

N° d'ordre :

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de L'enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique  
جامعة بلحاج بوشعيب عين تموشنت  
Université Belhadj Bouchaib-Ain Témouchent



Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Mécanique  
Laboratoire des Structures Intelligentes

## THESE

Présentée pour l'obtention du **diplôme de DOCTORAT LMD 3<sup>ème</sup> Cycle**

**Domaine** : Science et Technologie

**Filière** : Génie Mécanique

**Spécialité** : Mécanique

**Par** : Kada HADDA

### Intitulé de la thèse

**Contribution à l'étude du comportement thermo-électromécanique  
des connecteurs de puissance**

Soutenue, le 19/10/2024, devant le jury composé de :

Mr. Abdelkader ZIADI	Pr	Président	Université Ain Témouchent
Mme. Farida BOUAFIA	Pr	Examinatrice	Université Ain Témouchent
Mr. Youcef BELDJELILI	MCA	Examinateur	Université de Sidi Bel Abbès
Mr. Sidi Mohammed CHORFI	MCA	Examinateur	Université de Tlemcen
Mr. Mohammed El Amine BELOUFA	MCA	Directeur de thèse	Université Ain Témouchent
Mr. Mohamed AMIRAT	Pr	Co-Directeur de thèse	Université de Tlemcen
Mr. Aissa BOUTTE	MRA	Invité	ASAL-Oran

## **Remerciements**

*Je souhaite exprimer ma sincère gratitude à toutes les personnes qui ont contribué au succès de cette thèse. En premier lieu, je tiens à remercier chaleureusement mon directeur de thèse, Amine BELOUFA, pour son encadrement, son soutien inestimable, ses conseils éclairés et sa confiance en moi tout au long de cette aventure académique.*

*Un immense merci s'adresse aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail et m'ont prodigué des conseils avisés.*

*Je tiens à exprimer ma gratitude à tous mes collègues du département AIT du CDS/Centre de développement des satellites d'Oran avec lesquels j'ai eu le privilège de travailler. Je remercie tout particulièrement M. Aissa BOUTTE et M. El Yazid BELAIDI.*

*Un merci particulier va au professeur Mohamed AMIRAT pour ses précieux conseils et son soutien constant. Je lui souhaite plein de succès pour ses projets futurs.*

*Un grand merci à l'ensemble du personnel, professeurs et doctorants du laboratoire SSL de l'université pour la convivialité et l'ambiance agréable.*

*Enfin, un sincère remerciement va à mes parents, tous les membres de ma famille, mon épouse et mes enfants pour leur soutien constant et leurs encouragements.*

*À la mémoire de ma petite sœur, que Dieu lui fasse miséricorde*

# **Table des matières**

## **Table des matières**

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>15</b>
<b>CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART ET GENERALITES SUR LES CONTACTS.....</b>	<b>17</b>
I.1 INTRODUCTION .....	18
I.2 CARACTERISTIQUES D'UN CONTACT ELECTRIQUE.....	19
I.2.1 Le contact statique.....	20
I.2.2 Résistance de contact - Modèle a plusieurs passages.....	23
I.3 PROPRIETES D'UN ARC ÉLECTRIQUE LORS DE LA COUPURE ET ANALYSE DES PHENOMENES ASSOCIES .....	26
I.3.1 Introduction .....	26
I.3.2 L'arc stationnaire.....	27
I.3.2.1 La colonne de l'arc.....	29
I.3.2.2 La zone cathodique .....	29
I.3.2.3 La zone anodique .....	31
I.4 L'ARC ELECTRIQUE DE COUPURE (LES DIFFERENTES PHASES DE L'ARC D'OUVERTURE) (EVOLUTION DE LA TENSION AUX BORNES DES CONTACTS) .....	32
I.5 AMORÇAGE DE L'ARC PAR CONTACT : CREATION ET EXPLOSION D'UN PONT FONDU.....	33
I.5.1 Le développement de l'arc électrique.....	35
I.5.2 Conséquences et problèmes engendrés par l'arc d'ouverture / commutation.....	37
I.5.2.1 Augmentation de la résistance de contact.....	38
I.5.2.2 Transfert de matière et érosion des contacts .....	38
I.5.2.3 Soudure des contacts.....	41
I.5.2.4 Coupure du circuit.....	41
I.6 MATERIAUX DE CONTACT .....	42
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE I .....	45
<b>CHAPITRE II : L'ARC D'OUVERTURE - L'ARC A L'OUVERTURE DES CONTACTS ET SES CONSEQUENCES.....</b>	<b>48</b>
II.1 INTRODUCTION .....	49
II.2 BANC D'ESSAI D'OUVERTURE, PROCEDURES DE TESTS ET MATERIAUX DE CONTACT.....	50
II.2.1 Principe de fonctionnement du dispositif expérimental .....	50
II.2.2 Banc d'essai d'ouverture .....	51
II.2.2.1 Partie mécanique.....	52
II.2.2.2 Partie électrique .....	55
II.3 LES MATERIAUX UTILISES DANS LA CONNECTIQUE .....	57
II.3.1 Les matériaux de base .....	57
II.4 METHODOLOGIE D'APPLICATION D'UN REVETEMENT DE PROTECTION .....	58
II.4.1 Nature de dépôt.....	58
II.4.2 Caractéristiques d'un bon revêtement en Or/ Argent.....	59
II.4.3 Matériaux de contacts utilisés .....	59

II.4.4	La fabrication des contacts électriques :.....	60
II.5	METHODOLOGIE EXPERIMENTAL .....	62
II.5.1	Protocole d'essai.....	62
II.5.2	Traitement des données issues de la carte d'acquisition (oscilloscope).....	63
II.6	PHENOMENES ELECTRIQUES LORS DE L'OUVERTURE .....	64
II.6.1	Le pont fondu .....	64
II.6.1.1	Exemple de traces de pont fondu .....	65
II.6.2	L'arc d'ouverture.....	67
II.7	ÉTUDE DES GRANDEURS CARACTERISTIQUES DE L'ARC ELECTRIQUE.....	68
II.7.1	Effet de la forme sphérique du contact et de la puissance d'entrée sur l'énergie de l'arc et la durée de vie des contacts en cuivre.....	68
II.7.1.1	Objectif .....	68
II.7.1.2	Rappel de la forme et dimensions des échantillons de contact .....	69
II.7.1.3	Matériaux des échantillons de contact testés .....	70
II.7.1.4	Courant d'arc $E_{arc}$ et tension d'arc $V_{arc}$ .....	70
II.7.1.5	Puissance de l'arc $P_{arc}$ , durée de l'arc $\Delta t$ et énergie de l'arc $E_{arc}$ .....	71
II.7.1.6	Effet de la puissance d'entrée sur la durée de vie du contact .....	75
II.7.1.7	Influence du diamètre du contact hémisphérique sur la durée de vie du contact.....	79
II.7.1.8	Simulation numérique de l'arc pour les deux diamètres ( $D = 5$ mm et $D = 8$ mm) .....	81
II.7.2	Influence de matériau du contact sur la durée d'arc et son énergie.....	84
II.7.2.1	Objectif .....	84
II.7.2.2	Propriétés des matériaux utilisés.....	85
II.7.2.3	La tension $V_{arc}$ et le courant de l'arc $I_{arc}$ .....	87
II.7.2.4	Energie de l'arc $E_{arc}$ et le nombre d'opérations (n).....	89
II.7.2.5	Durée de l'arc $\Delta t$ et nombre d'opération ( n ).....	90
II.7.3	La durée de vie des contacts en fonction de l'aire de contact et la puissance d'entrée .....	93
II.7.3.1	Objectif .....	93
II.7.4	Effet de la nature de matériau du contact sur l'énergie de l'arc et la durée de vie des contacts .....	94
II.7.4.1	Matériaux nu (non revêtu) .....	94
II.7.4.2	Matériaux revêtu .....	96
II.8	CONCLUSION.....	98
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE II .....	101
	<b>CHAPITRE III : ETABLISSEMENT DU MODELE NUMERIQUE .....</b>	<b>104</b>
III.1	INTRODUCTION .....	105
III.2	MODELE D'ARC ELECTRIQUE DANS UNE CONFIGURATION SIMPLIFIEE.....	105
III.2.1	Présentation du modèle.....	105
III.2.2	Hypothèses générales .....	106
III.2.3	Les équations impliquées .....	107
III.3	DESCRIPTION MAGNETOHYDRODYNAMIQUE (MHD) .....	107
III.4	METHODOLOGIE DE SIMULATION.....	116

III.4.1	Démarrez ANSYS Workbench.....	117
III.4.2	Créer une géométrie .....	118
III.4.3	Créer un maillage de calcul .....	119
III.4.4	Écrire des fonctions définies par l'utilisateur .....	119
III.4.5	Configurer la simulation de champ multi-physique dans ANSYS Fluent. ....	120
III.4.6	Configurer le module MHD .....	120
III.5	SIMULATION NUMERIQUE .....	121
III.5.1	Modèle géométrique.....	121
III.5.2	Maillage.....	122
III.5.3	Propriétés du plasma notamment UDF.....	123
III.5.4	Paramètres de simulation et conditions aux limites .....	127
III.5.5	Configuration du logiciel.....	129
III.5.6	Mise en place du module MHD.....	130
III.6	RESULTATS ET ANALYSE.....	136
III.6.1	Energie de l'arc électrique.....	136
III.6.2	Température de l'arc électrique.....	138
III.7	CONCLUSION .....	139
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE III.....	141
<b>CHAPITRE IV : ETUDE DE L'ENDOMMAGEMENT DES CONTACTS</b>		
	<b>ELECTRIQUE .....</b>	<b>143</b>
IV.1	INTRODUCTION .....	144
IV.2	OBJECTIF ET METHODOLOGIE.....	144
IV.3	ENDOMMAGEMENT DES CONTACTS DE CONNECTEURS.....	145
IV.3.1	Structure des contacts avant essai.....	145
IV.4	ANALYSE DES ELECTRODES .....	147
IV.4.1	Oxidation des surface de contact.....	148
IV.4.2	Effet des arcs électriques sur la microstructure des contacts .....	149
IV.5	ANALYSES MICROSCOPIQUES MEB & EDX.....	155
IV.5.1	La composition chimique .....	155
IV.6	CONCLUSION .....	163
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE IV.....	165

## Liste des figures

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I- 1 :</b> Aire de contact entre deux sphères sous l’action d’une force de contact $F_c$ .....	22
<b>Figure I- 2 :</b> Constriction des lignes de courant dans un contact réel d’après P.G. Slade .....	23
<b>Figure I- 3 :</b> Schématisation du modèle de la résistance de contact à plusieurs passages .....	25
<b>Figure I- 4 :</b> Potentiel entre les électrodes dans un arc stationnaire. ....	28
<b>Figure I- 5 :</b> Structure de la zone cathodique .....	30
<b>Figure I- 6 :</b> Structure de la zone anodique .....	32
<b>Figure I- 7 :</b> Phase d’allumage d’un arc par séparation de contacts .....	34
<b>Figure I- 8 :</b> Évolution de la tension aux bornes des contacts (Ag, 40 A, 2 cm/s).....	35
<b>Figure I- 9 :</b> Transfert de matière entre les électrodes en fonction du gap d’extinction.....	40
<b>Figure II- 1 :</b> Principe de test d’ouverture des contacts.....	50
<b>Figure II- 2 :</b> Schéma fonctionnel du dispositif expérimental .....	51
<b>Figure II- 3 :</b> Schéma du banc d'ouverture .....	53
<b>Figure II- 4 :</b> Banc d'essai pour la mesure de la tension et du courant de l'arc électrique.....	54
<b>Figure II- 5 :</b> Forme géométrique des contacts utilisés (modèle CAD).....	54
<b>Figure II- 6 :</b> le schéma électrique .....	56
<b>Figure II- 7 :</b> Les différents matériaux des contacts utilisés.....	59
<b>Figure II- 8 :</b> Les phases d’usinage des contacts électriques.....	62
<b>Figure II- 9 :</b> Analyse d’un exemple d’un cycle d’ouverture par programme BVA.....	63
<b>Figure II- 10 :</b> Exemple de traces de pont fondu pour différentes conditions en tension et courant (contact en aluminium). ....	66
<b>Figure II- 11 :</b> Traces de tension et de courant d'arc d'ouverture en circuit résistif. Contacts en cuivre, diamètres $D= 5\text{mm}$ , $P_{in}= 100\text{W}$ .....	67
<b>Figure II- 12 :</b> Dimensions des échantillons de contact utilisés .....	69
<b>Figure II- 13 :</b> Tension d'arc $V_{arc}$ & courant d'arc $I_{arc}$ pour l'opération d'ouverture-fermeture du contact N°300 ( $D= 5\text{mm}$ , $P_{in}= 100\text{W}$ ).....	71
<b>Figure II- 14 :</b> Puissance de l'arc pour deux puissances d'entrée ( $D= 5\text{mm}$ , $P_{in}= 100\text{W}$ & $256\text{W}$ ) (Opération N°300).....	72
<b>Figure II- 15 :</b> Énergie maximale de l'arc pour les deux puissances d'entrée ( $100\text{W}$ & $256\text{W}$ ) et pour les deux diamètres ( $D= 5\text{mm}$ & $D= 8\text{mm}$ ) .....	73

<b>Figure II- 16 :</b> Histogrammes de la fréquence cumulée en fonction de l'énergie maximale de l'arc pour des contacts de diamètres $D= 5\text{mm}$ et $D= 8\text{mm}$ .....	74
<b>Figure II- 17 :</b> Images de microscopie électronique à balayage (MEB) et spectres d'analyse de rayons X à dispersion d'énergie (EDX) de la composition chimique des surfaces de contact de l'anode et de la cathode à la fin de leur vie ( $P_{in} = 256\text{ W}$ , $D= 5\text{ mm}$ et $8\text{ mm}$ ).....	77
<b>Figure II- 18 :</b> Érosion des surfaces de contact à la fin de la durée de vie (contacts avec $D= 5\text{ mm}$ ) ..	78
<b>Figure II- 19 :</b> Érosion des surfaces de contact à la fin de la durée de vie des contacts ( $D = 5\text{ mm}$ et $D = 8\text{ mm}$ , $P_{in} = 256\text{ W}$ ).....	80
<b>Figure II- 20 :</b> Champ magnétique $B$ , courant électrique d'arc $I_{arc}$ et force de Lorentz $F$ de l'arc .....	82
<b>Figure II- 21:</b> Distribution de la densité de courant électrique de l'arc pour les deux contacts.....	83
<b>Figure II- 22 :</b> Impact de la mobilité de l'arc sur la dégradation de la zone de contact des deux échantillons de contact ( $D = 5\text{ mm}$ et $D = 8\text{ mm}$ ) .....	84
<b>Figure II- 23 :</b> la forme géométrique des contacts en modèle CAO et les différents matériaux de contact utilisés .....	85
<b>Figure II- 24 :</b> Traces de tension et de courant de l'arc d'ouverture. Contacts D5 en cuivre (op1202), laiton (op72) et aluminium (op79), puissance 100W .....	87
<b>Figure II- 25 :</b> Caractéristiques courant-tension dans le plasma pour des contacts en cuivre, laiton et aluminium à 100 W, diamètre $D= 5\text{ mm}$ .....	89
<b>Figure II- 26 :</b> Énergie de l'arc en fonction du nombre d'opérations pour la puissance d'entrée de 100W et diamètre des contacts $D= 5\text{mm}$ .....	90
<b>Figure II- 27 :</b> Durée de l'arc en fonction du nombre d'opérations pour différents matériaux sous une puissance de 100W, $D= 5\text{mm}$ .....	91
<b>Figure II- 28 :</b> Durée de vie en fonction de la forme de contacts et la puissance d'entrée.....	94
<b>Figure II- 29 :</b> Les mesures de durée d'arc en fonction de nombre d'opérations aux bornes des contacts en cuivre, aluminium et laiton sous 100 et 256W. Le diamètre des contacts est de 5mm.....	95
<b>Figure II- 30 :</b> Durée de l'arc en fonction de nombre d'opération pour différents matériaux (revêtu et non revêtu). (Diamètre des contacts $D= 5\text{mm}$ , $P_{in}=256\text{W}$ ).....	97
<b>Figure III- 1:</b> Interaction des processus physiques dans la colonne d'arc.....	115
<b>Figure III- 2 :</b> Boîte à outils de Fluent .....	118
<b>Figure III- 3 :</b> Le modèle 3D de la géométrie .....	121
<b>Figure III- 4 :</b> Vue 3D de l'ensemble du maillage complet/ détaillé.....	123
<b>Figure III- 5 :</b> Densité de l'aire à haute température .....	125
<b>Figure III- 6 :</b> Chaleur spécifique de l'air à haute température.....	125
<b>Figure III- 7 :</b> Conductivité thermique de l'air à haute température.....	126

<b>Figure III- 8 :</b> Viscosité de l'air à haute température .....	126
<b>Figure III- 9 :</b> Conductivité électrique de l'air à haute température .....	126
<b>Figure III- 10 :</b> Modules d'ANSYS Fluent .....	130
<b>Figure III- 11 :</b> Configuration du module MHD .....	131
<b>Figure III- 12 :</b> Configuration de la simulation transitoire.....	133
<b>Figure III- 13 :</b> Compilation des propriétés du plasma .....	133
<b>Figure III- 14 :</b> Chargement des propriétés des matériaux.....	133
<b>Figure III- 15 :</b> configuration de la zone cellulaire .....	133
<b>Figure III- 16 :</b> Configuration les limites de la simulation.....	134
<b>Figure III- 17 :</b> Configurations avancées pour les contrôles de solution .....	134
<b>Figure III- 18 :</b> Solution Methods Set-up Fluent.....	135
<b>Figure III- 19 :</b> Solution Controls Set-up Fluent .....	135
<b>Figure III- 20 :</b> Set-up of Run Calculation.....	135
<b>Figure III- 21 :</b> Distribution de l'énergie de l'arc électrique pour un courant de 8A, diamètre des contacts D= 5mm.....	137
<b>Figure III- 22 :</b> Distribution de la température de l'arc électrique pour un courant de 8A, diamètre des contacts D= 5mm.....	139
<b>Figure IV- 1 :</b> Forme des contacts. Modèle CAD de la géométrie .....	146
<b>Figure IV- 2 :</b> Microscope à Balayage Electronique MEB JEOL JSM-6610LA utilisé lors des analyses. ....	147
<b>Figure IV- 3 :</b> Aspect typique de l'impact de l'arc électrique sur une électrode (une cathode).il s'agit d'une image réalisée à l'aide d'un appareil photo.....	149
<b>Figure IV- 4 :</b> Micrographie MEB : Etat de surface du contact fixe (anode) en Ag après certains nombre arc électrique.....	149
<b>Figure IV- 5 :</b> Micrographies MEB. Etat de surface du contact mobile (cathode) en Ag après un certains arc électrique. ....	150
<b>Figure IV- 6 :</b> Micrographies MEB, caractéristique d'une partie du cratère après un certains arc électrique – Anode.....	151
<b>Figure IV- 7 :</b> Surface des contacts fixes Alu à différents nombres de manœuvres. ....	152
<b>Figure IV- 8 :</b> Grossissement de l'état de Surface des contacts fixes après un certain manœuvre d'ouverture pris par MEB .....	153
<b>Figure IV- 9 :</b> Micrographie MEB. Mise en évidence du dégazage de métal lors du refroidissement d'une électrode contact fixe. ....	154

**Figure IV- 10 :** Micrographie MEB. Des grains basaltiques présents sur une électrode..... 154

**Figure IV- 11 :** Images de microscopie à balayage électronique (MEB) & microanalyse par Energie Dispersion de rayons X (EDX) de la composition chimique des surfaces de contact à la fin de leur durée de vie (Pin=100W, D=5mm, matériau Cuivre). ..... 156

**Figure IV- 12 :** Images de microscopie à balayage électronique (MEB) & microanalyse par Energie Dispersion de rayons X (EDX) de la composition chimique des surfaces de contact à la fin de leur durée de vie (Pin=100W, D=5mm, matériau laiton). ..... 158

**Figure IV- 13 :** Images de microscopie à balayage électronique (MEB) & microanalyse par Energie Dispersion de rayons X (EDX) de la composition chimique des surfaces de contact à la fin de leur durée de vie (Pin=100W, D=5mm, matériau Aluminium)..... 159

**Figure IV- 14 :** Images de microscopie à balayage électronique (MEB) & microanalyse par Energie Dispersion de rayons X (EDX) de la composition chimique des surfaces de contact à la fin de leur durée de vie (Pin=256W, D=5mm, matériau Or)..... 161

**Figure IV- 15 :** Images de microscopie à balayage électronique (MEB) & microanalyse par Energie Dispersion de rayons X (EDX) de la composition chimique des surfaces de contact à la fin de leur durée de vie (Pin=256W, D=5mm, matériau Argent)..... 162

# Liste des tableaux

## **LISTE DES TABLEAUX**

<b>Tableau I- 1</b> : Courant et tension minimaux d'arc dans une atmosphère ambiante .....	36
<b>Tableau II- 1</b> : Propriétés physiques des électrodes utilisées.....	60
<b>Tableau II- 2</b> : Propriétés mécaniques, thermiques et électriques du cuivre pur .....	70
<b>Tableau II- 3</b> : Différents résultats d'arc pour différents échantillons de contact. ....	74
<b>Tableau II- 4</b> : Propriétés thermiques et électriques des matériaux des connecteurs et leurs revêtements	85
<b>Tableau III- 1</b> : Les conditions aux limites appliquées.....	128
<b>Tableau III- 2</b> : Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de l'énergie de l'arc (Contacts D5 et D8 en cuivre, puissance 256Watts).....	137
<b>Tableau IV- 1</b> : Composition chimique des différentes zones par rapport à la figure IV- 11 .....	157
<b>Tableau IV- 2</b> : Composition chimique des différentes zones par rapport à la figure IV- 12.....	158
<b>Tableau IV- 3</b> : Composition chimique des différentes zones par rapport à la figure IV- 13.....	160
<b>Tableau IV- 4</b> : Composition chimique des différentes zones par rapport à la figure IV- 14.....	161
<b>Tableau IV- 5</b> : Composition chimique des différentes zones par rapport à la figure IV- 15.....	162

# **Introduction générale**

## **INTRODUCTION GENERALE**

Depuis plusieurs années, nous constatons une augmentation du nombre d'équipements et sous système dans divers domaine tel que d'automobile et d'aéronautique (lanceur, satellite, drone solaire et aussi véhicule électrique). Ceux-ci nécessitent une source d'énergie électrique élevée, ainsi qu'un réseau robuste et important pour la distribution et la commande de puissance. Parmi les éléments de ce circuit, les connecteurs en particulier les contacts et les relais qui sont utilisés pour permettre ou interrompre le passage du courant dans ces circuits.

Le connecteur de puissance est un ensemble de contacts montés sur un capot isolant, les contacts assurent la transmission de l'énergie pour assurer et le fonctionnement des appareils.

Les contacts de puissance sont caractérisés par leurs géométries (diamètres, tailles et forme), leurs matériaux (aluminium, cuivre, laiton, argent, or,...) ainsi que leurs rugosités ; Ils sont utilisés sur les relais des appareils qui nécessitent une puissance élevée pour garantir un bon usage. Cette augmentation est obtenue en augmentant la tension ou le courant d'alimentation.

L'accroissement d'énergie va entraîner le développement d'un pont fondu avant l'apparition de l'arc et ce, lors d'ouverture à chaud, volontaire ou accidentelle des contacts. Ce phénomène est dû à l'échauffement des spots de contact électrique suite au relâchement de la force mécanique initialement appliqué.

L'arc électrique provoque plusieurs dégradations aux contacts telles que l'érosion, l'augmentation de la résistance ainsi que le soudage des contacts lors de la fermeture. Ces dégradations sont l'origine de défaillances des dispositifs de coupure. De plus, l'augmentation de la puissance augmente fortement les dommages causés aux contacts par les arcs électriques, ce qui affecte directement le vieillissement et la durée de vie des relais, les interrupteurs et précisément les contacts.

L'arc de coupure sous une puissance significative à différentes puissance (courant et tension), matériaux et diamètres a été le sujet de cette thèse, plusieurs résultats ont été

obtenus. L'objectif principal de cette thèse est d'obtenir une compréhension approfondie des mécanismes impliqués dans le processus, et donc évaluer et comparer les performances de différents matériaux en ce qui concerne la formation de l'arc électrique au niveau des contacts. Cette approche méthodique permettra d'optimiser les paramètres des contacteurs pour chaque matériau spécifique. En étudiant en détail les phénomènes de l'arc électrique, nous visons à identifier les caractéristiques des matériaux qui influent sur ce phénomène et à proposer des solutions appropriées. Cela ouvrira la voie à des applications plus efficaces et à des améliorations significatives dans la conception des dispositifs, en particulier dans le domaine des contacts électriques.

Afin de présenter cette recherche de manière exhaustive, le manuscrit est organisé en quatre chapitres distincts, chacun abordant des aspects clés de l'étude. Dans le premier chapitre nous avons défini les phénomènes physiques qui se produisent lors de la séparation des électrodes.

Ensuite, dans le deuxième chapitre, nous collectons les résultats de l'arc à l'ouverture des contacts en termes de durée de l'arc, le gap d'extinction, durée de vie des contacts, énergie de l'arc, résistance de l'arc et l'érosion. La caractérisation des performances des différents matériaux standard, non revêtue (nu) et revêtue de matériaux nobles de différents diamètres (or et argent) et cela à l'aide d'un banc expérimental d'ouverture et fermeture des contacts développé par nos soins au sein du Centre de Développement des Satellites de l'Agence Spatiale Algérienne (CDS/ASAL).

Le troisième chapitre est dédié à la modélisation magnétohydrodynamique MHD de l'arc électrique sous une forme géométrique simplifiée afin d'obtenir les grandeurs de certaines propriétés du plasma.

Enfin le chapitre quatre a été consacré à l'analyse de l'érosion des matériaux de contacts soumis à des coupures répétées dans les conditions réelles. L'analyse microscopique par microscope électronique à balayage après la rupture totale des contacts nous permet d'analyser l'oxydation des surfaces érodées de contacts, d'éclairer les phénomènes observés et l'interaction entre l'arc électrique et les contacts de connecteurs, ceci dans le but de comprendre les variations de la direction du transfert de masse entre électrodes interconnectées à la variation de la longueur d'arc.

# CHAPITRE

# 1

## *État de l'art et généralités sur les contacts*

---

## **I.1 INTRODUCTION**

Les connecteurs, les dispositifs de coupure tels que les relais et les interrupteurs ..., et en particulier les contacts, jouent des rôles cruciaux dans le domaine de l'électricité. Leur première fonction essentielle consiste à interrompre le passage du courant en provoquant une séparation physique entre les contacts. Cela garantit l'arrêt du flux électrique à un moment donné, contribuant ainsi à la sécurité des circuits électriques.

D'autre part, les contacts assurent une conduction parfaite du courant avec un minimum de résistance lorsqu'ils sont en position fermée. Cette caractéristique est vitale pour garantir l'efficacité et le bon fonctionnement des appareils électriques. Une résistance minimale permet de minimiser les pertes d'énergie sous forme de chaleur et d'assurer un transfert optimal du courant électrique.

Toutefois, lors de l'ouverture des contacts, un phénomène complexe peut se produire sous la forme d'un arc électrique. Cet arc électrique peut endommager les surfaces des matériaux de contact en raison de la chaleur générée et des forces électromagnétiques en jeu. Dans certains cas, cet arc électrique peut même provoquer la soudure des contacts lors de leur fermeture ultérieure, ce qui compromettrait le bon fonctionnement du dispositif.

Ainsi, la gestion et la compréhension de ces phénomènes sont cruciales pour concevoir et maintenir des circuits électriques fiables et sûrs, minimisant les effets indésirables tels que l'usure des contacts et les pertes d'énergie. Cela nécessite une étude approfondie des caractéristiques des contacts électriques et des moyens de prévenir les dommages potentiels causés par les arcs électriques.

Dans ce chapitre, notre exploration se concentre sur l'analyse approfondie des caractéristiques fondamentales des contacts électriques. Nous commencerons par rappeler les notions générales essentielles concernant les contacts électriques de puissance, établissant ainsi une base solide pour notre investigation approfondie.

Nous plongerons ensuite dans les phénomènes physiques complexes de l'arc électrique qui surgissent lors de l'ouverture des contacts. Cet arc électrique, une réaction dynamique du courant électrique lors de la séparation des contacts, est un élément critique qui nécessite une compréhension approfondie. Nous explorerons en détail les

forces électromagnétiques et thermiques qui interagissent, ainsi que leurs implications sur les matériaux constituant les contacteurs. Cette analyse pointue permettra de dévoiler les mécanismes sous-jacents qui dictent les performances et la durabilité des contacts électriques.

En outre, nous aborderons les diverses dégradations subies par les matériaux des contacts en raison de l'arc électrique, soulignons les conséquences néfastes de ce phénomène sur la structure et la fonctionnalité des contacts. Comprendre ces dégradations est impératif pour concevoir des dispositifs plus résistants et durables.

L'objectif ultime de cette démarche analytique approfondie est de mieux cerner la problématique inhérente à l'interaction des contacts électriques avec l'arc électrique, et de contribuer ainsi à l'amélioration des technologies de coupure et de connexion. Ces avancées permettront de concevoir des systèmes électriques plus fiables et efficaces, alignés avec les impératifs de sécurité et de performance. C'est précisément cette quête de compréhension et d'amélioration qui forme la pierre angulaire de la thèse que nous poursuivons.

## **I.2 CARACTERISTIQUES D'UN CONTACT ELECTRIQUE**

Avant d'explorer en profondeur le problème de l'arc électrique, il est impératif de bien saisir la fonction fondamentale d'un contact électrique. Par définition, un contact électrique a pour rôle principal de permettre la conduction du courant électrique entre deux éléments conducteurs. C'est à travers ce contact que l'électricité peut circuler d'un point à un autre, établissant ainsi un lien essentiel dans le circuit électrique.

Lorsque le contact est fermé, les propriétés de la liaison entre deux électrodes sont cruciales. Ces propriétés déterminent la qualité et l'efficacité de la conduction électrique, qui à son tour influe directement sur la performance et la stabilité globales du circuit électrique.

Cependant, si les interfaces de contact sont dégradées, cela peut avoir des conséquences significatives. La dégradation des surfaces en contact peut entraîner une augmentation de la résistance, conduisant à des pertes d'énergie plus importantes. De plus, cette détérioration peut provoquer des points chauds, générant ainsi de la chaleur supplémentaire et risquant de compromettre l'intégrité du système électrique. Ces

conséquences peuvent impacter la fiabilité du circuit et nécessiter des réparations coûteuse

### **I.2.1 Le contact statique**

Lorsque deux pièces métalliques entrent en contact sous une certaine force, définissant ainsi leur position fermée, le contact électrique ne se produit généralement pas uniformément sur toute la surface de contact. Au contraire, il se concentre en des zones spécifiques appelées "contacts élémentaires" ou "spots de conduction". Ces contacts élémentaires sont les points de contact où la conduction du courant électrique s'initie entre les deux matériaux conducteurs.

La quantité et la taille de ces zones de contact dépendent de divers paramètres. Tout d'abord, la force initiale appliquée entre les deux pièces métalliques joue un rôle crucial. Une force plus importante augmente la probabilité et l'étendue des contacts élémentaires, favorisant ainsi une meilleure conduction électrique.

Parallèlement à cela, l'état des surfaces en contact est un facteur déterminant. La rugosité des surfaces métalliques peut influencer la formation et la distribution des contacts élémentaires. Des surfaces plus rugueuses peuvent comporter davantage de points de contact, tandis que des surfaces lisses peuvent favoriser une répartition plus uniforme des contacts.

La dureté des matériaux utilisés est également un élément clé. Des matériaux plus durs peuvent résister à une force de contact plus élevée, ce qui peut influencer la taille et la stabilité des contacts élémentaires.

Enfin, la présence de contaminants sur les surfaces métalliques peut altérer la formation des contacts élémentaires. Les contaminants peuvent interférer avec la conduction électrique, modifiant ainsi la répartition et la qualité des points de contact.

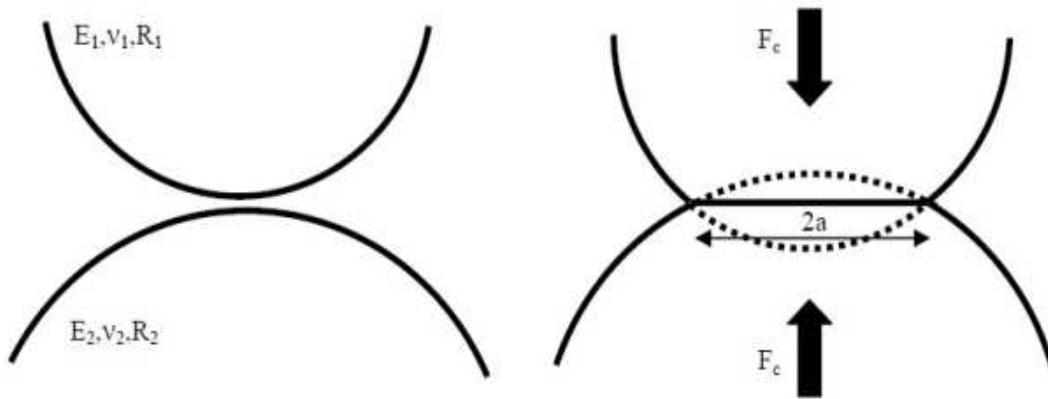
Comprendre ces paramètres est essentiel pour optimiser la conception des contacts électriques et garantir une conduction efficace. En manipulant adéquatement la force de contact, la rugosité des surfaces et en veillant à la propreté des matériaux, il est possible d'améliorer la performance des contacts et d'assurer un transfert électrique fiable et stable entre les pièces métalliques.

Le modèle mécanique le plus simple pour calculer l'aire de contact entre deux éléments métalliques repose sur l'utilisation de deux sphères métalliques en contact élastique, soumises à l'action d'une force  $F_c$ . Chacune de ces sphères possède un rayon propre, noté  $R_1$  et  $R_2$  respectivement, ainsi qu'un module d'Young, noté  $E_1$  et  $E_2$ , et un coefficient de Poisson, noté  $\nu_1$  et  $\nu_2$ . Lorsque ces deux sphères métalliques entrent en contact, elles forment une aire de contact qui peut être représentée comme un disque de rayon  $a$ , comme illustré dans la **figure I-1**.

Ce modèle mécanique repose sur des principes fondamentaux de l'élasticité des matériaux. Lorsque les deux sphères métalliques sont pressées l'une contre l'autre par une force  $F_c$ , elles subissent une déformation élastique. Le module d'Young ( $E$ ) représente la rigidité du matériau et sa capacité à résister à cette déformation. Le coefficient de Poisson ( $\nu$ ) exprime la relation entre la contraction latérale et l'extension axiale du matériau sous contrainte.

L'aire de contact, représentée par le disque de rayon  $a$ , est déterminée par la déformation élastique induite par la force  $F_c$  et les propriétés mécaniques des sphères, à savoir leurs rayons, modules d'Young et coefficients de Poisson respectifs. Cette aire de contact a une importance capitale dans divers domaines tels que la tribologie, l'ingénierie des matériaux et les applications industrielles, car elle influence la répartition de la contrainte et la performance de l'interface entre les matériaux.

En utilisant ce modèle, il est possible d'évaluer et de prédire l'aire de contact en fonction des paramètres mécaniques des matériaux en présence. Ces calculs sont cruciaux pour concevoir des interfaces efficaces dans les composants et systèmes industriels, garantissant ainsi leur durabilité et leur fonctionnement optimal.



**Figure I- 1 :** Aire de contact entre deux sphères sous l'action d'une force de contact  $F_c$  [1].

Le problème énoncé peut être abordé de manière équivalente sur le plan mathématique en le ramenant au calcul de l'aire de contact entre une sphère élastique de rayon équivalent  $R_{eq}$  et un module d'Young équivalent  $E_{eq}$  en contact avec un plan. Ces paramètres sont cruciaux pour comprendre et quantifier les interactions complexes qui se produisent à l'interface entre la sphère et le plan. Les valeurs de  $R_{eq}$  et de  $E_{eq}$  sont données par les relations suivantes [2-3].

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (I-1)$$

et

$$\frac{1}{E_{eq}} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (I-2)$$

Le calcul effectué par Hertz donne le résultat suivant [4] :

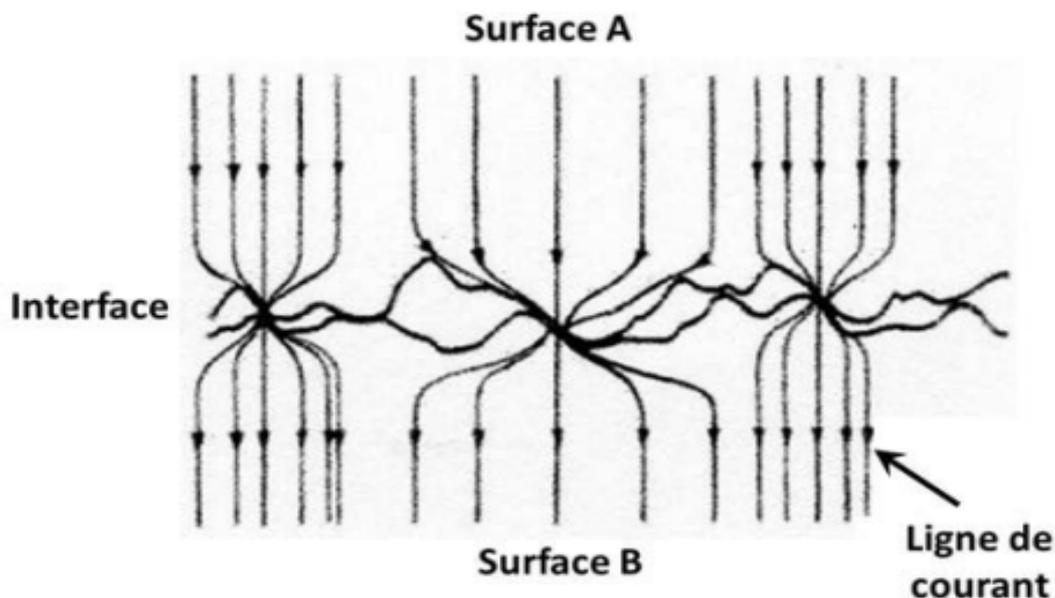
$$a = \left( \frac{3F_c \times R_{eq}}{4E_{eq}} \right)^{1/3} \quad (I-3)$$

En utilisant les éléments des équations (I- 1), (I- 2) et (I- 3), l'aire de contact apparente (idéale) « A » est alors donnée par :

$$A = \pi \times a^2 = \pi \times \left( \frac{3R_{eq}}{4E_{eq}} \right)^{2/3} \times F_c^{2/3} \quad (I-4)$$

### I.2.2 Résistance de contact - Modèle a plusieurs passages

La résistance de contact à un seul passage de courant, ce que l'on appelle également la résistance de contact à travers une seule zone de constriction, repose sur l'hypothèse que les surfaces des conducteurs sont parfaitement lisses. Cependant, cette hypothèse ne correspond que rarement à la réalité. En effet, dans la plupart des situations pratiques, les surfaces des conducteurs présentent des imperfections, des aspérités ou des irrégularités à différentes échelles, allant des microscopiques aux macroscopiques.



**Figure I- 2 :** Constriction des lignes de courant dans un contact réel d'après P.G. Slade [5].

La **figure I- 2** montre le passage du courant à travers plusieurs zones de contact réel (vu à l'échelle microscopique). La zone de contact possède une résistance appelée aussi résistance de contact  $R_c$ , qui est donnée par le rapport de la tension de contact mesurée aux bornes des contacts et le courant qui les traverse. Elle résulte de deux contributions : la résistance massique des matériaux de contacts  $R_m$  et la résistance de constriction  $R_{const}$  due aux contacts élémentaires. La résistance massique des matériaux de contacts est habituellement faible par rapport à la résistance de constriction et ne dépend que de

la résistivité du matériau. Par contre, la résistance des contacts élémentaires évolue et dépend du nombre et de la taille des contacts élémentaires mais aussi des couches présentes sur la surface des contacts (oxydes, érosion, pollution,...).

Les contacts statiques constituent un vaste domaine d'étude, englobant plusieurs disciplines de la physique et de la mécanique des contacts électriques. Cette branche de recherche est caractérisée par une diversité de phénomènes physiques et de mécanismes complexes qui se produisent lorsque deux surfaces entrent en contact sans mouvement relatif significatif.

Les études sur les contacts statiques ont conduit au développement d'une théorie approfondie visant à comprendre et à modéliser les phénomènes qui se produisent au niveau des points de contact. Cette théorie englobe des aspects fondamentaux de la physique tels que la conductivité électrique, les propriétés mécaniques des matériaux, la thermodynamique des surfaces, et d'autres concepts connexes. Elle est le fruit de nombreuses recherches et est continuellement enrichie par les avancées dans le domaine.

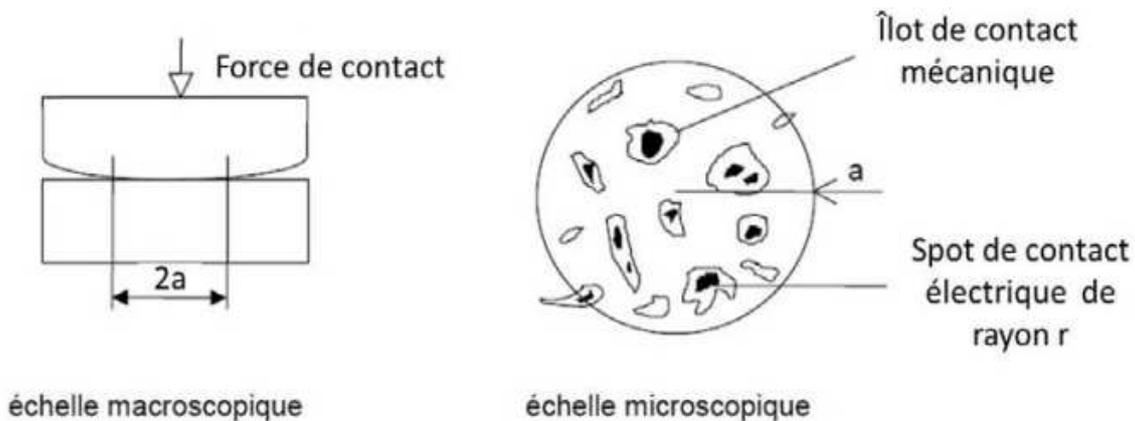
Un corpus substantiel de travaux scientifiques a été consacré à l'étude des contacts statiques, avec un grand nombre d'articles publiés par des chercheurs du monde entier. Ces articles, répertoriés dans les références [5, 6, 7, 8], constituent une base solide pour les chercheurs et les praticiens qui cherchent à approfondir leur compréhension de ce domaine et à appliquer ces connaissances dans des applications concrètes.

Ces recherches sont essentielles dans de nombreux secteurs industriels où les contacts statiques sont omniprésents, tels que l'électronique, l'automobile, l'aérospatial et bien d'autres. Elles fournissent des bases théoriques et des outils précieux pour optimiser les performances des systèmes électriques, minimiser les pertes énergétiques, prolonger la durée de vie des composants et contribuer à des avancées technologiques significatives.

L'état des surfaces des conducteurs revêt une importance cruciale dans les applications électriques, car il influence de manière significative les zones de contact entre les conducteurs. Ces zones de contact, essentielles pour le passage du courant électrique, ne s'effectuent que par l'intermédiaire de quelques îlots localisés dans une aire apparente de contact, comme illustré dans la **figure I- 3**, en raison de la rugosité présente sur les surfaces.

L'impact de la rugosité est particulièrement remarquable : le courant électrique ne peut traverser uniformément l'ensemble des surfaces en contact mécanique en raison des variations de la rugosité. Cela dépend également de la présence d'éventuelles couches d'oxyde ou de polluants déposées à la surface, lesquelles peuvent agir comme des barrières entravant le passage du courant.

Un autre élément crucial à considérer est la taille des îlots de contact mécanique et les points de contact électrique, souvent désignés par «  $\alpha$ -spots ». Cette taille est intrinsèquement liée à plusieurs paramètres, notamment la force appliquée pendant le contact, la forme macroscopique des surfaces en contact, leur rugosité respective, ainsi que la nature des matériaux impliqués. Chacun de ces paramètres joue un rôle déterminant dans la distribution et la densité de ces points de contact, influant ainsi directement sur la résistance de contact et, par conséquent, sur les performances globales du système électrique. Une compréhension approfondie de ces mécanismes est donc essentielle pour concevoir des dispositifs et des systèmes électriques optimaux.



**Figure I- 3** : Schématisation du modèle de la résistance de contact à plusieurs passages [9].

Le calcul prenant en compte l'interaction entre les spots ne peut pas être effectué de manière analytique, en raison de la complexité inhérente à ce type de modélisation. Cependant, malgré cette complexité, il est toujours envisageable de formuler des expressions approximatives dans des cas spécifiques. L'un des pionniers dans ce domaine est Holm, dont les travaux ont jeté les bases pour évaluer la résistance dans des configurations particulières.

Holm a entrepris le calcul de la résistance pour un ensemble de N spots uniformes, chacun ayant un rayon identique (r), répartis de manière régulière sur une aire apparente de rayon « a » [6]. Cette approche a été fondamentale car elle a permis d'explorer la relation entre la distribution spatiale des spots et la résistance électrique, offrant ainsi des solutions et des insights précieux pour des systèmes comportant plusieurs spots de contact.

Holm a ainsi ouvert la voie à des méthodologies de calcul approchées, établissant ainsi des fondements pour l'étude et l'analyse des interactions complexes entre les points de contact, ce qui est essentiel dans la conception et l'optimisation de systèmes électriques à multiples contacts. Ces contributions ont élargi notre compréhension du comportement électrique dans des configurations réelles, en tenant compte des paramètres tels que le rayon des spots, leur distribution spatiale et d'autres variables importantes.

$$R_c = \frac{\rho}{2N.r} + \frac{\rho}{2a} \quad (I - 5)$$

Dans cette formule, un terme correspond à la résistance des N spots en parallèle :

$$\frac{\rho}{2N.r}$$

Et un terme d'interaction :

$$\frac{\rho}{2a}$$

## **I.3 PROPRIETES D'UN ARC ÉLECTRIQUE LORS DE LA COUPURE ET ANALYSE DES PHENOMENES ASSOCIES**

### **I.3.1 Introduction**

L'arc électrique, également appelé décharge électrique auto-entretenu à fort courant, est un phénomène singulier. Il mérite son qualificatif "auto-entretenu" du fait qu'il n'exige pas l'introduction d'une source externe d'ionisation pour maintenir son existence. Les collisions inélastiques entre les particules chargées, en particulier les électrons, et les atomes neutres suffisent à déclencher et à maintenir l'ionisation,

caractérisant ainsi la nature auto-entretenu de l'arc. Son appellation "à fort courant" découle de sa constance en termes de courant, toujours supérieur à 0,1 A, ce qui le distingue nettement des autres types de décharges.

L'introduction suffisante d'énergie dans le milieu situé entre les deux électrodes portant des potentiels différents provoque l'ionisation de cette aire et lui confère une conductivité électrique. Ce milieu inter-électrodes peut être composé d'air ou d'un gaz. Par exemple, dans certaines applications industrielles ou scientifiques, des gaz particuliers sont utilisés pour obtenir des performances spécifiques. Sous l'influence du champ électrique appliqué aux bornes des contacts, les électrons se déplacent en direction de l'anode, la borne positive. Les ions porteurs de charge positive se déplacent en direction de la cathode, la borne négative. Cette migration des charges met en évidence un flux de charges essentiel au fonctionnement de l'arc électrique.

Pour appréhender pleinement l'arc électrique, un phénomène transitoire complexe caractérisé par des variations de la distance inter-électrodes au fil du temps, il est essentiel de décrire en premier lieu les propriétés de l'arc stationnaire dans un gap fixe. Cette approche permettra de distinguer clairement les différentes zones de l'arc, donnant ainsi des bases solides pour mieux comprendre ce phénomène. L'arc stationnaire peut être assimilé à un instantané figé de l'arc, comme si nous gelions l'arc électrique à un moment précis. Cette considération peut être pertinente si l'on suppose que l'arc est à l'équilibre thermodynamique local à ce moment donné. En d'autres termes, à un certain moment, les propriétés thermiques de l'arc atteignent un équilibre relatif à cette configuration particulière. Dans le monde réel, les conditions du système électrique varient avec la variation de la distance entre les électrodes (le gap). Cela nous amène à aborder le cas plus complexe de l'arc de coupure à gap variable. Cette situation dynamique nécessite une analyse approfondie où nous devons donc étudier les mécanismes en jeu dans ce contexte fluctuant pour saisir pleinement les phénomènes et les comportements associés à l'arc électrique, notamment lorsqu'il s'agit d'un arc de coupure.

