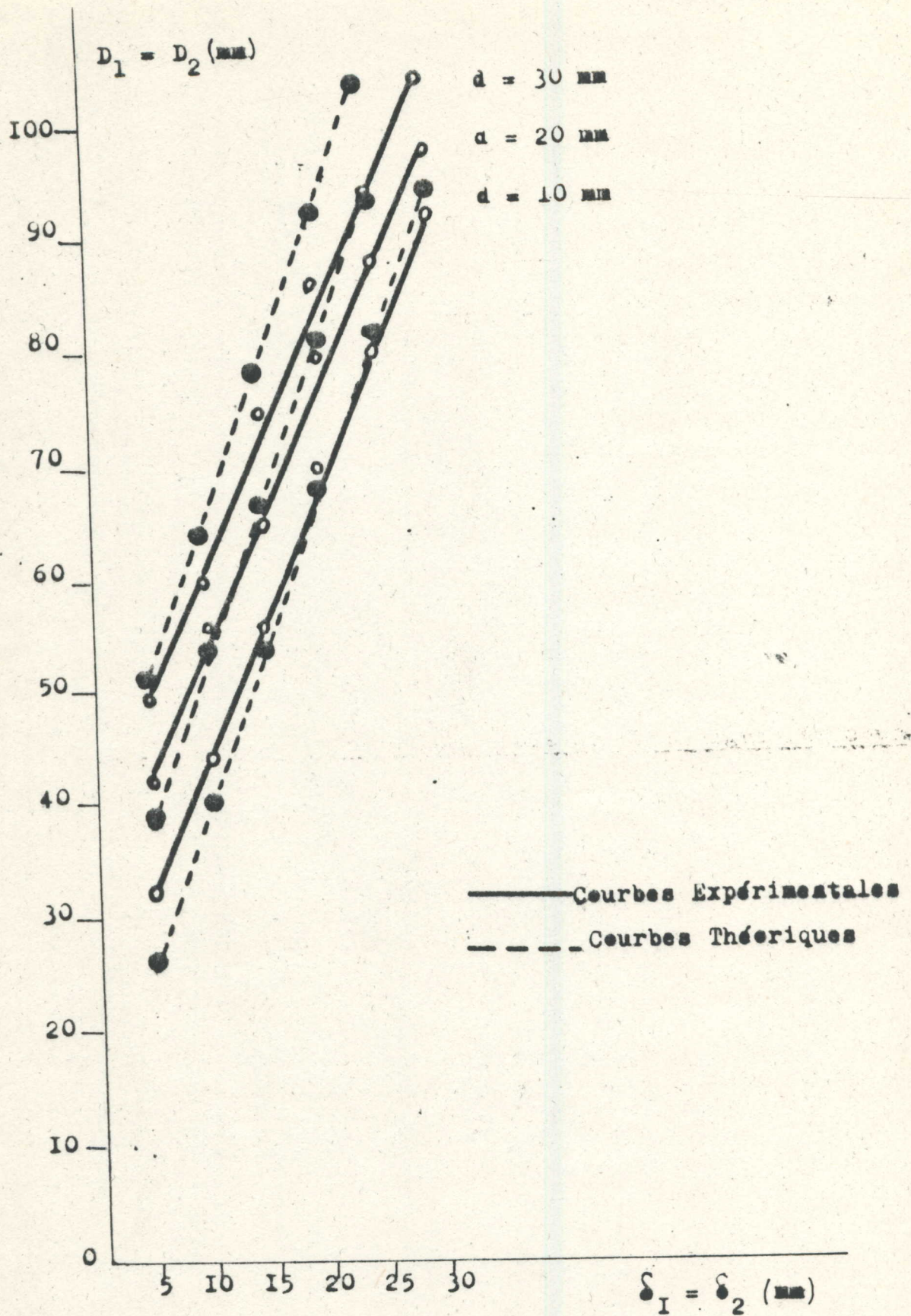


Fig. 4.2: influence des épaisseurs sur les lignes de courant.

