



HAL
open science

Étude de collage dans les contacteurs pour application aéronautique

Asma Ramzi

► **To cite this version:**

Asma Ramzi. Étude de collage dans les contacteurs pour application aéronautique. Electronique. Université Rennes 1, 2021. Français. NNT : 2021REN1S085 . tel-03609647

HAL Id: tel-03609647

<https://theses.hal.science/tel-03609647>

Submitted on 15 Mar 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE DE RENNES 1

ÉCOLE DOCTORALE N° 596

Matière, Molécules, Matériaux

Spécialité : Physique

Par

Asma RAMZI

Étude du Phénomène de Collage dans les Contacteurs à Application Aéronautique

Thèse présentée et soutenue à Rennes, le 13 décembre 2021

Unité de recherche : Institut de Physique de Rennes (IPR UMR 6251)

Rapporteurs avant soutenance :

Jean-Marie JOUVARD Professeur des Universités Université Bourgogne Franche-Comté

Patrick SCHWEITZER Maître de conférences (HDR) Université de Lorraine

Composition du Jury :

Président : Robert GEORGES

Examineurs : Jean-Marie JOUVARD

Patrick SCHWEITZER

Maryline GUILLOUX-VIRY

Christine BOURDA

Dir. de thèse : Erwann CARVOU

Professeur Université de Rennes 1

Professeur Université Bourgogne Franche-Comté

Maître de conférences (HDR) Université de Lorraine

Professeur Université de Rennes 1

Responsable R&D METALOR Technologies

Enseignant chercheur (HDR) Université de Rennes 1

Remerciement

Les travaux de cette thèse sont le fruit d'une collaboration entre l'Institut de Physique de Rennes et l'entreprise Safran Electrical & Power. Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de ce travail.

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de thèse Erwann Carvou pour son encadrement, son soutien, tous ses conseils et sa confiance en moi tout au long de cette thèse. Je remercie Alain Gautier qui m'a accordé sa confiance et son soutien durant les premiers mois avant son départ pour une nouvelle aventure. Je remercie Alexis Schach pour ces conseils et son soutien, je lui souhaite tout le succès pour l'avenir et je remercie également Moussa Chenani pour son soutien et sa disponibilité.

Je remercie également les membres du jury qui ont accepté à examiner ce travail et qui m'ont conseillé, Jean-Marie Jouvard, Patrick Schweitzer, Maryline Guilloux-Viry, Robert Georges et Christine Bourda.

Je tiens à exprimer ma gratitude à toutes les personnes avec lesquelles j'ai eu l'occasion de travailler à l'IPR et Safran Electrical & Power à Niort. Je remercie Jonathan Courbe, Jonathan Thievin, Francis, Nathalie Mabic, Amandine Poirier, Sébastien Dammam, Véronique Duvignau, Francisco Egea et Frédéric Laigle.

Je remercie l'ensemble du personnel permanent et non permanent (Thésards, post-docs et stagiaires) pour la bonne ambiance et la convivialité au laboratoire.

Je remercie infiniment tous mes amis et mon âme sœur pour leur soutien et pour les bons moments que nous avons partagé (voyages, sorties, repas, jeux...), je les remercie d'avoir coloré ma vie.

Enfin, un grand merci à tous les membres de ma famille Ramzi et Akchikchi pour leur soutien et leurs encouragements, les mots ne suffisent pas pour exprimer ma profonde gratitude.

Table des matières

REMERCIEMENT	2
Table des matières.....	3
LISTE DES FIGURES	6
LISTE DES TABLEAUX	9
INTRODUCTION GÉNÉRALE	11
CHAPITRE 1. GÉNÉRALITÉS SUR LES CONTACTS ÉLECTRIQUES L'ARC ÉLECTRIQUE ET ÉTAT DE L'ART SUR LA SOUDURE DYNAMIQUE	14
I. Introduction	15
II. Généralités sur les contacts électriques	15
1. Appareil de commutation : Les contacteurs de puissance.....	15
2. Contacts électriques	16
2.1. Aire de contact	17
2.1.1. Théorie de Hertz	17
2.1.2. Aire réelle du contact électrique	18
2.2. Résistance de contact	19
2.2.1. Cas de la constriction des lignes de courant : Modèle à un seul passage	20
2.2.2. Cas de la constriction des lignes de courant : Modèle à plusieurs passages	21
III. Arc électrique	24
1. Définition de l'arc électrique	24
2. Processus d'amorçage de l'arc	25
2.1. Amorçage par Claquage-loi de Paschen.....	25
2.2. Amorçage par d'autres phénomènes	26
2.3. Amorçage par explosion d'un pont fondu	27
3. Arc stationnaire	28
3.1. La colonne de l'arc	29
3.2. La zone cathodique	29
3.3. La zone anodique	30
4. Effets de l'arc sur les contacts électriques	31
4.1. Transfert de matière ou érosion des contacts.....	32
4.2. Augmentation de la résistance de contact	33
4.3. Soudure des contacts	34
IV. Soudure des contacts électriques à la fermeture	34
1. Soudure statique et dynamique	34
2. Paramètres influençant le comportement de la soudure	35
2.1. Caractéristiques de rebond mécanique : durée et amplitude	35
2.2. Énergie d'arc.....	37
2.3. Rugosité	38
2.4. Répulsion	38
2.5. Atmosphères.....	39
2.6. Type de charge	40
V. Comportement de la soudure en fonction de la nature des matériaux	41

1.	Généralités sur les matériaux des contacts	41
2.	Pseudo-alliage Argent	41
2.1.	AgSnO ₂	41
2.2.	Comparaison des matériaux composites : Argent-Oxydes métalliques.....	44
3.	Microstructure taille de grains et homogénéité de distribution de grains.....	47
4.	Forme des contacts électriques	49
VI.	Conclusion	50

CHAPITRE 2. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL 51

I. Introduction 52

II. Généralités sur l'électrification des avions..... 52

1.	Évolution de l'électrification des avions	52
2.	Fonctionnement d'un réseau électrique d'avion	55
3.	Distribution électrique d'avion : cœur électrique.....	56
4.	Contacteur	57

III. Caractérisation des rebonds mécaniques dans un contacteur de puissance 59

1.	Contexte et objectif	59
2.	Descriptif du dispositif expérimental	60
3.	Caractéristiques de rebond	63

IV. Dispositif expérimental du test de la soudure 66

1.	Objectif	66
2.	Principe de fonctionnement : Conception et dimensionnement /Composants du banc	67
3.	Partie opératoire	69
3.1.	Partie mécanique	69
3.2.	Dimensions du dispositif.....	70
3.3.	Moteur de séparation.....	70
3.4.	Piézoélectrique support / USB	71
4.	Partie électrique	73
4.1.	Schéma électrique	73
4.2.	Alimentation.....	74
4.3.	Contacteur de protection/ alimentation de laboratoire /driver	74
4.4.	Câbles	75
5.	Partie acquisition et pilotage	76
5.1.	Acquisition des données mécaniques	76
5.2.	Acquisition des données électriques.....	77
5.3.	Oscilloscope	77
5.4.	Pilotage PC : Programme LabVIEW.....	78
6.	Assemblage des échantillons	80

V. Conclusion..... 80

CHAPITRE 3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX..... 82

CARACTÉRISATION DE LA SOUDURE DYNAMIQUE ET DE L'ARC DE REBOND – ÉTUDE MÉTALLOGRAPHIQUE DES SURFACES DE CONTACTS 82

I. Introduction 83

II. Conditions de test 84

1.	Électrique et mécanique	84
----	-------------------------------	----

2.	Matériaux des contacts électriques.....	84
III.	Caractéristiques de la soudure des contacts	85
1.	Taux et force de soudure	85
2.	Vieillessement	88
2.1.	Diagrammes des effectifs cumulés de forces soudure à 50 Hz	89
2.2.	Diagrammes des effectifs cumulés de forces de soudure à 400 Hz.....	90
2.3.	Diagrammes des effectifs cumulés de forces soudure à 500 Hz.....	91
IV.	Caractéristiques de l'arc	92
1.	Durée de l'arc.....	92
1.1.	Approche numérique	92
1.2.	Mesure de la durée d'arc et du nombre de ré-allumage de l'arc.....	92
2.	Energie de l'arc	99
V.	Étude métallographique des contacts	103
1.	État initial des contacts électriques	103
2.	État de surface des contacts électriques après les tests de soudure	106
2.1.	Vue d'ensemble.....	106
2.2.	Contacts d'AgSnO ₂ non dopé.....	109
2.3.	Contacts d'AgSnO ₂ dopé en In ₂ O ₃	114
2.4.	Contacts d'AgSnO ₂ dopé en Bi ₂ O ₃	120
3.	Étude d'une seule soudure	127
3.1.	Cas de l'argent pur	127
3.2.	Cas d'AgSnO ₂ non dopé	129
VI.	Discussion	130
VII.	Conclusion	134
CHAPITRE 4. SIMULATION DES CARACTÉRISTIQUES DE L'ARC DE REBOND		
.....		135
I.	Introduction	136
II.	Choix du modèle d'arc	136
III.	Méthodologie	138
1.	Mode expérimental	138
2.	Caractéristiques statiques V(I) de l'arc	140
3.	Paramètres de modèle en fonction de la distance	141
4.	Simulation de l'arc de rebond	141
4.1.	Paramètres de test.....	141
4.2.	Comparaison entre la simulation et les mesures de courant et de tension de l'arc	142
5.	Distance inter-électrodes vs longueur d'arc	145
IV.	Conclusion	147
CONCLUSION GÉNÉRALE		148
BIBLIOGRAPHIES.....		151

Liste des figures

Figure 1 : Schéma d'un contacteur de puissance.....	16
Figure 2 : Contact ouvert – Contact fermé	17
Figure 3 : Aire de contact entre deux sphères sous l'action d'une force de contact F_c	18
Figure 4 : Schéma représentatif d'une aire de contact apparente, mécanique et électrique	19
Figure 5 : a) Surfaces équipotentielles et lignes d'écoulement de courant à proximité d'une constriction électrique. Le paramètre μ est l'axe vertical de la surface ellipsoïdale verticale. Les courbes correspondant aux lignes courantes identifient les limites entourant la fraction actuelle indiquée, b) Cylindre conducteur d'électricité de rayon R portant une constriction circulaire de rayon a [5]	20
Figure 6 : Résistance électrique de constriction[17]	21
Figure 7 : Comparaison des caractéristiques de puissance d'arc en fonction du temps, pour des contacts en Ag sous $42 V_{DC}$ et $20 A$, circuits résistif et inductif ($L=10mH$), vitesse d'ouverture $20 cm/s$ [14].....	25
Figure 8 : Courbe de Paschen [19]	26
Figure 9 : Séquence d'ouverture d'un contact électrique ; formation d'un pont fondu, sa rupture et la formation d'arc [6].....	27
Figure 10 : Exemple d'évolution de la tension aux bornes des contacts pendant le pont fondu, exemple pour des contacts en Ag, $40 A$, vitesse d'ouverture de $2 cm/s$ [22]	28
Figure 11 : Évolution du potentiel électrique dans un arc stationnaire	28
Figure 12 : Structure de la zone cathodique [22]	30
Figure 13 : Structure de la zone anodique [22]	31
Figure 14 : Modèle du transfert de matière entre les électrodes en fonction du gap d'extinction, d'après [5], [14].....	32
Figure 15 : Processus de soudure des contacts électriques sous un arc d'ouverture[11]	34
Figure 16 : Profil de force en cas de soudure [14]	35
Figure 17 : Force de soudure après des processus de rebond court et long, respectivement, en fonction du courant [9]	36
Figure 18 : Force de soudure en fonction de la durée d'arc [10].....	37
Figure 19 : Surface de contact électrique avant et après soudure [28]	38
Figure 20 : Force de répulsion F_r entre deux conducteurs en contact sous la force de contact F_s [40]	39
Figure 21 : a) Durée de l'arc selon l'intensité de courant pour différents gaz b) Durée de l'arc selon l'intensité de courant pour différentes pressions pour chacun des gaz [41].....	40
Figure 22 : Force de soudure en fonction de type de charge [31]	41
Figure 23 : Force de soudure pour les contacts d'AgCdO (15% d'oxyde) et AgSnO ₂ (12% oxyde) [50]	42
Figure 24 : a) Microstructure du matériau de contact électrique Ag-SnO ₂ . b) Microstructure du matériau de contact électrique Ag-SnO ₂ In ₂ O ₃ [52]	43
Figure 25 : a) Force de soudure en fonction du pourcentage de SnO ₂ [14]. b) La répartition des résistances de soudure en fonction de plage de force de soudure pour trois matériaux Ag SnO ₂ (15%, 20% et 22% d'oxyde métallique)[31].....	43
Figure 26 : Force de soudure en fonction de l'énergie [30]	45
Figure 27 : Distribution de Bi ₂ O ₃ (EDS) sur la section transversale après l'essai montrant la ligne concentrée de Bi ₂ O ₃ sur la surface de contact [30]	45
Figure 28 : Distribution de zinc après essai (EDS) montrant la couche de surface et les bulles de ZnO [30]	46
Figure 29 : a) Force de soudure à $4kA$. b) Force de soudure à $6kA$ [59]	47
Figure 30 : Microstructure de la surface de 14WPA (a) et du matériaux standard (b) après test de soudure. [60].....	48
Figure 31 : Formes des matériaux de contact : rivets et pastilles [14]	49
Figure 32 : Force de soudure en fonction du pourcentage de SnO ₂ . a) Pastilles. b) Rivets [14].....	49

Figure 33 : Le petit aérostat à hélice de M. Gaston Tissandier à l'exposition d'Électricité en 1881 [62]	53
Figure 34 : Évolution du besoin en énergie électrique (gris : court à moyen porteur ; noir : moyen à long porteur) [63]	54
Figure 35 : Répartition des puissances sur A380	54
Figure 36 : Architecture du circuit électrique de l'A380	55
Figure 37 : Boîtier de distribution électrique	56
Figure 38 : Exemple de contacteurs de différentes générations	57
Figure 39 : Schéma d'un contacteur monophasé utilisé en aéronautique	58
Figure 40 : Positionnement des pastilles de contacts électriques sur les shunts	59
Figure 41 : Les différents composants du banc expérimental pour la caractérisation des rebonds	60
Figure 42 : Schéma du dispositif de mesure de rebonds	61
Figure 43 : Emplacement de la caméra et les deux lasers par rapport au contacteur	62
Figure 44 : Exemple de traces de la tension aux bornes des contacts et de déplacement des contacts mobile et fixe lors de la fermeture	63
Figure 45 : Images prises par la caméra rapide : a) contact ouvert, b) premier contact avant le rebond, c) arc durant le rebond, d) contact fermé	64
Figure 46 : Déplacement des contacts mobile et fixe obtenu via l'imagerie rapide	64
Figure 47 : Soustraction des valeurs de la courbe d'ajustement de la vibration du système et les valeurs des mesures de déplacement du contact mobile	65
Figure 48 : Profil du rebond mécanique et son approximation	66
Figure 49 : a) Vitesse du rebond, b) Accélération du rebond	66
Figure 50 : Schéma de l'équipement d'essai pour étudier le phénomène de la soudure dans des conditions aéronautiques	68
Figure 51 : Étapes d'une opération mécanique du banc de test	68
Figure 52 : Dispositif expérimental : partie opératoire	69
Figure 53 : Emplacement de la partie mobile du banc de test sans et avec enceinte climatique	71
Figure 54 : Configuration de la partie fixe du banc de test	72
Figure 55 : a) Signal de la mise d'offset b) signal de rebond mécanique	73
Figure 56 : Schéma de la partie électrique du banc de test	73
Figure 57 : Schéma descriptif du dimensionnement de l'alimentation statique AC	74
Figure 58 : outils pour la commutation du contacteur de puissance utilisé pour ouvrir ou fermer le circuit de l'expérience	75
Figure 59 : Boîtiers Raccordement des charges et de la source	76
Figure 60 : Interface du programme LabVIEW	78
Figure 61 : Schéma synoptique du test	79
Figure 62 : a) Contact électrique brasé sur un shunt en cuivre b) le contact fixé sur un porte échantillon en PEEK c) contacts électriques montés sur le banc de test	80
Figure 63 : Taux de soudure en fonction du matériau et de la fréquence	86
Figure 64 : Nombre de cycles en fonction du matériau et de la fréquence	86
Figure 65 : Force moyenne et maximale de la soudure en fonction du matériau et de la fréquence	86
Figure 66 : Fréquences cumulées des soudures en fonction de la force correspondante pour les trois périodes du test (début, milieu et fin) à 50 Hz	89
Figure 67 : Fréquences cumulées de la soudure en fonction de la force correspondante pour les trois périodes du tests (début, milieu et fin) à 400 Hz	90
Figure 68 : Fréquences cumulées de la soudure en fonction de la force correspondante pour les trois périodes du tests (début, milieu et fin) à 500 Hz	91
Figure 69 : Durées d'arc maximales estimées pendant une demi-période de courant en fonction de la fréquence de la tension pour 115 Vrms point de passage du courant par zéro	92
Figure 70 : Durée d'arc de rebond à 50 Hz	93
Figure 71 : Durée d'arc de rebond à 400 Hz	94

Figure 72 : Durée d'arc de rebond à 500 Hz	94
Figure 73 : Exemple d'arc de rebond à 500 Hz /115Vrms/750Arms avec des contacts AgSnO ₂ dopé Bi ₂ O ₃ : réamorçage de l'arc durant le rebond mécanique de 2 ms	97
Figure 74 : Exemple d'arc de rebond à 500 Hz /115Vrms/750Arms avec des contacts AgSnO ₂ non dopé : réamorçage de l'arc trois fois durant le rebond mécanique de 2 ms.....	97
Figure 75 : Arc de rebond à 50 Hz /115Vrms/750 Arms avec des contacts AgSnO ₂ dopé Bi ₂ O ₃ : a) réamorçage de l'arc 2 fois b) un seul arc.....	98
Figure 76 : Energie de l'arc de rebond en fonction des cycles d'essai à 50 Hz.....	100
Figure 77 : Energie de l'arc de rebond en fonction des cycles d'essai à 400 Hz.....	101
Figure 78 : Energie de l'arc de rebond en fonction des cycles d'essai à 500 Hz.....	102
Figure 79 : Micrographies MEB - SE des surfaces des contacts électriques : a) AgSnO ₂ ; b) AgSnO ₂ dopé In ₂ O ₃ ; c) AgSnO ₂ dopé Bi ₂ O ₃ avec un grandissement X1000. Micrographies MEB-BSE des coupes transversales des contacts électriques : d) AgSnO ₂ ; e) AgSnO ₂ dopé In ₂ O ₃ ; f) AgSnO ₂ dopé Bi ₂ O ₃ avec un grandissement X5000.....	104
Figure 80 : Analyse EDS de la surface d'un contact neuf d'AgSnO ₂ non dopé.....	105
Figure 81 : Analyse EDS de la surface d'un contact neuf d'AgSnO ₂ dopé en In ₂ O ₃	105
Figure 82 : Analyse EDS de la surface d'un contact neuf d'AgSnO ₂ dopé en Bi ₂ O ₃	105
Figure 83 : Analyse EDS d'une coupe de contact neuf d'AgSnO ₂ dopé en Bi ₂ O ₃	106
Figure 84 : Vue d'ensemble des contacts électriques après les tests des arcs de rebond	108
Figure 85 : Surface de contact d'AgSnO ₂ ayant subi des arcs de rebond à 50 Hz sous 115Vrms et 750 Arms à différents grossissements : a) X25 et b) X100.....	109
Figure 86 : Analyse EDS de la surface de contact d'AgSnO ₂ non dopé ayant subi des arcs de rebond à 50 Hz sous 115Vrms et 750 Arms.....	110
Figure 87 : Surface de contact d'AgSnO ₂ ayant subi des arcs de rebond à 400 Hz sous 115Vrms et 750 Arms : a) X100 et b) X1000.....	110
Figure 88 : Analyse EDS de la surface de contact d'AgSnO ₂ ayant subi des arcs de rebond à 400 Hz sous 115Vrms et 750 Arms	111
Figure 89 : Surface de contact d'AgSnO ₂ ayant subi des arcs de rebond à 500 Hz sous 115Vrms et 750 Arms a) grandissement X100 b) grandissement X1000.....	112
Figure 90 : Analyse MEB en mode BSE de coupe de contact d'AgSnO ₂ ayant subi des arcs de rebond à 500 Hz sous 115Vrms et 750 avec un grandissement X1000 : a) au niveau d'une zone perturbée par les tests b) au niveau de la fracture d'une forte soudure >100N	113
Figure 91 : Analyse EDS de la surface de contact d'AgSnO ₂ ayant subi des arcs de rebond à 500 Hz sous 115Vrms et 750 Arms	114
Figure 92 : Surface de contact d'AgSnO ₂ dopé en In ₂ O ₃ ayant subi des arcs de rebond à 50 Hz sous 115Vrms et 750 Arms, avec un grandissement X25	115
Figure 93 : Analyse EDS de la surface de contact d'AgSnO ₂ dopé en In ₂ O ₃ ayant subi des arcs de rebond à 50 Hz sous 115Vrms et 750 Arms -phénomène de ségrégation d'oxyde métallique	116
Figure 94 : Surface de contact d'AgSnO ₂ dopé en In ₂ O ₃ ayant subi des arcs de rebond à 400 Hz sous 115Vrms et 750 Arms, avec un grandissement X100	117
Figure 95: Analyse EDS de la surface de contact d'AgSnO ₂ dopé en In ₂ O ₃ ayant subi des arcs de rebond à 50 Hz sous 115Vrms et 750 Arms -phénomène de ségrégation d'oxyde métallique	118
Figure 96 : Surface de contact d'AgSnO ₂ dopé en In ₂ O ₃ ayant subi des arcs de rebond à 500 Hz sous 115Vrms et 750 Arms, avec un grandissement X100	119
Figure 97 : Analyse EDS de la surface de contact d'AgSnO ₂ dopé en In ₂ O ₃ ayant subi des arcs de rebond à 500 Hz sous 115Vrms et 750 Arms - phénomène de ségrégation d'oxyde métallique	120
Figure 98 : Surface de contact d'AgSnO ₂ dopé en Bi ₂ O ₃ ayant subi des arcs de rebond à 50 Hz sous 115Vrms et 750 Arms – zone de fracture d'une soudure a) Grandissement X20 b) Grandissement X50	121
Figure 99 : Analyse EDS de la surface de contact d'AgSnO ₂ dopé en Bi ₂ O ₃ ayant subi des arcs de rebond à 50 Hz sous 115Vrms et 750 Arms - phénomène de ségrégation d'oxyde métallique	122

Figure 100 : Surface de contact d'AgSnO ₂ dopé en Bi ₂ O ₃ ayant subi des arcs de rebond à 400 Hz sous 115Vrms et 750 Arms, avec un grandissement X100	123
Figure 101 : Analyse EDS de la surface de contact d'AgSnO ₂ dopé en Bi ₂ O ₃ ayant subi des arcs de rebond à 400 Hz sous 115Vrms et 750 Arms - phénomène de ségrégation d'oxyde métallique	124
Figure 102 : Surface de contact d'AgSnO ₂ dopé en Bi ₂ O ₃ ayant subi des arcs de rebond à 500 Hz sous 115Vrms et 750 Arms, avec un grandissement X100	125
Figure 103 : Analyse de contact d'AgSnO ₂ dopé en Bi ₂ O ₃ ayant subi des arcs de rebond à 500 Hz sous 115Vrms et 750 Arms : a) surface, avec un grandissement X2500 b) coupe avec un grandissement X1000	125
Figure 104 : Analyse EDS de la surface de contact d'AgSnO ₂ dopé en Bi ₂ O ₃ ayant subi des arcs de rebond à 500 Hz sous 115Vrms et 750 Arms	126
Figure 105 : Surface des contacts d'argent pur après avoir subi un seul arc, avec un grandissement X60 : a) mobile b) fixe	127
Figure 106 : Modèle de chevauchement ; As = surface de la zone de contact, Am1, Am2 = zones fondues de contacts, A0 = zone de chevauchement des zones fondues [81]	128
Figure 107 : Zoom sur une des zones d'arrachement de soudure sur le contact fixe avec un grossissement X600	128
Figure 108 : Surface des contacts mobile et fixe d'AgSnO ₂ non dopé après avoir subi un seul arc a) contact mobile en SE, b) contact fixe en SE, c) contact mobile en BSE, b) contact fixe en BSE	129
Figure 109 : Tracé radar de l'erreur en Volt entre les mesures de tension et la tension calculée avec les équations d'ajustement pour les matériaux Ag, Au, Cu, C, W [94]	137
Figure 110 : Banc de test des arcs d'ouverture	138
Figure 111 : Exemple d'arc statique pour : d= 1 mm ; UDC= 220V ; I= 6A	139
Figure 112 : Caractéristiques statiques de l'arc à différentes distances et lignes de charge pour 220V _{DC} pour différents courants	140
Figure 113 : Paramètres α et β du modèle en fonction de la distance inter-électrodes	141
Figure 114 : Schéma de principe du programme de la simulation d'arc	143
Figure 115 : Mesures et simulation de courant et de tension d'arc de rebond en fonction du déplacement de contact avec une fréquence de 50 Hz : Exemple de 2 allumages	144
Figure 116 : Mesures et simulation de courant et de tension d'arc de rebond en fonction du déplacement de contact avec une fréquence de 500 Hz : Exemple de 2 allumages	144
Figure 117 : Mesures et simulation de courant et de tension d'arc de rebond en fonction du déplacement de contact avec une fréquence de 500 Hz : Exemple de 3 allumages	145
Figure 118 : Mesure de la longueur d'arc et de la distance inter-électrodes pour un courant de circuit de 10 A et une tension de 220 V _{DC}	146
Figure 119 : Distance inter-électrodes vs longueur d'arc pour une tension de circuit de 220 V _{DC}	146
Figure 120 : Images d'arcs statiques à différentes distances inter-électrodes pour un courant de circuit de 10 A et une tension de 220 V _{DC}	147

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tensions et températures critiques pour différents matériaux de contact [5] [6]	24
Tableau 2 : Caractéristiques des métaux	24
Tableau 3 : Températures de fusion et d'ébullition de différents oxydes	44
Tableau 4 : Conditions électriques et mécaniques de test des arcs de rebond	84
Tableau 5 : Matériaux des contacts électriques utilisés dans les tests de soudure	85
Tableau 6 : Caractéristiques de l'arc et force de soudure pour les contacts d'argent pur	127
Tableau 7 : Caractéristiques de l'arc et la force de soudure pour les contacts d'AgSnO ₂	129
Tableau 8 : Tableau : récapitulatif des résultats sur l'étude de la soudure	133
Tableau 9 : Paramètres de test -Arc Statique	139

Introduction Générale

Au cours des dernières décennies, il y a eu un mouvement croissant vers des avions plus électriques (More Electric Aircraft) provenant de la nécessité d'améliorer la fiabilité des avions et d'optimiser leur durée de vie. Actuellement, ce mouvement s'étend vers un nouveau concept (All Electric Aircraft) qui consiste en l'électrification de tous les différents composants de l'avion, y compris les composants pneumatiques et hydrauliques, afin d'améliorer le rendement, d'avoir une maintenance d'avion plus aisée et de diminuer les émissions de CO₂ [1]–[3]. Les réseaux électriques des avions doivent s'adapter à des puissances de fonctionnement toujours plus importantes [4]. La fiabilité, et donc la sûreté de ces composants doivent pouvoir suivre ces changements. En particulier, les contacteurs qui sont des éléments très importants pour le bon fonctionnement des réseaux électriques de l'avion. Ils doivent assurer la coupure et la mise sous tension pour permettre une reconfiguration fiable du réseau électrique dans toutes les conditions d'utilisation de l'avion notamment les cas de défauts. Cette reconfiguration permet d'utiliser la redondance des sources et des charges disponibles et donc d'atteindre les objectifs de disponibilité des barres de distribution primaire. Cette disponibilité est un élément important pour la sécurité de l'avion.

Un phénomène important pouvant mettre en cause la fiabilité de ces contacteurs est la soudure des contacts électriques. En effet, toute coupure sous charge d'un circuit électrique produit un arc électrique, susceptible d'éroder et d'endommager les électrodes [5], [6]. Dans le cas de la fermeture du contact, des rebonds mécaniques se produisent, entraînant l'apparition d'un arc qui, si les contacts sont refermés sur des zones fondues par ces arcs, peut entraîner la soudure des contacts, empêchant ainsi le bon fonctionnement du contacteur [5]–[7]. Cet arc de fermeture, ainsi que les mécanismes exacts de son interaction avec les électrodes, sont encore mal compris.

L'objectif de cette thèse est de mieux comprendre les mécanismes en jeu afin de pouvoir comparer les performances de différents matériaux sur l'aspect de la soudure dynamique des contacts sans avoir à fabriquer et tester de nombreux contacteurs. Cela permettra d'optimiser les paramètres des contacteurs pour chaque matériau.

Les phénomènes de la soudure dynamique des contacts ont été régulièrement étudiés mais les paramètres évalués ont été centrés sur les besoins industriels et les matériaux existants [8]–[11]. Ces études n'ont pas permis de développer des modèles analytiques suffisamment complets pour pouvoir modéliser le comportement des matériaux soumis à des fermetures de contacts en

court-circuit. Les besoins aéronautiques correspondant à des valeurs de paramètres spécifiques (le niveau de tension et courant, la fréquence de la tension etc.) n'ont pas ou très peu été étudiés.

Cette étude complète une longue expérience de l'équipe Contacts Électriques de l'Institut de Physique de Rennes dans le domaine de l'arc de commutation et de ses conséquences, en particulier la soudure entre les contacts mobiles et fixes pouvant se produire durant la phase de fermeture. En effet, de nombreuses thèses ont été effectuées sur ce sujet depuis de nombreuses années [11]–[14]. Ces études ont, jusqu'à maintenant, été menées dans le domaine automobile sous différentes conditions, c'est-à-dire pour une tension de quelques dizaines de volts et une intensité de quelques centaines d'ampères, pour des pseudo alliages d'argent mais surtout pour un courant continu.

Les travaux de cette thèse sont réalisés en collaboration avec l'entreprise Safran Electrical & Power. L'objectif est d'étudier l'impact des conditions aéronautiques qui ne sont pas couvertes dans l'état de l'art, notamment l'effet de la fréquence sur la soudure des contacts électriques et les paramètres de l'arc de rebond.

Pour exposer cette recherche, le manuscrit a été structuré en quatre chapitres.

Le premier chapitre sera consacré à une étude bibliographique permettant de mettre en évidence les contacts électriques, les phénomènes physiques généraux sous-jacents à l'arc électrique et finalement le phénomène de soudure dynamique des contacts électriques et le comportement des matériaux de contact sur cet aspect soudure.

Le deuxième chapitre présentera dans un premier temps l'étude effectuée pour la caractérisation des rebonds mécaniques produits dans un contacteur, dans un second temps, le descriptif du dispositif expérimental conçu et réalisé dans le laboratoire permettant d'étudier les caractéristiques de l'arc de rebond et de la soudure sous des conditions contrôlées.

Le troisième chapitre présentera les résultats des tests de soudure des contacts réalisés avec une tension de 115Vrms et un courant de 750Arms pour trois fréquences 50 Hz, 400 Hz et 500 Hz. Ce chapitre est composé de trois parties, la première partie présente les résultats sur les caractéristiques de la soudure (taux et force de soudure), la deuxième partie présente les caractéristiques de l'arc : la durée de l'arc, l'énergie de l'arc. La dernière partie est consacrée à une description de la microstructure (MEB, EDS) des contacts électriques après fonctionnement ainsi qu'à une approche théorique qui permettra d'étudier la soudure à partir d'un seul rebond.

Le quatrième chapitre présentera la modélisation des caractéristiques électriques de l'arc de rebond. L'accent est mis sur l'identification des paramètres du modèle à partir des données expérimentales des arcs statiques pour différentes distances inter-électrodes. La pertinence du modèle a été évaluée par la prédiction des caractéristiques des arcs de rebond.

Chapitre 1. Généralités sur les Contacts Électriques l'Arc Électrique et État de l'Art sur la Soudure Dynamique

I. Introduction

Dans un réseau électrique d'avion, un contacteur est un dispositif électromécanique destiné à établir ou couper le courant électrique en garantissant une bonne marche de ce réseau dans toutes les conditions d'utilisation de l'avion notamment les cas de défauts. Le bon fonctionnement de contacteur représente une des exigences pour maintenir la sécurité du transport aérien à son plus haut niveau. Les contacts électriques sont les pièces de liaison d'un contacteur, ainsi, leurs performances influencent directement la fiabilité des contacteurs.

Le phénomène de la soudure produit pendant la fermeture des contacts compte parmi les modes de défaillance les plus importants qui affecte la vie d'un contacteur, cela pouvant se produire à cause des arcs de rebonds. Les caractéristiques de la soudure peuvent être influencées par plusieurs paramètres tels que la nature des matériaux, le niveau de courant, la tension du circuit, le type de charge, les paramètres de rebond mécanique lors du contact, les caractéristiques de l'arc, la force de contact, etc.

Ce premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les différents aspects que nous allons aborder dans la suite de notre étude. Dans un premier temps, nous allons présenter des généralités sur les contacts électriques et les arcs électriques, cette partie vise à dégager une compréhension des phénomènes physiques qui peuvent avoir lieu au niveau des contacts électriques. Dans un deuxième temps, nous allons présenter un aperçu sur la soudure indésirable des contacts électriques et l'effet de la nature des matériaux des contacts sur ce phénomène.

II. Généralités sur les contacts électriques

1. Appareil de commutation : Les contacteurs de puissance

Un contacteur de puissance à application aéronautique est un dispositif électromagnétique qui permet d'établir, de supporter et d'interrompre un courant suivant une commande à distance. La différence entre un contacteur et un relais réside dans le niveau de tension et de courant de commutation. Généralement, les relais sont utilisés pour de faibles puissances tandis que les contacteurs sont utilisés pour des puissances plus fortes. Le contacteur se compose d'un moteur à électroaimant (noyau et bobine), de contacts principaux (contacts mobiles et fixes) et de contacts auxiliaires (figure 1). Lorsque sa bobine est alimentée par un courant continu de 5 A et 28 V, appelé courant d'appel, elle excite le noyau qui attire les contacts mobiles et les contacts auxiliaires. Par la suite, la bobine reste alimentée avec un

courant 10 fois plus faible que le courant d'appel, appelé courant de maintien. Ses contacts principaux sont prévus pour supporter un courant élevé par rapport à ceux d'un relais, les contacts auxiliaires, quant à eux, sont liés mécaniquement aux contacts de puissance, ils servent à indiquer la position des contacts de puissance, à signaler que l'appareil est déclenché suite à un court-circuit, etc.

Généralement, il existe deux types de contacteurs, les NO pour « Normaly Open » et NC pour « Normaly Close », dépendant de leur état en l'absence de commande.

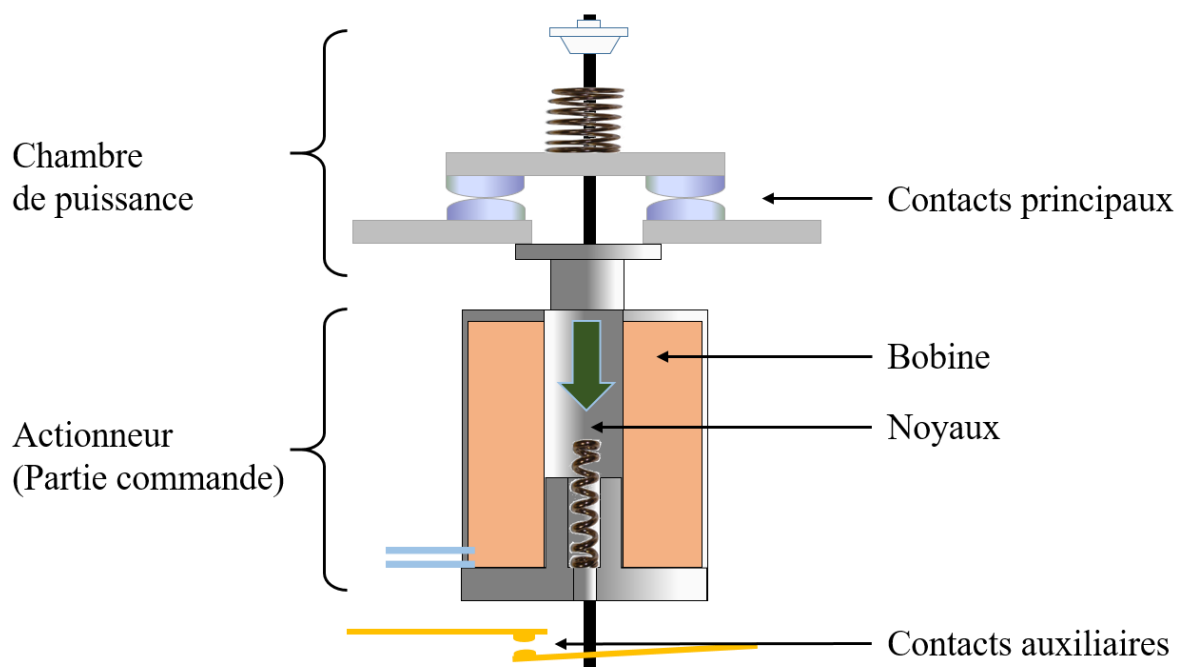


Figure 1 : Schéma d'un contacteur de puissance

Dans un réseau électrique d'avion, les contacteurs se situent généralement dans un boîtier de distribution électrique appelé cœur électrique, qui permet de gérer toute l'énergie électrique de l'avion. Chaque cœur électrique contient plusieurs dizaines de contacteurs.

2. Contacts électriques

Les contacts électriques sont très importants dans les circuits électriques et électroniques, leur fonction est d'assurer la continuité des circuits que ce soit pour la distribution de l'énergie électrique ou pour la transmission d'information. Malgré la simplicité de ces fonctions, la fiabilité des contacts est régie par les mêmes phénomènes fondamentaux, le plus important étant la dégradation de leurs surfaces et les changements associés de résistance de contact, de niveau de courant et tension, de température et d'autres paramètres d'un contact. Le contact électrique se caractérise par sa résistance électrique de contact, sa résistance à

l'érosion, sa résistance à l'oxydation. Les contacts électriques peuvent être classés en fonction de plusieurs paramètres tels que leur nature, la géométrie de leur surface, leur cinématique ainsi que leur application, etc. [5], [6]. En général, les contacts électriques peuvent être divisés en trois catégories de base : permanent (soudure, vissé), semi permanent (connecteur), non permanent (contacteur, relais, ...)

Les contacts électriques représentent les éléments principaux dans un contacteur, ils se ferment mécaniquement avec une certaine force pour permettre le passage d'un courant électrique. La figure 2 présente un schéma d'une paire de contact dans une position d'ouverture et de fermeture.

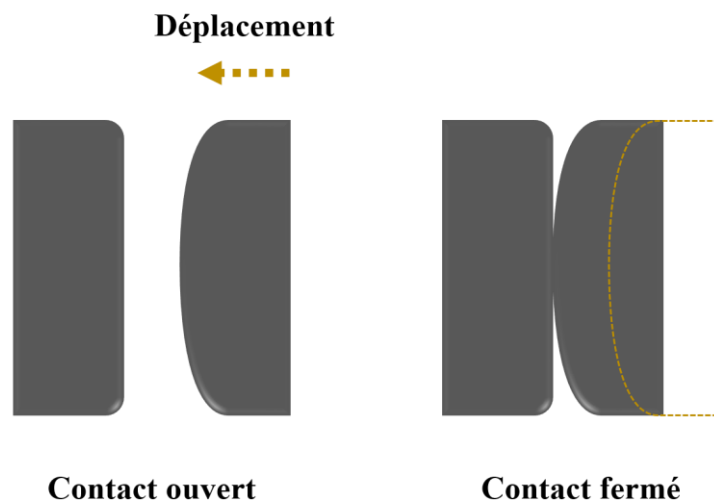


Figure 2 : Contact ouvert – Contact fermé

2.1. Aire de contact

2.1.1. Théorie de Hertz

La théorie de Hertz est un modèle permettant de calculer la surface de contact. Le contact de Hertz se réfère aux contraintes localisées qui se développent lorsque deux surfaces viennent en contact et se déforment légèrement sous l'action des forces appliquées (figure 3). Pour évaluer l'aire de contact, pour deux sphères métalliques de rayons R_1 et R_2 , de modules d'Young E_1 et E_2 et de coefficients de Poisson ν_1 et ν_2 , en contact élastique et soumises à une force F_c . Le degré de déformation dépend de l'élasticité du matériau en contact [15].

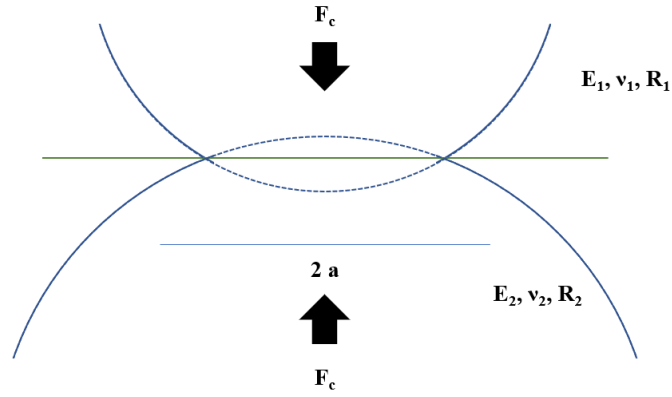


Figure 3 : Aire de contact entre deux sphères sous l'action d'une force de contact F_c

Dans le cas d'un contact entre sphère, le calcul de l'aire de contact de rayon R_{eq} et de module d'Young E_{eq} sur un plan infini se fait en partant des relations suivantes :

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

et

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

Le calcul réalisé par Hertz est [15] :

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

À partir des éléments des équations 1, 2 et 3, on déduit alors l'aire de contact apparente (idéale)

A :

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

2.1.2. Aire réelle du contact électrique

À l'échelle microscopique, les surfaces des solides sont rugueuses, par conséquent, les surfaces des deux contacts ne se touchent pas parfaitement lors du contact, le contact mécanique ne se fait qu'en un certain nombre d'îlots, où la contrainte d'interface n'est pas nulle, appelée « aire

de contact mécanique ». La surface se constitue d'une couche superficielle d'oxyde ou d'autres contaminants, par conséquent, les aspérités pénètrent cette couche et créent des chemins conducteurs, les aires de contact électrique résultants sont appelées « contacts élémentaires » ou « spots de conduction » (figure 4) , leur nombre et taille dépendent de plusieurs paramètres tels que la force de contact appliquée, les caractéristiques mécaniques des matériaux (dureté, élasticité et plasticité) et l'état de la surface (rugosité, contamination des surfaces). Cette microrugosité représente les défauts micro géométriques de la surface, ses caractéristiques dépendent entre autres des détails fins du processus de traitement de surface [5].

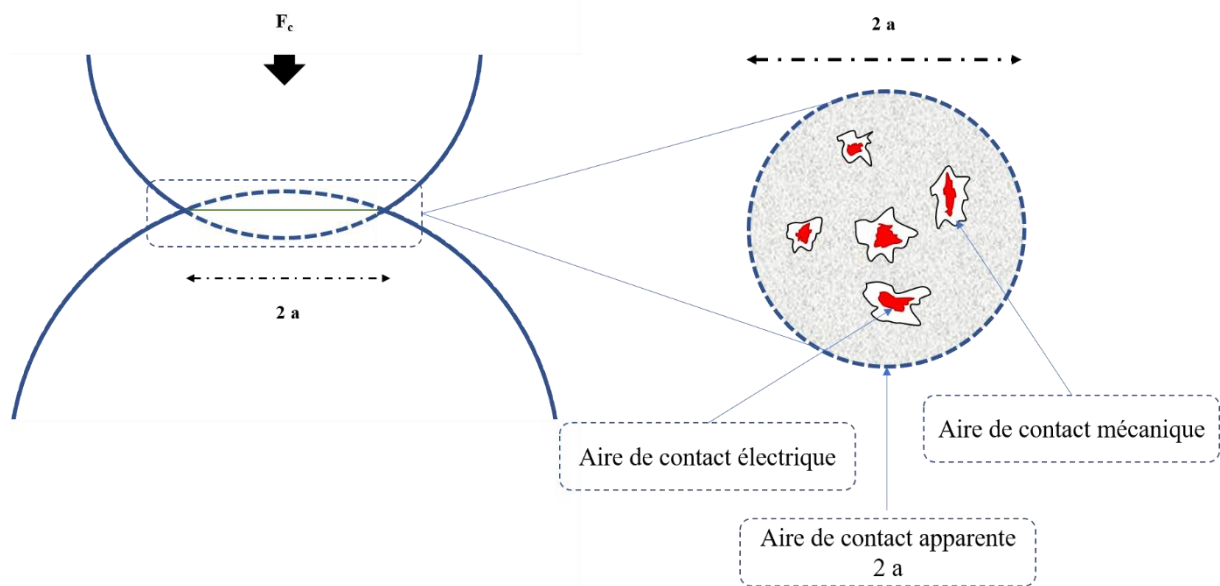


Figure 4 : Schéma représentatif d'une aire de contact apparente, mécanique et électrique

2.2. Résistance de contact

Le courant électrique traverse les zones de contact réel. Ainsi, les lignes de courant électrique se resserrent pour pouvoir passer à travers les a-spots, ce phénomène conduit à une résistance supplémentaire appelé résistance de constriction qui s'ajoute à la résistance ohmique du conducteur. La résistance ohmique R_{ohm} d'un barreau conducteur, dépend de sa section S , de la longueur l et de la résistivité du matériau. Elle est exprimée comme suit :

$$R_{ohm} = \rho \frac{l}{S} \quad (5)$$

où ρ est la résistivité du matériau, l est la longueur et S la section transversale du conducteur.

2.2.1. Cas de la constriction des lignes de courant : Modèle à un seul passage

Dans le cas d'une constriction des lignes de courant entre conducteurs de dimensions infinies et séparés d'une distance infinitésimale (figure 5), les ligne de courant sont de forme hyperbolique et les équipotentielles de forme ellipsoïdales. La densité de courant est la plus importante en périphérie du disque, où μ est la longueur du demi-axe vertical de l'ellipsoïde et (r, z) sont des coordonnées cylindriques (figure 5). Holm a établi en utilisant les lois de l'électrostatique, la résistance de constriction pour une zone de profondeur comprise entre 0 et Z , la relation suivante [5]:

$$R_{const} = \frac{\rho}{2\pi a} \arctan\left(\frac{Z}{a}\right) \quad (6)$$

avec ρ la résistivité du matériau, a le rayon de l'aire de contact et Z égal à $\sqrt{\mu}$.

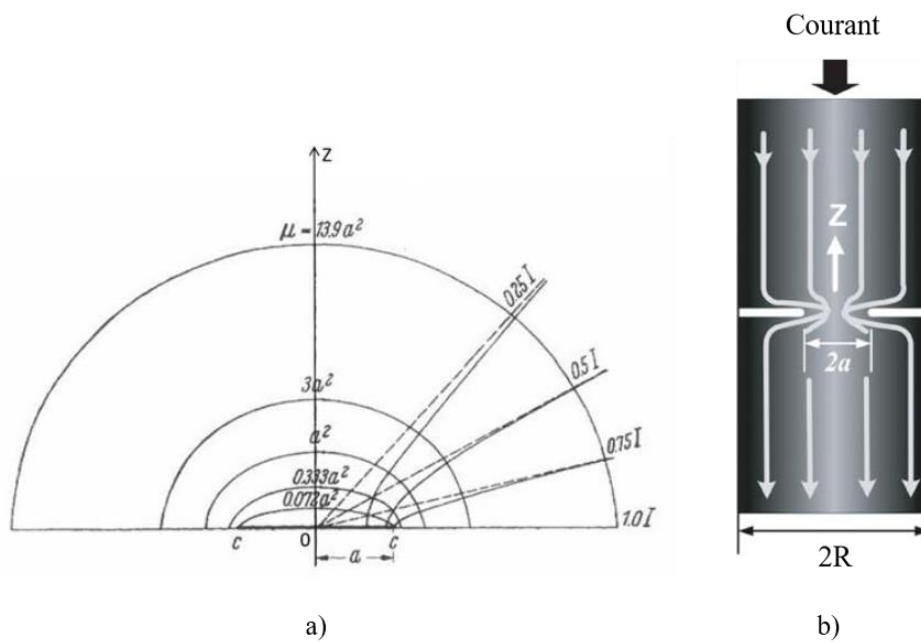


Figure 5 : a) Surfaces équipotentielles et lignes d'écoulement de courant à proximité d'une constriction électrique. Le paramètre μ est l'axe vertical de la surface ellipsoïdale verticale. Les courbes correspondant aux lignes courantes identifient les limites entourant la fraction actuelle indiquée, b) Cylindre conducteur d'électricité de rayon R portant une constriction circulaire de rayon a [5]

Pour $Z \gg a$, $\arctan\left(\frac{Z}{a}\right)$ tend vers $\frac{\pi}{2}$, on obtient pour un seul contact la relation suivante :

$$R_{const} = \frac{\rho}{4a} \quad (7)$$

et pour la constriction totale, incluant les deux contacts, on obtient :

$$R_{const} = \frac{\rho}{2a} \quad (8)$$

avec ρ la résistivité du matériau de contact.

Si le contact se fait entre deux types de matériaux différents, la relation de Holm devient :

$$R_{const} = \frac{\rho_1 \rho_2}{2a} \quad (9)$$

avec ρ_1 et ρ_2 représentant successivement les résistivités du matériau de contact 1 et du matériau de contact 2.

2.2.2. Cas de la constriction des lignes de courant : Modèle à plusieurs passages

Comme évoqué précédemment, à l'échelle microscopique les surfaces ne sont jamais parfaitement lisses (figure 6). À cause de cette rugosité de surface, le contact réel entre deux conducteurs se produit uniquement au niveau des aspérités (a-spots) des surfaces en contact. Greenwood et Tripp [16] [17] ont effectué des travaux sur ce sujet.

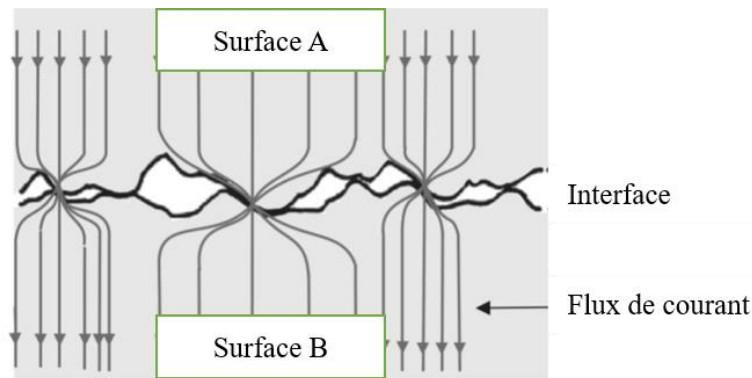


Figure 6 : Résistance électrique de constriction[17]

La taille réduite des îlots de contact mécanique entraîne des contraintes de compression élevées et ces îlots deviennent par conséquent entièrement plastifiés. Supposant que les surfaces en contact sont parfaitement propres, si les spots sont suffisamment éloignés les uns des autres pour ne pas interagir, la résistance globale de contact R_c^* peut être modélisée par un ensemble de résistances de constriction R_p en parallèle :

$$\frac{1}{R_c^*} = \sum_p \frac{1}{R_p} \quad (10)$$

Le calcul exact qui tient compte de l'interaction entre les spots, ne peut en principe pas se faire de façon analytique.

Cependant, il est possible de formuler des expressions approchées dans certains cas. Holm a calculé la résistance pour un ensemble de N spots de même rayons r uniformément répartis sur une aire apparente de rayon [5] :

$$R_c^* = \frac{\rho}{2 \cdot N \cdot r} + \frac{\rho}{2a} \quad (11)$$

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

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

et un terme d'interaction :

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

Greenwood calcule dans ses travaux [18] la résistance pour un contact constitué de spots circulaires de rayons différents r_i distants les uns des autres d'une distance d_{ij} , dans l'hypothèse où les spots conducteurs sont loin les uns des autres.

Dans le cas où la taille des spots est indépendante de leur position, l'équation est :

$$R_c^* \approx \frac{\rho}{2 \sum r_i} + \frac{\rho}{\pi \cdot N^2} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \quad (12)$$

2.2.2.1. Relation de Kohlrausch

Le passage du courant à travers les striction engendre un échauffement important par effet Joule au niveau des zones de constriction. Kohlrausch a montré qu'il est possible d'établir une relation entre la chute de tension aux bornes des contacts V_c et la température de striction T, par la relation suivante :

$$V_c \cdot dV_c = \lambda \cdot \rho \cdot dT \quad (13)$$

V_c : tension aux bornes des contacts.

λ : conductivité thermique.

ρ : résistivité électrique.

T : température.

2.2.2.2. Loi Wiedemann-Franz

La résistivité électrique ρ ainsi que la conductivité thermique λ des métaux sont associées à la mobilité des électrons. La relation entre ces deux grandeurs est donnée par la relation suivante :

$$\lambda \cdot \rho = L \cdot T \quad (14)$$

L : coefficient de Lorenz ($L=2,45 \cdot 10^{-8} \text{ V}^2 \cdot \text{K}^{-2}$). Il est indépendant de la température et varie assez peu pour les matériaux conducteurs généralement utilisés dans les contacts.

Une relation approximative entre la tension V_c et la température T est déduite en combinant les équations 13 et 14, et en l'intégrant, cette relation est donnée par :

$$L(T_\theta^2 - T_0^2) = \frac{V_c^2}{4}$$
$$V_c = 2\sqrt{L} \sqrt{T_\theta^2 - T_0^2} \quad (15)$$

T_θ : température de l'échauffement local (température de ramollissement, fusion ou ébullition du métal).

T_0 : température ambiante.

En supposant que la température de l'environnement ambiant est négligeable par rapport à celle de l'échauffement local, $T_\theta^2 \gg T_0^2$, la relation suivante est obtenue :

$$T_\theta \approx 3200 \cdot V_c \quad (16)$$

Le tableau 1 donne les valeurs des températures de ramollissement, de fusion et d'ébullition pour différents matériaux de contact, ainsi que les valeurs de tension associées pour chaque phase.

Tableau 1 : Tensions et températures critiques pour différents matériaux de contact [5] [6]

Métal	Ramollissement		Fusion		Ébullition	
	Température (°C)	Tension (mV)	Température (°C)	Tension (mV)	Température (°C)	Tension (mV)
Ag	180	90	961	370	2212	700
Au	100	80	1063	430	2966	900
Cu	190	120	1083	430	2595	800
Sn	100	70	232	130	2270	865
Al	150	100	660	300	2450	-
Ni	520	160	1453	533	2800	969

Le tableau 2 présente les valeurs de la conductivité et de la résistivité électriques, de la conductivité thermique et de la densité de quelques métaux :

Tableau 2 : Caractéristiques des métaux

	Conductivité Électrique (10^{+6} Siemens/m)	Résistivité Électrique (10^{-8} Ohms.m)	Conductivité therm. (W/m.k)	Masse volumique (g/cm^3)
Argent	62,1	1,6	420	10,5
Cuivre	58,5	1,7	401	8,9
Or	44,2	2,3	317	19,4
Aluminium	36,9	2,7	237	2,7

III. Arc électrique

1. Définition de l'arc électrique

L'arc électrique est défini comme une décharge auto-entretenu à fort courant. Contrairement aux autres décharges, l'arc électrique conduit un courant toujours supérieur à 0.1 A. C'est un phénomène qui peut apparaître à la manœuvre des contacts dans différent milieux : gaz, liquides ou même dans le vide. En effet, les processus thermiques conduisent à l'ionisation du milieu isolant situé entre les deux électrodes qui font le contact et qui sont portées à différents potentiels. Cette ionisation est dû essentiellement à des collisions inélastiques entre les

particules chargées majoritairement, les électrons et les atomes neutres. Le courant circule à l'aide des électrons qui se déplacent vers l'anode et les ions positifs vers la cathode dans ce milieu ionisé, appelé plasma. Les caractéristiques de l'arc électrique sont influencées par le type du circuit ; charge inductive, charge résistive. L'exemple présenté sur la figure 7 permet de faire une comparaison des caractéristiques d'un arc issu d'un circuit inductif et l'autre d'un circuit résistif :

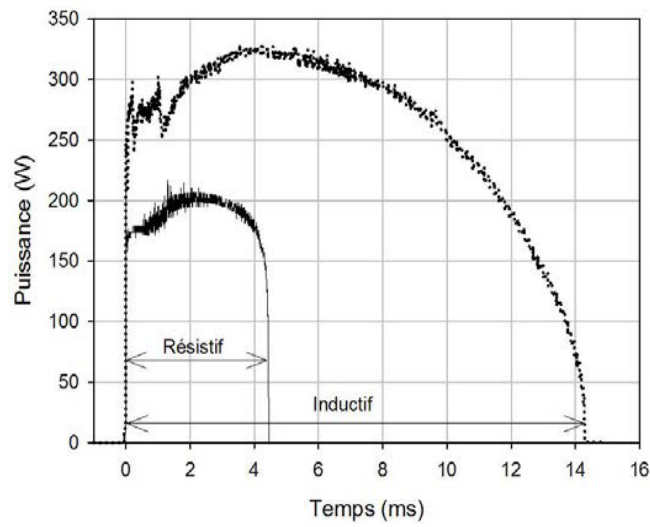


Figure 7 : Comparaison des caractéristiques de puissance d'arc en fonction du temps, pour des contacts en Ag sous 42 V_{DC} et 20 A, circuits résistif et inductif (L=10mH), vitesse d'ouverture 20 cm/s[14]

La puissance et la durée de l'arc inductif sont plus importantes que celles obtenue avec l'arc résistif, ceci est dû à l'énergie restée dans la bobine et qui est dissipée dans l'arc.

