



HAL
open science

Caractérisation du comportement du plasma dans un disjoncteur basse tension par le développement d'un outil numérique et d'expériences associées

Jingjing Lu

► **To cite this version:**

Jingjing Lu. Caractérisation du comportement du plasma dans un disjoncteur basse tension par le développement d'un outil numérique et d'expériences associées. Plasmas. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2020. Français. NNT : 2020TOU30154 . tel-03138233v2

HAL Id: tel-03138233

<https://hal.science/tel-03138233v2>

Submitted on 19 Feb 2021

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.

Université Fédérale



Toulouse Midi-Pyrénées

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

Présentée et soutenue par :

Jingjing LU

le jeudi 19 novembre 2020

Titre :

Caractérisation du comportement du plasma dans un disjoncteur basse tension par le développement d'un outil numérique et d'expériences associées

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED GEET : Ingénierie des PLASMAS

Unité de recherche :

Laboratoire PLASma et Conversion d'Énergie – CNRS – UPS – INPT

Directeur/trice(s) de Thèse :

Pierre FRETON, Professeur, Université Toulouse III

Jean-Jacques GONZALEZ, Directeur de Recherche au CNRS, Université Toulouse III

Jury :

Marie-Pierre PLANCHE, Maître de Conférence, UTBM – Belfort, Rapporteur

Jean-Marc BAUCHIRE, Professeur, GREMI– Orléans, Rapporteur

Pierre BIDAN, Professeur, Université Toulouse III, Examineur

Laurent PECASTAING, Professeur, SIAME – Pau, Examineur

Patrice JOYEUX, Docteur-Ingénieur, Hager Electro SAS – Obernai, Invité

Remerciements

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont été réalisés au sein de l'équipe Arc Electrique et Procédés Plasmas Thermiques (AEPPT) du Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie (Laplace) de Toulouse dans le cadre d'une collaboration avec l'entreprise Hager Electro SAS d'Obernai.

Je voudrais tout d'abord adresser mes sincères remerciements à mes directeurs de thèse, Monsieur Jean-Jacques GONZALEZ, Directeur de Recherche du CNRS, et Monsieur Pierre FRETON, Professeur de l'Université Toulouse III, pour m'avoir encadré tout au long de cette thèse, pour le temps qu'ils ont consacré à m'apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de cette recherche, et pour m'avoir fait partager leurs intuitions.

Je tiens à remercier Monsieur Patrice JOYEUX et Monsieur Gauthier DEPLAUDE, Docteur-Ingénieurs de Hager, pour m'avoir fourni les matériels nécessaires de l'expérimentale, pour m'avoir transmis leurs connaissances sur le disjoncteur basse tension, pour leur confiance et leur gentillesse.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur Jean-Marc BAUCHIRE, Professeur de l'Université d'Orléans et Madame Marie-Pierre PLANCHE, Maître de Conférences (HDR) de l'Université de Technologie Belfort Montbéliard, pour avoir accepté de rapporter mes travaux de thèse, pour leurs conseils et leurs commentaires.

J'adresse tous mes remerciements à Monsieur Pierre BIDAN, Professeur de l'Université Toulouse III, pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse et pour l'attention portée à ce travail. J'aimerais également remercier Monsieur Laurent PECASTAING, Professeur de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, pour avoir examiné ce manuscrit.

Je tiens à témoigner ma gratitude et à adresser mes remerciements à Malyk BENMOUFFOK, Docteur de l'équipe AEPPT, pour m'avoir aidé dans mon travail. Je remercie Pierre FORT, Technicien du CNRS, de m'avoir accompagné pour de nombreuses d'expériences.

J'exprime également ma sympathie à l'ensemble de l'équipe AEPPT, des doctorants du laboratoire, pour le temps passé ensemble et le partage de leurs expériences au quotidien : Andri, Alejandro, Tianbo, Elhadji, Jean, Ali, Sidhant, Francis, Nicolas, Julien, Sébastien, Flora

Enfin, je remercie ma très chère famille et Qi, qui ont toujours été là pour moi, pour leurs encouragements. Un grand merci à mes chers amis : Yutian, Xuanhao, Denis, Ada, Xiaona, Hind, Jingwen, Frédéric, Rongrong.... Leurs soutiens inconditionnels et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	13
CHAPITRE I : Généralités – Position du sujet	17
I.1. L’arc électrique	19
I.2. Le plasma thermique	20
I.3. Zones anodique et cathodique	22
I.4. Application des arcs électriques	24
I.5. Le disjoncteur basse tension (DBT)	27
I.5.1. Types de DBT	28
I.5.2. Technologie de coupure	28
I.5.3. Augmentation de la tension de l’arc	30
<i>I.5.3.1. Commutation et déplacement de l’arc</i>	31
<i>I.5.3.2. Segmentation de l’arc</i>	37
I.5.4. Autres travaux	46
<i>I.5.4.1. Dimensions des gaines</i>	46
<i>I.5.4.2. Courant de Foucault</i>	47
<i>I.5.4.3. Fréquence du courant</i>	48
<i>I.5.4.4. Nombre de séparateurs</i>	51
I.6. Synthèse de l’étude bibliographique	53
CHAPITRE II : Modélisation	55
II.1. Introduction	57
II.2. Equations hydrodynamiques	58
II.2.1. Equation de conservation de la masse.....	58
II.2.2. Equation de conservation de la quantité de mouvement.....	58
II.2.3. Equation de conservation de l’énergie	58
II.3. Equations électromagnétiques	59

II.4. Présentation du code Ansys – Fluent.....	62
II.5. Travaux antérieurs de l'équipe sur les mouvements des pieds d'arc.....	63
II.6. Description du modèle de gaine – application à une géométrie de la littérature .	66
II.6.1. Mise en place de l'approche de Lindmayer [Lin_1]	66
II.6.2. Hypothèses générales du modèle	69
II.6.3. Conditions initiales	70
II.6.4. Conditions aux limites	71
II.6.5. Influence du nombre de séparateurs sur le comportement de l'arc.....	72
II.6.5.1. Cas sans séparateur (0 Sp_50 A).....	72
II.6.5.2. Cas avec un séparateur (1 Sp_50 A).....	75
II.6.5.3. Cas avec deux séparateurs (2 Sp_50 A).....	79
II.6.5.4. Analyse comparative suivant le nombre de séparateurs.....	81
II.6.6. Influence de l'intensité de courant sur le comportement de l'arc	83
II.6.7. Synthèse des résultats de modélisation	86
CHAPITRE III : Expériences et étude paramétrique	89
III.1. Présentation de l'expérience	91
III.1.1. Prise en main de la maquette des travaux de J. Quéméneur [Qué_1].....	91
III.1.2. Présentation de la nouvelle maquette	93
III.1.3. Alimentation impulsionnelle	94
III.1.4. Outils de diagnostics.....	96
III.1.5. Synchronisation	97
III.1.6. Outil d'exploitation.....	97
III.2. Etudes paramétriques	101
III.2.1. Estimation du courant présumé	101
III.2.2. Influence de nombre de séparateur sur le comportement de l'arc.....	103
III.2.2.1. Conditions expérimentales	103
III.2.2.2. Caractéristiques électriques.....	104
III.2.3. Influence du « bouchage » de la chambre sur le comportement de l'arc	107
III.2.3.1. Conditions expérimentales	107
III.2.3.2. Déplacement de l'arc.....	108
III.2.4. Influence de la forme des séparateurs sur le comportement de l'arc.....	112
III.2.4.1. Conditions expérimentales	112
III.2.4.2. Caractéristiques de la tension	113
III.2.4.3. Déplacements avec imagerie.....	114

III.2.5. Influence de l'intensité sur le comportement de l'arc	119
III.2.5.1. Conditions expérimentales	119
III.2.5.2. Caractéristiques du courant	119
III.2.5.3. Etats des rails et des séparateurs	120
III.3. Synthèse des résultats expérimentaux	124
CHAPITRE IV :	125
Application à la configuration expérimentale	125
IV.1. Géométrie et maillage	127
IV.2. Condition initiale.....	129
IV.3. Amorçage par un canal de Température.....	131
IV.3.1. Configuration (O-O)	131
IV.3.2. Configuration (F-O)	134
IV.4. Amorçage par un canal de Température et de Pression	136
IV.4.1. Choix de la pression initiale	136
IV.4.2. Géométrie réduite	139
IV.4.3. Comparaison des résultats expérimentaux et simulations.....	141
IV.4.3.1. Déplacement de l'arc.....	141
IV.4.3.2. Tension de l'arc	145
IV.5. Synthèse des résultats	146
CONCLUSION.....	147
BIBLIOGRAPHIE	155

INTRODUCTION

Les réseaux électriques ont pour rôle d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les endroits de consommation de l'électricité, par l'intermédiaire d'un réseau de lignes électriques aériennes ou souterraines. Il existe divers composants dans les réseaux électriques, par exemple : des générateurs, des transformateurs, des lignes et systèmes de protections etc. Dans le centre de production, l'électricité est produite par les générateurs (nucléaires, hydrauliques, thermiques, éoliennes, photovoltaïques), ensuite elle doit être transportée par des lignes avec des étapes d'élévation et de baisse du niveau de tension par les transformateurs. Afin de sécuriser la distribution de l'électricité, notamment au niveau des habitations, il existe des systèmes de protection. Le disjoncteur est un élément essentiel dans les réseaux de distribution électriques. Lors de l'ouverture du circuit se crée un arc électrique. Cet arc est indispensable à la dissipation de l'énergie cependant il doit être éteint le plus rapidement possible afin de protéger les installations et les personnes.

Au sein de l'équipe AEPPT (Arc Electrique et Procédés Plasmas Thermiques), les thématiques sont centrées sur l'étude des plasmas thermiques, dont la caractérisation des milieux plasmas, l'étude des interfaces plasma avec leur environnement et notamment la compréhension du comportement de l'arc dans les dispositifs industriels. Ainsi, il existe depuis de nombreuses années des travaux avec le Groupe Hager. Dans le cadre de cette collaboration, des travaux antérieurs ont été réalisés. Ils portaient sur le déplacement de l'arc entre deux rails parallèles (Travaux expérimentaux et de modélisation) et sur l'étude de la commutation sur une maquette expérimentale simplifiée. Ces deux thèmes, faisaient l'objet de la thèse de Jean Quémeur [Qué_1]. Cependant, un long chemin reste à parcourir pour approfondir la description et l'étude de la segmentation de l'arc dans les séparateurs. Ainsi un effort particulier a dû être déployé sur le plan théorique pour la prise en compte des chutes de tension aux gaines afin de décrire l'effet limiteur du courant. Ce point donne le cheminement sur les objectifs de cette thèse.

Ces travaux de thèse consistent à caractériser le plasma d'arc durant la phase de segmentation dans un disjoncteur basse tension par le développement d'un code numérique et d'expériences associées. Dans le **chapitre I**, nous donnons quelques notions fondamentales sur le disjoncteur basse tension et sur les phénomènes présents au sein du plasma. Une étude bibliographique est présentée sur les différentes phases du fonctionnement du disjoncteur basse tension. Le **chapitre II** est consacré à la présentation des aspects théoriques ainsi qu'au développement du modèle de gaine appliqué à une géométrie de la littérature. Les résultats

obtenus sur la configuration de la géométrie de la littérature seront discutés. Nous présentons ensuite **Chapitre III** la méthode expérimentale appliquée sur la maquette des travaux précédents ainsi que sur la nouvelle maquette avec les dispositifs utilisés. Le comportement de l'arc est analysé par les outils de diagnostic sur les différentes configurations. Enfin, la confrontation des résultats obtenus par le modèle et l'expérience feront l'objet du **chapitre IV**.

CHAPITRE I : Généralités – Position du sujet

I.1. L'arc électrique

Un arc électrique peut être produit en séparant deux contacts dans lesquels circule le courant électrique. Le passage à l'arc se fait par une ionisation du milieu par l'intermédiaire d'une décharge électrique transportant un fort courant (plusieurs ampères) sous une faible différence de potentiel (quelque dizaine de volts pour un arc de quelques centimètres). L'arc se caractérise par une colonne et deux zones appelées « gaines » au voisinage de l'anode et de la cathode où se situent les « pieds d'arc ».

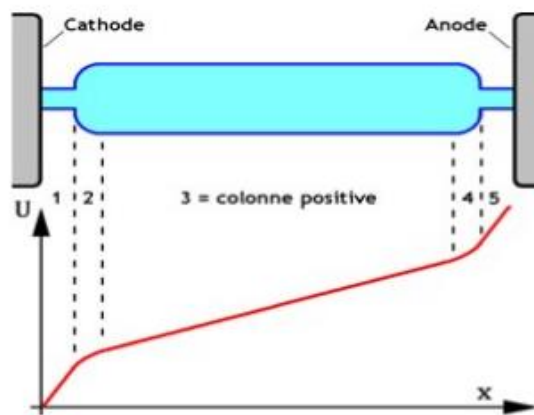


Figure I.1 : Répartition de la tension dans l'espace inter électrode, 1 : zone de charge d'espace ionique, 2 : zone cathodique, 3 : colonne positive, 4 : zone anodique, 5 : zone de charge d'espace électronique [Vac_1]

La répartition de la tension entre les deux électrodes n'est pas linéaire. En effet, à proximité des électrodes, il existe une chute de tension importante (Figure I.1). La tension totale de l'arc U_{arc} peut être exprimée par l'expression :

$$U_{\text{arc}} = U_{\text{colonne}} + U_a + U_c \quad (\text{I.1})$$

U_{colonne} correspond à la tension de la zone positive, U_c représente la tension des zones 1 et 2 côté cathodique et U_a est la tension des zones 4 et 5 côté anodique. La cathode émet des électrons qui sont ensuite collectés par l'anode. L'émission par effet de champs joue un rôle important du fait du fort gradient de tension près des électrodes et devient prépondérante dans les applications où les électrodes sont refroidies. Une des caractéristiques principales de l'arc

électrique est sa tension entre les électrodes. Cette tension diminue lorsque le courant augmente (Figure I.2).

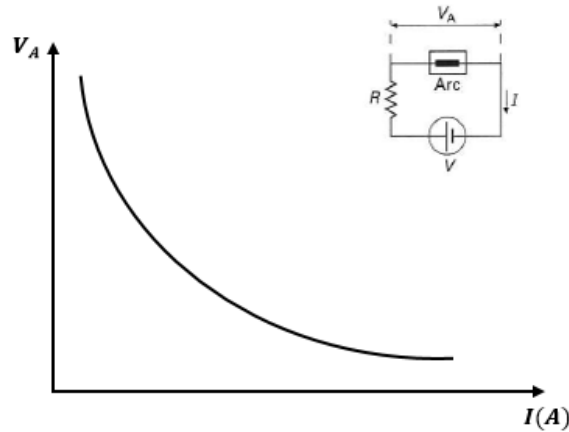


Figure I.2 : Evolution de la tension de l'arc en fonction du courant au sein d'un circuit électrique. [Vac_1]

Ce comportement s'explique par la conductivité électrique du milieu qui augmente avec la température. La tension est le reflet direct de la difficulté du courant à circuler. Lorsque la valeur de l'intensité est basse, le milieu est très peu ionisé et les électrons qui transportent le courant ont une faible densité. Ainsi la conductivité électrique est faible et la tension très importante. Au fur et à mesure que l'on augmente l'intensité, la température du milieu monte et avec elle la conductivité électrique. La densité d'électrons augmente entre les deux électrodes et la tension s'abaisse. Les paramètres courant et tension sont donc essentiels pour caractériser l'état du milieu.

I.2. Le plasma thermique

Un plasma est par définition un milieu gazeux plus ou moins ionisé suivant sa température et sa pression. Il est constitué de molécules, d'atomes, d'ions et d'électrons. Nous nous intéressons dans cette étude aux plasmas thermiques. Ce milieu est considéré être à l'équilibre thermodynamiques local (ETL). Cette hypothèse suppose que toutes les espèces présentent une distribution maxwellienne, qui permet de définir une température unique pour toutes les espèces. Les différentes espèces du milieu ont alors la même énergie cinétique moyenne.

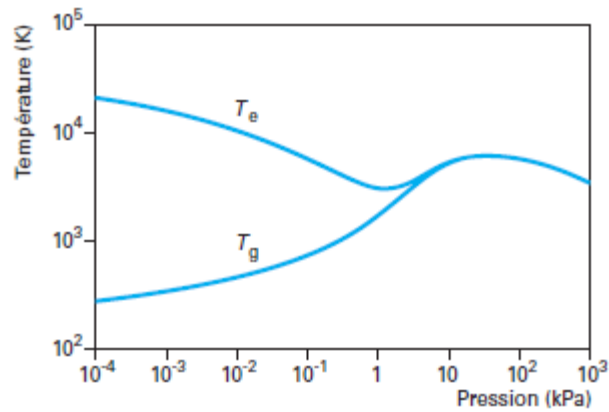


Figure I.3: Évolution des températures des électrons T_e et des particules lourdes T_g avec la pression du milieu. [Vac_1]

Comme nous pouvons le voir sur la Figure I.3, des écarts à l'équilibre thermique peuvent exister entre les électrons et les particules dites « lourdes ». Cependant, plus la pression est élevée et plus les interactions entre les particules sont importantes conduisant à une équipartition de l'énergie et à la possibilité de décrire le milieu par une température unique. Ainsi, à la pression atmosphérique et pour des températures supérieures à 8 kK, l'ETL semble assuré.

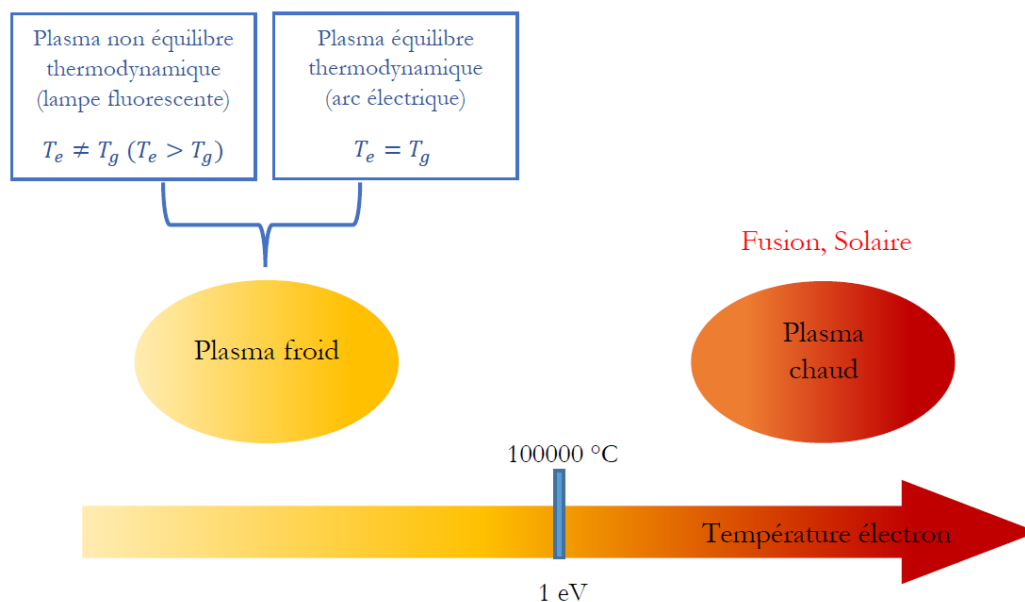


Figure I.4 : Classification des plasmas suivant la température

Les plasmas thermiques sont le plus souvent créés à la pression atmosphérique par l'application d'un arc électrique entre deux électrodes. Le milieu se caractérise par des flux d'énergie importants de l'ordre de 10^7 W/m^2 , par la présence de nombreuses espèces excitées et ionisées, ce qui en fait un milieu très réactif. Les plasmas thermiques sont produits dans des gaz et/ou des mélanges de gaz et se rencontrent dans de nombreuses configurations/systèmes. Le milieu se caractérise par des températures comprises entre $300 \text{ K} < T < \forall 10 \text{ kK}$ pour des pressions allant de la pression atmosphérique à plusieurs centaines de bar. Malgré ces caractéristiques les plasmas thermiques sont référencés dans la catégorie des plasmas froids par opposition aux plasmas chauds que sont les plasmas de fusion rencontrés notamment dans les tokamaks (Figure I.4).

I.3. Zones anodique et cathodique

Nous avons évoqué précédemment la structure générale de l'arc en colonne positive et gaines. Nous nous intéressons à présent plus en détails aux zones anodiques et cathodiques. La Figure I.5 représente la structure de la zone anodique qui réalise la transition entre la colonne du plasma et l'électrode. Sur cette figure, la gaine et la zone de chute libre (zone non collisionnelle) sont appelées la zone de charge d'espace.

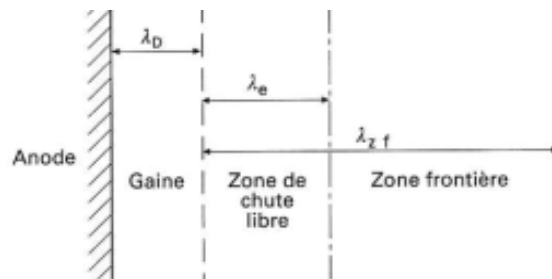


Figure I.5: Structure de la zone anodique [Vac_1].

L'anode est un récepteur d'électrons. La gaine anodique est de faible épaisseur, typiquement d'une dimension égale à la longueur de Debye : λ_D . La zone de chute libre ou de pré-gaine possède une épaisseur de l'ordre du libre parcours moyens des électrons λ_e . Pour un arc à la pression atmosphérique, λ_e est de l'ordre de 10^{-6} m . La zone frontière se trouve entre

la zone de charge d'espace et la colonne positive. Son épaisseur est d'environ 100 à 1000 fois celle de λ_e [Vac_1].

La cathode est la zone d'émission des électrons. La structure de la zone cathodique ressemble à celle de l'anode. La zone la plus proche de la surface du métal est la gaine. Son épaisseur est de l'ordre de grandeur de la longueur de Debye. La zone d'ionisation, est adjacente à la colonne du plasma. Son comportement est voisin de celui de la colonne.

Les zones anodique et cathodique peuvent être caractérisées entre autre par leurs chutes de tension. Beaucoup d'efforts ont été consacrés, par de nombreux auteurs, à la mesure des chutes de tension anodique et cathodique. Cependant, la plupart des mesures étaient limitées aux arcs d'intensités inférieures à quelques centaines d'ampères. L'étude bibliographique nous permet de retenir certaines informations :

- La chute de tension est comprise entre 1-12 V sur des dimensions de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-2} mm pour l'anode et entre 8-20 V pour la cathode dont la taille est proche de celle de l'anode [Gui_1].

- La tension dépend du potentiel d'ionisation et de la nature du matériau de contact.

- Le courant de la cathode a une valeur minimale d'environ 30 mA à la pression atmosphérique [McB_1].

- L'influence de l'intensité de décharge d'un arc sur les chutes de tension a montré que la chute de tension était indépendante du courant si l'intensité était supérieure à 50 A [Zho_1][Hem_1][Hem_2].

- Pour un arc libre dans l'argon, la chute de tension à l'anode et à la cathode est de l'ordre de 24.2 V pour un courant constant de 5 A. Pour un courant supérieur à 50 A, la chute est d'environ 20 V et indépendante du courant [Zho_1].

- Pour des intensités de courant comprises entre 350 A et 1500 A la chute de tension anodique de l'arc dans l'air pour des électrodes en cuivre, argent et tungstène est respectivement 1.2, 4.5 et 1.2 V [Hem_1][Hem_2]. La tension cathodique est de 14 V pour les électrodes en argent [Hem_1].

I.4. Application des arcs électriques

De par leurs caractéristiques, les plasmas thermiques sont présents dans de nombreux systèmes, procédés. Parmi les procédés les plus répandus, on retrouve ceux liés à la découpe et au soudage. Pour ce type de procédé, la configuration utilisée est celle de la torche à plasma. Il faut distinguer la torche à arc soufflé (A) de la torche à arc transféré (B).

(A) Dans la configuration de torche à arc soufflé, l'arc est établi entre la cathode et une tuyère annulaire mise au potentiel anodique. Un gaz injecté en position amont au travers de l'arc électrique permet de générer un jet de plasma qui sera ensuite utilisé pour ses propriétés [Cou_1]. A titre d'exemple on peut citer le procédé de projection où des particules sont injectées à la sortie de la torche pour être ensuite déposées sur un substrat [Bau_1]. Ce type de procédé peut aussi être utilisé dans le cas des traitements de déchets ou bien encore dans les hauts fourneaux. Dans ce dernier cas, les puissances mises en jeu sont très importantes et peuvent atteindre le MW contrairement aux applications de projection dont la puissance avoisine la dizaine de kW.

(B) La seconde configuration est celle de l'arc transféré. L'arc est établi entre la cathode et l'anode située à l'extérieur de la torche. Le gaz est toujours injecté en position amont. Le procédé le plus répandu est celui de la découpe de plaques d'acier. L'arc électrique amène l'énergie à la plaque à couper. Les flux sont augmentés par la vitesse du gaz. La quantité de mouvement est aussi utilisée pour injecter le métal en fusion et décrocher les scories situées sous la plaque [Fre_1][Gir_1].

Nous venons d'illustrer deux procédés dans lesquels le plasma thermique créé par arc électrique était présent. Il existe aussi des situations naturelles ou encore des systèmes pour lesquels les plasmas thermiques sont présents. Ainsi, dans certains systèmes, l'arc électrique n'est pas désiré mais il est présent. On utilise alors ses propriétés pour optimiser ou produire un effet. Dans les deux systèmes les plus connus, on retrouve (C) le disjoncteur haute tension et (D) le disjoncteur basse tension. Dans ces deux dispositifs, lors d'un défaut dans le circuit ou bien par l'intervention volontaire d'ouverture du circuit, un arc électrique se crée entre les deux contacts, conduisant à un pont fondu et à la création d'un plasma thermique. Tant que l'arc est présent le système n'est pas ouvert et les installations et les personnes ne sont pas

protégées, le courant continuant à passer.

(C) Les disjoncteurs à haute tension les plus répondus sont ceux à auto-soufflage. Ils sont constitués d'une enceinte remplie préférentiellement de SF₆ à une pression voisine de 5 bars. Lors d'un défaut ou d'une ouverture volontaire, un arc est créé. Le courant est alternatif et pendant son évolution temporelle les électrodes continuent de s'écarter. Lors de la phase de fort courant se produisent de nombreux mécanismes tels que l'érosion des buses en téflon. Les mouvements hydrodynamiques sont tels que du gaz chaudensemencés en C₂F₄ vient faire monter la pression dans les volumes de chauffage. Lors du passage par le zéro du courant, la section de l'arc diminue, et la pression entre les deux électrodes s'abaisse conduisant à une vidange du gaz contenu dans les volumes de chauffage qui vient souffler l'arc et tenter de l'éteindre. Le milieu plus ou moins ionisé est soumis entre les électrodes à la tension du réseau. Il peut donc y avoir un réamorçage ou un recouvrement diélectrique. Tous ces mécanismes sont fonction d'une dualité entre les termes d'apport d'énergie (effet Joule) et ceux de perte (Rayonnement, convection). Par les nouveaux enjeux notamment liés aux effets de serre, de nombreuses études sont actuellement menées sur l'optimisation et la compréhension [Gon_1][Gon_2][Rei_1] ou bien sur de nouveaux gaz/mélanges [Cre_1][Cre_2] en vue de substituer le gaz de remplissage par un autre gaz moins néfaste qui posséderait des propriétés similaires.

(D) Un autre système, que nous retrouverons au cours de ce manuscrit, est le disjoncteur basse tension. Contrairement au disjoncteur haute tension, le milieu est constitué d'air à la pression atmosphérique. Lors de l'ouverture des contacts, un arc électrique est aussi généré. Il doit être éteint le plus rapidement possible. Pour cela on utilise différentes forces : la force de pression et la force de Lorentz. Ces deux forces poussent, par le biais de deux rails, l'arc vers une chambre de coupure qui comporte des séparateurs. La tension de l'arc est constituée de la tension de la colonne ainsi que de celles des chutes anodiques et cathodiques. Ainsi lorsque l'arc entre dans la chambre de coupure sa tension se trouve rapidement augmentée par l'addition de chutes de tension supplémentaires, chacun des séparateurs étant sur chacune de ses faces cathode ou anode. La tension aux bornes de l'arc devient rapidement supérieure à celle du réseau créant une limitation du courant jusqu'à l'extinction. On voit bien ici que l'enjeu

consiste à faire se déplacer le plus rapidement possible cet arc vers la chambre de coupure. Il faut donc que le design soit efficace et que les forces, conduisant à son déplacement, soient optimisées. A titre d'exemple nous ne donnons ici que quelques références sur des études menées par le biais d'expériences et de modélisations [Lin_1][Mut_1][Yan_1]. Une liste plus exhaustive sera donnée lors de l'étude bibliographique.

Finalement il existe aussi des configurations naturelles de plasmas thermiques en présence d'un arc électrique. Parmi ces « plasmas naturels » nous pouvons citer l'arc de foudre. Lors d'un orage le milieu après le passage de streamers devient ionisé permettant à l'arc de foudre de se propager. Ce type de phénomène est très étudié dans le milieu aéronautique notamment pour la protection des aéronefs [Lag_1][Tes_1]. Contrairement aux configurations précédentes, l'arc n'est en rien maîtrisé et les études portent sur le moyen de se protéger de ses effets. Ainsi des courants normatifs sont définis afin de caractériser les effets sur les matériaux et minimiser les dégâts. Dernièrement, avec le développement de l'avion tout composite, on observe que les charges ont du mal à s'évacuer et les endommagements sur les avions peuvent être dramatiques. Les dégâts sont plus liés aux risques d'étincelage dans les réservoirs qu'à l'endommagement de la voilure.

Nous avons pu voir au travers de ces quelques exemples que les plasmas thermiques sont présents dans de nombreuses configurations/systèmes. Dans le cadre de cette thèse, nous nous focaliserons sur le disjoncteur basse tension.

I.5. Le disjoncteur basse tension (DBT)

Le DBT est un appareillage électrique de protection dont la fonction consiste à ouvrir manuellement le circuit par action de l'utilisateur ou automatiquement en cas de défaut électrique, à faire chuter le courant à zéro et de garantir l'isolation après coupure.

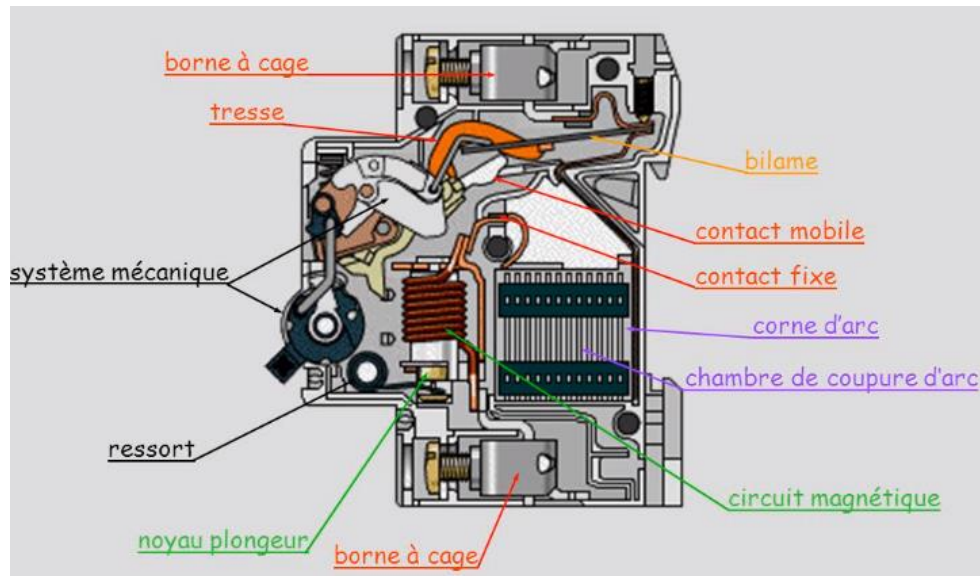


Figure I.6 : Représentation interne d'un disjoncteur basse-tension [Car_1]

On peut citer 3 types de défauts : court-circuit, surcharge ou défaut d'isolation. Le DBT protège des réseaux électriques pour des gammes de tension inférieures au kilovolt. La Figure I.6 présente la structure interne d'un disjoncteur basse tension. Sur cette figure, nous pouvons repérer différents éléments tels que: les module thermique, magnétique, ou bien mécanique. La chambre de coupure est constituée par des plaques métalliques parallèles. Différents noms sont donnés à ces plaques tels que : séparateurs, splitters, déions. Le processus d'ouverture est différent selon les cas: la protection contre une surcharge est assurée par le module thermique constitué du bilame. Lors de sa déformation le bilame vient appuyer sur le mécanisme d'ouverture des contacts. L'ouverture en cas de surcharge est plutôt lente. La protection contre le court-circuit est assurée par un module magnétique constitué d'une bobine. En cas de court-circuit, une forte variation de courant se produit dans le circuit engendrant alors dans le solénoïde le mouvement du percuteur qui vient ouvrir les contacts à grande vitesse.

I.5.1. Types de DBT

Les principaux types de DBT sont le disjoncteur isolé (Insulated Case Circuit Breaker : ICCB), le disjoncteur à boîtier moulé (Molded Case Circuit Breaker : MCCB) et le disjoncteur miniature (Miniature Circuit Breaker : MCB).

Type	Courant nominal	Tension AC	Pouvoir de coupure	Domain usage
MCB	< 100 A	200-800 V	25 KA-100 KA @480 V	Installations domestiques, commerciales et industrielles de faible puissance
MCCB	< 1000 A			Tableau électrique basse tension, centre de commande des moteurs et armoire de commande
ICCB	200-4000 A			Tableau électrique basse tension, centre de commande des moteurs et certains commutateurs de transfert

Tableau I.1 : Liste des disjoncteurs basses tensions et de leurs caractéristiques [Fre_2]

Leurs caractéristiques sont présentées dans le Tableau I.1. Parmi ces différentes gammes de DBT, notre étude est focalisée sur le disjoncteur miniature qui est le système le plus familier dans le domaine domestique.

I.5.2. Technologie de coupure

Dans le disjoncteur basse tension, une chambre de coupure est utilisée pour accélérer l'extinction de l'arc. Le principe fondamental de la chambre de coupure consiste à déplacer l'arc vers une série de plaques métalliques afin de segmenter l'arc en plusieurs parties. La technique de coupure est basée sur la limitation de courant, ce qui signifie que la valeur crête

du courant d'arc est bien inférieure à la valeur de courant prospectif. Le principe de la limitation est le suivant :

Soit un circuit alternatif de tension e , débitant dans une charge Z à travers un dispositif de protection A , de résistance équivalente R et d'inductance L . Lorsqu'un court-circuit apparaît aux bornes de la charge (Figure I.7), le circuit est gouverné par la relation :

$$e = Ri + L \frac{di}{dt} + U_a \quad (\text{I.2})$$

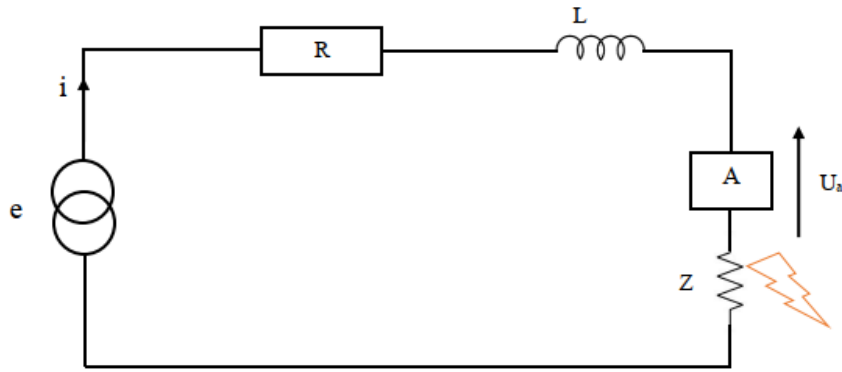


Figure I.7. Schéma d'un « circuit défaut »

Le maximum de courant limité est atteint lorsque la tension U_a est égale à la tension de la source e . Sur la Figure I.8 le point « P » représente le point d'intersection des courbes de la tension U_a et de la tension « e ». Les courbes montrent que pour obtenir une limitation correcte, il est indispensable que l'instant de l'intersection (Point P) intervienne bien avant le maximum du courant présumé (donc < 5 ms en 50 Hz) d'où l'intérêt d'une augmentation de la tension U_a la plus rapide possible.

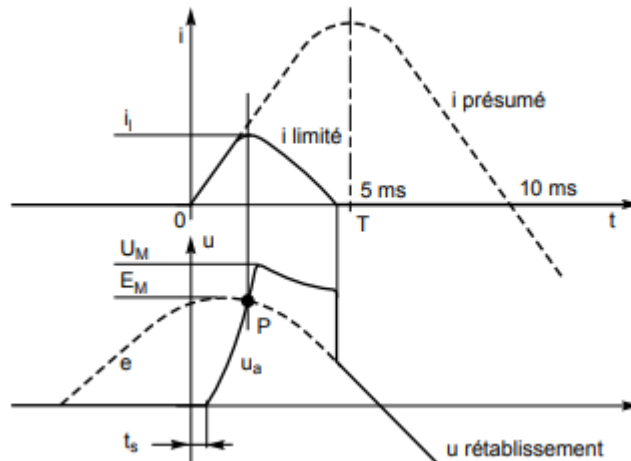


Figure I.8. Principe de la limitation de courant [Sch_1]

Pour obtenir une décroissance du courant de court-circuit, il faut que la tension maximale U_M introduite par U_a soit supérieure à la tension maximum e de la source. Par conséquent, les deux conditions à respecter par U_a pour une limitation correcte sont :

- (A) Développement rapide de la tension U_a obtenue dans le disjoncteur par une forte accélération de l'arc après sa naissance pour avoir le temps t_s minimum ;
- (B) Augmentation de la tension de l'arc pour avoir $U_M > e$ par allongement, fractionnement et refroidissement de l'arc dans la chambre de coupure.

I.5.3. Augmentation de la tension de l'arc

La limitation du courant est due à l'augmentation de la longueur de l'arc ainsi que de la tension à ses bornes. La longueur de l'arc peut être augmentée par la commutation de l'arc et son allongement par des rails divergents, cependant le mécanisme le plus efficace pour une augmentation rapide de la tension réside dans la phase de segmentation par les séparateurs où la tension d'arc est augmentée par des chutes de gaines anodique et cathodique [Mut_2]. Les séparateurs généralement sont en acier en raison de sa propriété ferromagnétique qui favorise l'insertion de l'arc dans la chambre de coupure [Lin_1]. L'évolution de la tension de l'arc entre deux contacts est représentée sur la Figure I.9. De gauche à droite : dans le cas où les contacts sont fermés, le courant circule et la tension aux bornes des contacts est nulle. Après l'ouverture

des contacts, l'arc crée une différence de potentiel U_1 qui est la somme de la chute de tension anodique et cathodique (U_{ac}) et de la tension de la colonne positive. La tension de la colonne dépend de sa longueur (L) et du champ électrique entre les contacts (E_{col}). Une augmentation progressive de l'écartement entre les contacts induit une augmentation de la tension ($U_2 > U_1$). En présence d'un séparateur (épaisseur h), l'arc est segmenté. La tension de l'arc U_3 augmente en raison des chutes additionnelles. C'est ce principe qui est utilisé dans la chambre de coupure du DBT.

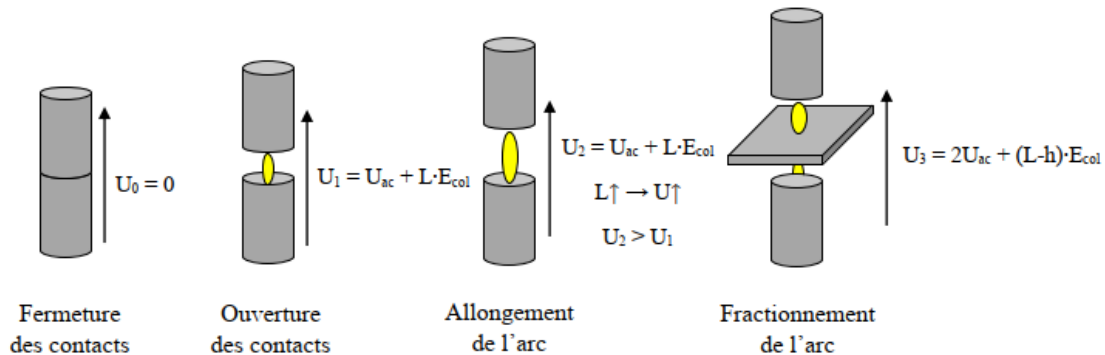


Figure I.9 : Évolution de la tension de l'arc entre deux contacts [Bau_2]

I.5.3.1. Commutation et déplacement de l'arc

Lors de l'ouverture des contacts, sous l'effet du champ magnétique et de la force de pression, l'arc est allongé et déformé (Figure I.10). Il se déplace ensuite vers la chambre de coupure. L'efficacité de la coupure dépend du temps nécessaire pour couper le courant, et donc du temps d'ouverture du contact et du temps de déplacement de l'arc entre les contacts et les séparateurs.

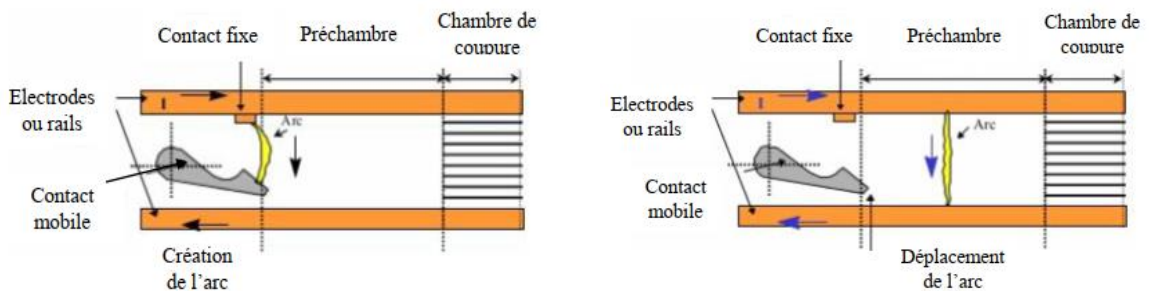


Figure I.10: Création de l'arc par ouverture du contact et déplacement vers la chambre de coupure dans la géométrie simplifiée du MCB

La Figure I.10 représente une géométrie simplifiée du MCB avec deux rails en parallèle et un bras rotatif pour le contact mobile. Côté gauche de la Figure I.10, l'arc se situe entre le contact mobile et le contact fixe. La colonne d'arc, galbée, chauffe le milieu. A un moment donné, l'arc va sauter sur le rail du bas, c'est la phase de la commutation. Poussé par différentes forces, il se déplace ensuite jusqu'à la chambre.

Les études sur le temps d'ouverture des contacts reviennent à étudier le temps d'immobilité de l'arc qui correspond au temps de stagnation sur les contacts. Ce temps joue un rôle important pour la limitation du courant et l'érosion des contacts. Le temps d'immobilité dépend de nombreux paramètres tels que : la vitesse d'ouverture du contact mobile, la nature des contacts, les conditions d'échappement du gaz de la chambre ainsi que de la polarité des contacts durant la phase de commutation. Le temps de déplacement peut être affecté par le champ magnétique, la géométrie de la chambre aussi que par les conditions d'échappement de gaz. Ces temps peuvent être appréhendés par les courbes de la tension d'arc mesurée ou par caméra rapide. Différents travaux expérimentaux et théoriques sont menés afin d'accéder à ces grandeurs.

Lindmayer [Lin_2] et Belbel [Bel_1] ont étudié expérimentalement l'influence de la vitesse d'ouverture et de la nature des contacts sur le temps d'immobilité. Pour différents matériaux de contact: cuivre, argent, nickel, et cadmium, Lindmayer a montré que le temps d'immobilité était plus faible pour le cuivre et que l'utilisation du cadmium ou de matériaux contenant de l'oxyde de cadmium donnaient un temps d'immobilité plus grand que lors de l'usage du nickel et de l'argent. Par contre, pour des vitesses d'ouverture de contact supérieures à 6 m/s, le temps d'immobilité est peu dépendant du courant prospectif de court-circuit, de la vitesse d'ouverture ou bien de la nature des contacts [Bel_1]. Le cuivre est fortement sensible à l'érosion due à la présence de l'arc et la commutation commence plus tôt lors de contacts contenant de l'argent carboné [Tou_1].

Le groupe de McBride a aussi étudié expérimentalement la commutation de l'arc [McB_7] [McB_2][McB_3][McB_4] [Pec_1] et son déplacement [Wea_1] [McB_5] [McB_6] [McB_1] [McB_8][McB_9] par la mise en place d'un système d'imagerie rapide. Concernant la commutation, ils ont montré que l'augmentation de la vitesse d'ouverture diminuera le temps d'immobilité de l'arc sur les contacts. Ils ont aussi relevé que la nature des contacts et des rails influençait la vitesse de déplacement de l'arc. La configuration des échappements de gaz est aussi essentielle pour le déplacement des pieds d'arc comme a pu le montrer McBride [McB_3].

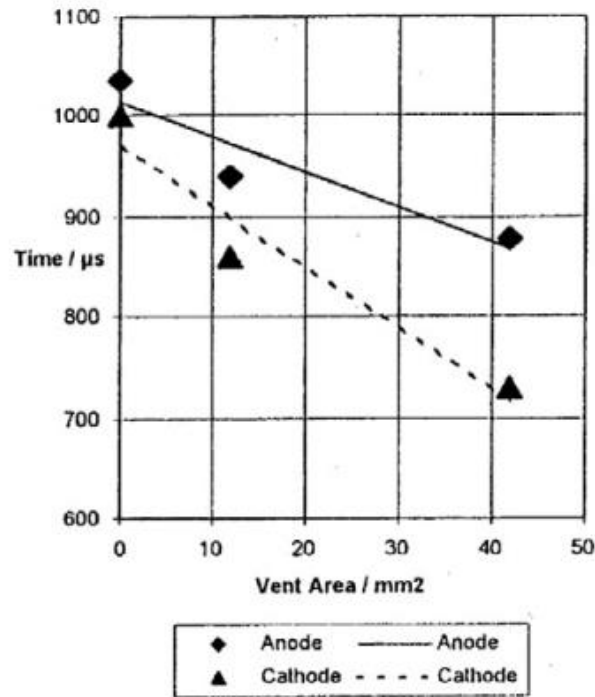


Figure I.11 : Influence de la surface de bouchage sur le déplacement de l’arc [McB_3]

La Figure I.11 présente le temps que l’arc met pour se déplacer de 10 mm à partir de sa position initiale suivant la surface des bouchages. Plus les bouchages de sortie sont ouverts, moins l’hydrodynamique est contraint et plus les pieds d’arc, quelle que soit leur polarité, se déplacent rapidement. L’arc se déplace plus vite pour la polarité cathodique (Figure I.11) [McB_3].

