



*République Algérienne Démocratique et Populaire*



*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*

*Université de Batna*

*Faculté des Sciences de l'Ingénieur*

Mémoire Préparé au

Département d'Electrotechnique

Présenté par

**BOUHARKAT Khaled**

Pour obtenir le titre de

**Magister**

Spécialité : Matériaux électriques

**UTILISATION DES ALLIAGES MONOTECTIQUES DANS  
L'ELABORATION DES CONTACTS ELECTRIQUES**

Soutenu en Juillet 2007

*Devant le Jury composé de :*

**El djemai BELBACHA**  
**Malek BOUHARKAT**  
**Fouzia ADJADJ**  
**Azzeddine BENOUDJIT**  
**Kamel SRAIRI**

*Professeur*  
*Maître de Conférences*  
*Maître de Conférences*  
*Professeur*  
*Professeur*

*Univ. Batna*  
*Univ. Batna*  
*Univ. Batna*  
*Univ. Batna*  
*Univ. Biskra*

**Président**  
**Rapporteur**  
**Co-Rapporteur**  
**Examineur**  
**Examineur**

## **Remerciements**

Je tiens tout d'abord à remercier M. Malek BOUHARKAT, Maître de Conférences au Département de Génie Electrique à l'université de Batna, et M<sup>me</sup> Fouzia ADJADJ, Maître de Conférences au Département de Physique à l'université de Batna, d'avoir proposé et dirigé ce travail, et également pour leur dévouement et leur disponibilité. Ils m'ont toujours soutenu partageant avec moi leur grande expérience scientifique et prodiguant de précieux conseils. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

J'adresse également mes remerciements à M. El djemai BELBACHA, Professeur au Département de Physique à l'université de Batna, d'avoir accepté de présider ce jury. Sa présence m'honore amplement.

Mes remerciements les plus sincères s'adressent à M. Azzedine BENOUDJIT, Professeur au Département de Génie électrique à l'université de Batna, qui a accepté de juger ce mémoire. Ses compétences élèvent considérablement la valeur de ce travail. Je lui suis très reconnaissant aussi d'avoir beaucoup contribué à ma formation. Je le remercie aussi d'avoir mis à notre disposition les pastilles de contact du disjoncteur qui a servi à réaliser l'étude expérimentale.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à M. Kamel SRAIRI, Professeur au Département d'Electrotechnique à l'université de Biskra, pour faire partie de ce jury malgré ses nombreuses obligations et accepter de faire le déplacement.

Je ne saurais oublier M. Zakaria Boumerzoug, Professeur au Département de Métallurgie à l'université de Biskra, qui a contribué à la réalisation expérimentale de ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de mon profond respect.

J'associe à ces remerciements tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire par leur aide et surtout par leur bonne humeur.

En fin, je souhaite que tous mes proches trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance pour leur soutien moral et matériel.



# **SOMMAIRE**

<b>Introduction générale</b> .....	1
------------------------------------	---

## **CHAPITRE I : Contacts Electriques**

I.1. Introduction .....	5
I.2. Etablissement d'un contact électrique .....	5
I.3. Fonctions fondamentales de l'appareillage électrique .....	7
I.4. Types d'appareillage électriques à contacts électriques .....	8
I.4.1. Disjoncteurs .....	8
I.4.2. Structure d'un disjoncteur MCCB .....	9
I.4.2.1. Boitier .....	10
I.4.2.2. Ampoule de coupure .....	10
I.4.2.2.1. Ligne de pole .....	11
I.4.2.2.2. Partie non conductrice .....	11
I.4.3. Contacteurs électrique .....	12
I.4.3.1. Structure des contacteurs électriques .....	13
I.5. Différents types d'essai .....	14
I.5.1. Normes internationale en électrotechnique .....	14
I.5.2. Essais normalisés pour les disjoncteurs IEC .....	15
I.5.3. Essais normalisés pour les contacteurs IEC .....	15
I.5.4. Essais de laboratoires pour les contacteurs .....	16
I.6. Conclusion .....	17

## **CHAPITRE II : Présentation et Propriétés des Pastilles de Contact Industrielles**

II.1. Introduction .....	19
II.2. Propriétés générales des matériaux de contact .....	19
II.2.1. Changements d'état .....	20
II.2.2. Propriétés électriques .....	20
II.2.2.1. Influence des conductivités sur le choix des matériaux de contact .....	21
II.2.2.2. Conductivités électrique des métaux purs .....	21
II.2.2.3. Conductivités électrique dans les alliages ou pseudo-alliages .....	23
II.2.3. Conductivités thermique .....	23
II.2.4. Capacité calorifique .....	25
II.2.5. Inertie chimique .....	26

II. 2.6. Tenue mécanique .....	26
II.3. Différents types de matériaux de contacts .....	27
II.3.1. Matériaux à base de cuivre.....	27
II.3.2. Matériaux à base d'argent .....	28
II.3.2.1. Argent dopé.....	28
II.3.2.2. Alliages .....	28
II.3.2.3.Pseudo-alliages.....	28
II.3.2.4. Composites à Matrices Métallique (CMM) .....	29
II.3.2.4.1.Argent tungstène .....	30
II.3.2.4.2. Argent-Nickel Ag-Ni .....	31
II.3.2.4.3. Le ternaire Ag-C-Ni .....	34
II.3.2.4.4. Argent-Fer Ag- Fe.....	34
II.4. Conclusion.....	36

## **CHAPITRE III : Etude Phénoménologique des Contacts Electriques**

### **CHAPITRE III-1 : Procédés de fabrication des contacts électriques.**

#### **Phénomènes générés par l'apparition de l'arc électrique**

III-1.1. Introduction .....	39
III-1.2. Elaboration des poudres .....	40
III-1.2.1. Méthodes d'obtention de poudre d'alliage.....	40
III-1.2.1.1. A partir de l'alliage solide .....	40
III-1.2.1.2. A partir de l'alliage liquide.....	41
III-1.3. Conception des pastilles de contacts .....	42
III-1.3.1. Le pressage .....	42
III-1.3.1.1. La compression mécanique .....	42
III-1.3.1.2 La compression isostatique.....	42
III-1.3.1.3. La compression uniaxiale hydraulique .....	43
III-1.3.2. Frittage.....	44
III-1.4. Comportement des matériaux de contact durant un arc électrique.....	45
III-1.5. Comment s'amorce ou apparaît un arc électrique ? .....	46
III-1.5.1. Transition continue.....	48
III-1.5.2. Contact.....	48

III-1.5.3. Surtension .....	48
III-1.6. Bilan énergétique.....	48
III-1.7.Changements de phase dus à l'arc sur les contacts .....	49
III-1.7.1. Vaporisation .....	49
III-1.7.2 Fusion .....	49
III-1.8. Contraintes thermomécaniques dans les contacts.....	50

## **CHAPITRE III-2 : Diagrammes de Phases des Alliages Monotectiques Utilisés**

III-2.1. Introduction .....	52
III-2.2. Définition des alliages monotectiques.....	52
III-2.3. La transformation monotectique.....	52
III-2.4. Identification des dangers causés par les produits utilisés .....	54
III-2.5. Propriétés physiques et chimiques des produits étudiés.....	55
III-2.6. Diagrammes de phases binaires.....	55
III-2.6.1. Diagramme de phases Ag-W .....	55
III-2.6.2. Diagramme de phases Ag-Fe.....	55
III-2.6.3. Diagramme de phases Ag-Ni.....	56
III-2.7. Diagramme de phases ternaire.....	57

## **CHAPITRE III-3 : Partie Expérimentale**

III-3.1. Introduction .....	59
III-3.2. Présentation du disjoncteur utilisé.....	59
III-3.3. Principe de l'essai Vickers .....	59
III-3.4. Précautions opératoires.....	60
III-3.5. Déroulement de l'essai .....	60
III-3.6. Résultats et discussion .....	62

## **CHAPITRE IV : Equations de la modélisation de l'arc électrique**

IV.1. Introduction .....	65
IV. 2. Modèle de l'arc (cylindrique) .....	66
IV. 3. Notion de striction .....	66

IV. 3. 1. Forces de soudure en présence d'arc.....	67
IV. 3 .2 Comportement des contacts en surcharge .....	67
IV. 4. Hydrodynamique .....	69
IV. 4. 1. Equations de l'hydrodynamique pour un écoulement laminaire .....	69
IV. 4. 2 Ecoulement entre deux pastilles de forme carrée .....	73
IV. 5. Modélisation d'un arc libre.....	74
IV. 5. 1 Modèle analytique .....	75
IV. 6. Equation de la chaleur .....	77
IV. 6. 1 Hypotheses des modèles thermiques .....	80
IV. 7. Modèle enthalpique .....	80
IV. 8 Conclusion .....	81
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>82</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>85</b>

# **Introduction Générale**

Les contacts électriques sont abondamment utilisés dans de nombreux domaines de l'électricité. Leur rôle est de mettre en contact deux parties conductrices afin de faire passer un courant électrique et fermant un circuit. Lorsque le courant qui les traverse est faible, on dit que l'on a affaire à des contacts bas-niveau (CBN). Lorsque ce courant est élevé et qu'il peut produire un échauffement, on dit qu'il s'agit de contacts de puissance (CP). Dans ce dernier cas, un arc électrique peut apparaître, à la fermeture, mais surtout, à l'ouverture du contact.

Du fait qu'ils peuvent prendre des configurations extrêmement variées, il est difficile, voire impossible, d'établir une classification indiscutable des contacts électriques [1]. Il existe néanmoins des grandes familles de ces contacts ou nous citons des exemples connus du plus grand nombre (contacts vissés, contacts sertis, contacts à insertion, contacts à fermeture par pression).

Ceci étant, quels que soient les types de classification et de contact, les phénomènes qui permettent ou qui gênent le passage du courant d'un membre de contact à l'autre, sont toujours les mêmes.

Les contacts des contacteurs et spécialement ceux des disjoncteurs sont élaborés à partir des matériaux à matrice d'argent. La recherche des meilleurs matériaux des contacts passe obligatoirement par de bonnes connaissances des propriétés des alliages monotectiques et les diagrammes d'équilibre de phases, afin de répondre aux normes et l'adéquation de l'appareillages électriques recommandées par la régie de l'électrotechnique et le rôle à jouer.

Les contacts électriques sont destinés à faire relier des parties électriques, en vue :

- D'assurer la continuité du circuit électrique sans perte excessive d'énergie ;
- De pouvoir à tout moment fermer le circuit sans causer la soudure des contacts ;
- De réaliser un isolement apparent au moyen d'un diélectrique entre les contacts sans le claquage ;
- De pouvoir à tout moment couper le courant de manière sûre, rapide et sans générer de surtension dommageable pour les appareils électriques.

Le travail que nous présentons dans ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous faisons la description des contacts électriques, ainsi que leurs fonctions fondamentales dans les contacteurs et les disjoncteurs.

Dans le deuxième chapitre, nous accordons une importance à la présentation des alliages à caractère monotectiques utilisés dans la fabrication des contacts électriques pour les disjoncteurs et contacteurs. Certaines propriétés de ces matériaux métalliques ont été exposées.

Le troisième chapitre se présente sous trois parties :

La première relate les différents procédés utilisés pour l'élaboration des contacts électriques.

La deuxième porte sur l'étude de la transformation monotectique dans les alliages binaires et ternaires utilisés dans les contacts électriques. Les changements de phases en fonction de la température seront également évoqués grâce à l'utilisation des diagrammes d'équilibre. Enfin, un travail expérimental (étude de la dureté) sur un disjoncteur est entrepris dans la troisième partie de ce chapitre.

Nous clôturons ce travail par un quatrième chapitre, nous avons essayé d'étaler l'ensemble des équations décrivant le phénomène de l'arc électrique sur plusieurs facettes qui englobent plusieurs disciplines telles que : la mécanique des fluides, l'hydrodynamique, l'écoulement du fluide et la physique thermique.

Une conclusion générale est faite et à travers laquelle des interprétations sont données, ainsi que des recommandations pour la continuité du travail de ce mémoire.

**CHAPITRE I**  
**Contacts Electriques**

## I.1. Introduction

Les disjoncteurs et les contacteurs contiennent des contacts électriques. Ils sont conçus d'une manière à assurer physiquement l'ouverture et la fermeture d'un circuit électrique. A chaque opération, un arc électrique apparaît entre les surfaces des contacts et endommage les matériaux de ces derniers [1-5].

Ces matériaux subissent en service des sollicitations importantes, avec des densités de puissance supérieures à  $10^{12}$  W/m<sup>2</sup>, ainsi, que des températures transitoires généralement supérieures à 2500 K. Les contacts sont le siège de phénomènes mécaniques, hydrodynamiques, électromagnétiques violents et complexes, de cela ils doivent de plus être en mesure de supporter plusieurs millions de cycles sans pour autant se souder dans les conditions de forts courants (de 30 à 38 000 A). Il résulte de ces sollicitations de nombreux types d'endommagements : thermique, propagation de fissures de fatigue, faïençage, ségrégation microscopique et macroscopique, formation de croûtes de matériau fondu et solidifié [6-8].

La miniaturisation des appareils, l'augmentation du nombre de contacts électriques dans un appareil, la recherche de matériaux de plus en plus adéquats pour des coûts de plus en plus faible, font des matériaux de contacts électriques un problème d'actualité [7-8].

## I.2. Etablissement d'un contact électrique

Le contact électrique est réalisé en pressant deux électrodes conductrices l'une contre l'autre. Si l'on reste dans un domaine de fréquences relativement basses, un contact électrique peut être représenté par une résistance de valeur  $R_c$  que l'on nomme "résistance de contact". Mais dans le cas particuliers, on cherche à avoir une résistance suffisamment faible, avec une stabilité dans le temps, de façon à ne être dans le cas du "faux contact".

Malheureusement, les surfaces des métaux conducteurs et "bon marché" comme le cuivre et l'aluminium sont constitués de fines couches mauvaises conductrices, voire isolantes, comme l'alumine sur l'aluminium.

La formation de ces couches provient de réactions chimiques du métal avec des constituants de l'atmosphère et ces constituants pouvant être gazeux "naturels" ( $O_2$ ) et "polluants" ( $NO_x$ ,  $SO_2$ ,  $H_2S$  et  $Cl_2$ ) ou liquides (brouillard salin, proximité de la mer) [4].

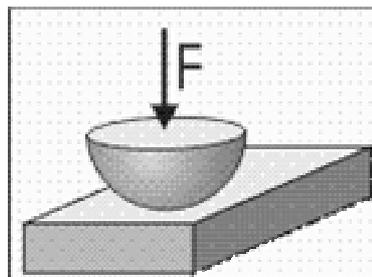
Ainsi, lorsqu'on presse deux électrodes l'une contre l'autre, les couches mauvaises conductrices de ces métaux sont présentes à leurs surfaces et diminuent la surface de contact. Pour lutter contre ce phénomène et permettre une grande participation surfacique, on peut agir sur un ensemble de paramètres principaux :

- le revêtement terminal des électrodes (tel que l'argent etc.) ;
- la force de contact  $F$  ;
- les courbures des surfaces des électrodes (géométrie) ;
- le frottement d'une électrode par rapport à l'autre ;

La rugosité des surfaces des électrodes constitue un cinquième paramètre difficilement contrôlable en pratique. Elle joue cependant un rôle important dans le passage du courant [8-10].

Dans un contact sphère plan comme le montre la figure I.1, la forme de la sphère concentre les contraintes à l'intérieur d'un disque, appelé "aire de contact apparente". Cependant, du fait de la rugosité, la sphère ne touche le plan qu'en un certain nombre d'îlots. Ces îlots, où la contrainte d'interface n'est pas nulle, constituent "l'aire de contact mécanique".

Enfin, la couche superficielle mauvaise conductrice n'est percée qu'en un certain nombre de zones constituant "l'aire de contact électrique". Il n'y a qu'au niveau de ces zones que la densité de courant électrique n'est pas nulle [3].



**Figure I.1** : Contact d'une sphère avec un plan

En réalité, dans le cas d'un contact cuivre/cuivre, par exemple, l'aire de contact électrique peut ne représenter qu'une faible fraction (quelques %) de l'aire de contact apparente. On observe alors une résistance de contact trop élevée. Pour perfectionner le contact et abaisser sa résistance, le déplacer, sous contrainte, la sphère sur le plan. Ce qu'on appelle le "rodage" en pratique, ainsi, on élimine les aspérités des deux électrodes et une partie de leurs couches superficielles mauvaises conductrices (figure I. 2).

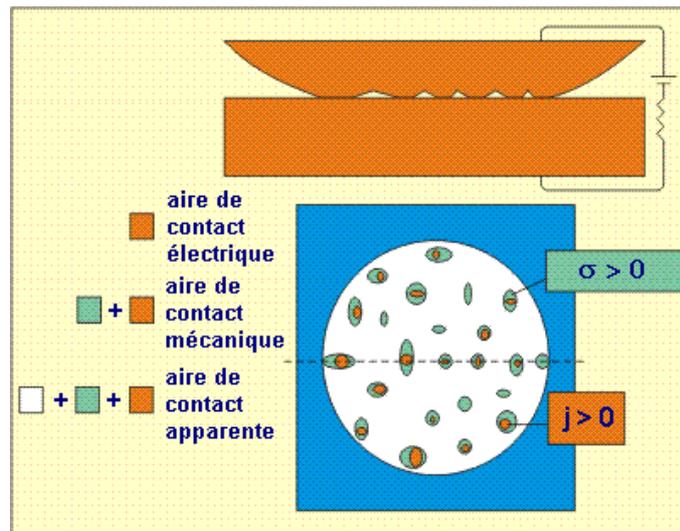


Figure I. 2 : Aires de contact entre deux plans

D'un autre côté, plus la force de contact est importante, plus la résistance de contact est faible, et d'autre part, l'utilisation de revêtements des électrodes en métaux nobles, citant par exemple l'argent, et surtout l'or, permet de réduire considérablement l'influence néfaste de la couche superficielle mauvaise conductrice [3].

### I.3. Fonctions fondamentales de l'appareillage électrique

L'appareillage électrique de puissance désigne l'ensemble des systèmes destinés à être reliés à un circuit électrique, en vue :

- d'assurer la continuité du circuit électrique sans perte excessive d'énergie ;
- de permettre d'isoler physiquement l'amont de l'aval d'un appareil au moyen d'un isolant entre les deux bornes du circuit ;

- de pouvoir à tout instant interrompre le courant de manière rapide, sûre et sans générer de surtension dommageable pour les appareils électriques ;
- de pouvoir à tout instant fermer le circuit sans souder les contacts [7, 8].

#### **I.4. Types d'appareillage électriques à contacts électriques**

L'appareillage électrique regroupe plusieurs types de produits tels que : les relais, les disjoncteurs, les contacteurs, les transformateurs, etc.

Il est cependant possible de distinguer deux grandes catégories :

- a) Les produits dont le but est de rendre l'énergie électrique disponible en toute sécurité, depuis la production de l'énergie jusqu'au consommateur ;
- b) Ceux dont le but est de commander, contrôler et protéger les machines et les installations des procédés industriels.

Deux types d'appareils d'une manière générale : les disjoncteurs et les contacteurs appartiennent respectivement à ces deux catégories et présentent un certain nombre de points communs (leurs contacts, etc.) [5].

