



HAL
open science

Contribution à l'étude des arcs électriques sur réseau HVDC (540 VDC) en conditions aéronautiques

Mohamed Boukhelifa

► **To cite this version:**

Mohamed Boukhelifa. Contribution à l'étude des arcs électriques sur réseau HVDC (540 VDC) en conditions aéronautiques. Energie électrique. Université Paris-Saclay, 2021. Français. NNT : 2021UP-AST013 . tel-03261937

HAL Id: tel-03261937

<https://theses.hal.science/tel-03261937>

Submitted on 16 Jun 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.

Contribution à l'étude des arcs électriques sur réseau HVDC (540 VDC) en conditions aéronautiques

Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay

École doctorale n° 575 : electrical, optical, bio : physics and engineering (EOBE)

Spécialité de doctorat : Génie électrique

Unité de recherche : Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, Laboratoire de
Génie Electrique et Electronique de Paris, 91192, Gif-sur-Yvette, France

Référent : Faculté des sciences d'Orsay

**Thèse présentée et soutenue à Gif-sur-Yvette, le 28
janvier 2021, par**

Mohamed BOUKHLIFA

Composition du Jury

Philippe DESSANTE

Professeur, CentraleSupélec

Président du jury

Jean-Marc BAUCHIRE

Professeur des Universités, Université d'Orléans (GREMI)

Rapporteur & Examineur

Philippe TEULET

Professeur des Universités, Université de Toulouse (LAPLACE)

Rapporteur & Examineur

Thierry LEBEY

Expert scientifique, Safran Helicopter Engines

Examineur

Vincent RAT

Directeur de Recherche, CNRS (Limoges)

Examineur

Philippe TESTÉ

Chargé de Recherche - HDR, CNRS

Directeur de thèse

Romarc LANDFRIED

Enseignant- chercheur, Centralesupelec

Co-encadrant de thèse

Thomas KLONOWSKI

Expert scientifique, Safran Helicopter Engines

Invité

Remerciement

Tout d'abord, je voudrais remercier Monsieur Claude MARCHAND, directeur du Laboratoire de Génie Électrique et Électronique de Paris (GeePs) de m'avoir accueilli au sein du laboratoire et permis de travailler dans les meilleures conditions.

Je tiens à remercier Messieurs Jean-Marc BAUCHIRE et Philippe TEULET pour avoir accepté d'être rapporteurs de mon travail. Je vous remercie pour le temps que vous avez passé sur ce manuscrit et aussi pour les commentaires, les remarques constructives que vous avez portées à l'amélioration de celui-ci. Un grand merci à Monsieur Philippe DESSANTE qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Je remercie également Messieurs Thierry LEBEY et Vincent RAT d'avoir accepté d'examiner mon manuscrit ainsi que pour leurs questions et leurs remarques lors de ma soutenance.

Je tiens à remercier aussi Monsieur Thomas KLONOWSKI d'avoir participé au jury en tant qu'invité.

J'aimerais exprimer ma profonde reconnaissance envers Monsieur Philippe TESTÉ, mon directeur de thèse, sans lui cette thèse n'aurait pas eu lieu. Je le remercie de m'avoir fait confiance, de m'avoir transmis son enthousiasme et ses connaissances sur les arcs électriques, également pour son accueil, son encadrement, ses conseils, ses encouragements et surtout pour le soutien qu'il m'a apporté depuis le premier jour au laboratoire et qu'il m'apporte encore aujourd'hui tant du point de vue personnel que professionnel.

Avec tous mes sentiments je remercie mon co-directeur de thèse, Monsieur Romaric LANDFRIED qui m'a toujours été d'une aide précieuse. Ses idées et ses solutions intéressantes ont apporté des améliorations importantes pour mon travail de thèse. Merci Romaric pour ton état d'esprit, ta disponibilité et ta gentillesse.

Je tiens à remercier infiniment Monsieur Thierry LEBLANC pour sa grande implication durant l'intégralité de mon projet de thèse et avec lequel j'avais la chance de partager le bureau. Mes

remerciements vont également à Madame Aurore BRÉZARD OUDOT pour son soutien technique et moral. Je tiens à remercier Monsieur Richard ANDLAUER pour son aide technique précieuse sur les manip et ses conseils très utiles, je remercie également Monsieur Michel POLICE pour son aide sur les parties mécaniques des manip.

Je remercie tous les collègues du GeePs : Léonor, Séverine, Sylvie, Nathalie, Christine, Olivier, Anthony, Laurent, Frédéric, Abelin, Pascal, Sophie, Florent, Emmanuel, Adrien, ... Je les remercie également pour les moments conviviaux passés ensemble lors des pauses cafés au point K.

Je remercie chaleureusement mes amis et mon entourage, qui m'ont accompagné et soutenu durant toutes ces années, particulièrement Mokran, Alaidine, Krarim, Madjda, Redouane, Loucif, Aicha, Meriem, Fethi, Hakim, Tahar, Aderraouf, Selmane, Youghourta, Chakibe, Abderrahmane, Abderrahim, Kamal, Asma, Said, Amar, Neïla, Nour, Belkacemi, Aurélien, Cyril, Tanbir, Vincent...

Enfin un merci particulier à ma grande famille pour m'avoir soutenu tout au long de ces années d'études en France et d'avoir fait de moi celui que je suis aujourd'hui.

Table des matières

Remerciement.....	iii
Table des matières.....	v
Introduction générale.....	11
Chapitre 1 : Description de la plateforme expérimentale mise en œuvre en vue des études consacrées à l'arc en régime DC en conditions de pression sub-atmosphérique dans la gamme [100 hPa - 1000 hPa]	17
Introduction.....	19
1.1 Les alimentations électriques.....	19
1.2 L'enceinte à vide, le système de pompage, les jauges de pression.	20
1.3 Les charges	22
1.4 Les mesures et le dispositif d'imagerie.....	23
1.1 Le contrôle des essais	24
Chapitre 2 : Contribution à l'étude expérimentale du déplacement de l'arc électrique sous l'effet de son propre champ pour des pressions dans la gamme [1 hPa – 1000 hPa]	27
2.1 Introduction :	29
2.2 Rappel bibliographique :	29
2.2.1 Introduction.....	29
2.2.2 Généralités concernant la structure de l'arc en mouvement et les modes de déplacement observés.....	31
2.2.3 Conclusion partielle.....	43
2.3 Description du dispositif et de la procédure expérimentale	44
2.3.1 Description du dispositif.	44
2.3.2 Description de la procédure expérimentale.....	45
2.4 Résultats et discussion :	46
2.4.1 Évolution du mode de déplacement et de la structure de l'arc en fonction de la pression pour une valeur de $I_{arc} \approx 50A$	46
2.4.1.1 Observation du mouvement de l'arc pour $I_{arc} \approx 50 A$ à pression atmosphérique. 46	
2.4.1.2 Observation du déplacement de l'arc : $I \approx 50 A$, $d = 15 \text{ mm}$ et P dans la plage [150 - 1000] hPa.....	48
2.4.1.3 Observation du déplacement de l'arc : $I \approx 50 A$, $d = 15 \text{ mm}$ et P dans la plage [150 \approx 100] hPa	49
2.4.1.4 Observation du déplacement de l'arc : $I \approx 50 A$, $d = 15 \text{ mm}$ et P dans la plage [10-100] hPa.	53

2.4.1.5	Observation du déplacement de l'arc : $I \approx 50$ A, $d = 15$ mm et P dans la gamme [1-10] hPa.....	55
2.4.2	Synthèse qualitative sur le type de déplacement observé et la structure et le comportement des pieds d'arcs pour diverses conditions de courant d'arc et de distance inter-électrodes en fonction de la pression.....	60
2.4.2.1	Synthèse concernant le mode déplacement du pied anodique et cathodique de l'arc.	60
2.4.2.2	Synthèse concernant la structure des pieds anodiques et cathodiques et le sens de déplacement de l'arc.....	61
2.4.3	Estimation du champ électrique dans la colonne d'arc	64
2.4.4	Influence de la pression, de l'intensité du courant d'arc et de la distance inter-électrodes sur la vitesse de déplacement de l'arc.	66
2.4.5	Évolution des caractéristiques électriques moyennes de l'arc en fonction de différents paramètres : pression, distance inter-électrodes et intensité du courant.	70
2.5	Conclusions	73
Chapitre 3 : Stabilité, extension spatiale et extinction d'un arc électrique en conditions de pressions aéronautiques sous une tension de 540 VDC		
		75
3.1	Introduction	77
3.2	Quelques points de discussion concernant l'arc électrique sous tension continue.	78
3.3	Description du dispositif expérimental.....	87
3.3.1	Protocole expérimental.....	88
3.3.2	Équipements électriques.....	88
3.3.3	Dispositif mécanique.....	89
3.3.4	Mesures et observations	89
3.4	Résultats.....	90
3.4.1	Observation du comportement des arcs électriques et exemples d'enregistrement..	90
3.4.2	Estimation de la longueur de stabilité de l'arc.....	94
3.4.3	Durée et distance inter-électrodes à l'extinction de l'arc en fonction de la pression	95
3.4.3.1	Observations et commentaires.....	97
3.4.4	Énergie dissipée dans l'arc en fonction de la pression	98
3.5	Caractérisation d'un contacteur HVDC en environnement dépressurisé	101
3.5.1	Introduction	101
3.5.2	Description de l'appareil et rappel concernant les principes de la coupure DC	101
3.5.3	Description des conditions d'essai	103
3.5.4	Résultats	104
3.5.4.1	Évolution de l'intensité du courant de l'arc et de la tension aux bornes du contacteur	105

3.5.4.2	Influence de la charge inductive à la pression atmosphérique et à 200 hPa sur la durée de coupure et de l'énergie dissipée dans le contacteur	105
3.5.4.3	Influence de la pression sur la capacité de coupure du contacteur pour $I = 300 \text{ A}$	109
3.6	Conclusions	111
Chapitre 4 : Caractérisation paramétrique de l'arc : influence de l'intensité, de la distance inter-électrodes et de la pression..... 113		
4.1	Introduction	115
4.2	Rappel bibliographique.....	115
4.2.1	Introduction	115
4.2.2	Présentation « détaillée » de quelques travaux concernant la relation courant/tension dans le cas d'un arc électrique.....	117
4.2.2.1	Travaux d'Ayrton , Eather et Baker	117
4.2.2.2	Travaux de Steinmetz	120
4.2.2.3	Travaux de Nottingham	121
4.2.2.4	Travaux de Stokes et al. ³⁷	125
4.2.2.5	Travaux de Paukert.....	130
4.2.2.6	Travaux de Rieder	132
4.2.2.7	Travaux de Mossop et al.....	133
4.2.2.8	Synthèse et autres travaux	140
4.2.3	Conclusion partielle concernant la bibliographie et définition des objectifs poursuivis lors de ce chapitre :.....	143
4.3	Description du dispositif expérimental et de la démarche :.....	143
4.4	Quelques exemples de résultats « bruts » et mise en évidence des difficultés	147
4.5	Choix et limites de la méthode :	148
4.6	Présentation des résultats concernant les valeurs de V_0 et du champ électrique dans la colonne d'arc	152
4.6.1	Valeur de $V_A + V_C$	152
4.6.1.1	Dépouillement sans contrainte sur la valeur de $V_A + V_C$	152
4.6.1.2	Dépouillement avec contrainte sur V_0	153
4.6.2	Calculs des champs électriques moyens dans la colonne d'arc	154
4.6.2.1	$P = 100 \text{ hPa}$	154
4.6.2.2	$P = 1000 \text{ hPa}$	154
4.6.2.3	Synthèse : influence de la pression.....	155

4.6.2.4	Influence du mode de dépouillement sur les valeurs prises par le champ électrique	156
4.6.2.5	Influence de la pression sur le champ électrique dans la colonne.	158
4.6.2.6	Proposition d'une expression « générale »	158
4.7	Conclusions	161
4.8	Annexe au chapitre	162
Chapitre 5 : Contribution à l'étude des défauts d'arcs – évolution du défaut d'arc : des phénomènes précurseurs de l'arc jusqu'à son extinction (ou non) dans le cas de l' « arc tracking » humide au sein d'un faisceau de câbles		
		167
5.1	Introduction	169
5.2	Rappels : les défauts d'arc, quelques travaux sur le sujet, les dispositifs utilisés usuellement et les normes en régime AC.	173
5.2.1	Les différents défauts et leurs caractéristiques.....	173
5.2.2	Rappel bibliographique sur quelques travaux menés en AC et DC	174
5.2.2.1	Quelques mots concernant les travaux de König et al. ⁹⁷	175
5.2.2.2	Quelques mots concernant les travaux de H. El Bayda ³⁵ et de T. André	176
5.2.3	Dispositif typique utilisé lors des études d'arc tracking	177
5.2.4	Les normes de test d'arc tracking humide [prEN 3475-603] [prEN 3475-605] ...	180
5.3	Objectifs de notre étude et description de la démarche :	183
5.4	Description du banc expérimental mis en œuvre.....	186
5.5	Résultats.....	193
5.5.1	Présentation des différentes phases observées lors de l'évolution de l'arc tracking humide	193
5.5.1.1	Phase dite de « Grésillement »	193
5.5.1.2	Phase dite «d'arc ».....	211
5.5.1.3	Phase de point chaud et départ de feu.....	215
5.5.1.4	Phase finale de court-circuit ou de circuit ouvert	217
5.5.2	Présentation de quelques exemples permettant d'illustrer diverses chronologies possibles des évènements.	220
5.5.3	Impact des conditions d'essais sur l'évolution du défaut.....	227
5.5.3.1	Présentation de l'ensemble des essais réalisés en vue d'une synthèse	227
5.5.3.2	Influence de la tension d'alimentation.....	230
5.5.3.3	Influence de la nature de la charge (résistive /inductive)	231
5.5.3.4	Influence de la polarité du câble central	232
5.5.3.5	Influence de la nature du liquide de contamination.....	232

5.6	Conclusions	235
	Conclusion générale	239
	Perspectives.....	243
	Référence.....	245

Introduction générale

Début 2020 on assistait encore à une forte croissance du trafic aérien (qui représentait déjà des dizaines de milliers de vols par jour). Pour soutenir cette croissance, la politique des avionneurs s'oriente depuis quelques années sur la réduction de masse afin d'une part d'augmenter le nombre de passagers transportés (augmentant ainsi la rentabilité) et d'autre part de répondre aux exigences environnementales de la communauté internationale. Pour ce faire, le choix d'une proportion plus grande de l'énergie électrique embarquée a été fait (on parle d'avion « plus électrique »). Au sein d'un tel avion, l'emploi d'énergie de type hydraulique et pneumatique sera remplacé par l'usage de l'énergie électrique. Cela permettra une meilleure optimisation de la consommation, une maintenance facilitée et une plus grande souplesse d'utilisation, en plus du gain de masse. Cette augmentation de l'énergie électrique embarquée nécessite de repenser les réseaux électriques au sein des aéronefs et ainsi de recourir à une puissance électrique plus importante. À titre d'exemple, on peut rappeler que la puissance embarquée est passée en moins de vingt ans de 350 kVA (dans le cas d'un « A330 ») à 1000 kVA (dans le cas d'un « A350 »). Cette démarche a donc imposé un changement des tensions des réseaux embarqués. Ainsi est-il envisagé, à minima, d'avoir à bord des tensions de l'ordre de 540 VDC et 230 VAC (entre 360 et 1000 Hz). Pour mémoire, dans la grande majorité des avions, les tensions de réseaux embarqués sont 28 VDC et 115 VAC, 400 Hz. Dans l'objectif d'une propulsion électrique, une valeur allant jusqu'à 3000 V est même envisagée.

Les nouvelles propriétés et valeurs des tensions embarquées si elles vont bien évidemment contribuer à faciliter une plus grande électrification de l'avion, elles ont en revanche fait apparaître de nouvelles problématiques techniques et vont nécessiter la révision d'un bon nombre de composants dans les aéronefs. Un premier enjeu concerne la nécessité de disposer de systèmes de commutation ou de coupure (contacteurs, disjoncteur...) susceptibles d'une part de travailler sous des tensions continues élevées et d'autre part pour certains de ces composants de travailler dans des conditions de pressions « aéronautiques » (de 100 hPa à 1000 hPa).