2. Processus d'amorçage de l'arc

Il existe différentes modalités de la formation de l'arc lors de la manœuvre des contacts électriques, dans ce paragraphe, nous donnons un aperçu sur les types d'amorçages.

2.1. Amorçage par Claquage-loi de Paschen

L'amorçage par claquage du milieu inter-électrodes est un type d'amorçage qui peut se produire dans le cas d'un contact ouvert. La loi de Paschen indique qu'il existe toujours une tension électrique minimale pour une certaine distance entre les électrodes à une pression donnée, permettant au courant électrique de se décharger dans le gaz : elle est appelée le minimum de Paschen. À pression atmosphérique, quand la tension entre les contacts est supérieure ou égale

à 330 V et la distance entre les contacts est inférieure ou égale à 7 μm dans l'air, l'arc peut être amorcé par claquage diélectrique du milieu inter-électrodes (figure 8).

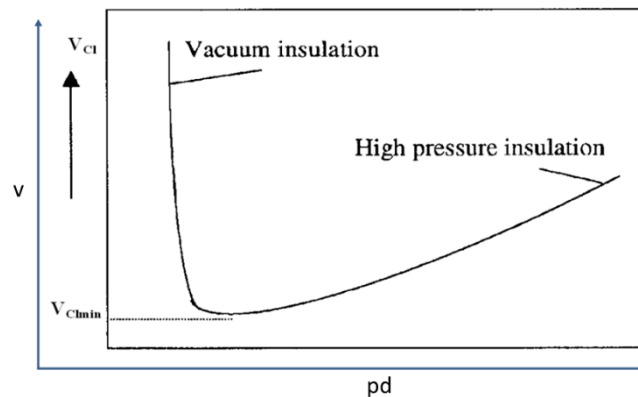


Figure 8 : Courbe de Paschen [19]

À la pression atmosphérique, l'air est un isolant disposant d'une tension de claquage élevée. Il n'y a pas assez d'électrons libres et leur libre parcours moyen est trop faible pour qu'ils accélèrent suffisamment entre deux collisions : leur énergie cinétique est insuffisante pour ioniser le gaz. Mais plus la pression de l'air diminue et plus la décharge électrique survient à des tensions faibles.

La courbe présentée sur la figure 8 montre que la tension de claquage V_{c1} , a un minimum unique, s'appelle V_{c1min} pour un produit de pression et la distance inter-électrodes $(P.d)_{min}$.

Par contre, si la pression continue de descendre sous ce minimum de Paschen alors la tension à fournir augmente à nouveau. Le libre parcours moyen des électrons devient cette fois trop grand, ceci étant dû au fait qu'il n'y a plus assez d'atomes sur leur chemin pour déclencher, par collisions avec ceux-ci, l'effet d'avalanche qui transforme le gaz en plasma [20] [19].

2.2. Amorçage par d'autres phénomènes

Durant nos recherches, nous avons constaté dans le cas d'un courant alternatif, qu'après l'extinction d'un premier arc créé par explosion de pont fondu, un nouvel arc ou plusieurs arcs s'amorcent pendant que le contact est ouvert. Ce type d'arc peut se créer à de très faibles écartements pour des tensions bien inférieures au minimum de Paschen, où la rugosité de la surface des contacts peut jouer fortement. Cet amorçage fait intervenir l'émission cathodique sous fort champ électrique [5], Sawa *et al.* l'expliquent par l'existence d'une plasma résiduel dans l'espace inter-électrodes [21].

2.3. Amorçage par explosion d'un pont fondu

Généralement, dans notre étude, les arcs sont amorcés par l'explosion d'un pont de métal fondu entre les contacts, qui se produit à partir des contacts fermés (cas de l'amorçage à l'ouverture). Quand la force de contact diminue lors du premier instant d'ouverture (cas d'un arc d'ouverture) ou aux premiers instants d'un rebond (cas d'un arc de fermeture) le nombre de contacts élémentaires et leurs surfaces se réduisent. Il n'en subsistera finalement qu'un, au travers duquel les lignes de courant se resserrent, ainsi, ceci fait augmenter la résistance de constriction, le métal s'échauffe par effet Joule jusqu'à la fusion en créant un pont fondu entre les deux contacts. Les électrodes s'éloignant de plus en plus l'une de l'autre, le pont liquide s'étire, provoquant son explosion par la vaporisation du métal liquide, un arc électrique se produit alors à cause de l'ionisation de l'espace inter-électrodes. La figure 9 décrit les étapes de l'amorçage de l'arc par pont fondu :

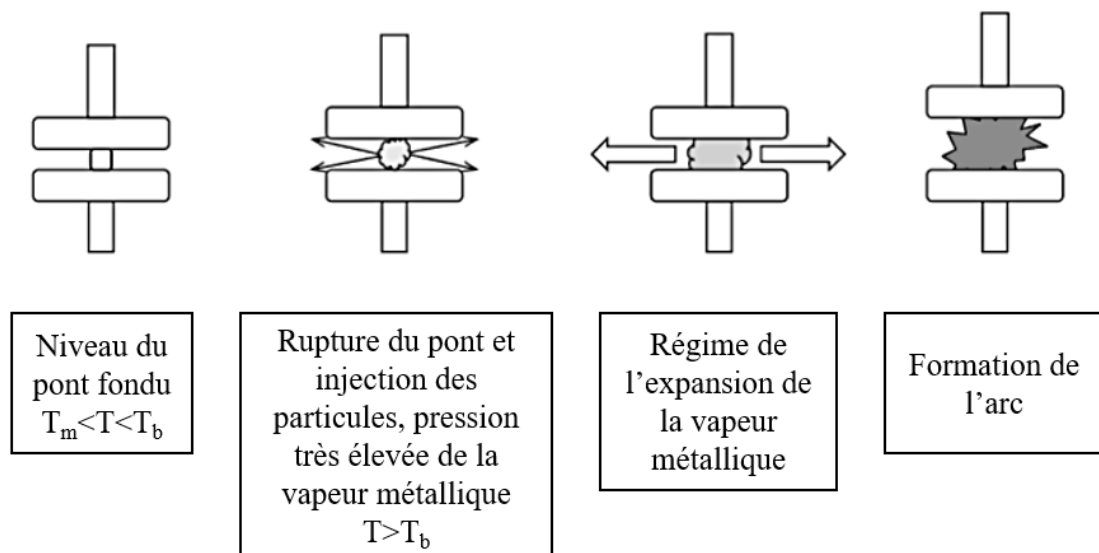


Figure 9 : Séquence d'ouverture d'un contact électrique ; formation d'un pont fondu, sa rupture et la formation d'arc [6]

La figure 10 montre les différentes phases d'un pont fondu « Pré-arc », grâce à l'évolution de la chute de tension V_c aux bornes des contacts durant leur ouverture. La phase 1 représente l'état de l'échauffement du métal dans le cas où la striction est à l'état solide, la phase 2 est relative de la fusion de la zone de constriction, la phase 3 est l'extension de la zone fondue, et finalement la phase 4 qui arrive juste avant l'arc, correspond au pincement et à l'explosion du pont fondu où la striction est à l'état d'ébullition.

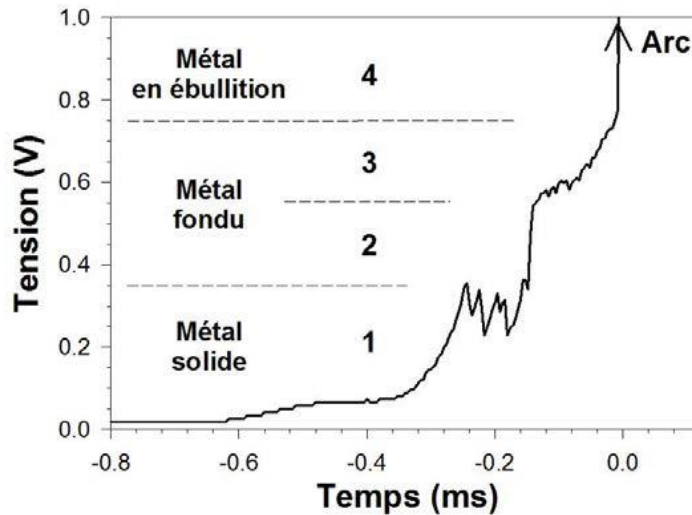


Figure 10 : Exemple d'évolution de la tension aux bornes des contacts pendant le pont fondu, exemple pour des contacts en Ag, 40 A, vitesse d'ouverture de 2 cm/s [22]

3. Arc stationnaire

L'arc stationnaire est considéré comme un arc entre deux électrodes fixes. Des mesures à la sonde de Langmuir ont montré que le champ électrique n'est pas constant dans l'espace inter-électrodes, par conséquent lorsque l'on représente le potentiel électrique le long de l'espace inter-électrodes, on distingue trois zones dans la structure de l'arc (Figure 11) : la colonne où le champ électrique est quasiment constant et reste à une valeur faible, et les deux zones d'extrémité, la zone cathodique et la zone anodique, où la chute de tension est bien plus abrupte que dans la colonne du fait des phénomènes aux électrodes.

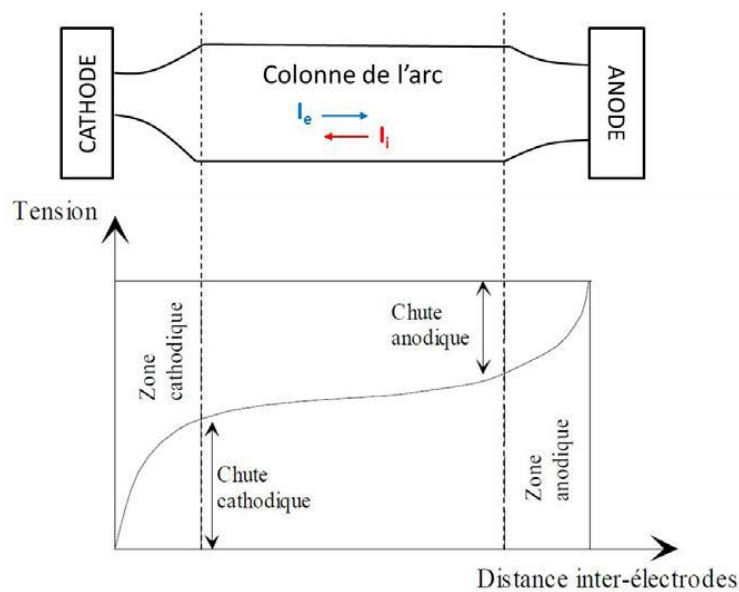


Figure 11 : Évolution du potentiel électrique dans un arc stationnaire

3.1. La colonne de l'arc

La colonne de l'arc électrique est constituée d'électrons, d'ions et d'espèces neutres (atomes et molécules) formant un plasma thermique. À l'intérieur de ce plasma, les électrons sont accélérés par le champ électrique et transitent vers l'anode subissant de nombreux chocs avec les atomes au cours de ce déplacement. Les électrons cèdent ainsi une partie de leur énergie cinétique et c'est par ces collisions que se réalise la conversion d'énergie électrique en énergie thermique. La mobilité des ions étant faible devant celle des électrons, ils ne gagnent que très peu d'énergie entre les collisions. Aussi, le courant est essentiellement électronique. L'acquisition de cette énergie thermique par le plasma permet l'ionisation des espèces par collisions inélastiques entre particules, produisant ainsi une densité de porteurs de charges suffisante pour assurer la conduction électrique.

Les plasmas d'arc sont en général dans un état proche de l'équilibre thermodynamique local (ETL), cela veut dire que les températures cinétiques des éléments du plasma (neutres, ions et électrons) températures de vibration et de rotation des molécules etc. sont identiques [23].

3.2. La zone cathodique

La cathode peut être considérée comme une source émissive portée à un potentiel négatif par rapport au plasma, donc la zone cathodique peut être représentée comme un espace limité par deux plans parallèles : le plan représentant la cathode où il y a émission des électrons et le plan représentant la colonne émettant des ions. Cette zone se caractérise par une chute de potentiel de l'ordre d'une dizaine de volts. Cette chute de potentiel dépend de la nature du matériau composant la cathode. Cette zone se compose de deux parties : une zone de charge d'espace et une zone d'ionisation (figure 12).

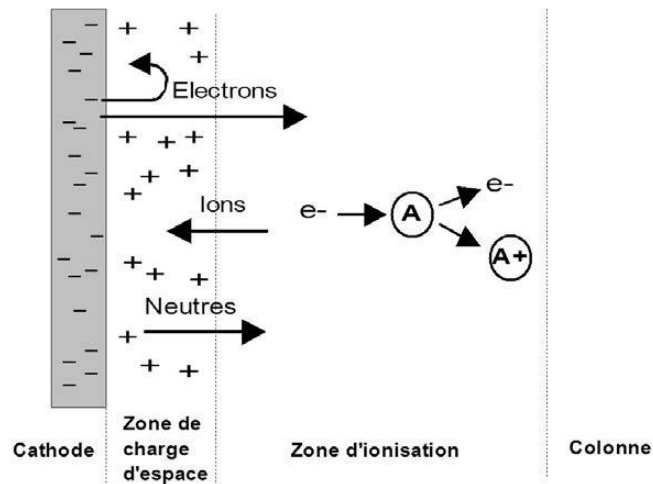


Figure 12 : Structure de la zone cathodique [22]

Dans la zone de charge d'espace (Figure 12), la chute de tension est d'environ 7 V [22] [24], aucune collision n'a lieu dans cette zone car son épaisseur, de quelques dizaines de nanomètres, est inférieure au libre parcours moyen des électrons et des ions et qui est de l'ordre du micromètre dans un arc à pression atmosphérique.

Celle-ci est responsable de la chute cathodique et de l'émission électronique. Les électrons, extraits de la cathode, principalement par effet thermoélectrique et par effet de champ, sont fortement accélérés et pénètrent dans la zone d'ionisation.

La zone d'ionisation permet le transfert de l'énergie des électrons, acquise dans la zone de charge d'espace, aux espèces neutres par collisions élastiques et inélastiques. Au fur et à mesure que les électrons progressent dans la colonne d'arc, ils perdent leur surplus d'énergie.

Ce transfert conduit à une ionisation croissante du milieu gazeux et à l'égalisation des températures des espèces. À la frontière avec la colonne, le plasma se situe dans un état où il ne subsiste que très peu d'écart entre la température électronique et celle des espèces lourdes : le système est proche de l'ETL comme dans la colonne.

3.3. La zone anodique

Le rôle de l'anode n'est pas aussi fondamental que celui de la cathode dans la structure de l'arc. Elle sert essentiellement de collecteur d'électrons. Cette région peut être séparée en deux zones successives : une zone de double charge d'espace et une zone de transition anodique où les ions se thermalisent avant leur entrée dans la colonne (figure 13).

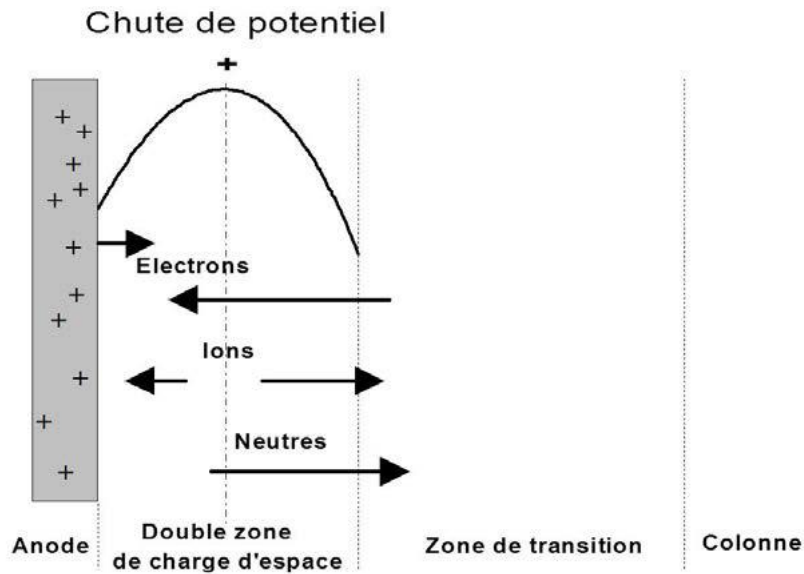


Figure 13 : Structure de la zone anodique [22]

Dans la zone de charge d'espace, les électrons venant de la zone de transition sont accélérés vers l'anode. Au fur et à mesure qu'ils se rapprochent ils gagnent de l'énergie et ionisent les espèces neutres, l'augmentation des charges positives ainsi créées, engendre un potentiel croissant vers l'anode.

La zone de transition anodique est similaire à la zone d'ionisation de la zone cathodique.

Elle possède cependant des caractéristiques différentes à ses deux extrémités. À la frontière avec la colonne, les températures des espèces sont similaires à celles présentes dans le plasma ainsi elles sont assez proches de l'ETL. En revanche, les ions provenant de la zone de charge d'espace et se dirigeant vers la colonne entrent dans la zone de transition avec une énergie élevée de quelques électronvolts alors que les autres espèces (électrons et neutres) ont une température cinétique proche de celle de la colonne.

Dans certains arcs courts (de quelques μm), appelés arcs anodiques, l'anode contribue à l'émission de vapeurs métalliques par bombardement électronique [22].

4. Effets de l'arc sur les contacts électriques

Les arcs électriques créent des phénomènes physiques au niveau des contacts électriques. Ces phénomènes peuvent engendrer une dégradation des contacts, ce qui peut impacter le fonctionnement et la fiabilité des appareils de commutation.

La structure d'un arc de commutation est variable avec le temps. Son expansion peut faire varier les phénomènes physiques aux interfaces du plasma d'arc et des électrodes. Les trois phénomènes majeurs générés par l'arc électrique susceptibles de dégrader les contacts sont :

- Transfert de matière ou érosion des contacts
- Augmentation de la résistance de contact
- Soudure des contacts

4.1. Transfert de matière ou érosion des contacts

L'échauffement des contacts résultant de l'arc, engendre un transfert de matière entre les contacts par évaporation et re-déposition, ou une érosion des deux contacts par éjection de métal fondu. La figure 14 illustre les différents régimes de transfert de la matière entre les contacts électriques (cathode et anode) :

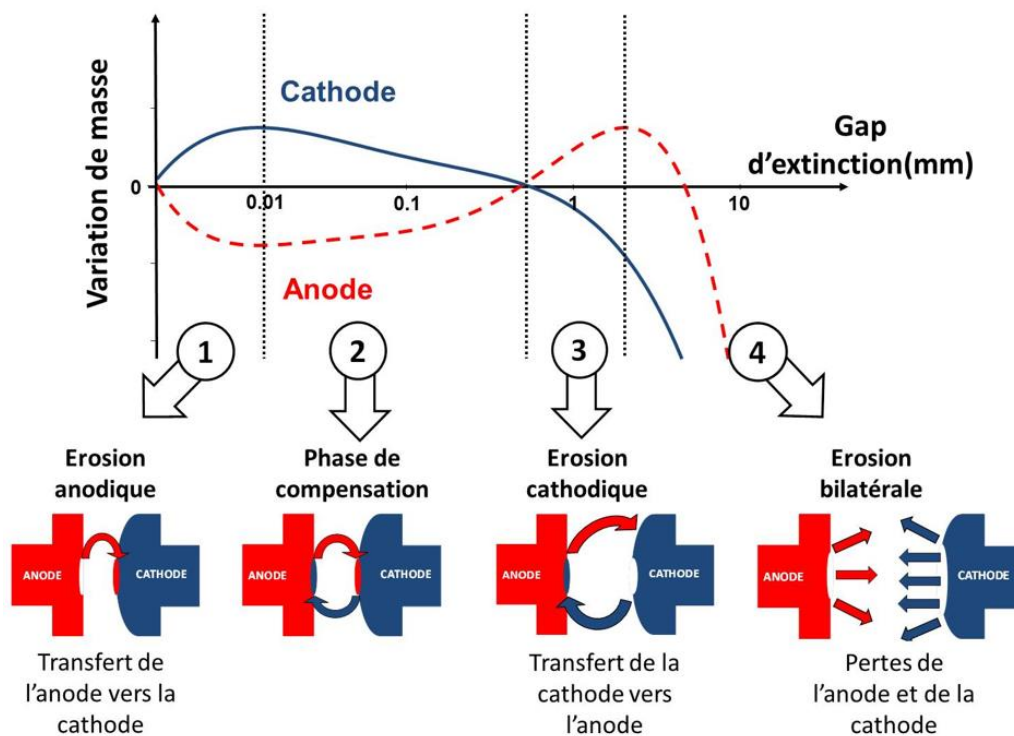


Figure 14 : Modèle du transfert de matière entre les électrodes en fonction du gap d'extinction, d'après [5], [14]

1) **Arc anodique** : L'arc anodique se caractérise par un fort transfert de matière, de l'anode vers la cathode. Elle a lieu quand l'écartement entre les électrodes est inférieur à la somme des épaisseurs des régions cathodique et anodique, donc, l'existence d'une colonne proche de l'ETL est impossible car les températures des électrons, des ions et des neutres ne sont pas équilibrées. La région centrale entre les zones de charge d'espace est constituée de l'interpénétration de la

zone d'ionisation de la région cathodique et de la zone de transition du côté anode. En effet, les électrons émis par la cathode ne subissent pas, ou peu, de collisions sur leur trajet vers l'anode, car la distance inter contacts est de l'ordre du libre parcours moyen des électrons. Cette émission attaque l'anode avec toute l'énergie acquise dans la gaine cathodique. Sous l'effet de ce bombardement électronique l'anode s'évapore et une partie des vapeurs produites est collectée par la cathode.

3) **Arc cathodique** : L'arc cathodique se caractérise par un transfert de matière, de la cathode vers l'anode, il se produit quand les zones d'ionisation cathodique et de transition anode-colonne se mettent en place complètement, la constitution d'une colonne proche de l'ETL devient alors possible. Les températures des électrons, des ions et des neutres sont alors très voisines, dans cette phase, la distance inter-électrodes est bien supérieure au libre parcours moyen des électrons, les atomes présents dans le plasma s'ionisent sur leur chemin vers l'anode et les ions produits heurtent la cathode qui s'échauffe. Il s'en suit que, la cathode s'évapore et la matière est collectée par l'anode, d'où un transfert de la cathode vers l'anode. À la phase de la transition d'un arc anodique à un arc cathodique, le transfert de la matière par la cathode compense celui de l'anode. Cette phase est appelée phase de compensation. Une fois que cette compensation se termine, le transfert devient complètement cathodique. Cependant avec l'augmentation de l'énergie de l'arc et son allongement, une perte de masse au niveau de la cathode et de l'anode est engendrée à cause de l'éjection de gouttelettes du métal fondu, on parle ici de la phase bilatérale.

Deux phases peuvent survenir pendant l'allongement de l'arc : les phases métallique et gazeuse.

Phase métallique : lorsque les ions présents dans le plasma et qui participent à la conduction proviennent essentiellement des contacts.

Phase gazeuse : lorsque les ions participant à la conduction proviennent de l'atmosphère extérieure, et sont donc d'origine gazeuse [25].

4.2. Augmentation de la résistance de contact

Durant la phase gazeuse de l'arc, des éléments provenant de l'atmosphère et des pièces isolantes voisines peuvent entrer dans la composition du plasma, des éléments résistifs se forment et se déposent sur la surface des contacts. Cela engendre une augmentation de la résistance de contact, qui dans certains cas extrêmes peut entraîner la non conduction des contacts, ainsi qu'une élévation du taux de rugosité des surfaces de contacts [26] [27].

4.3. Soudure des contacts

La soudure dynamique des contacts, qui fait l'objet de notre étude, se produit quand les surfaces sont fondues à cause de l'arc et qu'elles se referment à la fin d'un rebond (figure 15), avec pour conséquence une ouverture des contacts soudés retardée voire impossible.

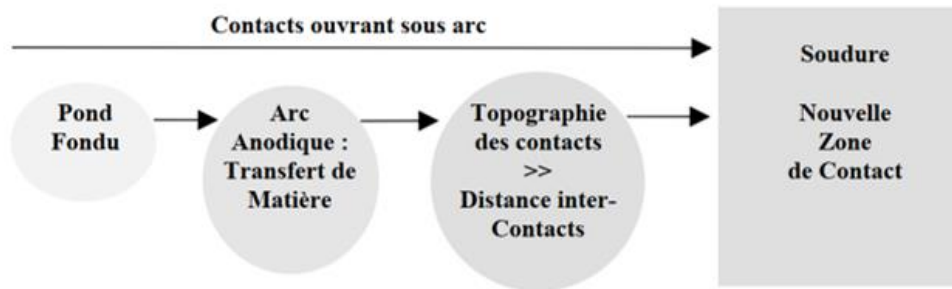


Figure 15 : Processus de soudure des contacts électriques sous un arc d'ouverture[11]

Les facteurs qui influencent les caractéristiques de la soudure des contacts sont plus détaillés dans la deuxième partie de ce chapitre.

IV. Soudure des contacts électriques à la fermeture

La fermeture des contacts électriques est souvent accompagnée de rebonds, ces rebonds se produisent juste après le choc « élastoplastique » du contact mobile sur le contact fixe. Un arc peut avoir lieu à l'ouverture sur rebond, cela provoque une fusion au niveau des surfaces de contacts et par conséquent à la formation d'un pont fondu qui se solidifie, ceci pouvant créer un risque sérieux de soudure.

1. Soudure statique et dynamique

La soudure des contacts électriques, aussi appelée « collage des contacts », peut mener à des risques de défaillance des dispositifs de commutation. Ce phénomène se produit à cause d'un ensemble de paramètres qu'on explicitera par la suite. On distingue deux types de soudure : une soudure dynamique et une soudure statique. La soudure dynamique surgit à la fermeture des contacts à cause de l'arc de rebond. En effet, lors du rebond mécanique de contact, un arc se produit, la chaleur de cet arc fait fondre, vaporiser et éclabousser le matériau de la surface de contact et provoque une érosion. L'arc s'éteint lorsque les contacts se referment, le métal fondu de la surface de contact se refroidit et se solidifie, rendant une soudure possible. Alors qu'une soudure statique survient lorsque le courant passe à travers les contacts, leur

température augmente avec l'augmentation de la résistance de contact. Ce qui provoque la fusion puis la soudure du matériau de la surface de contact.[28].

2. Paramètres influençant le comportement de la soudure

La compréhension des mécanismes de la soudure dynamique est un élément clé pour assurer une utilisation sûre et efficace de systèmes électriques. La force de soudure correspond à la force additionnelle à la force de contact, nécessaire pour séparer les contacts électriques (figure 16). Cette caractéristique est importante pour évaluer l'état de la soudure.

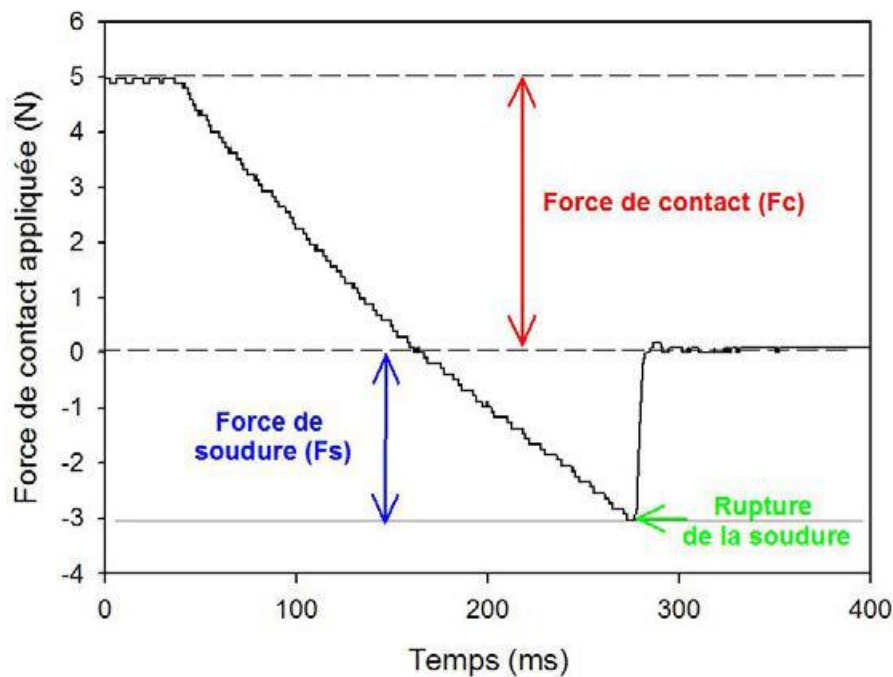


Figure 16 : Profil de force en cas de soudure [14]

La soudure dynamique est affectée par de nombreuses variables telles que : niveau de courant, tension de circuit ouvert, type de charge, durée et fréquence de rebond de contact, force de contact, vitesses d'ouverture et de fermeture, et la nature du matériau de contact [7]. Les différents facteurs influençant la soudure seront exposés brièvement mais nous décrirons de manière plus approfondie l'influence de la nature des matériaux des contacts électriques dans une partie à suivre.

2.1. Caractéristiques de rebond mécanique : durée et amplitude

Plusieurs recherches ont été menées sur l'influence des caractéristiques de rebond mécanique sur la soudure des contacts. Ces caractéristiques de rebond sont influencées par le niveau de courant qui traverse les contacts et par la répulsion électrostatique [29] [8].

Chen et Witter ont montré que les soudures fortes se produisent plus fréquemment avec des rebonds de courte amplitude et courte durée ($<5\mu\text{m}$). Un arc anodique de type d'un arc métallique se crée lors d'un rebond court, cet arc provoque des taches de fusion étroites et profondes, une évaporation locale des oxydes métalliques donc des forces de rupture de soudure extrêmement élevées. En revanche, l'arc cathodique se crée lors d'un rebond long ($>30\mu\text{m}$), il crée des zones fondues plus larges et peu profondes et par conséquent, des forces de rupture de soudure relativement plus faibles [30] [31] (figure 17). Lorsque les arcs de fermeture deviennent plus longs, le courant diminue rapidement et, si l'intervalle est suffisamment long, les arcs peuvent s'éteindre, diminuant ainsi la probabilité de se refermer sur une grande quantité de métal fondu [9] [32] [33].

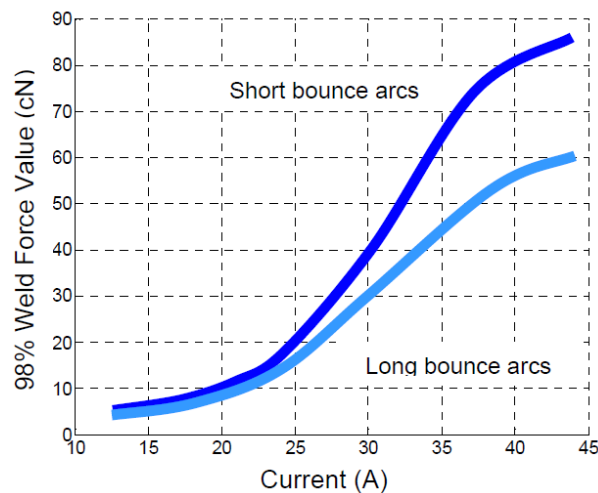


Figure 17 : Force de soudure après des processus de rebond court et long, respectivement, en fonction du courant [9]

A *contrario*, d'autres recherches ont montré que la force de soudure augmente avec l'augmentation de la durée d'arc ainsi que l'augmentation du courant (figure 18), ce qui signifie que la fréquence d'apparition de la soudure et sa force maximale dépendent de l'énergie de l'arc [10] [29] [34]–[37] .

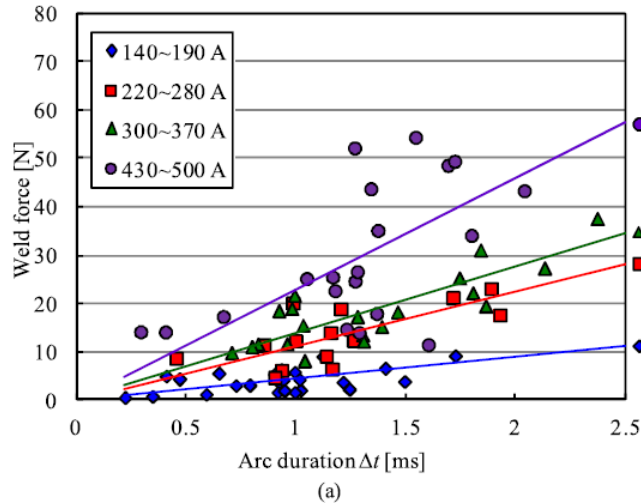


Figure 18 : Force de soudure en fonction de la durée d'arc [10]

D'autres études ont montré que la force de soudure ne dépend pas directement de la hauteur et de la durée de rebond [38]. De plus, d'autres paramètres [14], tels que la géométrie des surfaces de contact, jouent aussi un rôle important pendant la phase de soudure.

2.2. Énergie d'arc

Comme évoqué précédemment, l'énergie de l'arc de fermeture est le paramètre le plus influent sur les caractéristiques de la soudure : le taux et la force de soudure. C'est un paramètre clé pour définir le mode de fonctionnement des matériaux utilisés pour réduire la tendance à la soudure [39], ceci sera abordé plus tard dans la partie sur les matériaux de contacts.

L'énergie d'arc W_{arc} dissipée pendant le temps d'arc est [38]:

$$W_{arc} = \int_{\Delta t_{arc}} u \cdot i \, dt \quad (17)$$

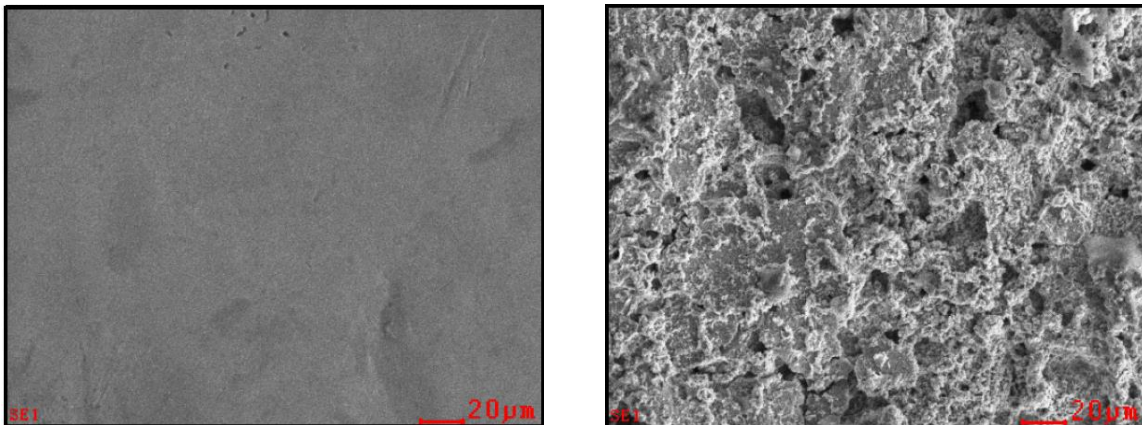
i : le courant qui traverse le contact

u : la tension à travers le l'espace entre les contacts

Δt_{arc} : la durée de l'arc

2.3. Rugosité

McBride *et al.* ont constaté que le rebond électrique est influencé par la rugosité de surface, le niveau de courant et les temps de rebond mécanique [29]. La rugosité et la déformation de la surface des contacts dues à l'érosion causent une augmentation de la résistance ainsi que de la température des contacts. Le glissement des surfaces de contact pendant l'impact est empêché par le frottement des surfaces rugueuses et molles après l'amorçage de l'arc, par conséquent, les contacts ont tendance à se souder. [32]. La figure 19 montre une comparaison entre l'état de surface d'un contact électrique avant et après soudure



a) Microstructure surface de contact

b) Microstructure du contact après soudure

Figure 19 : Surface de contact électrique avant et après soudure [28]

2.4. Répulsion

Les forces de répulsion provenant à la fois de la constriction magnétique et du réchauffement du matériau et de l'évaporation pendant la formation d'arc aux courants fort peuvent avoir un effet d'affaiblissement des soudures, cette force de répulsion contrebalançant la force de contact et entraînant une séparation des contacts. En revanche, dans le cas où la force de contact est supérieure à la force de répulsion, les contacts se soudent [40].

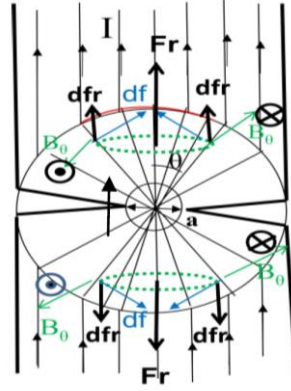


Figure 20 : Force de répulsion F_r entre deux conducteurs en contact sous la force de contact F_s [40]

La relation de la force de répulsion a été définie comme suit :

$$F_r = \frac{\mu_0}{2\pi} \int Idl \int_a^R \frac{dr}{r} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (1 - \cos\theta) \sin\theta d\theta = \frac{\mu_0}{4\pi} \log\left(\frac{R}{a}\right) \quad (18)$$

F_r : Force de répulsion

I : courant du circuit

R : Rayon traversé par le courant I

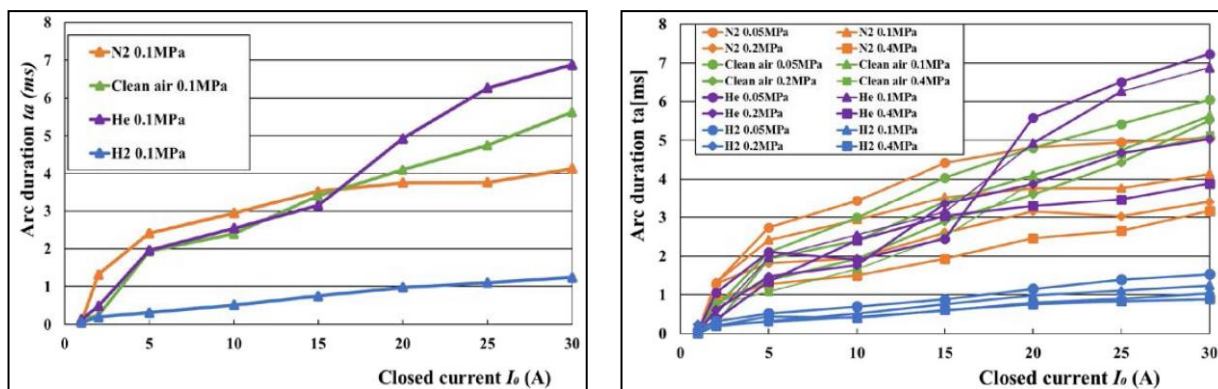
μ_0 : perméabilité magnétique du vide, égale à $1,257 \cdot 10^{-6}$ H/m

Dans d'autres cas, quand la force de contact est plus élevée que la force de répulsion, aucune séparation ne se produit et par conséquent la soudure par contact peut avoir lieu [40].

2.5. Atmosphères

La tension et le courant d'arc pour une distance inter-électrodes donnée diffèrent d'une atmosphère à l'autre. Généralement, les caractéristiques de l'arc dépendent de la nature de l'atmosphère ainsi que de la nature des matériaux des contacts électriques.

Yoshida *et al.* ont étudié le comportement de l'arc dans différentes atmosphères, cette étude a été faite sur des arcs d'ouverture (figure 21). Les résultats montrent que la durée de l'arc dépend de la nature de l'atmosphère (type de gaz) et que pour l'air, la durée de l'arc diminue avec l'augmentation de la pression d'air [41].



a)

b)

Figure 21 : a) Durée de l'arc selon l'intensité de courant pour différents gaz b) Durée de l'arc selon l'intensité de courant pour différentes pressions pour chacun des gaz [41]

En outre, comme le montre Schrank *et al.* [42] la résistance à la soudure, quant à elle, change en fonction de la nature du gaz atmosphérique : air ambiant, azote, argon et hélium. Cependant, l'évaluation de la puissance de l'arc de fermeture ne donne aucune indication sur l'évolution des forces de soudure. De plus, les tests de soudure causée par l'arc dans le vide sont souvent faits avec des contacts en cuivre [40] [43]. Malheureusement, jusqu'à présent, il n'existe pas d'études sur la soudure dynamique des contacts électriques en fonction de la pression de l'air.

2.6. Type de charge

Un exemple d'étude [31] sur la soudure en fonction de types de charges est représenté sur la figure 22, le test de fermeture ayant été fait avec deux types de charges, résistive et inductive. Cette étude montre que l'arc métallique résistif nettoie et recuit la surface de contact en argent usée initialement et permet au collage mécanique d'avoir lieu (soudure à froid). La charge inductive conduit à un arc gazeux et certains oxydes d'argent se produisent sur la surface et réduisent la résistance de la soudure par rapport à la surface dans le cas de l'arc métallique.

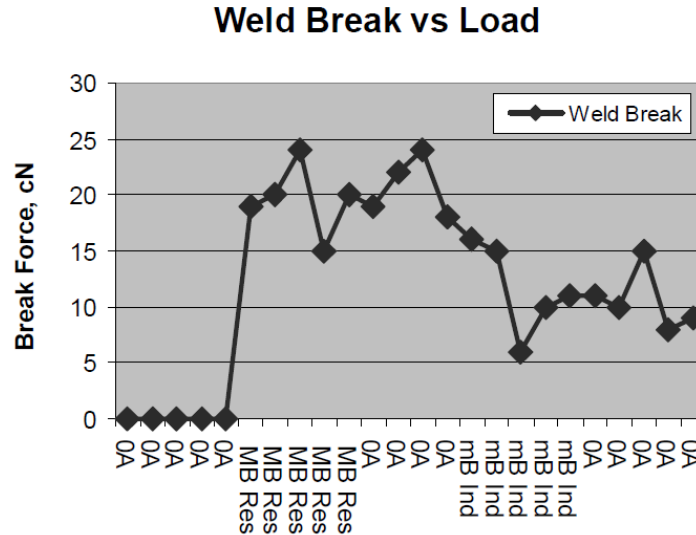


Figure 22 : Force de soudure en fonction de type de charge [31]

V. Comportement de la soudure en fonction de la nature des matériaux

1. Généralités sur les matériaux des contacts

La nature des matériaux des contacts joue un rôle majeur face au phénomène de soudure. La composition chimique, les caractéristiques physiques telles que la dureté, la température critique de ramollissement, de fusion et d'ébullition, le degré de l'homogénéité de la microstructure, la rugosité de la surface, influent sur, d'une part, le comportement de l'arc selon ses différentes phases, d'autre part, sur les mécanismes et la force de la soudure et l'érosion.

L'argent est un métal qui dispose d'une grande conductivité électrique et d'une grande résistance à la corrosion, il est de plus le moins cher des métaux nobles. Cependant, il a une grande conductivité thermique et est connue pour sa très faible résistance à la soudure dynamique. Ainsi, pour améliorer les propriétés de l'argent et l'utiliser comme matériau de contact, les fabricants des contacts ont créé des alliages du type argent-oxyde métallique, comme l'oxyde d'étain, qui ont une meilleure résistance à la soudure, ou les alliages d'argent tel que l'argent-nickel, argent-cadmium, l'argent-graphite. Ce dernier conduit à des soudures faibles mais présente une très mauvaise résistance à l'érosion [32].

2. Pseudo-alliage Argent

2.1. $AgSnO_2$

En plus du règlement européen REACH (règlement n°1907/2006) dans l'industrie des contacts électriques, l'Union européenne a finalisé deux directives (Waste Electrical and

Electronic Equipment (WEEE) Directive et the Restriction of Hazardous Substances (RoHS Directive) pour limiter l'utilisation du cadmium dans les nouveaux équipements électriques et électroniques à partir de juillet 2006 [44]. C'est pour cela que plusieurs recherches ont été faites sur l'oxyde d'étain afin d'étudier ses performances et les comparer avec celles de l'oxyde de cadmium [8], [42], [46]–[48], [49].

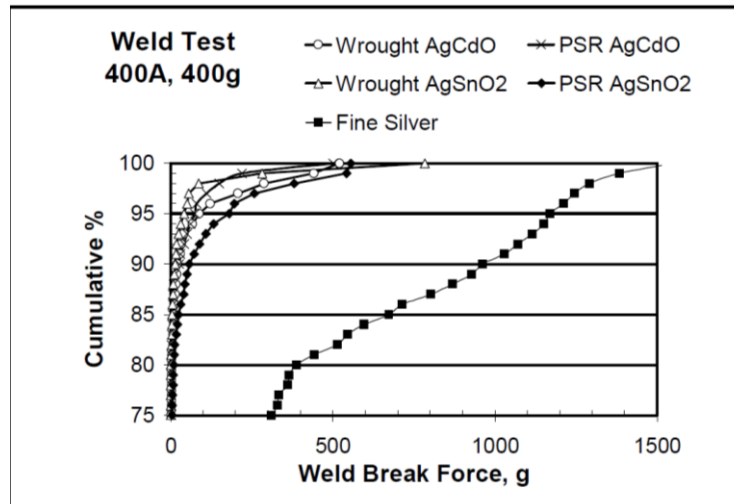


Figure 23 : Force de soudure pour les contacts d'AgCdO (15% d'oxyde) et AgSnO₂ (12% oxyde) [50]

La fabrication des matériaux Ag/SnO₂ est difficile en raison de leurs faibles propriétés métallurgiques (ex : faible mouillabilité entre l'argent et SnO₂), contrairement aux matériaux Ag/CdO. Comme évoqué auparavant, les méthodes de fabrication des matériaux de contact tels que l'oxydation interne et la métallurgie des poudres, jouent un rôle important sur leurs performances notamment leur comportement à la soudure. Ceci amène à des microstructures, avec des tailles et des distributions de grains différentes pour une même composition chimique [51] [52].

Le traitement des métaux en poudre aide à maximiser les propriétés souhaitées du matériau, en effet, il permet de contrôler la taille, la forme et la distribution des particules. Bien que les poudres composites présentent une microstructure très homogène, lors du pressage et du frittage, la mouillabilité médiocre des particules de SnO₂ dans la masse fondue d'argent et leur stabilité thermique élevée engendrent une microstructure du matériau de contact final (figure a-25) avec des régions d'argent pur (sans oxyde). Ce problème est généralement évité par l'introduction de petites quantités d'additifs différents tels que In₂O₃, WO₃ et MoO₃ [53] et comme on peut le voir sur la Figure 27, dans le cas du matériau Ag-SnO₂In₂O₃, les régions sans oxyde sont beaucoup moins prononcées et sont sous la forme de fines lignes d'argent (figure b-

24). Les oxydes d'Ag / SnO₂ / In₂O₃ oxydés de manière interne ne sont pas aussi efficaces que l'Ag / CdO oxydé de manière interne [52].

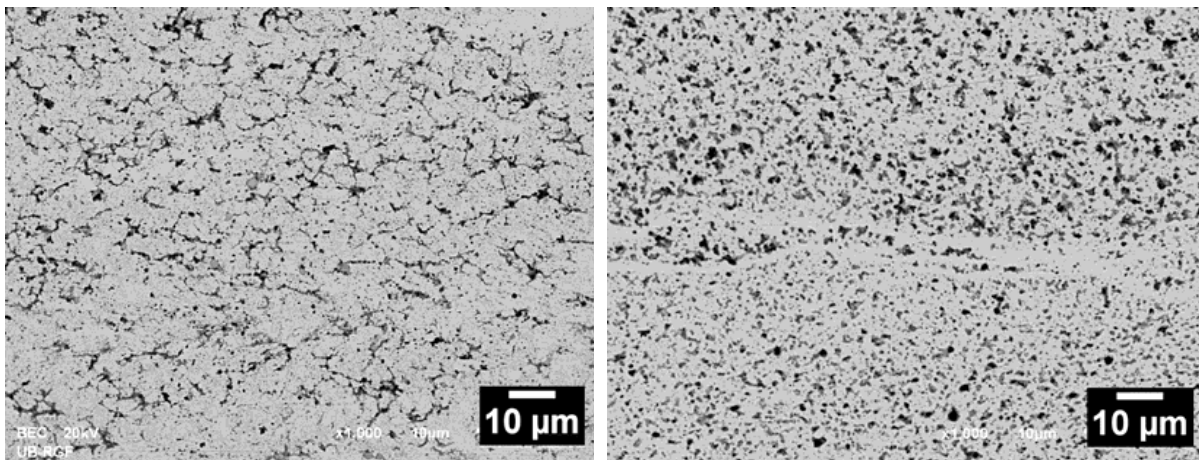


Figure 24 : a) Microstructure du matériau de contact électrique Ag-SnO₂. b) Microstructure du matériau de contact électrique Ag-SnO₂In₂O₃ [52]

Les matériaux à base d'argent et d'oxyde d'étain à teneur élevée en oxyde métallique offrent des possibilités d'économie de métaux précieux aux fabricants d'appareils. Une petite augmentation du pourcentage d'oxyde peut modifier de manière significative les propriétés de la soudure. De plus, le dopage du matériau de contact avec différents types d'oxydes métalliques en tant qu'additifs peut conduire à d'autres améliorations (figure 25). Ainsi il est montré que l'argent à 14% de SnO₂ (avec une faible teneur d'additifs comme Li et Cu) ont une très bonne tenue à la soudure ainsi qu'à l'érosion. Mais, une saturation de cet effet semble être atteinte pour les matériaux ayant plus de 12% en masse de teneur en oxyde de métal [8] [14] [47] [54]–[57] .

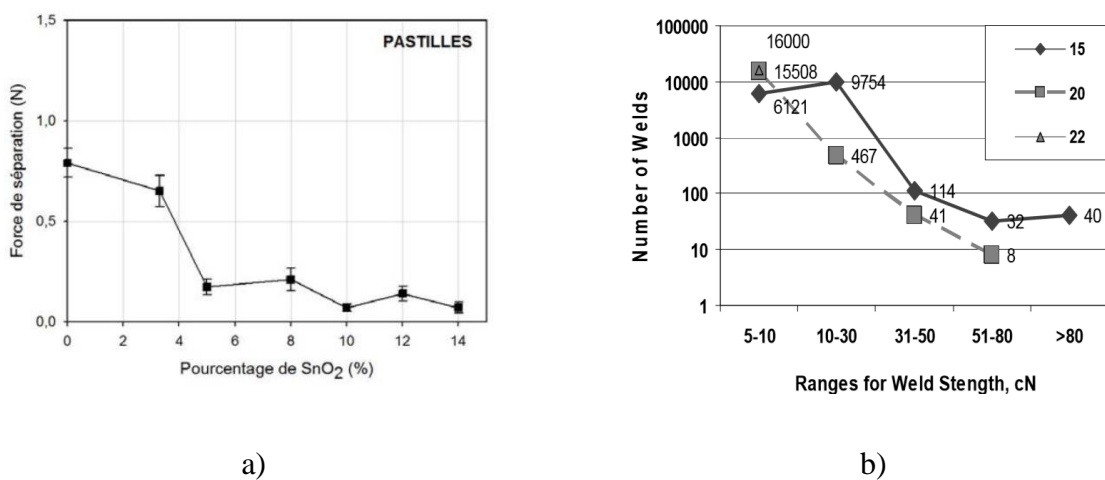


Figure 25 : a) Force de soudure en fonction du pourcentage de SnO₂[14]. b) La répartition des résistances de soudure en fonction de plage de force de soudure pour trois matériaux Ag SnO₂ (15%, 20% et 22% d'oxyde métallique)[31]

2.2. Comparaison des matériaux composites : Argent-Oxydes métalliques

Les oxydes métalliques entraînent une grande fragilité du matériau, ce qui réduit considérablement la tendance à la soudure. Les oxydes de métaux augmentent également la viscosité de la masse fondue face à un arc électrique et réduisent donc l'érosion des contacts causée par les éclaboussures, le tableau 3 présente les températures de fusion et d'ébullition de différents oxydes, ces paramètres sont une clé majeure pour comprendre les mécanismes de soudure de chaque matériau de contact.

Tableau 3 : Températures de fusion et d'ébullition de différents oxydes

Oxyde	T de fusion (°C)	T d'ébullition (°C)
Ag	962	2210
Bi ₂ O ₃	817	1890
CuO	1326	2000
WO ₃	1473	1700
CdO	900-1000	1559
SnO ₂	1630	1800-1900
ZnO	1975	2360

Comme déjà évoqué, l'énergie de l'arc a un impact important sur le matériau de contact et en particulier sur la résistance de contact.

La figure 26 présente le comportement de différents oxydes de métal argenté (Ag / CdO, Ag / SnO₂, Ag / ZnO), incluant divers groupes d'additifs tels que les oxydes métalliques à bas point de fusion et d'ébullition (Bi₂O₃) et les oxydes à haut point de fusion (CuO, WO₃). Ils sont fabriqués par la méthode de métallurgie des poudres, par mélange, compactage, extrusion et laminage. Les compositions des matériaux sont données en pourcentage massique.

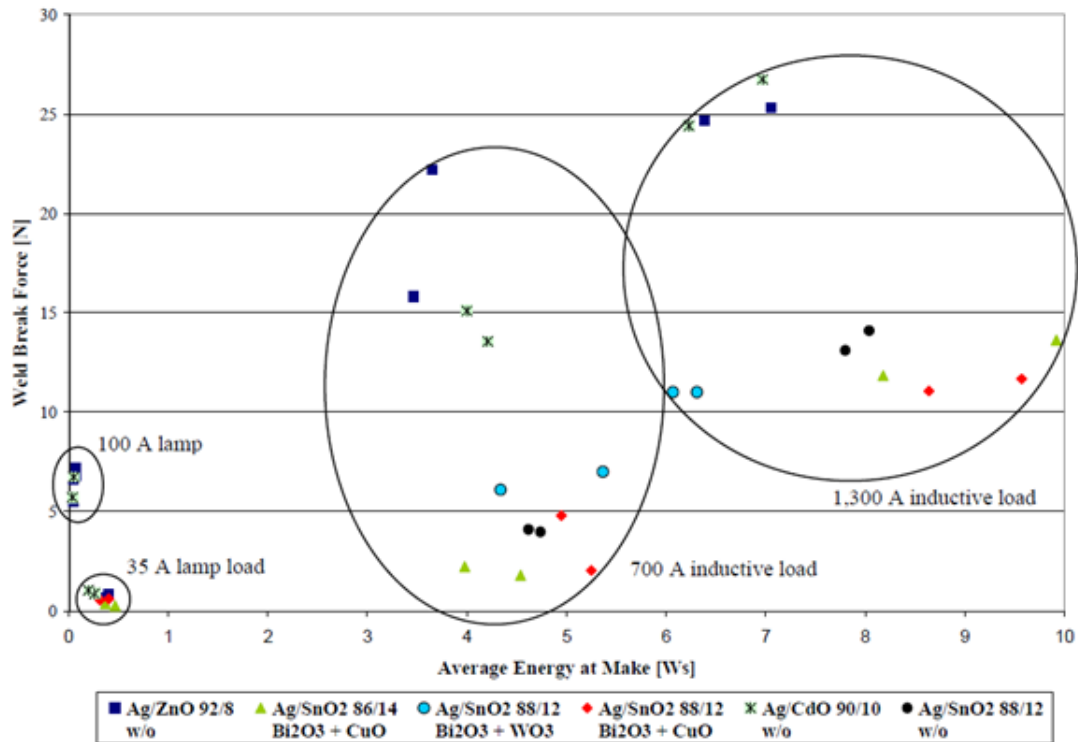


Figure 26 : Force de soudure en fonction de l'énergie [30]

À énergies d'arc faible et moyenne, AgSnO₂ semble être meilleur que AgCdO et AgZnO. En général, la force de rupture de la soudure se réduit en augmentant les teneurs totales en oxyde métallique.

La figure 27 montre une couche de Bi₂O₃ sur la surface de la pièce de contact supérieure, qui crée une phase vitreuse fragile (cette image est faite par spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (EDS)).

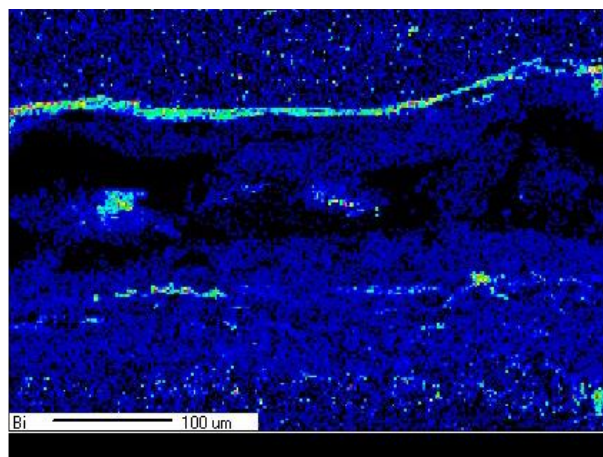


Figure 27 : Distribution de Bi₂O₃ (EDS) sur la section transversale après l'essai montrant la ligne concentrée de Bi₂O₃ sur la surface de contact [30]

Le CuO conduit à un grossissement des particules de SnO₂ et à une réduction locale de la température de fusion de l'argent aux interfaces Ag-CuO pendant l'événement de l'arc de fermeture. Ainsi, la force de rupture de soudure et la tendance de soudure correspondante sont élevées. À une énergie forte (100W.s), pour le Ag / SnO₂ 88/12 (additifs Bi₂O₃ et CuO), il est observé qu'il y a une déplétion complète de Bi₂O₃ à l'intérieur de la zone soudée, ceci étant due à l'énergie d'arc de fermeture élevé.