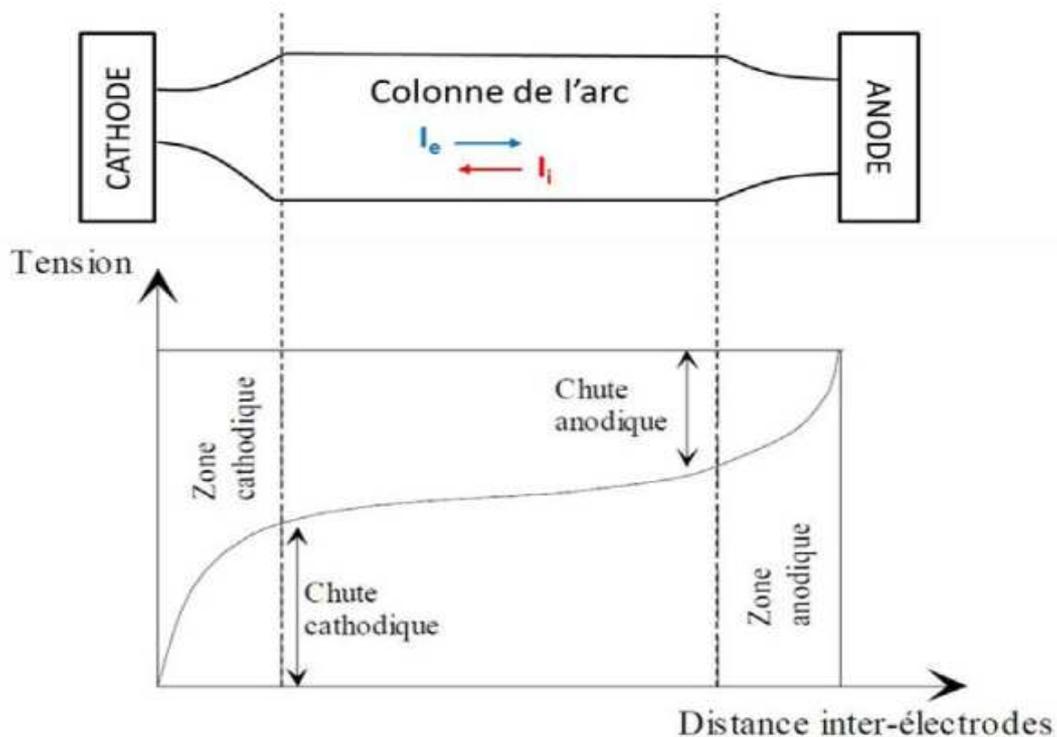
### **I.3.2 L'arc stationnaire**

Le plasma se constitue au milieu inter-électrodes où se manifeste la décharge électrique, ce qui nous amène à étudier un arc entre deux électrodes fixes. Les mesures

effectuées à l'aide de la sonde de Langmuir ont révélé que le champ électrique ne demeure pas constant entre ces électrodes. Lorsque l'on trace le potentiel électrique le long de l'espace entre les électrodes, il devient évident que la structure de l'arc se divise en trois parties distinctes, comme c'est illustré dans la **figure I- 4**.

Une colonne où le champ électrique demeure constant avec une valeur relativement faible et deux zones d'extrémité, nommées cathodique et anodique, où la chute de tension s'opère beaucoup plus rapidement que dans la colonne centrale. Ces distinctions dans le champ électrique et la vitesse de la chute de tension entre ces différentes régions nous informent sur la dynamique interne de l'arc électrique.

Une analyse détaillée de ces trois zones a déjà été entreprise dans le travail préalable de L. Nedelec [10]. Dans notre étude actuelle, nous nous concentrerons seulement sur les caractéristiques fondamentales de chaque région, mettant en lumière leurs rôles et leurs impacts sur le comportement global de l'arc électrique. Comprendre ces aspects revêt une importance cruciale pour une vision approfondie du plasma et de ses interactions ce qui est primordial pour les différents applications.



**Figure I- 4 :** Potentiel entre les électrodes dans un arc stationnaire.

### **I.3.2.1 La colonne de l'arc**

La colonne constitue la majeure partie de cette phénoménale manifestation énergétique. À l'intérieur de cette colonne, nous trouvons un mélange complexe de particules, comprenant des électrons, des ions et diverses espèces neutres telles que des atomes et des molécules. L'ensemble de ces particules interagissant dans un même environnement forme ce que l'on appelle un plasma thermique.

Dans ce plasma, les électrons subissent une accélération induite par le champ électrique en jeu et se déplacent en direction de l'anode. Tout au long de ce parcours, ces électrons subissent une multitude de collisions avec les atomes, les ions et les molécules présents, cédant ainsi une fraction de leur énergie cinétique à ces particules lors de chaque impact. Ces collisions sont responsables de la conversion d'énergie électrique en énergie thermique. C'est ainsi que l'énergie cinétique des électrons est transférée sous forme d'agitation thermique au niveau du plasma. L'énergie thermique acquise par le plasma grâce à ces collisions incessantes déclenche l'ionisation des espèces, réalisée par des collisions inélastiques entre les particules constitutives du plasma. Ces collisions violentes permettent non seulement l'ionisation mais engendrent également une densité suffisante de porteurs de charges, assurant ainsi une excellente conduction électrique au sein du plasma. Ce mécanisme dynamique illustre remarquablement la transformation d'énergie électrique en énergie thermique, conduisant à un plasma conducteur.

Le potentiel varie linéairement le long de la colonne car le champ électrique est quasi-constant de l'ordre de  $10^3 \text{ V.m}^{-1}$ . Il est admis de considérer la colonne d'arc à l'équilibre thermodynamique local (ETL), ce qui signifie qu'en un point donné toutes les températures de toutes les espèces présentes (ions, électrons et neutres) sont identiques. La mobilité des ions étant faible devant celle des électrons et ne gagnant que très peu d'énergie entre les collisions, la conductivité est essentiellement assurée par les électrons.

### **I.3.2.2 La zone cathodique**

La zone cathodique étant l'interface entre la cathode et la colonne de l'arc électrique, joue un rôle crucial dans le processus global. Elle est caractérisée par une chute de potentiel d'environ une dizaine de volts, une valeur qui peut varier en fonction

de la nature du matériau constituant la cathode. Cette chute de potentiel est essentielle car elle marque le point où l'énergie est transférée de la source d'alimentation vers l'arc électrique, créant ainsi un environnement propice à la libération d'électrons.

L'importance de la zone cathodique dans le fonctionnement de l'arc réside dans le fait qu'elle est l'endroit précis où l'émission d'électrons se produit en abondance. Ces électrons libérés, formant le flux principal du courant électrique de la colonne, sont catapultés hors de la cathode par le potentiel électrique. Leur mouvement rapide et coordonné à travers la zone cathodique est fondamental pour l'initiation et le maintien de l'arc électrique.

La zone cathodique se divise en deux parties distinctes : d'une part, une zone de charge d'espace où les électrons émis initient le courant électrique, et d'autre part, une zone d'ionisation où les électrons émis interagissent avec les particules du milieu, provoquant l'ionisation. Cette division en deux zones fonctionnelles est illustrée en détail dans la **figure I- 5**, fournissant ainsi une visualisation explicite de ce processus central du fonctionnement de l'arc électrique.

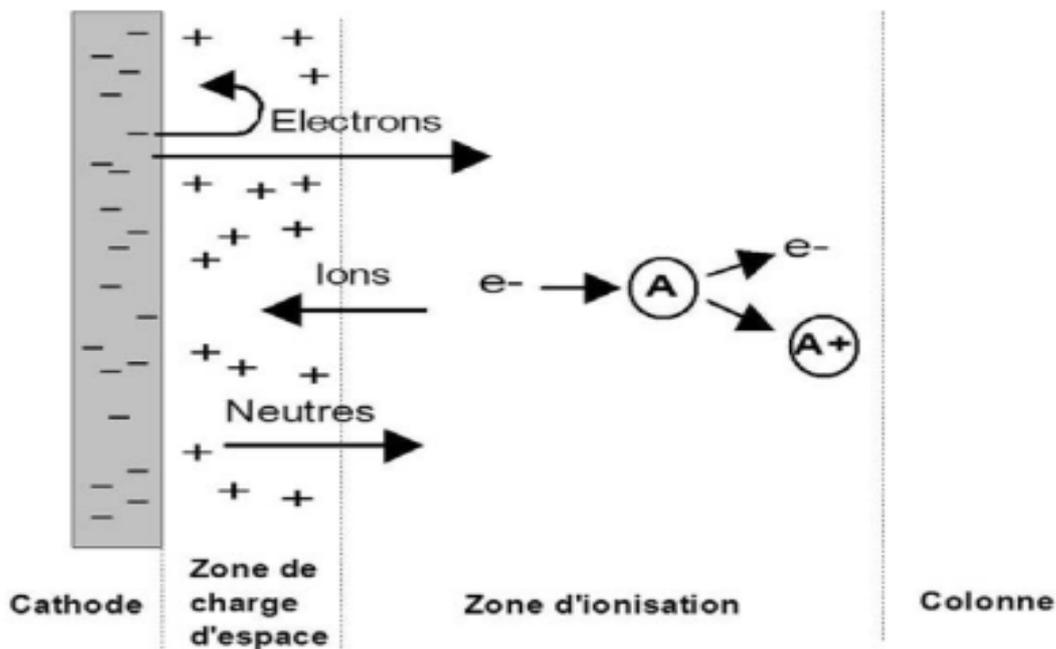


Figure I- 5 : Structure de la zone cathodique [10].

### I.3.2.3 La zone anodique

L'anode par rapport à la cathode occupe un rôle relativement moins essentiel dans la structure et le fonctionnement de l'arc électrique. Il est pertinent de souligner que la région de transition entre l'anode et la colonne n'a été que peu étudiée jusqu'à présent. En dépit de cela, la zone anodique a ses propres fonctions significatives dans le contexte de l'arc.

Essentiellement, la zone anodique agit principalement comme collecteur d'électrons. C'est dans cette région que les électrons, après avoir traversé la colonne, sont dirigés vers l'anode. La zone anodique peut être conceptualisée en deux parties successives distinctes : premièrement, une zone double de charge d'espace où les électrons sont collectés et canalisés vers l'anode, et deuxièmement, une zone de transition anodique qui marque la jonction entre la charge d'espace et la partie proprement dite de l'anode (**Figure I- 6**).

Même si son rôle peut sembler moins prépondérant que celui de la cathode, comprendre le fonctionnement de la zone anodique reste d'une importance significative. Il contribue à une vision globale de la dynamique de l'arc électrique, apportant ainsi des connaissances cruciales pour diverses applications, telles que la conception et l'optimisation de dispositifs et de technologies liées à l'arc électrique. Des recherches approfondies sur la région de transition anode-colonne sont également nécessaires pour élucider davantage les phénomènes qui s'y produisent et leur impact sur le comportement global de l'arc.

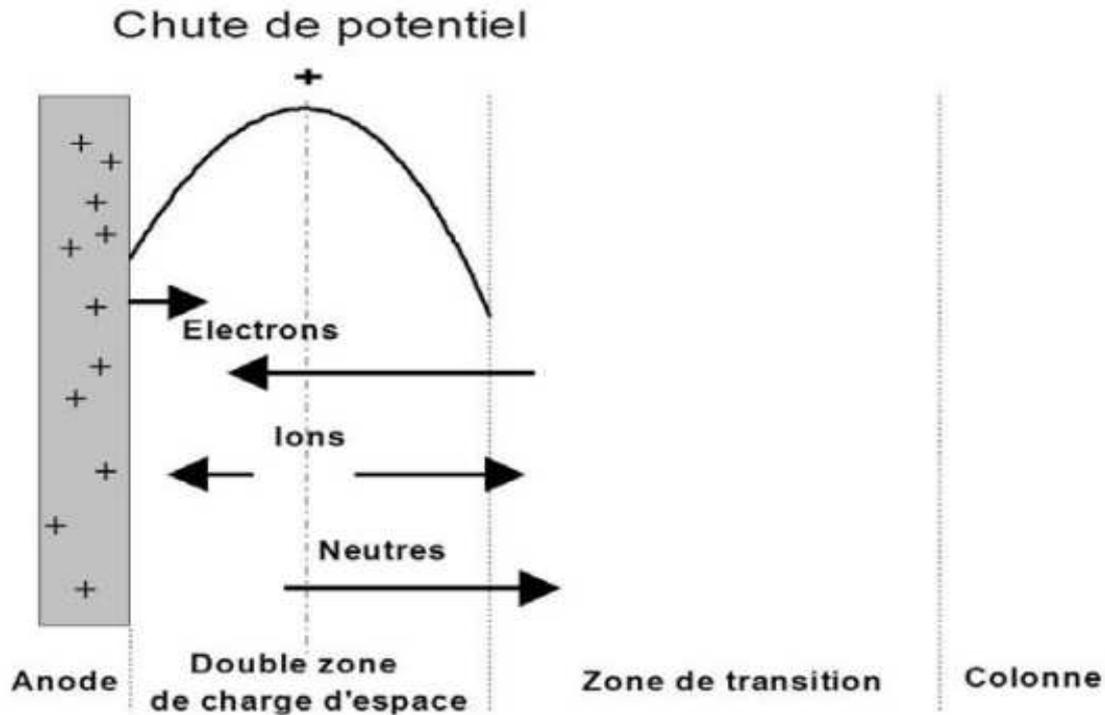


Figure I- 6 : Structure de la zone anodique [10].

#### **I.4 L'ARC ELECTRIQUE DE COUPURE (LES DIFFERENTES PHASES DE L'ARC D'OUVERTURE) (EVOLUTION DE LA TENSION AUX BORNES DES CONTACTS)**

Lorsque survient une coupure, qu'elle soit volontaire ou non (accidentelle), et lors de la séparation à chaud des contacts électrique, un phénomène important se produit : l'apparition et l'évolution rapide du phénomène de l'arc électrique, depuis son initiation jusqu'à son extinction naturelle ou provoquée. Dans notre domaine d'étude, l'extinction de l'arc est généralement obtenue par l'ouverture mécanique des contacts.

Il est important de noter que la structure de l'arc électrique n'est pas figée comme celle décrite dans le paragraphe précédent de l'arc stationnaire. Il conserve les composants essentiels d'un arc électrique à savoir une colonne, une zone anodique et une zone cathodique mais avec des variations. Ces variations sont induites par l'expansion de l'arc, modifiant les phénomènes physiques aux interfaces du plasma et des électrodes. En effet, la structure de l'arc subit des modifications en raison du mouvement de l'espace inter-électrodes. La colonne d'arc évolue et s'allonge progressivement au fil du temps à mesure que la distance entre les contacts s'agrandit lors de leur éloignement.

Cette ouverture des contacts engendre des interactions complexes entre l'arc et son environnement. Ces interactions peuvent englober des phénomènes tels que des perturbations électromagnétiques, des échanges thermiques et des réactions chimiques avec l'atmosphère environnante. Comprendre en détail cette dynamique de l'arc pendant son évolution, depuis son allumage jusqu'à son extinction est essentiel. Cela permet d'optimiser les processus de coupure, de garantir la sécurité des dispositifs électriques et d'améliorer les performances des systèmes impliquant des arcs électriques.

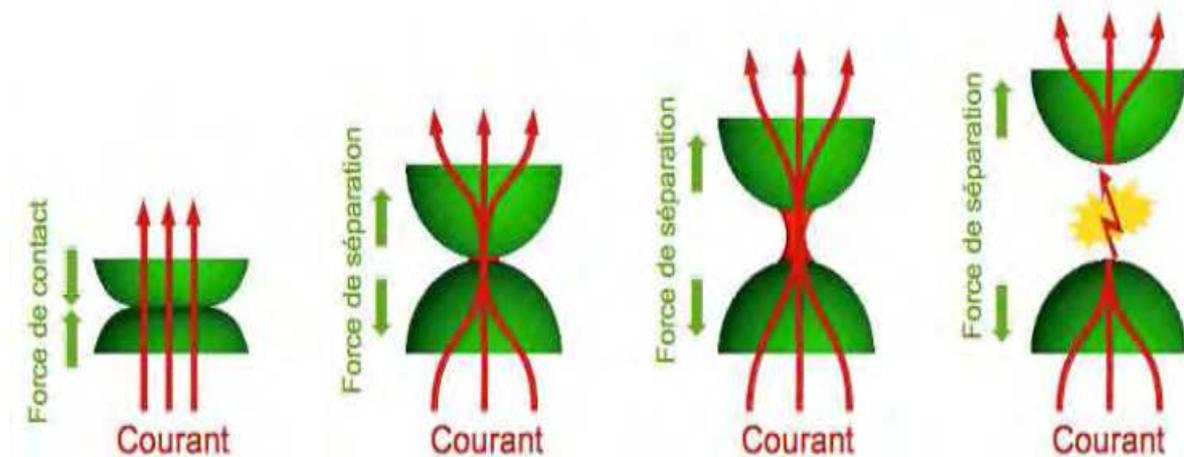
## **I.5 AMORÇAGE DE L'ARC PAR CONTACT : CREATION ET EXPLOSION D'UN PONT FONDU**

Durant l'ouverture des deux contacts métalliques, plusieurs phénomènes interviennent pour donner naissance à un arc électrique. Dans notre étude, l'arc est amorcé par l'explosion d'un pont de matière fondue, et il s'éteint grâce au mouvement d'ouverture des contacts. Initialement, deux contacts métalliques sont maintenus en position fermée grâce à une force appliquée. À ce stade, un courant électrique traverse ces contacts.

Aux premiers instants de l'ouverture, la force de contact initialement appliquée  $F_c$ , commence à diminuer à mesure que le nombre de contacts élémentaires diminue et que leurs surfaces se réduisent. Finalement, il ne subsiste qu'un seul contact élémentaire à la fois, à travers lequel les lignes de courant se concentrent, entraînant ainsi une augmentation significative de la résistance de constriction. C'est à ce stade que le métal, soumis à l'effet Joule, commence à s'échauffer progressivement jusqu'à atteindre le point de fusion.

Le métal en fusion crée un pont fondu entre les deux contacts, agissant comme un conducteur alternatif pour le courant électrique. À mesure que les électrodes s'éloignent progressivement l'une de l'autre, ce pont liquide s'étire. Lorsque cette fine ligne de métal atteint une certaine tension critique, elle subit une vaporisation instantanée due à la chaleur intense et à la pression croissante. Cet événement violent est communément appelé "l'explosion du pont fondu".

L'explosion du pont fondu libère une grande quantité d'énergie, provoquant la vaporisation du métal liquide et créant un plasma de gaz ionisé. Ce phénomène entraîne l'ionisation de l'espace inter-électrodes et déclenche ainsi l'apparition immédiate et spontanée de l'arc électrique. Cet arc électrique est caractérisé par son intensité élevée, sa chaleur intense, son éclat lumineux et les ondes électromagnétiques générées (**Figure I- 7**).

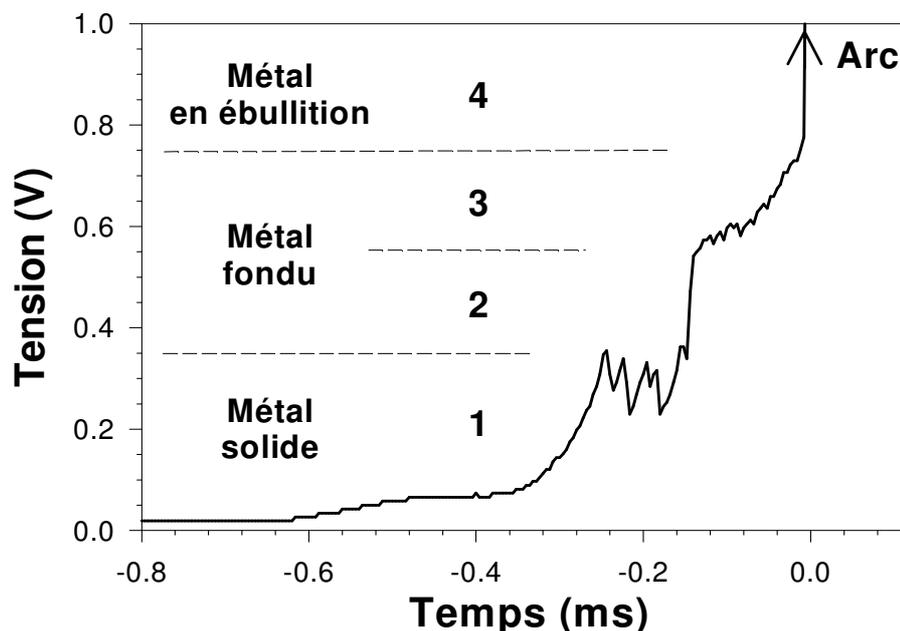


**Figure I- 7** : Phase d'allumage d'un arc par séparation de contacts

L'évolution de la tension aux bornes des contacts lors de l'écartement progressif des électrodes juste avant l'apparition de l'arc électrique est représentée de manière graphique sur la **figure I- 8**. Cette courbe nous offre un aperçu visuel des différentes étapes successives de la formation de la zone de contact. Quatre phases distinctes intimement liées à la formation du pont fondu, y sont clairement identifiables grâce à des travaux antérieurs [11,12] :

- **Échauffement local du métal au point de contact (striction à l'état solide)** : Lorsque le courant électrique traverse le point de contact initial entre les électrodes, le métal est soumis à un chauffage localisé dû à l'effet Joule. Cette phase provoque un échauffement du matériau à l'état solide.
- **Fusion de la zone de constriction (striction à l'état liquide)** : À mesure que l'échauffement persiste, la température dans la zone de constriction atteint le point de fusion du matériau provoquant ainsi sa transition de l'état solide à l'état liquide.

- **Extension de la zone fondue (striction à l'état liquide)** : Avec la fusion du matériau, la zone fondue commence à s'étendre créant un pont liquide entre les électrodes.
- **Pincement et explosion du pont fondu (striction en état d'ébullition)** : La tension continue de monter et atteint un point critique où le pont fondu est soumis à un pincement et une vaporisation rapides formant un plasma. C'est cette vaporisation explosive qui conduit à l'ionisation du milieu inter-électrodes et à l'apparition instantanée de l'arc électrique.



**Figure I- 8** : Évolution de la tension aux bornes des contacts (Ag, 40 A, 2 cm/s).

### I.5.1 Le développement de l'arc électrique

L'arc électrique est fortement influencé par plusieurs paramètres, dont la tension, le courant d'alimentation et la configuration du circuit (résistif, inductif, capacitif, courant continu ou alternatif). Ces éléments jouent un rôle important dans l'amorçage et le maintien de l'arc électrique.

La tension exprimée en volts est un paramètre essentiel. Elle représente la différence de potentiel entre les électrodes, nécessaire pour amorcer l'arc. On sait que pour qu'un arc électrique se forme, une tension minimale  $V_{\min}$ , d'environ quelques dizaines de volts

est requise. Cette tension est critique pour établir un champ électrique adéquat qui initie la formation du pont fondu.

De même, le courant d'alimentation exprimé en ampères est un élément vital. Il représente la quantité de charge électrique en mouvement par unité de temps. Pour amorcer un arc, un courant minimal  $I_{\min}$ , est nécessaire, souvent de l'ordre de quelques centaines de milliampères. Ce courant minimal est aussi important pour chauffer le point de contact initial, provoquant ainsi la fusion du matériau et la création du pont fondu. Le courant minimal de l'arc est essentiel pour maintenir une densité suffisante d'électrons dans le plasma. En effet, en deçà de cette valeur minimale, l'arc n'a plus l'énergie thermique nécessaire pour s'auto-entretenir et il s'éteint. La tension minimale requise par l'arc est la somme des potentiels d'ionisation du gaz et du travail de sortie des électrons provenant de la cathode.

Lorsque l'arc s'établit, la vapeur métallique provenant de l'explosion du pont fondu forme un environnement entre les électrodes. La tension de l'arc mesurée aux bornes des contacts passe instantanément de quelques centaines de millivolts à une dizaine de volts correspondant à la tension minimale de l'arc. Cette tension dépend du matériau des contacts et de l'atmosphère, tandis que sa forme dépend de la vitesse de séparation.

Le tableau 1-1 présente de manière synthétique les tensions et courants d'arc minimaux pour différents matériaux, offrant ainsi un aperçu des spécificités de ces paramètres dans le contexte de la formation et du maintien de l'arc électrique.

**Tableau I- 1 :** Courant et tension minimaux d'arc dans une atmosphère ambiante [13, 14,15]

Matériaux	Courant minimal (A)	Tension minimale (V)
Ag	0.4	12
Cu	0.4	13
Or	0.35	12.5
Pd	0.8	14
Fe	0.45	12.5
Ni	0.5	13.5

## I.5.2 Conséquences et problèmes engendrés par l'arc d'ouverture / commutation

L'arc électrique représente la principale cause de défaillances des connecteurs en particulier des conducteurs. Cet événement se produit à l'ouverture et à la fermeture des contacts électriques. Les conséquences de l'arc électrique sur les contacts sont majeures et peuvent entraîner des dégradations significatives.

L'un des principaux phénomènes de dégradation des contacts causés par l'arc électrique est l'**augmentation de la résistance de contact**. Lorsque l'arc s'établit, il génère de la chaleur et provoque la fusion et l'érosion du matériau des contacts. Cette fusion et érosion altèrent la surface des contacts ce qui conduit à une augmentation de leur résistance. Cette résistance accrue peut affecter la performance du circuit électrique en entraînant une chute de tension, un échauffement excessif et même un mauvais fonctionnement des appareils.

En plus de l'augmentation de la résistance de contact, l'arc électrique provoque l'**érosion et l'oxydation des contacts**. Les hautes températures générées par l'arc entraînent l'évaporation et la dispersion des matériaux des contacts créant ainsi des particules et des dépôts sur les surfaces environnantes. Ces particules peuvent causer des problèmes d'isolation, des courts circuits et augmenter davantage la résistance de contact.

Lors de la fermeture des contacts, l'arc électrique peut également entraîner le **phénomène de soudure**. Ceci se produit lorsque les contacts se touchent et se séparent rapidement, générant un arc électrique. Les hautes températures et les forces impliquées dans ce processus peuvent faire fondre et souder temporairement les contacts créant ainsi des irrégularités sur leur surface. Ces irrégularités peuvent interférer avec un futur établissement de contact stable.

Tous ces phénomènes causés par l'arc électrique peuvent provoquer des dysfonctionnements des appareils et des moyens d'interface de coupure. Dans des cas graves, ils peuvent conduire à la destruction du dispositif.

### I.5.2.1 Augmentation de la résistance de contact

Lorsque la durée de l'arc électrique dépasse une certaine durée ce que l'on peut considérer comme une "longueur significative", divers éléments présents dans l'atmosphère peuvent pénétrer dans le plasma formé par l'arc électrique. Ces éléments atmosphériques tels que l'oxygène et le carbone ont la capacité de modifier et de contaminer la surface des contacts électriques.

Les phénomènes de contamination de la surface des contacts engendrés par l'arc électrique peuvent se manifester sous plusieurs formes dont l'**oxydation**, la **carbonisation** et l'**érosion** [16, 17]. L'oxydation survient lorsque les atomes ou molécules de l'atmosphère réagissent avec les matériaux constituant les contacts à des températures élevées, formant ainsi des composés oxydés qui recouvrent la surface du matériau. La carbonisation résulte de la présence du carbone qui peut provenir de l'atmosphère ou des matériaux eux-mêmes et forme des couches carbonisées. L'érosion quant à elle, est provoquée par les interactions violentes entre le plasma et les matériaux des contacts, entraînant leur détérioration physique.

Ces phénomènes de contamination et de dégradation génèrent une **augmentation de la résistance de contact**. La formation de ces couches isolantes altère la conductivité des surfaces de contact. Leur présence peut entraîner un défaut de conduction des contacts où le contact qui était supposé conducteur en position fermée devient effectivement isolant en raison de la formation de ces couches isolantes [16]. Cette augmentation de la résistance de contact peut avoir des conséquences néfastes sur le circuit électrique, provoquant des pertes de puissance, des surchauffes et un fonctionnement non optimal des dispositifs reliés.

### I.5.2.2 Transfert de matière et érosion des contacts

Lorsqu'un arc électrique se produit entre les contacts métalliques, il déclenche un processus complexe qui entraîne un échauffement considérable des contacts, suivi d'une évaporation du matériau sous l'effet du bombardement incessant d'ions provenant à la fois de l'anode et de la cathode. Cet échauffement et cette évaporation sont des phénomènes cruciaux qui conduisent à un transfert de matière entre les conducteurs, modifiant ainsi la composition et la structure des contacts.

Le phénomène d'érosion, résultant des pertes et des échanges de matière au sein des électrodes, est étroitement lié à divers paramètres :

- **Matériau de contact** : La composition chimique et les propriétés intrinsèques du matériau des contacts jouent un rôle majeur dans le processus d'érosion. Certains matériaux sont plus résistants à l'érosion que d'autres en raison de leur structure cristalline et de leurs propriétés physiques.

- **Durée de l'arc** : La quantité de matière perdue et la gravité de l'érosion dépendent de la durée pendant laquelle l'arc électrique persiste. Plus l'arc dure longtemps, plus l'érosion est susceptible d'être sévère.

- **Intensité du courant d'arc** : L'intensité du courant d'arc influence directement l'échauffement des contacts et, par conséquent, le degré d'érosion. Des courants d'arc plus élevés entraînent généralement une érosion plus importante.

- **Vitesse d'ouverture** : La rapidité avec laquelle les contacts sont séparés est un facteur crucial. Une ouverture plus faible peut générer des conditions plus intenses et accélérer le processus d'érosion.

- **Dimensions et géométrie des électrodes** : La forme, la taille et la configuration des électrodes ont un impact sur la manière dont l'énergie de l'arc est répartie, ce qui peut influencer l'érosion de manière significative.

- **Distance inter-électrodes** : La distance entre les électrodes, appelée gap inter-électrodes, est un paramètre important influençant la densité de courant et donc l'intensité de l'arc. Cela affecte directement l'échauffement et l'érosion.

La **figure I- 9** illustre ces transferts de matière entre les contacts déclenchés par les arcs. Ce modèle a été élaboré grâce à des mesures expérimentales qui ont surveillé la modification de la masse totale des contacts soumis à des arcs de durées contrôlées [10, 16, 18]. Ces travaux expérimentaux ont été cruciaux pour comprendre et décrire les processus mis en jeu dans ces transferts de matière.

Voici une exploration approfondie de ces mécanismes :

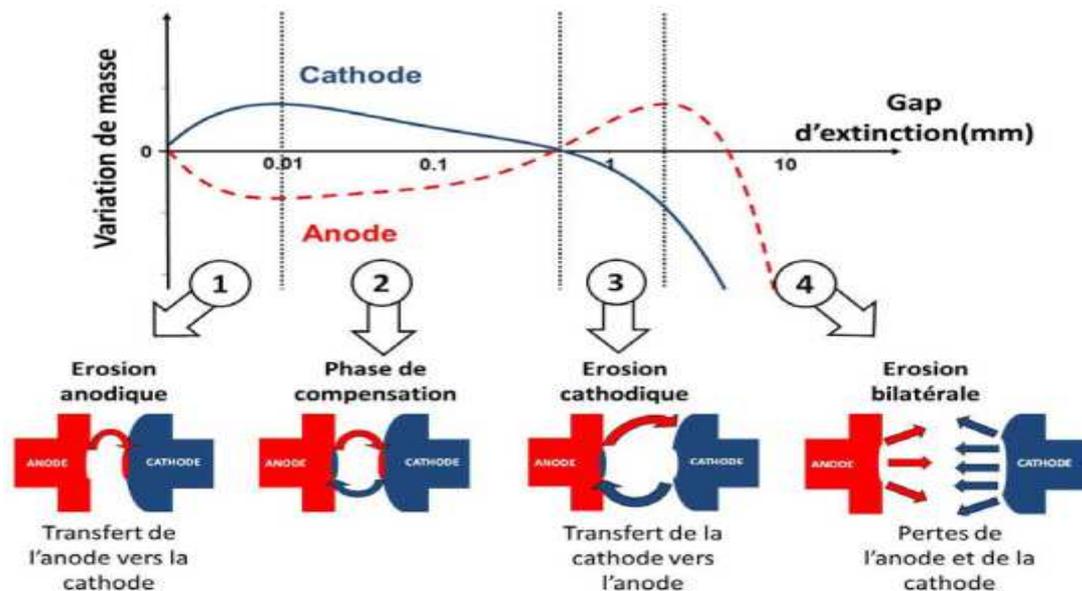
Dans les premiers instants de l'arc électrique, et avec des faibles écarts entre les électrodes, le transfert de matière se fait de l'anode vers la cathode, c'est un transfert anodique. Les électrons émis par la cathode vont percuter la surface de l'anode avec toute leur énergie. Le bombardement électronique de l'anode produit des vapeurs

métalliques qui sont assemblées par la cathode. Si le gap d'extinction reste toujours inférieur à une distance critique de quelques micromètres [16, 21], le transfert est anodique.

Lorsque l'écartement des électrodes augmente petit à petit, une phase de compensation apparaît grâce aux ions qui vont heurter la surface de la cathode qui s'échauffe et s'évapore. Un transfert de la matière de la cathode vers l'anode s'établit, permettant ainsi de compenser progressivement le transfert anodique antérieur. Ce régime correspond à un transfert équilibré entre l'anode et la cathode [21, 22].

Pour des distances plus grandes, l'évaporation de la cathode devient trop importante que celle de l'anode, cela revient à l'augmentation croissante des espèces ionisées. Le transfert de matière devient généralement cathodique, il s'effectue de la cathode vers l'anode.

Et finalement pour les gaps encore plus grands, l'érosion devient bilatérale, les pertes sont au niveau de l'anode et de la cathode. Les arcs fortement énergétiques ( $I > 10A$  [23]) induisent un mécanisme d'éjection de gouttelettes de métal fondu et la grande distance inter-électrodes rend difficile tout transfert de matière. Il est à noter que ce régime d'érosion est très dommageable pour les contacts électriques.



**Figure I- 9** : Transfert de matière entre les électrodes en fonction du gap d'extinction [1, 10,19, 20].

### I.5.2.3 Soudure des contacts

Les rebonds mécaniques, qui surviennent lors de la fermeture des contacts, peuvent entraîner des conséquences significatives dans le fonctionnement des dispositifs électriques. Ces rebonds peuvent provoquer des séparations temporaires et successives des contacts, créant ainsi plusieurs arcs électriques similaires à ceux observés lors de l'ouverture des contacts. Lors de ces rebonds, les arcs générés sur la surface fondue des contacts peuvent conduire à des phénomènes de soudure, communément appelés "soudure dynamique".

Dans la littérature spécialisée, de nombreuses études ont été menées pour comprendre les impacts de ces phénomènes, que ce soit à faible ou à forte puissance [24, 25]. Les chercheurs ont mis en évidence les phénomènes de collage et de soudure des contacts induits par ces arcs lors des rebonds.

- **Collage des Contacts** : Le collage des contacts se produit lorsque les surfaces des contacts déjà dégradées par les arcs précédents sont mécaniquement accrochées l'une à l'autre. Ces accrochages mécaniques peuvent entraîner un retard dans la réouverture des contacts lors des rebonds, ce qui affecte le bon fonctionnement du dispositif. Dans de tels cas, les contacts ne parviennent pas à se séparer complètement, retardant ainsi la coupure du courant électrique.

- **Soudure des Contacts** : Lorsque les conditions sont propices, les surfaces des contacts peuvent fondre et se fusionner sous l'effet des arcs générés lors des rebonds. Ce phénomène de soudure conduit à une liaison permanente entre les contacts, rendant l'appareil ou le dispositif de coupure inutilisable. En effet, l'appareil perd sa capacité à ouvrir les contacts et à interrompre le courant électrique, ce qui peut avoir des conséquences graves sur la sécurité et le bon fonctionnement du système électrique.

### I.5.2.4 Coupure du circuit

Lorsqu'un appareil ou un dispositif est conçu pour une application spécifique, la manière dont l'arc de coupure est géré revêt une importance cruciale. L'arc électrique peut être rapidement éteint de différentes manières, notamment par l'écartement rapide des contacts ou par des actions externes telles que le soufflage magnétique, pneumatique ou autres .... Cependant, dans certains cas, si ces mesures ne sont pas prises, l'arc peut persister entre les contacts.

La persistance de l'arc entre les contacts pose un grave problème, car cela signifie que la coupure du circuit n'est pas assurée. Cette situation peut entraîner une forte érosion des contacts, ce qui est particulièrement critique dans des dispositifs tels que les disjoncteurs. Une érosion excessive peut altérer les performances du dispositif, affecter sa durée de vie et même provoquer des défaillances complètes.

Pour minimiser les problèmes générés par l'arc persistant, deux approches sont souvent adoptées :

- **Conception Appropriée de l'Appareillage** : Une conception bien pensée de l'appareillage ou du dispositif peut permettre une extinction rapide et efficace de l'arc. Cela peut impliquer des mécanismes internes qui facilitent l'écartement rapide des contacts lors de l'ouverture ou l'intégration de dispositifs externes qui contribuent à éteindre l'arc. La conception doit être adaptée à l'application spécifique pour garantir un fonctionnement optimal.

- **Choix de Matériaux de Contact Appropriés** : Le matériau utilisé pour les contacts est crucial. Certains matériaux de contact peuvent mieux résister à l'érosion due à l'arc et offrir des performances durables. Il est important de sélectionner des matériaux de contact adéquats en fonction des propriétés spécifiques de l'arc et des exigences de l'application.

## I.6 MATERIAUX DE CONTACT

Ces dernières années, de nombreuses recherches ont été entreprises pour améliorer les matériaux de contact, en visant à développer des produits adaptés à diverses conditions d'utilisation [26, 7, 16, 27]. Pour garantir une qualité de service optimale et une longue durabilité des connecteurs, des contacts, des contacteurs et des relais automobiles (en courant continu), les matériaux de contact doivent répondre à un ensemble de critères :

- **Faible aptitude au transfert de matière entre contacts** : Les matériaux de contact doivent minimiser le transfert indésirable de matière entre eux, ce qui peut se produire pendant les cycles d'ouverture et de fermeture.

- **Faible érosion et oxydation** : Ils doivent également présenter une résistance élevée à l'érosion et à l'oxydation, des phénomènes courants lors des opérations sous arcs électriques.

- **Faible résistance de contact initiale et stabilité après les manœuvres sous arcs** : Une faible résistance initiale au contact est essentielle, et elle doit demeurer stable même après plusieurs cycles d'ouverture et de fermeture impliquant la présence d'arcs électriques.

- **Faible propension à la soudure lors de la fermeture** : Les matériaux de contact ne doivent pas avoir tendance à se souder les uns aux autres lors de la fermeture des contacts, ce qui peut compromettre le fonctionnement du dispositif.

Ces exigences, en conjonction avec la nécessité d'une bonne conductivité électrique, thermique et de résistance à l'oxydation, ont conduit à l'utilisation de métaux précieux. L'argent, en tant que constituant de base, est largement privilégié pour les contacts, souvent sous forme de matériaux composites à matrice métallique également appelés pseudo-alliages.

**REFERENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES  
DU CHAPITRE I**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE I

- [1] D. Sallais. *Contribution à l'étude de nouveaux matériaux élaborés par métallurgie des poudres pour les contacts électriques soumis aux arcs de coupure et de fermeture du courant continu*. PhD thesis, Université de Rennes 1, France, Décembre 2007.
- [2] K. L. Johnson, *Contacts mechanics*; Gambridge University Press, Cambridge, 1989.
- [3] Fisher-Cripps, Anthony C, *Introduction to contact mechanics*; New York springer, 2000.
- [4] H. Hertz. *Über die berührung fester elastischer körper*. Journal für die reine und angewandte Mathematik, vol.92, pages 156–171, 1882
- [5] P.G. Slade. *Electrical Contacts: Principles and applications*. CRC Press Taylor & Francis Group edition, New York, 2014
- [6] R. Holm. *Electric Contacts: theory and applications*. Springer edition, 2000
- [7] L. Féchant. *Le contact électrique : phénomènes physiques et matériaux*. Collection SEE, Hermes édition, 1997.
- [8] W. Rieder. *Electrical Contacts: an introduction to their physics and applications*. VDE Verlag, 2005.
- [9] M. Porte. *Etudes et caractérisations de l'arc électrique de déconnexion entre contacts de connecteurs automobiles de puissance. Etudes de solutions pour en limiter les effets*. PhD thesis, Université de Rennes 1, France, Avril 2007.
- [10] L. Nedelec, " *Contribution à l'étude des arcs électriques et de leurs conséquences sur les matériaux de contacts : application aux commutateurs automobiles* ", Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, France, Juin 1997.
- [11] R. Haug, T. Kouakou, and J.L. Doremieux. *Phenomena preceding arc ignition between opening contacts: experimental study and theoretical approach*. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Part A, vol. 14, n°1, pages 14–19, March 1991.
- [12] S.N. Kharin. *Dynamics of the transition of the arc metallic phase into the gaseous phase in opening electrical contacts*. Proc. 17th International Conference on Electrical Contacts, pages 817–825, Nagoya, July 1994.
- [13] Holm R., " *Electrical contacts* ", Springer-Verlag, Berlin, 4th edition, 1967.
- [14] Slade P.G., " *Electrical Contacts* ", Marcel Dekker Inc. edition, 1999.

- [15] Ben Jemaa N., Quéffelec J.L., Haug R., "*Theoretical and experimental laws of anodic and cathodic arc duration on break at low electrical level*", J. Phys. D: Appl. Phys. 20, pp 468-475, 1987.
- [16] L. Morin. *Etude expérimentale des arcs électriques et de leurs conséquences sur les matériaux de contact : application aux commutateurs automobiles de puissance*. PhD thesis, Université de Rennes 1, France, Juin 2000.
- [17] G. Witter and I. Polevoy. *A study of contact resistance as a function of electrical load for silver based contacts*. Proc. 17th International Conference on Electrical Contacts, pages 563–567, Nagoya, July 1994.
- [18] L. Doublet. *Contribution à l'étude de l'arc électrique et de ses interactions avec les matériaux de contact sous 42 Volts DC pour applications automobiles*. PhD thesis, Université de Rennes 1, France, Juillet 2004.
- [19] L. Morin, N. Benjema, D. Jeannot, and H. Sone. *Transition from the anodic arc phase to the cathodic metallic arc phase in vacuum at low dc electrical level*. Proc. 47th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, pages 88–93, Montreal, September 2001.
- [20] Z. Chen, K. Sawa, "*Effect of Arc Behaviour on Material Transfer: a Review*", Proc. 42nd IEEE Holm Conf. On Electrical Contact, Chicago, Sept. 1996, pp. 238-251.
- [21] N. Benjema, L. Morin, S. Benhenda, and L. Nedelec. *Anodic and cathodic arc transition according to break arc lengthening*. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies Part A, vol.21 n°4, pages 599–603, December 1998.
- [22] J. Swingler and J.W. McBride. *The net zero erosion phenomena on opening switching contacts with ac loading*. Proc. 43rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, pages 238–245, Philadelphia, October 1997.
- [23] J. McBride. *The volumetric erosion of electrical contacts*. Proc. 45th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, pages 44–52, Pittsburgh, 1999.
- [24] C. Poulain and J. Devautour. *Parametric study of the dynamic welding of power electrical contacts*. Proc. 19th International Conference on Electrical Contacts, pages 343–347, Nuremberg, September 1998.
- [25] C. Leung and E. Streicher. *Material transfer in dynamic welding of Ag an AgSnO2 contact material*. Proc. 48th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, pages 21–28, Orlando, October 2002.
- [26] L. Féchant, P. Tixador, *Matériaux conducteurs et de contact électrique*, Collection EGEM, Hermes édition, 2003.

- [27] F. Hauner, D. Jeannot, K. Mc Neilly, J. Pinard, ***Advanced AgSnO<sub>2</sub> contact materials for the replacement of AgCdO in high current contactors***, Proc. 46th IEEE Holm Conf. On Electrical Contact, Sept. 2000, Chicago, pp. 225-230.

# CHAPITRE

# 2

**L'arc d'ouverture-**

**L'arc à l'ouverture des contacts et  
ses conséquences**

---

## **II.1 INTRODUCTION**

L'augmentation de la puissance électrique des appareils destinés aux applications aérospatiales, aéronautiques ou aussi automobiles nécessite une augmentation de la tension d'alimentation. Toutefois, cette transition entraîne des arcs électriques plus importants en termes de durée et d'énergie [1-6]. Il est donc impératif de comprendre ce phénomène afin de trouver des moyens d'atténuer leurs répercussions sur les matériaux des contacts [7-11]. Ce chapitre se concentre sur les travaux menés sur l'arc d'ouverture à différentes puissances en courant continu DC, et vise à discuter des résultats obtenus. Nous commencerons par présenter le banc d'essai expérimental simulant l'ouverture en continue des contacts fabriqués par nos soins, les conditions expérimentales des tests appliquées, ainsi que les matériaux de contact utilisés.

Dans notre étude, nous aborderons en détail les différents phénomènes observés lors de l'ouverture des contacts à savoir le pont fondu et l'arc électrique qui feront l'objet de notre de recherche. Ces deux phénomènes jouent un rôle essentiel dans la compréhension des effets sur les connexions et en particulier les contacts électriques.

Tout d'abord, nous examinerons les conséquences de ces arcs d'ouverture sur les contacts en analysant des aspects tels que le nombre de cycle d'opérations (durée de vie des contacts), la longueur et la durée de ces arcs, l'augmentation de la résistance de contact et le transfert de matière entre les contacteurs.

Au même temps, nous caractérisons les performances des différents matériaux impliqués dans ces contacts (revêtu et non revêtu). Il est essentiel de comprendre comment ces matériaux réagissent et interagissent avec les phénomènes observés.

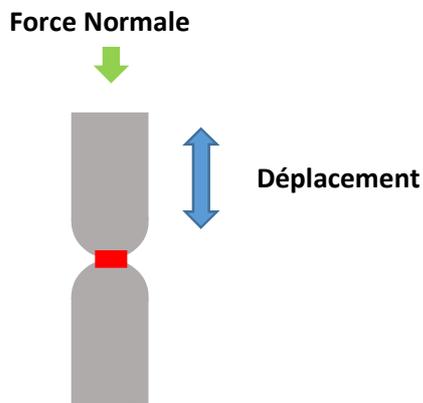
Enfin, nous présentons les résultats obtenus relatif aux durées d'arc lors de l'extinction naturelle de l'arc par ouverture dans différentes conditions électriques. Ces données seront nécessaires pour évaluer les performances et les comportements des contacts dans différentes conditions.

## **II.2 BANC D'ESSAI D'OUVERTURE, PROCEDURES DE TESTS ET MATERIAUX DE CONTACT**

### **II.2.1 Principe de fonctionnement du dispositif expérimental**

Le principe du dispositif expérimental repose sur une méthodologie élaborée et mise en œuvre au niveau de laboratoire ATM/ DAIT de centre de développement des satellites CDS. Ce dispositif a été spécialement développé par nos soins pour faire des études approfondies sur les arcs électriques apparaissant lors de l'ouverture des contacts. Le dispositif expérimental a été conçu pour reproduire des ouvertures de contacts dans des conditions électriques et mécaniques purement contrôlées, imitant ainsi exactement les conditions que l'on retrouve dans des équipements de coupure tels que les relais et les contacteurs. La conception globale du dispositif comprend deux composantes majeures : une partie mécanique et une partie électrique dédiée à l'instrumentation, la commande et à l'acquisition des données expérimentales. En combinant ces composantes, ce dispositif offre un moyen robuste et contrôlé pour mener des recherches sur les arcs électrique à l'ouverture des contacts, apportant des clartés précieux sur ces phénomènes et leur impact sur les dispositifs de coupure électriques, précisément les contacts électrique.

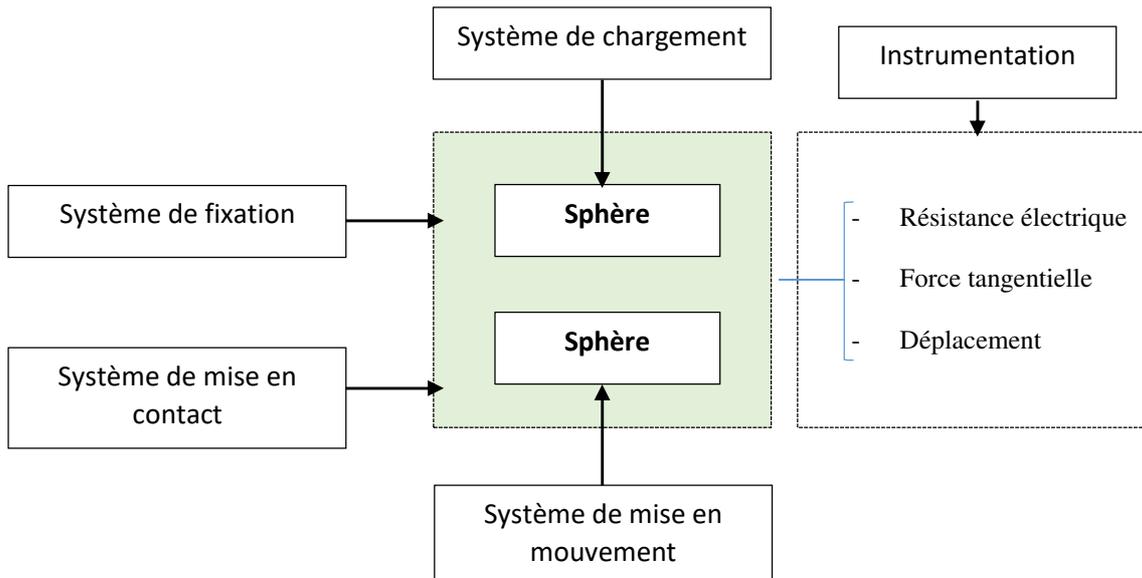
L'essai d'ouverture des contacts électriques implique le déplacement contrôlé d'une électrode sur des courtes distances (dans notre cas c'est la cathode). La procédure commence par le maintien des deux parties en contact en appliquant une force normale constante. Ensuite, la partie mobile est soumise à un déplacement sinusoïdal imposé. Le schéma de ce type d'essai est illustré dans la **figure II- 1**.



**Figure II- 1** : Principe de test d'ouverture des contacts

Plusieurs configurations de contacts peuvent être envisagées dans le domaine des contacts électrique (sphère/plan et cylindre/plan). Dans le but d'avoir des configurations de contact localisé, s'approchant de la réalité industrielle (contact entre deux surfaces sphériques) nous avons choisi un contact de type sphère / sphère facilement réalisable.

La **figure II - 2** montre le schéma fonctionnel du dispositif expérimental.



**Figure II- 2** : Schéma fonctionnel du dispositif expérimental

## II.2.2 Banc d'essai d'ouverture

Les grandeurs physiques associées à l'arc électrique sont méticuleusement mesurées en reliant le banc d'essai d'arc au banc de déconnexion des contacts, comme illustré dans la figure réel du banc (**figure II- 4**). Le dispositif expérimental utilisé pour ce procédé est entièrement automatisé [12-14] et spécialement conçu pour réaliser des ouvertures de contacts en continu, reproduisant ainsi les conditions électriques et mécaniques semblables à celles rencontrées dans les relais et les contacteurs électriques.

Le banc expérimental se divise en deux principaux sous-ensembles : une partie mécanique et une partie électrique dédiée à la commande et à l'acquisition des données. Sa conception a été réalisée au sein du laboratoire du Centre de Développement des satellites d'Oran (CDS) en s'inspirant des travaux déjà réalisé

[15- 16]. La conception de ce banc a été conçue pour permettre la réalisation d'essais d'ouverture et de fermeture des électrodes avec un déplacement imposé et asservi. Il offre la possibilité de simuler des mouvements oscillants avec une amplitude et une fréquence constantes.