Le second point concerne les potentiels défauts liés à l'apparition d'arcs électriques. Avec ces nouvelles conditions les problèmes liés à l'apparition des défauts d'arc dans le réseau embarqué revêtent un aspect crucial. En effet, les pannes dans les réseaux électriques peuvent générer des arcs électriques pouvant atteindre des intensités de courant élevées. Leurs durées et leurs extensions spatiales sont limitées soit par des dispositifs de protection, soit par l'extinction naturelle de l'arc. Cependant, la durée de vie d'un défaut d'arc, la propagation d'un tel défaut (phénomène habituellement dénommé « arc tracking ») et par conséquent les dommages matériels causés dans l'environnement proche peuvent être importants. Ils peuvent entraîner une perte de fonctionnalité, endommager le système, se propager (le long d'un faisceau de câbles ou au sein d'un calculateur par exemple) et même provoquer un incendie en quelques secondes (plus de 60% de risque de départ d'incendie pour un arc qui dure 4s sous 120 - 240 VAC). Ce problème, commun à de nombreux réseaux électriques lorsque les tensions d'alimentation dépassent quelques dizaines de volts, représente un aspect critique en termes de conséquences dans le domaine de l'avionique. Les causes de ces défauts sont multiples. Il peut s'agir de coupures de câbles, de problèmes mécaniques tels qu'un contact inopiné entre deux pièces conductrices, l'apparition de décharges partielles

susceptibles de transiter spontanément vers des arcs électriques, de courant de fuite dans un circuit imprimé pouvant conduire au fil du temps à l'apparition progressive d'un échauffement important et induire un arc électrique. Par ailleurs, avec les nouvelles tensions embarquées, non seulement l'amorçage d'un arc sera plus aisé, mais son maintien sera facilité, augmentant aussi la durée pendant laquelle il se propagera et endommagera le système. Si de nombreux travaux sont menés depuis plusieurs années dans le domaine du dimensionnement des dispositifs électriques et du vieillissement des câbles (étude des décharges partielles en milieu aéronautique par exemple...) avec pour objectifs d'éviter l'apparition du défaut, ce dernier semble inévitable.

Aussi, apparaît-il indispensable de mener des travaux en vue de caractériser les phénomènes d'arcs électriques en régime DC en condition aéronautique. Ceci est un enjeu particulièrement important non seulement dans l'optique de contribuer au dimensionnement de futurs appareils de coupure par exemple, mais aussi en vue de contribuer à la maîtrise et détection des défauts d'arcs qui risquent d'apparaître.

Le travail de thèse présenté dans ce manuscrit s'inscrit dans le cadre de cette problématique. Le financement de cette thèse par une bourse ministérielle nous a permis de disposer d'une grande liberté dans les orientations choisies. Ainsi plusieurs thèmes ont été abordés. Ces différents axes ne sont pas tous intimement intriqués et certains chapitres peuvent être lus indépendamment les uns des autres. Cependant tous s'inscrivent dans le domaine des arcs électriques (au sens très large) en régime DC en condition de pression aéronautique.

Ce manuscrit présentant les résultats obtenus au cours de la thèse est structuré en 5 chapitres. Les travaux entrepris sont principalement à caractère expérimental. Ils se sont donc appuyés sur une « plateforme » permettant la réalisation d'arc dans des conditions de pression sub-atmosphérique en régime DC avec des alimentations permettant d'alimenter l'arc sous des tensions allant jusqu'à 540 VDC et des intensités de courant d'arc pouvant atteindre 300 A. Cette plateforme commune aux trois types de travaux entrepris est décrite dans le chapitre 1 permettant ainsi de ne pas répéter à chaque chapitre une description complète des montages mis en œuvre. Nous avons par ailleurs pris le parti de ne pas présenter un « gros » chapitre bibliographique (souvent rébarbatif) en début de manuscrit mais de proposer une bibliographie ciblée sur les différents thèmes abordés en début de chaque chapitre.

Nous avons entrepris des travaux dans trois directions :

- i) La caractérisation du déplacement de l'arc à pression sub-atmosphérique.
- ii) La caractérisation d'un arc libre toujours à pression sub-atmosphérique.
- iii) L'étude des phénomènes précurseurs du défaut d'arc dans le cas de l'amorçage d'un défaut d'arc par voie humide au sein d'un faisceau de câbles aéronautiques.

Les points i) et ii) sont « voisins » puisqu'ils concernent tous les deux directement la caractérisation d'arcs électriques en régime DC. Le dernier point devait, à l'origine concerner la

propagation d'un défaut d'arc. Cependant les premières études menées ayant fait apparaître des phénomènes nous paraissant intéressants dans la mesure où ils contribuaient fortement à l'endommagement du faisceau de câbles, nous avons accordé à l'étude de ces événements précurseurs un temps important. Pour finir dans cette présentation générale de la démarche adoptée, il faut souligner que les conditions particulières liées à la situation sanitaire ont hélas causé quelques désagréments dans le déroulement de la dernière année, particulièrement dans le contexte d'une thèse expérimentale. Ceci a eu par exemple pour conséquence de parfois rendre difficile la réalisation des expériences complémentaires dont la nécessité apparaît bien souvent au cours des derniers mois lors de la rédaction du manuscrit.

Les chapitres 2 à 5 sont organisés de la façon suivante :

Le chapitre 2 concerne l'étude du déplacement de l'arc électrique entre deux barres parallèles sous l'action de son propre champ. Il s'agit d'une étude principalement « amont » du fait des intensités de courant d'arc mises en jeu (de 10 à 300A). Ces travaux avaient pour but d'étudier l'influence de la pression sur d'une part le mode de déplacement de l'arc, c'est-à-dire à la fois la structure de l'arc et la façon dont celui-ci se déplace et d'autre part sur les caractéristiques électriques de l'arc en mouvement. Après un rappel bibliographique mettant en évidence non seulement la richesse des travaux déjà présentés mais aussi la « diversité » des résultats obtenus, nous avons étudié l'influence de trois paramètres sur le mode de déplacement de l'arc. Ces paramètres sont la pression, l'intensité du courant d'arc que nous avons essayé de garder la plus constante possible au cours de l'essai, et de la distance inter-électrodes (deux barres de cuivre ofhc parallèles). Une synthèse qualitative des modes de déplacements observés en cinématographie rapide en fonction des conditions expérimentales est proposée. Dans un second temps, une étude se voulant plus quantitative est présentée concernant la vitesse de déplacement de l'arc ainsi que les caractéristiques électriques de celui-ci. Pour finir, au cours de ces travaux, nous nous sommes écartés de la gamme de pression que nous appelons « aéronautique » et avons poursuivi les essais pour des pressions plus basses permettant ainsi d'observer le mouvement « rétrograde » de l'arc.

Le chapitre 3 et le chapitre 4 concernent la caractérisation d'un arc libre (« free burning arc ») pour les pressions dans la gamme [100 hPa – 1000 hPa] et des intensités dans la gamme [10 A – 100 A]. Dans les deux cas le mode d'amorçage de l'arc se fait par ouverture d'un contact constitué de deux électrodes en cuivre. Nous avons divisé ces chapitres en deux parties afin d'en rendre la lecture plus « légère ». Ainsi le chapitre 3 est plus directement lié à la coupure de l'arc. Nous nous sommes intéressés à étudier l'influence de la pression sur différentes caractéristiques de l'arc telles que sa stabilité, la distance inter-électrodes pour laquelle il s'éteint naturellement, l'énergie dissipée au sein de l'arc... L'influence de divers paramètres tels que la pression, le courant d'arc, la vitesse d'ouverture du contact a été étudiée sur ces propriétés. Dans le chapitre 4, l'objectif poursuivi est de proposer une caractérisation électrique de l'arc en fonction des paramètres cités avant. L'étude bibliographique préliminaire a montré l'intérêt d'approfondir les travaux déjà mené hors des gammes de courant et de distance inter-électrodes habituellement

étudiées. C'est pourquoi nous nous sommes intéressés au cas des fortes distances inter-électrodes (supérieures à 10 mm) et aux intensités de courant là aussi supérieures à 10 A ainsi qu'aux pressions allant de 100 hPa à 1000 hPa. La méthode utilisée ainsi que ses limitations sont décrites puis exploitées en vue d'obtenir le champ électrique dans la colonne en fonction des différents paramètres de l'étude. Enfin une expression générale de la tension d'arc en fonction de l'intensité du courant, de la distance inter-électrodes et de la pression est proposée. Bien conscient qu'il ne peut s'agir d'une expression très précise, nous avons aussi tenté d'en donner les limites.

L'objectif à long terme de l'étude présentée dans le chapitre 5 est lié à la détection et à la propagation d'un défaut d'arc au sein d'un faisceau constitué de 7 câbles. Nous nous sommes inspirés de la norme valable en régime AC pour proposer une configuration géométrique et une méthodologie que nous avons appliquée au régime DC. Un système répondant aux exigences des normes en usage en AC a été mis en œuvre. Nous avons opté pour un amorçage du défaut selon une voie humide à l'aide d'un goutte-à-goutte d'eau salée. Les premiers essais ayant mis en évidence tout un ensemble de phénomènes précurseurs de l'apparition de l'arc ayant causé des dommages importants au faisceau de câbles, nous nous sommes penchés au cours de cette étude sur la description et la chronologie de ces différents phénomènes.

Le manuscrit bien sûr se termine par une conclusion. Du fait de la variété et de la richesse des domaines abordés d'une part et d'autre part pour les raisons évoquées précédemment propres à la situation sanitaire, de nombreux points n'ont pas pu être abordés et de nombreuses pistes de travail demeurent. Ceci est évoqué dans la partie perspective de ce manuscrit.

Chapitre 1 :
Description de la plateforme expérimentale mise en
œuvre en vue des études consacrées à l'arc en régime
DC en conditions de pression sub-atmosphérique
dans la gamme [100 hPa - 1000 hPa]

Introduction

Ce court chapitre est consacré à la description de la plateforme expérimentale mise en œuvre pour les diverses études que nous avons menées et qui concernent les propriétés d'un arc en régime DC, dans l'air, dans une gamme de pression allant de 1 hPa à 1000 hPa (bien conscient que la pression atmosphérique est égale à 1013 hPa, vu que nous descendons suffisamment en pression, une pression de 1000 hPa est considérée par approximation et abus de langage comme pression atmosphérique). Si les configurations expérimentales (géométries des électrodes, méthode pour amorcer l'arc par exemple...) varieront au cours des chapitres, une grande partie du dispositif restera le même, à savoir l'alimentation électrique, les charges, l'enceinte à vide... Ce chapitre a donc pour objectif de décrire les éléments « immuables » utilisés dans nos expériences. Les parties plus spécifiques propres à chaque type d'étude seront quant à elles décrites dans le chapitre dédié.

1.1 Les alimentations électriques

Nous avons au cours de nos travaux utilisé deux types d'alimentations électriques continues. La première, de marque Hemitechnic modèle 500-30 permet de délivrer de façon permanente un courant dont l'intensité est réglable de 0 à 30 A sous une tension continue réglable de 0 à 500 V DC. Une photographie de cette alimentation est présentée sur la figure 1.1.

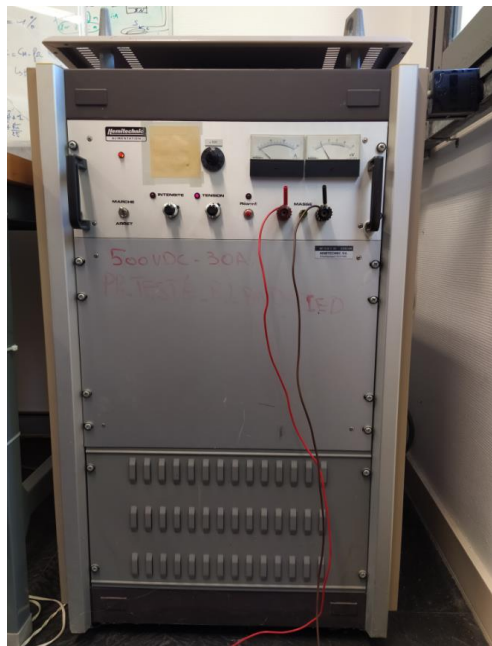


Figure 1.1 : alimentation Hemitechnic 500 V DC, 30 A.

La seconde, de marque Micronix Systems, permet de délivrer des « impulsions » de durée réglable de 0 à 10 s par pas de 100 ms, pour des tensions continues réglables de 100 à 540 VDC et des courants dont l'intensité maximale peut atteindre 300A. Les photographies présentées sur la figure 1.2 présentent une vue de l'extérieur et deux vues de l'intérieur de cette alimentation.



Figure 1.2 : photographies de l'alimentation à impulsion, (a) : vue de face, (b) et (c) : vue de l'intérieur côté face et opposé, la durée maximale l'impulsion est de 10 s, $U_{max}= 540$ VDC, $I_{max}= 300$ A, $P_{max}= 162$ kW.

En entrée de l'alimentation se trouve un redresseur (AC/DC) qui permet de charger les quatre super-condensateurs sous une tension de 12 V chacun. Ils sont montés en série pour augmenter la tension totale à 48 VDC, cette tension est amplifiée à travers deux étages de conversion DC/DC, à la sortie de l'alimentation. La tension d'alimentation reste constante durant les essais, donc elle ne dépend pas de la nature ou du comportement de la charge qui se trouve à ses bornes.

1.2 L'enceinte à vide, le système de pompage, les jauges de pression.

Dans l'objectif de mener notre étude expérimentale en fonction de la pression, nous avons disposé une enceinte à vide de forme cubique de 0,75 m de côté pour un volume utile de 422 litres. L'enceinte est réalisée en acier inoxydable type 304 et dispose d'une porte transparente (polycarbonate) qui permet de suivre et filmer les expériences réalisées à l'intérieur. Elle est équipée de piquages qui permettent d'instrumenter le dispositif expérimental via des traversées étanches (alimentation et mesures courants, tensions, jauge de vide, etc.).

Le système de pompage (figure 1.3.b) est composé d'une pompe primaire à palette Alcatel de type 2033 d'un débit de 30 m³/h. Elle permet d'atteindre rapidement (quelques minutes) des niveaux de pression de l'ordre de quelques hPa. Cette pression est mesurée en continue avec une jauge capacitive/Pirani PCR 280 Pfeiffer Vacuum, modèle compact connectée à un appareil de mesure de la pression TPG 361 muni d'un afficheur numérique. Les jauges PCR 280 servent à la mesure de pressions dans la gamme [5.10⁻⁵ – 1500] hPa avec une erreur de mesure inférieure à 0.01% F.S (Full Scale). La jauge PCR est une jauge combinée qui se compose d'un élément Pirani et d'un capteur capacitif à membrane. Les deux capteurs sont activés en permanence. Une

photographie de l'enceinte et une photographie du dispositif de pompage sont présentées figures 1.3 (a) et (b).

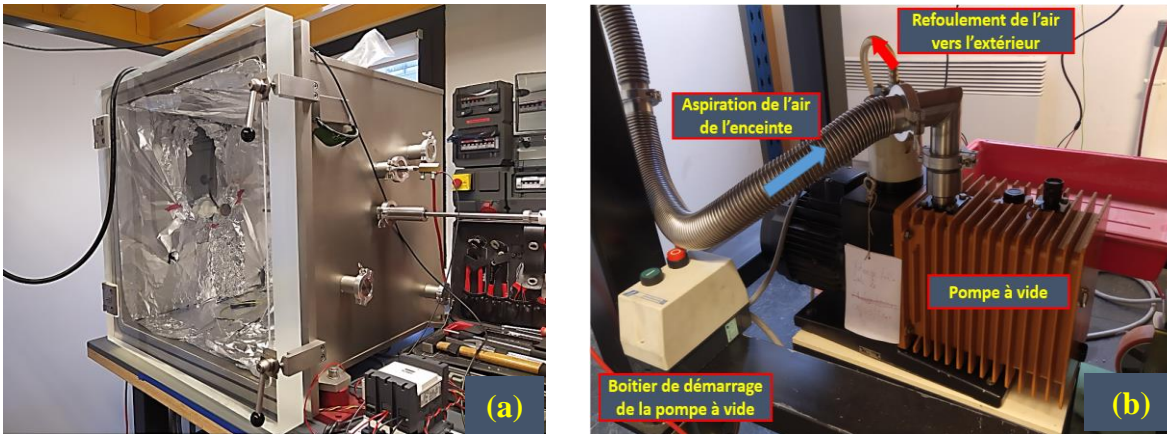


Figure 1.3 : photographies de l'enceinte à vide de 0,75 m de côté (a) et du système de pompage (b).

Le dimensionnement de l'enceinte limite la montée de la pression durant l'arc qui peut durer plusieurs secondes, ceci a été étudié en détail dans les travaux de thèse de T. André¹. Pour un volume de l'enceinte de 200 L, une estimation de la montée en pression dans l'enceinte pour un arc de 350 A sous une tension de 50V a été proposée. Un tracé de l'évolution de la pression d'un plasma d'air à volume constant ($\rho_{air} = 0,11 \text{ kg. m}^{-3}$) en fonction de la température est présenté sur la figure 1.4.