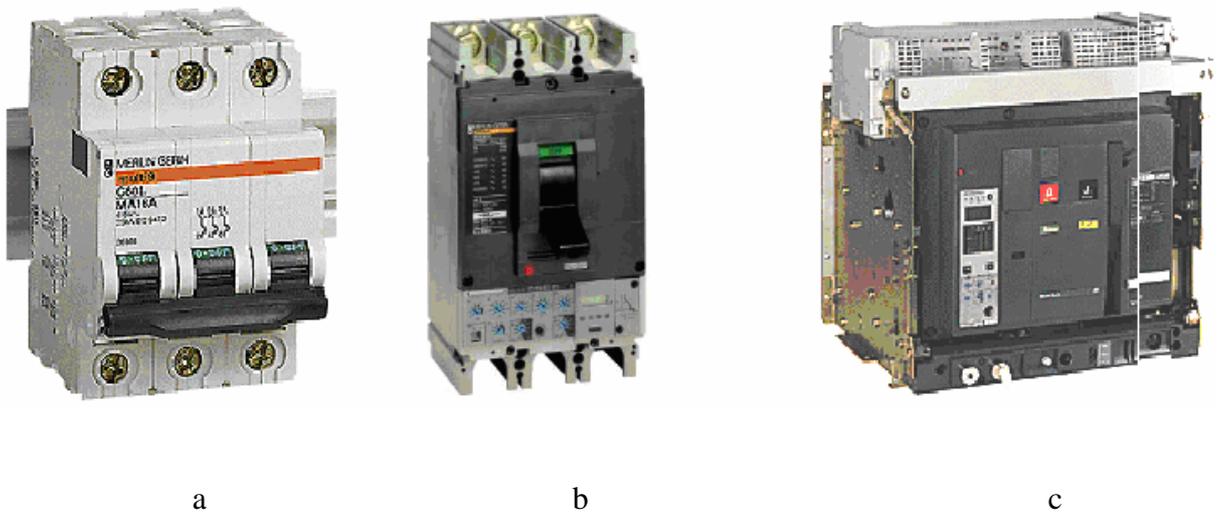
##### **I.4.1. Disjoncteurs**

La sécurité électrique relève de la protection des installations et des personnes de risques d'origine électrique. Les disjoncteurs sont des appareils de sécurité électrique : leur rôle consiste à éliminer les défauts d'alimentation électrique, les défauts d'isolement et protéger les biens et les personnes de tout risque.

Parmi les types de disjoncteurs nous distinguons :

- Les disjoncteurs différentiels : ils analysent les fuites de courant pour diagnostiquer un défaut et le filtrer, aussi ils assurent la fonction de limiteur de surcharge.
- Les disjoncteurs limiteurs miniatures ou terminaux, MCB (miniature circuit breaker) sont utilisés pour contrôler une partie d'une machine ou d'une installation tertiaire (commerce, bureaux d'une usine, etc.). Ils sont limiteurs mais ils peuvent aussi être différentiels : ils protègent alors aussi les personnes (figure I.3.a) [11].

- Les disjoncteurs industriels limiteurs moulés, MCCB (Moulded case circuit breaker) fonctionnent pour des intensités plus importantes. Ils sont limiteurs et sont utilisés pour l'alimentation d'un outil ou d'une installation industrielle. Ils correspondent dans la gamme Merlin Gerin au « Compact NS » (figure I.3.b).
- Les disjoncteurs de puissance à air, ACB (air circuit breaker), sont utilisés pour de fortes intensités. Ils servent à contrôler la distribution électrique dans un tunnel, une usine, etc. Ils correspondent dans la gamme Merlin Gerin au « MasterPact » (figure I.3.c) [11].



**Figures I.3 :** Vue extérieure de disjoncteurs Merlin Gerin  
a : MCB, b : MCCB, c : ACB

Nous nous limitons aux disjoncteurs MCCB pour en détailler les fonctions.

#### **I.4.2. Structure d'un disjoncteur MCCB**

Vu la similitude entre les trois modèles des disjoncteurs cités au paravent, on s'intéresse plus au disjoncteur MCCB pour en détailler ces les fonctions [11].

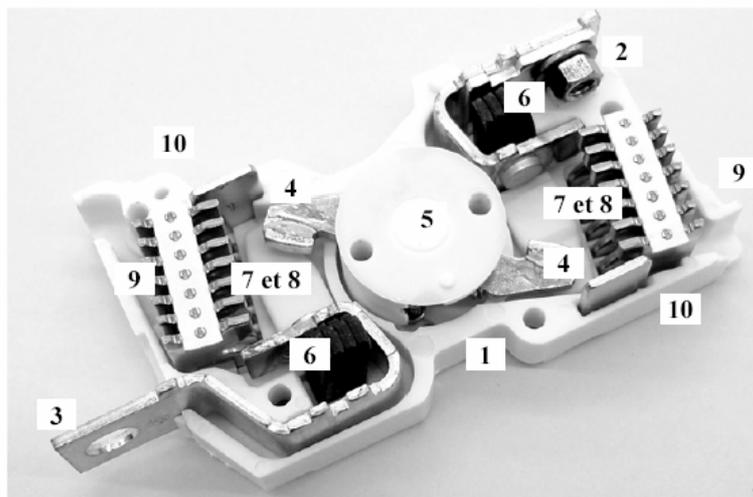
Un disjoncteur MCCB est composé d'un boîtier en matière plastique, d'une ou plusieurs chambres de coupure et d'un dispositif de commande et de disjonction appelé serrure.

### I.4.2.1. Boîtier

Généralement réalisé en matières thermoplastiques, il contient tous les organes du disjoncteur et assure la stabilité structurelle, l'esthétique, la protection électrique des personnes qui le manipulent ainsi que la protection du disjoncteur vis-à-vis du milieu extérieur. En revanche, il laisse passer les gaz générés lors de la coupure. Celle-ci se fait dans une ampoule.

### I.4.2.2. Ampoule de coupure

Placée sur chaque phase de l'appareil, elle contient les organes qui assurent la séparation physique entre l'amont et l'aval du circuit. Elle se compose d'une enveloppe en polymère thermodurcissable (figure I.4) dans laquelle est située la partie conductrice du disjoncteur. Il y a une ampoule par phase.

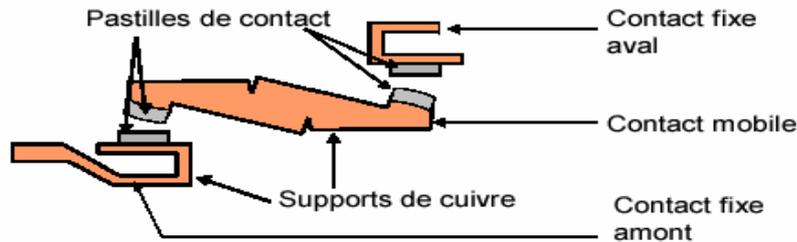


**Figure I.4.** Disjoncteur compact NS 160 Merlin Gerin

- 1 : enveloppe ;
- 2 et 3 : contacts fixes ;
- 4 : contacts mobiles ;
- 5 : barreau flottant ;
- 6 : cales ;
- 7 : joues ;
- 8 : chambre de précoupure ;
- 9 : chambre de coupure ;
- 10 : masse électrique.

#### I.4.2.2.1. Ligne de pôle

La ligne de pôle est la partie conductrice d'un disjoncteur. Elle se compose d'un contact mobile et de deux contacts fixes (figure I.5).



**Figure I.5 :** Schéma simplifié d'un disjoncteur MCCB

On distingue les deux paires de pastilles de contacts dont le matériau est différent des autres organes, montées sur des supports fixes et mobiles.

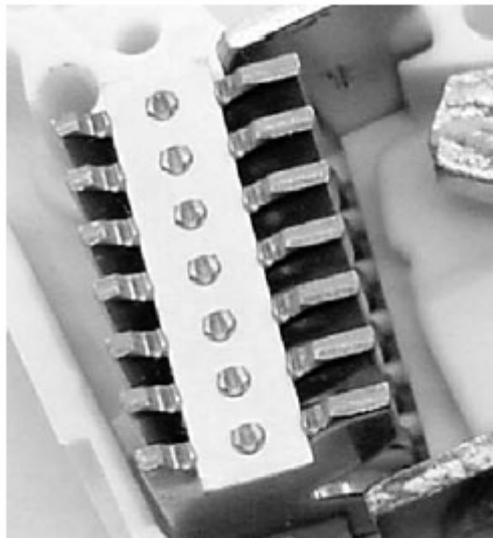
Les arcs électriques apparaissent entre ces contacts lors de l'ouverture ou de la fermeture du circuit :

- Les contacts fixes (2 et 3 de la figure I.4) assurent la liaison avec le reste du circuit. L'interface de coupure est constituée d'une pastille d'argent-carbone Ag-C brasée sur un support de cuivre ou de cuivre argenté. Les supports amont ont des formes de crochet (figure I.5) permettant de chasser l'arc loin des contacts grâce aux forces de Laplace générées lors du passage du courant ;
- Un contact mobile (4 de la figure I.4) avec deux pastilles de contact en composite argent - carbure de tungstène ou en composite argent - carbone. Il est placé dans un barreau flottant (5) qui lui permet d'avoir un mouvement de rotation autour d'un axe. A l'intérieur du barreau, de puissants ressorts sont destinés à écraser les pastilles de contacts mobiles sur celles des contacts fixes. Cet écrasement permet d'améliorer la qualité du contact entre les deux couples de pastilles en augmentant la surface de contact.

#### I.4.2.2.2. Partie non-conductrice

Les autres pièces ont pour but de limiter les effets des arcs électriques qui apparaissent entre les deux paires de contacts :

- De chaque côté des zones d'apparition de l'arc se trouvent des joues (7). Ce sont des flancs de matières plastiques gazogènes destinés à fondre en dégageant de fortes quantités de gaz en présence d'un arc électrique. Il en résulte une augmentation locale de la pression gazeuse qui chasse l'arc lorsque ces matières sont brûlées par l'arc 4 ;
- La chambre de pré-coupure (8) est le lieu physique de la séparation de l'arc et des contacts. L'arc est ensuite chassé vers la chambre de coupure ;
- La chambre de coupure (9 sur la figure 1.4, reprise à part figure 1.6) est constituée d'ailettes, plaques de métal régulièrement espacées et comportant une encoche destinée à favoriser la disparition de l'arc ;
- Des filtres qui permettent d'évacuer la surpression tout en limitant les manifestations extérieures dues à l'arc (flashes lumineux) ;
- Une plaque de métal (10) qui sert de masse électrique [11].



**Figure I.6 :** Chambre de coupure d'un disjoncteur MCCB

La structure en ailette permet de transformer un arc unique en un grand nombre d'arcs ce qui contribue à son extinction.

### **I.4.3. Contacteurs électriques**

Les contacteurs sont des composants fondamentaux de l'automatisation : ce sont des appareils de connexion commandable à distance (en général, par un électroaimant). Ils sont capables d'établir, de supporter et d'interrompre des courants

dans les conditions normales de fonctionnement, y compris celles de surcharge en service. L'invention des contacteurs au début du vingtième siècle a permis l'essor de l'automatisme [8].

La commande d'ouverture ou de fermeture du circuit se fait par passage d'un courant dans l'étage de commande du contacteur. Un contacteur doit pouvoir effectuer environ cent fois plus de manœuvres qu'un disjoncteur.

L'actionnement des contacteurs est soit électronique soit électromagnétique. Pour les contacteurs électromagnétiques, l'action conjointe d'une bobine et de ressorts permet l'ouverture ou la fermeture du circuit. L'architecture existe en double coupure ou à simple coupure, à clapet ou à actionnement direct [4]. Les faibles calibres sont dépourvus de dispositif de soufflage. Pour les calibres moyens, le soufflage est réalisé au moyen d'ailettes, comme dans les disjoncteurs. Pour les très gros calibres, il existe des dispositifs magnétiques de soufflage.

#### I.4.3.1. Structure des contacteurs électriques

Un contacteur sans dispositif de soufflage est représenté [4] sur la figure 1.7.

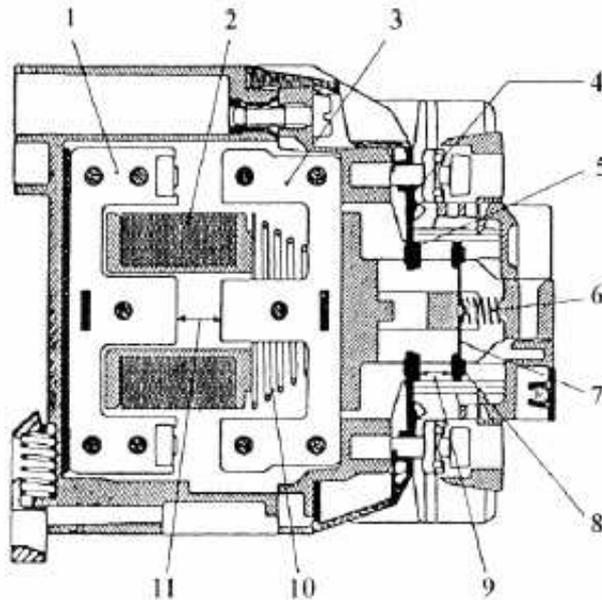


Figure I.7 : Coupe d'un contacteur électromécanique

On distingue la ligne de pôle, composée d'un pont mobile (7) et de deux parties fixes par phase (4). Le pont mobile possède deux pastilles de contact (8). Chaque partie fixe dispose d'une pastille (5), soit quatre pastilles par phase.

Le pont mobile est relié à son support, le râteau, au moyen d'un ressort (6). Le ressort peut être placé entre le pont et le râteau ou entre le pont et le boîtier. Sur le râteau est fixée l'armature mobile de l'électroaimant (3). Celle-ci est composée d'un ensemble de plaques d'acier au silicium isolées entre elles et assemblées par des rivets pour éviter l'apparition de courants de Foucault [7].

En mode passant, les parties fixes et mobiles de l'électroaimant (1) se touchent en comprimant un ressort (10) et en enserrant la bobine (2). L'électroaimant peut avoir des formes très diverses (en U, en W) selon le type de courant à couper. Cet appareil dispose de deux courses, celle de l'électroaimant (11) et celle des contacts (9). Cette dernière conditionne la distance nécessaire pour passer du mode passant au mode non-passant.

Dans le cas d'une fermeture, le pont mobile positionne dans un premier temps les contacts mobiles contre les contacts fixes. Ensuite, l'électroaimant continue sa course en comprimant les ressorts d'écrasement (6) pour appliquer sur les contacts une pression permettant de garantir un bon contact électrique.

La structure et les caractéristiques de l'ensemble du contacteur ont une influence sur la durée de vie des pastilles, notamment au travers des pressions exercées sur les contacts et des vitesses d'ouverture ou de fermeture du circuit.

## **I.5. Différents types d'essai**

### **I.5.1. Normes internationale en électrotechnique**

Les normes sont omniprésentes en électrotechnique. Il en existe trois grandes familles, correspondant à autant de zones géographiques d'influence :

1 - La norme NEMA (National Electrical Manufacturers Association) [9] ou la norme UL (Underwriters Laboratories Inc) [10] sont principalement utilisées en Amérique du Nord ;

2 - La norme JSI est principalement utilisée au Japon et en Extrême-Orient ;

3 - La norme IEC est principalement utilisée en Europe en Afrique du nord.

### **I.5.2. Essais normalisés pour les disjoncteurs IEC**

D'après la norme IEC, les disjoncteurs doivent répondre à des exigences définies par les essais suivants :

Les essais sont de plusieurs types :

- a - Essais d'échauffement en mode passant ;
- b - Propriétés diélectriques en mode non-passant ;
- c - Limites et caractéristiques du déclenchement ;
- d - Aptitude au fonctionnement en service ;
- e - Pouvoir de coupure en court-circuit.

Ces essais sont organisés en séquences d'essais. Ils sont regroupés en deux grandes familles :

- Les essais caractérisant le fonctionnement mécanique du disjoncteur (ouverture correcte du circuit, etc.) ;
- Les essais évaluant le comportement électrique ;
- L'intensité maximale que peut couper un disjoncteur (et donc la puissance maximale admissible) ;
- Comportement à l'usure en service [9-10].

### **I.5.3. Essais normalisés pour les contacteurs IEC**

De même les contacteurs doivent répondre à la norme IEC dont les exigences sont définies par :

La norme conditionne le choix technologique fait pour la conception d'un appareil. Ainsi, la norme définit la taille des appareils afin qu'ils soient librement interchangeables pour une puissance et une tension données. Les contacteurs sont, de plus, conçus pour fonctionner de manière satisfaisante pour une durée de vie donnée quel que soit le circuit dans lequel ils sont implantés.

En revanche, aussi les contacteurs sont conçus pour une utilisation idéalisée exprimée en terme de catégorie d'emploi. La catégorie d'emploi est le type de courant que le contacteur va avoir à couper ou à établir tout au long de sa vie. Il dépend du type d'appareils présents sur le circuit (moteurs asynchrone, etc.). Pour un même calibre, il y a plusieurs catégories d'emploi et donc plusieurs durées de vie [2].

#### **I.5.4. Essais de laboratoire pour les contacteurs**

Certains types d'essais de laboratoire permettent d'étudier les propriétés de non-soudure des contacts; d'autres exacerbent les problèmes de fonctionnement en service.

Les essais peuvent être considérés comme statiques ou dynamiques selon la méthode utilisée pour générer l'arc électrique. Pour les essais dynamiques de fermeture, l'arc apparaît lorsque les contacts se rapprochent l'un de l'autre d'une distance inférieure à la distance diélectrique (distance au-dessus de laquelle la diélectrique est en quantité et qualité suffisantes pour interdire le claquage) [10].

Inversement, quand les contacts conduisant le courant ils se séparent. La rupture du pont de métal liquide formé par échauffement localisé conduit à l'apparition d'un arc électrique. Pour les essais statiques, la génération de l'arc est plus complexe. L'échauffement résultant du passage du courant dans un fil de métal le fait exploser. On trouve aussi des systèmes d'amorçage de l'arc au moyen d'une impulsion haute tension.

Ils permettent de s'affranchir du mouvement des pièces mais modifient profondément la physiologie de l'arc électrique. Au contraire des essais dynamiques permettent de rendre compte précisément de ce qui se passe dans les contacts. Pour autant, il est impossible de supprimer l'influence du mouvement relatif des contacts sur la dynamique intrinsèque de l'arc.

On considère généralement deux types d'essais dynamiques : les essais critiques, tels que les essais de fermeture sous fort courant et les essais d'endurance.

Les essais critiques caractérisent le comportement du matériau dans des conditions difficiles, celui-ci, par exemple, ne doit pas souder tandis que les essais d'endurance évaluent la durée de vie des pastilles [12-16].

L'érosion à la fermeture, mise en évidence lors de certains essais critiques, dépend essentiellement de trois facteurs :

- La durée et la vitesse d'accostage ;
- L'énergie du rebond généré lors de l'accostage ;
- La composition et les caractéristiques des contacts.

Dans les essais d'endurance, les contraintes mécaniques générées par l'arc lors de l'ouverture des contacts conduisent à leur érosion.

### **I.5. Conclusion**

Dans ce chapitre une recherche bibliographique a été réalisée, en accordant une importance particulière à la description des contacts électriques, leur emplacement dans les équipements électriques (tels que les contacteurs et les disjoncteurs).

Les différents phénomènes (mécaniques, hydrodynamiques, électromagnétiques violents et complexes) que subissent les contacts lors de l'ouverture et la fermeture d'un circuit sont énumérés.

L'établissement du contact entre deux électrodes sur un ensemble de points de surface et la relation reliant la résistance avec ces points de contact entre les électrodes y est explicité.

La description et le principe de fonctionnement, ainsi, que les différents types d'essai et normalisation des équipements (contacteurs et disjoncteurs) ont été entrepris dans ce chapitre.

## **CHAPITRE II**

### **Présentation et Propriétés des Pastilles de Contact Industrielles**

## **II.1. Introduction**

Les contacts électriques sont fabriqués à partir des alliages ou pseudo-alliages de métaux sous formes de rivets massifs, bi ou tri-métalliques, pastilles (avec ou sans couche de brasure).

La plupart des matériaux sont issus de la métallurgie des poudres, ils peuvent donc être obtenus par compression unitaire. Ils sont principalement composés de (AgC, AgNi, AgW, AgWC, CuCr, SnO<sub>2</sub>).

Les matériaux utilisés dans l'élaboration des contacts doivent avoir des propriétés bien définies, afin de durer dans le temps et résister aux sollicitations importantes, avec des montées en température importantes jusqu'à la fusion et la formation de gouttelettes. Les contacts sont le siège de phénomènes mécaniques, hydrodynamiques, électromagnétiques violents d'où le choix de l'alliage s'impose.

Les procédés de fabrication des contacts sont réalisés soit par coulée (alliage d'argent faiblement dopé) sous la forme d'une billette, soit par métallurgie des poudres. Les poudres sont mélangées par voie sèche ou humide. Le pseudo-alliage obtenu est soit utilisé directement en compression unitaire de pastilles à l'aide d'une presse rotative, soit mis sous forme de billettes obtenues en comprimant à haute pression le mélange de poudre et en lui faisant subir un traitement thermique (frittage). Le but de ces deux opérations est de solidifier et de densifier le pseudo-alliage [14-17].