Dans l’équipe de Rong, un modèle 3D d’arc, dans une géométrie simplifiée de chambre de disjoncteur, a été proposé pour étudier le mécanisme d’ouverture [Wu_2][Wu_3][Wu_4][Ron_3] et le déplacement de l’arc [Ron_1][Ron_2][Li_1][Li_2][Wu_1][Yan_2][Wu_5][Ma_1]. L’ouverture des contacts est provoquée par la rotation du contact mobile. Le domaine de calcul est divisé en deux parties : une zone déformée et une zone fixe.

La géométrie et les maillages sont illustrés sur la Figure I.12. Les dimensions de la géométrie sont de 80 x 15 x 10 mm suivant l’axe x (longueur), y (hauteur), z (largeur). Lors de la simulation, le contact mobile (1) et le rail supérieur (4) sont en polarité anodique, le contact fixe (2) et le rail inférieur (3) en polarité cathodique. La simulation a été réalisée en considérant

un champ magnétique externe constant de 5.5 mT et un courant de 1.5 kA [Wu_2][Wu_3][Wu_4]. La Figure I.12 montre une partie des maillages en 2D sur le plan (xy). Autour du contact mobile, le nombre et la forme des cellules peuvent être ajustés pendant le calcul (Maillage adaptatif). Le nombre de cellules total est d'environ 132850. Entre les deux maillages fixe et adaptatif se trouve une interface fluide qui contraint les deux zones.

Les résultats ont montré que l'augmentation de la vitesse d'ouverture des contacts et du champ magnétique externe pouvait réduire le temps de la commutation.

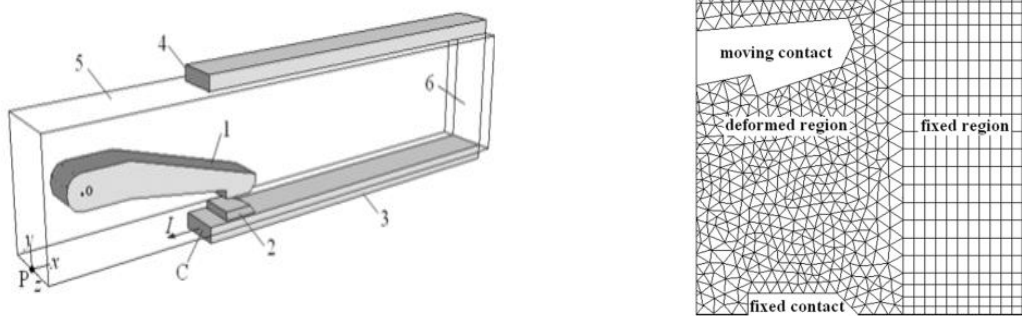


Figure I.12: Domaine de calcul avec le contact mobile et maillage sur le plan (xy) [Wu_2]

Sur la droite de la Figure I.13, l'évolution de la tension de l'arc, obtenue par la simulation est représentée. La grandeur ω représente la vitesse d'ouverture du contact mobile. La tension de l'arc augmente avant la commutation et lors de l'allongement de l'arc [Wu_2][Wu_3][Ron_3]. Entre $t = 0$ à t_1 (1 ms), la tension de l'arc augmente linéairement, l'arc est positionné entre les deux contacts et présente une forme cylindrique. Après t_1 , pendant l'ouverture du contact, l'arc commence à se déplacer sur le contact mobile. La contribution de la tension provient donc de l'étirement de l'arc mais aussi des prémisses du galbe. Entre les instants t_2 et t_3 on observe un changement de pente dans l'évolution de la tension qui correspond à l'instant où l'arc quitte la pastille du contact fixe. Dans cet intervalle temporel, l'arc est attaché sur le bord du contact mobile. Son galbe lui permet d'approcher le rail supérieur. On observe une augmentation rapide de la tension jusqu'à l'instant t_2 où l'arc commute sur le rail supérieur. Après 2.3 ms l'arc est totalement accroché sur le rail supérieur, et se déplace sous l'influence des forces.

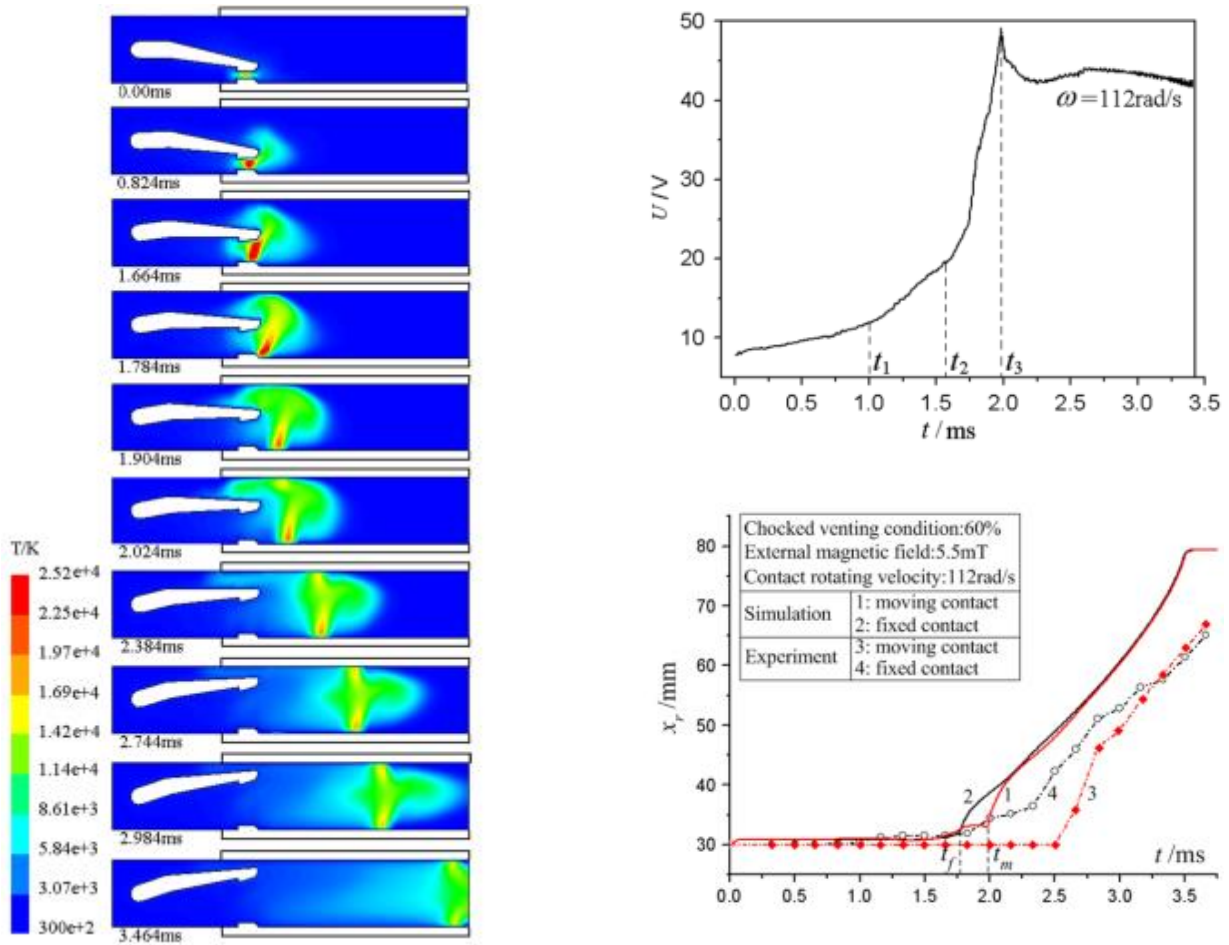


Figure I.13: Champ de température du modèle (gauche) et évolution de la tension pour le modèle (droite supérieure) et vitesse de déplacement du modèle et l'expérience (Droite inférieure) [Wu_2]

Une évolution similaire, a été montrée par l'expérience (Figure I.13 droite inférieure) où les positions des pieds d'arc à partir du contact mobile et du contact fixe sont représentées et comparées avec celles du modèle. La position x_r représente la position de l'arc suivant l'axe longitudinal du déplacement de l'arc. Les courbes rouges sont relatives au déplacement de l'arc à partir du contact mobile. Les résultats entre le modèle et l'expérience diffèrent. En effet, expérimentalement l'arc ne se déplace qu'à partir de 2.5 ms. De façon générale un comportement analogue est obtenu lors de la comparaison des résultats expérimentaux et ceux du modèle, cependant la simulation conduit à un déplacement plus rapide (Courbes 1 et 2).

Après la commutation de l'arc, le déplacement a été étudié en fonction de différents paramètres, tels que le champ magnétique, la géométrie de la chambre et la condition

d'échappement de gaz. L'utilisation d'un champ magnétique externe [Ron_1][Wu_2] permet d'augmenter la force magnétique et tend à accélérer le processus de déplacement.

Li et al. [Li_1] ont utilisé pour leurs simulations et études expérimentales la géométrie simplifiée de la Figure I.14 pour étudier les effets de la position initiale de l'arc, de la surface de bouchage et la nature du milieu sur son comportement. Sur cette figure, l'arc se déplace de la gauche vers la droite. Les dimensions de la géométrie sont 50 x 8 x 8 mm pour l'axe x, y, z. La colonne d'arc est initialisée entre l'anode et la cathode par un hexaèdre de 8mm de hauteur avec une base de 4 mm². Le bouchage (Venting sur la Figure I.14) se situe au centre de l'extrémité (côté droit) et sa surface peut être ajustée. La position initiale de l'arc se situe ou bien au milieu de la chambre, ou bien elle est décalée de +10 mm (vers le bouchage) ou de -10 mm selon l'axe x par rapport à la position centrale. Les résultats indiquent que plus la distance entre le bouchage et l'arc est importante plus le déplacement de l'arc est rapide.

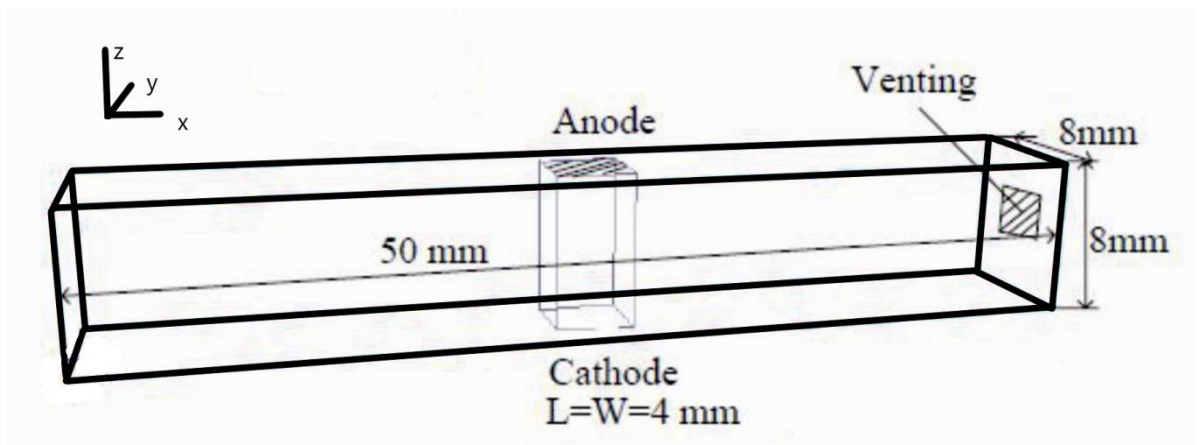


Figure I.14: Géométrie du modèle de Li [Li_1]

Les positions de la colonne d'arc en fonction du temps, pour différentes surfaces de bouchage pour la simulation et pour l'expérience sont illustrées sur la Figure I.15. L'augmentation la surface d'ouverture de bouchage entraîne une augmentation de la vitesse de déplacement de l'arc [Li_1][Li_2][Wu_5][Shi_1]. Ceci est dû à la répartition de la pression à l'intérieur de la géométrie. Le modèle a été validé par l'expérience (Figure I.15) où le même comportement est observé. La vitesse de déplacement peut être réduite en élargissant la chambre [Wu_5].

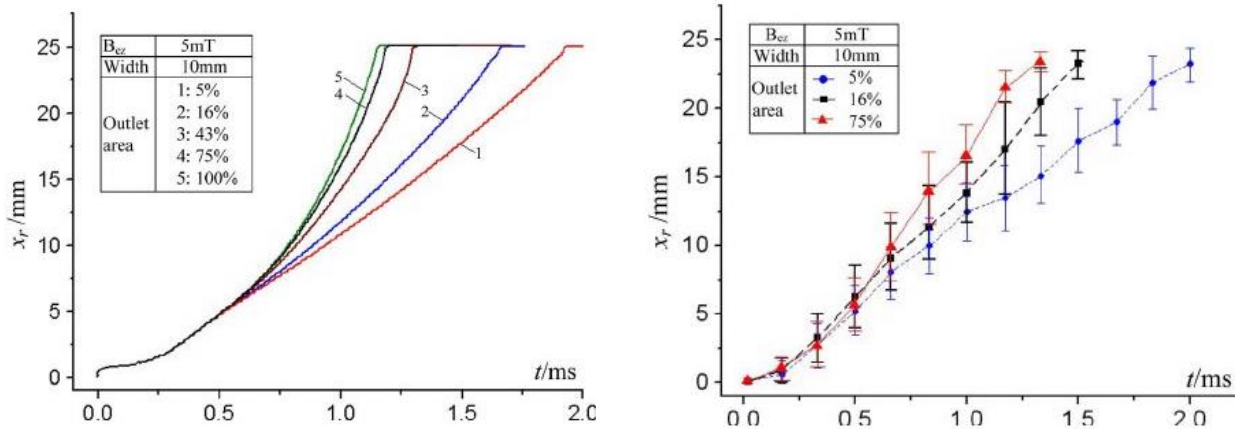


Figure I.15 : Positions de l'arc en fonction du temps obtenues par la simulation et par l'expérience [Wu_5]

La surface d'échappement n'est pas le seul paramètre influant sur le déplacement de l'arc. En générale, les parois du DBT sont constituées de polymères tels que le polyoxyméthylène (POM) et le polyamide6 (PA6). Lors du déplacement de l'arc, le polymère est ablaté. Des vapeurs organiques sont générées et modifient les propriétés thermodynamiques de l'arc. Les vapeurs organiques contiennent du H_2 , qui a une conductivité thermique élevée, ce qui a pour conséquence d'étaler l'arc et de le refroidir. De plus, ces vapeurs organiques augmentent la pression dans la chambre, ce qui permet d'accélérer la vitesse de déplacement ainsi que la tension de l'arc [Li_1][Li_2][Ron_1][Yan_2][Ma_1].

1.5.3.2. Segmentation de l'arc

La Figure I.16 illustre la phase de segmentation de l'arc. L'étude de cette phase est complexe en raison des dimensions de la chambre et de l'existence des gaines proches des électrodes. Cependant cette zone du dispositif est essentielle pour parfaire la limitation du courant. Ainsi de nombreuses contributions menées par le biais de modèles et d'expériences peuvent être trouvées dans la littérature.

Pour la modélisation de cette phase, différentes approches seraient possibles : une approche qui consisterait à décrire finement la gaine et la pré-gaine [Ben_1] mais qu'il est difficile à mettre en œuvre dans une configuration réelle de disjoncteur base tension et une approche plus

macroscopique basée sur des constatations expérimentales pour prendre en compte la chute de tension supplémentaire provenant de la présence d'un rail ou d'un séparateur [Lin_1]. Lindmayer et al. [Lin_1] ont proposé un système expérimental avec une maquette simplifiée (Figure I.17) pour étudier le processus de segmentation de l'arc.

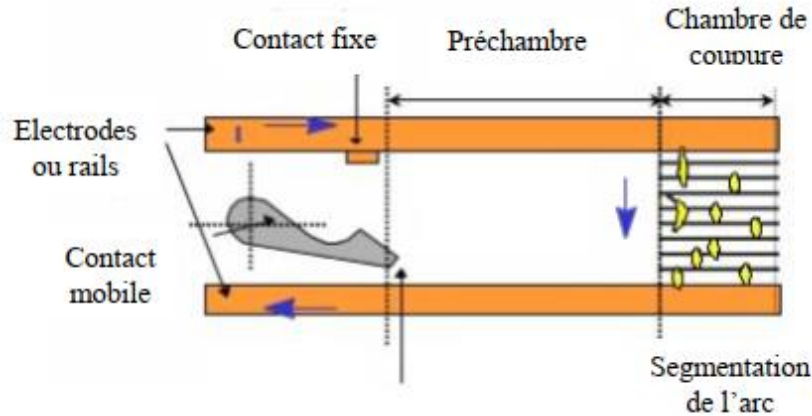


Figure I.16 : Segmentation de l'arc dans la chambre de coupure

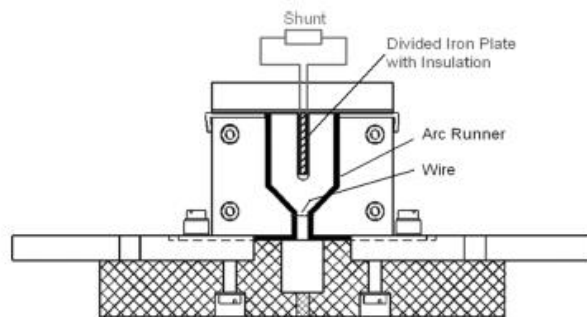
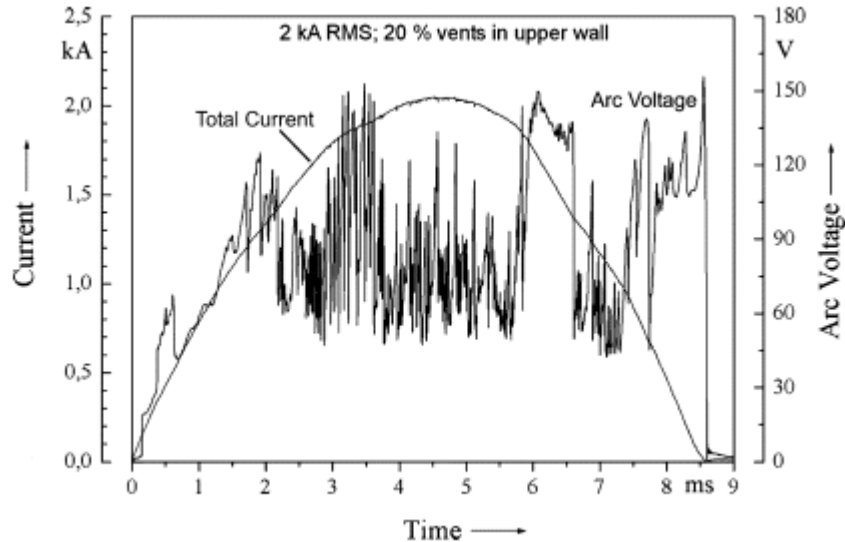


Figure I.17. Système expérimental avec des rails divergents [Lin_1]

La maquette simplifiée de 12 mm de large est composée de deux rails divergents en cuivre d'épaisseur et de largeurs respectives de 1.5mm et 4 mm. Le séparateur a une épaisseur de 3 mm. Il est constitué de deux plaques d'acier de 1 mm d'épaisseur séparées d'un matériau isolant de 1mm. Le séparateur en acier est connecté avec une résistance de shunt ($0.1 \text{ m}\Omega$) qui permet de mesurer le courant qui passe. Cette configuration a été utilisée avec un et deux séparateurs. Le courant et la tension sont relevés et une caméra rapide est mise en place pour étudier le

comportement de l'arc et le processus de la segmentation. L'évolution des mesures électriques est représentée sur la Figure I.18.



La Figure I.18 représente les mesures courant et tension pour le cas avec deux séparateurs. La configuration expérimentale est celle de la Figure I.17 adaptée pour un et deux séparateurs chacun d'épaisseur de 2 mm. Le courant maximum est de 2 kA. Le bouchage est ouvert à 20%. L'arc est initié par un fil fusible, cependant sa nature et son diamètre ne sont pas précisés. Sur la courbe de tension (Figure I.18), le pic autour de 0.6 ms correspond à l'explosion du fil, ensuite l'arc se déplace vers le haut de la chambre. De $t = 2.3$ ms à 5.9 ms, la tension diminue à 60 V due à des claquages vers l'arrière. A partir de 6 ms l'arc est entré dans les séparateurs comme on peut l'observer sur les images de la Figure I.19. A partir de cet instant, l'arc est segmenté cependant la partie centrale de l'arc stagne devant le séparateur.

On peut observer une déformation de l'onde de courant par l'effet de limitation due à l'augmentation de la tension.

Le déplacement de l'arc entre les rails et dans la chambre de coupure est montré sur la Figure I.19. Après avoir été allongé et galbé, l'arc est segmenté par les séparateurs. Les portions d'arc situées entre les rails et les séparateurs se déplacent jusqu'au fond de la chambre, tandis que l'arc central, positionné entre les deux séparateurs, stagne sur le devant des séparateurs. Les résultats expérimentaux montrent qu'il y a deux chemins de courant

simultanés au moment où l'arc communique avec les séparateurs. Ces observations sont schématisées par la Figure I.20. Les deux chemins sont représentés par les traits noirs continu et pointillé. Le séparateur est un obstacle pour le déplacement de l'arc, il bloque le mouvement de la colonne mais les pieds d'arc avancent. Ceci conduit à un allongement de la colonne et donc à une augmentation de la tension d'arc.

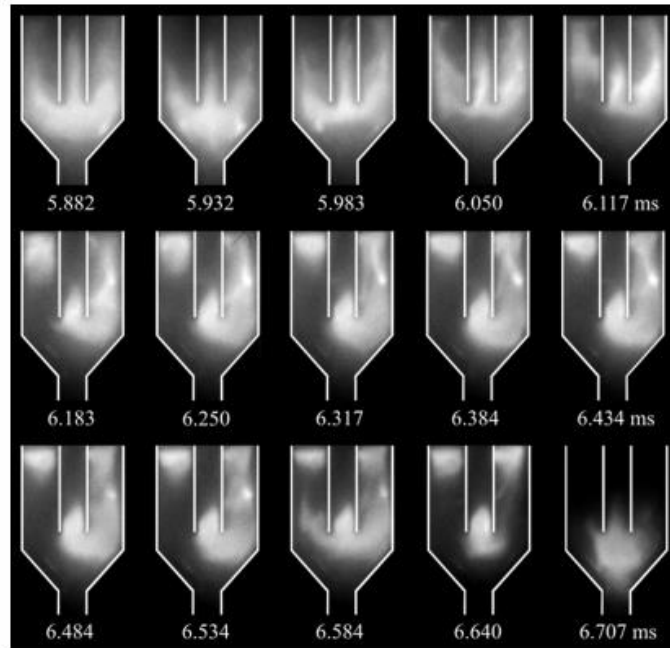


Figure I.19: Visualisation du déplacement et de la segmentation de l'arc par imagerie [Lin_1]

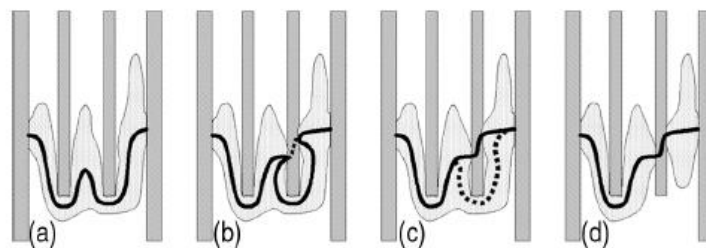


Figure I.20. Principe du fractionnement de l'arc par les séparateurs [Lin_1]

A un instant donné, deux nouveaux pieds d'arc sont créés sur le séparateur, l'arc peut alors de nouveau se déplacer. Afin de rendre compte de ce comportement de l'arc, Lindmayer [Lin_1] a proposé un modèle. La géométrie d'étude est constituée d'une chambre avec deux rails en parallèle en présence d'un seul séparateur. Afin de décrire la chute de tension au niveau des

électrodes et de représenter l'accrochage du pied d'arc, une conductivité électrique est définie par la caractéristique de la chute de tension en fonction de la densité de courant sur une épaisseur de gaine à 0.1 mm (Figure I.21). Les chutes de tension anodique et cathodique sont de 15 à 20 V et dépendent du matériau de l'électrode, du courant d'arc et de la polarité [Lin_1]. Cependant dans cette approche, bien que les phénomènes soient différents sur l'anode et la cathode, les pieds d'arc sont traités de la même manière.

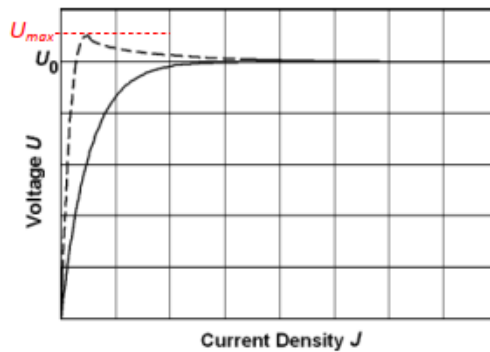


Figure I.21. Caractéristique de la tension de gaine en fonction de la densité de courant pour la détermination de la résistivité dans la gaine [Lin_1]

Sur la Figure I.21, un exemple de variation de la tension en fonction de la valeur de la densité de courant est donné. La densité du courant tend vers zéro lorsque la valeur de la tension est faible. Lorsque le courant augmente, la valeur de la tension passe par un maximum noté U_{max} . Elle se stabilise ensuite à une valeur U_0 qui représente la chute de tension anodique ou cathodique. Mutzke [Mut_1][Mut_2] a appliqué l'approche proposée par Lindmayer et approfondi l'étude. Sur la Figure I.22, quatre caractéristiques de la tension en fonction de la densité du courant sont présentées. Elles sont relevées expérimentalement pour différentes configurations et matériaux, mais ceux-ci ne sont pas précisés par l'auteur [Mut_1]. Chaque courbe possède une valeur maximale de la tension U_{max} (« a » : 22.3 V, « b » : 19.7 V, « c » : 17.1 V, « d » : 10 V) pour une densité du courant de l'ordre de 15 kA/m². Les tensions tendent vers une valeur constante $U_0 = 10$ V pour une densité de courant supérieure à 150 kA/m².

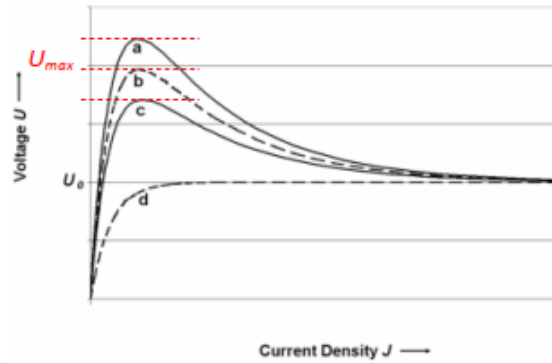


Figure I.22 : Caractéristiques tension-densité de courant pour le modèle du pied d'arc [Mut_1]

Ces différentes caractéristiques (Figure I.22) ont été testées dans le modèle de Mutzke [Mut_1] dont la géométrie est présentée sur la Figure I.23. Elle est constituée de deux rails parallèles de 4 x 1.5 x 16 mm (largeur, épaisseur, longueur) distants de 8 mm. Les dimensions du séparateur sont 4 x 2 x 7 mm. Les rails et le séparateur sont considérés en cuivre. Le courant est de 100 A en DC. La chambre est totalement fermée. Les résultats du modèle décrivant l'arc, pour les différentes courbes de la Figure I.22, peuvent être synthétisés par le Tableau I.2. On trouve dans la première colonne : l'augmentation de la tension d'arc avant la segmentation, le temps et la position du premier pied d'arc sur le séparateur, la densité de courant maximale du pied d'arc ainsi que l'apparition des pieds d'arc en parallèle.

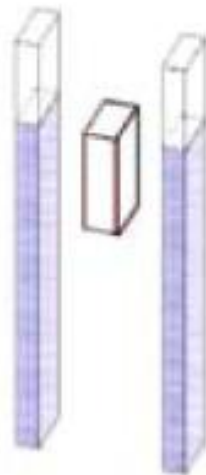


Figure I.23 : Géométrie du modèle [Mut_1]

Lors de l'utilisation de la courbe « a » la tension est trop élevée pour conduire à l'accrochage du pied d'arc sur le séparateur. Pour la courbe « b », la valeur de la tension nécessaire pour un accrochage de l'arc reste élevée. L'arc est donc plus galbé et son accrochage sur le séparateur retardé par rapport à la courbe « c » et « d ». La distance entre la position du premier pied d'arc et la position du séparateur est plus grande pour « b », la densité de courant maximale est aussi plus élevée. Par conséquent, dans le cas où l'on ne prend pas en compte de chute de tension, l'arc ne se galbe pas devant le séparateur, le pied d'arc se forme immédiatement sur le bord du séparateur. L'apparition des pieds d'arc en parallèle sur le séparateur ne peut être observée que pour les cas où U_{\max} est supérieure à 10 V.

Cette première étude avait pour finalité de démontrer la différence des comportements suivant la courbe utilisée. Les auteurs ont ensuite fait une confrontation entre les résultats expérimentaux et ceux du modèle. Pour cela de nouvelles conditions ont été appliquées. La courbe « b » a été utilisée pour le modèle et une variation temporelle du courant ($I_{\max} = 1 \text{ kA}$) telle que dessinée sur la Figure I.25 a été appliquée.

	Arc root model				
	Curve a	Curve b	Curve c	Curve d	without arc root model
<i>Voltage increase before subdivision</i>	No subdivision of arc	8.7 V	6.7 V	1.6 V	0 V
<i>Time first arc root formation</i>		450 μs	390 μs	300 μs	210 μs
<i>Location of first arc roots above edge of plate</i>		3.9 mm	2.5 mm	0.8 mm	0 mm
<i>Max. arc root current density</i>		$1.5 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$	$1.1 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$	$5 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$	$5 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$
<i>Parallel arc roots</i>		yes	yes	no	no

Tableau I.2 : Comparaison de l'utilisation des caractéristiques pour une intensité constante de 100 A [Mut_1]

La Figure I.24 présente du côté droit la norme de la densité de courant pour des temps de $1 \mu\text{s}$ à 0.15 ms, et sur le côté gauche la variation de la chute de tension et le courant passant dans le séparateur en fonction de l'intensité du courant. L'initialisation de l'arc par un canal conducteur a été réalisée très proche du séparateur. L'arc devient ensuite « diffus » et semble ne se propager que vers le séparateur. Même si ce n'est pas signalé dans l'article, nous touchons

ici du doigt à la difficulté de la mise en place des conditions initiales notamment concernant la nécessité d'imposer un couple pression – température initiales dans ce canal. Progressivement la tension arrive à une valeur stabilisée de 40 V entre les deux rails. L'arc se galbe ensuite sur le séparateur (intervalle $t = 90 \mu\text{s} - t = 120 \mu\text{s}$) sans pour autant qu'un courant ne le traverse. Un courant commence ensuite à passer dans le séparateur (Figure de gauche) et une densité de courant se profile annonçant la future zone de passage progressif du courant dans le séparateur. Au bout de $150 \mu\text{s}$ la totalité du courant passe par le séparateur. La chute de tension est à présent de 60 V

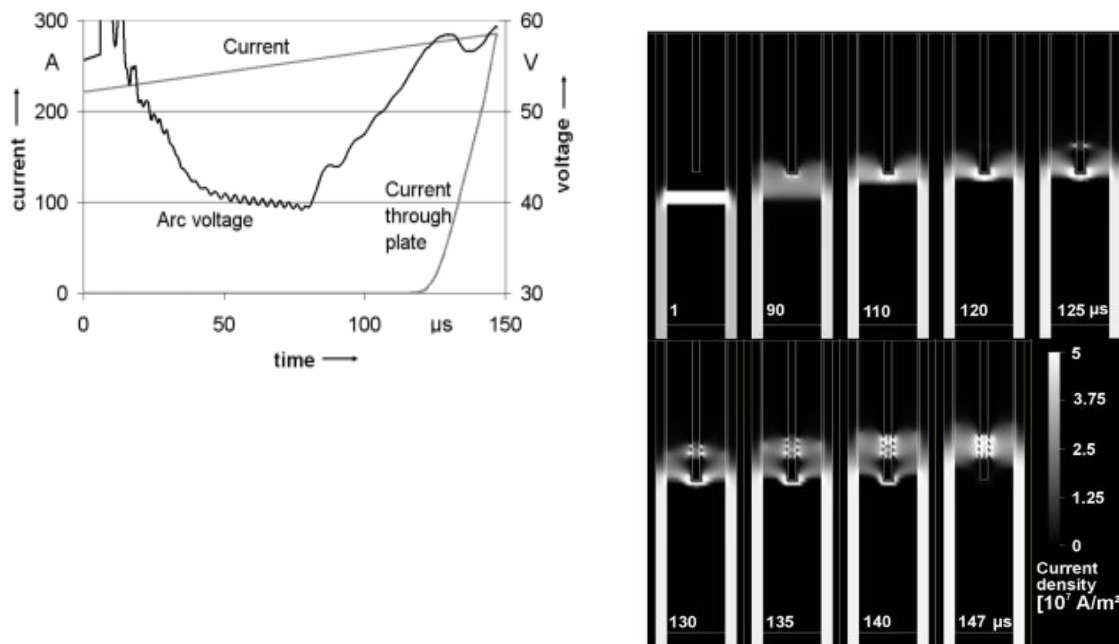


Figure I.24 : Evolutions du courant et de la tension obtenues par la simulation et norme de la densité de courant [Mut_1]

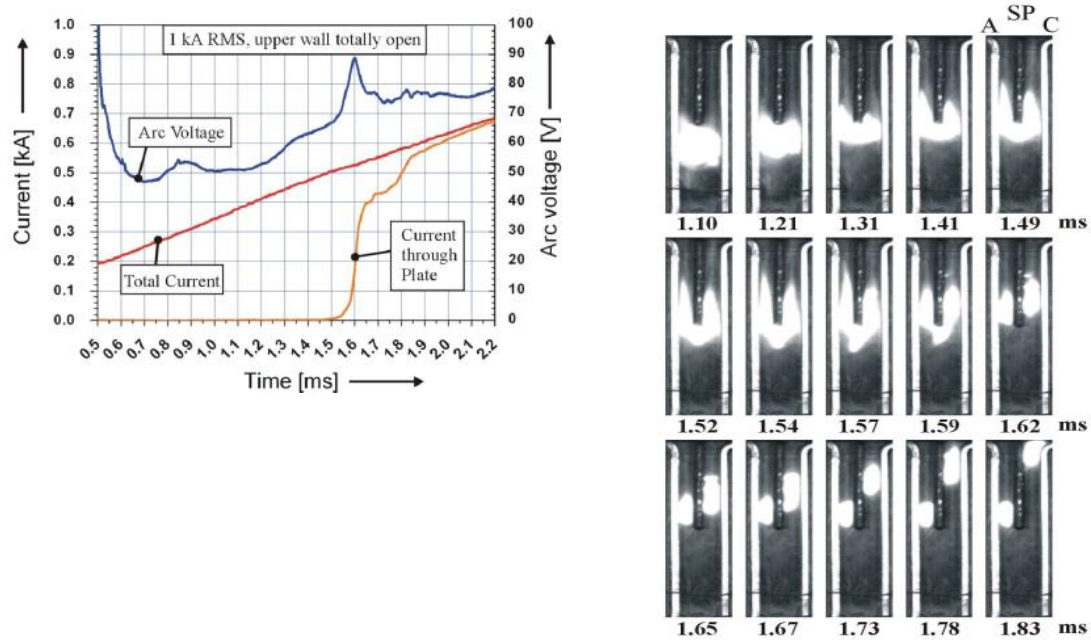


Figure I.25 : Evolutions du courant et de la tension obtenues par l'expérience (gauche) et norme de la densité de courant (droite) [Mut_1]

Les résultats expérimentaux sont représentés sur la Figure I .25. Le courant imposé débute à une valeur de 200 A. Cependant les constantes de temps sont totalement différentes. L'auteur a pourtant décalé la prise en compte des mesures expérimentales à $t = 0.5$ ms, instant pour lequel, dans la modélisation l'arc est totalement établi. Malgré cela la totalité du courant ne passe dans le séparateur qu'au bout de 2 ms contre 0.15 ms pour la simulation (Facteur >10). Expérimentalement, le passage de la totalité du courant sur le séparateur survenant plus tard, l'intensité qui par la simulation atteignait 280 A est à présent de 600 A. Expérimentalement le courant commence à passer dans le séparateur au bout de 1.5 ms contre 0.12 ms pour la simulation. Le comportement, entre expérience et simulation semble donc identique cependant les constantes de temps liées au déplacement et au passage du courant sont totalement différentes.

Cette approche théorique proposé par Lindmayer [Lin_1] et approfondie par Mutzke [Mut_1] a été reprise par de nombreux auteurs pour étudier différents paramètres sur des géométries simplifiées [Sun_1] [Yan_1] [Yan_3] [Yan_4] [Yan_5] [Ron_3] [Itu_1] [Itu_2] [Yin_1] [Yin_2] ou sur des géométries industrielles [Ron_3]. Cependant même si cette approche permet de décrire un comportement cohérent et en accord avec l'expérience, les constantes de temps sont différentes et tributaires notamment des conditions initiales.

I.5.4. Autres travaux

I.5.4.1. Dimensions des gaines

Dans certains travaux [Sun_1][Yan_1][Yan_3][Yan_4][Yan_5][Ron_3] les pieds anodique et cathodique sont traités différemment. L'épaisseur de la gaine cathodique est prise égale à 0.1 mm contre 0.04 mm pour la gaine anodique. La variation de tension en fonction de la valeur de la densité de courant s'appuie cependant sur la Figure I.23 avec $U_{\max} = 22.6$ V pour une faible densité de 10^4 A/m² et $U_0 = 14.5$ V pour une densité supérieure à 10^8 A/m².

D'autres auteurs ont considéré les dimensions de la gaine anodique conformément au modèle de Lowke et Tanaka [Low_1]. La nature ferromagnétique des séparateurs a été considérée dans le modèle. Les auteurs ont étudié l'influence de la prise en compte des vapeurs de fer issues de l'érosion sur l'évolution de la tension. Pour la simulation, le calcul commence par un canal de température entre deux électrodes. Un bilan énergétique aux électrodes est réalisé. La valeur du courant utilisée dans le calcul provient des valeurs expérimentales. Le pas de temps est de 2 μ s. Ils obtiennent une chute de tension qui est plus faible lorsqu'ils considèrent l'érosion du séparateur (Figure I.26) [Yan_3]. Avant la segmentation de l'arc, les tensions sont les mêmes, car aucune vapeur métallique n'est produite. La tension devient plus faible à partir 1.1 ms lorsque l'érosion est considérée. Les auteurs expliquent que la présence des vapeurs métalliques augmente la conductivité électrique de plasma et des gaz chauds autour du séparateur pour des températures inférieures à 15 kK diminuant ainsi la chute de tension.

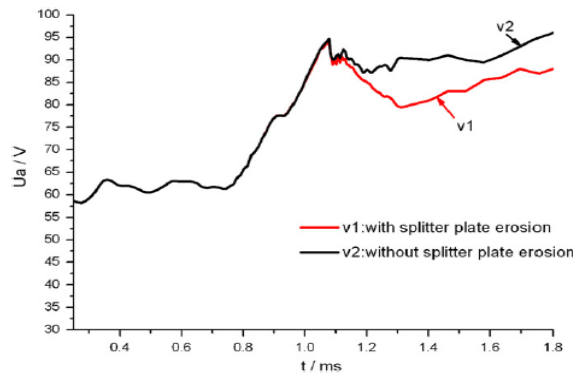


Figure I.26 : Comparaison de la chute de tension en fonction du temps avec et sans prise en compte de l'érosion du séparateur [Yan_3]

I.5.4.2. Courant de Foucault

L'influence du courant de Foucault dans le splitter et dans les rails a aussi été étudiée [Yan_4][Yin_2]. Pour cette étude, les vapeurs métalliques ne sont pas prises en compte dans la simulation. L'étude a été menée pour une intensité de courant $I = 600$ A. L'instant de commutation et donc de segmentation de l'arc est ralenti par le courant de Foucault, par conséquent, l'obtention de la tension maximale est retardée (Figure I.27), cependant, cette différence est négligeable pour un faible nombre de séparateurs [Yan_4][Yin_2].

Ces développements, de prise en compte de la chute de tension additionnelle lors de la segmentation de l'arc, ont aussi été mis en place sur une géométrie réelle de disjoncteur basse tension [Ron_3]. La Figure I.28 représente la géométrie globale du modèle ainsi que la forme du séparateur utilisée dans la chambre.

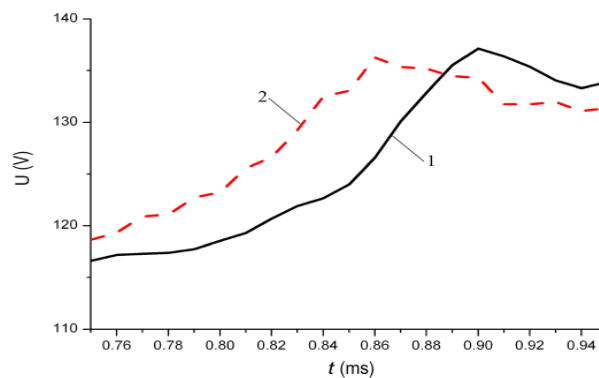


Figure I.27. Comparaison de l'évolution temporelle de la chute de tension avec (1) et sans (2) la prise en compte des courants de Foucault [Yan_4].

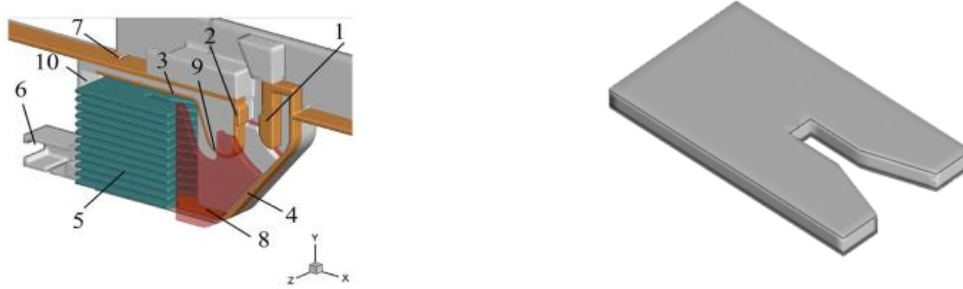


Figure I.28 : Géométrie du modèle et forme du séparateur [Ron_3]

1.5.4.3. Fréquence du courant

Sur cette géométrie les auteurs ont étudié l'évolution temporelle du courant et de la tension. Les résultats obtenus ont été comparés à des valeurs expérimentales (Figure I.29).

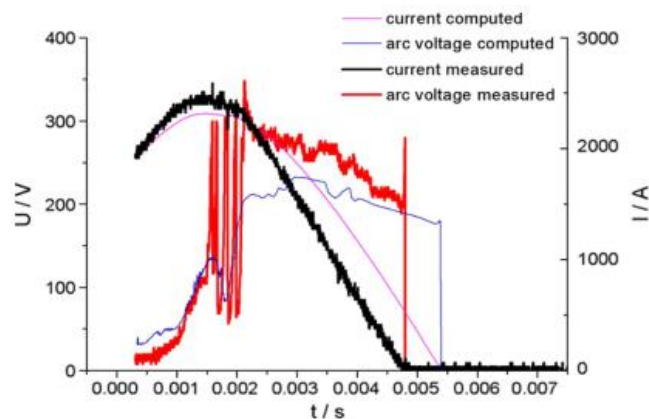


Figure I.29: Comparaison des évolutions de la tension et du courant obtenues par la simulation et l'expérience [Ron_3]

La « tendance » est similaire avec de plus grandes disparités sur les valeurs de la tension. Les auteurs expliquent cela par quelques différences sur la géométrie prise en compte et par le fait que dans la modélisation les vapeurs métalliques ne soient pas prises en compte. Comme nous pouvons le constater de très nombreux paramètres peuvent être étudiés. Parmi les études on peut également citer celle de Yin [Yin_1] relative à l'influence du nombre des séparateurs et à la fréquence du courant. La géométrie est représentée sur la Figure I.30.

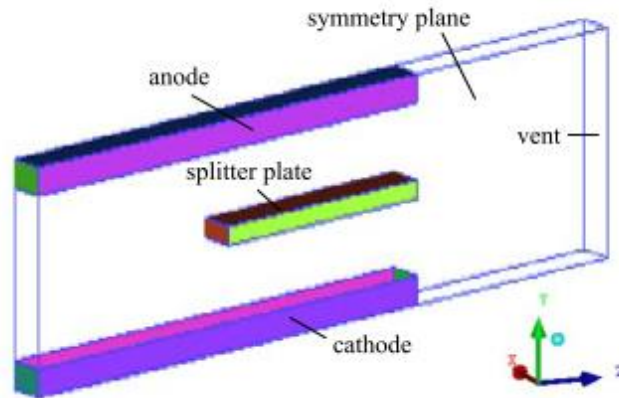


Figure I.30 : Géométrie de l'étude avec un séparateur [Yin_1]

La dimension de la chambre est de 5 x 14 x 60 mm suivant la direction x, y, z. L'épaisseur des rails et du séparateur est de 1mm. La courbe « a » de la Figure I.22 a été utilisée ($U_{\max} = 22.3$ V et $U_0 = 10.3$ V) pour le modèle du pied d'arc. Les dimensions des gaines sont prises égales à 0.1 mm. Le courant de la simulation s'exprime comme $i(A) = 600\sqrt{2}\sin(\omega t + \pi/12)$, l'étude a été menée pour des fréquences de 50, 100 et 200 Hz. Le comportement trouvé par le modèle est illustré par la densité du courant sur la Figure I.31 pour un courant de 50 Hz pour le cas avec un séparateur. L'arc est amorcé devant le séparateur (Schéma (a)). Il est ensuite allongé pendant le déplacement avec une colonne qui se propage plus rapidement que les pieds (Schéma (b)). L'arc arrive ensuite devant le séparateur où il se retrouve bloqué (Schéma (c)). Les pieds d'arc toujours poussés par les forces de Lorentz permettent à l'arc de se redresser (Schéma (c)). Les pieds d'arc continuant à avancer, l'arc n'ayant pas commuté se retrouve galbé (Schéma (d)). Sur l'étape « e » les pieds d'arc apparaissent sur le séparateur avec deux chemins possibles pour le courant. Schéma (f) le passage de courant au travers du séparateur devient de plus en plus prépondérant, mais il subsiste encore deux chemins.