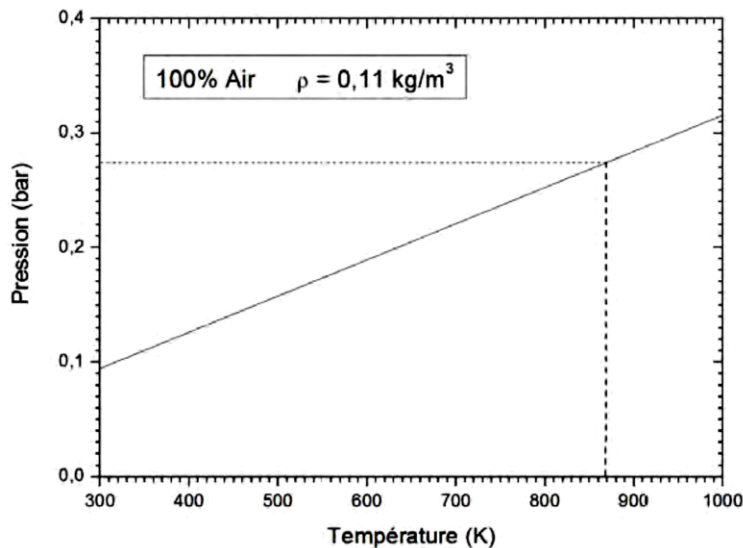


Figure 1.4: représentation de la pression en fonction de la température pour un plasma d'air à volume constant ($\rho_{air} = 0,11 \text{ kg. m}^{-3}$). Zoom sur la zone de basse température [300 – 1000] K.¹

Dans notre étude, la mesure de pression en continu a permis de confirmer que le volume était suffisant pour ne pas générer d'augmentation de pression significative d'un tir sur l'autre.

¹ André « Étude des mécanismes d'entretien et de propagation d'un arc électrique de court-circuit entre câbles endommagés dans les réseaux électriques d'aéronefs », thèse Université Paul Sabatier, 2017

1.3 Les charges

Des charges résistives variables sont utilisées pour obtenir le courant de court-circuit I_{CC} désiré. Un banc de résistances réglables de 10 à 537 Ω permet d'obtenir des valeurs d'intensités de courant jusque 100 A sous des tensions de 540 VDC. Pour des intensités de courant plus importantes (300 A) nous utilisons des résistances de puissance de type chantournée avec des valeurs de quelques dizaines de milliohms jusqu'à quelques ohms. Ces charges résistives sont présentées sur les figures 1.5a et 1.5b.

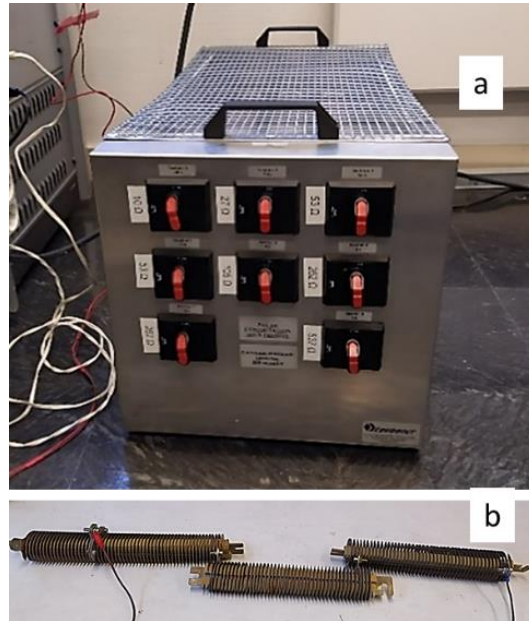


Figure 1.5a (en haut) : boîtier de résistances variable [10 – 537] Ω .

Figure 1.5b (en bas) : résistances chantournées utilisées pour les essais à forts courants jusqu'à 300 A.

Nous disposons également de 2 charges inductives variables et que l'on peut associer avec les charges résistives. La première dans la gamme 25 μH à 2,5 mH (présentée figure 1.6) et la seconde dans la gamme 210 μH à 6.07 mH.

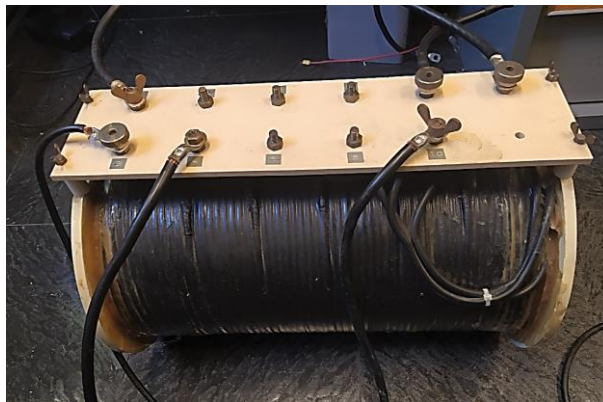


Figure 1.6 : inductance variable (210 μH à 6 mH).

1.4 Les mesures et le dispositif d'imagerie

De façon récurrente les principales mesures concernent la mesure de l'évolution du courant d'arc (I_{arc}), de la tension d'arc (U_{arc}).

La tension d'arc est mesurée aux bornes des électrodes à l'aide d'une sonde de tension différentielle de marque E2M caractérisée par une bande passante jusqu'à 70 MHz, une atténuation $\times 200$ ou $\times 2000$ et une tension d'entrée maximum de $\pm 1400\text{VDC}$.

Selon les cas, l'intensité du courant d'arc est mesurée à l'aide de shunt coaxiaux (pour des faibles courants et des hautes fréquences), de sondes de courant ampèremétriques, ou par mesure de la tension aux bornes de la résistance de charge en série avec le circuit d'arc. Les caractéristiques de ces équipements sont données ci-après:

- Shunt coaxial de marque T&M série 2MT10, de valeur $R = 1 \Omega$, caractérisé par une bande passante de 800 MHz; un temps de montée de 0,45 ns et une intensité maximale admissible de 17 A pendant 5s.
- Shunt coaxial de marque T&M série F 300-1 de valeur $R = 0,025250 \Omega$, caractérisé par une bande passante de 800MHz, un temps de montée de 0,45 ns, et une intensité maximale admissible de 60A pendant 3,3s.
- Pince ampèremétrique de marque Chauvin Arnoux, caractérisée par une bande passante de 100 kHz et un courant maximal mesuré de 70A rms ou 100A peak.

Les signaux sont enregistrés avec un oscilloscope Tektronix MDO3054 à une fréquence d'échantillonnage de 2,5 Géch./s et une bande passante de 500 MHz.

Chaque fois que cela était possible, nous avons couplé ces mesures électriques à des observations faites à l'aide d'une caméra rapide de type Photron SA1.1 modèle 675M-M1. Elle est positionnée devant la porte transparente de l'enceinte. Les paramètres ajustables sont la vitesse d'acquisition (jusqu'à 675 000 images/s), le temps d'exposition (de 1 μs à 1/fréquence d'acquisition) et la taille de l'image (résolution de 1024 x 1024 pixels en mode plein format). La vitesse d'acquisition maximale dépend de la taille de l'image choisie. Ainsi en mode plein format (1024 x 1024 pixels) on peut atteindre jusqu'à 5400 images/s et la vitesse d'acquisition maximale de 675000 images/s est obtenu pour une taille d'image de 64 x 16 pixels. L'intérêt du réglage du temps d'exposition indépendamment de la vitesse d'acquisition est de pouvoir le réduire pour ne pas saturer le capteur (et donc l'image) quand on filme le phénomène très lumineux. Dans ce but, on peut aussi régler l'ouverture de l'objectif (le diaphragme).

Pour chaque condition d'essais (intensité du courant d'arc, pression...) il convient donc de trouver le meilleur compromis entre l'ouverture de l'objectif et le temps de pose pour obtenir des images de la meilleure qualité possible. Plusieurs réglages sont parfois nécessaires car l'intensité lumineuse rayonnée par l'arc varie en fonction des paramètres des essais tels que la pression ou l'intensité du courant.

Les réglages de la caméra sont contrôlés par ordinateur par le biais du port de communication Gigabit Ethernet. C'est aussi par ce même port que les images (vidéos d'arc) sont

transférées de la caméra vers l'ordinateur où elles sont enregistrées. La mémoire interne de la caméra est de 8 GB (la caméra enregistre la vidéo avant son transfert vers l'ordinateur). La caméra présente un retard de 500 μ s entre le déclenchement d'enregistrement et la prise en compte du signal de trigger. Quand ce retard pose problème, il existe un mode d'enregistrement avec un déclenchement milieu. Dans ce mode, la caméra enregistre les images en permanence. Quand le trigger est pris en considération, la camera gardera en mémoire une partie des images acquises avant et après le signal de trigger.

1.1 Le contrôle des essais

L'ensemble du dispositif expérimental est piloté et contrôlé par PC par l'intermédiaire d'un programme développé avec le logiciel LabVIEW et d'un boîtier de commande et d'acquisition modèle NI6361 de National Instrument. Cet ensemble permet la synchronisation des différentes tâches à effectuer pour chaque essai, à savoir :

- la commande des dispositifs mécaniques si nécessaire.
- La commande des alimentations.
- La synchronisation des acquisitions des données électriques.
- La commande et la synchronisation de la caméra rapide.

Une description schématique du dispositif expérimental est présentée figure 1.7

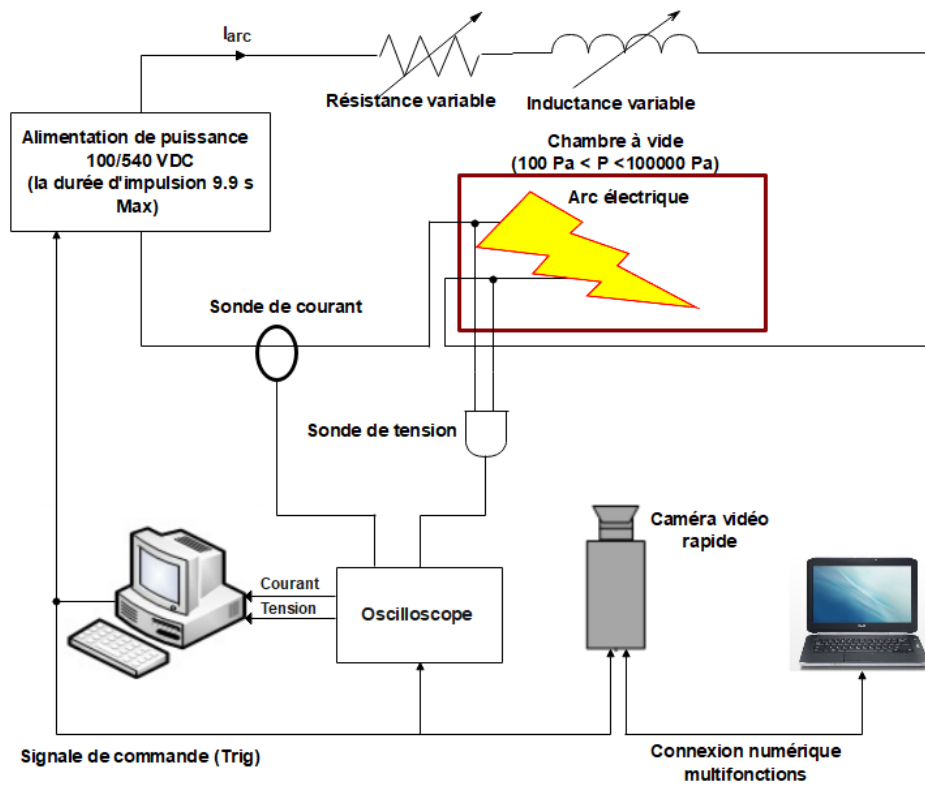


Figure 1.7 : description schématique du dispositif

Chapitre 2 :
Contribution à l'étude expérimentale du
déplacement de l'arc électrique sous l'effet de son
propre champ pour des pressions dans la gamme
[1 hPa – 1000 hPa]

2.1 Introduction :

Ce chapitre concerne l'étude du déplacement de l'arc électrique entre deux barres parallèles sous l'action de son propre champ magnétique. Du point de vue applicatif de tels travaux pourraient servir à décrire ce qui arrive quand un défaut d'arc apparaît entre deux zones conductrices approximativement parallèles ou des barres de distribution électrique par exemple (« busbars ») notamment lorsqu'un objet crée inopinément un court-circuit entre ces deux barreaux. Dans ce cas les intensités mises en jeu peuvent être particulièrement importantes. Cependant nous avons choisi, dans un premier temps, une démarche plus « amont » en nous intéressant au comportement de l'arc pour des intensités ayant une intensité du courant d'arc la plus constante possible durant le déplacement afin de mieux pouvoir en étudier l'influence sur le déplacement. Cette démarche a eu pour conséquence de limiter la plage d'intensité explorée à 300 A. La décharge d'un banc de capacités permet effectivement de monter bien plus haut en intensité, mais ne nous permet pas d'obtenir une intensité de courant constante au cours du temps. Nous nous sommes donc orientés vers l'une des alimentations décrites au chapitre 1 qui permet de délivrer un courant continu (jusqu'à 300 A) sous une tension d'alimentation réglable entre 100 - 540VDC.

Une première partie de ce chapitre est constituée d'un rappel bibliographique sur le déplacement en général. Dans une seconde partie le dispositif expérimental mis en œuvre sera décrit ainsi que les moyens utilisés pour caractériser et observer l'arc. La partie concernant les résultats se divisent en plusieurs paragraphes. Dans un premier temps nous avons choisi un cas représentatif des différents modes de déplacement de l'arc ainsi que des différentes structures (notamment au niveau des pieds d'arc) observés lorsque la pression varie. Dans un deuxième temps nous proposons une synthèse qualitative concernant la structure des pieds d'arc ainsi que le mode et le sens de déplacement de l'arc en fonction des différents paramètres variables (distance inter-électrodes, intensité du courant d'arc et pression). Une troisième partie avec une étude plus quantitative est présentée, elle concerne l'influence des conditions expérimentales d'une part sur les caractéristiques électriques de l'arc (champ électrique) et d'autre part sur la vitesse de déplacement. Pour finir, au cours de ces travaux, nous nous sommes écartés de la gamme de pression que nous appelons « aéronautique » et avons poursuivi les essais pour des pressions plus basses permettant ainsi d'observer le mouvement « rétrograde » de l'arc. Le chapitre se termine par une synthèse des résultats obtenus et une proposition de quelques pistes susceptibles d'enrichir les premiers travaux présentés.

2.2 Rappel bibliographique :

2.2.1 Introduction

On rencontre dans la littérature de nombreux travaux concernant la mise en mouvement de l'arc électrique dans l'air et dans divers gaz. Schématiquement on peut distinguer trois grands groupes de dispositifs expérimentaux :

- des dispositifs dans lesquels l'arc est mis en mouvement entre deux barres. Il s'agit alors bien souvent de travaux menés dans le cadre d'études concernant les disjoncteurs BT (Mc Bride *et al.*)² ou de réacteurs à arc électrique (K. Yukimura *et al.*)³. Dans ce cas, la mise en mouvement se fait naturellement du fait du champ magnétique induit par le passage du courant entre les deux barreaux, mais peut aussi être assisté par un champ magnétique externe. Les géométries rencontrées sont soit deux électrodes parallèles, soit des électrodes pour laquelle la distance inter-électrodes peut varier, reflétant ainsi plus précisément la géométrie d'une chambre de coupure dans un disjoncteur BT,
- des dispositifs du type « torche à plasma » dans lesquels l'arc électrique est mis en rotation entre deux électrodes coaxiales à l'aide d'un champ magnétique extérieur (SW Chau *et al.*)⁴,
- des dispositifs dans lesquels l'arc est mis en mouvement mécaniquement⁵. Un tel type de dispositif a notamment été mis en œuvre en vue de simuler l'interaction entre un aéronef et un arc électrique visant à reproduire la foudre.

Par ailleurs, la plupart des travaux présentés se situent soit dans des conditions de pression atmosphérique soit dans un vide plus poussé (disjoncteur sous vide). Peu de travaux concernent les valeurs de pression dans la gamme [10 hPa – 1000 hPa], gamme de pression qui concerne le domaine de l'aéronautique et sur laquelle nos études se sont focalisées. Dans la suite de ce chapitre, nous nous intéresserons principalement aux arcs électriques se déplaçant dans l'air. Quelques références à d'autres gaz plasmagènes seront proposées même si ce n'est pas là notre centre d'intérêt.

Le déplacement de l'arc a bien souvent été étudié expérimentalement en cinématographie rapide. Les travaux et les observations sont particulièrement riches et variés et il n'est pas toujours aisé d'en faire une synthèse d'autant plus que le mode de génération du déplacement peut lui-même avoir une influence sur le déplacement lui-même. Dans la suite de cette partie bibliographique nous nous intéresserons à différents points :

- la structure de l'arc en mouvement,
- le mode de déplacement de l'arc,
- la vitesse de déplacement de l'arc.

² J. W. McBride *et al.*, « Review of arcing phenomena in low voltage current limiting circuit breakers », IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology, vol. 148, n°1, pp. 1-7, 2001.

³ K. Yukimura *et al.*, “High deposition rate of amorphous carbon film using a magnetically driven shunting arc discharge”, Surface & Coatings Technology 196 (2005) 203– 206

⁴ S W Chau *et al.* “Experimental study on copper cathode erosion rate and rotational velocity of magnetically driven arcs in a well-type cathode non-transferred plasma torch operating in air”, 2007, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 40 1944

⁵ J. A. Dobbing *et al.*, « A SWEPT STROKE EXPERIMENT WITH A ROCKET SLED », 1978 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, [10.1109/ISEMC.1978.7566889](https://doi.org/10.1109/ISEMC.1978.7566889)

2.2.2 Généralités concernant la structure de l'arc en mouvement et les modes de déplacement observés

Concernant la structure de l'arc, deux types de structure ont été observés. D'une part un arc composé d'une seule colonne d'arc (« single arc mode ») et d'autre part, un arc composé de plusieurs colonnes d'arc. Cette structure peut se retrouver principalement dans le cas d'un arc se déplaçant entre deux rails (« distributed arc mode »).