## **II.2. Propriétés générales des matériaux de contact**

Les matériaux de contacts doivent satisfaire les propriétés suivantes :

- Présenter des températures de fusion adéquates ;
- Avoir des conductivités électrique et thermique élevées ;
- Etre suffisamment inertes vis-à-vis de l'atmosphère dans laquelle ils seront placés pour éviter la formation de films isolants ;
- Présenter des propriétés mécaniques suffisantes pour supporter les forces appliquées lors de l'écrasement des contacts.

### II.2.1. Changements d'état

Les changements d'état du diagramme phase de la matrice et du renfort conditionnent pour une bonne part les performances des contacts en présence d'arc.

Les paramètres à prendre en compte sont les températures de fusion et d'ébullition de la matrice ainsi que les chaleurs latentes correspondantes, la température de vaporisation du renfort et sa chaleur latente, ainsi que les réactions éventuelles de changement de phase [18].

Ces chaleurs latentes jouent le rôle de puits thermique en absorbant une partie de l'énergie de l'arc électrique. Les oxydes présentant des températures basses de changement d'état sont donc favorisés. Cependant, une température trop basse de changement d'état entraîne des problèmes de stabilité de l'oxyde lors de l'élaboration des pastilles de contact électrique.

Elle favorise de plus le soudage et l'érosion par l'arc à cause de l'apparition en surface d'une couche de métal liquide. Une température trop haute favorise les réamorçages d'arc électrique. Les caractéristiques des changements d'état de certains matériaux utilisés dans l'élaboration des contacts électriques sont classés dans le tableau II.1 [19].

Matériaux	Ag	Cu	SnO <sub>2</sub>	WC
Température de fusion (K)	1235	1357	1893	3070-3140
Température d'ébullition (k)	2483	2855-2868	2750	-
Chaleur latente de fusion (kJ.mol <sup>-1</sup> )	11.95	13.05	-	-
Chaleur latente d'ebulition (kJ.mol <sup>-1</sup> )	254.1	304.6	-	-
Température de dissotiation (K)	-	-	2300	3700
Chaleur latente de dissotiation (kJ.mol <sup>-1</sup> )	-	-	580.8	-

**Tableau II.1** : Températures et enthalpies de changement d'état

### II.2.2. Propriétés électriques

La conductivité électrique  $\sigma$  est une des propriétés électriques caractérisant l'aptitude d'un matériau à laisser passer le courant électrique. Elle s'exprime en

siemens sur mètre. L'inverse de la conductivité est la résistivité  $\rho$ , elle est exprimée en Ohm. Mètre.

### II.2.2.1. Influence des conductivités sur le choix des matériaux de contact

Un contacteur ou un disjoncteur doit laisser passer le courant en position fermée. Il s'échauffe alors par effet Joule. Cet effet doit être contrôlé : les normes préconisent une augmentation de température inférieure à 70°C entre les bornes de connexion des contacteurs lors du passage du courant. Les contacts doivent donc être de bons conducteurs électriques et thermiques.

Les meilleurs alliages sont à base de cuivre ou à base d'argent. Ceci explique l'emploi massif de ces deux éléments dans les lignes conductrices des disjoncteurs. L'argent a une conductivité électrique supérieure de 8% à celle du cuivre : malgré son coût plus élevé, il est préférentiellement utilisé pour les pastilles de contact d'intensité importante. Il a de plus une bonne résistance à l'oxydation. L'or est rarement utilisé en raison de son prix élevé. Il est cependant totalement inoxydable. Quand l'atmosphère, particulièrement oxydante, interdit l'utilisation d'un autre élément, on réalise un dépôt de quelques microns d'or par galvanoplastie. Ce dépôt ne permet le passage que des courants faibles, comme ceux utilisés dans la connectique bas niveau. Le matériau le plus utilisé pour les forts courant est l'argent [13-17].

### II.2.2.2. Conductivité électrique des métaux purs

La conduction électrique dans les métaux purs est principalement électronique. La fonction de distribution d'équilibre global  $f(0)$ , correspondant à la densité des porteurs de charges ayant une énergie donnée et se trouvant à l'équilibre, obéit alors à la statistique de Fermi-Dirac. Elle apparaît dans l'équation de Boltzmann par :

$$f^{(0)}(\mathbf{r}, \mathbf{E}_k, t) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - \mu}{k_B T}}} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

M : niveau de Fermi ;  
E : énergie du porteur de charge ;  
R : position du niveau de Fermi ;  
 $k_B$  : constante de Boltzmann.

L'intégrale de collision traduit l'évolution temporelle de l'énergie du porteur de charge par suite d'une collision et elle permet d'établir un bilan énergétique. Comme elle fait ressortir le temps de relaxation  $\tau$  :

$$(df/dt)_{\text{coll.}} = (f - f(0)) / \tau \quad (\text{II.2})$$

Avec

$\tau$  : temps de relaxation (temps moyen séparant deux chocs électroniques consécutifs);  
f : fonction de distribution.

D'une autre part la densité de courant électrique « j » peut se calculer à partir de la fonction de distribution f donnée par :

$$J = \frac{2e}{(2\pi)^3} \int f \cdot v dk \quad (\text{II-3})$$

Avec :

J : densité de courant dans le conducteur ;  
e : charge du porteur de charge ;  
f : fonction de distribution (fonction de k) ;  
v : vitesse du porteur de charge (fonction de k) ;  
k : état énergétique du porteur de charge.

La conductivité électrique  $k_{el}$  du matériau est définie par l'équation :

$$j_x = k_{el} \cdot E_x \quad (\text{II.4})$$

Avec  $j_x$  : composante selon la coordonnée x de la densité de courant dans le conducteur.

La conductivité dans les métaux purs, est essentiellement donnée par le temps de relaxation puisque la concentration en électrons varie peu. Ainsi, quand la température augmente, les ions oscillent de plus en plus fort autour de leur position d'équilibre et diffusent des électrons. Avec l'augmentation de température, il en résulte que le temps de relaxation diminue et amène une diminution de la conductivité électrique. De cela la conductivité du métal pur est alors proportionnelle à la température selon la loi de Bloch-Grüneisen [3-8].

Et à titre d'exemple on cite le cas de Ag :

La conductivité électrique de l'argent pur est  $6.25.10^7 \text{ S.m}^{-1}$  à 293 K, et elle est de  $1.19.10^7 \text{ S.m}^{-1}$  à 1233 K (soit sa température de fusion) [6].

### II.2.2.3. Conductivité électrique dans les alliages ou pseudo-alliages

La résistivité d'un métal dopé (alliage)  $\rho$  s'écrit :

$$\rho = \rho_{\text{dopant}} + \rho_T \quad (\text{II.5})$$

Avec  $\rho_{\text{dopant}}$  : résistivité du dopant dans le métal considéré,  
 $\rho_T$  :résistivité du métal pur à la température  $T$ .

Un alliage peut être considéré comme un métal dopé avec un second métal. Pour un alliage dont le métal de base a une résistivité électrique inférieure au métal d'apport (le cas des contacts électriques à base d'argent), la résistivité de la solution solide est supérieure à celle de l'alliage. Les atomes du second métal freinent les électrons, d'autant plus s'ils sont répartis de manière homogène : la détermination de  $\rho_{\text{dopant}}$  est délicate car elle dépend de la répartition et de la diffusion du dopant [16].

### II.2.3. Conductivité thermique $\lambda$

La conductivité thermique  $\lambda$  est définie comme la quantité de chaleur échangée par conduction à travers un corps par unité de temps, de surface, d'épaisseur et de température. Elle est donnée par la relation de Fourier si elle est considérée comme indépendante de la température :

$$\underline{\varphi n} = -\lambda \text{grad}(T) \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$\varphi$  : densité de flux de chaleur ;

T : température ;

$n$  : vecteur normal.

La conductivité thermique  $\lambda$  est définie au niveau microscopique par l'énergie moyenne des particules permettant la conduction :

$$\lambda = C v l_m / 3 \quad (\text{II.7})$$

Avec :

C : capacité thermique du système de particules considéré ;

v : leur vitesse moyenne ;

$l_m$  : leur libre parcours moyen.

Dans les métaux purs, la conduction thermique (comme la conduction électrique) est assurée par les électrons. La relation (II.7) devient :

$$\lambda = n \pi^2 k_B^2 T \tau / 3 m \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$k_B$  : constante de Boltzmann ;

n : concentration en électrons ;

$\tau$  : temps de relaxation ;

m : masse des porteurs de charge.

La conductivité électrique et la conductivité thermique sont alors liées par la relation de Wiedermann-Franz :

$$\lambda / \text{kel} = L T \quad (\text{II.9})$$

Avec L : coefficient de Lorentz,

$$L = \frac{\pi^2 k_B}{3e^2} \quad (\text{II.10})$$

$$L = 2.31 \cdot 10^{-8} \text{ J} \cdot \Omega \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-2} \quad \text{pour l'argent à 273 K (température absolue).}$$

$\lambda$  peut être estimée si l'on connaît  $k_{el}$ , mais cette méthode n'est applicable que pour les matériaux dont la conduction thermique et la conduction électrique sont véhiculées principalement par les électrons. Le tableau II.2 illustre la conductivité thermique de l'argent à l'état solide et à l'état liquide Tableau II. 3. On remarque que la conductivité thermique décroît avec l'augmentation de la température dans le cas du solide et l'inverse dans le cas liquide pour l'Argent.

T (K)	90	273	373	723
$\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	425,9	418,4	410,0	355,6

**Tableau II.2 :** Conductivité thermique de l'argent solide en fonction de la température [18-20]

Pour l'état liquide, on a les valeurs du tableau II.3:

T (K)	1233	1273	1373	1473	1573	1673
$\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	174.8	176.5	180.8	185.1	189.3	193.5

**Tableau II.3 :** Conductivité thermique de l'argent liquide en fonction de la température [18-20]

#### II.2.4. Capacité calorifique

La capacité calorifique est définie comme la dérivée en température de l'enthalpie ou de l'énergie interne du matériau. Elle varie peu pour un matériau ne subissant pas de transformation physique mais elle évolue fortement en cas de changement d'état. Pour un matériau pur passant de  $T_1$  à  $T_2$  (avec  $T_1 < T_f < T_2$ ), on a :

$$H = \int_{T_1}^{T_f} C_{p \text{ solide}} dT + L_f + \int_{T_f}^{T_2} C_{p \text{ liquide}} dT \quad (\text{II.11})$$

Avec :H : enthalpie du matériau ;

$C_p$  : capacité calorifique ;

$L_f$  : chaleur latente de fusion ;

Cela conduit à une fonction du type :

$$H(T) = C_{p \text{ solide}} \cdot (T - T_1) + L_f \cdot (T - T_f) + C_{p \text{ liquide}} \cdot (T - T_f) \cdot \text{Heaviside}(T - T_f) \quad (\text{II.12})$$

Avec :Heaviside : fonction de HEAVISIDE définie telle que.

Heaviside(x) = 0 pour  $x < 0$  et Heaviside(x) = 1 pour  $x > 0$ .

Le passage à la dérivée de la fonction H(T), qui correspond au changement d'état en échelon de Dirac, facilitera la convergence de la solution numérique.

### II.2.5. Inertie chimique

La surface des contacts peut-être oxydée par l'air ou par les gaz contenus dans le disjoncteur. Il se forme alors un film isolant qui augmente la résistance de contact et provoque une surchauffe. Aussi, à la fermeture, de disjoncteur doit pouvoir casser ce film pour permettre le passage du courant. Le film ne doit donc être ni trop épais, ni trop résistant. Le cuivre s'oxyde irréversiblement à l'air ambiant.

L'oxyde d'argent,  $\text{Ag}_2\text{O}$ , se décompose à partir de 430K. Ce dernier est éliminé lors de l'apparition de l'arc électrique.

L'argent est préféré au cuivre pour les matériaux de contact en milieu oxydant. Toutefois, l'argent a tendance à se sulfurer suivant la réaction [17] :



La formation de sulfure est particulièrement pénalisante dans les atmosphères corrosives. A haute température, le sulfure d'argent  $\text{Ag}_2\text{S}$  forme des points de connexion entre les deux surfaces de contacts (du fait de la résistance de contact plus importante pour le sulfure que pour le métal) et donc entraîne l'apparition d'une soudure.

La contamination de surface par oxydation, par corrosion, par formation de films par diffusion thermique, par condensation ou encore par usure mécanique est responsable de la défaillance des contacts électriques [21-26]. Cependant, l'arc généré a pour effet de nettoyer la surface d'un certain nombre d'impuretés. De plus, ce genre de problème se pose uniquement dans les atmosphères corrosives pour les matériaux à base d'argent.

### II.2.6. Tenue mécanique

Des essais mécaniques tel que, la mesure de la dilatation thermique par la quelle on peut identifier le coefficient de dilatation volumique, car une augmentation de l'énergie interne du matériau à pour effet d'augmenter l'amplitude de vibration des atomes du matériau et d'accroître la distance moyenne entre les atomes, ce qui provoque une augmentation du volume lorsque la température croît.

Microscopiquement, le coefficient de dilatation thermique volumique  $\alpha_v$  peut être calculé par la formule :

$$\alpha_v = dV/dT \quad (\text{II.14})$$

avec :  $v$  = volume (pour une masse donnée) du matériau à la température  $T$ .

Le coefficient de dilatation thermique volumique dépend de la phase métallurgique du matériau et de son état physique. La variation de la déformation thermique au temps  $t$  est alors définie par :

$$\Delta\varepsilon_{th} = \alpha_T(t) (T - T_{réf}) - \alpha_T(t=0)(T(t=0) - T_{réf}) \quad (\text{II.15})$$

Avec  $T_{réf}$  : température de référence, pour la quelle on suppose l'absence de déformation thermique.

Une faible contrainte à rupture tend à favoriser l'érosion mais permet de casser facilement un pont soudé et donc d'améliorer le pouvoir antisoudure des contacts.

### II.3. Différents types de matériaux de contact

Les matériaux de contact ont généralement comme élément principal l'argent ou le cuivre.

#### II.3.1. Matériaux à base de cuivre

Le cuivre est privilégié pour les applications haute tension sous vide ou sous  $SF_6$  ou pour les petits calibres, en raison de son faible coût. On trouve principalement des pseudo-alliages de cuivre-chrome et de cuivre-tungstène.

Les supports de contacts mobiles peuvent être en cuivre-béryllium, pour ses propriétés mécaniques après revenu (même si le béryllium pose maintenant des problèmes de nocivité pour l'homme et l'environnement), en cuivre-nickel-silicium, pour sa faible résistivité, en cuivre-nickel-étain ou en acier revêtu de cuivre pour leur faible coût. On trouve aussi des pièces de cuivre revêtues d'argent pour améliorer les propriétés de conduction électrique et diminuer l'oxydabilité.

Les principaux défauts du cuivre sont sa tendance au soudage aux fortes intensités et à l'oxydation sous air. Il est donc utilisé sous vide ou sous atmosphère inerte et à cause de cet inconvénient que présent le cuivre on s'intéressera que au matériau à base d'argent.

### **II.3.2. Matériaux à base d'argent**

L'argent est très bon conducteur mais sa faible résistance mécanique, sa tendance au soudage sous fort courant, son coût et surtout la faible endurance électrique des contacts d'argent font qu'il n'est jamais utilisé pur. Aussi les différents travaux et la littérature traitant le domaine de fabrication des contacts électriques ont montrés que l'argent pur n'est pas capable de satisfaire toutes les applications électrotechniques [8-11, 17]. Il existe donc une large gamme de matériaux utilisés pour permettre de répondre aux différentes exigences.

#### **II.3.2.1. Argent dopé**

Il est possible de doper l'argent avec un métal dur comme le nickel. Les propriétés mécaniques sont améliorées mais la conductivité thermique diminue de manière très importante du fait des perturbations du réseau provoquées par le second métal. On trouve ainsi Ag-Ni avec 99,85/0,15 % souvent appelé « argent dur ».

#### **II.3.2.2. Alliages**

L'ajout d'un second métal plus dur permet d'améliorer le comportement mécanique mais cela se fait au détriment de la conductivité. Ainsi, l'ajout de 15% de Cd à l'argent fait baisser sa conductivité. On trouve cependant des alliages d'argent-cuivre et d'argent-palladium (pour diminuer la tendance à la sulfuration de l'argent) pour les applications subissant de faibles courants comme les interrupteurs domestiques [17].

#### **II.3.2.3. Pseudo-alliages**

Les pseudo-alliages sont des matériaux composites frittés constitués de deux phases métalliques. Ils sont de meilleurs conducteurs thermiques ou électriques que les alliages équivalents. On trouve des pseudo-alliages d'Ag-Ni ou d'Ag-W. Ils ont une bonne tenue à la soudure, une résistance à l'érosion comparable à celle de l'Ag-SnO<sub>2</sub>, une conductivité moins importante que celle de l'argent pur mais qui reste acceptable. Par contre, la faible ductilité du second métal rend la mise en forme difficile pour les proportions importantes de nickel ou de tungstène.

Cependant, la forte résistivité des pseudo-alliages par rapport aux composites limite leur utilisation aux petits calibres. Le tableau II. 4 permet de montrer les principaux matériaux de contact, ainsi le choix de l'alliage d'argent en fonction de son application électrique.

Courant (AC et DC)	1	10	100	1'000	10'000	100'000 A
Interrupteurs pour applications domestiques	Ag (enduit) - Ag - AgCu - AgNi (0.15)					
	AgNi (10)					
			AgCdO* - AgSnO2 - AgFe2O3			
Interrupteurs pour l'éclairage	Ag - AgCu - AgNi (0.15)					
			AgCdO* - AgSnO2 - AgFe2O3			
Disjoncteurs (domestiques)	AgCdO* - AgZnO - AgSnO2					
			AgC - Cu/AgC - AgNi			
Commutateurs auxiliaires	Ag - AgCu - AgNi (0.15)					
			AgNi - AgFeRe - AgFe2O3			
Contacteurs - Relais	Ag - AgCu - AgNi (0.15)					
			AgNi - AgFe2O3			
			AgSnO2 - AgCdO* - AgZnO			
Disjoncteurs (industriels)	AgCdO* - AgZnO - AgSnO2					
			AgC/AgNi - AgC/AgFeRe - AgC/AgFe2O3 - AgCNI/AgNi			
			AgW - AgWC - AgWC C			

Tableau II.4 : Principaux matériaux de contact suivant le courant électrique [17]

#### II.3.2.4. Composites à Matrice Métallique (CMM)

Les CMM occupent une place de choix dans l'industrie des contacts électriques. Contrairement aux pseudo-alliages, la seconde phase des CMM n'est pas métallique. Les structures cristallines de la matrice et du renfort ne sont pas cohérentes, ce qui pose des problèmes d'interface mais facilite aussi la rupture de la soudure. Par contre, ils ont souvent une meilleure conductivité électrique que les alliages ou pseudo-alliages. Ainsi, l'Ag-CdO a une conductivité électrique de 65% IACS contre 35% pour un pseudo-alliage Ag-Cd à même proportion d'argent [9-25].

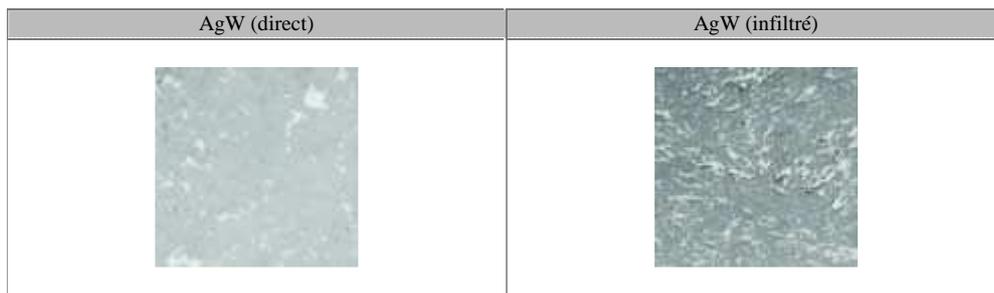
Outre l'Ag-CdO, longtemps utilisé et maintenant abandonné en Europe pour des raisons environnementales. Les composites monotectiques les plus utilisés sont : Ag-WC ; Ag-Ni ; Ag-C-Ni ; Ag-Fe.

#### II.3.2.4.1. Argent tungstène

Cee alliage utilise les propriétés réfractaires du tungstène (point de fusion : 3400°C). Ce matériau résiste à des arcs électriques forts avec un faible taux d'érosion ainsi qu'une faible tendance au soudage.