Si les épaisseurs des pièces sont différentes  $\delta_1 \neq \delta_2$  , on doit déterminer le diamètre maximum du champ de courant par la relation (14) pour chaque épaisseur, et par conséquent il faut établir une fonction mathématique de la forme  $D_2 = f(D_1)$ .

#### 4.3. RELATION DES LIGNES DE COURANT EXTREMES POUR DIFFERENTES EPAISSEURS

Afin d'établir une relation entre les deux diamètres maximum des lignes de courant dans la pièce mince et la pièce épaisse. Une série d'expérience a été effectuée avec des éprouvettes de différentes épaisseurs.

La méthode de détermination de D est identique aux précédentes expériences, c'est à dire dans les mêmes conditions.

L'expérience est alors effectuée sur des éprouvettes avec différentes épaisseurs  $\delta_1$  et  $\delta_2$  mais le diamètre de l'électrode est constant.

Les résultats moyens de toutes les séries d'expérience sont donnés au tableau 4.3.

TABLEAU 4.3

| RELATION DES EPAISSEURS<br>$\delta_2 / \delta_1$ | ALUMINIUM |         |         |
|--|-----------|---------|---------|
|  | D1 (mm)   | D2 (mm) | D2 / D1 |
| 1 / 1  | 52        | 52      | 1       |
| 2 / 1  | 52        | 80      | 1.53    |
| 3 / 1  | 52        | 102     | 1.96    |
| 4 / 1  | 52        | 128     | 2.46    |
| 5 / 1  | 52        | 148     | 2.84    |

On en déduit alors les courbes de dépendances, entre la relation des épaisseurs et le diamètre des lignes de courant voir (fig. 4.3).

On voit que pour toutes les relations de différentes épaisseurs D1 est toujours constant courbe en traits discontinus voir (fig.4.3).

Après analyse mathématique des résultats on en déduit la relation suivante :