Le dispositif adopté nous offre la flexibilité d'ajuster plusieurs paramètres essentiels, tels que le courant, la tension, l'amplitude du déplacement, la fréquence de déplacement et la force normale appliquées entre les électrodes. Ces ajustements sont importants afin de reproduire une large gamme de conditions expérimentales, ce qui enrichit notre compréhension des phénomènes liés aux arcs électriques et à leur comportement dans des situations de contact simulées.

### **II.2.2.1 Partie mécanique**

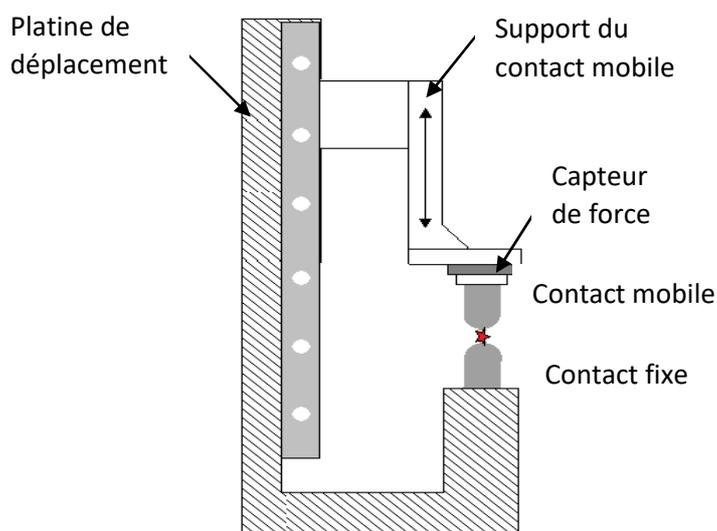
La partie mécanique du dispositif joue un rôle essentiel dans la coordination des mouvements d'ouverture et de fermeture des contacts en continu, en maintenant une force constante et une vitesse constante. Le mécanisme de mouvement est piloté par une machine d'essais mécaniques lloyd instruments LS1 installée au sein du laboratoire. La machine LS1 est polyvalente utilisée pour divers tests mécaniques normalisés. La vitesse de montée et de descente de la partie mobile de la machine peut être réglée grâce à une interface numérique, permettant des ajustements allant de 0.01mm/s à 34 mm/s.

La machine d'essai de matériaux *LS* de *Lloyd Instruments* est une machine universelle, facile à utiliser, idéale pour tester des matériaux jusqu'à 5000 N. Elle utilise un capteur de force de haute précision de la série YLC, interchangeable, pour les tests de traction, de compression et de cyclage, grâce à des mesures de la force zéro. La machine a une précision de  $\pm 0,5$  % de 1 % à 100 % de la valeur du capteur de force. Cette machine d'essai des matériaux dispose d'une console de commande intégrée avec un clavier multifonction et un écran LCD rétroéclairé, facile à lire, pour afficher les informations de charge et d'extension. La console de commande affiche des invites et des menus qui guident l'utilisateur à travers les opérations de la machine.

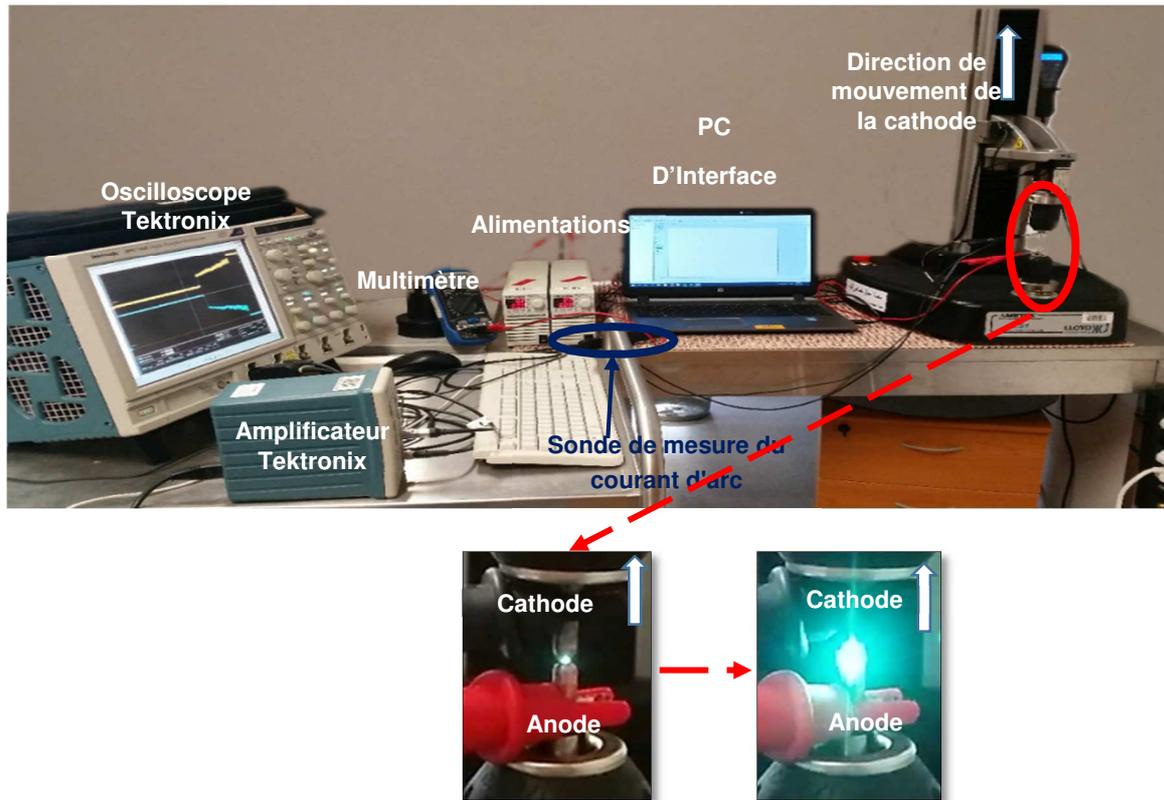
Le dispositif est capable de mesurer deux paramètres pendant les tests : la force appliquée entre les échantillons lorsque la traverse mobile se déplace ainsi que le mouvement de la traverse (force en fonction de l'allongement). Ces mesures sont obtenues grâce à deux mouvements principaux, celui d'ouverture et de fermeture qui sont contrôlés via une interface numérique du logiciel *Nexygen-plus* fourni avec la machine.

La **figure II- 3** illustre le schéma de la partie mécanique. Les contacts électriques sont fixés sur des supports spécifiques et sont solidement maintenus sur la machine à l'aide des mors. Cette méthode de fixation offre une grande flexibilité pour monter, aligner et démonter rapidement et en toute sécurité les électrodes.

Le principe de l'essai implique un déplacement vertical de la cathode avec une vitesse constante contrôlé tandis que l'anode reste fixe. Le support du contact mobile est fixé sur une platine de déplacement et est écarté du contact fixe à une vitesse prédéfinie. Le mouvement de la platine mobile est réalisé grâce au déplacement d'une vis-sans-fin. La force de contact est maintenue par le capteur de force, fixée à 20N. La vitesse d'ouverture est réglée à 5 mm/s, assurée par la partie mobile du support de fixation du contact mobile.

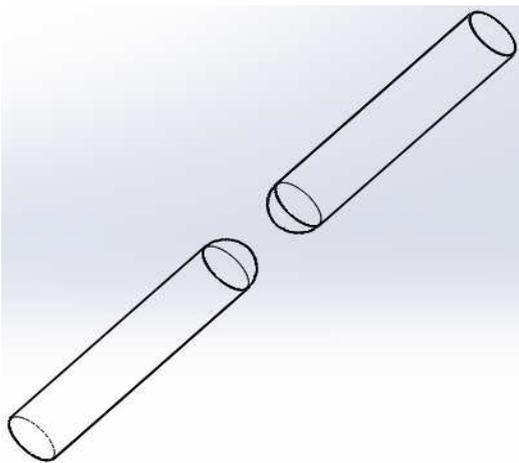


**Figure II- 3** : Schéma du banc d'ouverture

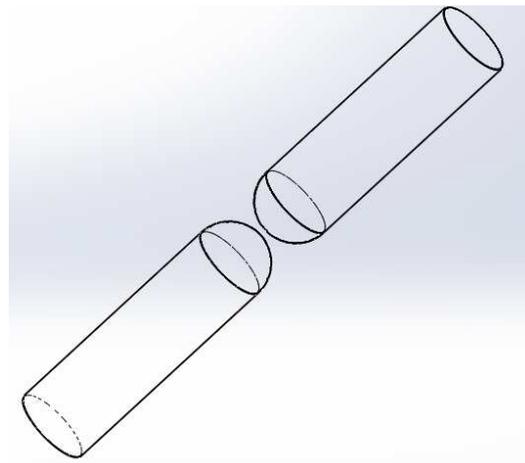


**Figure II- 4 :** Banc d'essai pour la mesure de la tension et du courant de l'arc électrique

La **figure II- 5** représente les contacts électriques utilisés lors des essais. Les électrodes, l'anode et la cathode sont sphériques avec un diamètre de 5 et 8mm. La longueur des contacts électriques est de 30mm.



**(a)** Contact de  $D= 5\text{mm}$ ,  $L= 30\text{mm}$



**(b)** Contact de  $D= 8\text{mm}$ ,  $L= 30\text{mm}$

**Figure II- 5 :** Forme géométrique des contacts utilisés (modèle CAD) [17-19]

### II.2.2.2 Partie électrique

- *Partie électrique et instrumentation :*

La composante électrique représentée dans la **figure II- 6** est essentielle pour assurer le bon fonctionnement des tests. Le circuit principal comprend deux alimentations stabilisées *TDK-Lambda ZUP60-7* montées en parallèle. Cette configuration permet d'obtenir le courant et la tension nécessaires pour les essais. Chaque alimentation offre une plage de tension de 0 à 60V et de courant de 0 à 7A. Dans notre étude et selon nos besoins, les tensions d'alimentation sont fixées à 20 et 32V DC avec des courants respectifs de 5 et 8A. Un ensemble de résistances à une valeur fixe de 4 Ohm est intégré dans le circuit, complété par les contacts électriques.

La partie instrumentation et acquisition des données regroupe l'ensemble des instruments permettant l'automatisation des essais et l'acquisition des données en continu. Un ordinateur portable est connecté directement à la machine via une interface USB. Ce dernier est utilisé pour ajuster les paramètres de test tels que la vitesse d'ouverture et de fermeture, la force appliquée initialement, le déplacement du contact et la distance entre les électrodes et autres.

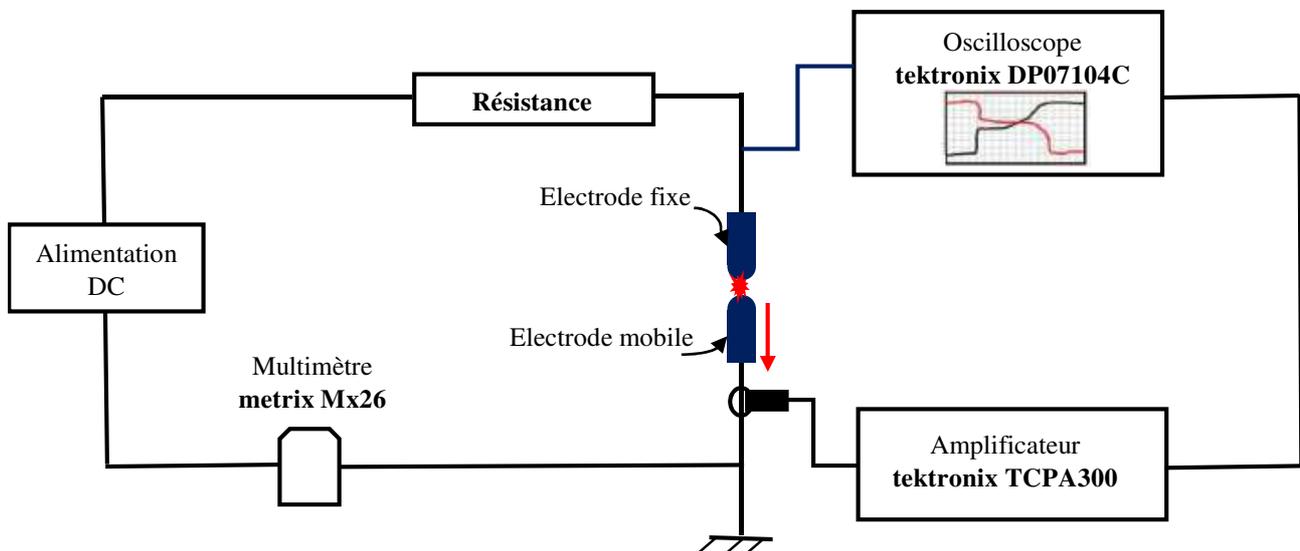
Un *multimètre Metrix Mx26* est intégré dans le circuit de test pour effectuer des mesures précises et fiables du courant électrique. Cet appareil est essentiel pour deux fonctions principales : la mesure du courant lorsque les électrodes sont en position fermée et la détection de la séparation des électrodes.

Lorsque les électrodes commencent à se séparer, le multimètre joue un rôle clé en détectant ce changement dans le circuit. La séparation des électrodes peut entraîner une modification significative du courant, souvent associée à l'initiation ou à l'extinction d'un arc électrique. Cette détection est vitale pour le contrôle des tests, car elle permet d'enregistrer le moment précis où les électrodes ne sont plus en contact, contribuant ainsi à une meilleure compréhension des caractéristiques de défaillance du système et aidant à optimiser les paramètres de test.

La tension aux bornes du contact est mesurée à l'aide d'une sonde de tension avec une bande passante de 500 MHz et une atténuation de x10, connectée à un

oscilloscope numérique **Tektronix DP07104C**. Cet oscilloscope, doté d'une bande passante de 1 GHz et d'un taux d'échantillonnage maximal de 20 GS/s, permet d'obtenir des mesures précises et en temps réel.

Le courant fourni par l'alimentation et circulant dans le circuit est mesuré à l'aide d'une sonde de courant **Tektronix TCPA300**. L'ensemble de ces données est acquis et traité pour déterminer des paramètres clés tels que la durée de l'arc, la longueur de l'arc, ainsi que le courant et la tension de l'arc, après chaque opération d'ouverture et de fermeture. Dans notre étude, nous nous concentrons spécifiquement sur l'arc généré lors de l'ouverture des contacts, afin d'analyser en détail les effets et les caractéristiques de ce phénomène.



**Figure II- 6 : le schéma électrique**

Résumé des conditions expérimentales :

- tension : 20 V et 32V DC
- courant : 5 et 8 A
- résistance : 4 Ohm
- puissance : 100W et 256W
- vitesse d'ouverture/ fermeture : 5 mm/s
- anode : fixe, sphérique R=2.5 et 4 mm, diamètre 5 et 8 mm
- cathode : mobile, sphérique R=2.5 et 4 mm, diamètre 5 et 8 mm
- force de contact : 20 N
- Atmosphère : air ambiant

## **II.3 LES MATERIAUX UTILISES DANS LA CONNECTIQUE**

### **II.3.1 Les matériaux de base**

Afin d'assurer une qualité de service optimale et une durabilité électrique élevée pour les contacteurs et les relais, les matériaux de contact doivent répondre à des conditions essentielles :

**Faible tendance au transfert de matière entre contacts :** Il est Fondamental que les matériaux des contacts présentent une faible propension au transfert de matière d'un contact à l'autre lorsqu'ils entrent en contact et se séparent. Le transfert de matière entraîne une dégradation des surfaces de contact ce qui affecte la performance globale qui conduit à des dysfonctionnements prématurées.

**Faible résistance de contact :** Les matériaux des contacts doivent avoir une résistance de contact minimale lorsqu'ils sont en contact électrique. Une résistance de contact réduite garantit une conductivité électrique optimale, minimisant ainsi les pertes d'énergie et favorisant un fonctionnement efficace et fiable du dispositif.

**Faible tendance à la soudure :** Les matériaux de contact doivent présenter une faible probabilité de soudure indésirable entre les surfaces de contact lorsqu'elles sont en contact prolongé. La soudure peut provoquer un blocage des contacts et entraînant des dysfonctionnements dans le circuit. Donc, Il est essentiel que les matériaux résistent à ce phénomène.

Dans l'ensemble, un connecteur doit être fabriqué à partir d'un substrat doté d'une conductivité électrique élevée, généralement comprise entre  $10^6$  et  $10^8$  S/m à température ambiante. Cette caractéristique est essentielle pour assurer une transmission efficace du courant électrique à travers les contacts du connecteur. Les matériaux généralement choisis comme substrat dans la connectique automobile incluent le cuivre, l'aluminium et leurs alliages en raison de leur conductivité électrique remarquable [20- 23]. En plus de la conductivité élevée du substrat, il est également important que le matériau présente d'autres propriétés avantageuses telles que la résistance mécanique, la résistance à l'oxydation et la facilité de fabrication. Ces propriétés garantissent la durabilité et la fiabilité du connecteur dans les conditions d'utilisation variées rencontrées dans l'automobile.

Pour améliorer davantage les performances des contacts dans le domaine de la connectique, des métaux nobles purs tels que l'or et l'argent ainsi que leurs alliages sont souvent utilisés comme revêtements. Ces revêtements en métaux nobles offrent une excellente conductivité électrique, résistent à l'oxydation et à la corrosion et assurent des contacts électriques fiables. Cependant, il convient de noter que l'utilisation de ces revêtements nobles entraîne des coûts élevés ce qui doit être pris en considération lors de la conception et de la fabrication des connecteurs, en particulier pour les applications automobiles où la rentabilité est un facteur décisif [13 - 24].

## **II.4 METHODOLOGIE D'APPLICATION D'UN REVETEMENT DE PROTECTION**

Les procédés de dépôt jouent un rôle fondamental dans les propriétés des revêtements. L'électrolyse est le procédé le plus utilisé pour l'élaboration des couches en or et d'argent [24, 13]. Ce type de revêtement vise principalement à protéger le métal de base (en général des alliages de cuivre) de la corrosion et à améliorer la qualité du contact (électrique et thermique).

### **II.4.1 Nature de dépôt**

Les revêtements par l'or et argent peuvent s'obtenir par différentes méthodes. Les plus courantes sont le dépôt par immersion dans un bain d'or/argent en fusion et le dépôt par galvanoplastie. Avant le dépôt des couches, les substrats subissent des opérations de préparation, à savoir le dégraissage et le décapage pour éliminer les huiles, les graisses et les divers oxydes ou contaminants. Le processus de dépôt industriel le plus utilisé est le suivant :

#### ***Par électrolyse***

Les revêtements obtenus par électrolyse sont à base d'or/ argent pur dans le but d'améliorer la conductivité électrique et la résistance à la corrosion. Les pièces sont immergées dans un bain constitué par une solution de sels d'or/argent dans un champ électrique uniforme. L'épaisseur de la couche dépend de l'intensité de

l'électrolyse, de la vitesse de passage de la bande dans l'installation de traitement et du temps de l'immersion.

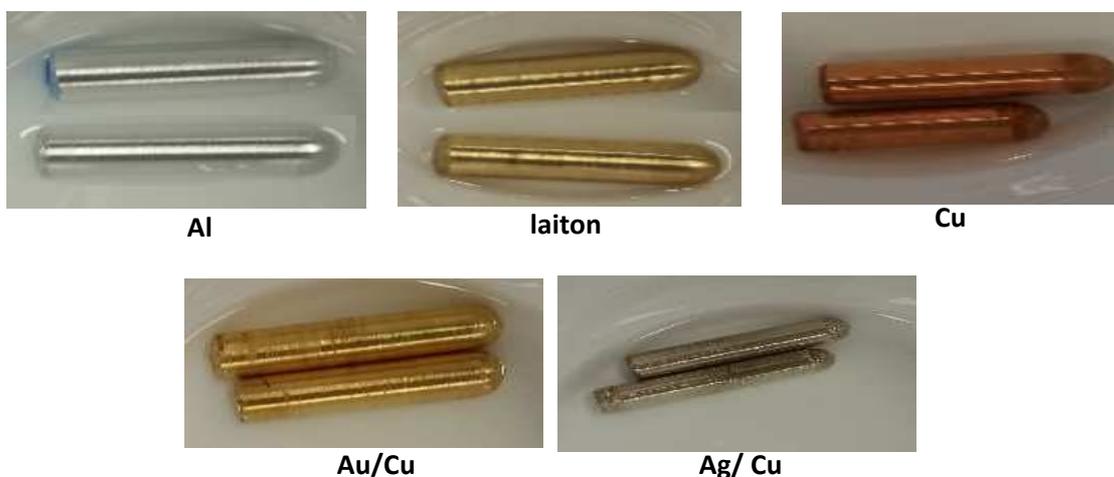
#### **II.4.2 Caractéristiques d'un bon revêtement en Or/ Argent**

Le dépôt doit répondre à plusieurs exigences ; il doit être lisse et uniforme assurant une continuité de la masse sur toute la surface, assez adhérent pour supporter sans écaillage ni décollement sa mise en œuvre, avoir une bonne résistance à la température et enfin, être résistant à la corrosion.

#### **II.4.3 Matériaux de contacts utilisés**

Dans l'ensemble de cette étude, nous avons étudié le comportement d'un grand nombre de matériaux utilisés dans l'industrie des contacts pour transmettre des commandes de fonctions électriques dans les automobiles, aérospatiales, ou autres lorsque le courant électrique est interrompue. Les échantillons ont été fabriqués par nos mêmes en utilisant une machine de tour semi-automatique, ils sont de symétrie cylindrique avec différents diamètre.

Les matériaux de contacts utilisés sont ; le cuivre, l'aluminium et le laiton pour les deux dimensions de géométrie (**figure II- 7**). Ainsi, le cuivre non revêtu, le cuivre revêtu avec argent et le cuivre revêtu avec or, ces derniers n'étant fabriqués que pour un diamètre de 5mm. La connexion sphérique (contacts sphère-sphère) de diamètre 5 mm permet de centrer et réduire la surface de contact.



**Figure II- 7 :** Les différents matériaux des contacts utilisés

**Tableau II- 1 :** Propriétés physiques des électrodes utilisées.

Matériaux et leurs nuances	Module de Young (GPa)	Limite d'élasticité (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Allongement A %	Coef dilatation thermique $\alpha$ ( $^{\circ}\text{K}^{-1}$ )	Résistivité électrique ( $\Omega\text{mm}$ )	Conductivité thermique (w/mk)	Dureté (HV)
<b>Cuivre</b> (Cu 99.99%)	120	200	240-300	24	$1.77 \cdot 10^{-5}$	$1.68 \cdot 10^{-5}$	401	120-140
<b>Aluminium</b> (Al 2017A)	74	260	390	9	$2.3 \cdot 10^{-5}$	$5.1 \cdot 10^{-5}$	134	69
<b>Laiton</b> (Cu Zn37)	110	170	350-440	19	$2.05 \cdot 10^{-5}$	$6.6 \cdot 10^{-5}$	116	95-125
<b>Au-Cu</b>	78-120	455-200	860-300	-	$1.42 \cdot 10^{-5}$	$2.2 \cdot 10^{-5}$	318-401	78-124
<b>Ag-Cu</b>	83-120	45-200	110-300	-	$1.89 \cdot 10^{-5}$	$1.6 \cdot 10^{-5}$	420-401	83-124

Les propriétés physiques principales de ce type de substrat sont regroupées dans le **tableau II-1** [18].

Avant toute utilisation, les deux parties du contact ont été nettoyées suivant la procédure ci-après :

- Trempage dans un bain d'acétone pendant quelques minutes. Cette opération permet d'enlever toutes les impuretés éventuellement présentes en surface.
- Séchage de l'échantillon.

#### **II.4.4 La fabrication des contacts électriques :**

Lors de la fabrication des échantillons de contact, il est important de souligner qu'un échantillon ayant un diamètre de 2 mm se casserait rapidement pendant le processus de fabrication. En effet, ce faible diamètre ne permet pas à l'échantillon de résister aux contraintes mécaniques imposées lors des différentes phases d'usinage. De plus, un échantillon de ce diamètre fondrait lorsqu'il serait soumis à une puissance d'entrée élevée de 256 W, en raison de l'augmentation excessive de la température générée.

C'est précisément pour éviter ces problèmes que nous avons opté pour un diamètre minimal de 5 mm pour nos essais. Ce diamètre plus important assure une meilleure

résistance mécanique pendant le processus de fabrication et réduit considérablement les risques de fusion sous des puissances élevées.

Cependant, même avec ce diamètre de 5 mm, la fabrication des échantillons n'a pas été sans difficultés. Nous avons rencontré des problèmes notables, tels que la flexion et la rupture des échantillons de ce diamètre (5mm), et ce, parfois avant même d'avoir terminé leur fabrication. Ces déformations sont survenues principalement lors de la phase de façonnage des têtes sphériques, où les forces appliquées ont conduit à des tensions excessives sur le matériau.

La **figure II-8** ci-dessous présente un aperçu de la méthode de fabrication des contacts électriques.



(a) machine de tour semi-automatique utilisée



(b) outils de coupe utilisé pour façonner la tête sphérique



(c) phase de chariotage



(d) phase de dressage



(e) phase de façonnage de la tête hémisphérique



(f) phase d'affûtage et de polissage de la tête par papier verre

**Figure II- 8 :** Les phases d'usinage des contacts électriques

## **II.5 METHODOLOGIE EXPERIMENTAL**

### **II.5.1 Protocole d'essai**

Les essais ont été conduits dans un environnement de laboratoire à température ambiante. Le processus a débuté par le déstockage des contacts suivis par un dégraissage et de nettoyage à l'alcool ISO. Ensuite, les contacts ont été centrés, aligné et montés sur les mors de la machine, cela garantit les conditions d'essai précises et l'obtention des résultats expérimentales fiables.

La vitesse d'ouverture et de fermeture des contacts a été fixée à 5 mm/s. Une force de maintien en contacts des électrodes de 20N a été appliquée sur les échantillons. Cette force a été ajustée par des micro-descentes de la partie mobile de la machine portant la cathode via une console numérique. La limite des courses a été établie entre 0 et 2 mm (Drive limits), où 0 représente la position fermée des contacts avec une force de 20N, et 2 mm est la distance maximale entre les électrodes après l'ouverture.

L'acquisition de la tension et du courant de l'arc a été réalisée individuellement pour les 10 premières opérations d'ouverture afin d'observer le comportement réel de l'arc électrique. Pour les opérations suivantes, les mesures ont été effectuées de manière cyclique. L'oscilloscope a enregistré automatiquement tous les phénomènes liés aux arcs.

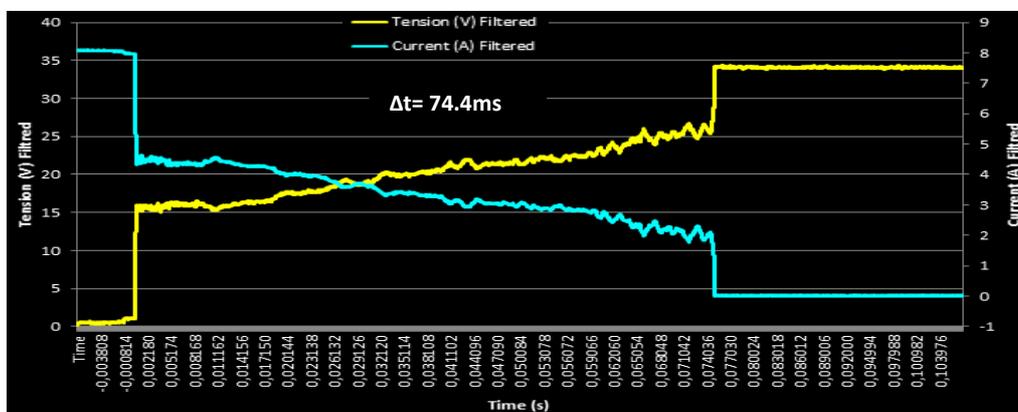
## II.5.2 Traitement des données issues de la carte d'acquisition (oscilloscope)

Face à la quantité considérable de fichiers et au volume important de données à traiter, pouvant atteindre jusqu'à 15 000 fichiers pour un seul essai (par exemple, pour les contacts en cuivre de diamètre 5mm), il était impératif de trouver une solution numérique permettant un traitement approfondi de l'ensemble des données. Dans cette optique, j'ai développé une application à l'aide du langage Python afin de traiter les données enregistrées par l'oscilloscope, en filtrant les courbes et en éliminant les fluctuations indésirables dans les courbes de tension et de courant. Cette démarche a considérablement amélioré la précision de l'analyse des résultats, permettant ainsi une interprétation plus fiable des phénomènes observés.

L'application conçue prend en considération plusieurs paramètres clés pour un traitement efficace des données. Voici un aperçu du processus :

- **Lecture et traitement des fichiers** : Le programme débute par la lecture des fichiers suivie d'un traitement approprié de chaque fichier.
- **Transformation en fichier Excel** : Une fois les données chargées, elles sont transformées en un fichier Excel pour une gestion et une analyse plus aisées.
- **Traçage des courbes** : L'application génère ensuite différentes courbes représentant des aspects cruciaux des données, notamment les courbes de tension et de courant de l'arc en fonction du temps ainsi que la durée de l'arc enregistré.

Les courbes d'évolution en fonction du temps pendant une manœuvre d'ouverture sont extrêmement instructives et sont illustrées dans la **figure II- 9** pour la tension et le courant d'un arc. Ce graphe apporte une compréhension visuelle essentielle des comportements des arcs au cours des manœuvres d'ouverture.



**Figure II- 9** : Analyse d'un exemple d'un cycle d'ouverture par programme BVA

## **II.6 PHENOMENES ELECTRIQUES LORS DE L'OUVERTURE**

La commutation d'un circuit se réfère au passage d'un état où le circuit est conducteur (état 1) à un état où il est ouvert (état 0). Dans cette thèse, notre étude se concentre sur cette transition de l'état 1 caractérisé par le fonctionnement normal du circuit à l'état 0 où le circuit est au repos. Ces deux états sont détaillés ci-dessous :

### **État 1 :**

- Les contacts du commutateur sont fermés permettant au courant nominal  $I_0$  de traverser le circuit.
- À l'exception de la chute de potentiel due à la résistance des contacts qui reste très faible, la tension aux bornes du contacteur est considérée comme nulle.

### **État 0 :**

- Les contacts sont suffisamment éloignés ce qui signifie que le circuit est ouvert. Ainsi, le courant dans le circuit est interrompu.
- La tension aux bornes des électrodes est établie à la valeur de la force électromotrice fournie par l'alimentation E.

Le passage de l'état 1 à l'état 0 est accompagné de phénomènes transitoires. Ces phénomènes transitoires sont caractérisés par des variations électriques mesurables, notamment la variation de la tension de 0 à E et celle du courant, diminuant de  $I_0$  à 0 au cours de la phase de commutation.

Dans le chapitre précédent, nous avons établi que la commutation à l'ouverture ou à la coupure se déroule en deux phases distinctes : le pont fondu est suivi d'un arc électrique sous réserve que certaines conditions minimales en courant et tension soient respectées.

### **II.6.1 Le pont fondu**

Comme exposé dans le chapitre antérieur, lors de l'ouverture des contacts, un phénomène de pont fondu précède l'apparition de l'arc. Ce phénomène est le résultat d'un échauffement de la zone de contact due au relâchement des contraintes

mécaniques  $F_c$ . Grâce à l'utilisation du banc d'ouverture, nous avons pu étudier en détail ce pont fondu qui précède l'apparition de l'arc. Cette étude a été divisée en deux volets principaux :

Analyse des traces du pont fondu : Initialement, nous avons examiné les traces caractéristiques laissées par le pont fondu. Ces traces fournissent des informations importantes sur les variations de tension et de courant pendant cette phase de transition, nous permettant ainsi de mieux comprendre les mécanismes sous-jacents.

Mesure de la durée et du déplacement du pont fondu : Ensuite, nous avons entrepris des mesures précises pour déterminer la durée du pont fondu, ainsi que le déplacement des contacts pendant cette période. Ces mesures quantitatives ont fourni des données importantes pour évaluer le comportement et les caractéristiques de cette phase préliminaire au développement de l'arc.

#### **II.6.1.1 Exemple de traces de pont fondu**

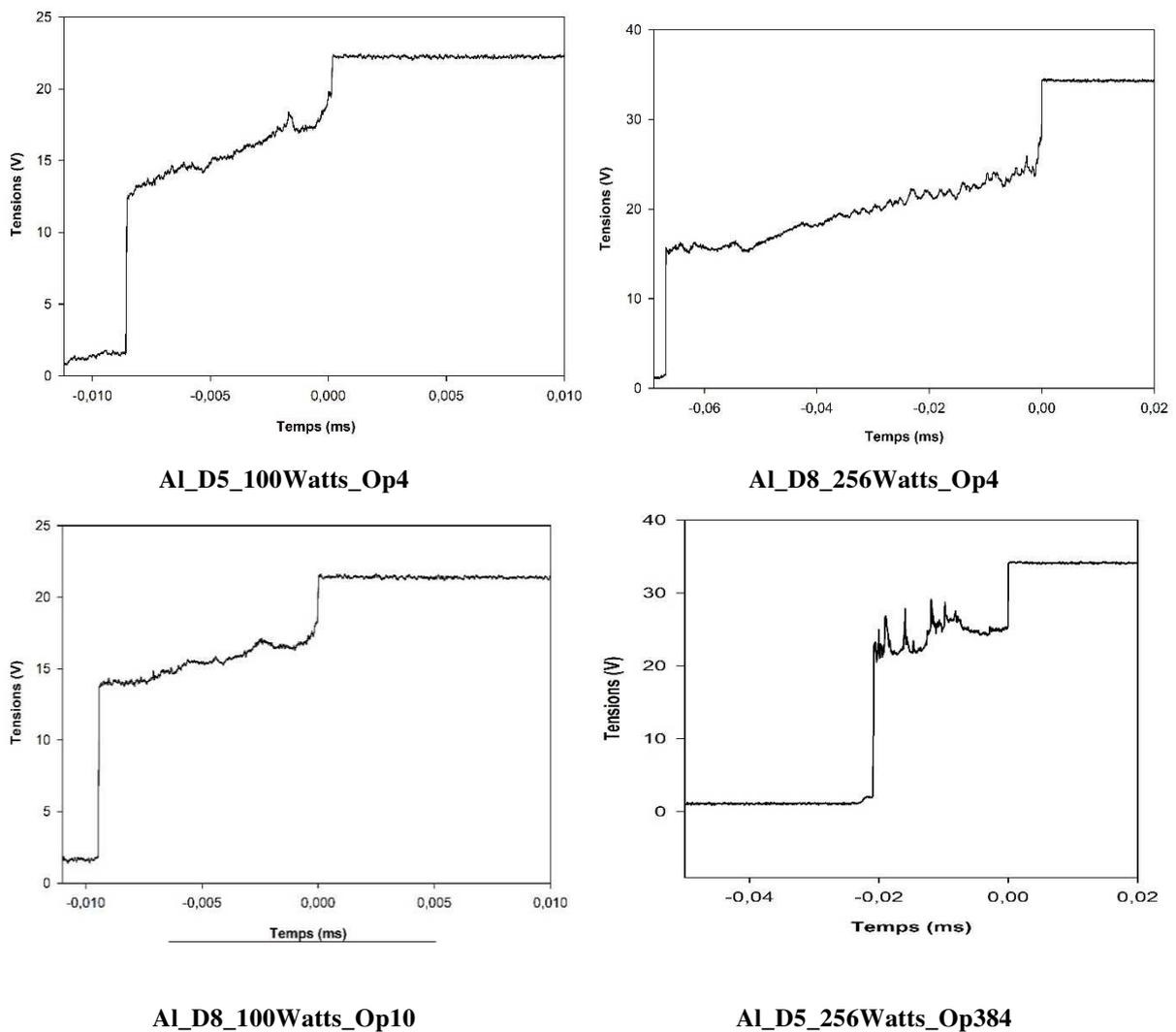
Dans le chapitre précédent, nous avons détaillé les différentes phases du pont fondu qui se déroulent avant l'apparition de l'arc lors de l'ouverture des contacts (**figure II- 9**). Ces phases comprennent échauffement du métal, Fusion de la zone de striction, extension de la zone fondue, pincement et explosion du pont fondu. Ces différentes phases sont observables en traçant l'évolution de la chute de tension aux bornes des contacts en fonction du temps à l'aide des données expérimentales enregistrées par l'oscilloscope.

La **figure II- 10** présente quelques traces de pont fondu dans diverses conditions. Ces courbes sont des exemples tirés à partir des opérations d'ouverture pour les contacts en aluminium. Après une analyse approfondie des traces du pont fondu, il est clair que les différentes phases ont des durées variables et parfois certaines phases peuvent même être inexistantes. Cette observation accord avec les travaux de Haug et al [25, 14].

Par exemple, dans la première trace des contacts en aluminium ( $D= 8\text{mm}$ ,  $P_{in}= 256\text{Watts}$ ), il n'est pas possible d'observer les deuxième et troisième phases. La striction des contacts passe presque directement d'un état ramolli à un état

d'ébullition avec l'apparition de l'arc. Ce type de trace peut être observé indépendamment de la nature des matériaux.

Dans les traces des contacts de D5 et D8 sous  $P_{in}= 100\text{Watts}$ , on observe que la striction de contact passe de l'état fondu à un état solide ramolli juste avant l'apparition de l'arc. Cela met en évidence la nature perturbée de l'évolution des phases. Enfin, on remarque clairement, sur les différentes traces, les fusions et re-solidifications successives du pont fondu soulignant la complexité de ce phénomène lors de l'ouverture des contacts.

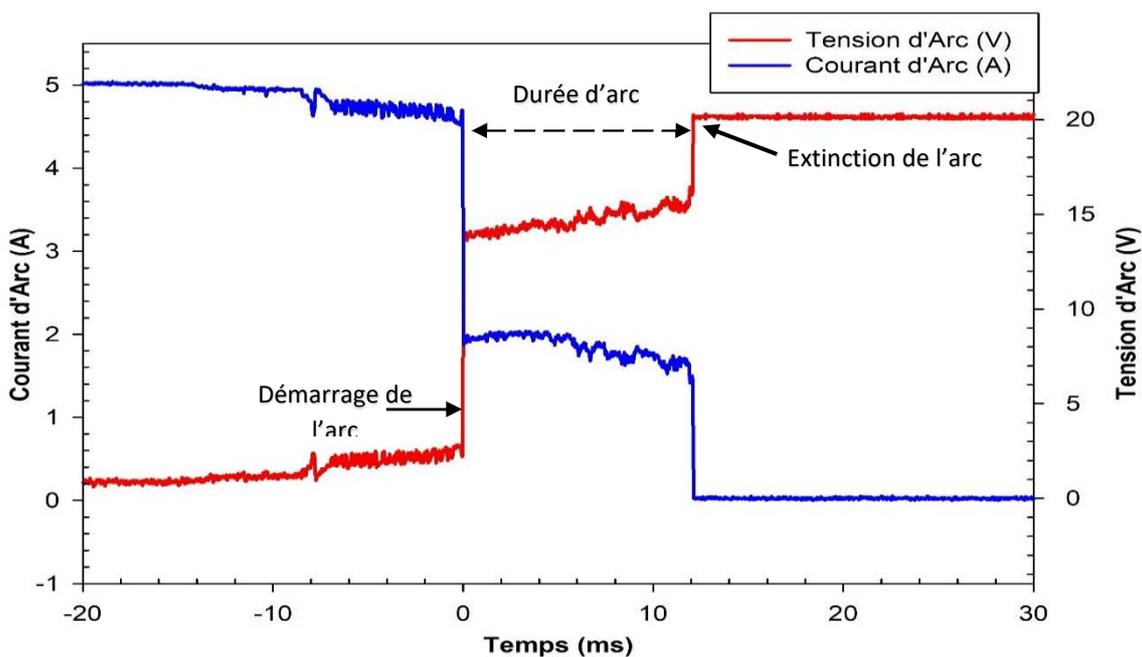


**Figure II- 10 :** Exemple de traces de pont fondu pour différentes conditions en tension et courant (contact en aluminium).

### II.6.2 L'arc d'ouverture

Dans nos expériences d'ouverture et de fermeture sous les tensions et courants spécifiques, le phénomène d'arc joue un rôle prépondérant tant en termes de durée que de conséquences sur la dégradation des contacts. Le phénomène d'arc est caractérisé par des durées significatives et exerce un impact consistant sur la stabilité et la qualité des contacts.

La **figure II- 11** est une trace typique de la tension et du courant dans le cas d'un circuit résistif sous 20 VDC pour des contacts en cuivre est présentée. On y observe la formation d'arcs d'une durée d'environ 12.11 ms. La durée de l'arc est définie comme le temps nécessaire à l'extinction complète et naturelle de l'arc. Cette durée prolongée de l'arc témoigne de la complexité et de l'intensité du phénomène, soulignant ainsi son rôle dominant dans les opérations de commutation étudiées. Il est donc impératif de prendre en considération ce phénomène majeur, tant dans l'analyse des traces expérimentales que dans la recherche de solutions visant à améliorer la stabilité et la durabilité des contacts électriques. L'étude approfondie de la dynamique de l'arc, de ses caractéristiques et de son comportement est essentielle pour mieux appréhender son impact et mettre en place des stratégies efficaces pour optimiser les performances des contacts.



**Figure II- 11** : Traces de tension et de courant d'arc d'ouverture en circuit résistif. Contacts en Cuivre, diamètres  $D= 5\text{mm}$ ,  $P_{in}= 100\text{W}$

Le courant décroît suivant la relation :

$$I_a = I_0 \left( 1 - \frac{V_a(t)}{E} \right) \quad (\text{II} - 1)$$

Où:

$$E = RI_a + V_a$$

$I_a$  est le courant de l'arc,  $V_a$  est la tension de l'arc et  $I_0$  le courant de coupure,  $R$  est la résistance du circuit et  $E$  la tension de source (20 VDC).

Lors du démarrage de l'arc, la tension passe brusquement de 2.2 à environ 14 V qui est la tension minimale d'arc. D'après la formule précédente, il est donc normal que le courant subisse une chute brutale de plusieurs ampères. Avec l'allongement de l'arc, le courant diminue de façon instable, et la tension augmente très lentement. Lorsque le courant est égal au courant minimal d'arc, la densité des électrons véhiculant ce courant n'est plus suffisante, le plasma ne possède plus assez d'énergie thermique pour s'auto-entretenir. Alors l'arc s'éteint, provoquant une chute du courant et parfois avec une légère surtension due à l'inductance parasite du circuit.

## **II.7 ÉTUDE DES GRANDEURS CARACTERISTIQUES DE L'ARC ELECTRIQUE**

### **II.7.1 Effet de la forme sphérique du contact et de la puissance d'entrée sur l'énergie de l'arc et la durée de vie des contacts en cuivre**

#### **II.7.1.1 Objectif**

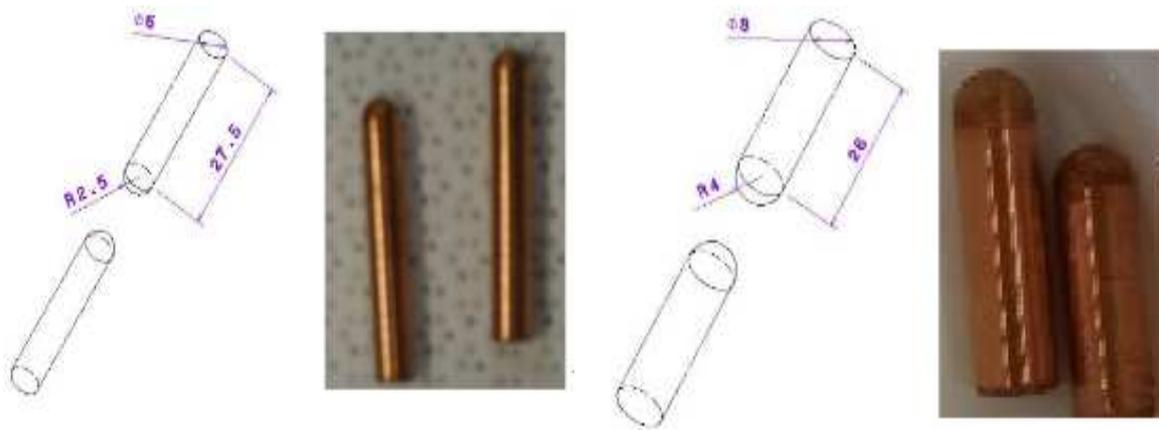
Ce travail vise à analyser l'effet de la puissance électrique d'entrée et du diamètre du contact sur la dégradation des surfaces de contact par un arc électrique. Une étude expérimentale a été réalisée sur des échantillons de contact électrique; le matériau de ces contacts est le cuivre pur. Les échantillons testés ont la même forme hémisphérique avec deux diamètres différents ( $D= 5\text{mm}$  et  $D= 8\text{mm}$ ), sont soumis à deux puissances d'entrée ( $P_{in}= 100\text{W}$  et  $P_{in}= 256\text{W}$ ).

Dans notre étude expérimentale, le courant d'arc, la tension d'arc et la durée de l'arc sont mesurées pour plusieurs opérations d'ouverture et de fermeture du contact. La puissance et l'énergie de l'arc ont été déduites. Une comparaison entre les résultats des deux puissances électriques appliquées et des deux diamètres des échantillons de

contact est présentée dans cette partie de travail afin d'évaluer le paramètre prédominant qui accélère la dégradation des surfaces de contact et par conséquent réduit la durée de vie du contact. Cette recherche expérimentale est une contribution originale à la science où elle permet de concrétiser l'hypothèse de la gravité de la mobilité de l'arc sur la dégradation des surfaces de contact.

### II.7.1.2 Rappel de la forme et dimensions des échantillons de contact

La **figure II- 12** montre les dimensions des contacts utilisés, les échantillons de contact sont fabriqués par nos soins. Deux diamètres d'échantillons de contacts hémisphériques sont testés ; le premier diamètre est égal à 5mm. En outre, le second est égal à 8 mm.



(a) Le diamètre du contact hémisphérique est égal à 5 mm

(b) Le diamètre du contact hémisphérique est égal à 8 mm

**Figure II- 12** : Dimensions des échantillons de contact utilisés

### II.7.1.3 Matériaux des échantillons de contact testés

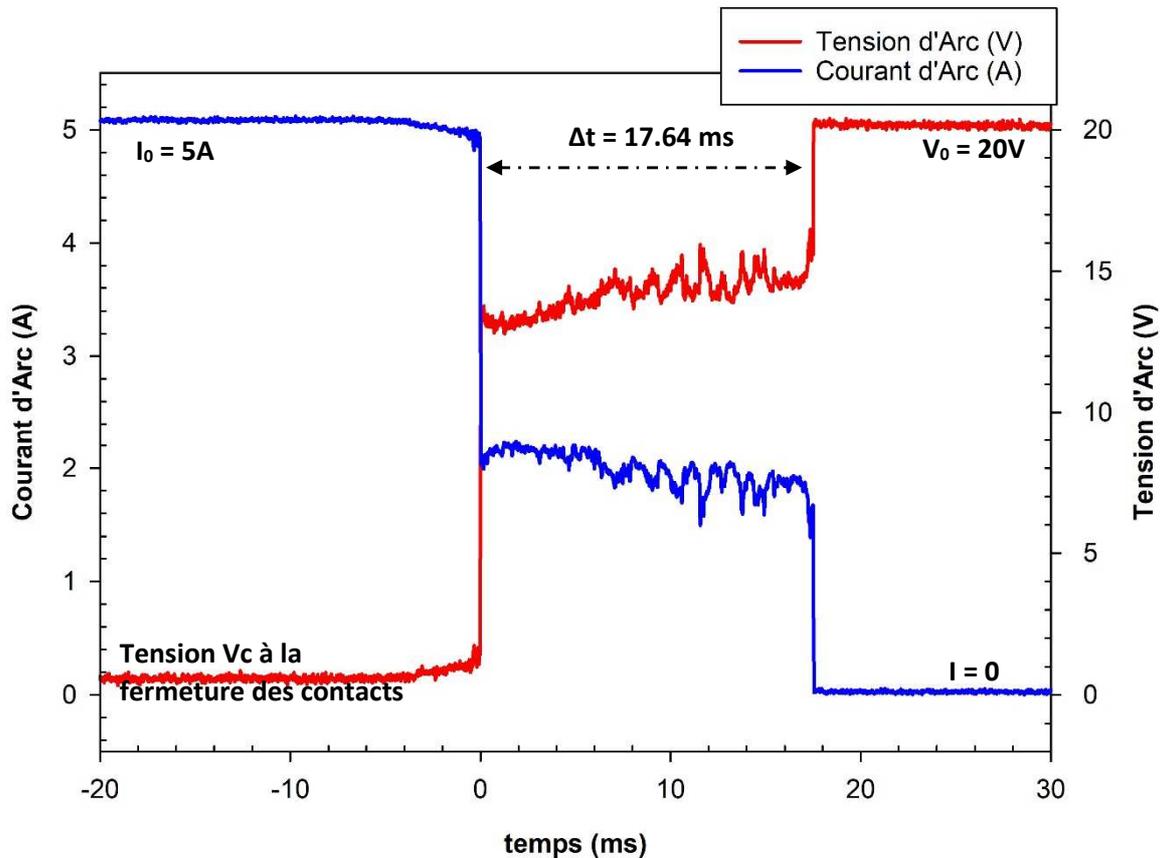
Le **tableau II- 2** présente les propriétés mécaniques, électriques et thermiques du cuivre pur Cu 99,9 % (le matériau des échantillons de contact testés). Le choix s'est porté sur ce matériau car le cuivre pur est un matériau classique qui ne contient aucun élément supplémentaire. Il est moins coûteux et possède de bonnes propriétés thermoélectriques et mécaniques.