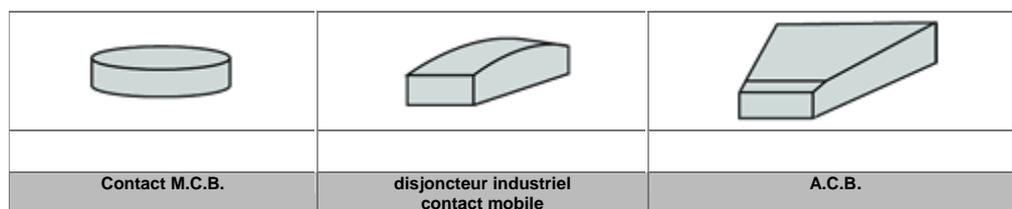
Cependant, la mobilité réduite de l'arc ainsi que la formation de tungstates provoque une élévation de la résistance de contact et donc de la température. Cet inconvénient peut être compensé en, choisissant la composition la plus appropriée de tungstène, ainsi, que la taille du grain et en utilisant une plus grand force magnétique.

Le matériau AgW peut être obtenu sous forme de différentes structures : direct, ou bien par infiltration, figure II.1.



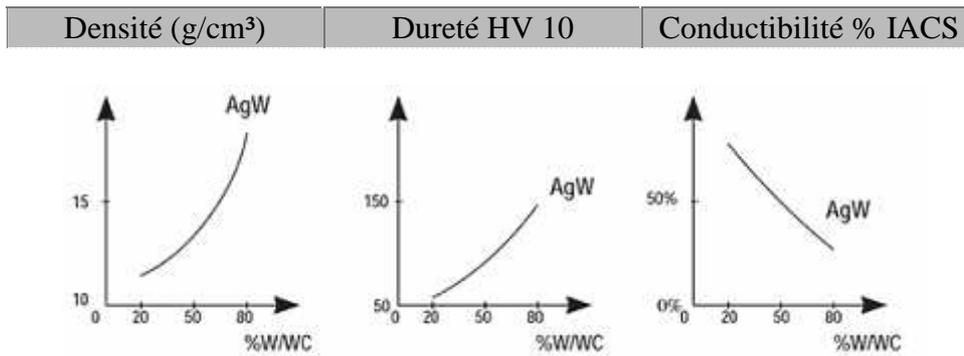
**Figure II.1** :Structure direct et infiltré du matériau Ag-W [17]

Ces contacts électriques sont produits par compression unitaire. Une grande variété de formes est donc possible. Les formes les plus courantes sont données figure II.2.



**Figure II.2** : Formes de pastilles

Les caractéristiques physiques tels que la densité, la dureté et la conductivité des deux matériaux sont exposées sur la figure II.3.



**Figure II.3 :** Caractéristiques physiques des matériaux AgW

Les pastilles de contact à base d'argent-tungstène, équipent généralement les interrupteurs tels que :

- Thermostats ;
- MCB ;
- Contacts mobiles pour disjoncteurs entre 100 et 800 A ;
- Contacts mobiles pour ACB entre 1000 et 10 000 A ;
- Contacts d'arc pour contacteurs de grande taille.

Leurs champs d'application sont surtout dans le domaine industriel. Généralement le choix des contacts obéit à des critères tels que la forme des contacts, les dimensions et les conditions de brasage, on les trouve sur des :

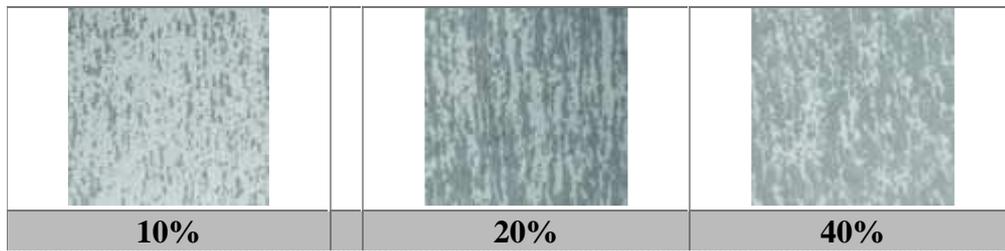
- Appareils ménagers ;
- Distribution d'énergie électrique ;
- Chemins de Fer ;
- Industrie aéronautique.

#### II.3.2.4.2. Argent-Nickel Ag-Ni

Le nickel est un matériau réfractaire (point de fusion 1455°C) très. Ajouter du nickel à l'argent augmente la dureté de l'argent, lui permettant de garder ses bonnes propriétés mécaniques après avoir subi un arc électrique.

La grande conductivité du matériau et son utilisation facile le rendent idéal pour des applications extrêmes pour autant que le courant soit faible. La teneur en

nickel peut être de 10 à 50%, ayant une structure de taille des grains variant de 2 à 5  $\mu$  ( $\varnothing$  FSSS : 2 à 5  $\mu$ ), figure II.4.



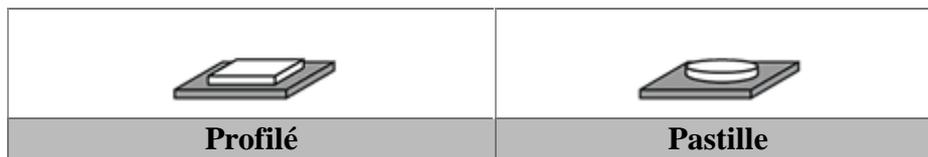
**Figure II.4 :** Structure des grains et teneur en Nickel

Le procédé de fabrication des pastilles de contact à base du matériau Argent-Nickel utilisé est l'extrusion, le laminage et la compression unitaire. Les propriétés physiques du matériau, la teneur en Nickel, en fonction du procédé de fabrication sont exposées au tableau II.5 [17].

Procédé de fabrication	EXTRUDE ou LAMINE				COMPRESSION	
	10	20	30	40	30	40
Teneur Ni (%)	10	20	30	40	30	40
Densité théorique g/cm <sup>3</sup>	10.1	9.9	9.8	9.7	9.8	9.7
Dureté Vickers (recuit)	50±5	60±5	60±5	80±5	75±5	80±5
Résistivité* électrique à 20° C $\Omega$ mm <sup>2</sup> /m	0.0359	0.0639	0.115	0.246	0.0862	0.1724
Conductibilité électrique à 20°C % IACS	48	27	15	7	20	10

**Tableau II.5 :** Propriétés physiques du matériau et la teneur en Nickel

On fabrique une grande variété de formes des pastilles de contact. Les formes les plus courantes sont motionnées par la figure II. 5.



**Figure II.5 :** Forme des pastilles de contact [17]

Les surfaces de contact < 12 mm<sup>2</sup> peuvent être fabriquées sans apport de brasure. La qualité de soudage (rapport de la surface brasée sur la surface de contact) dépend de la technique d'assemblage. Par contre les surfaces de contact > 12 mm<sup>2</sup> et

dans les cas de pourcentage de nickel élevé, un apport de brasure est souvent nécessaire.

Dans les cas d'assemblage par brasage par résistance, une brasure contenant du phosphore est recommandée. Dans le cas d'assemblage par brasage à la flamme, un matériau avec une sous-couche d'argent est préférable, tableau II .6.

<b>Brasage par résistance</b>	<b>Brasage</b>	
Erosion comparative à 12A :	AgNi 90/10	<b>18%</b>
	Ag	<b>100%</b>

**Tableau II.6 :** Brasage par résistance et érosion du matériau AgNi [17]

Les alliages de 20, 30, 40 % d'AgNi sont généralement utilisés pour les contacts mobiles dans les interrupteurs (disjoncteurs, RCCB) compte tenu de la qualité de la mobilité de l'arc malgré sa tendance au soudage.

Leurs Applications sont dans tout type d'interrupteur utilisant du courant entre 0.5 et 250 A et 24 et 600V.

Le matériau Argent-Nickel est idéal pour les contacts mobiles dans les dispositifs de sécurité avec un courant nominal plus élevé que 32 A. Il convient particulièrement aux relais et contacteurs opérant entre 0.5 et 20 A. L'alliage Argent-Nickel équipe un ensemble d'appareillage électrique tel que :

- Relais ;
- Contacteurs (< 20 A) ;
- Interrupteurs ;
- Disjoncteurs ;
- Boutons poussoirs.

L'utilisation de ces équipements dans la plupart des cas est le domaine de :

- Automatismes industriels ;
- Circuit de distribution finale ;
- Appareils ménagers ;
- Protection de lignes.

### II.3.2.4.3. Le ternaire Ag-C-Ni

Le matériau Ag-C-Ni, se présente suivant une composition bien définie, dont l'élément Argent prend une grande proportion, vu les avantages de ce dernier tel que la conductivité. Le tableau II.7, illustre la composition du matériau ternaire, ainsi, que la taille des grains

	Ag	C	Ni
<b>Composition</b>	80 % mini	0.1 - 5 %	20 % maxi
<b>Taille du grain</b>		< 5 $\mu$	2 - 5 $\mu$

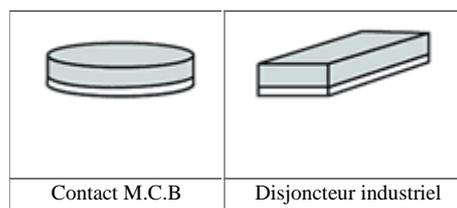
**Tableau II.7 :** Teneur en %, et taille des grains du ternaire Ag-C-Ni [17]

Les pastilles des contacts électriques sont produites par le procédé d'usinage, généralement par compression unitaire où découpe de bandes, la figure II.6, montres la structure du matériau Ag-C-Ni dont la teneur est 94-4-2.



**Figure II.6 :** Structure du matériau Ag-C-Ni [17]

Les pastilles des contacts peuvent être conçues avec une sous-couche en Ag ou en AgNi, avec ou sans couche de brasure pour faciliter l'assemblage. Les formes les plus communes sont représentées sur la figure II.7.

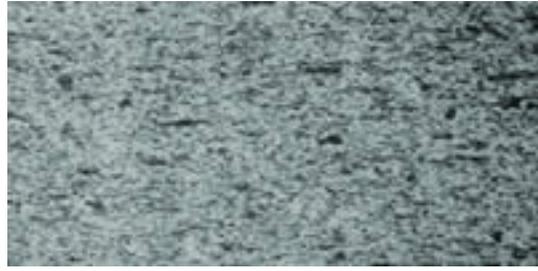


**Figure II.7 :** Forme des pastilles des contacts [17]

### II.3.2.4.4 Argent-Fer (Ag-Fe)

Le matériau Argent-Fer est utilisé pour l'élaboration des pastilles de contact est le binaire argent fer, est obtenu par le procédé de la métallurgie des poudres composée de l'extrusion, le laminage et la compression unitaire. Sa teneur en

pourcent est de 91.2%, 8.4% et 0.4 dopant, avec une taille des grains de 1 à 5  $\mu$ , figure II. 8.

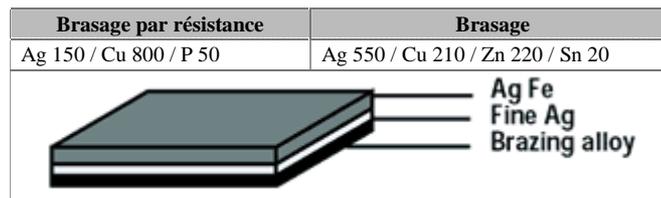


**Figure II. 8 :** Structure du matériau Ag- Fe

Le matériau argent-fer présente les caractéristiques physiques indiquées sur le tableau II.8, son soudage est possible sans apport de brasure. Dans le cas des pastilles de grande section, un apport de brasure est souhaitable pour un meilleur assemblage figure II.9.

Teneur en Fe ( % )	8.4
Agent de dopage	Re = 0.4
Densité théorique g/cm <sup>3</sup>	10.23
Dureté Vickers	65
Conductibilité électrique IACS %	50

**Tableau II. 8 :** Caractéristiques physiques du matériau Ag- Fe



**Figure II.9 :** Apport de brasure et assemblage d'une pastille

La littérature spécialisée dans l'élaboration des pastilles de contact montre que le matériau argent-fer est un excellent substitut de AgNi, pour tout type d'interrupteur utilisant du courant de 0.5 et 250 A et 24 et 600 V. Ce matériau est idéal pour les contacts mobiles dans les dispositifs de sécurité avec un courant nominal plus élevé que 32A. Il convient également particulièrement pour les relais et les contacteurs opérant entre 0.5 et 20 A. La figure II.10 montre les performances des résultats électriques de ce matériau par rapport à l'érosion.

1000 A Test de contact

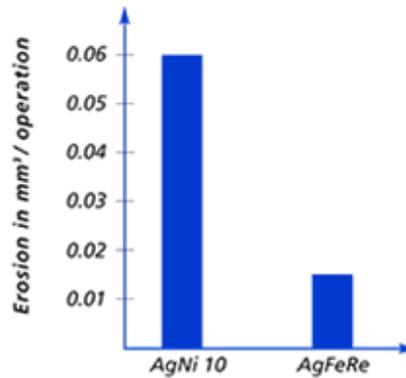
Courant : 220 V

Dimensions : 10 x 10 mm

Opérations : 1000

Vitesse : 1 m/s

3 rebonds : 5 ms



La figure II.10 : Performances par rapport à l'érosion

#### II.4. Conclusion

L'étude des matériaux utilisés pour l'élaboration des contacts électriques a montré qu'on pouvait disposer d'un panel assez étendu et riche et où la composition chimique joue un rôle prépondérant.

Dans les alliages monotectiques binaires à base d'argent on retrouve le fer, le nickel et le tungstène. Pour les alliages ternaires, on a le système argent-nickel-carbone.

La connaissance des propriétés électriques, chimiques et mécaniques des divers matériaux permet de choisir le plus adapté pour une utilisation précise en s'appuyant sur les principes théoriques de la physique, de la chimie et de la mécanique des solides.

## **CHAPITRE III-1**

**Procédés de fabrication des contacts  
électriques.**

**Phénomènes générés par l'apparition  
de l'arc électrique**

### **III-1.1. Introduction**

Nous avons consacré cette partie à l'élaboration des contacts électriques à base d'argent qui se présentent, dans la majorité des cas, comme des alliages monotectiques.

Les contacts sont très souvent élaborés par les procédés connus de la métallurgie des poudres.

La poudre est tout d'abord pressée (habituellement à froid) dans une matrice de forme adaptée. L'objet poreux ainsi formé est alors chauffé dans une atmosphère de gaz inerte à haute température, ce qui favorise l'agglomération des particules de métal.

Les dimensions, la densité et les propriétés mécaniques du métal comprimé peuvent être modifiées par des procédés supplémentaires tels qu'un pressage répété ou un traitement à chaud...

Les particules de poudre doivent être de l'ordre d'un à plusieurs centaines de microns. La plupart des poudres résultent de la fragmentation d'un métal ou d'un alliage fondu. D'autres poudres sont fabriquées par broyage de métal solide. Certaines sont produites par voie chimique, par exemple par réduction ou par précipitation.

Les pastilles sont élaborées selon les étapes suivantes : pressage, frittage, calibration et recuit. Les contraintes résiduelles générées pendant le calibrage sont relaxées par des traitements de recuit.

Le recuit permet la restauration et la recristallisation des grains : l'accroissement de température permet l'annihilation des défauts dans les joints de grains. Une sous-couche d'argent est ajoutée pour permettre le brasage de la pastille sur son support [27, 28].

Les pastilles sont élaborées afin de répondre à plusieurs exigences, notamment au cours de l'apparition de l'arc électrique.

Les différentes opérations d'obtention des pastilles peuvent être décrites par l'organigramme présenté figure III-1.1.

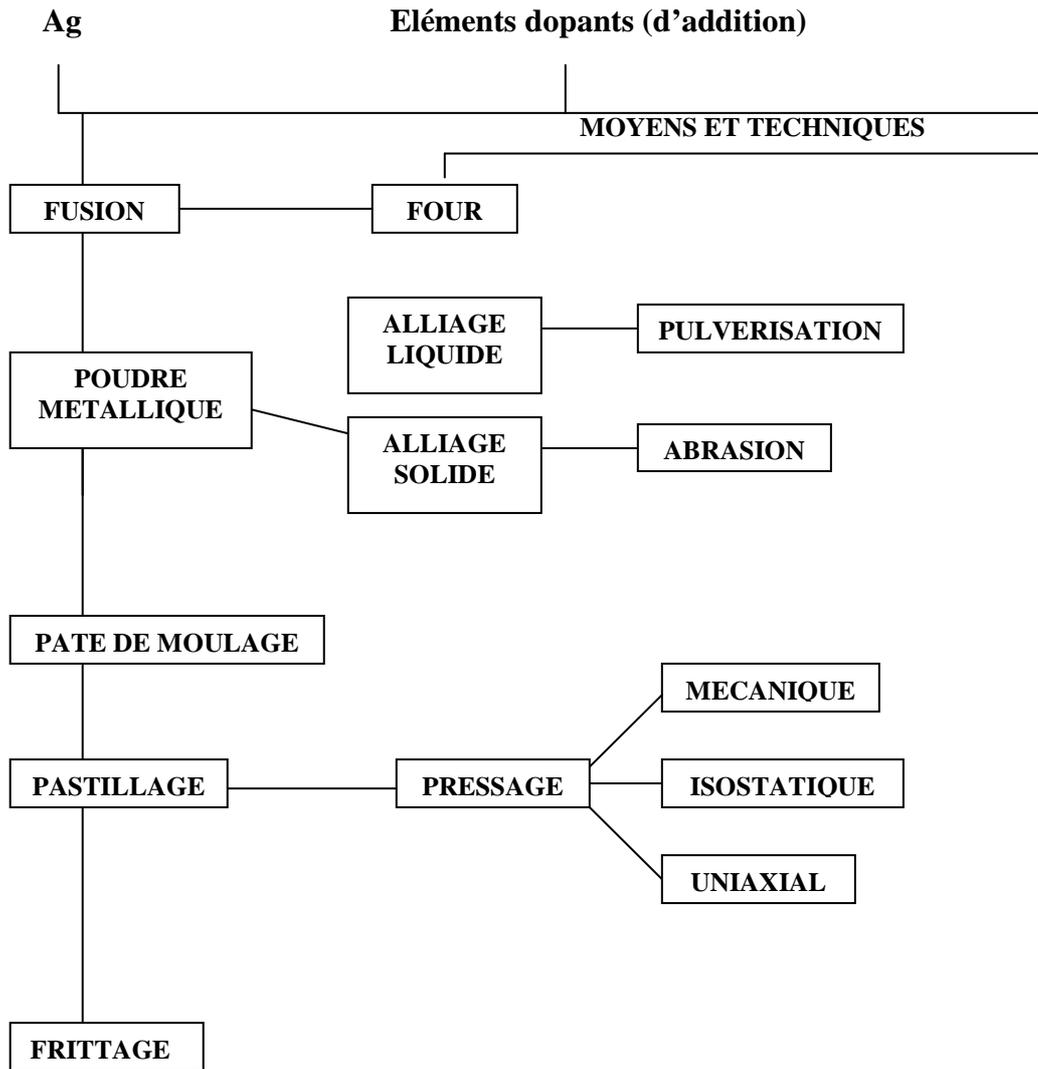


Figure III-1.1 : Schéma général de fabrication des pastilles de contact

### III-1.2. Elaboration des poudres

L'obtention de poudre métallique est un des points clé du procédé d'élaboration des pastilles de contact réalisé à partir de l'alliage solide ou liquide.

#### III-1.2.1. Méthodes d'obtention de poudre d'alliage

##### III-1.2.1.1. A partir de l'alliage solide

La poudre est obtenue par broyage désigné, également, sous l'appellation de mécanosynthèse. Cette dernière rencontre de nos jours un intérêt grandissant dépassant largement le cadre des contacts électriques. Elle consiste à faire subir à des

poudres d'argent et de renfort un broyage très énergétique qui augmente l'énergie de surface des composés et conduit ainsi à la formation de composites assez homogènes.

La poudre peut s'obtenir par abrasion du lingot sur un disque revêtu de carbure de silicium. En vue de limiter l'échauffement dû aux frottements, rendant l'alliage ductile et collant, il est abrasé à basse température à l'aide d'un système de réservoir d'air liquide qui est en contact avec le lingot.

### **III-1.2.1.2. A partir de l'alliage liquide**

La poudre est obtenue à partir de l'alliage liquide et dont la température de fusion n'excède pas 1000 °C.