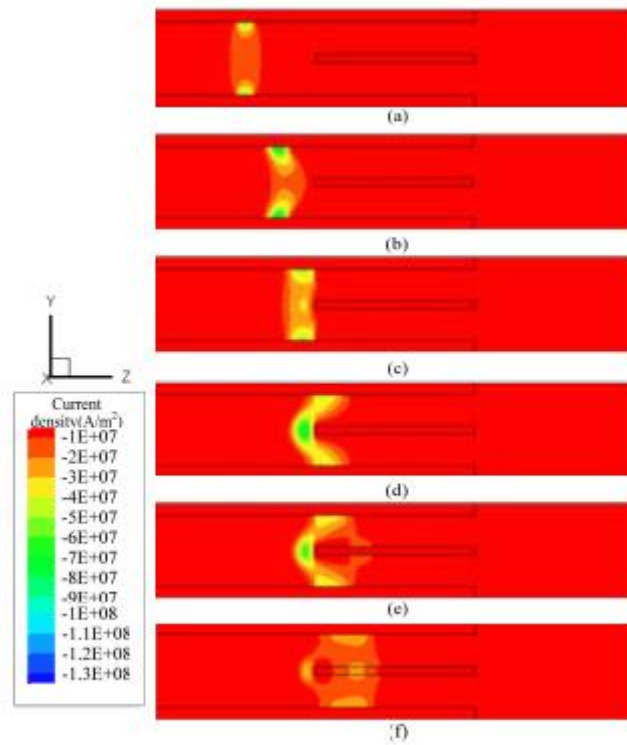


Figure I.31 : Densité du courant avec une fréquence de 50 Hz (a) $t = 0.01$ ms (b) $t = 0.65$ ms (c) $t = 0.86$ ms (d) $t = 1.23$ ms (e) $t = 1.26$ ms (f) $t = 1.45$ ms [Yin_1]

L'influence de la fréquence de l'intensité de courant sur la tension de l'arc est représentée sur la Figure I.32. La vitesse de déplacement de l'arc, ainsi que la variation de la tension, sont d'autant plus grands que la fréquence est élevée. Par rapport à la fréquence de 50 Hz, la tension maximale est en avance de 10.6% et 28.5% respectivement pour 100 et 200 Hz. Ceci s'explique par le fait que le courant et donc les forces de Lorentz sont plus élevées.

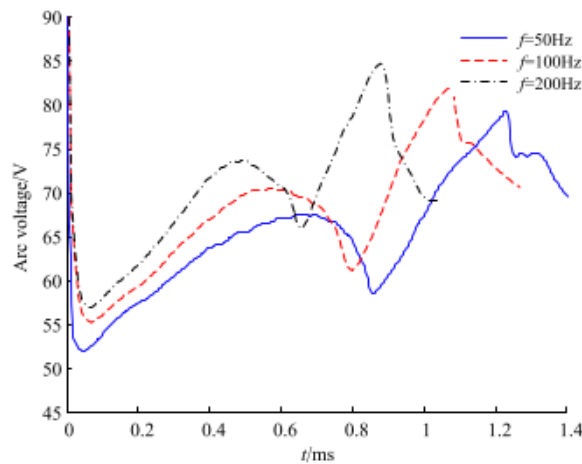


Figure I.32 : Comparaison de la tension de l'arc pour une fréquence de l'intensité de courant de 50, 100 et 200 Hz [Yin_1]

I.5.4.4. Nombre de séparateurs

Une autre étude intéressante est celle d'Iturregi [Itu_1][Itu_2].

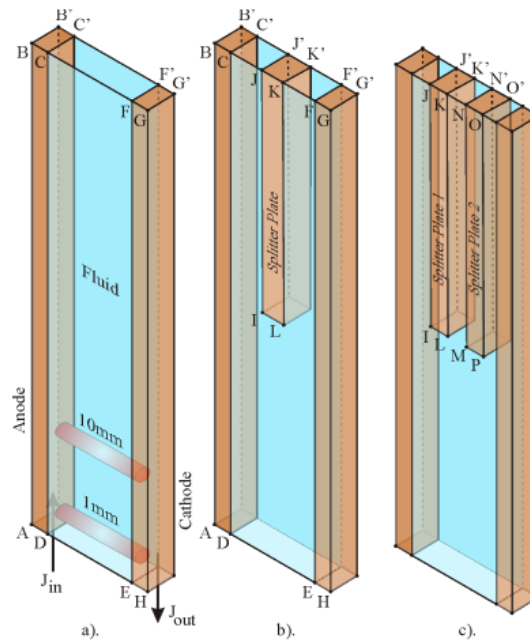


Figure I.33 : Géométries du modèle pour a) : 0 séparateur, b) : 1 séparateur, c) : 2 séparateurs [Itu_1]

Elle consiste à étudier l'influence du nombre de séparateurs, du courant et de la position d'amorçage de l'arc [Itu_1][Itu_2]. L'auteur a proposé un modèle 3D avec les dimensions suivantes : pour la géométrie: 11 mm de large, 2.5 mm en épaisseur et 40 mm en hauteur et 1.55 x 2.5 x 40 mm pour les rails (Figure I.33). A noter que les largeurs des séparateurs sont différentes suivant les configurations avec un et deux séparateurs. Ainsi Figure I.33 l'épaisseur est de 2 mm pour un séparateur (Schéma b) et de 1mm pour deux séparateurs (Schéma c). Les différentes épaisseurs des séparateurs permettent de construire une seule géométrie pour les trois cas et de changer la nature des cellules de la géométrie suivant la configuration en considérant les cellules en « live » ou en « solide ».

L'approche de Lindmayer a été implantée par l'auteur dans son modèle. La Figure I.34 représente l'évolution temporelle de la tension pour 0, 1 et 2 séparateurs dans la chambre. Le courant est de 50 A et la courbe « d » de la Figure I.22 est utilisée.

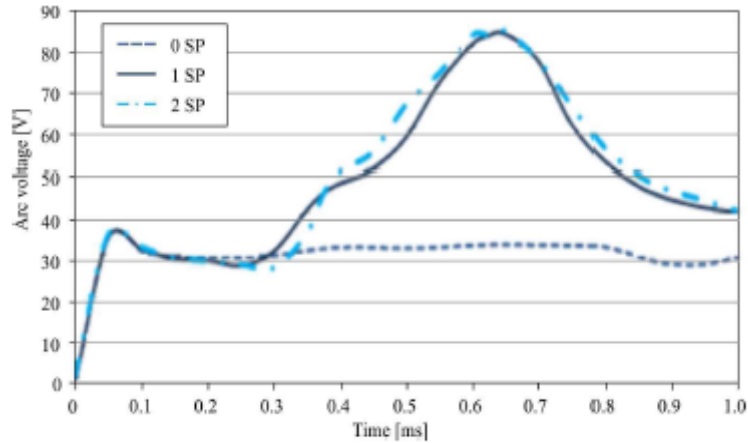


Figure I.34: Evolution temporelle de la tension pour 0, 1 et 2 séparateurs [Itu_2]

La tension de l'arc obtenue pour différents nombres de séparateurs est représentée sur la Figure I.34. Elle reste constante de 0.1 à 0.8 ms pour le cas sans séparateur (0 SP). Les tensions augmentent avec la présence des séparateurs. Cependant les variations de la tension sont pratiquement identiques entre le cas avec un séparateur (1 SP) et deux séparateurs (2 SP).

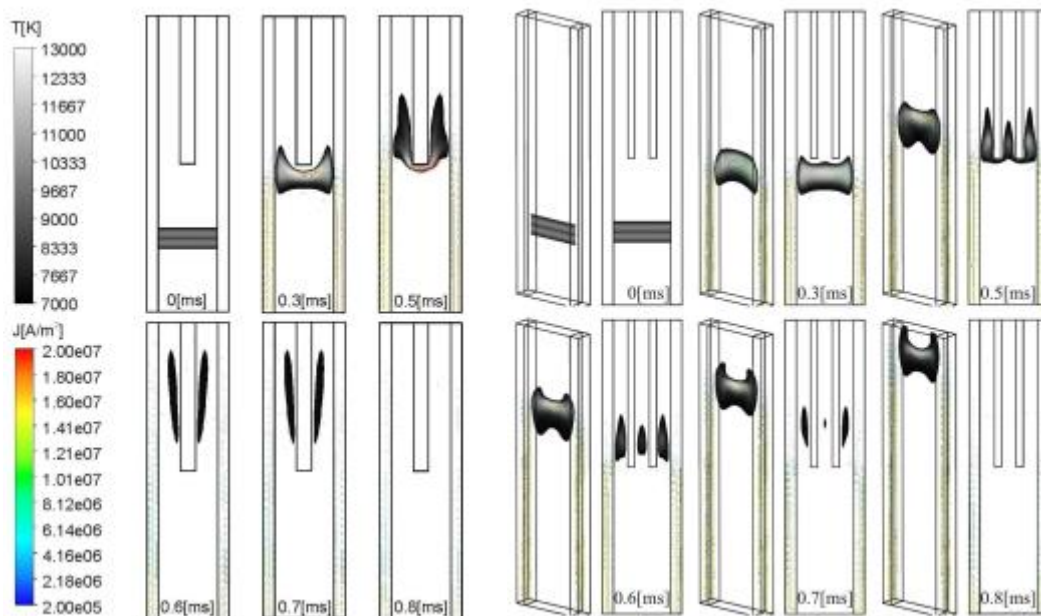


Figure I.35 : Déplacement de l'arc pour zéro, un et deux séparateurs [Itu_2]

Il est à noter que les explications données par l'auteur restent floues, et les représentations données des champs de la température ou de la norme de la densité de courant (Figure I.35), ne permettent pas d'apporter une explication. La courbe « d » de la Figure I.22 est utilisée, la chute de tension additionnelle devrait être de 20 V en présence d'un séparateur. Cependant, l'auteur n'a trouvé sur l'intervalle de temps de 0.3 à 0.5 ms que 5 V de plus entre les configurations avec 1 et 2 séparateurs et aucune explication n'est donnée sur la superposition des courbes après la segmentation de l'arc (autour de 0.6 ms). Les développements, concernant les gaines, que nous avons implémentés et qui seront présentés dans la suite du manuscrit, sont disponibles en « option » dans CFX. Il semblerait que l'auteur se soit limité à utiliser cette option sans toutefois bien en mesurer la portée et la méthodologie. Il est précisé que le CIF (Conservative Interface Flux) est appliqué sur l'interface entre la partie fluide et la partie solide des rails et des séparateurs pour le champ électrique ainsi que le champ magnétique. Cependant aucune explication n'est fournie sur cette méthode.

I.6. Synthèse de l'étude bibliographique

Dans cette étude bibliographique, nous avons présenté le fonctionnement d'un DBT et cité les différents types de DBT. Nous avons également introduit la technologie de coupure au sein du DBT qui repose sur le principe de la limitation du courant. Ainsi, l'augmentation de la tension de l'arc est essentielle pour créer cette limitation. Il existe différentes phases dans le processus de coupure du DBT :

- le déclenchement
- l'ouverture des contacts et la création de l'arc
- la commutation sur le rail supérieur pendant la phase d'ouverture
- le déplacement sur les rails sous l'influence des forces de pression et de Lorentz avec la possibilité de claquage arrière
- l'entrée et la commutation sur les séparateurs
- la phase de limitation et de décroissance du courant.

La commutation et le déplacement de l'arc peuvent augmenter la tension de l'arc par l'augmentation de sa longueur, cependant la phase de segmentation dans les séparateurs est la plus efficace pour une augmentation rapide de la tension par l'ajout des chutes de tension

anodique et cathodique. Les travaux essentiels de la littérature sur ces différents aspects et leurs résultats sont présentés dans ce chapitre. Les études expérimentales et théoriques sur la phase de commutation et de déplacement sont assez complètes, cependant celles sur la phase de segmentation sont moins nombreuses dû à la complexité des phénomènes et aux dimensions des zones à étudier. Une approche macroscopique, basée sur la caractéristique $U(J)$ permettant de représenter l'accrochage des pieds d'arc sur les séparateurs, a été proposé par le groupe de Lindmayer et a été présentée dans ce chapitre. Cette approche permet de prendre en compte les chutes de tension supplémentaire (anodique et cathodique) des rails ou des séparateurs sans pour autant faire intervenir la complexité de la représentation des gaines. Différents auteurs ont utilisé cette approche et ont présenté des études paramétriques notamment sur le nombre de séparateurs, cependant la mise en œuvre n'est pas détaillée (les auteurs utilisant un module boîte noire d'Ansys) et des incohérences non expliquées présentes dans leurs travaux. Nous avons donc décidé d'implémenter nos propres modules en appliquant la même approche. Les études paramétriques seront présentées dans le chapitre suivant. La géométrie, les conditions initiales ainsi que les conditions limites seront détaillées.

CHAPITRE II : Modélisation

Les modèles numériques présentent l'avantage d'accéder à des grandeurs physiques qu'il est difficile d'obtenir expérimentalement. Ils constituent ainsi un outil puissant d'analyse complémentaire à la mise en œuvre d'expérimentations. Le modèle théorique utilisé dans cette thèse propose la description fine des phénomènes mis en jeu ainsi qu'une connaissance précise des paramètres impliqués.

Dans un premier temps, ce chapitre aborde la présentation théorique des équations de base et du modèle utilisé. La résolution de ces équations est effectuée à l'aide du code commercial Ansys – Fluent [Ans_1] et de « User Functions » développées dans l'équipe AEPPT. Nous présentons ensuite le modèle utilisé pour la description du passage du courant entre les électrodes et le plasma. Ce modèle est appliqué sur une géométrie de la littérature sur laquelle une étude paramétrique est réalisée.

II.1. Introduction

Le plasma thermique peut être considéré comme un fluide à l'Equilibre Thermodynamique Local (ETL), si les hypothèses suivantes sont respectées :

- Equilibre thermique : la température des électrons T_e est égale à la température des particules lourds T_a ;
- Libre parcours moyen très petit devant les grandeurs caractéristiques ;
- Quasi-neutralité : le plasma est électriquement neutre.

Le plasma d'arc est un mélange de plusieurs types de particules : les particules neutres, les ions et les électrons. Pour une espèce « a », on définit la densité de particules, la charge électrique et la masse notées respectivement n_a , q_a , m_a , ainsi que T_a , P_a , \vec{U}_a la température, la pression et la vitesse moyenne. Ainsi, la pression totale P , la masse volumique ρ et la vitesse du fluide \vec{V} peuvent s'écrire :

$$P = \sum P_a \quad (\text{II.1})$$

$$\rho = \sum \rho_a = \sum n_a m_a \quad (\text{II.2})$$

$$\rho \vec{V} = \sum n_a m_a \vec{U}_a \quad (\text{II.3})$$

Ces grandeurs macroscopiques présentent des gradients spatio-temporels qui provoquent des flux de masse, de quantité de mouvement et d'énergie cinétique au sein de fluide. Sous l'hypothèse fluide, les équations de Navier Stokes et de conservation de l'énergie décrivent le plasma et le lien entre ces quantités.

II.2. Equations hydrodynamiques

II.2.1. Equation de conservation de la masse

L'équation de conservation de la masse pour un mélange de particules s'écrit :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \rho \vec{V} = 0 \quad (\text{II.4})$$

II.2.2. Equation de conservation de la quantité de mouvement

L'équation de conservation de la quantité de mouvement pour le plasma peut s'écrire de la façon suivante :

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V} \otimes \vec{V}) = -\overrightarrow{\text{grad}} P + \text{div } \vec{t} + \rho \vec{g} + \vec{j} \wedge \vec{B} + e(\sum n_i - n_e) \vec{E} \quad (\text{II.5})$$

$\vec{j} \wedge \vec{B}$ représente la force de Laplace, \vec{g} l'accélération de la pesanteur, \vec{B} l'induction magnétique, $e(n_i - n_e) \vec{E}$ la force électrique avec n_i et n_e les densités ioniques et électroniques et \vec{E} le champ électrique. Le plasma étant considéré comme électriquement neutre cette force est nulle dans notre cas.

II.2.3. Equation de conservation de l'énergie

L'équation de conservation de l'énergie est une équation de bilan d'énergie pour toutes les espèces :

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \text{div } \rho H \vec{V} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum \vec{U}_a \cdot \overrightarrow{\text{grad}} P_a + \vec{j} \cdot \vec{E} - S_{rad} - \text{div} \vec{Q} + S \quad (\text{II.6})$$

Avec \vec{E} le champ électrique, S_{rad} le terme de dissipation radiative, H est l'enthalpie massique définie par :

$$\rho H = \sum n_a h_a \quad (\text{II.7})$$

h_a est l'enthalpie massique de chaque particules.

Q est le flux de conduction thermique tel que :

$$\vec{Q} = -k \overrightarrow{grad} T \quad (\text{II.8})$$

k est la conductivité thermique.

S est un terme source supplémentaire qui peut être nécessaire pour prendre en compte par exemple le flux d'enthalpie des électrons.

L'équation finale s'écrit comme :

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + div \rho H \vec{V} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{V} \cdot \overrightarrow{grad} P + \vec{j} \cdot \vec{E} - S_{rad} - div k \overrightarrow{grad} T + S \quad (\text{II.9})$$

II.3. Equations électromagnétiques

Les équations de base de l'électromagnétisme sont gouvernées pas les équations de Maxwell :

$$rot \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.10})$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + rot \vec{E} = 0 \quad (\text{II.11})$$

Avec les lois de comportement :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{II.12})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.13})$$

\vec{H} est le champ magnétique, \vec{D} la densité de flux électrique, \vec{B} l'induction magnétique, \vec{E} le champ électrique et \vec{j} est la densité de courant telle que

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.14})$$

La conservation du courant s'écrit alors :

$$\text{div } \vec{j} = 0 \quad (\text{II.15})$$

En faisant intervenir le potentiel scalaire V , et en supposant le terme temporel négligeable, $\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V$ l'équation de conservation du courant s'écrit :

$$\text{div} (-\sigma \overrightarrow{\text{grad}} V) = 0 \quad (\text{II.16})$$

Dans cette équation, σ est la conductivité électrique.

Le champ magnétique est calculé à l'aide du potentiel vecteur \vec{A} :

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (\text{II.17})$$

\vec{A} est obtenu par l'équation (II.18) :

$$\vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) = -\mu_0 \vec{j} \quad (\text{II.18})$$

Cette formulation du potentiel vecteur permet d'obtenir localement la contribution du champ magnétique provenant de la circulation du courant dans les parties métalliques mais aussi celui auto induit par l'arc. Cela demande néanmoins une équation de fermeture qui dans notre cas sera donnée en condition aux limites par la formulation de Biot&Savart [Fre_3] :

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint \frac{\vec{j}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} dV \quad (\text{II.19})$$

Cette équation permet aussi de prendre en compte le champ magnétique externe dû à la circulation du courant dans les rails sans avoir à résoudre le potentiel vecteur dans le solide. Cette formulation n'est à utiliser que pour la fermeture entre les domaines solides et fluides. En effet il s'agit d'une triple intégrale sur le volume et elle peut être fortement pénalisante pour le temps calcul

Enfin, il est à noter que toutes les propriétés thermodynamiques et de transport dépendent dans le modèle de la température et de la pression. A titre d'exemple, nous avons représenté sur la Figure II.1, les évolutions de la conductivité électrique et la conductivité thermique d'un plasma d'air pour deux pressions (1 bar et 8 bar). Ces deux quantités évoluent sur plusieurs ordres de grandeur (en particulier pour la conductivité électrique). On peut aussi observer les

effets de la pression, qui sont surtout marqués à hautes températures avec notamment un décalage des pics de dissociation et d'ionisation pour la conductivité thermique. Cet effet est dû à un décalage avec la pression de la chimie vers les hautes températures.

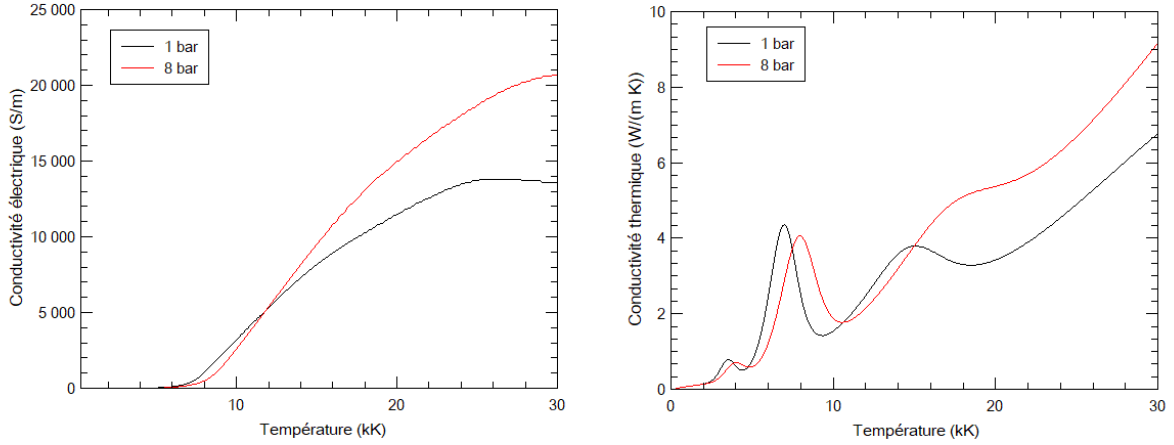


Figure II.1 : Evolution des conductivités électriques et conductivités thermiques de l'air en fonction de la température pour la pression 1 bar et 8 bar

Les équations décrites ci-dessus nécessitent d'être résolues de façon numérique. Nous avons choisi d'utiliser le logiciel Ansys – Fluent [Ans_1] adapté pour les plasmas thermiques par l'équipe AEPPT. Nous présentons la prise en main de ce logiciel dans le paragraphe suivant.

II.4. Présentation du code Ansys – Fluent

Le logiciel Ansys-Fluent [Ans_1] est un outil qui permet la description de nombreux phénomènes physiques, notamment des écoulements fluides. Cependant ce code est conçu pour la résolution d'écoulements à des températures moins élevées (généralement inférieures à 4000 K) que pour les plasmas thermiques. Ainsi, de nombreuses précautions (relaxation, choix des schémas) doivent être prises dans le cadre de son application à ces milieux en présence d'un arc électrique. Ce logiciel a donc été modifié en profondeur via des UDF (User Define Function) pour étendre les bases de données, ajouter des équations, modifier des équations par des termes source, ou bien insérer des conditions aux limites particulières adaptées aux arcs électriques. Le logiciel Fluent résout l'équation généralisée (II.20). Ainsi les équations ajoutées pour traiter les aspects électromagnétiques devront eux aussi être mises sous cette forme :

$$\underbrace{a \frac{\partial \rho \phi}{\partial t}}_{(1)} + \underbrace{b \operatorname{div}(\rho \vec{v} \phi)}_{(2)} = \underbrace{\operatorname{div}(\Gamma_{\phi} \overrightarrow{\operatorname{grad}}(\phi))}_{(3)} + \underbrace{S_{\phi}}_{(4)} \quad (\text{II.20})$$

Cette équation possède un terme temporel (1), un terme convectif (2) ainsi qu'un terme diffusif (3) et en second membre un terme source (4). Suivant l'équation à traiter les termes peuvent ou pas exister. La résolution de cette équation généralisée permet, moyennant l'adaptation des paramètres, d'exprimer l'ensemble des équations fluides et électromagnétiques et d'accéder aux différentes grandeurs (voir Figure II.2). Par rapport aux équations « de base » résolues par Fluent, (équation de l'énergie - température, équation de la quantité de mouvement - vitesses, conservation de la masse), nous avons donc ajouté la résolution de la conservation du courant (équation du potentiel scalaire), la résolution du champ magnétique (équations des potentiels vecteur). La conservation du courant permet d'accéder aux densités du courant, et donc d'exprimer le terme source de l'équation de l'énergie. Combinées avec le champ magnétique, les densités de courant composent le terme source des équations de la quantité de mouvement. Ces équations sont fortement couplées et des précautions doivent être prises afin de relaxer les différentes grandeurs et mener le calcul à converger.

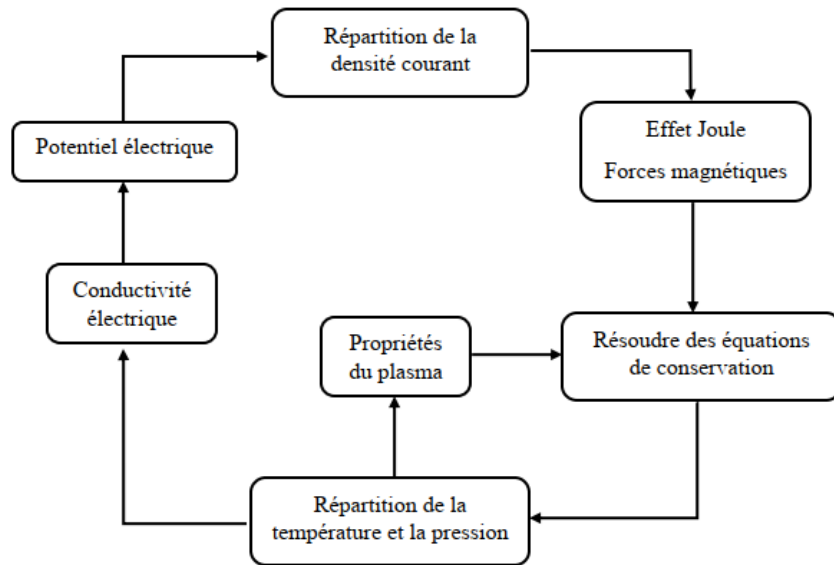


Figure II.2 : Organigramme de calcul

Pour résoudre les équations de Navier-Stokes, le code Fluent utilise une méthode de discrétisation qui transforme les équations différentielles en un système d'équations algébriques qui peuvent être résolues pour obtenir une approximation de la solution exacte. Fluent est basé sur la Méthode des Volumes Finis (FVM), pour la discrétisation des équations fluides [Azz_1]. Elle consiste à transformer les équations différentielles sous des formes intégrales. Elle peut être utilisée pour des géométries avec des maillages structurés ou non structurés.

II.5. Travaux antérieurs de l'équipe sur les mouvements des pieds d'arc

Antérieurement à ces travaux, une première thèse avec la société Hager a été menée [Qué_1]. Il s'agissait de mettre en place des expérimentations et un premier modèle d'arc pour les disjoncteurs basse tension. D'un point de vue numérique, un des points principaux a consisté à l'étude du déplacement de l'arc dans un disjoncteur basse tension par deux méthodes de déplacement.

La première d'entre elles est la Méthode de la Conductivité Electrique Moyenne (MCEM) basée sur les travaux de Swierczynski et al [Swi_1]. Son principe consiste à rechercher pour

chaque électrode la zone à conductivité électrique maximale et à faire l'hypothèse que le pied d'arc s'accroche dans cette zone. La méthode a été améliorée par Quémeneur en permettant pour une même électrode la détermination de plusieurs maxima afin de pouvoir représenter un accrochage avec deux ou trois pieds. Dans cette méthode, la chambre de coupure est découpée en tranches élémentaires perpendiculaires aux électrodes, la position du pied d'arc est ensuite imposée dans la tranche où la conductivité moyenne est la plus élevée.

La seconde méthode est la Méthode de Résolution Globale du Courant (MRGC), qui consiste à résoudre la continuité du courant depuis son entrée dans un rail, jusqu'à sa sortie par un autre rail par un couplage direct entre les rails et le milieu plasma [Qué_1]. Dans sa thèse, Quémeneur ne fait pas de traitement particulier entre le plasma et l'électrode. Il considère en particulier que la conductivité électrique proche de l'électrode est celle du plasma. Il s'agit là d'une hypothèse forte ne représentant ni la physique associée aux gaines cathodique et anodique ni la prise en compte des tensions de gaine. Nous reviendrons sur ce point ultérieurement.

La géométrie théorique étudiée lors des travaux antérieurs est présentée sur la Figure II.3. Cette géométrie, de taille relativement réduite représente une maquette simplifiée de disjoncteur. Elle est constituée de deux rails en cuivre, et d'une entrée et d'une sortie qui peuvent être fermées ou ouvertes [Qué_1]. A noter que la géométrie présentée Figure II.3 est très proche de la géométrie expérimentale étudiée dans la même thèse si ce n'est l'absence du bras d'ouverture (contact mobile) non représenté dans la maquette théorique. Une version avec ouverture de contact et commutation avait aussi été testée mais cet aspect n'est pas traité par notre étude.

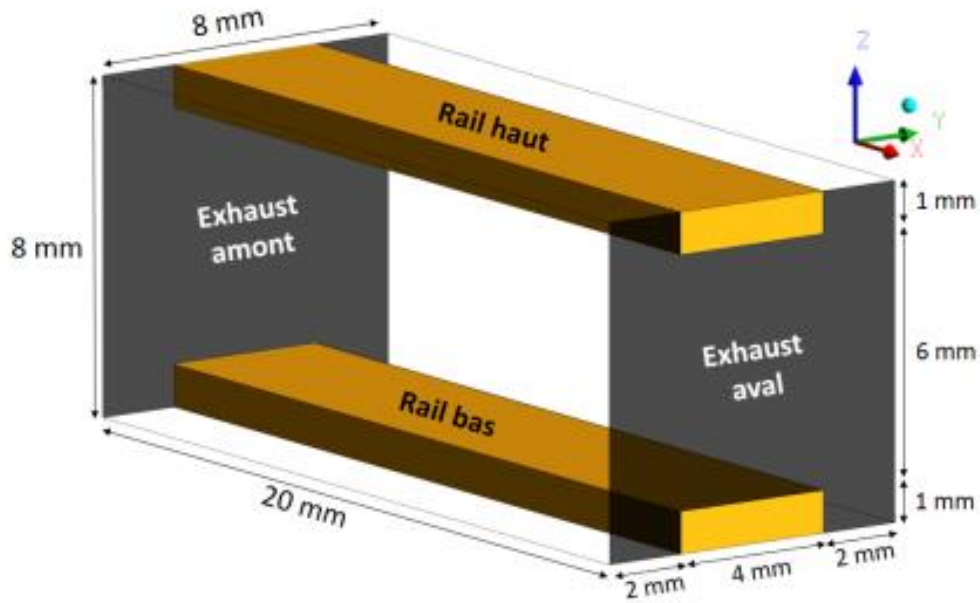


Figure II.3 : Dimension de la géométrie issue des travaux de Quéméneur [Qué_1]

Pour les deux méthodes de déplacement (MCEM et MRGC), l'arc est initialisé par un canal conducteur situé entre deux rails, il s'agit d'un cylindre où l'on impose une température de 20 kK à l'instant $t = 0$ s. Comme évoqué, dans les deux méthodes citées, aucune physique particulière n'avait été implémentée afin de représenter la chute de tension additionnelle due aux zones hors équilibre. Ainsi, il nous a semblé que l'approche globale était intéressante mais devait être améliorée, notamment en adoptant l'approche de Lindmayer [Lin_1] qui décrit les zones proches électrodes comme des zones avec une conductivité électrique particulière. Ce sont ces développements, indispensables pour bien étudier la phase de segmentation, que nous présentons dans la suite de ce chapitre.

II.6. Description du modèle de gaine – application à une géométrie de la littérature

II.6.1. Mise en place de l'approche de Lindmayer [Lin_1]

Les phénomènes aux électrodes, au sein de la décharge, sont parmi les plus complexes. Dans le disjoncteur basse tension, l'interruption de l'arc est principalement due à la multiplication de tension des gaines aux niveaux des séparateurs dans la chambre de coupure. Afin de représenter les chutes de tension des gaines à l'aide du modèle, nous avons choisi de mettre en place une approche qui permet de décrire de façon macroscopique mais réaliste la chute de tension supplémentaire due au passage du courant dans les rails ou pour chacun des séparateurs. Etant donné les temps de calculs nécessaires sur les géométries tridimensionnelles (de plusieurs jours à plusieurs semaines voir mois), afin de mettre au point cette méthode, et de confronter nos résultats avec les tendances de la littérature nous avons utilisé les géométries des travaux d'Iturregi [Itu_1]. Ces travaux présentent l'avantage d'avoir été faits sur des géométries de dimension relativement réduites et avec un certain nombre d'études paramétriques sur l'influence du nombre de séparateurs et sur les zones d'entrée et de sortie qui sont plus ou moins obstruées. Nous verrons par la suite que ces travaux présentent cependant certaines incohérences.

Il faut souligner le fait que cette géométrie et ses variantes présentent des dimensions très différentes de celles rencontrées pour des disjoncteurs traditionnels, mais elle a été choisie pour mettre en place le modèle afin d'avoir des temps de calcul acceptables. Il est à noter tout de même que même avec une telle géométrie 6 jours de calcul avec une parallélisation sur 6 processeurs sont nécessaires pour obtenir 20 pas de temps. Ces géométries sont présentées sur la Figure II.4. La chambre possède suivant l'axe x une hauteur de 40 mm, une épaisseur de 2.5 mm sur l'axe y et une largeur de 11 mm sur l'axe z. En raison de la largeur de chambre, les dimensions des séparateurs sont différentes suivant les géométries. Ainsi dans la configuration avec un séparateur, celui-ci est deux fois plus épais que lorsque nous considérons deux séparateurs. D1 représente la distance entre deux rails qui est égale à 8 mm,

D2 et D3 sont les distances entre le rail et le séparateur respectivement pour les géométries avec un et deux séparateurs. Les surfaces « ExAm » et « ExAv » représentent les bouchages amont et aval, qui peuvent être fermés ou bien ouverts. Les zones en bleu correspondent aux parties solides et la zone entre ces parties solides correspond à la zone fluide.

Concernant la partie maillage, la construction de la géométrie est un travail complexe. Ainsi, pour simplifier le passage d'une géométrie à l'autre, une seule géométrie a été créée initialement comme suggéré par l'auteur [Itu_1] et le changement de l'une à l'autre se fait en changeant la nature des cellules de la géométrie (en changeant le type de zone en « Live » ou « Material » dans le logiciel Ansys – Fluent) sans avoir à la remailler.

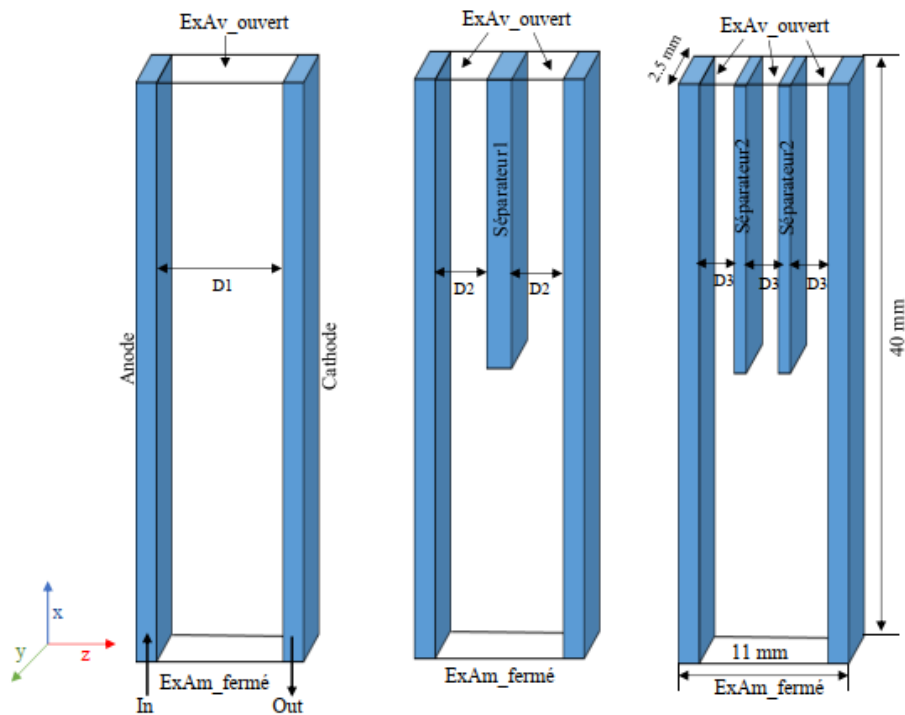


Figure II.4 : Géométrie de la littérature [Itu_1] pour zéro, un et deux séparateurs (gauche à droite)

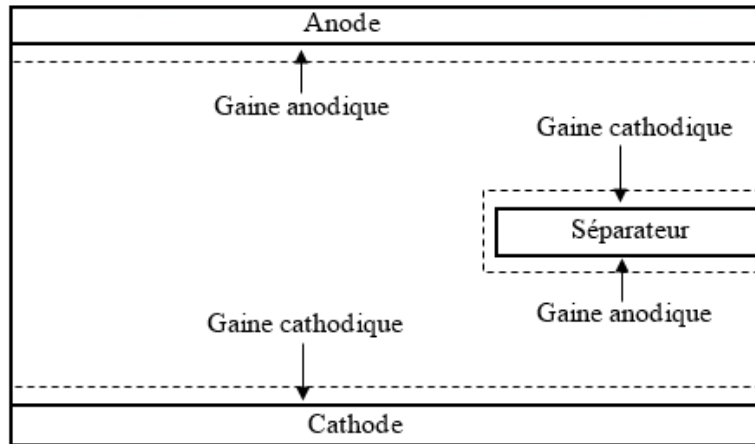


Figure II.5 : Zones de gaine où on applique le module additionnel de résistivité

Comme évoqué précédemment, La méthode de résolution globale du courant couplée à l'approche de Lindmayer [Lin_1] est utilisée. Le courant entre par la surface « In » (Figure II.4) et il sort par la surface « Out ». Le maillage est uniforme avec des cellules de 0.1 mm^3 . Un total de 1.12 million de cellules est nécessaire pour décrire la géométrie. Nous allons à présent détailler les éléments nécessaires à la mise en place du modèle de Lindmayer [Lin_1].

Dans le modèle de Lindmayer [Lin_1], afin de représenter la chute de tension additionnelle au niveau des gaines autour des rails et des séparateurs, une conductivité électrique effective (σ_{eff}) est définie. Les zones sur lesquelles elle est prise en compte sont données sur la Figure II.5. Cette conductivité effective est donnée par la relation entre la chute de tension (ΔU) et la densité de courant (J) parcourue dans les gaines des électrodes (Figure II.6):

$$\sigma_{eff} = J \frac{\Delta y}{\Delta U} \quad (\text{II.21})$$

Δy représente l'épaisseur de la gaine qui est prise dans notre cas comme l'épaisseur de la maille proche des électrodes. Nous avons pris la précaution de fixer l'épaisseur de cette maille à une valeur d'environ 0.1 mm , dimension caractéristique des gaines anodique et cathodique [Ben_1]. Afin de pouvoir estimer la formulation II.21, il est nécessaire d'avoir le lien entre la densité de courant et la chute de tension. Cette relation est déterminée à partir d'expériences et de travaux de Lindmayer et al. [Lin_1] qui donne différentes courbes de la chute de tension en fonction de la densité de courant.

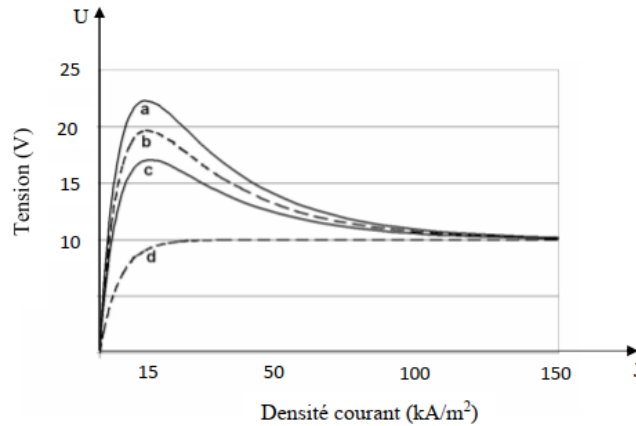


Figure II.6 : Caractéristiques tension – densité courant [Lin_1]

Ces courbes sont reportées sur la Figure II.6 et représentent la chute de tension du courant à commuter sur le séparateur. Pour rappel (voir chapitre I), d'après l'auteur, les quatre courbes sont relevées expérimentalement pour différentes configurations et matériaux. La densité du courant tend vers zéro lorsque la valeur de la tension est faible. Lorsque le courant augmente, la valeur de la tension passe par un maximum pour une densité du courant de l'ordre de 15 kA/m^2 , elle se stabilise ensuite à 10 V lorsque la densité de courant est supérieure ou égale à 150 kA/m^2 . Cette valeur de 10 V correspond à la chute de tension anodique ou cathodique. Ces courbes permettent aussi un ajustement de la tension théorique qui est atteinte lorsque la totalité du courant passe par un séparateur.

Nous avons donc implémenté cette théorie dans notre modélisation magnétohydrodynamique par la mise en place d'un UDF dans Ansys – Fluent.

II.6.2. Hypothèses générales du modèle

Les hypothèses utilisées dans notre modèle sont les suivantes :

- Le milieu est supposé être de l'air à Equilibre Thermodynamique Local (ETL). Cette hypothèse est également utilisée pour calculer la composition du plasma (évolution des densités des espèces), et les propriétés de transport et thermodynamiques ; dans notre cas ces données dépendent de la température et de la pression. Cette hypothèse d'existence de l'ETL est légitime pour la colonne d'arc

[Ben_1] mais pas pour les zones périphériques à l'arc et celles en proche voisinage des électrodes. Pour le fluide, une seule équation d'énergie est résolue, en supposant que toutes les espèces sont à la même température.

- L'écoulement est considéré comme laminaire ;
- Les vapeurs du PA66 ($C_6H_{11}O_1N_1$) des parois, les vapeurs de cuivre des rails ou de fer en provenance des séparateurs ne sont pas prises en compte, même si elles peuvent modifier les propriétés du plasma et donc le déplacement de l'arc ;
- Les gaines aux voisinages des rails et des séparateurs sont traitées par la résistivité additionnelle [Lin_1] ;
- Le champ magnétique est calculé par la méthode hybride: Potentiel vecteur et Biot&Savart en condition limite [Fre_3];
- Le rayonnement est pris en compte en utilisant la méthode du coefficient d'émission nette.

Sur le dernier point, il est à signaler que d'autres méthodes pourraient être utilisées pour le traitement du rayonnement comme les méthodes P1 ou DOM en utilisant les coefficients d'absorption moyen. Ces méthodes permettent non seulement de considérer les pertes dues à l'émission des régions les plus chaudes, mais également d'envisager de considérer l'absorption du rayonnement dans le plasma environnant. Le choix du modèle de rayonnement peut affecter la prédiction de la température dans certaines zones et donc les propriétés du plasma et jouer sur la prédiction du déplacement de l'arc.

II.6.3. Conditions initiales

Afin d'initialiser la décharge, un canal conducteur est créé entre les deux rails en injectant de l'énergie dans un cylindre pendant un court intervalle de temps. Dans l'article d'Iturregi [Itu_1], l'auteur indique que l'arc est initialisé par un canal de température de 10 kK, sans que ni la taille de ce canal ni sa pression ne soit précisée.

II.6.4. Conditions aux limites

Le modèle est tridimensionnel et ne considère pas de plan de symétrie. Les conditions limites sont données dans le Tableau II.1 et se rapportent à la géométrie donnée Figure II.4. Les murs en face avant et arrière sont nommés « parois ».

La vitesse du gaz n'est pas calculée dans le domaine solide (rails, séparateurs, bouchages et parois) et nous supposons une vitesse nulle sur les surfaces. Pour l'équation de l'énergie ; la « méthode couplée » proposée par le logiciel Fluent est appliquée entre le plasma et les rails. Cette méthode prend en compte un transfert de chaleur « simplifié » (uniquement par conduction, sans décrire les phénomènes plus complexes dans les gaines comme les flux électroniques ou ioniques). Pour les zones d'échange vers l'extérieur de la maquette, une condition de Neumann est fixée pour la température fonction du signe de la convection. L'intensité du courant est calculée par la résolution de la conservation du potentiel scalaire. Une distribution homogène de la densité du courant est donnée à l'entrée « In » et un potentiel de référence de 0 V est imposé à la sortie « Out ». La température des murs latéraux en face avant et arrière est posée à 300 K. Le champ magnétique est calculé à partir du potentiel vecteur dans le domaine fluide et la formulation de Biot&Savart est utilisée en condition aux limites.

Condition limite	Vitesse	Energie	Potentiel électrique	Champ magnétique
Anode	$v = 0$ m/s	Transfert chaleur	Continuité fluide/solide	Biot&Savart
Cathode	$v = 0$ m/s	Transfert chaleur	Continuité fluide/solide	Biot&Savart
In	/	$dT/dn = 0$	$j = I/S$	/
Out	/	$dT/dn = 0$	0 V	/
ExAm	$v = 0$ m/s	Neumann Convection	$dV/dn = 0$	Biot&Savart
ExAv	$P = P_{atm.}$	Neumann Convection	$dV/dn = 0$	Biot&Savart
Parois	$v = 0$ m/s	300 k	$dV/dn = 0$	Biot&Savart
Séparateurs	$v = 0$ m/s	Transfert chaleur	Continuité fluide/solide	Biot&Savart

Tableau II.1 : Conditions limites utilisées dans la géométrie

II.6.5. Influence du nombre de séparateurs sur le comportement de l'arc

Dans cette partie, nous présentons les études paramétriques donnant l'évolution de la tension en fonction du nombre de séparateurs. L'intensité du courant est constante et égale à 50 A. Afin de simuler les gaines anodique et cathodique, la courbe « c » de la Figure II.6 est choisie et appliquée pour introduire la résistivité additionnelle au niveau des rails et des séparateurs. Le milieu est de l'air à la pression atmosphérique. Pour cette géométrie, le pas de temps de calcul est de 10 μ s. A noter qu'Iturregi dans ses travaux [Itu_1] avait utilisé un pas de temps de 2.5 μ s. Pour analyser le comportement de la segmentation de l'arc et réduire le temps de calcul, l'arc est initialisé à la position $x = 1.5$ mm devant le séparateur. Pour l'étude paramétrique, un canal conducteur est initié à $t = 0$ entre les deux rails avec une température moyenne égale à 20 kK dans un cylindre de 4 mm diamètre.

Nous allons, dans ce qui suit, présenter les résultats obtenus sur les différentes configurations.

II.6.5.1. Cas sans séparateur (0 Sp_50 A)

Le comportement de l'arc est présenté par la norme de la densité de courant (Figure II.7) et de la pression (Figure II.8) sur le plan (xz) en milieu de géométrie. Les polarités anode (A) et cathode (C) sont précisées sur les figures. L'arc se déplace entre les deux rails sous l'effet de la force de pression et de la force de Lorentz. Dans cette configuration, le bouchage amont (ExAm) est fermé et le bouchage aval (ExAv) est ouvert.