ZnO solide peut être aggloméré sur la surface de contact, pendant que l'argent est fondu, et peut former une couche superficielle enrichie en oxyde métallique fragile. Si l'énergie de l'arc de fermeture est suffisamment élevée pour atteindre la température de sublimation de ZnO (2360 ° C), le ZnO forme des bulles gazeuses dans la masse fondue d'argent visqueuse. Pendant le refroidissement, le ZnO gazeux se recristallise sur les parois internes des bulles, conduisant à un film mince dans une microstructure semblable à de la mousse, qui peut facilement se briser à l'ouverture des contacts (figure 28) [30] [39] [58]

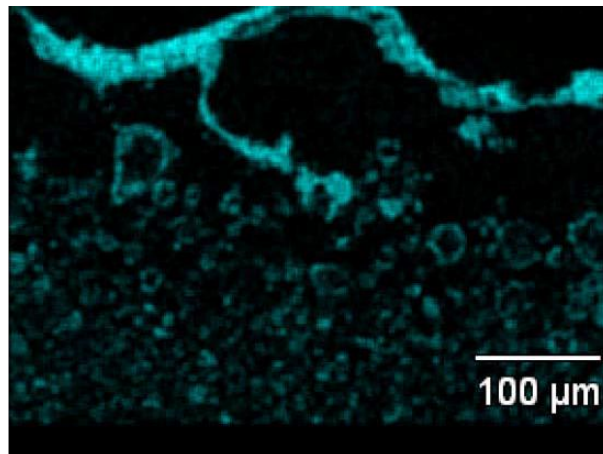


Figure 28 : Distribution de zinc après essai (EDS) montrant la couche de surface et les bulles de ZnO [30]

Walczuk *et al.* ont testé les matériaux suivant : 1) AgCdO 10% m, 2) AgCdO 13,5% m, 3) AgSnO₂Bi₂O₃ 10, % m 4) AgSnO₂In₂O₃ 12, % m 5) AgNi 10, 6) AgFe 10% m, 7) AgNi 0,15% m, 8) Ag-MM (MM: 1% m. métaux de terres rares dans lesquels il y a : 50% m. cerium (Ce), 30% m lanthane). Ils ont fait ces tests avec des courants élevés (4 kA-6 kA) à une tension de 48 V (50 Hz).

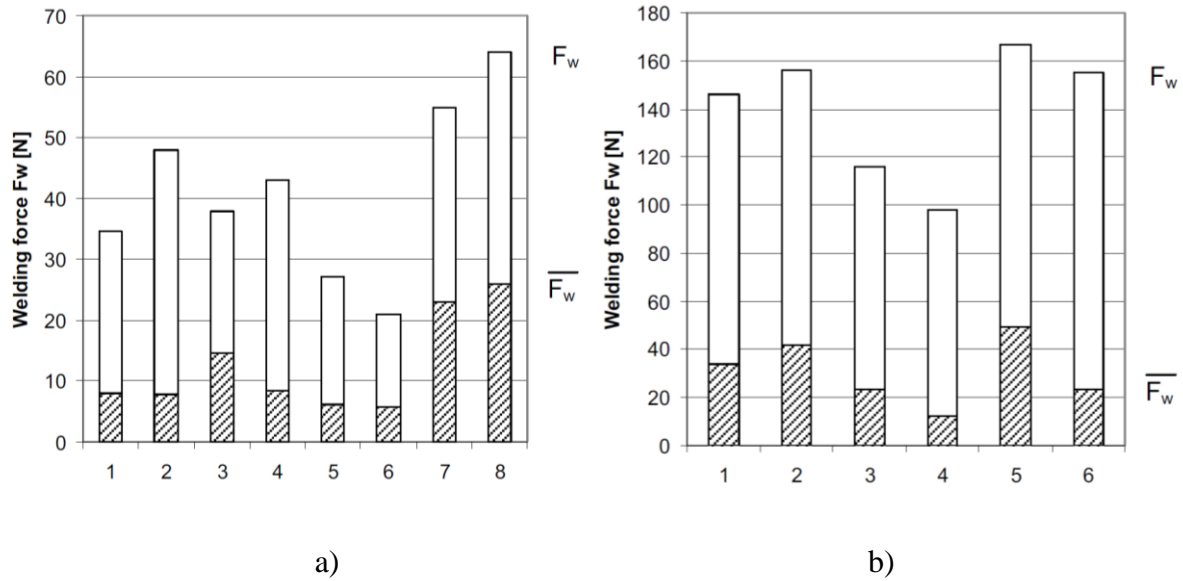


Figure 29 : a) Force de soudure à 4kA. b) Force de soudure à 6kA [59]

Ces résultats présentés sur la figure 29 montrent que la force de soudure évolue différemment d'un matériau à l'autre en fonction du niveau de courant. Le AgNi et le Ag-MM ne sont pas présentés sur la figure de test de soudure à 6 kA car ils sont associés à des forces de séparation très élevées ($F_{\max(\text{AgNi } 0,15)} = 207 \text{ N}$ et $F_{\max(\text{Ag-MM})} = 190 \text{ N}$) [59]. Généralement, plus le courant est fort, plus la force de soudure est importante.

3. Microstructure taille de grains et homogénéité de distribution de grains

Plusieurs recherches confirment que les matériaux Argent-Oxyde d'étain ont une bonne résistance à la soudure. Ainsi, des études se font sur l'amélioration de ce matériau par modification de sa microstructure en diversifiant ses méthodes de fabrication [47] [60]. Ceci apporte des changements remarquables sur le comportement de ces matériaux lors d'une commutation, en particulier, une modification de la valeur de la force de soudure peut être observée clairement.

Cinaroglu *et al.* [60] ont fait une comparaison entre des matériaux qui ont la même composition chimique (Ag, SnO_2 et des additifs Bi_2O_3 et CuO) mais à différentes microstructures dues à des différences au niveau de certains paramètres de la méthode de fabrication. D'après les résultats, ils ont conclu que la force de soudure dépend de la taille de grain de l'oxyde d'étain et que l'homogénéité de la distribution de ces grains et des additifs influence la dispersion des valeurs de la force de soudure [60].

La figure 30 montre la surface de deux matériaux avec la même composition chimique et différentes microstructures. Au niveau du matériau amélioré, la zone affectée par l'arc après le test de soudure présentes beaucoup de petits pores et le matériau standard forme une surface de contact avec de très gros pores. En outre, le matériau standard (matériau de référence) forme, juste au-dessous de la zone affectée par l'arc, des fissures parallèles à l'orientation préférentielle des particules d'oxyde le long de l'axe d'extrusion à chaud. Ces fissures peuvent provoquer un délaminage du matériau de contact et donc une augmentation de l'érosion par contact. De plus, ces fissures parallèles réduisent la dissipation thermique du pied d'arc dans la pièce de contact et augmentent ainsi l'épaisseur de la surface fondue ainsi que les pertes de matériau de contact par évaporation et éclaboussures de la masse fondue. Pour, le matériau amélioré (14WPA), ce n'est pas le cas, il forme une surface de contact plutôt lisse sans fissures. Il n'y a pas de signe de délamination du matériau de contact. C'est cette zone poreuse et fine du matériau de contact Ag / SnO₂ optimisé (14WPA) qui est, probablement, responsable du maintien des forces de soudure à un niveau modéré et donc de la réduction de la tendance au collage de ce matériau [60] [61].

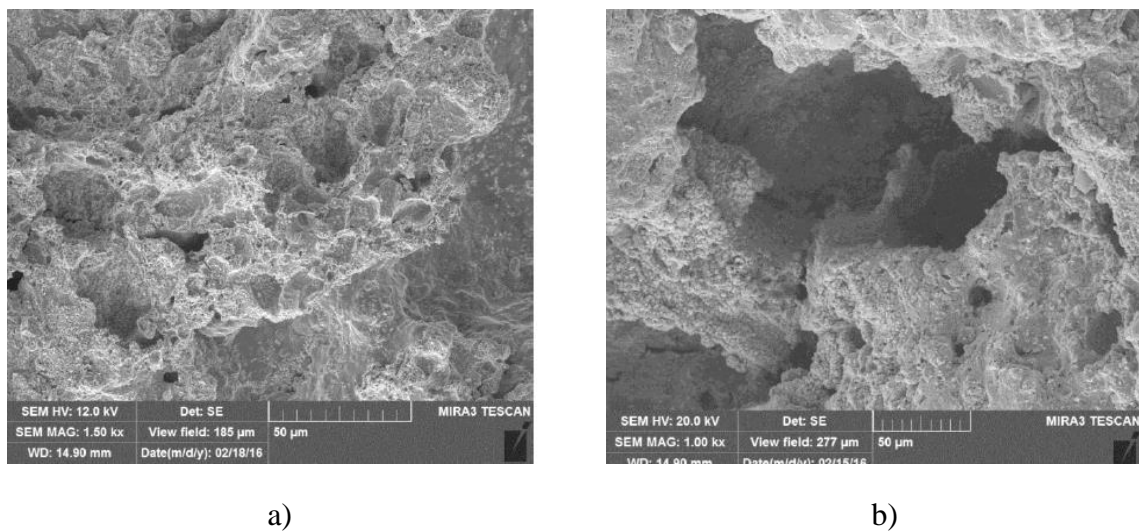


Figure 30 : Microstructure de la surface de 14WPA (a) et du matériaux standard (b) après test de soudure. [60]

En ce qui concerne la rugosité, Nilsson *et al.* ont montré qu'elle a un effet significatif sur la résistance de soudure. La rugosité de la surface de contact due à la microstructure évolue au cours de la commutation. Pour certaines conditions électriques, ils ont proposé des contacts avec une surface striée pour augmenter la résistance à la soudure [45].

4. Forme des contacts électriques

La forme des contacts peut aussi avoir un effet sur le phénomène de soudure. Des tests ont été effectués par Yee Kin Choi *et al.* [14], sur deux types de formes de contact des matériaux Argent-Oxyde d'étain, à savoir des rivets et des pastilles, dont les dimensions sont décrites sur la figure 30.

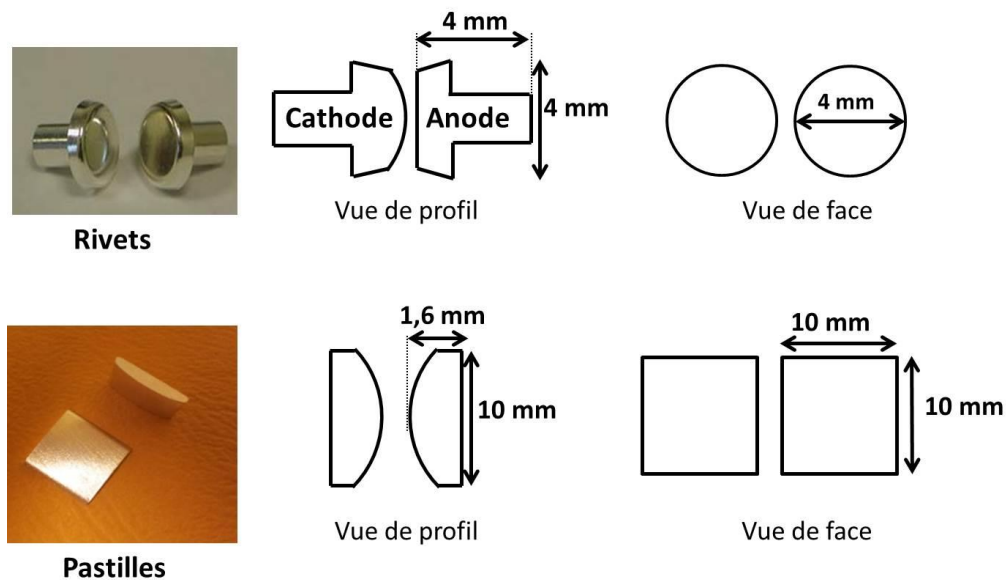


Figure 31 : Formes des matériaux de contact : rivets et pastilles [14]

Cette étude montre que les valeurs de la force de soudure des pastilles sont inférieures à celles des rivets sauf pour les échantillons contenant un fort taux d'oxydes d'étain ($\text{SnO}_2 > 10\%$) où elles sont du même ordre (figure 32).

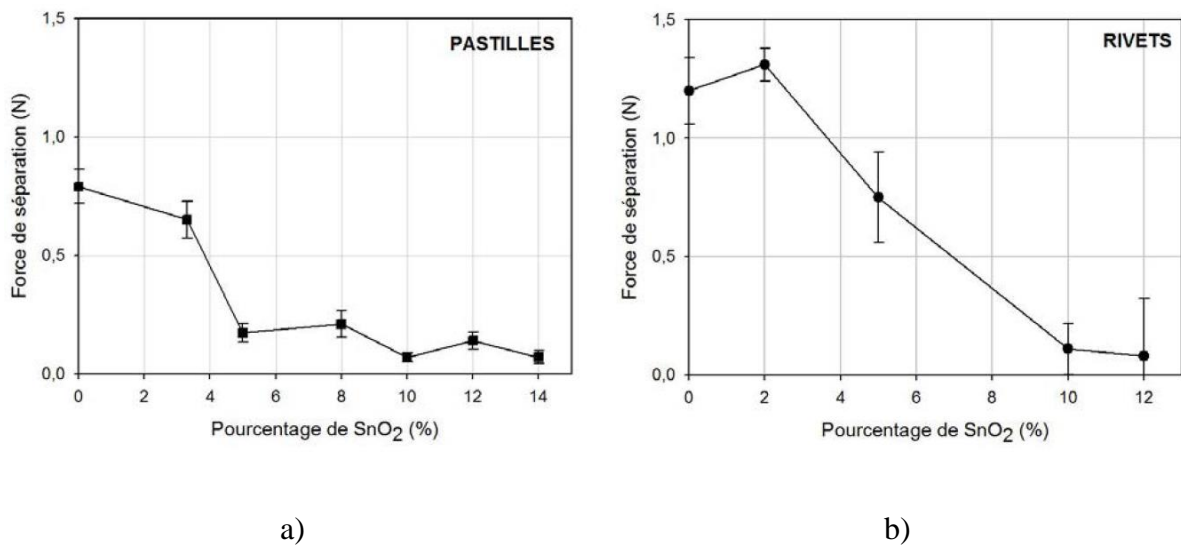


Figure 32 : Force de soudure en fonction du pourcentage de SnO₂. a) Pastilles. b) Rivets [14]

VI. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes caractéristiques des contacts électriques ainsi que les phénomènes physiques à l'origine de la formation de l'arc électrique. Par la suite, nous avons présenté les phénomènes qui conduisent à la dégradation des contacts, en particulier la soudure, qui est le sujet principal de cette thèse. Dans la dernière partie du chapitre, nous avons donné un aperçu des matériaux de contact en nous concentrant sur leur comportement à la soudure. L'analyse bibliographique montre l'existence de multiples paramètres qui influencent la résistance à la soudure des contacts, liés à la nature de l'application ainsi qu'à la nature des contacts eux-mêmes. Chaque matériau de contact se comporte différemment en fonction des conditions de fonctionnement des dispositifs de commutation. L'AgSnO₂ est actuellement le matériau de contact le plus utilisé dans l'industrie en raison de ses meilleures caractéristiques (conductivité, résistance à la soudure, etc.), la quantité d'oxyde métallique dans ce matériau a un effet remarquable sur sa résistance à la soudure ainsi que la nature et la quantité d'additifs tels que CuO, Bi₂O₃. L'amélioration des caractéristiques des matériaux, notamment la composition chimique, la microstructure et la forme des contacts électriques, peut réduire la tendance et la force de soudure et se traduire généralement par de meilleures performances.

Chapitre 2. Dispositif Expérimental

I. Introduction

L'étude de la soudure des contacts électriques nécessite l'utilisation d'un dispositif spécifique permettant de contrôler les conditions de test, mécaniques et électriques, et de mesurer les caractéristiques de la soudure, telle que la force de soudure, et les caractéristiques de circuit électrique lors d'un arc électrique. Ainsi, le banc permet de comparer le comportement de différents matériaux de contacts sans avoir besoin d'utiliser un contacteur pour chaque condition.

Les appareils de commutation (contacteurs, relais, etc.) disposent de caractéristiques telles que la taille des contacts, la force de contacts, le courant nominal etc., ces caractéristiques diffèrent de l'un à l'autre. Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, ces paramètres pourraient avoir un effet sur la caractéristique de la soudure.

Notre objectif est donc, dans un premier temps, de déterminer tous les paramètres électriques et mécaniques à partir des caractéristiques du contacteur et des conditions de son utilisation, et dans un second temps, de concevoir et de fabriquer le banc de test multifonctionnel, qui sert à étudier la soudure des contacts et les caractéristiques des arcs de rebond (durée, tension, courant). C'est la raison pour laquelle, nous avons établi une procédure pour caractériser les rebonds mécaniques produits dans le contacteur de puissance, et pour définir de tous les besoins spécifiques qui assurent le bon dimensionnement de tous les composants et leur bon fonctionnement dans les conditions aéronautiques (prise en compte de l'altitude par exemple).

Nous allons commencer ce chapitre par donner un aperçu sur l'évolution de l'électrification des avions et préciser le rôle du contacteur dans la distribution électrique. Nous allons poursuivre par la caractérisation des rebonds mécaniques en présentant la méthodologie suivie et les résultats obtenus et nous clôturerons par une description des caractéristiques et du fonctionnement du banc de test de soudure fabriqué durant cette thèse.

II. Généralités sur l'électrification des avions

1. Évolution de l'électrification des avions

En 1883, le scientifique et aérostatier français Gaston Tissandier et son frère Albert ont contribué à la réalisation du premier modèle de ballon dirigeable mû par l'électricité à l'aide de moteurs électrique. Ce modèle est présenté sur la figure 33. Cette invention marque le début de l'histoire de l'électrification des aéronefs [62].

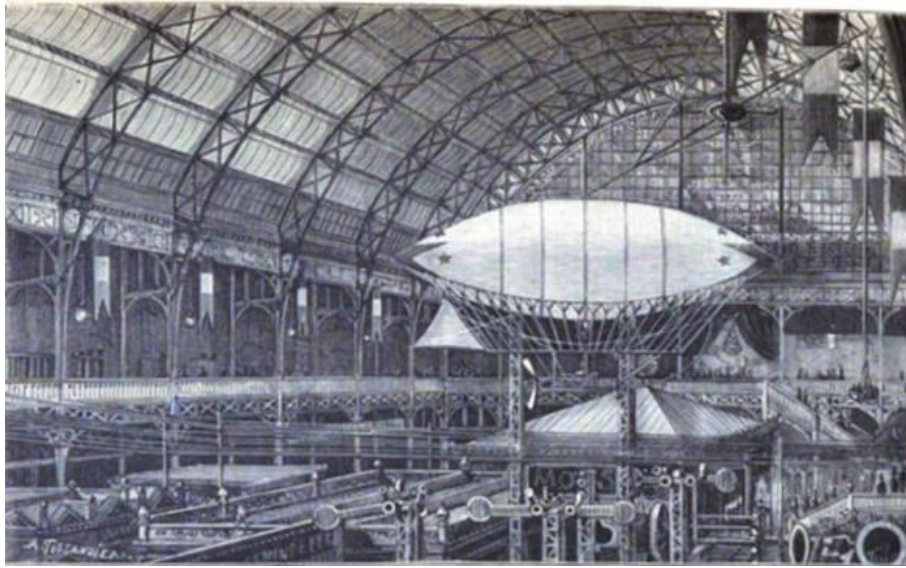


Figure 33 : Le petit aérostat à hélice de M. Gaston Tissandier à l'exposition d'Électricité en 1881 [62]

Au début de l'aviation, le pilotage et la navigation, considérés comme fonctions primaires, reposaient sur l'utilisation de la mécanique, du pneumatique et de l'hydraulique, à l'exception des fonctions auxiliaires telles que le démarrage du moteur et l'éclairage, qui étaient alimentés par l'électricité. Cependant, l'électrification des avions croît à chaque nouvelle génération d'appareils, chaque année l'industrie aéronautique développe des technologies pour mettre en service des avions plus électriques (figure 34). Les objectifs visés sont multiples tels que l'augmentation de la sécurité des avions, la simplification de leur maintenance, rendre ces appareils plus vertueux écologiquement et l'augmentation du confort des passagers.

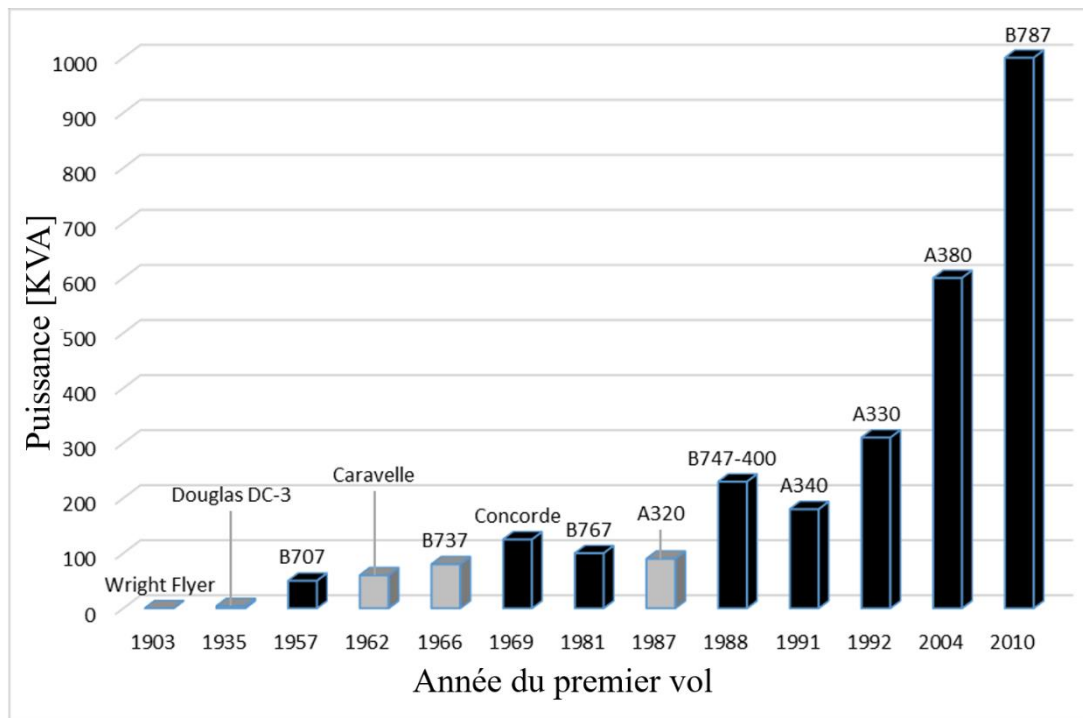


Figure 34 : Évolution du besoin en énergie électrique (gris : court à moyen porteur ; noir : moyen à long porteur) [63]

Le remplacement d'une partie des systèmes mécaniques, pneumatiques et hydrauliques par un système électrique se traduit par la croissance du nombre de dispositifs électriques (figure 35). Ainsi, cette progression a conduit à une augmentation de la puissance électrique requise, en particulier pour les gros avions [63]–[67], comme le montre la Figure 34.

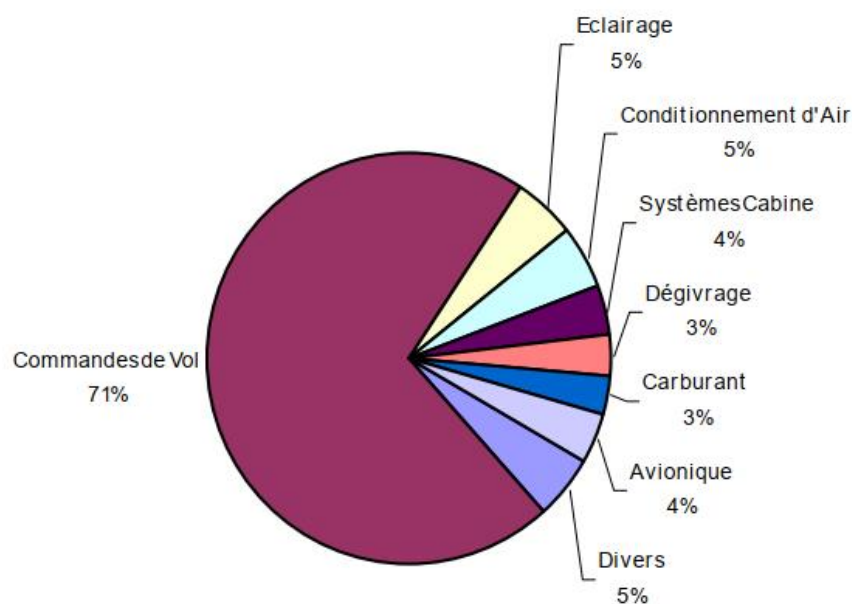


Figure 35 : Répartition des puissances sur A380

2. Fonctionnement d'un réseau électrique d'avion

Les avions sont équipés de plusieurs sources électriques, principales et auxiliaires. Les générateurs électriques principaux fournissent de l'électricité une fois que les moteurs démarrent, en se servant de l'énergie mécanique fournie par un des moteurs. L'avion est par conséquent autonome électriquement. Les avions fabriqués avant l'A380 fonctionnent avec une électricité à fréquence fixe, produite par des générateurs appelés « IDG Integrated Drive Generator », ils étaient couplés à chaque moteur, permettant la constitution d'un réseau alternatif triphasé principal avec une tension de 115 à 200 V_{AC}. Actuellement, le réseau AC est désormais à fréquence variable (360/800 Hz), il existe donc un dispositif qui permet de réguler la fréquence appelé « CSD Constant Speed Drive ». Ce régulateur contrôle mécaniquement la vitesse de rotation du générateur et assure un nombre de tours stable afin de maintenir une fréquence constante au réseau (400 Hz), il a l'avantage d'être moins encombrant et moins lourd. L'utilisation du 400 Hz est apparue pendant la seconde guerre mondiale en Angleterre.

La figure 36 montre l'emplacement des différentes sources électriques dans un avion A380.

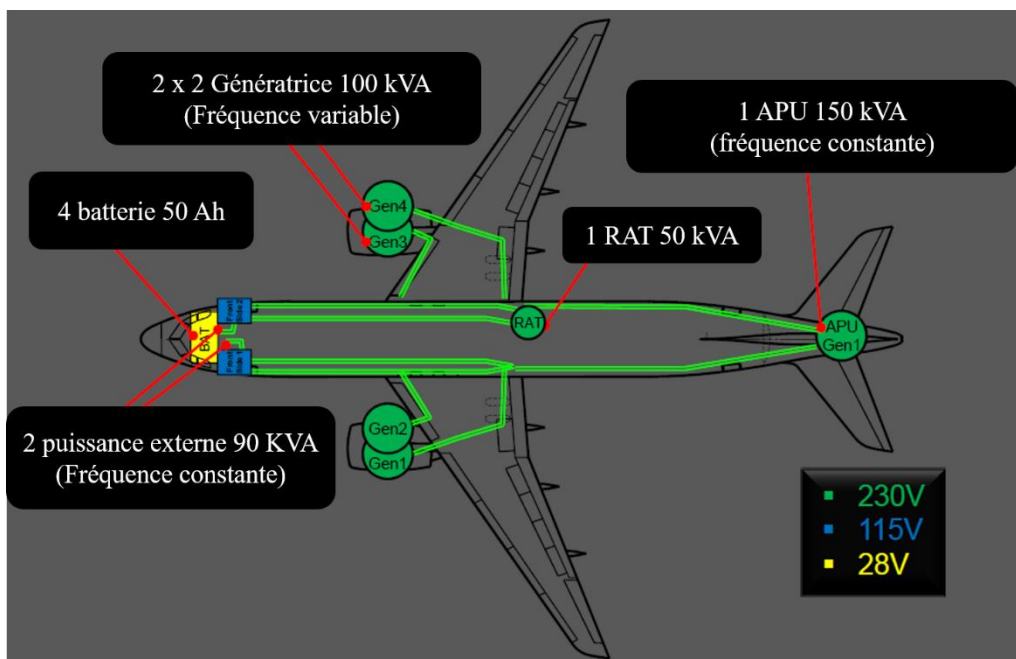


Figure 36 : Architecture du circuit électrique de l'A380

Il existe aussi un réseau secondaire continu d'une tension de 28 V utilisé pour les faibles charges électriques tel que les charges de contrôle, ce réseau secondaire est issu du réseau principal à travers des transformateurs et des redresseurs.

En outre, il existe des moyens de secours, deux systèmes auxiliaires capables de générer de l'énergie et pouvant prendre le relais en cas de besoin : des batteries dans les soutes et une éolienne de secours (RAT) qui fonctionne automatiquement en cas de rupture d'alimentation électrique. Ces systèmes de secours n'ont été utilisés qu'à deux reprises en 20 ans.

3. Distribution électrique d'avion : cœur électrique

La distribution électrique est assurée par un boîtier électrique appelé « cœur électrique » (figure 37). Ce boîtier se situe dans la soute d'avion, il permet de gérer toute l'énergie électrique de l'aéronef ; La puissance vient principalement des génératrices, ensuite, elle arrive au cœur électrique pour se répartir entre les différentes charges. Les avions possèdent aussi un cœur de secours. Ces systèmes de distribution primaires et secondaires disposent d'une gamme de composants (contacteurs, dispositifs de protection, disjoncteurs, interrupteurs, etc.), d'un module de régulation de la tension de l'alternateur UGS, un module de désexcitation rapide de l'alternateur et finalement d'un module de protection des circuits distribués.

Chaque cœur électrique contient plusieurs dizaines de contacteurs et de « bus bar ». Par exemple, l'A380 est équipé de 130 contacteurs.



Figure 37 : Boîtier de distribution électrique

4. Contacteur

Le contacteur joue un rôle crucial dans la distribution électrique, il doit être capable d'établir, de transporter et de couper des courants dans les conditions normales et également en cas de surcharges. Le contacteur doit nécessairement être utilisé dans le domaine pour lequel il a été conçu.

Les contacteurs à leur tour connaissent des changements d'une génération à l'autre, la figure 38 montre un exemple de cette évolution qui se distingue au niveau de la taille et du poids des contacteurs mais également au niveau de leurs fonctionnalités.

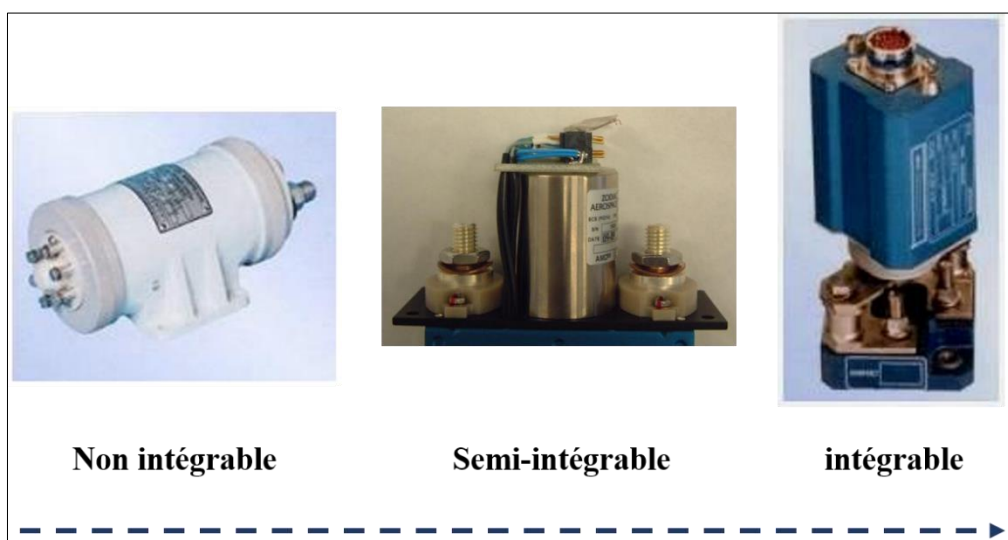


Figure 38 : Exemple de contacteurs de différentes générations

Ces commutateurs doivent suivre l'évolution de l'électrification des avions et s'adapter aux nouvelles puissances électriques à bord d'un avion. Ainsi, l'industrie aéronautique travaille en permanence sur l'amélioration des performances de ces appareils électromécaniques.

Ainsi, notre étude est menée dans le cadre de l'amélioration des contacts électriques principaux qui se situe dans la chambre de puissance du contacteur, la figure 39 montrant le positionnement de ces contacts. La fermeture et l'ouverture de ces contacts sont assurées par l'actionneur, qui représente la partie commande du contacteur. Comme évoqué dans le chapitre précédent, les contacts électriques peuvent subir des endommagements sous l'effet des arcs électriques. Dans notre cas, nous nous sommes intéressés à l'étude du problème de la soudure dans un contacteur aéronautique. Ceci nécessite une détermination des caractéristiques clés du contacteur qui nous aide à nous rapprocher des conditions réelles de son fonctionnement. Ces caractéristiques sont

la force de contact et les caractéristiques des rebonds produits lors de la fermeture de ces contacts (durée, amplitude).

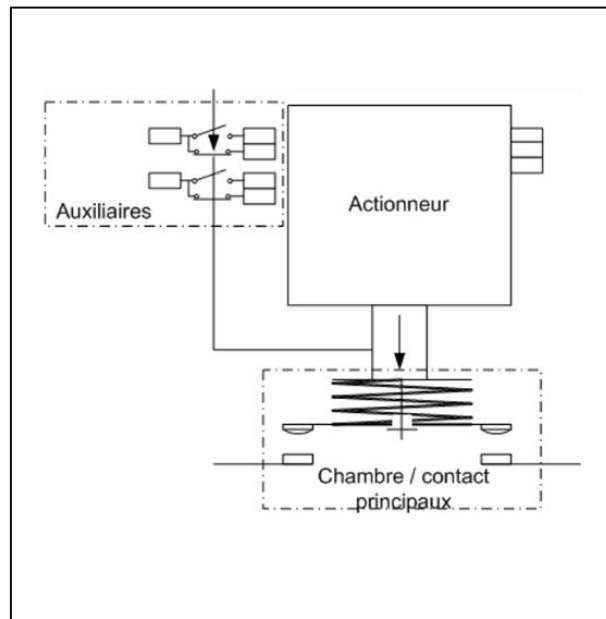


Figure 39 : Schéma d'un contacteur monophasé utilisé en aéronautique

Concernant les paramètres électriques, il faut déterminer la tension, le courant nominal, le type de circuit avec lesquels le contacteur fonctionne. Le but ici, est de pouvoir comparer les performances des matériaux sur l'aspect soudure pour différentes fréquences de tensions électriques, y compris la fréquence de l'utilisation usuelle (400 Hz), en prenant en compte le cas de défaut.

Les contacts électriques utilisés dans le contacteur échantillon sont à base d' AgSnO_2 , l'oxyde d'étain représentant 10% de la masse. Comme mentionné dans le chapitre précédent, ce type de matériau est connu pour son pouvoir anti soudure. Ces contacts ont une forme de pastille d'un diamètre de 16 mm de surface bombée avec un rayon de 300 mm, ils sont brasés sur des shunts en cuivre revêtus avec de l'argent, l'objectif de ce revêtement d'argent étant de protéger les shunts contre l'oxydation. Les deux contacts mobiles se retrouvent sur un même shunt, l'un à côté de l'autre, un devant l'autre, tandis que chaque contact fixe est brasé sur l'extrémité d'un shunt séparé. L'autre extrémité de ce shunt est conçu pour le branchement d'un câble électrique par visserie. La figure 40 décrit le positionnement des contacts sur les shunts.

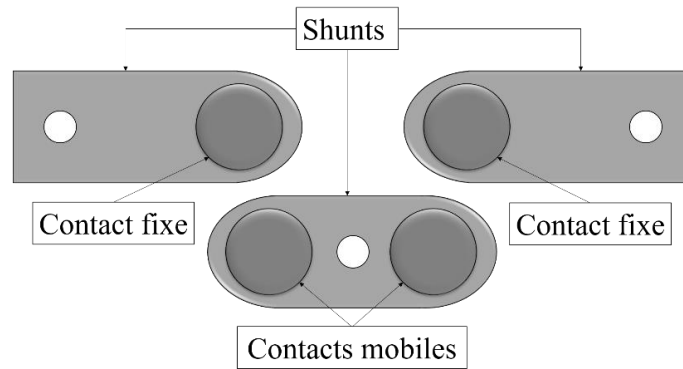


Figure 40 : Positionnement des pastilles de contacts électriques sur les shunts

III. Caractérisation des rebonds mécaniques dans un contacteur de puissance

1. Contexte et objectif

Afin d'étudier le phénomène de la soudure des contacts électriques dans des conditions aéronautiques, nous avons, dans un premier temps, effectué une caractérisation mécanique d'un contacteur fabriqué par Safran Electrical & Power, ce contacteur est un modèle triphasé de type NO (Normally Open), son courant nominal est 430 A. Cette étude préliminaire s'attache à définir les caractéristiques des rebonds mécaniques produits lors de la fermeture des contacts.

Dans les contacteurs de puissance, la cinématique de commutation du contact transmet des vibrations à l'ensemble du système, ces vibrations perturbent les mouvements relatifs du contact mobile, c'est-à-dire les rebonds du contact mobile sur le contact fixe. Malheureusement, ces vibrations compliquent la détection des rebonds.

Pour remédier à ce problème, nous combinons simultanément deux méthodes de caractérisation des rebonds. La première méthode s'appuie sur l'utilisation de deux capteurs de déplacement, le premier mesure le déplacement du contact mobile et le deuxième mesure les vibrations du contacteur par rapport au bâti. Ensuite, nous calculons le déplacement relatif du contact mobile par rapport au contact fixe à l'aide d'un programme d'ajustement, et finalement nous en déduisons les paramètres des rebonds (force, longueur, durée, forme). La deuxième méthode est complémentaire à la méthode précédente. Elle consiste à utiliser l'imagerie rapide afin de visualiser le déplacement du contact mobile par rapport au contact fixe. La corrélation entre les deux méthodes permet d'avoir une caractérisation fiable de ces rebonds.

Enfin, l'objectif de cette étude est de concevoir le banc expérimental principal qui permet d'étudier la soudure des contacts électriques, dans des conditions contrôlables. Ce banc devra

être capable de reproduire des rebonds mécaniques identiques à ceux produits dans le contacteur réel.

2. Descriptif du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental monté pour caractériser les rebonds mécaniques du contacteur de puissance est présenté sur la figure 41. Il est composé de deux parties distinctes, une partie électrique et une partie acquisition.

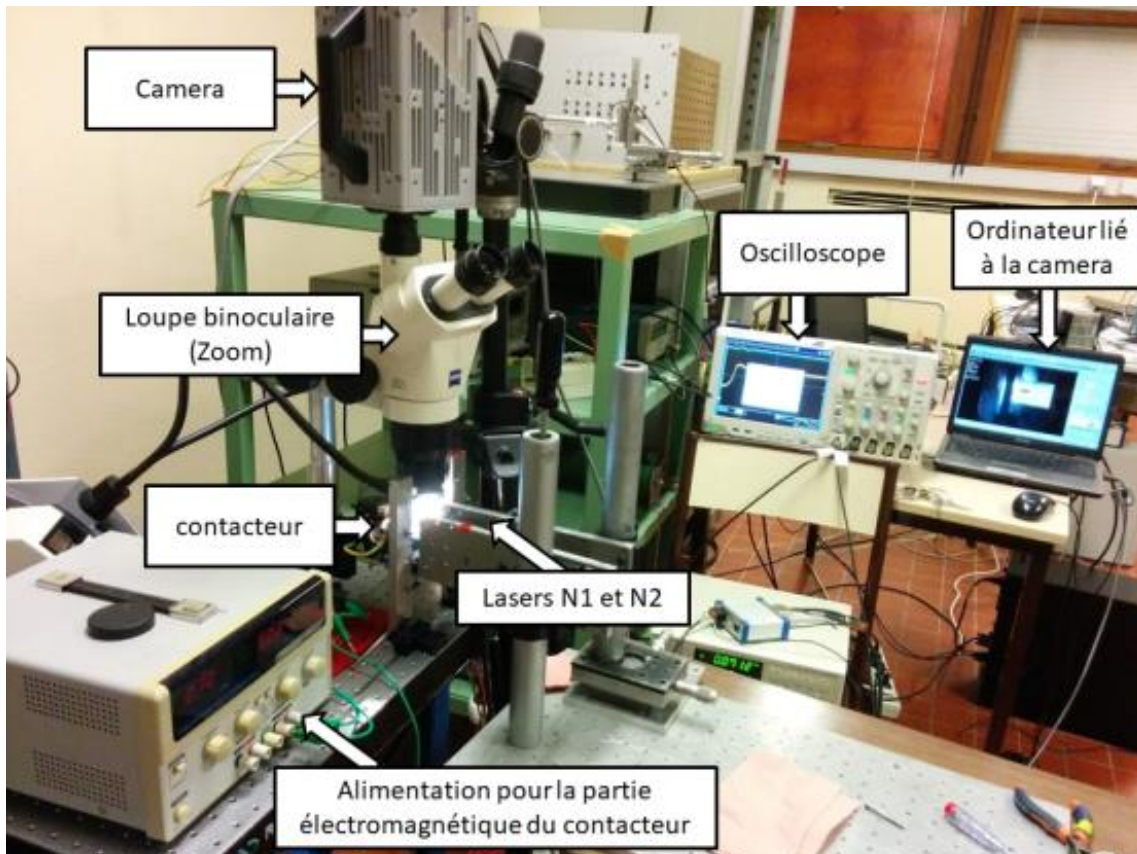


Figure 41 : Les différents composants du banc expérimental pour la caractérisation des rebonds

La figure 42 décrit le schéma de ce banc de test. La partie électrique et la partie acquisition sont synchronisées, le déroulement d'un essai se fait principalement par fermeture du contacteur. Une fois que l'oscilloscope détecte une tension d'arc, il commence à enregistrer les mesures de la tension et des déplacements détectés par les lasers, tandis que la caméra commence l'enregistrement des images des contacts en mouvements.

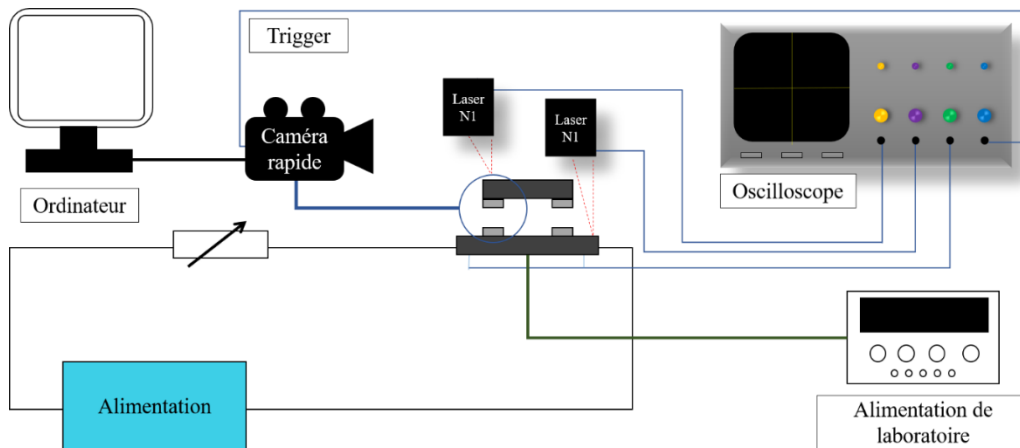


Figure 42 : Schéma du dispositif de mesure de rebonds

Partie électrique

Cette partie est formée des composants suivants :

- Une alimentation (XANTREX) pouvant fournir jusqu'à 60V et 100A. Nous avons choisi d'alimenter le circuit avec une tension de 42 V et un courant de 10A.
- Le contacteur (3PST NO 430 A) est fixé sur une table optique à l'aide d'un support mécanique pour réduire les vibrations produites par la cinématique de la commutation. Une seule phase est utilisée pour ce test, sachant que chaque phase est équipée d'une double fermeture, c'est-à-dire, de deux contacts fixes et de deux contacts mobiles. Pour éviter une incohérence des mesures de la tension d'arc, un couple de contacts (mobile et fixe) doivent être shuntés.
- Une alimentation de laboratoire est installée pour commuter le contacteur, l'opération de la fermeture se fait quand l'alimentation alimente la bobine du moteur avec une tension de 28V et avec un courant d'appel de 5 A et par la suite le contacteur reste fermé avec un courant de maintien de 0.5A. L'ouverture du contacteur se fait au moment où l'alimentation arrête de fournir le courant ($I=0A$)
- Un bloc de résistance de 4,2 Ω .

Partie acquisition

Cette partie se compose de deux types d'appareils d'acquisition, le premier type est destiné à la mesure des déplacements et le deuxième type est utilisé pour mesurer les caractéristiques électriques du circuit. Nous allons citer ces composants dans ce paragraphe et décrire leur emplacement et fonctionnement.

Sur une deuxième table optique, un capteur de déplacement « Laser N1 » (LK-H027, laser rouge à semi-conducteur de longueur d'onde de 655nm) est placé et fixé devant le contact mobile pour détecter le déplacement de ce dernier. Un autre capteur de déplacement « Laser N2 » (LC-2440, laser rouge à semi-conducteur de longueur d'onde de 670 nm) est fixé devant une partie fixe du contacteur afin de détecter les vibrations de l'ensemble du contacteur dues à la cinématique du contact. Au-dessus du contacteur, une loupe binoculaire est installée, sur laquelle une caméra rapide (Fastcam SA3, Photron) est fixée. Ce dispositif permet de filmer l'opération de la fermeture des contacts. Pour que les contacts apparaissent clairement sur les images prises par la caméra, la figure 43 montre le positionnement de chaque appareil par rapport au contacteur.

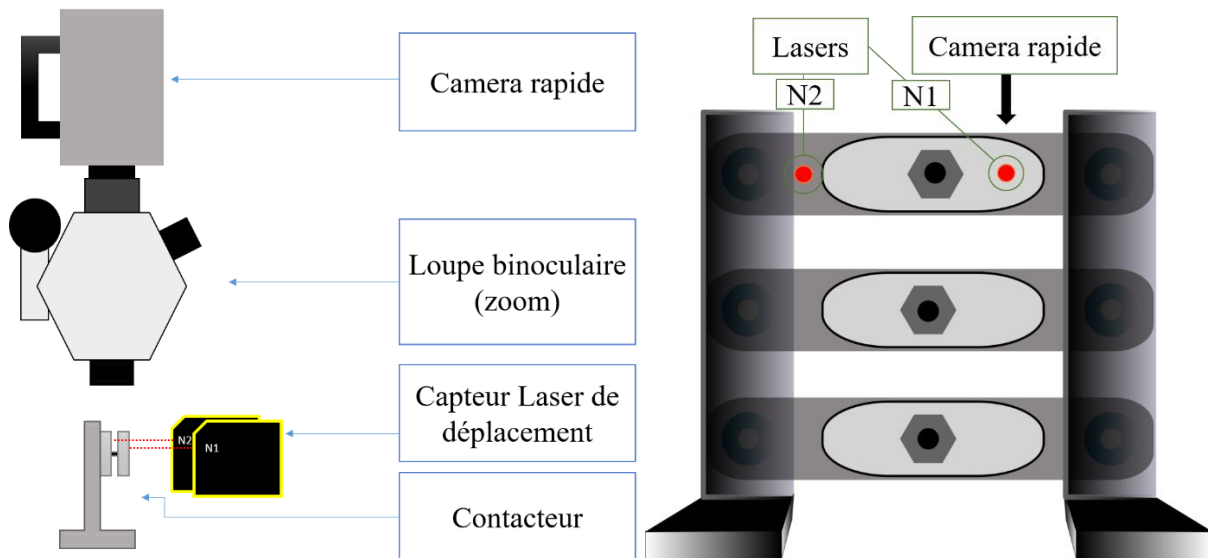


Figure 43 : Emplacement de la caméra et les deux lasers par rapport au contacteur

Une sonde de tension est utilisée pour mesurer la tension entre les bornes de contacts fixe et mobile. La caméra est branchée sur l'oscilloscope, ce qui permet de déclencher l'enregistrement des images sur un PC d'une façon synchronisée avec les autres appareils de mesure au moment de la fermeture des contacts. L'ensemble des mesures réalisées par les capteurs de déplacement et la sonde de tension sont acquis par l'oscilloscope (Tektronix DPO 5104 Digital Phosphor Oscilloscope 1GHz, 10GS/s).

Une vingtaine d'essais doivent être faits pour garantir la reproductibilité des résultats et pour s'assurer de leur exactitude.

3. Caractéristiques de rebond

Capteurs de déplacement

Les profils de déplacement des contacts mobiles et fixes, ainsi que la trace de tension obtenus lors de la fermeture du contacteur, sont présentés sur la figure 44. Ces mesures montrent que tout le système (contacts fixe et mobile) subit une vibration provoquée par la cinétique de commutation du contacteur. Sur la courbe de mesure de déplacement de contact mobile, nous observons l'apparition d'un rebond juste après le premier contact provoquant un arc électrique d'une durée de ~ 2 ms et d'une tension de 14 V.

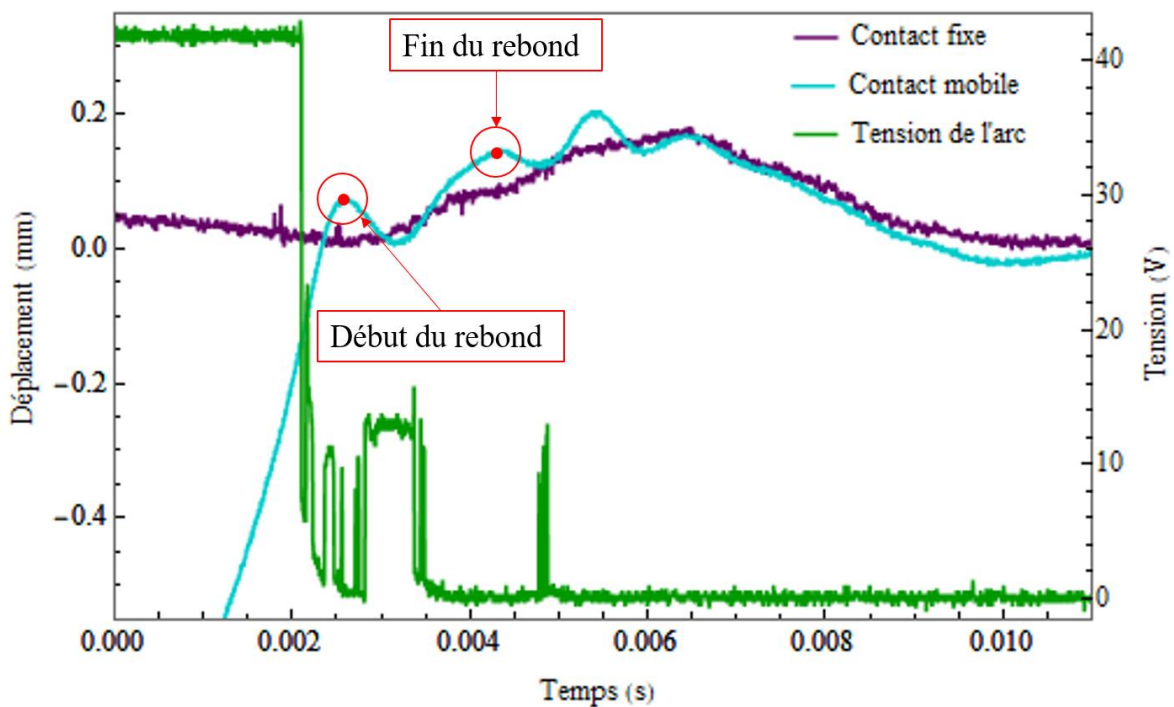


Figure 44 : Exemple de traces de la tension aux bornes des contacts et de déplacement des contacts mobile et fixe lors de la fermeture

Imagerie rapide

Avec l'imagerie rapide nous observons clairement le déroulement des rebonds mécaniques et l'apparition de l'arc électrique. La figure 45 montre quatre clichés sélectionnés parmi d'autres images par ordre chronologique de l'acquisition, qui représentent le déplacement du contact mobile vers le contact fixe. Les contacts font une première fermeture (figure 45-b), ensuite le

contact mobile rebondit, cette réouverture cause l'amorçage de l'arc par pont fondu (figure 45-c), cet arc s'éteint finalement par re-fermeture des contacts.

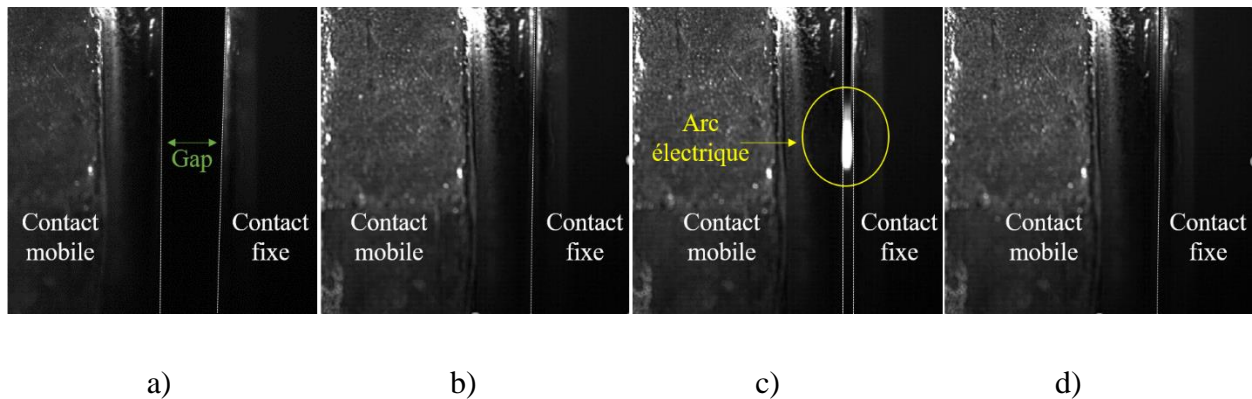


Figure 45 : Images prises par la caméra rapide : a) contact ouvert, b) premier contact avant le rebond, c) arc durant le rebond, d) contact fermé

En plus de l'importance de l'observation visuelle que l'imagerie rapide offre, nous pouvons aussi en déduire des mesures de déplacements des contacts. Le principe de cette méthode s'appuie sur la détermination des coordonnées des pixels qui correspondent aux positions des deux parties des contacts électriques en fonction du temps. Le programme utilisé pour extraire ces coordonnées est développé à l'IPR, intégré dans le logiciel ImageJ (open source).

La figure 46 représente le déplacement des contacts fixe et mobile obtenu par imagerie rapide. Cette méthode complémentaire permet de valider les résultats obtenus avec les lasers.

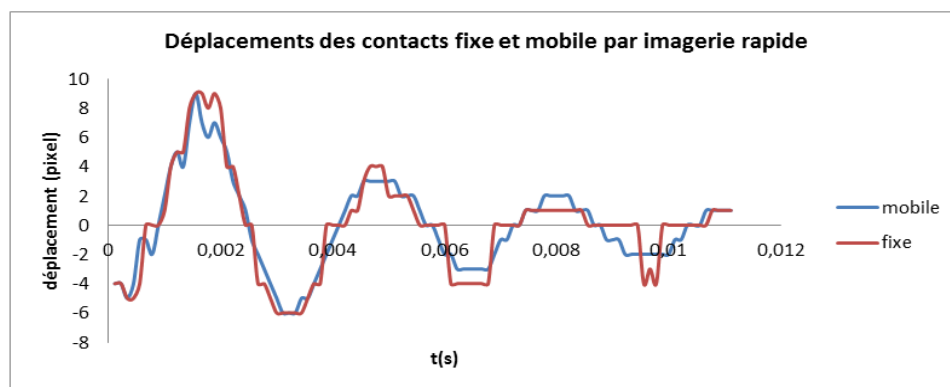


Figure 46 : Déplacement des contacts mobile et fixe obtenu via l'imagerie rapide

Comme évoqué précédemment, une vibration de l'ensemble du système causée par la cinématique de commutation du contacteur, complique la détection des rebonds mécaniques. Dans un premier temps, nous avons effectué un ajustement des mesures de contact fixe et mobile, pour montrer qu'ils ont subi tous les deux la même vibration.

Afin de déterminer le profil absolu du rebond, une soustraction de mesures de déplacement du contact mobile et de l'ajustement de la vibration du système a été effectuée. Le résultat de cette soustraction est présenté sur la figure 47.

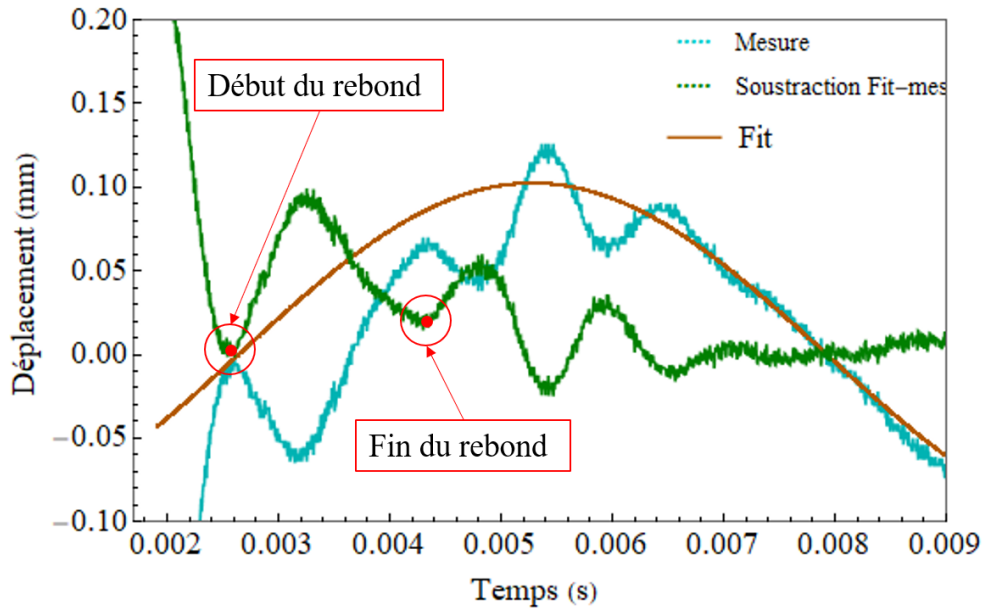


Figure 47 : Soustraction des valeurs de la courbe d'ajustement de la vibration du système et les valeurs des mesures de déplacement du contact mobile.