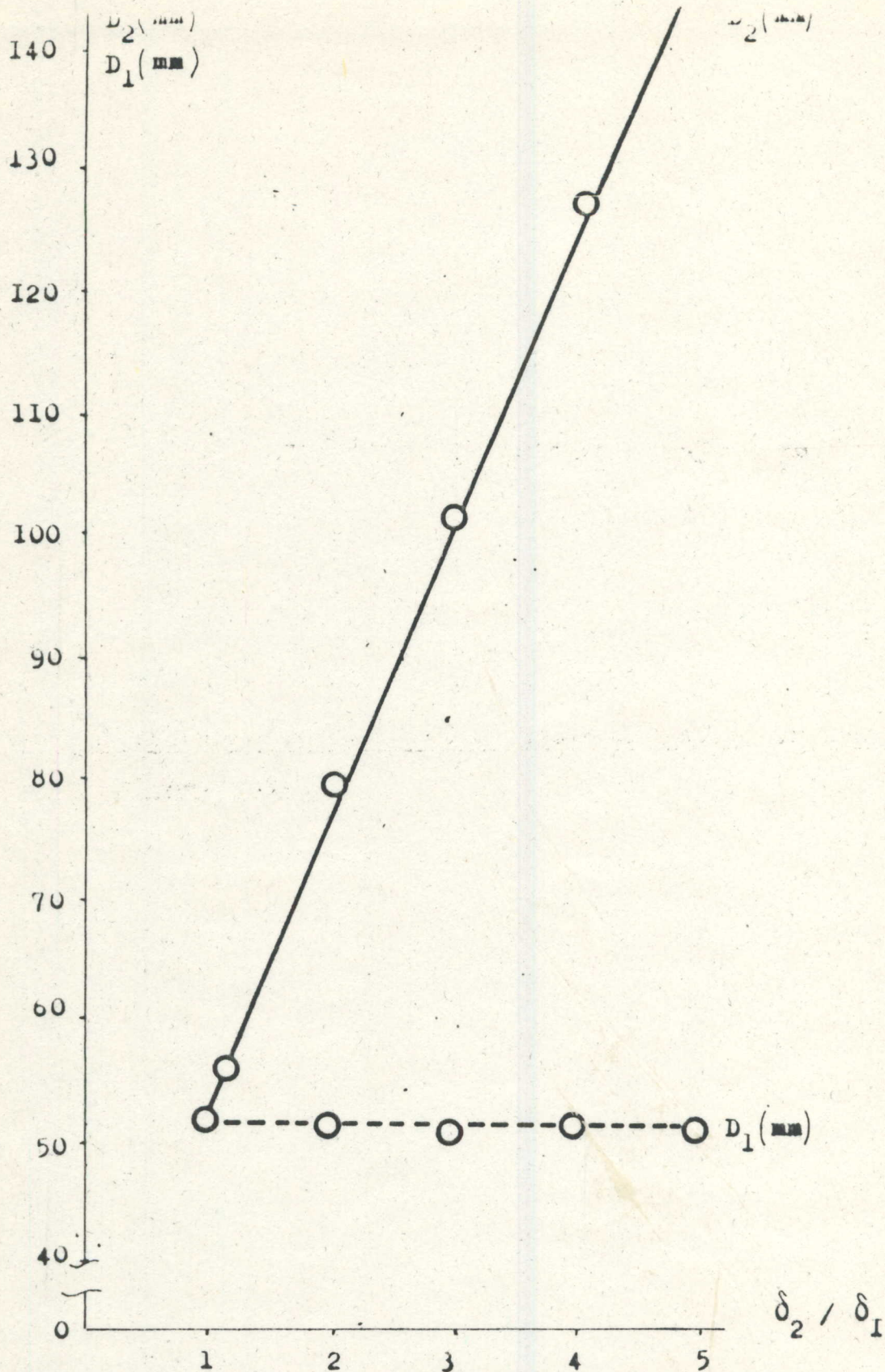


Fig.4.3 : influence de la relation des épaisseurs sur les lignes de courant.

$$D2 = 0,5 D1 [1 + \delta 2 / \delta 1]$$

(17)

où

D2 : est le diamètre maximum des lignes de courant dans la pièce épaisse

D1 : est le diamètre maximum des lignes de courant dans la pièce mince

$\delta 2$  : épaisseur de la pièce épaisse

$\delta 1$  : épaisseur de la pièce mince .

#### 4.4. INFLUENCE DU MATERIAU DES PIECE A SOUDER SUR LE DIAMETRE DES LIGNES DE COURANT.

L'expérience est faite sur deux matériaux différents (éprouvettes en aluminium dont les résultats sont déjà obtenus au paragraphe 4.3 et sur des éprouvettes en acier inoxydable). Donc l'expérience sera axée uniquement sur les éprouvettes en acier inoxydable.

Dans l'expérience on considère les épaisseurs différentes et le diamètre de l'électrode constant.

Les résultats moyens sont donnés sur le tableau 4.4.

TABLEAU 4.4.

| RELATION DES EPAISSEURS<br>$\delta_2 / \delta_1$ | A L U ' M I N I U M |         |         | ACIER INOXYDABLE |         |         |
|--|---------------------|---------|---------|------------------|---------|---------|
|  | D1 (mm)             | D2 (mm) | D2 / D1 | D1 (mm)          | D2 (mm) | D2 / D1 |
| 1 / 1  | 52                  | 52      | 1       | 22               | 22      | 1       |
| 2 / 1  | 52                  | 80      | 1.53    | 24               | 32      | 1.33    |
| 3 / 1  | 52                  | 102     | 1.96    | 23               | 42      | 1.82    |
| 4 / 1  | 52                  | 128     | 2.46    | 24               | 52      | 2.15    |
| 5 / 1  | 52                  | 148     | 2.84    | 22               | 60      | 2.77    |

En prenant les résultats du tableau 4.4 pour l'aluminium et l'acier inoxydable, on trace les courbes de dépendance du diamètre des lignes de courant extrêmes correspondantes aux deux matières voir (fig. 4.4).