Plusieurs méthodes peuvent être employées. La pulvérisation sous vide est un procédé qui consiste à faire fondre l'alliage dans un four sous vide. Une chambre contenant le four est mise sous une surpression d'hydrogène qui se dissout en grande quantité dans le métal liquide.

Le creuset est ensuite remonté jusqu'à ce qu'un tube de transfert, relié à une chambre supérieure, plonge au fond du métal liquide. La chambre supérieure maintenue sous vide est enfin mise en communication avec le tube, au moyen d'une vanne, et le métal liquide afflue en explosant dans la chambre supérieure sous la forme de fines gouttelettes pulvérisées par l'hydrogène quittant liquide. La poudre obtenue est d'une grande pureté.

Le deuxième procédé est la pulvérisation d'une électrode tournante. Le principe consiste à fondre l'extrémité d'une électrode constituée par l'alliage désiré. Cette électrode tourne axialement à grande vitesse (1000 à 2000 tr/mn) et la force centrifuge pulvérise le métal fondu en gouttelettes sphériques qui se solidifient dans une chambre.

Les opérations sont réalisées sous gaz neutre (argon, hélium). La contre électrode de tungstène est fixe. Ce procédé fournit des poudres sphériques de grande pureté. Il exige, cependant, l'élaboration préalable d'un lingot cylindrique de l'alliage, de composition parfaitement homogène et sans défauts mécaniques.

### **III-1.2.5. Conception des pastilles de contacts**

Les pastilles sont élaborées selon les étapes suivantes : pressage, frittage, calibration et recuit. Les contraintes résiduelles générées pendant le calibrage sont relaxées par des traitements de recuit.

Le recuit permet la restauration et la recristallisation des grains : l'accroissement de température permet l'annihilation des défauts dans les joints de grains. Une sous-couche d'argent est ajoutée pour permettre le brasage de la pastille sur son support.

### **III-1.3. Le pressage**

L'opération de mise en forme d'une poudre ou d'un mélange de poudres a pour but de former une pastille de forme et dimension déterminées, et ayant une cohésion suffisante pour qu'elle puisse être manipulée dans l'opération ultérieure de frittage.

La compacité du comprimé joue un rôle essentiel dans ses propriétés surtout pour l'étape suivante de frittage. On distingue trois types de compression :

- la compression mécanique ;
- la compression isostatique ;
- la compression uniaxiale hydraulique.

#### **III-1.3.1. La compression mécanique**

Dans ce type de presse, la descente du piston supérieur se fait à hauteur constante ; il en résulte qu'un excès de matière lors du remplissage du moule entraîne une forte pression avec risque de déformation de ce dernier. Dans le cas contraire, la pièce n'aura pas le compactage désiré.

#### **III-1.3.2. La compression isostatique**

Le principe du pressage isostatique est basé sur la loi de Pascal. Une pression appliquée sur un liquide (ou un gaz) statique se propage également et exerce sur les surfaces atteintes des forces directement proportionnelles aux surfaces.

En immergeant une enveloppe souple remplie de poudre dans une enceinte à huile ou à gaz qui peut être montée en pression, on réalise un pressage isostatique.

Le pressage isostatique est un procédé de façonnage agissant sur toutes les faces du matériau. Cette technique présente de nombreux avantages :

- Obtention d'une densité uniforme dans toutes les zones de la pièce.
- Application à diverses formes de pièces mêmes les plus compliquées, qui dans le cas de la compression uniaxiale ne pourraient être démoulées.

Mais cette technique de pressage est utilisée dans l'industrie dans le cas de formes complexes.

### **III-1.3.3. La compression uniaxiale hydraulique**

Contrairement à la compression isostatique, c'est la technique de pressage la plus utilisée dans l'industrie. La pression est transmise à la poudre par un ou plusieurs pistons en acier traité.

En compression uniaxiale hydraulique trois types d'outillage sont utilisés :

- à simple effet ou compression unilatérale ;
- à double effet ou compression bilatérale ;
- à matrice flottante.

Au cours de la compression unilatérale, le piston inférieur est fixe. Le piston supérieur assurant à lui seul la compression de la poudre.

L'inconvénient de cette méthode est que le compactage obtenu est non homogène : la poudre se situant à proximité du poinçon inférieur sera la moins compactée alors que les couches de poudres situées au voisinage du poinçon mobile sont les plus tassés.

Lors de la compression à double effet, la pression est appliquée simultanément par les poinçons inférieur et supérieur, ce qui a pour but d'homogénéiser la pression à l'intérieur de la pièce à mettre en forme.

En ce qui concerne les presses à matrice flottante, elles ne reçoivent la pression que d'un seul côté, mais la matrice dite flottante se déplace dans le même sens, ce qui fait que le résultat est le même que pour le pressage à double effet décrit précédemment.

### **III-1.4. Frittage**

La définition proposée par Cizeron [29] est la suivante :

« Le frittage est un processus faisant évoluer par traitement thermique un système constitué de particules individuelles (ou un aggloméré poreux), en l'absence de pression externe exercée ou sous l'effet d'une telle pression, de sorte qu'au moins certaines des propriétés du système (sinon toutes) soient modifiées dans le sens d'une réduction de l'énergie libre globale du système.

Parallèlement, cette évolution entraîne une diminution importante (sinon complète) de la porosité initiale. Enfin, le processus suppose qu'au moins une phase solide existe constamment pendant tout le traitement thermique, de façon à conserver une certaine stabilité de forme et de dimension au système considéré ».

Plus simplement, le frittage est la consolidation par action de la chaleur d'un agglomérat granulaire plus ou moins compact, avec ou sans fusion d'un ou de plusieurs de ses constituants.

Le Frittage assure les fonctions suivantes :

- Il permet de maîtriser la densité de la matière ; comme on part d'une poudre et que celle-ci ne fond pas, on peut maîtriser la taille des grains de poudre (granulométrie) et la densité du matériau, selon le degré de (compactage) initial des poudres et/ou l'utilisation de dopants, et/ou l'adjonction de liants ...
  
- Il permet d'obtenir des matériaux durs mais fragiles, à porosité contrôlée, inerte chimiquement (faible réactivité chimique et bonne tenue aux corrosions) et inerte thermiquement ;

- Il permet de maîtriser les dimensions des pièces produites : comme il n'y a pas de changement d'état, les variations de volume, de dimensions, sont peu importantes par rapport à la fusion (phénomène de retrait).

Le frittage peut être réalisé avec ou sans liant. Le procédé sans liant concerne essentiellement les poudres métalliques. Celles-ci sont fortement comprimées et mises en forme dans une matrice, sous l'action d'un ou de plusieurs poinçons. Les pressions atteignent communément plusieurs milliers de bars.

Après démoulage, on obtient des préformes plus ou moins fragiles qui sont ensuite chauffées sous vide ou dans une atmosphère contrôlée, à une température inférieure à la température de fusion de l'élément principal. C'est la phase de frittage proprement dite.

Sous l'effet de la chaleur, les matériaux diffusent les uns dans les autres et les grains de poudre se lient de façon relativement solide, suffisamment en tous cas pour que l'on puisse obtenir des composants mécaniques utilisables.

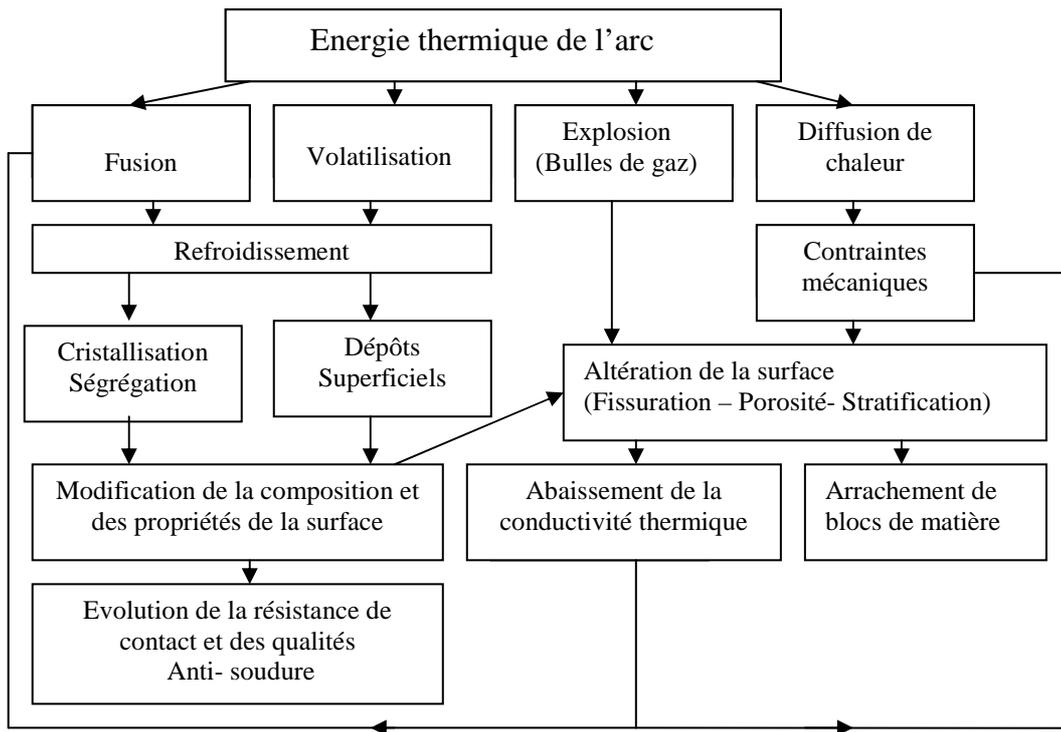
### **III-1.5. Comportement des matériaux de contact durant un arc électrique**

Nous commençons tout d'abord par donner une définition du phénomène appelé arc électrique. Il s'agit d'une décharge à forte densité de courant pour laquelle les processus thermiques sont dominants. Ils existent pour les conditions suivantes:

- une pression de l'ordre de la pression atmosphérique;
- une intensité de l'ordre de 1A.

Les propriétés thermiques (température du milieu élevée) et chimiques (conditions idéales pour certaines réactions) des arcs leur donnent de multiples applications, en particulier dans le secteur de l'électrotechnique, dont on peut citer quelques exemples les appareils de coupure.

L'arc électrique a de nombreux effets sur les contacts. Le matériau est alors soumis à de très fortes contraintes thermomécaniques, à des changements d'état violents ou à des décompositions (figure III-1.2).



**Figure III-1.2 :** Effet de l'arc électrique sur un contact en matériaux composites

Cependant, cet arc a une utilité : il limite la tension à ses bornes et l'énergie électromagnétique qu'il devrait dissiper

Par la suite, nous allons présenter quelques phénomènes dont les contacts électriques font l'objet.

### III-1.6. Comment s'amorce ou apparaît un arc électrique ?

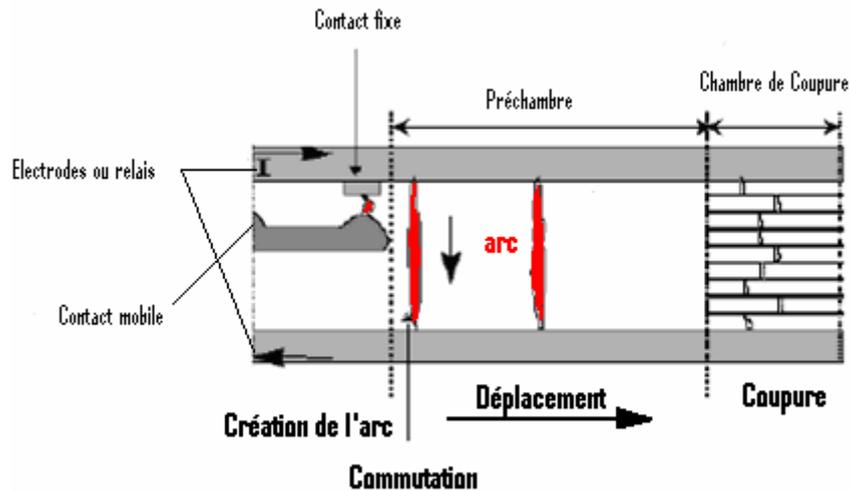
Lorsque deux électrodes (contacts) sont encore en contact, elles prennent appui seulement sur les aspérités et irrégularités de leur surface et à ce moment que les lignes de courant se concentrent ainsi en un très petit nombre de contacts. Au moment de la séparation des contacts, la totalité de l'intensité du courant passe d'une électrode à l'autre par des micro-contacts de l'ordre de  $10^{-6} \text{ mm}^2$ .

L'effet Joule est alors très intense et conduit à une augmentation considérable de la température. Le point de d'ébullition du matériau formant les électrodes est alors atteint et il se forme des ponts fondus métalliques entre les électrodes.

Les zones d'encrage des ponts sur les contacts sont à une température voisine de la température d'ébullition du matériau, ainsi l'émission thermo-ionique est très possible. L'environnement des ponts fondus est alors un mélange de gaz ambiant et de vapeur métalliques.

Lorsque les électrodes s'écartent d'avantage, on assiste à un phénomène appelé rupture des ponts fondus, qui sont soumis à des fortes convulsions et instabilités. Ces ruptures prennent la forme d'explosions et il y a éjection de micro-gouttettes du matériau fondu à une vitesse de 100 à 300 m/s, permettant ainsi l'ionisation de l'air puis l'apparition d'un arc électrique [30-33].

L'arc soumis à des effets électromagnétiques et gazodynamiques, saute de l'électrode mobile vers l'électrode de commutation et se déplace ensuite jusqu'au fond du boîtier ou il sera découpé en petit tronçons afin de favoriser son extinction figure III-1.2. Le phénomène de coupure ne dure que quelques millisecondes.



**Figure III-1.2** : Création et extinction de l'arc électrique

Il existe trois méthodes pour que, un arc électrique s'amorce:

- Transition continue ;
- Contact ;
- Surtension.

### **III-1.6.1. Transition continue**

Le système est au départ dans un état de décharge luminescente. La cathode est recouverte par le plasma de décharge. Si on augmente l'intensité, la tension d'extraction des électrons augmente et la température s'élève. L'émission thermo-électronique devient majoritaire. On arrive ainsi, d'une manière continue, à passer d'une décharge luminescente à un arc électrique.

### **III-1.6.2. Contact**

L'amorçage de l'arc par contact se fait lorsque deux pastilles de métal traversées par un courant suffisant et à leurs séparation, grâce aux irrégularités de la surface, le courant passe par un contact très fin; la température s'élève par effet joule jusqu'à la fusion du métal. On a donc un filet de métal fondu très fin par lequel passe tout le courant. Lors de la rupture du pont fondu, on est dans les conditions de formation d'un arc électrique.

### **III-1.6.3. Surtension**

Lorsque la tension dépasse la tension de claquage, une étincelle apparaît. On obtient alors un arc par phénomène d'avalanche.

### **III-1.7. Bilan énergétique**

Lors de l'apparition de l'arc électrique au niveau de la cathode, la puissance fournie (par le circuit) peut être décomposé de la manière suivante:

$$P = P_{\text{vap}} + P_{\text{th}} + P_{\text{ray}} + P_{\text{dec}}$$

Avec:

- $P_{\text{vap}}$  : puissance dissipée par vaporisation du métal ;
- $P_{\text{th}}$  : puissance dissipée par conduction thermique ;
- $P_{\text{ray}}$  : puissance perdue par rayonnement ;
- $P_{\text{dec}}$ : puissance dissipée par l'émission des électrons.

Mais, il existe d'autres formes de perte de puissance, mais elles sont négligeables devant celles-ci comme le montre la figure III-1.3, [33].

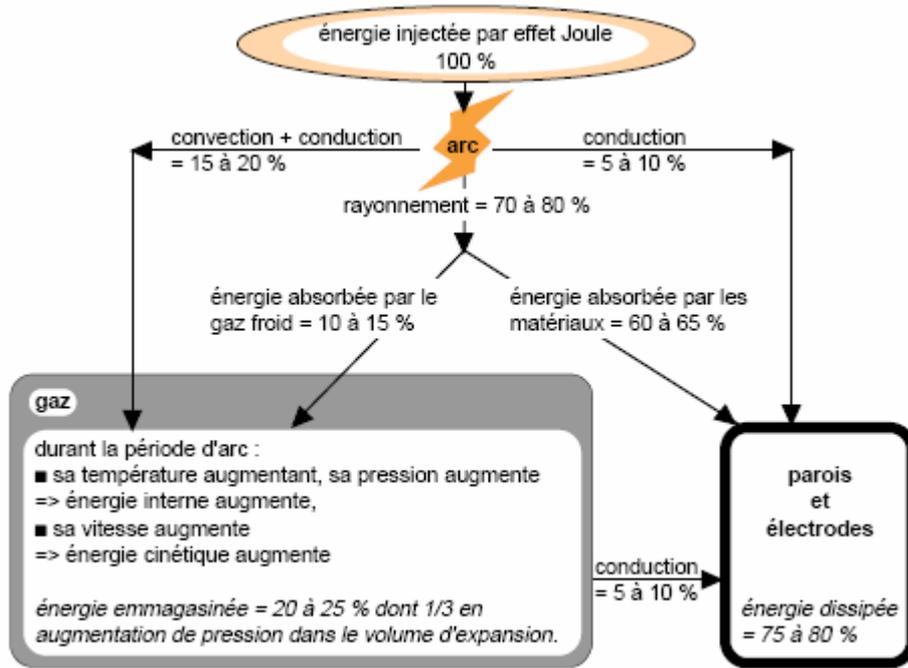


Figure III-1.3 : Flux énergétiques lors de l'apparition de l'arc électrique

### III-1.8. Changements de phase dus à l'arc sur les contacts

#### III-1.8.1. Vaporisation

La perte de matière par vaporisation est prépondérante quand la température maximale atteinte est proche du point d'ébullition. La perte par vaporisation d'un matériau dépend de la masse molaire de l'espèce passant en phase vapeur et de l'aire des surfaces. Si l'érosion d'un composite est due principalement à la vaporisation, la nature du renfort n'aura que peu d'influence sur l'érosion. Le contact peut aussi être le siège d'émission de jets de plasmas.

#### III-1.8.2. Fusion

La fusion du matériau, sous l'effet de la pression ionique de l'arc, intéresse la zone au contact du pied de l'arc. La matière fondue est alors chassée sur les cotés. Une

collerette apparaît. Si la vitesse du front liquide est suffisante, des gouttelettes seront éjectées radialement. Il peut y avoir aussi présence de gouttelettes d'éjection axiale due au retour élastique du bain fondu suite à l'interruption de l'arc. Celles-ci vont conduire à un transfert de matière entre électrodes.

### **III-1.9. Contraintes thermomécaniques dans les contacts**

Le chauffage rapide des contacts peut entraîner deux types de fissuration :

- Chocs thermiques : Lors du chauffage de la zone d'impact, si le matériau est fragile et que les contraintes thermomécaniques dépassent la contrainte à rupture du matériau, la plasticité ne permettra pas de dissiper toute l'énergie : des fissures vont apparaître.
  
- Fatigue thermique : Des variations cycliques de température peuvent conduire aussi à l'endommagement par fissuration, même si les contraintes thermomécaniques générées sont inférieures à la contrainte de rupture.

## **CHAPITRE III-2**

### **Diagrammes de Phases des Alliages Monotectiques Utilisés**

### III-2.1. Introduction

Les propriétés des alliages dépendent de leur constitution et de leur structure. La compréhension de la structure et de l'existence des différentes phases des alliages métalliques implique que l'on connaisse les diagrammes d'équilibre [-].

Leur étude est d'un grand intérêt, mais comme nous nous intéressons à un type bien particulier d'alliages nous n'exposerons ici que les diagrammes présentant une monotexie. Nous aborderons ce type de transformation dans le diagramme d'équilibre et présenterons les systèmes qui sont à la base de l'élaboration des contacts électriques.

### III-2.2. Définition des alliages monotectiques

Un alliage monotectique, est un mélange métallique, qui à une température donnée donne naissance à deux phases liquides immiscibles au-dessous d'une courbe appelée lacune de miscibilité (gap de miscibilité, courbe de démixion ou démixtion).

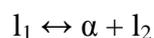
Les diagrammes d'équilibres des alliages binaires présentant une lacune de miscibilité en phase liquide correspondent à une démixion à l'état liquide et conduisent à un domaine biphasé dont la frontière possède une concavité vers le bas.