**Tableau II- 2 :** Propriétés mécaniques, thermiques et électriques du cuivre pur [18, 26].

Propriétés du matériau	Module de Young (GPa)	Dureté (HV) (MPa)	Poisson Ratio	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Résistivité électrique (Ω.m)	Ébullition °C	Conductivité thermique W/(m.k)	Chaleur Spécifique de Fusion (J/kgK)	Fusion °C
<b>Cu 99.99%</b>	124	400-900	0.33	8.91	$1.68 \cdot 10^{-8}$	2526	394	385	1084.6

### II.7.1.4 Courant d'arc $E_{arc}$ et tension d'arc $V_{arc}$

Le courant d'arc d'ouverture  $I_{arc}$  et la tension d'arc  $V_{arc}$  sont mesurés pendant toutes les opérations d'ouverture-fermeture des échantillons de contact. A titre d'exemple, la **figure II- 13** montre, la variation de  $I_{arc}$  et de  $V_{arc}$  pendant le processus d'ouverture de l'échantillon de contact en cuivre d'un diamètre  $D= 5\text{mm}$  soumis à une puissance d'entrée  $P_{in}$  de 100 Watts et cela pour l'opération numéro 300. Cette puissance est égale à la tension ouverte  $V_0= 20\text{V}$  multipliée par le courant continu appliqué  $I_0= 5\text{A}$ . Les mesures de tension et de courant d'arc sur la coupure présentent des fluctuations dans leurs signaux. Ces fluctuations sont dues à la variation dans le temps de la pression de la vapeur métallique de l'arc, qui s'est diffusée dans l'air ambiant près de la zone de contact [27] et [28]. De plus, la densité de la vapeur métallique joue un rôle dans cette fluctuation.



**Figure II- 13 :** Tension d'arc  $V_{arc}$  & courant d'arc  $I_{arc}$  pour l'opération d'ouverture-fermeture du contact N°300 ( $D= 5\text{mm}$ ,  $P_{in}= 100\text{W}$ )

On peut conclure de la figure ci-dessus que la variation de  $I_{arc}$  et  $V_{arc}$  n'est pas linéaire. Les différentes formes de l'arc électrique sont dues à la non-linéarité du courant d'arc ou du champ électrique de l'arc. L'arc cherche toujours le chemin le moins résistif ou le plus conducteur, même s'il se déforme. Nous pouvons déduire de la dernière figure une durée d'arc  $\Delta t$  égale à 17,64 ms.

### II.7.1.5 Puissance de l'arc $P_{arc}$ , durée de l'arc $\Delta t$ et énergie de l'arc $E_{arc}$

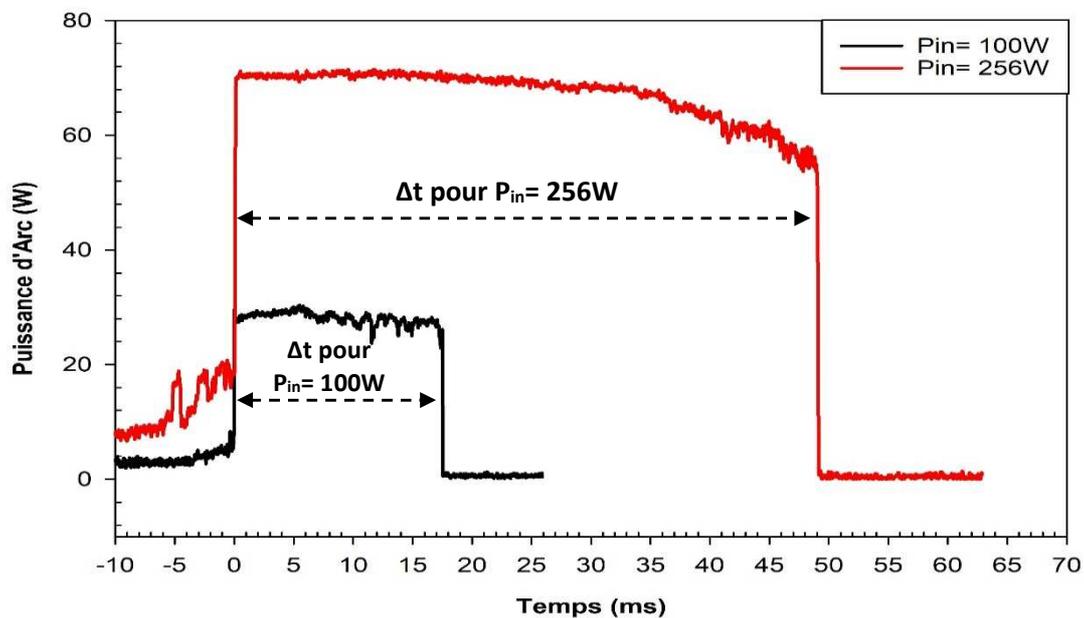
A partir des deux courbes  $I_{arc}$  et  $V_{arc}$  (**Figure II- 13**), on peut calculer la puissance de l'arc électrique  $P_{arc}(t)$  par la relation suivante :

$$P_{arc}(t) = V_{arc}(t) \cdot I_{arc}(t) \quad (\text{II- 2})$$

L'énergie de l'arc  $E_{arc}$  est calculée par la relation suivante :

$$E_{arc}(t) = \int P_{arc}(t) dt = \int [V_{arc}(t) \cdot I_{arc}(t)] dt \quad (\text{II- 3})$$

En utilisant l'équation (II- 2), nous pouvons tracer la variation de la puissance de l'arc pendant la durée de l'arc pour toutes les opérations d'ouverture. Par exemple, la **figure II- 14** donne la variation de la puissance de l'arc pendant la durée de l'opération d'ouverture N°300 et cela pour les deux puissances d'appliquée 100 Watts et 256 Watts. La courbe noire représente le produit de  $I_{arc}$  et de  $V_{arc}$  illustré précédemment dans la **figure II- 14**. On peut voir sur la figure que la puissance d'arc  $P_{arc}$  et la durée de l'arc  $\Delta t$  varient proportionnellement à la puissance électrique d'entrée  $P_{in}$ . A partir de cette figure (**figure II- 13**), on peut également déterminer la valeur maximale de la puissance d'arc  $P_{arc}^{Max}$ .



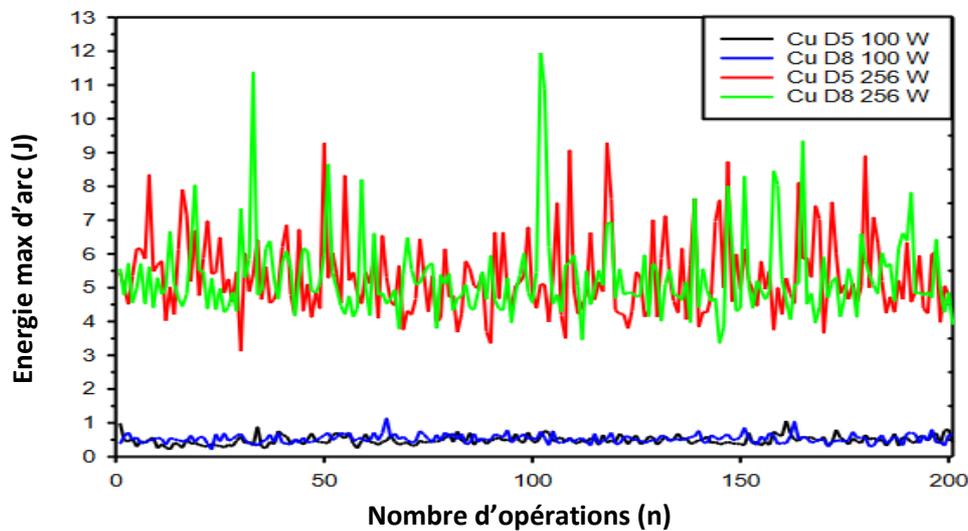
**Figure II- 14 :** Puissance de l'arc pour deux puissances d'entrée ( $D= 5\text{mm}$ ,  $P_{in}= 100\text{W}$  &  $256\text{W}$ ) (Opération N°300)

En utilisant  $P_{arc}^{Max}$  et la durée d'arc correspondante  $\Delta t$ , l'énergie maximale de l'arc peut être calculée comme suit :

$$E_{arc}^{Max} = P_{arc}^{Max} \cdot \Delta t \quad (\text{II- 4})$$

Pour une puissance d'entrée constante, les valeurs de  $\Delta t$  et  $P_{arc}^{Max}$  varient tout au long des opérations; ceci est dû à la nature du gaz emprisonné entre les surfaces de contact et à son degré d'ionisation qui dépend de la température, de la pression,... de ce gaz. De plus, la variation de  $\Delta t$  et  $P_{arc}^{Max}$  est due à la morphologie des surfaces de contact, la nature du matériau et de la couche conductrice de ces surfaces de contact.

Il est intéressant de noter qu'il n'y a pas de proportionnalité d'une opération à l'autre entre la durée de l'arc  $\Delta t$  et la valeur maximale de la puissance de l'arc. Par conséquent, nos résultats seront analysés par l'énergie maximale de l'arc  $E_{arc}^{Max}$  qui contient les deux termes précédents  $\Delta t$  et  $P_{arc}^{Max}$  (voir équation (II- 4)). Après avoir obtenu tous les résultats de  $I_{arc}$ ,  $V_{arc}$  et  $P_{arc}$  pour toutes les opérations d'ouverture, nous avons calculé  $E_{arc}^{Max}$  pour chaque opération et les avons reportés dans la figure suivante (**figure II- 15**) pour les différents cas de test : Échantillons de contact avec  $D= 5\text{mm}$  soumis à des puissances d'entrée de 100W et 256W, et échantillons de contact avec  $D= 8\text{mm}$  soumis aux mêmes puissances d'entrée.



**Figure II- 15 :** Énergie maximale de l'arc pour les deux puissances d'entrée (100W & 256W) et pour les deux diamètres ( $D= 5\text{mm}$  &  $D= 8\text{mm}$ )

Nous pouvons remarquer dans la figure ci-dessus que l'énergie maximale de l'arc  $E_{arc}^{Max}$  varie proportionnellement à la puissance électrique d'entrée. De plus, pour une même puissance d'entrée, le diamètre de l'échantillon de contact n'influence pas l'énergie de l'arc; il n'y a pas de différence significative entre les deux énergies d'arc pour les deux diamètres  $D= 5\text{mm}$  et  $D= 8\text{mm}$ .

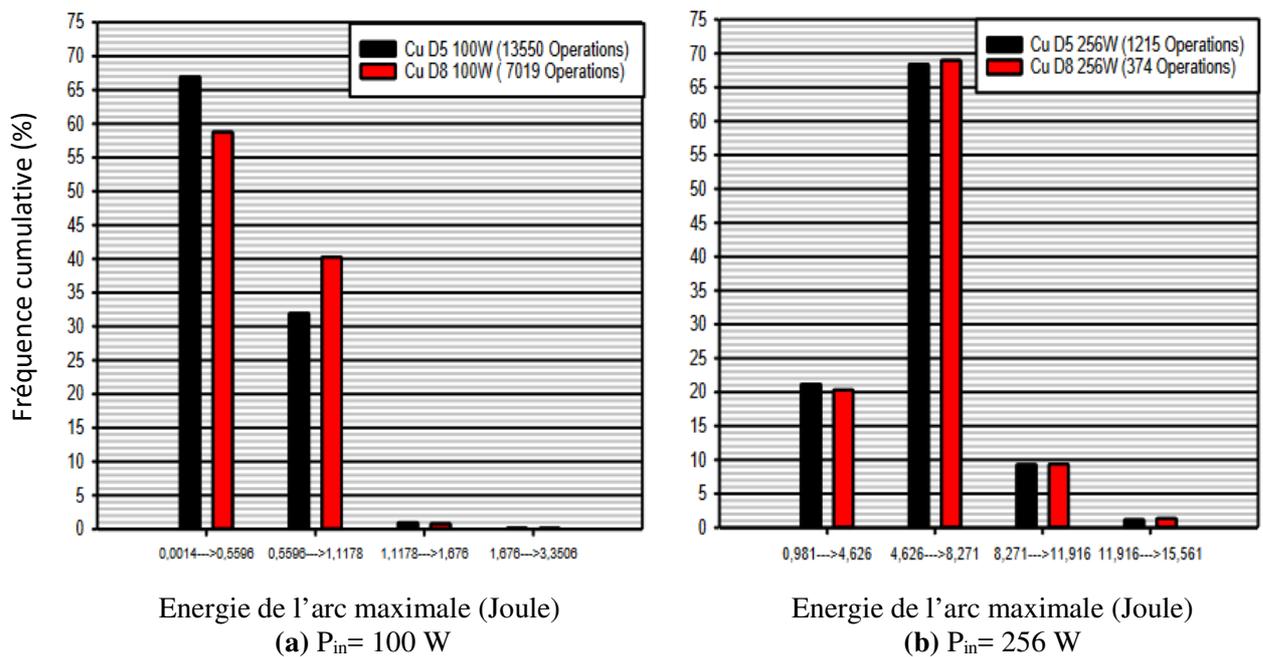
Le **tableau II- 3** donne la durée de vie de divers échantillons de contacts de différents diamètres soumis à différentes puissances d'entrée; il présente une comparaison entre différentes moyennes de:  $\Delta t$ ,  $P_{arc}^{Max}$ , et  $E_{arc}^{Max}$ . Le nombre maximum d'opérations d'ouverture  $n$  cité dans ce tableau correspond à la dernière opération avant la fin de la durée de vie du contact. Le contact atteint sa fin de vie lorsque ses surfaces de contact deviennent électriquement isolantes.

**Tableau II- 3 :** Différents résultats d'arc pour différents échantillons de contact.

Diamètre D (mm)	Puissance d'entrée $P_{in}$ (Watt)	Nbre Max d'ops d'ouverture (n)	Durée MOY $\Delta t$ (ms)	Puissance MOY $P_{arc}^{Max}$ (Watt)	Energie MOY $E_{arc}^{Max}$ (Joule)
5	100	13550	8.83	56.65	0.49
	256	1215	60.56	99.43	6.01
8	100	7019	8.14	57.39	0.45
	256	374	57.39	99.24	5.69

On peut voir dans le **tableau II- 3** que l'échantillon de contact avec un grand diamètre a une durée de vie inférieure à celle de l'échantillon de contact avec un petit diamètre. Pour comprendre ce phénomène, nous avons commencé à vérifier les fréquences cumulées de toutes les valeurs de E pour les deux contacts.

La **figure II- 16** présente la fréquence cumulée en pourcentage en fonction des nombres d'opérations pour un intervalle donné des valeurs  $E_{arc}^{Max}$ .



**Figure II- 16 :** Histogrammes de la fréquence cumulée en fonction de l'énergie maximale de l'arc pour des contacts de diamètres D= 5mm et D= 8mm

La fréquence cumulée peut être définie comme le pourcentage du nombre d'opérations d'ouverture qui donnent des valeurs de  $E_{arc}^{Max}$  comprises dans un

intervalle donné. Cette fréquence cumulée est calculée par rapport au nombre total d'opérations  $n$ .

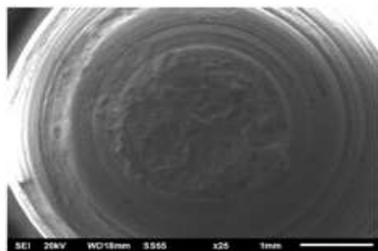
Prenons par exemple l'histogramme (**figure II- 16 (a)**) qui correspond à une puissance d'entrée de 100W. Dans cet exemple, les valeurs de  $E$  inférieures à 0,56 Joule correspondent à 67% pour  $n$  opérations pour l'échantillon de contact ayant un diamètre  $D= 5\text{mm}$ , tandis qu'elles correspondent à 59% pour  $n$  opérations pour l'échantillon de contact d'un diamètre  $D= 8\text{mm}$ . Ainsi, pour les deux puissances d'entrée et tous les intervalles d'énergie d'arc, les valeurs de fréquence cumulée pour les deux diamètres ne sont pas très éloignées l'une de l'autre (**figure II- 16 (a) & (b)**). Ainsi, pour toute puissance d'entrée, les deux contacts de diamètre ( $D= 5\text{mm}$  et  $D= 8\text{mm}$ ) ont presque les mêmes énergies d'arc (**figure II- 15**) et presque les mêmes fréquences cumulées (**figure II- 16**). Les deux derniers paramètres ne sont donc pas ceux qui font la différence entre la durée de vie des deux diamètres de contact ( $D= 5\text{mm}$  et  $D= 8\text{mm}$ ); cela nous amène à rechercher un autre facteur qui fera cette différence.

Nous poursuivons nos recherches afin de mieux comprendre ce phénomène en analysant les surfaces endommagées à l'aide de techniques microscopiques, SEM et EDX.

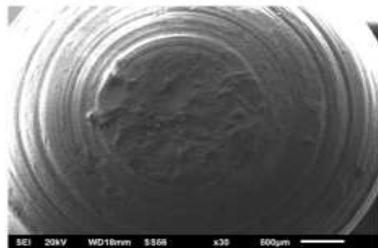
### **II.7.1.6 Effet de la puissance d'entrée sur la durée de vie du contact**

Lorsque les contacts électriques commencent à s'éloigner l'une de l'autre, le contact s'ouvre et la surface de contact entre les deux électrodes diminue progressivement. Par conséquent, la résistance de contact, la densité de courant et la température de contact augmentent, entraînant la formation d'un pont de métal fondu entre les électrodes. Après la rupture ou l'explosion de ce pont, une partie du pont de métal fondu explosé est transférée au contact cathodique ou anodique, provoquant la corrosion des contacts et l'autre partie du métal explosé participe à la formation d'une vapeur métallique à haute pression et à très haute température qui libère des électrons permettant l'ionisation de la vapeur métallique (plasma) et l'amorçage d'un arc. Dans cet arc, le courant électrique et l'énergie sont principalement portés par des électrons et très peu par des ions métalliques et gazeux.

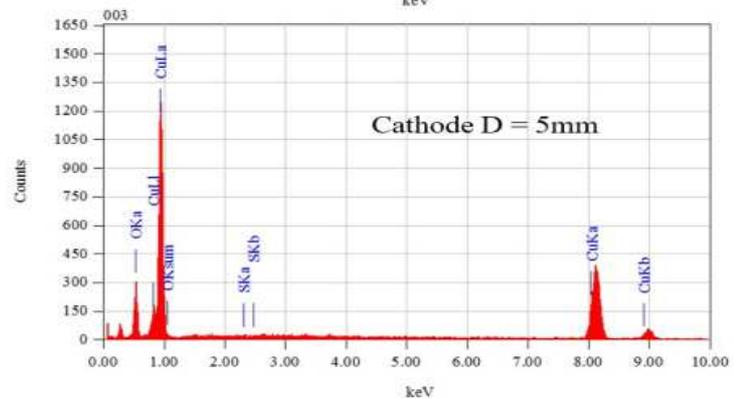
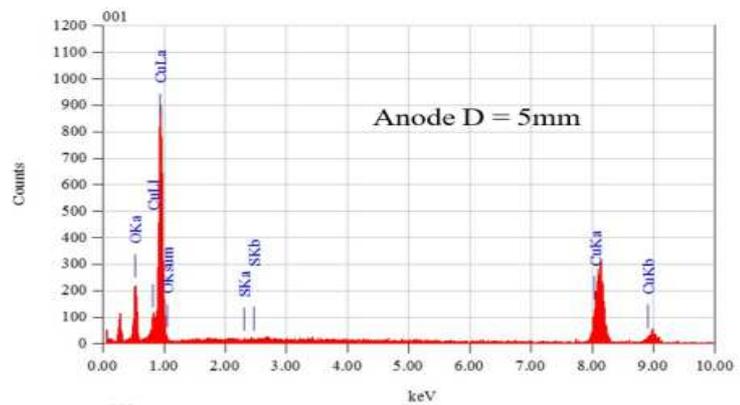
Par le processus de chimisorption et à une température élevée de l'arc, le cuivre et le carbone présents sur les surfaces de contact absorbent l'oxygène de l'air pour former des couches d'oxyde sur les surfaces de contact. Le dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$  et le monoxyde de carbone  $\text{CO}$  peuvent être trouvés et libérés des surfaces de contact [33, 34]. Des oxydes de cuivre  $\text{CuO}$  et  $\text{Cu}_2\text{O}$  ont également été observés sur les surfaces de contact. Il est à noter que la présence essentielle de dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$  et de dioxygène  $\text{O}_2$  déclenche la réaction d'oxydation du cuivre, qui s'accélère avec l'augmentation de la température.

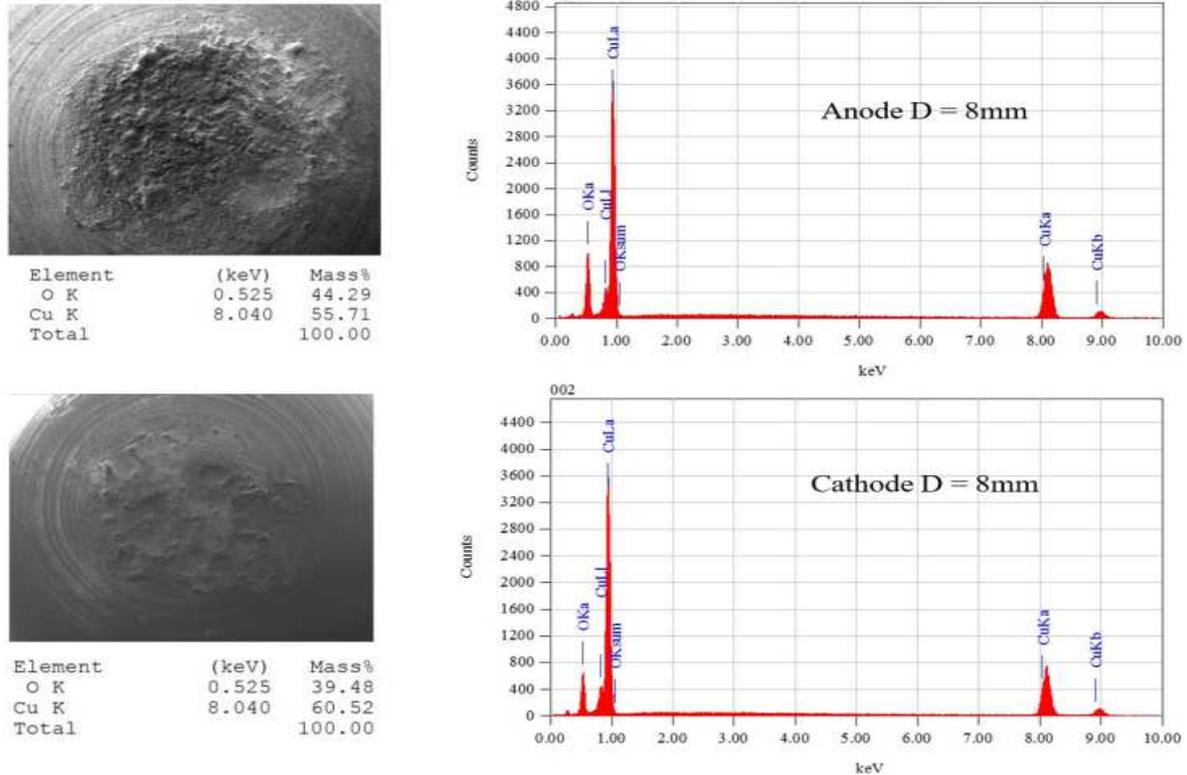


Element	(keV)	Mass%
S K	2.307	0.08
O K	0.525	48.76
Cu K	8.040	51.16
Total		100.00



Element	(keV)	Mass%
S K	2.307	0.59
O K	0.525	48.91
Cu K	8.040	50.50
Total		100.00





**Figure II- 17 :** Images de microscopie électronique à balayage (MEB) et spectres d'analyse de rayons X à dispersion d'énergie (EDX) de la composition chimique des surfaces de contact de l'anode et de la cathode à la fin de leur vie ( $P_{in} = 256 \text{ W}$ ,  $D = 5 \text{ mm}$  et  $8 \text{ mm}$ ).

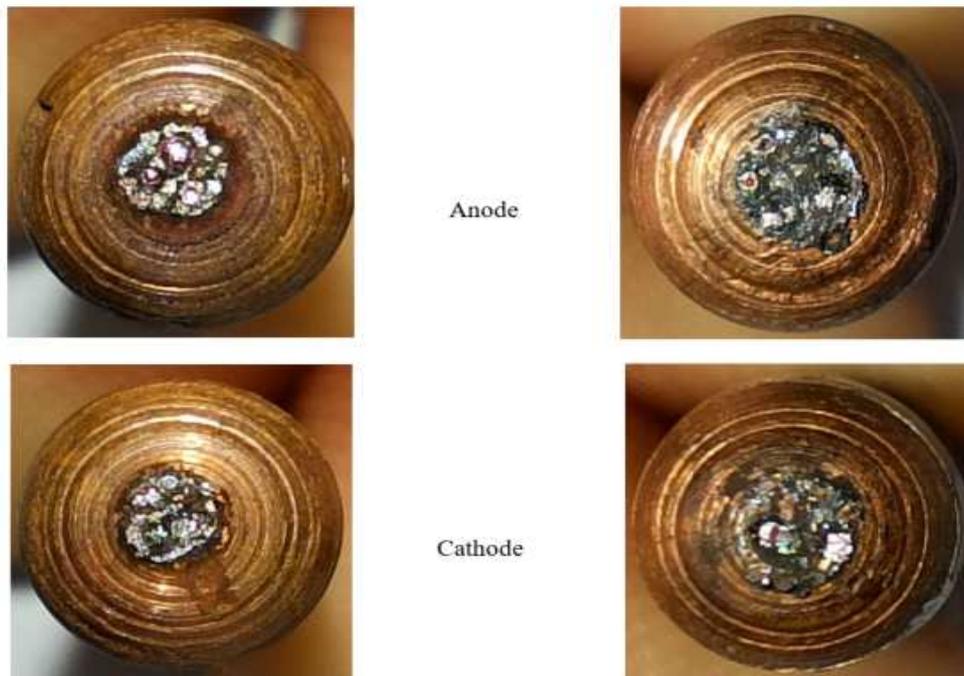
En se référant au tableau II- 4, on remarque que pour tout diamètre de l'échantillon de contact, la durée de l'arc  $\Delta t$ , la puissance maximale de l'arc  $P_{arc}^{max}$  et l'énergie maximale de l'arc  $E_{arc}^{max}$  augmentent avec l'augmentation de la puissance d'entrée. En effet, lorsque le courant appliqué  $I$  ou la tension  $V$  augmente, la puissance d'entrée augmente également. Par conséquent, juste après l'opération d'ouverture, le champ électrique est très élevé, et les surfaces de contact chauffées par effet Joule émettent suffisamment d'électrons libres à haute énergie de la cathode vers l'anode. De plus, ces électrons sont accélérés par le champ électrique élevé.

Il y aura donc plus de collisions entre les électrons et les ions du gaz. Ainsi, une plus grande ionisation du plasma gazeux sera confinée entre les surfaces de contact, ce qui conduira à une énergie d'arc élevée.

Cependant, l'énergie élevée de l'arc provoquée par une puissance d'entrée élevée a un effet désastreux sur l'endommagement des surfaces de contact par oxydation et érosion. Une puissance d'entrée élevée ou une énergie d'arc élevée induit une température élevée dans le matériau de contact ; par conséquent, l'oxydation des

surfaces de contact métalliques sera accélérée par l'augmentation de cette température et conduira à une défaillance rapide du contact (tableau II- 5). En outre, une puissance d'entrée élevée induit une forte énergie d'arc, ce qui entraîne une dégradation excessive des surfaces de contact par érosion. La Figure II- 18 compare les images des surfaces de contact prises par un microscope optique à la fin de la durée de vie des échantillons de contact.

Ces contacts ont un diamètre de  $D= 5$  mm et sont soumis aux deux puissances d'entrée 100 et 256W. Ces images ont été prises sur les parties anodique et cathodique du contact. On constate que la surface de contact soumise à une puissance d'entrée de 256W (Figure II- 18b) est plus érodée que celle soumise à une puissance d'entrée de 100W (Figure II- 18a). La même conclusion peut être tirée pour le contact avec un diamètre  $D= 8$  mm. De plus, nous pouvons voir dans la figure suivante (Figure II- 18) que la couleur noire dans les zones érodées fait référence à l'oxyde de cuivre  $\text{CuO}$  (Cuivre(II)), tandis que la couleur rouge-brun fait référence à l'oxyde  $\text{Cu}_2\text{O}$  (Cuivre(I)).



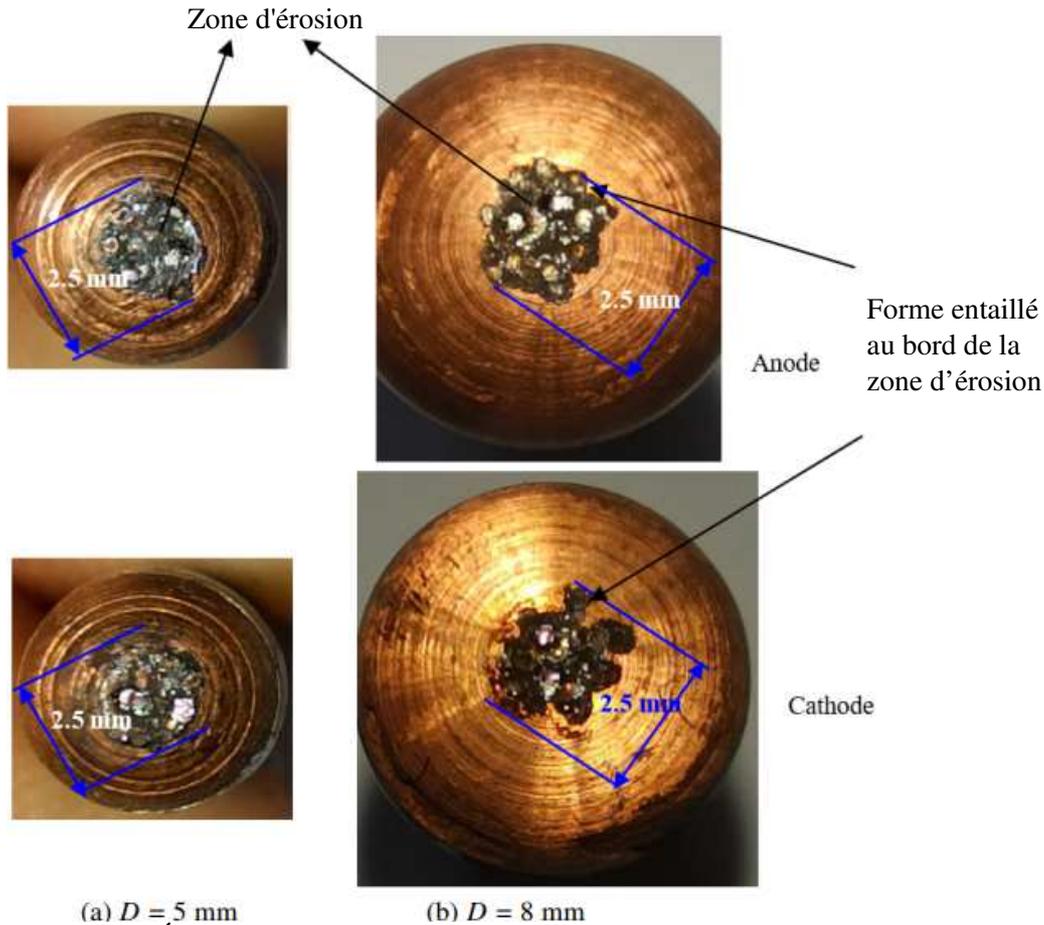
(a) puissance d'entrée  $P_{in}= 100\text{W}$

(b) puissance d'entrée  $P_{in}= 256\text{W}$

**Figure II- 18 :** Érosion des surfaces de contact à la fin de la durée de vie (contacts avec  $D= 5$  mm)

### **II.7.1.7 Influence du diamètre du contact hémisphérique sur la durée de vie du contact**

Pour une puissance d'entrée constante, la durée de vie du contact diminue avec l'augmentation du diamètre du contact (voir tableau II- 3) ; cela peut s'expliquer par le fait que si le diamètre augmente, la surface de la partie hémisphérique du contact augmente, et l'arc aura plus de mobilité sur cette surface, donc plus de dégradation. En fait, d'autres démonstrations et arguments seront donnés plus loin dans les paragraphes suivants. La figure II- 19 donne une comparaison entre les tailles des zones d'érosion pour les parties de contact ( $D= 8\text{mm}$  et  $D= 5\text{mm}$ ). Ces tailles d'érosion ont été mesurées à la fin de la durée de vie des contacts ; ces contacts ont été soumis à une puissance d'entrée de 256W. Pour les deux échantillons de contact ( $D= 8\text{mm}$  et  $D= 5\text{mm}$ ), le diamètre de la zone d'érosion est estimé à près de 2,5 mm. Par conséquent, les dimensions des zones d'érosion sont similaires pour les deux échantillons de contact. On peut voir sur la figure II-19b que la zone d'érosion pour l'échantillon de contact d'un diamètre de 8 mm n'a pas une circularité uniforme comme celle obtenue pour un échantillon de contact d'un diamètre de 5 mm. Il a été observé lors de toutes les opérations d'ouverture que l'arc effectue des tours avec des sauts sur les surfaces de contact pour l'échantillon de contact de 8 mm de diamètre ; ceci est confirmé par la présence d'une forme entaillée au bord de la zone d'érosion (Figure II- 19b) ; ceci nous fait penser que l'arc est plus mobile pour l'échantillon de contact de 8 mm de diamètre.



**Figure II- 19 :** Érosion des surfaces de contact à la fin de la durée de vie des contacts ( $D = 5$  mm et  $D = 8$  mm,  $P_{in} = 256$  W)

Ainsi, les deux contacts soumis à une puissance d'entrée identique (256W) génèrent des énergies d'arc similaires (Figure II- 15) avec des tailles d'érosion (Figure II- 19) et des taux d'oxydation presque identiques, tandis que l'échantillon de contact avec  $D= 5$  mm a une durée de vie de 1215 opérations.

Cependant, l'autre (avec  $D=8$  mm) a une durée de vie de 374 opérations ; cela confirme que la surface de contact avec  $D=8$  mm s'oxyde rapidement par rapport au contact avec  $D= 5$  mm.

Lors des tests expérimentaux, nous avons observé que l'arc est trop mobile pour le contact d'un diamètre de 8 mm par rapport au contact de diamètre 5 mm. En effet, la mobilité de l'arc augmente avec l'augmentation du diamètre du contact car l'arc est trop mobile pour le contact de diamètre 8 mm ; par conséquent, le point touché s'oxyde rapidement par l'air chaud libre, et la racine de l'arc cherche un autre chemin moins résistif et touche plusieurs points aléatoires avec le principe du saut de tour

(principe décrit précédemment dans la figure II- 19b). Lorsque tous les points sont oxydés, la surface de contact de la zone de mobilité de l'arc ou de la zone d'érosion devient électriquement isolante. Le contact arrive alors en fin de vie.

On peut conclure que la surface de contact ayant  $D= 8$  mm s'oxyde rapidement à cause d'un arc trop mobile par rapport au contact ayant  $D= 5$  mm. Pour cette raison, la durée de vie du contact avec  $D= 8$  mm est beaucoup plus faible que celle d'un contact avec  $D= 5$  mm.

Pour confirmer ces observations et conclusions expérimentales relatives à la mobilité de l'arc, un modèle numérique MHD a été développé dans la section suivante pour calculer la mobilité de l'arc pour les deux contacts ( $D= 5$  mm et  $D= 8$  mm).

### **II.7.1.8 Simulation numérique de l'arc pour les deux diamètres ( $D= 5$ mm et $D= 8$ mm)**

Pour commencer, nous donnons quelques notions théoriques sur le mouvement de l'arc. La mobilité de l'arc dépend de la force magnétique  $\vec{F}$  générée par l'interaction entre le champ magnétique induit  $\vec{B}$  et la densité de courant  $\vec{J}$ .  $\vec{B}$  est due au mouvement de l'arc et au passage du courant électrique  $I$  à l'intérieur de la colonne d'arc (figure II- 20). Le courant qui traverse l'arc est  $I_{arc}$ . Ce courant est à l'origine de la distribution de la densité de courant électrique  $\vec{J}$  de l'arc aux surfaces de contact.

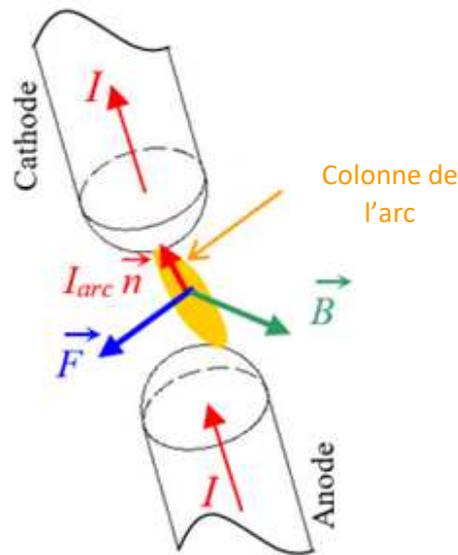
La relation entre le champ magnétique  $\vec{B}$  et la densité de courant  $\vec{J}$  donne une naissance à un terme appelé force magnétique de Lorentz  $\vec{F}$  ( $N/m^3$ ) ; la formule de cette force est donnée par :

$$\vec{F} = \vec{J} \wedge \vec{B} \quad (II- 5)$$

En outre, nous pouvons voir dans l'équation ci-dessus que la force de mobilité de l'arc ou la force de Lorentz de l'arc varie proportionnellement à la densité de courant de l'arc et au champ magnétique de l'arc ;  $\vec{J}$  ( $A/m^2$ ) et  $\vec{B}$  (Tesla ou  $N m^{-1}A^{-1}$ ) qui dépendent du courant appliqué et des dimensions du contact. Cependant, la loi d'Ohm qui définit la densité de courant est donnée par :

$$\vec{J} = \frac{1}{\rho_{arc}} \vec{E} = \rho_{arc} \vec{E} = \frac{I_{arc} \vec{n}}{S_{arc}} \quad (II- 6)$$

Où  $\vec{E}$  est le champ électrique (V/m),  $I_{arc}$  est le courant d'arc (A),  $\rho_{arc}$  ( $\Omega m$ ) et  $\sigma_{arc}$  (S/m) sont respectivement la résistivité électrique et la conductivité électrique du gaz du plasma d'arc,  $S_{arc}$  est la section transversale de la colonne d'arc et  $\vec{n}$  est le vecteur normal unitaire à la surface  $S_{arc}$ . La figure II- 20 montre la force de mobilité de l'arc ou la force de Lorentz de l'arc créée par le champ magnétique une fois que le courant traverse l'arc.

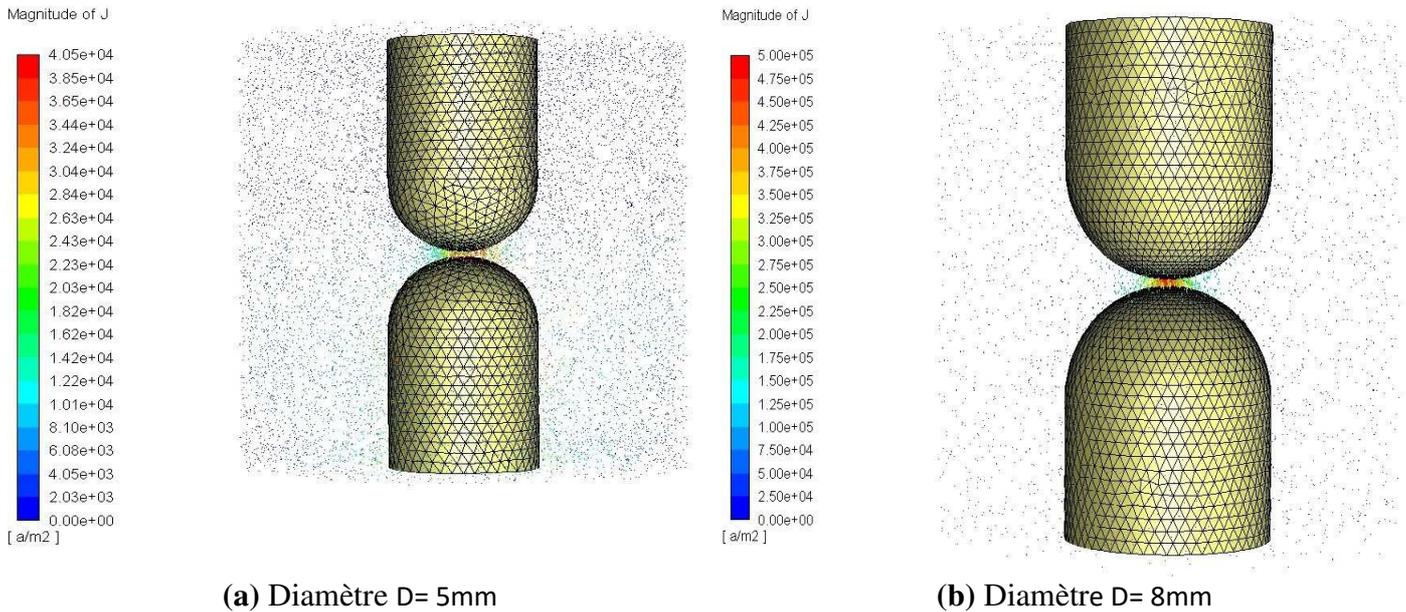


**Figure II- 20 :** Champ magnétique  $B$ , courant électrique d'arc  $I_{arc}$  et force de Lorentz  $F$  de l'arc

Le calcul théorique de la distribution de la densité de courant est complexe car nous ne disposons pas d'informations sur les dimensions et la conductivité électrique de la colonne d'arc. Par conséquent, nous procédons au calcul numérique de cette distribution à l'aide d'un modèle numérique MHD tridimensionnel développé avec un logiciel d'éléments finis (Fluent V18.1).

Ce modèle peut calculer la distribution de la densité de courant électrique d'arc  $J$  au niveau des surfaces de contact pour les arcs d'ouverture des deux contacts en cuivre ( $D=5mm$  et  $D=8mm$ ) sous une puissance d'entrée de 256W. Le but du calcul de la densité de courant est de voir comment la force qui mobilise l'arc varie en fonction de cette densité pour les deux contacts. Les résultats numériques présentés dans la figure suivante (Figure II- 21) confirment que le contact de grand diamètre ( $D=8mm$ ) a une distribution de densité de courant plus élevée près des surfaces de contact ( $J= 5 E5 A/m^2$ ) par rapport au contact de petit diamètre ( $D=5mm$ ) qui a une

densité de courant maximale ( $J = 4.05 \text{ E}4 \text{ A/m}^2$ ); cette densité de courant élevée génère une force magnétique d'arc plus élevée ce qui rend l'arc très mobile.

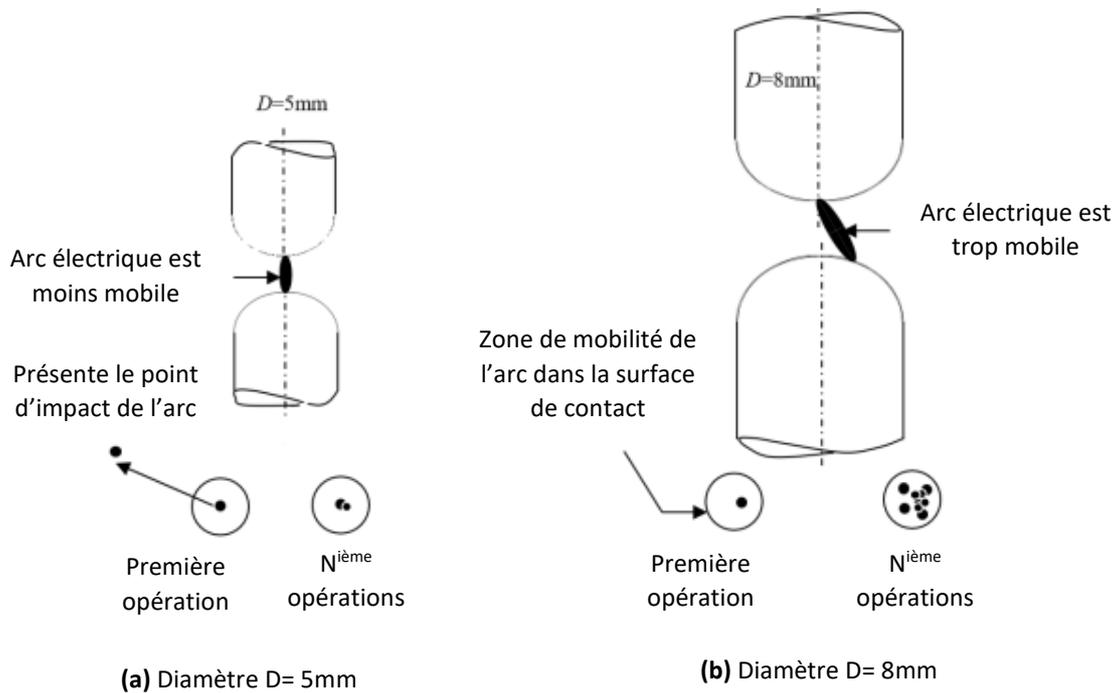


**Figure II- 21:** Distribution de la densité de courant électrique de l'arc pour les deux contacts

Comme nous l'avons observé expérimentalement et démontré numériquement, la mobilité de l'arc est plus élevée pour les contacts de grand diamètre. Par conséquent, nous aurons une oxydation rapide pour ce contact. Pour expliquer l'impact de cette mobilité de l'arc sur la dégradation des surfaces de contact, nous avons présenté dans la figure suivante la différence entre la mobilité de l'arc pour les deux échantillons de contact ( $D = 5 \text{ mm}$  et  $D = 8 \text{ mm}$ ) et sa conséquence sur la dégradation des surfaces de contact.

Pour le contact de diamètre  $D = 5 \text{ mm}$  (Figure II- 22a), l'arc touche le même point cible noir de la première à la  $N^{\text{ème}}$  opération ( $N$  peut atteindre 25 opérations ou plus) ; ce point reste conducteur (c'est-à-dire non oxydé) jusqu'à la  $N^{\text{ème}}$  opération. Après cette opération, le premier point touché s'oxyde et l'arc ne passe pas par ce point. L'arc cherche un autre chemin moins résistif qui correspond à un autre point très proche du premier (Figure II- 22a). Par contre, pour le contact de diamètre  $D = 8 \text{ mm}$  (Figure II- 22b), l'arc est trop mobile ; il percute plusieurs points aléatoires avec le principe du saut de tour (principe décrit précédemment à la Figure II- 19b), et avec une fréquence de deux à trois opérations pour chaque point, fréquence bien inférieure à celle observée pour le contact de diamètre  $D = 5 \text{ mm}$  ; ceci conduit à une

oxydation rapide du premier point percuté par l'air chaud libre. Ainsi, les autres points s'oxydent l'un après l'autre (Figure II- 22b). Lorsque tous les points sont oxydés, la surface de contact de la zone de mobilité de l'arc ou de la zone d'érosion devient électriquement isolante. Par conséquent, le contact atteint la fin de sa durée de vie. On peut conclure que la surface de contact avec  $D= 8 \text{ mm}$  s'oxyde rapidement par un arc trop mobile par rapport au contact avec  $D= 5 \text{ mm}$ . Pour cette raison, la durée de vie du contact avec  $D= 8 \text{ mm}$  est beaucoup plus faible que celle d'un contact avec  $D= 5 \text{ mm}$ .



**Figure II- 22 :** Impact de la mobilité de l'arc sur la dégradation de la zone de contact des deux échantillons de contact ( $D= 5 \text{ mm}$  et  $D= 8 \text{ mm}$ )

## II.7.2 Influence de matériau du contact sur la durée d'arc et son énergie

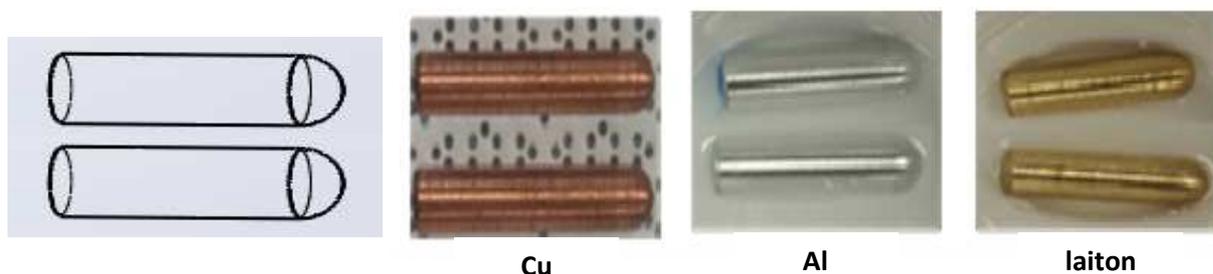
### II.7.2.1 Objectif

Les contacts de puissance sont généralement caractérisés par leurs géométries et leurs matériaux ; ils sont utilisés dans les relais d'appareils qui nécessitent une puissance élevée pour garantir leur bon fonctionnement [21- 23]. L'objectif de ce travail est d'analyser expérimentalement plusieurs matériaux classiques soumis à un arc électrique afin de sélectionner un matériau ayant une longue durée de vie. Le banc expérimental développé a été utilisé pour mesurer les paramètres de l'arc (durée/énergie de l'arc,...). Le système de fermeture/ouverture permet d'appliquer

une force  $F_c=20N$  avec vitesse d'ouverture constante. Une alimentation est utilisée ( $I_0= 5A$ ,  $V_0= 20VDC$ ).

### II.7.2.2 Propriétés des matériaux utilisés

En général, les connecteurs sont fabriqués à partir d'un matériau ayant une conductivité électrique élevée. Les matériaux utilisés dans les connecteurs sont le cuivre, l'aluminium et les alliages [20, 18]. Dans notre travail, nous étudions le comportement de certains matériaux lorsqu'un courant électrique est interrompu. Les électrodes utilisés elles ont un diamètre de 5 mm, la pointe est légèrement bombée avec un rayon de 2.5 mm (**figure II- 23**).