Le profil du rebond obtenu correspond à une partie d'une solution d'un modèle mécanique :

$$x(t) = a\sin(2\pi ft + \phi) \quad (19)$$

avec $a=83 \mu\text{m}$; $f=300 \text{ Hz}$ pour l'exemple présenté sur la figure 48. Cette fonction nous permet d'extraire toutes les caractéristiques nécessaires pour simuler les rebonds mécaniques avec le banc de test de soudure. Le profil du rebond, sa vitesse et son accélération sont présentés sur la figure 48 et 49.

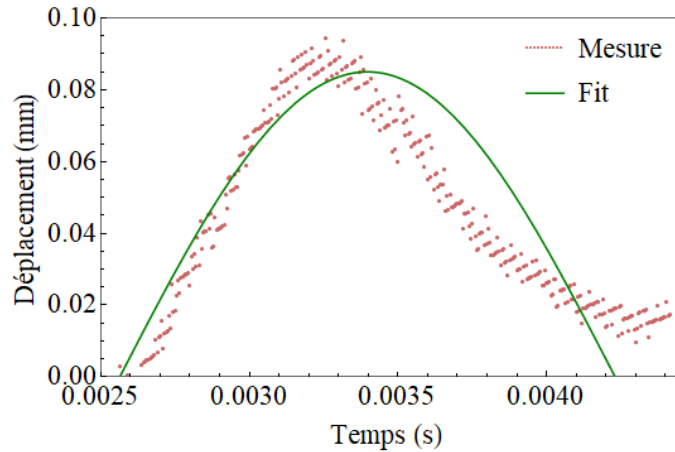


Figure 48 : Profil du rebond mécanique et son approximation

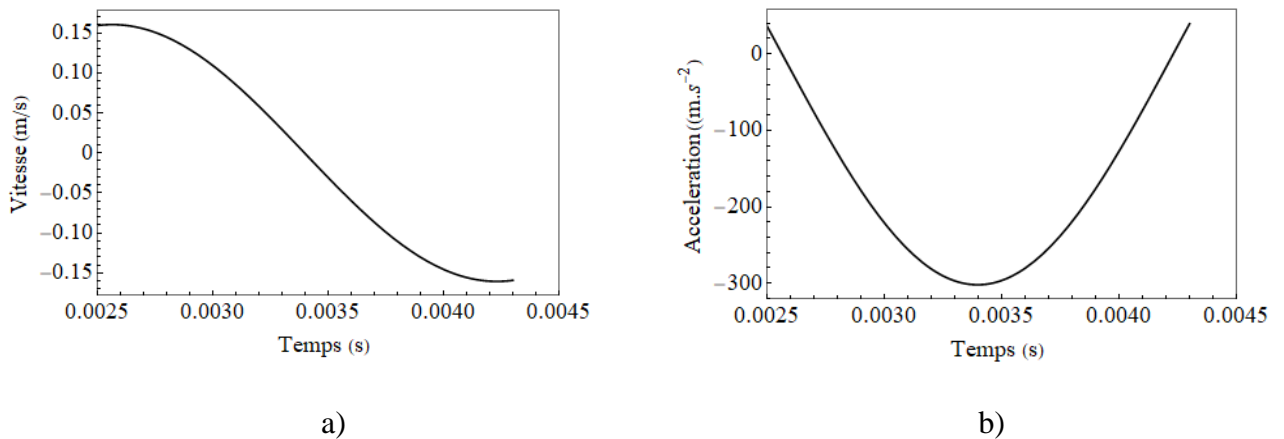


Figure 49 : a) Vitesse du rebond, b) Accélération du rebond

Pour récapituler, cette investigation a permis de définir les caractéristiques de rebond. Ceci, nous a permis de concevoir un banc de test de soudure permettant de produire des rebonds similaires à ceux mesurés, c'est à dire avec une durée de $\sim 2 \pm 0,5$ ms et une amplitude de 80 ± 5 μm . À partir de cette étude, nous allons concevoir un banc de test permettant de reproduire ces rebonds mécaniques. Ce banc de test sera approprié à l'étude du phénomène de soudure des contacts électriques. Ainsi, il permettra de réaliser ces tests de soudure dans des conditions mécaniques et électriques proches des conditions réelles de fonctionnement d'un contacteur utilisé pour une application aéronautique.

IV. Dispositif expérimental du test de la soudure

1. Objectif

Les mécanismes exacts de l'interaction de l'arc avec les électrodes, sont encore mal compris. En particulier, aucun modèle n'explique de façon complète les caractéristiques physiques de

l'interaction arc-électrodes, de même que son influence sur la soudure. Cet état de l'art implique que de nombreux essais sont nécessaires pour valider les performances du contacteur notamment pour des conditions aéronautiques. De plus, ces essais sont coûteux et allongent le cycle de développement. Notre objectif est de comprendre les mécanismes mis en jeu afin de pouvoir comparer les performances des différents matériaux sur l'aspect soudure dynamique des contacts sans avoir à fabriquer et tester de nombreux contacteurs.

Pour développer un dispositif expérimental pour notre étude, nous nous sommes basés sur le principe de fonctionnement du banc de test réalisé par Morin [11], ce dernier a étudié les arcs de fermeture pour application automobile. Cependant, dans notre cas, la conception de ce banc doit être adaptée à une utilisation dans des conditions aéronautiques, où les niveaux de tension et de courant sont plus importants que dans le cas de l'automobile. De plus, il est nécessaire de prendre en considération des moyens de test spécifiques disponibles uniquement à l'échelle industrielle, comme les alimentations de puissance. Dans cette partie de ce chapitre nous allons donner une description détaillée des caractéristiques des différents composants de ce nouveau dispositif.

2. Principe de fonctionnement : Conception et dimensionnement / Composants du banc

Le schéma du dispositif expérimental est présenté sur la figure 50. Ce dispositif se compose principalement de deux parties, une partie qui permet d'appliquer une force de contact spécifique, de produire des rebonds mécaniques contrôlés sous des conditions électriques définies (niveau de tension et courant, et fréquence) et finalement de séparer les contacts. Et une partie pilotage et acquisition qui permet de contrôler la partie opératoire, d'acquérir et de traiter les données de mesures mécaniques et électriques obtenues durant chaque opération. La conception de ce banc permet de l'installer dans une enceinte climatique afin de simuler les altitudes d'un vol d'avion pour de futurs tests, c'est-à-dire dans des conditions de pression et de température différentes.

En raison de la spécificité des moyens de test aéronautique, ce dispositif expérimental doit être installé dans les locaux de notre partenaire industriel. Ces moyens de tests sont notamment la source électrique, qui permet de fournir une puissance allant jusqu'à 1,4 MWatt.

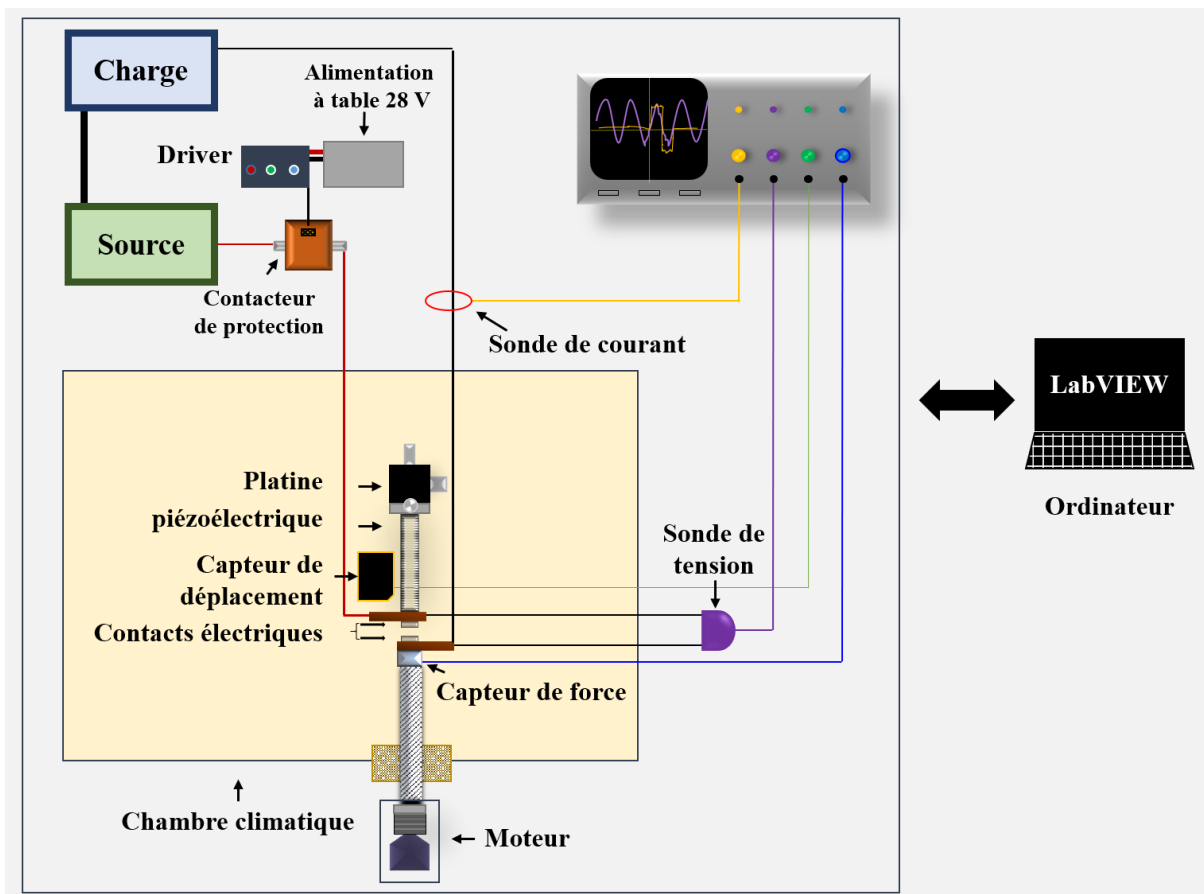


Figure 50 : Schéma de l'équipement d'essai pour étudier le phénomène de la soudure dans des conditions aéronautiques

Le banc de test est automatisé, il réalise les essais en toute autonomie. Tous les appareils opératoires et de mesures qui le constituent sont pilotés directement par un programme développé sous LABVIEW.

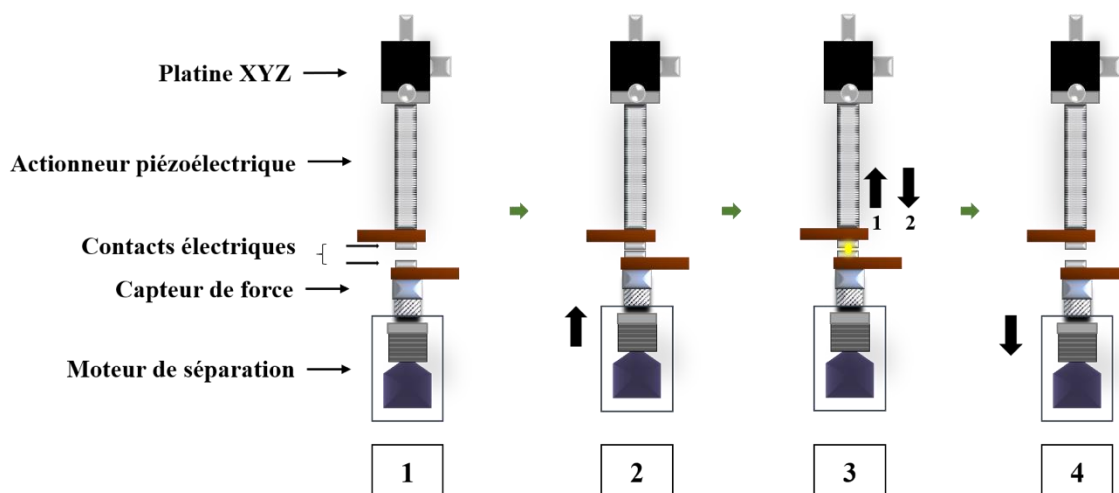


Figure 51 : Étapes d'une opération mécanique du banc de test

Globalement, après la mise en place des échantillons et l'allumage des appareils qui composent le banc de test, le déroulement d'un essai commence par une initialisation de tous ces appareils (voir la figure 51). Le moteur de séparation à son tour, trouve sa position initiale, en laissant un gap entre les électrodes de $\sim 1,5$ mm (étape 1). Le moteur applique une force de contact choisie (étape 2), cette force est ajustée à l'aide d'un capteur de force fixé sur le contact mobile. Dans un second temps (étape 3), le courant est appliqué dans le circuit électrique du banc, puis, l'actionneur piézoélectrique sur lequel le contact fixe est accroché, produit un rebond mécanique contrôlé, durant lequel un arc électrique peut avoir lieu. Après 5s les contacts se séparent à l'aide du moteur de séparation et le capteur de force mesure simultanément la force de séparation à partir de laquelle on déduit la force de soudure des contacts (étape 4).

3. Partie opératoire

3.1. Partie mécanique

Comme évoqué dans le paragraphe précédent, les contacts échantillons subissent des opérations mécaniques et électriques de façon contrôlée et chronologique. La partie opératoire à son tour se forme de deux parties, une mécanique et une électrique. La figure 52 montre les différents composants mécaniques du banc de test ainsi que leur emplacement.

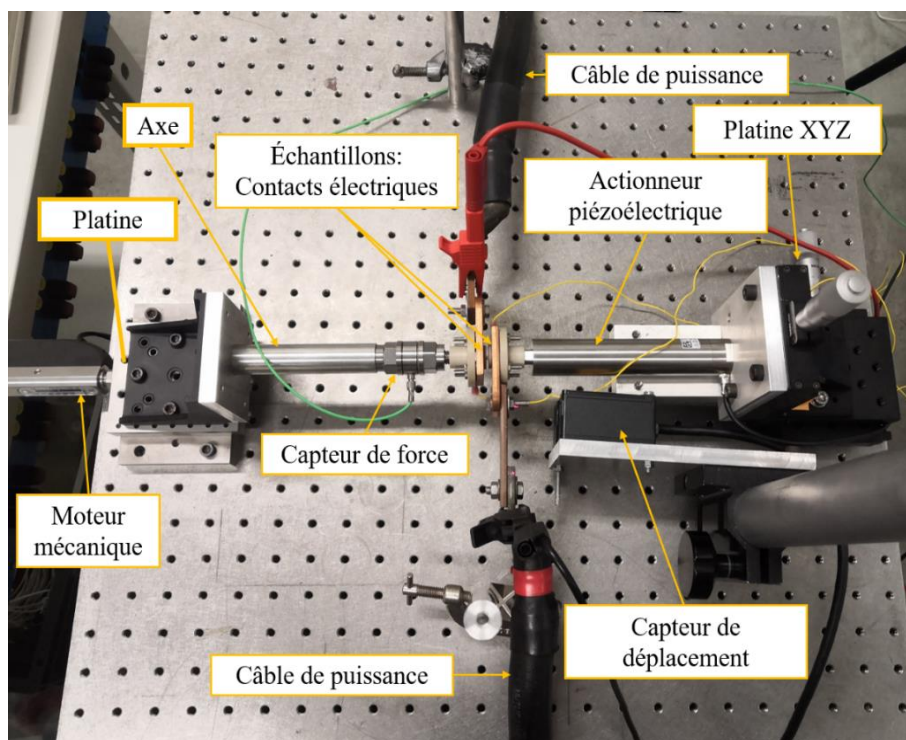


Figure 52 : Dispositif expérimental : partie opératoire

3.2. Dimensions du dispositif

Les composants mécaniques sont fixés sur un plateau optique de forme carrée de 600x600 mm, d'une épaisseur de 59 mm déposé sur une table. La surface de travail est en acier inoxydable, elle contient des trous de fixation M6 espacés de 2,5 cm. Le corps du plateau est formé de différents morceaux de nid d'abeilles d'acier empilés. Cette configuration permet d'avoir un plan de travail amorti. Il est possible de déposer ce plateau optique dans une enceinte climatique, un schéma présenté sur le paragraphe suivant montre l'emplacement du plateau optique et les autres composants dans différentes configurations (sans et avec enceinte climatique).

3.3. Moteur de séparation

Le moteur a un rôle crucial dans ce banc de test, il doit appliquer une force de pression et de traction selon le sens de son déplacement. Le moteur que nous avons choisi pour notre dispositif est un actionneur LTA-HL pas à pas de chez Newport, avec une résolution de 0.0074 μm , il se caractérise par une course maximale de 25 mm, avec une capacité de compression qui va jusqu'à 120 N et une capacité de traction de 100 N. L'actionneur est équipé d'un câble avec un connecteur SUB-D25 pour le connecter avec son contrôleur de mouvement SMC100CC. Le SMC100CC à son tour est connecté avec l'ordinateur de la manipulation par un câble USB.

L'actionneur est fixé sur une platine linéaire UMR8. Une équerre est placée au-dessus de cette même platine UMR8. Cette équerre à son tour est reliée à un système qui se compose, successivement, d'une barre métallique, d'un capteur de force, d'un porte échantillon et de l'échantillon (contact mobile brasé sur un shunt), l'ensemble de ces composants est assemblé par visserie. Cette configuration permet de déplacer ce système de manière efficace.

Pour des essais à l'intérieur de l'enceinte climatique, l'actionneur doit être placé à l'extérieur de la chambre climatique, compte tenu des basses pressions qui peuvent l'endommager. C'est pour cela que nous avons prévu une table élévatrice sur laquelle nous pouvons installer la platine linéaire UMR8 qui porte l'actionneur et ajuster sa position par rapport au passage qui se trouve sur le côté de l'enceinte. La figure 53 montre les deux possibilités de montage de la partie mobile, pour un essai dans des conditions atmosphériques ou dans des conditions qui simulent l'altitude.

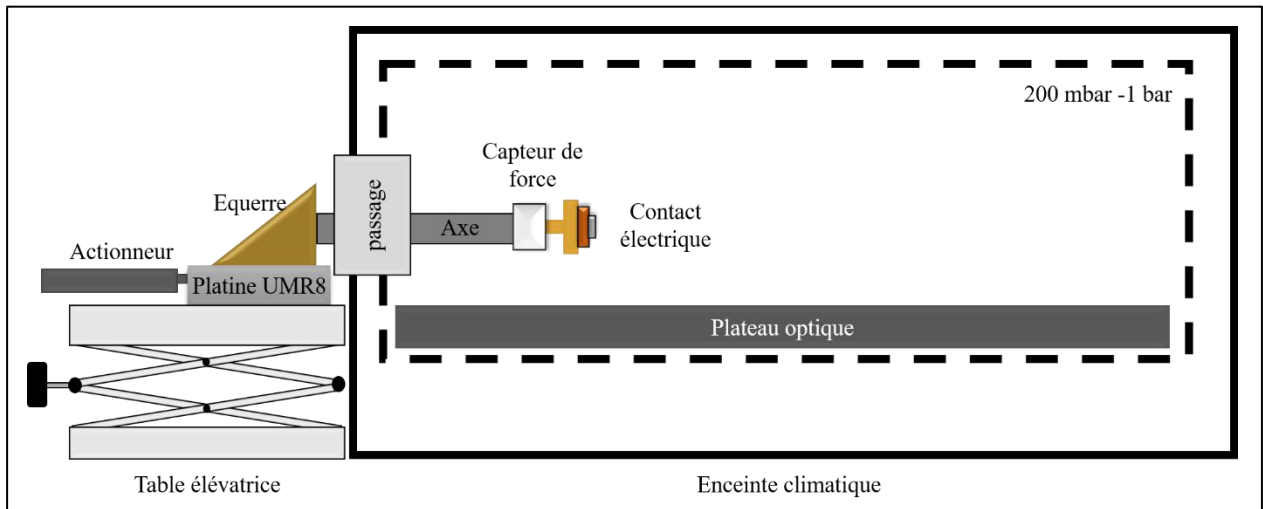
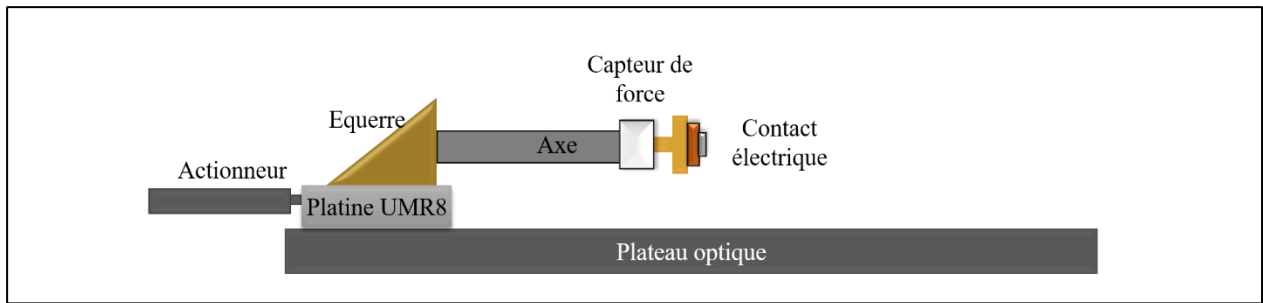


Figure 53 : Emplacement de la partie mobile du banc de test sans et avec enceinte climatique

3.4. Piézoélectrique support / USB

Du côté opposé de la partie mobile, l'actionneur piézoélectrique de type P-216 de chez PI est utilisé pour produire des rebonds mécaniques. Cet actionneur piézoélectrique se caractérise par une course maximale de 120 μm et peut appliquer une force de pression axiale qui va jusqu'à 4500 N et une force de traction maximale de 500 N. Il peut fonctionner aussi dans le vide et dans une plage de températures comprise entre -40°C et $+80^{\circ}\text{C}$.

Cet actionneur est tenu par des pièces en acier qui assurent sa fixation sur une platine XYZ. La platine est fixée sur le plateau optique, il permet d'ajuster la position de la partie fixe. La figure 54 décrit cette configuration.

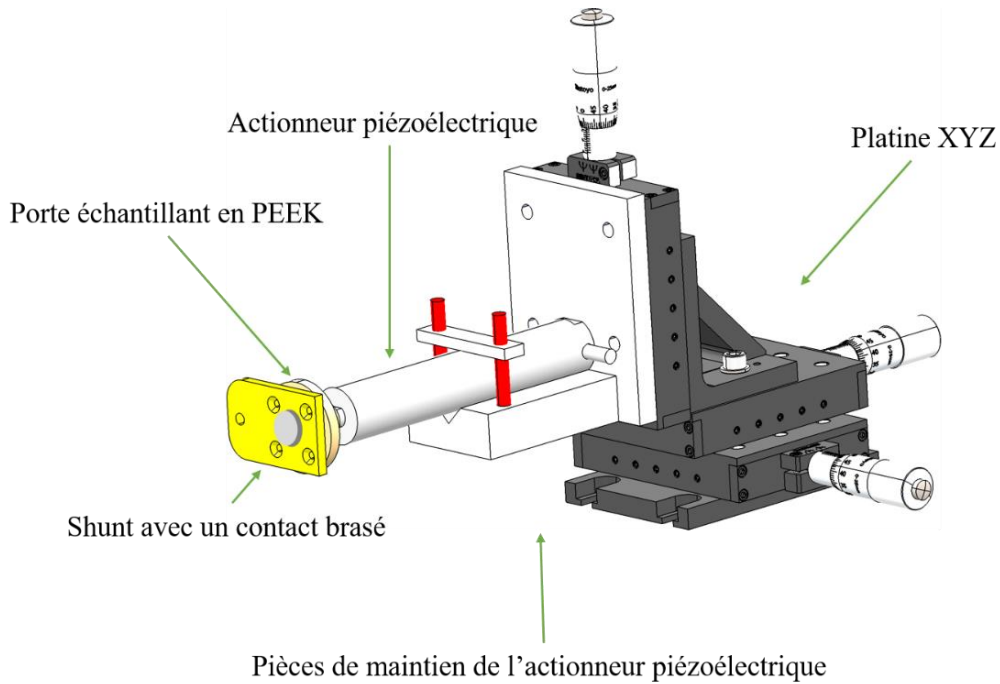


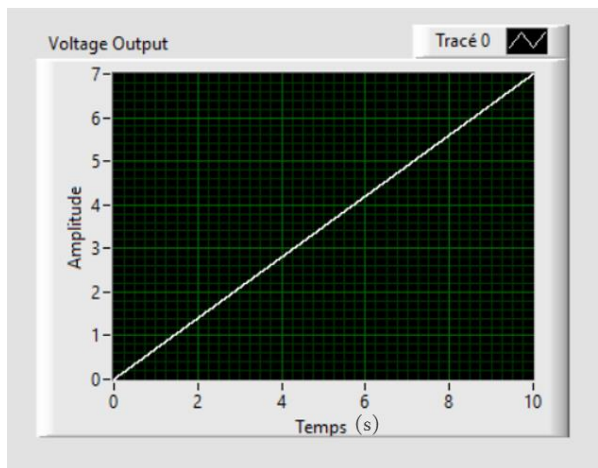
Figure 54 : Configuration de la partie fixe du banc de test

Dans notre cas, l'amplificateur E-482.00 permet d'appliquer une différence de potentiel sur l'actionneur pour que ce dernier se déforme en créant un déplacement. Les caractéristiques de ce déplacement sont contrôlées à l'aide d'une carte USB-6011 dotée d'entrées/sorties analogiques connectée à l'amplificateur. Le signal à envoyer doit être compris entre 0 et 11V. Durant le fonctionnement du banc test, à partir de l'étape de l'initialisation des appareils, l'actionneur piézoélectrique se met dans une position offset, la grandeur de cet offset est équivalente à la hauteur du rebond mécanique, cette opération se fait par l'envoi d'un signal à travers le boîtier USB-6011 qui va de 0 V à la tension équivalente de la hauteur du rebond. Pour créer le rebond, le signal nécessaire correspond à une seule demi-sinusoïde inversée d'une fréquence de ~ 330 Hz et d'une amplitude équivalente à 8V, donnée par l'équation suivante :

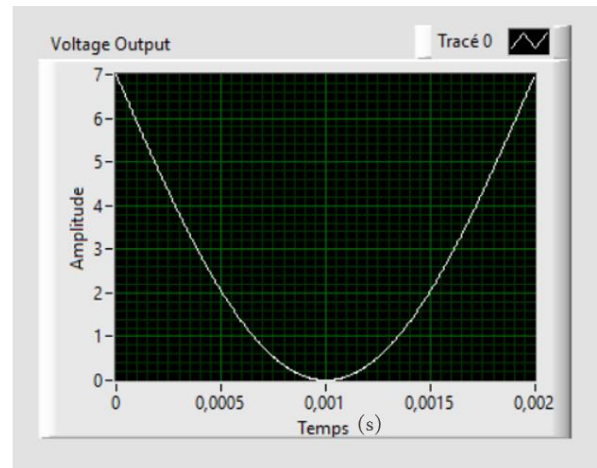
$$x(t) = -a\sin(2\pi ft) \quad (20)$$

Avec a : amplitude, f : fréquence et $0 < t < 2$ ms

À la fin des cycles l'offset se remet à 0. La figure 55 montre un exemple de signal de l'offset et d'un signal du rebond mécanique :



a)



b)

Figure 55 : a) Signal de la mise d'offset b) signal de rebond mécanique

4. Partie électrique

4.1. Schéma électrique

Le schéma présenté sur la figure 56 montre le circuit électrique utilisé durant l'expérience. Il est composé d'une source triphasée 115 V_{AC} en série avec les contacts de banc de test, un contacteur de puissance et une charge résistive variable. Le banc de charge est pilotable à distance par un PC, ce banc est constitué de résistances de puissance. Une seule phase est utilisée (phase A) pour les essais car nous testons un seul couple de contacts.

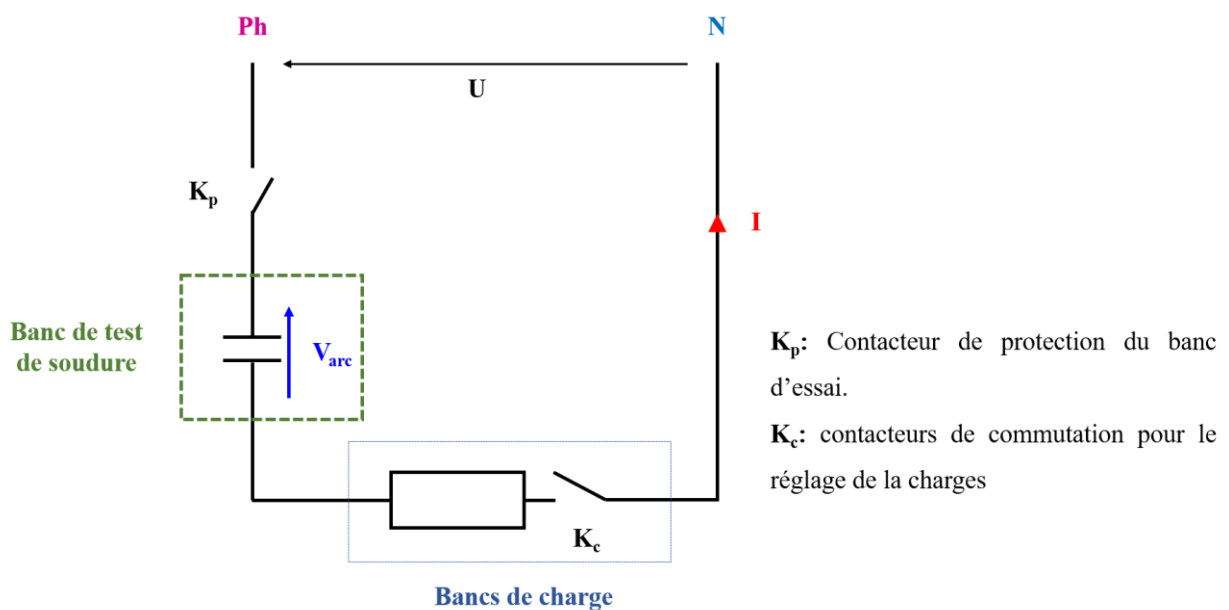


Figure 56 : Schéma de la partie électrique du banc de test

4.2. Alimentation

Nous avons utilisé une alimentation statique AC installée dans les locaux de notre partenaire industriel, elle permet la fourniture d'un courant alternatif stable et ininterrompu, indépendamment de ce qui se passe sur le réseau électrique.

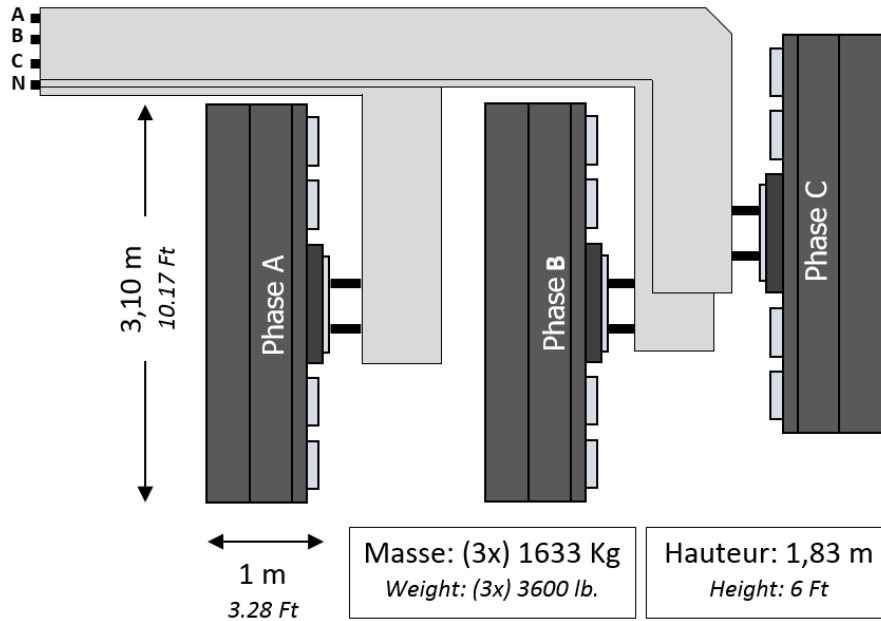


Figure 57 : Schéma descriptif du dimensionnement de l'alimentation statique AC

Cette alimentation se caractérise par sa puissance maximale de 1,4 MWatt, avec un courant maximal de 4000A. Il est possible d'utiliser deux niveaux de tension 115 V_{AC} et 230V_{AC}, avec une fréquence qui peut varier entre 16 Hz et 2000 Hz. Cette alimentation se constitue de trois phases A, B et C. La figure 57 montre une vue de dessus de cette alimentation statique.

Dans notre cas, nous avons utilisé une tension de 115V_{AC} et trois niveaux de fréquence 50 Hz, 400 Hz et 500 Hz. Le choix de ces paramètres sera expliqué dans le paragraphe sur les conditions expérimentales des tests.

4.3. Contacteur de protection/ alimentation de laboratoire /driver

Le contacteur joue un rôle majeur dans le circuit de l'expérience, il est responsable de l'alimentation et la coupure du courant. Il s'agit d'un contacteur (3PST NO 430 A) triphasé de type NO (Normally Open), son courant nominal est 430 A, identique à celui utilisé pour la caractérisation des rebonds mécaniques. Comme expliqué précédemment, la fermeture de ce type de contacteur se fait en alimentant sa bobine avec une tension de 28V et un courant d'appel de 5 A. Une fois que le contact est fait, le courant diminue jusqu'à atteindre 500 mA. Cette

intensité permet le maintien du contact. L'ouverture du contacteur se fait tout simplement en arrêtant d'alimenter la bobine.

La commutation du contacteur s'effectue à travers un boîtier de commande. Ce boîtier appelé « Driver » fait l'intermédiaire entre une alimentation de laboratoire et la bobine du contacteur (figure 58). Cet appareil permet de piloter le contacteur avec une commande manuelle ou électronique. Dans notre cas, nous utilisons une commande électronique.

Deux phases de contacteur sont utilisées afin de répartir le courant et éviter le collage de ses contacts.

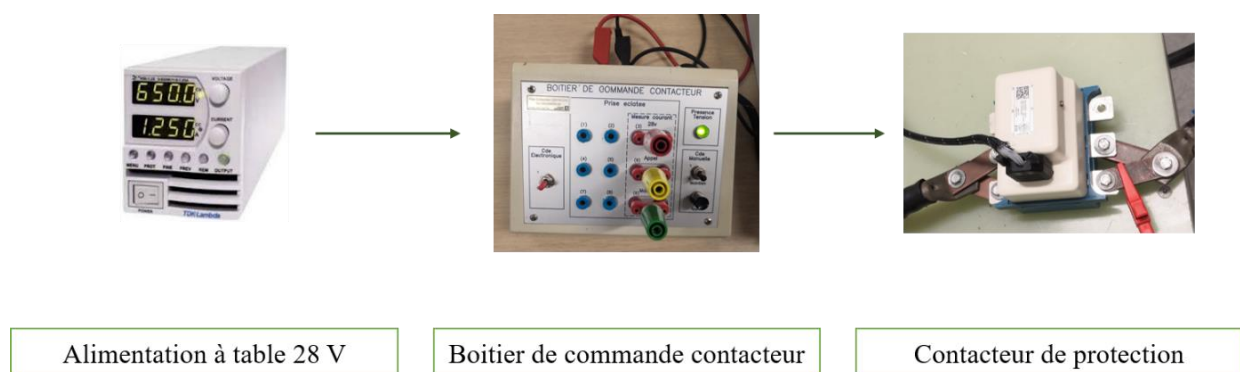


Figure 58 : outils pour la commutation du contacteur de puissance utilisé pour ouvrir ou fermer le circuit de l'expérience

4.4. Câbles

Quatre câbles de puissance d'un diamètre égale ou supérieur à 2,5 cm sont utilisés pour le branchement électrique du banc de test :

- Un câble fait le lien entre la phase A de la source et une borne de contacteur de protection.
- Un câble raccorde le contacteur de protection et le contact mobile.
- Un câble fait le lien entre le contact fixe et la charge.
- Deux câbles reliés par un répartiteur électrique qui connectent le neutre et la terre.

La salle de l'expérience se situe entre le local où l'alimentation statique est installée, et le local où est présent le banc de charge. La connexion entre la source et la charge s'effectue à l'aide de boîtiers de raccordements (figure 59), un du côté source et l'autre du côté charge. Les câbles sont équipés de connecteurs qui permettent de les insérer dans les bornes des boîtiers. Le

raccordement se fait selon un codage de couleurs. Ce type de raccordement a pour objectif d'assurer la sécurité de l'installation électrique.

Les autres extrémités des câbles sont équipées par des cosses en cuivre étamé, ces cosses permettent de raccorder les câbles avec les shunts des contacts de banc de test et les shunts de contacteur, soit directement, soit par utilisation d'un bus barre en cuivre.



Figure 59 : Boîtiers Raccordement des charges et de la source

De même, afin d'accroître la sécurité, nous avons utilisé une balise clignotante pour montrer quand l'équipement est mis sous tension. Cette lampe est branchée entre le neutre et la phase à l'aide du répartiteur.

5. Partie acquisition et pilotage

5.1. Acquisition des données mécaniques

5.1.1. Capteur de force

Pour l'ajustement de la force de contact appliquée par le moteur et pour mesurer la force de séparation des contacts, nous avons utilisé un capteur de force piézoélectrique de chez Kistler. Il a la capacité de réaliser des mesures sur une plage de ± 10 kN. Ce capteur est situé au bout de l'axe fixé sur la platine du moteur et le porte échantillon du contact mobile (Figure 53).

Le conditionnement du signal de charge issu de ce capteur se fait à l'aide d'amplificateur de charge de type 5018A. En effet, il convertit le signal en sortie de capteur en une sortie analogique proportionnelle. Cet amplificateur est branché sur l'oscilloscope pour visualiser les mesures par un câble BNC qui est lui-même connecté avec l'ordinateur par un câble USB.

5.1.2. Capteur de déplacement

Pour la vérification de la réalisation des rebonds mécaniques, un capteur de déplacement est mis en place. Il s'agit d'un capteur de déplacement de chez Keyence (LK-H027, Laser rouge à semi-conducteur de longueur d'onde de 655nm). Ce capteur est situé derrière le contact fixe. Il est branché à son amplificateur LK-G5001PV sur lequel les mesures de déplacement s'affichent et avec lequel le capteur peut être commandé. Cet amplificateur est branché sur le PC par câble USB.

5.2. Acquisition des données électriques

5.2.1. Multimètre

Le multimètre permet de mesurer la chute de tension aux bornes des contacts, ce qui permet de suivre son évolution en fonction du nombre de cycle pour chaque matériau de contact. Ce multimètre est un modèle DMM6500 de chez Keithley Instruments. Il est connecté à l'ordinateur par câble USB, ce qui permet de le contrôler à distance et d'enregistrer les mesures directement.

5.2.2. Sondes de tension et de courant

La tension et le courant d'arc de fermeture sont mesurés par des sondes de tension et de courant connectées à oscilloscope. La sonde utilisée pour mesurer la tension aux bornes des contacts est une sonde différentielle active d'une bande passante de 100 MHz et une précision de $\pm 2\%$. Le courant du circuit de banc de test est mesuré à l'aide d'une sonde de courant i3000s flex, elle a une capacité de mesurer jusqu'à 3000 A. Le choix des calibres des sondes est obligatoire pour obtenir des mesures précises.

Les deux sondes sont branchées à l'oscilloscope avec un câble BNC, ce qui permet l'enregistrement des données au moment de la création de l'arc de rebond.

5.3. Oscilloscope

L'oscilloscope utilisé pour visualiser les signaux est un modèle MDO3054 de chez Tektronix, il dispose de quatre voies analogiques et d'une bande passante de 500 MHz.

Les appareils de mesures, sondes de tension et de courant, capteur de force ainsi que le capteur de déplacement sont connectés à cet l'oscilloscope par des câbles BNC. Lui-même est branché à l'ordinateur de pilotage du banc de test via un câble USB. Le réglage de ses paramètres se fait par des commandes envoyées depuis l'ordinateur. En effet, la configuration de l'oscilloscope

change selon les étapes de l'essai, il passe d'un échantillonnage de 1KS/s et 1ms/div pour l'acquisition des caractéristiques électriques de l'arc de rebond et la longueur du rebond mécanique, à un échantillonnage de 1KS/s/ 100ms/div qui se fait juste avant la séparation des contacts pour l'acquisition de la mesure de la force de soudure.

5.4. Pilotage PC : Programme LabVIEW

Pour automatiser le banc de test, nous avons développé un programme LabVIEW. Ce programme est chargé d'enchaîner les actions de test, d'enregistrer les résultats de mesure, d'effectuer des calculs et d'éditer un fichier de résultats. La figure 60 montre une capture d'écran de l'interface de ce programme.

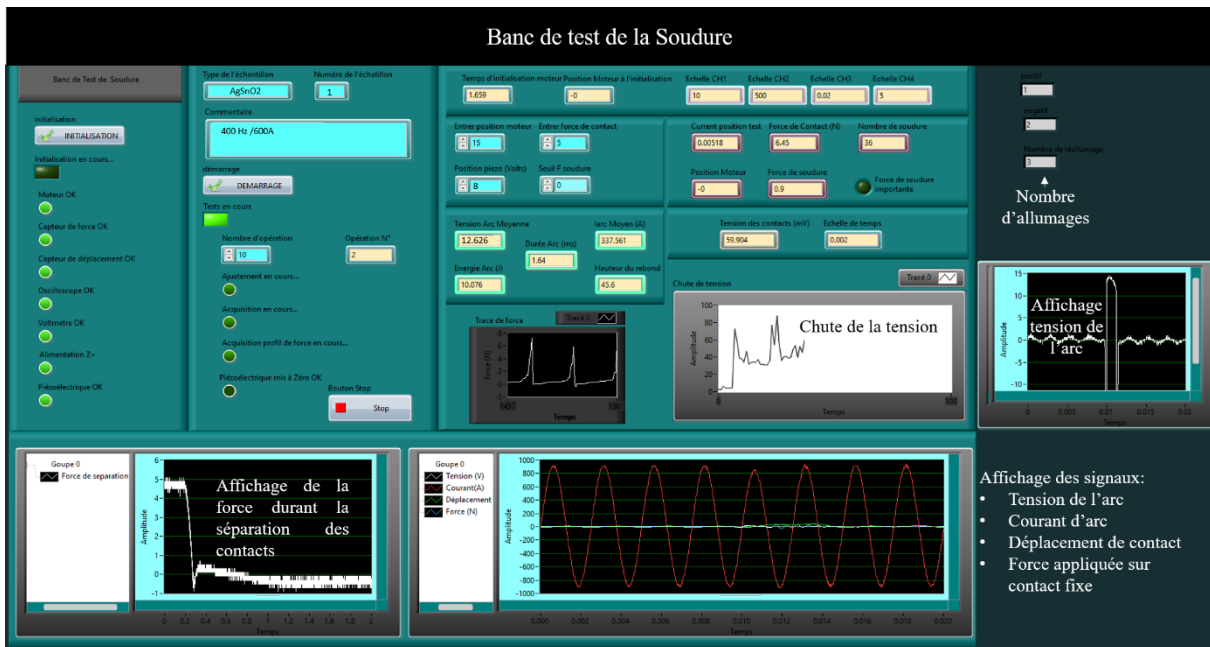


Figure 60 : Interface du programme LabVIEW

Ce programme se constitue de trois instructions principales, la première étant l'initialisation, puis le démarrage de test, l'enregistrement et le traitement des données et finalement la finalisation du test, son schéma synoptique est présenté sur la figure 61.

Initialisation : cette phase permet dans un premier temps de vérifier que tous les appareils sont allumés et qu'ils fonctionnent correctement. Dans un second temps, les appareils se mettent dans leur état initial, c'est-à-dire que le capteur de force et le capteur de déplacement se mettent à zéro, l'alimentation de table se met à 0 V, le moteur se déplace pour revenir à sa position initiale, alors que l'actionneur piézoélectrique prend une position d'offset qui a une amplitude similaire à celle du rebond mécanique. Finalement, l'oscilloscope se configure et se met en

mode déclenchement. Les LED qui sont affichées devant chaque nom d'appareil, indiquent si cet appareil est bien initialisé (dans ce cas la LED « Booléen » s'allume en vert, dans le cas contraire, si un appareil rencontre des problèmes de fonctionnement, la LED s'allume en rouge).

Démarrage de test et l'enregistrement et le traitement des données : cette phase représente la partie la plus importante du programme, elle est responsable des manœuvres de l'essai. En effet, pour des raisons de sécurité, afin d'éviter les anomalies, l'accès au **démarrage** n'est possible qu'après la validation de la phase précédente « **initialisation** ». En outre, avant d'appuyer sur le bouton démarrage, il faut insérer les paramètres de test tels que la force de contact, l'amplitude du rebond et le nombre d'opérations, c'est-à-dire le nombre de fermeture de contact. Puis ce démarrage commence par une demande de création d'un fichier texte, dans lequel les résultats traités seront enregistrés. Par la suite les étapes de fonctionnement de banc expliqué précédemment se déroulent de façon chronologique. L'enregistrement des données se fait simultanément avec les actions du test. Le programme dispose d'une partie calculs qui permet de traiter les données et finalement les enregistrer sur le fichier texte.

Finalisation : cette étape concerne précisément l'actionneur piézoélectrique, une fois le nombre d'opérations atteint, le piézoélectrique quitte le mode offset et se met à sa position zéro. Cette action permet d'éviter l'endommagement du cristal constituant l'actionneur piézoélectrique.

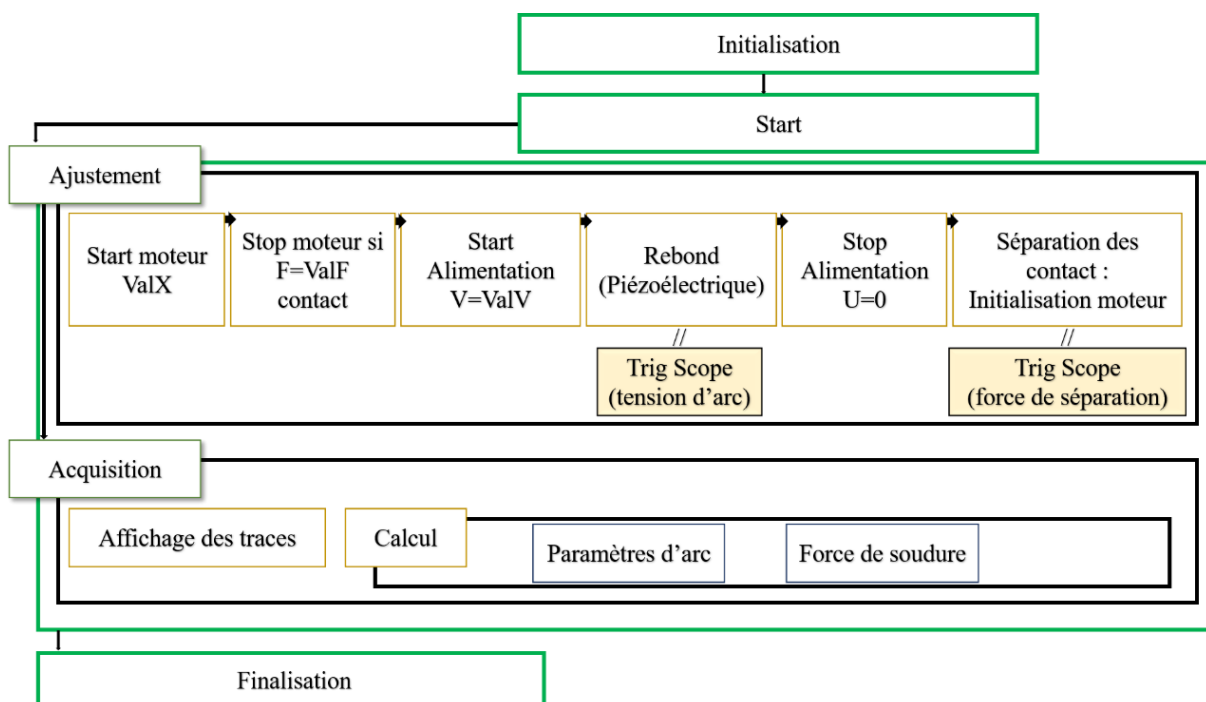


Figure 61 : Schéma synoptique du test

6. Assemblage des échantillons

Les échantillons utilisés sont des contacts en forme de pastilles bombées avec un rayon de 300 μm , leur diamètre est de 16 mm. Leur découpe se fait en interne à l'entreprise. Elles sont ensuite brasées sur des shunts en cuivre. La configuration de ce shunt permet de les raccorder avec un câble de puissance et de les fixer sur le porte échantillon par vissage. Les portes échantillons sont fabriqués en PEEK pour isoler électriquement les composants du banc de test. Le PEEK est connu pour sa caractéristique thermostable, il peut résister à des températures allant jusqu'à 260° tout en gardant ses paramètres physiques.

La figure 62 présente un exemple d'échantillon brasé sur un shunt en cuivre et son porte-échantillon isolant ainsi que leur emplacement, l'un par rapport à l'autre dans le banc de test

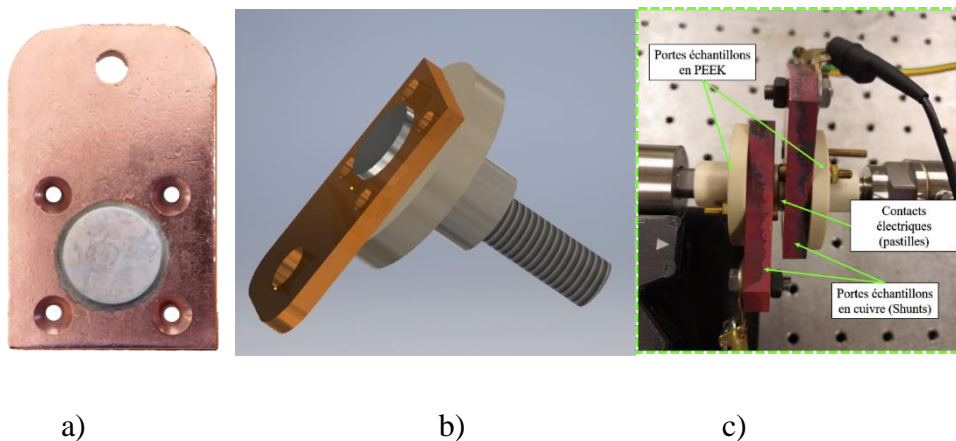


Figure 62 : a) Contact électrique brasé sur un shunt en cuivre b) le contact fixé sur un porte échantillon en PEEK c) contacts électriques montés sur le banc de test

V. Conclusion

Il a été nécessaire de concevoir et réaliser un nouveau banc de test pour étudier les arcs de rebond et la soudure des contacts électriques résultante. Ce banc est adapté spécifiquement à des conditions aéronautiques. À travers ce chapitre, nous avons, dans un premier temps, présenté l'étude de la caractérisation des rebonds mécaniques que nous souhaitons simuler. Dans un second temps, nous avons décrit et expliqué le fonctionnement global du nouveau banc de test ainsi que la fonction et les caractéristiques de chaque composant. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les tests réalisés et les résultats obtenus par ce dispositif expérimental.

Chapitre 3. Résultats Expérimentaux

Caractérisation de la Soudure
Dynamique et de l'Arc de Rebond –
Étude Métallographique des Surfaces
de Contacts

I. Introduction

La soudure dynamique des contacts électriques compte parmi les modes de défaillance des contacteurs. Elle est attribuable à l'effet de l'arc lors de la fermeture que nous appelons arc de rebond. Les caractéristiques de cette soudure indésirable peuvent être affectées par plusieurs paramètres. Dans la littérature, nous trouvons que ce phénomène a fait l'objet de multiples études [5], [6], [26], [36], [38], [47], [55], [68], [69] dans lesquelles les auteurs ont essayé de montrer l'influence de différents paramètres sur ce phénomène tels que l'énergie de l'arc, la nature du matériau et la force de contact. Mais, jusqu'à présent, aucune étude n'a été faite sur l'effet de la fréquence de circuit électrique sur le phénomène de la soudure ainsi que sur les caractéristiques de l'arc de fermeture.

Dans le cadre de l'amélioration des performances des contacteurs, nous avons donc pris l'initiative d'étudier la soudure dynamique des contacts et les caractéristiques des arcs de rebonds pour différentes fréquences d'alimentation afin de montrer l'impact de la fréquence sur la fiabilité des contacteurs.

Pour ce faire, nous avons utilisé le dispositif expérimental décrit au chapitre II. Les fréquences choisies dans le cadre de cette étude sont 50 Hz, 400 Hz et 500 Hz avec une tension de 115 Vrms et un courant de 750 Arms. À chaque niveau de fréquence, nous testons 4 types de matériaux de contacts, l'argent pur que nous considérons comme référence, l'AgSnO₂ non dopé, l'AgSnO₂ dopé avec In₂O₃ et l'AgSnO₂ dopé avec Bi₂O₃. L'objectif est aussi de pouvoir comparer le comportement des matériaux dans ces conditions électriques.

Dans ce chapitre nous allons montrer, dans un premier temps, les résultats expérimentaux sur les caractéristiques de la soudure. Dans un second temps, nous allons présenter les résultats sur les caractéristiques de l'arc en mettant en avant le phénomène de ré-allumage de l'arc. Dans un troisième temps, nous allons présenter une étude métallographique des contacts électriques ayant subi les arcs de rebond.

II. Conditions de test

1. Électrique et mécanique

Les paramètres électriques et mécaniques de test ont été choisis dans l'optique de se rapprocher le plus possible des conditions réelles d'utilisation des contacts dans un contacteur en conditions aéronautiques.

En plus des caractéristiques des rebonds mécaniques que nous avons définies à partir de l'étude décrite dans le chapitre II, la force de contact utilisée est équivalente à la force de rappel du ressort du contacteur étudié.

La tension choisie est la tension utilisée majoritairement dans le domaine de l'aéronautique. De plus, le niveau de courant a été défini pour simuler les cas de défaut ou de surcharge dans les contacteurs. Nous avons également choisi trois valeurs de fréquence pour pouvoir comparer le comportement des matériaux de contact sur l'aspect soudure ainsi que les caractéristiques des arcs. Le tableau 4 regroupe les conditions de test de soudure.

Tableau 4 : Conditions électriques et mécaniques de test des arcs de rebond

Tension	115 Vrms
Courant	750 Arms
Type de charge	Résistive
Nombre d'opérations	500 cycles. Sauf cas de collage définitif ($F_s > 100N$)
Force de contact	6 N
Limite inférieure de la force de soudure	2 N
Atmosphère	Air ambiant
Hauteur de rebond	80 μm
Durée du rebond	2 ms
Nombre de rebonds	1

2. Matériaux des contacts électriques

Le premier objectif de cette thèse est d'étudier les conséquences de l'arc de fermeture sur les matériaux des électrodes en termes de soudure, de leur taux d'apparition ainsi que de leur force

de rupture. Ainsi, nous allons tester différents matériaux dans les différentes conditions listées précédemment dans le tableau 4.

Le tableau suivant donne les types de matériaux choisis pour les tests de soudure, leur méthode de fabrication, et leur composition chimique. Les contacts en argent pur ont été utilisés comme référence. Les matériaux AgSnO_2 sont bien connus pour leur aspect anti-soudure et une grande résistance à l'érosion par arc [6], [11], [26]. Le SnO_2 est un matériau fragile et très dur, sa mouillabilité dans l'argent est faible, pour améliorer cette mouillabilité, il est nécessaire d'utiliser un dopant [47], [70], [71].

Tableau 5 : Matériaux des contacts électriques utilisés dans les tests de soudure

Matériaux	Méthode de fabrication	Composition chimique en % en masse
Argent pur	Métallurgie des poudres	100% Ag
AgSnO_2	Métallurgie des poudres	10% SnO_2
AgSnO_2	Métallurgie des poudres	10% de SnO_2 + 1% In_2O_3
AgSnO_2	Métallurgie des poudres	10% de SnO_2 + 1% Bi_2O_3

III. Caractéristiques de la soudure des contacts

1. Taux et force de soudure

Comme indiqué précédemment dans la partie décrivant les conditions de tests (paragraphe II), le nombre de cycles pour chaque essai est fixé à 500, c'est-à-dire 500 opérations de fermeture pour chaque couple de contacts. Cependant ces cycles s'arrêtent lorsque les contacts sont considérés comme définitivement collés, autrement dit, quand leur force de soudure est supérieure à 100 N. En effet, ceci est dû à la capacité maximale de tirage du moteur qui correspond à 100 N. La figure 63 présente le taux de soudure, la figure 64 présente le nombre de cycles effectués par chaque contact et la figure 65 la force de soudure moyenne (les barres) et la force maximale (les points) pour chaque type de contact : d'argent pur, d' AgSnO_2 , d' AgSnO_2 dopé en In_2O_3 et d' AgSnO_2 dopé en Bi_2O_3 aux différentes fréquences d'essai, 50 Hz, 400 Hz et 500 Hz.