On voit que qualitativement les deux courbes sont identiques (par l'augmentation de l'épaisseur augmente le diamètre maximum du volume chauffé par la résistance métallique). Mais quantitativement le résultat est différent, cela est dû à l'influence de la résistivité électrique des matériaux.

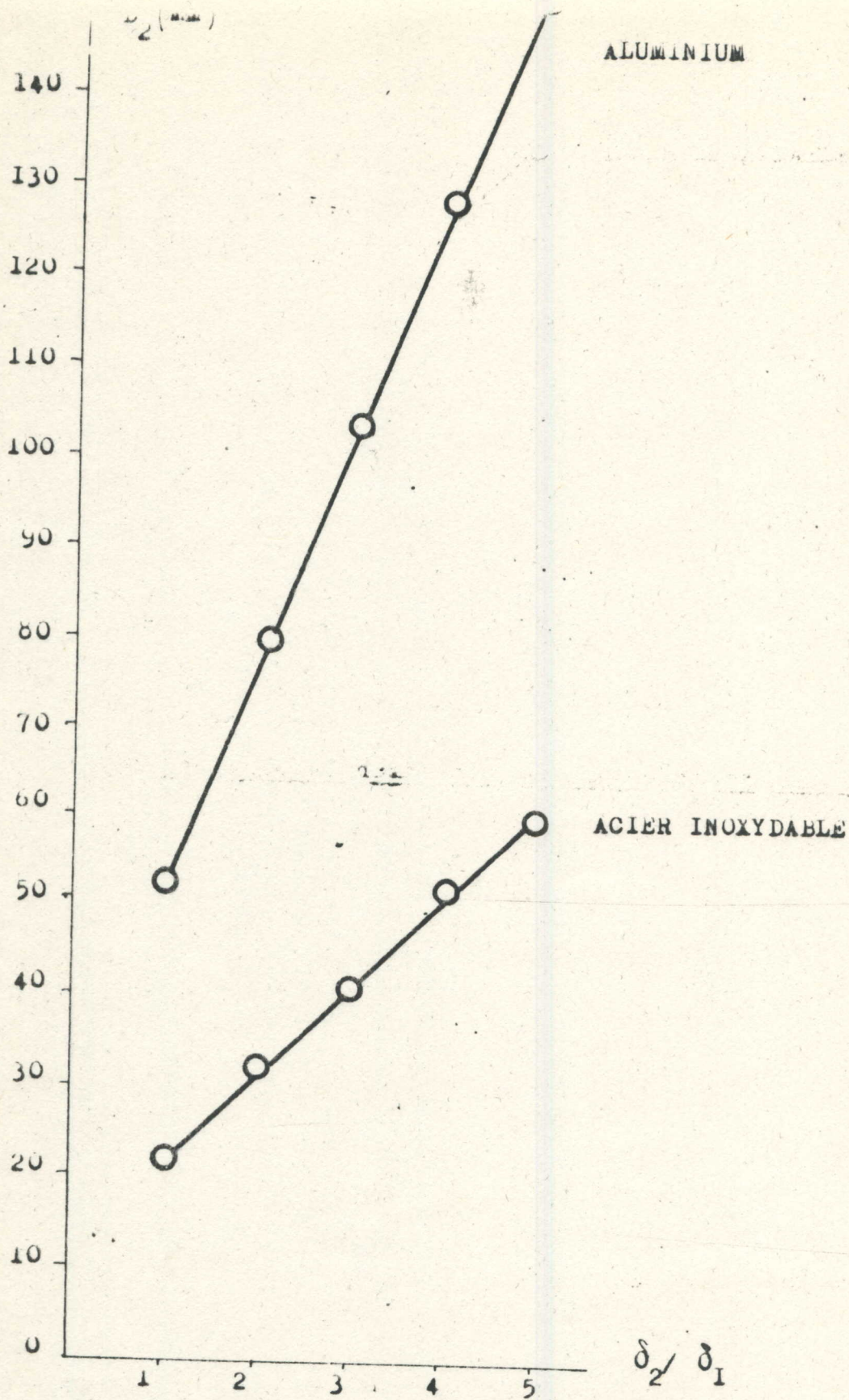


Fig. 4.4 : Dépendance du diamètre des lignes de courant et les matéri

#### 4.5. INFLUENCE DE LA RELATION DES EPAISSEURS SUR LA CHALEUR DEGAGEE DANS LA PIECE EPAISSE.

Dans le soudage par résistance d'un conducteur unique voir (fig; 3.3a) et le soudage par point voir (fig 3.3b), et après analyse nous en déduisons que d'après l'expression (1)  $Q = I^2 R_T t$  l'augmentation de la longueur l du conducteur entraîne une augmentation de la résistance R.

Mais pour le soudage par point avec différente épaisseur nous avons trouvé que la résistance métallique peut-être calculée par l'expression:

$$R = \frac{4\mu\delta}{\pi dD}$$

Dans ce cas, si on utilise la méthode pour le choix de l'électrode [5],  $d = 5 \sqrt{J\delta}$ , et en remplaçant d par  $5\sqrt{J\delta}$  dans l'expression R,

on a :

$$R = \frac{4 \mu \sqrt{J\delta}}{5 \pi D}$$

Donc, il est visible que dans cette expression avec l'augmentation de l'épaisseur  $\delta$ , la relation  $\sqrt{J\delta}/D$  diminue, et par suite la résistance métallique  $R_m$  diminue. Ceci explique le phénomène du retour du noyau vers le contact des pièces.

On peut en déduire que pour certaines relations (1/1, 1/2, 1/3,...) la résistance de contact joue un grand rôle pour la chaleur. Pour les relations (1/6.....1/10) la résistance métallique influe sur la position du noyau fondu. A partir de la relation (1/12 et plus), l'influence de la résistance métallique diminue et un rôle important est joué par la résistance de contact.

Il faut remarquer que d'après le bilan thermique, la chaleur absorbée joue toujours un rôle important et varie avec la variation de la relation des épaisseurs. Néanmoins, notre supposition est basée sur le résultat total.

A la suite des expériences effectuées et des relations mathématiques établies, on peut déduire les conclusions suivantes:

Les paramètres géométriques influent sur la chaleur dégagée dans les pièces. Et sachant que la chaleur dégagée joue un grand rôle dans le bilan thermique, nous avons étudié l'expression de la chaleur dégagée  $Q = R_T I^2 t$  et on considère avec attention la résistance totale  $R_T$  pour le soudage par point. Cette résistance est égale à  $R_c + R_m$  ou  $R_m$  est la résistance métallique et  $R_c$  est la résistance de contact. On voit que la résistance métallique influe sur la résistance totale. Pour cela on a établi une relation pour déterminer  $R_m$ , la résistance des pièces à souder.

$R_m$  est inversement proportionnelle au diamètre des lignes de courant extrêmes, c'est à dire par l'augmentation de l'épaisseur d'une pièce, la résistance métallique diminue et par suite diminue la chaleur dégagée dans la pièce épaisse.

**CINQUIEME CHAPITRE**

**RESULTATS OBTENUS ET RECOMMANDATIONS PRATIQUES**

## 05.1. RESULTATS OBTENUS

Avec les analyses bibliographiques, les expériences pratiques et les résultats métallographiques et théoriques on déduit les résultats suivants:

- 1 - la position du noyau fondu dépend de la relation des épaisseurs.
- 2 - sur la position du point de soudure influent deux phénomènes en fonction de la relation des épaisseurs :
  - la résistance de contact
  - la résistance métallique
- 3 - la résistance métallique est inversement proportionnelle à l'augmentation de l'épaisseur.
- 4 - la résistance métallique dans une pièce est déterminée par :

$$R_m = \frac{4\mu\delta}{\pi d D}$$

- 5 - détermination pratique de la direction des lignes de courant dans les pièces à souder.
- 6 - détermination analytique du diamètre maximum du champ de courant par :

$$D = 1,25 d + 2,8 \delta.$$



## 5.2. RECOMMANDATIONS PRATIQUES

Après analyse des résultats obtenus pour obtenir le noyau normal, on peut donner les recommandations suivantes:

On doit arriver à une condition de soudage de pièces de différentes épaisseurs à une condition de pièces de même épaisseur par les solutions suivantes:

### 1ère solution

augmentation du diamètre de l'électrode qui est en contact avec la pièce épaisse. Ceci fait augmenter le diamètre du champ de courant dans la pièce épaisse et par suite fait diminuer la résistance métallique.