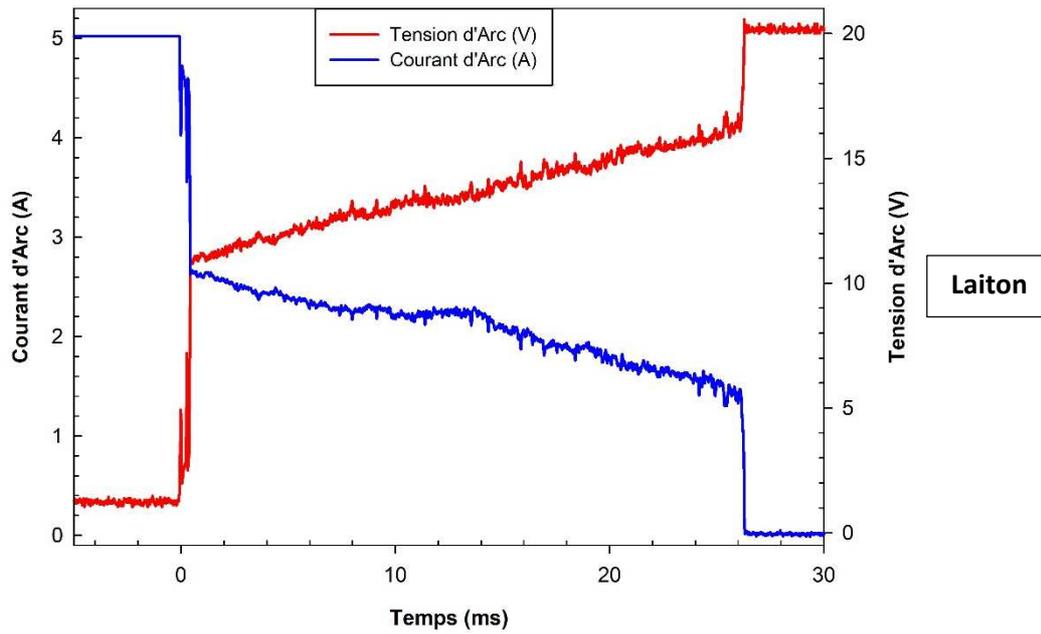
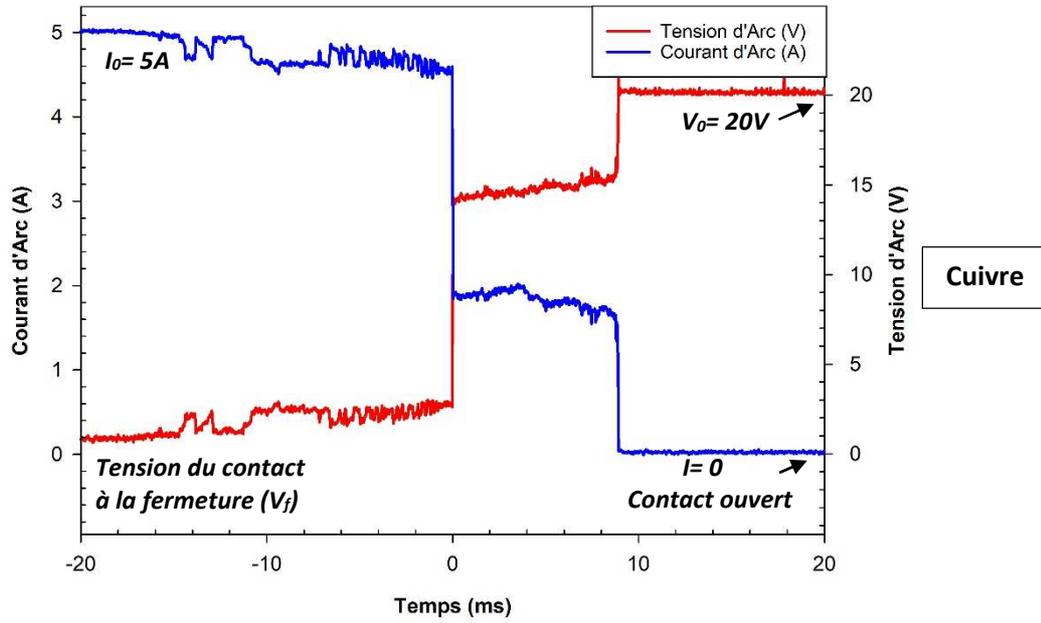
**Figure II- 23** : la forme géométrique des contacts en modèle CAO et les différents matériaux de contact utilisés

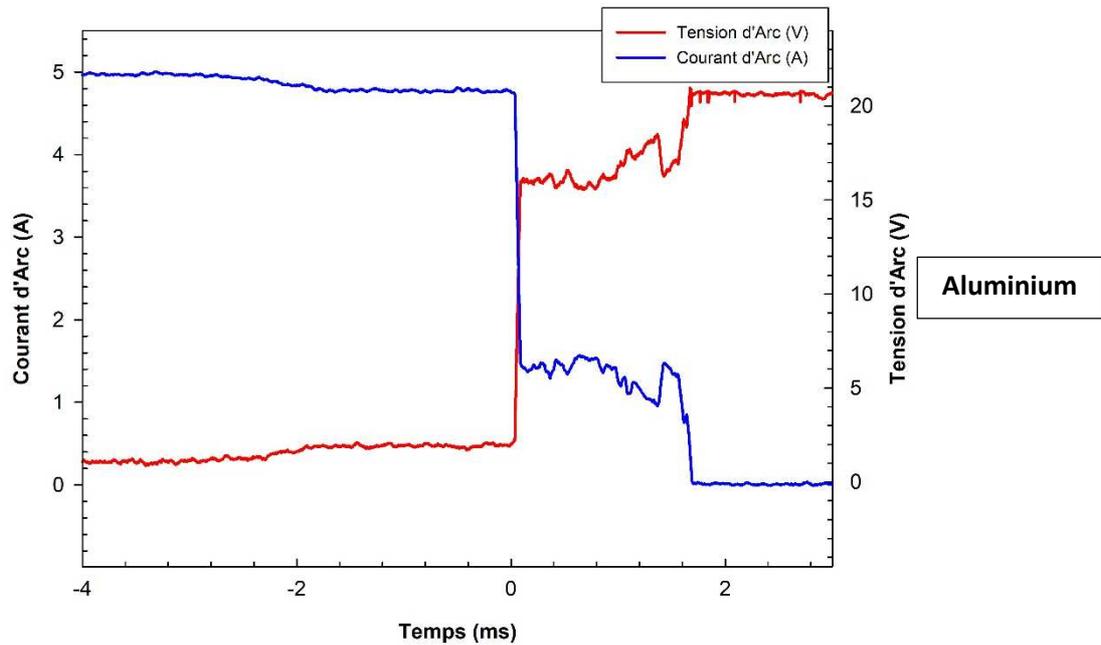
**Tableau II- 4** : Propriétés thermiques et électriques des matériaux des connecteurs et leurs revêtements [6].

Métaux	Température de ramollissement (°C)	Température de fusion (°C)	Température d'ébullition (°C)	Pression de vapeur au point de fusion (Pa)	Conductivité thermique à 20°C (W/mK)	Température de fusion J/kg	Conductivité électrique à 20°C ( $\times 10^2 \Omega^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ )
<b>Cu</b>	190	1083	2595	0.052	394	212	595.2
<b>Al</b>	150	660	2450	$2.5 \times 10^{-6}$	222	395	377
<b>Zn</b>	170	420	907	20	113	102	168.9
<b>Ag</b>	180	961	2212	0.36	419	105	628.9
<b>Au</b>	100	1063	2966	$2.4 \times 10^{-3}$	297	67.4	456.6

La **figure II- 24** montre les traces typiques de tension et de courant dans le circuit pour les différents matériaux de contact (cuivre, laiton et aluminium) Lors des opérations d'ouverture sous tensions et courants associés. Une forte durée d'arc de

25.9 ms est observée pour les contacts en laiton, cette durée est définie comme le temps nécessaire à l'arc pour s'éteindre.



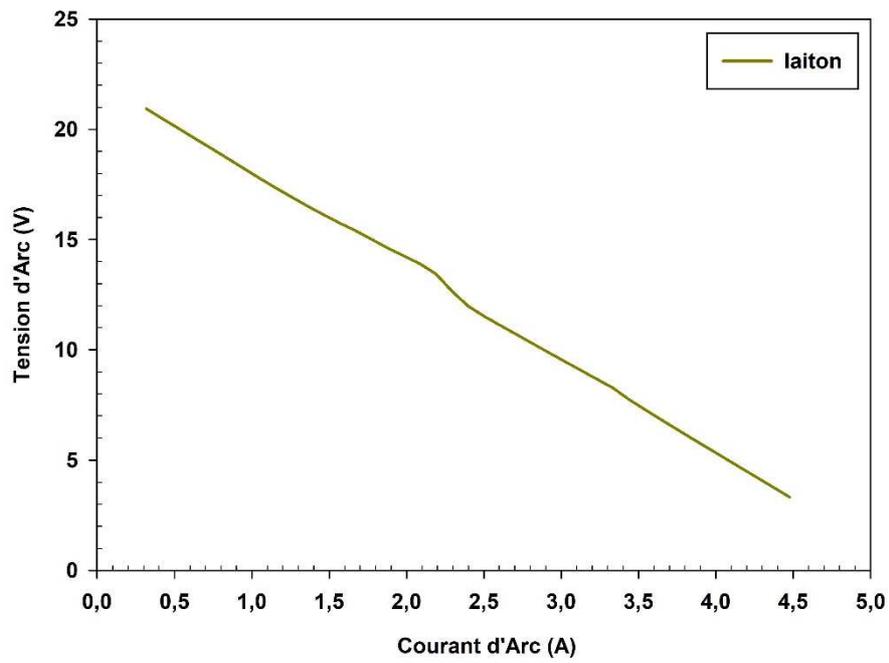
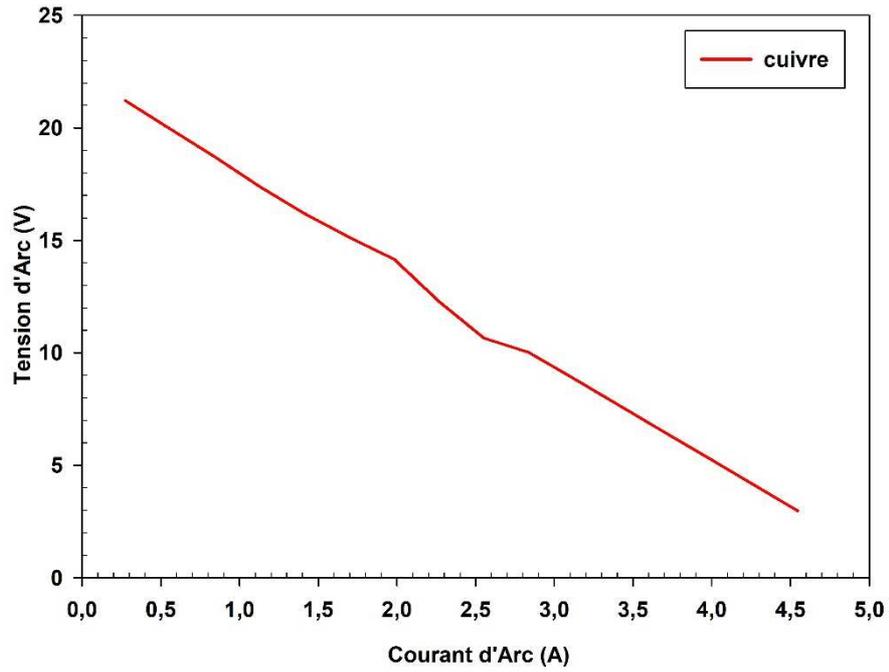


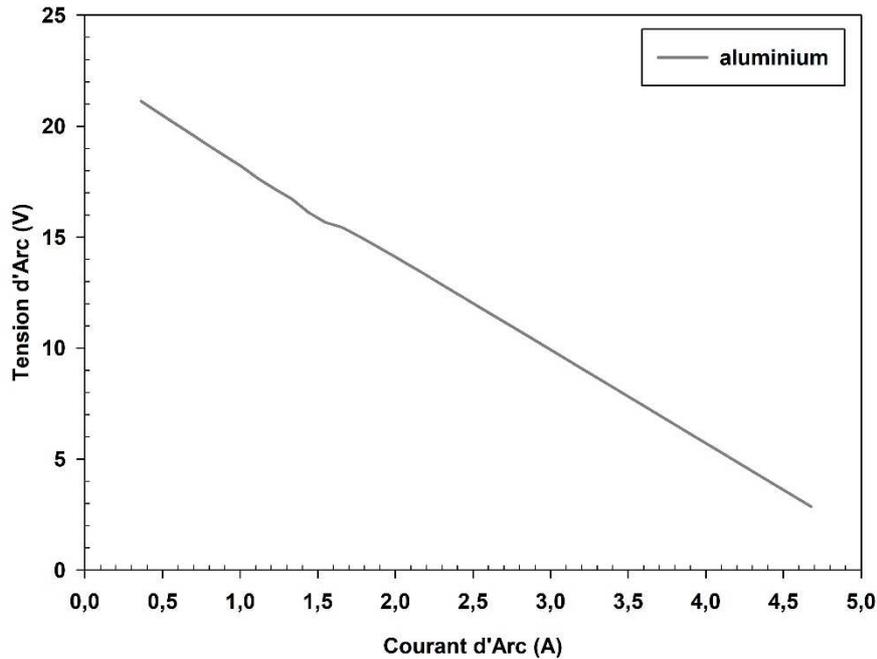
**Figure II- 24 :** Traces de tension et de courant de l'arc d'ouverture.  
Contacts D5 en cuivre (op1202), laiton (op72) et aluminium (op79), puissance 100W

Pour démontrer les principaux changements provoqués par la modification du matériau sous une tension d'alimentation élevée, nous présentons dans la **figure II- 24** les caractéristiques de la puissance de l'arc obtenues où le laiton a été exposé à une puissance élevée pendant une période intéressante.

### II.7.2.3 La tension $V_{arc}$ et le courant de l'arc $I_{arc}$

Les caractéristiques courant-tension dans le plasma sont illustrées dans la **figure II- 25**, dans laquelle le courant augmente. Il s'agit du régime de décharge de l'arc, dans lequel la tension diminue fortement tandis que le courant augmente rapidement. La figure montre la variation de la résistance de l'arc pour les trois matériaux utilisés (cuivre, laiton et aluminium) au cours de laquelle on peut dire que la tension d'arc varie linéairement avec le courant d'arc.

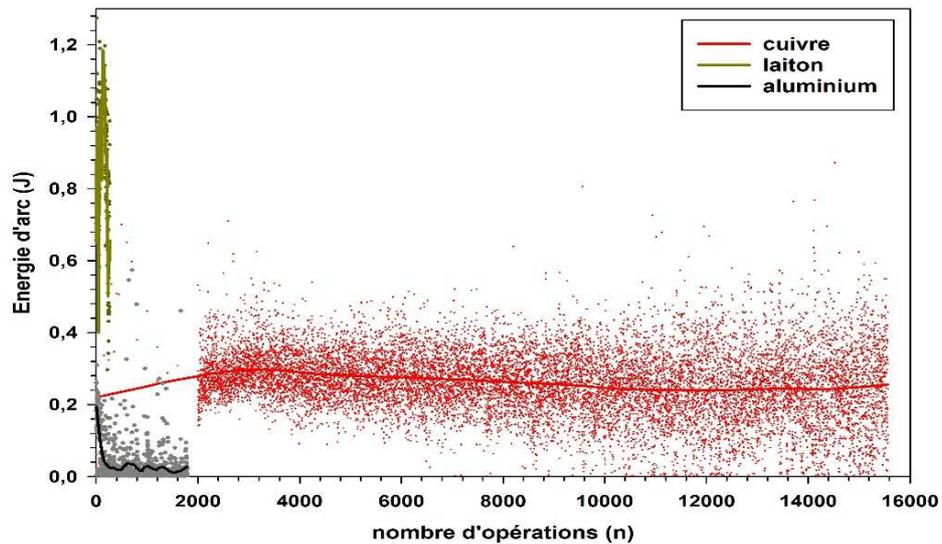




**Figure II- 25 :** Caractéristiques courant-tension dans le plasma pour des contacts en cuivre, laiton et aluminium à 100 W, diamètre D= 5 mm

#### II.7.2.4 Energie de l'arc $E_{arc}$ et le nombre d'opérations (n)

La **figure II- 26** montre la variation de l'énergie moyenne de l'arc durant les opérations d'ouverture pour des contacts en cuivre, laiton et aluminium, sous une puissance d'entrée de 100W. Nous avons utilisé un lissage avec un taux d'échantillonnage de 0.1 pour avoir la courbe de la durée moyenne de l'arc en fonction du nombre d'opérations. Le laiton a enregistré les énergies les plus fortes atteignant 1.2J. En conséquence, les énergies intéressantes ont eu une influence directe sur la durée de vie ces électrodes où elles ont diminué leurs durées d'utilisation. Le taux d'oxydation élevé des surfaces mises en jeu a joué un rôle dominant dans les contacts en laiton.



**Figure II- 26 :** Énergie de l'arc en fonction du nombre d'opérations pour la puissance d'entrée de 100W et diamètre des contacts D= 5mm

#### II.7.2.5 Durée de l'arc $\Delta t$ et nombre d'opération ( n )

La **figure II- 27** montre la variation moyenne de la durée de l'arc pour toutes les opérations d'ouverture des matériaux utilisés sous une puissance d'entrée de 100Watts. Le même type de lissage est utilisé pour avoir la durée moyenne de l'arc en fonction du nombre d'opérations. Le cuivre a enregistré le plus grand nombre d'opérations, où il a atteint 1600 opérations. En effet, les caractéristiques électriques et thermiques du cuivre ainsi que la stabilité de la durée de l'arc permettent d'augmenter la durée de vie de l'échantillon de contact.

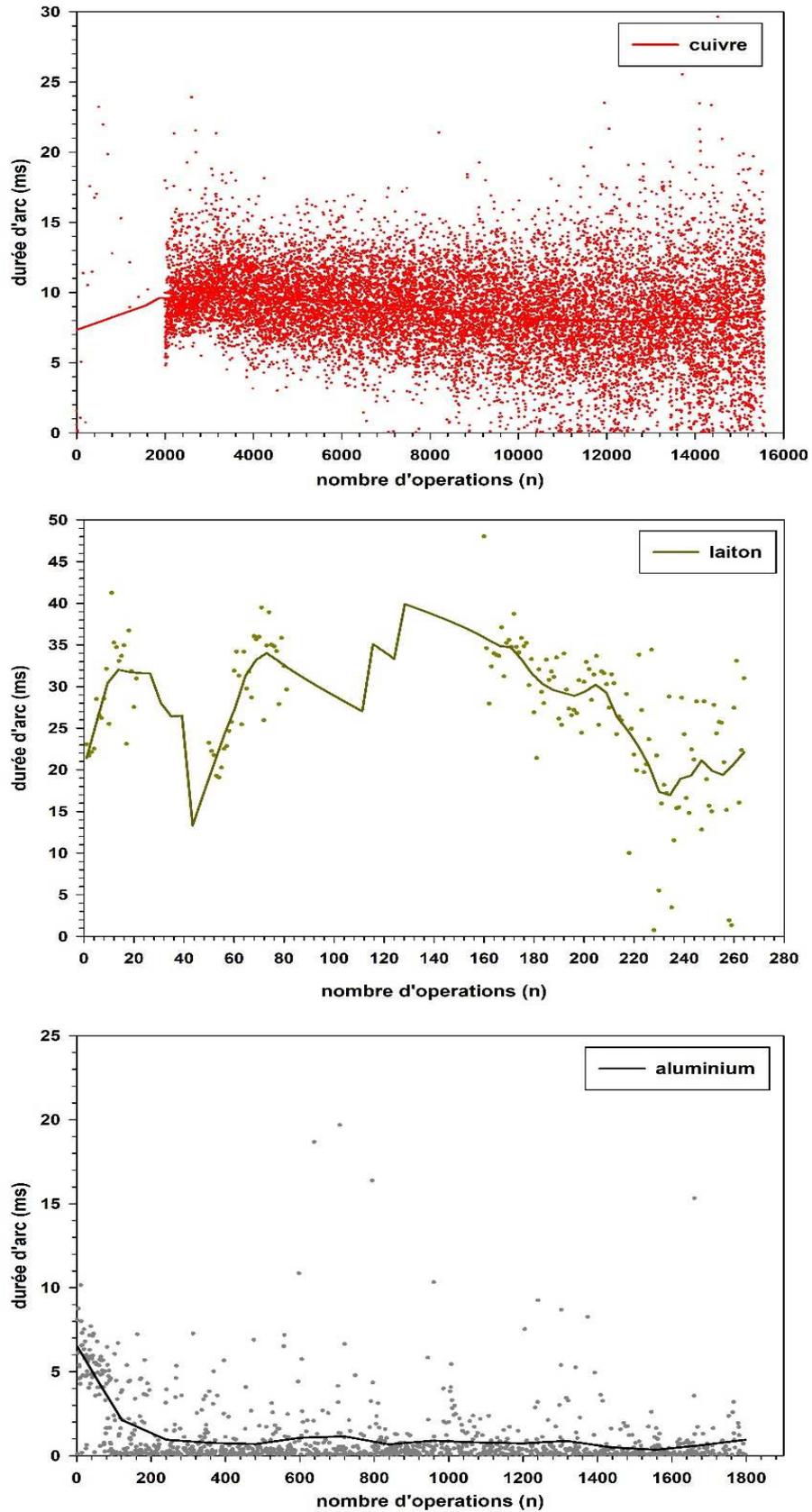


Figure II- 27 : Durée de l'arc en fonction du nombre d'opérations pour différents matériaux sous une puissance de 100W, D= 5mm.

La dégradation des contacts évolue selon la même forme de courbe, où il a été constaté que ;

La durée de l'arc diminue avec l'augmentation du nombre d'opérations pour la majorité des matériaux utilisés dans cette étude. Les matériaux à haute conductivité électrique (aluminium et cuivre) ont enregistré une durée d'arc moyenne trop faible par rapport au laiton; elle est de 8.83 ms pour le cuivre et de 1,1 ms pour l'aluminium. En effet, ce paramètre a influé directement sur la durée d'utilisation des contacts.

Une grande stabilité de la durée moyenne de l'arc est enregistrée durant le test pour les contacts en cuivre, la courbe moyenne de dégradation est faible. Ce paramètre a donné une durée de vie trop longue par rapport aux autres (de l'ordre de 15569 opérations).

La stabilité de la durée de l'arc à des énergies d'arc importantes pour le laiton a accéléré le vieillissement des contacts en augmentant le taux d'oxydation de l'air de contact, ces facteurs ont limité la durée de vie des électrodes. Les images de la cartographie EDX de la zone impactée par l'arc ont approuvé et démontré le degré de dégradation du contact en un temps trop court, le nombre d'opérations obtenues pour ce matériau n'étant que de 264 opérations. Le transfert de matériau est plus important en raison de la durée plus longue de l'arc.

Les matériaux à basses températures de fusion et d'ébullition, tels que le laiton et l'aluminium, sont généralement utilisés dans diverses applications électriques. Cependant, leur durée de vie peut être limitée lorsqu'ils sont soumis à des conditions d'arc électrique intense. L'intensité de l'arc électrique provoque des modifications structurelles dans ces matériaux, altérant leur composition et leur microstructure. L'arc électrique crée des températures élevées localisées qui favorisent la fusion partielle ou la vaporisation des surfaces en contact, notamment pour des matériaux comme le laiton et l'aluminium, qui ont des températures de fusion relativement basses (environ 660°C pour l'aluminium et 900°C pour le laiton), ainsi, le laiton possède une pression de vapeur à la température de fusion la plus élevée par rapport aux autres matériaux, ce qui lui permet de produire une forte ionisation. En conséquence, ces matériaux subissent une oxydation accélérée, car la chaleur élevée et l'exposition à l'oxygène favorisent la formation rapide d'oxydes sur leur surface.

### **II.7.3 La durée de vie des contacts en fonction de l'aire de contact et la puissance d'entrée**

#### **II.7.3.1 Objectif**

La performance des connecteurs dit aussi la durée de vie est jugée par le nombre des opérations d'ouverture et fermeture des contacts sous arc électrique. L'augmentation de la puissance électrique des appareils nécessite notamment une augmentation de la tension d'alimentation, cette augmentation va nous conduire à limiter la durée de vie des contacts car un arc électrique trop important va se produire lors d'ouverture et fermeture des contacts.

Parmi les principaux phénomènes de dégradation des contacts causés par l'arc électrique est l'érosion des contacts. C'est la source majeure de défaillance dans les connecteurs de puissance. Ce phénomène engendre des dysfonctionnements dans le circuit et à la destruction du dispositif.

Cette partie présente l'influence de l'aire de contacts sur la durée de vie des connecteurs (la rupture complètes des contacts), pour cela une campagne des essais a été effectuée sur des contacts cylindrique de diamètre 5 et 8mm. Les échantillons de différents matériaux ont été testés sous des puissances d'entrée de 100 et 250W. L'emploi des contacts de plus grande taille, permet d'augmenter la surface de contact.

La **figure II- 28** (graphe à barres) représente la durée de vie des contacts des deux diamètres testés sous différentes puissances. La durée semble augmenter de manière claire et d'une façon similaire pour tous les matériaux ayant un faible diamètre et même puissance éjecter.

Les électrodes de grand diamètre ont une surface de contacts plus importante [29], ce paramètre va mener à avoir plus de ligne de construction, le décroissement de la résistivité électrique et la diminution de la durée de l'arc des contacts. Avec tous ses avantages, ces contacts ont une durée de fonctionnement bien limitée par rapport aux petits diamètres. Cela pourrait s'expliquer par la configuration géométrique et la disposition des contacts de 5mm différente de celle des 8mm, combinée au fait que les contacts de 8mm de diamètre soient de plus grandes tailles que les contacts de

5mm permettraient une plus grande mobilité de l'arc entraînant ainsi les durées d'arc variables. Cette donnée favorise l'utilisation des contacts de petit dimensionnement.

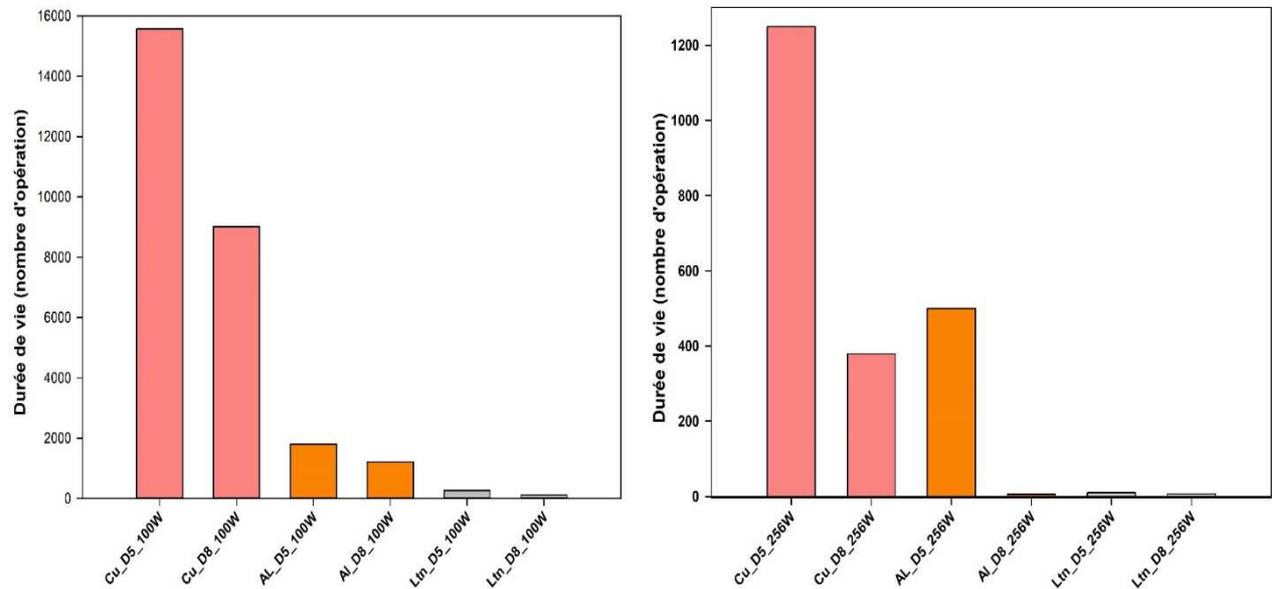


Figure II- 28 : Durée de vie en fonction de la forme de contacts et la puissance d'entrée

## II.7.4 Effet de la nature de matériau du contact sur l'énergie de l'arc et la durée de vie des contacts

Le choix de matériaux de contact joue un rôle très essentiel pour la suppression de l'arc. Les matériaux peuvent réduire le gap d'extinction et l'érosion par l'arc dans les circuits. L'influence du matériau de contact se produit au début de l'apparition de l'arc, il est facile de comparer différents matériaux en fonction des conditions du circuit électrique.

Durant cette étude, six matériaux ont été testés au laboratoire, les conditions expérimentales sont décrites au-dessous.

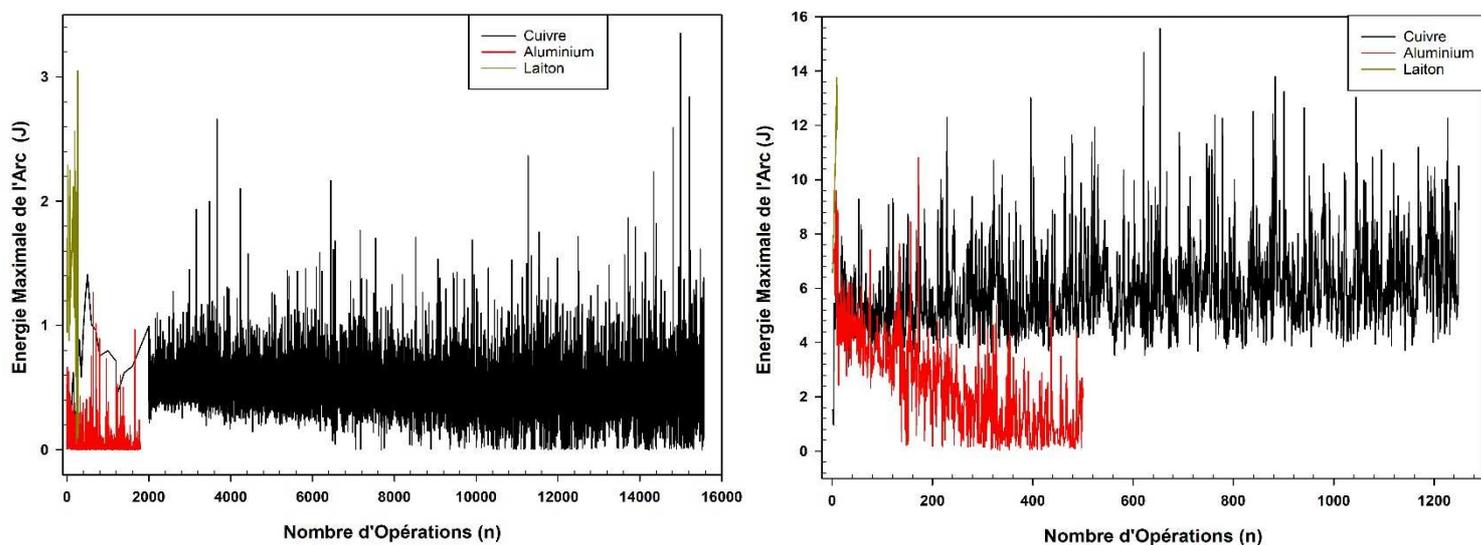
### II.7.4.1 Matériaux nu (non revêtu)

Les mesures de la durée de l'arc et du nombre d'opération sont effectuées sous une puissance initiale de 100 et 256W à des tensions de 20 et 32 VDC aux bornes des contacts, elles sont appliquées aux différents matériaux cuivre, aluminium et laiton. Les diamètres des contacts testés sont les suivants :  $D_1 = 5\text{mm}$  et  $D_2 = 8\text{mm}$ .

Les résultats montrent que le nombre des opérations est trop important pour les contacts en cuivre sous les tensions testées, atteignant *15569 opérations* pour une puissance d'entrée de 100 Watts et *1249 opérations* pour une puissance de 256 Watts. Ce phénomène est dû au taux d'oxydation du cuivre qui est trop faible par rapport à l'aluminium et laiton. Les mesures de la durée de l'arc sont presque stables pour le cuivre, soit environs de 60ms ( $D_1$ : 5mm- 256W) et 10ms ( $D_2$ : 8mm- 100W). La dégradation des contacts en cuivre se fait par niveau (surface horizontal); elle commence par le centre puis elle se propage autour de la première empreinte endommagée par l'arc.

La durée de l'arc de laiton est trop longue en raison de sa faible conductivité électrique, elle est de l'ordre de  $15,9 \times 10^6$  Siemens/m, les longue durée de l'arc et les puissances enregistrer ont accélérer le vieillissement des contacts par la dégradation et l'oxydation de l'aire de contact (nombre d'opération est trop réduit).

La durée de l'arc de l'aluminium diminue lentement avec l'augmentation de nombre d'opération, car l'énergie d'ionisation est trop faible pour ce matériau. Comme il est reconnu que l'aluminium a une conductivité électrique très élevée. La diminution de la durée de l'arc revient à la morphologie des contacts où les formes acquises par les électrodes (pic/cavité) ont augmenté la surface de contacts.



**Figure II- 29 :** Les mesures de durée d'arc en fonction de nombre d'opérations aux bornes des contacts en cuivre, aluminium et laiton sous 100 et 256W. Le diamètre des contacts est de 5mm.

#### **II.7.4.2 Matériaux revêtus**

Dans la littérature, il est bien connu que l'augmentation de la résistance de contact est une l'un des conséquences de l'arc électrique [18, 30, 31]. Par de nombreuses opérations d'ouverture et fermeture des contacts sous tension, les arcs modifient la surface des contacts en modifiant sa morphologie et sa composition chimique. Ces perturbations provoquent l'échauffement des contacts car les zones de passage de courant sont devenue plus petites et la constriction des lignes de courant plus importante.

Parmi les différentes solutions suggérées :

##### **Les revêtements**

Les principaux revêtements se regroupent en trois catégories : les métaux nobles (or, argent et leurs alliages), les platinoïdes (essentiellement les alliages de palladium) et les métaux non nobles (étain et étain plomb). Ces revêtements pour les contacts électrique doivent répondre aux plusieurs exigences : avoir une faible résistivité et présente un bon comportement en friction, être compatible et protéger le substrat de la corrosion.

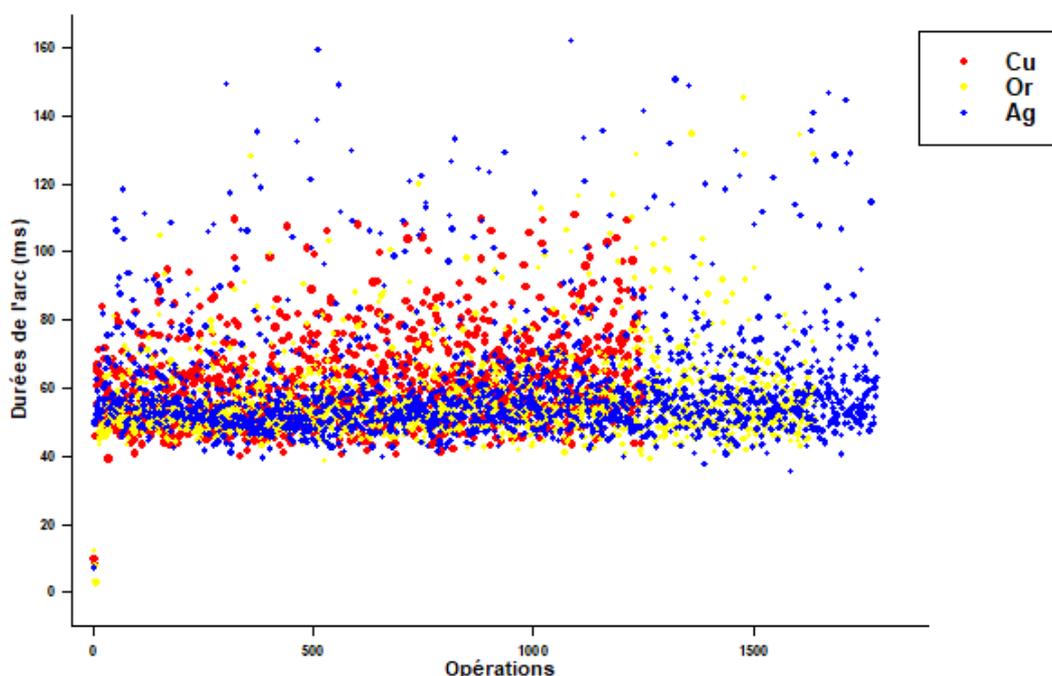
**L'or :** L'or est un métal idéal pour les revêtements des contacts car il est très malléable : il ne s'oxyde pas et réagit très difficilement avec d'autres substances. L'or permet un bon passage du courant même pour de faibles forces de contact, ce qui est très intéressant lorsqu'un nombre important de contacts doit être engagés simultanément. La couche d'or est déposée par électrolyse à partir d'un bain d'auricyanure ( $\text{Au}(\text{CN})_2$ ), l'épaisseur déposée est de  $2\mu\text{m}$ .

**L'argent :** L'argent a des propriétés similaires à celles de l'or. Cependant, il est attaqué par le sulfure d'hydrogène et le chlore, ce qui le rend inapte à de nombreuses applications. une couche d'argent, d'une épaisseur de  $2\mu\text{m}$ , est également déposée par électrolyse.

L'argent seul utilisé pour revêtir le cuivre a plus de tendance à la soudure lors de la fermeture des contacts après l'apparition de l'arc dans la phase d'ouverture. En effet, son usage reste limité en raison de sa faible résistance à l'érosion. En effet, sa mauvaise tenue à l'érosion est liée à sa faible température de fusion ( $961^\circ\text{C}$ ),

pourquoi vous n'avez pas pensé à le faire élaborer avec d'autres matériaux métalliques ou d'autres composantes chimiques comme par exemple : Ni, Ti, etc pour former un pseudo-alliage d'argent plus résistant à l'arc. En effet, il existe des matériaux récents (résistants à l'érosion et au soudage par effet d'arc et présentant une faible résistance électrique de contact à la fermeture) et qui sont utilisés dans les contacts électriques comme par exemple : AgSnO<sub>2</sub>, Ag-Ni, Ag-CuO, Ag/TiB<sub>2</sub>, etc., Juste à titre d'information que l'alliage AgCdO était le meilleur matériau du contact électrique utilisé à l'époque, mais à cause de son caractère polluant, il a été totalement interdit par la direction environnementale de l'Union Européenne.

Les mesures de durée d'arc soulevé pour cette expérience sont sous 256W pour une tension de 32VDC aux bornes des contacts, appliqués sur plusieurs matériaux revêtus et non revêtu à base de cuivre. Le diamètre des contacts testé est de 5mm ; Les résultats sont présentés sur la **figure II- 30** en dessus.



**Figure II- 30** : Durée de l'arc en fonction de nombre d'opération pour différents matériaux (revêtu et non revêtu). (Diamètre des contacts D= 5mm, Pin=256W)

Nous avons constaté une distribution de la durée d'arc jusqu'à la fin de vie des échantillons en **Cu** non revêtu, **Cu** revêtu avec **Or** et **Cu** revêtu avec **Ag** (**figure II- 30**). Les premières opérations correspondent à la période de nettoyage de la surface

du contact par l'arc, puis une stabilisation de la durée d'arc est constatée autour de 60 ms jusqu'à la dégradation total et la fin de vie des contacts. La durée moyenne de gap d'extinction enregistré est de 0,3mm.

La durée de vie des contacts revêtue est très importante par rapport aux matériaux non revêtus (nu), et cela due à leurs propriétés thermique et électrique. Le cuivre revêtue avec **Ag** est le matériau le plus résistant à l'arc, il atteint un nombre d'opérations le plus long 1783 Ops grâce à ça grande conductivité électrique. En derniers le **Cu** nue avec 1249 Ops.

Le matériau revêtu en **Ag** a eu aussi une durée de l'arc importante, jusqu'à 162.01 ms mais restera plus efficace que **Or** et **Cu** nue.

Après cette étude, nous confirmons que l'augmentation prématurée de la résistance de contact est due à la forte résistivité de l'oxyde de cuivre, d'où l'intérêt de revêtir les contacts par un matériau qui résiste au phénomène d'oxydation tel que **Or** et l'argent **Ag**.

## **II.8 CONCLUSION**

Pendant les opérations d'ouverture et de fermeture, la durée de vie d'un échantillon de contact électrique dépend de la gravité de l'arc et de son énergie. Une énergie d'arc élevée entraîne l'érosion, l'oxydation et l'isolation électrique des surfaces de contact.

Dans cette partie du travail, il a été démontré que pour tout diamètre de contact, l'énergie de l'arc est plus influencée par la puissance d'entrée ; une puissance d'entrée élevée conduit à une énergie d'arc élevée, une durée d'arc élevée, une oxydation et une érosion élevées, et une faible durée de vie.

Il a été expliqué à l'aide de nos calculs numériques et de nos observations expérimentales que les contacts de grand diamètre ont une mobilité d'arc élevée ; cela accélère l'oxydation des surfaces de contact et entraîne une diminution rapide de la durée de vie du contact.

Enfin, l'utilisation combinée d'un contact de grand diamètre soumis à une puissance d'entrée élevée provoque une énergie d'arc élevée avec une température et une mobilité d'arc élevées.

Tous ces facteurs entraînent une dégradation rapide et un endommagement des surfaces de contact par oxydation, ce qui aboutit finalement à la défaillance du

dispositif. Le cuivre étant moins cher que les matériaux nobles, la possibilité de l'utiliser dans les contacts d'ouverture de puissance sous la forme d'un contact hémisphérique de petit diamètre est plus intéressante pour les fabricants de connecteurs d'ouverture électrique.

La durée de l'arc diminue avec l'augmentation du nombre d'opérations pour la majorité des matériaux utilisés. Les matériaux à haute conductivité électrique (aluminium et cuivre) ont enregistré une durée d'arc moyenne trop faible par rapport au laiton.

Une grande stabilité de la durée moyenne de l'arc est enregistrée durant le test pour les contacts en cuivre.

La stabilité de la durée de l'arc à des énergies d'arc importantes pour le laiton a accéléré le vieillissement des contacts en augmentant le taux d'oxydation de l'air de contact.

La durée de vie des contacts revêtue est très importante par rapport aux matériaux non revêtues (nu), et cela due à leurs propriétés thermique et électrique.

**REFERENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES  
DU CHAPITRE II**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE II

- [1] J.J. Lowke, R. Morrow, and J. Haidar. A *simplified unified theory of arcs and their electrodes*. Journal of Physics D: Applied Physics. 30(14):2033–2042, 1997.
- [2] M. Tanaka, K. Yamamoto, S. Tashiro, K. Nakata, E. Yamamoto, K. Yamazaki, K. Suzuki, A.B. Murphy, and J.J. Lowke. *Time-dependent calculations of molten pool formation and thermal plasma with metal vapour in gas tungsten arc welding*. Journal of Physics D: Applied Physics, 43(43):434009, 2010.
- [3] Y. Liu, A. Guha, J. Montanyà, Y. Wang, and Z. Fu. *Effects of single impulse current and multiwaveform multipulse currents on aluminum alloy in lightning damage analysis*. IEEE Transactions on Plasma Science, 48(4):1146–1153, 2020.
- [4] Y. Liu and Y. Wang. *Is indirect electrode a good choice for simulated lightning damage tests, The effect of metal vapor*. IEEE Transactions on Plasma Science, 49(5):1661–1668, 2021.
- [5] S.L. Millen, A. Murphy, G. Abdelal, and G. Catalanotti. *Sequential finite element modelling of lightning arc plasma and composite specimen thermal-electric damage*. Computers & Structures, 222:48–62, 2019.
- [6] Y. Liu and Y. Wang. *Modeling the lightning continuing current electric arc discharge and material thermal damage: Effects of combinations of amplitude and duration*. International Journal of Thermal Sciences, 162:106786, 2021.
- [7] A. Beloufa. *Numerical and experimental analysis of the electrical, mechanical and thermal behavior of electrical contacts in the fields of forces (1 to 100 N) and currents (1 to 100 A). Analyse numérique et expérimentale du comportement électrique, mécanique et thermique des contacts électriques dans les domaines de forces (1 à 100 N) et de courants (1 à 100 A)*. Ph.D. Thesis, University of Rennes, Rennes, France, 2008 (in French).
- [8] L. Doublet, N.B. Jemaa, F. Hauner, and D. Jeannot. *Make arc erosion and welding tendency under 42 VDC in automotive area*. In: Proceeding of the 49th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, pages 158–162, Washington, DC, USA, 08-10 Sept. 2003.
- [9] S.N. Kharin and M.M. Sarsengeldin. *The role of the arc flux and Joule heating in the erosion of electrical contacts*. In: 2017 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, pages 293–301, Denver, USA, 10-13 Sept. 2017.

- [10] F. Pons. *Electrical contact material arc erosion: experiments and modeling towards the design of an AgCdO substitute*. Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, USA, 2010.
- [11] Bonhomme. *Wear behavior of the electrical contact pads mad with silver matrix*. Ph.D.Thesis, Paris Mining School, Paris, France, 2005 (in French).
- [12] Amine BELOUFA, Kada HADDA & Mohamed AMIRAT, *Damage of contact materials under a powerful electric arc discharge*, The 1st International Symposium on Industrial Engineering Maintenance and Safety: IEMS'22.IEMS 2022 Hybrid Mode, 05 - 06 March 2022 Oran, Algeria.
- [13] L. Morin, *Etude expérimentale des arcs électriques et de leurs conséquences sur les matériaux de contact* : application aux commutateurs automobiles de puissance, Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1 France, Juin 2000.
- [14] L. Nedelec, « *Contribution à l'étude des arcs électriques et de leurs conséquences sur les matériaux de contacts : application aux commutateurs automobiles* », Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, France, Juin 1997.
- [15] C. Maul, J. W. McBride, «*A Model to Describe Intermittency Phenomena in Electrical Connectors*», 48th. IEEE Holm Conf on Electrical Contact, Orlando USA, Volume 9, pp. 165-174, (2002).
- [16] L. Fechant, *Le contact électrique : Phenomenes physique et materiaux*, Collection SEE. Paris,France : Hermes, 1997, p. 349.
- [17] N. Ben Jemaa, J. L. Queffelec, and R. Haug, *Theoretical and experimental laws of anodi cand cathodic arc duration on break at low electrical level*, J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 20, pp. 468-475, 1987.
- [18] R. Holm. *Electric Contacts: theory and applications*. Springer edition, 2000.
- [19] Slade, P.G.: *Electrical Contacts: Principles and Applications*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press,
- [20] M. Braunovic, V. Konchits, N. Myshkin, «*Electrical Contacts: Fundamentals Applications and Technology*», pp 309-312, 364, (2006).
- [21] R. A. Higgins, «*Engineering Metallurgy*», 3rd ed, London: The English Universities Press, (1971).
- [22] Gauthier Deplaudé. *Comportement d'un arc électrique impulsif de forte intensité* : cas du disjoncteur modulaire. Plasmas. Université Paris Saclay, 2017.

- [23] R. Haug, T. Kouakou, and J.L. *Doremieux*. ***Phenomena preceding arc ignition between opening contacts: experimental study and theoretical approach***. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Part A, vol. 14, n°1, pages 14–19, March 1991.
- [24] S.N. Kharin. ***Dynamics of the transition of the arc metallic phase into the gaseous phase in opening electrical contacts***. Proc. 17th International Conference on Electrical Contacts, pages 817–825, Nagoya, July 1994.
- [25] L. Féchant, « ***Le contact électrique: phénomènes physique et matériaux*** », Collection SEE, Hermes édition, 1997.
- [26] K. Hadda, A. Beloufa, M. Amirat, A. Boutte, ***Investigation on contact surfaces damage of copper contacts by an electric arc***, Archive of Mechanical Engineering, Volume 71, Issue 2, pp. 251–271, 2024.
- [27] P.G. Slade. ***Electrical contacts: principles and applications***. CRC Press, New York, 2014.
- [28] N. Benjemaa, J.L. Queffelec, and D. Travers. ***Some investigations on slow and fast arc voltage fluctuations for contact materials proceeding in various gases and direct current***. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 14(1): 113–117, 1990.
- [29] P. J. Boddy and T. Utsumi. ***Fluctuation of arc potential caused by metal-vapor diffusion arcs in air***. Journal of Applied Physics, 42(9): 3369–3373, 1971.
- [30] Elsa YEE KIN CHOI « ***Étude des arcs et de leurs conséquences sur les matériaux de contacts électriques de puissance pour des applications DC*** » ; thèse doctorat UNIVERSITÉ DE RENNES 1, juillet 2015.
- [31] L. Féchant and P. Tixador. ***Matériaux conducteurs et de contact électrique***. Collection EGEM, Hermes édition, 2003.
- [32] R.S. Timsit. ***Electrical contact resistance properties of stationary interfaces***. Proc. IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, pages 1–19, 1988.
- [33] J.D. Lambert. ***The oxidation of carbon***. Transactions of the Faraday Society, 32:452–462, 1936.
- [34] D.Y. Cho, K.J. Kim, K.S. Lee, M. Lübben, S. Chen, and I. Valov. ***Chemical influence of carbon interface layers in metal/oxide resistive switches***. ACS Applied Materials & Interfaces, 15(14):18528–18536, 2023.

# CHAPITRE

# 3

## **Etablissement du modèle numérique**

---

### **III.1 INTRODUCTION**

Dans un modèle numérique, les lois qui régissent les phénomènes physiques se traduisent par des équations mathématiques. La résolution analytique ou numérique des équations permet de déterminer les grandeurs physiques qui caractérisent le système.

L'objectif de la modélisation est de donner une description cohérente du phénomène (plasma thermique dans notre étude) en fonction de paramètres externes tels que, la géométrie, la nature de gaz, la densité de courant et les conditions aux limites. En pratique, la modélisation d'un plasma thermique ne permet pas une description auto-cohérente complète, ceci notamment par manque de compréhension des phénomènes complexe ou aussi les interactions du plasma avec les électrodes. Les limites nous imposent à faire des hypothèses simplificatrices sur les modèles. Par ailleurs, la résolution des équations qui régissent ces modèles est généralement difficile ce qui nécessite encore de faire appel à d'autres simplifications pour parvenir à une solution satisfaisante.