Les conditions d'apparition de ces modes dépendent des conditions expérimentales. Le premier mode (appelé mode 1 dans la suite) est souvent observé pour de faibles intensités du courant d'arc, le second mode (ou mode 2) pour de plus fortes intensités. De plus, Koyama *et al.*⁶ (pour des intensités de courant d'arc dans la gamme [10kA - 40kA]) ont observé que pour une intensité de courant d'arc donnée, le mode 1 était d'autant plus fréquent que la distance entre l'arc et une paroi isolante susceptible de s'ablater était élevée. Ceci est illustré sur la figure 2.1 qui présente les différents modes d'arc en fonction de la distance aux parois.

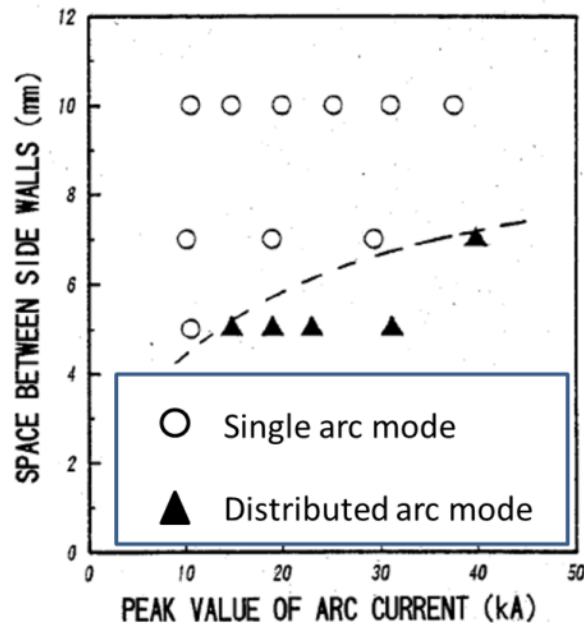


Figure 2.1 (extrait de Koyama *et al.*⁶) : observation des différentes structures d'arc (« single mode » = mode 1 ou « distributed mode » = mode 2) en fonction de la distance entre l'arc et une possible paroi isolante et en fonction de la valeur maximale de l'intensité du courant d'arc. Travail mené dans l'air à pression atmosphérique (avant l'arc).

Dans le cas d'un arc se déplaçant entre deux rails (à pression atmosphérique) par exemple, Zeller *et al.*⁷ ont mis en évidence une forme spécifique de l'arc. Dans ces travaux l'arc est mis en mouvement entre deux barreaux. La distance inter-électrodes est dans la gamme [5 - 15] mm et l'intensité du courant d'arc comprise entre 1k A et 5 kA. Les barreaux sont parfois entourés de

⁶ K. Koyama *et al.*, « Arc Behavior Driven by Electromagnetic Force between Rail Electrodes », IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 29, NO. 1. JANUARY 1993

⁷ P. R. Zeller *et al.*, « Arc Structure, Arc Motion, and Gas Pressure Between Laterally Enclosed Arc Runners », IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS AND PACKAGING TECHNOLOGIES, VOL. 24, NO. 3, SEPTEMBER 2001

deux parois isolantes. L'arc est mis en mouvement par un champ magnétique externe, et l'influence du champ propre à l'arc est réduite par la symétrie des amenées de courant. Ils ont observé un arc en mode 1, de forme spécifique : une colonne d'arc avec une dissymétrie pouvant intervenir, soit du côté de la cathode soit du côté de l'anode. Ils ont appelé cette dissymétrie le nez de l'arc. L'interaction de ce « nez » avec la surface de l'électrode la plus proche peut générer l'apparition de nouveaux spots conduisant à la commutation du courant vers une autre colonne d'arc. Ils ont observé un déplacement des pieds anodique et cathodique soit continu, soit par sauts sans proposer d'explication à ces observations. Aux plus fortes valeurs de la distance inter-électrodes (15 mm) des colonnes d'arc distinctes apparaissent simultanément (ainsi que plusieurs spots cathodiques). Les formes de « nez » observées par Zeller *et al.* sont reproduites sur les figures 2.2 et 2.3. Dans les deux cas l'arc se déplace de la droite vers la gauche, ce qui est cohérent vis-à-vis de la loi de Lenz puisque les amenées de courant se situent sur la droite des images dans ce cas.

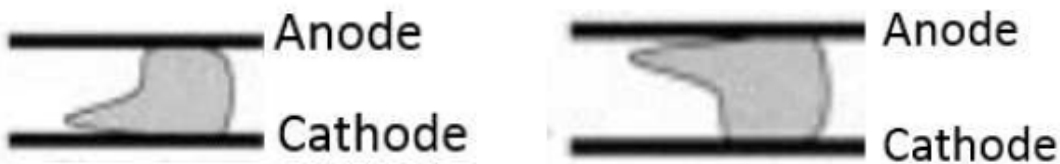


Figure 2.2 (extrait de Zeller *et al.*) : forme de l'arc dissymétrique et présentant un « nez » au niveau de la cathode.

Figure 2.3 (extrait de Zeller *et al.*) : forme de l'arc dissymétrique et présentant un « nez » au niveau de l'anode.

De nombreux autres travaux ont permis l'observation du mouvement de l'arc. Dans le cas d'un arc se déplaçant entre deux barreaux parallèles il est intéressant de citer les travaux menés récemment par

M. Lisnyak⁸. Dans ce travail, mené à pression atmosphérique, deux dispositifs expérimentaux ont été utilisés dans les deux cas pour des intensités élevées du courant d'arc (entre 500 A et 2 kA).

Dans le premier dispositif l'arc est créé entre deux rails de section circulaire distants de 20 mm et long de 250 mm. L'onde de courant est une demi-sinusoïde (à 50 Hz soit d'une durée de 10ms) dont l'intensité maximale peut varier entre 200 A et 2 kA. L'arc est amorcé en ouvrant un contact entre une électrode « auxiliaire » et un des rails. Ensuite, comme dans le cas d'un disjoncteur BT, l'arc saute sur le second rail et se déplace entre les deux rails. Le déplacement observé en cinématographie rapide a montré que les pieds anodique et cathodique se déplacent simultanément dans la même direction. Aucun saut significatif n'a été observé aussi bien au niveau du pied anodique que cathodique. Ceci étant corroboré par une tension d'arc « lisse » sans perturbations significatives durant la phase de propagation de l'arc. Par ailleurs, aucun « reclaquage » n'a été observé.

Dans le second dispositif, l'arc est réalisé entre deux barreaux d'aluminium de section rectangulaire. Ces barreaux sont distants de 5 ou 8 mm et longs de 20 mm. L'onde de courant est

⁸ M. Lisnyak : “ Theoretical, numerical and experimental study of DC and AC electric arcs ”, Thèse de l'Université d'Orléans, 2018

alternative avec des fréquences possibles de 420 et 760 Hz. L'intensité maximale du courant varie entre 400 A et 2 kA. La tension d'alimentation est de 115 V ou 230 V. L'arc est initié par l'explosion d'un petit morceau d'aluminium qui « court-circuite » les deux rails. Selon les conditions expérimentales, des phénomènes de « reclaquage » pouvaient apparaître. Si l'existence de jets de plasma en provenance des pieds anodique et cathodique est avérée dans le cas de l'impulsion de courant semi sinusoïdale, leur potentielle présence était beaucoup moins évidente pour les essais à plus haute fréquence. Enfin, aux plus hautes fréquences un déplacement par sauts a parfois été observé. Pour finir, les auteurs ont observé une forme d'arc avec un nez dans la plupart des configurations. Cette forme, déjà observée par Zeller⁷, fut interprétée comme la résultante d'une interaction « déséquilibrée » entre les deux jets de plasma. Si on poursuit le tour d'horizon des différents travaux concernant la mise en mouvement de l'arc électrique à l'aide d'un champ magnétique externe ou « auto-induit », on peut citer les travaux de Gray *et al.*^{9,10} ainsi que Choi *et al.*¹¹, dans le cas d'un arc là encore réalisé entre deux électrodes parallèles (intensité maximale du courant de l'ordre de 1 kA). Ils ont observé un mouvement continu du pied cathodique. Le pied cathodique précède le pied anodique et ils n'ont pas observé que la colonne de plasma précédait le pied cathodique. Quant au pied anodique, ils ont observé qu'il s'accroche périodiquement sur la surface de l'anode et ensuite saute pour rattraper le pied cathodique – nous reviendrons plus loin sur la notion de saut. La colonne de plasma d'arc s'étend loin devant le pied anodique. Ceci est illustré sur la figure 2.4 par les dommages laissés par les pieds d'arc sur les électrodes : dommage continu sur la cathode et ponctuels sur l'anode.



Figure 2.4: photographie des dommages laissés par l'arc au niveau des électrodes. On aperçoit les nombreux points d'ancrage du pied anodique ainsi que la trace continue laissée au niveau de la cathode (extrait de Gray *et al.*^{9,10}).

Par ailleurs, lorsque la distance inter-électrodes est réduite en dessous de 2 mm, les auteurs n'ont plus observé un déplacement par saut au niveau de l'anode. Dans ce cas ils ont observé un mouvement continu de l'arc aussi bien à la cathode qu'à l'anode. Guile *et al.*¹², ont étudié le déplacement de l'arc entre deux électrodes parallèles en régime DC (jusqu'à 500A) et en régime AC (50 Hz) (jusqu'à 3000 A) en l'absence de champ extérieur appliqué au système dans l'air. La distance inter-électrodes était dans la gamme [12 – 84] mm. Dans le cas AC, les observations ont

⁹ M. Gray *et al.*, "Structure of propagating arc in a magnetohydrodynamic rail plasma actuator", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 49 015202

¹⁰ M. Gray *et al.* « Study of the dynamic behavior of the rail plasma actuator arc », 2018, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 51 315203

¹¹ Y. Choi *et al.*, "Effects of anchoring and arc structure on the control authority of a rail plasma actuator », *J. Phys. D: Appl. Phys.* 50 (2017) 355203

¹² AE Guile *et al.* "Arc movement due to the magnetic field of current flowing in the electrodes." Proceedings of the IEE-Part A: Power Engineering, vol. 104, no. 18, pages 533–540, 1957.

montré qu'un déplacement erratique se produisait : s'il advenait que la colonne touche l'une ou l'autre électrode, le pied d'arc se transférait au niveau du point de contact. La distance entre chaque saut peut aussi bien être grande que très petite. Dans le cas DC, les auteurs ont observé un mouvement continu ou « semi continu » (« regular » et « semi regular » dans l'article) du pied cathodique. Le mouvement semi continu est constitué d'une trace continue sur une certaine zone, puis d'un saut qui se poursuit de nouveau par une trace continue (on pourrait dire continue par morceaux). Ceci est illustré sur la figure 2.5 extraite de [Guile et al.] sur laquelle on constate de plus que le pied anodique peut être en avance sur le pied cathodique. Par ailleurs le mouvement semi-continu apparaît quand l'intensité du courant d'arc croît. Ainsi dans le cas d'électrodes en acier, pour une distance inter-électrodes d'environ 30 mm, ils ont observé un mouvement continu pour des courants inférieurs à 350 A, un mouvement semi continu de 350 A à 470 A et ensuite un mouvement erratique fait de sauts. Concernant le déplacement du pied anodique sur des électrodes en acier, celui-ci s'est avéré être nettement moins régulier que celui du pied cathodique. Sur l'anode le pied avait une plus grande tendance à rester accroché. Pour l'essentiel, sur l'anode les traces du déplacement étaient composées de petites zones de formes et de tailles différentes dispersées au hasard le long de l'électrode. De temps en temps, des sauts réguliers ont aussi été observés, formant de très petits cratères alignés et séparés par des distances « égales » formant ainsi une longue trace.

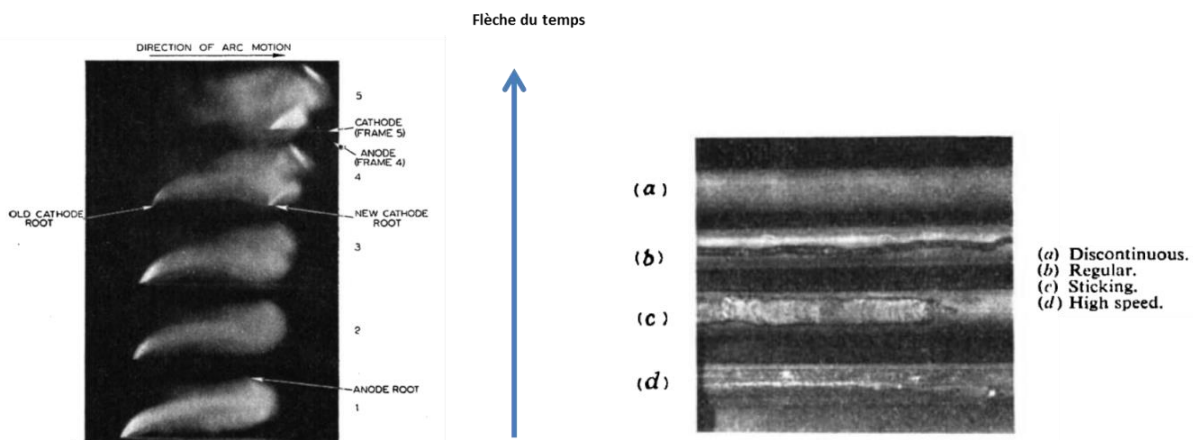


Figure 2.5 : arc en régime DC entre deux électrodes parallèles en acier. Extrait d'un film réalisé en cinématographie rapide (extrait de Guile *et al.*¹²).

Figure 2.6 (extrait de Secker *et al.*¹³) : photographies montrant les différents types de traces laissées sur la cathode.

Dans d'autres travaux, Secker *et al.*¹³ ont classé, dans le cas d'arc en régime DC (jusqu'à 500A sous 500 VDC) et en présence d'un champ magnétique transverse externe, les traces laissées par les pieds cathodiques en 4 catégories présentées sur la figure 2.6 que les auteurs assimilent aussi à des modes de déplacement (a, b, c et d). La première catégorie correspond à des traces discontinues et les trois autres à des traces continues mettant en évidence un échauffement plus ou moins important du matériau. D'une façon générale, ils ont observé que le mode de déplacement par sauts

¹³ P. E. SECKER et al., "ARC MOVEMENT IN A TRANSVERSE MAGNETIC FIELD AT ATMOSPHERIC PRESSURE", The Institution of Electrical Engineers Paper No. 3044 S Aug. 1959

correspondait aux vitesses les plus importantes et que le mode de déplacement dépendait des facteurs suivants :

- L'intensité du courant d'arc : en général, quand l'intensité du courant d'arc augmente, l'arc change de mode de déplacement dans l'ordre suivant : (c) puis (b) puis (d) puis (a). Cependant, fait un peu contradictoire, ils observent que la vitesse maximale de l'arc, pour un champ magnétique extérieur donné, est indépendante de la valeur du courant d'arc....Ceci sera discuté plus loin.
- L'intensité du champ magnétique transverse : augmenter le champ magnétique a le même effet qu'augmenter la valeur du courant d'arc, mais l'effet semble plus marqué.
- Le matériau de cathode et son état de surface.
- La distance inter-électrodes : quand la distance inter-électrodes augmente les auteurs ont observé que la vitesse augmentait et que le pourcentage de déplacement continu diminuait en faveur d'un déplacement par sauts. Ceci est montré sur la figure 2.7 (extraite de Secker *et al.*¹³). Par ailleurs ils ont observé qu'à vitesse élevée (mode (a)) la vitesse maximale présentait une saturation pour les distances inter-électrodes élevées. Ceci est représenté sur la figure 2.8 dans le cas de l'aluminium.
- La nature du circuit : plus l'impédance du circuit est inductive, plus l'arc a tendance à se déplacer par sauts. Les auteurs attribuent cela au fait que plus le circuit est inductif, plus la colonne d'arc peut s'étendre. Ils ont aussi observé que plus le circuit était inductif plus la vitesse de déplacement de l'arc augmentait.

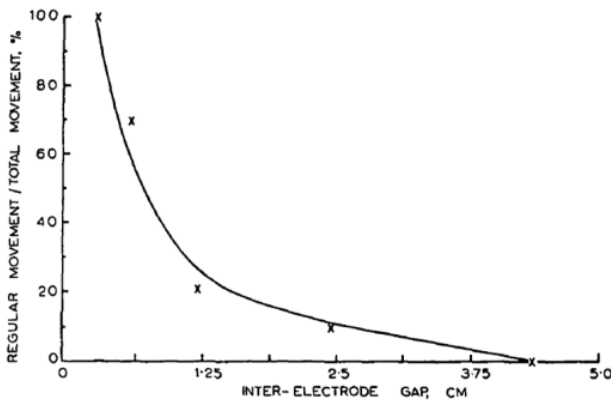


Figure 2.7 (extrait de Secker *et al.*) : variation du pourcentage de mouvement continu en fonction de la distance inter-électrodes.