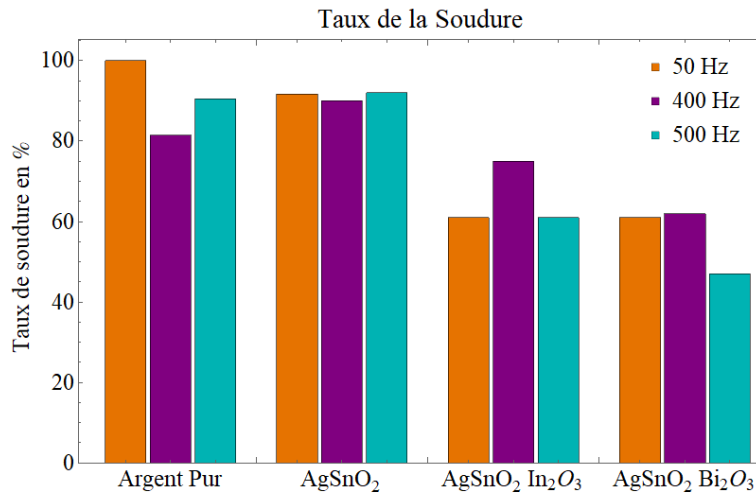


Figure 63 : Taux de soudure en fonction du matériau et de la fréquence

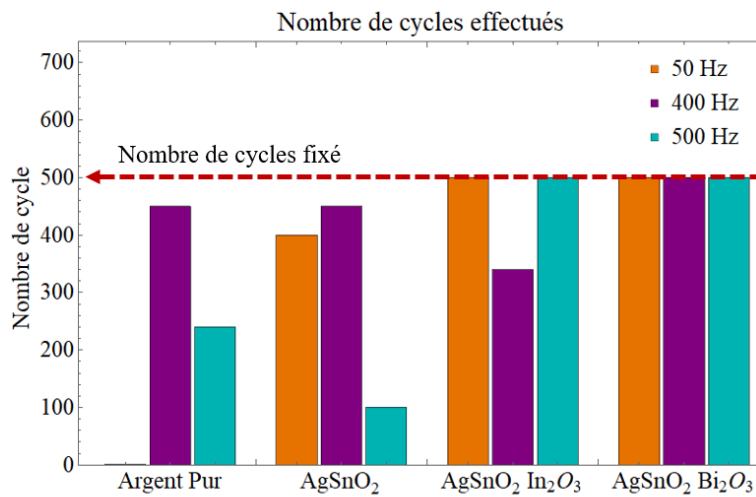


Figure 64 : Nombre de cycles en fonction du matériau et de la fréquence

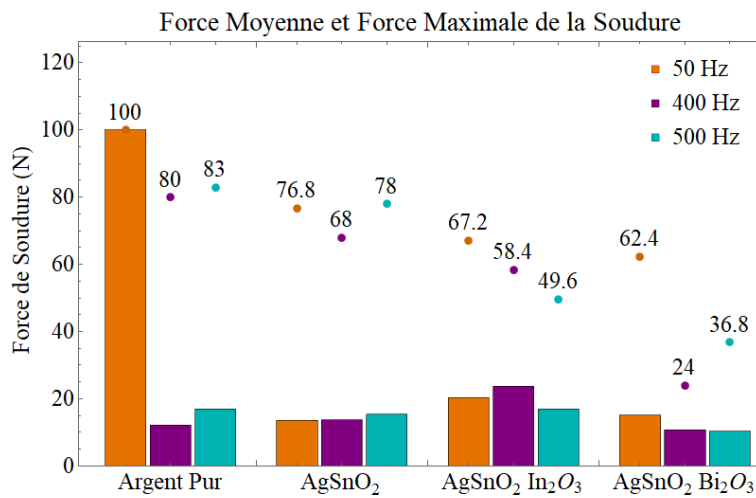


Figure 65 : Force moyenne et maximale de la soudure en fonction du matériau et de la fréquence

À partir des résultats de la caractérisation de la soudure pour chaque condition, nous constatons que l'argent pur et l'AgSnO₂ non dopé, ont une tendance à la soudure plus importante que l'AgSnO₂ dopé en In₂O₃ et l'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃. Notamment, les contacts d'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃ s'avèrent les plus résistants à la soudure.

a) Contacts d'Argent pur

Les contacts d'argent pur testés à 50 Hz ont subi, dès le premier cycle, une forte soudure supérieure à 100 N, c'est-à-dire, après leur exposition seulement au premier arc de rebond. Néanmoins, les autres contacts d'argent testés à 400 Hz et 500 Hz ont effectué respectivement 450 cycles et 240 cycles avant d'atteindre un collage définitif. Le pourcentage de cas de soudure de ces contacts correspondant à 81,2% pour l'essai à 400 Hz et à 90,5% à 500 Hz.

b) Contacts d'AgSnO₂

Les échantillons d'AgSnO₂ testés à 50 Hz ont effectué seulement 400 cycles, ce n'était pas dû à une soudure forte cette fois, mais plutôt à l'endommagement sévère de la surface des contacts. En effet, pendant les derniers cycles de l'essai, nous avons observé qu'à partir du moment de la création du rebond mécanique, l'arc ne s'arrête pas tant que l'alimentation n'est pas coupée, donc au lieu d'avoir un arc avec une durée d'environ 2 ms, nous nous retrouvons avec un arc avec une durée totale de quelques secondes. Nous avons été obligés d'arrêter l'essai pour des raisons de sécurité. YEE KIN CHOI *et al.* ont observé le même phénomène avec des contacts vieillissants, les auteurs supposent que lorsque les électrodes se remettent en contact, les zones de contact sont plus résistives que l'arc, combiné à des creux formés par l'érosion des contacts, l'arc reste dans ces creux et ne s'éteint pas naturellement [14]. Pourtant, dans le cas de 400 Hz, les contacts ont effectué la totalité des 500 opérations. Finalement, dans le cas de 500 Hz les contacts ont subi une forte soudure supérieure à 100 N au bout de 100 cycles seulement.

c) Contacts d'AgSnO₂ dopé In₂O₃

Pour le cas de la fréquence 400 Hz, le taux de soudure des contacts d'AgSnO₂ dopé en In₂O₃ est de 75 %, il est plus élevé en comparaison du taux de soudure atteint à 50 Hz et à 500 Hz, qui correspondent à 61% pour les deux fréquences. Le nombre de cycles s'est arrêté à 340 cycles pour une fréquence de 400 Hz à cause d'un collage définitif, tandis que pour les fréquences 50 Hz et 500 Hz, les contacts ont pu compléter les 500 cycles.

d) Contacts d'AgSnO₂ dopé Bi₂O₃

Les contacts d'AgSnO₂ dopés Bi₂O₃ ont montré une tendance à la soudure faible par rapport aux autres types de contacts dans toutes les fréquences de test. A 50 Hz et à 500 Hz, le pourcentage de cas de soudure est équivalent, respectivement à 61% et 62%, alors que, à 500 Hz, le taux de soudure est équivalent à 47%. De plus, tous les essais effectués avec ce type de contacts ont atteint les 500 cycles.

Ces résultats sur les caractéristiques de la soudure montrent que chaque matériau de contact se comporte différemment en fonction de la fréquence. Seuls les contacts d'AgSnO₂ Bi₂O₃ montrent de faibles forces et taux de soudure au niveau des trois différentes fréquences, notamment à 500 Hz.

Afin d'étudier l'évolution de la soudure en fonction du temps pour chaque type de matériau de contact et pour chaque fréquence, nous avons présenté les fréquences cumulées des soudures pour trois périodes de chaque essai, le début, le milieu et la fin de l'essai.

2. Vieillessement

Les figures 66, 67 et 68 rassemblent les graphiques qui représentent la fréquence cumulée des soudures en fonction de la force de soudure pour trois périodes de la durée de vie de chaque contact. Nous précisons que seuls les cas de soudure ayant une force de soudure supérieur à 2 N sont pris en compte dans cette présentation. Ces graphiques permettent d'observer l'effet du vieillissement du contact sur l'évolution de la force de soudure avec le temps.

2.1. Diagrammes des effectifs cumulés de forces soudure à 50 Hz

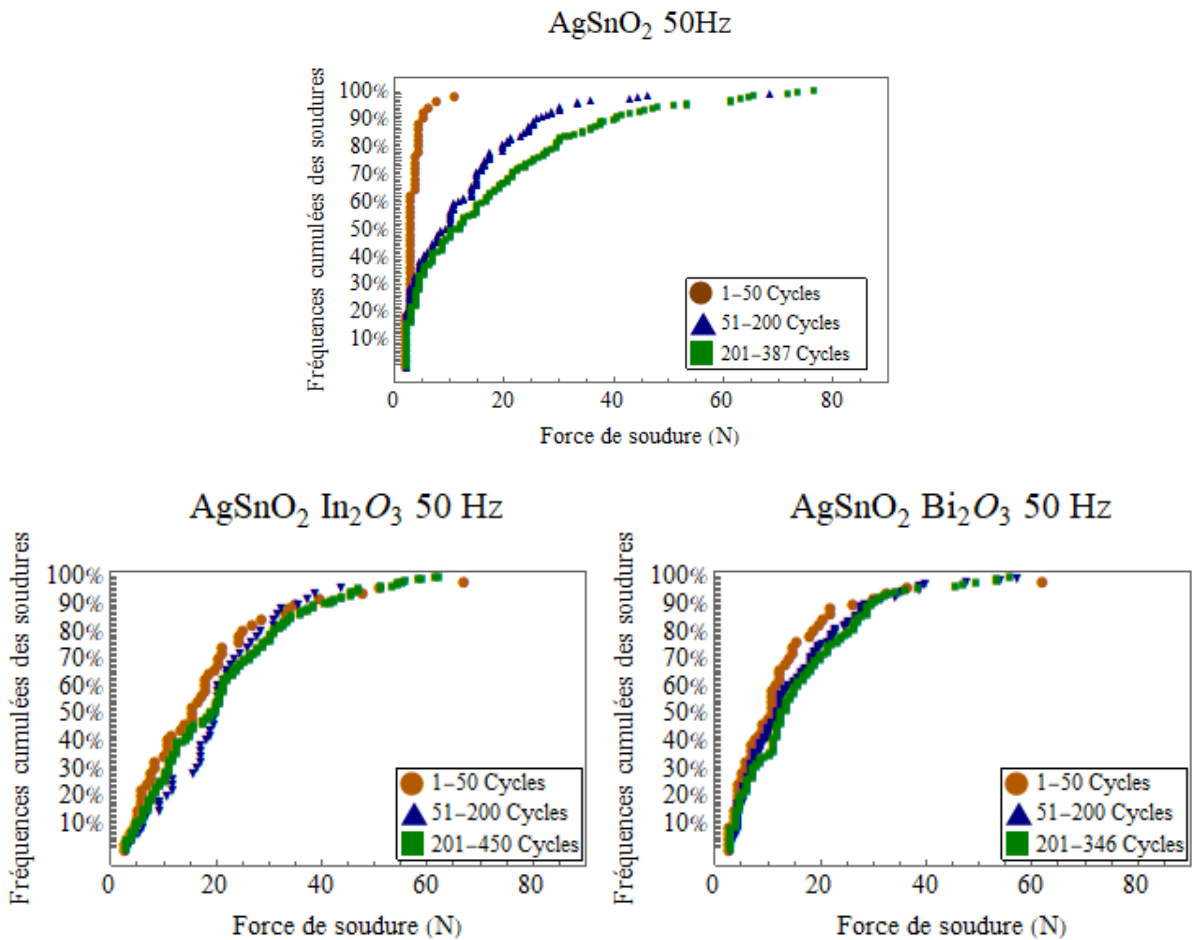


Figure 66 : Fréquences cumulées des soudures en fonction de la force correspondante pour les trois périodes du test (début, milieu et fin) à 50 Hz

La figure 66 présente la fréquence cumulée des soudures pour les contacts d'AgSnO₂, d'AgSnO₂ dopés In₂O₃, d'AgSnO₂ dopés Bi₂O₃ testé à 50 Hz. Les contacts d'argent sont absents car ils ont effectué un seul rebond.

Le vieillissement pour cette fréquence (50 Hz) a un impact sur la force de soudure pour tous les types de contacts. Cet impact est plus remarquable au niveau des contacts d'AgSnO₂, les forces obtenues pendant la première période sont 8 fois plus faibles par rapport à celles obtenues durant la période finale. La force maximale de soudure atteinte durant cet essai est de 76,8 N, elle est atteinte à la période finale du test. Tandis que pour les contacts d'AgSnO₂ dopés In₂O₃ et les contacts d'AgSnO₂ dopés Bi₂O₃ l'effet du vieillissement reste très léger. La force maximale pour les contacts d'AgSnO₂ dopés In₂O₃ est équivalente à 67,2 N, elle est obtenue au début de l'essai. Enfin pour les contacts d'AgSnO₂ dopés Bi₂O₃ la force maximale est obtenue aussi durant la première période de l'essai, elle est équivalente à 62,4 N. Nous précisons que la

valeur de la force maximale obtenue durant chaque essai correspond à la soudure la plus forte que le moteur de séparation a pu rompre.

2.2. Diagrammes des effectifs cumulés de forces de soudure à 400 Hz

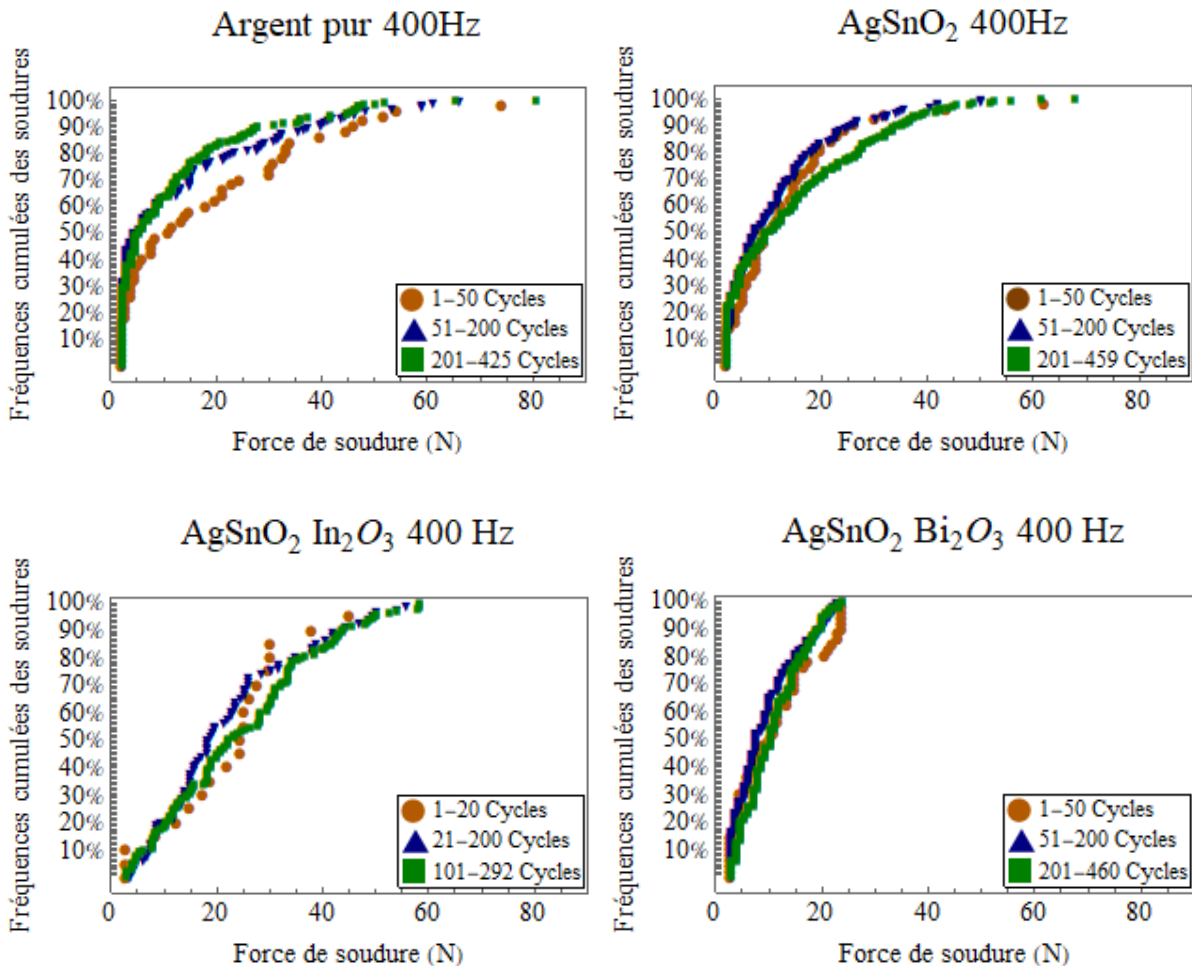


Figure 67 : Fréquences cumulées de la soudure en fonction de la force correspondante pour les trois périodes du tests (début, milieu et fin) à 400 Hz

Pour la fréquence 400 Hz, la soudure diminue relativement avec le temps pour les contacts d'argent pur, le vieillissement semble avoir un effet inverse de ce qui est attendu. Ainsi, pour les contacts d'AgSnO₂, d'AgSnO₂ dopé In₂O₃ et d'AgSnO₂ dopé Bi₂O₃, les soudures les plus fortes sont plutôt obtenues au début et à la fin de l'essai.

2.3. Diagrammes des effectifs cumulés de forces soudure à 500 Hz

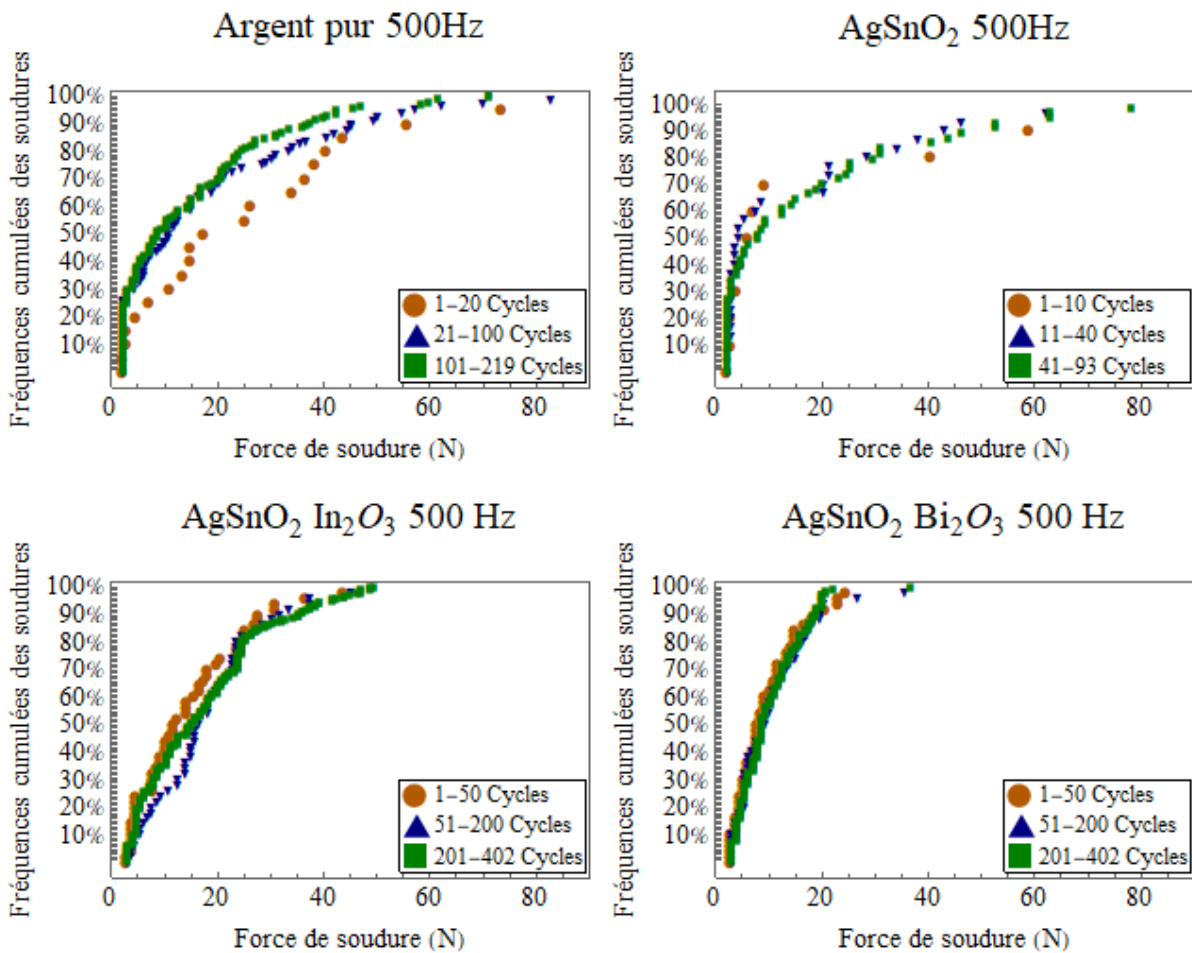


Figure 68 : Fréquences cumulées de la soudure en fonction de la force correspondante pour les trois périodes du tests (début, milieu et fin) à 500 Hz

À 500 Hz, nous constatons que l'évolution de la force de soudure pour les contacts d'argent est très proche de celle établie à 400 Hz. L'effet de vieillissement sur la soudure des contacts d'AgSnO₂, d'AgSnO₂ dopé In₂O₃ reste très faible. Pour les contacts d'AgSnO₂ dopé Bi₂O₃, la fréquence cumulée des forces de soudure est la même pour toutes les périodes, c'est-à-dire, qu'à cette fréquence (500 Hz) le vieillissement n'a pas d'effet marquant sur les caractéristiques de la force de soudure.

IV. Caractéristiques de l'arc

1. Durée de l'arc

1.1. Approche numérique

En courant continu, l'arc de rebond peut rester allumé jusqu'à la fermeture définitive des contacts, ce qui signifie que la durée de l'arc est égale ou inférieure à la durée du rebond. Néanmoins, l'extinction de l'arc définitif peut être conditionnée par la fréquence du courant.

Dans la littérature, l'allumage de l'arc nécessite une tension d'alimentation supérieure à ~ 12 V et un courant supérieur à 400 mA pour l'argent [6] [72]. D'ailleurs, l'arc peut s'interrompre au point zéro du courant, à ce point, la puissance de l'arc s'annule. Ainsi, la durée maximale de l'arc dépend non seulement de la durée d'arc mais aussi de la fréquence. Par conséquent, prenant en considération cette approche, la durée de l'arc ne peut pas être supérieure à la demi-période du courant. La figure 69 ci-dessous montre les durées d'arc maximales estimées qui auraient pu se produire en suivant cette approche.

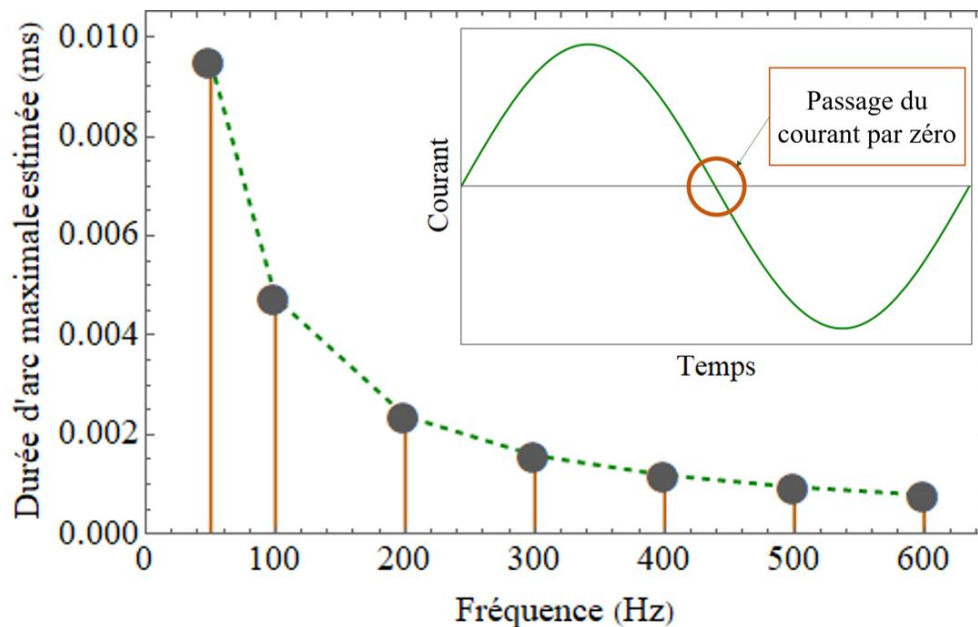


Figure 69 : Durées d'arc maximales estimées pendant une demi-période de courant en fonction de la fréquence de la tension pour 115 Vrms point de passage du courant par zéro

1.2. Mesure de la durée d'arc et du nombre de ré-allumage de l'arc

Au début de cette étude, durant les tests préliminaires, nous avons observé que l'arc créé durant un rebond mécanique de 2 ms, s'éteint en arrivant à proximité du point zéro du courant puis il se réallume juste après ce point. Slepian *et al.* [73] expliquent que l'extinction ou le réamorçage d'un arc alternatif résulte d'une compétition entre la tension de rétablissement et la tension de

claquage. La tension de rétablissement est la tension qui apparaît entre les bornes des contacts après le passage du courant à zéro, autrement dit, après l’extinction de l’arc. Si la tension de claquage est supérieure à la tension de rétablissement, le réamorçage ne se produit pas. Comme mentionné dans le premier chapitre, la tension de claquage minimale, appelée minimum de Paschen dans l’air est de l’ordre de 330 V pour des distances de l’ordre du millimètre. Néanmoins, la tension que nous avons utilisée dans cette étude est de 115 Vrms, c’est-à-dire, que nos conditions ne permettent pas un amorçage de l’arc par claquage. Donc, nous sommes confrontés à un autre type d’amorçage d’arc dont nous ne connaissons pas les détails des mécanismes physiques qui sont à l’origine de son apparition.

Donc, dans un premier temps, pour quantifier ce phénomène, nous avons pensés à compter le nombre de réamorçages de l’arc durant chaque rebond en même temps que la mesure de la durée de l’arc. Les figures 70 , 71 et 72 représentent la répartition des durées d’arc mesurées pour chaque test de soudure, ainsi que la répartition du nombre d’allumages de l’arc. De plus, la demi-période correspondant à la fréquence du test est représentée par la barre rouge sur les graphiques. Ceci permet d’observer si la durée d’arc est conditionnée par la valeur de la fréquence. De plus la durée de rebond est représentée par la barre verte, pour une durée de 2 ms.

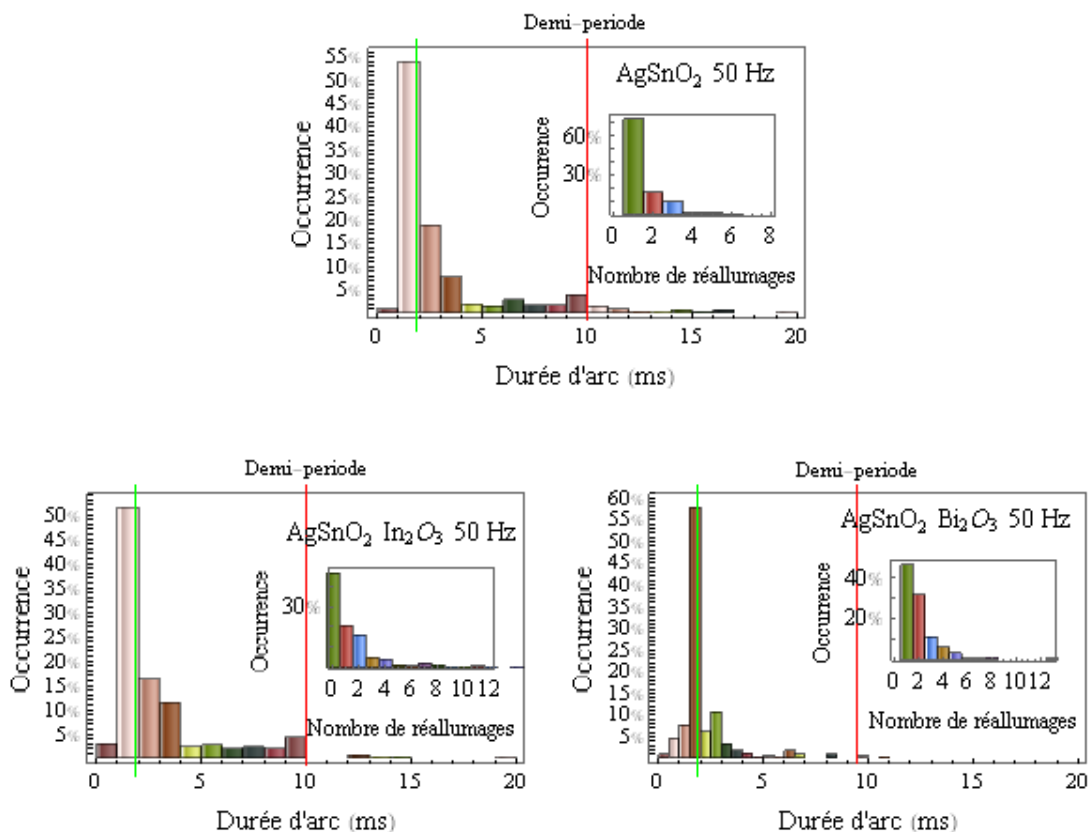


Figure 70 : Durée d’arc de rebond à 50 Hz

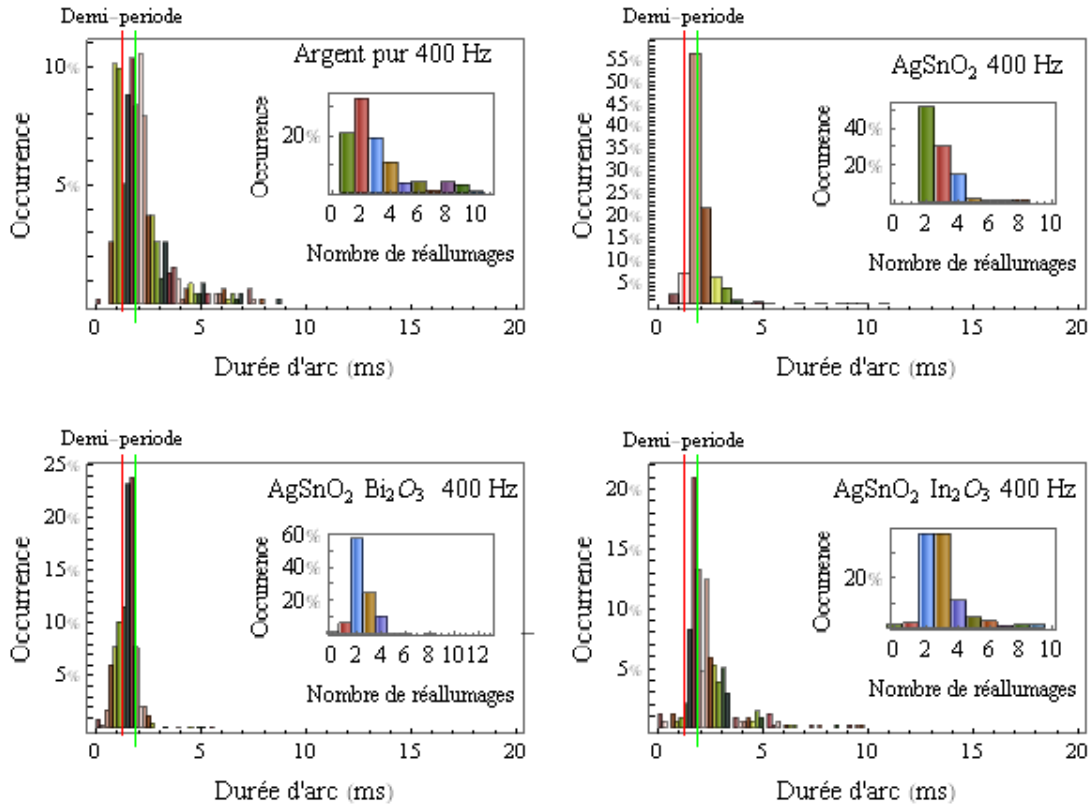


Figure 71 : Durée d'arc de rebond à 400 Hz

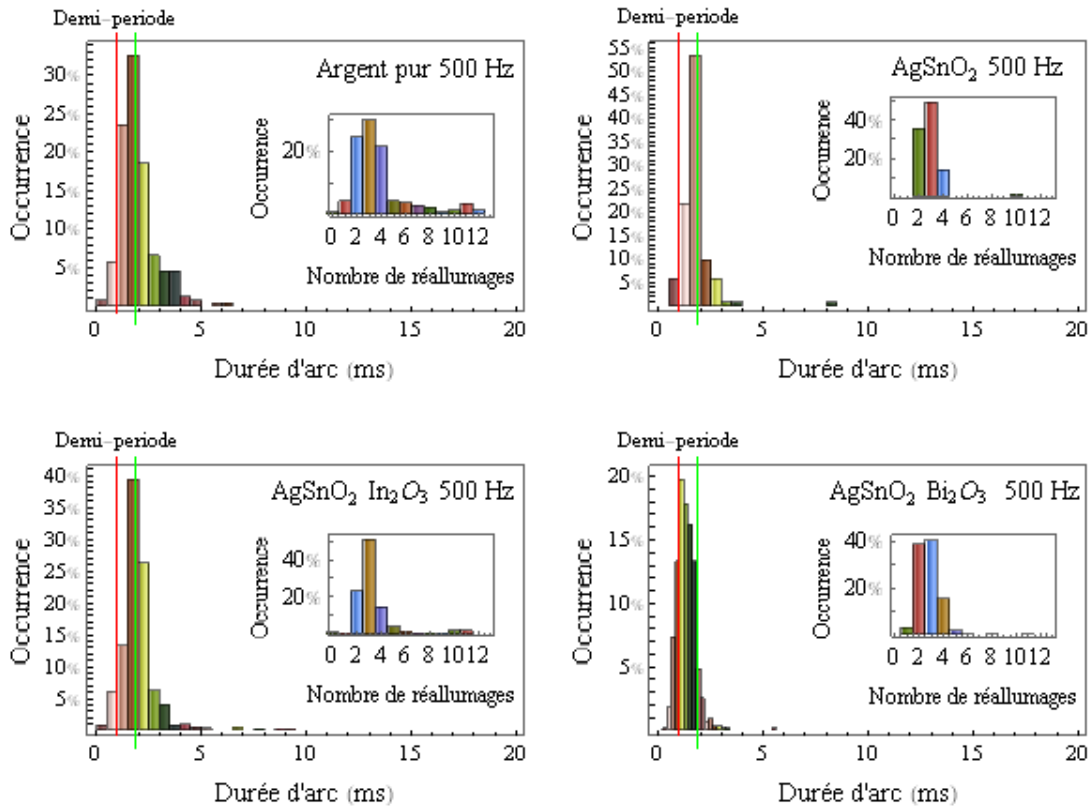


Figure 72 : Durée d'arc de rebond à 500 Hz

50 Hz : La durée de l'arc de rebond est d'environ 2 ms, pour tous les types de contacts testés. Aucun effet remarquable de la nature du matériau sur la durée d'arc est observé (figure 70). En outre, à 50 Hz, la demi-période est égale à 10 ms, bien supérieure à la durée du rebond mécanique qui est égale à 2 ms. Dans cette condition, l'arc a une faible chance de passer par le point zéro du courant. Ceci explique le nombre de ré-allumage obtenus, c'est-à-dire que l'arc s'allume majoritairement une seule fois.

400 Hz : à cette fréquence aussi, la durée totale de l'arc est de l'ordre de 2 ms, équivalent à la durée de rebond mécanique. La valeur de cette durée est obtenue à cause du réamorçage de l'arc. À ce niveau de fréquence, le nombre de ré-allumage est de l'ordre de 2 fois par rebond (figure 71).

500 Hz : Encore une fois, nous avons trouvé que la durée totale de l'arc est de l'ordre de 2 ms à 500 Hz, pour tous les types des contacts, à l'exception des contacts d'AgSnO₂ dopé Bi₂O₃. La durée totale de l'arc obtenu avec les contacts d'AgSnO₂ dopé Bi₂O₃ est d'environ 1 ms (figure 72). À première vue, nous pensons que l'arc dure la totalité d'une demi-période de 500 Hz, qui est égale à 1 ms aussi, mais en observant la répartition du nombre de ré-allumages, nous constatons que l'arc s'allume en moyenne entre deux et trois fois. Une analyse de quelques exemples des traces de la tension et du courant de l'arc à 500 Hz est faite pour comprendre ces résultats. La figure 73 présente un exemple de ces traces lors d'un rebond. Au début, l'arc a duré 300 μs (zone I), puis il s'est éteint pendant 1,6 ms (zone II) où le courant est nul et la tension est celle du circuit. Finalement, l'arc s'est réamorcé et a duré 260 μs (zone III) avant qu'il se soit éteint à la fin du rebond, c'est-à-dire que l'extinction finale de l'arc a été faite par la fermeture des contacts. Cependant, avec les contacts d'AgSnO₂ non dopé, le ré-allumage de l'arc de rebond se fait instantanément comme indiqué sur l'exemple présenté sur la figure 74, où la zone I représente le premier arc amorcé par la séparation des contacts, c'est-à-dire par explosion de pont fondu, cet arc a durée 440 μs, il s'est éteint à cause du passage du courant au point zéro. Les zones II et III représentent les deux autres réamorçages après le point zéro du courant.

La figure 75 représente deux exemples d'arc obtenus à 50 Hz dans différentes positions de la demi-période du courant. Le premier arc a durée sans interruption 2 ms quant au deuxième arc (figure 75-a), sa durée totale est de 820 μs seulement, vu qu'il s'est éteint au point zéro du courant et qu'il a pris un certain temps avant de se réamorcer (figure 75-b).

Nous distinguons donc, deux types de ré-allumage. Un ré-allumage retardé où le ré-allumage de l'arc prend un certain temps ($\sim 900 \mu\text{s}$) après le passage par zéro du courant et un ré-allumage instantané où le courant d'arc continue à circuler avec une polarité inverse après le passage par zéro du courant. Les traces de tension et de courant présenté à la figure 73 (ré-allumage avec 500 Hz) et la figure 75-b (ré-allumage avec 50 Hz) représente des exemples d'un ré-allumage retardé. Visiblement ce type de ré-allumage ne dépend pas de la valeur de la fréquence. Il peut être attribué à la lente décroissance de la conductivité de la colonne d'arc en raison du refroidissement par recombinaison des particules ionisées via plusieurs mécanismes comme l'attachement, la neutralisation de la paroi ou émission de photons [74]–[76]. Quant à Karimi *et al.*, ils expliquent qu'un réamorçage thermique de l'arc se produit principalement à cause du plasma post-arc laissé entre les électrodes de l'arc. En outre, le flux de courant post-arc dû à l'application de la tension de rétablissement (Transient Recovery Voltage) augmente la conductivité du plasma résiduel en raison de la vitesse élevée des particules chargées restantes dans le champ électrique appliqué. La densité des particules chargées restantes dépend du taux de chute du courant avant le courant zéro. Elle dépend également du courant post-arc produit par la tension post-arc appliquée [77]. Il est supposé également que le réamorçage thermique dépende fortement du taux de diminution du courant avant le courant zéro ainsi que du taux d'augmentation de la tension de rétablissement où la nature du matériau pourrait jouer également. Ces hypothèses ont été faites pour des arcs d'ouverture obtenus durant la coupure du courant [77], [78]. Ainsi, ce phénomène de ré-allumage reste difficile à comprendre, il nécessitera par la suite une étude plus approfondie en prenant en considération les paramètres du circuit électrique, la cinétique des contacts (rebond mécanique) ainsi que la nature des matériaux.

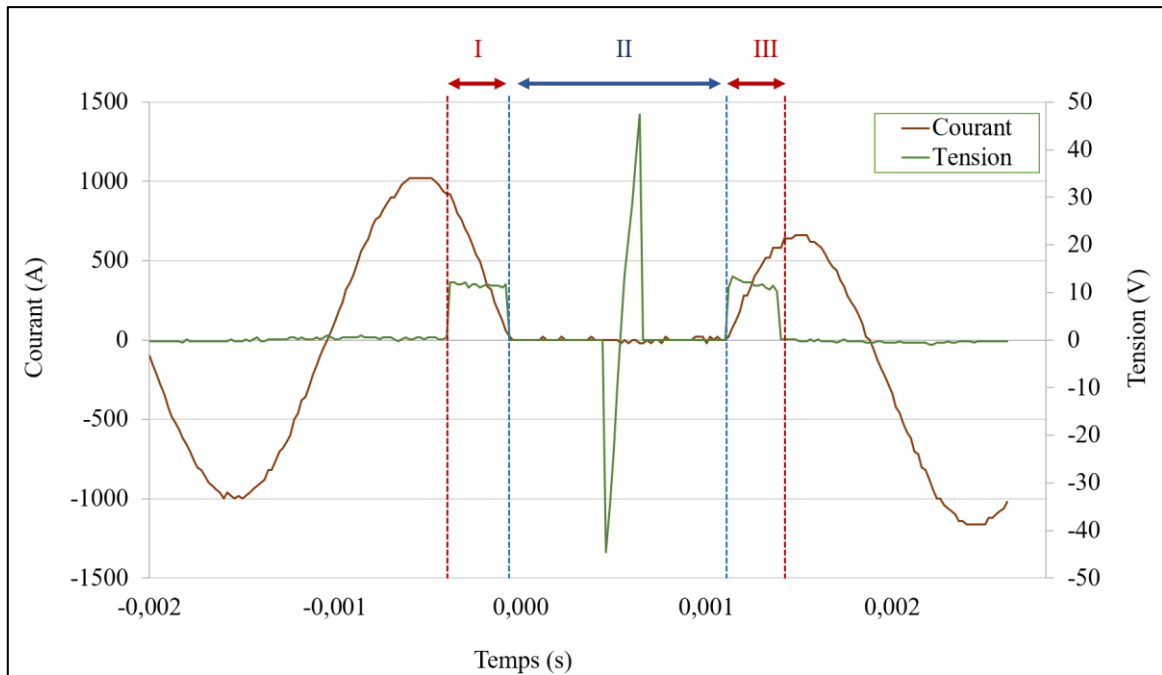


Figure 73 : Exemple d'arc de rebond à 500 Hz /115Vrms/750Arms avec des contacts AgSnO_2 dopé Bi_2O_3 : réamorçage de l'arc durant le rebond mécanique de 2 ms

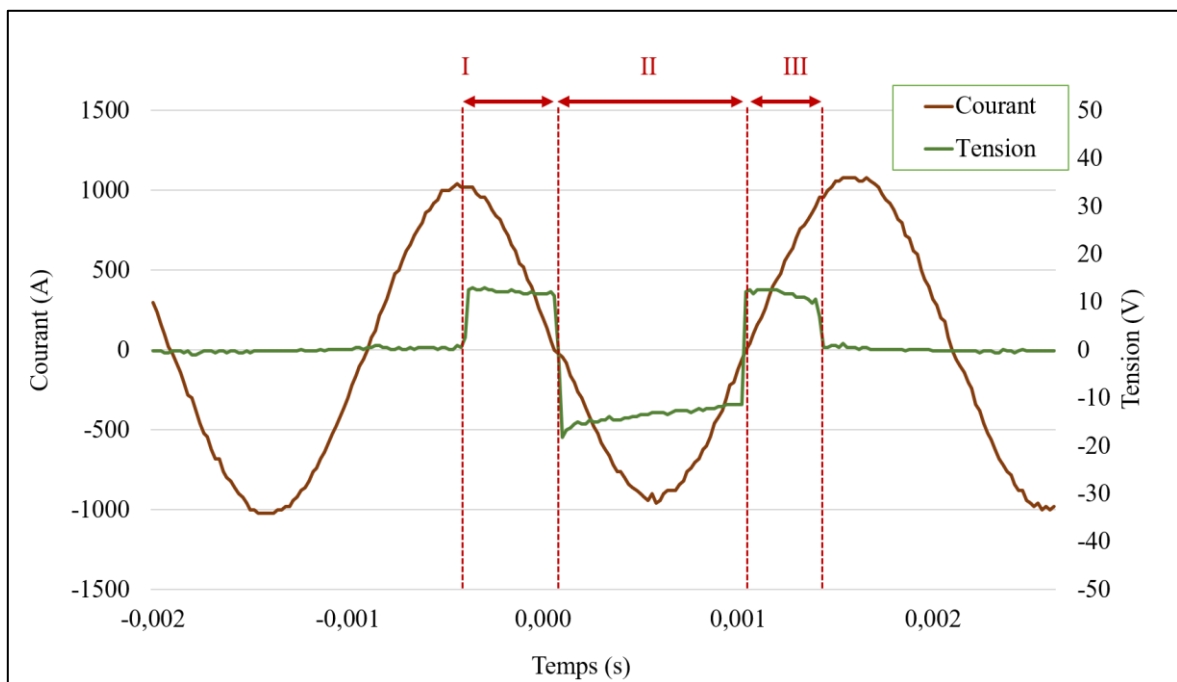
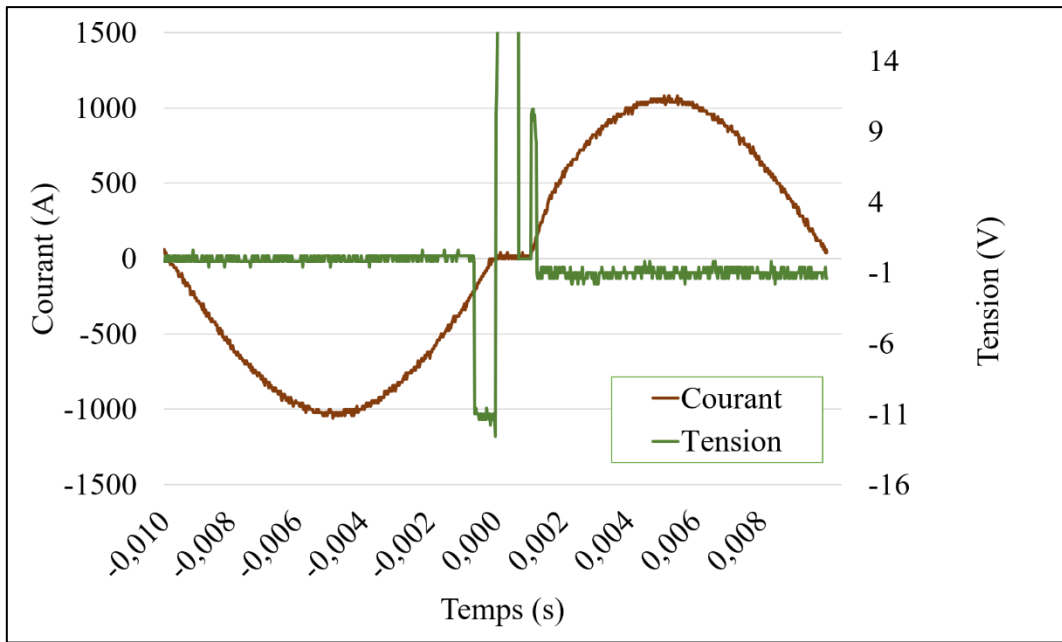
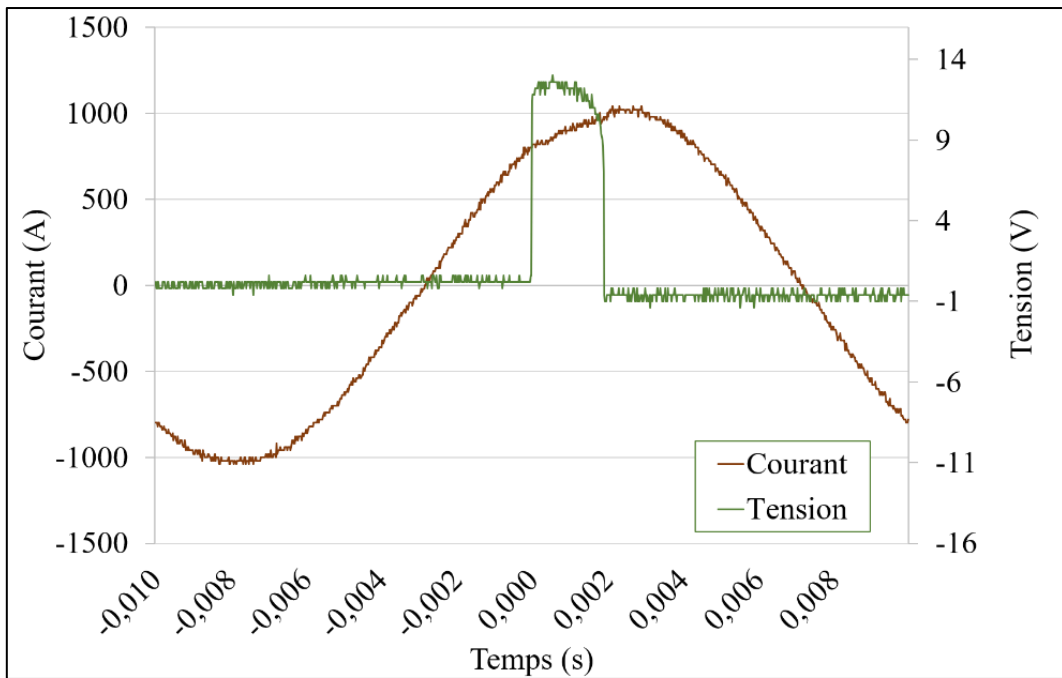


Figure 74 : Exemple d'arc de rebond à 500 Hz /115Vrms/750Arms avec des contacts AgSnO_2 non dopé : réamorçage de l'arc trois fois durant le rebond mécanique de 2 ms



a)



b)

Figure 75 : Arc de rebond à 50 Hz /115Vrms/750 Arms avec des contacts AgSnO_2 dopé Bi_2O_3 : a) réamorçage de l'arc 2 fois b) un seul arc

2. Energie de l'arc

Nous avons mentionné dans le premier chapitre que l'énergie de l'arc compte parmi les facteurs qui peuvent avoir un impact important sur les caractéristiques de la soudure des contacts. Elle est proportionnelle à la durée totale de l'arc, au niveau du courant et au niveau de la tension de l'arc. Les figures 76, 77, 78 montrent les énergies d'arc en fonction du nombre de cycles, seul le cas d'argent pur n'est pas présenté car comme nous l'avons mentionné précédemment, il a été collé dès le premier cycle.

50 Hz : avec les contacts d'AgSnO₂ non dopé, l'énergie de l'arc augmente avec le vieillissement des contacts. Étant donné que l'évolution de la force de soudure suit l'évolution de l'énergie de l'arc au fil des cycles, l'énergie maximale obtenue lors des premiers cycles ne dépasse pas 40 J, alors que vers la fin des cycle l'énergie de l'arc peut monter jusqu'à 100 J. Cette évolution est peut-être due à l'endommagement de la surface des contacts. Cet endommagement contribue à une augmentation du nombre d'aspérités, et par conséquent à une augmentation de la résistance de constriction qui finalement provoque d'autres arcs par explosion de pont fondu, la durée totale devient plus importante, ce qui augmente implicitement l'énergie de l'arc. En utilisant les contacts d'AgSnO₂ dopé In₂O₃, les énergies mesurées montrent une fluctuation importante au fur et à mesure des cycles, ce qui montre que ces valeurs ne dépendent pas du vieillissement du contact. En effet, excepté le tout début de l'essai, de fortes énergies de l'ordre de 70 J sont fréquemment obtenue. Tandis que, pour les contacts d'AgSnO₂ dopé Bi₂O₃, la fluctuation d'énergie semble moins importante, les mesures montrent que de fortes énergies de l'ordre de 80 J ont été obtenues durant la première et la dernière période de l'essai.

400 Hz : les énergies de l'arc mesurées, en utilisant les contacts d'argent pur présentent une forte fluctuation au fil des cycles, où les valeurs maximales d'énergie montent jusqu'aux alentours de 100 J, tandis que les énergies mesurées en utilisant les autres types de contacts, AgSnO₂, AgSnO₂ dopé In₂O₃ et AgSnO₂ dopé Bi₂O₃, montrent une fluctuation moins forte, où l'écart entre les valeurs d'énergie maximales semble moins important, d'environ 35 J.

500 Hz : avec les contacts d'argent pur et les contacts d'AgSnO₂ dopé In₂O₃ l'énergie de l'arc fluctue avec le temps, alors que pour les contacts d'AgSnO₂ la valeur de l'énergie de l'arc s'avère stable avec le temps, puis soudainement, augmente ~20 J jusqu'à 70 J vers la fin de l'essai. Pour les contacts d'AgSnO₂ dopé Bi₂O₃ l'énergie reste stable au fil des cycles. Dans ce cas, les valeurs de l'énergie mesurée semblent 2 fois plus faibles par rapport à celles obtenues dans les autres conditions.

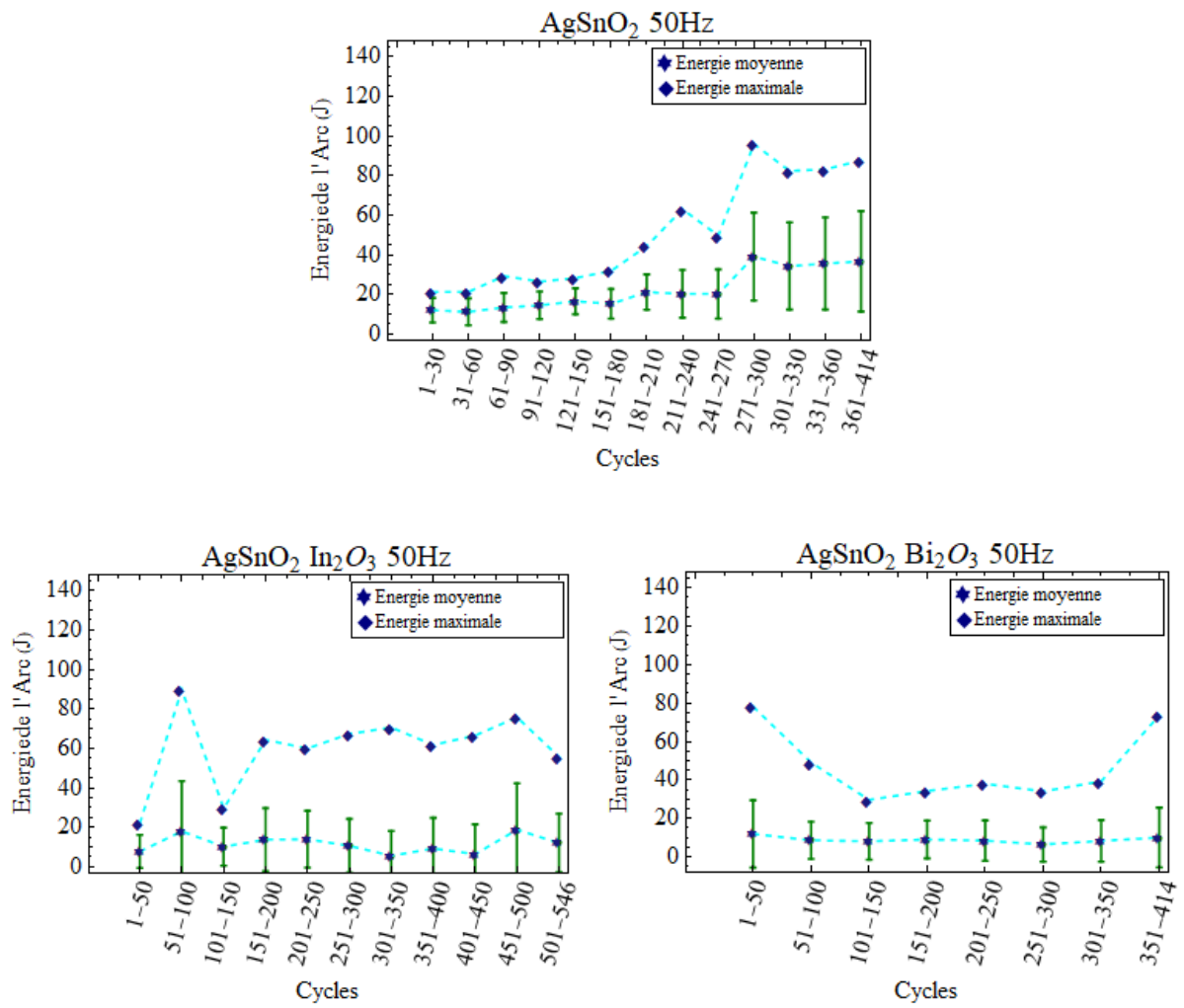


Figure 76 : Energie de l'arc de rebond en fonction des cycles d'essai à 50 Hz

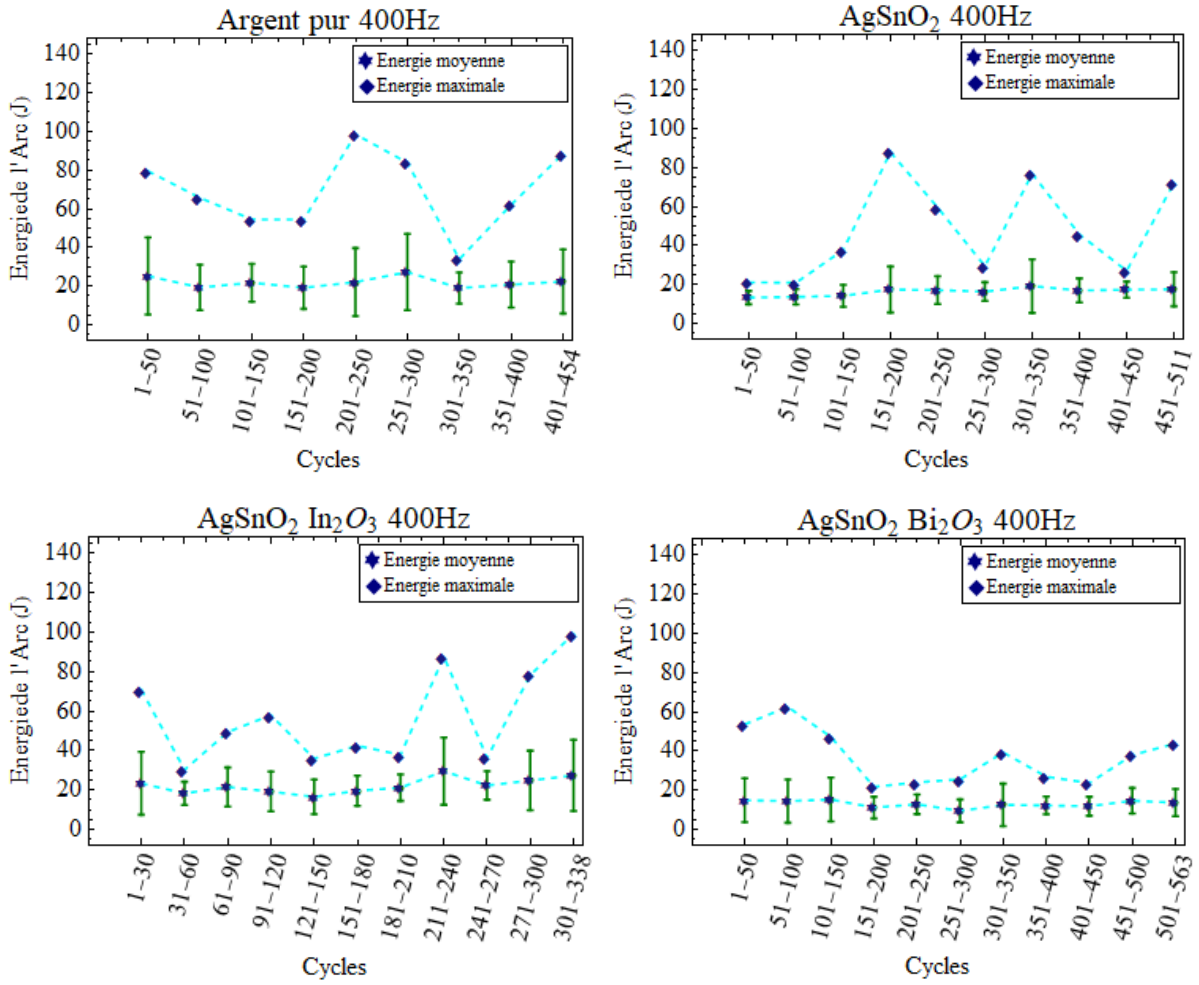


Figure 77 : Energie de l'arc de rebond en fonction des cycles d'essai à 400 Hz

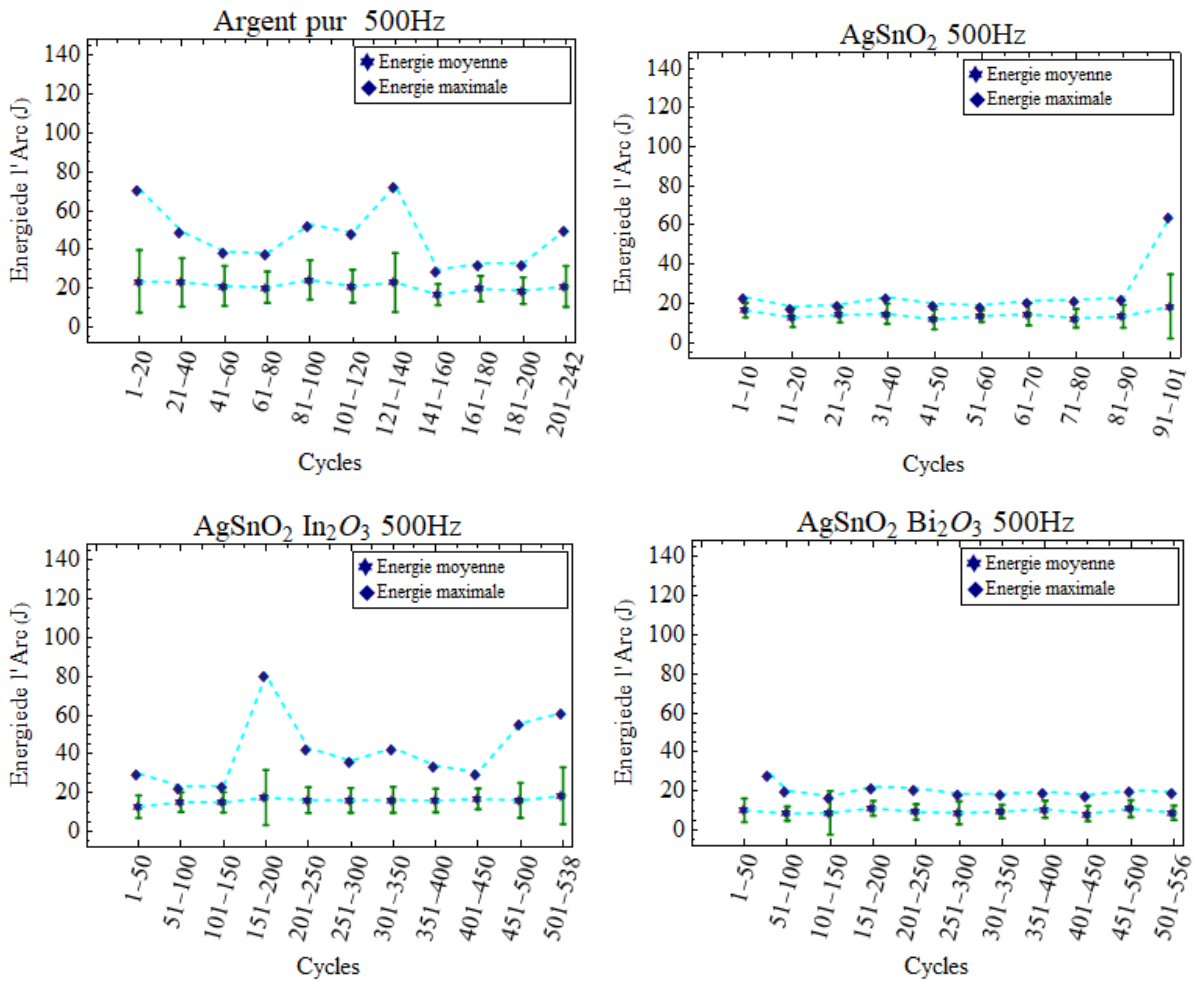


Figure 78 : Energie de l'arc de rebond en fonction des cycles d'essai à 500 Hz

Nous pouvons, donc, relier ces résultats aux résultats obtenus sur les caractéristiques de la soudure et confirmer que l'énergie de l'arc a un impact sur la soudure. En effet, nous supposons que les arcs ayant des énergies élevées contribuent à la dégradation de la surface des contacts. Par conséquent l'état de la surface contribue à une occurrence de soudure plus importante. Ce qui nous a amené à étudier les surfaces de ces contacts afin de mieux comprendre cette interaction arc-matériau de contact. Cette étude est présentée dans la partie suivante.