Les phénomènes électrique, magnétique et fluide dans les plasmas peuvent être décrits par le modèle magnétohydrodynamique (MHD) incluant les équations de Navier-Stokes, de l'énergie et de l'électromagnétisme. Toutes ces équations ont été résolues par le logiciel Ansys Fluent basé sur la méthode des volumes finis. Ce chapitre décrit brièvement la façon dont on a utilisé le solveur de Fluent pour la résolution du modèle MHD d'arc libre dans l'air.

### **III.2 MODELE D'ARC ELECTRIQUE DANS UNE CONFIGURATION SIMPLIFIEE**

#### **III.2.1 Présentation du modèle**

La modélisation d'un arc électrique dans une géométrie simplifiée est proposée dans ce chapitre, l'objectif principal étant d'obtenir les grandeurs de certaines propriétés du plasma telle que l'énergie, la température ou encore la durée de l'arc. Pour obtenir ces paramètres, les termes sources utilisés pour la partie électrique de la simulation du plasma permettent d'établir le couplage électrique et hydrodynamique nécessaire à la simulation.

Le modèle de plasma dans la configuration d'arc libre sera décrit en commençant par les hypothèses générales suivies d'une présentation de la géométrie et des conditions de simulation utilisées, et enfin des équations impliquées, les diagrammes de résolution et des critères de convergence pour ce modèle.

### III.2.2 Hypothèses générales

Dans l'approche Magnétohydrodynamique (MHD) appliquée à l'étude des arcs électriques, les modèles mathématiques sont basés sur les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie dans les éléments macroscopiques de l'arc. Ces équations prennent en compte les propriétés du gaz, les mécanismes d'échange d'énergie, ainsi que les propriétés spécifiques du plasma. Cependant, en raison de la complexité du système, certaines simplifications doivent être faites en ce qui concerne la géométrie et les propriétés physiques du plasma.

Les hypothèses de base qui sous-tendent l'établissement du modèle plasma en présence d'un arc électrique sont les suivantes [1] :

- **Système à symétrie 2D cylindrique** : Le modèle considère une symétrie cylindrique bidimensionnelle.
- **Négligence de l'effet de gravité** : L'effet de la gravité est considéré comme négligeable par rapport à la pression.
- **Plasma en tant que fluide newtonien**: Le plasma est modélisé comme un fluide newtonien.
- **Équilibre thermodynamique local (ETL)**: Le plasma est supposé être en équilibre thermodynamique local, ce qui signifie qu'il y a un équilibre dans les réactions chimiques et une température commune à toutes les espèces du plasma.
- **Plasma comme milieu continu** : Le plasma formé par l'arc électrique est considéré dans son ensemble comme un milieu continu et est régi notamment par les équations de Navier-Stokes.
- **Écoulement laminaire** : L'écoulement du plasma est supposé être laminaire.
- **Négligence de la taille des gaines cathodiques et anodiques**: La taille des gaines cathodiques et anodiques du plasma, ainsi que la physique associée est négligée par rapport à celle de la colonne d'arc.

- **Négligence des vapeurs provenant des électrodes et des réactions chimiques:**  
Les vapeurs provenant des électrodes et les réactions chimiques ne sont pas prises en compte dans le modèle, l'objectif principal étant de mettre en œuvre le modèle MHD.
- similaire aux articles [2,3,16], l'amorçage de l'arc n'est pas inclus dans la simulation et le calcul démarre avec une distribution de température constante et une petite distance entre les contacts (gap).

Il est important de noter que ces hypothèses permettent de simplifier le modèle et de rendre les calculs plus gérables tout en préservant une représentation significative des phénomènes essentiels de l'arc électrique. Ces simplifications sont nécessaires pour obtenir des résultats quantifiables et interprétables dans des systèmes aussi complexes. Cependant, il est également important de reconnaître les limites et les implications de ces simplifications dans l'interprétation des résultats.

### III.2.3 Les équations impliquées

En prenant en compte les aspects ci-dessus, les équations régissant les modèles Magnétohydrodynamiques (MHD) de l'arc électrique sont élaborées [4]. Ces équations sont nécessaires pour décrire le comportement complexe du plasma dans un arc électrique. Examinons de plus près le contexte mathématique de ces modèles et les différents effets qui interagissent dans l'arc électrique.

Ces équations sont formulées dans le cadre d'un système à symétrie cylindrique, conforme aux hypothèses expliquées. Il est également important de prendre en considération les propriétés du gaz et d'intégrer une formulation empirique pour représenter les mécanismes d'échange d'énergie. Ces équations permettent ainsi de modéliser de manière approfondie le comportement dynamique et thermique du plasma.

## III.3 DESCRIPTION MAGNETOHYDRODYNAMIQUE (MHD)

La magnétohydrodynamique (MHD) est un modèle utilisé pour décrire le comportement des fluides électriquement conducteurs exposés à un champ électromagnétique. Les phénomènes observés dans le plasma sont très complexes, car ils incluent la dynamique des fluides, les lois de la thermodynamique à une échelle

macroscopique, les réactions chimiques, l'électromagnétisme, et parfois même le mouvement de pièces mécaniques. Ces multiples interactions font du plasma un domaine d'étude multidisciplinaire, nécessitant des modèles mathématiques sophistiqués et des simulations numériques pour une compréhension approfondie.

En raison de la complexité inhérente à ces mécanismes et pour approfondir la compréhension du modèle magnétohydrodynamique (MHD), de nombreux chercheurs se tournent vers des expériences pour étudier les phénomènes plasmatiques. Cependant, mesurer les paramètres critiques tels que la vitesse du gaz, la distribution de température ou le champ magnétique induit peut parfois présenter des difficultés. La complexité s'accroît lorsque le plasma est confiné et que l'introduction d'instruments peut devenir techniquement difficile.

Grâce à la simulation numérique, nous pouvons obtenir une vision complète et détaillée du processus, ce qui permet d'analyser et de quantifier les résultats de manière précise. Ces simulations offrent l'avantage d'accélérer considérablement les processus de conception et d'optimisation. En réduisant la nécessité de fabriquer un grand nombre des échantillons et de mener des expériences coûteuses, elles contribuent à minimiser les coûts liés à la recherche et au développement. Les simulations numériques représentent un outil puissant et économique pour mieux comprendre les phénomènes complexes du plasma et optimiser les dispositifs basés sur la magnétohydrodynamique [2, 4].

La simulation proposée dans cette étude se concentre sur la phase d'ouverture de contacts électriques, un processus crucial dans le domaine des dispositifs de commutation. Comprendre et modéliser cette phase est primordial car elle impacte directement la performance et la fiabilité des équipements de commutation. En simulant le comportement de l'arc électrique lors de l'ouverture des contacts, nous pouvons analyser les phénomènes complexes qui se produisent et ainsi optimiser la conception de ces dispositifs pour augmenter les performances et la sécurité. Les résultats de cette simulation apporteront des informations précieuses pour améliorer la qualité et l'efficacité des connexions électriques (les contacts) dans diverses applications industrielles.

La méthode magnétohydrodynamique est une approche puissante pour modéliser les plasmas à l'équilibre. Dans le contexte de la modélisation des plasmas, ce dernier est considéré comme étant en équilibre thermodynamique local (ETL) lorsque certaines hypothèses fondamentales sont remplies, comme décrit dans [5, 16]:

- **Équilibre thermique** : Cela signifie que la température des électrons  $T_e$  est égale (ou très similaire) à la température des particules lourdes  $T_a$ . En d'autres termes, les électrons et les particules lourdes (ions, atomes) atteignent un état de température similaire.
- **Équilibre d'ionisation** : Ce critère implique que la densité électronique  $n_e$  est égale ou très proche de la densité d'électrons qui existerait dans le plasma, déterminée par les équations de Saha. Ces équations décrivent le degré d'ionisation du plasma en fonction de la température, de la densité et de l'énergie d'ionisation des atomes  $n_{esaha}$  [6].
- **Quasi-neutralité** : Le plasma est électriquement neutre à la fois globalement et localement. Cela signifie que la densité totale de particules pour l'ensemble du plasma  $n$  est équilibrée électriquement, assurant ainsi une quasi-neutralité du plasma, comme c'est défini dans l'équation (III- 1).

En respectant ces hypothèses, la méthode MHD peut être appliquée pour modéliser et comprendre divers phénomènes complexes dans les plasmas, offrant ainsi des bases solides pour l'étude et l'analyse des comportements plasmatiques dans différentes applications scientifiques et technologiques.

$$n = n_a + n_e \quad (\text{III} - 1)$$

La densité du plasma,  $\rho$ , est définie par (3-2).

$$\rho = \rho_a + \rho_e \quad (\text{III} - 2)$$

La vitesse du fluide,  $u$ , est donnée par l'équation (3-3).

$$u = \frac{u_a \rho_a + u_e \rho_e}{\rho_a + \rho_e} \quad (\text{III} - 3)$$

Et la densité de courant du plasma est donnée par (III- 4).

$$j = j_e + j_i + j_{ext} \quad (\text{III} - 4)$$

En considérant les notations conventionnelles où "a" désigne les particules lourdes, "e" représente les électrons, "i" fait référence aux ions et "ext" désigne les sources externes au plasma, les équations de transport pour la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie du plasma en tant que fluide unique sont établies. Ces équations, connues sous le nom d'équations de Navier-Stokes (III- 5), (III- 6) et (III- 7), décrivent les relations entre la vitesse, la pression, la température et la densité d'un fluide en mouvement. Ces aspects seront élaborés en détail ci-dessous:

- **Conservation de la masse :**

Dans un contexte donné, la conservation de la masse est essentielle. Elle signifie que la quantité de masse reste constante dans certains domaines car la masse ne peut ni être créée ni détruite. Cela veut dire que pour une densité de fluides donnés, le volume et la forme peuvent évoluer dans le temps. De plus, la masse peut se déplacer à travers le domaine, mais il ne peut y avoir ni accumulation ni destruction de masse. En d'autres termes, la quantité de masse qui entre dans un domaine est équivalente à celle qui en sort, assurant la conservation de la masse.

Dans l'équation (III- 5), le premier terme représente la variation de la densité en un point de l'espace (un point de calcul dans le cadre des simulations), tandis que le second terme exprime la variation de cette même propriété, c'est-à-dire la densité, en relation avec le changement de position, ce qui équivaut aux flux d'entrée et de sortie du volume de contrôle.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (\text{III} - 5)$$

- **Conservation de la quantité de mouvement :**

La conservation de la quantité de mouvement est un principe fondamental selon lequel la quantité de mouvement reste constante dans un champ donné. Cette quantité est définie comme le produit de la masse d'un objet par sa vitesse. La conservation de la quantité de mouvement signifie que la quantité de mouvement n'est ni créée ni détruite, mais peut seulement être modifiée par l'action des forces, comme l'indiquent les lois du mouvement de Newton ( $F = m \times a$ ), où " $F$ " est la force appliquée, " $m$ " est la masse de l'objet et " $a$ " est son accélération.

La conservation de la quantité de mouvement est plus complexe que celle de la masse et de l'énergie. En fait, la quantité de mouvement est une grandeur vectorielle, possédant à la fois une magnitude et une direction. Elle est conservée dans les trois dimensions physiques simultanément. Cette complexité est amplifiée dans le cas d'un gaz, où les forces agissant dans une direction peuvent influencer le mouvement dans une autre direction en raison des collisions entre les molécules. Ainsi, les interactions au sein du gaz peuvent entraîner des variations complexes de la quantité de mouvement dans différentes directions, ce qui nécessite une analyse approfondie pour en rendre compte de manière adéquate.

Equation de *Navier-Stokes* modifiée:

Le premier terme ( $\rho \frac{\partial v}{\partial t}$ ) de l'équation de Navier-Stokes modifiée (III- 6) représente la variation locale de la quantité de mouvement au point de calcul du volume de contrôle. Il indique comment la quantité de mouvement change en fonction de la position dans l'espace.

Le deuxième terme ( $\rho(v \cdot \nabla)v$ ) exprime la différence de quantité de mouvement relative à l'entrée et à la sortie du volume de contrôle. Cela tient compte des flux de quantité de mouvement qui traversent les frontières du volume contrôlé.

Le troisième terme ( $-\nabla p$ ) représente la force d'accélération induite par la distribution de pression à l'intérieur du fluide. Il tient compte des variations de pression qui influent sur le mouvement du fluide.

Le quatrième terme  $(\frac{4}{3}\nabla\mu(\nabla.v) - \nabla \times \mu(\nabla.v))$  représente les forces surfaciques agissant sur le volume de contrôle. Il se compose de deux termes : le premier est particulièrement important pour les écoulements de fluides compressibles, tandis que le second est significatif lorsque de forts gradients de vitesse sont présents.

Le cinquième terme ( $F$ ) représente la force de Lorentz qui établit la relation entre le champ électrique et magnétique et les lois de la dynamique des fluides. Il est crucial dans les phénomènes où l'électricité et le magnétisme jouent un rôle essentiel.

Enfin, le sixième terme ( $\rho.g$ ) représente la force de gravité. Cependant, dans le contexte des arcs, ce terme est souvent négligé car il n'est significatif que pour les écoulements superposés, tels que les arcs brûlants libres.

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho(v.\nabla)v = -\nabla p + \frac{4}{3}\nabla\mu(\nabla.v) - \nabla \times \mu(\nabla.v) + F + \rho.g \quad (\text{III- 6})$$

- **Conservation d'énergie :**

La troisième équation de Navier-Stokes (III- 7) est fondamentale pour comprendre la conservation de l'énergie dans un système. Dans des domaines problématiques spécifiques, la quantité totale d'énergie reste constante ce qui signifie que l'énergie n'est ni créée ni détruite. Bien que l'énergie puisse subir des conversions d'une forme à une autre (par exemple, de l'énergie potentielle à l'énergie cinétique), l'énergie totale dans le domaine reste inchangée (constante).

Dans cette équation, le premier  $(\rho \frac{\partial H}{\partial t})$  décrit le taux de changement local de l'énergie dans le volume de contrôle. Il indique comment l'énergie évolue en fonction de la position dans l'espace.

Le deuxième terme  $(\rho(v.\nabla)H)$  représente la différence d'enthalpie du fluide entrant et sortant du volume de contrôle. Il tient compte des variations d'enthalpie, une mesure de l'énergie thermique du système, lorsqu'elle traverse les limites du volume contrôlé.

Le troisième terme  $(\frac{\partial p}{\partial t} - (v \cdot \nabla_p))$  capture le travail réalisé par le changement de pression et le gradient de pression. Ce terme est généralement faible par rapport à l'échange d'enthalpie.

Du côté droit de l'équation, le quatrième terme  $(\nabla \cdot \frac{\lambda}{c_p} \nabla H)$  indique la perte de chaleur par conduction, un processus où la chaleur se dissipe à travers le matériau.

Le cinquième terme  $(\nabla \cdot q_R)$  représente la perte de chaleur par rayonnement, qui se produit lorsque la chaleur est émise sous forme de rayonnement électromagnétique.

Le sixième terme  $(\Phi)$ , la dissipation visqueuse, quantifie la perte d'énergie due à la viscosité du fluide. Elle intervient lorsque le fluide présente des frottements internes qui dissipent de l'énergie sous forme de chaleur.

Enfin, le septième  $(J \cdot E)$  terme représente la dissipation de l'énergie électrique dans le volume de contrôle due au chauffage ohmique. Ce terme supplémentaire lie une fois de plus la dynamique du fluide au champ électrique, montrant ainsi que l'énergie électrique peut également influencer le comportement énergétique global du système.

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} + \rho (v \cdot \nabla) H - \frac{\partial p}{\partial t} - (v \cdot \nabla_p) = \nabla \cdot \frac{\lambda}{c_p} \nabla H - \nabla \cdot q_R + \Phi + J \cdot E \quad (\text{III- 7})$$

$\Phi$  est le facteur de dissipation visqueuse (généralement négligé), il est exprimé par (III- 8)

$$\Phi = \sum \left[ \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (\text{III - 8})$$

Où

$\rho$  : densité du gaz

$v$  : vitesse du gaz

$t$  : temps

$p$  : pression

$\mu$  : viscosité

$g$  : gravité

$H$  : enthalpie

K : conductivité thermique  
 C<sub>p</sub> : chaleur spécifique  
 T : température  
 E : champ électrique  
 J : densité de courant  
 B : densité de champ magnétique  
 A : vecteur potentiel magnétique

Le terme source de l'équation de la quantité de mouvement du fluide est la force de Lorentz donnée par :

$$F = J \wedge B \quad (\text{III} - 9)$$

Où le champ magnétique est :

$$B = \nabla \wedge A$$

Le terme source S<sub>h</sub> est le taux de chauffage par effet Joule, il est donné par :

$$S_h = Q = \frac{J^2}{\sigma} = J \cdot E \quad (\text{III} - 10)$$

Il est important de souligner que lors de l'application des équations de *Navier-Stokes* au plasma, en particulier dans l'équation de quantité de mouvement (III- 6) et l'équation d'énergie (III- 7), il est nécessaire de définir les termes électromagnétiques afin de représenter le chauffage ohmique et l'interaction de la force de Lorentz avec la dynamique des fluides. Ainsi, il est donc impératif de prendre en compte les lois de *Maxwell* en même temps que les équations de *Navier-Stokes*.

Les champs électromagnétiques sont décrits par les équations de Maxwell comme suit :

Champ magnétique Loi de Gauss

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (\text{III} - 11)$$

Loi de Faraday

$$\nabla \wedge E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{III} - 12)$$

Loi de Gauss

$$\nabla \cdot D = q \quad (\text{III} - 13)$$

Loi d'Ampère

$$\nabla \wedge H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (\text{III} - 14)$$

Où :

$J$  : densité du courant

$B$  : densité du flux magnétique

$E$  : champ électrique

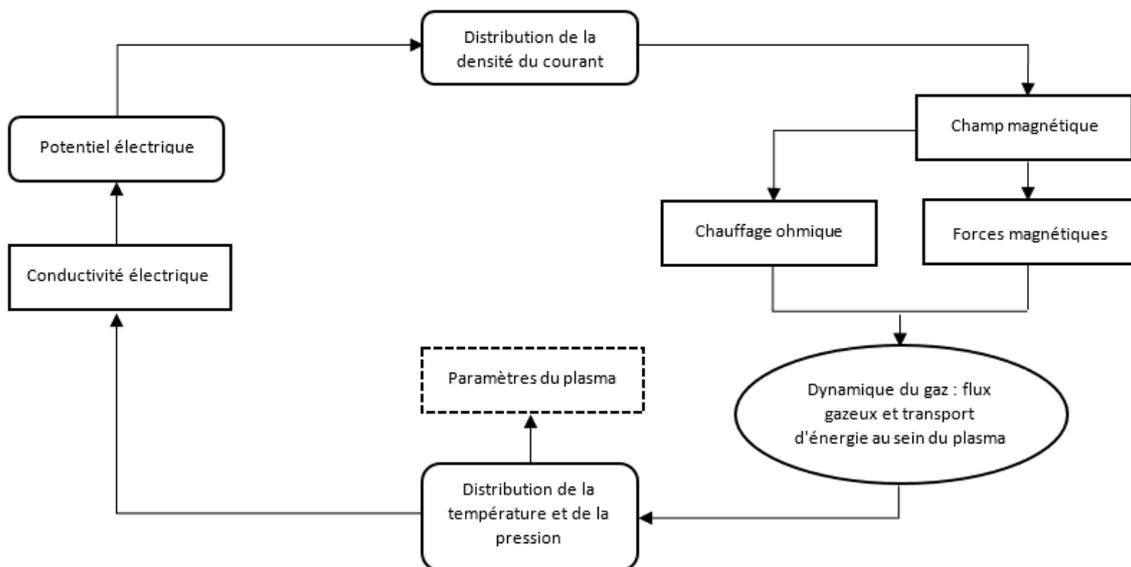
$D$  : densité du champ électrique

$H$  : champ d'induction magnétique

$q$  : densité de la charge électrique

Lorsqu'on applique les équations de Navier-Stokes du plasma dans l'équation de quantité de mouvement et l'équation d'énergie en particulier, le chauffage ohmique et l'interaction de la force de Lorentz avec la dynamique des fluides doivent être spécifiés (termes électromagnétiques).

La **figure III- 1** illustre les processus physiques, la dynamique des fluides et l'interaction électromagnétique qui se produisent dans l'arc électrique.



**Figure III- 1:** Interaction des processus physiques dans la colonne d'arc [1, 7].

Le processus peut être décrit comme suit : un potentiel électrique est établi entre les bornes du contact créant ainsi un gradient de tension favorise le déplacement du

courant à travers l'arc électrique. Ce courant qui traverse l'arc génère un champ magnétique et induit donc une force magnétique dans la région environnante. en même temps, le courant a pour effet d'augmenter la température du milieu par effet Joule ce qui entraîne un échauffement. Dans l'analyse de ce processus, il est nécessaire de prendre en compte ces deux composantes majeures : l'effet joule et la force magnétique. L'effet joule contribue à l'évolution de la température et est calculé en tenant compte des propriétés électriques et thermiques du matériau. De même, la force magnétique induite par le courant est un paramètre crucial dans la dynamique du système, affectant le comportement de l'arc électrique. Ces aspects sont intégrés dans les équations modifiées de Navier-Stokes, qui sont à leur tour résolues à l'aide d'un logiciel de Dynamique des Fluides Computationnelle CFD. Cette approche permet une analyse approfondie du processus prenant en compte les interactions complexes entre le courant électrique, le champ magnétique généré et les effets thermiques induits, ce qui est crucial pour une compréhension complète et précise du phénomène.

Lors de l'exécution de simulations avec Fluent- ANSYS, de nouvelles données de température et de pression seront générées. Ces données engendreront des ajustements des propriétés et des caractéristiques du plasma, notamment la conductivité thermique, la viscosité, la densité et la chaleur spécifique.

### **III.4 METHODOLOGIE DE SIMULATION**

Le logiciel ANSYS Workbench est un ensemble complet d'outils de simulation qui offre une multitude de possibilités pour l'analyse et la modélisation. Il permet aux ingénieurs et aux chercheurs d'effectuer divers types d'analyses, notamment des analyses structurelles, thermiques, fluides et électromagnétiques. Dans le domaine des analyses structurales, les utilisateurs peuvent évaluer le comportement des composants sous diverses contraintes, charges et conditions environnementales. Les analyses thermiques permettent de comprendre le comportement thermique des systèmes, en évaluant les transferts de chaleur et les distributions de température. Les analyses fluides sont essentielles pour étudier le mouvement des fluides, la pression, la vitesse et d'autres propriétés fluidiques. Les

analyses électromagnétiques se concentrent sur les champs électriques et magnétiques, ainsi que sur leurs interactions avec les structures et les matériaux.

De plus, ANSYS Workbench permet le couplage de différents domaines physiques, offrant ainsi la possibilité d'effectuer des analyses couplées. Par exemple, il est possible de déterminer l'expansion volumétrique d'un composant en fonction des variations de température en couplant ANSYS Fluent (pour les analyses fluides) et ANSYS Mechanical (pour les analyses structurelles).

Dans le cadre de ce travail, le module MHD (Magnétohydrodynamique) de Fluent est spécifiquement utilisé. La magnétohydrodynamique traite de l'interaction entre les champs électromagnétiques et les fluides conducteurs, ce qui est crucial dans de nombreux domaines tels que l'automobile, l'aérospatiale, la fusion nucléaire et les applications énergétiques avancées. La méthodologie pour initialiser le logiciel, spécifiquement en utilisant le module MHD de Fluent, est décrite en détail dans X.Li [8], fournissant ainsi des instructions complètes pour la mise en place et l'exécution des simulations. Cette référence constitue une source essentielle pour les utilisateurs cherchant à utiliser de manière efficace et précise le module MHD de Fluent dans le cadre de leur travail.

#### III.4.1 Démarrez ANSYS Workbench

Lorsque l'utilisateur sélectionne l'option "Fluid Flow (Fluent)" dans ANSYS Workbench et l'exécute, le programme se charge dans l'interface utilisateur graphique (GUI) offrant un environnement de simulation interactif. Cette interface utilisateur graphique offre un moyen convivial et visuel pour interagir avec le logiciel et permet aussi aux utilisateurs d'effectuer des simulations complexes tout en bénéficiant d'une expérience utilisateur intuitive.

Une fois que l'outil Fluid Flow est chargé dans l'interface graphique, il est facile de créer un système d'analyse. Cette création est initiée par l'affichage du système d'analyse à l'écran représenté dans la **figure III- 2**. Le système d'analyse comprend les paramètres, les conditions initiales, les matériaux, les géométries et autres éléments essentiels pour définir et mener à bien la simulation d'écoulement de fluide.

Dans le système d'analyse, l'utilisateur peut spécifier les conditions aux limites, les propriétés des matériaux, les modèles de turbulence, les paramètres thermiques, et autres paramètres fondamentales. Ces informations sont utiles pour obtenir des résultats précis et significatifs tout au long du processus de simulation.

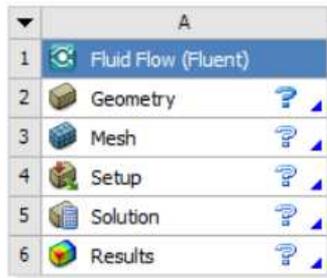


Figure III- 2 : Boîte à outils de Fluent

### III.4.2 Créer une géométrie

L'outil ANSYS Design-Modeler est un composant polyvalent qui peut être utilisé comme éditeur de géométrie pour des modèles CAO existants. Il offre aux utilisateurs une interface graphique intuitive et complète, permettant diverses actions essentielles liées à la géométrie pour la préparation d'analyses. Grâce à cet outil, les utilisateurs ont la possibilité de naviguer dans l'interface graphique de manière fluide et transparente. Ils peuvent créer, modifier et nettoyer la géométrie en vue de préparer leurs analyses. Une fonctionnalité importante est la possibilité de créer des esquisses 2D qui peuvent ensuite être converties en modèles 2D ou 3D, offrant une grande flexibilité dans le processus de création de modèles.

Le mode "Design-Modeler Esquisse 2D" permet de créer des esquisses 2D, un point de départ essentiel pour concevoir des modèles complexes. Les utilisateurs peuvent dessiner des formes, des lignes, des cercles, des rectangles et d'autres éléments de base pour construire la géométrie de leur modèle. Ces esquisses peuvent ensuite être extrudées, révolues ou utilisées comme guides pour d'autres processus de modélisation. Le mode "Design-Modeler Modélisation 3D" est utilisé pour créer et modifier la géométrie en trois dimensions. Les utilisateurs peuvent manipuler des entités 3D, ajouter des fonctionnalités, soustraire des matériaux et appliquer diverses

opérations de transformation pour obtenir la forme et la structure finales de leur modèle.

Dans l'ensemble, ANSYS Design-Modeler offre une gamme complète de fonctionnalités, permettant aux ingénieurs et aux concepteurs de préparer avec précision et efficacité leurs modèles pour une éventuelle analyse contribuant à des simulations plus précises et informatives.

### **III.4.3 Créer un maillage de calcul**

ANSYS ICEM CFD est un outil de maillage central dans l'environnement ANSYS Workbench. Il offre la possibilité de créer des maillages de manière paramétrique à partir de la géométrie d'un modèle, simplifiant ainsi le processus de génération de maillage. La particularité d'ANSYS ICEM CFD réside dans sa capacité à automatiser la création de maillages en fonction de paramètres définis par l'utilisateur. Ces paramètres peuvent inclure des critères de résolution, la densité du maillage et d'autres paramètres pertinents, offrant un contrôle flexible sur la qualité et la complexité du maillage généré.

L'un des avantages majeurs d'ANSYS ICEM CFD est sa capacité à préparer la géométrie avant le maillage. Il propose des outils avancés pour nettoyer, réparer et simplifier la géométrie importée, garantissant ainsi que le maillage généré soit basé sur une géométrie de haute qualité. Ces fonctionnalités facilitent le processus de maillage et contribuent à des simulations CFD précises et fiables.

### **III.4.4 Écrire des fonctions définies par l'utilisateur**

Les fonctions définies par l'utilisateur (UDF) qui sont des fonctions définies par l'utilisateur, sont des éléments clés dans l'adaptation et la personnalisation d'ANSYS Fluent. Elles permettent aux utilisateurs d'améliorer les capacités du code standard en y ajoutant des fonctionnalités spécifiques et personnalisées. Les UDF enrichissent le logiciel en modifiant et en améliorant divers aspects. Les utilisateurs peuvent ainsi définir des conditions aux limites personnalisées, ajuster les propriétés des matériaux selon leurs besoins, incorporer des termes sources pour influencer le

comportement de l'écoulement, configurer la solution selon des critères particuliers, ou encore améliorer le post-traitement des résultats.

Les UDF écrits en langage de programmation C nécessitent une extension de fichier ".C" pour le code source. Cette structure permet aux utilisateurs de personnaliser ANSYS Fluent en fonction des exigences spécifiques de leurs projets, démontrant ainsi la souplesse et la puissance de cette plateforme de simulation.

#### **III.4.5 Configurer la simulation de champ multi-physique dans ANSYS Fluent.**

ANSYS Fluid Flow Systems permet aux utilisateurs la possibilité de configurer et de résoudre des problèmes complexes de champ tridimensionnel et multi-physique. Le logiciel propose des capacités de modélisation physique étendues, indispensables pour représenter de manière précise des phénomènes tels que l'écoulement, la turbulence, le transfert de chaleur et les réactions chimiques dans un large éventail d'applications industrielles.

Les domaines d'application d'ANSYS Fluent sont diversifiés, couvrant des scénarios allant de l'écoulement de l'air sur une aile d'avion à la combustion dans un four, des colonnes à bulles aux plates-formes pétrolières, du flux sanguin à la fabrication de semi-conducteurs, et de la conception de salles blanches aux installations de traitement des eaux usées. Grâce à cette diversité, les ingénieurs et les chercheurs sont en mesure de modéliser avec précision des phénomènes complexes dans divers secteurs industriels.

#### **III.4.6 Configurer le module MHD**

Le module magnétohydrodynamique MHD est une extension disponible avec la licence standard du logiciel FLUENT. Il propose une gamme de fonctionnalités supplémentaires permettant de modéliser les phénomènes magnétohydrodynamiques dans les simulations. Ce module comprend une bibliothèque de fonction définie par l'utilisateur (UDF) ainsi qu'une bibliothèque de schémas précompilés. Ces composants doivent être chargés et activés avant de pouvoir procéder aux calculs.

Pour utiliser le module MHD, l'utilisateur doit charger cette extension dans FLUENT via l'interface utilisateur texte (TUI). Pour ce faire, il doit disposer d'un

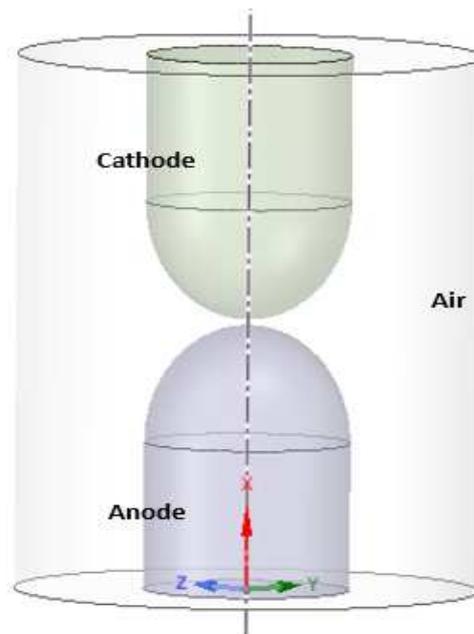
fichier d'état FLUENT préalablement défini ou importé. Une fois le module MHD chargé et activé, il devient possible d'intégrer les effets magnétohydrodynamiques dans les simulations et d'explorer les interactions entre les champs magnétiques et les écoulements de fluides.

### III.5 SIMULATION NUMERIQUE

#### III.5.1 Modèle géométrique

Le modèle géométrique utilisé pour cette simulation est présenté dans la **figure III- 3**. Cette géométrie a été conçue comme une représentation simplifiée tout en conservant les éléments essentiels du mécanisme, à savoir l'anode, la cathode et le domaine [1].

Les deux contacts métalliques, séparés par une zone d'air, constituent un aspect important du modèle. Ils ont été spécifiés avec un diamètre de 5 mm avec une distance inter-électrode de 0.1 mm [9, 10]. La simplification géométrique permet de se concentrer sur les aspects fondamentaux du phénomène étudié, en réduisant sa complexité tout en conservant une représentation adéquate des principaux composants. Par conséquent, cette modélisation géométrique équilibrée facilite la résolution numérique et l'interprétation des résultats dans le contexte de la simulation.



**Figure III- 3** : Le modèle 3D de la géométrie

### III.5.2 Maillage

Les équations partielles qui décrivent le comportement des fluides et les transferts de chaleur sont souvent complexes et ne peuvent généralement pas être résolues de manière analytique, sauf dans des cas très simples. Pour analyser ces phénomènes, les domaines sont subdivisés en sous-domaines plus petits, constitués de primitives géométriques telles que des hexaèdres et des tétraèdres en 3D, et des quadrilatères et des triangles en 2D. Ces équations fondamentales sont ensuite discrétisées, c'est-à-dire qu'elles sont transformées en formes discrètes adaptées à l'analyse numérique. Cette discrétisation permet de les résoudre dans chaque sous-domaine individuellement. Généralement, des méthodes telles que la méthode des volumes finis, la méthode des éléments finis ou la méthode des différences finies sont utilisées pour résoudre ces versions discrètes du système d'équations.

Il est nécessaire d'assurer la continuité de la solution aux interfaces partagées entre deux sous-domaines. Cela permet de combiner de manière cohérente les solutions approximatives dans les différents sous-domaines afin d'obtenir une solution globale qui représente l'écoulement du fluide dans l'ensemble du domaine.

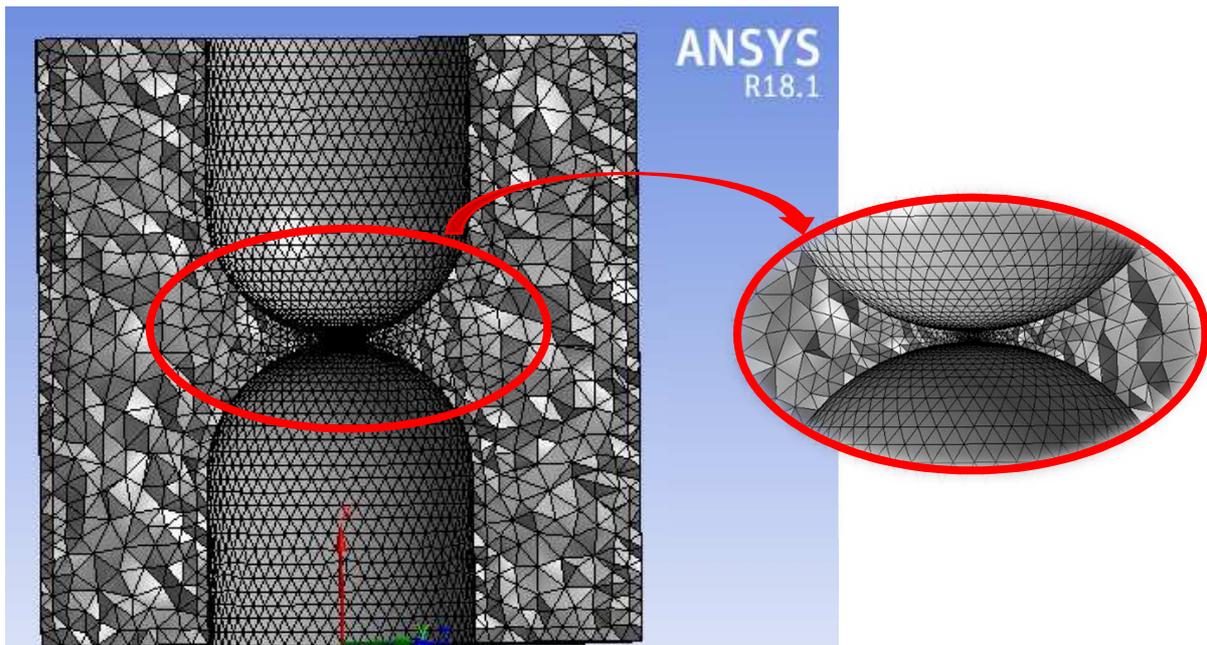
Les sous-domaines sont souvent appelés éléments ou cellules, et l'ensemble de ces éléments ou cellules est généralement désigné sous le terme de maillage ou grille [11]. Le maillage est donc la structure discrète qui permet d'approximer et de résoudre numériquement les équations des fluides et de la chaleur, facilitant ainsi l'analyse et la compréhension des phénomènes physiques étudiés.

Le choix du maillage pour le modèle est d'une grande importance, car la précision, la flexibilité et la convivialité sont des aspects cruciaux pour déterminer le maillage le plus approprié. Le maillage spécifiquement conçu pour ce modèle a été élaboré à l'aide du logiciel commercial ICEM CFD faisant partie de la suite ANSYS.

Les caractéristiques définissant le maillage généré sont illustrées en détail dans la **figure III- 4**. Dans ce modèle, en raison des difficultés rencontrées lors de la génération d'un maillage 3D dynamique, nous avons adopté un maillage statique triangulaire structuré. Une densité de maillage plus fine a été appliquée aux

interfaces et aux bords, particulièrement là où une variation significative des paramètres pourrait rendre le système instable et provoquer des divergences.

Les principales caractéristiques du maillage utilisé sont résumées dans le paragraphe ci-dessous, ou peuvent être visualisées dans la **figure III- 4**. Ces caractéristiques permettent d'obtenir une représentation optimale du modèle, prenant en compte les aspects de stabilité et de précision nécessaires pour mener à bien la simulation.



**Figure III- 4 :** Vue 3D de l'ensemble du maillage complet/ détaillé

Au total, le maillage se compose de 204221 éléments afin d'assurer une représentation précise des zones de contact. Ce nombre d'éléments a été choisi en tenant compte d'un équilibre entre la précision de la représentation et la charge de calcul pour garantir des résultats de simulation fiables et efficaces.

### III.5.3 Propriétés du plasma notamment UDF

Les fonctions définies par nous-même (User-Defined Functions UDF) sont des fonctions qui peuvent être programmées et chargées dynamiquement dans le solveur FLUENT afin d'améliorer les fonctionnalités standard du code. Ces UDF sont écrites dans le langage de programmation C.

Dans FLUENT, les UDF programmés peuvent être exécutés sous forme de fonctions interprétées ou compilées. Il est nécessaire de noter que les valeurs transmises par un UDF au solveur ou renvoyées par le solveur à un UDF doivent être spécifiées en unités SI [12].

Les UDF permettent une personnalisation étendue des simulations. Ils permettent de modifier les conditions aux limites, les propriétés des matériaux, les taux de réaction en surface et en volume, les termes sources des équations de transport dans FLUENT, ainsi que les termes sources des équations de transport scalaires définies par l'utilisateur (UDS) et les fonctions de diffusion. Pour définir les UDF, nous avons déclaré des fonctions fournies par Fluent. Ces déclarations sont implémentées par la suite dans le code sous forme de macros, désignées dans ce document comme des macros DEFINE.

La définition des domaines est essentielle dans le cadre de l'analyse numérique car elle nécessite la définition de paramètres nécessaires tels que la surface du fluide, ainsi que des éléments clés de la simulation tels que les électrodes à savoir la cathode et l'anode.

Dans le modèle utilisé, les domaines sont définis comme suit :

- Volume d'air
- Cathode et anode

Le matériau choisi pour les domaines solides (cathode, anode) est le cuivre, caractérisé par des propriétés physiques constantes indépendantes de la température et de la pression.

Le comportement des interfaces qui représentent les surfaces communes entre les différents domaines tels que l'air et les parties solides a également été déterminé.

En ce qui concerne le volume du fluide, le matériau a été déterminé à l'aide d'une fonction spécifique que nous avons développé. Les propriétés de l'air ont été tirées de la référence [13], détaillée dans la **figure III- 5** à la **figure III- 9**. Ces propriétés

sont importantes pour garantir une représentation précise et réaliste du comportement du fluide dans la simulation.

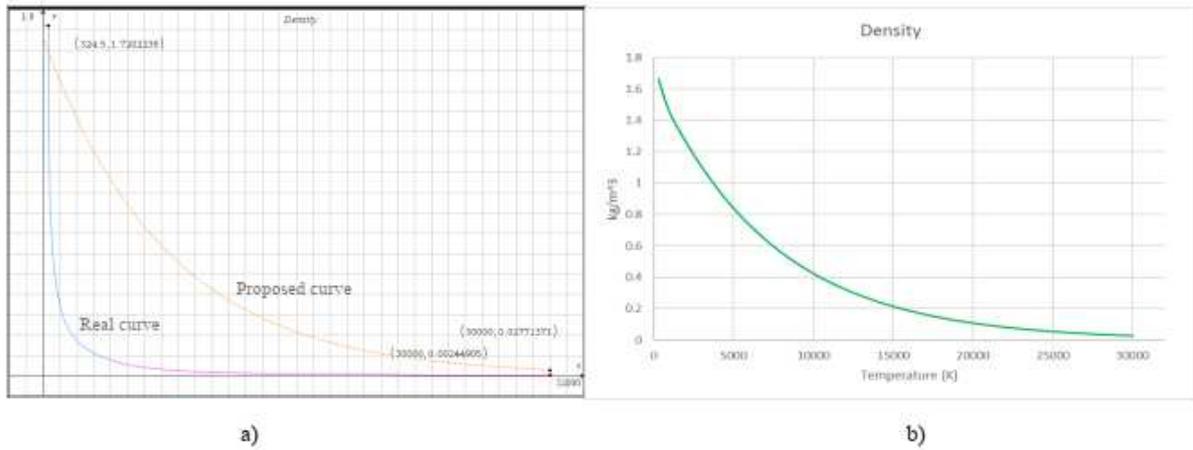


Figure III- 5 :Densité de l'aire à haute température [13]

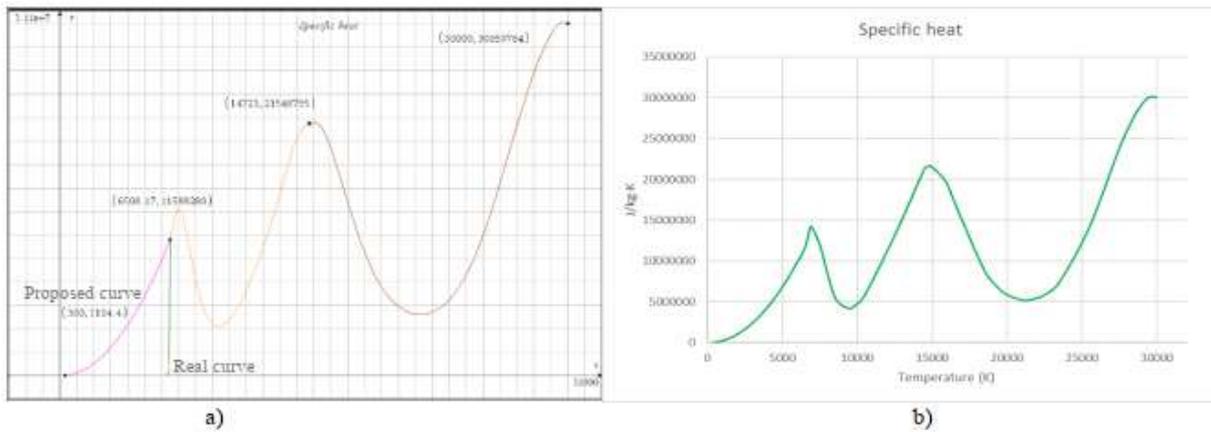


Figure III- 6 : Chaleur spécifique de l'air à haute température [13]

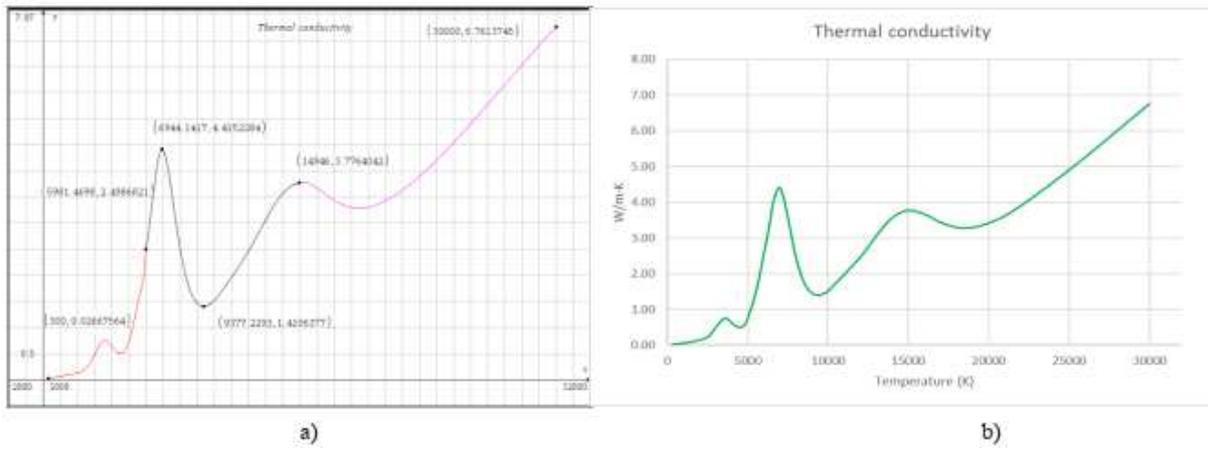


Figure III- 7 : Conductivité thermique de l'air à haute température [13]

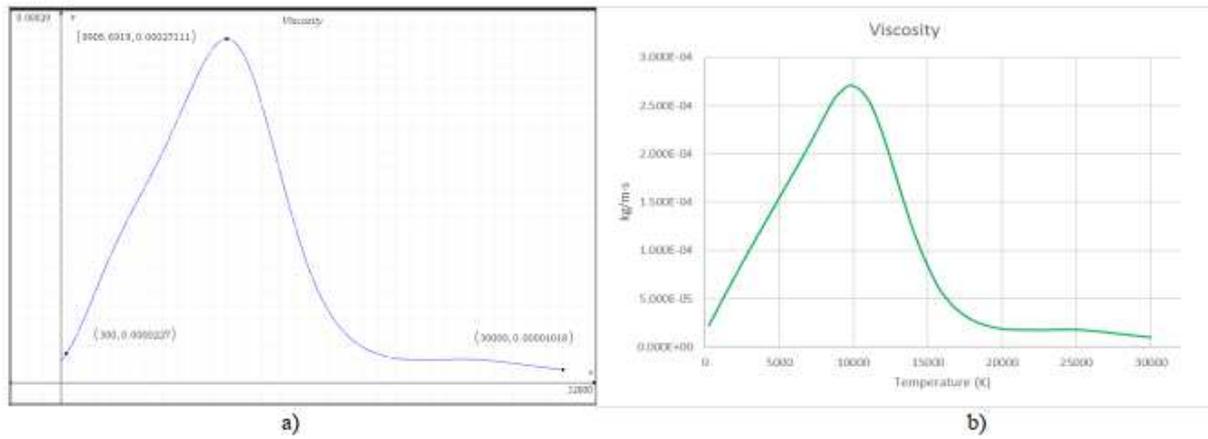


Figure III- 8 : Viscosité de l'air à haute température [13]

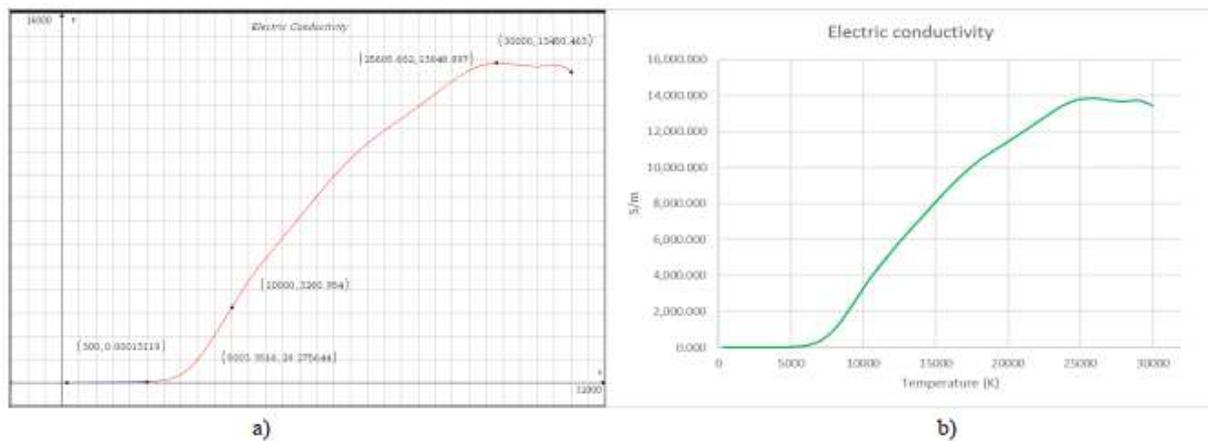


Figure III- 9 : Conductivité électrique de l'air à haute température [13]

Il est important de noter que les propriétés physiques de l'air varient considérablement en fonction de la température. En particulier, entre les deux points de connexion (contacts) que la variation s'étend considérablement, allant d'une température ambiante d'environ 300 K à une température d'environ 25000 K lorsque l'état de plasma est atteint. Cette amplitude de variation souligne l'importance majeure de prendre en compte la variation des propriétés de l'air en fonction de la température dans le modèle. En effet, la précision du modèle est directement liée à la définition précise de ces valeurs, particulièrement dans les zones où les températures varient fortement. L'intégration précise de ces données de température dans le modèle permet d'obtenir des résultats plus fiables et une représentation plus réaliste du comportement du fluide, en particulier dans des conditions extrêmes telles que le plasma.

#### **III.5.4 Paramètres de simulation et conditions aux limites**

Pour élaborer une définition du problème qui conduise à une solution unique et correcte, il est impératif de spécifier précisément les variables dépendantes, également appelées flux, au sein des limites d'un domaine donné [14]. Cette spécification doit inclure les flux de masse, la quantité de mouvement, l'énergie et d'autres paramètres pertinents à l'intérieur du domaine.