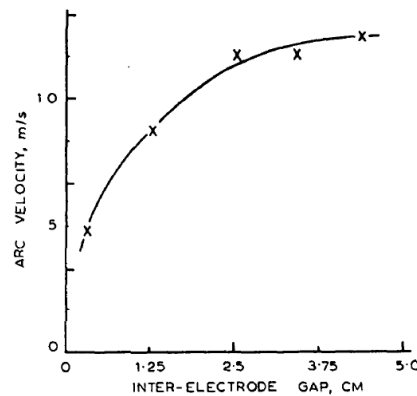


Figure 2.8 (extrait de Secker *et al.*) : vitesse en mode (a) (par sauts) en fonction de la distance inter-électrodes pour des électrodes en aluminium.

Chabrierie *et al.*¹⁴ ont observé dans le cas d'un arc mis en rotation à l'aide d'un champ magnétique extérieur (à pression atmosphérique), un déplacement continu du pied cathodique, en avance sur le

¹⁴ J.-P. Chabrierie *et al.* « Study of the arc root displacement and three-dimensional modelling of the thermal phenomena occurring in a hollow cathode submitted to an electric moving arc », January 1999, Journal of Physics D: Appl. Phys. 28(5):888

pied anodique, ce dernier se déplaçant par sauts pour « rattraper » le pied cathodique. Ces observations corroborent celles de Gray *et al.*^{9,10}. Ceci est rappelé sur la figure 2.9 montrant une succession d'images prises en cinématographie rapide (6000 images/s) et mettant en évidence un tel comportement. Dans ce cas l'intensité du courant était de l'ordre de 100 A, le temps de stagnation du pied anodique était de l'ordre de 2 ms et la vitesse de déplacement de l'ordre de 40 m/s.

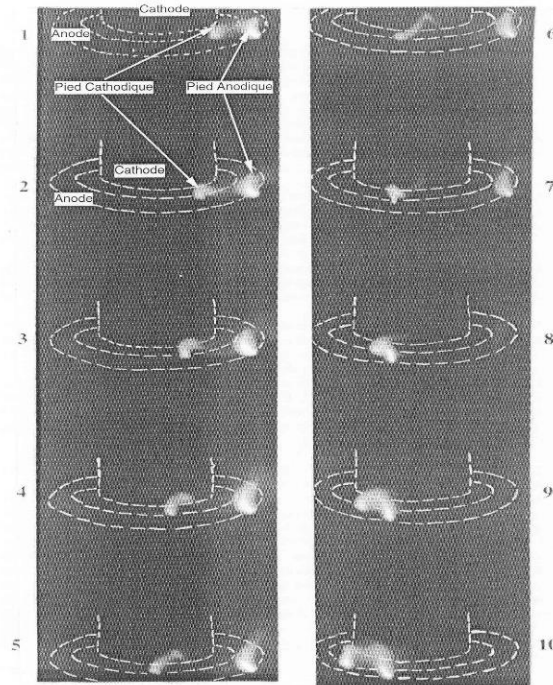


Figure 2.9 : (extrait de Chabrierie *et al.*) : arc se déplaçant entre deux électrodes concentriques. Le pied cathodique a un mouvement continu, le pied anodique se déplace par saut pour « rattraper » le pied cathodique.

Dans le cas d'arc mis en mouvement mécaniquement, c'est-à-dire en créant un déplacement relatif d'une électrode par rapport à l'autre (J. P. Chabrierie *et al.*), une électrode cylindrique était mise en mouvement à l'aide d'une perceuse au-dessus d'un disque en cuivre comme cela est décrit sur la figure 2.10. L'observation des traces laissées sur le disque a montré que dans le cas où le disque était l'anode le pied anodique se déplace par bonds alors que dans le cas où le disque est cathode, le pied cathodique a un mouvement continu ou continu par morceaux, comme ceci est montré sur la figure 2.11. Par ailleurs on peut noter que le fait d'avoir le disque en anode autorisait, pour une tension d'alimentation donnée, une vitesse de rotation nettement plus élevée que quand le disque était la cathode. Dans ce cas, une vitesse de rotation élevée entraînait l'extinction de l'arc, laissant penser que la contrainte au niveau du déplacement de l'arc se situait au niveau de la capacité du pied cathodique à se déplacer.

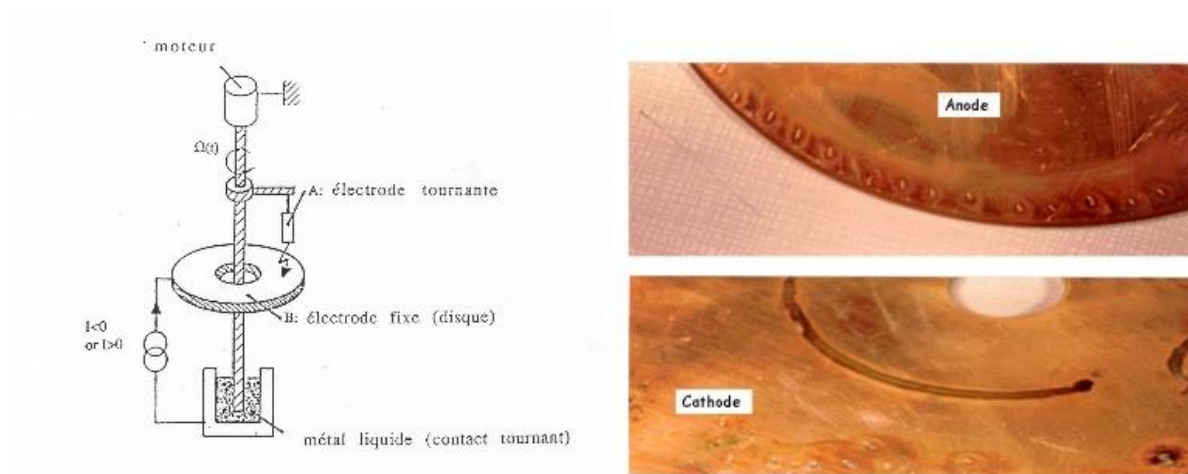


Figure 2.10 (extrait de Chabrerie *et al.*) : schéma du dispositif expérimental utilisé pour l'observation des traces laissées par l'arc en fonction de la polarité dans le cas d'une électrode en mouvement relatif par rapport à la seconde (électrodes en cuivre dans l'air à pression atmosphérique).

Figure 2.11 (extrait de Chabrerie *et al.*) : traces laissées par un arc dans le dispositif de la figure 2.10 selon la polarité : traces ponctuelles sur l'anode et trace continue sur la cathode.

Dobbing *et al.*⁵ ont étudié l'interaction entre un arc électrique et une plaque en mouvement en vue de simuler le foudroiement d'une aile d'avion. L'arc (dont l'intensité vaut environ 600A) créé entre deux électrodes était traversé par une « aile » mise en mouvement à grande vitesse (de l'ordre de 250 km/h). Des tests ont été effectués sur des ailes en aluminium peintes et non peintes ainsi que sur des panneaux en fibre de carbone (protégé ou non par une couche conductrice). Ils ont observé des sauts de tension correspondant à des instants auxquels l'arc, après s'être allongé « reclaque » sur l'aile à un endroit en « vis-à-vis » des électrodes. De plus la structure de l'arc selon la nature de l'électrode et son recouvrement ou non par une peinture a été étudiée. Un exemple de photographie est donné sur la figure 2.12 qui permet d'observer la structure de l'arc en fonction de la nature du matériau (en haut fibre de carbone en bas aluminium non peint). Ils ont par ailleurs pu observer la différence de comportement entre l'arc du dessus et celui du dessous.

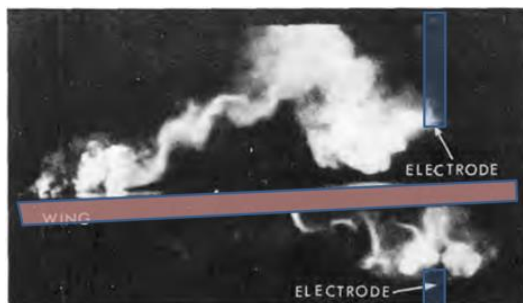


Figure 2.12 (extrait de Dobbing *et al.*) : attachement de l'arc d'une aile en fibre de carbone (au dessus) et d'une ailer en aluminium non peint (en dessous).

De nombreux paramètres ont une influence sur le mode de déplacement, comme cela a déjà été évoqué notamment en faisant référence aux travaux de Secker *et al.* D'autres travaux ont bien sûr été publiés sur ce sujet et ne conduisent pas toujours aux mêmes observations. À titre d'exemple, dans le cas d'un arc mis en mouvement à l'aide d'un champ externe, certains résultats rapportés

dans la littérature montrent des variations extrêmes ou une forte dispersion lorsqu'on essaie de corréler le déplacement de l'arc avec le champ magnétique¹⁵. Par ailleurs, le gaz plasmagène a aussi une importance. Ainsi, R. N. Szente *et al.*¹⁶ ont observé que la vitesse de l'arc dans l'argon était presque indépendante de la valeur du champ externe, et dans l'hélium, ils ont observé que la vitesse diminuait après une valeur seuil du champ magnétique. De même concernant l'influence de la distance inter-électrodes, différentes expériences ont conduit à des résultats pas toujours en accord. Spink *et al.*¹⁷ ont observé (comme cela est montré sur les figures 2.13 et 2.14) une augmentation de la vitesse quand la distance inter-électrodes décroît. Cette augmentation est particulièrement marquée au-dessus de 1 000 ampères à des distances inférieures à 5 mm. À des courants plus faibles, la variation de la vitesse, lorsque l'espacement est réduit à 1,6 mm, est moindre. Il en va de même dans les travaux de Guile *et al.*¹⁸ dans lesquels les auteurs ont étudié le déplacement de l'arc sous l'action d'un champ externe pour différentes configurations observant à chaque fois une décroissance de la vitesse avec la distance inter-électrodes comme ceci est rappelé sur la figure 2.15. Il est intéressant de noter que ce sens de variation de la vitesse avec la distance inter-électrodes est l'opposé de celle observée dans le cas de l'aluminium (cf. figure 2.8) par Secker *et al.*¹³.

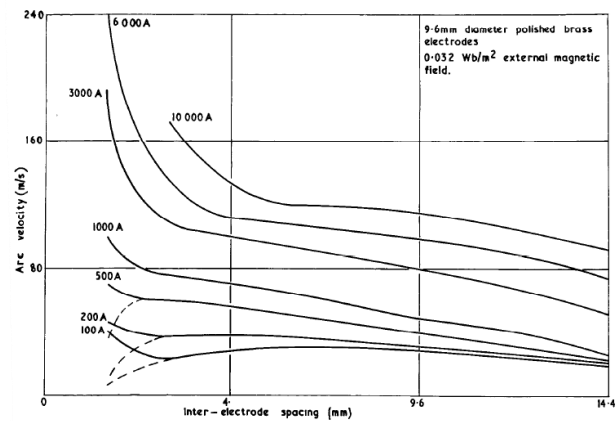
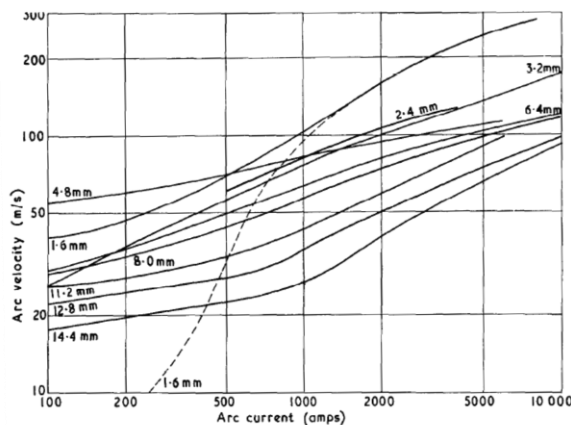


Figure 2.13 (à gauche) (extrait de Spink *et al.*) : vitesse de déplacement de l'arc en fonction de la distance inter-électrodes pour différentes valeurs du courant d'arc.

Figure 2.14 (à droite) (extrait de Spink *et al.*) : vitesse de déplacement de l'arc en fonction du courant d'arc pour différentes valeurs de la distance inter-électrodes.

¹⁵ O. L. Yasko "Correlation of the characteristics of electric arcs moving in transverse magnetic fields", 1969 *Proc. IEE* **116** 3 453

¹⁶ R N Szente *et al.*, « The influence of the cathode surface on the movement of magnetically driven electric arcs », *J. Phys. D: Appl. Phys.* 23 (1990) 1193-1200

¹⁷ H.C. Spink *et al.* « The Movement of High-Current Arcs in Transverse External and Self-Magnetic Fields in Air at Atmospheric Pressure », Aeronautical research council current papers, 1965

¹⁸ Guile *et al.* « High-current arcs in transverse magnetic fields in air at atmospheric pressure », *PROC. IEE*, Vol. 116, No. 4, APRIL 1969

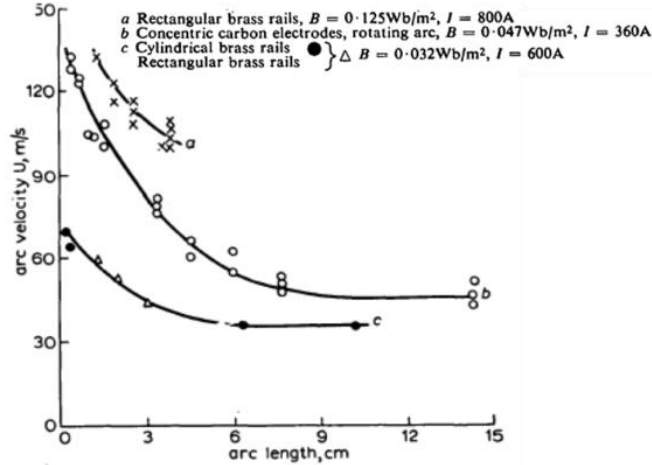


Figure 2.15 (extrait de Guile *et al.*) : vitesse de l'arc pour différentes configurations en fonction de la distance inter-électrodes.

De nombreux auteurs se sont intéressés plus précisément à la vitesse de déplacement de l'arc. La question de la vitesse de déplacement de l'arc rejoint bien sûr la problématique des facteurs influents : certains auteurs considèrent que la colonne d'arc peut être considérée indépendamment des pieds anodique et cathodique et qu'elle se comporte tel un canal conducteur et se déplace de façon continue alors que les pieds anodique et cathodique ont leurs comportements propres mais n'influent pas sur la vitesse de déplacement de l'arc ¹⁹. Dans le cas d'arcs électriques mis en mouvement à l'aide d'un champ magnétique transverse, de nombreux auteurs ont proposé des expressions donnant la vitesse de l'arc en fonction de divers paramètres tels que l'intensité du courant d'arc, le champ magnétique, la distance inter-électrodes, la nature du gaz, ... Les premières démarches liant vitesse de l'arc aux différents paramètres ont été basées sur l'observation de corrélations entre les différents paramètres expérimentaux (vitesse, champ magnétique, courant, distance inter-électrodes, densité du gaz, longueur caractéristique liée au déplacement) (travaux de Daumov *et al.*²⁰ et de Yasko¹⁵). Ces relations ont été obtenues par en se basant sur une analyse dimensionnelle, et non à partir d'un examen des mécanismes physiques qui contrôlent le mouvement de l'arc. Guile *et al.*^{18, 21} s'appuyant sur ces travaux et considérant que l'arc se déplace à une vitesse v qui est déterminée par l'équilibre entre la force magnétique et une force de type frottement aérodynamique (dépendant du carré de la vitesse) :

$$BId = \frac{1}{2}CDv^2\rho d \quad (2.1)$$

où B est l'induction magnétique, I le courant d'arc, d la distance inter-électrodes, C un coefficient de frottement, v la vitesse de déplacement, ρ la densité du gaz et D une dimension caractéristique de l'arc (son diamètre).

¹⁹ SV Bobashev *et al.* "Generation of high-velocity plasma flows in railgun channels filled with gases of various density." Technical Physics Letters, vol. 36, no. 1, pages 72–75, 2010

²⁰ G. Daumov *et al.* "Some generalization relating to the study of electric arc", Zhurnal Prikladnoi Mekhaniki i Tekhnicheskoi Fiziki, No. 2, pp. 97-105, 1965.