V. Étude métallographique des contacts

L'objectif de cette étude est d'analyser l'effet des tests de soudure sur les matériaux de contact et de comprendre les interactions arcs-matériaux qui contribuent à l'occurrence ou à la non occurrence de la soudure. Pour ce faire, nous avons effectué des analyses qualitatives et quantitative en Microscopie Électronique à Balayage (MEB) couplé à l'EDS (Spectroscopie de Rayons X à Dispersion d'énergie), afin d'observer l'état de surface des contacts testés et la répartition des éléments chimiques.

1. État initial des contacts électriques

Pour analyser l'état initiale des électrodes, nous avons procédé en deux étapes. Dans une première étape, nous avons caractérisé la surface des électrodes à l'aide d'un microscope électronique à balayage, en utilisant le détecteur des électrons secondaires, permettant d'obtenir principalement un contraste relatif à la topographie du matériau analysé.

La figure 79-(a, b et c) présente des micrographies MEB de la surface des contacts d'AgSnO₂ non dopé, d'AgSnO₂ dopé en In₂O₃ et d'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃ dans leur état initial. Nous constatons que ces surfaces contiennent des pores. Sur les trois images, nous observons deux contrastes. Un contraste clair, majoritaire, correspondant à la matrice, et un autre contraste sombre, qui correspond vraisemblablement à des porosités. Ces porosités sont de l'ordre d'un micromètre pour les contacts d'AgSnO₂ non dopé, quant aux porosités qui se trouvent dans les contacts d'AgSnO₂ dopés, ils apparaissent plus grands, leur diamètre étant de l'ordre de 2 à 4 μm pour l'AgSnO₂ dopé en In₂O₃ et l'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃. Cependant, la répartition des pores s'avère homogène pour les trois matériaux.

La deuxième étape, consistait à analyser l'homogénéité chimique des contacts électriques. Pour ceci, nous avons réalisé des coupes longitudinales, que nous avons caractérisées par MEB également. Cette fois, les observations ont été réalisées en mode BSE (électrons rétrodiffusés), permettant d'obtenir un contraste relatif principalement au numéro atomique (Z) des éléments chimiques (figure 79- (d, e et f).

Les coupes des contacts présentées sur cette figure montrent des particules d'apparence sombre à la surface de la coupe caractérisée. Ces particules pourraient correspondre aux grains d'oxyde métallique dispersés dans la matrice d'argent. Dans le cas de l'AgSnO₂ non dopé la taille des grains est petite, présentant une taille d'environ 1 μm, tandis que les grains des contacts

d'AgSnO₂ dopé, qui semblent plus grands, présentent une taille qui varie approximativement entre 1 et 5 μm.

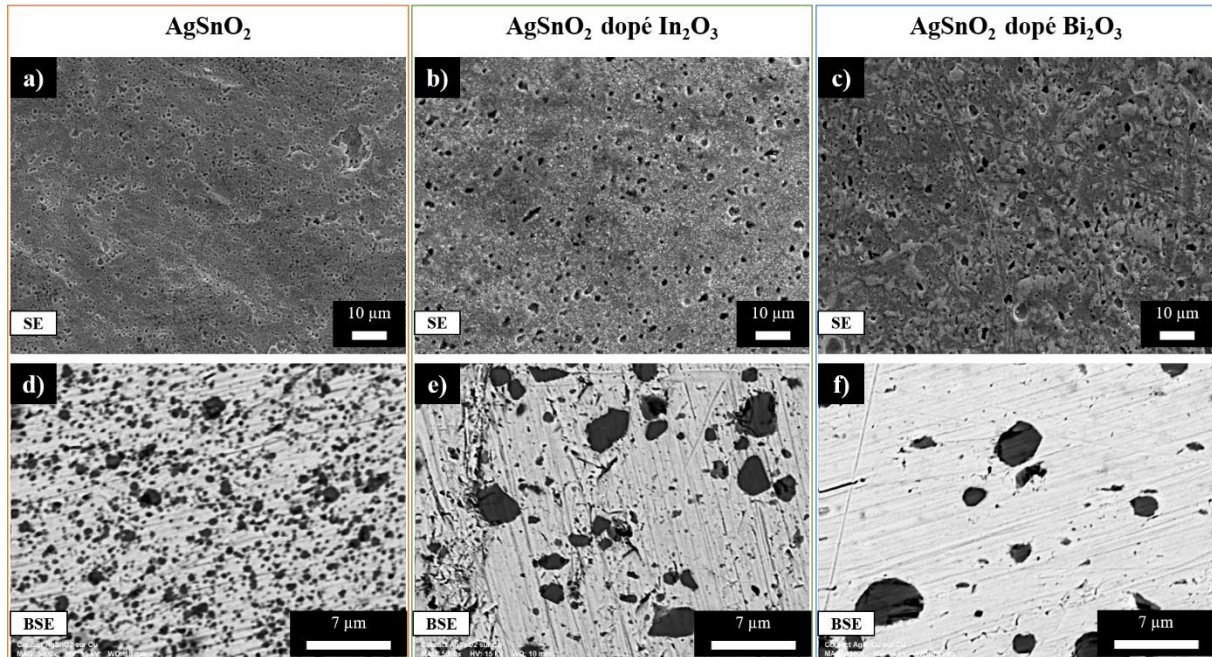
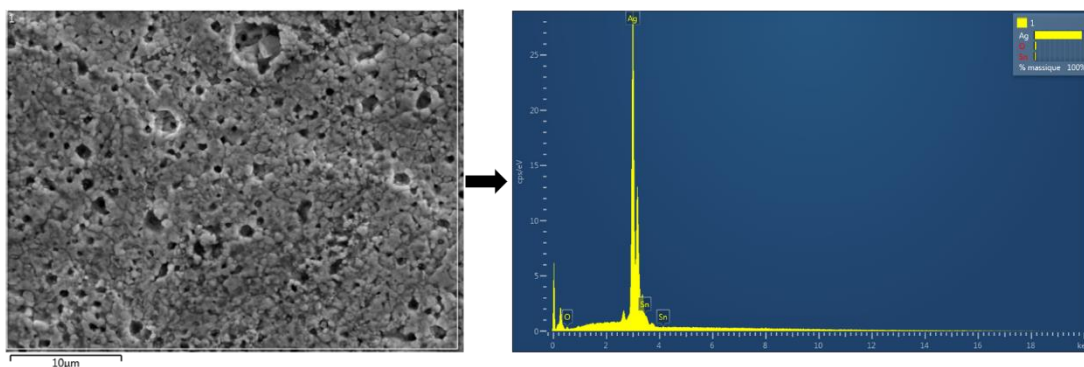


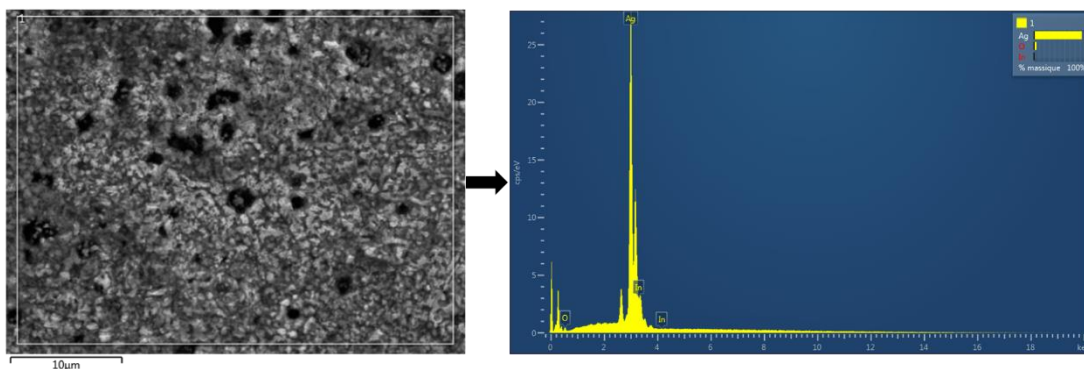
Figure 79 : Micrographies MEB - SE des surfaces des contacts électriques : a) AgSnO₂ ; b) AgSnO₂ dopé In₂O₃ ; c) AgSnO₂ dopé Bi₂O₃ avec un grandissement X1000. Micrographies MEB-BSE des coupes transversales des contacts électriques : d) AgSnO₂ ; e) AgSnO₂ dopé In₂O₃ ; f) AgSnO₂ dopé Bi₂O₃ avec un grandissement X5000

Pour confirmer ceci, nous avons réalisé des analyses EDS sur les contacts neufs (figures 80, 81, 82). Ces analyses représentent le pourcentage massique (% m) et atomique (% at) des éléments chimiques composant le matériau de contact. Le contact d'AgSnO₂ non dopé représente un pourcentage de 93,55% m d'argent et 3,74% m d'oxygène et de 2,6% m d'étain au niveau de la zone analysée (figure 80). Le contact d'AgSnO₂ dopé In₂O₃, quant à lui, représente un pourcentage de 93,74% m d'argent et 5,33% m d'oxygène et de 0,92% m d'étain au niveau de la zone analysée (figure 81). L'analyse de la surface du contact d'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃ montre que le bismuth n'est pas présent sur la surface, la composition de cette surface représente 6,75% m d'oxygène et 93,25% m d'argent (figure 82). En effet, dans le cas d'AgSnO₂ dopé Bi₂O₃, il a été difficile de détecter le bismuth au niveau de la surface. C'est pour cela que nous avons analysé une coupe de ce contact, sur lequel nous avons trouvé 1,20% m de bismuth 6,59% m d'oxygène, 10,55% m d'étain et 81,66% m d'argent (Figure 83).



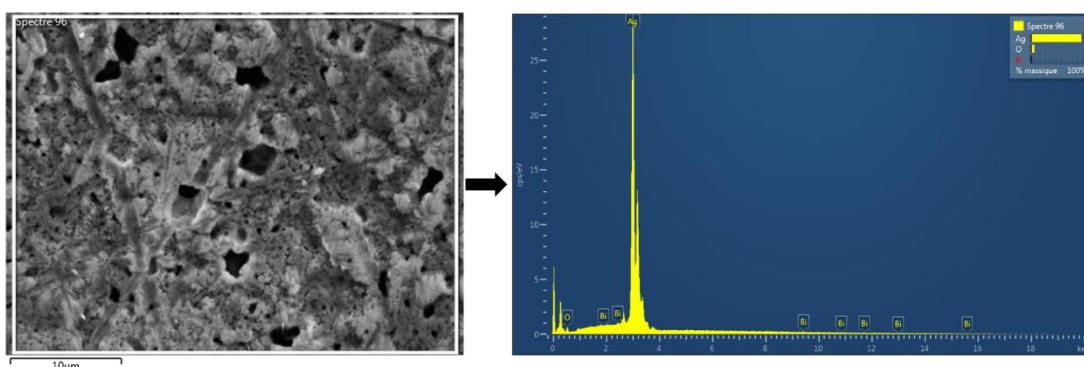
Élément	Type de raie	% Masse	% atomique
O	Série K	3,74	20,79
Ag	Série L	93,66	77,26
Sn	Série L	2,60	1,95

Figure 80 : Analyse EDS de la surface d'un contact neuf d'AgSnO₂ non dopé



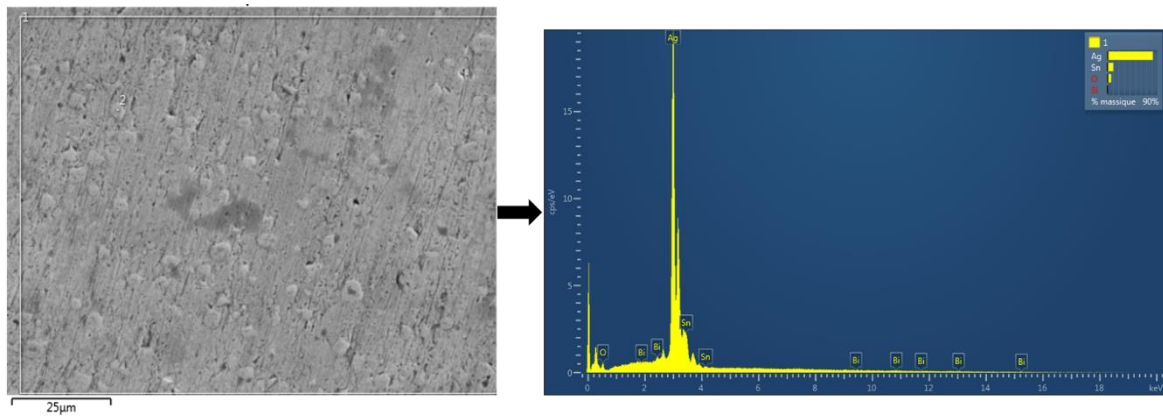
Élément	Type de raie	% Masse	% atomique
O	Série K	5,33	27,54
Ag	Série L	93,74	71,80
In	Série L	0,92	0,67

Figure 81 : Analyse EDS de la surface d'un contact neuf d'AgSnO₂ dopé en In₂O₃



Élément	Type de raie	% Masse	% atomique
O	Série K	6,75	32,81
Ag	Série L	93,25	67,19
Bi	Série M	0,00	0,00

Figure 82 : Analyse EDS de la surface d'un contact neuf d'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃



Élément	Type de raie	% Masse	% atomique
O	Série K	6,59	32,60
Ag	Série L	81,66	59,91
Sn	Série L	10,55	7,03
Bi	Série M	1,20	0,45

Figure 83 : Analyse EDS d'une coupe de contact neuf d'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃

2. État de surface des contacts électriques après les tests de soudure

La surface des contacts change et se dégrade après avoir effectué les tests des arcs de rebond. Cette dégradation correspond à la déformation de la topographie de la surface ainsi qu'au changement de la répartition des composants chimiques. Elle est le résultat, non seulement de l'effet de l'arc, mais d'une combinaison d'autres actions. Nous distinguons donc trois phénomènes principaux qui contribuent à la dégradation des surfaces de contact :

- La dégradation par fusion et érosion du métal sous l'effet de l'arc
- La dégradation par l'arrachement de la soudure dynamique des deux contacts
- La dégradation due à l'action répétée de la force de contact

Les deux premiers types de dégradation semblent être plus prépondérants que l'effet de la force de contact. Dans cette partie, nous allons étudier l'effet de la fréquence et du type du matériau sur l'état de la surface.

2.1. Vue d'ensemble

Pied d'arc : Afin de comparer l'état de surface des contacts, nous avons rassemblé dans la figure 84 les images présentant une vue d'ensemble de chaque contact ayant subi le test des arcs de rebond, ceci en fonction de la fréquence de la tension. Nous constatons que l'arc à 50 Hz a plus tendance à être présent sur toute la surface des contacts, notamment pour des contacts d'AgSnO₂ non dopé et d'AgSnO₂ dopé en In₂O₃. Normalement, cet effet aurait pu être observé

sur le contact d'argent, mais celui-ci a effectué seulement 3 cycles, c'est-à-dire qu'il n'a subi que 3 arcs. Dans ce cas, le diamètre du pied d'arc est d'environ 4 mm. Pour les contacts de bismuth, l'arc n'a pas affecté toute la surface malgré qu'il ait effectué plus de 500 cycles. Nous constatons également que plus la fréquence est basse, plus la surface du contact touchée par l'arc est grande.

Érosion : la taille et le poids du contact et du shunt ainsi que leur assemblage par brasage rendent difficile la mesure des variations de masse des électrodes dues à l'érosion sous l'effet de l'arc, car, d'une part, les balances ayant une précision de l'ordre du microgramme ne peuvent pas supporter le poids du shunt et, d'autre part, une quantité du métal éjecté se retrouve sur la surface du shunt. En effet, dans notre cas, en AC le transfert de la matière pourrait être le même sur les deux électrodes. Ceci est dû au fait que les deux électrodes, contact mobile et contact fixe, échangent les rôles entre cathode et anode selon le signe du courant. Les événements contrôlant l'érosion de l'arc vont donc changer avec le changement de polarité du contact [6]. Dans notre cas, la polarité des contacts au moment de la création du rebond mécanique est aléatoire.

La figure 84 regroupe les images des surfaces de contact affecté par les tests des arcs de rebond. Pour les contacts en argent pur, l'érosion se fait par l'éjection des gouttelettes du métal liquide, cette éjection s'avère très forte. Cependant, cet effet est moins observé sur les autres contacts. À 50 Hz, l'éjection de gouttelettes est encore plus faible dans le cas des contacts AgSnO_2 dopés.

Nous pouvons conclure que l'oxyde métallique SnO_2 diminue fortement l'éjection des gouttelettes du métal liquide. Le dopage du matériau de contact par In_2O_3 et Bi_2O_3 contribue encore à diminuer ce phénomène. Ces résultats confirment ceux obtenus à partir d'une étude réalisée par Mingzhe *et al.*[79] sur les effets des additifs sur le comportement d'érosion des contacts AgSnO_2 . Il a testé plusieurs types de dopants parmi lesquels, le In_2O_3 et Bi_2O_3 . Il explique que l'agent dopant a un effet prédominant sur l'amélioration de la résistance à l'érosion par arc du matériau AgSnO_2 . Le dopant réduit la résistance de contact et la génération de chaleur et par conséquent l'agent dopant réduit l'éjection des gouttelettes liquides [79].

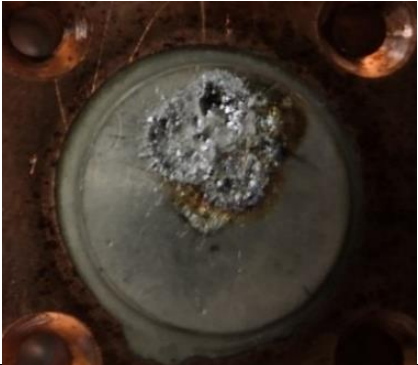
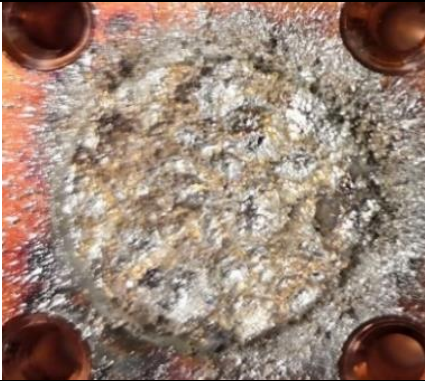

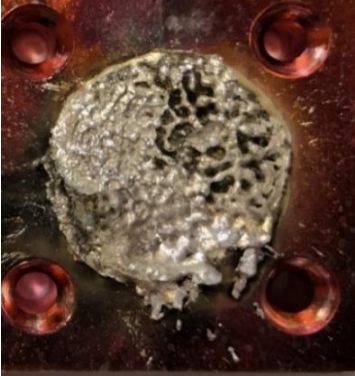








	50 Hz	400 Hz	500 Hz
Argent pur			
	3 cycles (3 soudures > 100N)	450 cycles	240 cycles
AgSnO ₂			
	400 cycles	500 cycles	100 cycles
AgSnO ₂ In ₂ O ₃			
	>500 cycles	340 cycles	>500 cycles
AgSnO ₂ Bi ₂ O ₃			
	>500 cycles	>500 cycles	>500 cycles

Figure 84 : Vue d'ensemble des contacts électriques après les tests des arcs de rebond

2.2. Contacts d'AgSnO₂ non dopé

2.2.1. À 50 Hz

Les contacts d'AgSnO₂ ont subi une modification de l'état de surface sous l'effet des arcs de rebond à 50 Hz. Cette modification se manifeste sous forme de bosses et de cratères d'ordre du millimètre. Comme le montre la figure 85, chaque bosse est située à côté d'un cratère. Holmes et Slade ont observé le même comportement dans une étude sur le transfert du matériau en AC [80].

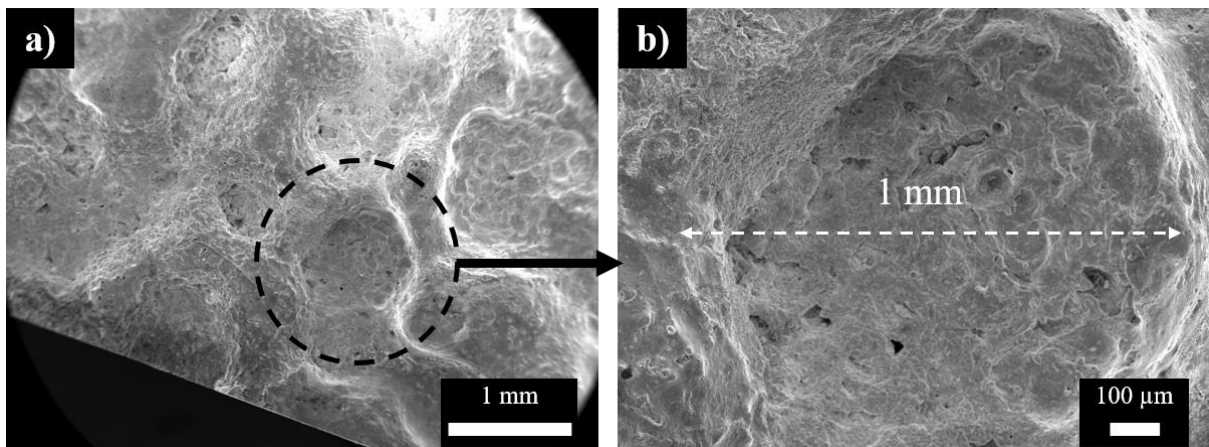
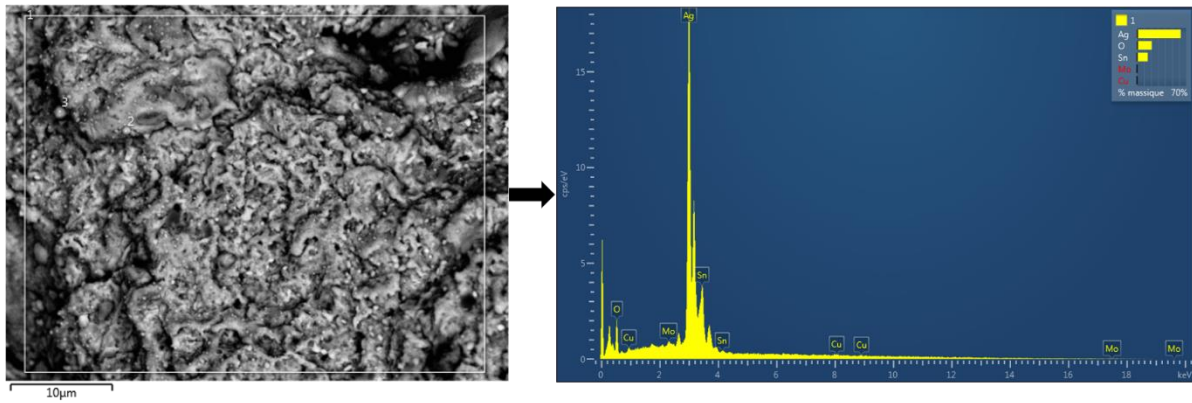


Figure 85 : Surface de contact d'AgSnO₂ ayant subi des arcs de rebond à 50 Hz sous 115Vrms et 750 Arms à différents grossissements : a) X25 et b) X100

L'analyse par EDS montre qu'au niveau de cette surface endommagée, la composition chimique du matériau a changé (figure 86). Le pourcentage d'étain est approximativement 5 fois plus élevé que le pourcentage relevé dans le contact neuf. Cependant, l'argent représente toujours l'élément chimique majoritaire constituant le matériau mais avec un pourcentage de 62% m (Figure 86). Les traces de molybdène et de cuivre détectées sont des impuretés, peut-être issues du brasage du contact sur le shunt de cuivre.



Élément	Type de raie	% Masse	% atomique
O	Série K	20,95	64,39
Cu	Série K	0,55	0,43
Mo	Série L	0,76	0,39
Ag	Série L	62,40	28,44
Sn	Série L	15,33	6,35

Figure 86 : Analyse EDS de la surface de contact d'AgSnO₂ non dopé ayant subi des arcs de rebond à 50 Hz sous 115Vrms et 750 Arms

2.2.2. À 400 Hz

À 400 Hz, le contacts d'AgSnO₂ non dopé a subi 500 cycles, sa surface montre une topographie différente de celle observée sur la surface de l'échantillon du même matériau testé à 50 Hz.

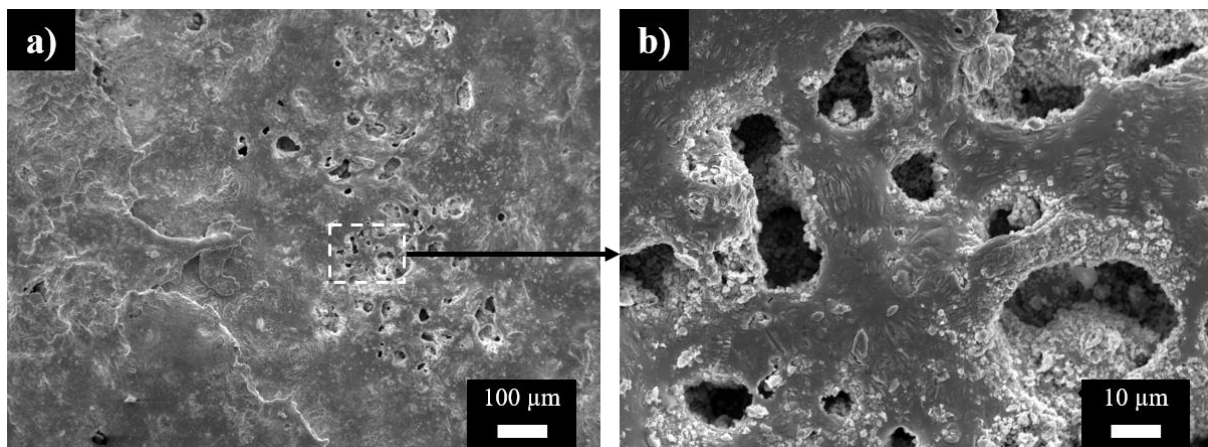


Figure 87 : Surface de contact d'AgSnO₂ ayant subi des arcs de rebond à 400 Hz sous 115Vrms et 750 Arms : a) X100 et b) X1000

La figure 87 montre la topographie de cette surface qui apparaît moins dégradée que dans le cas précédent (figure 86), où nous observons une absence de bosses et de cratères. Cependant, nous observons que la surface contient des porosités qui sont réparties de manière aléatoire. De plus, en utilisant un grossissement X1000, nous voyons clairement la morphologie de ces cavités, comme le montre la figure (88-a). La taille de ces cavités varie entre 10 et 30 µm, soit 10 fois

plus grande que celle observée sur la surface du même matériau neuf. Nous constatons également la présence de particules de quelques micromètres à l'intérieur et sur les bords des cavités (figure 87-a). Nous supposons que ce rassemblement a pu se produire à la suite de la décomposition du matériau AgSnO_2 sous l'effet de la chaleur de l'arc.

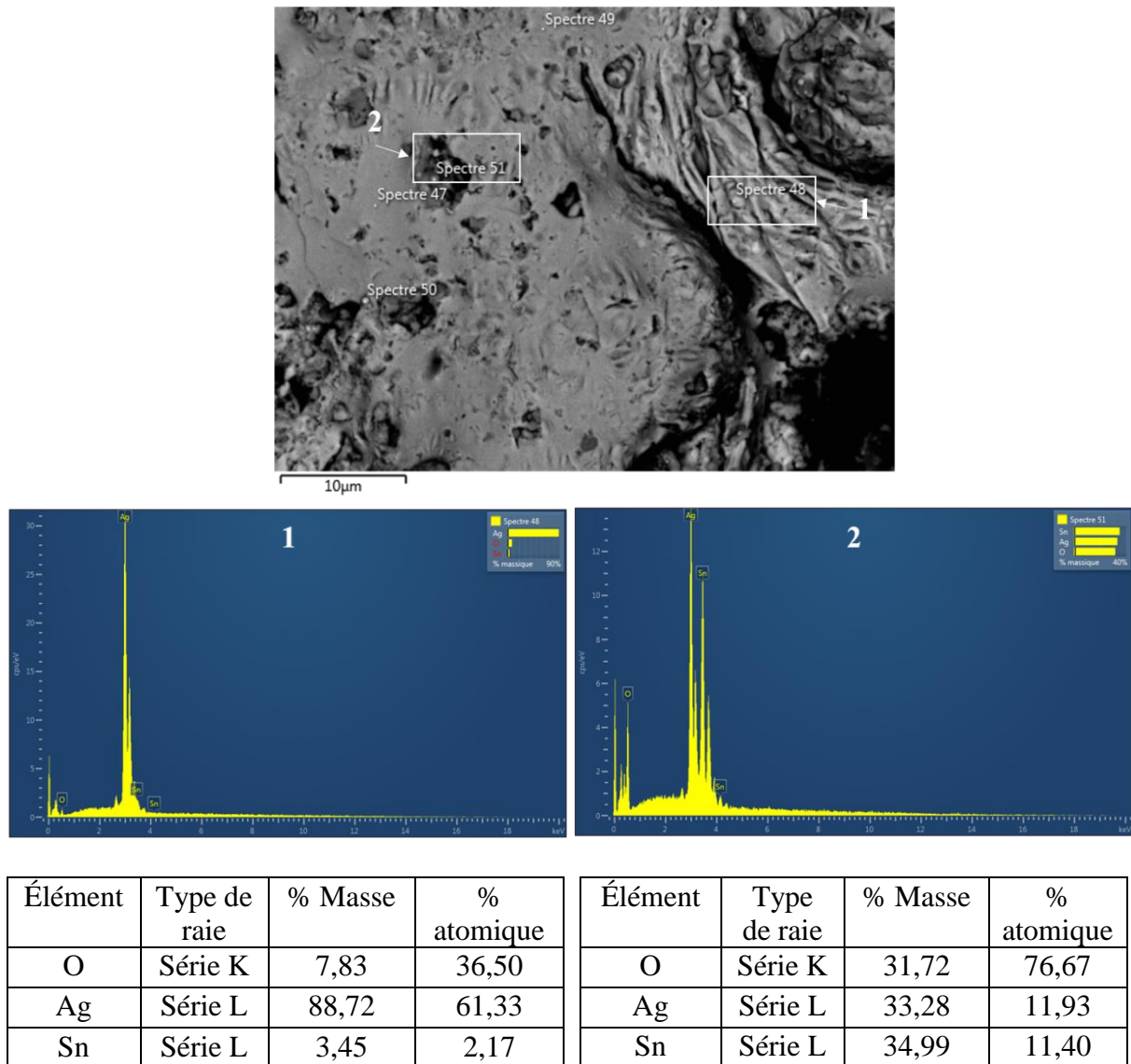


Figure 88 : Analyse EDS de la surface de contact d' AgSnO_2 ayant subi des arcs de rebond à 400 Hz sous 115Vrms et 750 Arms

L'analyse chimique par EDS de la surface de contact d' AgSnO_2 ayant subi des arcs de rebond à 400 Hz, présentée sur la figure 88 montre que la composition chimique de ce matériau varie d'une zone à l'autre. Au niveau des zones éloignées des cavités (analyse 1), l'argent se présente

avec un pourcentage majoritaire, à 88,72% m contre 3,45% m d'étain. Cette composition est proche de la composition du contact de référence. L'étain quant à lui se présente majoritairement dans les cavités, avec un pourcentage s'élevant jusqu'à 34,99% m contre 33,28% m d'argent. Cette analyse confirme notre supposition sur une éventuelle ségrégation de l'oxyde métallique au niveau des cavités.

2.2.3. À 500 Hz

La figure 89 présente une partie de la surface de contact AgSnO_2 au niveau de l'arrachement d'une soudure forte. On distingue deux types de topographies présentées sur cette figure. La première montre des cavités ayant une forme de bulles, de taille variant entre quelques micromètres jusqu'à $\sim 100 \mu\text{m}$ (Zone 1). Ces cavités sont créées suite à une libération d'oxygène sous l'effet de la température élevée de l'arc. En outre, une deuxième topographie, observée sur « la zone 2 », montre des traces d'arrachement de la soudure avec une absence de cavités. Nous expliquons cette différence de microstructure par l'enrichissement de la zone 1 en oxyde d'étain, et à l'appauvrissement de la zone 2 de cet oxyde métallique.

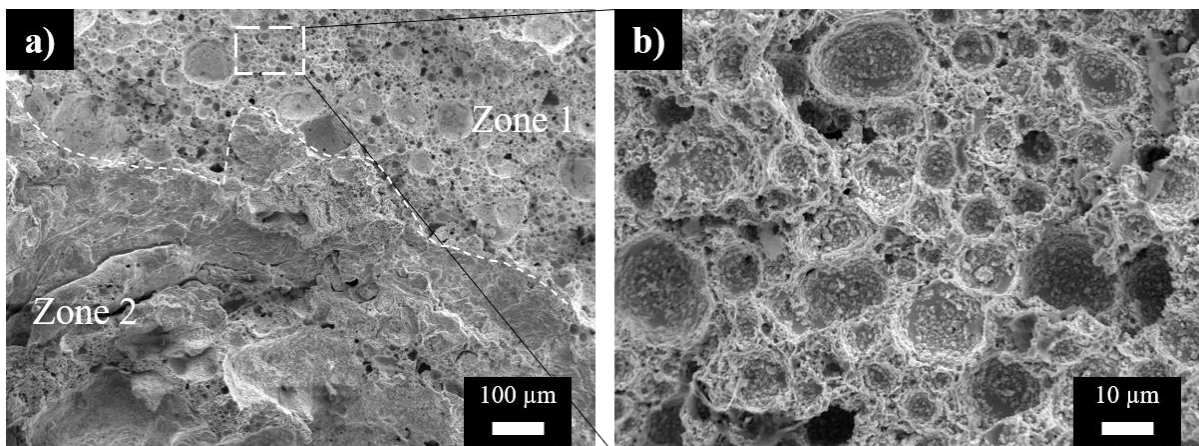
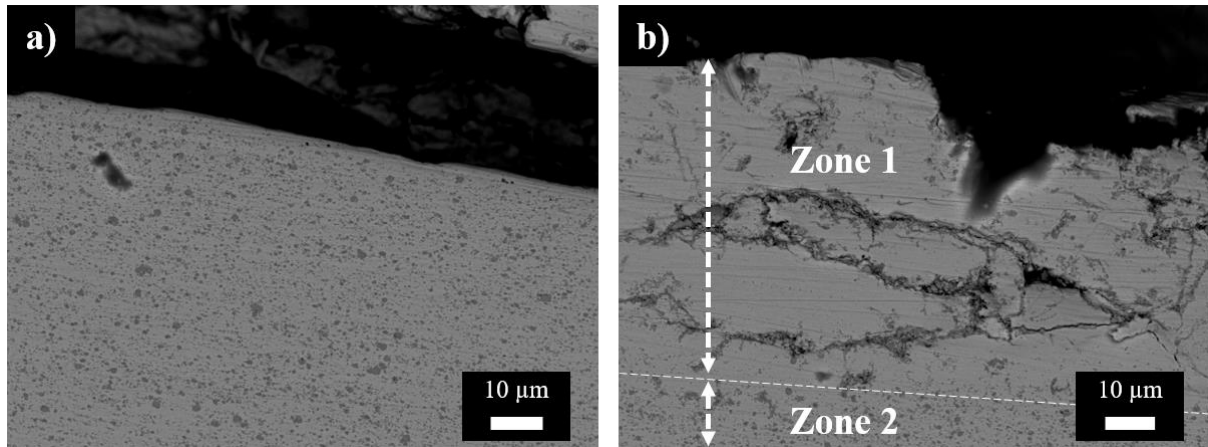


Figure 89 : Surface de contact d' AgSnO_2 ayant subi des arcs de rebond à 500 Hz, sous 115Vrms et 750 Arms a) grandissement X100 b) grandissement X1000



a)

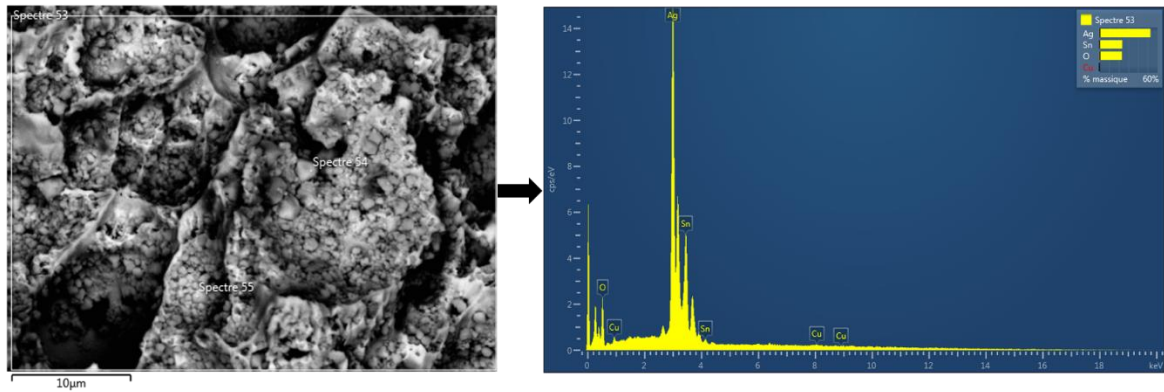
b)

Figure 90 : Analyse MEB en mode BSE de coupe de contact d'AgSnO₂ ayant subi des arcs de rebond à 500 Hz sous 115Vrms et 750 avec un grandissement X1000 : a) au niveau d'une zone perturbée par les tests b) au niveau de la fracture d'une forte soudure >100N

Nous avons effectué une analyse MEB en mode électrons rétrodiffusés (BSE) sur des coupes de ce contact. La première analyse a été effectuée au niveau d'une zone affectée légèrement par l'arc (figure 90-a). La deuxième analyse a été faite au niveau de la fracture d'une forte soudure (>100N) (la figure 90-b). Sur la première image (figure 90-a), nous observons que la répartition des grains d'oxydes métalliques est homogène. Cependant, au niveau de la fracture comme le montre la figure 90-b, nous distinguons deux zones, la zone 1 qui contient des fissures, vers lesquels l'oxyde métallique SnO₂ a migré et la zone 2, où la distribution des grains de SnO₂ dans la matrice d'argent reste homogène.

Nous avons deux théories sur l'origine de cette ségrégation. La première serait due tout simplement à un défaut de fabrication du matériau. La deuxième, et la plus probable selon nous, serait la fissuration du matériau sous les contraintes mécaniques répétitives, autrement dit, les forces de contact et les forces d'arrachement des soudures qui se sont produites préalablement, suivie par une ségrégation de l'oxyde d'étain sous l'effet de l'arc. Indépendamment de la cause de cette ségrégation, nous pensons qu'elle a été responsable de la forte soudure qui s'est produite juste après 100 cycles.

L'analyse chimique réalisée sur la surface au niveau d'une zone de la surface de la fracture de la soudure forte est présentée sur la figure 91. Elle montre un enrichissement important d'étain, qui représente 23,77% m contre 52,85% m d'argent.



Élément	Type de raie	% Masse	% atomique
O	Série K	23,38	67,92
Ag	Série L	52,85	22,77
Sn	Série L	23,77	9,31

Figure 91 : Analyse EDS de la surface de contact d'AgSnO₂ ayant subi des arcs de rebond à 500 Hz sous 115Vrms et 750 Arms

2.3. Contacts d'AgSnO₂ dopé en In₂O₃

2.3.1. À 50 Hz

La surface du contact d'AgSnO₂ dopé en In₂O₃ ayant subi les arcs de rebond à 50 Hz, montre une topographie qui nous rappelle celle observée sur le contact d'AgSnO₂ non dopé qui a subi également des arcs de rebond à 50 Hz. Cependant, cette rugosité n'est pas aussi marquée dans ce cas. Nous pensons, comme nous l'avons évoqué précédemment, que ceci est dû au dopage de l'AgSnO₂ en oxyde d'indium, qui contribue à diminuer l'érosion de ces contacts,

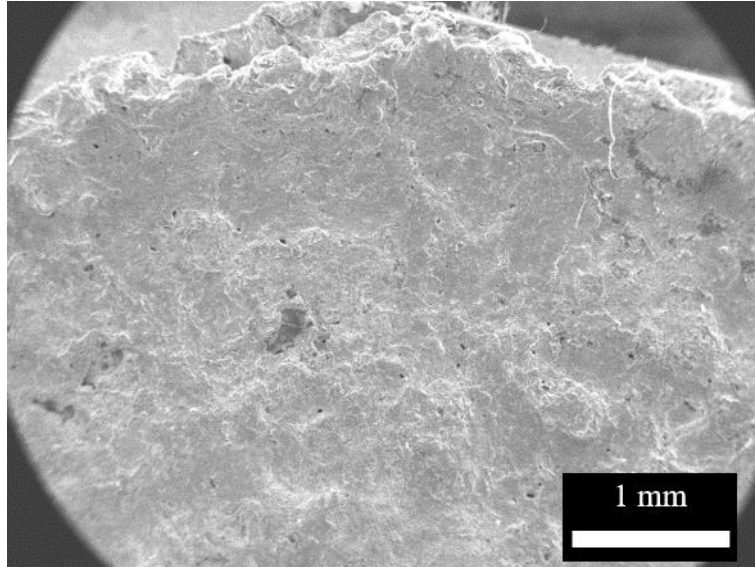
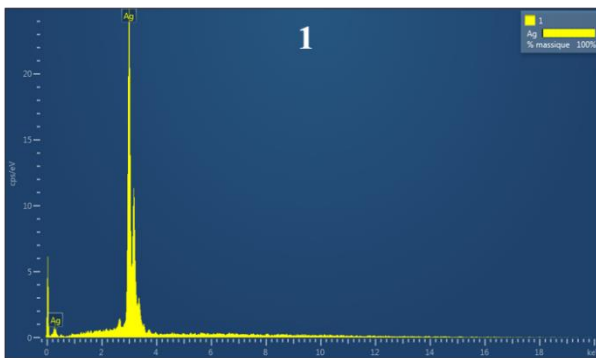
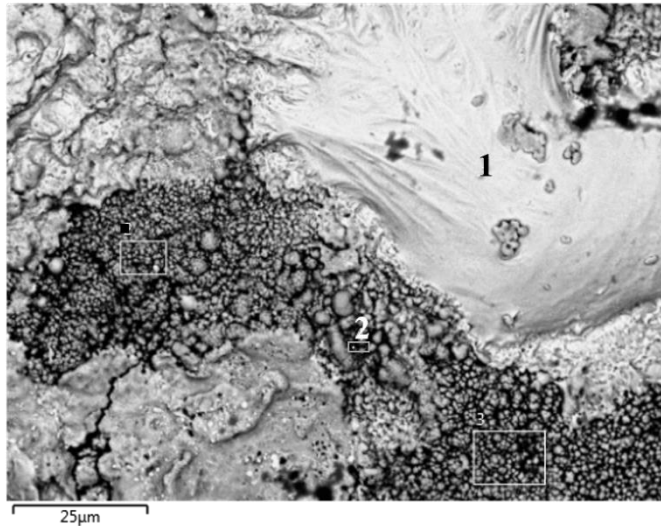


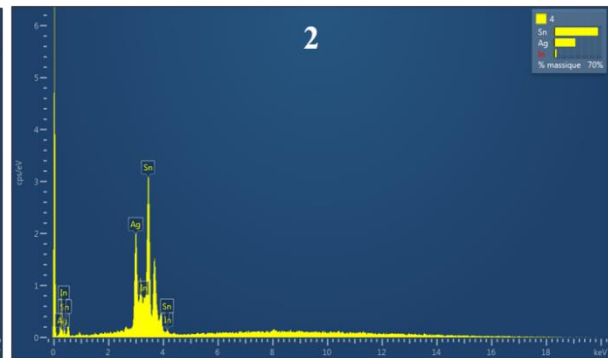
Figure 92 : Surface de contact d'AgSnO₂ dopé en In₂O₃ ayant subi des arcs de rebond à 50 Hz sous 115Vrms et 750 Arms, avec un grandissement X25

Dans le cas de dopage d'indium, nous observons une ségrégation du matériau. L'oxyde d'indium et l'oxyde d'étain se décomposent dans la matrice d'argent, et s'agglomèrent sous forme de billes.

L'analyse faite au niveau de la zone 1 représente 100% d'argent, tandis que la zone 2 représente un pourcentage de 64,41% m d'étain et 4,14% m d'indium. Nous pensons que l'addition de l'oxyde d'indium comme dopant n'a pas aidé à améliorer la mouillabilité de l'oxyde d'étain dans l'argent fondu.



Élément	Type de raie	% Masse	% atomique
Ag	Série L	100,00	100,00



Élément	Type de raie	% Masse	% atomique
Ag	Série L	31,45	33,50
In	Série L	4,14	4,14
Sn	Série L	64,41	62,36

Figure 93 : Analyse EDS de la surface de contact d'AgSnO₂ dopé en In₂O₃ ayant subi des arcs de rebond à 50 Hz sous 115Vrms et 750 Arms -phénomène de ségrégation d'oxyde métallique

2.3.2. À 400 Hz

Les contacts d'AgSnO₂ dopé en In₂O₃ n'ont subi que 340 cycles avant d'être définitivement soudés. La topographie de la fracture de cette soudure forte (> 100N) est présentée sur la figure 94. Sur cette surface, nous remarquons l'absence de cavités comme celles rencontrées sur les surfaces analysées précédemment (exemple : figure 89).

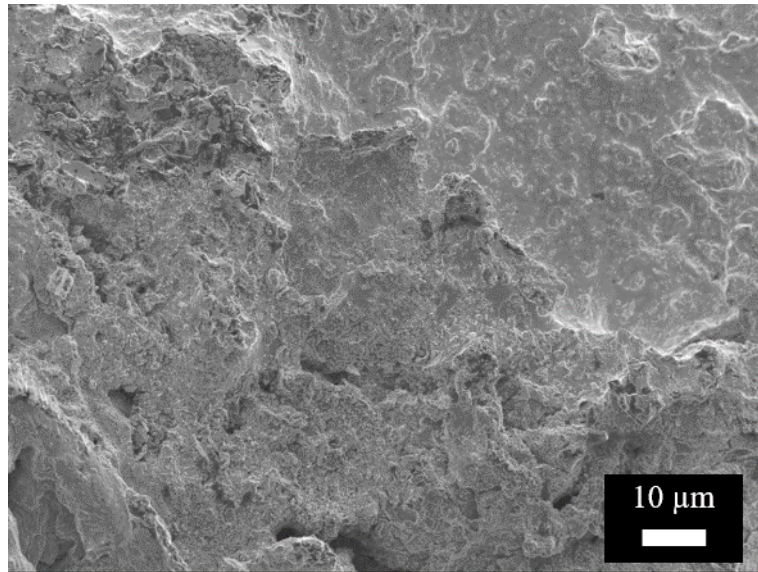
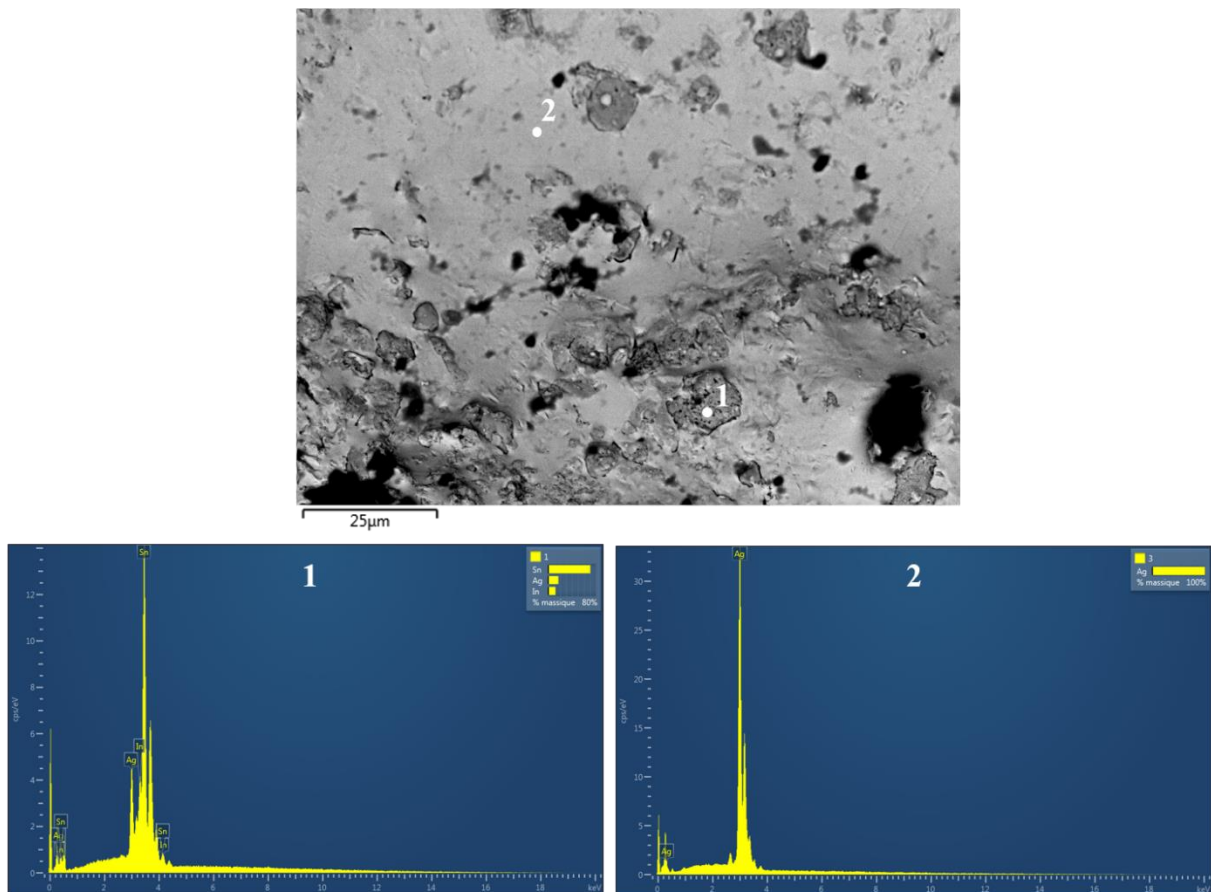


Figure 94 : Surface de contact d'AgSnO₂ dopé en In₂O₃ ayant subi des arcs de rebond à 400 Hz sous 115Vrms et 750 Arms, avec un grandissement X100

La décomposition du matériau d'AgSnO₂ dopé en In₂O₃ dans le cas de l'exposition de contact à des arcs de rebond avec une fréquence de circuit de 400 Hz, conduit à une distribution non uniforme de l'oxyde métallique dans une matrice d'argent pur, comme le montre l'analyse EDS sur la figure 94. Comme observé sur l'image MEB présentée dans figure 94, l'oxyde métallique s'agglomère dans des zones d'une taille d'environ dix micromètres. Ces zones sont plus petites par rapport à celles observées sur le contact de même nature testé à 50 Hz. Ces petites zones sont également enrichies en étain, environ 70% m, le pourcentage d'indium s'élève à 12,45% m, tandis que l'argent ne représente que 17% m.



Élément	Type de raie	% Masse	% atomique
Ag	Série L	17,16	18,48
In	Série L	12,45	12,60
Sn	Série L	70,39	68,92

Élément	Type de raie	% Masse	% atomique
Ag	Série L	100,00	100,00

Figure 95: Analyse EDS de la surface de contact d'AgSnO₂ dopé en In₂O₃ ayant subi des arcs de rebond à 50 Hz sous 115Vrms et 750 Arms -phénomène de ségrégation d'oxyde métallique

2.3.3. À 500 Hz

Le contact d'AgSnO₂ dopé en In₂O₃ a subi plus que 500 arcs de rebond avec une fréquence de 500 Hz. Comme présenté sur la figure 96, la surface de ce contact ne semble pas très endommagée par l'effet du test, elle contient également des cavités de différentes tailles variant entre quelques micromètres et 200 µm.