En ce qui concerne la définition des conditions aux limites, plusieurs éléments doivent être pris en compte :

- Identifier les conditions aux limites : Il est nécessaire de déterminer où sont situées et appliquées les conditions aux limites, telles que les entrées, les murs ou autres parois, en fournissant des informations détaillées à leur sujet.
- Nature des données requises pour chaque limite : Les données nécessaires pour définir une limite dépendent du type de condition aux limites et des modèles physiques employés dans le contexte. Ces données varient en fonction de la nature de la condition aux limites en question.
- Connaissance des informations relatives aux conditions limites: en tant que utilisateur, il est essentiel d'avoir une connaissance approfondie des informations requises pour les conditions aux limites. Nous devons également être en mesure

de localiser avec précision les parois pour lesquelles ces informations sont connues ou peuvent être raisonnablement.

- Impact des conditions aux limites mal définies : des conditions aux limites mal définies peuvent avoir un impact significatif sur la solution. Il est donc essentiel de définir ces conditions avec précision pour obtenir des résultats fiables et précis.

Les domaines spécifiques du modèle, comme mentionné précédemment, comprennent le volume de fluide ou d'air, la cathode et l'anode. Le matériau utilisé dans les domaines solides (cathode, anode) est le cuivre, caractérisé par des propriétés physiques constantes indépendantes de la température et de la pression. Dans le volume de fluide, le matériau est défini à l'aide de fonctions définies par nous-même (UDF) et les propriétés du plasma sont appliquées comme le montrent les **figures III- 5 à III- 9**.

Il est également nécessaire de définir le comportement des interfaces et les limites extérieures du modèle une fois que les domaines sont spécifiés. Les interfaces représentent les surfaces communes entre différents domaines tels que l'air et les parties solides. Les conditions aux limites appliquées à ces surfaces communes sont détaillées dans le **tableau III- 1** et la **figure III- 4**. Une compréhension approfondie et une définition précise de ces aspects sont essentielles pour résoudre avec succès le problème modélisé.

**Tableau III- 1** : Les conditions aux limites appliquées

Conditions	Thermique	Electrique	Mouvement	Vecteur potentiel
Anode	$\frac{\delta T}{\delta n} = 0$	$J_{D5} = 4.07 \text{ E5 Am}^{-2}$ $J_{D8} = 1.59 \text{ E5 Am}^{-2}$	$V = 0$	$A = 0$
Cathode	$\frac{\delta T}{\delta n} = 0$	$\Phi = 0 \text{ V}$	$V = 0.005 \text{ ms}^{-1}$	$A = 0$
Parois de la région d'air	$T = 300 \text{ K}$	$\frac{\delta \phi}{\delta n} = 0$	-	$\frac{\delta A}{\delta n} = 0$

Dans ce type d'écoulement, la nature laminaire du fluide est prise en compte en raison de sa faible vitesse supposée. Une répartition uniforme de densité de courant  $J$  est appliquée à la partie verticale de l'anode ( $J_{D5} = 4.07 \text{ E5 Am}^{-2}$  et  $J_{D8} = 1.59 \text{ E5 Am}^{-2}$ ). Par ailleurs, la paroi verticale de la cathode est soumise à une condition limite impose un potentiel électrique nul.

Les parois latérales des électrodes sont considérées comme des parois isolantes, ce qui signifie qu'elles empêchent le transfert de chaleur ou de particules. Cela est fondamental pour maintenir les propriétés thermiques du système et éviter toute fuite de chaleur à travers ces parois (un échange thermique adiabatique).

En ce qui concerne les parois de contact, un flux de chaleur thermique nul a été fixé. Cette condition garantit qu'aucune chaleur ne quitte le système via ces parois, contribuant à maintenir la température globale du système en l'absence d'échange thermique à travers ces surfaces.

Finalement, à l'extérieur du système, les parois en contact avec l'air sont soumises aux conditions atmosphériques. La température est fixée à 300K, représentant la température ambiante, tandis que la pression est maintenue à 1 ATM (101 325 Pa). Ces conditions externes sont essentielles pour définir l'environnement dans lequel se situe le système jouant un rôle majeur dans l'évolution du modèle.

### III.5.5 Configuration du logiciel

Comme mentionné dans le paragraphe précédent, voici un rappel de certaines des hypothèses utilisées pour réduire la complexité de la simulation. Certaines de ces hypothèses et simplifications sont les suivantes :

- Le plasma est dans un état d'équilibre thermodynamique local (ETL).
- Le processus d'allumage de l'arc et d'ouverture du contact n'est pas inclus dans la simulation. Le calcul commence par une distribution de température stationnaire entre deux électrodes.
- Les vapeurs provenant des électrodes et des matériaux de la paroi ne sont pas prises en compte dans le modèle.
- ....etc.

### III.5.6 Mise en place du module MHD

Comme cité précédemment, le module MHD est appliqué à une géométrie simplifiée. Son intégration dans Fluent repose sur un couplage avec Maxwell, un processus essentiel pour prendre en compte les phénomènes magnétohydrodynamiques dans le modèle.

La première étape pour initier les simulations MHD (Magnétohydrodynamique) consiste à charger le module dédié dans le logiciel Fluent. Ce module MHD est chargé à travers l'interface utilisateur texte (TUI) de Fluent qui permet aux utilisateurs d'interagir avec le programme par le biais de commandes texte.

Il est à noter que le module MHD ne peut être chargé que lorsqu'un fichier Fluent valide est déjà défini ou lu à partir d'une source existante. Le fichier Fluent contient les paramètres et configurations spécifiques nécessaires à l'exécution des simulations MHD.

Cette commande spécifique est utilisée dans l'interface utilisateur texte (TUI) de Fluent pour charger le module MHD, intégrant ainsi les fonctionnalités et les capacités nécessaires pour simuler et analyser les phénomènes magnétohydrodynamiques dans le système en question. L'activation du module MHD est un élément clé pour réaliser avec succès les simulations MHD et obtenir des résultats précis et informatifs.

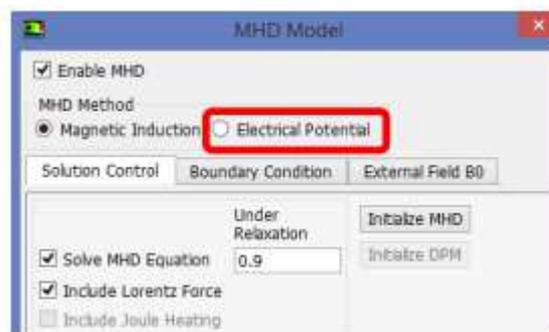
Une liste des modules complémentaires de FLUENT apparaît dans la **figure III- 10** :

```
Done.  
define  
  
/define> models  
  
/define/models> addon-module  
Fluent Addon Modules:  
0. None  
1. MHD Model  
2. Fiber Model  
3. Fuel Cell and Electrolysis Model  
4. SOFC Model with Unresolved Electrolyte  
5. Population Balance Model  
6. Adjoint Solver  
7. Single-Potential Battery Model  
8. Dual-Potential MSMD Battery Model  
9. PEM Fuel Cell Model  
10. Macroscopic Particle Model
```

**Figure III- 10** : Modules d'ANSYS Fluent

- Pour sélectionner le modèle MHD, il suffit d'entrer le numéro de module correspondant. Lors de processus de chargement, une bibliothèque de schémas intégrant l'interface graphique et textuelle, ainsi qu'une bibliothèque de fonction sont chargées dans Fluent. À la fin du processus de téléchargement, un message complémentaire s'affiche pour indiquer que le module additionnel a été chargé avec succès, comme suit : "Module complémentaire chargé : mhd2.1..."
- Une fois le module MHD chargé, certaines configurations doivent être effectuées pour garantir la convergence des calculs et une approximation précise de la réalité au cours du processus de simulation. Ces configurations sont utiles pour ajuster les paramètres du modèle en fonction des spécificités du système étudié, assurant ainsi des résultats précis et significatifs.
- Dans l'interface Fluent, la première étape initiale consiste à accéder à la page des tâches typique des modèles. Dans cette interface, il est essentiel de sélectionner spécifiquement le modèle MHD parmi les options disponibles. Ensuite, pour définir adéquatement la solution du problème, il est impératif de choisir la méthode du potentiel électrique comme explicitement indiqué dans la **figure III-11** du système.

Cette étape de configuration permet de déterminer de manière précise la densité de courant aux limites du modèle. De plus, elle permet également de déterminer les potentiels électriques nécessaires à la résolution du problème. Ces choix et configurations sont essentiels pour garantir une modélisation adéquate et obtenir des résultats compatibles à la réalité dans le cas de la magnétohydrodynamique.



**Figure III- 11** : Configuration du module MHD

Au début de l'analyse, certaines considérations de base doivent être prises en compte pour garantir une modélisation et une simulation adéquates. Voici les grandes démarches à suivre :

- Sélectionner un mode de simulation transitoire : sur la page dédiée aux tâches générales de Fluent, choisir le mode de simulation transitoire. Cette décision détermine la façon dont le système évolue dans le temps, et est souvent cruciale pour les phénomènes qui changent continuellement. Cette étape est illustrée dans la **figure III- 12 (a)**.
- Sélectionner les modèles appropriés : Dans la même page des tâches générales, il est important de choisir les modèles appropriés en fonction du type de simulation et des phénomènes à prendre en considération. Ces modèles influent sur les équations et les calculs de base nécessaires pour la simulation. Cette étape est illustrée dans la **figure III- 12 (b)**.
- Compiler et charger les UDF's de plasma : Les fonctions spécifiques définies par l'utilisateur pour le plasma doivent être compilées et chargées dans la page dédiée aux matériaux de Fluent **figure III- 13** et **III- 14**. Les UDF's sont importants pour représenter avec précision le comportement du plasma dans le modèle.
- Définir les conditions de zone cellulaire : Pour chaque zone du modèle, il est nécessaire de définir avec précision les conditions de zone de cellule. Cela implique d'établir les paramètres et les caractéristiques particulières de chaque zone, ce qui est crucial pour obtenir des résultats précis et représentatifs. Cette étape est illustrée dans la **figure III- 15**.

Ces considérations et étapes sont importants pour établir les bases d'une simulation MHD réussie, en s'assurant que le modèle est correctement configuré et que les conditions initiales et aux limites sont définies de manière appropriée pour représenter le système physique à l'étudié.

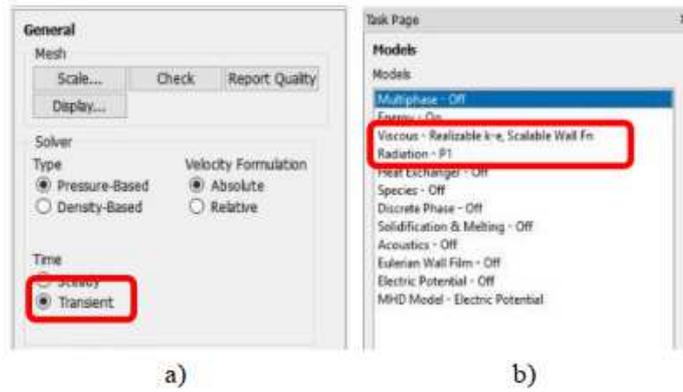


Figure III- 12 : Configuration de la simulation transitoire

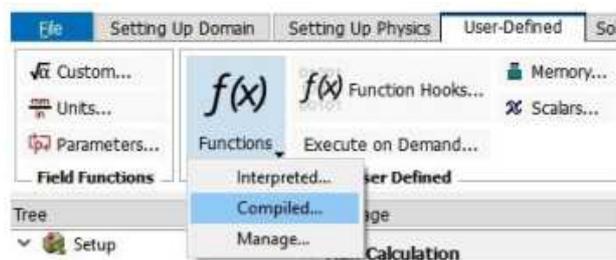


Figure III- 13 : Compilation des propriétés du plasma

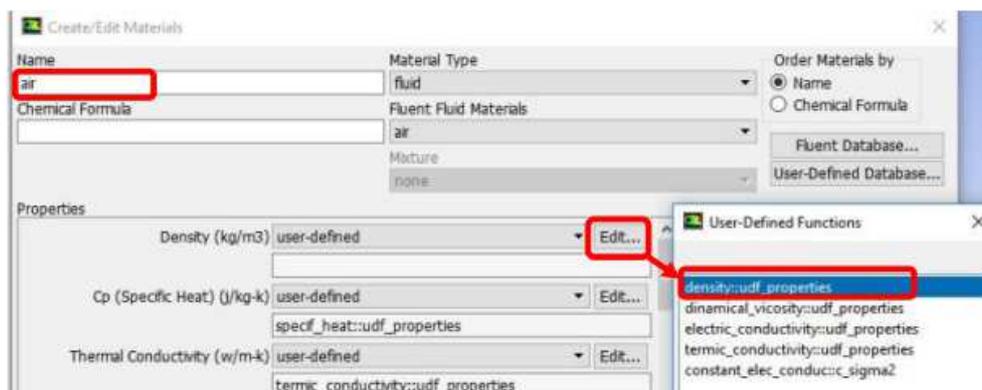
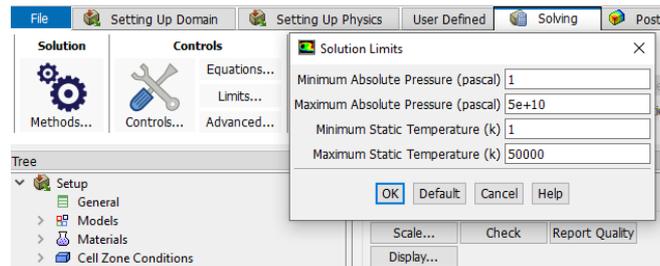


Figure III- 14 : Chargement des propriétés des matériaux

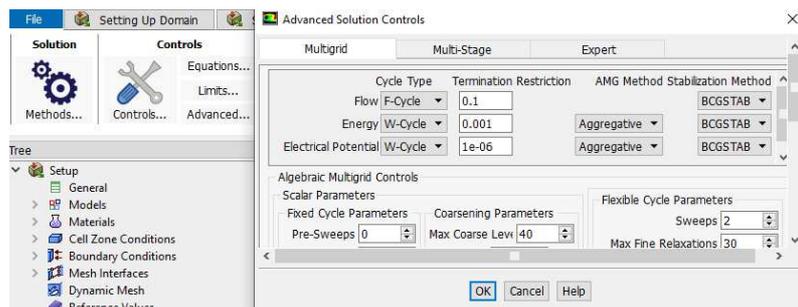


Figure III- 15 : configuration de la zone cellulaire

- Dans le volet Solution, personnalisez les paramètres des limites de la simulation ainsi que les commandes de la solution **figure III- 16** et **figure III- 17**. Ces ajustements doivent être adaptés en fonction des caractéristiques spécifiques du problème, du type de simulation et de la complexité de la géométrie en question. Il est nécessaire aussi de calibrer ces paramètres pour garantir une convergence du calcul efficace et des résultats précis qui reflétant fidèlement le comportement du système étudié.



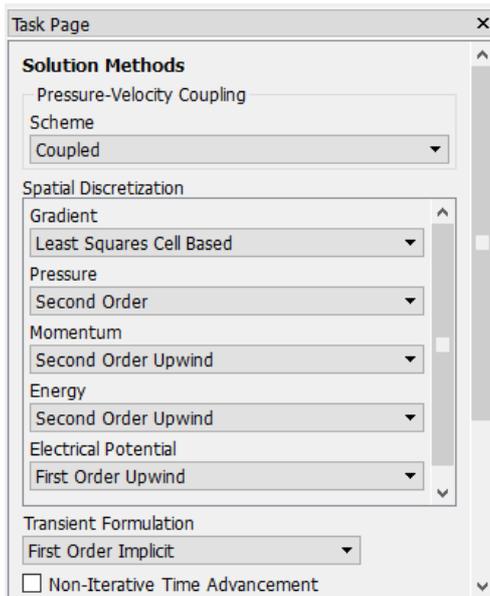
**Figure III- 16** : Configuration les limites de la simulation



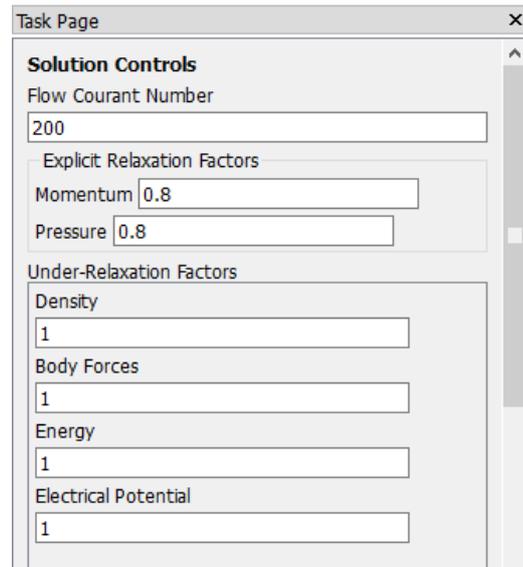
**Figure III- 17** : Configurations avancées pour les contrôles de solution

- Dans la section "Méthodes de solution" située dans la fenêtre des tâches, optez pour le schéma couplé avec une discrétisation spatiale du second ordre pour toutes les équations, à l'exception du terme du potentiel électrique. Maintenez ce dernier au premier ordre, une configuration visible dans la **figure III- 18**.

En outre, effectuez des ajustements sur les facteurs de relaxation, comme démontré dans la **figure III- 19**, pour favoriser une convergence rapide des équations. Ces ajustements sont essentiels pour stabiliser et accélérer le processus de convergence, ce qui est fondamental pour obtenir des résultats précis et fiables dans un temps raisonnable.

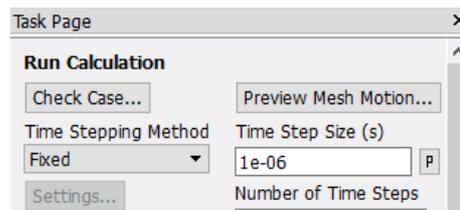


**Figure III- 18** : Solution Methods Set-up  
Fluent



**Figure III- 19** : Solution Controls Set-up  
Fluent

Une fois que toutes les préparations du modèle achevées, il est possible de lancer la simulation en spécifiant un pas de temps à  $1 \times 10^{-6}$  seconde et un maximum de 20 itérations pour chacune des étapes, comme indiqué dans la **figure III- 20**. Cette configuration détermine le rythme de progression de la simulation, en équilibrant la précision des résultats avec l'efficacité du processus de calcul.



**Figure III- 20** : Set-up of Run Calculation.

## III.6 RESULTATS ET ANALYSE

### III.6.1 Energie de l'arc électrique

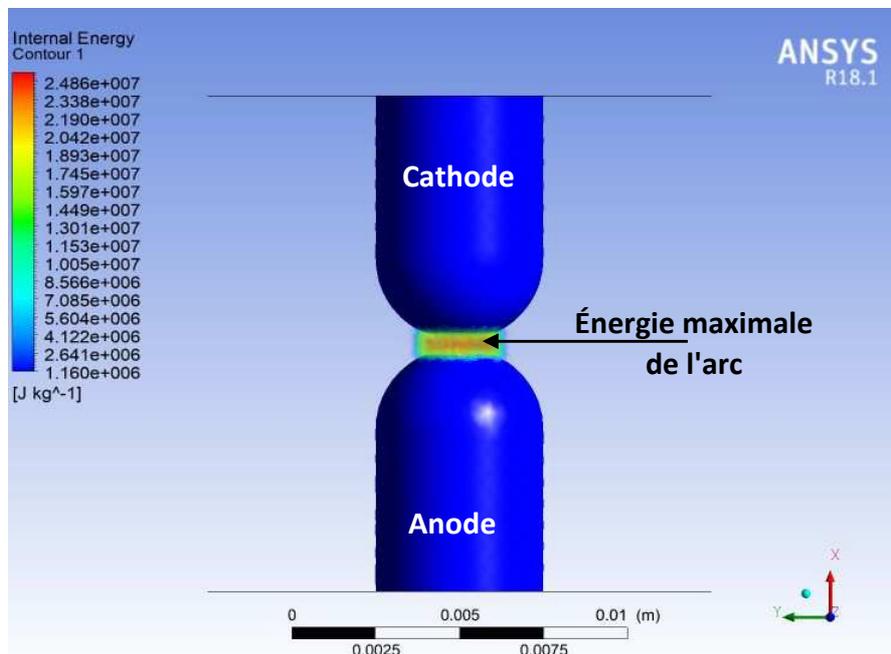
L'énergie de l'arc est mesurée lorsque la cathode commence à s'éloigner de l'anode. La **figure III- 21** représente la distribution numérique de l'énergie interne enregistrée dans l'espace inter-électrode. Les échantillons simulés ci-dessous ont un diamètre de 5 mm avec une densité de courant appliquée de  $4.07 \text{ E5 A/m}^2$ .

L'énergie interne du solveur est donné par l'unité Joule/kg, pour obtenir cette énergie en Joules afin d'effectuer une comparaison par la suite, il suffit de multiplier cette énergie par la masse.

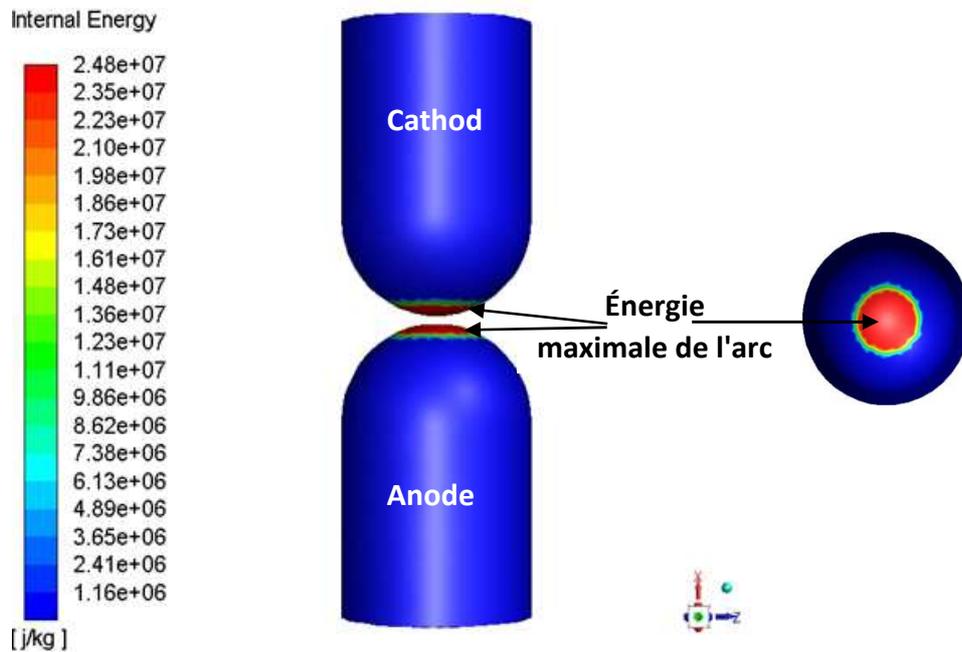
Avec  $m = \rho \times v$

Où,  $\rho$  est la masse volumique de l'air et  $V$  est volume inter-électrode (zone d'extinction d'arc).

La **figure III- 21**, montre que l'énergie maximale est de 3.9 Joules, elle se situe dans l'espace inter-électrodes.



(a) Energie de l'arc dans l'espace inter-électrodes



(b) Energie de l'arc dans les électrodes

**Figure III- 21 :** Distribution de l'énergie de l'arc électrique pour un courant de 8A, diamètre des contacts  $D=5\text{mm}$ .

Le **tableau III-2** présente une comparaison des résultats expérimentaux et numériques de l'énergie de l'arc présent entre les contacts (gap) pour un courant appliqué de 8A.

**Tableau III- 2 :** Comparaison des résultats expérimentaux et numériques de l'énergie de l'arc (Contacts D5 et D8 en cuivre, puissance 256Watts).

Energie de l'arc E (Joule)						
Courant (A)	Diamètre des contacts D (mm)	Densité de courant ( $\text{A}/\text{m}^2$ )	Résultat Numérique (E)	Résultat Expérimental $E_{\text{min}}$	Résultat Expérimental $E_{\text{max}}$	Nombre d'Opérations (n)
8	5	4.07 E5	3.9	3.12	15.56	1249
8	8	1.59 E5	3.07	2.66	14.27	379

Selon le théorème de Hertz, la surface de contacts augmente avec l'augmentation de diamètre des contacts. La résistance de contact varie également de manière inversement proportionnelle à la surface de contact  $[R_c = \frac{\rho}{2a}]$ .

L'énergie de l'arc est faible pour les contacts de grand diamètre en raison du grand nombre des spots (lignes de passage de courant), ce qui entraîne un moindre échauffement des contacts et un faible niveau d'ionisation.

En raison de la surface de contacts, on peut constater que la durée et l'énergie de l'arc est influencée par le changement de diamètre des contacts. Les valeurs numériques et expérimentales ont diminué légèrement lorsque le diamètre des échantillons de contact augmente. En effet, les durées et l'énergie de l'arc sont moins faibles (de 10%) pour les contacts de 8 mm de diamètre [15].

Les résultats de la simulation montrent que l'énergie maximale est située dans l'espace inter-électrodes des deux échantillons de contacts électrique.

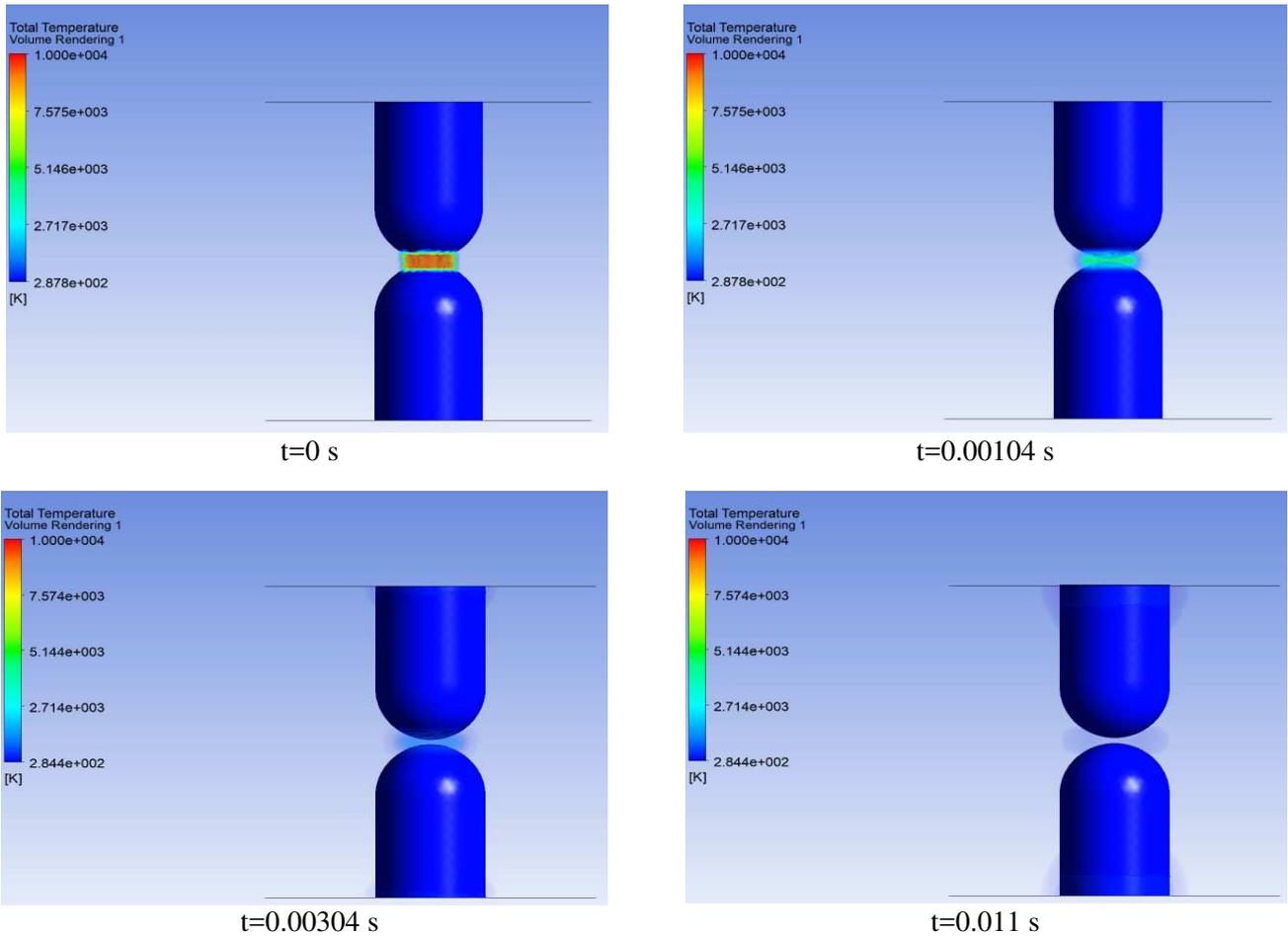
Les résultats expérimentaux présentent des similitudes avec les résultats numériques obtenus pour les deux diamètres des échantillons. Les résultats numériques obtenus sont compris entre les valeurs maximales et minimales de l'étude expérimentale. L'énergie de l'arc enregistré diminue légèrement lorsque le diamètre des contacts augmente.

Les essais expérimentaux ont montrés aussi que la durée de vie des contacts est trop longue pour les contacts de petits diamètres, augmentant de 30%. Cela pourrait s'expliquer par la configuration géométrique des contacts, un diamètre plus grand permettrait un mouvement d'arc plus important (mobilité de l'arc), ce qui entraînerait une oxydation de la surface des échantillons.

### III.6.2 Température de l'arc électrique

Grâce aux calculs réalisés, la **figure III- 22** illustre la distribution de la température du plasma à différents instants jusqu'à son extinction naturelle. Au début, un arc court se forme dans la zone de contact, au moment où le contact mobile commence son déplacement vertical. Les échantillons simulés ci-dessous ont un diamètre de 5 mm, et une densité de courant appliquée de  $4.07 \text{ E5 A/m}^2$ .

La **figure III- 22**, montre que la température maximale est se situe dans l'espace inter-électrodes.



**Figure III- 22 :** Distribution de la température de l'arc électrique pour un courant de 8A, diamètre des contacts  $D= 5\text{mm}$ .

### III.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons vu que l'arc électrique à l'ouverture des contacts peut être caractérisé par la mesure numérique de sa durée, de son énergie,... etc. Les paramètres électriques de l'arc pour un circuit sous 32 VDC, la durée et l'énergie de l'arc sont modifiées le fait de modifier le diamètre des échantillons des contacts. Les résultats montrent que la durée et l'énergie de l'arc pour les contacts à petits diamètre sont supérieures à celle enregistrée pour les grands diamètres. En effet le fait de passer à des surfaces de contacts plus grand (contacts de 8mm) abaisse l'énergie de l'arc de 10%.

Les contacts de petit diamètre ont montré leurs ténacités à l'énergie élevée de l'arc où on a enregistré une durée de vie trop importante pour ces échantillons. La durée de fonctionnement des contacts a augmenté de 30%, celui-là revient au comportement aléatoire d'arc.

**REFERENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES  
DU CHAPITRE III**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE III

- [1] A. I. Aio, “*Modelization and analysis of the electric arc in low voltage,*” Escuela Técnica Superior De Ingeniería De Bilbao, 2013.
- [2] WU, Y., RONG, M., LI, X., MURPHY, A.B., WANG, X., YANG, F. and SUN, Z. “*Numerical Analysis of the Effect of the Chamber Width and Outlet Area on the Motion of an Air Arc Plasma*”. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, vol. 36, no. 5, p. 2831-2837. DOI 10.1109/TPS.2008.2004040.
- [3] YANG, F., WU, Y., RONG, M., SUN, H., MURPHY, A.B., REN, Z. and NIU, C. “*Low-voltage Circuit Breaker Arcs-Simulation and Measurements*”. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, vol. 46, no. 27, paper 273001. DOI 10.1088/0022-3727/46/27/273001.
- [4] M. Mačák\*, P. Vyroubal and J. Maxa. ”*Magnetohydrodynamic Model of Electric Arc during Contact Opening*” Advances in Military Technology. November 2019.
- [5] M. S. Benilov, "Understading and modelling plasma–electrode interaction in *highpressure arc discharges: a review,*" Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 41, pp. 01-31, 2008.
- [6] Julio César Bautista Cruz, thesis « *Characterization of Arc Extinction in Direct Current Residential Circuit Breakers* », Monterrey Nuevo León. 2018
- [7] F. Karetta and M. Lindmayer, "Simulation of arc motion between divergent arc runners, " in Proceedings of 19th International Conference on Electric Contact Phenomena, 1998, pp. 361-7
- [8] X. Li, C. Bao, and H. Wu, “Simulation of Multi-Physical Fields in a Fault Arc,” no. 3, pp. 69–73, 2015.
- [9] Yi Wu, Mingzhe Rong, Zhiqiang Sun, Xiaohua Wang, Fei Yang and Xingwen Li « Numerical analysis of arc plasma behaviour during contact opening process in low-voltage switching device ». journal of physics January 2007
- [10] Mingzhe Rong, Qiang Ma, Yi Wu, Tiejun Xu, and Anthony B. Murphy ; « The influence of electrode erosion on the air arc in a low-voltage circuit breaker », journal of applied physics
- [11] CFD online, “Meshing,” 2012. [Online]. Available: <https://www.cfdonline.com/Wiki/Meshing>

- [12] ANSYS INC, “*UDF Manual.*” 2013. [Online] p. 684. Available: [http:// users.ugent.be/~mvbelleg/fludf-12-0.pdf](http://users.ugent.be/~mvbelleg/fludf-12-0.pdf)
- [13] A. Gleizes, Y. Cressault, and P. Teulet, “*Mixing rules for thermal plasma properties in mixtures of argon, air and metallic vapours,*” *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 19, no. 5, 2010.
- [14] ANSYS INC, “*Boundary Conditions,*” 2006. [Online]. Available: [http://www.southampton.ac.uk/~nwb/lectures/GoodPracticeCFD/Articles/BCs\\_Fluent-v6.3.04.pdf](http://www.southampton.ac.uk/~nwb/lectures/GoodPracticeCFD/Articles/BCs_Fluent-v6.3.04.pdf)
- [15] Elsa Yee Kin Choi : Thèse de Doctorat : « *Étude des arcs et de leurs conséquences sur les matériaux de contacts électriques de puissance pour des applications DC* ». Université de Rennes1 2015.
- [16] YANG, F., WU, Y., RONG, M., SUN, H., MURPHY, A.B., REN, Z. and NIU, C. “*Low-voltage Circuit Breaker Arcs-Simulation and Measurements*”. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, vol. 46, no. 27, paper 273001. DOI 10.1088/ 0022-3727/46/27/273001.
- [17] Ms. Araitz Iturregi Aio, PhD thesis, « *modelization and analysis of the electric arc in low voltage circuit breakers* ». Thèse de Doctorat 2013

# CHAPITRE

# 4

## **Etude de l'Endommagement des contacts électrique**

---

## **IV.1 INTRODUCTION**

L'arc électrique, également connu sous le nom de plasma thermique constitue la principale cause d'érosion des contacts et de transfert de matériaux entre les électrodes, en particulier dans le contexte des relais, les applications automobiles et aérospatiales où les électrodes sont essentielles pour interrompre le courant lors de la séparation des contacts.

Le transfert de matière provoqué par l'arc entre les contacts a été étudié et rapporté dans divers travaux [1-5]. Différentes directions de transfert de matière ont été observées et elles sont associées aux deux types d'arcs : transfert anodiques et transfert cathodiques. La quantité d'érosion et la direction du transfert sont étroitement liées à la longueur de l'arc formé entre les électrodes lors de la séparation à chaud.

Dans le cadre de cette étude, nous exploitons un banc expérimental de coupure équipé d'un dispositif permettant de contrôler, enregistrer la longueur de l'arc et de mesurer les paramètres de l'arc (à l'aide d'un oscilloscope numérique). Ce dispositif nous permet d'étudier le transfert de masse avec allongement de l'arc en utilisant différents métaux pures et revêtues pour des contacts de différents diamètres et matériaux.

## **IV.2 OBJECTIF ET METHODOLOGIE**

La tendance actuelle se concentre sur l'augmentation du nombre d'opération et de manœuvres pour les contacts électriques en service, met en évidence l'importance croissante des problèmes liés à l'endommagement des contacts. Ces problèmes proviennent principalement de l'apport important d'énergie thermique générée par l'arc électrique au niveau de l'espace inter-électrodes. Cette augmentation de température conduit à une altération des propriétés de surface et à une modification de la structure du contact électrique. Dans cette perspective, nous examinerons en détail l'impact significatif du vieillissement sur les contacts.

Le protocole de visualisation que nous avons suivi peut être détaillé comme suit :

- Nous avons initié un certain nombre d'arcs électriques entre une paire de contacts en imposant des conditions électriques spécifiques, les conditions électriques ont été détaillées dans les paragraphes précédents.
- Ensuite, nous avons examiné l'état de la surface des contacts en utilisant un Microscope Électronique à Balayage (MEB).
- Et finalement, nous avons procédé à des analyses quantitatives et qualitatives pour déterminer la composition chimique des surfaces impactées par l'arc après un certain nombre d'ouvertures.

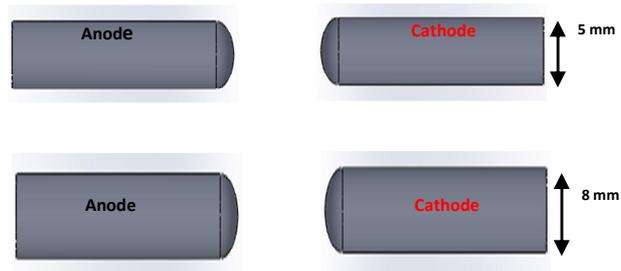
Ce protocole nous a permis d'observer et d'évaluer les changements survenant à la surface des contacts après l'exposition à des arcs électriques, fournissant ainsi des données précieuses sur les altérations induites par ces phénomènes.

### **IV.3 ENDOMMAGEMENT DES CONTACTS DE CONNECTEURS**

Les contacts ont été soumis à de multiples opérations d'ouverture/fermeture sous l'effet d'arcs électriques dans des conditions électriques spécifiques. Le banc d'essai utilisé nous a permis de simuler et d'évaluer l'effet du phénomène observé sur les électrodes de manière précise et contrôlée [6].

#### **IV.3.1 Structure des contacts avant essai**

Pour ces essais, nous avons utilisé des contacts sous forme cylindrique avec un bout sphérique de différents diamètres, fabriqués à partir de différents matériaux (**figure IV- 1**). L'utilisation de ce type de contacts représentait un choix judicieux pour reproduire des conditions proches de la réalité tout en permettant une manipulation aisée et reproductible. Les différences de diamètre étaient concluantes car elles influent directement sur la répartition des contraintes et la dynamique de l'arc électrique. Les divers matériaux des contacts ont été sélectionnés pour évaluer leur réaction face aux arcs électriques et ainsi analyser les variations dans les transferts de matière et l'érosion sur les surfaces des électrodes. En combinant ces différentes configurations, nous avons pu obtenir des données significatives sur le comportement des contacts soumis aux conditions électriques et thermiques spécifiques de notre étude.



**Figure IV- 1 :** Forme des contacts. Modèle CAD de la géométrie

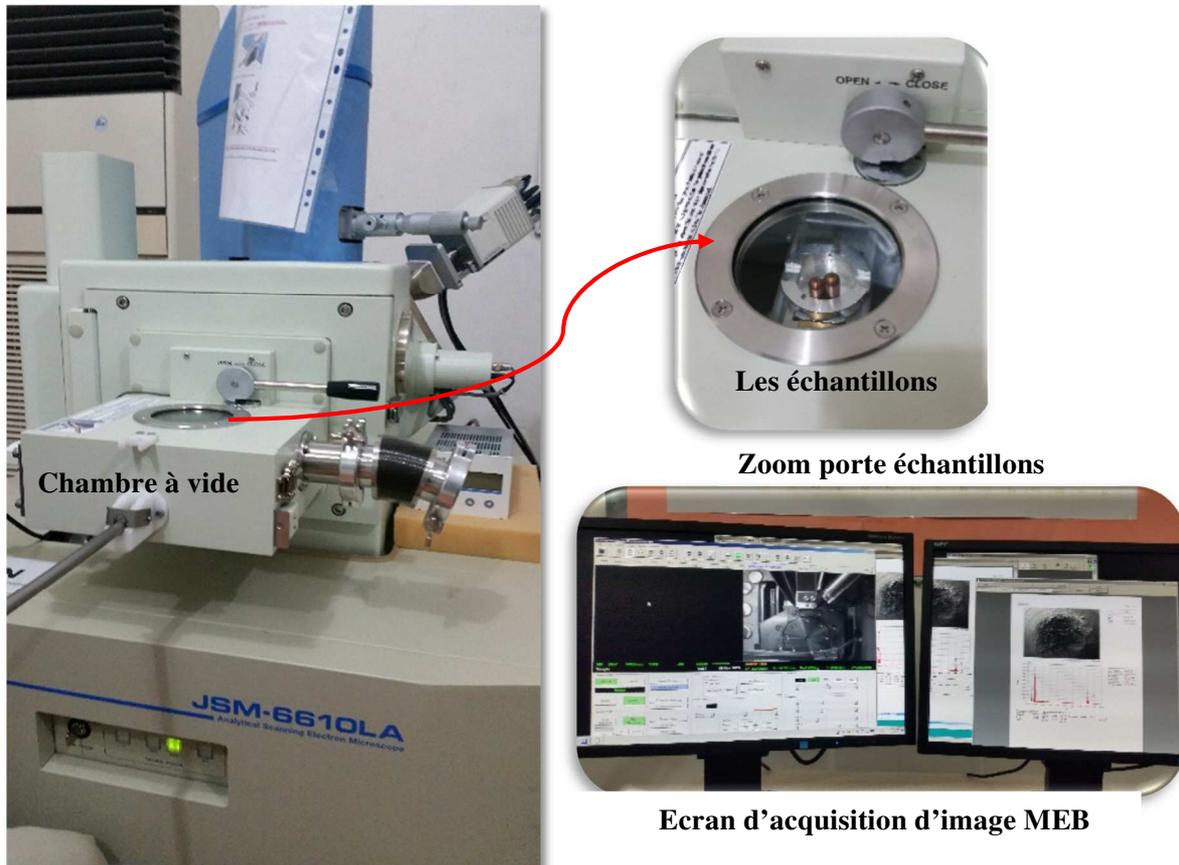
Nous avons utilisé un microscope électronique à balayage (MEB) de modèle JEOL JSM-6610LA équipé d'un spectromètre à rayons X à dispersion d'énergie (EDS) intégré pour effectuer nos observations et analyses. Le MEB est un outil puissant qui nous a permis d'explorer en détail la morphologie de la surface des contacts après leur exposition aux arcs électriques [7].

Le spectromètre EDS intégré au MEB s'est avéré particulièrement utile pour obtenir des informations sur la composition chimique des différentes zones d'intérêt sur les surfaces des contacts. Cette technique nous a permis d'analyser les éléments chimiques présents dans les régions affectées par les arcs électriques et d'identifier d'éventuels changements de composition dus à l'érosion, à l'oxydation ou d'autres processus.

L'observation morphologique et l'analyse chimique ont permis de comprendre les mécanismes de transfert de matière entre les électrodes. Ces constatations mettent en évidence la nature de la dégradation des contacts électriques par arc, ce qui est essentiel pour améliorer la durabilité des contacts électriques [8].

Dans ce chapitre, notre étude se concentre sur l'évolution détaillée de la surface de contact à mesure que le nombre d'impacts par arcs électriques augmente, dans les conditions opératoires spécifiées précédemment. Les images que nous présentons donnent un aperçu visuel du comportement des électrodes après avoir subi à plusieurs arcs électriques. Nous avons étudié de près l'évolution de la surface de contact sous l'impact répété d'arcs électriques, en observant les changements morphologiques et en analysant les modifications chimiques qui se produisent. Ces images capturent les changements progressifs de la surface, donnant des indices sur les processus de transfert de matière et les mécanismes d'usure provoqués par les arcs électriques. Grâce à ces données visuelles, nous sommes en mesure de mieux

comprendre les effets cumulatifs des arcs électriques sur les électrodes, ce qui est essentiel pour améliorer la conception des contacts électriques et améliorer leur durabilité et leur performance opérationnelle dans des environnements soumis à des conditions de décharge électrique sévères [7].



**Figure IV- 2 :** Microscope à Balayage Electronique MEB JEOL JSM-6610LA utilisé lors des analyses.

#### IV.4 ANALYSE DES ELECTRODES

L'analyse des traces laissées par l'arc électrique sur les électrodes apporte des informations complémentaires nécessaires aux mesures électriques. Bien que la première observation se fasse souvent à l'œil nu, l'utilisation d'une loupe binoculaire représente un réel avantage qui permet des observations et des mesures dimensionnelles plus détaillées.

Durant notre étude, nous avons incorporé un appareil photo équipé d'un objectif offrant un grossissement grandeur x10 pour suivre l'évolution des électrodes. Cet appareil nous permet d'avoir un premier aperçu de l'état de surface des électrodes après tests. Cependant, pour des analyses plus approfondies, nous faisons appel ponctuellement à des outils spécialisés tels que le Microscope Électronique à Balayage (MEB). La combinaison des différents outils d'observation nous permet d'obtenir une vue complète et détaillée de l'effet de l'arc électrique sur les électrodes, offrant ainsi des perspectives approfondies pour améliorer la robustesse des contacts électriques.

#### IV.4.1 Oxidation des surface de contact

La **figure IV- 3** donne un aperçu typique de l'effet d'un arc électrique sur une électrode. On peut remarquer plusieurs éléments distincts dans cette image :

**A → La zone affectée par l'arc électrique**, qui présente une forme elliptique bien définie. C'est la zone qui est directement affectée par l'arc électrique.

**B → À l'intérieur de cette zone** on observe une zone d'aspect fondu. Cette région montre l'échauffement et de la fusion du matériau sous l'effet de l'arc.

**C → Un halo de dépôt carboné** entoure la zone impactée par l'arc. Ce halo indique des réactions chimiques complexes et des dépôts de carbone dus à l'interaction entre l'arc et le matériau.

**D → Des gouttelettes métalliques** sont visibles déposées de manière radiale autour du pied de l'arc. Ces gouttelettes se forment à la suite de l'évaporation du métal et de sa condensation sous l'effet de la température élevée de l'arc.

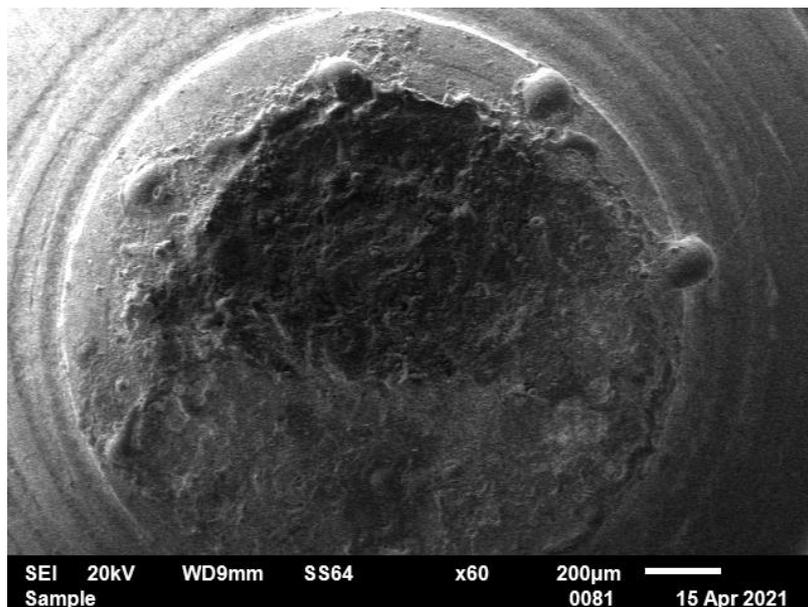
En examinant cette image, les couleurs allant du bleu au brun foncé en passant par l'orange correspondent à des processus d'oxydation à haute températures. Ces nuances de couleurs montrent les changements de température et les transformations physico-chimiques qui se produisent en surface sous l'effet de l'arc. Ces observations visuelles sont essentielles pour comprendre en détail les changements de surface provoqués par l'arc électrique.



**Figure IV- 3 :** Aspect typique de l'impact de l'arc électrique sur une électrode (une cathode).il s'agit d'une image réalisée à l'aide d'un appareil photo.

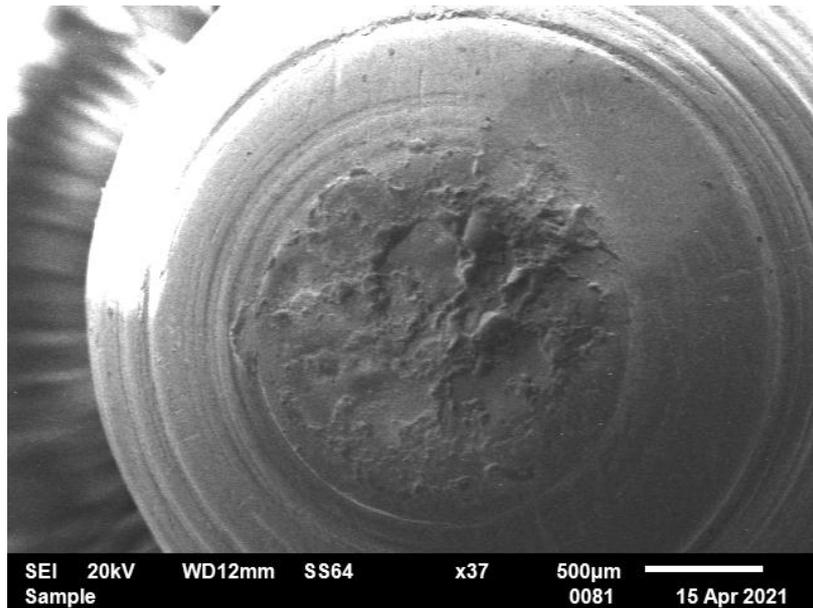
#### IV.4.2 Effet des arcs électriques sur la microstructure des contacts

La **figure IV- 4** est la micrographie MEB de la surface du contact fixe (anode) après plusieurs arcs électriques fournit des informations précieuses sur l'impact de l'arc sur le matériau.