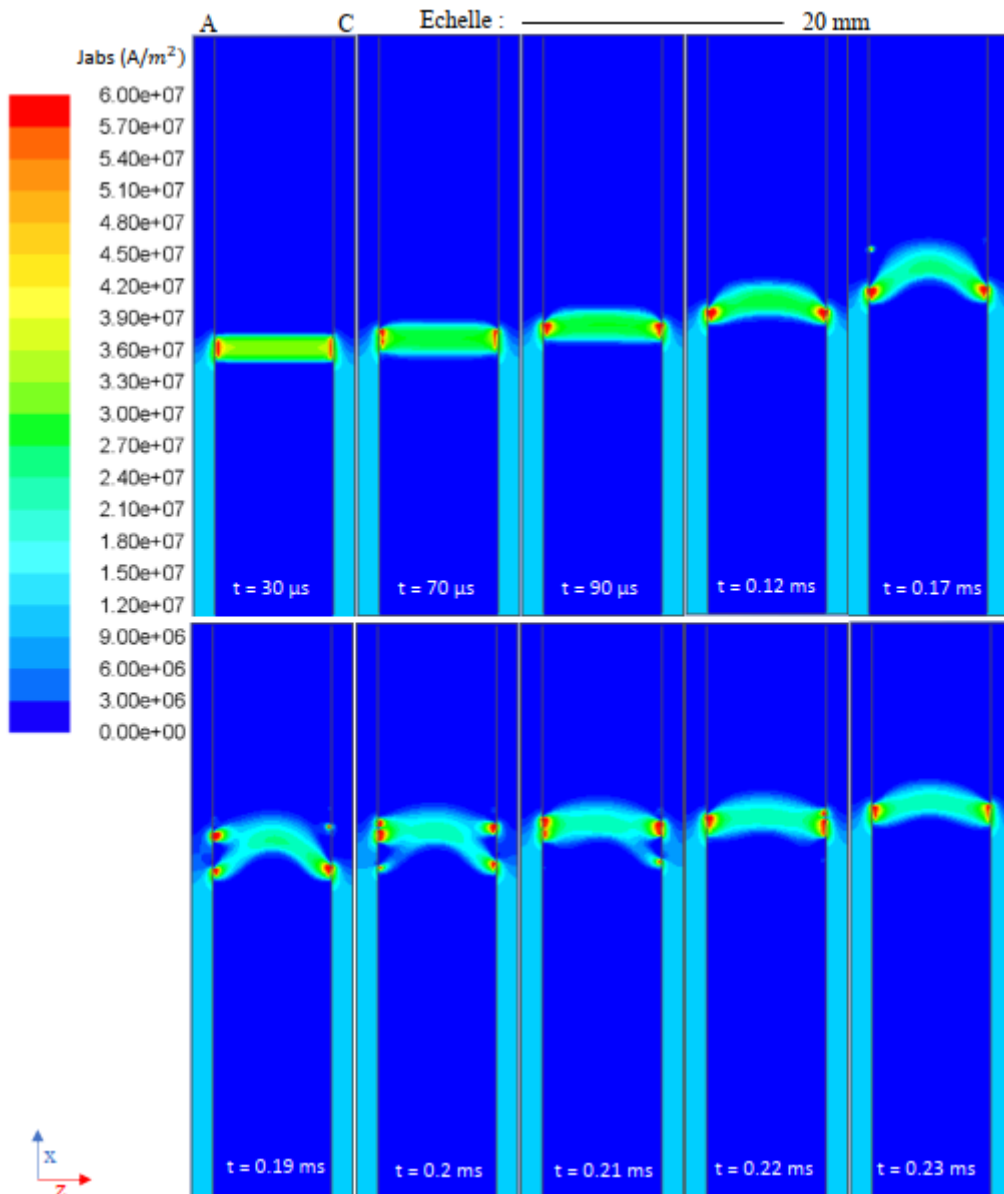


Figure II.7 : Norme de la densité courant dans le cas sans séparateur amont fermé, aval ouvert (0 Sp_50 A)

Sur la Figure II.7, on constate que la colonne d'arc se galbe à partir de 0.12 ms. Cela peut être dû à l'effet combiné des pressions en amont supérieures à celles en aval (Voir Figure II.8) et de la force de Lorentz créée par les rails qui poussent l'arc vers les séparateurs.

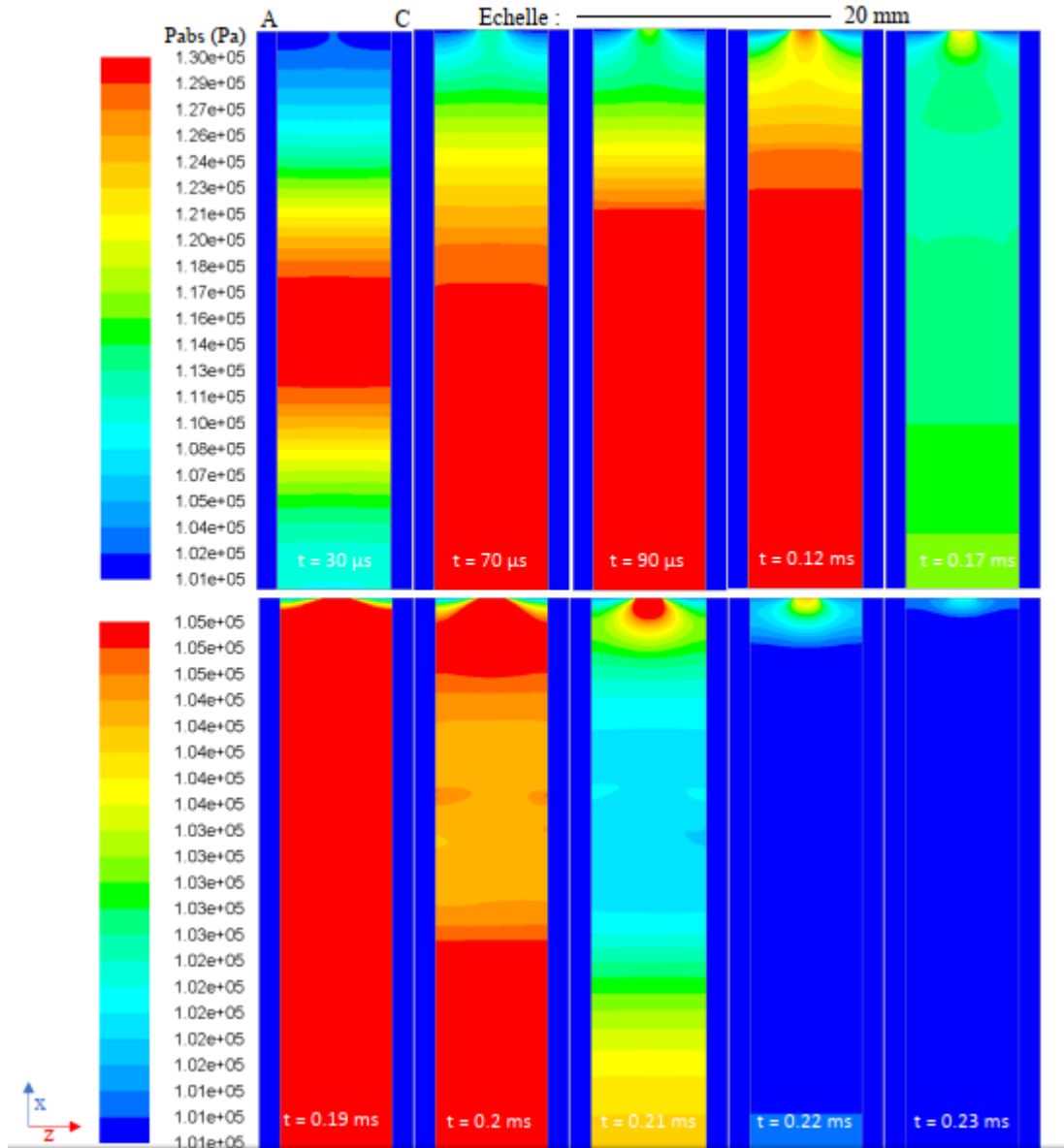


Figure II.8 : Variation de la pression sans séparateur (0 Sp_50 A)

En effet, pour les premiers pas de temps sur la Figure II.8, on constate que la pression est maximale à l'endroit où l'arc est initié puis s'uniformise à l'arrière de ce dernier jusqu'au bouchage amont. Cette « uniformisation » de la pression à l'arrière de l'arc peut être expliquée par un effet de bouchage de l'arc et le fait que la surface amont soit fermée. A l'autre extrémité, la surface aval étant ouverte à la pression atmosphérique, un gradient de pression existe.

A $t = 0.17$ ms, la colonne d'arc s'est avancée vers l'aval suivie par les pieds d'arc. A $t = 0.19$ ms, on constate à l'anode la création de deux pieds d'arc. Nous avons tracé sur la Figure II.9 les champs de température obtenus. Il apparaît que le milieu est préchauffé par

l'avancement de la colonne ce qui entraîne la présence de nouveaux pieds d'arc sur les électrodes de 0.19 à 0.22 ms.

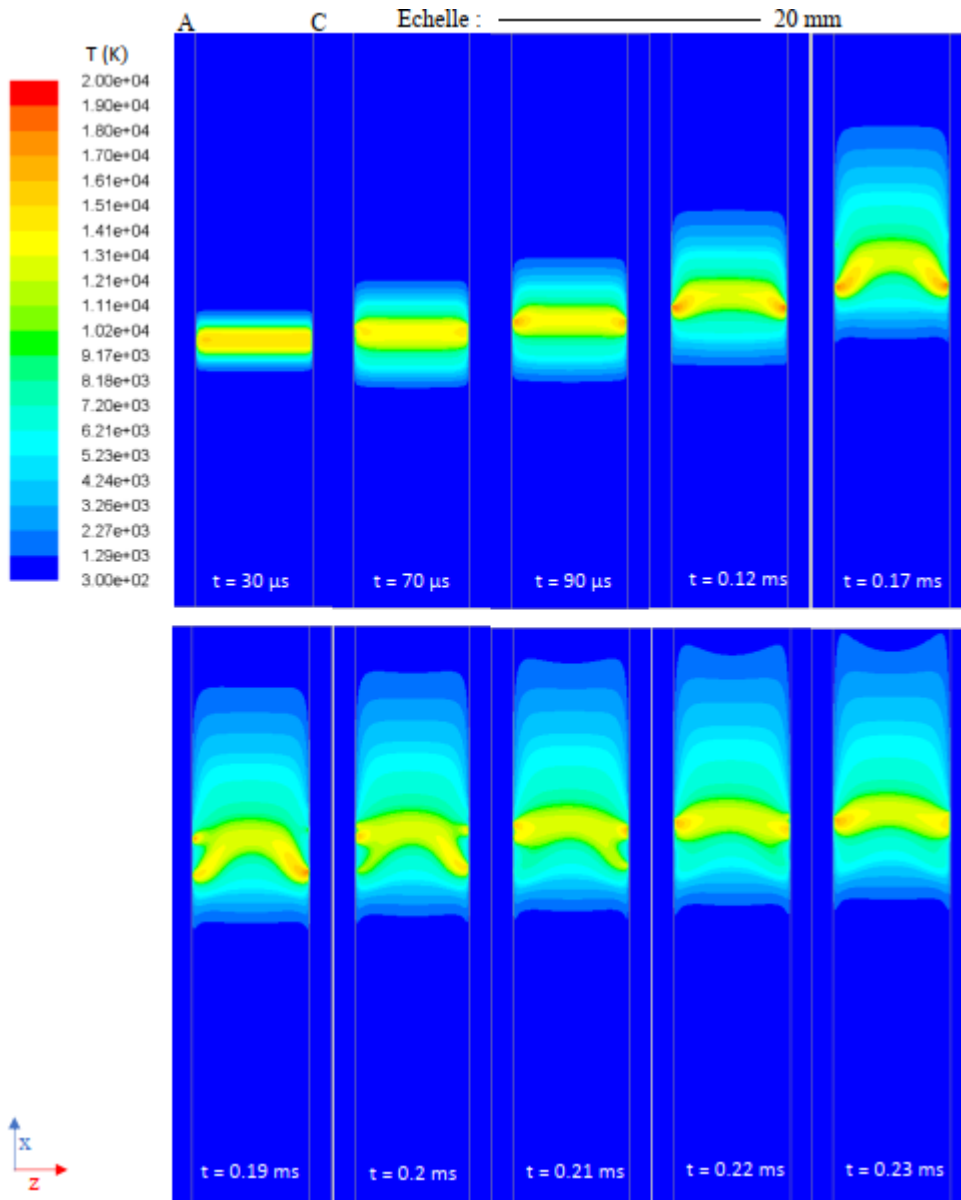


Figure II.9 : Champs température sans séparateur (0 Sp₅₀ A)

II.6.5.2. Cas avec un séparateur (1 Sp₅₀ A)

Nous avons mené le même type d'étude sur la géométrie comportant un séparateur en gardant la même configuration au niveau des entrée/sortie (fermée en amont/ouverte en aval).

Les champs, de la norme de la densité de courant, de pression ainsi que de la température, obtenus pour ce nouveau cas sont donnés respectivement sur les Figures II.10, II.11 et II.12.

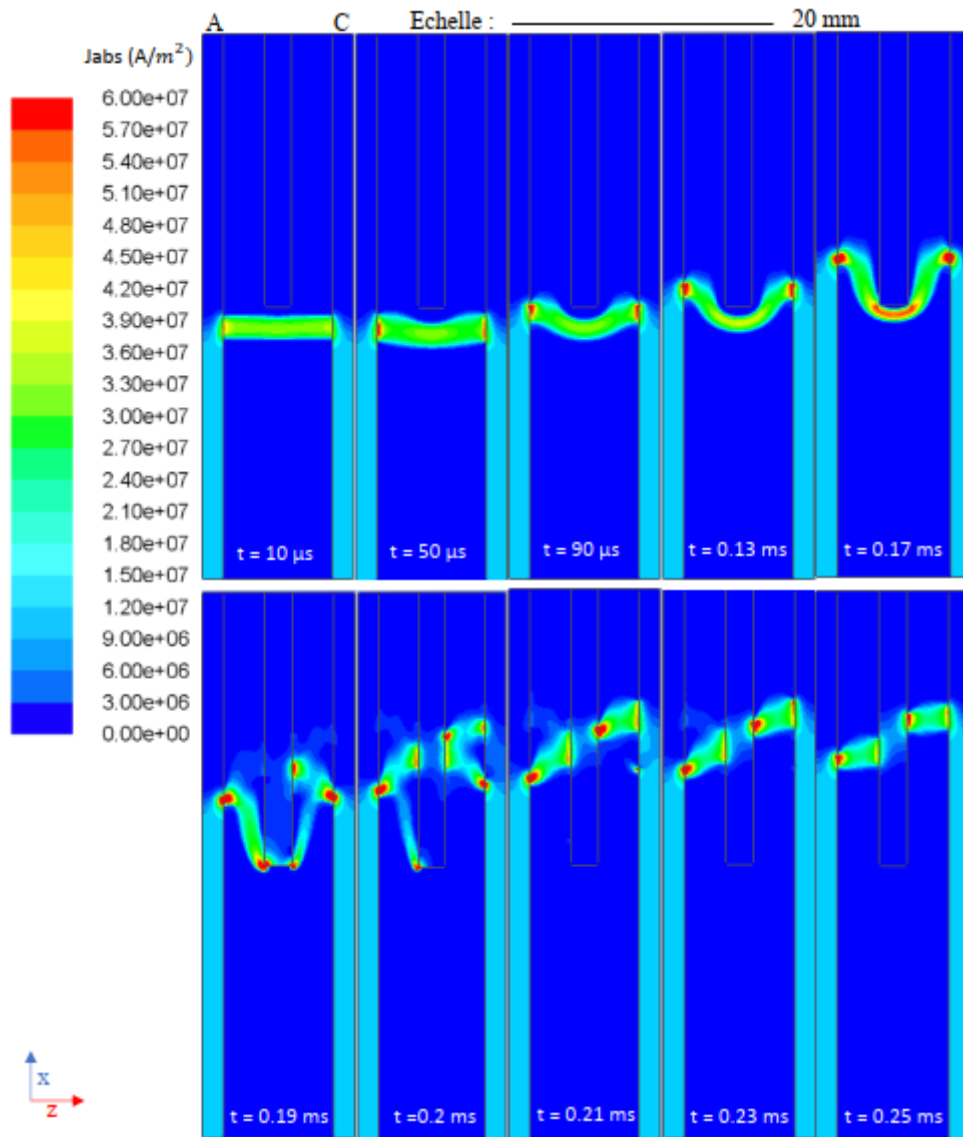


Figure II.10 : Norme de la densité de courant pour un séparateur (1 Sp₅₀ A)

La valeur moyenne de la densité de courant est d'environ $3 \cdot 10^7$ A/m² dans la colonne d'arc avec des valeurs plus élevées autour de $6 \cdot 10^7$ A/m² près des pieds d'arc et devant le séparateur lorsque l'arc est galbé (Voir Figure II.10). La forme de l'arc, illustrée par les champs de la densité et de la température, montre que la colonne d'arc semble entraînée par les pieds d'arc. Ainsi, l'arc commence à se galber et se déplacer vers le séparateur dès $t = 50 \mu\text{s}$. A partir de ce temps, il apparait clairement que le séparateur est un obstacle pour le déplacement de la colonne d'arc. Poussés par la force de Lorentz les pieds d'arc continuent de se déplacer. Un autre

phénomène à considérer sur la colonne est la force de pression. On observe que de $10 \mu\text{s}$ à 0.21 ms , la pression dans la partie aval de la maquette est plus faible que celle en amont (Voir Figure II.11) créant ainsi un effet de détente.

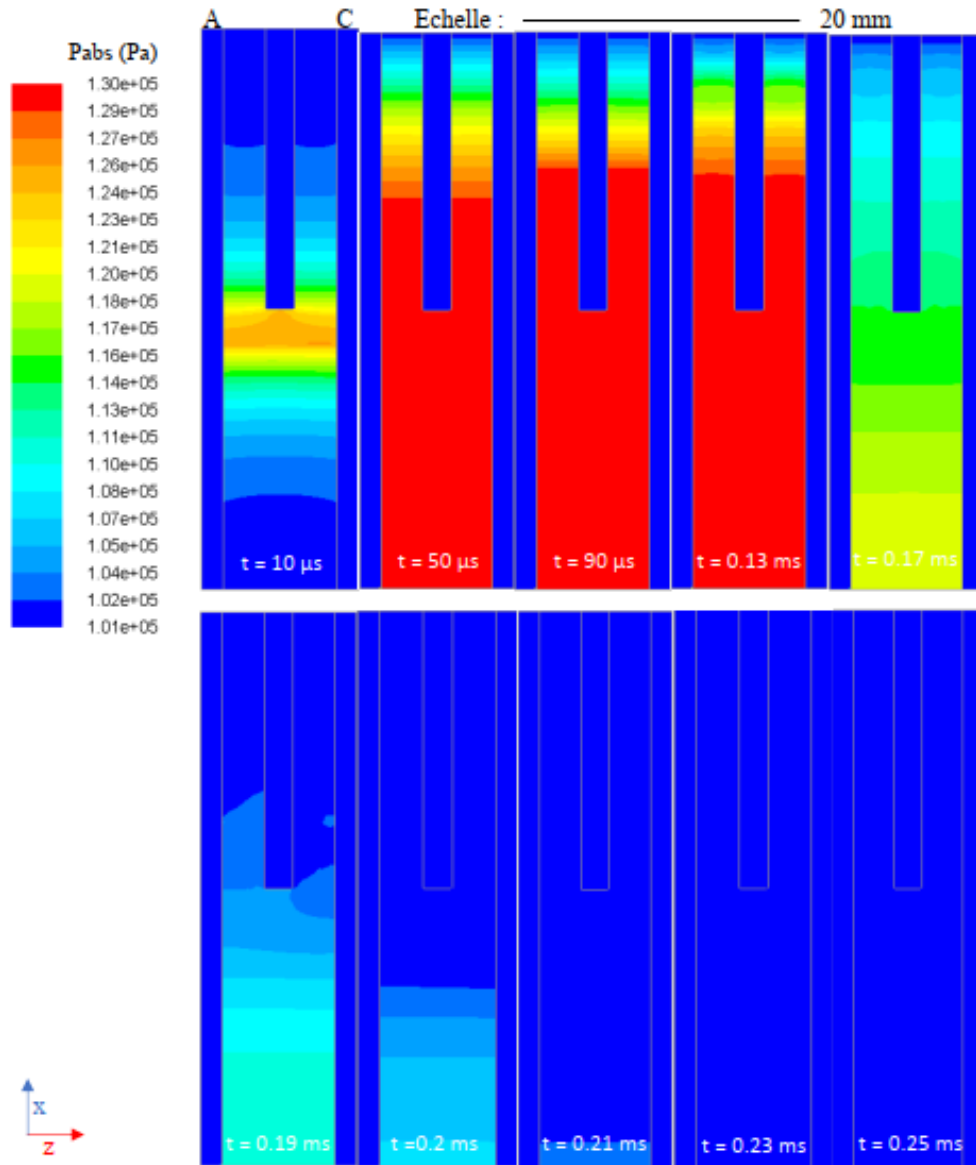


Figure II.11 : Variation de la pression pour un séparateur (1 Sp_50 A)

A $t = 0.13 \text{ ms}$, l'arc est galbé à cause de la présence du séparateur et on peut observer une augmentation de la température au voisinage du séparateur. Cette augmentation de température favorise la commutation de l'arc sur le séparateur.

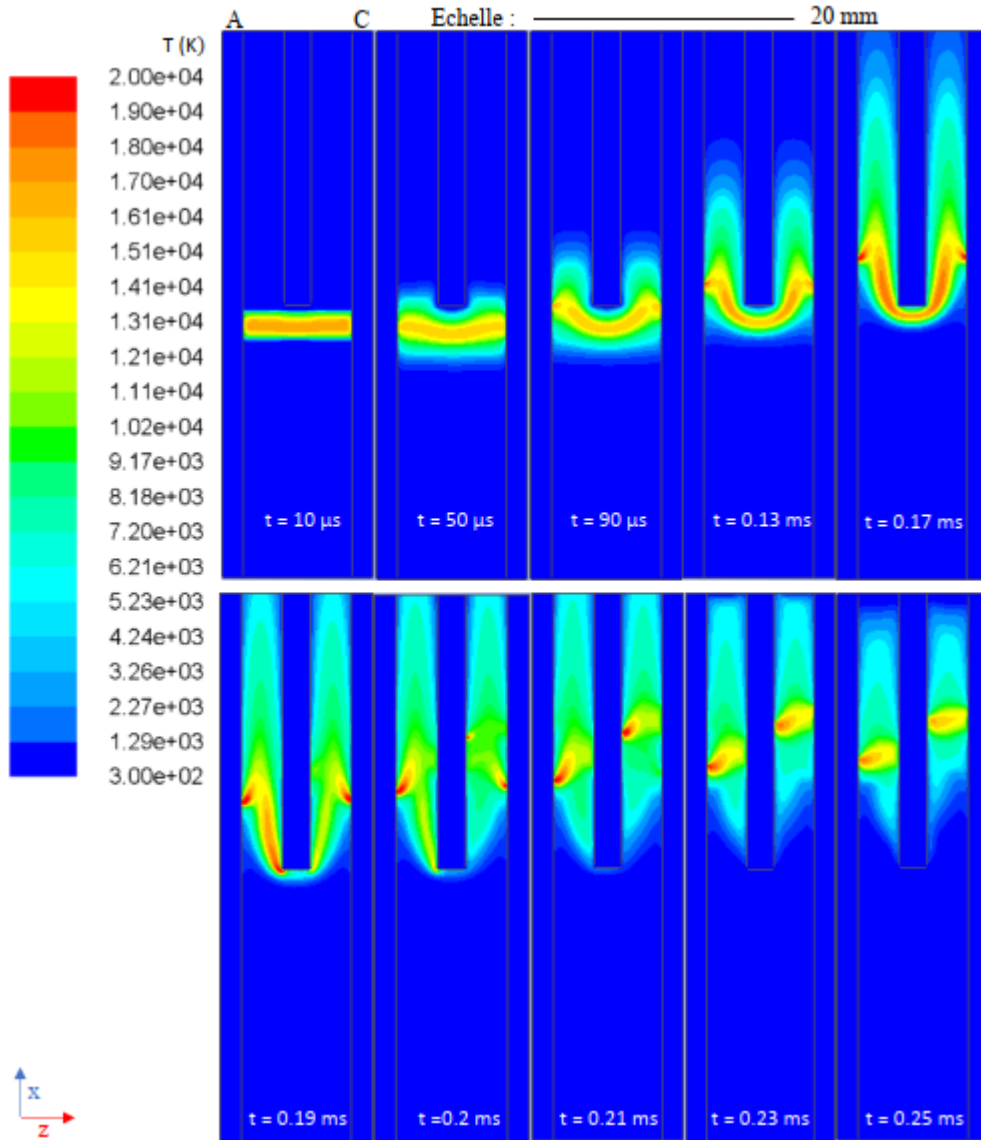


Figure II.12 : Champs de la température pour un séparateur (1 Sp₅₀ A)

Dans cette simulation, il n'existe pas de plan de symétrie, néanmoins un comportement similaire de l'arc est observé sur les deux rails de 0 à 0.17 ms. A $t = 0.19 \text{ ms}$, nous pouvons observer que l'arc a commuté sur le séparateur. Sur la Figure II.12, une dissymétrie existe entre la cathode et l'anode à partir de 0.19 ms. Le pied d'arc cathodique se déplace plus rapidement que celui anodique. Comme le traitement de la gaine est similaire des deux côtés, la différence ne peut être due qu'à de petites différences sur le maillage ou au flux enthalpie des électrons (voir équation II.6) qui agit de manière significative sur le côté anodique.

A partir de 0.19 ms, le galbe de l'arc s'estompe et le courant circule progressivement dans le séparateur conduisant à une diminution de la tension totale. L'allure de la tension de l'arc sera présentée dans la partie suivante (II.6.5.4).

Ces Figures II.10 et II.12, montrent l'aptitude de nos développements à décrire des multi accrochages et le passage du courant dans les séparateurs. Ces multi accrochages se produisent après la stagnation de l'arc dans un milieu qui a été chauffé ou qui est resté chaud.

II.6.5.3. Cas avec deux séparateurs (2 Sp_50 A)

Afin de compléter notre étude, nous avons considéré un cas avec deux séparateurs. A noter que les temps présentés sur le comportement de l'arc ne sont pas les mêmes que dans les autres cas. En effet, le déplacement de l'arc, le comportement des processus ainsi que les temps « d'intérêts » sont différents. Les champs de la densité de courant et de la température sont donnés sur les Figures II.13 et II.14. Pendant les premiers instants, jusqu'à $t = 0.14$ ms, le comportement de l'arc est similaire à celui du cas avec un séparateur.

A $t = 0.16$ ms l'arc commence à sauter sur les séparateurs et deux pieds d'arc apparaissent (contre 0.21 ms pour un séparateur). Sur la Figure II.13, pour les temps 0.14 ms et 0.15 ms la densité de courant à travers les séparateurs augmente et le courant qui circulait autour des séparateurs diminue. Même si les temps présentés ne sont pas les mêmes, on constate un comportement différent pour la commutation de l'arc suivant le nombre de séparateurs. Dans le cas à deux séparateurs, l'arc n'est pas autant galbé que dans le cas avec un séparateur. En effet, il commute plus rapidement sur les séparateurs conduisant à une augmentation rapide de la tension (augmentation de 15 V de 0.14 à 0.16 ms). La courbe de tension sera présentée dans la partie suivante pour une analyse comparative suivant le nombre de séparateurs (Voir Figure II.15). A $t = 0.17$ ms, des accrochages en multipoints peuvent être observés sur une même électrode. Cependant, ils sont moins fréquents que dans le cas à un séparateur. Enfin, il est à noter que quel que soit le nombre de séparateurs, les températures dans le plasma sont du même ordre de grandeur (Voir Figure II.13 et Figure II.14) et le comportement de l'arc est similaire côté anode ou cathode.

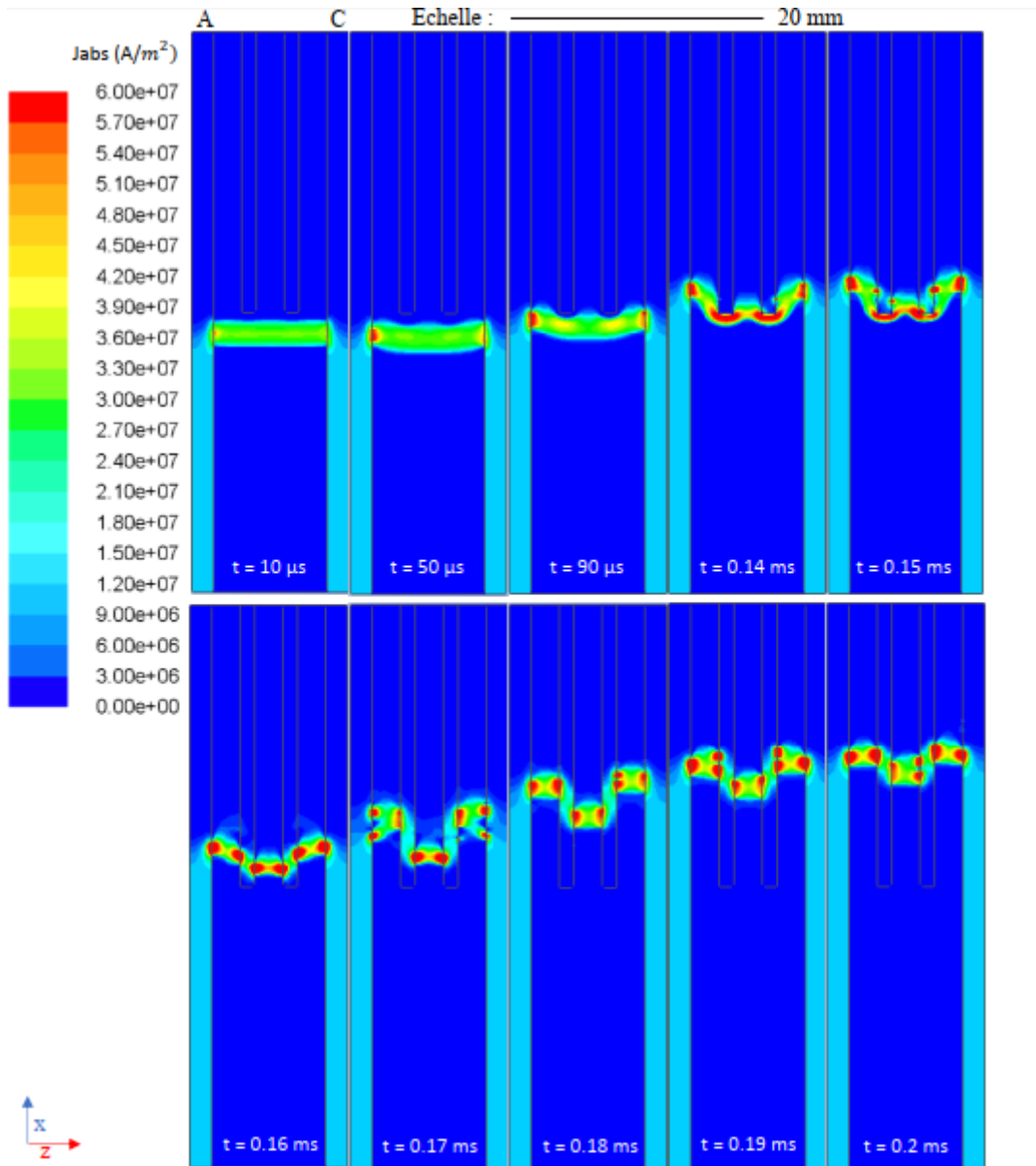


Figure II.13 : Norme de la densité de courant pour deux séparateurs (2 Sp₅₀ A)

Lorsque l'arc a commuté (Figure II.13), il existe trois portions d'arcs. L'arc central situé entre les deux séparateurs est toujours en position arrière. Cela peut être expliqué par le fait que les deux pieds d'arc sur les rails sont poussés par les forces électromagnétiques dues à la circulation du courant dans les rails. La position arrière de l'arc central contribue à pousser les pieds de l'arc sur les rails par effet de boucle. Ce comportement avait été vu lors de l'étude bibliographique sur des travaux expérimentaux [Lin_1]. Il s'agit là d'un point intéressant qui laisse présager la complexité de ce qu'il se passe pour des configurations plus proches de la réalité avec plus d'une dizaine de séparateurs.

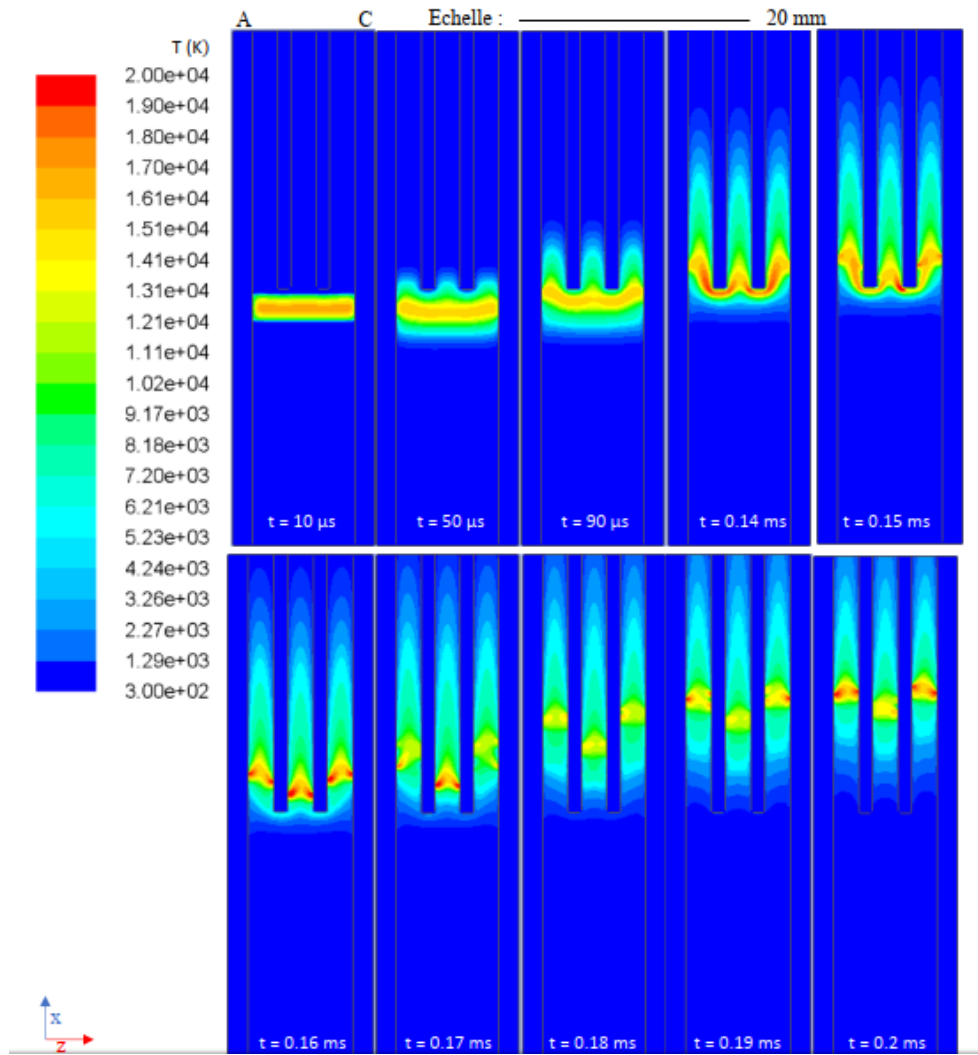


Figure II.14 : Champs température pour deux séparateurs (2 Sp₅₀ A)

II.6.5.4. Analyse comparative suivant le nombre de séparateurs

La Figure II.15 donne les évolutions de tension de l'arc en fonction du temps pour différents nombres de séparateurs dans la chambre (Aucun séparateur – 0 Sp ; Un séparateur – 1 Sp ; 2 séparateurs – 2 Sp). Le premier temps de calcul avec la résolution de toutes les équations est à $t = 10 \mu\text{s}$, correspondant aux premières valeurs de chute de tension tracées sur la Figure II.15. Pendant deux pas de temps le comportement de l'arc est similaire pour les trois configurations, l'arc est situé entre les deux rails et la présence des séparateurs n'influence pas la tension de la colonne d'arc.

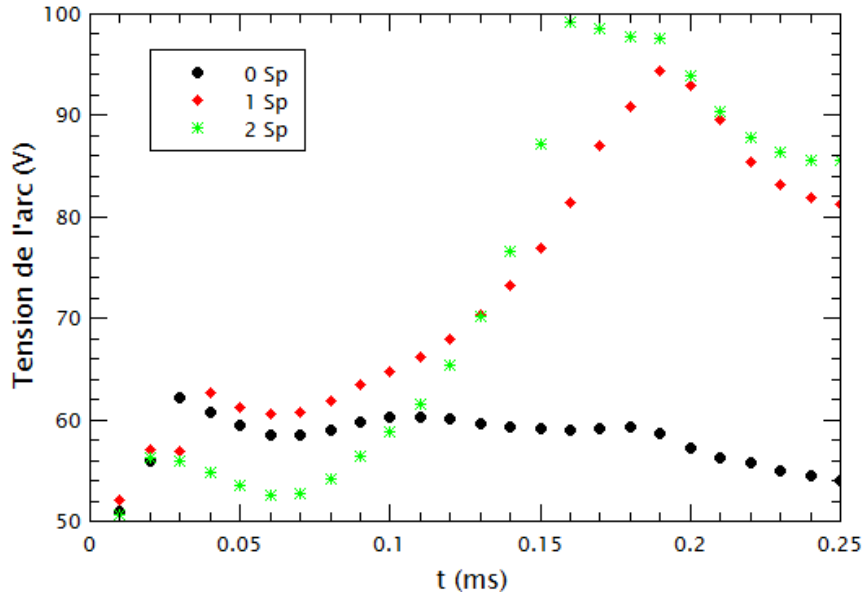


Figure II.15 : Evolutions de la tension de l'arc pour zéro (0 Sp), un (1 Sp) et deux (2 Sp) séparateurs

Pour le cas sans séparateur (0 Sp), la tension de l'arc augmente de 10 μ s à 30 μ s dû à la température de l'arc qui diminue de la température initiale de 20 kK à 15 kK (Voir Figure II.9). Ensuite la tension décroît et présente un palier quasi constant.

Dans le cas avec un séparateur (1 Sp), la tension augmente progressivement jusqu'à 61 V à 50 μ s pour les mêmes raisons. Ensuite, la tension continue d'augmenter pour atteindre sa valeur maximale de 94 V à $t = 0.19$ ms. La cause principale de cette augmentation de tension peut être attribuée à l'allongement de l'arc qui s'enroule autour du séparateur (Voir Figure II.10). Une fois l'arc commuté dans les séparateurs, la tension d'arc diminue et ce malgré le fait que deux chutes de tension de gaines supplémentaires soient prises en compte. La tension, lorsque l'arc a commuté, reste toutefois inférieur à celle avant la commutation.

Dans le cas avec deux séparateurs (2 Sp), le déplacement de l'arc et le comportement des processus sont différents. A $t = 0.14$ ms, la tension de l'arc augmente jusqu'à 77 V tant que l'arc est galbé devant les séparateurs. Une fois l'arc commuté dans les cas avec séparateurs, à $t = 0.25$ ms, la différence de la tension pour un et deux séparateurs n'est que de 4 V. On aurait pu s'attendre à ce que le passage d'un à deux séparateurs augmente sensiblement la tension dû à la présence de plus de gaines. Ainsi, une tension supplémentaire de 20 V entre un et deux séparateurs devrait exister. Cependant, l'interprétation reste difficile à faire car les chemins de

courant, les longueurs d'arc, les positions des pieds d'arc ainsi que la température moyenne sont différentes.

II.6.6. Influence de l'intensité de courant sur le comportement de l'arc

Nous nous intéressons à présent à l'influence de l'intensité de courant sur la segmentation de l'arc. La configuration avec deux séparateurs pour un courant constant de 100 A est utilisée pour cette étude.

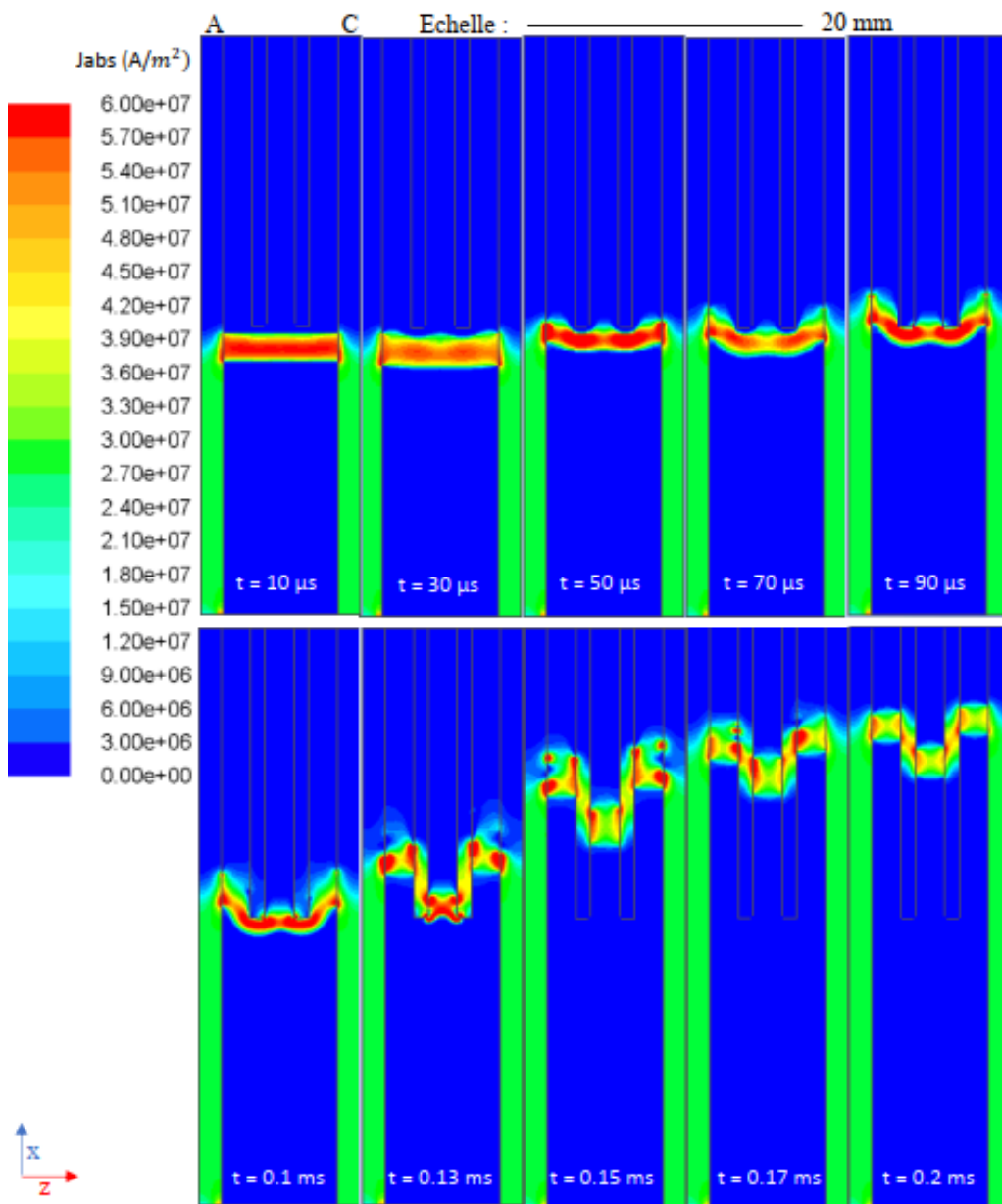


Figure II.16 : Norme de la densité de courant pour deux séparateurs (2 Sp_100 A)

Nous présentons le champ de la densité courant (Figure II.16) et le champ de la température (Figure II.17) sur le plan milieu de xz. Ces figures sont à comparer à celles obtenues à 50 A dans la partie II.2.5.3.

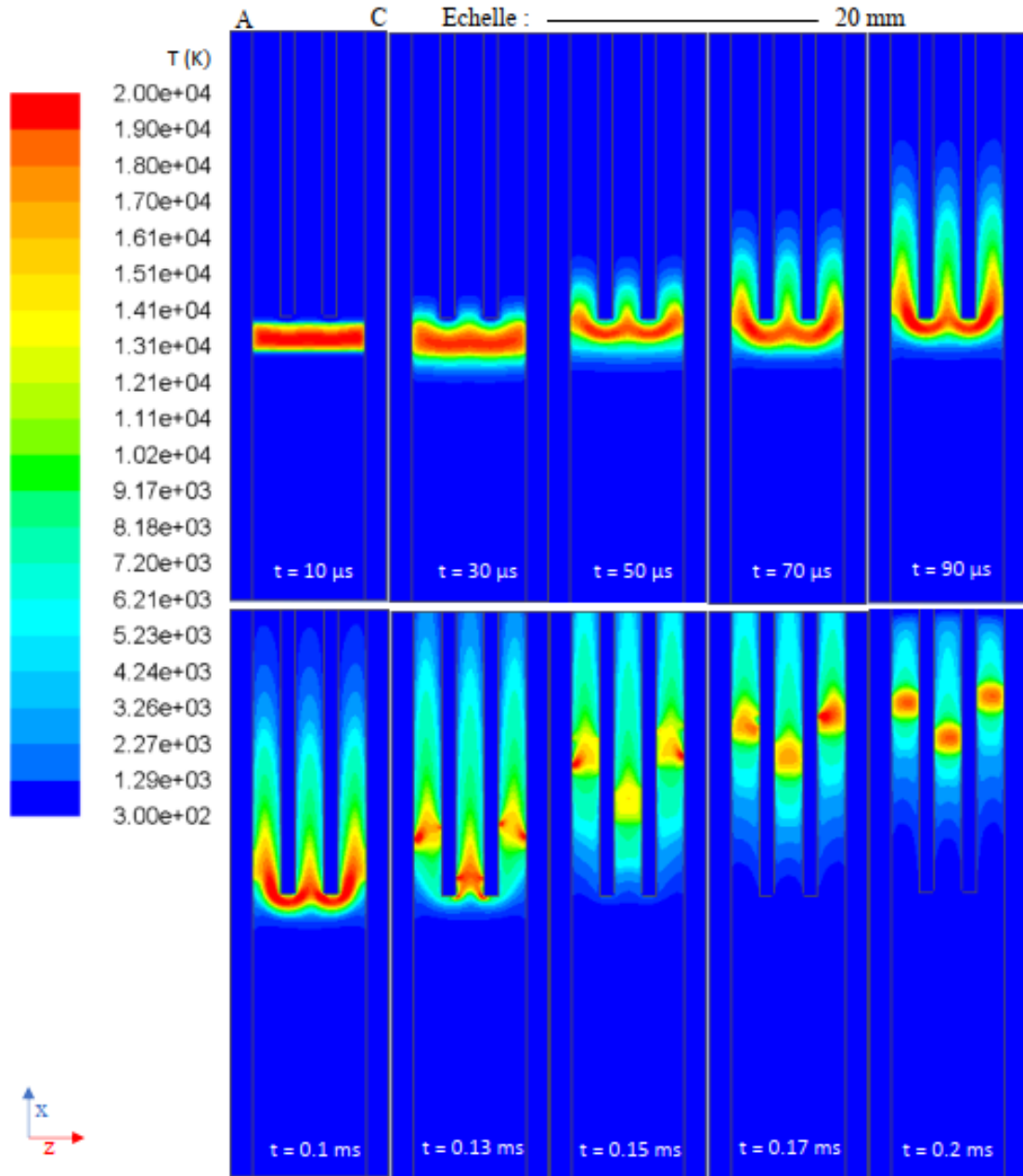


Figure II.17 : Champs de température pour deux séparateurs (2 Sp₁₀₀ A)

Concernant la commutation, sur la Figure II.16, l'arc a sauté sur les séparateurs à $t = 0.13 ms$ et les pieds d'arc se déplacent jusqu'aux deux tiers du séparateur à $t = 0.2 ms$ avec l'apparition de nouveaux pieds d'arcs à l'avant à $t = 0.15 ms$. En comparant avec ce qui est

observé à 50 A (Figure II.13) l'arc à 0.2 ms n'était qu'à la moitié du séparateur. Il avance donc plus rapidement à 100 A qu'à 50 A probablement du fait des forces de Lorentz deux fois plus importantes puisque le courant a été doublé. Sur la température à présent (Figure II.17), on peut constater qu'elle est plus importante à 100 A (autour de 20 kK) qu'à 50 A (autour de 15 kK). Cela peut être expliqué par une puissance injectée plus importante.