### 2ème solution

interposer une pièce entre l'électrode et la pièce mince.

### 3ème solution

déplacement de l'électrode qui est en contact avec la pièce épaisse, ceci permet d'augmenter artificiellement le diamètre extrême des lignes de courant dans la pièce épaisse et diminuer la résistance métallique.

Nous avons établi cette recommandation à la suite d'une expérience pratique effectuée sur le modèle plat expérimentale. Nous avons considéré un modèle plat avec les épaisseurs suivantes : voir ( fig. 5.1 )

$$\delta_2 = 50 \text{ mm} , \delta_1 = 10 \text{ mm}$$

Le diamètre de l'électrode est égale à : 20 mm

Nous avons ensuite déplacé l'électrode qui se trouve en contact avec la pièce épaisse.

Nous avons remarqué en mesurant les tensions équipotentiellles, que le champ de courant avait augmenté comparativement au champ de courant du modèle initiale.

Nous avons donc déduit que :

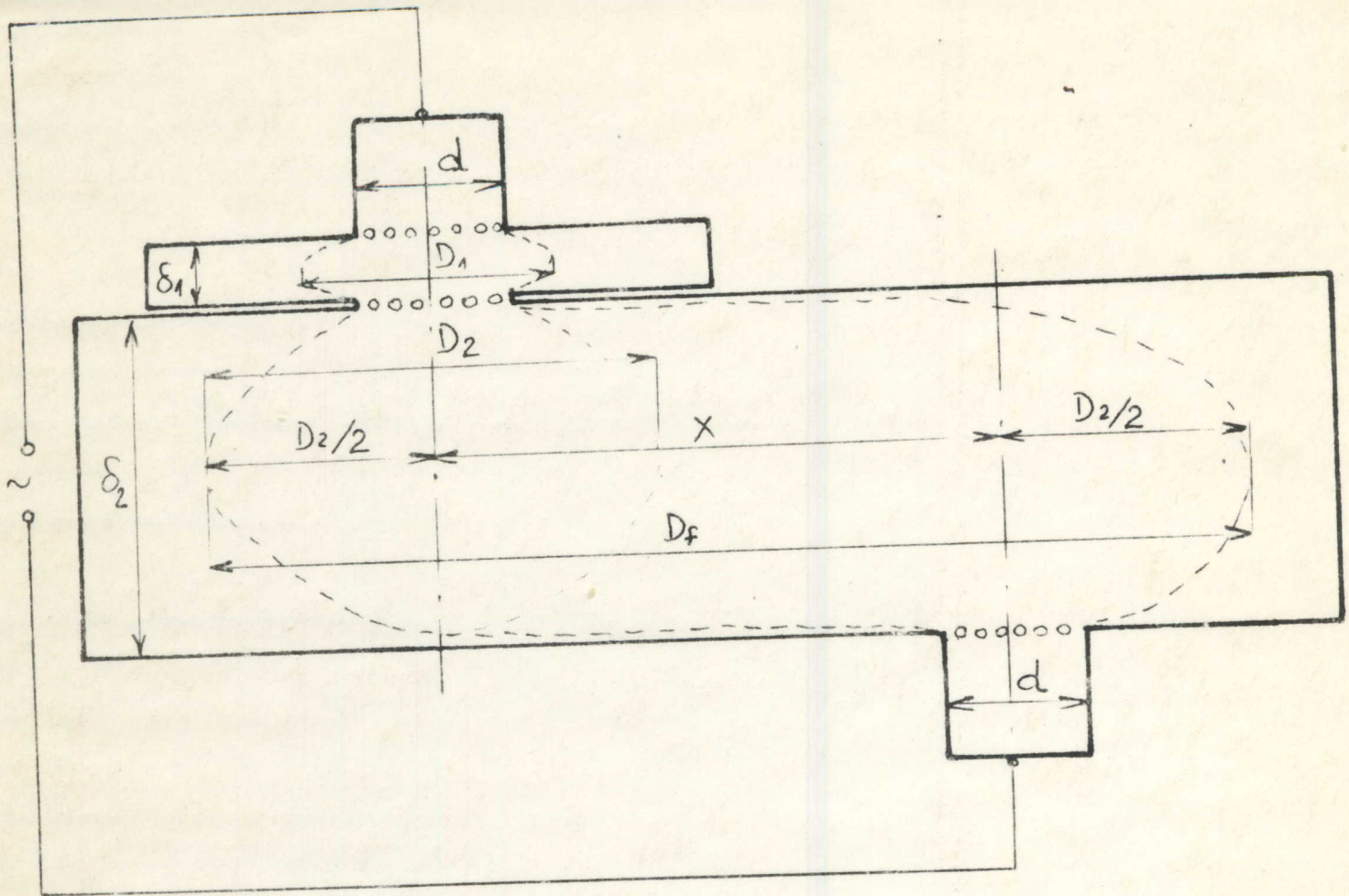


Fig. 5.1: Déplacement de l'électrode par rapport à l'axe initial

- $\delta_1$  et  $\delta_2$  : épaisseur des pièces
- $d$  : diamètre de l'électrode
- $D_1$  : diamètre maximum du champ de courant dans  $\delta_1$
- $D_2$  : diamètre maximum du champ de courant dans  $\delta_2$  avant le déplacement de l'électrode inférieure
- $D_f$  : diamètre maximum du champ de courant après déplacement de l'électrode inférieure
- $X$  : Valeur égale au déplacement de l'électrode, fonction de  $\delta_1$  et  $\delta_2$

le déplacement de l'électrode qui est en contact avec la pièce épaisse permet d'augmenter le diamètre extrême ( D ) des lignes de courant , et par conséquent diminuer la résistance métallique  $R_m$  , et assurer une position symétrique du noyau fondu par rapport au contact des pièces.