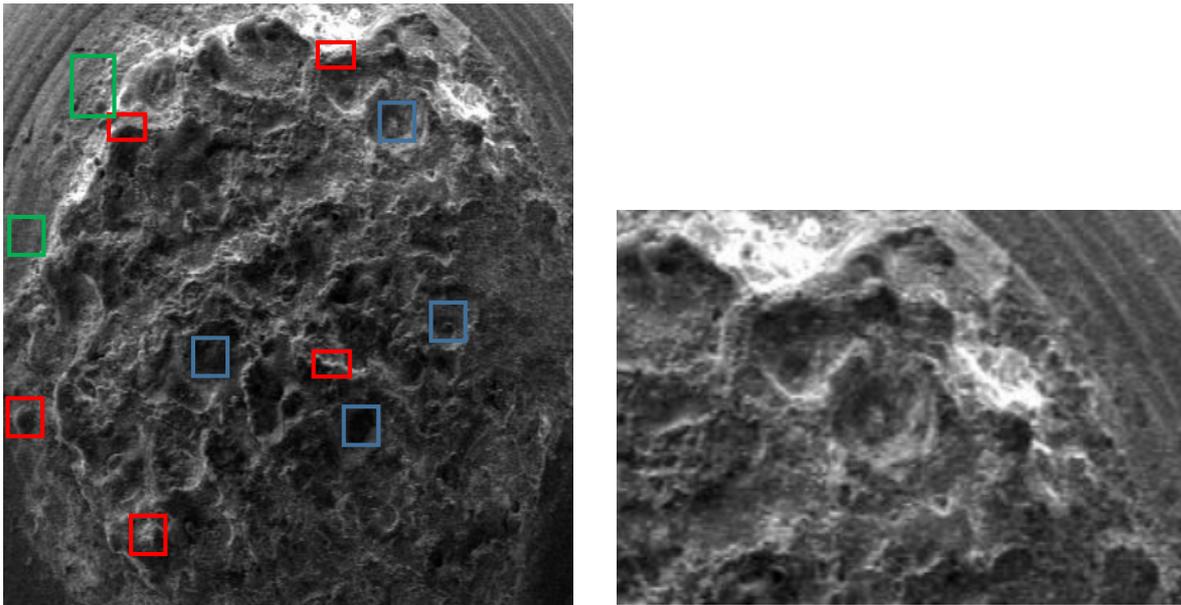


**Figure IV- 4 :** Micrographie MEB : Etat de surface du contact fixe (anode) en Ag après certains nombre arc électrique.

Des gouttelettes de métal (d'argent) sont apparues sur la surface des contacts. La fusion du métal a été provoquée par un échauffement résultant de la diminution de taille et du nombre des lignes de striction électrique et de l'apparition d'un arc électrique. Le métal a disparu de la surface de contact et s'est oxydé. Il apparaît que l'état de surface du contact mobile (cathode) a été moins endommagé par l'arc électrique que celui du contact fixe (anode) (**figure IV- 5**).



**Figure IV- 5** : Micrographies MEB. Etat de surface du contact mobile (cathode) en Ag après un certains arc électrique.



**Figure IV- 6** : Micrographies MEB, caractéristique d'une partie du cratère après un certains arc électrique – Anode

À partir des observations micrographie **figure IV- 6**, il est possible de regrouper les zones en fonction de similitudes en termes de morphologie et de composition chimique. Ces groupes permettent de classer les zones impactées par l'arc électrique en trois groupes distincts :

Dans la **figure IV- 6**, on observe d'abord la présence d'un cratère d'impact résultant de l'arc électrique, caractérisé par une cavité de taille millimétrique, dont la composition chimique est majoritairement composée d'oxydes (zone encadrée en bleu). Autour de ce cratère, des projections de matière fondue apparaissent à l'extérieur avec une composition riche en argent (zone encadrée en rouge), indiquant un taux élevé de ce métal dans sa composition (**figure IV- 6**).

En outre, dans la zone encadrée en verte correspondant aux parties solidifiées du bain de fusion ainsi qu'aux zones non directement touchées par l'arc électrique, la composition en argent est inférieure à 90 %, bien qu'elle reste proche de la composition chimique d'origine du matériau de contact (**figure IV- 6**).

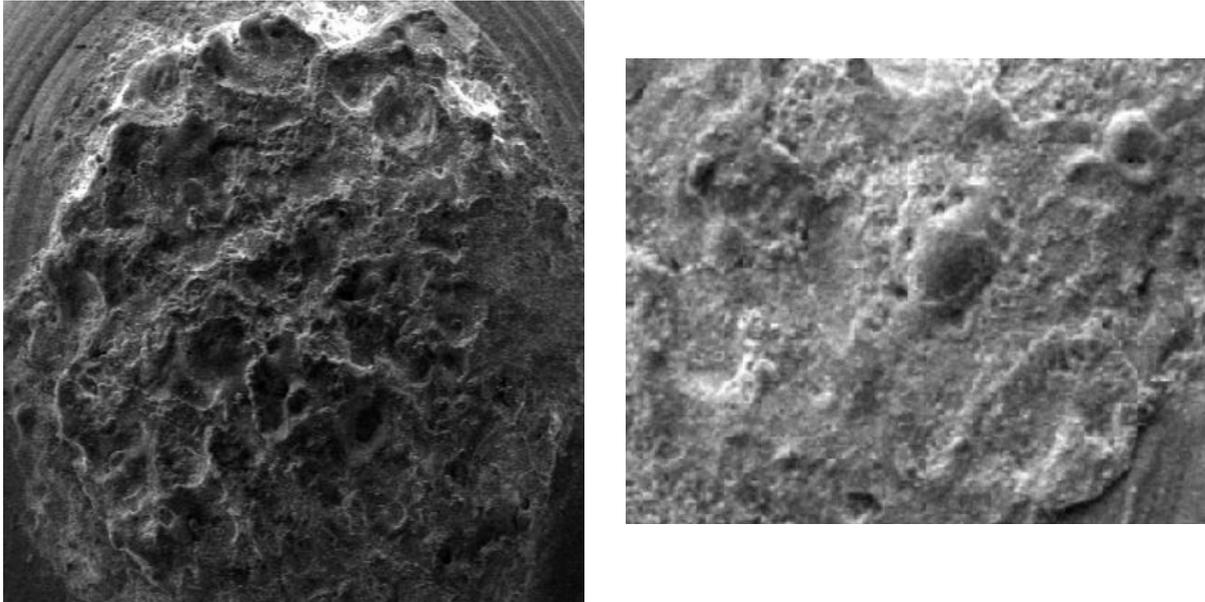
Cette étude expérimentale met également en évidence une dégradation notable de la surface des contacts fixes (anode) au fur et à mesure que le nombre de manœuvres d'ouverture augmente, comme illustré dans la **figure IV- 7**.



**Figure IV- 7** : Surface des contacts fixes Al à différents nombres de manœuvres.

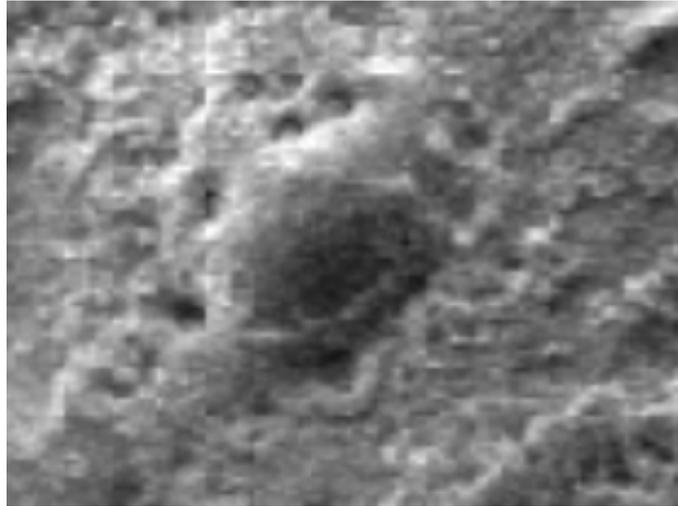
La taille de la zone endommagée augmente proportionnellement au nombre croissant d'opérations d'ouverture. Initialement, lorsqu'un arc électrique se forme, un cordon de matière fondue se développe autour des zones touchées par l'arc. Au fil du temps, cette zone d'impact tend à être recouverte par une sorte de "peau" résultant du refroidissement de la matière fondue. À un niveau de grossissement plus élevé, on peut discerner la présence de cavités ou de retassures provoquées par les cycles répétés de fusion et de solidification rapides (**figure IV- 8** droite).

Ces retassures sont des creux ou des irrégularités de surface qui se forment lorsque la matière fondue générée par l'arc électrique refroidit et solidifie rapidement après chaque processus d'arc. Ces cycles successifs de fusion et de solidification peuvent entraîner des contraintes thermiques importantes, conduisant à la formation de ces cavités et à une détérioration supplémentaire de la surface du matériau. Ainsi, avec une répétition fréquente des opérations d'ouverture, ces retassures peuvent s'étendre et aggraver les dommages sur la surface des contacts.

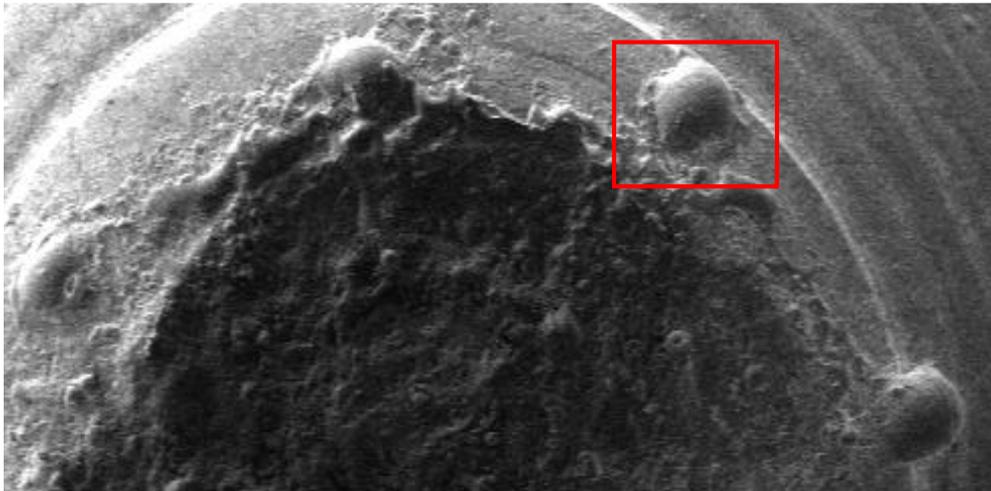


**Figure IV- 8 :** Grossissement de l'état de Surface des contacts fixes après un certain manœuvre d'ouverture pris par MEB

Les petites cavités sphériques observées sur la micrographie (**figure IV- 9**) révèlent un phénomène intéressant. Il semblerait que l'oxygène dissous dans le métal liquide se transforme en gaz pendant la solidification des gouttelettes. Lorsque la matière fondue se refroidit et commence à se solidifier, la pression et la composition chimique changent dans ces micro-environnements locaux. L'oxygène dissous dans le métal liquide, il a la particularité de passer à l'état gazeux pendant la solidification. Cette transition est probablement favorisée en raison des conditions de refroidissement rapides lors de la solidification des gouttelettes. Ces petites cavités sphériques peuvent donc être interprétées comme des bulles d'oxygène formées à partir de l'oxygène dissous dans le métal liquide pendant le processus de solidification. Ce phénomène met en évidence l'influence de la composition chimique et des conditions de solidification sur la morphologie et la structure des matériaux. Il souligne également l'importance de comprendre ces processus microscopiques pour évaluer l'effet de l'arc électrique sur la microstructure et les propriétés des matériaux.



**Figure IV- 9 :** Micrographie MEB. Mise en évidence du dégazage de métal lors du refroidissement d'une électrode contact fixe.



**Figure IV- 10 :** Micrographie MEB. Des grains basaltiques présents sur une électrode.

La forme basaltique des grains de métal formé sur les électrodes, comme observée dans la micrographie (**figure IV- 10**) est un indicateur révélateur d'un choc thermique intense lors de la solidification. Ce type de structure se forme lorsque le matériau passe brusquement d'un état liquide à un état solide subissant ainsi un refroidissement très rapide. La configuration basaltique des grains suggère des conditions de refroidissement extrêmement rapides, typiques des processus de solidification après exposition à des températures élevées.

La goutte de matériau fondu encadrée dans la photo micrographie (**figure IV- 10**) met en évidence la dégradation de la surface des électrodes. On observe une

altération de surface à quelques nombre de manœuvres, évoluant vers un changement structurel plus profond avec un nombre élevé de manœuvres d'ouverture (dégradation approfondi). Cette dégradation peut même atteindre un niveau où des fissures apparaissent dans la zone soumise à un choc thermique intense, accompagnées de collerettes de métal de part et d'autre de la zone fondue.

Les résultats de cette campagne de tests montre que l'état de surface des contacts mobiles est considérablement moins altéré que celui des contacts fixes en raison des chocs thermiques répétés provoqués par l'arc électrique.

#### **IV.5 ANALYSES MICROSCOPIQUES MEB & EDX**

Les échantillons ont fait l'objet d'une analyse approfondie en suivant une méthodologie standardisée. Les images ci-dessous illustrent les zones des électrodes affectées par l'arc électrique après un certain nombre de manœuvres, et jusqu'à la rupture totale de la connexion électrique, ce qui se caractérise par l'arrêt de passage du courant à cette étape. La sélection des zones impactées a été réalisée grâce à des observations minutieuses au microscope à fort grossissement complétées par une cartographie EDS visant à identifier de manière qualitative et quantitative les compositions chimiques des surfaces.

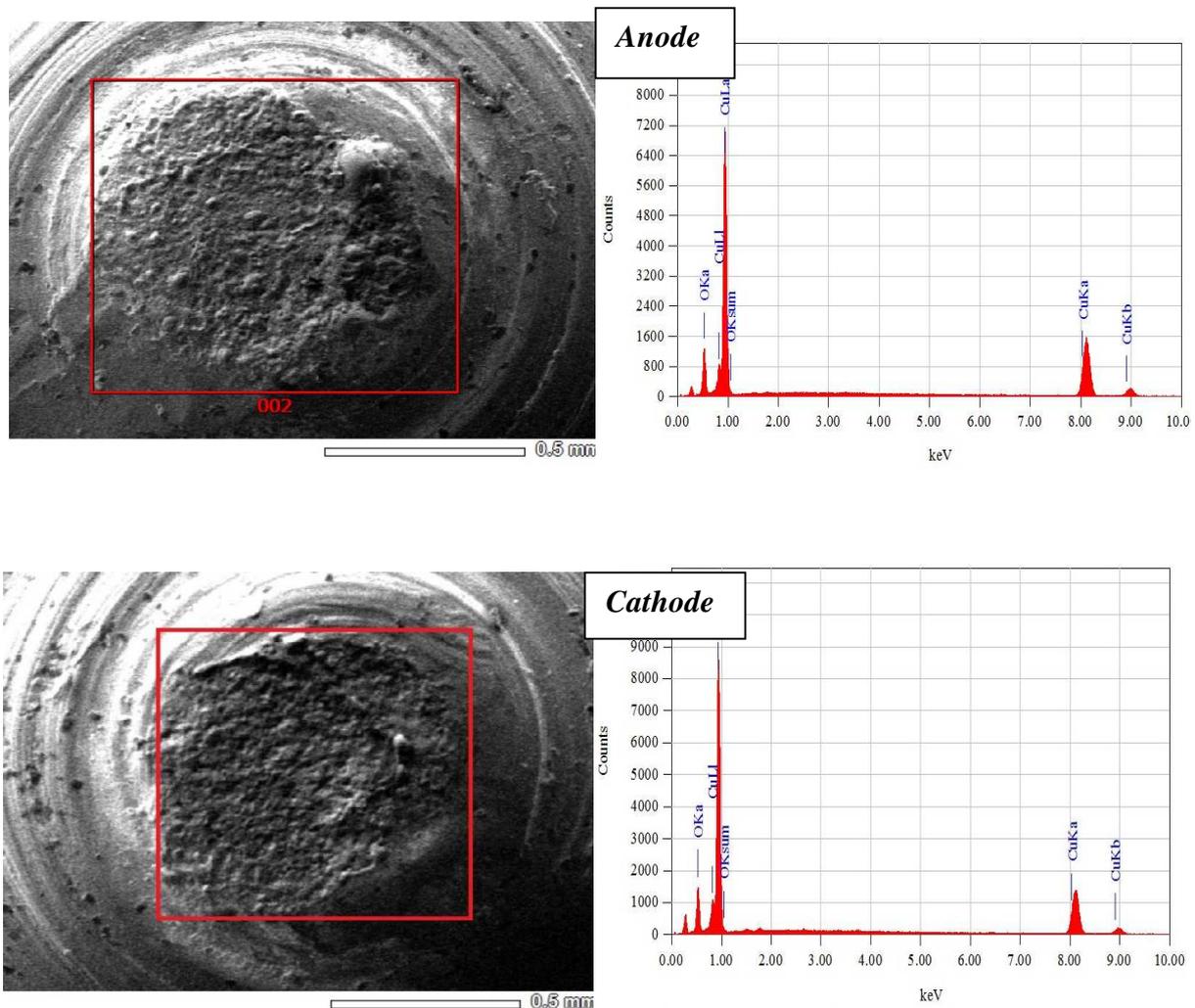
Il est important de noter que la matière transférée provient exclusivement de la phase métallique de l'arc électrique. Cette distinction met en évidence le processus de transfert de matière qui se produit spécifiquement dans le domaine métallique et contribue à une compréhension approfondie des interactions entre l'arc électrique et les électrodes, ainsi que de ses répercussions sur la structure et les propriétés des matériaux impliqués.

##### **IV.5.1 La composition chimique**

Les rectangles clairement définis dans les figures représentent les zones que nous avons minutieusement scannées à l'aide du microscope MEB. Les zones sélectionnées présentent des différences morphologiques notables, permettant une analyse approfondie des modifications et des transformations survenues sous l'effet de l'arc électrique. Grâce à ces scans, nous avons obtenu des spectres caractéristiques qui fournissent des informations importantes sur la composition

chimique de chaque zone analysée comme illustrées dans la **figure IV- 11** à la **figure IV- 15**). Ces données spectroscopiques obtenues par spectroscopie des rayons X à dispersion d'énergie (EDS), permettent d'identifier les éléments présents dans chaque région et d'évaluer leur concentration respective.

Les résultats spectrométriques sont résumés dans les tableaux suivants, fournissant un aperçu clair des compositions en éléments observées dans les différentes zones sélectionnées. Ces données sont essentielles pour une compréhension approfondie des changements chimiques et structuraux associés aux effets de l'arc électrique sur les matériaux étudiés.



**Figure IV- 11** : Images de microscopie à balayage électronique (MEB) & microanalyse par Energie Dispersion de rayons X (EDX) de la composition chimique des surfaces de contact à la fin de leur durée de vie (Pin=100W, D=5mm, materiau Cuivre).

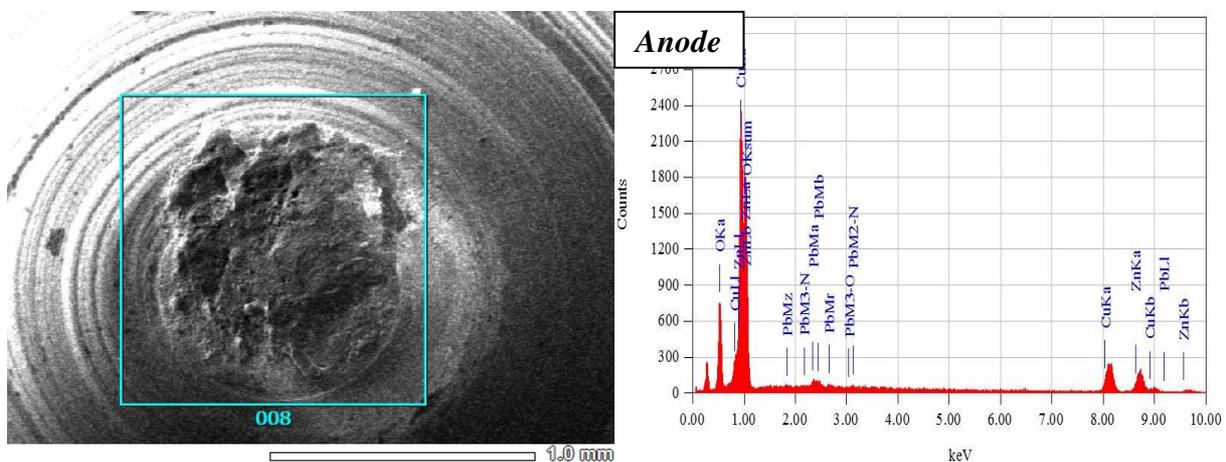
Les compositions en éléments des différentes zones sont synthétisées dans le tableau ci-dessous.

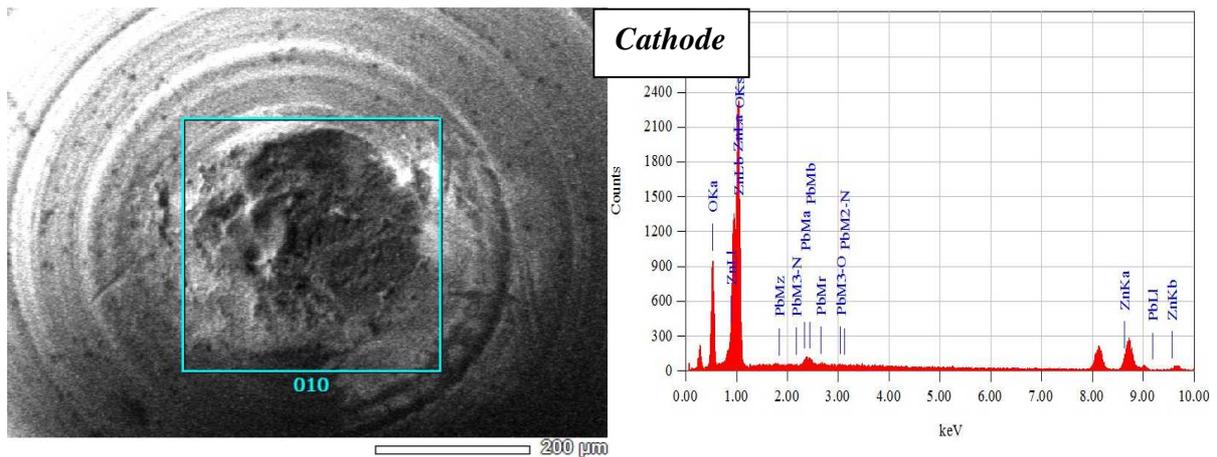
**Tableau IV- 1 :** Composition chimique des différentes zones par rapport à la figure IV- 11

Contacts en Cuivre _D5 100W			
Anode %		Cathode %	
<b>O</b>	43.63	<b>O</b>	47.59
<b>Cu</b>	56.37	<b>Cu</b>	52.41

Pour une longueur moyenne maximale de l'arc enregistrée de 0,044mm, nous avons effectué une analyse détaillée des zones de surfaces touchées par l'arc électrique. Il est à noter que l'oxygène a été détecté dans des proportions similaires représentant environ 45% de la composition chimique quelle que soit la zone de dégradation des électrodes. Ce résultat souligne un phénomène important : les transferts de matière significatifs qui se produisent en raison du grand nombre d'opérations d'ouverture et de fermeture, soit environ 15569 opérations peuvent conduire à l'incorporation d'oxygène et d'autres composants étrangers aux constituants de base de l'électrode (ici, principalement de Cu) dans la matière échangée.

Ce phénomène de contamination chimique peut avoir des implications majeures sur les propriétés et la stabilité des matériaux des électrodes. L'incorporation d'oxygène et d'autres éléments peut modifier la conductivité électrique, la structure cristalline et d'autres propriétés importantes des matériaux.





**Figure IV- 12 :** Images de microscopie à balayage électronique (MEB) & microanalyse par Energie Dispersion de rayons X (EDX) de la composition chimique des surfaces de contact à la fin de leur durée de vie (Pin=100W, D=5mm, matériau laiton).

Les compositions en éléments des différentes zones sont résumées dans le tableau suivant.

**Tableau IV- 2 :** Composition chimique des différentes zones par rapport à la **figure IV- 12**

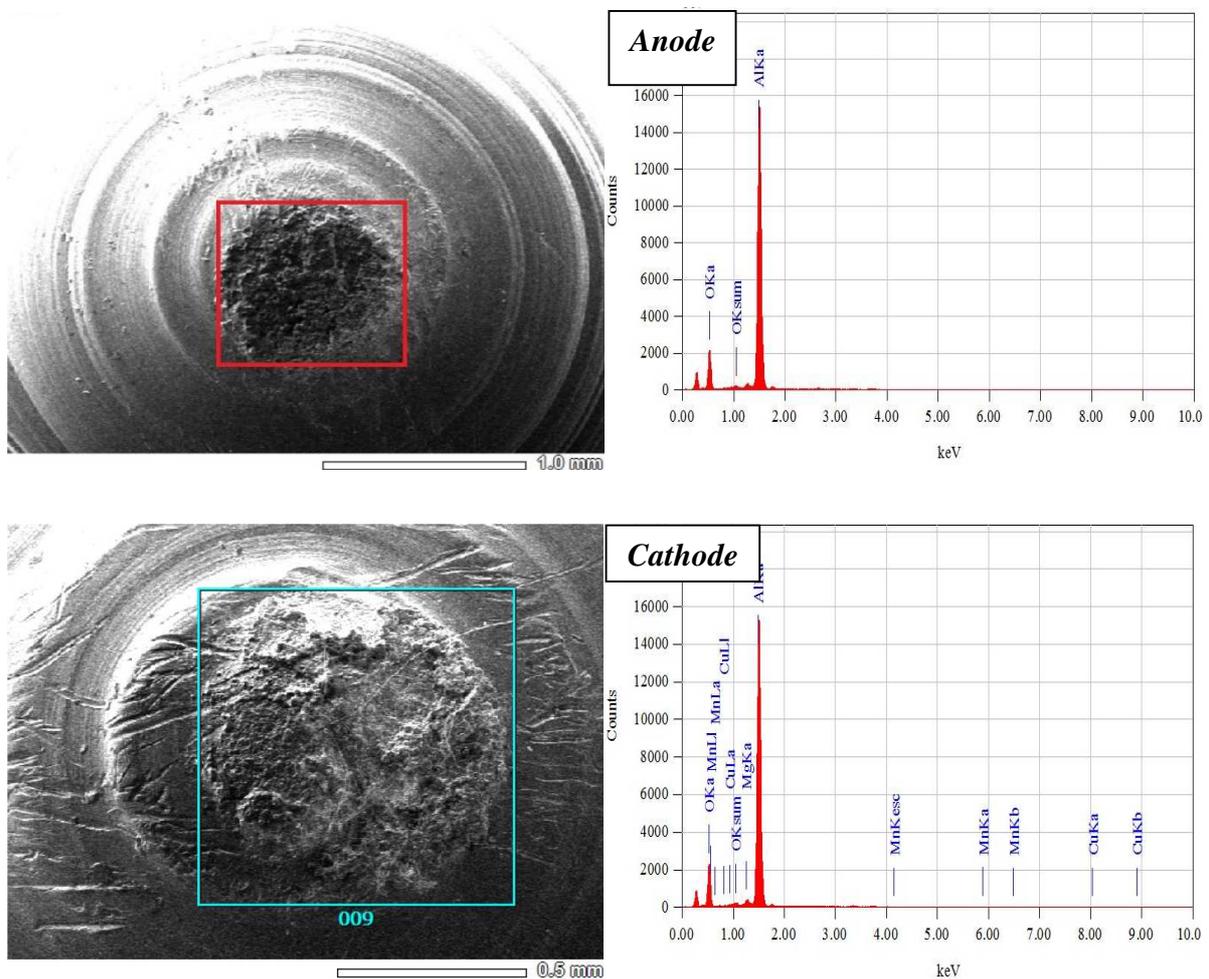
Contacts en Laiton _D5 100W			
Anode %		Cathode %	
<b>O</b>	63.27	<b>O</b>	59.35
<b>Zn</b>	14.73	<b>Zn</b>	15.95
<b>Pb</b>	8.14	<b>Pb</b>	13.46
<b>Cu</b>	13.44	<b>Cu</b>	11.24
<b>Sn</b>	0.42	<b>Sn</b>	-

Pour des arcs plus longs, atteignant en moyenne 0,13mm (valeur moyenne pour le laiton), une analyse détaillée des surfaces touchées par l'arc a été réalisée. Dans ces conditions, il est observé que le taux d'oxygène détecté est significativement élevé dans les zones dégradées. Les dégradations causées par les arcs dans ce matériau semblent être plus prononcées que dans d'autres matériaux.

La durée de vie des contacts en laiton a été particulièrement limitée à environ 264 opérations. Ceci est dû à la grande résistance de contact associée au laiton. Les transferts de matière sont plus marqués dans ce cas en raison de la durée d'arc plus longue par rapport au nombre d'opération limité. Ces transferts de matière considérables résultant de la longueur prolongée de l'arc conduisent à une

incorporation accrue d'oxygène et d'autres éléments étrangers dans les zones touchées par l'arc.

Ces observations mettent en évidence l'influence significative de la longueur de l'arc sur les processus de transfert de matière et sur les modifications chimiques des matériaux des électrodes. Ils soulignent également que les matériaux de contact réagissent différemment aux cycles d'ouverture et de fermeture en fonction de la durée de l'arc, ce qui a des répercussions directes sur leur durabilité et leurs performances dans les applications électriques.



**Figure IV- 13 :** Images de microscopie à balayage électronique (MEB) & microanalyse par Energie Dispersion de rayons X (EDX) de la composition chimique des surfaces de contact à la fin de leur durée de vie (Pin=100W, D=5mm, materiau Aluminium).

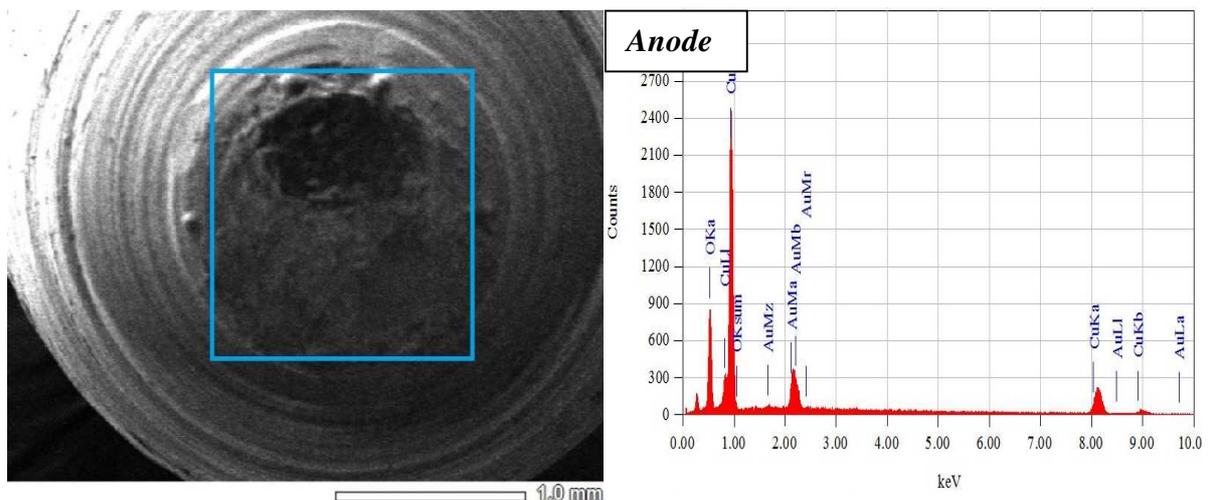
Les compositions en éléments des différentes zones comme illustré dans le tableau ci-dessous, fournissent un aperçu de la distribution des éléments chimiques au sein des zones impactées par l'arc électrique.

**Tableau IV- 3** : Composition chimique des différentes zones par rapport à la **figure IV- 13**

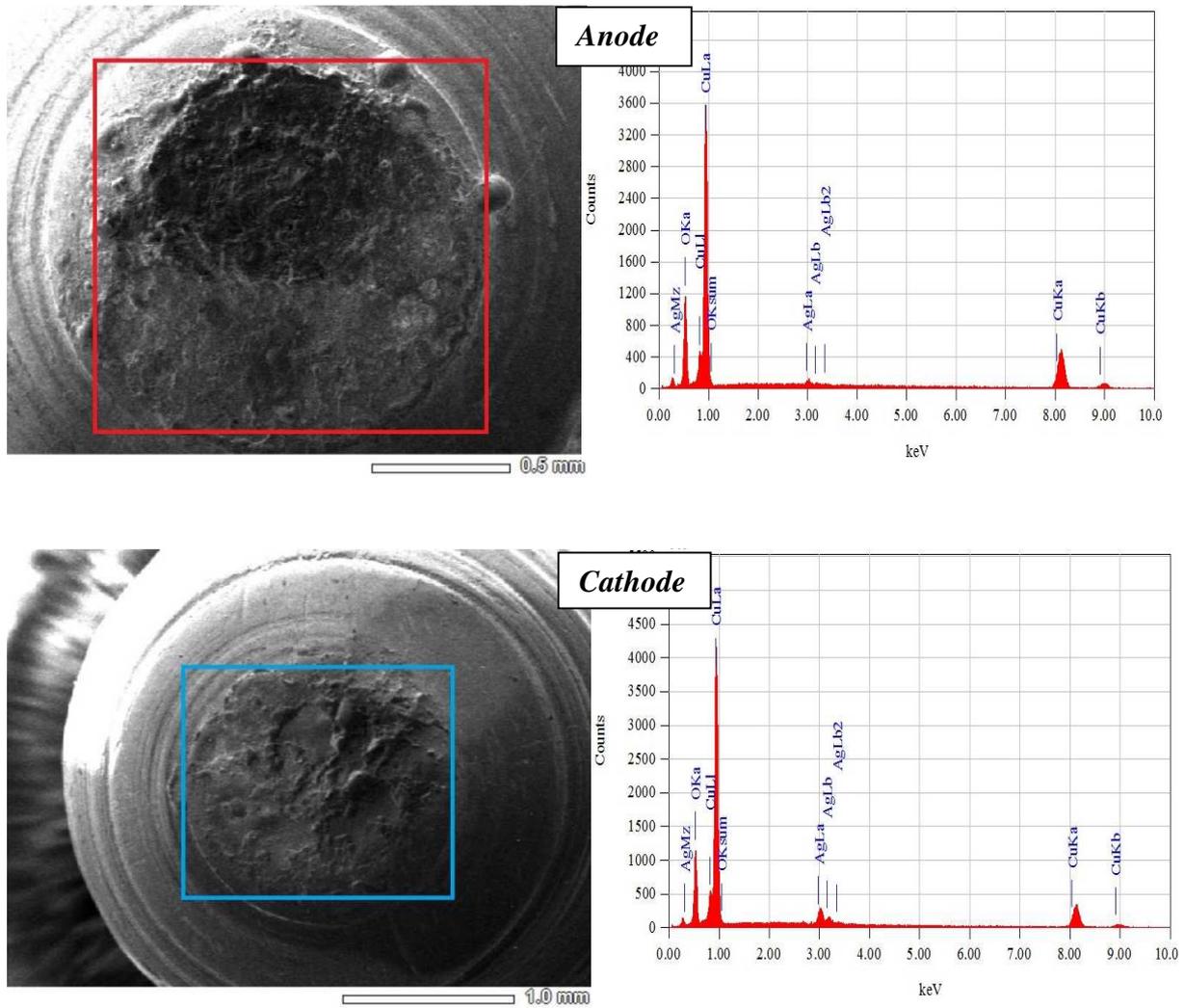
Contacts en Alu _D5 100W			
Anode %		Cathode %	
<b>O</b>	43.64	<b>O</b>	40.87
<b>Al</b>	56.36	<b>Al</b>	56.54
<b>Cu</b>	-	<b>Cu</b>	0.09
<b>Mn</b>	-	<b>Mn</b>	0.23
<b>Mg</b>	-	<b>Mg</b>	2.26

De manière similaire aux arcs créés entre les électrodes en aluminium, la composition chimique de l'interface de contact ne semble pas présenter de différences significatives par rapport au matériau précédent (cuivre). Le taux d'oxygène détecté est quasiment constant, autour de 43%, malgré un nombre plus important d'opérations d'ouverture/fermeture qui atteignent 1797 manœuvres.

Cela indique que même si le nombre de manœuvres augmente, la composition chimique de l'interface de contact reste relativement stable. Cependant, il est crucial de noter que d'autres paramètres et propriétés, tel que la résistance de contact et les altérations structurelles, pourraient subir des modifications significatives avec des cycles de fonctionnement plus longs.







**Figure IV- 15 :** Images de microscopie à balayage électronique (MEB) & microanalyse par Energie Dispersion de rayons X (EDX) de la composition chimique des surfaces de contact à la fin de leur durée de vie (Pin=256W, D=5mm, materiau Argent).

Les compositions en éléments des différentes zones sont résumées dans le tableau suivant.

**Tableau IV- 5 :** Composition chimique des différentes zones par rapport à la **figure IV- 15**

Contacts en Argent _D5 256W			
Anode		Cathode	
<b>O</b>	47.94	<b>O</b>	46.75
<b>Cu</b>	51.75	<b>Cu</b>	52,56
<b>Ag</b>	0.31	<b>Ag</b>	0.69

## **IV.6 CONCLUSION**

A travers les résultats et les analyses que nous avons menés dans ce travail, nous montrons ce que suit :

L'utilisation de la microscopie MEB était très importante et utile car les analyses ont donné des interprétations précieuses, qui nous ont aidés à discuter et à justifier nos résultats expérimentaux.

La dégradation des contacts utilisés pour les opérations d'ouverture/fermeture sous courant électrique est principalement due à une perte de masse lors des tests. Où nous avons constaté que le vieillissement par ouverture déforme fortement l'état de surface des échantillons sans modifier significativement leur composition chimique, chaque élément chimique de l'anode restant dans les mêmes proportions que celles de la cathode (cuivre, aluminium et laiton). Néanmoins, On observe que la cathode est légèrement dégradée morphologiquement par rapport à l'anode.

Quand les contacts vieillissent après un certain nombre d'arc où le courant ne passe plus, nous avons observé une quantité d'oxyde importante dans la zone où s'est produit l'arc, le pourcentage minimum d'oxyde enregistré était d'environ 40-45% pour les électrodes qui ont une conductivité électrique élevée. Par conséquent, Le laiton a enregistré le pourcentage le plus élevé vu ça résistance électrique qui est assez élevée.

Lorsque les échantillons subissent un certain nombre d'arc électrique atteignant un point où le courant ne passe plus, des observations approfondies de la surface des électrodes révèlent un taux d'oxyde significatif de 40-45% au minimum, quelque soit la nature de la puissance d'entrée (100/ 256Watts).

**REFERENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES  
DU CHAPITRE IV**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE IV

- [1] R. Holm, *Electric Contacts*, 4th ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1967, pp. 334-337.
- [2] L. Fechant, "*Le contact électrique: Phénomènes physique et matériaux*," Collection SEE. Paris, France: Hermes, 1997, p. 349.
- [3] F. Llwellyn-Jones, *The Physics of Electrical Contacts*. Oxford, U.K.: Clarendon, 1957.
- [4] N. Ben Jemaa, J. L. Queffelec, and R. Haug, "*Theoretical and experimental laws of anodic and cathodic arc duration on break at low electrical level*," J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 20, pp. 468-475, 1987.
- [5] N. Ben Jemaa, Member, IEEE, L. Morin, S. Benhenda, and L. Nedelec « *Anodic to Cathodic Arc Transition According to Break Arc Lengthening* ». iee transactions on components, packaging, and manufacturing technology—part a, vol. 21, no. 4, december 1998.
- [6] Alexandre Bonhomme, thèse doctorat mai 2005 « *Comportement à l'usure de pastilles de contacts électriques matrice argent* ». Centre des Matériaux P.M. Fourt de l'Ecole des Mines de Paris,
- [7] JEOL\_Product-Guide.pdf ; <https://www.jeol.com/products/scientific/sem/JSM-6610series.php>.
- [8] Frédéric Pons ; *Erosion suite à l'impact d'un arc électrique : Modélisation & Campagnes expérimentales en vue du développement d'un matériau de substitution à l'alliage AgCdO*. Thèse doctorat mai 2010 EMMA - Ecole Doctorale Energie - Mécanique - Matériaux.

# **CONCLUSION GENERALE**

## **CONCLUSION GENERALE**

L'objectif de cette thèse est d'étudier le comportement de l'arc électrique sous différentes puissances d'entrée faible et élevée ainsi que son interaction avec le changement de diamètre et de matériau des contacts. Cette étude a été réalisée à l'aide d'un banc d'essai expérimental que nous avons développé afin de simuler l'ouverture et la fermeture de contacts dans des conditions parfaitement contrôlées et similaires à celles observées dans les contacteurs réels. Grâce à ce travail, nous avons maintenant une bonne compréhension des conséquences des arcs électriques sur les contacts et les performances des matériaux de contact. Les conclusions sont récapitulées comme suite :

Durant les opérations d'ouverture et de fermeture des contacts électrique sous une puissance d'entrée, un arc électrique apparaît, ce phénomène pouvait être caractérisé par la mesure de sa durée, de la longueur et de son énergie,... etc.

La durée de vie des contacts électriques dépend de plusieurs paramètres tel que la longueur de l'arc, la durée de l'arc et l'énergie de l'arc. L'augmentation de l'un de ces paramètres engendre la dégradation de ces derniers par oxydation et l'isolation électrique des surface de contacts.

Utiliser des matériaux purs dotés de meilleures propriétés électriques et mécaniques pour les contacts électriques est une solution séduisante qui peut toutefois poser des problèmes importants. Bien que ces matériaux aient d'excellentes propriétés électriques peuvent être sujets à une usure excessive et à des transferts de matière importants lorsqu'ils sont soumis à des arcs électriques répétés. Cela peut conduire à une dégradation avancée et une perte d'intégrité structurale des points de contact.

Pour étendre la durée de vie des contacts, l'utilisation de matériaux revêtus est essentielles (dans notre étude, il s'agit de l'or et de l'argent), car ces deux matériaux ont une conductivité électrique extrêmement élevée. Cependant, le coût élevé des métaux nobles a limité leur utilisation.

Une autre solution pour améliorer la durabilité des contacts consiste à réduire le diamètre des électrodes, ce qui réduit l'ampleur de transfert de matière et des dégradations engendrées par l'arc électrique. Modifier la forme de la surface des contacts pour améliorer son utilisation est une approche intéressante. Toutefois, cela nécessite des recherches approfondies pour concevoir des géométries de surface qui maximisent la répartition du courant et minimisent l'accumulation de chaleur. En outre, ces modifications de forme peuvent être sensibles aux désalignements des contacts, ce qui exige une grande précision dans la conception et la fabrication des composants. Ces différentes stratégies visent à prolonger la vie utile des contacts et à optimiser leur performance.

L'anode qui représente souvent le contact fixe dans les dispositifs, est particulièrement sujette à des modifications morphologiques importantes. Ces dégradations sont dues aux fortes contraintes thermiques et mécaniques provoquées par la durée élevée de l'intensité de l'arc électrique lors de l'ouverture des contacts.

L'absence de modifications significatives dans la composition chimique indique que les changements observés sont principalement de nature structurelle. Les transferts de matière et les déformations de surface sont fortement dus à la fusion et à la solidification rapide des matériaux sous les effets de l'arc électrique ce qui provoque des déformations locales, des cavités et des dépôts de matière fondue. Ces observations mettent en évidence l'importance de la composition chimique et de la structure de la surface des électrodes dans le contexte des opérations d'ouverture et de fermeture des contacts. La persistance des oxydes et l'augmentation de la résistance de contact soulignent la nécessité de poursuivre les recherches visant à réduire les effets de l'oxydation et à améliorer les propriétés des électrodes afin de prolonger leur durabilité et leur efficacité dans des conditions de manœuvres répétées.

Le modèle numérique basé sur la théorie de la Magnétohydrodynamique (MHD) s'est avéré efficace pour calculer l'énergie du plasma électrique présent dans l'espace entre les électrodes, particulièrement en raison de la difficulté ou de la complexité des mesures directes. Cette approche théorique est utilisée pour résoudre des phénomènes physiques impliquant l'interaction entre les champs magnétiques et les fluides.

## **Résumé**

Les connecteurs électriques jouent un rôle crucial dans les systèmes électriques modernes, assurant la liaison et la transmission de courants électriques puissants entre divers composants. Dans les satellites, ils relient les panneaux solaires aux batteries et aux différents sous-systèmes. Dans les lanceurs, ils connectent les étages d'alimentation électrique. Dans les avions, les drones et les véhicules automobiles hybrides ou électriques, ils assurent la liaison entre les batteries et les moteurs électriques.

L'augmentation croissante de la puissance électrique dans les systèmes électriques modernes pose de nouveaux défis aux connecteurs. Les courants élevés génèrent une chaleur importante due à l'effet Joule, pouvant endommager les surfaces de contact par ramollissement ou fusion. De plus, la séparation des connecteurs volontaire ou involontaire, peut créer un arc électrique intense accélérant l'érosion, la corrosion et le transfert de matière entre les surfaces de contact, altérant irrémédiablement le fonctionnement du connecteur.

Cette recherche vise à analyser expérimentalement l'impact des arcs électriques sur les performances des connecteurs électriques. L'objectif principal est d'identifier les matériaux et les géométries de contact les plus résistants à l'érosion et à la dégradation causées par les arcs électriques.

Un banc d'essai expérimental a été développé pour simuler l'ouverture des contacts dans des conditions contrôlées, reproduisant fidèlement les conditions réelles d'utilisation. Ce banc permet d'appliquer des courants électriques précis et de mesurer les propriétés physiques des arcs générés, telles que la durée et la longueur de l'arc, énergie et la puissance de l'arc.... L'analyse MEB et le calcul numérique MHD à l'aide du logiciel Fluent nous ont permis d'analyser, de comprendre le phénomène d'arc et de confronter les résultats numériques avec les résultats expérimentaux.

Cette recherche apporte une contribution significative à la compréhension des mécanismes de dégradation des connecteurs électriques sous l'effet des arcs électriques. Les résultats obtenus permettront d'optimiser la conception et le choix des matériaux des connecteurs pour améliorer leur fiabilité et leur durabilité dans les environnements exigeants.

## **ABSTRACT**

Electrical connectors play a crucial role in modern electrical systems, ensuring the connection and transmission of powerful electrical currents between various components. In satellites, they link solar panels to batteries and other subsystems. In launchers, they connect the power supply stages. In airplanes, drones and hybrid or electric automobiles, they link batteries and electric motors.

The increasing power in modern electrical systems poses new challenges to connectors. High currents generate significant heat due to the Joule effect, which can damage contact surfaces by softening or melting them. Additionally, the separation of connectors, whether intentional or unintentional, can create intense electrical arcs, accelerating erosion, corrosion, and material transfer between contact surfaces, irreversibly affecting connector performance.

This research aims to experimentally analyze the impact of electrical arcs on the performance of electrical connectors. The main objective is to identify the most erosion and degradation-resistant materials and contact geometries caused by electrical arcs.

An experimental test bench has been developed to simulate contact opening under controlled conditions, faithfully reproducing real-world usage conditions. This bench allows for the application of precise electrical currents and the measurement of physical properties of generated arcs, such as arc's duration and length, arc's energy and power.... SEM analysis and MHD numerical calculation using Fluent software enabled us to analyze and understand the arc phenomenon and compare the numerical results with the experimental results.

This research makes a significant contribution to understanding the degradation mechanisms of electrical connectors under the influence of electrical arcs. The results obtained will help optimize the design and material selection of connectors to improve their reliability and durability in the demanding environments.

## الملخص

تلعب الموصلات الكهربائية دوراً حاسماً في الأنظمة الكهربائية الحديثة، حيث تضمن توصيل ونقل التيارات الكهربائية القوية بين المكونات المختلفة. في الأقمار الصناعية، تقوم بربط الألواح الشمسية بالبطاريات والأنظمة الفرعية الأخرى. وفي منصات الإطلاق، تقوم بتوصيل معدات الإمداد بالطاقة. وفي الطائرات والدرونات والسيارات ذات المحركات الهجينة أو الكهربائية، تقوم بتوصيل البطاريات والمحركات الكهربائية.

تشكل الطاقة الكهربائية المتزايدة باستمرار في الأنظمة الكهربائية الحديثة تحديات جديدة للموصلات. فالتيارات العالية تولد حرارة كبيرة بسبب تأثير جول، والتي يمكن أن تلحق الضرر بأسطح التلامس عن طريق التلدين أو الذوبان. بالإضافة إلى ذلك، يمكن أن يؤدي انفصال الموصلات، سواء كان انفصلاً إرادياً أو لا إرادياً، إلى حدوث قوس كهربائي شديد، مما يسرع من التآكل والصدأ. وانتقال المواد بين أسطح التلامس، مما يؤدي إلى تغيير تشغيل الموصل بشكل لا يمكن إصلاحه.

الهدف من هذا البحث هو التحليل التجريبي لتأثير القوس الكهربائي على أداء الموصلات الكهربائية. ويتمثل الهدف الرئيسي في تحديد المواد والأشكال الهندسية للتلامس الأكثر مقاومة للتآكل والتدهور الناتج عن الأقواس الكهربائية.

تم تصميم نموذج اختبار تجريبي وتطويره لمحاكاة فتح التلامس في ظل ظروف خاضعة للرقابة، مما يحاكي ظروف الحياة الواقعية بأمانة يمكن استخدام نموذج الاختبار هذا لتطبيق تيارات كهربائية دقيقة وقياس الخصائص الفيزيائية للأقواس المتولدة، مدة وطول القوس، وطاقة وقوة القوس مكننا تحليل والحساب العددي باستخدام برنامج من تحليل ظاهرة القوس وفهمها ومقارنة النتائج العددية بالنتائج التجريبية.

يقدم هذا البحث مساهمة كبيرة في فهم الآليات التي تتسبب من خلالها الأقواس الكهربائية في تدهور الموصلات الكهربائية. سيتم استخدام النتائج التي تم الحصول عليها لتحسين تصميم واختيار مواد الموصلات الكهربائية لتحسين اعتماديتها وصلابتها في البيئات الصعبة.