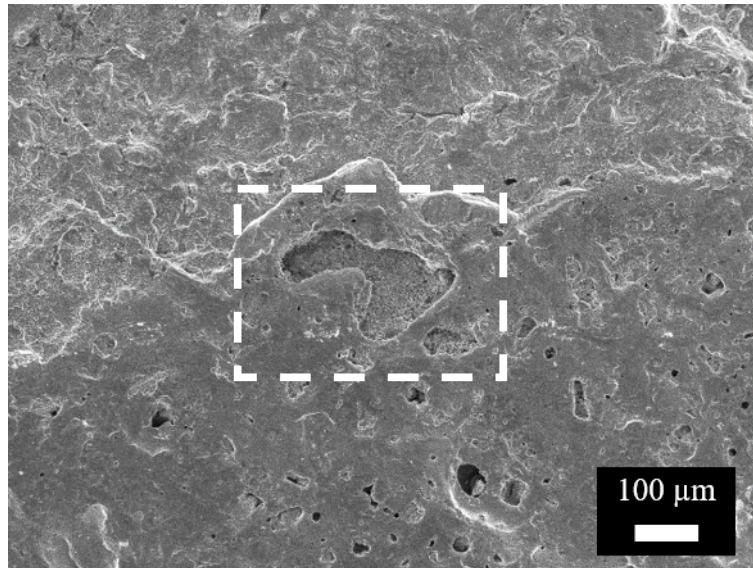


Figure 96 : Surface de contact d'AgSnO₂ dopé en In₂O₃ ayant subi des arcs de rebond à 500 Hz sous 115Vrms et 750 Arms, avec un grandissement X100

La zone entourée de hachures sur la figure 96 représente une grande cavité que nous avons choisie pour faire une analyse chimique par EDS. Au cœur de cette cavité, l'étain représente le pourcentage le plus élevé des éléments chimiques de cette zone (1), avec un pourcentage de 54,03% m, ainsi la teneur de l'indium s'est élevée jusqu'à 3,05% m, par contre, le pourcentage d'argent ne représente que 17,27% m. Tandis qu'en zone (2) sur le bord de la cavité, nous constatons une absence d'argent remplacé par un enrichissement d'oxyde d'étain et d'oxyde d'indium, respectivement 66,26% m et 3,03% m.

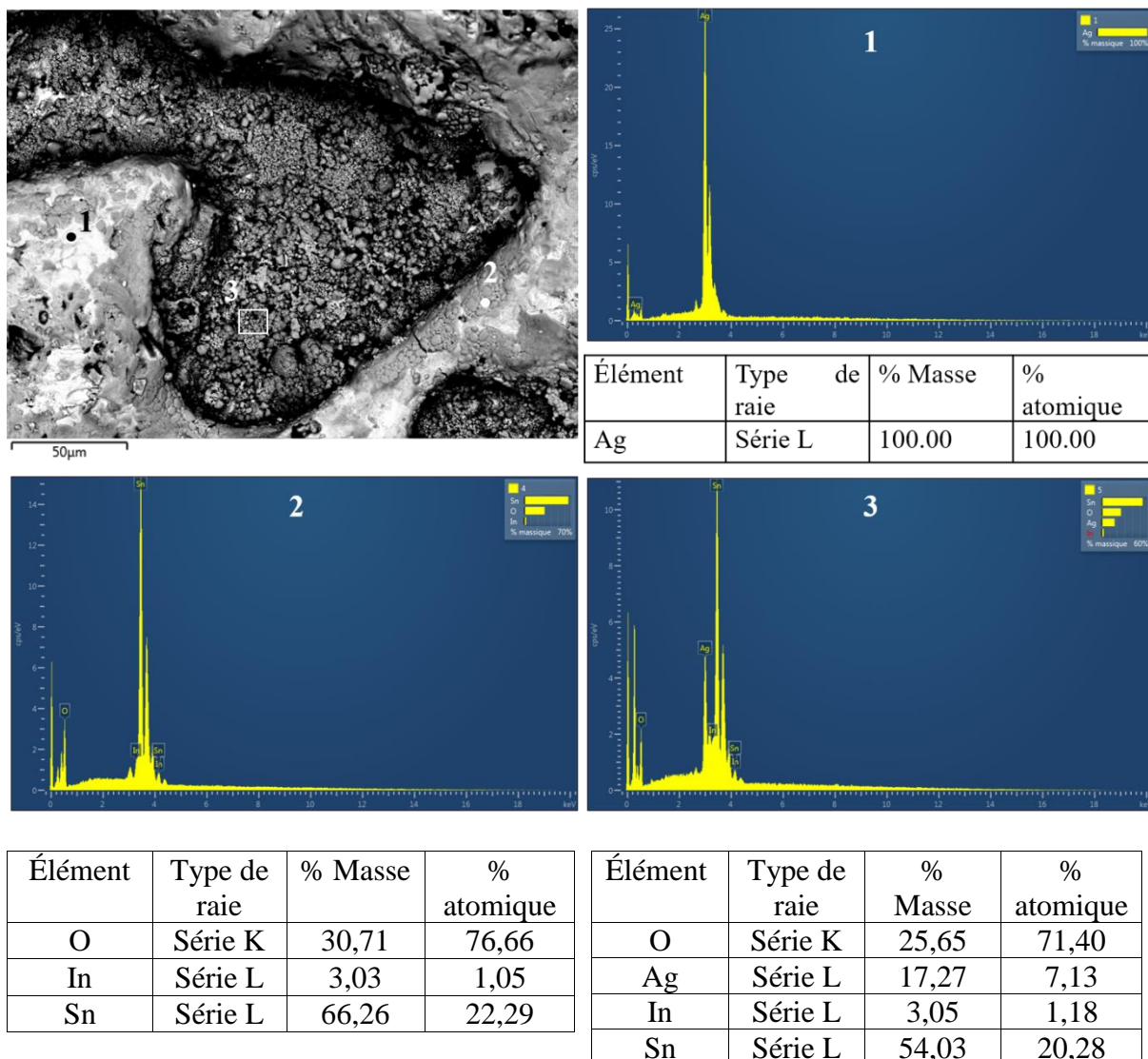


Figure 97 : Analyse EDS de la surface de contact d'AgSnO₂ dopé en In₂O₃ ayant subi des arcs de rebond à 500 Hz sous 115Vrms et 750 Arms - phénomène de ségrégation d'oxyde métallique

2.4. Contacts d'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃

2.4.1. À 50 Hz

Nous avons montré sur la partie III de ce chapitre, les contacts d'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃ présentent une bonne résistance à la soudure comparativement aux autres matériaux, ainsi ils ont subi plus de 500 cycles en subissant en présence des arcs de rebond aux fréquences de 50 Hz, 400 Hz et 500 Hz.

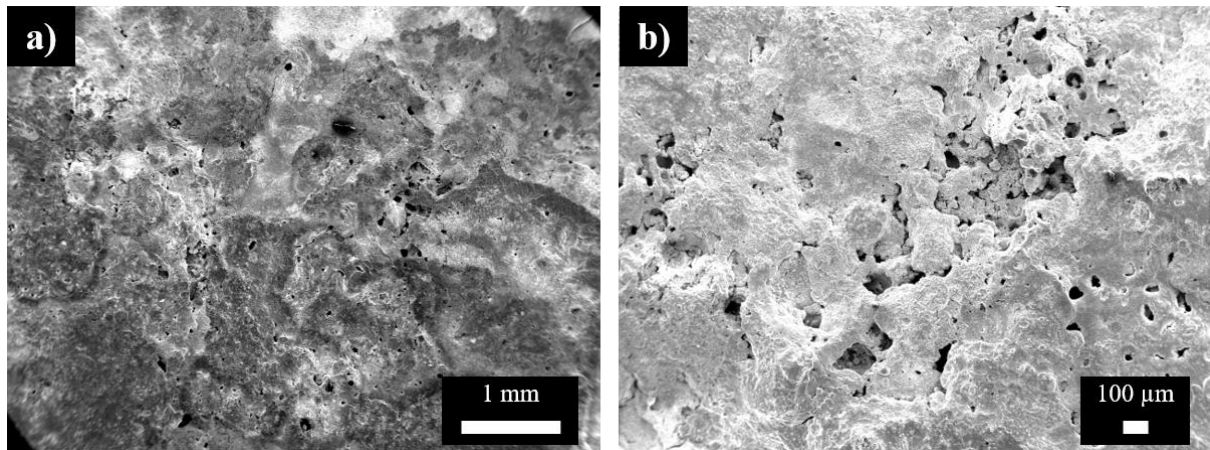
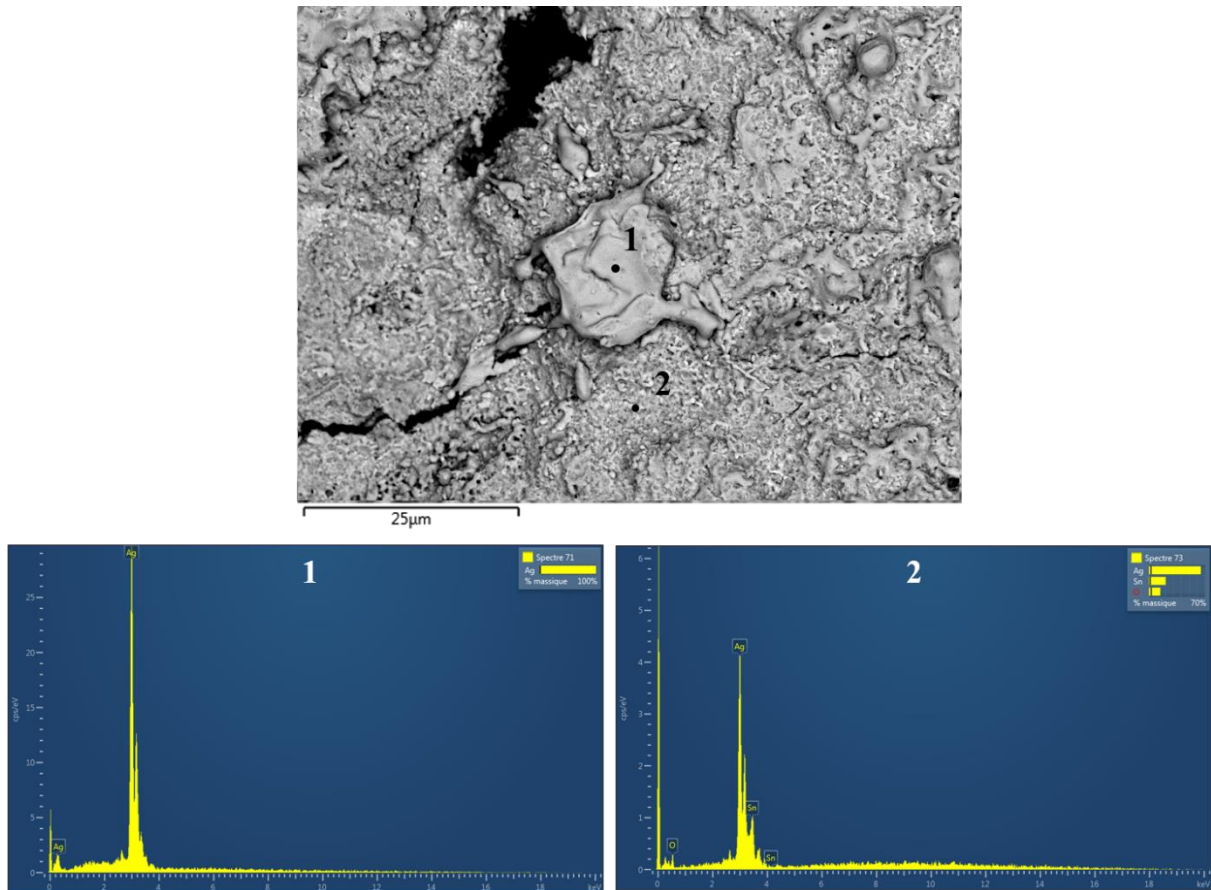


Figure 98 : Surface de contact d'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃ ayant subi des arcs de rebond à 50 Hz sous 115Vrms et 750 Arms – zone de fracture d'une soudure a) Grandissement X20 b) Grandissement X50

A 50 Hz, la figure 98 montre que la topographie du contact d'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃ semble modifiée après avoir subi les arcs de rebond, des bosses et des cratères sont présents sur sa surface, mais ils semblent moins marqués par rapport à ceux observés sur le contact d'AgSnO₂ non dopé (figure 85). D'autre part, la porosité est présente sur la surface de ce contact d'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃. La zone présentée sur la figure 98 montre la fracture d'une soudure, cette zone présente un ensemble de cavités. Ces cavités ont vraisemblablement été responsables de la fragilisation de la soudure.



Élément	Type de raie	% Masse	% atomique
Ag	Série L	100,00	100,00

Élément	Type de raie	% Masse	% atomique
O	Série K	14,14	53,17
Ag	Série L	64,97	36,24
Sn	Série L	20,89	10,59

Figure 99 : Analyse EDS de la surface de contact d'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃ ayant subi des arcs de rebond à 50 Hz sous 115Vrms et 750 Arms - phénomène de ségrégation d'oxyde métallique

La figure 99, montre l'analyse chimique d'une zone impactée par l'arc, et sur laquelle une gouttelette du métal fondu a été éjectée. Nous avons donc trouvé que cette gouttelette est composée de 100% d'argent qui est probablement éjecté lors de l'arc tandis que sur la surface du contact, nous constatons un enrichissement en étain, avec toujours une absence de bismuth.

2.4.2. À 400 Hz

À partir de la figure 100 la surface de contact d'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃ apparaît moins déformée par l'effet des tests de l'arc de rebond à 500 Hz. Cette surface contient de petites cavités.

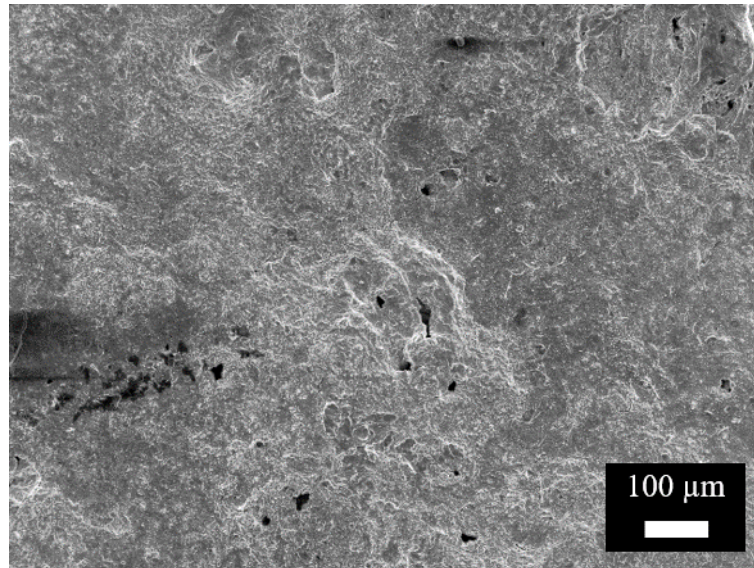
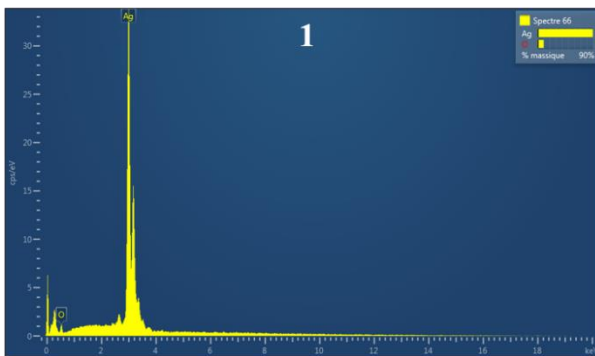
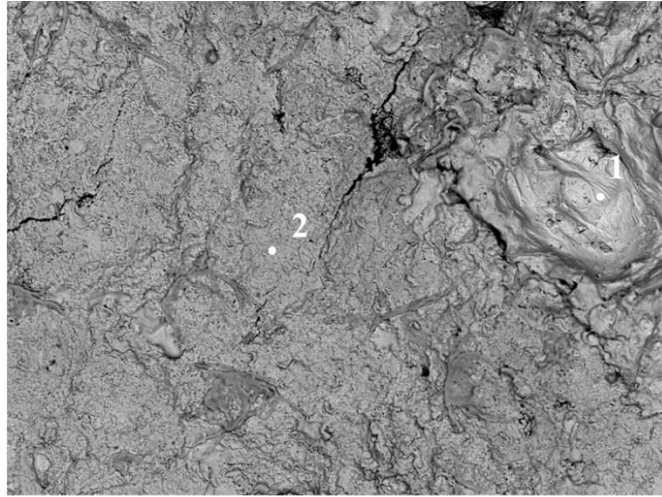
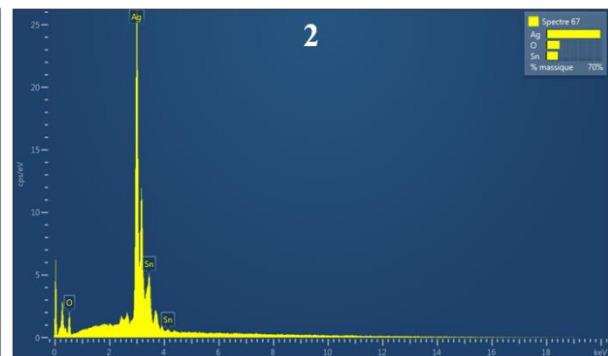


Figure 100 : Surface de contact d'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃ ayant subi des arcs de rebond à 400 Hz sous 115Vrms et 750 Arms, avec un grandissement X100

L'analyse chimique de ce contact montre que le bismuth est absent sur la surface de contact également. Cependant, la surface garde une certaine homogénéité quant à la répartition des autres éléments chimiques (figure 101). Nous n'avons pas détecté une décomposition du matériau similaire à celle observée dans les contacts d'AgSnO₂ non dopé et d'AgSnO₂ dopé en In₂O et en Bi₂O, l'argent pur provient probablement de l'éjection des gouttelettes au moment de l'arc. Pourtant, nous avons observé des fissurations à l'échelle micrométrique, comme c'est le cas aussi pour les contacts testés à 50 Hz et à 500 Hz à partir du même matériau. La figure montre une analyse d'une zone de la surface de ce contact.



Élément	Type de raie	% Masse	% atomique
O	Série K	10,35	43,78
Ag	Série L	89,65	56,22



Élément	Type de raie	% Masse	% atomique
O	Série K	17,10	58,57
Ag	Série L	68,09	34,59
Sn	Série L	14,82	6,84

Figure 101 : Analyse EDS de la surface de contact d'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃ ayant subi des arcs de rebond à 400 Hz sous 115Vrms et 750 Arms - phénomène de ségrégation d'oxyde métallique

2.4.3. À 500 Hz

La figure montre une partie de la surface ayant subi l'impact des tests de l'arc de rebond avec une fréquence de circuit de 500 Hz. Cette image MEB montre des traces de fracture d'une soudure dispersée, qui a eu lieu sur des zones différentes. Dans ces petites zones de fracture, nous observons des cavités qui sont dues à la libération d'oxygène par la chaleur de l'arc, contribuant à la fragilisation de la soudure.

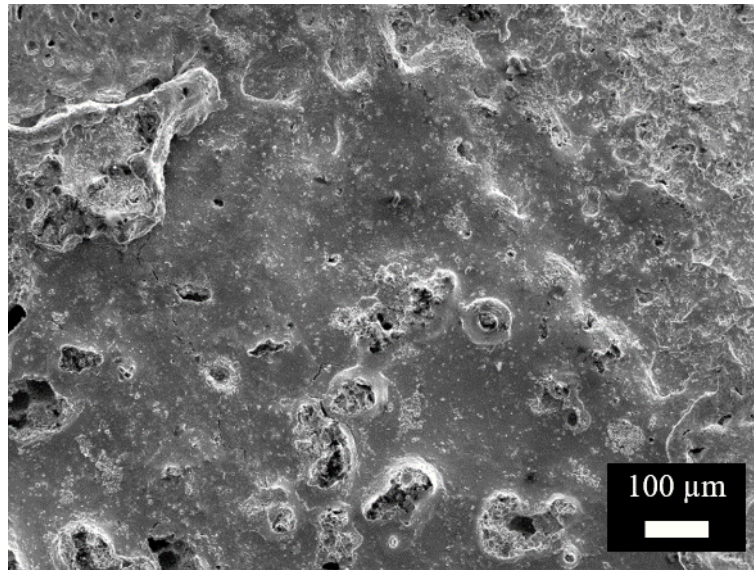


Figure 102 : Surface de contact d'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃ ayant subi des arcs de rebond à 500 Hz sous 115Vrms et 750 Arms, avec un grandissement X100

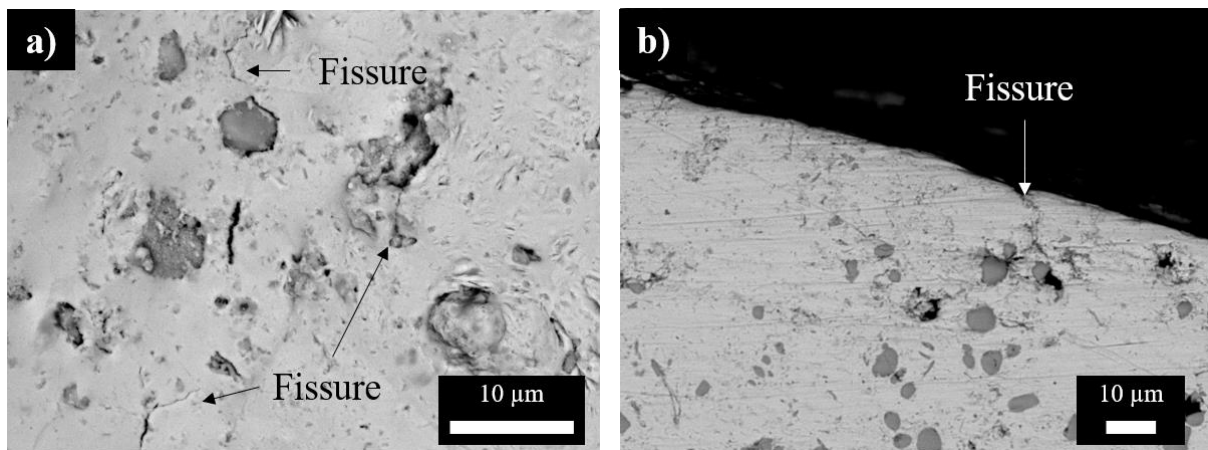


Figure 103 : Analyse de contact d'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃ ayant subi des arcs de rebond à 500 Hz sous 115Vrms et 750 Arms : a) surface, avec un grandissement X2500 b) coupe avec un grandissement X1000

Comme nous l'avons évoqué au paragraphe précédent (II-4-1 50 Hz : pour le contact d'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃), la surface de contact contient des fissures.

La figure 103-a) présente un exemple de fissures sur la surface de contact d'AgSnO₂ dopé Bi₂O₃, et la figure 103-b) montre la profondeur d'une fissure sur le même contact. Nous supposons que, la formation des microfissures contribue probablement à des forces de soudure plus faibles c'est-à-dire que pendant la séparation du contact, ces microfissures se propagent et finissent par fracturer facilement la soudure. Nous supposons également que ces fissures favorisent l'évacuation de l'oxygène pendant l'arc, ce qui permet de créer facilement des cavités qui contribuent à fragiliser la soudure.

En effet, le phénomène de ségrégation est moins observé dans ce cas. Comme le montre l'image MEB de la figure 104, la taille des grains d'oxyde métallique n'a quasiment pas changé, cependant, leur distribution dans la matrice d'argent, par rapport à la coupe du contact de référence (figure 82), est moins homogène. L'analyse chimique montre à nouveau dans ce cas, l'absence du dopant à la surface de contact.

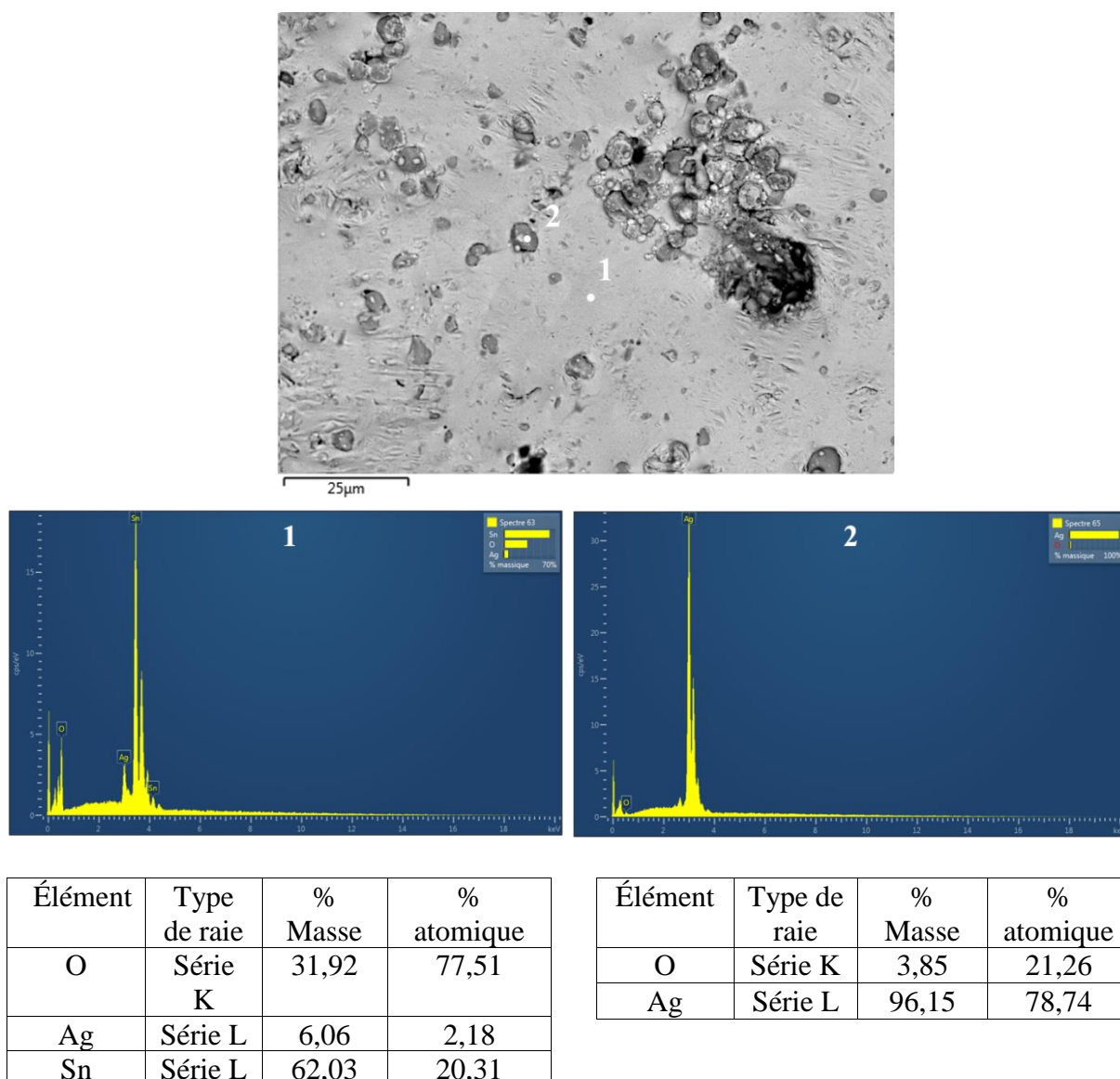


Figure 104 : Analyse EDS de la surface de contact d'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃ ayant subi des arcs de rebond à 500 Hz sous 115Vrms et 750 Arms

3. Étude d'une seule soudure

La soudure dynamique est un phénomène complexe, dans lequel interviennent de multiples facteurs, tels que l'énergie de l'arc, le ré-allumage de l'arc, la nature des matériaux de contact, etc. L'étude de la surface des contacts ayant subi un seul test de soudure permet de mieux comprendre les mécanismes de l'interaction arc-électrode. Nous présentons ici une analyse de deux exemples de soudures formées à partir d'un seul cycle, le premier exemple concerne des contacts d'argent pur et le deuxième concerne des contacts d'AgSnO₂. L'objectif étant de distinguer la surface de soudure et la surface totale perturbée par l'arc, nous avons donc effectué une analyse MEB de ces zones. L'approche suivie est expliquée sur ces deux exemples.

3.1. Cas de l'argent pur

La figure 105 montre une image MEB d'une tache produite par un seul arc de rebond présentant un diamètre d'environ 2 mm, sur une paire de contacts en argent pur. Ce test a été effectué avec une tension de 115 Vrms, un courant de 750 Arms et une fréquence de 500 Hz. L'arc ne s'est allumé qu'une seule fois, c'est pourquoi les gouttelettes n'ont été éjectées qu'au niveau du contact fixe car la polarité des contacts n'a pas changé pendant le rebond. La durée et l'énergie de cet arc ainsi que la force de soudure qu'il a provoquée sont regroupées sur le tableau 6.

Tableau 6 : Caractéristiques de l'arc et force de soudure pour les contacts d'argent pur

Matériau	Durée totale d'arc (ms)	Energie d'arc (J)	Nombre d'arcs	Force de soudure (N)
Argent pur	0,88	7,2	1	73

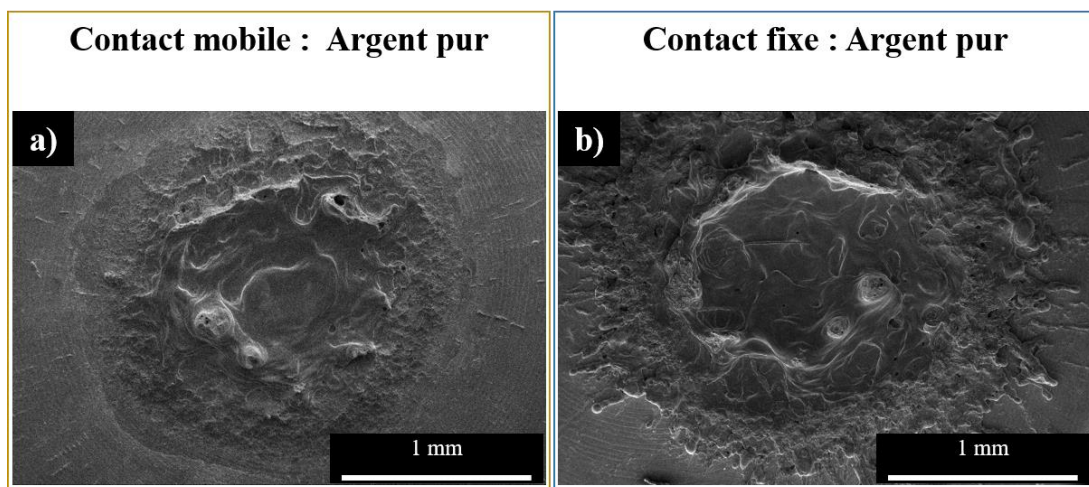


Figure 105 : Surface des contacts d'argent pur après avoir subi un seul arc, avec un grandissement X60 : a) mobile b) fixe

Rieder *et al.* [81] donnent un modèle de chevauchement des zones fondues, présenté sur la figure 109, ils expliquent que plus les zones fondues de chaque électrode chevauchent, plus la force de soudure devient élevée.

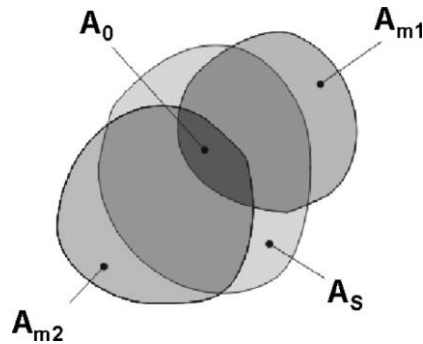


Figure 106 : Modèle de chevauchement ; A_s = surface de la zone de contact, A_{m1} , A_{m2} = zones fondues de contacts, A_0 = zone de chevauchement des zones fondues [81]

Nous constatons sur de notre exemple que la zone de chevauchement des contacts est équivalente à la zone fondue de chaque contact, mais bien que ces zones fondues se chevauchent parfaitement, la soudure n'est faite que sur des parties de la surface perturbée par l'arc, la figure 107 montre une des zones d'arrachement de soudure de (100x100 μ m). Donc à partir de ce modèle, il reste difficile d'estimer la surface de soudure.

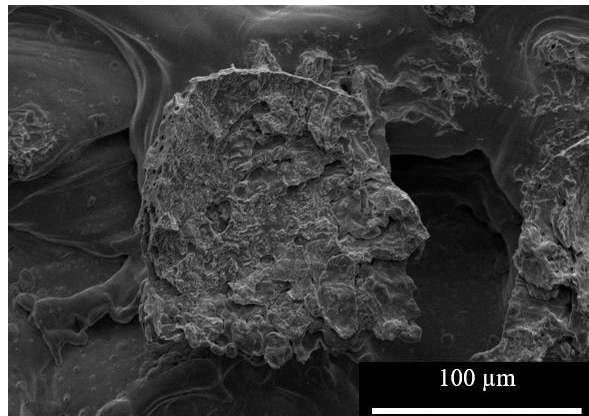


Figure 107 : Zoom sur une des zones d'arrachement de soudure sur le contact fixe avec un grossissement X600

Par imagerie, la distinction de ces zones est également difficile. Or, il est possible de déduire leur surface totale pour une force de soudure donnée, en utilisant la formule suivante [6] :

$$S_s = \frac{F_s}{\Gamma} \quad (21)$$

Où S_s est la surface d'arrachement de soudure (mm), F_s est force de soudure et Γ est la résistance à la rupture en traction (N/mm²). Pour l'argent $\Gamma = 230 - 350$ N/mm².

Avec la force de soudure mesurée dans ce cas, équivalente à 73 N, la zone de soudure est estimée entre 0,317 et 0,208 mm².

3.2. Cas d'AgSnO₂ non dopé

Cette fois-ci, le test a été effectué avec un contact d'AgSnO₂. L'arc a été ré-allumé durant le rebond. Ce qui pourrait être l'origine de l'éjection des gouttelettes observée au niveau des deux contacts. Le diamètre de cette tâche est également d'environ 2 mm, comme le montre la figure 108. La durée, l'énergie de l'arc de rebond et la force de soudure résultante sont indiquées dans le tableau 7.

Tableau 7 : Caractéristiques de l'arc et la force de soudure pour les contacts d'AgSnO₂

Matériaux	Durée totale d'arc (ms)	Energie d'arc (J)	Nombre d'arc	Force de soudure (N)
AgSnO ₂	1,54	13,14	2	40,8

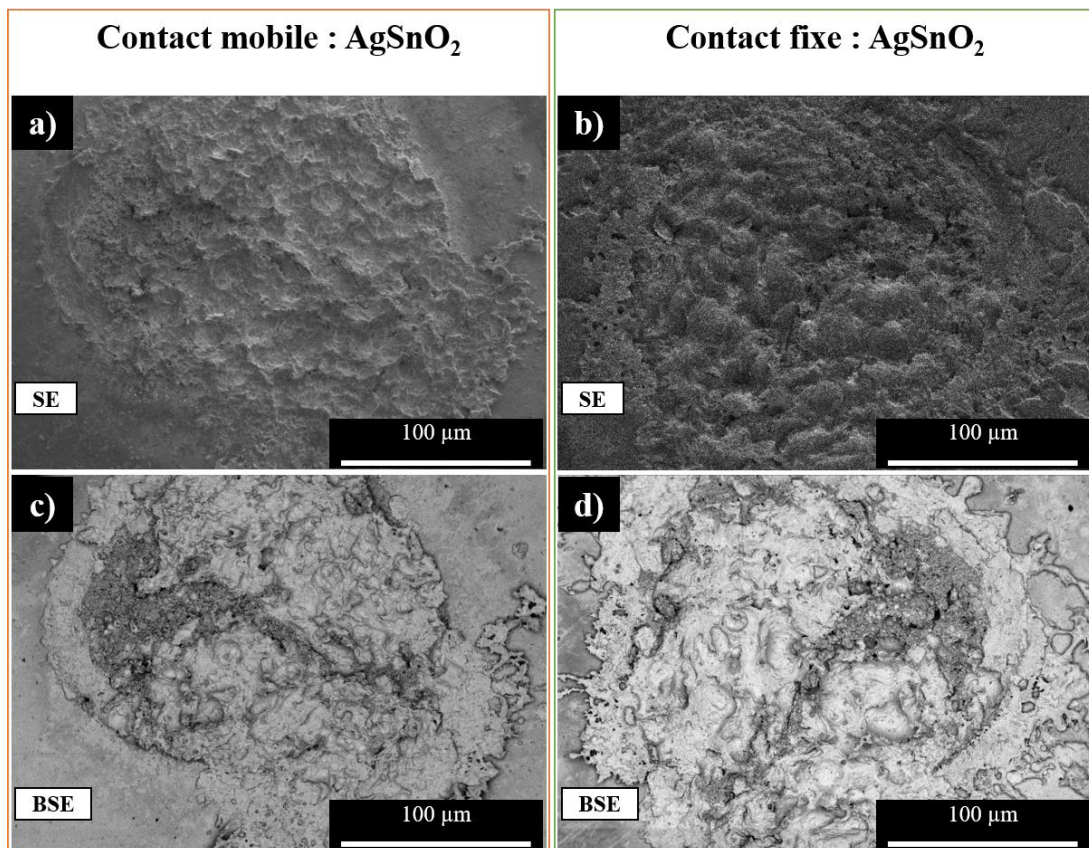


Figure 108 : Surface des contacts mobile et fixe d'AgSnO₂ non dopé après avoir subi un seul arc a) contact mobile en SE, b) contact fixe en SE, c) contact mobile en BSE, b) contact fixe en BSE

Dans cet exemple, la distinction des zones de rupture de la soudure est plus compliquée, à cause des cavités s'étant formées à partir du dégagement d'oxygène de l'oxyde métallique.

La résistance à la traction de ce matériau (AgSnO_2 10% m de SnO_2) est de 220 - 330 N/mm². Par conséquent, en appliquant la même formule (21), pour la force de soudure mesurée de 40,8 N, nous obtenons que la zone effective de soudure se situe entre 0,177 mm² et 0,185 mm².

En suivant la même méthode de calcul sur plusieurs échantillons de même nature, nous pourrions obtenir un résultat statistique décernant une explication du phénomène de soudure en fonction des caractéristiques de l'arc de rebond.

VI. Discussion

Nous rappelons que les tests d'arc de rebond ont été réalisés avec une tension de 115 Vrms et un courant de 750 Arms, et que nous avons testé quatre matériaux de contact : l'argent pur, le AgSnO_2 non dopé, AgSnO_2 dopé en In_2O_3 et AgSnO_2 dopé en Bi_2O_3 , avec trois fréquences de courant : 50 Hz, 400 Hz et 500 Hz. Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté les résultats sur les caractéristiques de la soudure des contacts électriques. Nous avons constaté que chaque matériau réagit différemment à ce phénomène, ces résultats étant récapitulés dans le tableau 8. Par la suite, dans la deuxième partie, nous avons présenté les caractéristiques de l'arc de rebond, qui montrent que la durée totale des arcs est équivalente à la durée de rebond mécanique, sauf dans le cas des contacts d' AgSnO_2 dopé en Bi_2O_3 testé avec une fréquence de 500 Hz. Pour mieux comprendre ces interactions « arc-soudure », nous avons réalisé une étude métallographique sur les surfaces des contacts impactés par les tests des arcs de rebond, cette étude est présentée dans la troisième partie de ce chapitre. Nous allons donc discuter de ces résultats afin d'aboutir à des explications sur le comportement de ces matériaux en termes de soudure.

Les contacts en argent ont été collés dès leur première exposition à l'arc de rebond, créé à une fréquence de 50 Hz. Tandis que les contacts en Ag testés avec des arcs de rebond créés à 400 Hz et 500 Hz n'ont été collés qu'après 450 et 240 cycles respectivement. Dans ce cas, nous supposons que l'arc à 50 Hz peut souvent conduire à une déformation de surface plus importante que dans le cas d'un arc à 400 Hz et 500 Hz. C'est-à-dire que plus la fréquence de la tension est faible (chaque arc présente une durée plus longue) et plus la surface fondue résultant de l'apparition de l'arc est importante. En outre, comme on l'a observé pour le contact en argent testé à 50 Hz, la zone perturbée par l'arc a un diamètre d'environ 4,5 mm (figure 84), tandis que

pour les contacts en argent testés à 500 Hz, la zone impactée par l'arc est d'environ 2 mm (figure 105). Nous supposons que l'élargissement de la zone fondue augmente la probabilité que la fermeture après rebond se fasse sur les zones fondues des contacts et par conséquent augmente la zone de soudure ce qui conduit à des soudures fortes.

Pour les contacts AgSnO_2 non dopés, testés sous des arcs de rebond à 50 Hz, la surface de ces contacts s'est complètement déformée, contenant des bosses et des cratères ayant un diamètre d'environ un millimètre. Cette déformation sévère a rendu le contact inutilisable après 400 cycles. A 400 Hz, les contacts ont effectué les 500 cycles requis, leur force de soudure moyenne est proche de celle mesurée pour le cas de 50 Hz, 13,5N (à 50 Hz) contre 13,7 N (à 400 Hz), mais le taux de soudure dans ces deux cas est différent, 76% (à 50 Hz) contre 68% (à 400 Hz). De plus, la surface semble moins dégradée et n'a pas été complètement atteinte par l'ensemble des arcs. Cependant, pour la troisième paire de contacts, un collage s'est produit après seulement 100 cycles. La force de soudure moyenne est équivalente à 15,39 N. Elle s'avère être plus élevée par rapport aux cas de 50 Hz et de 400 Hz, ce à quoi nous ne nous attendions pas. En fait, au début, nous avons supposé que dans le cas de la même durée totale de l'arc, le phénomène de ré-allumage, peut aider à avoir des zones fondues plus petites que dans le cas d'un arc continu. C'est-à-dire que la surface aurait des cycles de montée et de descente de la température de l'arc en fonction du temps et donc, la surface serait moins sujette à fusion. Dans le cas d'un arc continu, la chaleur de l'arc se propage continuellement à travers le matériau jusqu'à ce que les contacts soient refermés, ce qui peut conduire à des zones fondues plus grandes.

Cependant, notre hypothèse pourrait être vraie, mais pas suffisante, car l'analyse d'une section transversale de ce contact a montré l'existence de fissures au niveau de la zone d'arrachement de la soudure, où les grains d'oxyde d'étain ont migré vers ces fissures et par conséquent, la surface a été purifiée. Par ailleurs, nous n'avons observé aucune fissure ou ségrégation de l'oxyde métallique sur le reste du contact.

Dans le cas des contacts AgSnO_2 dopés en In_2O_3 , la dégradation de la surface était moins prononcée par rapport aux contacts AgSnO_2 non dopés. Cependant, ce matériau a montré des forces de soudure moyennes plus élevées par rapport aux autres matériaux pour toutes les fréquences : 20,34 N à 50 Hz, 23,7 N à 400 Hz et 16,91 N à 500 Hz. Nous supposons que cette augmentation de la force de soudure est due à la ségrégation de l'oxyde métallique observée par SEM/EDS, cette ségrégation est à l'origine de la non-homogénéité du matériau, avec des

zones qui ne contiennent que de l'argent pur et des zone concentrées en oxyde d'étain. Néanmoins, le contact a effectué plus de 500 cycles dans le cas de 50 Hz et 500 Hz et seulement 340 cycles à 400 Hz en raison du collage définitif.

Les contacts d'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃ semblent avoir la meilleure résistance à la soudure, la force moyenne obtenue est de 15,07 N à 50 Hz avec un taux de 61% et 10,7 N à 400 Hz 62% et à 500 Hz 47%. Les surfaces de ces contacts après test semblent moins dégradées avec la présence de porosités et de microfissures. De plus, les arcs n'ont pas atteint la totalité de la surface. Ces contacts ont effectué plus de 500 cycles à toutes les fréquences testées.

En plus de ce que nous venons de supposer sur l'effet du ré-allumage sur la taille de la zone de fusion, la nature du matériau semble jouer également un rôle important dans la taille de la zone de fusion. En effet, celle-ci peut dépendre de la diffusivité thermique du matériau. Cette diffusivité à 25 °C est de l'ordre de 10^4 m²/s pour AgSnO₂ et de $1,72 \cdot 10^4$ m²/s pour l'argent pur. La diminution de la diffusivité dans ce cas s'explique par la présence de l'oxyde métallique à plus faible diffusivité thermique dans la matrice d'argent ainsi que par la présence de porosités [82].

Tableau 8 : Tableau : récapitulatif des résultats sur l'étude de la soudure

Fréquence [Hz]	Matériaux de contact	Force maximale [N]	Force moyenne [N]	Taux de soudure [%]	N° de cycles	Commentaire
50	Argent pur	>100	>100	100	1	Collage des contacts Forte éjection de gouttelette du métal
	AgSnO ₂	76.8	13.5	91.7	400	Forte rugosité Contact non fonctionnel
	AgSnO ₂ In ₂ O ₃	67.2	20.34	61	>500 548	Rugosité moins marquée Ségrégations du matériau
	AgSnO ₂ Bi ₂ O ₃	62.4	15.0751	61	>500 563	Surface moins dégradée avec présence de porosité et fissures
400	Argent pur	80	12.2	81.5	450 Collage	Forte éjection de gouttelettes du métal
	AgSnO ₂	68	13.7	90	500	Surface moins dégradée, pas de ségrégation du matériau
	AgSnO ₂ In ₂ O ₃	58.4	23.7	75	340 Collage	Porosité + ségrégation du matériau
	AgSnO ₂ Bi ₂ O ₃	24	10.7158	62	>500 582	Surface moins dégradée avec présence de porosité et fissures
500	Argent pur	83	17	90.5	240 Collage	Forte éjection de gouttelettes du métal
	AgSnO ₂	78	15.39	92	100 Collage	Présence de fissures au niveau de la forte soudure + migration de SnO ₂ vers les fissures
	AgSnO ₂ In ₂ O ₃	49.6	16.9108	61	>500 538	Porosités + ségrégation du matériau
	AgSnO ₂ Bi ₂ O ₃	36.8	10.2826	47	>500 556	Surface moins dégradée, présence de porosités et fissures

VII. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude de la soudure des contacts sous arcs de rebond, réalisée avec une tension de 115 Vrms et un courant 750 Arms pour trois fréquences 50 Hz, 400 Hz, et 500 Hz. Nous avons testé quatre matériaux de contact : l'argent pur, l'AgSnO₂ non dopé, l'AgSnO₂ dopé en In₂O₃ et l'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃.

Dans un premier temps nous avons montré que les caractéristiques de la soudure (force et taux de soudure, durée de vie) peuvent être influencées par la fréquence de la tension. En revanche, la nature du matériau reste le facteur ayant l'effet le plus important pour la soudure dans nos conditions de test. Les contacts d'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃ ont montré la force et le taux de soudure les plus faibles par rapport aux autres matériaux testés.

Ainsi, la durée totale de l'arc de rebond, ne dépend pas de la fréquence de tension, les résultats montrent qu'elle est équivalente à la durée de rebond (2 ms), car l'arc se réallume après le passage par le zéro de courant. De plus nous avons observé que le délai entre l'extinction et le réamorçage de l'arc est souvent immédiat sauf dans le cas de contacts d'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃, où l'arc prend un certain temps qui va jusqu'à ~1 ms avant de se réamorcer, ce qui induit des durées d'arc plus courtes par rapport aux autres matériaux. Les phénomènes physiques derrière ce réamorçage de l'arc ne sont pas encore complètement maîtrisés, une étude plus approfondie sur ce sujet est à envisager.

Chapitre 4. Simulation des Caractéristiques de l'Arc de Rebond

I. Introduction

Nous avons vu que dans les contacteurs, les arcs de rebond se produisent pendant la fermeture des contacts et sont responsables de plusieurs problèmes conduisant à l'endommagement ou même au dysfonctionnement de ces commutateurs. Comme évoqué auparavant, ces arcs de rebond sont un cas particulier d'arcs d'ouverture. En effet, dans le cas d'une coupure de courant, l'écartement des contacts augmente en fonction du temps, alors que dans le cas d'un rebond mécanique lors de la fermeture, le contact suit une trajectoire dont la forme peut être approximée par une demi-sinusoïde, c'est-à-dire que souvent l'arc de rebond s'éteint avec la re-fermeture des contacts. Les caractéristiques de l'arc dépendent du mouvement du contact mobile par rapport au contact fixe, de la tension, du courant, du type de circuit ainsi que de la nature des matériaux et de la forme des contacts.

Plusieurs modèles ont été établis pour simuler la tension et le courant des arcs [83]–[91]. Pour notre étude, nous avons choisi un modèle qui prend en compte l'allumage et l'extinction de l'arc.

Afin de simuler la tension et le courant de l'arc de rebond, une identification des paramètres du modèle a été réalisée à partir des caractéristiques statiques des arcs (tension-courant). Ces paramètres sont fonction du déplacement relatif du contact mobile par rapport au contact fixe. Les mesures des arcs statiques ont été réalisées à l'aide d'un banc d'ouverture disponible dans notre laboratoire en utilisant des contacts d'AgSnO₂.

II. Choix du modèle d'arc

Pour simuler la tension et le courant de l'arc de rebond, nous avons choisi un modèle d'arc (équation 22) proposé par Andrea *et al.* [92]. Le travail d'Andrea *et al.* sur la modélisation de l'arc offre une approximation analytique valide pour différents circuits, qui simule le comportement de l'arc, et prend en compte l'allumage et l'extinction de l'arc. Ce modèle définit les caractéristiques de l'arc statique en considérant la décharge globale, où le paramètre du phénomène qui apparaît au début de l'arc (Corona, pont fondu...) est pris en compte. Il est considéré comme décharge purement résistive et modélisée par une impédance [93]. Cependant, le modèle néglige certaines décharges, telle que la décharge de Townsend, qui apparaissent avant l'arc à cause de leur très faible courant (près de 10⁻⁶ A). Seule la décharge Corona ayant un courant de près de 10⁻¹ A est pris en compte.

La caractéristique $V(I)$ s'écrit comme suit :

$$V_T = \frac{\alpha R_c I_T}{\arctan(\beta I_T) I_T R_c + \alpha} \quad (22)$$

où V_T et I_T sont successivement la tension et le courant de la décharge, R_c est la résistance du phénomène ayant lieu avant l'arc (la décharge corona et le pont fondu), α et β sont les paramètres spécifiques de l'arc. Ils dépendent du type de matériau et de la distance entre les électrodes.

Dans la littérature, il existe plusieurs modèles pour la caractéristique statique de l'arc [83]–[91]. Des études présentées sur les références suivantes [94], [95] présentent une comparaison entre ces modèles d'arc et le modèle que nous avons choisi (figure 109). Cette comparaison a démontré que le modèle d'Andrea *et al.* correspond le plus aux mesures expérimentales des caractéristiques $V(I)$ de plusieurs cas d'arc, pour plusieurs types de matériaux et pour plusieurs longueurs d'arc.

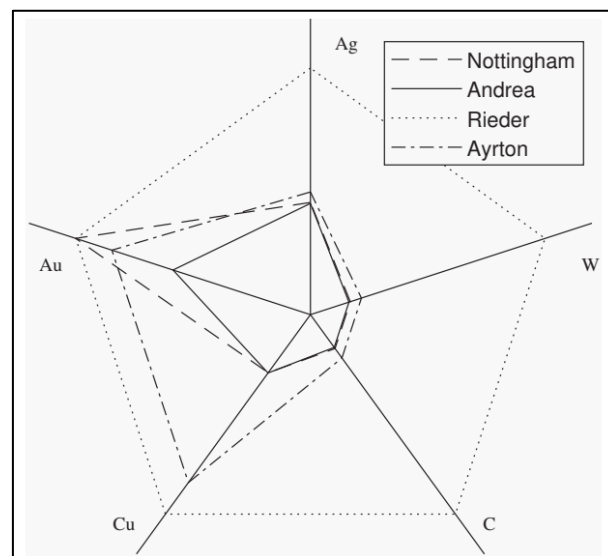


Figure 109 : Tracé radar de l'erreur en Volt entre les mesures de tension et la tension calculée avec les équations d'ajustement pour les matériaux Ag, Au, Cu, C, W [94]

III. Méthodologie

1. Mode expérimental

Afin de déterminer les caractéristiques statiques de l'arc en fonction de la distance inter-électrodes, nous avons utilisé un banc de test d'ouverture disponible dans notre laboratoire [14], ce dispositif est présenté sur la figure 110. Ces caractéristiques statiques peuvent être mesurées lorsque l'arc est stable.

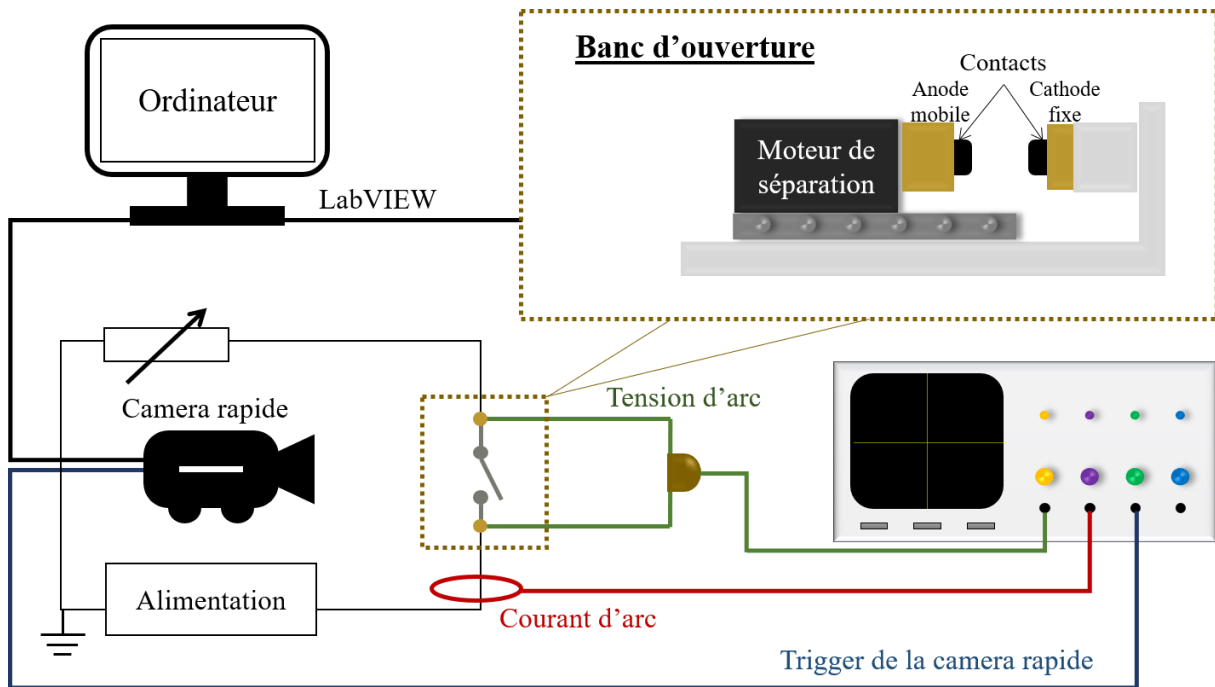


Figure 110 : Banc de test des arcs d'ouverture

Ce banc de test est composé de trois parties principales : une partie mécanique, une partie électrique et une partie d'acquisition des données expérimentales. Tout d'abord, le moteur de séparation ajuste la position du contact mobile (cathode), puis il maintient les contacts fermés, à ce moment, le circuit se met sous tension et par la suite, les contacts se séparent jusqu'à ce que le contact mobile atteigne la position requise. Lorsque le moteur s'arrête de bouger, l'arc se maintient et devient stable. Enfin, après une durée de 5 secondes, l'arc s'éteint par coupure du courant de l'alimentation. Le courant et la tension de l'arc sont mesurés par des sondes et visualisés sur un oscilloscope. Pour caractériser la longueur de l'arc stable dans différents écartements de contacts et en fonction du courant, une caméra rapide à 30000 fps est située devant les électrodes, son déclenchement est synchronisé avec la séparation des contacts à l'aide de l'oscilloscope. L'ensemble de ces appareils (oscilloscope, moteur et alimentation) sont connectés à un PC par GPIB (General Purpose Interface Bus) ou par USB (Universal Serial

Bus). Le pilotage des appareils et le traitement des données se font à l'aide d'un programme réalisé avec LabVIEW®.

Le tableau 9 ci-dessous présente les conditions expérimentales des tests des arcs statiques.

Tableau 9 : Paramètres de test -Arc Statique

Matériau de contacts	AgSnO ₂ (10% . Wt)
Tension	220V DC
Courant	2, 4, 6, 8, 10A
Charge	Résistive
Longueur d'écartement des contacts	0,1mm à 10 mm
Durée de l'arc statique	5 s
Atmosphère	Air ambiant

La figure 111 montre un exemple de mesure du courant et de la tension d'un arc statique, obtenu avec une distance inter-électrodes de 1 mm pour une tension de 220 V_{DC} et un courant de 6 A.