Les résultats de l'expérience montrent que le diamètre artificiel (  $D_r$  ) est égal à:

$$D_r = \frac{D_{12}}{2} + \frac{D_{22}}{2} + X$$

d'où

$$X = D_r - D_{22}$$

---

**CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

Cette présente recherche a porté sur les assemblages par recouvrement en liaison rigide permanente en soudage électrique par résistance.

- 1 - On constate que pendant le soudage des pièces de différentes épaisseurs, le noyau fondu présente une position différente en fonction de la relation des épaisseurs de la manière suivante :
  - A - Pour les rapports 1/1 à 1/10, le noyau fondu se déplace vers le centre géométrique des pièces.
  - B - Pour les rapports 1/12 et plus, le noyau fondu revient vers le contact des pièces à souder
- 2 - En analysant le bilan thermique pour le soudage par résistance de pièces de différentes épaisseurs, on constate qu'un facteur essentiel influe sur la position du noyau: c'est la variation de la chaleur dégagée dans la pièce épaisse.
- 3 - On a déterminé que la chaleur dégagée dans le volume considéré se calcul par le diamètre des lignes de courant extrêmes .

Le diamètre des lignes de courant extrêmes est inversement proportionnel à la résistance métallique.
- 4 - L'augmentation de l'épaisseur fait diminuer la résistance métallique de la pièce épaisse.
- 5 - On a déterminé une méthode pour l'obtention du diamètre du champ de courant.
- 6 - On a déterminé les facteurs qui influent sur le diamètre des lignes de courant extrêmes par :
  - A - Variation de l'épaisseur des pièces
  - B - Variation du diamètre de l'électrode.L'augmentation de ces deux facteurs fait augmenter le diamètre des lignes de courant.