De cette façon Guile *et al.*^{18,21} ont montré qu'il existait une corrélation entre la vitesse de l'arc v et le champ magnétique B de telle façon que $v \propto B^{0.34}$ jusqu'à $v \propto B^{0.6}$. Utilisant les résultats de divers auteurs, Szente *et al.*²² obtiennent quant à eux une relation du type :

$$Bld = \frac{1}{2} Cd\rho_0 D_0 v_0^{0.39} v^{1.61} \quad (2.2)$$

où les indices 0 se rapportent une valeur de référence. Les mêmes auteurs¹⁶ ont étudié le déplacement de l'arc dans le cas d'un arc mis en rotation à l'aide d'un champ magnétique externe. Ils en concluent que la vitesse de l'arc suit une équation du type aérodynamique lorsque la surface de la cathode a été contaminée (oxydation). En revanche, pour les surfaces cathodiques propres ou fortement contaminées, une autre force contrariant le déplacement devient importante : la force de traînée de surface sans en préciser l'expression mais les auteurs la lie à la cathode et au rôle d'émetteur d'électrons de celle-ci. Ils se sont plus particulièrement attachés à l'étude de l'influence de l'état de surface de la cathode sur le déplacement concluant par exemple que plus le travail de sortie du matériau de cathode était faible, plus rapidement l'arc pouvait se déplacer, liant ainsi explicitement le rôle de force de frottement à la cathode aux phénomènes d'émission électronique à ce niveau. D'autres auteurs ont étudié l'influence de l'état de surface. Ainsi, les expériences de Lewis et Seeker²³, ont montré que l'oxyde de l'électrode a influencé sensiblement la vitesse de l'arc. De même Hitchcock²⁴ *et al.* ont observé les phénomènes liés à l'immobilité et la mise en mouvement de l'arc en présence d'un film d'oxyde sur la cathode que ce soit pour le mouvement « direct » ou le mouvement « rétrograde ». C. Lichun *et al.*²⁵ ont observé l'influence de l'état de surface des électrodes sur le déplacement de l'arc dans le cas d'un arc se déplaçant entre deux barreaux en cuivre, en aluminium et en acier. L'intensité du courant est de l'ordre de 100A, un champ extérieur est appliqué, la distance entre les électrodes est dans la gamme [3 - 8] mm. Ils ont constaté que pour des électrodes oxydées le déplacement était fortement ralenti et parfois discontinu. En étudiant l'influence de la taille des électrodes en vis-à-vis, ils ont conclu que dans le cas d'électrodes oxydées (et ce sur tous les métaux étudiés cuivre, aluminium, acier...) la présence d'une épaisse couche d'oxyde réduisait la vitesse de déplacement des pieds d'arcs. Une fois cette couche « nettoyée » (par l'action de l'arc), la vitesse pouvait fortement augmenter si la surface des électrodes en vis-à-vis était suffisamment faible pour que l'arc repasse par le même chemin. Ainsi, ils ont observé différents comportements : quand les pieds d'arc sont « freinés » par la couche d'oxyde, c'est le mouvement de la colonne qui « tire » les pieds d'arcs. L'arc a alors la forme schématiquement décrite sur la figure 2.16. Au contraire, quand les électrodes ont été

²¹ Guile A E et al. , Further correlation of experimental data for electric arcs in transverse magnetic fields », *PROC. IEE, Vol. 115, No. 9, september 1968*

²² R. N Szente et al. « Arc velocity and cathode erosion rate in a magnetically driven arc burning in nitrogen », *J. Phys. D: Appl. Phys.* **21** (1988) 909-913.

²³ T. J. Lewis and P. E. Seeker, "Influence of the cathode surface on arc velocity," *J. Appl. Phys.*, vol. 32, pp. 54-64, 1960.

²⁴ A. H. Hitchcock, M. S. I. Rageh, A. E. Guile et al., "Effects of cathode oxide films on forward and retrograde motion of arcs," *Gas Discharge*, pp. 293-295, 1978.

²⁵ C. Lichun et al. "Motion of magnetically driven arcs on oxidized electrodes", *IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, HYBRIDS. AND MANUFACTURING TECHNOLOGY. VOL. CHMT-5, NO. 1, MARCH 1982*

nettoyées par le passage de l'arc et que dans les essais suivants il est obligé de repasser au même endroit, les pieds anodiques et cathodiques se déplacent plus vite et l'arc a la forme suivante décrite sur la figure 2.17. On peut par ailleurs noter que d'autres formules « semi-empiriques » de la vitesse de l'arc ont été proposées, valables pour certaines configurations (« electric arc heaters » par exemple)^{26, 4}.

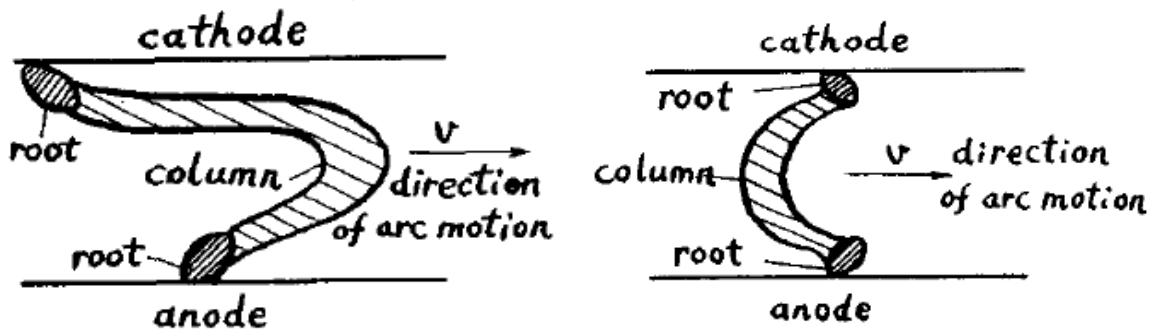


Figure 2.16 (à gauche) (extrait de C. Lichun *et al.*) : représentation schématique de l'arc quand les pieds sont freinés par la couche d'oxyde.

Figure 2.17 (à droite) (extrait de C. Lichun *et al.*) : représentation schématique de l'arc quand les électrodes ont été nettoyées par plusieurs passages de l'arc.

Quand la pression diminue, le mouvement de l'arc se trouve modifié avec notamment la possibilité d'observer un déplacement allant à l'inverse des forces de Laplace. On parle de mouvement rétrograde. Ce type de mouvement apparaît vers des valeurs de la pression de l'ordre de quelques dizaines de hectopascals²⁷ même si certains auteurs ont observé un tel mode de déplacement pour des pressions proches de la pression atmosphérique²⁸. Une littérature très riche^{29, 30, 31} concerne ce type de mouvement sans que pour autant qu'une théorie soit actuellement complètement admise. L'étude de ce type de mouvement ne fait pas l'objet de l'étude que nous avons menée. En revanche, nous nous sommes quand même intéressés au déplacement de l'arc pour des pressions inférieures aux pressions aéronautiques (nous sommes descendus en dessous de ces pressions purement par curiosité). Pour la gamme de pression qui nous intéresse [100 – 1000] hPa, exception faite bien sûr de la pression atmosphérique nous n'avons pas trouvé une littérature très fournie. Les principaux travaux menés ont été effectués par Blix *et al.*³². Les auteurs se sont intéressés aussi bien au mouvement direct qu'au mouvement rétrograde. Concernant ce dernier, ils ont constaté

²⁶ A M Essiptchouk *et al.*, « A new formula for the rotational velocity of magnetically driven arcs », J. Phys. D: Appl. Phys. 33 (2000) 2591–2597

²⁷ A. E. Robson, «The motion of a low-pressure arc in a strong magnetic field», J. Phys. D. Appl. Phys., vol. 11, pp. 1917-1923, 1978.

²⁸ R. P. Carter *et al.*, «Arc motion reversal in crossed electric and magnetic fields in an argon atmosphere from 200 to 900 Torr», J. Appl. Phys., Vol. 44, No. 11, November 1973

²⁹ M. G. Drouet, « The physics of retrograde motion of the electric arc », Japanese Journal of applied physics, vol. 20, n°6, 1981.

³⁰ M. G. Drouet, «The Physics of the Retrograde Motion of the Electric Arc», IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. PS-13, NO. 5. OCTOBER 1985

³¹ B. Jüttner *et al.* ,«The retrograde motion of arc cathode spots in Vacuum », J. Phys. D: Appl. Phys. 33 (2000) 2025–2036.

³² Blix *et al.* « The Magnetic Deflection of short Arcs Rotating between Annular Electrodes above and below Atmospheric Pressure », AERONAUTICAL RESEARCH COUNCIL Current Papers, 1966

que dans l'air et l'azote, pour un champ magnétique donné, l'inversion du sens du mouvement de l'arc se produit à une pression d'autant plus faible que le courant d'arc était important et que, pour un courant d'arc donné, l'inversion se produit à une pression plus élevée lorsque l'intensité du champ magnétique est augmentée. Leurs résultats en accord avec d'autres résultats de la littérature ont mis en évidence une pression d'inversion de l'ordre de 100 à 200 mm Hg pour un courant de 10 A et un champ de l'ordre de 34 mT. Leurs résultats ont aussi montré que la diminution de la distance inter-électrodes augmente la valeur de la pression d'inversion. Trois exemples de résultats sont donnés : dans le cas d'électrodes en laiton sur les figures 2.18 et 2.19 et dans le cas d'électrodes en aluminium sur la figure 2.20. Sur ces figures, la vitesse de l'arc a été tracée en fonction du courant d'arc pour différentes valeurs de la pression.

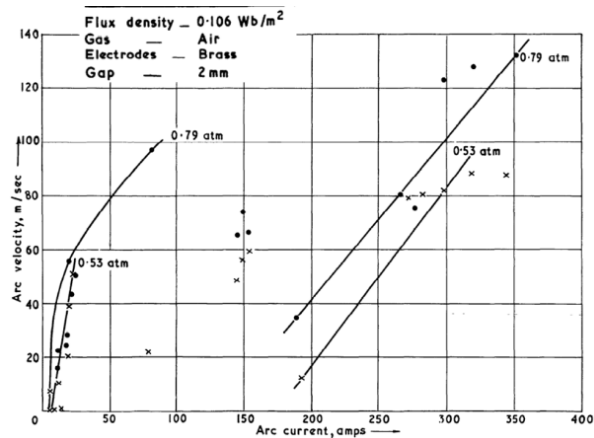
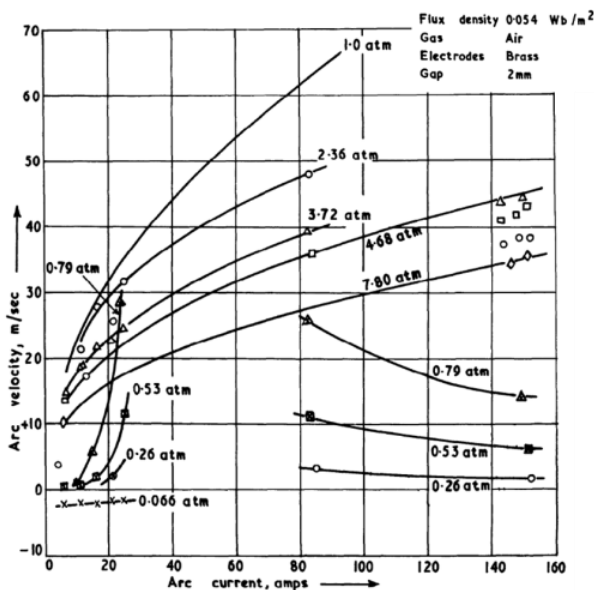


Figure 2.18 (extrait de Blix *et al.*) : vitesse en fonction de l'intensité du courant pour différentes valeurs de la pression pour des électrodes en laiton et une première valeur de l'induction magnétique.

Figure 2.19 (extrait de Blix *et al.*) : vitesse en fonction de l'intensité du courant pour différentes valeurs de la pression pour des électrodes en laiton et une seconde valeur de l'induction magnétique.

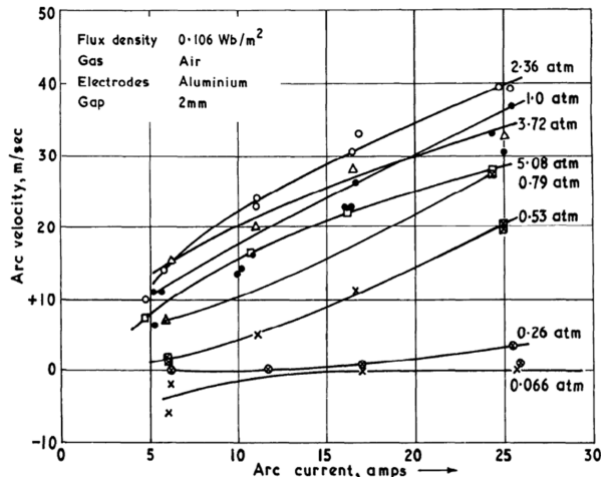


Figure 2.20 (extrait de Blix *et al.*) : vitesse de déplacement de l'arc en fonction de l'intensité du courant pour différentes valeurs de la pression pour des électrodes en aluminium.

Les auteurs ont observé qu'il existait une première région de transition, dans laquelle la vitesse augmentait rapidement avec la pression du gaz. Une autre transition avait lieu lorsque la vitesse chutait soudainement lors de l'augmentation du courant d'arc et continuait ensuite à augmenter avec le courant en partant d'un nouveau niveau de vitesse, plus faible. Ces transitions se caractérisaient au niveau de la structure de l'arc passant d'un arc « à faible densité de courant » à un arc à « forte densité de courant ».

2.2.3 Conclusion partielle

Comme nous avons tenté de le montrer, la bibliographie est très riche dans le domaine de la mise en mouvement de l'arc électrique sous l'action de son propre champ magnétique ou sous l'action d'un champ extérieur. Les résultats présentés peuvent paraître parfois contradictoires, certainement lié au fait que le nombre de paramètres influents est très important. Cependant ceci nous a donné conscience de la difficulté de prétendre réaliser une étude exhaustive sur un tel sujet. Cela nous a également permis de prendre conscience de la rigueur nécessaire à la description des différents comportements possibles de l'arc. Par exemple, lorsque les auteurs parlent de « sauts » de pied d'arc, il paraît difficile de concevoir ce genre de comportement sans une perte de continuité électrique, notamment au niveau du courant, et qui devrait conduire à l'extinction de l'arc. De même, il est parfois déroutant de constater des comportements antagonistes simplement en changeant le matériau d'électrode. Il y a certainement derrière ce changement de déplacement des paramètres physiques plus fins à prendre en compte et cela met en évidence la nécessité de décrire et explorer le plus de conditions expérimentales possibles afin d'être en mesure de cartographier les modes de déplacement des arcs en fonction notamment de la valeur du courant d'arc, de la pression environnante, du type de matériau d'électrode (matériau, état de surface, géométrie, état d'oxydation), de la distance entre ces électrodes (influence relative de la colonne d'arc et des pieds anodique et cathodique) et encore du type de gaz.

Dans toute la littérature que nous avons parcourue, nous n'avons trouvé que peu de travaux concernant des pressions entre 100 hPa et la pression atmosphérique. Cela est très certainement lié au manque d'intérêt applicatif qui perdurait jusqu'à aujourd'hui. Cependant, la volonté du milieu industriel aéronautique d'augmenter l'électrification des avions et hélicoptères depuis quelques années redonne un intérêt majeur à ce genre d'étude car il ne fait pas l'ombre d'un doute que la propagation d'un arc et donc la compréhension de ses modes de déplacements sera une des problématiques à solutionner de ce secteur.

2.3 Description du dispositif et de la procédure expérimentale

2.3.1 Description du dispositif.

Lors de cette étude nous avons utilisé la plateforme décrite au chapitre 1. La configuration des électrodes quant à elle consiste en deux barreaux (ou rails) parallèles en cuivre de section rectangulaire. Une photographie du système est donnée sur la figure 2.21. Les barreaux utilisés dans les essais sont en cuivre OFHC, mesurent 400 mm de long, 15 mm de large et 20 mm d'épaisseur. Les électrodes sont maintenues écartées parallèles par un système de fixation en isolant, nous avons dimensionné plusieurs systèmes de fixation pour avoir des distances inter-électrodes différentes (3, 6, 15 et 30 mm).

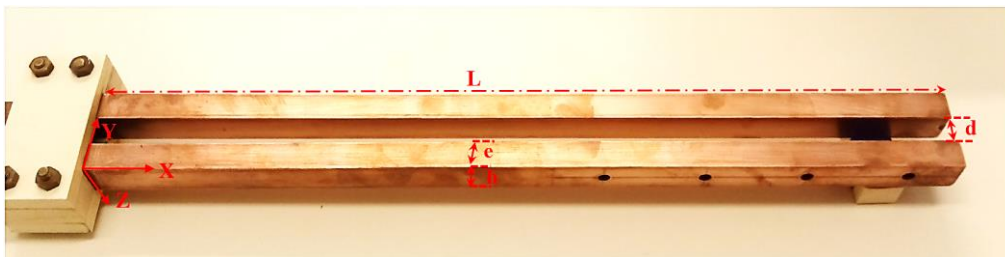


Figure 2.21 : photographie du dispositif expérimental composé de deux barreaux en parallèle, L : la longueur de la barre est d'environ 400mm. d : la distance inter-électrodes variable 3, 6, 15, 30 mm, e : largeur des électrodes (15mm), h : épaisseur des électrodes (20mm).