Sur la Figure II.18, nous présentons la chute de tension entre les deux rails pour deux valeurs de l'intensité du courant 50 A et 100 A. Pour le courant à 100 A, la chute de tension totale est plus élevée lorsque l'arc se situe entre les deux rails avec une différence de 8 V.

La commutation sur les séparateurs se produit à $t = 0.13$ ms pour 100 A et à $t = 0.16$ ms pour 50 A. Le temps de commutation arrive plus tôt lorsque l'on augmente la valeur de l'intensité de courant. En effet avec une intensité de courant plus élevée les forces de Lorentz sont plus importantes et la colonne d'arc arrive plus rapidement devant les séparateurs. La section de la colonne d'arc pour $I = 100$ A est plus importante, donc l'arc n'est pas aussi galbé entre les séparateurs et il commute plus facilement. La différence entre les deux évolutions de tension est due à la température du milieu qui agit directement sur le trajet de l'arc et donc sur la valeur de tension.

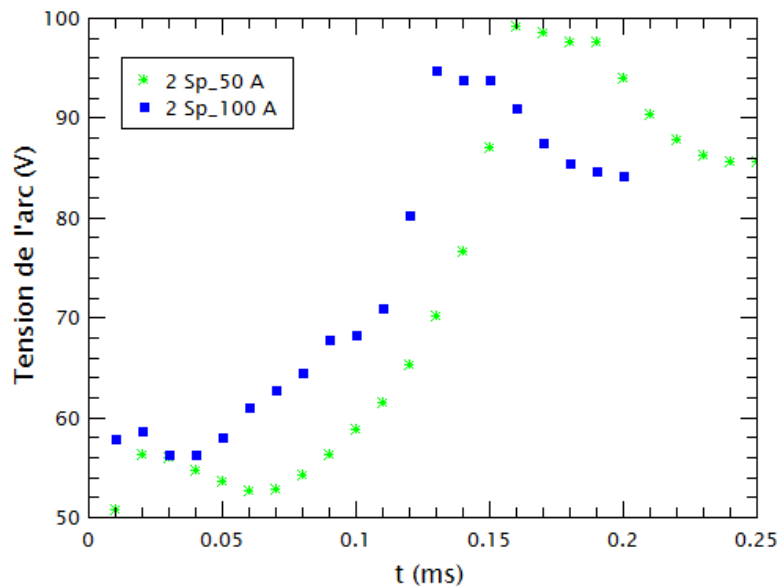


Figure II.18 : Influence de l'intensité de courant sur les évolutions de la tension pour le cas à deux séparateurs

II.6.7. Synthèse des résultats de modélisation

Dans ce chapitre les bases du modèle magnétohydrodynamique ont été présentées. A partir de ce modèle, de ses hypothèses, des conditions aux limites, celui-ci a été appliqué à une configuration de la littérature [Itu_1]. Cette configuration a été choisie pour plusieurs raisons :

- Elle est de faibles dimensions et permet donc de tourner les différents cas envisagés plus aisément (5 jours par configuration dans le cas d'un amorçage devant le séparateur).
- Une seule géométrie est construite, les cellules sont ensuite affectées en solides ou fluides suivant le nombre de séparateurs envisagés.
- Les résultats obtenus peuvent être confrontés à ceux de la littérature.
- Lors de notre étude bibliographique, certains résultats présentés par l'auteur Iturregi et al [Itu_1], nous avaient semblé incohérents et nous voulions les infirmer/confirmier.
- Dernier point, les auteurs ont utilisé un module optionnel boîte noire sans trop expliquer et justifier ce qui était mis en place.

Nous avons étudié deux paramètres, l'influence du nombre de séparateurs sur l'évolution temporelle de la tension pour une intensité de courant fixe de $I = 50$ A, et l'influence de l'intensité du courant $I_1 = 50$ A et $I_2 = 100$ A. La méthode d'initialisation de l'arc est identique à celle utilisée par les auteurs, à savoir la mise en place d'un canal de température afin de permettre, grâce à la valeur de la conductivité électrique correspondante, la circulation du courant. Contrairement aux résultats trouvés par l'auteur nous avons bien une évolution de la tension différente suivant la configuration étudiée avec des valeurs de la tension totale d'autant plus grandes que le nombre de séparateurs est élevé. Les résultats sont toutefois difficiles à interpréter, en effet suivant le nombre de séparateur l'arc pour un temps donné est plus ou moins galbé, et l'arc peut ou non avoir commuté partiellement ou en totalité. La tension est la résultante de la longueur de l'arc et des chutes de tension. On ne retrouve donc pas lors de la comparaison pour un temps donné la différence des 20 V systématiques qui proviendraient des chutes de tension dues aux gaines des séparateurs. Néanmoins l'analyse des résultats montre bien la cohérence du comportement décrit par le modèle mis en place et l'aptitude du code à décrire la segmentation du courant avec la prise en compte de l'augmentation de la tension. L'étude sur l'influence de la valeur de l'intensité de courant était elle aussi destinée à montrer la cohérence du comportement décrit par le modèle. L'augmentation de la valeur du courant

conduit à un plasma plus chaud qui préchauffe le milieu gazeux avant que l'arc ne se déplace. Cette augmentation de la valeur de l'intensité de courant amène aussi à des valeurs des forces de Lorentz supérieures et donc à un déplacement plus rapide. L'arc à 100 A arrive donc plus tôt au niveau des séparateurs. Une autre conséquence réside dans la résistivité de l'arc. L'arc pour $I = 100$ A se galbe moins sur le séparateur et commute plus facilement. Ce résultat est visible sur la Figure II.18.

Les résultats et configurations utilisés jusqu'à présent étaient destinés à une étape de confrontation et d'interprétation. Les conditions aux limites et initiales étaient calées sur celles utilisées par les auteurs. Comme nous l'avons vu très peu de ces résultats sont confrontés avec des résultats expérimentaux, et lorsque cela est fait, même si les tendances sont similaires, les constantes de temps des phénomènes et des vitesses de déplacement sont totalement différentes. Nous allons donc à présent utiliser notre modèle et confronter les résultats avec les travaux expérimentaux issus de nos maquettes. Dans un premier temps nous allons présenter nos configurations expérimentales, ainsi que les études paramétriques réalisées avant de confronter ces résultats à ceux de la modélisation et au difficile choix des conditions initiales.

CHAPITRE III : Expériences et étude paramétrique

Les premiers travaux ont consisté à prendre en main la maquette expérimentale qui avait été utilisée dans les travaux précédemment menés dans l'équipe AEPPT [Qué_1] ainsi que les outils associés. Puis, une nouvelle maquette a été mise en place pour réaliser différentes configurations expérimentales. Dans ce chapitre, nous présenterons à la fois les outils utilisés pour le diagnostic de la décharge mais également ceux nécessaires à l'exploitation des résultats.

III.1. Présentation de l'expérience

III.1.1. Prise en main de la maquette des travaux de J. Quéméneur [Qué_1]

Dans un premier temps, la prise en main de la maquette utilisée dans les travaux antérieurs a été réalisée afin de se sensibiliser et se familiariser avec le dispositif expérimental. Cette maquette est présentée sur la Figure III.1. Elle est composée d'une chambre de 90x22 mm sur 10 mm de profondeur, de deux rails en cuivre, d'un axe sur lequel est fixé un bras rotatif. Des bouchages sont présentes en amont et aval pour l'échappement des gaz. Ces bouchages peuvent être partiellement ou totalement fermés. Une façade en plexiglass permet de fermer l'avant de la maquette. Cette chambre est instrumentée en capteurs de pressions localisés sur la face arrière.

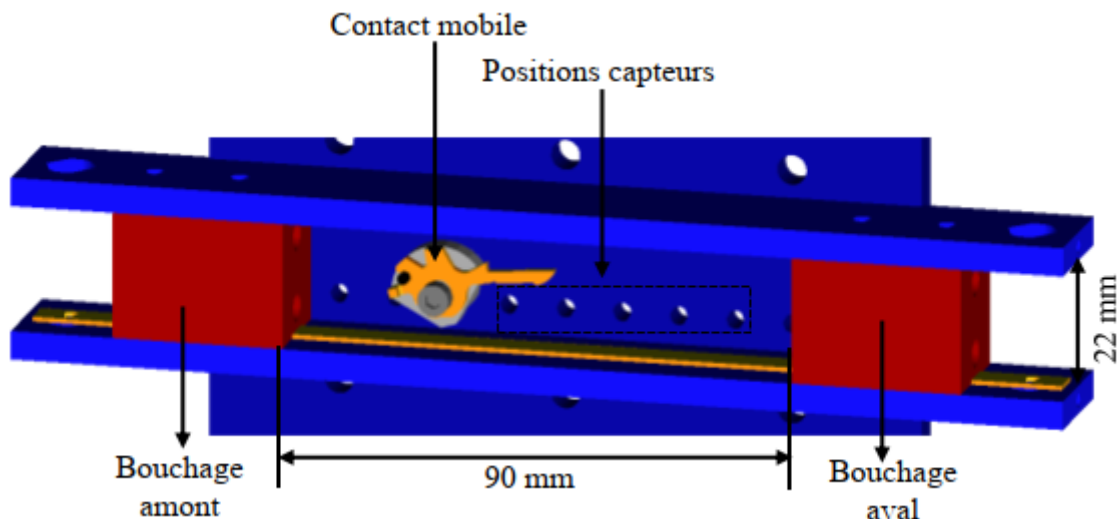


Figure III.1 : Maquette des travaux antérieurs [Qué_1]

Deux types d'amorçage peuvent être utilisés, un amorçage par fil fusible ou un amorçage par contact à l'aide d'un bras rotatif. Le fil fusible nécessite un démontage de la partie en

plexiglass située sur la face avant et un positionnement du fil de cuivre entre les deux rails. L'amorçage par bras rotatif est réalisé par un système d'ouverture qui est présenté sur la Figure III.2.

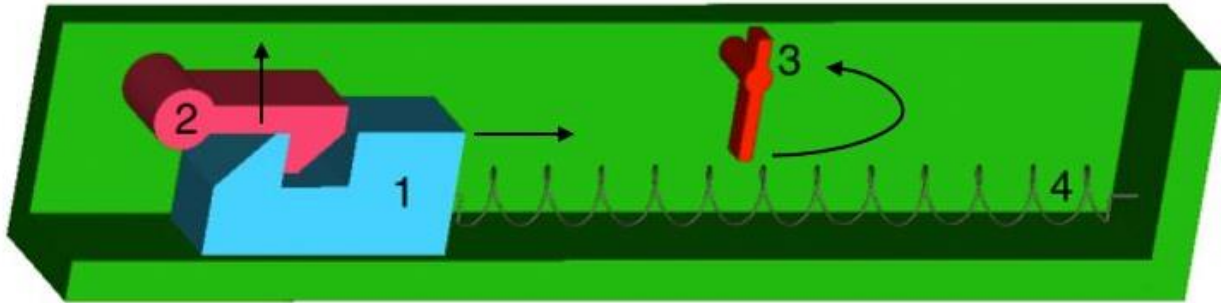


Figure III.2 : Schéma de principe du système d'ouverture. 1 : masse ; 2 : gâchette ; 3 : levier ; 4 : ressort [Qué_1]

Une gâchette (2) doit être armée. Elle bloque une masse (1) reliée à un ressort (4). Lors du déclenchement, un solénoïde relié en (2) libère la gâchette qui met la masse en mouvement sous l'action du rappel d'un ressort qui vient percuter un levier (3) qui actionne le bras. La flèche horizontale représente la translation de la masse qui est libérée par la gâchette. Cette masse vient percuter le bras et le mettre en rotation afin de bouger le contact mobile (Figure III.1) du rail inférieur vers le rail supérieur.

Cette maquette permet d'étudier le comportement de l'arc lors de la commutation, ainsi que l'influence de la vitesse d'ouverture du bras. Cependant, la phase de segmentation n'a pas été étudiée sur cette maquette du fait qu'elle ne possède pas de séparateur. Afin d'étudier la segmentation de l'arc, nous avons utilisé une nouvelle maquette qui permet, grâce à sa conception, beaucoup plus de latitude pour la réalisation des expériences ainsi qu'un gain de temps considérable pour la mise en œuvre des différents cas, notamment lors de la mise en place du fil fusible. Cette nouvelle maquette, mise à disposition par Hager et issue des travaux de Gauthier Déplaudé [Dép_1], est présentée dans la section suivante (III.1.2).

III.1.2. Présentation de la nouvelle maquette

Un schéma de cette nouvelle maquette est présenté sur la Figure III.3. On peut constater que la chambre de la nouvelle maquette permet de positionner des séparateurs dans la zone aval (Partie haute). Les rails et les séparateurs sont en acier doux revêtus de nickel. Les dimensions des éléments sont données dans le tableau suivant :

	Hauteur (x)	Largeur (y)	Epaisseur (z)
Chambre	125 mm	15 mm	20 mm
Rail	170 mm	15 mm	1 mm
Séparateur	75 mm	15 mm	1 mm

Tableau III.1 : Dimensions de la nouvelle maquette

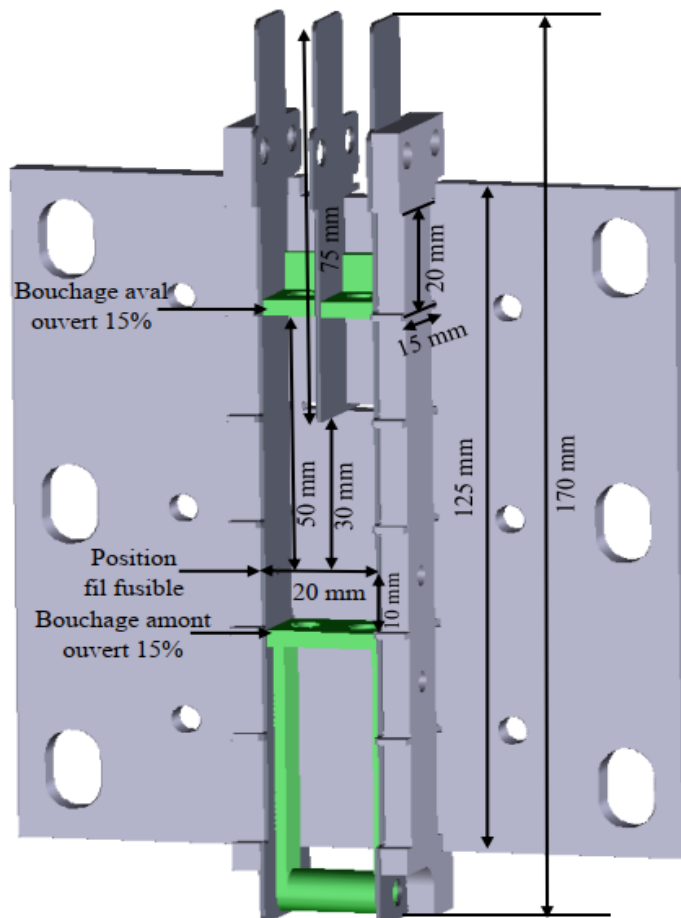


Figure III.3 : Géométrie de la nouvelle maquette

Un fil fusible en cuivre, de 0.1 mm de diamètre, placé à 10 mm de l'ouverture amont est utilisé pour amorcer l'arc. La distance entre la position initiale du fil fusible et l'entrée du séparateur est de 30 mm. Dans la configuration présentée Figure III.3, l'arc peut se déplacer sur une distance de 50 mm, de sa position initiale jusqu'au bouchage aval qui peut être totalement ou partiellement ouvert (15% de la surface ouverte). Dans le cas sans bouchage aval (totalement ouvert), l'arc peut parcourir 20 mm de plus avant de quitter la chambre. La distance entre les deux rails est de 20 mm et l'épaisseur des rails et des séparateurs est de 1 mm. La face avant de la chambre est fermée par une paroi plastique. Elle est transparente afin de permettre l'acquisition des images par caméra rapide. Dans la réalité les parois plastiques sont constituées d'un matériau de carbone, hydrogène, oxygène et azote : $C_6H_{11}O_1N_1$. Ce matériau se vaporise au cours des interruptions du courant et est utilisé afin d'augmenter la vitesse de déplacement. Un compromis doit donc être trouvé entre sa détérioration et l'effet escompté.

Nous allons à présent présenter l'alimentation électrique utilisée.

III.1.3. Alimentation impulsionnelle

L'alimentation utilisée est présentée sur la Figure III.4. Elle est constituée de bancs de condensateurs et d'inductances dont les différents jeux sont donnés dans le Tableau III.2. Ce banc est commandé par un circuit électronique à base de thyristors. Le circuit LC chargé généralement entre 300 et 600 V génère lors de la décharge une demi-alternance de courant de 50 Hz qui peut atteindre une intensité crête de 10 kA pendant 10 ms. La fréquence ainsi obtenue est similaire à celle observée sur les réseaux électriques domestiques. Le choix d'associer un jeu de capacité de puissance à une valeur d'inductance permet de faire varier le courant crête (courant maximum) de l'onde obtenue tout en conservant la fréquence de 50 Hz.

Inductance	Condensateur	Courant
1770 μ H (L_1)	5.6 mF (C_1)	1 kA
658 μ H (L_2)	15 mF (C_2)	3 kA
317 μ H (L_3)	30 mF (C_3)	5 kA
96 μ H (L_4)	87.7 mF (C_4)	10 kA

Tableau III.2 : Intensité du courant pour les différents couples LC

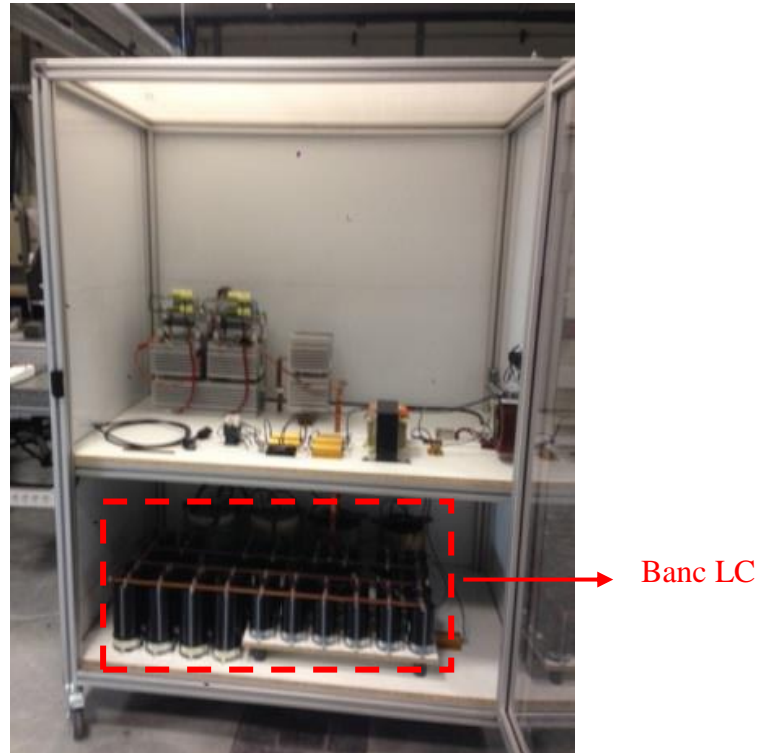


Figure III.4 : Alimentation impulsionnelle

La Figure III.5 représente un schéma électrique simplifié du banc d'énergie sur lequel nous avons fait apparaître les tensions et intensités mesurées. Ainsi, nous mesurons le courant circulant au travers de la décharge, la tension aux bornes des rails de la maquette ainsi que la tension aux bornes du banc de capacités.

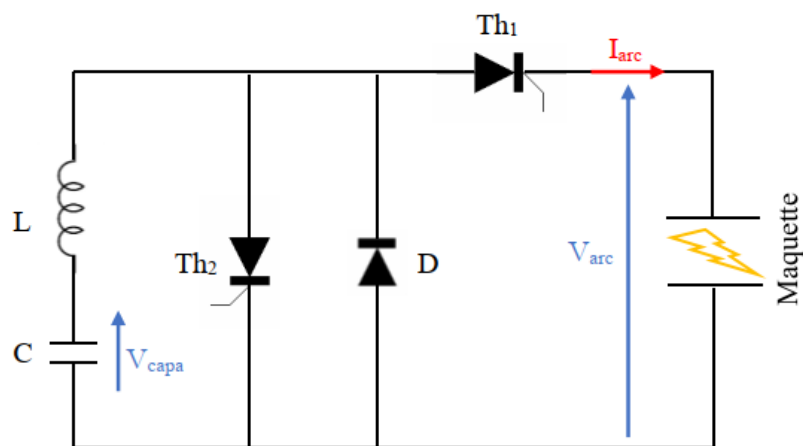


Figure III.5 : Schéma électrique de l'alimentation

La commande sur le thyristor Th_1 permet de commuter l'énergie depuis le banc d'énergie vers la maquette. Le thyristor Th_2 permet de court-circuiter la maquette et donc de mettre fin à la décharge dans la maquette. D est une diode à roue libre, elle permet de dériver l'alternance négative du courant.

III.1.4. Outils de diagnostics

Afin de réaliser l'acquisition des signaux de courant et de tension, un boîtier National instrument PXI [PXI_1] permet d'interfacer les appareils de mesure avec un logiciel d'acquisition. Le courant est mesuré via des boucles de Rogowski. Les fréquences d'acquisitions varient de 0.2 Hz à 17 MHz pour une valeur maximale du courant de 30 kA. Des sondes différentielles de bande passante 30 MHz sont utilisées pour les mesures de tension. Notre soft nous permet de régler la fréquence d'acquisition. Celle-ci est commune à l'ensemble des mesures électriques. Typiquement nous avons réglé la fréquence à 500 kHz. Etant donné que la demi-onde de courant dure 10 ms, cela nous permet d'effectuer 5000 mesures pendant l'observation des phénomènes. Pour l'ensemble de ces appareils (Mesures courant et tension), un logiciel mis au point par notre service électronique, permet d'observer la valeur réelle des grandeurs, les fréquences d'acquisition, les gains et offset et de visualiser les mesures temporelles.

Le diagnostic est complété par une caméra rapide Photron SA5. Elle peut acquérir jusqu'à 1.3 million d'images par seconde mais sur une zone fenêtrée. La taille maximale d'acquisition de la caméra est à 1024 x 1024 pixels. A cette taille, une résolution de 7000 images par seconde peut être atteinte. Nous utilisons une focale de 105 mm pour l'acquisition des vidéos. Des filtres de densité neutre NDX4 et NDX32 sont à disposition (respectivement atténuations x4 et x32). Cette caméra possède son propre logiciel de configuration fourni par le constructeur. Cependant, afin de pouvoir effectuer des mesures statistiques en utilisant toujours les mêmes luminosités et critères pour la détermination du positionnement des pieds d'arc et de la colonne d'arc, nous avons développé un logiciel de traitement des images à l'aide du logiciel Matlab. Le traitement des images sera présenté dans la partie III.1.6.

III.1.5. Synchronisation

La Figure III.6 propose une vue générale du dispositif expérimental. La synchronisation du déclenchement des mesures est un point clé de notre expérimentation.

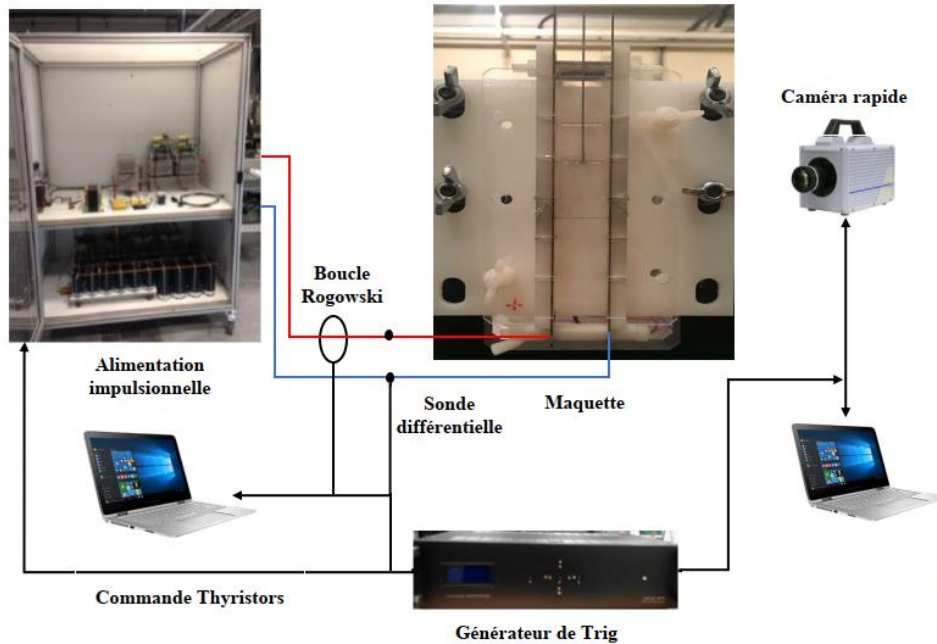


Figure III.6 : Vue d'ensemble du dispositif expérimental

Un générateur de signal TTL (Générateur de Trig) permet de synchroniser l'ensemble des dispositifs (Alimentation impulsionnelle, mesures électriques et caméra rapide). Un premier signal pilote le thyristor Th_1 et permet de décharger le banc préalablement chargé. Ce signal est dupliqué et envoyé d'une part sur le PXI qui lance l'acquisition des signaux de tension et courant et d'autre part sur la caméra rapide. La durée d'acquisition est fixée à l'aide du logiciel d'acquisition. Un second signal est généré afin de piloter le thyristor Th_2 et mettre un terme à la décharge.

III.1.6. Outil d'exploitation

La caméra rapide permet d'obtenir des séquences consécutives de plusieurs dizaines voire centaines d'images. Le traitement image/image par un opérateur n'est pas envisageable. Ainsi,

un outil d'exploitation avait été développé sous Matlab durant la thèse de Jean Quéméneur [Qué_1] afin de pouvoir déterminer, à partir des images obtenues, une estimation de la position des pieds d'arc à partir de la localisation des maxima d'émissivité en proche voisinage des rails. Un exemple de traitement est donné sur la Figure III.7.

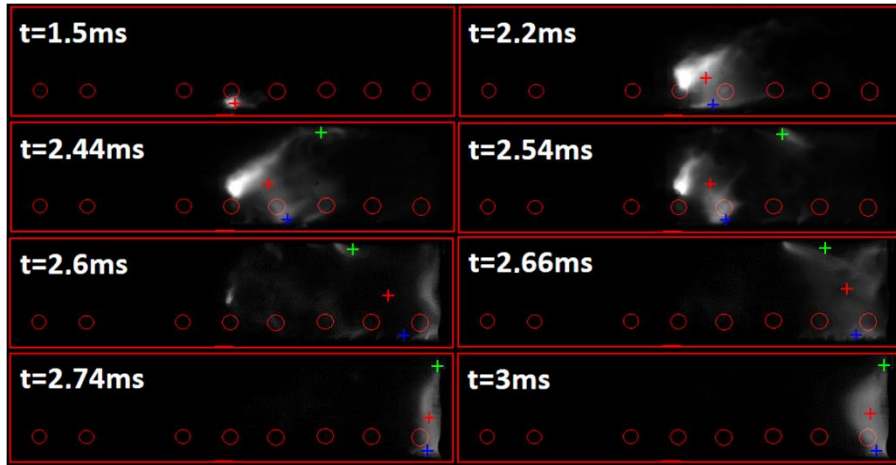


Figure III.7 : Images de la caméra rapide traitées par le logiciel de détection de l'arc pour la maquette antérieure [Qué_2]

Lors de l'utilisation de cet outil, dans un premier temps un masque est créé, permettant de cibler la zone d'intérêt. Cette zone correspond à la chambre et est délimitée par un rectangle rouge. Enfin une zone verte et une zone bleue (non visibles sur la Figure III.7) sont définies en proche voisinage des rails sur l'ensemble de leur longueur. C'est sur les zones définies par ces masques de couleur que seront recherchées les positions des pieds d'arc. Deux croix, correspondantes à chaque pied, sont positionnées sur chaque image, ce qui revient à réaliser un suivi temporel des pieds d'arc. A équidistance des deux croix, une troisième permettra de localiser la position moyenne de la colonne de plasma sur la partie la plus lumineuse. Les positions désignent les zones de plus fortes luminosités. Pour cela la somme des composantes des couleurs est calculée sur l'ensemble des pixels de l'image. La position de la croix correspond au pixel qui présente la valeur maximale c'est-à-dire la luminosité la plus grande. Sur la Figure III.7, nous pouvons voir les différentes croix pour huit instants allant de $t = 1.5$ ms à 3 ms. Cet outil a l'avantage de pouvoir aussi traiter des résultats issus du code magnétohydrodynamique à partir du « coefficient d'émission nette ». Il nous a semblé alors pertinent de continuer à utiliser cet outil en l'adaptant aux différentes configurations étudiées dans cette thèse notamment les configurations avec des séparateurs.

Nous illustrons sur la Figure III.8, les modifications réalisées sur l’outil d’analyse des images. Ces modifications sont liées à la géométrie de la nouvelle maquette. Elles consistent essentiellement à définir les contours des séparateurs et à prendre en compte la présence de plusieurs pieds d’arc, notamment dans la zone des séparateurs et en un changement de l’orientation de la maquette lorsque nécessaire.

Sur les deux premières images de gauche, nous retrouvons les résultats tels qu’observés précédemment (Figure III.7), à savoir, la géométrie avec le positionnement de trois croix pour repérer les positions des deux accrochages et la position moyenne de la colonne. Les trois images de droite illustrent la modification de l’outil. Lors de la présence d’un séparateur, 2 masques de couleur supplémentaires doivent être définis afin de rechercher la position des pieds d’arc.

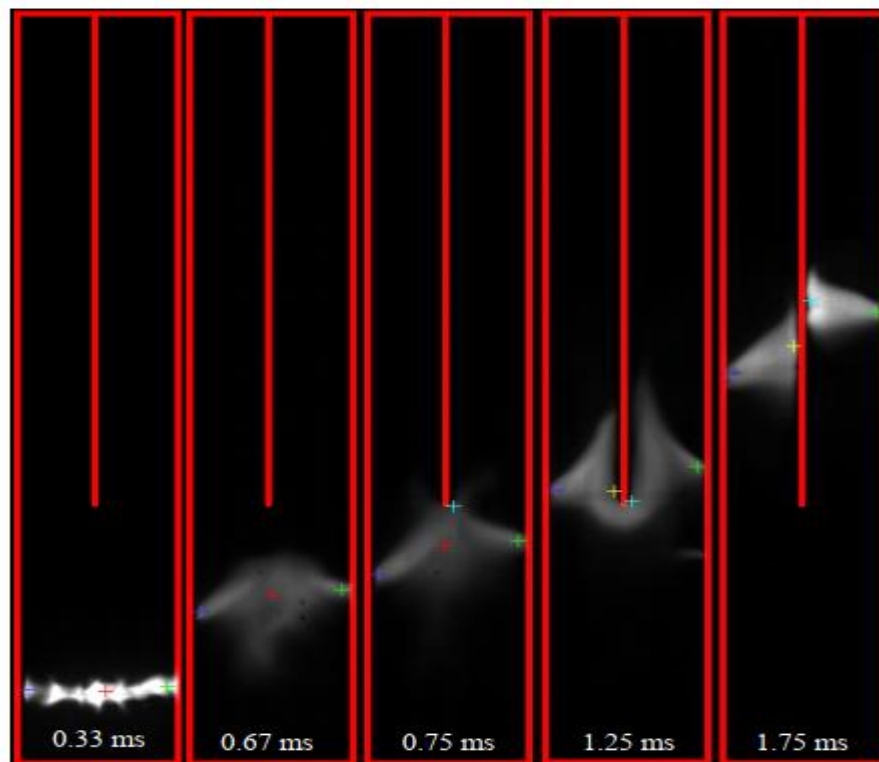


Figure III.8 : Images de la caméra rapide traitées par le logiciel de détection de l’arc pour la nouvelle maquette

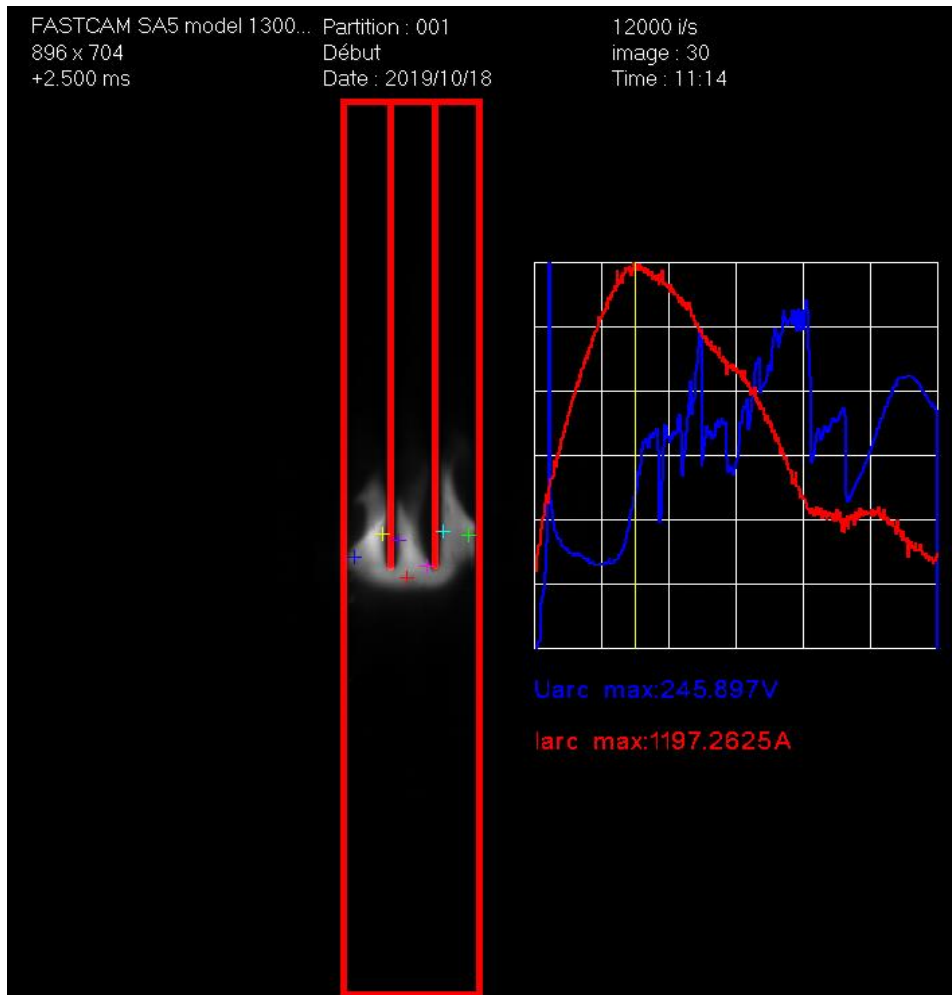


Figure III.9 : Vue générale de l'outil pour deux séparateurs

La Figure III.9 donne un résultat de l'outil modifié avec une vue générale pour deux séparateurs. Une fois l'arc commuté sur les séparateurs, de nouvelles croix sont représentées sur la figure pour les différentes portions de l'arc. Les courbes de courant ainsi que de tension sont représentées sur le côté droit. La complexité de l'étude réside en partie dans la quasi impossibilité d'analyser les signaux électriques ou les images de façon indépendantes sans prendre le risque d'une mauvaise interprétation. Ainsi, afin de pouvoir réaliser une analyse précise du cas étudié, notre logiciel de post-traitement est indispensable. Il permet d'afficher de façon simultanée à la fois les signaux électriques et l'image de la décharge. Afin d'être plus précis et pertinent, un curseur de position en jaune (positionné sur le maximum d'intensité sur la figure III.9) se déplace temporellement sur les signaux électriques afin d'être en corrélation avec le défilement des images de la décharge.

La courbe bleue représente la tension de l'arc mesurée entre deux rails et la courbe rouge le courant d'arc. Dans la partie haute de la Figure III.9 sont affichés : la vitesse d'acquisition de la caméra (12000 i/s), la résolution d'image (896 x704 pixels), le numéro d'image (30) et le temps correspondant (2.5 ms). Les images sont généralement obtenues avec un temps d'exposition inférieur à leur fréquence d'échantillonnage. Nous préciserons ce point plus tard.

III.2. Etudes paramétriques

III.2.1. Estimation du courant présumé

Le courant présumé est une grandeur importante pour vérifier l'effet de la limitation du courant. Nous avons d'abord essayé de déterminer ce courant présumé par un tir dans une résistance dont nous avons supposé la valeur équivalente à la résistance de l'arc en l'absence de limitation. La résistance de l'arc a été déterminée de deux manières :

D'une part à l'aide du modèle qui, pour une configuration identique à celle de notre expérience, nous permet de déterminer une résistance de l'espace inter rail en présence de l'arc d'environ $0.1 \text{ m}\Omega$. D'autre part en réalisant simplement la division de la tension d'arc mesurée par le courant de la décharge en l'absence de limitation.

La Figure III.10 illustre les indications ci-dessus. Pour la détermination du courant de court-circuit, une tension de charge du banc 300 V a été choisie. La configuration utilisée est la configuration L_3C_3 (Tableau III.2).

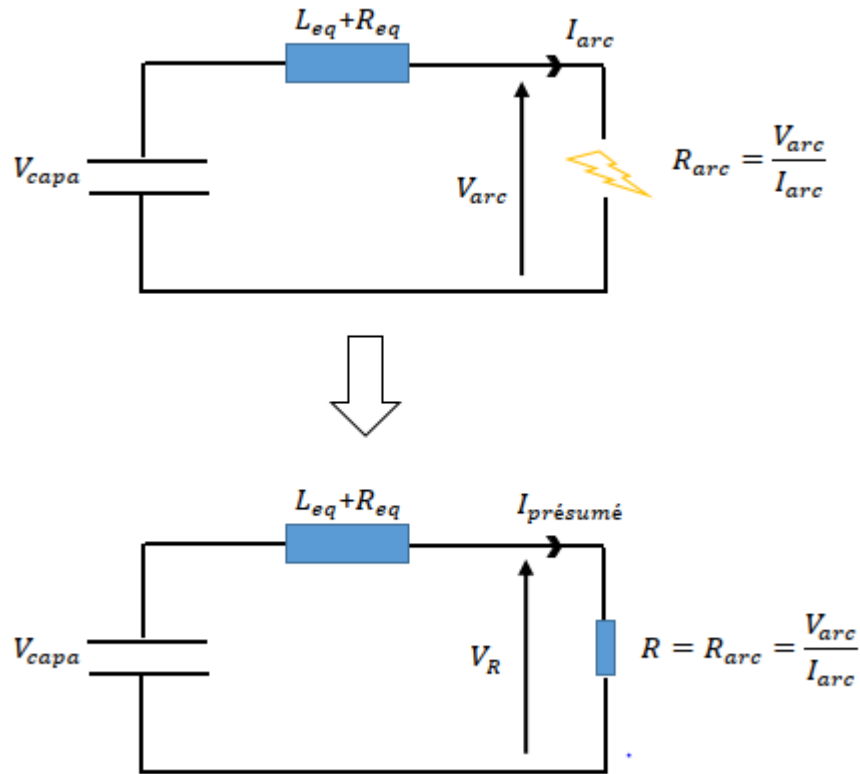


Figure III.10 : Schémas équivalents du circuit avec la décharge (haut) et en présence de la résistance équivalente (bas)

Une seconde façon de déterminer le courant présumé pour une tension de charge donnée est de déterminer L_{eq} et R_{eq} afin de pouvoir reconstruire un modèle de circuit plus complet. Pour cela, nous utilisons par exemple la courbe de courant mesuré lors d'un tir en court-circuit en mettant la sortie du thyristor Th_1 directement au potentiel zéro (masse) du générateur, ou un tir sur une charge connue (0.1Ω). Ensuite, à l'aide d'un code également développé dans l'équipe AEPPT, nous pouvons remonter aux paramètres du circuit correspondant au signal mesuré. Dans le cadre des signaux issus d'un banc d'énergie, on obtient généralement des sinus amortis. La solution de l'équation différentielle régissant le circuit est de la forme :

$$f(t) = K \cdot e^{-\lambda t} \cdot \sin(\omega t) \quad (III.1)$$

L'objectif du programme est d'optimiser à l'aide de la méthode des moindres carrés les paramètres K , λ et ω de façon à approximer le signal expérimental de référence. Connaissant ainsi la valeur de la constante de décroissance λ et la valeur de la pulsation du signal ω , il est aisé de remonter aux valeurs de R et de L du circuit [Mar_1]. Ainsi, nous obtenons un modèle de circuit électrique permettant de générer les courants présumés pour n'importe quel niveau

de tension de charge. Le courant présumé sera systématiquement tracé sur les courbes affichant des mesures de courant de façon à observer un changement de comportement lié au paramètre étudié. Nous cherchons à voir à quel moment et pour quelle intensité le paramètre étudié nous permet d'impacter le courant présumé.

Dans les parties qui vont suivre, nous allons présenter les résultats de notre étude paramétrique. Cette étude consiste à observer sur le comportement de l'arc :

- l'influence du nombre de séparateur
- l'influence du « bouchage » de la chambre
- l'influence de la forme des séparateurs
- l'influence de l'intensité

Pour chacune de ces études, nous présenterons lorsque cela est pertinent, les mesures de courant et tension que nous tenterons d'interpréter ainsi que les positions des pieds d'arc et les images obtenues par caméra rapide.

III.2.2. Influence de nombre de séparateur sur le comportement de l'arc



Schéma de principe : étude du nombre des séparateurs – Les parties grisées correspondent à d'éventuels zones de bouchage par des événements, le trait rouge à un séparateur.

III.2.2.1. Conditions expérimentales

Dans cette partie, nous allons étudier l'influence du nombre de séparateurs sur les signaux électriques ainsi que le comportement de la décharge à l'aide de notre logiciel de post traitement. Les mesures électriques permettent d'observer les chutes de tension et de déduire par leurs variations le positionnement de l'arc dans la géométrie. Par exemple, un arc positionné devant

les séparateurs se traduit par de fortes variations de la tension, suivi d'une tension plus élevée de par l'existence des chutes additionnelles lorsqu'il a commuté dessus.

Sur cette configuration, les conditions d'échappement des gaz sont : amont fermé et aval ouvert (F-O). Pour chaque configuration, trois essais sont réalisés. La vitesse d'acquisition de la caméra rapide est de 12 000 image/s et l'obturation est de 1/102 000 s. Le banc L₃C₃ a été choisi avec une tension de charge à 300 V ce qui correspond à un courant nominal de 800 A. Les séparateurs de la forme "pleine" sont utilisés dans un premier temps afin de comparer avec les résultats disponibles dans la littérature (Voir Figure III.12).

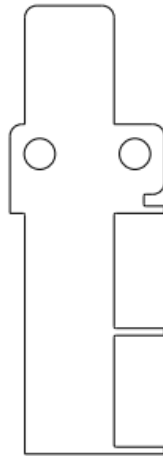


Figure III.12 : Séparateur de la forme "pleine"

III.2.2.2. Caractéristiques électriques

La Figure III.13 présente la tension moyenne obtenue dans la chambre lors de trois tirs entre les deux rails pour zéro, un et deux séparateurs. Les barres d'incertitude correspondent à deux fois l'écart type de mesure.

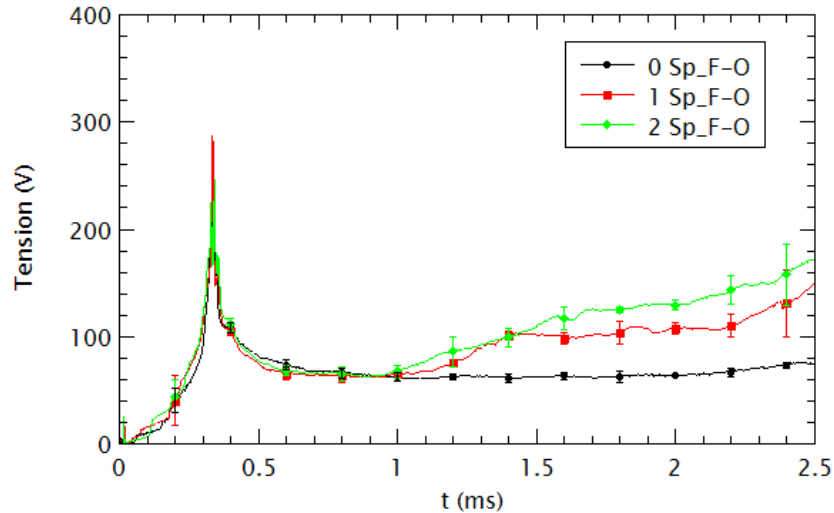


Figure III.13 : Evolution de la tension pour zéro (0 Sp), un (1 Sp) et deux séparateurs (2 Sp) en configuration (F-O)

Pour les trois configurations, on observe un pic situé autour de $t = 0.33$ ms. Ce pic correspond à la vaporisation (partielle) du fil fusible après son échauffement lors du passage du courant. Ce phénomène conduit à la création d'un plasma et à la circulation du courant entre les deux rails. Nous constatons une baisse brutale de la tension au-delà du pic. Cela s'explique par la création d'un canal conducteur et par la conductivité du milieu qui permet au courant de circuler avec une moindre différence de potentiel entre les rails.