Ces domaines biphasés (deux liquides immiscibles) s'appuient ensuite sur les domaines mono ou biphasés de l'état solide. Il y a donc, dans tous les cas, un domaine où la transition liquide-solide passe nécessairement par une réaction de type eutectique (transformation ou réaction monotectique) ou péritectique (transformation ou réaction syntectique) [34-36].

Les alliages monotectiques faisant l'objet de notre étude, nous allons détailler la transformation monotectique.

### III-2.3. La transformation monotectique [37-38]

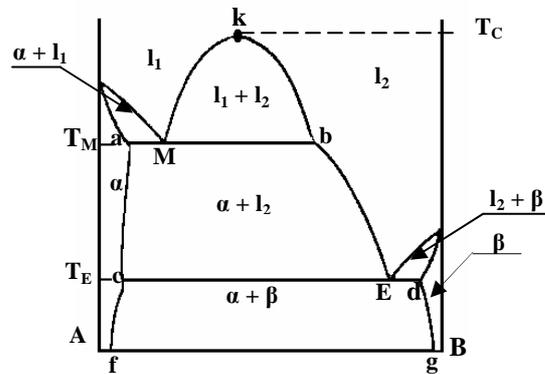
On considère le diagramme de phase de la figure III-2.1. L'apparence d'une lacune de miscibilité à l'état liquide est indiquée par une réaction invariante du type :



Cette réaction, où le liquide se décompose durant un refroidissement, a une phase solide et une nouvelle phase liquide, est appelée la réaction monotectique. Dans cette dernière figure les lignes monovariantes qui sont tracé dans les régions biphasées pour indiquer les compositions de coexistence des différentes phases.

Au-dessus de la température monotectique  $T_M$ , deux régions biphasées se présente. L'une est  $(l_1 + \alpha)$  à  $T_A$ , et l'autre est la lacune de démixtion représenté par la régions  $l_1 + l_2$ .

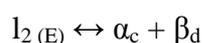
De la température monotectique  $T_M$  jusqu'à la température critique  $T_C$ , les deux liquides sont immiscible, et se séparent en deux couches. Une couche correspond dans la composition à des points sur la ligne  $Mk$  et l'autre couche aux points de la courbe  $bk$ .



**Figure III-2.1 :** Diagramme de phases binaires comportant une monotexie

A  $T_C$ , la ligne monovariante est dégénérée en un point et les deux phases liquides  $l_1$  et  $l_2$  sont à ce point indiscernables. La partie supérieur de la phase liquide est une région qui montre une miscibilité complète des deux composants on désigne ce liquide par  $l$ .

En dessous de la température monotectique in n'existe qu'une seule région biphasée. C'est le domaine  $\alpha + l_2$ . Pour illustrer complètement le diagramme avec consommation du liquide  $l_2$ , la figure II-2.1 est dessiné avec une réaction eutectique qui se présente à basse température :



### III-2.4. Identification des dangers causés par les produits utilisés

Les alliages de forme solide en vente sur le marché ne sont généralement pas considérés comme dangereux. Cependant, le meulage, la fonte, le soudage, le découpage, ou n'importe quel autre processus peut générer un dégagement de poussières ou de vapeurs dangereuses.

L'exposition à ces produits se passe par inhalation, contact ou ingestion. Le danger le plus courant est l'inhalation de poussières ou de vapeurs. Certains matériaux peuvent provoquer des irritations au niveau de la peau [17].

Dans le tableau III-2.1, nous exposons les limites tolérées en France et aux Etats-Unis pour les produits utilisés dans les contacts électriques.

Métal	Seuil limite des valeurs	
	En France (mg/m <sup>3</sup> )	Aux USA (mg/m <sup>3</sup> )
Argent	0.1	0.1
Fer	5	5
Nickel	1	0.05
Tungstène	-	5

**Tableau III-2.1** : Limite de tolérance des produits utilisés [17]

L'exposition à ces éléments peut causer les dangers suivants [17] :

Pour l'argent : Une exposition excessive peut provoquer une affection nommée Aggria, une décoloration des yeux, des muqueuses et de la peau.

Pour le fer : Empoisonnement par voie intrapéritonale. Réponses carcinogènes incertaines lors d'expérimentation sur des données à effets tumorigènes. Effets systémiques chez l'être humain : irritabilité, nausée, ou vomissement, anémie normocytaire. Le fer est potentiellement toxique sous toutes ses formes et par toutes les voies d'exposition.

Pour le nickel : Les vapeurs peuvent irriter l'appareil respiratoire et causer des maladies respiratoires ainsi que des réactions asthmatiques allergiques. Le contact

avec la peau peut également provoquer des irrptions cutanées (nickel-démangeaisons). Le nickel et ses composants ont été signalés comme pouvant causer le cancer des poumons et des sinus.

Pour le tungstène : Inhalation dangereuse. Modérément toxique par voie non spécifiée. Irritant pour la peau et les yeux.

### III-2.5. Propriétés physiques et chimiques des produits étudiés

Dans le tableau III-2.2, sont regroupées quelques propriétés sur les éléments qui intéressent notre étude.

Matériau	Forme	Couleur	Odeur	Solubilité dans l'eau (g/l)	Solubilité dans un acide inorganique
Argent	Solide	Blanc	Sans odeur	Insoluble	Soluble
Fer	Solide	Blanc	Sans odeur	Insoluble	Soluble
Nickel	Solide	Gris	Sans odeur	Insoluble	Soluble
Tungstène	Solide	Gris-blanc	Sans odeur	Insoluble	Soluble

**Tableau III-2.2** : Propriétés des éléments étudiés [17]

### III-2.6. Diagrammes de phases binaires

Les diagrammes de phases des systèmes considérés sont présentés ci-après.

#### III-2.6.1. Diagramme de phases Ag-W

Le diagramme de phases Ag-W n'a pas été retrouvé, mais des travaux ont mentionné que ce système présente une immiscibilité totale à l'état liquide [39].

#### III-2.6.2. Diagramme de phases Ag-Fe

Le diagramme d'équilibre entre phases du système Ag-Fe (figure III-2.1) présente quatre transformations invariantes dues à la présence de variétés allotropiques du fer [40, 41].

Une transformation de type eutectoïde se produit à 911 °C suivant la réaction :



Une transformation de type eutectique à 961 °C décrite par la réaction :



La troisième transformation est également eutectique et apparaît à 1398 °C selon :



Enfin la transformation monotectique a lieu à 1533 °C et se présente par la réaction :



La frontière du domaine biphasé ( $\text{L}_1 + \text{L}_2$ ) n'est pas définie.

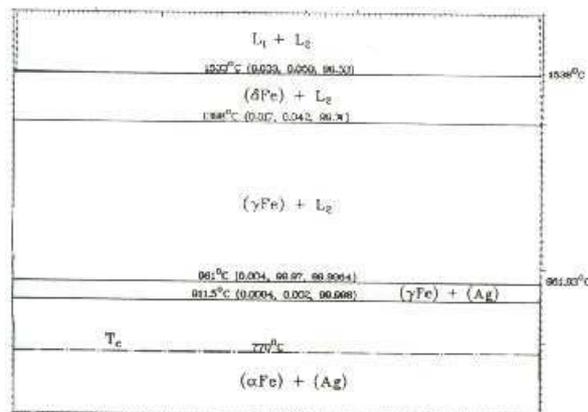


Figure III-2.1 : Diagramme de phases du système Ag-Fe

### III-2.6.3. Diagramme de phases Ag-Ni

Le diagramme d'équilibre entre phases du système Ag-Ni (figure III-2.2) est simple [40, 41]. Il présente deux réactions invariantes. La première, de type eutectique, se produit à 960 °C suivant la réaction :



La deuxième est la transformation monotectique apparaissant à 1435 °C définie par :

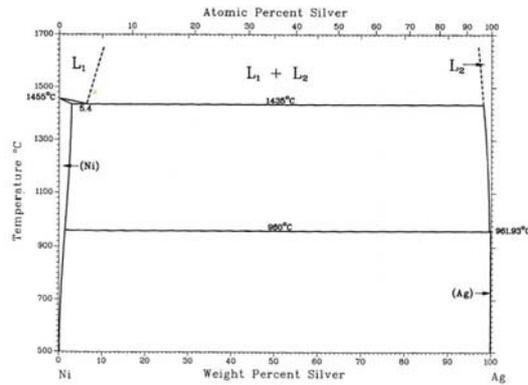
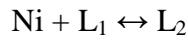


Figure III-2.2 : Diagramme de phases du système Ag-Ni

### III-2.7. Diagramme de phases ternaire

Le seul ternaire qui intéresse notre étude est Ag-C-Ni. Aucun travail n'a été trouvé dans la littérature en ce qui concerne ce système. Néanmoins, puisque ce ternaire présente un binaire limitrophe (Ag-Ni) où se trouve une démixtion à l'état liquide, il est fort probable qu'elle se prolonge dans le ternaire évoqué [42].

## **CHAPITRE III-3**

### **Partie Expérimentale**

### III-3.1. Introduction

Dans cette partie, nous avons réalisé un essai mécanique de dureté Vickers. Cet essai a été effectué sur une pastille d'un disjoncteur à l'université de Biskra dans le laboratoire de Métallurgie N° 1 (Métallographie et traitements thermiques).

### III-3.2. Présentation du disjoncteur utilisé

Il s'agit d'un disjoncteur de construction française, marque Merlin-Gerin (figure III-3.1) se trouvant au laboratoire de la section matériaux (Département de génie électrique de l'université de Batna) et présentant les caractéristiques suivantes :

- $U_n = 500 \text{ V } \sim$  ;
- En alternatif : Pouvoir de coupure (PC) = 18 KA à une tension de 380 V  $\sim$  ;
- En continu : Pouvoir de coupure (PC) = 15 KA à une tension de 250 V --- ;
- N° de série compact C 250.



**Figure III-3.1** : Disjoncteur compact C 250

### III-3.3. Principe de l'essai Vickers

Le pénétrateur est une pyramide de diamant à base carrée ; l'angle entre deux faces opposées est de  $136^\circ$ , choisi pour avoir une correspondance avec l'échelle de dureté Brinell.

L'avantage d'un pénétrateur pyramidal (comme d'un pénétrateur conique) est que la loi de similitude est automatiquement respectée et, quand on fait varier la charge, on obtient des empreintes géométriquement semblables entre elles, donc des valeurs identiques pour la dureté. De plus, l'avantage du diamant est l'absence de déformation du pénétrateur quand on mesure des duretés élevées.

Le diamant laisse une empreinte carrée et l'on mesure la longueur de la diagonale de l'empreinte (ou la moyenne des deux diagonales) à 0,002 mm près, grâce à un microscope micrométrique lié à la machine, et pouvant venir automatiquement se placer au-dessus de l'empreinte [43].

### III-3.4. Précautions opératoires

Pour assurer le bon déroulement de l'essai, il faut tenir compte des instructions suivantes :

- Les empreintes étant petites, les irrégularités de la surface prennent une importance plus grande, particulièrement pour les fortes duretés et les faibles charges ; un polissage aussi parfait que possible est désirable (surface rectifiée ; papier à polir en émeri 00 ; polissage micrographique à l'alumine).
- La distance entre le centre d'une empreinte et le bord de la pièce ou les côtes d'une autre empreinte ne doit pas être inférieur à 2,5 fois la diagonale. L'épaisseur de la pièce doit être supérieure à 1,5 fois la diagonale de l'empreinte.
- La pièce doit reposer sur le support de façon régulière et uniforme.
- L'état du diamant doit être fréquemment vérifié [43].

### III-3.5. Déroulement de l'essai

Nous avons représenté, sur la figure III-3.2, la pastille du disjoncteur compact C 250 avec son support avant de subir les opérations de polissage. La pastille de contact présente une crasse d'oxydes à sa surface de couleur gris foncé.



Pastille usée

**Figure III-3.2 :** Aspect de la pastille avant le polissage

La figure III-3.3 montre la pastille pendant les opérations de polissage puisque le décapage de la couche d'oxyde est assuré progressivement en utilisant du papier abrasif à gros grains puis on diminue au fur et à mesure la taille des grains jusqu'à obtention d'une surface miroir.



**Figure III-3.3 :** Pastille en cours des opérations de polissage

Sur la photographie illustrée par la figure III-3.4, la pastille (polie) est introduite dans le porte-échantillon du microduromètre.

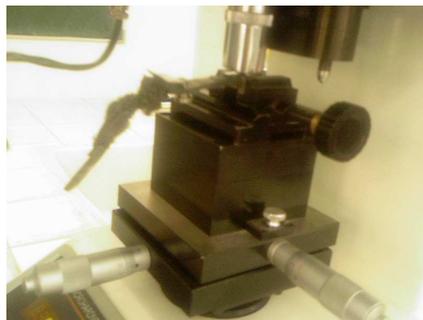


Support du microduromètre

Pastille polie

**Figure III-3.4 :** Pastille dans le porte-échantillon du microduromètre

La photographie suivante (figure III-3.5) montre l'installation de la pastille dans le microduromètre.



**Figure III-3.5 :** Installation de la pastille dans le microduromètre

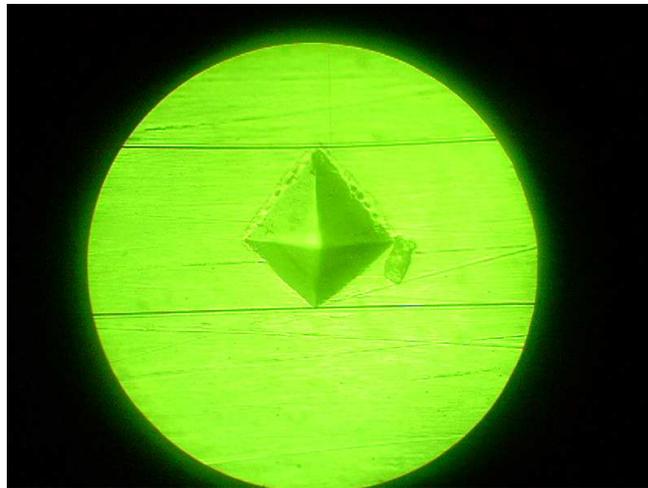
L'expérience est réalisée sur un microduromètre automatisé type AFFRI à affichage digital présenté figure III-3.6. Les conditions de l'essai sont les suivantes :

- Temps de charge 15 secondes ;
- Charge 500 g.



**Figure III-3.6 :** Microduromètre utilisé

Après avoir cadré l'empreinte pour en mesurer la diagonale située entre les deux lignes ajustables à partir du microduromètre (figure III-3.7), le résultat de la dureté Vickers s'affiche directement sur l'appareil.



**Figure III-3.7 :** Empreinte obtenue

### III-3.6. Résultats et discussion

Les résultats obtenus sont les suivants :

$d = 94.676 \mu\text{m}$  (d est la longueur de la diagonale de l'empreinte)

$H_v = 99.108$  (Hv est la valeur de la dureté Vickers)

La dureté obtenue est supérieure aux valeurs obtenues habituellement pour les différentes compositions des pastilles de contacts électriques (voir chapitre II).

Les métaux sont en général très solides, résistent aux différentes contraintes qu'ils peuvent subir et sont caractérisés par des propriétés comme la dureté (résistance aux déformations de surface et à l'abrasion), la résistance à la traction, la résistance à la rupture, l'élasticité (aptitude à reprendre la forme initiale après une déformation), la malléabilité (aptitude à être mis en forme par martelage), la résistance à la fatigue (aptitude à résister à des contraintes répétées), la résilience (aptitude à résister à un choc) et la ductilité (aptitude à subir des déformations sans rupture).

Le résultat obtenu s'explique par le nombre élevé de manœuvres effectuées par les deux pastilles formant les contacts, ce qui provoque la création de contraintes mécaniques superficielles. En général, il entraîne l'usure plus ou moins rapide des corps en contact, et par conséquent la modification de leurs surfaces (modification des propriétés mécaniques).

**CHAPITRE IV**  
**Equations de modélisation de**  
**l'arc électrique**

### **IV.1. Introduction**

Un contact électrique est destiné à établir, supporter et interrompre des courants sous sa tension nominale dans les conditions normales de service et dans les conditions anormales : court-circuit, discordance de phases etc....

La présence d'un courant de défaut déclenche l'ouverture des contacts. Les arcs électriques se forment, ainsi, quasi instantanément à l'intérieur des appareils. En effet, les surfaces réelles de contact se réduisent lors de l'ouverture, ce qui provoque localement la fusion voire même la vaporisation du métal. Donc, l'arc électrique apparaît sans qu'une surtension soit nécessaire.

Ainsi, du point de vue du constructeur, il est souhaitable de réduire la durée de vie de l'arc électrique et par conséquent le temps de coupure car les fortes énergies mises en jeu sont responsables d'une forte érosion des différents matériaux : électrodes, de plus la nécessité d'optimiser ces appareils afin de réduire le coût élevé des tests conduit les professionnels à avoir recours à des outils de modélisation et de simulation numériques des différents aspects du fonctionnement de ces dispositifs.

Cependant, la complexité de ces appareils rendent leur étude délicate et nécessite la prise en compte des phénomènes intervenant durant la coupure : érosion aux électrodes, déplacement de l'arc, optimisation de la chambre de coupure, reclaquage ou pertes radiatives.

Au début des recherches sur les appareils de coupures, de nombreux progrès techniques se sont longtemps appuyés sur des données empiriques. Depuis l'apparition de l'outil informatique, l'arc électrique fait l'objet d'études fondamentales nombreuses [44-48]. Elles ont débuté par une étude monodimensionnelle par la résolution de l'équation de conservation de l'énergie et la loi d'ohm, appelé, équation d'Elenbaas-Heller.

Cette première simulation numérique d'arc a permis de mettre en exergue le rôle des phénomènes physico-chimiques tels que l'ionisation, la conduction thermique et le rayonnement, puis des modèles bidimensionnels sont apparus dans les années quatre vingt, notamment par la modélisation de la colonne d'un arc libre.

## IV.2. Modèle de l'arc (cylindrique)

Un des modèles les plus simples est celui de l'arc cylindrique refroidi par conduction pure à travers le gaz immobile.

Les seules inconnues sont alors, le rayon  $r$ , la température  $T(r)$  et la densité du courant  $j(r)$ . A pression constante, les deux conductivités, électriques  $K_{el}$  et thermique  $\lambda$  ne dépendent que de la température  $T$ . Le champ électrique  $\vec{E}$  est uniforme dans toute la colonne conductrice [7]. L'équilibre thermique est alors donné par l'équation d'elenbaas-Heller :

$$rK_{el}(T)E^2 + \frac{d}{dr} \left[ r\lambda(T) \frac{dT}{dr} \right] = 0 \quad (IV.1)$$

avec les conditions suivantes :

$$T(r_0) = T_0$$

$$i = E \int_0^{r_0} 2\pi K_{el}(r) dr$$

L'équation soluble numériquement, montre d'elle même qu'aux rayons où  $\lambda$  présente un pic du aux dissociations et aux ionisations, le gradient de température  $\frac{dT}{dr}$  s'affaiblit, donnant des paliers dans le profil de  $T(r)$ .

En pratique, les phénomènes en jeu sont plus complexes. Une fraction du métal est éjectée sous forme liquide, par suite de la turbulence des pieds d'arcs. les particules solides peuvent meme se détacher à la suite de fissurations. En outre, une partie du métal éjecté est redéposée soit sur l'électrode d'origine, soit sur l'éctrode opposée, selon la violence des jets de plasma, la distance et le diametre des contacts.

## IV. 3. Notion de striction

Dans les contacts électriques, la surface réelle de contact (ou surface de portée) est toujours très inférieure à la surface apparente. Il y a donc une très forte concentration des lignes de courant à travers ces surfaces relativement faibles, que l'on appelle strictions de contact.

### IV.3 .1. Forces de soudure en présence d'arc

En comparaison avec l'effet joule, l'arc apporte à la striction une énergie considérable et il y a un risque de forte soudure en cas de refermeture sur des surfaces en fusion.

un modèle simplifié résulte des hypothèses suivantes :

- L'énergie d'arc est intégralement et également répartie entre les contacts ;
- La fusion locale est adiabatique (à la valeur  $T_F$ ) ;
- Le volume fondu est hémisphérique de part et d'autre de la striction.

la sphère fondue de rayon  $a$  est donnée par l'équation :

$$\frac{4\pi a^3}{3} = \frac{W_a}{\rho[c(T_F - T_0) + L_F]} \quad (IV.2)$$

avec  $c$ : capacité thermique massique exprimée en J/kg.K ;

$L_F$ : chaleur latente de fusion exprimée en J/kg ;

$\rho$  : masse volumique du métal exprimée en kg/m<sup>3</sup>.