7 - Par les résultats obtenus, on propose les recommandations suivantes pour obtenir un noyau fondu normal.

A - Augmentation du diamètre de l'électrode qui est en contact avec la pièce épaisse.

B - Utilisation d'une pièce intermédiaire entre l'électrode et la pièce mince.

C - Déplacement par rapport à l'axe initiale de l'électrode qui est en contact avec la pièce épaisse.

## BIBLIOGRAPHIE

- 1 **ARKADIEV V.K.**  
Processus électromagnétique des métaux ONTU  
Edit. Sovietique 1935
- 2 **BACHENKO V., EVTIFEVA P., ZAYTCHIK L., KOTCHERVINE**  
Soudage dans la construction d'appareils de mesure  
et radioelectronique Edit. Znanie Leningrad 1967.
- 3 **BALKOVEST D.**  
Soudage par point et à la molette pour les aciers  
spéciaux et ses alliages Edit. OBORONGUISS 1957
- 4 **BONDARENKO E., DOROFEV B., STOUKALKINE A.**  
Résistance électrique Edit. Energia Moscou 1967
- 5 **ROLANT CAZES**  
Soudage par résistance  
Edit. Techniques de l'ingénieur organes de machines 1986
- 6 **DEMIDOVITCH B., MAKON I.**  
Eléments de calcul numérique Edit. Mir Moscou 1979
- 7 **GUELMAN A.**  
Technologie et machines de soudage par résistance  
Edit. Machguiss Moscou 1960
- 8 **GUELMAN**  
Fondamentale du soudage par pression  
Edit. Machinostroenie Moscou 1970
- 9 **HEUREUX L., BELOTTE**  
Le soudage par résistance  
Edit. Dunod Paris 1965

- 10 KABANOV N., SLEPAK E.  
Soudage bout à bout  
Edit. Machprom Moscou 1962
- 11 KHOLM R.  
Contacts électriques  
Edit. Litterature étrangère Moscou 1961
- 12 KOTCHERGUINE K.  
Soudage par pression  
Edit. Machinostroenien Leningrad 1972
- 13 KOTCHERGUINE K.  
Fondamentale du soudage par résistance  
Edit. Machguiss Moscou 1955
- 14 KOTCHERGUINE K.  
Questions de théorie du soudage par résistance  
Machguiss Moscou 1950
- 15 KRASOULINE U., NAZAROV G.  
Microsoudage par pression  
Edit. Métallurgie Moscou 1976
- 16 ORLOV B.D.  
Technologie et machines de soudage par résistance électrique  
Edit. Machinostroenien Moscou 1975
- 17 ORLOV B.D.  
Control du soudage par point et à la molette  
Edit. construction machine Moscou 1973.
- 18 POLOUKHINE P.  
Technologie des métaux  
Edit. Mir Moscou 1967.



- 19 REOUTT E., SAKSONOV I.  
Contacts électriques  
Edit. oboronguiss Moscou 1971
- 20 RYBAKOV V.  
Le soudage et le coupage des métaux  
Edit. Mir Moscou 1980
- 21 SEFERAN D.  
Metallurgie de la soudure  
Edit. DUNOD Paris 1965
- 22 SLIOZBERG S., TCHOULOCHNIKOV P.  
Les électrodes pour le soudage électrique par résistance.  
Edit. Machguiss Leningrad 1972
- 23 A. SOULAMANIDZE  
Procédé de soudage par courant condensateur des pièces  
de NICKEL avec épaisseurs 0,05 - 0,3 mm Thèse de Doctorat  
Université technique de Moscou BAUMANE 1974
- 24 A. SOULAMANIDZE  
Recherche des mécanismes influant sur la position du noyau  
liquide dans le soudage électrique par résistance Rapport  
No 7 Institut polytechnique Tblissi 1976
- 25 A. SOULAMANIDZE  
Problème de soudage par résistance des pièces de différentes  
épaisseurs En publication
- 26 THOULOCHNIKOV P.  
Soudage par points et à la molette des aciers et les alliages  
Edit. Machinostroinie Moscou 1968.