Dans le cas 0 Sp, la chute de tension observée reste la même durant l'intégralité de la durée de vie de la décharge avec une valeur de tension autour de 70 V. En effet, aucun phénomène ne vient perturber l'arc qui se déplace le long des rails. Son allongement ne semble pas être modifié lors du déplacement ce qui justifie la valeur quasiment constante de la tension. Cette valeur de tension correspond à la somme de la tension de la colonne d'arc et des chutes de tension des gaines anodique et cathodique [Vac_1].

Dans les cas 1 Sp et 2 Sp, et après la chute de tension, la tension se stabilise aux environs de 70 V sur environ 0.5 ms. A partir de 1 ms environ, la valeur de la tension réaugmente. A ces instants-là, l'arc commence à s'approcher des séparateurs. Pendant l'intervalle de temps de 1 à 1.3 ms, l'arc est galbé devant le séparateur. En effet les conditions ne sont pas réunies afin de permettre à l'arc de commuter dessus. Afin que l'arc puisse s'accrocher sur les séparateurs, une conductivité électrique suffisante doit exister. Pour cela il faut que la zone au voisinage du séparateur soit assez chaude et que la différence de potentiel puisse assurer le passage du courant. Tant que ces conditions ne sont pas réunies, l'arc ne peut s'accrocher. Cependant les

forces de pression et de Lorentz continuent de s'exercer sur l'arc et le poussent vers l'aval. Ainsi les pieds d'arc peuvent se trouver plus en avant que la colonne ce qui produit un effet de galbe. A ces conditions citées viennent se rajouter des effets de viscosité. En effet dans l'air autour de 10 kK la viscosité est maximale, ainsi le séparateur se présente comme un obstacle qui ralentit la progression de l'arc. Cet effet agira d'autant plus que le nombre des séparateurs sera élevé.

Après 1.3 ms, les deux configurations (1 Sp et 2 Sp) ont des évolutions identiques seulement différenciées par une tension plus élevée dans le cas 2 Sp de par la présence de deux gaines supplémentaires. Les courbes s'arrêtent à 2.5 ms car l'arc arrive à la fin de la chambre. La différence de tension entre les deux courbes est d'environ 20 V. En partant du principe que les longueurs d'arc seraient équivalentes une fois l'arc devant les séparateurs dans les cas 1 Sp et 2 Sp, il est possible de supposer que cette différence s'explique par la présence de chutes de tension anodique et cathodique uniquement liées à la présence d'un séparateur supplémentaire. Autrement dit, dans cette géométrie, l'ajout d'un séparateur n'impacte pas la longueur de la colonne d'arc mais les chutes de tension anodique et cathodique s'ajoutent à la tension totale :

$$V_{total} = U_{colonne} + U_{anod_rail} + U_{cathod_rail} + N \cdot (U_{anod_separ} + U_{cathod_separ}) \quad (III.2)$$

Où N représente le nombre de séparateurs. Ceci nous conduit à estimer une chute de tension additionnelle de 15 V par chute anodique et cathodique.

$$U_{anod_separ} = U_{cathod_separ} = 10 V \quad (III.3)$$

Sur la Figure III.14, nous avons représenté l'évolution du courant moyen pour zéro, un et deux séparateurs. Sur la même figure, le courant présumé correspondant au courant appliqué sans limitation est tracé. Nous constatons un début de limitation du courant autour de 1.3 ms, cela se traduit par des courants plus faibles lorsque ce dernier est limité. Ce temps correspond à l'arrivée de l'arc près des séparateurs. Cette limitation augmente avec le nombre des séparateurs comme on peut l'observer à partir des courbes rouge (1 Sp) et vertes (2 Sp).

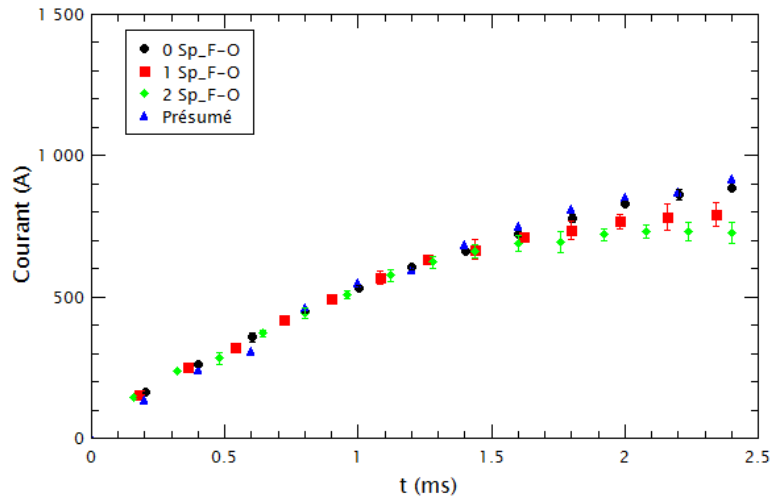


Figure III.14 : Courant présumé et courant moyen pour zéro, un et deux séparateurs

III.2.3. Influence du « bouchage » de la chambre sur le comportement de l'arc



Schéma de principe : étude du bouchage de la chambre

III.2.3.1. Conditions expérimentales

Au total, huit configurations ont été étudiées au niveau des bouchages: Ouvert (O), fermée (F) ou partiellement ouvert (PO) pour les positions amont ou aval. Chaque cas est reproduit trois fois. Ces cas sont présentés dans le Tableau III.3.

	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
0 Sp	O-O	PO-O	F-O	F-F
1 Sp	O-O	PO-O	F-O	F-F

Tableau III.3 : Configurations expérimentales

Les parois utilisées pour modifier l'évacuation sont présentées sur la Figure III.15 : Fermé et Partiellement Ouvert.



Figure III.15 : Configuration de bouchage

La configuration dénommée « Partiellement Ouvert » correspond à deux orifices d'une surface équivalente à 15% de la surface totale (Surface totale = 20 mm x 15 mm). Le séparateur utilisé dans cette partie est de forme "pleine" (Figure III-12).

Dans cette étude, nous avons chargé le condensateur à 300 V. Cela génère une onde de courant avec pour valeur maximale d'environ 820 A.

III.2.3.2. Déplacement de l'arc

La Figure III.16 et la Figure III.17 présentent respectivement les positions moyennes des pieds anodique et cathodique en fonction du temps pour le cas sans séparateur. Lorsque les écarts types étaient trop importants et que la lisibilité des courbes devenait difficile, nous avons choisi d'utiliser des enveloppes. Ces enveloppes représentent le maximum et le minimum pour une série de tir en chaque instant. Les cas 1, 2, 3 permettent de montrer l'influence de la surface de bouchage amont sur le déplacement de l'arc. Pour ces 3 cas, l'évacuation côté aval est ouverte. La fermeture progressive du bouchage amont (cas 1 vers 3) entraîne une augmentation de la vitesse de déplacement de l'arc. Cette différence est probablement due à des effets de pression. Une diminution de l'ouverture amont de 85% (cas 2) permet d'augmenter la vitesse moyenne de $v_1 = 17.6$ m/s (cas 1) à $v_2 = 37.6$ m/s (cas 2) soit plus du double de la vitesse sans

bouchage. Ces vitesses sont calculées à partir des positions moyennes données sur les Figures III.16 et III.17.

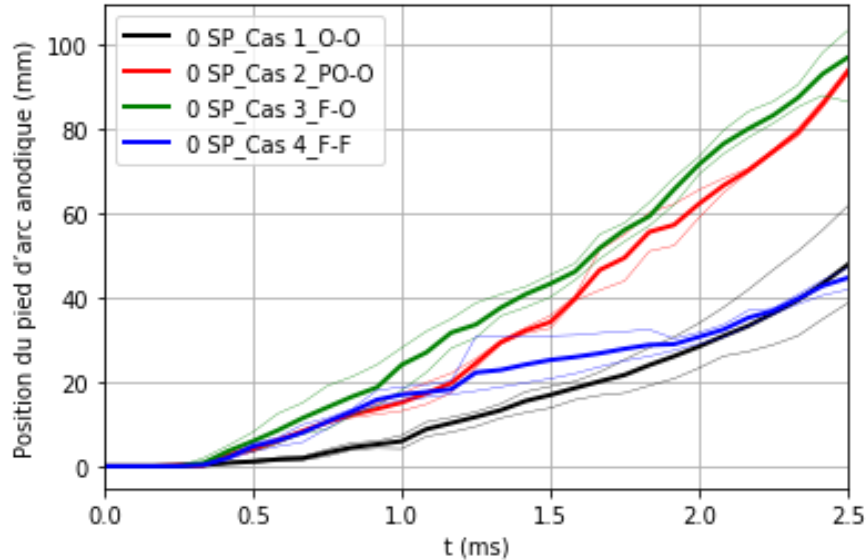


Figure III.16 : Position moyenne du pied d'arc anodique sans séparateur (0 Sp)

L'ouverture amont totalement fermée conduit à une vitesse $v_3 = 38.4$ m/s (cas 3). Bien entendu dans ce cas, la viscosité du plasma entraîne un effet de bouchage de la zone amont. En effet, l'air emprisonné dans cette zone est bloqué entre le plasma et la paroi. Il en résulte une montée en pression probablement liée aux efforts hydrodynamiques du plasma et à son réchauffement. Cette surpression en amont de l'arc joue un rôle non négligeable dans la vitesse de déplacement de l'arc (cas 2 et 3). Ce phénomène est amplifié par le fait que l'ouverture aval de la maquette est ouverte et qu'il n'y a pas d'obstacle à l'écoulement dans la direction aval. Au contraire, lorsque le côté aval de la maquette est partiellement fermé (cas 4), nous pouvons observer une diminution de la vitesse moyenne v_4 . En effet l'arc se déplaçant vers l'aval avec une certaine viscosité et occupant la majeure partie de la largeur de la chambre, l'air ne peut s'évacuer en aval, ce dernier se retrouve prisonnier, se réchauffe et monte en pression. Cette pression en aval vient s'opposer au déplacement de l'arc. D'où la diminution de la vitesse de déplacement.

Une comparaison entre la Figure III.16 et la Figure III.17 montre que le comportement est similaire pour les pieds d'arc anodique et cathodique et que les vitesses sont du même ordre de grandeur en l'absence de séparateur et cela quelle que soit la configuration (cas 1 à 4).

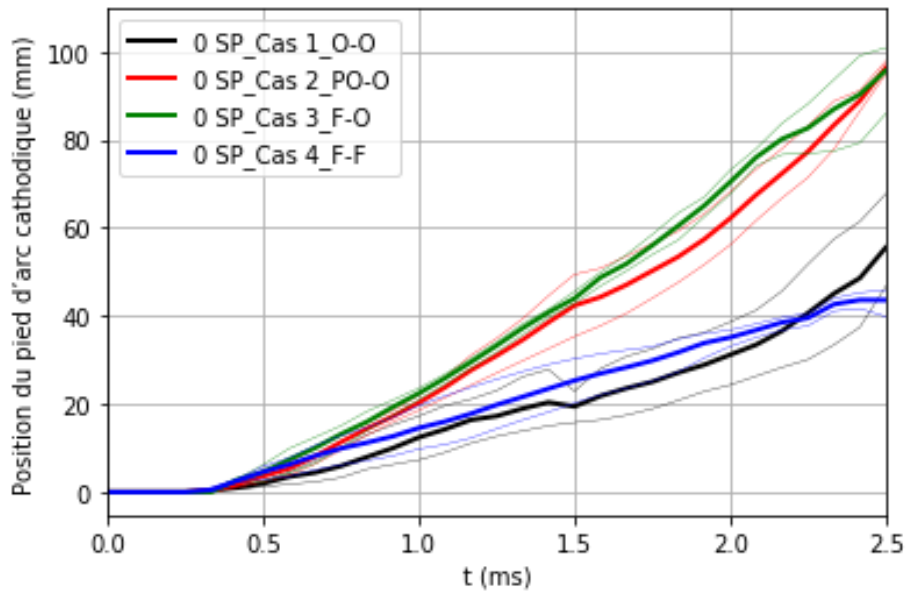


Figure III.17 : Position du pied d'arc cathodique sans séparateur (0 Sp)

La Figure III.18 présente les positions moyennes des pieds anodique et cathodique en fonction du temps pour 1 Sp et pour quatre configurations de bouchage. La partie supérieure de la figure est relative à l'anode et la partie inférieure à la cathode. Le trait pointillé horizontal matérialise la position du devant du séparateur. Avec la présence du séparateur dans la chambre de coupure, les mesures du déplacement des pieds d'arc sont moins reproductibles et présentent des enveloppes plus grandes. Les pentes des courbes côté cathodique suggèrent une vitesse de déplacement du pied d'arc plus grande. Ce résultat a été corroboré par les images vidéo. Ces mêmes images ont montré que le pied d'arc cathodique était plus resserré suggérant une force de Lorentz plus grande qui serait plus efficace pour le déplacement.

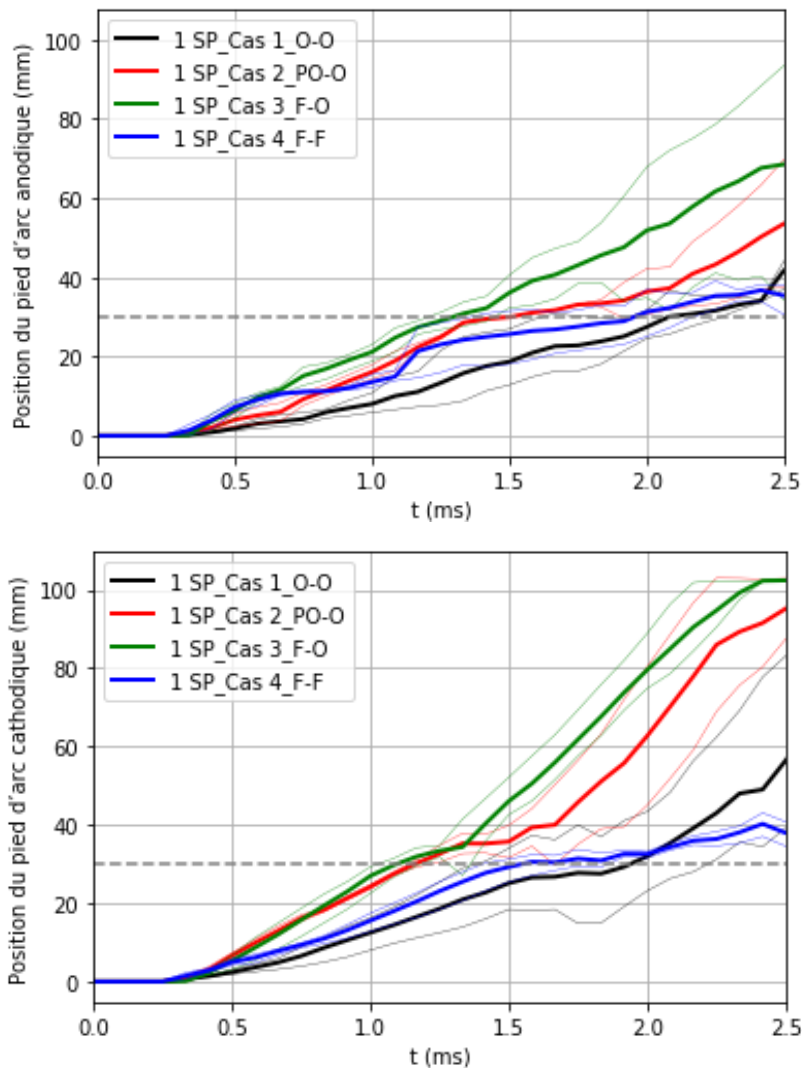


Figure III.18 : Positions moyennes des pieds d’arc avec un séparateur (1 Sp) : Côtés anodique (Partie supérieure) et cathodique (Partie inférieure)

Contrairement aux Figures III.16 et III.17 (qui ne possèdent pas de séparateur et donc de trait pointillé) nous pouvons observer un changement de pente dans l’évolution des courbes au niveau du séparateur. Ce retard provient du fait que l’arc stagne devant le séparateur avant de commuter dessus. Lorsque la géométrie est partiellement fermée ou fermée en amont (Cas 2 et Cas 3) les pieds d’arc se déplacent plus vite à condition de ne pas être perturbés par une sortie fermée (Cas 4).

Ainsi le contrôle de l’écoulement semble jouer une place prépondérante sur le déplacement de l’arc. Dans la configuration (O-O) (Cas 1) nous observons un arc beaucoup plus lent ce qui suggère que pour les cas où au moins une des ouvertures est fermée la force de pression est

prédominante sur la force de Lorentz. Bien que les courbes présentent des barres d'erreur relativement importantes, les pieds d'arc cathodique semblent se déplacer plus rapidement que les pieds anodiques. L'accrochage au niveau de l'anode étant plus diffus, la force de Lorentz pourrait être plus faible, ce qui conduirait à une vitesse moins élevée.

Dans les études précédentes, nous avons utilisé les séparateurs de forme "pleine", ce qui ne correspond pas à une configuration réelle de disjoncteur basse tension. Nous allons donc à présent étudier l'influence de la forme des séparateurs sur le comportement de l'arc au travers des caractéristiques électriques et à l'aide de l'imagerie.

III.2.4. Influence de la forme des séparateurs sur le comportement de l'arc



Schéma de principe : étude de la forme du séparateur "pleine" et "U"

III.2.4.1. Conditions expérimentales

La Figure III.19 montre les deux formes de séparateur qui ont été étudiées. La forme "pleine" a été utilisée pour les tests dans les sections III.2.2 et III.2.3. En réalité, la forme "U" est plus représentative de la géométrie d'un disjoncteur basse tension. La forme des séparateurs a une grande influence sur la répartition de la densité du flux magnétique [Itu_1]. Les conditions expérimentales sont identiques à celles présentées dans la section III.2.2 où l'entrée amont est fermée et celle aval ouverte (F-O), c'est la configuration la plus proche de la configuration réelle.

Dans cette partie, les déplacements de l'arc vont être présentés par les images de la caméra rapides. La caméra rapide possède une vitesse d'acquisition de 12 000 image/s et l'obturation est 1/102000 s, les filtres NDX4 et NDX32 sont utilisés pour limiter la saturation des images.

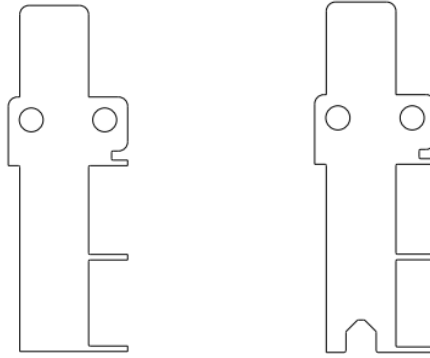


Figure III.19 : Séparateurs de forme "pleine" et "U"

III.2.4.2. Caractéristiques de la tension

La Figure III.20 montre les tensions moyennes de l'arc avec un et deux séparateurs dans la chambre pour des séparateurs de forme "pleine" ou en "U". Chaque courbe représente la moyenne de trois tirs. Les augmentations de la tension sont observées plus tôt dans les cas avec les séparateurs de la forme "pleine" (à 1 ms) que pour les cas avec les séparateurs de la forme "U" (à 1.1 ms). La forme "U" segmente l'arc de façon plus progressive, l'arc rentre dans le plan avant du séparateur mais il ne rencontre pas immédiatement de surface s'opposant à lui. La limitation « franche » et l'apparition des chutes de tension anodique et cathodique apparaissent légèrement plus tard.

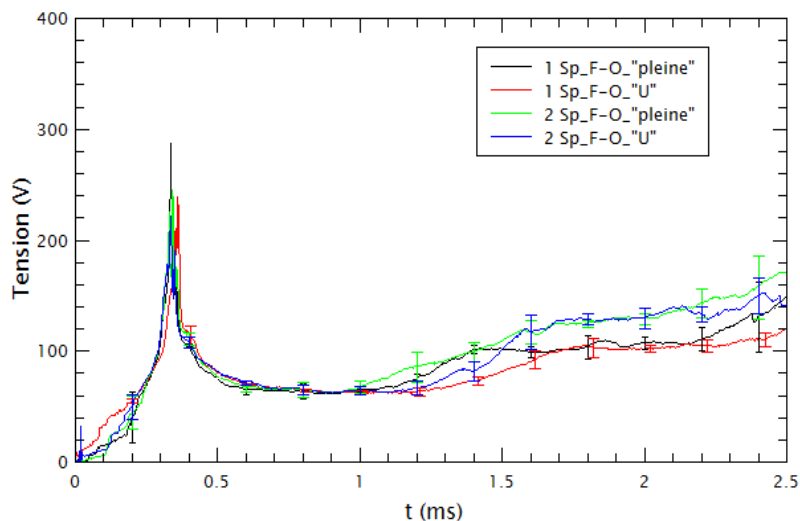


Figure III.20 : Tension moyenne de l'arc avec un et deux séparateurs pour différentes formes de séparateur

Le comportement chaotique de l'arc rend difficile l'interprétation des évolutions de tension. Cependant, nous pouvons noter qu'en général, la différence de tension observée entre le cas avec un seul séparateur et deux séparateurs est proche de 30 V. Ce résultat vient confirmer ce que nous observions dans la section III.2.2.2. Afin de tenter une analyse du comportement de l'arc, nous proposons d'observer directement les images de la caméra rapide.

III.2.4.3. Déplacements avec imagerie

Les images présentées dans cette partie sont obtenues par la caméra rapide en utilisant l'outil de traitement présenté dans la section III.1.6. La géométrie de l'étude est rappelée sur la Figure III.21. Cette Figure comporte l'image globale sur laquelle apparaissent les masques servant aux traitements. Le rectangle rouge correspond à la zone qui est traitée par l'outil développé. Les traits vert et bleu correspondent aux zones situées au proche voisinage des rails et servent pour la détermination de la localisation des pieds anodique et cathodique à partir de la luminosité.

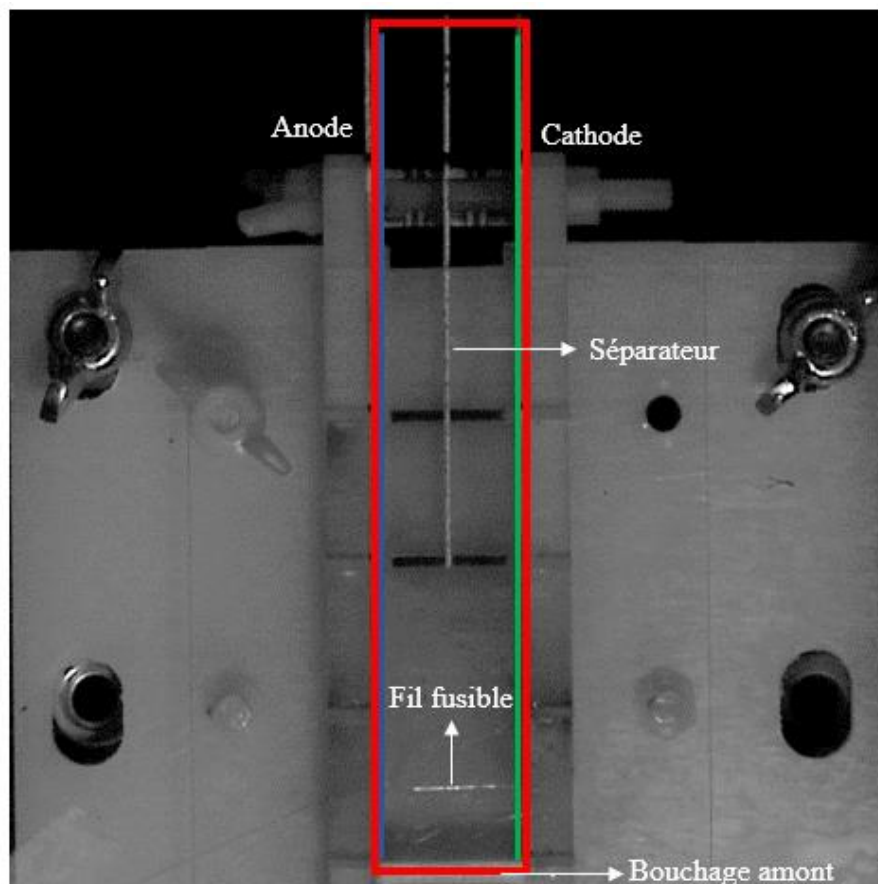


Figure III.21 : Image de la caméra rapide sans arc

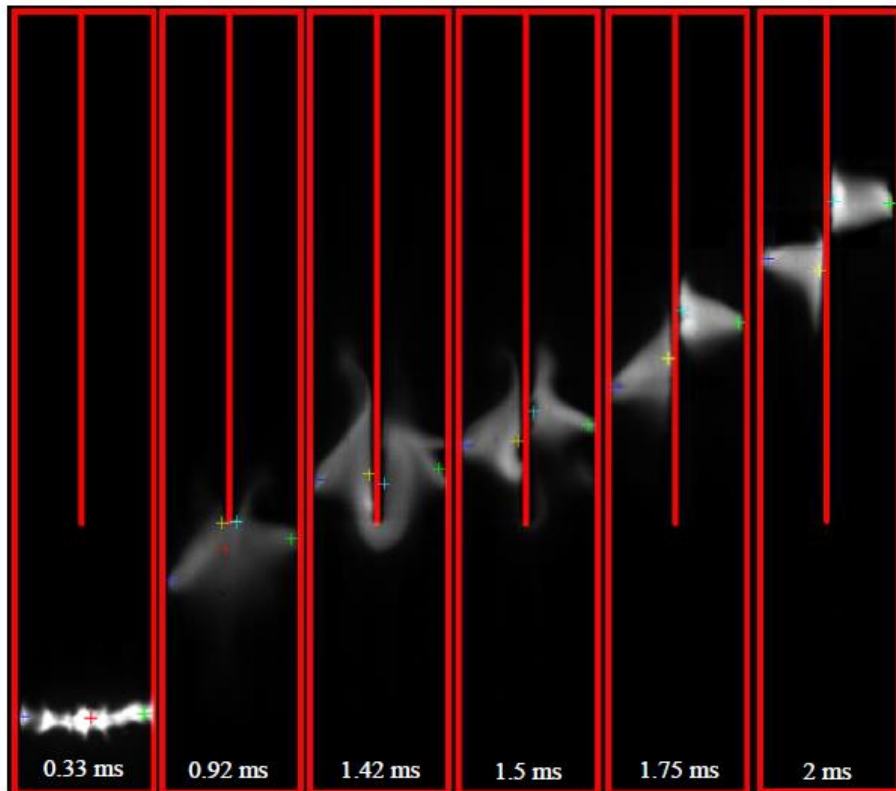


Figure III.22 : Déplacement de l'arc avec un séparateur de forme "pleine"

La Figure III.22 présente le déplacement de l'arc pour un tir avec le séparateur de forme "pleine" pour différents temps. L'évolution de la tension correspondante est illustrée sur la Figure III.23. La corrélation des Figures III.22 et III.23 permet de faire l'interprétation suivante : le fil fusible se vaporise à $t = 0.33$ ms. L'arc se déplace vers le séparateur (0.33 ms $< t < 0.92$ ms) puis stagne et se galbe (0.92 ms $< t < 1.42$ ms) devant le séparateur. Il commute sur le séparateur à $t = 1.42$ ms. Entre 1 et 2 ms, d'après les résultats observés sur la Figure III.22, la tension de l'arc passe de 60 à 95 V. Cette tension additionnelle correspond à la contribution des chutes anodique et cathodique additionnelles ainsi qu'au changement de longueur de l'arc. Après la commutation de l'arc, on observe une différence de vitesse de déplacement entre les deux segments créés. Cependant la longueur de ces deux arcs mis bout à bout n'est pas très différente de celle existante avant la segmentation. La différence de tension est donc majoritairement due à l'ajout de deux chutes de tension aux électrodes.

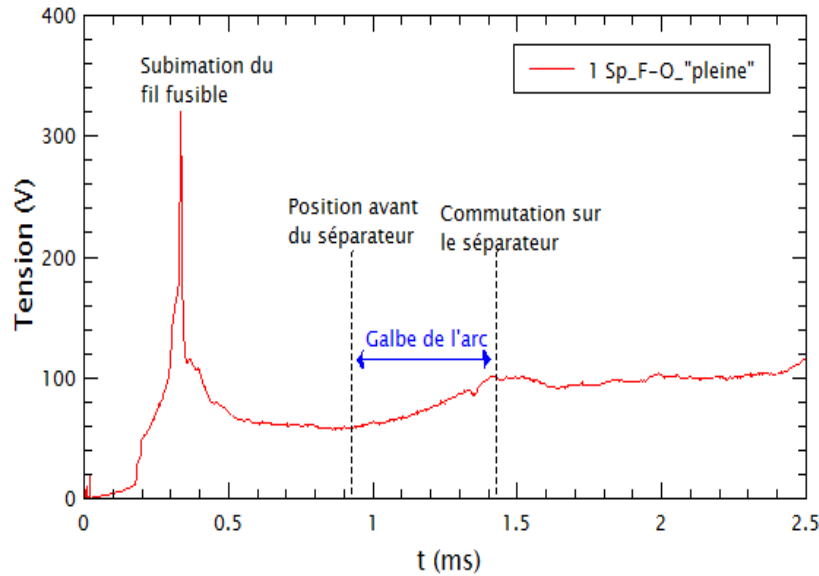


Figure III.23 : Tension de l'arc avec un séparateur de la forme "pleine"

Le déplacement de l'arc pour un tir avec le séparateur de la forme en "U" en différents temps est représenté sur la Figure III.24. Le fil fusible se vaporise à 0,33 ms. En présence de la forme en "U" du séparateur, l'arc arrive à la position du séparateur à $t_1 = 1,17$ ms. A cet instant, la tension commence à augmenter. Ensuite, l'arc se déplace dans le "U" de t_1 à $t_2 = 1,5$ ms.

A partir de t_2 l'arc se galbe au fond de "U" comme on peut l'observer notamment au temps $t_3 = 1,75$ ms. A $t = 1,83$ ms l'arc a commuté sur le séparateur, il est segmenté en deux arcs, la tension augmente d'environ 40 V de 1 à 2 ms (Voir Figure III.25). De l'avant du séparateur jusqu'au fond de la forme en "U", l'arc s'insère progressivement. On peut donc voir sa tension augmenter. On comprend à ce niveau que la dimension de la forme en "U" doit être adaptée à la section de l'arc pour que l'arc puisse pénétrer dans le séparateur. Pour les deux formes des séparateurs l'arc n'arrive pas aux mêmes instants au côté avant du séparateur, respectivement aux temps 0,92 ms et 1,17 ms pour la forme pleine et en "U". Ainsi pour la discussion la position avant du séparateur est matérialisée sur les figures. Une fois au fond du "U", l'arc ne met que 0,25 ms (entre t_2 et t_3) pour commuter en totalité sur le séparateur contrairement à la forme "pleine" pour laquelle l'arc mettait 0,5 ms (durée du galbe de l'arc) pour commuter.

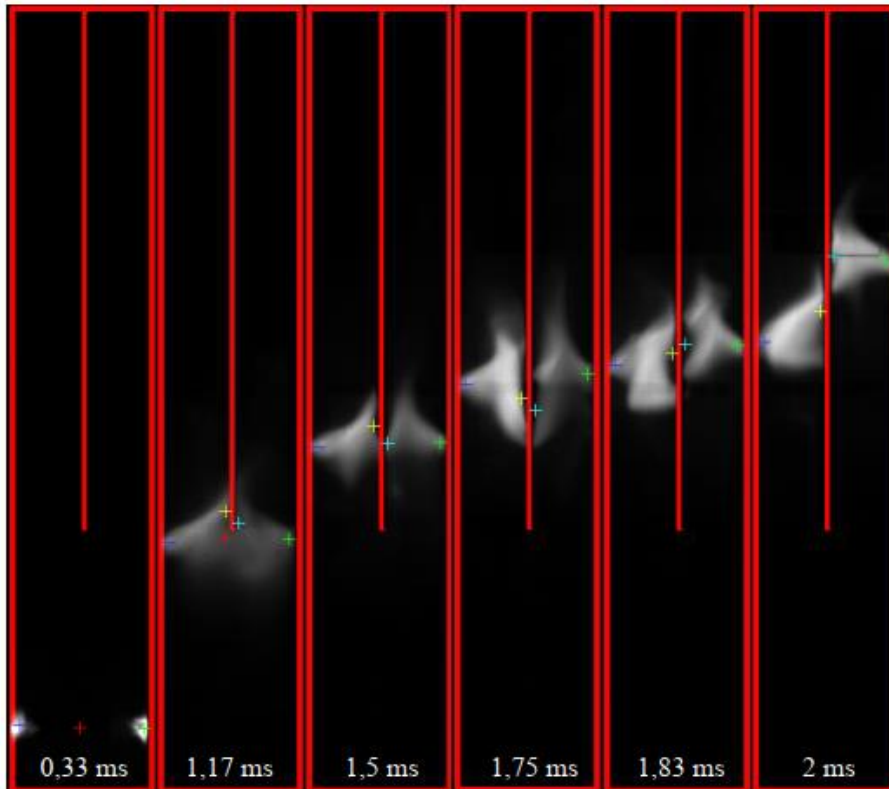


Figure III.24 : Déplacement de l'arc avec un séparateur en forme "U"

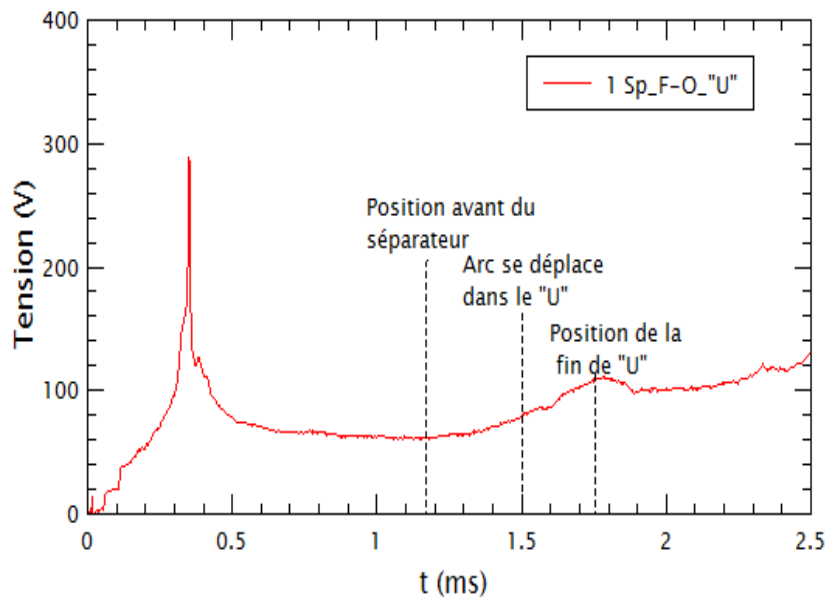


Figure III.25 : Tension de l'arc avec un séparateur en forme "U"

Le déplacement de l'arc avec deux séparateurs de formes "pleine" et en "U" a été étudié par imagerie sur la Figure III.26. Dans les deux cas, l'arc « central » situé entre les deux séparateurs

est toujours en position arrière. En effet les deux pieds d'arc sur les rails sont poussés par des forces électromagnétiques dues à la circulation du courant dans les rails. Cependant, l'arc commute plus facilement avec les séparateurs de la forme en "U".

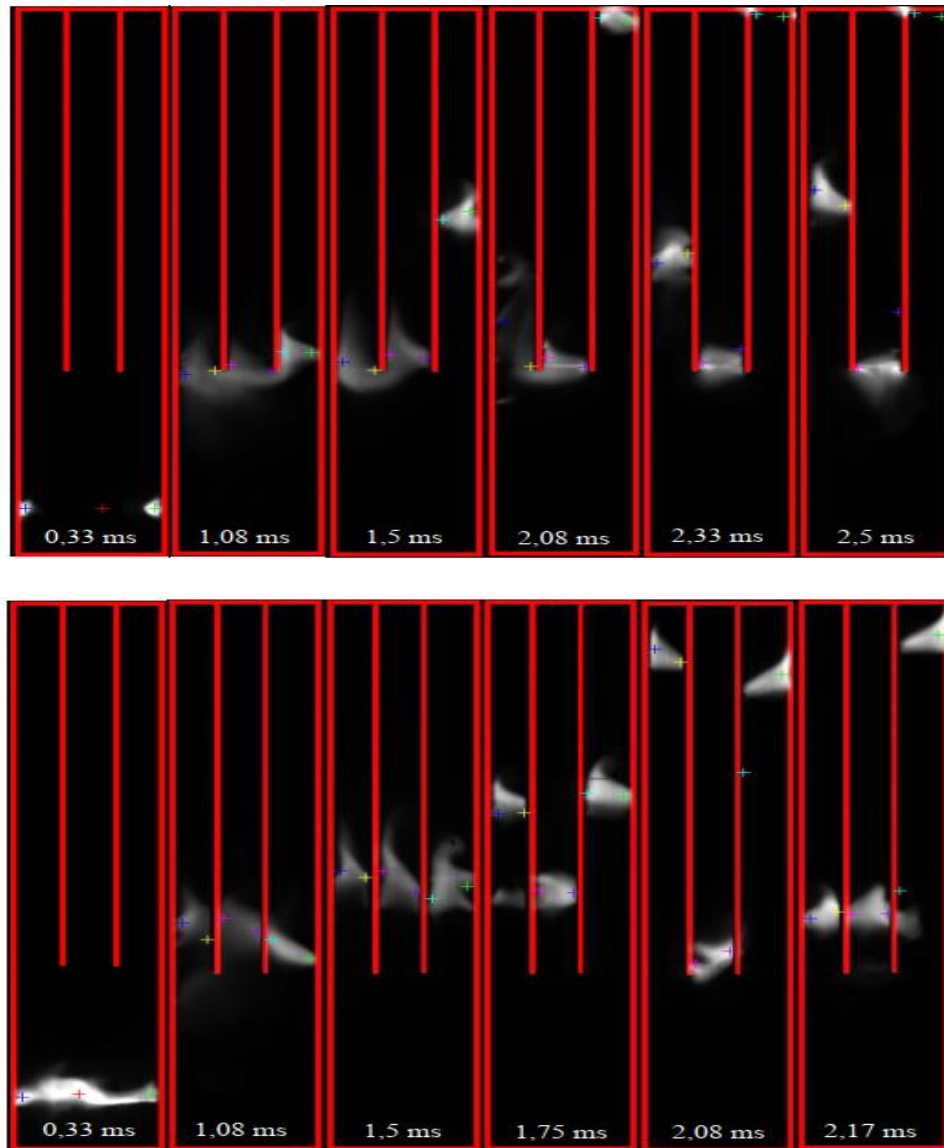


Figure III.26 : Déplacement de l'arc avec deux séparateurs de la forme "pleine" et "U"

Dans cette étude, la comparaison des formes du séparateur a été réalisée, les résultats montrent que pour un séparateur de forme en "U" l'arc commute plus facilement. Pour la suite, nous allons conserver le séparateur de forme en "U" pour étudier l'influence de l'intensité.

III.2.5. Influence de l'intensité sur le comportement de l'arc



Schéma de principe : étude de l'intensité

III.2.5.1. Conditions expérimentales

Le banc de puissance permet, tout en conservant la fréquence, de changer la valeur nominale de l'intensité en changeant la combinaison de LC ou la tension de charge. Dans cette section, nous n'avons pas changé la combinaison de LC, mais la tension varie de 300 à 500 V. La configuration choisie pour cette étude considère un bouchage amont fermé et aval ouvert (F-O). Un seul séparateur de la forme en "U" est utilisé.

III.2.5.2. Caractéristiques du courant

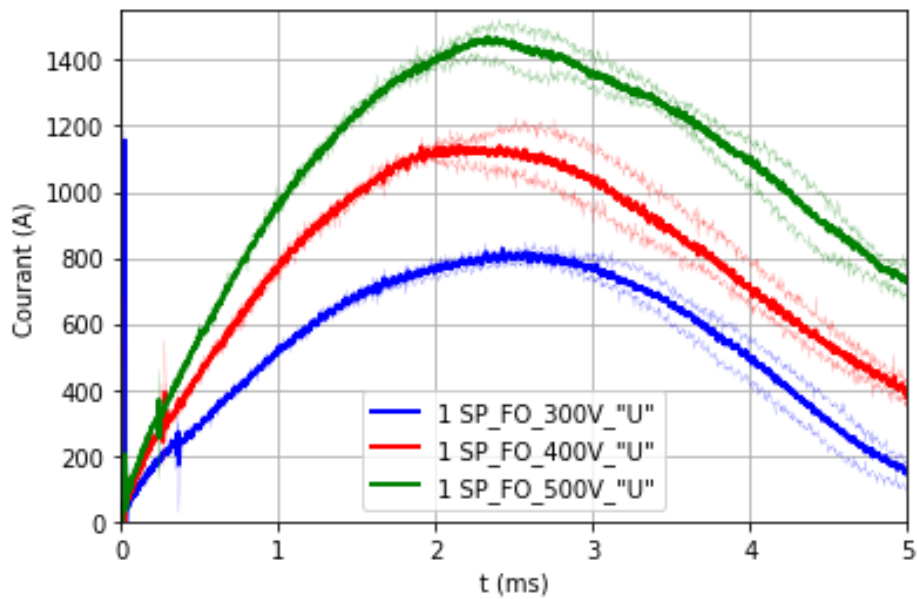


Figure III.27 : Variation du courant estimé suivant la charge

Les courants nominaux associés aux tensions de charge 300 V, 400 V et 500V sont respectivement 800 A, 1200 A et 1500 A.

III.2.5.3. Etats des rails et des séparateurs

Dans ce paragraphe, nous présentons côté anodique (Figure III.28) et côté cathodique (Figure III.30) les traces laissées par l'arc sur les rails lors de son déplacement. Sur ces figures, l'arc se déplace de la droite vers la gauche. Des photographies post-tir sont présentées de haut en bas pour trois tensions de charge 300 V, 400 V et 500 V. La configuration choisie pour cette étude considère des entrées amont fermées et aval ouvertes (F-O). Comme nous avons pu le montrer, cette configuration (F-O) conduit à des vitesses de déplacement plus importantes. En effet aux forces de Lorentz se rajoutent des forces de pression qui viennent pousser l'arc. Trois positions sont indiquées sur les photos : la position du séparateur en noir, celle du fil fusible en rouge et la position de bouchage amont en bleu. Trois tirs ont été effectués sur chacun des rails.

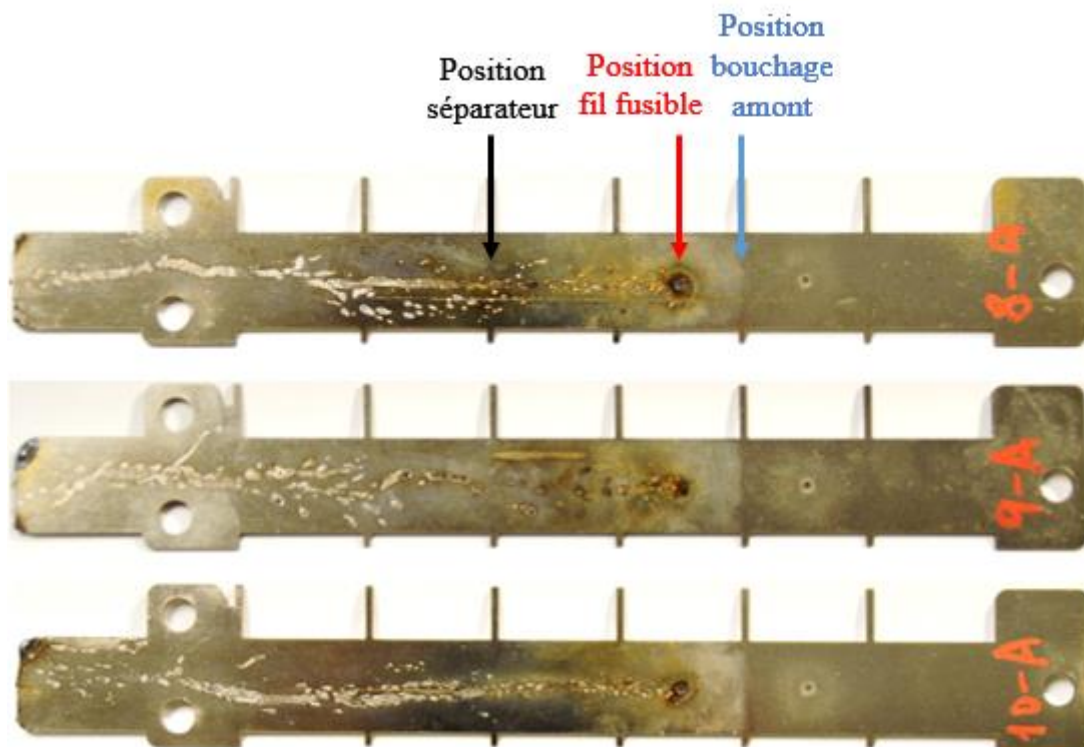


Figure III.28 : Photographie des rails anodiques

La Figure III.27 nous donne la variation temporelle de l'intensité suivant la tension de charge. En combinant la Figure III.27 et Figure III.29 il est possible de connaître la valeur moyenne de l'intensité lorsque l'arc arrive au niveau des séparateurs. Les intensités sont portées dans le Tableau III.4.

	Entrée dans le séparateur
Charge 300V	$t = 1.3 \text{ ms} - I = 600 \text{ A}$
Charge 400V	$t = 0.9 \text{ ms} - I = 700 \text{ A}$
Charge 500V	$t = 0.8 \text{ ms} - I = 800 \text{ A}$

Tableau III.4 : Intensité moyenne suivant la position et la charge.

Pour une charge de 300 V la valeur du courant lors de l'entrée dans le séparateur est de 600 A contre 700 A et 800 A pour des charges respectives de 400 V et 500 V. Le temps mis par l'arc en polarité anodique pour atteindre le séparateur est de 1.3 ms pour une charge de 300 V ce qui correspond à 40% de plus que pour les deux autres charges (Voir Figure III.29).