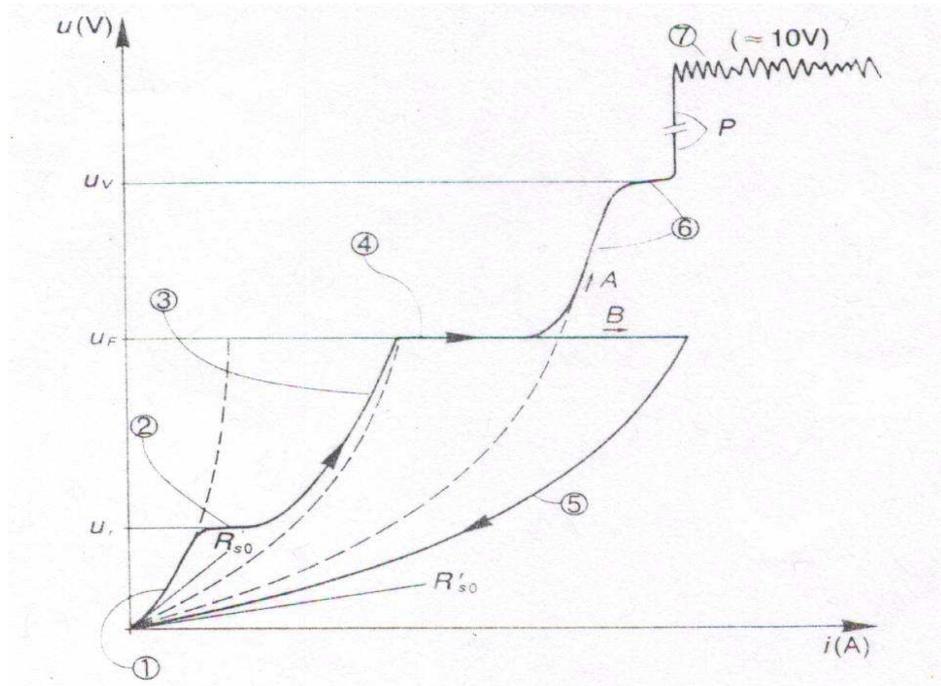
il en résulte une fois le métal refroidi, une force de soudure (rupture lente) :

$$F_S = \pi a^2 R$$

avec  $R$  résistance à la rupture en traction, mais pourrait être remplacée par la résistance à la rupture par choc.

### IV.3 .2 Comportement des contacts en surcharge

La fiabilité de l'appareillage dépend essentiellement des qualités des matériaux de contact, en particulier de celles qui permettent d'éviter la soudure des contacts. La figure IV.1 montre un cycle typique tension/ courant de surcharge, où la striction passe par plusieurs stades [7] :



**Figure IV.1 :** Cycle typique tension/ courant de surcharge

- (1) fonctionnement normal réversible ;
- (2) ramollissement, élargissement brusque ;
- (3) élargissement lent, collages ;
- (4) striction liquide, élargissement à la température  $T_F$  :
  - A vers l'ouverture des contacts ;
  - B vers la soudure des contacts.
- (5) striction soudée de section constante, refroidissement ;
- (6) striction liquide à température croissante ;
- (7) tension d'arc (P création du plasma d'arc ) :
  - $i$  courant à travers la striction ;
  - $R_{s0}$  résistance initiale à froid ;
  - $R'_{s0}$  résistance finale à froid ;
  - $u$  tension de striction ;
  - $u_r$  tension de ramollissement ;
  - $u_F$  tension de fusion ;
  - $u_v$  tension de volatilisation.

- 1)- **zone réversible** : la résistance résulte de la force de contact et de la géométrie les échauffements sont trop faibles pour la modifier ;
- 2)- **zone de ramollissement** : la plupart des métaux manifestent un effondrement de dureté à une certaine température; la dimension de la striction s'accroît ;
- 3)- **zone de collage** : la striction s'agrandit plus lentement ; on observe des collages aléatoires de thermocompression plus que de fusion ;
- 4)- **zone de fusion** : on atteint de façon très nette un palier de fusion sur lequel la striction s'auto-adapte en dimension au courant traversant ;
- 5)- **zone de soudure** : la réduction du courant provoque la solidification ; la tension évolue alors régulièrement ;
- 6)- **zone de volatilisation** : quand l'extension de la striction ne peut plus se faire par ouverture volontaire des contacts (ou par répulsion), la température et la tension croissent jusqu'aux valeurs correspondantes de volatilisation ;
- 7)- **zone d'arc** : dès la volatilisation, l'arc apparaît brusquement ; la tension (environ 10V) existe d'emblée, même pour des distances d'ouverture extrêmement faibles.

#### IV. 4. Hydrodynamique

L'écoulement d'un fluide réel engendre des forces de frottement dues à la viscosité et à la turbulence. La présence de ces forces induit une perte de charge qui est une transformation irréversible de l'énergie mécanique en énergie thermique, donc on étudiera les liquides réels où les forces de frottement jouent un rôle important.

Dans l'écoulement des liquides réels, ils s'impose de faire la distinction entre les écoulements laminaires et les écoulements turbulents [44].

Dans ce chapitre, nous abordons le développement et l'application des équations de mouvement, notamment les équations de Navier-Stokes.

##### IV. 4. 1. Equations de l'hydrodynamique pour un écoulement laminaire

Les forces agissant sur l'élément de volume ( $dx dy dz$ ) sont :

a) la force de volume :  $\rho f_z (dx dy dz)$  ;

b) la force nette de pression :  $-\left[ \frac{\partial p}{\partial z} dz \right] dx dy$  ;

c) la force nette de viscosité ou de frottement ;

$$\left( \frac{\partial \sigma'_{zz}}{\partial z} dz \right) dx dy + \left( \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} dx \right) dy dz + \left( \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} dy \right) dx dz \quad (IV.3)$$

d) les forces d'inertie (accélération) tridimensionnel :  $\rho \frac{dw}{dt} (dx dy dz)$ .

où w est la composante de la vitesse,  $\vec{V} (x,y,z)$  selon la direction z

$$\sigma'_{zz} = \mu \left( \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad \text{et} \quad \sigma_{zz} = -p + \sigma'_{zz}$$

$$\tau_{xz} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (IV.4)$$

$$\tau_{yz} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$

avec  $\sigma'_{zz}$  est la composante normale et  $\tau_{xz}$  et  $\tau_{yz}$  sont les composantes tangentielles de la tension de frottement( ou de cisaillement).

Avec les relations exprimées par l'équation IV.4 la force nette de viscosité par volume unitaire s'écrit comme suit :

$$2\mu \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \mu \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \mu \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$

En regroupant ces termes, on obtient:

$$\mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \mu \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (IV.5)$$

avec w,u,v composantes du vecteur vitesse  $\vec{V}$

Le deuxième terme de l'équation IV.5 exprime la continuité de l'écoulement pour un écoulement incompressible et conservatif, la force nette de viscosité qui est dissipative est alors :

$$\mu \nabla^2 w (dx dy dz) \quad (IV.6)$$

La masse restant constante, l'ensemble des forces satisfait à l'équation de Newton :  $\Sigma(\text{forces}) = (\text{masse}) \times (\text{accélération})$  et la condition d'équilibre des forces selon z permet d'écrire :

$$\mu \nabla^2 w (dx dy dz) - \left( \frac{\partial p}{\partial z} dz \right) dx dy + \rho z (dx dy dz) = \rho \frac{dw}{dt} (dx dy dz) \quad (IV.7)$$

Où, par unité de volume :

$$\mu \nabla^2 w - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho z = \rho \frac{dw}{dt} \quad (\text{IV.8})$$

La condition d'équilibre des forces selon les autres directions peut être écrite de manière identique et puis sous sa forme vectorielles :

$$\begin{aligned} \rho f_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u &= \rho \frac{du}{dt} \\ \rho f_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v &= \rho \frac{dv}{dt} \end{aligned} \quad (\text{IV.9})$$

$$\rho f_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 w = \rho \frac{dw}{dt}$$

Où :  $\rho \vec{f} - \text{grad} \bar{p} + \mu \nabla^2 \vec{V} = \rho \frac{d\vec{V}}{dt} \quad (\text{IV. 10})$

L'équation IV.10 est appelée équation générale de la dynamique des fluides réels ou équation de Navier-Stokes ; elle est valable pour l'écoulement laminaire d'un fluide incompressible.

L'interprétation physique de l'équation IV.10 sous sa forme vectorielle est la suivante :

$$\rho \vec{f} + (-\text{grad} \bar{p}) + \mu \nabla^2 \vec{V} = \rho \frac{d\vec{V}}{dt} \quad (\text{IV. 11})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{forces} \\ \text{de Volume} \\ \text{par Volume} \\ \text{unitaire} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{forces} \\ \text{de Pression} \\ \text{par Volume} \\ \text{unitaire} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{forces} \\ \text{de Viscosité} \\ \text{par Volume} \\ \text{unitaire} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{forces} \\ \text{d'inertie} \\ \text{par Volume} \\ \text{unitaire} \end{array} \right\}$$

En hydrodynamique comme en hydrostatique, on ne tient compte en général que du champ terrestre, d'où :

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 12})$$

Où g est l'accélération de la pesanteur.

La dérivée totale de la vitesse  $\frac{d\vec{V}}{dt}$  s'écrit :

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + \vec{V}.\text{grad}\vec{V} \quad (\text{IV. 13})$$

En introduisant ces définitions dans les équations de Navier-Stokes IV.10, on obtient :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 v \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 w - g \end{aligned} \quad (\text{IV.14})$$

Pour les fluides parfaits, où  $\nu = 0$ , l'ensemble des équations IV.14, se réduisent aux équations d'Euler :

$$\frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + \vec{V}.\text{grad}\vec{V} = -\frac{1}{\rho} \text{grad}(p + \rho gh) \quad (\text{IV. 15})$$

ou bien :

$$\frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + \vec{V}.\text{grad}\vec{V} = -\frac{1}{\rho} \text{grad}(p + \rho gh) + \nu \nabla^2 \vec{V} \quad (\text{IV.16})$$

Pour les fluides parfaits ou réels qui ne sont pas en mouvement, donc :

$\vec{V} = 0$  l'équation de Navier-Stokes se réduit à l'équation de l'hydrostatique.

Des équations de Navier-Stokes IV. 16 et l'équation de continuité  $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$

avec :  $\nabla.\vec{V} = \text{div}\vec{V} = 0$

Les équations précédentes sont nécessaires pour résoudre les problèmes de la mécanique des fluides.

La solution de ce système d'équations requiert des conditions aux limites. Dans le cas des fluides réels, la condition d'adhérence à la paroi doit être satisfaite, c'est à dire que les composantes normales et tangentielles de la vitesse à la paroi doivent être nulles.

#### IV.4.2 Ecoulement entre deux pastilles de forme carrée

Dans le cas de l'écoulement du fluide son comportement est incompressible en écoulement permanent et il est bidimensionnel entre deux pastilles planes et parallèles distantes de  $a$ .

L'écoulement est décrit par l'équation de mouvement :

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \text{grad} \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \text{grad}(p + \rho gh) + \nu \nabla^2 \vec{V} \quad (\text{IV. 17})$$

Pour un écoulement permanent  $\rightarrow \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = 0$ , les considérations hydrauliques sont les mêmes que pour une conduite cylindrique, mais les dérivées par rapport à  $y$  sont nulles et l'équation de mouvement devient alors :

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (\text{IV.18})$$

l'intégration de l'équation IV.18 en deux fois par rapport à  $z$ , donne :

$$u = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \frac{z^2}{2} + C_3 z + C_4 \quad (\text{IV.19})$$

Avec :

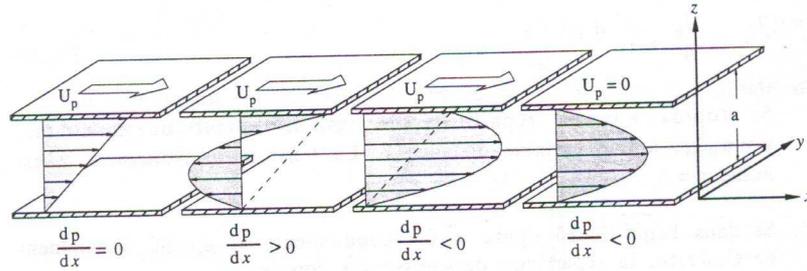
$C_3$  et  $C_4$  : constantes d'intégration, obtenues en utilisant les conditions aux limites.

$$\begin{aligned} z = 0 & \quad u = 0 \\ z = a & \quad u = U_p \end{aligned}$$

En remplaçant dans l'équation précédente on aura :

$$u = \frac{U_p}{a} z + \frac{1}{2\mu} \left[ -\frac{dp}{dx} \right] (az - z^2)$$

Cette répartition de vitesse est valable pour un écoulement avec gradient de pression positif,  $\frac{dp}{dx} > 0$ , ou négatif  $\frac{dp}{dx} < 0$ , entre les deux pastilles, l'une étant immobile et l'autre se déplaçant à une vitesse constante  $U_p$  figure IV.2 [44].



**Figure IV.2 :** répartition de vitesse  $U_p$  pour un écoulement avec gradient

A noter que si le gradient de pression est positif, suivant sa grandeur relative par rapport à la vitesse  $U_p$ , la répartition de vitesse peut avoir une forme plus complexe, comprenant des changements de direction de l'écoulement.

La répartition de la tension due au frottement,  $\tau = \mu \frac{du}{dz}$  est donnée par :

$$\tau = \mu \frac{U_p}{a} + \left[ -\frac{dp}{dx} \right] \left( \frac{a}{2} - z \right) \quad (\text{IV.20})$$

- Si  $\frac{dp}{dx} \neq 0$ , la répartition de vitesse admet un maximum  $u = u_{\max}$ , à une certaine distance  $z$ . La tension de frottement est alors nulle,  $\tau = 0$
- Si  $\frac{dp}{dx} = 0$ , l'écoulement est appelé écoulement de couette ; la répartition de vitesse est donnée par :

$$u = \frac{U_p}{a} z$$

Le profil est linéaire d'après la figure IV.2, il est valable pour un nombre de Reynolds  $R_e \leq 1500$  et la tension de frottement  $\tau$  est constante à travers tout l'écoulement, donc  $\tau = \tau_0$ .

#### IV. 5. Modélisation d'un arc libre

Pour la modélisation bidimensionnelle d'un arc libre, les hypothèses sont les suivantes :

- Le plasma est un fluide visqueux, laminaire, newtonien et incompressible ;
- Le plasma est en équilibre thermodynamique local ;
- La gravité est négligée devant les forces de pression ;
- Le modèle est stationnaire.

L'écoulement d'un fluide visqueux dans une conduite rectiligne s'effectue de telle façon que les lignes de courant glissent les unes sur les autres tout en restant parallèles, l'écoulement est appelé laminaire.

Dans ce type d'écoulement il n'y a pas d'échange de particule fluide d'une couche à l'autre. Lorsque la vitesse du fluide augmente, les couches ont tendance à se mélanger de façon désordonnée. L'écoulement devient turbulent, ainsi, on peut quantifier la transition entre un écoulement laminaire et un écoulement turbulent par le nombre de Reynolds. Ce nombre est défini comme le rapport entre le flux convectif et le flux diffusif de la quantité de mouvement soit :

$$R_e = \frac{\rho v^2}{\mu \nu / L} \quad (\text{IV.21})$$

L : représente une longueur qui caractérise l'échelle de l'écoulement considéré du plasma, distance sur laquelle la vitesse varie notablement, et  $\mu$  la viscosité. on considère en général que l'écoulement est turbulent si  $R_e$  est supérieur à 2000, soit un flux convectif largement supérieur au flux diffusif.

#### IV. 5. 1. Modèle analytique

Le modèle mathématique décrivant l'érosion de l'arc dans les contacts électriques, que ce soit par éjection de gouttelettes ou par perte de masse est régi par la relation suivante [49] :

$$j = j_0 e^{-\alpha r^2} \quad (\text{IV.22})$$

La description de l'érosion en phase liquide ou vapeur provient de l'équation du mouvement :

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = \frac{1}{\gamma_1} \vec{\nabla} P + \nu \cdot \Delta \vec{V} + \vec{F} \quad (\text{IV.23})$$

Avec :

V : vitesse des particules liquides ou gazeuses ;

P : pression appliquée par les particules liquides ou gazeuses ;

$\gamma_1$  : densité du liquide ;

$\nu$  : viscosité du liquide ;

F : force électromagnétique.

Ainsi, que des équations de conservation de l'énergie :

$$\Delta \vec{V} = \vec{0}$$

pour la partie fondue (notée1):

$$\gamma C \left( \frac{\partial T_1}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} T_1 \right) = \lambda^2 \Delta T_1 + q_{T1} + q_{j1}$$

avec

$$C : \text{capacité calorifique ;} \quad (\text{IV.24})$$

$\lambda$  : conductivité thermique ;

$$q_{j1} : \text{densité des sources de chaleurs par effets joule ;} \quad (\text{IV.25})$$

$q_{T1}$  : densité des sources de chaleur par effet thomson régie par :

$$q_{T1} = -\sigma_{T1} j_i \nabla T_i \quad (\text{IV.26})$$

Où :

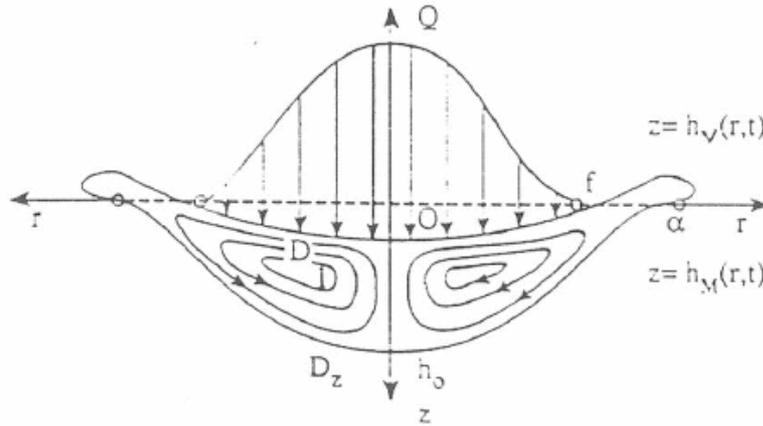
$\sigma_{T1}$  : coefficient de thomson ;

$j_i$  : densité de courant de l'état i (liquide ou solide ).

Pour la partie solide (notée2 ), le déplacement des particules solides est négligé :

$$\gamma C \left( \frac{\partial T_2}{\partial t} \right) = \lambda^2 \Delta T_2 + q_{T2} + q_{j2} \quad (\text{IV.27})$$

En utilisant les équations de conservation de l'énergie à travers les interfaces, ainsi que l'expression des forces de thermocapillarité électromagnétiques et hydrodynamiques, il est possible de montrer que l'effet Marangoni joue un rôle fondamental pour l'éjection de gouttelettes liquides. La figure IV. 3 donne une représentation des mouvements convectifs du bain fondu et de la densité d'énergie.



**Figure IV.3 :** Mouvements convectifs du bain fondu et de la densité d'énergie

La zone fondue D à un rayon  $a$ , elle est délimitée par les courbes  $h_M$  et  $h_v$  et subit des mouvements convectifs sous l'effet de pression des sources énergétiques  $Q(r)$  [50].

#### IV. 6. Equation de la chaleur

La zone de contact est le siège de nombreux phénomènes complexes, donc on fait appel à l'équation de la chaleur qui traduit le comportement thermique du problème sans transformation de phase [51].

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(\lambda \text{grad} T) = 0 \quad (\text{IV.28})$$

Avec :

$\rho$  : Densité du matériau ;

$C_p$  : Capacité calorifique massique ;

$T$  : Température ;

$\lambda$  : Conductivité thermique.

Si on considère  $\lambda$  indépendant de la température, il vient :

$$\Delta T - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (\text{IV.29})$$

avec  $a$  : diffusivité du matériau donnée par :

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (\text{IV.30})$$

Cette équation peut être résolue analytiquement, mais ne prend pas en compte les flux radiatifs, les termes de changement d'état et les flux de changement de phase du matériau, ainsi, que la géométrie du problème.