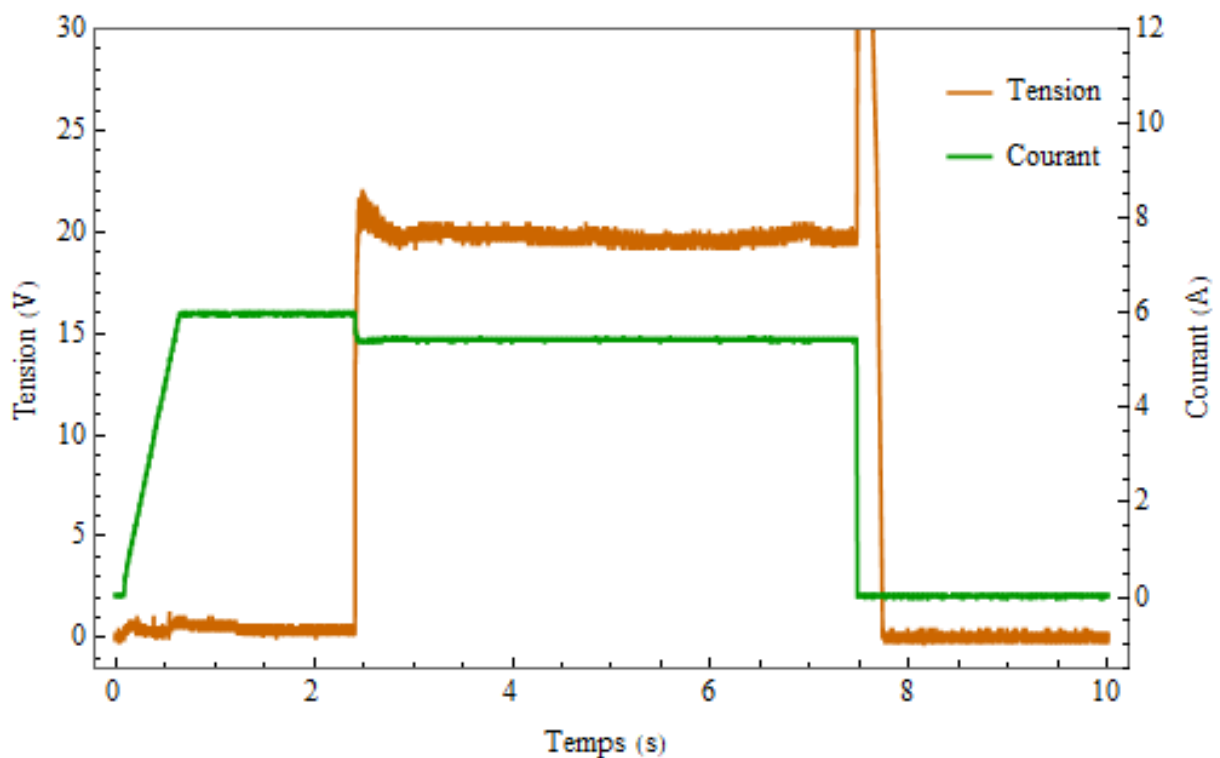


Figure 111 : Exemple d'arc statique pour : $d=1\text{ mm}$; $UDC=220V$; $I=6A$

2. Caractéristiques statiques V(I) de l'arc

Les caractéristiques statiques de l'arc en fonction de la distance inter-électrodes sont données sur la figure 112. Les points représentent les mesures du courant de l'arc en fonction de la tension de l'arc. Les courbes continues représentent l'ajustement des mesures avec le modèle d'Andrea (équation 22) pour chaque distance inter-électrodes. Les courbes en pointillés représentent les droites de charge (équation 23) pour les différents courants testés. En effet, la tension d'arc évolue en fonction de la droite de charge du circuit du test. L'équation de cette droite de charge est donnée comme suit :

$$V_{arc} = -RI_{arc} + V_{DC} \quad (23)$$

V_{arc} : Tension de l'arc

I_{arc} : Courant de l'arc

V_{DC} : Tension de circuit

R : Résistance du circuit

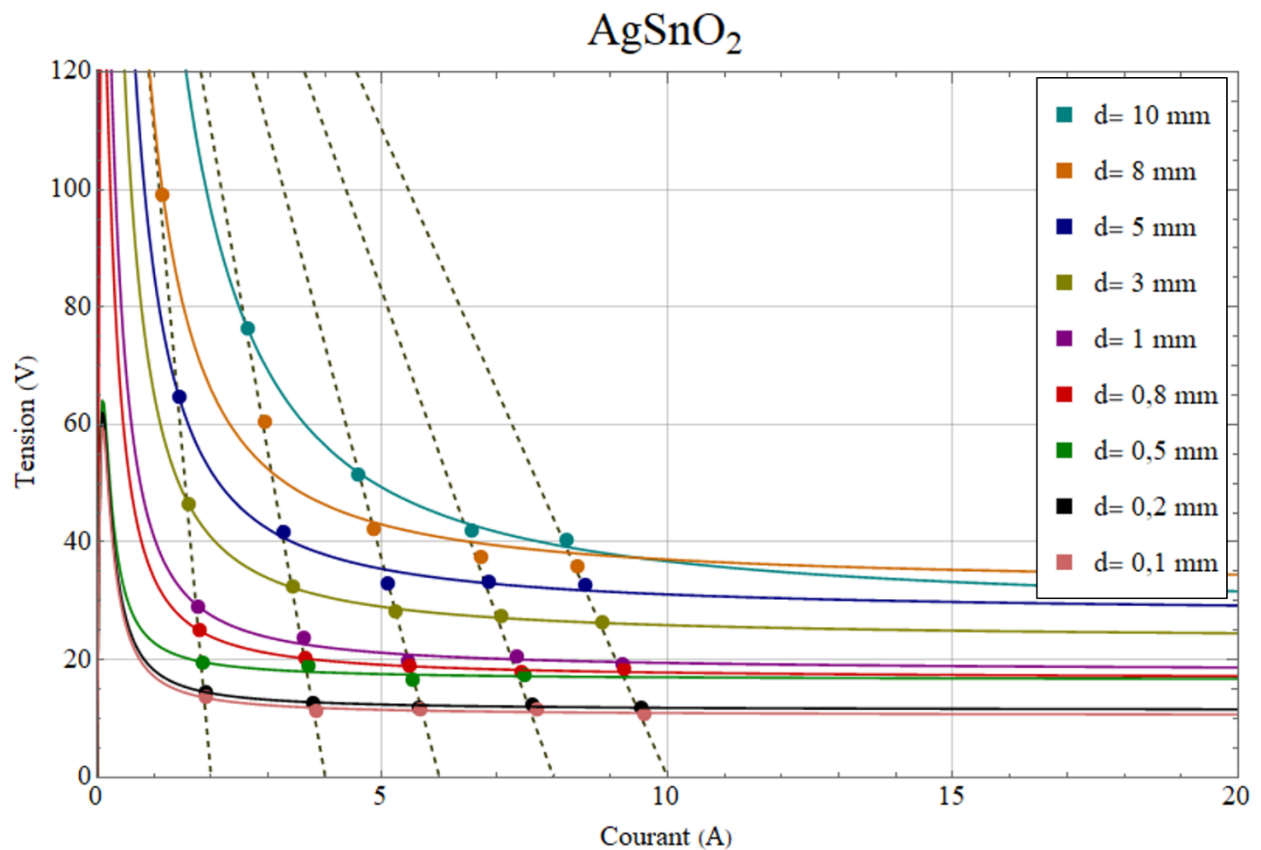


Figure 112 : Caractéristiques statiques de l'arc à différentes distances et lignes de charge pour 220V_{DC} pour différents courants

Le modèle d'Andrea montre un bon ajustement aux mesures. De plus nous constatons bien que pour chaque courant, l'évolution de la mesure de tension d'arc en fonction de la distance inter-électrodes suit parfaitement les droites de charges, plus la distance inter-électrodes augmente plus la tension d'arc augmente.

3. Paramètres de modèle en fonction de la distance

Les paramètres du modèle α et β utilisés pour ajuster des caractéristiques statiques de l'arc en fonction de l'écart inter-électrodes d sont présentés sur la figure 113. Pour α la courbe rouge représente son ajustement à partir de l'équation suivante :

$$\alpha(d) = a \times d^n + b \quad (24)$$

où

$a= 13,5, n=0.5$ & $b=13$;

et pour β la courbe verte représente son ajustement à partir de l'équation suivante :

$$\beta(d) = c \times \log(d) + e \quad (25)$$

où $c= -0.23$ & $e= 0.91$;

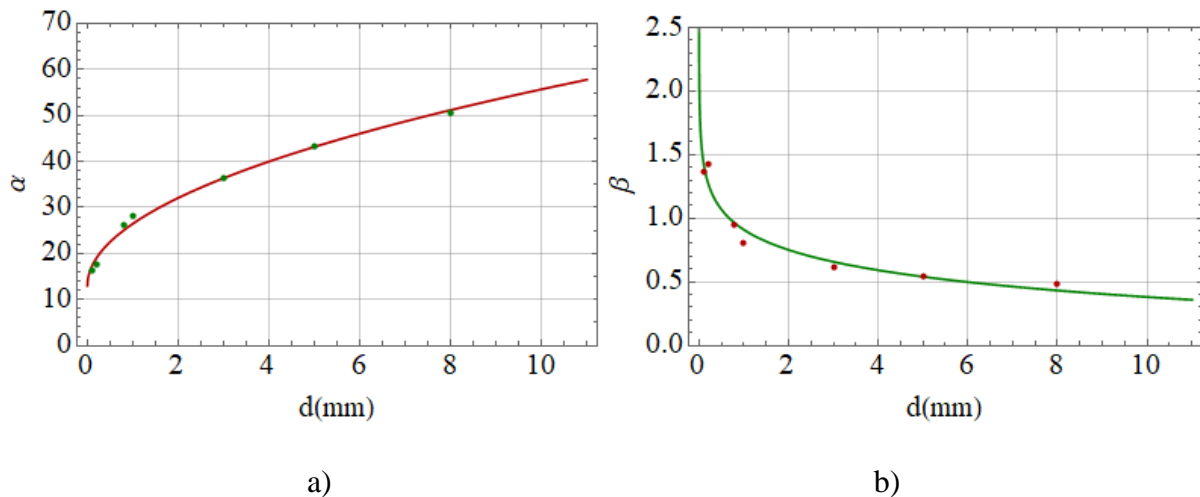


Figure 113 : Paramètres α et β du modèle en fonction de la distance inter-électrodes

4. Simulation de l'arc de rebond

4.1. Paramètres de test

Les essais des arcs de rebonds sont ceux présentés dans le chapitre 2, ils sont réalisés avec le dispositif que nous avons développé dans le cadre de cette thèse. Nous rappelons dans ce paragraphe les paramètres de circuit. La tension et le courant de test sont de 115 Vrms et 750 Arms, respectivement. Nous avons travaillé avec une charge résistive, la constante de

temps de l'alimentation utilisé est nulle. Les contacts électriques sont en AgSnO₂, ils sont sous forme de pastille avec un diamètre de 16 mm, leur surface est bombée avec un rayon de 300 mm. Le profil de rebond est une partie d'une solution d'un modèle mécanique, il est donné par :

$$d(t) = A \sin(2\pi f t) \quad (26)$$

avec A : la hauteur du rebond (mm), f : la fréquence de déplacement.

4.2. Comparaison entre la simulation et les mesures de courant et de tension de l'arc

À partir des caractéristiques statiques V(I), nous avons réalisé une simulation des caractéristiques dynamiques de l'arc pour le cas d'un rebond mécanique. Un code Matlab a été utilisé pour effectuer cette simulation des arcs de rebond pour un circuit AC. Les équations que nous avons utilisées pour résoudre le circuit à chaque point de la tension V_{AC}(k) sont l'équation (22) et l'équation qui définit le comportement dynamique de l'arc, donnée par :

$$V_{arc} + \tau \frac{dV_{arc}}{dt} = F \left(I_{arc} + \tau \frac{dI_{arc}}{dt} \right) \quad (27)$$

où τ est la constante de temps de l'arc, elle est nulle dans notre cas.

Le calcul peut donner une, deux ou trois solutions possibles pour (V_{arc}(k), I_{arc}(k)). Finalement, la bonne solution correspond à la variation de puissance minimale, déduite en calculant :

$$\Delta P = |V_{arc} I_{arc}(k) - V_{arc} I_{arc}(k-1)| \quad (28)$$

Nous avons considéré également les paramètres de test cités dans le paragraphe précédent, ainsi que les paramètres α (équation 24) et β (équation 25) du modèle qui dépendent du déplacement du contact mobile (équation 26), tous ces éléments sont présentés dans la figure suivante :

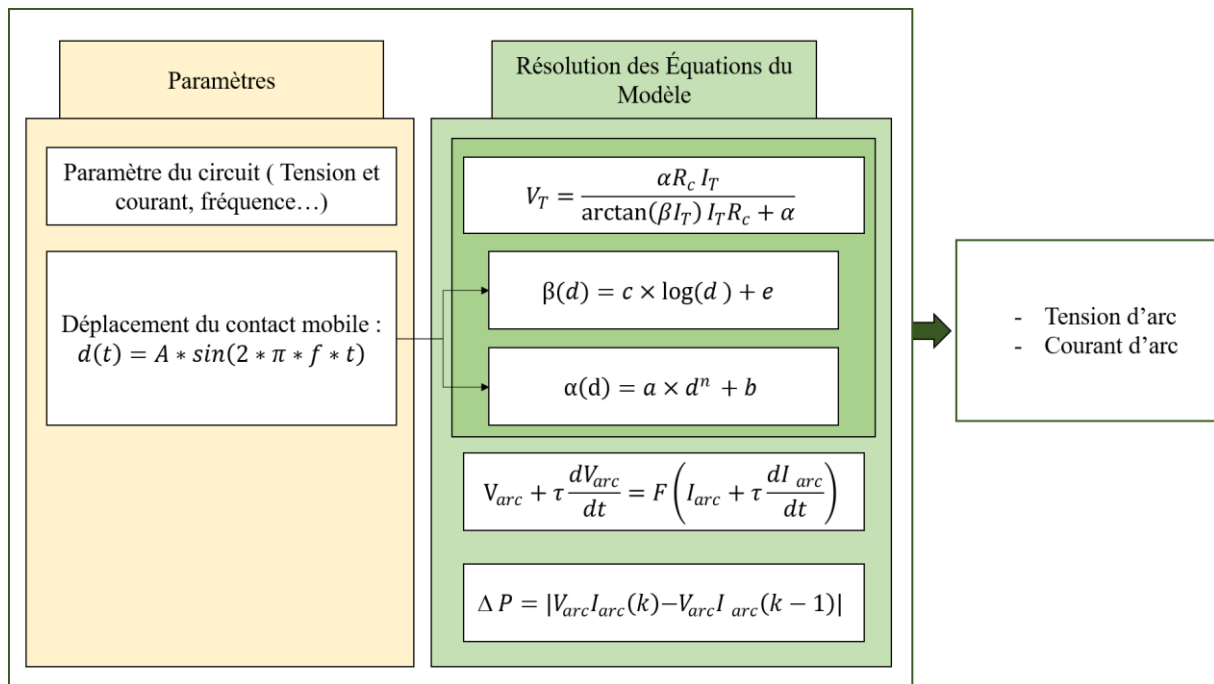


Figure 114 : Schéma de principe du programme de la simulation d'arc

Les figures 115, 116 et 117 montrent les signaux de la tension et le courant d'arc mesurés et les signaux de la tension et le courant d'arc simulés obtenus par le modèle. Ils sont représentés en fonction du profil de rebond pour une fréquence de 50 Hz et 500 Hz.

Nous constatons que ces résultats de simulation se rapprochent de la tension et du courant d'arc mesurés, ainsi le phénomène de ré-allumage a été reproduit. Ils permettent de déduire l'énergie de l'arc. Par conséquent, il serait possible de prédire l'effet des arcs de rebonds sur les matériaux des contacts. Pour étayer cette hypothèse, une étude plus approfondie sera nécessaire.

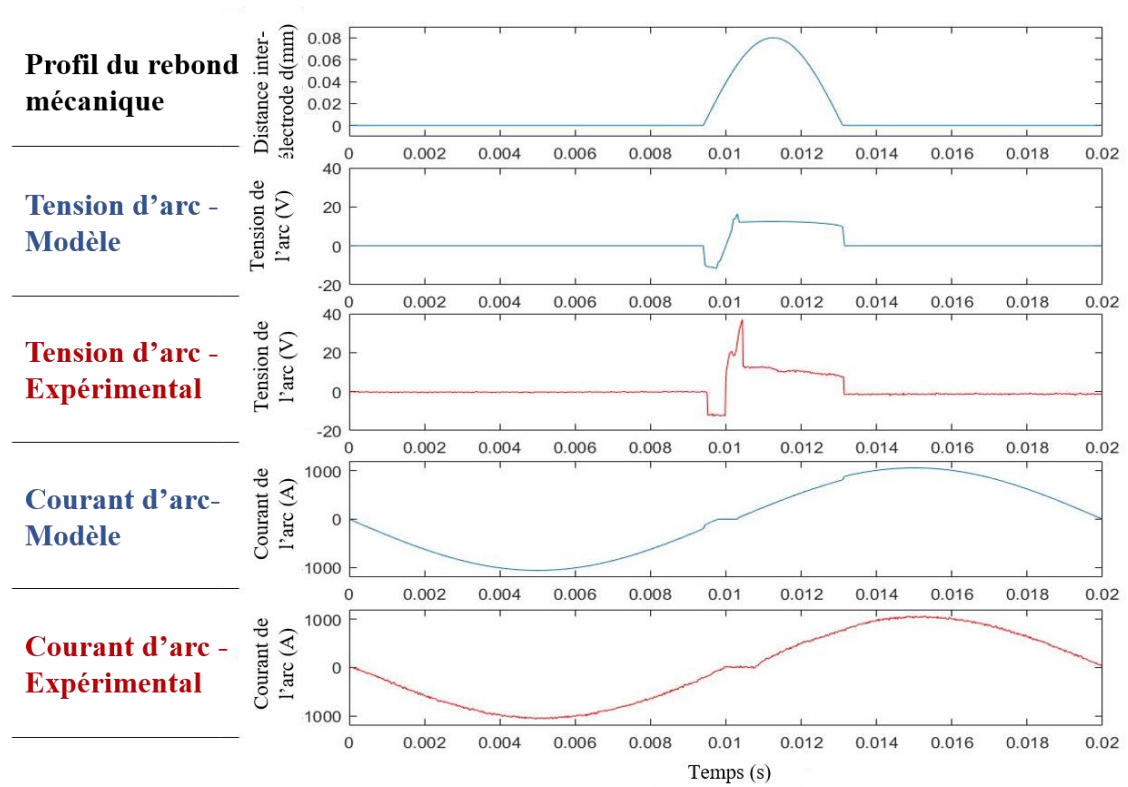


Figure 115 : Mesures et simulation de courant et de tension d'arc de rebond en fonction du déplacement de contact avec une fréquence de 50 Hz : Exemple de 2 allumages

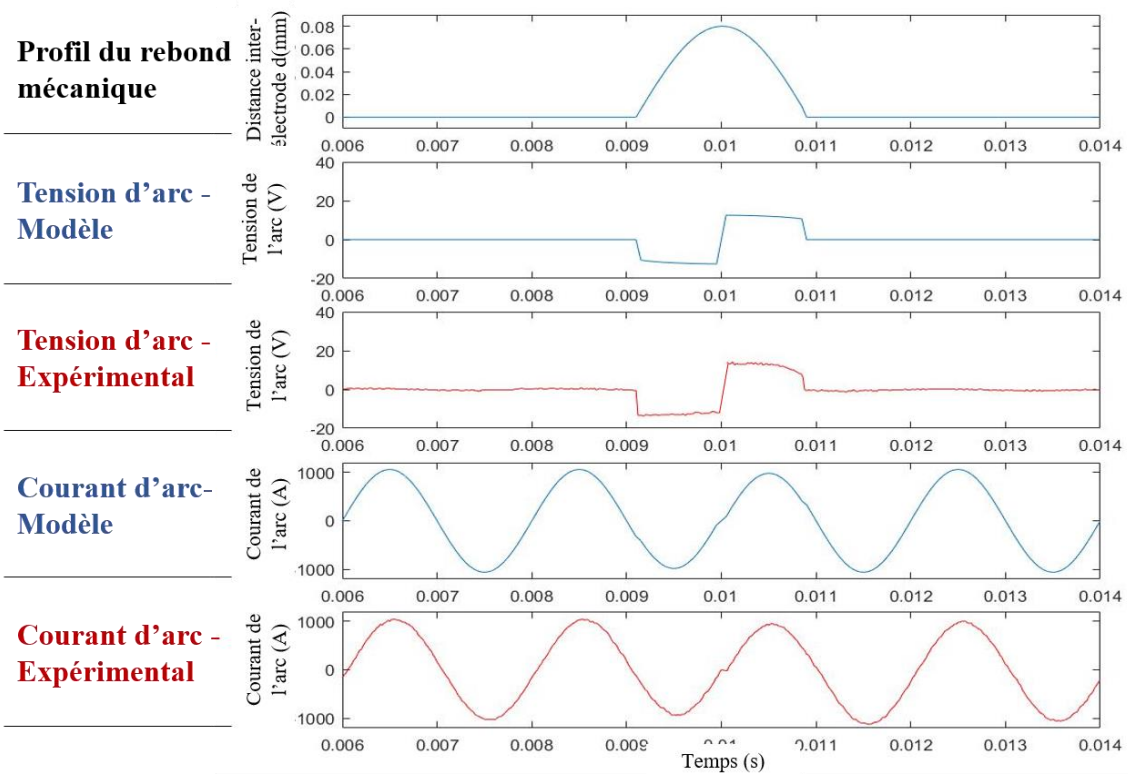


Figure 116 : Mesures et simulation de courant et de tension d'arc de rebond en fonction du déplacement de contact avec une fréquence de 500 Hz : Exemple de 2 allumages

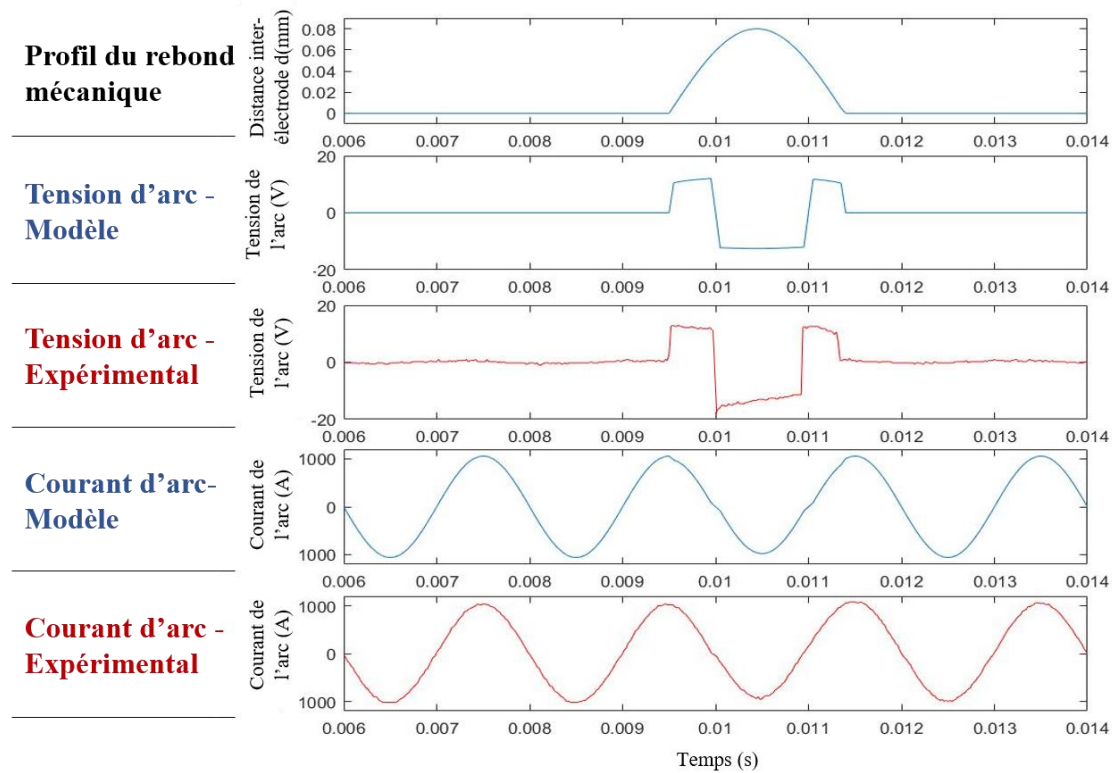


Figure 117 : Mesures et simulation de courant et de tension d'arc de rebond en fonction du déplacement de contact avec une fréquence de 500 Hz : Exemple de 3 allumages

5. Distance inter-électrodes vs longueur d'arc

Afin d'étudier l'évolution de l'arc en fonction de la distance inter-électrodes et le courant, nous avons effectué une mesure de la longueur de l'arc à l'aide d'un programme d'imagerie établi avec Mathematica. Ce programme donne les distances en pixel que nous traduisons en millimètre en nous basant sur la distance inter-électrodes comme référence. Le traçage de la distance que l'on souhaite mesurer, se fait manuellement. Un exemple de cette mesure est donné sur la figure suivante :

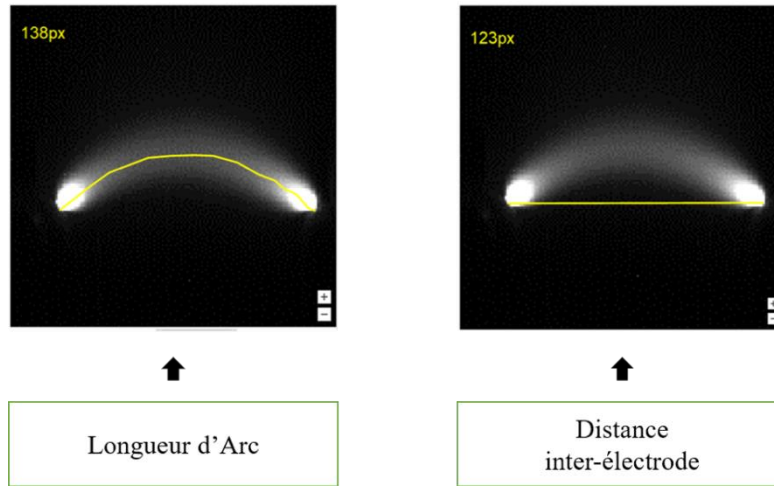


Figure 118 : Mesure de la longueur d'arc et de la distance inter-électrodes pour un courant de circuit de 10 A et une tension de 220 V_{DC}

Sur la figure 119, les mesures de la longueur d'arc ont été tracées en fonction de la distance inter-électrodes pour différents courants de circuit, allant de 2 A jusqu'à 10 A, la courbe verte pointillée représente la fonction $y(x)=x$, elle permet d'observer l'évolution de la longueur de ces arcs par rapport à la distance inter-électrodes.

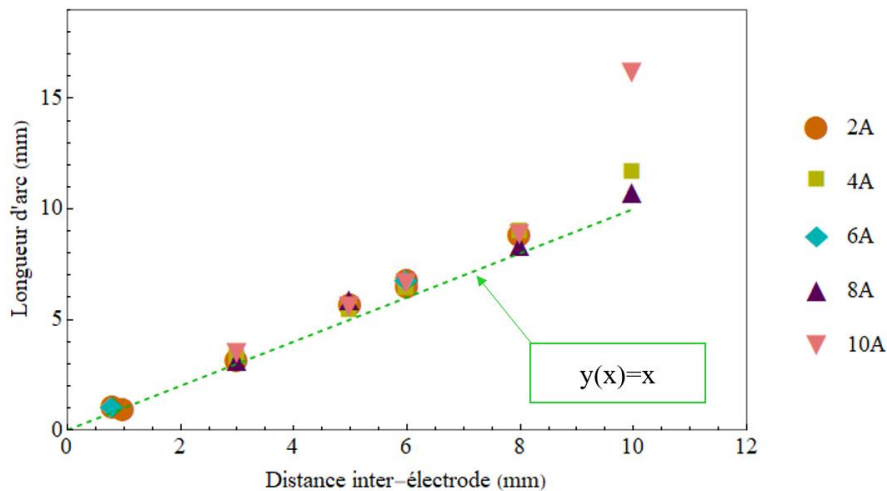


Figure 119 : Distance inter-électrodes vs longueur d'arc pour une tension de circuit de 220 V_{DC}

Nous remarquons que pour les petites distances, d'environ 1 mm, la longueur de l'arc est presque équivalente à la distance entre les contacts pour tous les niveaux de courant que nous avons testés. Cependant, pour les distances inter-électrodes de 3 mm et de 8 mm les arcs deviennent plus longs que la distance inter-électrodes, ils représentent la même longueur pour tous les courants de circuit. Finalement, pour le gap inter-électrodes de 10 mm, avec un courant de 2 A, l'arc s'éteint avant que le contact arrive à la position requise, en effet sa tension a augmenté et son courant est devenu insuffisant pour lui permettre de se maintenir.

Contrairement à l'arc établi avec un courant d'alimentation de 10 A, l'arc est devenu presque 2 fois plus long que la distance entre les contacts. Lorsque l'arc s'amorce, il commence à chauffer l'air environnant, ce qui provoque un courant de convection qui le souffle vers le haut et, par conséquent, l'allonge. La figure suivante représente les images des arcs statiques établis avec un courant de 10 A avec différents écartements inter-électrodes.

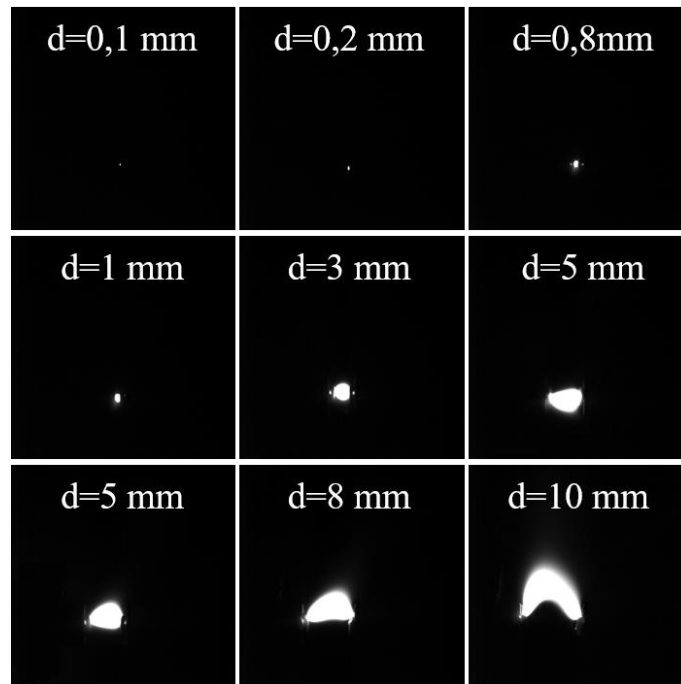


Figure 120 : Images d'arcs statiques à différentes distances inter-électrodes pour un courant de circuit de 10 A et une tension de 220 V_{DC}

IV. Conclusion

Nous avons utilisé un modèle d'arc pour simuler la tension et le courant d'un arc de rebond en alternatif créé avec des contacts d'AgSnO₂. Dans un premier temps nous avons présenté la méthodologie suivie pour identification des paramètres de ce modèle, cette identification consiste, dans un premier temps, à caractériser expérimentalement des arcs statiques pour différentes distances inter-électrodes pour une tension de 220 V_{DC} et différents courants. Par la suite, ces paramètres ont été données en fonction du déplacement des contacts. La simulation des arcs de rebond a été faite en utilisant l'équation de la décharge globale ainsi que l'équation décrivant le comportement dynamique de l'arc. Cette simulation semble proche des mesures expérimentales des caractéristiques des arcs de rebonds, et permet de prédire plusieurs grandeurs significatives en rapport avec les contacts électriques, telle que l'énergie de l'arc.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est une contribution à la compréhension du phénomène de la soudure dynamique et des arcs de rebond dans des conditions aéronautiques. Il est important de noter qu'à l'heure actuelle les études sur la soudure dans ces conditions, sont très rares, voire inexistantes. C'est également une première pour notre équipe de mener des études sur la soudure dans ces conditions, en collaboration avec Safran.

Trois problématiques ont été abordées dans ce travail :

- La reproduction des conditions réelles d'application de ces contacts électriques, à savoir : type de courant, tension, type de charge et condition atmosphérique (pression qui simule l'altitude de vol d'avion)
- La compréhension des phénomènes physiques derrière l'apparition de la soudure et l'interaction arc-électrode
- La caractérisation et la modélisation de différentes grandeurs significatives à l'étude des arcs de fermeture par rebond

Pour ce faire nous avons dans un premier temps conçu et développé un banc de test permettant de simuler des rebonds mécaniques. Sa réalisation a été précédée par une caractérisation des rebonds réels produits lors de la fermeture d'un contacteur, utilisé pour application aéronautique. Ces rebonds sont de $2 \pm 0,5$ ms et d'une hauteur de 80 ± 5 μ m. Ce dispositif peut être installé dans une chambre climatique, permettant d'étudier la soudure et les arcs de rebond en simulant l'altitude de vol. Dans notre cas, l'étude a été faite dans l'air ambiant.

Dans un deuxième temps, l'objectif a été de comparer le comportement des matériaux de contact sur l'aspect soudure sous une tension de 115 Vrms et un courant de 750 Arms, pour différentes fréquences 50 Hz 400 Hz et 500 Hz. Les résultats issus de cette étude nous ont révélé que la fréquence de la tension peut avoir un effet sur les caractéristiques de la soudure dynamique. Cet effet se produit à travers d'un changement au niveau des caractéristiques de l'arc, notamment le ré-allumage qui change manifestement en fonction de la fréquence. Ce ré-allumage est à l'origine du fait que la durée d'arc totale reste équivalente à la durée du rebond mécanique, excepté dans le cas d'utilisation des électrodes en AgSnO_2 dopé en Bi_2O_3 où l'arc prend un certain temps pour se réamorcer et par conséquent la durée totale de l'arc est réduite à ~ 1 ms au lieu de 2 ms. Ce phénomène de réamorçage est vraisemblablement contrôlé par les mécanismes de la fusion de la surface de contact.

Les matériaux des contact testés sont, l'argent pur, l'AgSnO₂ non dopé, l'AgSnO₂ dopé en In₂O₃ et l'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃, ce dernier étant le plus performant en terme de soudure. Sa résistance à la soudure est d'autant plus importante que la fréquence de la tension est basse. De plus, la surface de contact de l'AgSnO₂ dopé en Bi₂O₃ s'avère moins dégradée par l'arc par rapport aux autres types de contact. La ségrégation observée au niveau de la surface des contacts d'AgSnO₂ non dopé et AgSnO₂ dopé en In₂O₃ est sans doute à l'origine des fortes soudures mesurées. En outre, les contacts d'argent pur, quant à eux, semblent être affectés par la fréquence de la tension. En effet, pour une fréquence de 50 Hz, ces contacts ont eu un collage définitif après leur exposition à un seul arc de rebond. Néanmoins, à 400 Hz et 500 Hz, les contacts ont pu effectuer plusieurs cycles avant leur collage définitif.

Enfin, nous nous sommes intéressés à la modélisation de l'arc de rebond. Pour ce faire, nous avons utilisé un banc de test d'arc d'ouverture pour identifier les paramètres du modèle choisi, en fonction de la distance inter-électrodes. Cette identification résulte des caractéristiques statiques de l'arc $V(I)$ pour une tension de 220 V_{DC} et différents courants. Les électrodes utilisées sont en AgSnO₂(10% m d'oxyde métallique). Les résultats de la simulation des caractéristiques des arcs de rebond réalisée à l'aide du modèle d'Andrea semblent proches des mesures obtenues avec les électrodes en AgSnO₂ (10% m d'oxyde métallique). En outre, cette simulation permet de prédire des caractéristiques de l'arc liées aux contacts électriques dans des conditions dynamiques.

Les ouvertures et les perspectives générées par ce travail sont nombreuses. Dans un premier temps, il serait intéressant d'approfondir l'étude du pied d'arc y compris la surface de soudure, pour des cas d'un seul rebond. En effet, l'étude métallographique du pied d'arc permettra de comprendre les mécanismes d'apparition de la soudure en fonction des caractéristiques de l'arc de rebond. Ainsi, nous suggérons d'approfondir l'étude de la ségrégation de l'oxyde métallique des matériaux de contacts. Dans ce contexte, une collaboration d'un métallurgiste serait nécessaire.

Au cours de notre étude, nous avons été confrontés au phénomène de ré-allumage de l'arc lors des rebonds mécaniques. Ce ré-allumage se produit à une tension de 115V_{rms}, cette tension est inférieure à la tension minimale de claquage (~330 V). Il est donc important d'étudier ce phénomène en profondeur afin de comprendre les mécanismes physiques à l'origine de son apparition et le rôle que peut y jouer la nature des matériaux de contact.

Nous suggérons également d'étendre notre travail à différentes pressions simulant les altitudes de vol afin d'étudier l'effet de la pression sur les caractéristiques de l'arc et sur la soudure résultante.

Bibliographies

- [1] A. Barzkar et M. Ghassemi, « Electric Power Systems in More and All Electric Aircraft: A Review », IEEE Access, vol. 8, p.
- [2] P. Wheeler et S. Bozhko, « The More Electric Aircraft: Technology and challenges. », IEEE Electrification Mag., vol. 2, n° 4, p.
- [3] P. Wheeler, « Technology for the more and all electric aircraft of the future », in 2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA), Curicó, Chile, oct. 2016, p. 1-5.
- [4] James Domone, « The challenges and benefits of the electrification of aircraft ». SNC-Lavalin, 2018.
- [5] R. Holm, Electric Contacts theory and applications, Fourth edition. Germany, 2000.
- [6] P. G. Slade, Electrical Contacts : Principales and Applications, 2^e éd. 2014.
- [7] L. Féchant et P. Tixador, Matériaux conducteurs et de contact électrique, Lavoisier édition. 2003.
- [8] G. Witter et Y. Chen, « Dynamic Welding Resistance Comparisons of Silver and Silver Metal Oxides », 19th ICEC Nuremberg, Germany, p. 355-359, 1998.
- [9] W. F. Rieder et A. R. Neuhaus, « Contact welding influenced by anode arc and cathode arc, respectively », in Electrical Contacts, 2004. Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts, 2004, p. 378-381.
- [10] K. Hotta et T. Inaguchi, « Contact Welding Mechanism With Bounce Arc on Ag and Cu Contacts in Low-Voltage Switches », IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol., vol. 7, n° 3, p.
- [11] L. Morin, « Etude expérimentale des arcs électriques et de leurs conséquences sur les matériaux de contact. Application aux commutateurs automobiles de puissance. », Université de Rennes 1, France, 2000.
- [12] 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 », These de doctorat, Rennes 1, 2004. Consulté le: 31 octobre 2021.
- [13] 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 », These de doctorat, Rennes 1, 2007. Consulté le: 31 octobre 2021.
- [14] E. Yee Kin Choi, « Étude des arcs et de leurs conséquences sur les matériaux de contacts électriques de puissance pour des applications DC », THÈSE, UNIVERSITÉ DE RENNES 1, France, 2015.
- [15] H. Hertz, « Über die berührung fester elastischer körper. Journal für die reine und angewandte Mathematik », p. 156-171, 1882.
- [16] J. A. Greenwood et J. H. Tripp, « The Elastic Contact of Rough Spheres », Journal of Applied Mechanics, p. 153-159, 1 mars 1967.

- [17] J. A. Greenwood et J. H. Tripp, « The contact of two nominally flat rough surfaces », Proc. Instn. Mech. Engrs, p. 625-633, 1971.
- [18] J. A. Greenwood, « Constriction resistance and the real area of contact », Br. J. Appl. Phys., vol. 17, n° 12, p.
- [19] Y.P. Raizer, Gas Discharge Physics. Berlin: Springer-Verlag, 1997.
- [20] Y. Bourek, « Détermination des Conditions d'ionisation Caractérisant le Seuil de Claquage de l'Air par la logique Floue », Thèse de magister, Université de Batna, 2005.
- [21] Nozomi Miki et Koichiro Sawa, « Arc Extinction Characteristics in Power Supply Frequencies from 50Hz to 1MHz », The European Physical Journal - Applied Physics, p. 13-18, 2010.
- [22] Luc Nedelec, « Contribution à l'étude des arcs électroniques et de leurs conséquences sur les matériaux de contacts : Application aux commutateurs automobiles. », PhD Thesis, UNIVERSITÉ DE RENNES 1, 1997.
- [23] L'Arc électrique, 2^e éd. CNRS, 2000.
- [24] B. Rethfeld, J. Wendelstorf, T. Klein, et G. Simon, « A self-consistent model for the cathode fall region of an electric arc », J. Phys. Appl. Phys., vol. 29, n° 1, p. 121-128, janv. 1996.
- [25] E. W. Gray, « Some Spectroscopic Observations of the Two Regions (Metallic Vapor and Gaseous) in Break Arcs », IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 1, n° 1, p. 30-33, mars 1973.
- [26] E. Yee Kin Choi, E. Carvou, A. Vassa, N. Benjemaa, et J.B. Mitchell, « Optimisation of material erosion and welding performance by metal oxides and magnetic particles », Dresden, Germany, p. 61-66, 2014.
- [27] K. Yoshida, S. Nakamura, et S. Tanimoto, « Relationship between arc duration and contact resistance of Ag Alloy contacts mounted on relay », 2003, p. 6.
- [28] H. Wang, J. Wang, Q. Bao, et Z. Bao, « Analysis of Electrical Contact Performance for Alternating Current Contactor », janv. 2011, p. 463-466.
- [29] J. W. McBride, « Electrical contact bounce in medium-duty contacts », IEEE Trans. Compon. Hybrids Manuf. Technol., vol. 12, n° 1, p. 82-90, mars 1989.
- [30] T. Mutzel, M. Bender, et R. Niederreuther, « The effect of material composition on dynamic welding of electrical contacts », in Holm Conference on Electrical Contacts (HOLM), 2013 IEEE 59th, 2013, p. 1-7.
- [31] Z. K. Chen et G. J. Witter, « A Study of Dynamic Welding of Electrical Contacts with Emphasis on the Effects of Oxide Content for Silver Tin Indium Oxide Contacts », in 2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, oct. 2010, p. 1-6.
- [32] Z. Chen et G. Witter, « Dynamic welding of silver contacts under different mechanical bounce conditions », in Electrical Contacts, 1999. Proceedings of the Forty-Fifth IEEE Holm Conference on, 1999, p. 1-8.

- [33] G. Witter et Z. Chen, « A comparison of silver tin indium oxide contact materials using a new model switch that simulates operation of an automotive relay », in *Electrical Contacts, 2004. Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts, 2004*, p. 382-387.
- [34] W. Ren, J. Jin, Y. Fu, et C. Chang, « A novel test rig for in situ and real time measurement of welding force and impact force of contacts within electromagnetic relay », *New Orleans, LA, USA, 2014*, p. 7.
- [35] A. R. Neuhaus, W. F. Rieder, et M. Hammerschmidt, « Influence of Electrical and Mechanical Parameters on Contact Welding in Low Power Switches », *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.*, vol. 27, n° 1, p. 4-11, mars 2004.
- [36] N. C. Shaw, « Investigations of contact bounce and contact welding, » in *Proc. 2nd Int. Conf. Elect. Contact Phenom* », *Proc. 2nd Int. Conf. Elect. Contact Phenom*, p. 286-302, 1964.
- [37] Zhenbiao L, C. Lichun, et Z. Jiyun, « The Metallurgical Research on Contact Surface Deterioration of AgNi, AgW, & Fe, AgCu Contact Materials », *Proc. 41st IEEE Holm Conf. Elect. Contacts*, p. 346-349, 1995.
- [38] C. Poulain et J. Devautour, « Parametric Study of the dynamic welding of Power Electrical Contacts », in *Proc. 19th Int. Conf. Elect. Contact*, 1998, p. 343.
- [39] T. Mützel, M. Bender, et R. Niederreuther, « Contact Material Effects on Dynamic Contact Sticking », in *ICEC 2014; The 27th International Conference on Electrical Contacts; Proceedings of, 2014*, p. 1-6.
- [40] E. Carvou, N. Ben Jema, B. Mitchell, C. Gautherot, J. Rivenc, et L. Colchen, « Contact behavior of electrical vehicle-battery junction box under high shorting and breaking current », 2012, p. 151-155.
- [41] K. Yoshida, K. Sawa, K. Suzuki, et K. Takaya, « Influence of sealed gas and its pressure on arc discharge in electromagnetic contactor », in *Electrical Contacts, 2017 IEEE Holm Conference on, 2017*, p. 236-241.
- [42] C. Schrank, A. R. Neuhaus, et M. Reichart, « The Influence of Different Atmospheres on Arc Width, Arc Mobility, and Contact Welding investigated for Low Power Switches », in *Electrical Contacts - 2007 Proceedings of the 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, sept. 2007*, p. 130-133.
- [43] G. Li, Y. Yu, Y. Geng, Z. Liu, et J. Wang, « Fractal features of contact surface ruptured from arc welding by high frequency inrush current in vacuum interrupters », in *2017 4th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST)*, oct. 2017, p. 129-132.
- [44] « Environment Agency », <https://www.gov.uk/government/organisations/environment-agency>. GOV.UK.
- [45] O. Nilsson, F. Hauner, et D. Jeannot, « Replacement of AgCdO by AgSnO/sub 2/in DC contactors », in *Electrical Contacts, 2004. Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts, 2004*, p. 70-74.

- [46] F. Hauner, D. Jeannot, K. McNeilly, et J. Pinard, « Advanced AgSnO₂ Contact Materials for the Replacement of AgCdO in High Current Contactors », Chicago, IL, USA, 2000, p. 6.
- [47] C. Leung, E. Streicher, et D. Fitzgerald, « Welding Behavior of Ag/SnO₂ Contact Material with Microstructure and Additive Modifications », Seattle, WA, USA, 2004, p. 6.
- [48] V. Behrens, T. Honig, et A. Kraus, « Influence of the contact material on the performance of temperature-dependent switching controllers in household appliance », Chicago, IL, USA, 2000, p. 235-239.
- [49] K.- Schroder, « Silver-Metal Oxides as Contact Materials », IEEE Trans. Compon. Hybrids Manuf. Technol., vol. 10, n° 1, p. 127-134, mars 1987.
- [50] E. Streicher, C. Leung, et S. Allen, « Press-Sinter-Repress Ag/SnO₂ Contacts with Lithium and Copper Sintering Additives for Contactor Applications », Montreal, QC, Canada, 2001, p. 8.
- [51] F. Heringhaus, P. Braumann, D. Rühlicke, E. Susnik, et R. Wolmer, « On the Improvement of Dispersion in Ag-SnO₂-Based Contact Materials », p. 6, 2000.
- [52] V. Cosovic et al., « Microstructure refinement and physical properties of Ag-SnO₂ based contact materials prepared by high-energy ball milling », Sci. Sinter., vol. 45, n° 2, p. 173-180, 2013.
- [53] V. Behrens et W. Weise, « 10 Contact materials », in Powder Metallurgy Data: Part 1: Metals and Magnets, P. Beiss, R. Ruthardt, et H. Warlimont, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003, p. 637-666.
- [54] T. Mützel, P. Braumann, et R. Niederreuther, « Experimental investigations on material influences of silver metal-oxide contact materials for contactor applications », 54th Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, p. Ilmenau, Germany, 2009.
- [55] C. Leung et E. Streicher, « Material transfer in dynamic welding of Ag and Ag/SnO₂/sub 2/contact material », in Electrical Contacts, 2002. Proceedings of the Forty-Eighth IEEE Holm Conference on, 2002, p. 21-28.
- [56] H. Cinaroglu, V. Behrens, et T. Honig, « Switching Behavior of Ag/SnO₂ Contact Materials at High Operating Overload Currents », in 2018 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, oct. 2018, p. 176-183.
- [57] S. Shang, Z. Wang, W. Li, C. Han, et Z. Wang, « The Performance Degradation Comparison Test and Failure Mechanism of Silver Metal Oxide Contact Materials », in 2019 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Milwaukee, WI, USA, sept. 2019, p. 335-343.
- [58] T. Mützel, « Contact Material Solutions for LED Lamp Application », Albuquerque, NM, USA, 2018, p. 159-165.
- [59] E. Walczuk, P. Borkowski, S. Ksiezarek, W. Missol, Z. Rdzawski, et K. Durst, « Evaluation of Basic Electrical Parameters of Silver-Based Contact Materials of Different Chemical Composition and Manufacturing Technology », in 2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, oct. 2010, p. 1-8.

- [60] H. Cinaroglu, V. Behrens, et T. Honig, « Application of a New Ag/SnO₂ contact material in AC-contactors », Denver, CO, USA, sept. 2017, p. 215-220.
- [61] H. Cinaroglu, V. Behrens, et T. Honig, « Influence of Microstructure and Manufacturing Technique of Ag/SnO₂ Material on AC3 Service Life Performance », Edinburgh, Scotland, 2016, p. 6.
- [62] G. Tissandier, Les ballons dirigeables : application de l'électricité à la navigation aérienne, 1^{re} éd. France: Gauthier-Villars, 1885.
- [63] V. Madonna, P. Giangrande, et M. Galea, « Electrical Power Generation in Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities », IEEE Trans. Transp. Electrification, vol. 4, n° 3, p. 646-659, sept. 2018.
- [64] C. R. Avery, S. G. Burrow, et P. H. Mellor, « Electrical generation and distribution for the more electric aircraft », in 2007 42nd International Universities Power Engineering Conference, Brighton, UK, sept. 2007, p. 1007-1012.
- [65] X. Roboam, « New trends and challenges of electrical networks embedded in "more electrical aircraft" »;, in 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Gdansk, Poland, juin 2011, p. 26-31.
- [66] X. Roboam, B. Sareni, et A. Andrade, « More Electricity in the Air: Toward Optimized Electrical Networks Embedded in More-Electrical Aircraft », IEEE Ind. Electron. Mag., vol. 6, n° 4, p. 6-17, déc. 2012.
- [67] M. Sinnett, Saving Fuel and Enhancing Operational Efficiencies. Boing.
- [68] Z. Zheng, T. Wang, X. Zhang, et W. Ren, « Experimental Investigation of Alternating Current Arc Behavior and Associated Contact Welding Failure for General-purpose Relay », San Antonio, TX, USA, 2020, p. 7.
- [69] X. Zhang, W. Ren, Z. Zheng, et S. Wang, « Effect of Electrical Load on Contact Welding Failure of Silver Tin Oxide Material Used in DC Electromechanical Relays », IEEE Access, vol. 7, p.
- [70] D. Jeannot, J. Pinard, P. Ramoni, et E. M. Jost, « The effects of metal oxide additions or dopants on the electrical performance of AgSnO₂/ contact materials », in Proceedings of IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Pittsburgh, PA, USA, 1993, p. 51-59.
- [71] D. Jeannot, J. Pinard, P. Ramoni, et E. M. Jost, « Physical and chemical properties of metal oxide additions to Ag-SnO₂/ contact materials and predictions of electrical performance », IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol. Part A, vol. 17, n° 1, p. 17-23, mars 1994.
- [72] E. Carvou et N. Ben Jemaa, « Experimental Studies on Arc Duration in AC Voltage Supply », France, 2008, p. 7-12.
- [73] J. Slepian, « Abridgment of extinction of an A-C. arc », J. AIEE, vol. 47, n° 10, p. 706-710, oct. 1928.
- [74] Meek J. M. et Craggs J.D., Electrical Breakdown Of Gases. Oxford At The Clarendon Press, 1953.

- [75] A. von Engel, *Ionized Gases*, 1^{re} éd. American Inst. of Physics, 1994.
- [76] W. Hauer, E. Industries, et X. Zhou, « Re-ignition and Post Arc Current Phenomena in Low Voltage Circuit Breaker », Dresden, Germany, 2014, p. 6.
- [77] A. Karimi et K. Niayesh, « A simple evaluation method of the thermal interruption limit of power circuit breakers », *Electr. Eng.*, vol. 90, n° 8, p. 523-528, févr. 2009.
- [78] D. Shin, « A Study of Re-ignition Phenomena and Arc Modelling to Evaluate Switching Performance of Low-Voltage Switching Devices », University of Southampton, 2018.
- [79] Rong Mingzhe et Wang Qiping, « Effects of additives on the AgSnO₂ contacts erosion behavior », in *Proceedings of IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Pittsburgh, PA, USA, 1993, p. 33-36.
- [80] F. Holmes et P. Slade, « The Erosion Characteristics of Ag Contacts and the Effect of Adding a Small Percentage of W », *IEEE Trans. Parts Hybrids Packag.*, vol. 13, n° 1, p. 23-30, mars 1977.
- [81] W. F. Rieder et A. R. Neuhaus, « Short Arc Modes Determining Both Contact Welding and Material Transfer », *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.*, vol. 30, n° 1, p. 9-14, mars 2007.
- [82] A. Fuentes, P. Carre, P. Rogeon, T. Loulou, et G. Sierra, « Caractérisations thermique, électrique et interfaciale en vue d'une étude numérique d'un procédé d'assemblage de matériaux de contact », p. 7, 2009.
- [83] O. Mayr, « Beitrage zur theorie des statischen und des dynamischen Lichtbogens », *Archiv Fer Electrotechnik*, vol Band 37, Heft 12, pp588- 608, 1943.
- [84] A. Stokes et W. Oppenlander, « Electric arcs in open air », *J. Phys.*, p. 26-35., 1991.
- [85] W. Rieder « Leistungsbilanz der Elektroden und Charakteristiken frei brennender Niederstrombgen », *Zeitschrift fr Physik* Bd. 146 S 629-643 (1956).
- [86] J. Paukert, « The Arc Voltage and Arc Resistance of LV Fault Arcs », *Proceedings of the 7th International Symposium on Switching Arc Phenomena*, 1993, pp. 49-51.
- [87] C. P. Steinmetz, « Transformation of Electric Power into Light », *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. XXV, p. 789-813, janv. 1906.
- [88] I. A. Mossop, F. D. Gill, « The current and voltage relationships of a static DC arc between copper and silver electrodes in air at 1-760 mm Hg », 1956, p. 201-205.
- [89] W. B. Nottingham, « A New Equation for the Static Characteristic of the Normal Electric Arc », *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. XLII, p. 302-310, janv. 1923.
- [90] S. Baker, « Direct-reading metal spectroscopy with a d.c. arc », *Br. J. Appl. Phys.*, vol. 5, p. 215, déc. 2002.
- [91] R. H Eather « The silent and hissing DC arc », *Aust. J. Phys.*, 1963, vol 16, pp. 228-239.

- [92] J. Andrea, M. Bournat, R. Landfried, S. Weber, et P. Schweitzer, « Model of an Electric Arc for Circuit Analysis », 2016, p. 7.
- [93] J. Andrea, P. Schweitzer, et J.-M. Martel, « Arc Fault Model of Conductance. Application to the UL1699 Tests Modeling », in 2011 IEEE 57th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm), Minneapolis, MN, USA, sept. 2011, p. 1-6.
- [94] J. Andrea, P. Schweitzer, et E. Carvou, « Comparison of Equations of the VI Characteristics of an Electric Arc in Open Air », in 2019 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Milwaukee, WI, USA, sept. 2019, p. 76-81.
- [95] J. Andrea, P. Besdel, O. Zirn, et M. Bournat, « The electric arc as a circuit component », in IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Yokohama, nov. 2015, p. 003027-003034.

Titre : Étude du Phénomène de Collage dans les Contacteurs à Application Aéronautique

Mots clés : Soudure dynamique, Arc électrique, Matériaux de contacts, AgSnO_2

Résumé : Dans le domaine aéronautique, la tendance actuelle est à l'électrification des différents composants d'avion jusque-là pneumatiques ou hydrauliques. Les réseaux électriques des avions doivent être adaptés pour fournir une puissance toujours plus importante. En particulier, les contacteurs jouent un rôle majeur dans ces réseaux. Ils doivent assurer la coupure et la mise sous tension. Un phénomène important qui peut mettre en péril la fiabilité de ces contacteurs est la soudure dynamique des contacts électriques. Cette soudure est le résultat des arcs de rebonds créés lors de la fermeture du contacteur. Un banc d'essai a été développé pour simuler les rebonds mécaniques afin de reproduire ces arcs d'une façon contrôlée. Quatre matériaux (l'Ag, l' AgSnO_2 non dopé, l' AgSnO_2 dopé en In_2O_3 et l' AgSnO_2 dopé

en Bi_2O_3) ont été testés avec ce banc afin de comparer leur comportement sur l'aspect soudure sous une tension de 115 Vrms et un courant de 750 Arms, pour différentes fréquences 50 Hz 400 Hz et 500 Hz.

La fréquence de la tension peut avoir un effet sur les caractéristiques de la soudure, cela pouvant se traduire par un changement des caractéristiques de l'arc, en particulier son réamorçage. Ce ré-allumage implique que la durée d'arc totale reste équivalente au temps de rebond mécanique, sauf lors de l'utilisation d'électrodes en AgSnO_2 dopé en Bi_2O_3 où l'arc mettant un certain temps à se ré-allumer, la durée totale de l'arc est plus courte. En conclusion, les contacts AgSnO_2 dopé en Bi_2O_3 ont montré les plus faibles forces et taux de soudure, notamment à 500 Hz.

Title : Study of welding phenomenon in Contactors for Aeronautical Applications

Keywords : Dynamic welding, electrical arc, Contacts materials, AgSnO_2

Abstract : In the aeronautical field, the current trend is towards the electrification of various components that were previously pneumatic or hydraulic. The electrical networks of aircraft must be adapted to provide ever greater power. In particular, contactors play a major role in these networks. They must ensure that the power is switched off and on. An important phenomenon that can jeopardise the reliability of these contactors is the dynamic welding of electrical contacts. This welding is the result of the bounce arcs created during the contactor closure. A test bench has been developed to simulate the mechanical bounce to reproduce these arcs in a controlled manner. Four materials (Ag, undoped AgSnO_2 , AgSnO_2 In_2O_3

and AgSnO_2 Bi_2O_3) were tested with this test bench to compare their welding behaviour at 115 Vrms voltage and 750 Arms current, for different frequencies 50 Hz, 400 Hz and 500 Hz.

The frequency of the voltage can have an effect on the characteristics of the weld, which can result in a change in the characteristics of the arc, in particular its re-ignition. This re-ignition implies that the total arc time remains equivalent to the mechanical rebound time, except when using AgSnO_2 Bi_2O_3 electrodes where the arc takes some time to re-ignite and the total arc time is shorter. In conclusion, AgSnO_2 Bi_2O_3 contacts showed the lowest welding forces and rates, especially at 500 Hz.