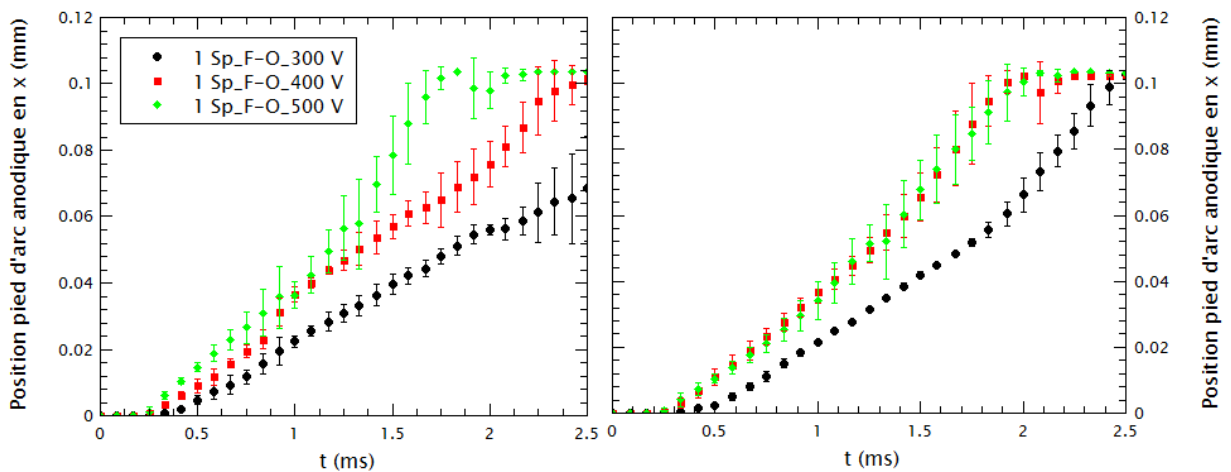


Figure III.29 : Positions des pieds en fonction du temps pour différentes charges initiales
(Côté Gauche : Anode – Côté droit : Cathode)

L'arc est poussé vers le séparateur sous l'effet des forces de Lorentz et sous les effets de l'onde de pression. On peut donc penser que pour une charge de 300 V, le bouchage de l'arc dans la maquette n'est pas suffisant pour que l'effet de pression se manifeste pleinement. Au

contraire à partir d'une charge de 400 A l'effet de pression prendrait le dessus sur la force de Lorentz ce qui expliquerait pourquoi pour 800 A la vitesse de déplacement reste pratiquement inchangée. Si nous partons de cette hypothèse, au fur et à mesure du déplacement de l'arc vers la sortie la pression diminue de par l'augmentation du volume compris entre le bouchage amont et l'arc et la force de Lorentz redevient progressivement prépondérante. Ainsi si nous examinons la Figure III.28, sur la photo supérieure, les traces laissées sur le rail proviennent de la force de Lorentz et donnent un déplacement assez rectiligne et cela d'autant plus que l'intensité est élevée (maximale vers la fin de déplacement). Lors de la commutation sur le séparateur les traces laissent supposer un comportement plus chaotique. Sur la photo centrale, l'effet de bouchage commence à se manifester, l'onde de pression ne pourrait se propager pleinement entre l'arc et les bords de la maquette, ce qui conduit à des pieds d'arc instables qui occupent lors de leur accrochage la largeur du rail. Au contraire pour une charge de 500 V l'arc est très « dirigé » et les traces sont situées dans la position médiane du rail.

Sur la Figure III.30 sont données les photographies des trois rails en polarité cathodique pour les mêmes charges mentionnées dans le Tableau III.4.

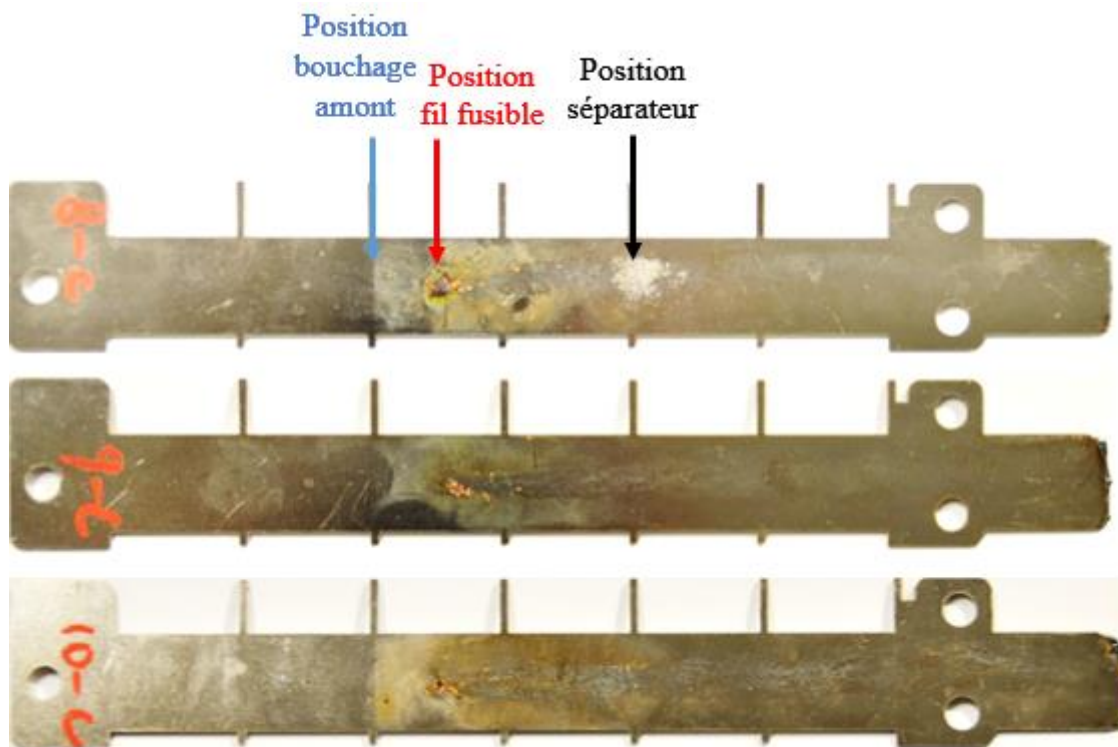


Figure III.30 : Photographie des rails cathodiques.

La comparaison des Figures III.28 et III.30, montre clairement une différence des traces laissées suivant la polarité considérée. La polarité anodique est plus impactée que la cathodique. La couleur du rail en amont et en aval de la position de bouchage est clairement différente due aux températures plus élevées auxquelles le rail a été soumis. Cependant l'aspect des rails est totalement différent de celui observé sur la Figure III.28. La vitesse moyenne des pieds d'arc côté anodique et cathodique Figure III.29 ne peut justifier une telle différence et il faut chercher l'explication dans les mécanismes physiques au niveau des pieds d'arc. Les bilans d'énergie réalisés dans la littérature sur des arcs transférés de la centaine d'ampère dans des configurations d'arc transférés montrent que le transfert d'énergie côté anodique est majoritaire [Fre_1]. La composante principale est la composante électrique donnée par la densité de courant et la chute de tension de la gaine. Ce transfert d'énergie conduit à une détérioration des rails sous polarité anodique lors de l'impact et à l'émission de vapeurs.

Ce même comportement est aussi visible sur la Figure III.31 donnant pour les trois charges les photographies des séparateurs côté faces anodique et cathodique. La partie de gauche est relative à la polarité anodique et celle de droite à la polarité cathodique

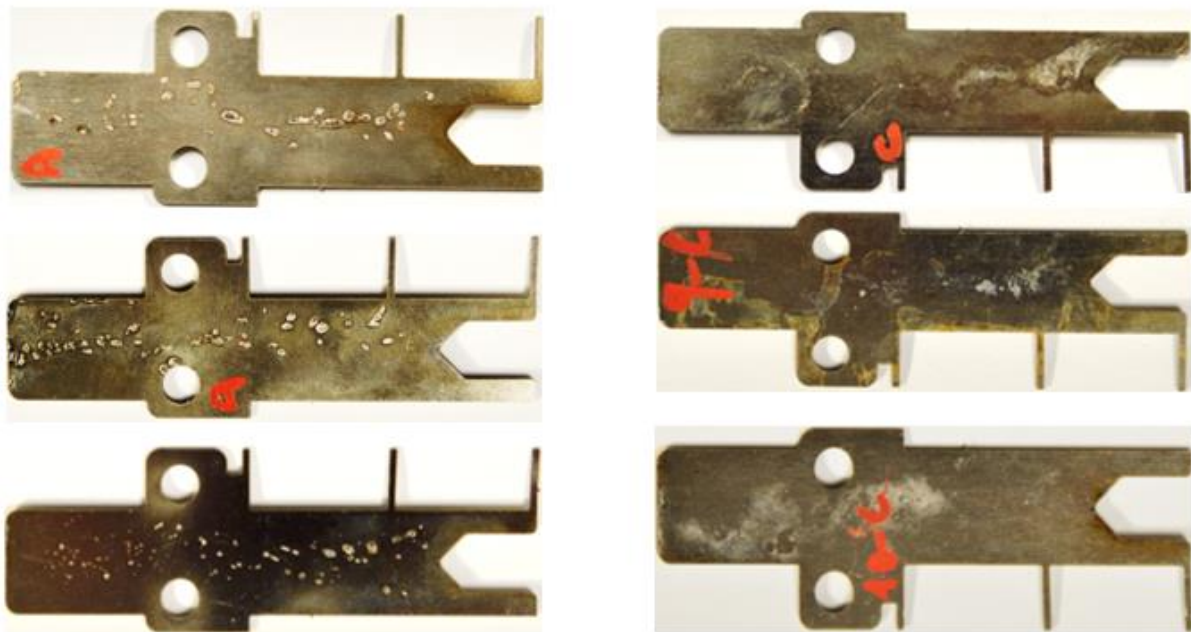


Figure III.31 : Photographie des séparateurs anode (gauche) et cathode (droite)

(De haut en bas charge de 300 V – 400 V – 500 V)

III.3. Synthèse des résultats expérimentaux

Des travaux expérimentaux avaient été réalisés dans l'équipe lors d'une précédente thèse [Qué_1]. Ils concernaient principalement l'étude de la vitesse d'ouverture du bras de contact et la vitesse de déplacement de l'arc. Nous avons poursuivi ces travaux expérimentaux sur la maquette initiale afin de nous familiariser avec les outils. Cependant la maquette utilisée ne permettait que difficilement des études paramétriques car le démontage des pièces prenait beaucoup de temps. C'est ainsi qu'après discussion une nouvelle maquette beaucoup plus pratique nous a été mise à disposition par Hager. Ces deux maquettes sont présentées dans ce chapitre, ainsi que l'alimentation utilisée et les outils de diagnostic. Un point crucial des mesures est relatif à la synchronisation des mesures électriques et des images vidéo. Afin d'aider à l'interprétation des résultats, l'outil précédemment développé sous Matlab, et qui permettait de visualiser temporellement la mesure avec l'image de l'arc a été upgradé afin de pouvoir considérer la nouvelle maquette ainsi que la présence potentielle de séparateurs avec une recherche des pieds d'arc. Dans ce chapitre différents points ont été étudiés. Le premier est relatif à l'étude du comportement de l'arc en présence de séparateurs. Les chutes de tension additionnelles provenant des gaines sont mises en évidence. Le second point est relatif aux entrées et sorties vers le milieu ambiant. Suivant la configuration l'arc se déplace plus ou moins rapidement. En effet même si les forces de Lorentz agissent pour mettre en œuvre le déplacement de l'arc, on a pu observer que sur une configuration amont fermée, et aval ouverte l'arc se déplaçait plus rapidement sous l'effet de la force de pression. Afin de nous rapprocher d'une configuration la plus réaliste possible, nous avons étudié l'influence de la forme des séparateurs. La configuration en "U" donne bien les résultats escomptés. Elle permet en effet à l'arc de commuter progressivement sur le séparateur et donc une vitesse de déplacement de l'arc plus rapide. L'ensemble de ces mécanismes dépendent aussi de la valeur de l'intensité. Plus la valeur de l'intensité est élevée plus la force de Lorentz agit et permet à l'arc de se déplacer rapidement.

Avec cette étude expérimentale nous avons à présent l'ensemble des outils permettant une confrontation/discussion avec les résultats de notre modèle. Ceci va être présenté dans le prochain chapitre.

CHAPITRE IV :
Application à la configuration expérimentale

Dans les études de J. Quéméneur [Qué_1], la géométrie utilisée dans l'équipe était centrée sur les phénomènes de déplacement de l'arc entre les rails et ne prévoyait pas l'utilisation de séparateurs. Pour la mise en place des séparateurs dans la chambre, nous avons reçu de la société Hager une nouvelle maquette [Dép_1]. Cette nouvelle maquette expérimentale a été détaillée dans le chapitre III. Nous allons dans ce chapitre présenter les caractéristiques principales de cette nouvelle géométrie, que nous avons maillée. Les résultats des simulations seront confrontés avec les résultats expérimentaux. En particulier, l'étude portera sur l'influence de la condition initiale sur le déplacement de l'arc. En effet, peu de résultats de la littérature ne s'intéressent à cette condition qui semble pourtant primordiale dans certains cas. Un premier cas « complet » allant jusqu'au déplacement dans les séparateurs sera ensuite présenté sur une géométrie tronquée en longueur pour réduire le temps de calcul. Les résultats de la modélisation englobent les développements réalisés pour la description du courant au proche voisinage des électrodes. La courbe « a » de la Figure II.6 est choisie et appliquée au niveau des rails et des séparateurs.

IV.1. Géométrie et maillage

La maquette utilisée dans ce dernier chapitre pour la modélisation correspond à la maquette expérimentale. La Figure IV.1 représente la géométrie sur une configuration à cinq séparateurs. C'est une chambre parallélépipédique qui comporte deux rails parallèles, avec ou sans la présence de séparateurs. Sur ce premier maillage, les dimensions de la géométrie sont similaires à celles de la maquette expérimentale. La longueur suivant x est égale 125 mm et la hauteur de la chambre est de 20 mm, l'épaisseur des rails et des séparateurs est de 1 mm. D représente la distance entre le rail et le séparateur. Sur la Figure IV.1 la chambre de coupure est composée de cinq séparateurs. C'est le nombre maximal de séparateurs que cette maquette peut accueillir. Suivant le nombre de séparateurs considérés pour la confrontation avec les résultats expérimentaux, les cellules sont mises en « live » ou bien « solide » sans qu'il soit nécessaire de remailler. Afin de réduire le nombre des cellules pour cette géométrie, nous avons mis en place une interface entre la zone proche des séparateurs (Chambre de coupure) et la zone sans séparateurs (Préchambre). Ceci nous permet de mailler de manière indépendante les deux côtés (voir Figure IV.2). Les mailles, au voisinage des rails et des séparateurs, sont de 0.1

mm afin de pouvoir appliquer le modèle de conductivité. Le nombre total de cellule est de 2.2 million. Nous pouvons observer que les mailles sont plus resserrées (image de droite de la Figure IV.2) afin de décrire le proche voisinage des séparateurs sans avoir à transposer cette fine description dans l'ensemble de la géométrie. Dans nos simulations nous n'avons considéré que des cellules quadrilatérales afin d'avoir une meilleure description sur les gradients calculés par le logiciel. Sur l'image de gauche de la Figure IV.1, deux zones de maillage plus raffiné sont toutefois présentes, elles correspondent aux surfaces des deux rails sur lesquels l'arc va se déplacer. Il faut compter sur cette géométrie environ 12 h de temps de calcul par pas de temps ($10 \mu\text{s}$) sur 12 processeurs avec 2000 sous itérations. Pour donner un ordre d'idée, l'obtention de 1 ms de temps de vie de l'arc prendra donc environ 50 jours.

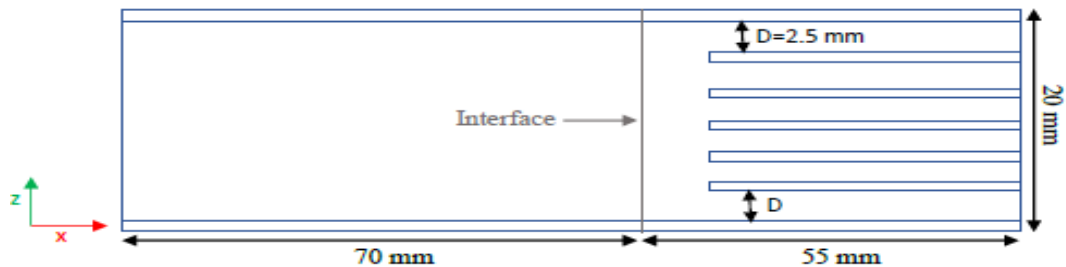


Figure IV.1: Plan milieu de la géométrie

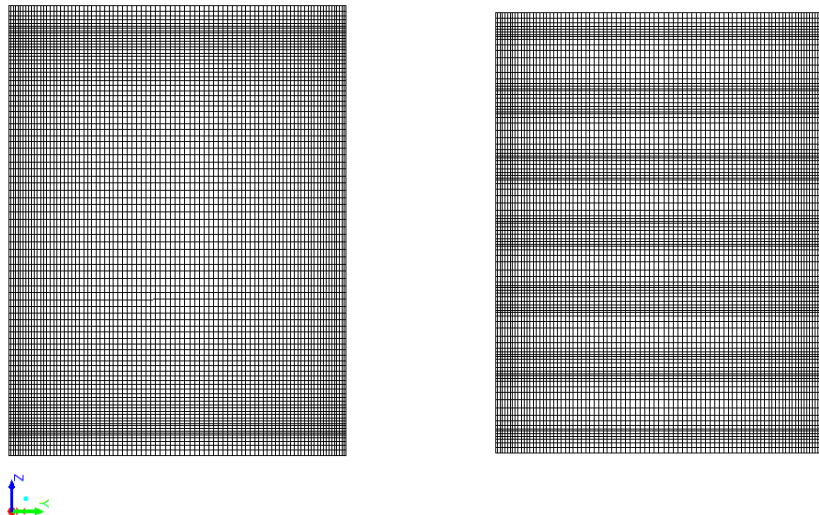


Figure IV.2: Maillages côté gauche de l'interface et côté droit en présence des séparateurs

IV.2. Condition initiale

Comme nous l'avons indiqué dans les chapitres précédents, notre modèle ne décrit pas les premiers instants du passage du courant. L'amorçage, expérimentalement est réalisé via un fil fusible. Nous avons pu observer sur les résultats expérimentaux que l'explosion du fil fusible était suivie par une hausse brutale de la tension qui se produisait autour de 0.33 ms. La variation du courant utilisée dans la simulation est directement issue des mesures expérimentales. Ainsi, afin de tenir compte du laps de temps nécessaire pour fondre le fil fusible la variation du courant dans le modèle débutera à 0.33 ms. Le temps initial pour le recalage et la confrontation des résultats sera donc de 0.33 ms. A cet instant l'arc, comme dans les chapitres précédents, est initialisé par un canal de température.

Sur la Figure IV.3 nous avons représenté les variations du courant en fonction du temps données par l'expérience dans deux configurations. Le courant présumé a été obtenu à partir d'une mesure directe lorsque les deux rails étaient mis en court-circuit avec une résistance estimée équivalente à celle de la maquette. Les deux autres courbes de couleurs rouge et verte correspondent au courant électrique mesuré dans une configuration expérimentale comportant un séparateur respectivement avec des bouchages amonts ouvert et fermé (Voir Figure IV.4), l'aval étant dans les deux cas ouvert.

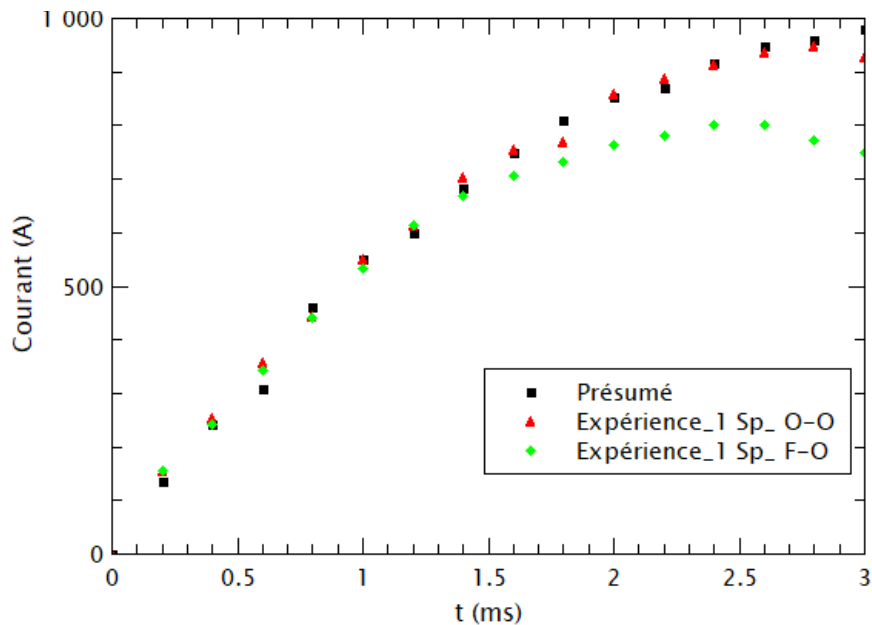


Figure IV.3 : Courants expérimentaux

La différence entre les deux courbes (verte et rouge) est, comme nous avons pu le montrer précédemment, due à la différence des vitesses de déplacement de l'arc. En effet dans la configuration (F-O) nous avons observé dans le chapitre III une vitesse de déplacement de l'arc beaucoup plus rapide, due aux forces de pression prépondérantes dans ce cas. Ainsi l'arc arrive beaucoup plus tôt dans les séparateurs qui limitent alors le courant. Un point sur lequel nous devons porter attention est le suivant : notre modèle n'est pas couplé avec des équations du circuit et ne permet donc pas de prendre en compte pour l'instant une limitation du courant par une hausse de la tension globale. La question se pose donc de savoir si c'est le courant expérimental présumé ou bien limité qui doit être imposé dans le modèle. Si nous imposons le courant présumé dans la configuration (O-O) cela ne devrait pas avoir trop d'incidence comme le montre la Figure IV.4, cependant dans la configuration (F-O) les différences sont notables. Nous avons fait le choix de donner en entrée de notre modèle le courant limité afin de ne pas surestimer la vitesse de déplacement de l'arc sous l'effet des forces de Lorentz et de pouvoir confronter avec les résultats expérimentaux. Nous devons donc prendre soin de vérifier que les résultats de modélisation conduisent bien à une entrée de l'arc dans des temps « acceptables » en comparaison avec les résultats expérimentaux afin que la valeur imposée du courant soit légitime.

La Figure IV.4 schématise les domaines de calcul pour la simulation, les conditions limites sont récapitulées dans le Tableau IV.1. Les parois correspondent aux surfaces autres que les rails.

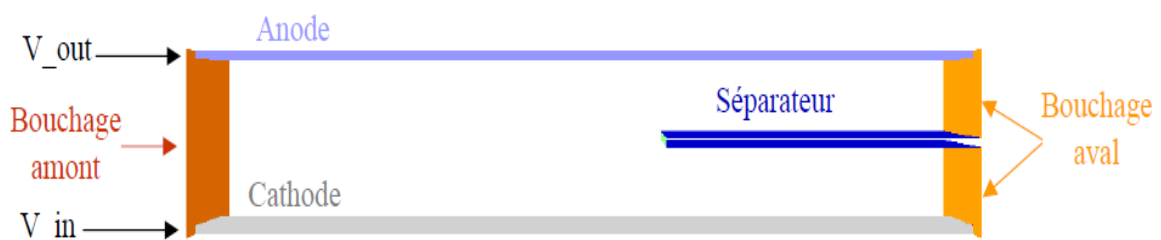


Figure IV.4 : Domaine de calcul

Condition limite	Vitesse	Energie	Potentiel électrique	Champ magnétique
Anode	$v = 0$ m/s	Transfert chaleur	Continuité fluide/solide	Biot&Savart
Cathode	$v = 0$ m/s	Transfert chaleur	Continuité fluide/solide	Biot&Savart
V_in	/	$dT/dn = 0$	$j = I/S$	/
V_out	/	$dT/dn = 0$	0 V	/
Bouchage Amont/aval	$P = P_{atm.}$	Convection	$dV/dn = 0$	Biot&Savart
Parois	$v = 0$ m/s	300 k	$dV/dn = 0$	Biot&Savart
Séparateur	$v = 0$ m/s	Transfert chaleur	Continuité fluide/solide	Biot&Savart

Tableau IV.1 : Conditions limites pour la configuration (O-O)

IV.3. Amorçage par un canal de Température

Dans cette partie, nous allons détailler la phase d'amorçage de l'arc et son influence sur son déplacement dans les premiers instants pour deux configurations (O-O) et (F-O).

IV.3.1. Configuration (O-O)

Afin d'étudier expérimentalement le déplacement de l'arc, nous utilisons les images de la caméra rapide (droite de la Figure IV.5) alors que pour la modélisation (gauche de la Figure IV.5), nous utilisons les valeurs du coefficient d'émission nette tracées en nuance de gris dans le plan médian. La configuration étudiée est ouverte sur les deux extrémités (O-O) suivant la terminologie employée. Le même outil de détection des pieds d'arc a été utilisé pour les deux sources de résultats. Ainsi on peut discerner sur la figure des croix de différentes couleurs correspondantes aux positions des pieds d'arc et du centre de la colonne. Les erreurs de positionnement peuvent être estimées à $\pm 2\%$ pour peu qu'il n'y ait pas sur la même image

plusieurs pieds d'arcs sur la même électrode. Si cela arrive, la croix se positionne alors sur la moyenne entre les deux et l'erreur est plus importante.

Côté droit à $t = 0.33$ ms nous pouvons observer l'éclatement du fil fusible sous l'influence de l'effet Joule. Ce temps expérimental correspondra au premier pas de temps de la simulation soit $t = 10 \mu\text{s}$. Ainsi la courbe de variation de courant pour le modèle sera décalée de 0.33 ms par rapport à l'expérience. L'arc sur un laps de temps de 0.4 ms ne s'est pratiquement pas déplacé de sa position initiale. La configuration étant (O-O) il n'est soumis qu'aux forces de Lorentz et présente une forme diffuse en son milieu. Côté modélisation (Gauche) la colonne de l'arc présente un retard par rapport au déplacement des pieds, ce qui conduit à garder l'espace entre les rails chauds. Nous pouvons alors observer à $t = 0.67$ ms les prémices d'un point chaud qui se concrétise à $t = 0.75$ ms par un claquage arrière.

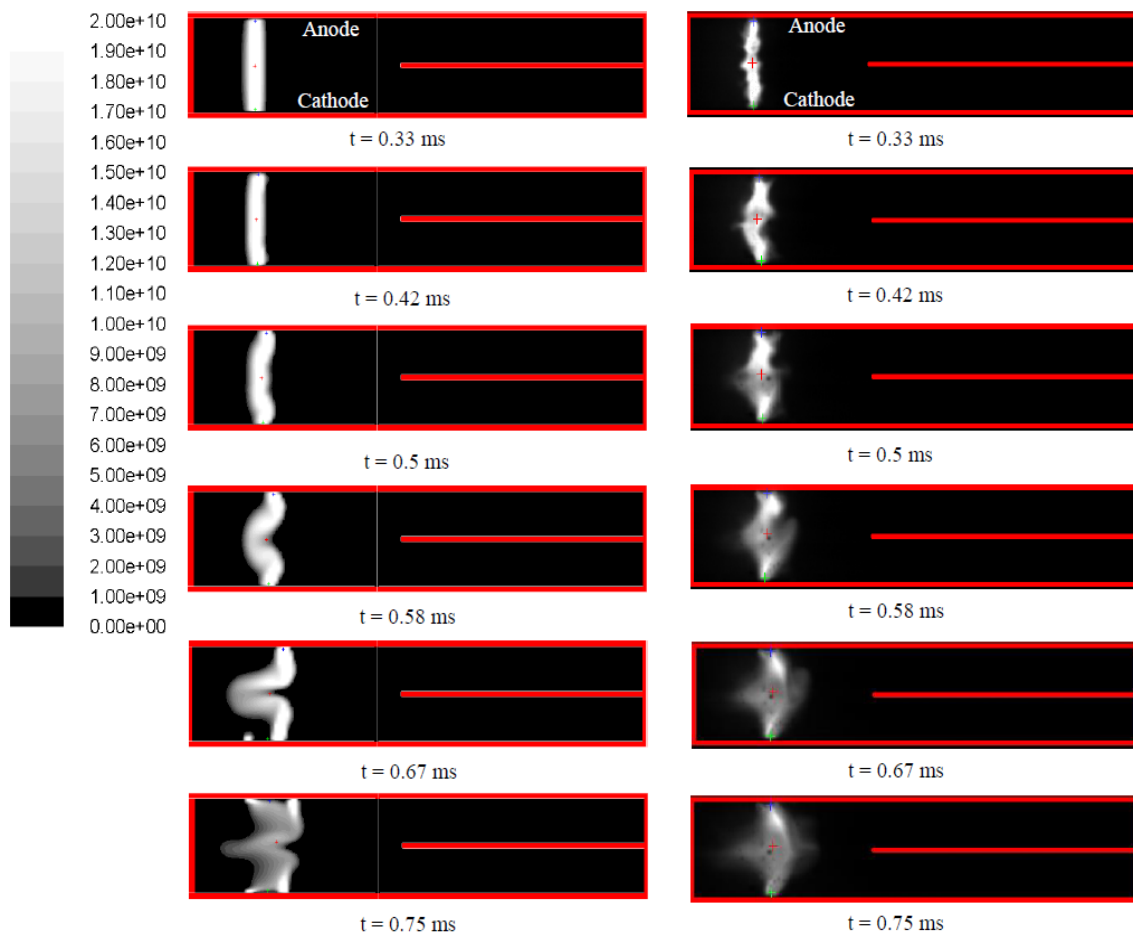


Figure IV.5 : Images dans le plan médian traitées par le logiciel de détection de l'arc pour la configuration (O-O). (Gauche : Coefficient d'émission nette – Droite : images de la caméra)

Les positions des pieds d'arc en fonction du temps pour le modèle ainsi que les positions moyennes expérimentales sont tracées sur la Figure IV.6. Un bon accord est observé jusqu'au temps $t = 0.67$ ms. La chute brutale de deux courbes de simulation correspond au claquage arrière qui est visible Figure IV.5. Pour rappel, dans cette configuration, l'arc est peu soumis aux forces de pression pour son déplacement puisque la géométrie est ouverte des deux côtés.

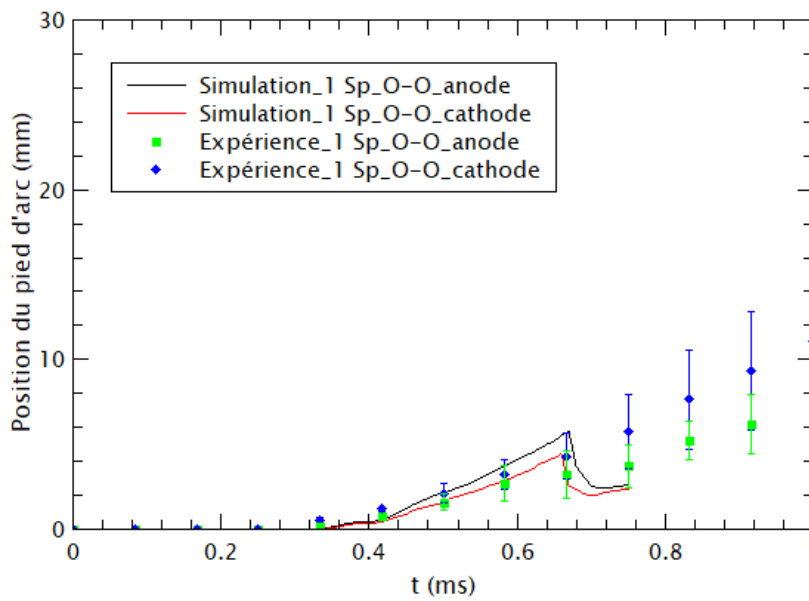


Figure IV.6 : Comparaison des déplacements de la simulation (gauche) et de l'expérience (droite) pour la configuration (O-O)

IV.3.2. Configuration (F-O)

La géométrie étudiée est à présent fermée côté amont (F-O). Nous comparons le déplacement avec la configuration précédente (O-O).

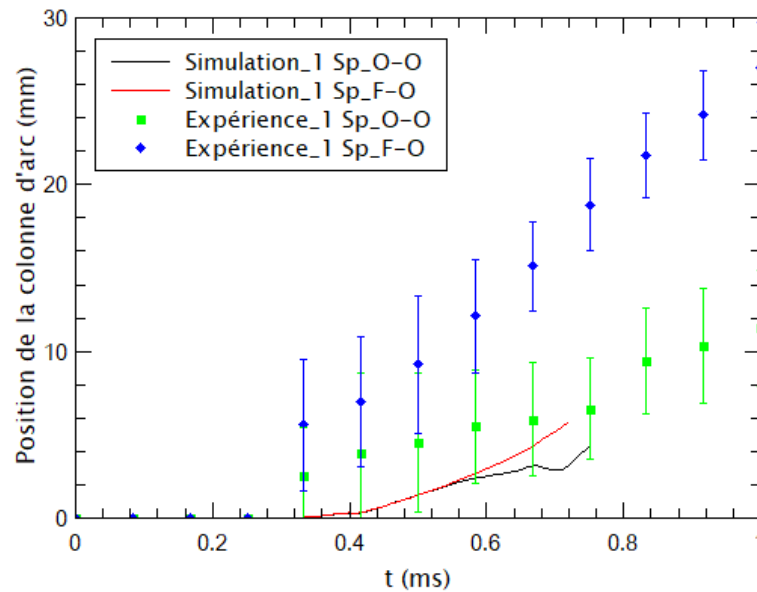


Figure IV.7 : Comparaison des déplacements de la simulation et de l'expérience pour la configuration (O-O) et (F-O)

Les positions de la colonne d'arc données par le modèle et par l'expérience sont affichées sur la Figure IV.7. Nous avons observé, lors de la présentation des résultats expérimentaux sur les précédentes géométries que la configuration (F-O) était plus favorable pour le déplacement de l'arc. Nous retrouvons bien ce même résultat sur les deux courbes expérimentales. Cependant ceci n'est pas mis en évidence par le modèle.

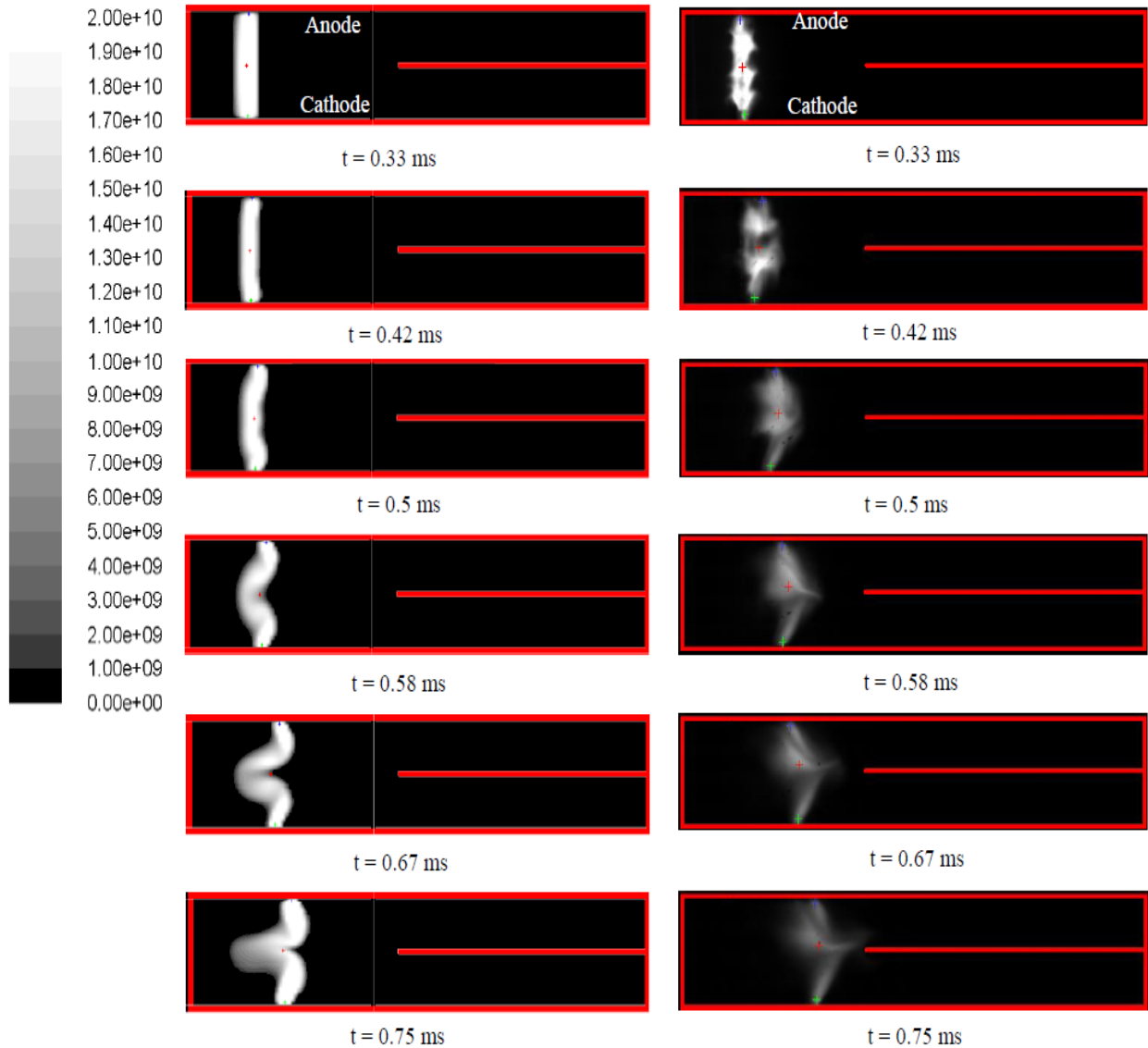


Figure IV.8 : Images du coefficient d'émission nette issues du modèle (gauche) et images de la caméra rapide traitées par le logiciel de détection de l'arc pour la configuration (F-O)

Les images par caméra de la Figure IV.8 montrent clairement qu'en configuration (F-O) l'arc qui auparavant stagnait (Voir Figure IV.5) est clairement poussé probablement du fait du bouchage de la géométrie en amont qui conduit à une augmentation de pression à l'arrière de l'arc et donc à une force de pression. Les résultats des chapitres précédents, destinés à des confrontations par rapport à des travaux de la littérature en choisissant des conditions identiques aux auteurs, sont légitimes dans l'objectif de comparer. Cependant en vue de nous rapprocher d'une configuration plus réaliste nous allons approfondir l'étude des conditions initiales afin d'en trouver des plus appropriées. Dans un boîtier de disjoncteur, même s'il n'est pas étanche, l'espace amont n'est pas totalement ouvert et se rapproche plus d'une configuration fermée.

C'est donc sur la configuration (F-O) que nous proposons dans les paragraphes suivants d'étudier le choix de conditions initiales qui permettraient une meilleure description de l'expérience. Lors de l'explosion du fil fusible, il existe certes un champ de température mais aussi un champ de pression, comme cela peut être le cas lors de l'étincelage d'une bougie de moteur [Ben_2]. C'est donc cette piste que nous avons choisie de privilégier.

IV.4. Amorçage par un canal de Température et de Pression

IV.4.1. Choix de la pression initiale

Afin d'estimer la température ainsi que la pression initiale, nous avons relevé à partir des mesures, l'énergie injectée avant l'explosion du fil. Celle-ci est donnée par l'intégrale du produit courant et tension obtenu par l'expérience :

$$E_{inj} = \int U * I dt \quad (IV.1)$$

La Figure IV.9 représente les variations temporelles du courant et de la tension données par l'expérience et les images d'arc associées dans la configuration (F-O). A $t = 0.33$ ms se produit l'explosion du fil fusible. On observe à cet instant un pic de tension et une fluctuation sur le courant.

E_{inj} calculée de 0 à 0.33 ms est égale à 3.3 J. Toutefois, une partie de cette énergie est utilisée pour la vaporisation et la fusion du fil fusible. En toute logique, il est donc nécessaire pour avoir un ordre de grandeur de l'énergie injectée dans l'arc de soustraire ces deux quantités à l'énergie obtenue par l'intégrale. Au final, l'énergie injectée dans l'arc E_{init} s'écrit par :

$$E_{init} = \int_{t=0}^{t=0.338ms} U * I dt - E_{vapor} - E_{fusion} \quad (IV.2)$$

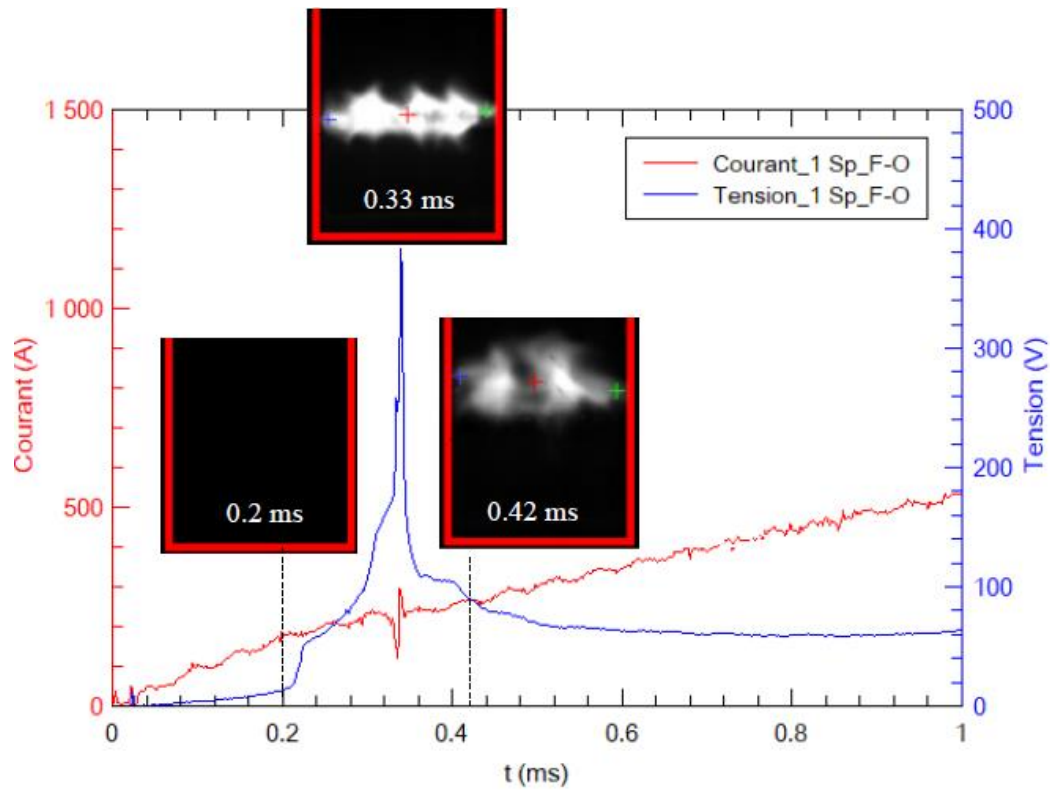


Figure IV.9 : Caractéristiques électriques expérimentales

L'énergie de vaporisation et l'énergie de fusion sont respectivement 330.3 kJ/mol et 13.05 kJ/mol. Le rayon du fil fusible est de 0.1 mm et la longueur du fil correspond à la distance entre les rails (2 cm). Les caractéristiques du cuivre utilisé sont données dans le Tableau IV.2, nous pouvons déduire la masse de notre fil fusible :

$$m_{fil\ fusible} = \rho_{Cu} \cdot V_{volume} \quad (IV.3)$$

L'énergie de vaporisation et l'énergie de fusion du fil fusible sont d'environ 0.1 mJ et 5 μ J. Ces valeurs sont donc négligeables devant l'énergie électrique (3.3 J).

E_{vapo_cuivre} (kJ/mol)	ρ_{Cu} (g·cm ⁻³)	$m_{fil\ fusible}$ (g)	Densité molaire (g/mol)	Masse molaire (mol)	E_{vapo_cuivre} (mJ)
300.3 kJ/mol	8.96	5.63e ⁻⁹	63.5	3.57e ⁻⁷	0.1

Tableau IV.2 : Caractéristique du cuivre

Dans les travaux de M. Benmouffok [Ben_2], l'énergie déposée en condition initiale (E_{init}) est définie comme étant l'image de l'énergie interne massique (U_{int}) :

$$E_{init} = U_{int} * \rho_{plasma} * V_{volume_canal} \quad (IV.4)$$

L'énergie interne s'exprime de la façon suivante :

$$U_{int} = U_{interne} + U_{translation} + U_{réaction} = \left(h - \frac{P}{\rho_{plasma}} \right) \quad (IV.5)$$

ρ_{plasma} représente la densité dans le canal initial, h est l'enthalpie massique tabulée dans la base de données thermodynamiques utilisées par le modèle et P est la pression. Ces expressions permettent d'exprimer des couples température, pression pour un rayon donné à partir de l'énergie injectée (Voir Tableau IV.3).

Cas	Température	Pression	Rayon	E_{init}
1	7650 K	16 bar	2.5 mm	3.3 J
2	6800 K	30 bar	2 mm	3.3 J
3	2000 K	50 bar	2 mm	3.3 J
4	7670 K	50 bar	1.5 mm	3.3 J
5	28200 K	100 bar	1 mm	3.3 J

Tableau IV.3: Tableau des valeurs obtenues pour une énergie initiale de 3.3 J

Nous pouvons observer que pour un rayon fixé, la température du plasma diminue lorsque la pression augmente.