L'équation de conservation de l'énergie à l'interface d'une électrode, en négligeant les transferts radiaux d'énergie est la suivante [50] :

$$\left[ -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right]_{\text{mat}} = \left[ -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right]_{\text{Plasma}} + j_z \frac{5k}{2e} (T_{\text{mat}} - T_{\text{Plasma}}) + j_z (\Phi_s + V_A) - L_{\text{mat}} \Phi_v \quad (\text{IV.31})$$

avec:

$j_z$  : densité de courant suivant la direction  $z$  ;

$T_{\text{mat}}$  : température dans l'électrode en surface ;

$T_{\text{plasma}}$  : température dans le plasma en surface ;

$\Phi_s$  : travail d'extraction anodique ;

$v_a$  : chute anodique ;

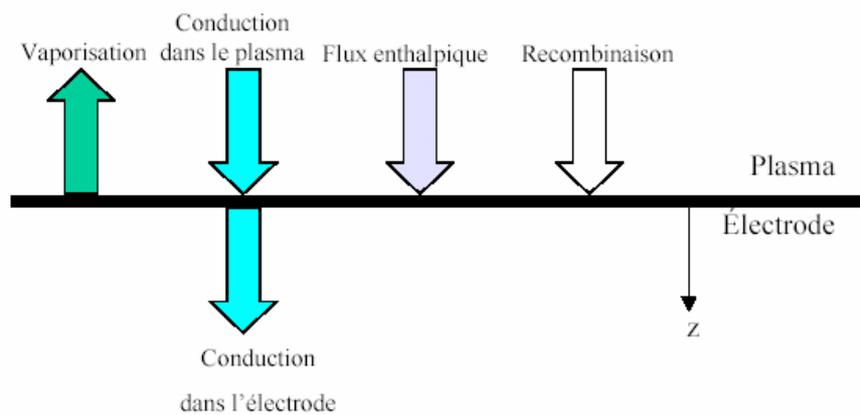
$L_{\text{mat}}$  : chaleur latente d'évaporation de l'anode ;

$\Phi_v$  : quantité de matière perdue par l'anode par vaporisation (érosion) ;

$k$  : constante de boltzmann ;

$e$  : charge électrique élémentaire.

Les caractéristiques du bilan sont représentés sur la figure (IV.4)



**Figure IV.4** : Bilan en flux de chaleur dans une électrode

Les propriétés thermophysiques sont indépendantes de la température.

- Les termes  $\left[-\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right]_{\text{mat}}$  et  $\left[-\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right]_{\text{plasma}}$  sont des termes convectifs;
- Le terme  $j_z \frac{5k}{2e} (T_{\text{mat}} - T_{\text{plasma}})$  traduit la différence d'enthalpie en surface entre l'électrode et le plasma ;
- Le terme  $j_z (\Phi_s + V_a)$  présente l'énergie perdue par recombinaison des porteurs de charge ;
- Le terme  $L_{\text{mat}} \Phi_v$  est lié à l'évaporation de l'électrode ;
- Les termes radiatifs et convectifs sont considérés comme négligeables.

La complexité de l'équation rend difficile la détermination de solutions analytiques. La résolution se fait donc au moyen de méthodes numériques sans tenir compte des effets thermiques ou magnétiques sur le bain fondu comme la thermocapillarité, l'effet marangoni ou la mise en mouvement du bain de métal liquide par le champ magnétique et la figure IV.5 montre la répartition du bilan des énergies aux électrodes [7] ; [48-50] :

$j_{ea}$ ,  $j'_{ea}$  : densités de courant respectivement des électrons qui atteignent l'anode, des électrons émis par l'anode ;

$p_0$  : pression ambiante (par exemple, valeur normale) ;

$T_0$  : température ambiante ;

$V_a$  : chute anodique ;

$V_c$  : chute cathodique ;

$V_e$  : potentiel d'évaporation d'un électron ;

$V_i$  : potentiel d'ionisation du métal ;

$V_m$  : potentiel d'extraction d'un électron ;

$\mu_0$  : mobilité des électrons.

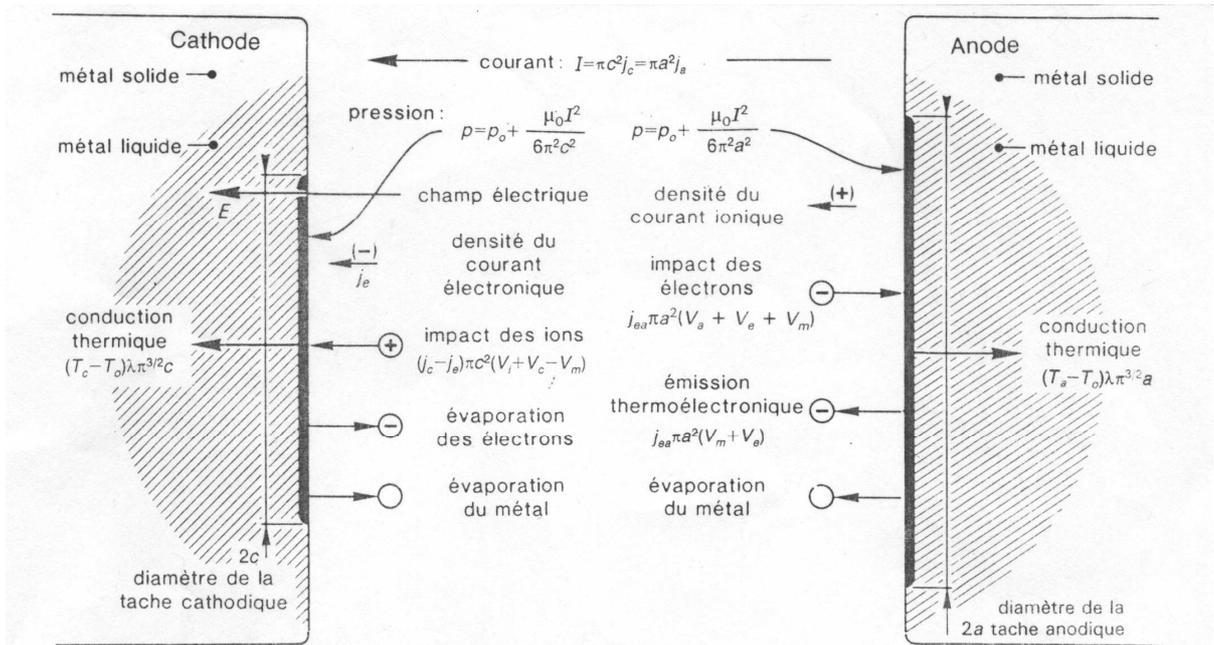


Figure IV.5 : Bilan d'énergie aux électrodes.

#### IV.6.1 Hypotheses des modèles thermiques.

Vu la complexité de l'équation de la chaleur, il est préférable de prendre des hypothèses simplificatrices afin d'arriver à des résultats cohérents :

- a- la température initiale du matériau et la température du milieu extérieur au maillage sont égales à 298 K ;
- b- les surfaces libres du matériau sont soumises à la convection. le paramètre convectif  $h$  est (généralement  $<1$ ) est considéré indépendant de l'espace et de la température ;
- c- le matériau utilisé est isotrope ;
- d- la modélisation est régie par un modèle thermique faisant appel à la capacité calorifique volumique du matériau ainsi qu'à sa conductivité thermique.

#### IV. 7. Modèle enthalpique

Pour le modèle enthalpique, la modélisation proposée par [DEVAUTOUR] est basée sur un maillage axisymétrique 2D. L'arc est considéré comme une densité de flux d'énergie apportée au matériau pur sur une partie de sa surface. La distribution spatiale de cette densité d'énergie n'est pas précisée mais la densité d'énergie injectée est inférieure à  $5.10^{10}$  W/m<sup>2</sup>. La diffusivité est dépendante de la température mais la dilatation thermique est négligée. Enfin, les bords verticaux ne voient aucun transfert d'énergie et le fond de la pastille a une température imposée. Les mouvements de liquide sont négligés (pour ne pas avoir à résoudre l'équation de Navier-Stokes), ainsi, que les effets de la thermoconduction et de la viscosité du matériau [44-54].

L'équation de la résolution pour le modèle enthalpique est :

$$\frac{\partial H(T)}{\partial t} = \text{div}(\lambda \vec{\nabla} T) + S \quad (\text{IV.32})$$

Avec H : enthalpie du matériau ;

S : termes de source (lié à l'effet Joule).

La discontinuité en température de la conductivité et de la capacité calorifique lors de la transition de phase pose de nombreux problèmes numériques. Cette difficulté est supprimée en supposant que la transition de phase se fait continûment sur un intervalle de température. L'enthalpie obtenue est donc linéaire par intervalle. Cette méthode s'applique aux matériaux purs.

#### IV. 8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé d'étaler l'ensemble des équations décrivant le phénomène de l'arc électrique sous plusieurs facettes qui englobent plusieurs disciplines telles que : la mécanique des fluides, l'hydrodynamique, l'écoulement du fluide et la physique thermique. Ces équations serviront à la modélisation dans les perspectives avenir et la continuité du travail.

## **Conclusion Générale**

Le but de ce travail était basé essentiellement sur une étude bibliographique des alliages monotectiques utilisés dans la fabrication des pastilles de contact pour les équipements électriques tels que les disjoncteurs et les contacteurs qui subissent de forts courants lors des fermetures et des ouvertures dans les circuits électriques.

L'analyse et l'interprétation des différents ouvrages et références, nous a permis de confirmer que les changements d'état des alliages monotectiques utilisés conditionnent pour une bonne partie les performances des contacts en présence de l'arc électrique, ce qui modifie des paramètres importants telles que les conductibilités thermique et électrique ce qui handicape d'une manière ou d'une autre le passage du courant d'une électrode à une autre.

Nous avons constaté aussi que les meilleurs alliages monotectiques employés pour la fabrication des contacts sont à base d'argent. Ce dernier possède une conductivité électrique nettement supérieure à celle du cuivre de l'ordre de 80 %. L'argent est préférentiellement utilisé pour l'élaboration des contacts d'intensité importante des disjoncteurs et contacteurs malgré son prix élevé. De plus il présente une bonne résistance à l'oxydation.

De l'observation des contacts d'un disjoncteur usé par le nombre élevé de manipulations (ouverture et fermeture) accompagnés d'arcs électriques, il apparaît l'endommagement des surfaces de contacts (rugosité, oxydation) ce qui constitue un paramètre difficilement contrôlable en pratique.

Le cas de la pastille réelle dont la composition est un alliage binaire ou ternaire est d'une complexité accrue vue la non-homogénéité de la composition ce qui n'est pas quantifiable pour poser un modèle mathématique.

A l'apparition de l'arc qui engendre une forte augmentation de température, on assiste à diverses manifestations. Au regard de la complexité des phénomènes physiques à l'intérieur des différentes zones de la pastille où l'équilibre thermodynamique locale est rarement établi. Et par le biais du quatrième chapitre nous avons essayé d'étaler l'ensemble des équations décrivant le phénomène de l'arc électrique sur plusieurs facettes qui englobent plusieurs disciplines telles que : la mécanique des fluides, l'hydrodynamique, l'écoulement du fluide et la physique thermique. Ces équations serviront à la modélisation dans les perspectives avenir et la continuité du travail.

il serait intéressant de connaître les différentes approches pour caractériser ces zones et de mettre les modèles mathématiques appropriés pour cerner au mieux les phénomènes et se rapprocher davantage de ce qui se passe réellement.

## **Références Bibliographiques**

- [1] J.L. Coulomb, J.C. Sabonnadière, *Cao en Electrotechnique*, Vol I, pp.128-140 édition Hermès, 1985.
- [2] R. Bourgeois, D. Cogniel, *Equipements et Installations électriques*, Vol. II pp. 336-353, Edition memotech, 2000.
- [3] [www.techni-science.net](http://www.techni-science.net).
- [4] M. Aguet, J.J. Morf, *Energie Electrique*, Vol. XII, pp.245-276, Edition Dunod, 1987.
- [5] W. Freeman, H. Heiermeier, *Simplifier les disjoncteurs*, ABB Switzerland Journal, pp. 48-56, december 2000.
- [6] L. Zehnder, T. Schoenemann, *Des disjoncteurs d'alternateurs pour couper des courants de court-circuit jusqu'à 200 KA*, ABB Switzerland Journal, pp. 34-40, January 2001.
- [7] L. Fechant, *Appareillage électrique à basse tension -Généralités. Principes. Technologie-*, *Techniques de l'Ingénieur*, Vol. D 4, D4860, 1984.
- [8] [www.lgep.suplec.fr](http://www.lgep.suplec.fr).
- [9] [www.nema.org](http://www.nema.org).
- [10] [www.ul.com](http://www.ul.com).
- [11] [www.merlin-gerin.com](http://www.merlin-gerin.com).
- [12] D. Kuhlmann-Wilsdorf, D.D. Makel, N.A. Sondergaard, D.W. Mambo, *On the Two Modes of Operation of Monolithic Ag-C Brushes*, *IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology*, Vol. 12, N°. 2, pp. 237-245, June 1989.
- [13] J. Schreurs, J.L. Johnson, I.R. McNab, *High current brushes, Part VI : Evaluation of slip ring surface films*, in *Electrical Contacts-1979 (Ill. Inst. Technol., Chicago, IL)*, pp. 145-151, 1979; see also *IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manuf. Technol.*, Vol. CHMT-3, N° 1, pp. 83-88, 1980.
- [14] M. Lindmayer, E. Marzahn, A. Mutzke, T. Rüter, M. Springstubbe, *The Process of Arc-Splitting Between Metal Plates in Low Voltage Arc Chutes* Manfred, *IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manuf. Technol*, Vol 2.1 pp. 28-34, juillet 2001.
- [15] O. Visata, J.L.Bessede, *Development of New Electrical Contacts for High Voltage Applications AREVA T&D*, *IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manuf. Technol*, pp. 58-63, janvier 2004.

- [16] F. Heringhaus, P. Braumann, D. Ruhlicke, E. Susnik, R. Wolmer, On the Improvement of Dispersion in Ag-SnO<sub>2</sub>-based Contact Materials, 20th International Conference on Electrical Contact, Stockholm Sweden, pp.199-204, 2000.
- [17] www.metalor.com.
- [18] F. Adjadj, Diagrammes d'équilibre entre phases des alliages, Notes de cours Magister, Département d'électrotechnique, Université de Batna, 2005.
- [19] Binary alloy phase diagrams, ASM International, Seconded Edition, 1990.
- [20] T.E. Waterman, H.J. Hirschhorn, Handbook of thermophysique properties of solid materials, Vol. 3, edition A, Goldsmith, MacMillan, New York, 1969.
- [21] S. Allen, E. Streicher, The Effects of Microstructure on the Electrical Performance of Ag WC-C Contact Materials, Proceedings of the 44<sup>th</sup> Holm Conference, pp. 276-285, 1998.
- [22] C. Leung, E. Streicher, D. Fitzgerald, Welding Behaviour of Ag/SnO<sub>2</sub> Contact Material with Microstructure and Additive Modifications, IEEE 0-7803-8460, pp. 64-69, janvier 2004.
- [23] D. Cajal, J.P. Toumazet, F. Gary, E. Debellut, C. Brdys, A. Laurent, C. Arnoux, L. Moreau, Influence of Contact Materials on the Current Transfer Thanks to the Current Distribution Measurement in a Low-Voltage Breaking Device by Means of a Magnetic Diagnostics, proceeding of the 50th IEEE Holm conference on electrical contacts, Vol. 11.4, pp. 347-354, juillet 2004.
- [24] J.W McBride, A.P. Sumption, J Swingler, On the Evaluation of Low Level Contact Erosion, proceedings of the 50th IEEE Holm conference on electrical contacts, Vol. 12.2, pp. 370-377, November 2004.
- [25] T. Klonowski, R. Andlauer, T. Leblanc, F. Faure, R. Meyer, Ph. Testé, High intensity contact opening under DC voltage, proceedings of the 50th IEEE Holm conference on electrical contacts, Vol. 15.1, pp 459-466, November 2004.
- [26] Defen Zhang, Martyn Hill, and John W. McBride," Evaluation of the Volumetric Erosion of Spherical Electrical Contacts Using the Perfect Remoual Method", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 29, N° 4, pp. 711-717, 2006.
- [27] R Meyer, Généralités sur la métallurgie des poudres, Techniques de l'ingénieur, M 860, 1994.
- [28] D. Bouvard, Métallurgie des poudres, Edition Hermès, 2002.

- [29] G. Cizeron, Le frittage sous son aspect physico-chimique, Extrait de l'industrie céramique, 1973.
- [30] B. Swierzynski, J.J. Gonzalez, P.Freton, P. Teulet, A. Gleizes, C. Fievet, J. Wild, Modélisation 3d de l'arc dans la chambre de coupure d'un disjoncteur basse tension“, Colloque sur les arcs électriques, Orléans, 2005.
- [31] S.N. Kharin, H. Nouri, D. Amft, Dynamics of Arc Phenomena at Closure of Electrical Contacts in Vacuum Circuit Breakers, IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 33, N° 5, pp. 1576-1581, 2005.
- [32] G. Speckhofer, H. P. Schmidt, Experimental and theoretical investigation of high-pressure arcs- part ii: The magnetically deflected arc (three-dimensional modelling), IEEE, Transactions on plasma science, Vol. 24-4, pp. 1239-1248, 1996.
- [33] G. Bernard, la coupure par auto-expansion, Merlin Gerin, cahier technique n° 171, décembre 1993.
- [34] A. Prince, Alloy Phase Equilibria, Elsevier publishing, Library of congress catalog number 65, 1966.
- [35] J. Hertz, Diagrammes D'équilibre, Alliages ternaires et Multiconstitués, Techniques de l'ingénieur, M4105, 2003.
- [36] M. Hillert, Phase diagrams and phase transformations, Cambridge University Press, 1998.
- [37] R.J. Davey, The role of solvent in crystal growth from solution, J. Crystal Growth, Vol. 76, pp. 637-644, 1986.
- [38] L. Laffarrère, Nucléation et transition de phases en chimie pharmaceutique, Thèse de Doctorat, Aix-Marseille III, 2002.
- [39] T.B. Massalski, Alloys Phase Diagrams, Second Edition, ASM International, 2001.
- [40] ASM Handbook®- Alloy Phase Diagrams, Volume 3, January 1997.
- [41] E.A. Brandes, G.B. Brook, Smithells Metals Reference Book, Seventh Edition, Edition Butterworth-Heinemann, 1992.
- [42] A. Naceur, Etude des caractères communs des systèmes binaires présentant une démixtion liquide-liquide. Extension aux systèmes ternaires, Mémoire de Magister, Batna, 2006.
- [43] D. François, Essais de dureté, Techniques de l'ingénieur, M 123, 2003.

- [44] R. Comolet, Mécanique expérimentale des fluides, Vol. 2, Edition Masson, Paris, 1982.
- [45] T Daube, H. Stammberger, M. Anheuser, C. Dehning, 3-D simulation of a low voltage switching arc based on MHD Equations. Switching arc phenomena, Lodz, pp. 168-173, 2001.
- [46] D. Volm, R. Walesch, A. Bachmann, "Simulation of the heat transfer mechanism in relays to improve contact reliability at freezing temperatures, proceedings of the 50th IEEE Holm conference on electrical contacts, Vol. 15.5, pp. 488- 493, November 2004.
- [47] F. Barcikowski, M. Lindmayer, Simulation of heat balance in low-voltage switchgear, 20<sup>th</sup> International conference on electrical contacts, Stockholm, pp. 1-7, 2000.
- [48] J. Gosse, mécanique des fluides, Techniques de l'ingénieur, A 1870, pp. 32-35, 1984.
- [49] S.N. Kharin, Mathematical model of arc erosion in electrical contacts, Proceedings of the 16<sup>th</sup> international conference on electrical contacts, pp. 205-209, 1992.
- [50] J. Cazaux, Initiation à la physique du solide, 3<sup>ème</sup> Edition, Masson, Paris, 1996.
- [51] G. Bruhat, Thermodynamique, 6<sup>ème</sup> Edition, Masson & Cie, 1968.
- [52] F.D. Griffiths, An Introduction to MATLAB, Dundee, 2001.
- [53] Omron Electronics, fabricant mondial de relais et de contacteurs.
- [54] H. Stöcker, F. Jundt, G. Guillaume, Toute la physique, Edition Dunod, Paris, 1999.