L'arc est amorcé avec un fil qui va exploser lors du passage du courant. Ce fil est en cuivre et a un diamètre de 200 μm . Il est placé au milieu du barreau. L'intensité du courant est déterminée par le choix de la résistance de charge. Les barreaux sont dimensionnés pour supporter des intensités de courant très élevées avec une résistance négligeable et sans avoir des dégradations importantes. Les deux barres comportent des trous de fixation sur la surface externe. Il est important de noter que dans chaque photographie présentée dans ce travail, l'arrivée de courant est à gauche de sorte que nous attendons en raison des forces de Lorentz un mouvement de gauche à droite. Il existe deux configurations possibles pour les barreaux, une configuration verticale et une configuration horizontale comme cela est décrit sur la figure 2.22.

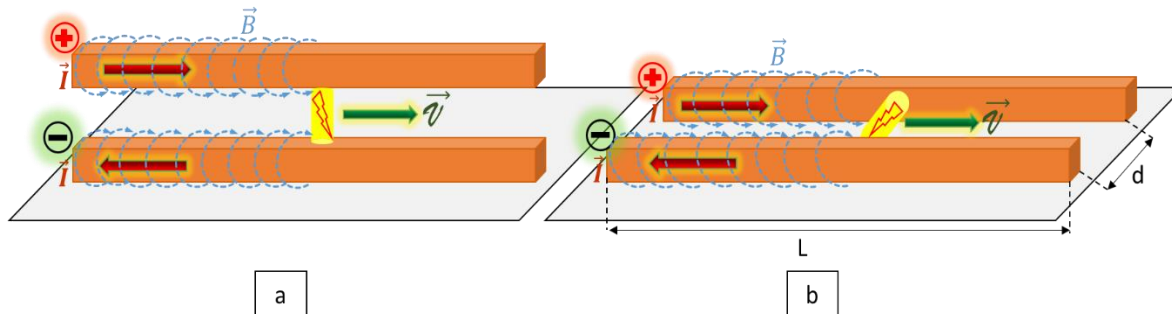


Figure 2.22 : schéma de deux configurations de barreaux
a : configuration verticale b : configuration horizontale.

Chaque configuration peut avoir deux positions de l’anode et de la cathode. On pourra avoir une configuration verticale avec l’anode en haut et la cathode en bas ou inversement. De même pour la configuration horizontale avec l’anode au premier plan et la cathode au second plan ou inversement.

Nous avons fait des essais préliminaires pour chacune des configurations pour les différentes positions des électrodes afin d’observer les différents déplacements de l’arc. Suite à ces essais nous avons choisi une configuration verticale pour les électrodes (anode en bas et cathode en haut) dans le but de limiter les instabilités thermiques de l’arc. Cette configuration présente le bénéfice de rendre l’observation plus aisée de la colonne d’arc et également des pieds d’arcs dont la position peut évoluer sur les électrodes et les rendre difficilement observables dans la configuration horizontale.

2.3.2 Description de la procédure expérimentale

La procédure expérimentale passe par les étapes suivantes :

- avant chaque essai nous nettoyons les deux électrodes de toutes les traces et dépôts causés par l’arc précédent avec du papier abrasif puis de l’ethanol 95% pour éliminer les poussières de cuivre liées à l’abrasion.
- Le fil permettant l’amorçage par explosion est positionné entre les barreaux au milieu.
- La consigne de tension de l’alimentation est ensuite réglée ainsi que la durée choisie pour l’impulsion de courant. Un choix judicieux de cette durée est nécessaire afin d’éviter que l’arc stagne trop longtemps au bout des barreaux.
- La mise du système de pompage en marche jusqu’à la pression souhaitée.
- Introduction des réglages de la caméra rapide.
- Déclenchement de l’essai avec un programme LabVIEW installé sur PC.

À la mise du circuit sous tension le courant traverse le fil qui rejoint les deux barreaux. Très rapidement (100 – 600 μ s) le fil explose et forme un arc électrique. Celui-ci se propage ensuite le long des barreaux jusqu’à ce que l’alimentation coupe le courant, ou que l’arc s’éteigne par lui-

même du fait d'une instabilité ou d'un allongement important de la colonne quand il arrive à l'extrémité des barreaux. On parlera alors d'auto-extinction (ou extinction naturelle). Ce cas n'est pas systématique, l'arc peut arriver au bout des barreaux et se maintenir jusqu'à la coupure de courant par l'alimentation. La géométrie des amenées de courant induit un champ magnétique B dans le plan perpendiculaire aux électrodes. Le sens de ce champ est tel que la force de Lorentz ($J \times B$) agissant sur la colonne d'arc le pousse le long des barreaux dans la direction opposée à l'arrivée du courant. Aucun autre champ externe n'est appliqué.

2.4 Résultats et discussion :

Nous avons réalisé divers essais et observations pour 4 valeurs de l'intensité du courant de court-circuit, $I_{CC} \approx 25$ A, 50 A, 100 A et 300 A, (ce qui conduit à des valeurs de l'intensité du courant d'arc légèrement inférieure), pour 4 valeurs de la distance inter-électrodes $d = 3, 6, 15$ et 30 mm et nous avons balayé la gamme de pression 1 hPa – 1000 hPa. La tension d'alimentation vaut 540 VDC.

Dans un premier temps, nous allons présenter les résultats obtenus pour une intensité du courant de l'ordre de 50 A (54 A plus précisément). La disposition de l'électrode est représentée sur la figure 2.22(a). Ceci permet de décrire de façon la plus illustrée possible les différents types de structure et de comportement que nous avons pu observer.

Dans un second temps nous proposons une synthèse des résultats obtenus pour les différentes valeurs de l'intensité et de la distance inter-électrodes. Ces résultats qualitatifs portent sur la structure et le type de déplacement observés.

2.4.1 Évolution du mode de déplacement et de la structure de l'arc en fonction de la pression pour une valeur de $I_{arc} \approx 50$ A.

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats concernant le mode de déplacement de l'arc, sa vitesse de déplacement ainsi que sa structure.

2.4.1.1 Observation du mouvement de l'arc pour $I_{arc} \approx 50$ A à pression atmosphérique.

Pour étudier l'influence de la pression sur le comportement de l'arc (son mouvement et sa structure), nous avons besoin d'une référence. Nous prendrons la pression atmosphérique. À cette pression, nous présentons sur la figure 2.23 la structure de l'arc et son mode de déplacement pour une valeur d'intensité de courant de 50 A et une distance inter-électrodes de 15 mm. L'anode est en bas et la cathode en haut. Sur la figure 2.24 nous présentons les signaux électriques correspondant (tension d'arc et intensité du courant d'arc). Les instants de prise des images 1 à 5 sont reportés sur la figure 2.24.

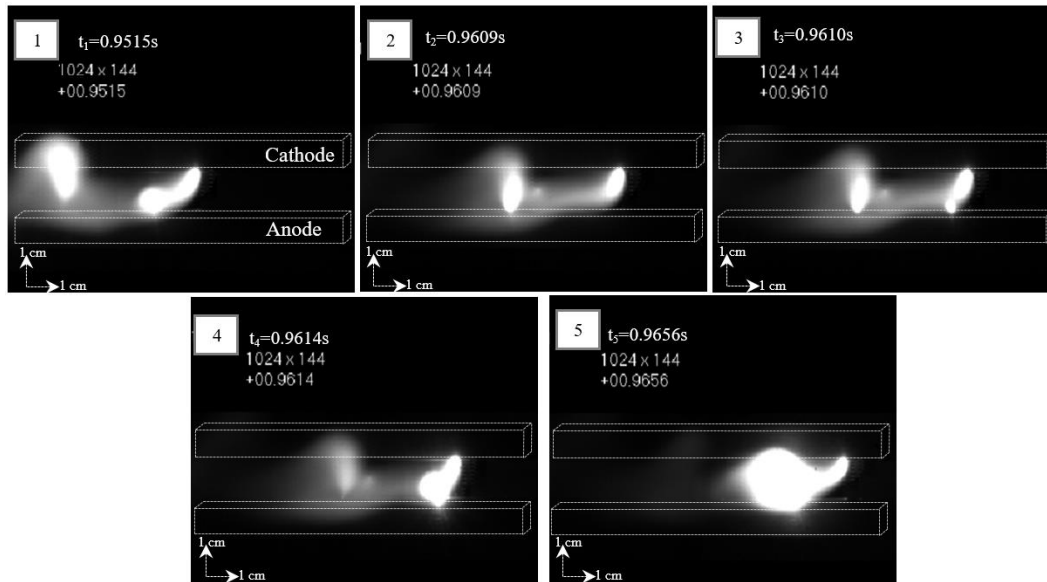


Figure 2.23 : déplacement de l'arc entre les deux barreaux en cuivre.

Conditions expérimentales : air - $P = 1000$ hPa, distance inter-électrodes $d = 15$ mm. Réglages de la caméra : vitesse de la caméra : 10000 i/s, temps de pose : 100 μ s, taille de l'image en pixels : 1024 x 144.

On constate que le pied cathodique se déplace de façon continue sur la cathode. Il est en avance sur le pied anodique, et nous n'avons pas observé que la colonne d'arc devançait le pied cathodique. Dans un premier temps le pied anodique est fixe (entre l'image 1 et l'image 2). Dans les conditions de cette expérience le pied anodique est resté fixe pendant plusieurs dizaines de millisecondes. Durant cette période la colonne d'arc s'allonge et ceci s'accompagne logiquement d'une augmentation progressive de la tension d'arc de 68 à 116 V en environ 9,4 ms. L'image 3 met en évidence l'apparition d'un second pied anodique en « parallèle » avec le premier. Cette brutale diminution de la longueur colonne d'arc s'accompagne d'une chute de la tension d'arc autour de 50 V en 50 μ s et d'une augmentation du courant d'environ 4 A. Ensuite sur l'image 4, le premier pied anodique a presque entièrement disparu. La tension d'arc a encore diminué. Sur l'image 5, le pied cathodique a repris son déplacement continu et la tension recommence à augmenter de façon progressive. La longueur du saut correspond à la valeur de la chute : plus le saut du pied anodique est long, plus la chute de tension d'arc est grande.

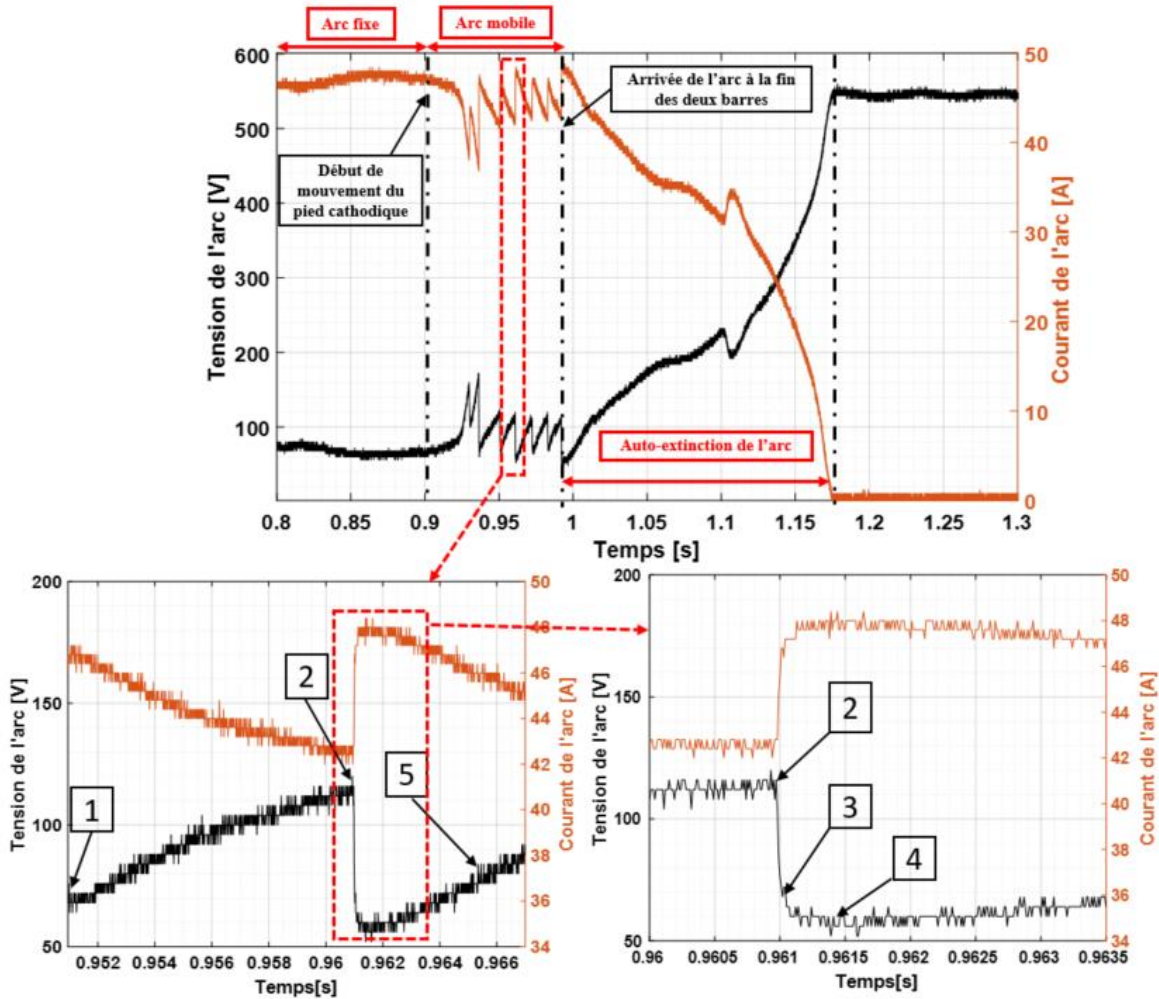


Figure 2.24 : évolution de la tension d'arc (courbe noire, axe gauche) et de l'intensité du courant d'arc (courbe orange, axe droit) pour l'arc considéré sur la figure 2.23. Les nombres correspondent aux photographies de la figure 2.23.

2.4.1.2 Observation du déplacement de l'arc : $I \approx 50 \text{ A}$, $d = 15 \text{ mm}$ et P dans la plage $[150 - 1000] \text{ hPa}$

À la pression atmosphérique et jusqu'à 150 hPa, il a été observé que le pied cathodique de l'arc avait un mouvement continu sur la surface de l'électrode et que le mouvement du pied anodique est une succession de périodes de stagnation (le pied anodique est attaché à un point fixe) et de «sauts». Le pied anodique reste en « arrière » du pied cathodique et le déplacement se déroule selon les étapes décrites précédemment. De plus, dans ces conditions de pression, comme précédemment, l'arc électrique va de gauche à droite dans le sens des forces de Lorentz.

2.4.1.3 *Observation du déplacement de l'arc : $I \approx 50$ A, $d = 15$ mm et P dans la plage $[150 \approx 100]$ hPa*

Dans cette plage de pression on a observé un changement de mode déplacement du pied anodique : il se déplace non seulement avec des sauts mais aussi d'une façon continue le long du barreau. Ceci est montré sur la figure 2.25. Sur cette figure il s'agit d'une sélection d'images prises en cinématographie rapide (5000 i/s avec un temps de pose de 50 μ s) qui illustre un déplacement typique d'un arc électrique sur un barreau à une pression de 150 hPa et une distance inter-électrodes de 15 mm, une intensité de courant de court-circuit de l'ordre de 50 A dans une configuration horizontale des électrodes, l'anode en bas et la cathode au-dessus. Sur la figure 2.26 on a représenté l'évolution de la tension d'arc ainsi que de l'intensité du courant d'arc au cours de ce déplacement. Là encore, les instants des prises d'image sont précisés sur la figure. Par exemple, entre les instants t_1 et t_2 le pied anodique s'est déplacé par saut. Ceci est confirmé par la mesure l'évolution de la tension d'arc. Par ailleurs, entre les instants t_3 et t_2 le pied anodique présente un déplacement en mode continue.