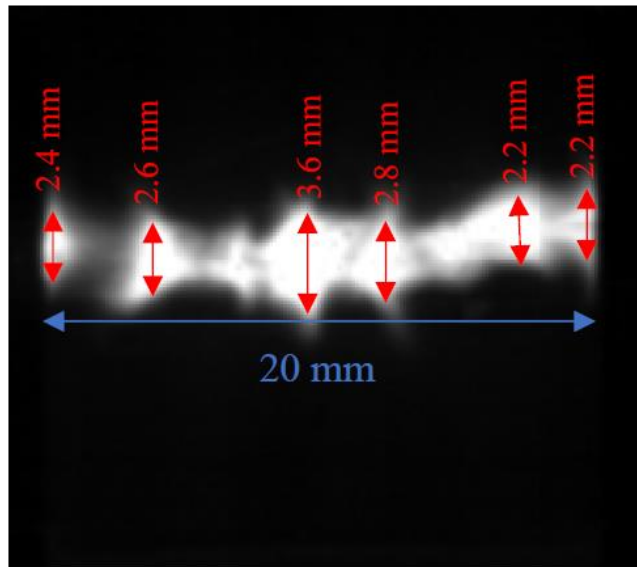


Figure IV.10 : Rayons d'arc

Sur la Figure IV.10, nous avons reporté l'image de l'arc obtenue expérimentalement au moment du pic de tension. Nous pouvons remarquer que le rayon d'arc entre les rails n'est pas homogène. Les diamètres de l'arc sont évalués en différentes côtes (Voir Figure IV.10). Au niveau des accrochages, le rayon d'arc est beaucoup plus resserré que ceux de la colonne. Un diamètre moyen de 3mm est retenu sur la totalité de l'espace inter-électrodes. Ceci équivaut d'après le Tableau IV.3 à une température moyenne dans l'arc de 7670 K pour une pression de 50 bars.

Ce sont ces nouvelles conditions qui vont à présent être utilisées pour initialiser le modèle. Toutefois, le temps de calcul étant extrêmement long sur ce maillage (50 jours pour décrire 1ms), nous avons fait le choix de réduire la géométrie en longueur du côté des séparateurs.

IV.4.2. Géométrie réduite

La géométrie d'étude est présentée sur la Figure IV.11 sous sa forme globale (Côté gauche) et sous sa forme simplifiée réduite (Côté droit).

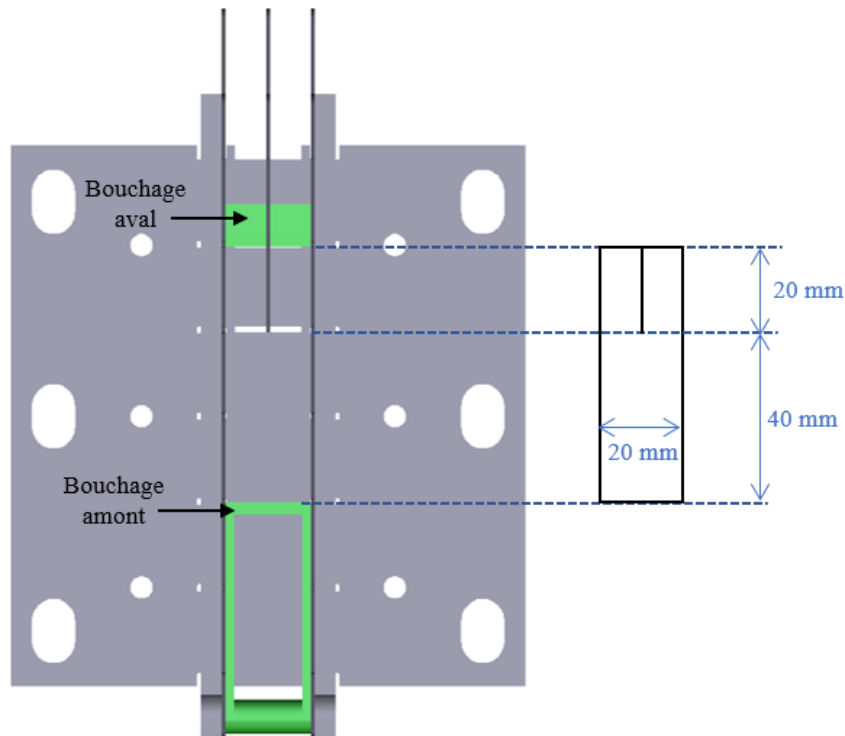


Figure IV.11 : Maquette expérimentale (gauche) et géométrie réduite (droite)

Les dimensions correspondantes sont portées dans la Tableau IV.4. La configuration de droite correspond à la géométrie modélisée à présent. Cette réduction nous permet de passer d'un maillage de 2.2 millions de cellules à 1.4 millions. Le temps pour un pas de temps de calcul passe alors de 12 h à 8 h ce qui fait 30 jours pour décrire 1 ms contre 50 jours précédemment. Sur la tranche aval de la géométrie, nous avons choisi une condition de pression atmosphérique.

	x	y	z
Chambre	60 mm	15 mm	20 mm
Rail	60 mm	15 mm	1 mm
Séparateur	20 mm	15 mm	1 mm

Tableau IV.4 : Dimensions de la géométrie réduite

IV.4.3. Comparaison des résultats expérimentaux et simulations

IV.4.3.1. Déplacement de l'arc

Afin d'illustrer le déplacement de l'arc, les images du coefficient d'émission nette (ϵ) sont données sur la Figure IV.12. La partie gauche est relative à des grandeurs situées dans le plan milieu pour des valeurs comprises entre zéro et $5 \cdot 10^9 \text{ W/m}^3/\text{Sr}$ et celle de droite est une iso valeur de $\epsilon = 5 \cdot 10^9 \text{ W/m}^3/\text{Sr}$. Les deux représentations sont données pour des temps identiques. La comparaison entre le côté gauche et le côté droit est nécessaire car elle montre que l'arc ne reste pas forcément dans le plan milieu mais qu'il peut se déplacer sur la largeur des rails.

Les résultats présentés correspondent à une configuration (F-O). En considérant une valeur initiale de la pression, la colonne de plasma est poussée. Le comportement du plasma (Figure IV.12) est totalement différent de celui qui a pu être observé Figure IV.8. Nous avons tracé les positions des pieds pour la simulation et l'expérience sur la Figure IV.13. Le trait en pointillé représente la position du séparateur. Un bon accord est à présent trouvé entre le modèle et l'expérience pour l'anode jusqu'à 0.95 ms. Le pied anodique arrive à la position du séparateur aux alentours de 1 ms.

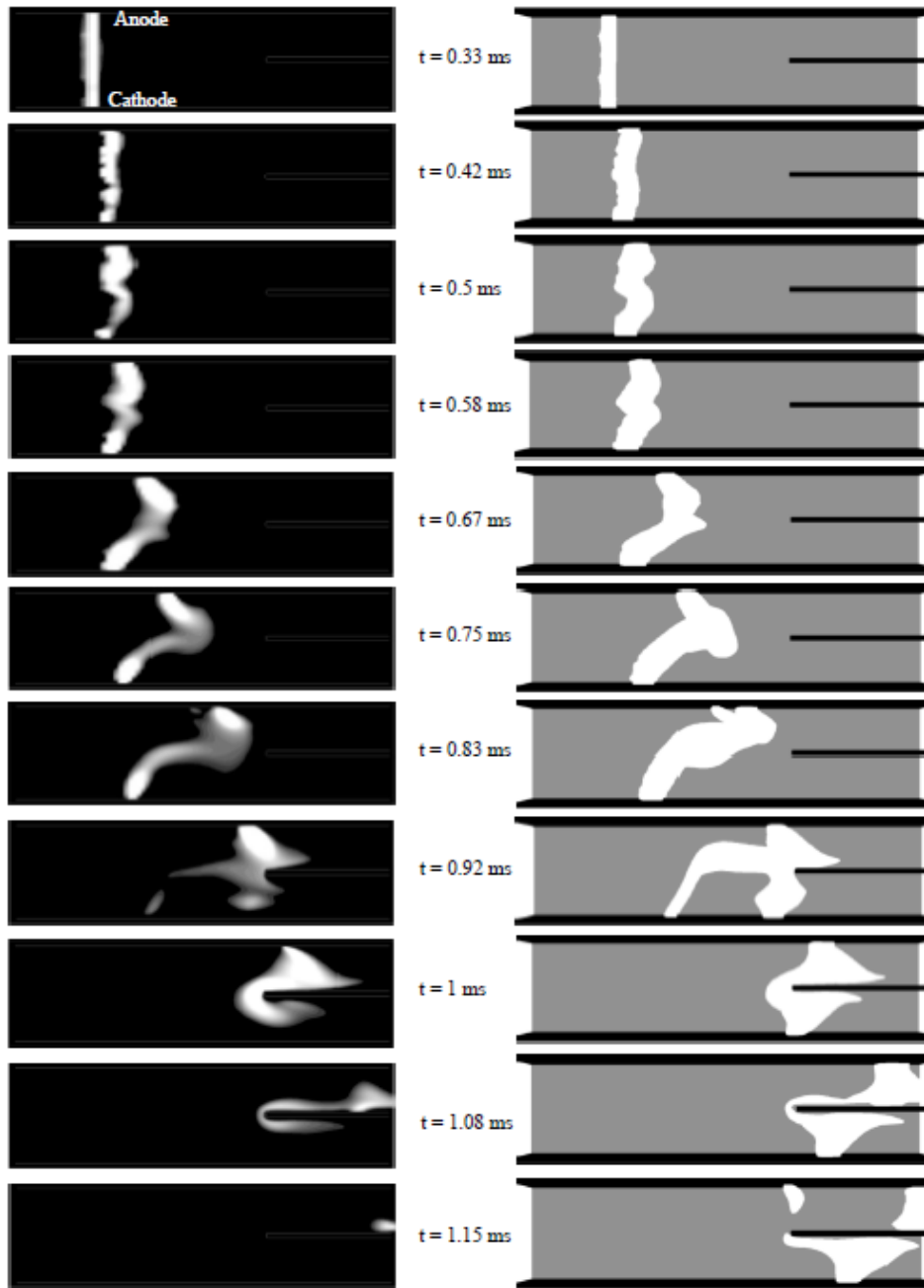


Figure IV.12 : Images du coefficient d'émission nette issues du modèle dans le plan milieu (gauche) et la représentation en 3D (droite)

On remarque toutefois qu'avec le modèle, le pied cathodique stagne avant de claquer brutalement devant le séparateur à 0.9 ms. Nous avons repris sur la Figure IV-14 les images obtenues expérimentalement. La partie droite de la figure a été « tronquée » de manière à pouvoir comparer correctement avec la géométrie réduite du modèle. Sur la partie concernant le déplacement de l'arc avant d'arriver sur les séparateurs, coté anodique, les images nous

confirment un accord relatif sur la forme de l'arc et son déplacement. On voit ainsi clairement que l'arc est orienté vers les séparateurs. Côté cathodique, l'accord est moins bon. D'autre part, expérimentalement, la colonne d'arc commute avec le séparateur à 0.95 ms, ce qui est en accord avec le résultat donné par modèle. La prise en compte d'une condition initiale en pression est donc indispensable dans la configuration (F-O) pour bien décrire le déplacement de l'arc.

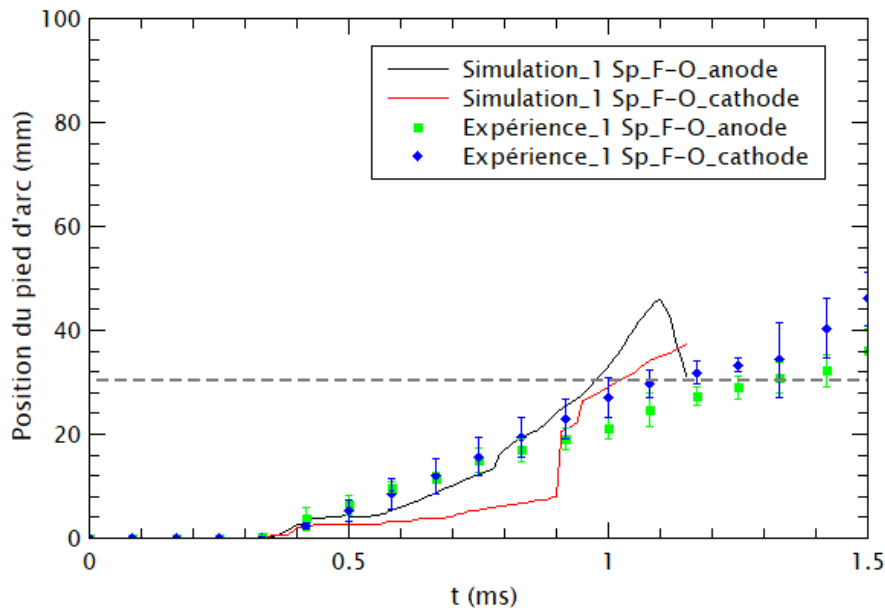


Figure IV. 13 : Comparaison des déplacements obtenus par la simulation et expérimentalement pour la configuration (F-O)

Une fois devant le séparateur, sur la Figure IV.14, nous pouvons constater que l'arc stagne entre l'anode et le séparateur pour ne réellement rentrer qu'à partir de 1.2 ms. Cet effet n'est pas visible sur les résultats de la modélisation où l'arc semble rentrer plus facilement dans l'espace contenant le séparateur alors que nous avons pourtant utilisé la courbe « a » pour le module de conductivité ce qui conduit à un déplacement plus lent. Il serait intéressant pour la suite de ce travail de prospecter si d'autres formes de courbes ne pourraient pas conduire à une rentrée plus progressive dans les séparateurs.

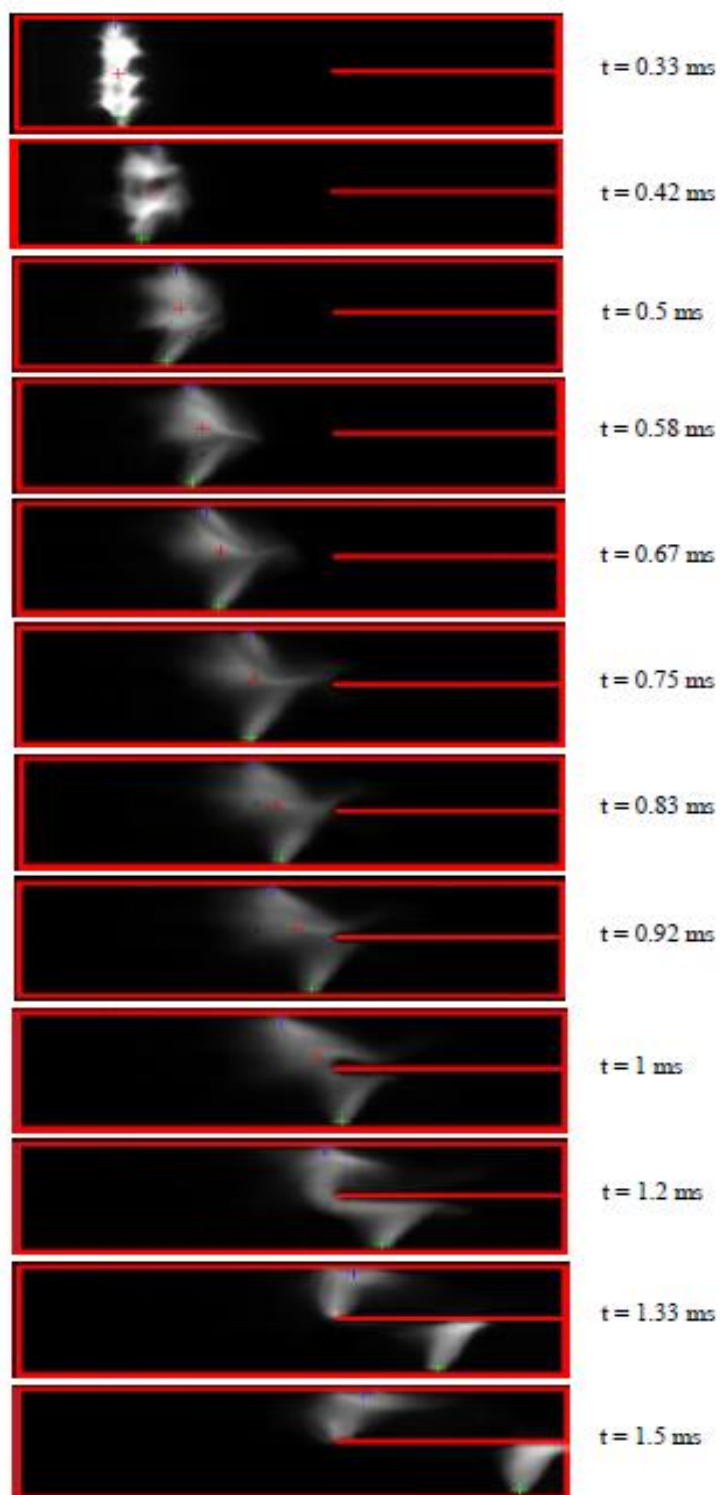


Figure IV.14 : Imagerie expérimentale de l'arc pour la configuration (F-O)

IV.4.3.2. Tension de l'arc

Sur la Figure IV.15, la tension expérimentale et celle donnée par le modèle sont tracées en fonction du temps. Une bonne concordance est retrouvée jusqu'à 0.9 ms. L'analyse des Figure IV.12 et IV.14 montre que ce temps $t = 0.9$ ms correspond à l'arrivée de l'arc dans la chambre de coupure. A partir de ce moment l'arc est plus « chahuté » sur les séparateurs et des différences existent, sur l'évolution de la tension, correspondantes à des différences sur la position de l'arc (plus en avant ou en arrière sur les séparateurs) et donc à un milieu plus ou moins chaud qui conduira à des différences sur la valeur de la tension. Toutefois la prédiction du modèle est plus cohérente lorsqu'une pression est initialisée dans le canal de plasma afin de représenter un amorçage par fil.

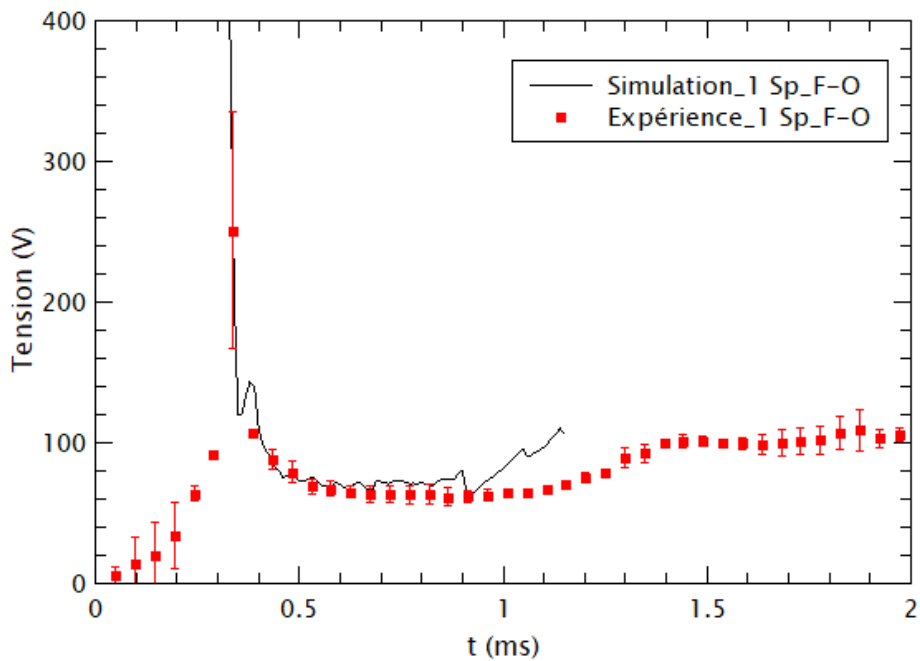


Figure IV. 15 : Tension modèle et expérimentale pour la configuration (F-O)

IV.5. Synthèse des résultats

Dans ce chapitre, le modèle développé incluant la résistivité de gaine au proche voisinage des rails et des séparateurs a été utilisé pour décrire la géométrie expérimentale complète et une version réduite. Nous avons présenté les résultats du modèle et nous les avons confrontés avec des résultats expérimentaux. Les configurations des bouchages (O-O) et (F-O) ont été testées. Afin d'initialiser l'arc un canal de température a été mis en place. Des incohérences ont été observées par rapport aux résultats expérimentaux. Nous avons donc considéré dans le canal initial, comme cela est exposé dans la thèse de M. Benmouffok [Ben_2], une condition initiale de température mais aussi de pression. Des résultats plus cohérents sont alors obtenus lors de la confrontation des vitesses de déplacement ou bien de variation de tension.

CONCLUSION

Ces travaux de thèse se sont déroulés au sein de l'équipe Arc Electric et Procédés Plasma Thermique (AEPPT). Ils avaient pour objectif d'apporter une meilleure connaissance du comportement de l'arc sur des maquettes simplifiées de disjoncteur basse tension. En effet même si ces dispositifs de coupure de courant sont largement implantés sur le réseau de distribution de l'électricité pour protéger les installations et les personnes, l'évolution des normes, la volonté d'augmenter leur durée de vie, d'élargir leur gamme d'utilisation ou encore leur fiabilité font que les activités de recherche concernant ces dispositifs sont encore très actives.

Ces dispositifs de coupure de courant sont complexes et permettent de mesurer toute l'expertise du savoir-faire des ingénieurs qui les développent. Les mécanismes physiques et chimiques conduisant à la coupure sont nombreux. Lors d'un problème sur le réseau ou bien lors d'une intervention volontaire, les dispositifs d'ouverture s'enclenchent (Manuellement, par le biais des déclencheurs magnétique ou bien thermique). Suite à l'ouverture un arc, est créé en présence de vapeurs métalliques issues des contacts, puis il se déplace sous l'influence de différentes forces vers la chambre de coupure. La nature du milieu lors de ce déplacement est constituée d'air ambiant, de vapeurs métalliques issues des différents matériaux ainsi que de vapeurs organiques en provenance des parois plastiques. Cet arc doit arriver le plus rapidement possible vers la chambre de coupure où il est segmenté. La géométrie des séparateurs, la nature des matériaux sont aussi des éléments importants. L'intérêt des séparateurs réside dans l'augmentation de la tension afin de créer une limitation du courant. Les écoulements au sein du disjoncteur sont également étudiés en détail afin de favoriser le déplacement de l'arc, évacuer les vapeurs métalliques et organiques. Le déplacement de l'arc est aussi régi par les forces électromagnétiques notamment dues aux amenées du courant qui doivent être les plus efficaces possibles.

Devant le nombre et la complexité des mécanismes mis en jeux, et afin de mieux appréhender l'optimisation de ces dispositifs, de nombreuses études sont menées par le biais de modélisation et/ou d'expérience. L'équipe AEPPT étudie les disjoncteurs basse tension depuis de nombreuses années, s'intéressant initialement seulement à la partie hydrodynamique, puis aux aspects électromagnétiques. Elle s'est ensuite intéressée notamment dans le cadre d'une première collaboration avec Hager à l'étude de l'arc pendant l'ouverture du contact mobile et à son déplacement sur les rails. La nouvelle collaboration avec Hager a ensuite porté

sur l'étude de la phase de segmentation de l'arc, à la montée de tension et à son éventuelle prise en compte dans les modèles. Ces points ont fait l'objet de cette thèse.

Ainsi ces travaux de thèse comportent les deux aspects : expérimental et théorique. Au fil de l'étude les maquettes expérimentales ont évolué ainsi que les géométries décrites par le modèle. Celui-ci est basé sur le logiciel commercial Ansys – Fluent qui utilise une méthode de résolution en FVM (Finite Volume Method). Il permet une représentation des écoulements plasmas en présence de l'arc électrique avec prise en compte des effets électromagnétiques moyennant le développement de nombreux sous-programmes (UDF) développés dans l'équipe qui viennent interagir avec la partie « boîte noire » du solveur. Cette étude bénéficie ainsi de tout le savoir-faire de l'équipe AEPPT et de toute la physique déjà implémentée qui représente plus de 10000 lignes de programmation. Cependant la représentation d'une montée de tension lors de la segmentation de l'arc n'était pas possible de manière simple en utilisant les UDFs existants. En effet, ces derniers décrivent les gaines en proche voisinage des électrodes en s'appuyant sur les travaux de Benilov [Ben_1] mais les développements sont basés sur la conservation locale de la densité de courant et ne donneraient que des valeurs locales de la tension. L'implémentation/utilisation de ces développements auraient nécessité des maillages très raffinés et un temps calcul non compatible avec la durée de la thèse. Au cours de l'étude bibliographique, présentée dans le *chapitre I*, la méthode de Lindmayer qui a pour principe de décrire les propriétés électriques des gaines par une résistance additionnelle en proche voisinage des surfaces en interaction avec l'arc a donc été présentée et choisie pour la suite. Elle permet une représentation macroscopique de la chute de tension au niveau des gaines.

Dans le *chapitre II*. Nous avons abordé la problématique de la segmentation de l'arc et présenté les bases du modèle 3D que nous avons développé avec ses hypothèses. Nous l'avons compris, dans l'étude du disjoncteur basse tension, l'un des points clefs est la description de la montée en tension. La résolution de l'équation du potentiel scalaire permet dans la plupart des codes de décrire la tension de la colonne du plasma suivant la longueur de l'arc électrique. Afin de pouvoir prendre en compte la tension de gaine présente au niveau des rails et sur chacune des faces du séparateur, nous avons développé dans Ansys – Fluent l'approche de Lindmayer qui consiste à intercaler entre le plasma et les surfaces une résistance de gaine plus ou moins grande qui introduira une tension lors du passage de l'arc. Ce module existe en « boîte noire » dans Ansys – CFX, mais pas dans Ansys – Fluent, et est utilisé par quelques auteurs sans que l'on ne comprenne réellement ce qu'il comporte. De plus les résultats accessibles dans la littérature présentaient nombre d'incohérences. Pour appréhender

l'approche de Lindmayer et valider nos développements, elle a été testée sur les mêmes géométries que celles d'Iturregi – une des études la plus complète et récente de la littérature. Ces travaux présentent l'avantage d'avoir été faits sur des géométries de dimensions relativement réduites. Ils comportent aussi une étude paramétrique portant notamment sur l'influence du nombre de séparateurs et sur l'influence d'initialisation de la position de l'arc. Les résultats de simulation montrent que dans le cas sans séparateur, la tension de l'arc est pratiquement constante pendant tout le mouvement de l'arc. Dans les cas avec un et deux séparateurs, la tension de l'arc augmente d'environ 20 V. En comparant avec les travaux d'Iturregi, les évolutions de la tension d'arc pour le cas d'un séparateur et deux séparateurs sont pratiquement identiques et leurs déplacements sont similaires ce qui reste étonnant.

Côté expérimental dans le *Chapitre III*, nous avons dans un premier temps utilisé la maquette des travaux précédents [Qué_1]. Cependant, la préparation des tirs pour chacune des configurations prenait énormément de temps. Après discussion avec notre partenaire industriel Hager, une nouvelle maquette a été mise à disposition. Celle-ci ne comportait plus de bras rotatif pour l'amorçage mais un fil fusible. Cette maquette permet de remplacer rapidement les rails et d'envisager différentes configurations notamment par l'obturation totale ou partielle des entrées à l'amont ou l'aval du déplacement de l'arc ou encore l'incorporation de séparateurs. Les rails et séparateurs que nous avons utilisés étaient constitués d'acier recouvert d'un dépôt de Nickel. Afin de créer une demi-onde de courant nous avons utilisé une alimentation mise au point lors des précédents travaux qui permet de délivrer par le choix de différents couples L-C des intensités de courant de quelques centaines d'ampères à quelques dizaines de milliers d'ampères sous une fréquence de 50 Hz. Seule une demi-onde de courant est générée. Des campagnes expérimentales ont été menées en présence ou non de séparateurs afin de faire des observations par caméra rapide et de relever des mesures résolues en temps du courant et de la tension. Pour l'interprétation des résultats nous avons adapté un outil développé sous Matlab qui nous permet de synchroniser sur une même image les mesures électriques et l'image de la caméra. Cet outil calcule aussi un certain nombre de grandeurs telles que les vitesses moyennes de déplacement et la position des pieds d'arc et de la colonne. Sur une configuration ouverte aux deux extrémités nous avons pu mettre en évidence le déplacement de l'arc sous l'influence grandissante des forces de Lorentz en fonction de l'intensité nominale du courant. Lorsque les deux extrémités sont fermées (F-F), nous avons pu constater que l'arc avait de la difficulté à se déplacer. Finalement dans une configuration fermée seulement en amont (F-O) nous avons pu observer l'influence de la force de pression sur la mise en mouvement de l'arc et sur sa vitesse

de déplacement. En conservant la configuration des bouchages (F-O) pour les autres études, une chute de tension d'environ 30 V par séparateur a été obtenue par l'analyse des caractéristiques dans la géométrie à un et deux séparateurs. Deux formes de séparateurs sont testées ("pleine" et en "U") afin d'identifier leur influence sur la segmentation de l'arc. Les résultats montrent que pour le séparateur de forme en "U" l'arc commute plus facilement, donc la segmentation de l'arc est plus aisée. Un résultat similaire à celui du chapitre II est observé pour l'influence de l'intensité. De plus, les états des rails et des séparateurs sont discutés suivant l'intensité permettant de conforter notre hypothèse de compétition entre force de Lorentz et force de pression suivant la configuration.

La simplification de la maquette précédente par le remplacement du bras rotatif par un fil fusible utilisé d'ailleurs dans de nombreux travaux de la littérature nous semblait à la base être une bonne idée. Nous avons compris un peu tardivement que cela changeait radicalement les conditions rendant la confrontation avec le modèle délicat. Les études expérimentales ont clairement montré l'influence de la force de pression sur la mise en mouvement de l'arc. Une représentation initiale de l'arc par un canal de température n'est donc pas suffisante. Nous avons ainsi utilisé la méthodologie de travaux antérieurs [Ben_2] portant sur les conditions initiales lors de l'étincelage d'une bougie afin d'en déduire des couples pression-température en fonction des dimensions de la décharge. En nous basant sur des observations expérimentales, nous avons pu déterminer les dimensions d'un canal initial et remonter à un couple température-pression que nous avons alors utilisé en condition initiale pour le modèle. Nous avons alors retrouvé des résultats similaires et une bonne cohérence sur l'évolution de la tension entre les résultats du modèle et ceux expérimentaux. Ainsi un grand pas a été mené vers une description plus réaliste des mécanismes et de prise en compte des chutes de tensions additionnelles. Cependant des travaux seraient encore à mener pour aller vers un outil prédictif du comportement sur une géométrie donnée.

Les développements actuels comportent un certain nombre d'hypothèses et/ou simplifications. En effet nous ne prenons pas en compte de modèle d'érosion de vapeurs métalliques et organiques, le rayonnement n'est considéré que par un coefficient d'émission nette qui ne permet pas de considérer de divergence de flux vers les parois et de réabsorption du rayonnement par la périphérie du plasma, l'écoulement est considéré laminaire. L'ensemble des points cités pourrait constituer les perspectives de ce travail. Dans la continuité directe de ces travaux à court terme, à partir des développements actuels, nous allons considérer une géométrie plus réaliste qui comporterait le déplacement d'un contact et une dizaine de

séparateurs. Une autre amélioration qui devrait être mise en place est relative à la limitation du courant. Même si nous sommes actuellement capables de décrire la montée en tension, la limitation de courant dans le cadre des travaux de cette thèse n'est pas directement calculée. Il faudrait donc à partir de la montée de tension mettre en place une équation électrique qui permettrait d'en déduire la limitation de courant correspondante.

BIBLIOGRAPHIE

- [Ans_1] ANSYS – Fluent 14.5 User Guide
- [Azz_1] Azzi A, Mécanique des fluides numérique par la méthode des volumes finis, 2011
- [Bau_1] Bauchire J M, Modélisation numérique d'une torche de projection à plasma : influence de la géométrie et de la turbulence sur les propriétés du plasma, Thèse de l'Université Paul Sabatier, 1997
- [Bau_2] Bauchire J M, Hong D, Gentils F & Fievet C, Le disjoncteur basse tension et l'arc électrique, 5^e Journées du Réseau Plasma Froid, 2006
- [Bel_1] Belbel E M & Lauraire M, Behavior of switching arc in low voltage limiter circuit breakers, IEEE, 1985
- [Ben_1] Benilov M S & Marotta A, A model of the cathode region of atmospheric pressure arc, J. Phys. D: Appl. Phys, 1995
- [Ben_2] Benmouffok M, Caractérisation théorique du plasma lors de l'application d'un courant impulsionnel : Application à l'allumage des moteurs, Thèse de l'Université Paul Sabatier, 2016.
- [Car_1] Carlomagno R, Les disjoncteurs basse tension: Généralités, Technologie, Caractéristiques et critère de choix, <https://slideplayer.fr/slide/1322160/>
- [Cou_1] Coudert J F, Planche M P & Fauchais P, Characterization of DC plasma torch voltage fluctuations, Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1996
- [Cre_1] Cressault Y, Teulet P, Gonzalez J-J, Gleizes A & Robin-Jouan Ph, Transport and radiative properties of CO₂ arc plasma : application for circuit-breaker modelling, 16th Symposium on Physics of Switching arc, Brno, 2005
- [Cre_2] Cressault Y, Teulet P & Gleizes A, Thermal plasma properties in gas-vapour mixtures, 17th International Conference on Gas Discharges and Their Applications (GD), 2008
- [Dép_1] Déplade G, Comportement d'un arc électrique impulsionnel de forte intensité : cas du disjoncteur modulaire, Thèse de l'Université Paris – Saclay, 2017
- [Fre_1] Freton P, Etude d'un arc de découpe par plasma d'oxygène : modélisation – expérience, Thèse de l'Université Paul Sabatier, 2002
- [Fre_2] Freton P & Gonzalez J-J, Overview of current research into low-voltage circuit breaker, The Open Plasma Physics Journal, 2009

- [Fre_3] Freton P, Gonzalez J-J, Masquère M & Reichert F, Magnetic field approaches in dc thermal plasma modelling, *J. Phys. D: Appl. Phys*, 44, 2011
- [Gir_1] Girard L, Caractérisation expérimentale d'une torche de découpe dans l'oxygène : étude du jet de plasma et de l'interaction arc-matériau, Thèse de l'Université Paul Sabatier, 2004
- [Gon_1] Gonzalez J-J & Freton P, Flow behavior in high-voltage circuit breaker, *IEEE*, 2011
- [Gon_2] Gonzalez J-J, Freton P, Reichert F & Petchanka A, PTFE vapour contribution to pressure changes in high voltage circuit breaker, *IEEE*, 2015
- [Gui_1] Guile A E, Arc electrode phenomena, *IEEE review*, 1971
- [Hem_1] Hemmi R, Yokomizu Y & Matsumura T, Anode-fall and cathode-fall of air arcs in atmosphere between silver electrodes, *J. Phys. D: Appl. Phys*, 2003
- [Hem_2] Hemmi R, Yokomizu Y & Matsumura T, Anode-fall and cathode-fall of air arcs in atmosphere between electrodes of copper, silver and tungsten at currents up to 1500 A, *IEEE*, 2004
- [Itu_1] Iturregi A, Barbu B, Torres E, Berger F & Zamora I, Electric arc in low voltage circuit breakers: experiments and simulation, *IEEE*, 2017
- [Itu_2] Iturregi A, Modelization and analysis of the electric arc in low voltage circuit breakers, Thèse de l'Université Del Pais Vasco, 2013
- [Lag_1] Lago F, Modélisation de l'interaction entre un arc électrique et une surface : application au foudroiement d'un aéronef, Thèse de l'Université Paul Sabatier, 2004
- [Lin_1] Lindmayer M, Marzahn E, Mutzke A, Ruther T & Springstubbe M, The process of arc splitting between metal plates in low voltage arc chutes, *IEEE*, 2006
- [Lin_2] Lindmayer M, The influence of contact materials and chamber wall materials on the migration and the splitting of the arc extinction chambers. *IEEE*, 1973
- [Li_1] Li X, Chen D & Wang Q, Simulation of the effects of several factors on arc plasma behavior in low voltage circuit breaker, *Plasma Sci. and Technology*, 2005
- [Li_2] Li X, Chen D, Dai R & Geng Y, Study of the influence of arc ignition position on arc motion in low voltage circuit breaker, *IEEE*, 2007

- [Low_1] Lowke J J & Tanaka M, LTE-diffusion approximation for arc calculations, J. Phys. D: Appl. Phys, 2006
- [Ma_1] Ma Q, Rong M, Murphy A B, Wu Y & Xu T, Simulation study of the influence of wall ablation on arc behavior in a low voltage circuit breaker, IEEE, 2009
- [Mar_1] Martin J, Etude et caractérisation d'onde de pression générée par une décharge électrique dans l'eau. Application à la fracturation électrique de roches, Thèse de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2013
- [McB_1] McBride J W & Cross K J, Cathode root motion studies of high current arcs using an optical fiber array based imaging system, IEEE, 2010
- [McB_2] McBride J W & Jeffery P A, Anode and cathode arc root movement during contact opening at high current, IEEE, 1999
- [McB_3] McBride J W & Pechrach K, Arc root commutation from moving contacts in low voltage devices, IEEE 2000
- [McB_4] McBride J W & Weaver P M, Review of arcing phenomena in low voltage current limiting circuit breaker, IEEE, 2001
- [McB_5] McBride J W, Pechrach K & Weaver P M, Arc motion and gas flow in current limiting circuit breakers operation with a low contact switching velocity, IEEE, 2002
- [McB_6] McBride J W, Weaver P M & Siew C C, Integrated measurement system for high-speed unsteady plasma flow and its application to electric arcs, IEEE, 2003
- [McB_7] McBride J W, Weaver P M & Jeffery P A, Arc root mobility during contact opening at high current, IEEE, 1998
- [McB_8] McBride J W, Balestrero A, Ghezzi L, Tribulato G & Cross K J, Optical fiber imaging for high-speed plasma motion diagnostics: Applied to low voltage circuit breakers, Review of Scientific Instruments, 2010
- [McB_9] McBride J W, Shin D & Bull T, A study of the motion of high current arcs in splitter plates using an arc imaging system, 28th International Conference on Electric Contacts (ICEC), United Kingdom, 2006
- [Mut_1] Mutzke A, Ruther T, Kurrat M, Lindmayer M & Wilkening E D, Modeling the arc splitting process in low-voltage arc chutes, IEEE, 2007

- [Mut_2] Mutzke A, Ruther T, Lindmayer M & Kurrat M, Arc behavior in low-voltage arc chamber, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2010
- [Pec_1] Pechrrach K, McBride J W & Weaver P M, Analysis of arc root mobility in low contact opening velocity circuit breaker, *Proc. 21st Int. Conf. on Electrical Contacts*, 2002
- [PXI_1] Acquisition de données de la série X NI PXIe-6361, sine.ni.com/nips/cds/view/p/nid/201416
- [Qué_1] Quéméneur J, Etude des forces à l'origine du déplacement d'un arc électrique dans un disjoncteur basse tension, Thèse de l'Université Paul Sabatier, 2016
- [Qué_2] Quéméneur J, Lu J, Gonzalez J-J & Freton P, Arc motion in low voltage circuit breaker (LVCB) experimental and theoretical approaches, *Science and Technology*, 2018
- [Rei_1] Reichert F, Gonzalez J-J & Freton P, Modelling and simulation of radiative energy transfer in high voltage circuit breakers, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2012
- [Ron_1] Rong M, Wu Y, Yang Q, Hu G, Jia S & Wang J, Simulation on arc movement under effects of quenching chamber configuration and magnetic field for low voltage circuit breaker, *IEICE Trans. Electron.*, 2005
- [Ron_2] Rong M, Yang F, Wu Y, Murphy A B, Wang W & Guo J, Simulation of arc characteristics in miniature circuit breaker, *IEEE*, 2010
- [Ron_3] Rong M, Wu Y, Yang F, Niu C & Ma R, Numerical research on switching arc of circuit breaker, *1st International Conference on electric Power Equipment – Switching Technology*, Xi'an, China, 2011
- [Sch_1] Schueller P, Coupure en BT par limitation du courant, *Cahier technique de Schneider*, 1998
- [Shi_1] Shin D, Golosnoy I O, Bull T G & McBride J W, Experimental study on the influence of vent aperture size and distribution on arc motion and interruption in low voltage switching devices, *IEEE, 4th International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology*, Xi'an, China, 2017
- [Sun_1] Sun Z, Rong M, Yang F, Wu Y, Ma Q & Wang X, Numerical modeling of arc splitting process with ferromagnetic plate, *IEEE*, 2008

- [Swi_1] Swiercznski B, Gonzalez J-J, Teulet P, Freton P & Gleizes A, Advances in low-voltage circuit breaker modelling, *J. Phys. D: Appl. Phys*, 2004
- [Tes_1] Testé P, Leblanc T, Uhlig F & Chabrierie J-P, 3D modelling of the heating of a metal sheet by a moving arc: application to aircraft lightning protection, *Eur. Phys. J. Ap.*, 2000
- [Tou_1] Toumazet J P, Brdys C, Cajal D, Gary F, Laurent A & Arnoux C, Arc commutation in low voltage circuit breakers: influence of the electrical contact materials, *IEEE*, 2008
- [Vac_1] Vacquié S, *L'arc électrique*, édition CNRS, 2000
- [Wea_1] Weaver P M & McBride J W, Magnetic and gas dynamic effects on arc motion in miniature circuit breakers, *IEEE*, 1994
- [Wu_1] Wu Y, Rong M, Yang Q & Hu G, Numerical analysis of the arc plasma in a simplified low voltage air circuit breaker chamber with ferromagnetic materials, *Plasma Sci. & Technology*, 2005
- [Wu_2] Wu Y, Rong M, Sun Z, Wang X, Yang F & Li X, Numerical analysis of arc plasma behaviour during contact opening process in low voltage switching device. *J. Phys. D: Appl. Phys*, 2007
- [Wu_3] Wu Y, Rong M, Sun Z, Wang X, Li J & Wang J, Simulation of low voltage arc plasma during contact opening, *Plasma Sci. & Technology*, 2007
- [Wu_4] Wu Y, Rong M, Yang F, Murphy A B, Ma Q, Sun Z & Wang X, Numerical modelling of arc root transfer during contact opening in a low voltage air circuit breaker, *IEEE*, 2008
- [Wu_5] Wu Y, Rong M, Li X, Murphy A B, Wang X, Yang F & Sun Z, Numerical analysis of the effect of the chamber width and outlet area on the motion of an air arc plasma, *IEEE*, 2008
- [Yan_1] Yang F, Rong M, Wu Y, Murphy A B, Pei J, Wang L, Liu Z & Liu Y, Numerical analysis of the influence of splitter-plate erosion on an air arc in the quenching chamber of a low-voltage circuit breaker, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2010
- [Yan_2] Yang Q, Rong M, Murphy A B & Wu Y, The influence of medium on low voltage circuit breaker, *Plasma Sci. & Technology*, 2006
- [Yan_3] Yang F, Rong M, Wu Y, Murphy A B, Chen S, Liu Z & Shi Q, Numerical analysis of arc characteristics of splitting process considering ferromagnetic plate in low voltage arc chamber, *IEEE*, 2010

[Yan_4] Yang F, Ma Q, Wu Y & Sun Z, Numerical study on arc plasma behavior during arc commutation process in direct current circuit breaker, *Plasma Sci. & Technology*, 2012

[Yan_5] Yang F, Rong M, Wu Y, Sun H, Murphy A B, Ren Z & Niu C, Low voltage circuit breaker arcs—simulation and measurements, *IEEE review*, 2013

[Yin_1] Yin J, Wang Q, Li X & Xu H, Numerical study of influence of frequency and eddy currents on arc motion in low-voltage circuit breaker, *IEEE*, 2018

[Yin_2] Yin J, Wang Q & Li X, Simulation analysis of arc evolution process in multiple parallel contact systems, *IEEE*, 2018

[Zho_1] Zhou X & Heberlein J, Analysis of the arc-cathode interaction of free-burning arcs, *Plasma Sci. & Technology*, 1994

Caractérisation du comportement du plasma dans un disjoncteur basse tension par le développement d'un outil numérique et d'expériences associées

Les processus liés à la segmentation de l'arc et à la quantification des chutes de tension additionnelles sont les phénomènes prépondérants à la compréhension et à l'optimisation des Disjoncteurs Basse Tension (DBT). Le but de nos travaux est d'appréhender leurs comportements par l'expérience et leurs représentations par l'outil numérique.

Pour cela une modélisation magnétohydrodynamique tridimensionnelle (3D) est réalisée sur une géométrie simplifiée de DBT. Les développements sont basés sur le code commercial Ansys @Fluent agrémenté d'UDF (User Define Functions). Afin d'étudier et d'isoler les mécanismes, les travaux expérimentaux et numériques sont réalisés sur une maquette simplifiée constituée de deux électrodes en parallèle et de la présence optionnelle de séparateurs. Numériquement la tension additionnelle, provenant de la présence des gaines aux interfaces plasma/matériau, est prise en compte par une méthode approchée basée sur la caractéristique théorique d'une variation de la tension en fonction de la densité de courant. Cette résistivité additionnelle permet une représentation du passage du courant vers les matériaux et du retard à la commutation sur le séparateur en fonction de la chute de tension. Les travaux ont été menés entre deux rails en utilisant un et deux séparateurs. Côté expérimental, le comportement de l'arc est caractérisé par des mesures électriques (Tension, courant) et par des acquisitions de la caméra rapide. L'amorçage de l'arc est initié par un fil fusible en cuivre de 0.1 mm. La géométrie étudiée peut être plus ou moins fermée à ses extrémités afin de mettre en évidence les effets des forces de pression et/ou des forces de Lorentz. Une bonne analogie de la description du comportement de l'arc est retrouvée entre les résultats du modèle et les résultats expérimentaux. Cependant les conditions initiales du modèle s'avèrent prépondérantes et dans les mêmes temps délicats à déterminer.

Mots-clés

Disjoncteur basse tension, arc électrique, segmentation, chute de tension, modélisation, expérience

Characterization of the plasma behavior in a low voltage circuit breaker through the development of a digital tool and associated experiments

The arc splitting process and the quantification of additional voltage drops are the major phenomena to understand and to optimize the Low Voltage Circuit Breaker (LVCB). The aim of our work is to understand their behavior through experiments and then their representation by our model.

Therefore, a three-dimensional (3D) magnetohydrodynamic modeling is carried out on a simplified LVCB geometry. The developments are based on the commercial code Ansys @Fluent with UDF (User Define Functions). The plasma is described by fluid equations and a finite volume method. To study and isolate the mechanisms, the experimental and numerical work were realized on a simplified geometry, composed by two parallel electrodes with or without splitter plates. Numerically, the additional voltage resulting from the sheaths at the plasma/material interfaces, is considered by an approximate method based on the theoretical characteristic of voltage variation, as the function of current density. This additional resistivity allows to present the current flow in the materials and create some delay at the switching during the splitting process. Further to the experiments, the arc behavior is characterized by electrical measurements (Voltage, current) and by high-speed camera. The arc ignition is realized by a copper fuse of 0.1 mm. The geometry can be more or less closed at its both extremities in order to highlight the effects of pressure force and/or Lorentz force. The description of arc behavior was found similar between the simulation and experiments results. However, the initial conditions of our model proved to be preponderate while at the same time, the conditions remained delicate to determine.

Keywords

Low voltage circuit breaker, electric arc, arc splitting, voltage drop, simulation, experiment