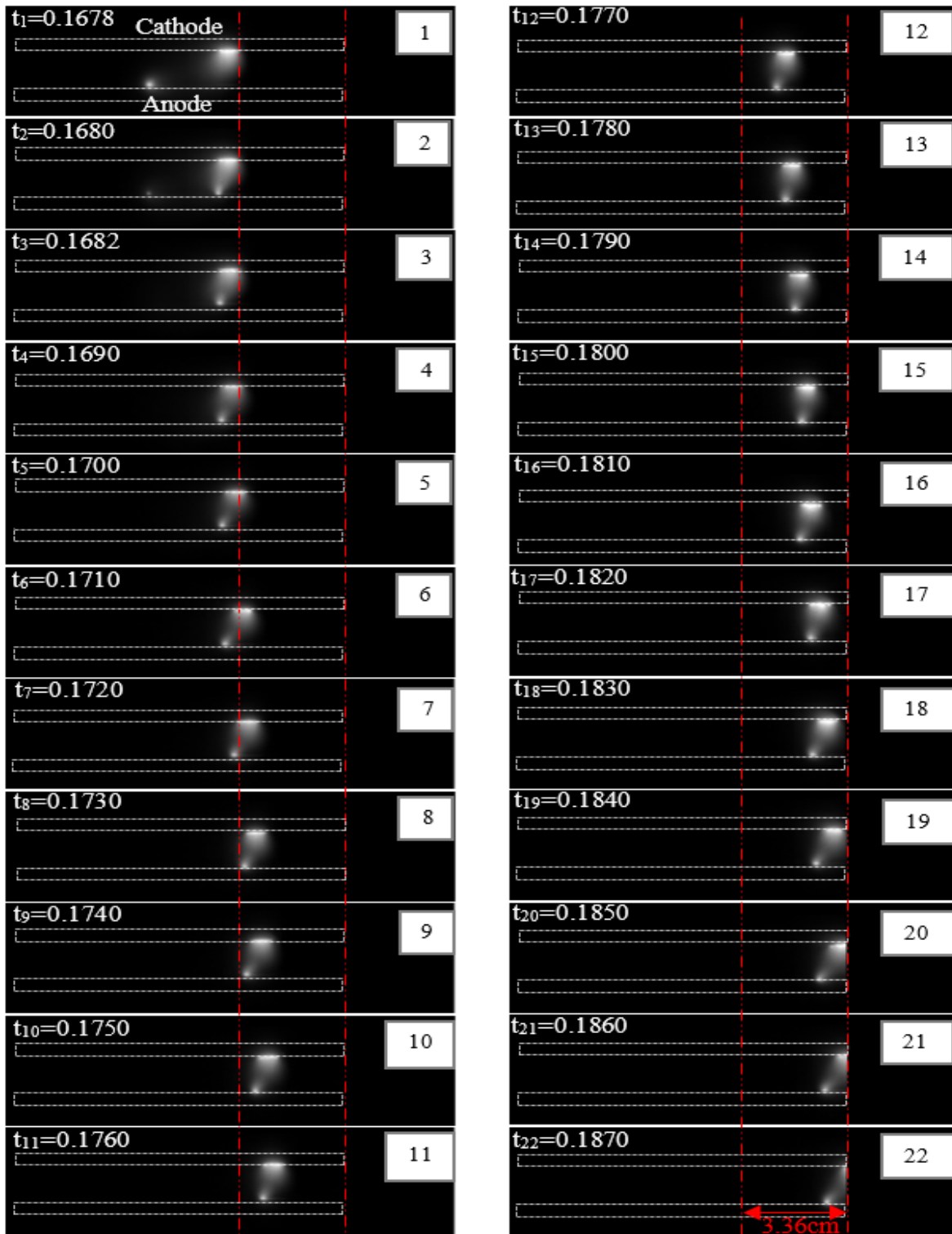


Figure 2.25 : déplacement de l'arc entre les deux barreaux en cuivre.

Conditions expérimentales : air - $P = 150$ hPa, distance inter-électrodes $d = 15$ mm.

Réglages de la caméra : vitesse de la caméra : 5000 i/s, temps de pose : 50 μ s, taille de l'image en pixels : 1024x1024.

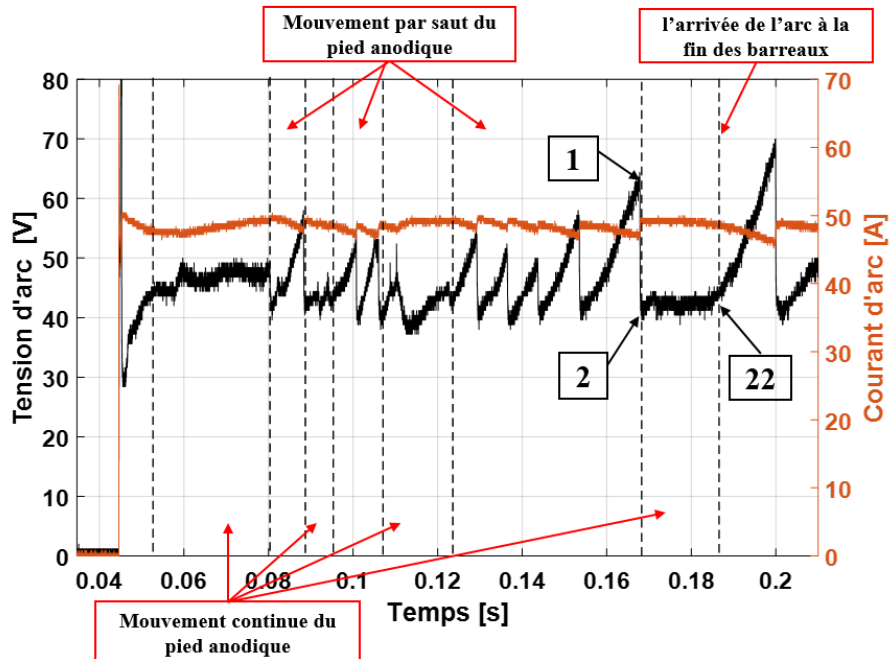


Figure 2.26 : évolution de la tension d'arc (courbe noire, axe gauche) et de l'intensité du courant d'arc (courbe orange, axe droit) pour l'arc considéré sur la figure 2.25.

Dans ces conditions, les sauts du pied anodique sont accompagnés par des chutes de tension instantanées maximales de 23 V et des pics de courant de 2 A. Ces chutes de tension sont plus faibles à cette pression qu'à des pressions plus élevées. Pour cette pression on a pu observer souvent un attachement à la cathode sous la forme de multi spots qui apparaissent et disparaissent très rapidement d'un instant à un autre (par exemple à t_{17}). Ces spots sont très proches les uns des autres. On observe le pied cathodique sous forme un peu diffuse, alors que le pied anodique est accroché par un seul grand spot. L'extension de la zone de rattachement du pied cathodique varie durant le mouvement et s'étend approximativement sur 6mm à 10mm.

La réduction de la pression entre 150 et 100 hPa engendre une grande modification du mode de déplacement de l'arc, pour une pression de 150 hPa le mode de déplacement par saut du pied anodique est prépondérant avec des longueurs de saut pouvant atteindre 2,65 cm, pour une pression de 100 hPa le mode de déplacement continu du pied anodique est prépondérant. Sur l'ensemble du mouvement de l'arc, le pied anodique et le pied cathodique se déplacent d'une manière pratiquement toujours continue comme le montre l'essai présenté sur la figure 2.27 pour lequel on n'observe que deux sauts dont la longueur est inférieure à 5mm. Ces sauts ont lieu entre les instants $t_{14}-t_{15}$ d'une part et $t_{18}-t_{19}$ d'autre part (en jaune sur la figure). Les signaux électriques correspondant sont donnés sur la figure 2.28.

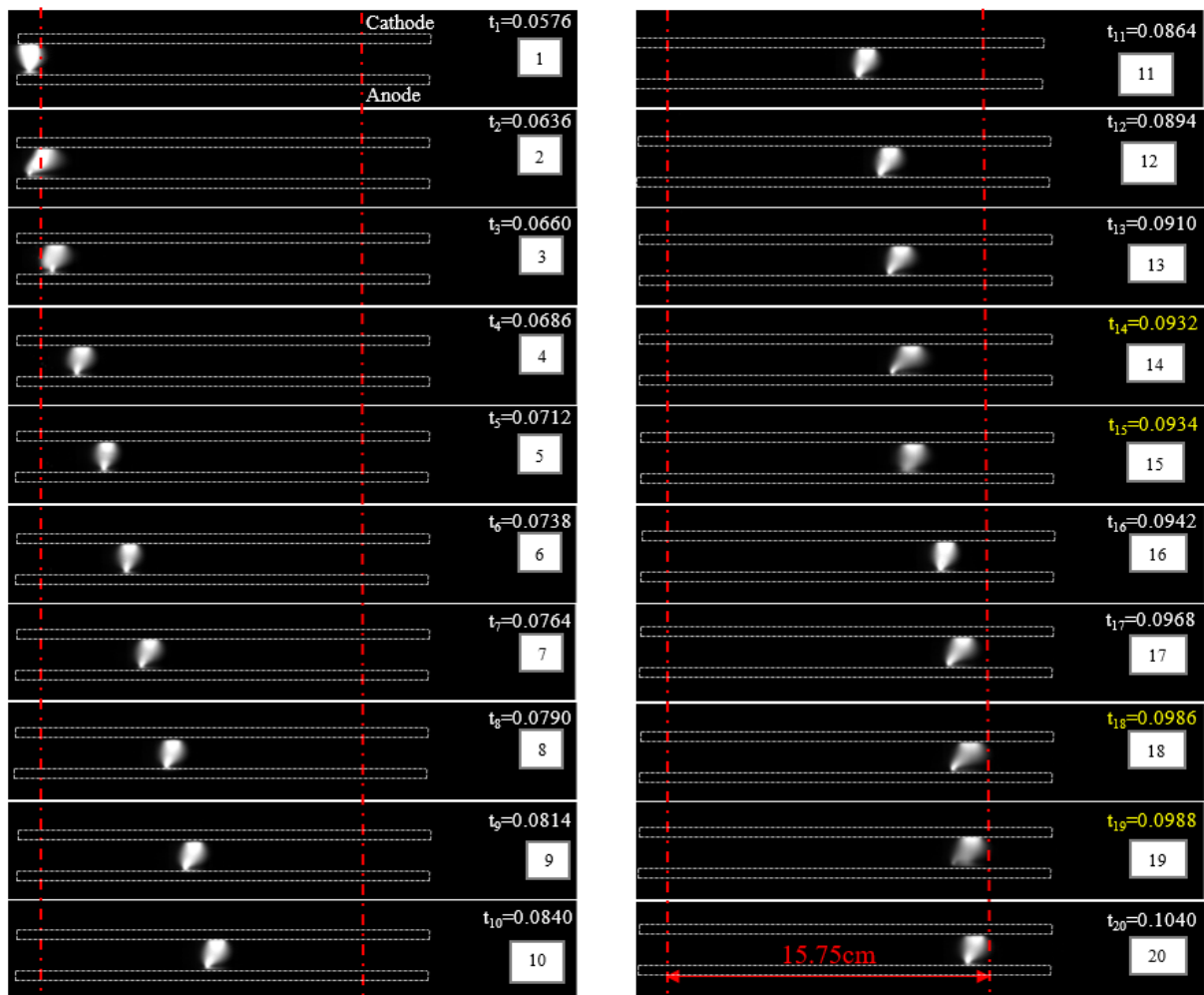


Figure 2.27 : déplacement de l'arc entre les deux barreaux en cuivre.
 Conditions expérimentales : air - $P = 100$ hPa, distance inter-électrodes $d = 15$ mm.
 Réglages de la caméra : vitesse de la caméra : 5000 i/s, temps de pose : 100 μ s,
 taille de l'image en pixels : 1024 x 400.

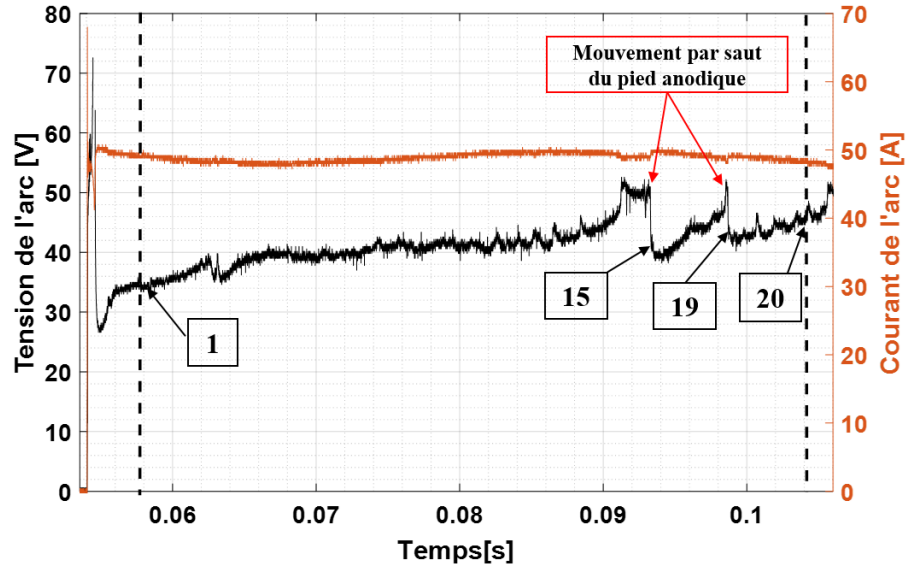


Figure 2.28 : évolution de la tension d'arc (courbe noire, axe gauche) et de l'intensité du courant d'arc (courbe orange, axe droit) pour l'arc considéré sur la figure 2.27. Les nombres encadrés correspondent aux numéros des images de la figure 2.27.

2.4.1.4 Observation du déplacement de l'arc : $I \approx 50 \text{ A}$, $d = 15 \text{ mm}$ et P dans la plage [10-100] hPa.

Dans ces nouvelles conditions, contrairement à ce qui a été observé avant, le mouvement du pied anodique de l'arc est intégralement continu (sans sauts). Comme précédemment, le pied anodique peut suivre le pied cathodique (ou est entraîné par le pied cathodique), avec de temps en temps un temps de stagnation sur l'anode, ou bien les deux pieds se déplacent ensemble l'un en face à l'autre. Dans ce cas la position du pied cathodique oscille autour d'une position moyenne qui est en face de la position du pied anodique. Un extrait de films réalisés en cinématographie rapide est donné sur la figure 2.29 dans ces conditions ainsi que les signaux électriques correspondant qui sont donnés sur la figure 2.30.

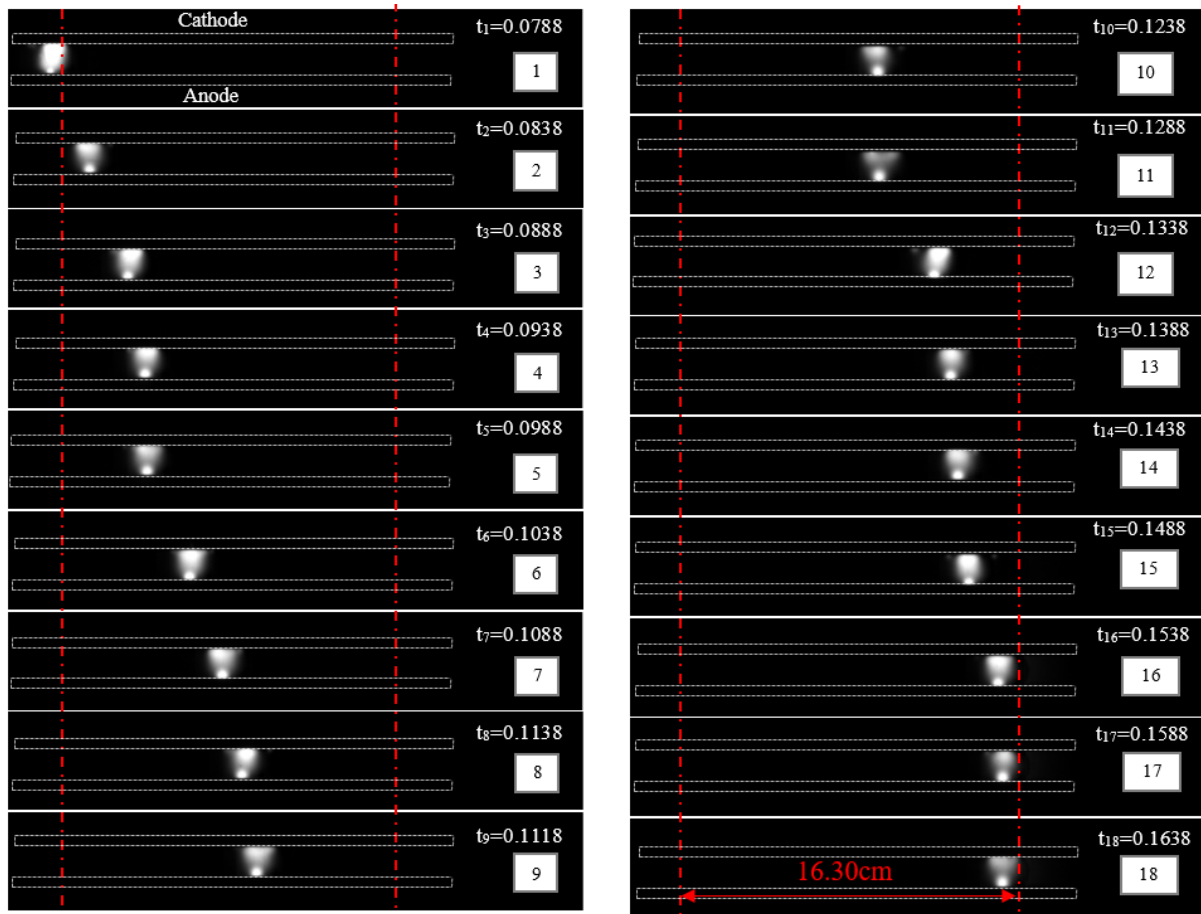


Figure 2.29 : déplacement de l'arc entre les deux barreaux en cuivre.
 Conditions expérimentales : air - $P = 10$ hPa, distance inter-électrodes $d = 15$ mm.
 Réglages de la caméra : vitesse de la caméra : 5000 i/s, temps de pose : 50 μ s,
 taille de l'image en pixels : 1024 x 1024.

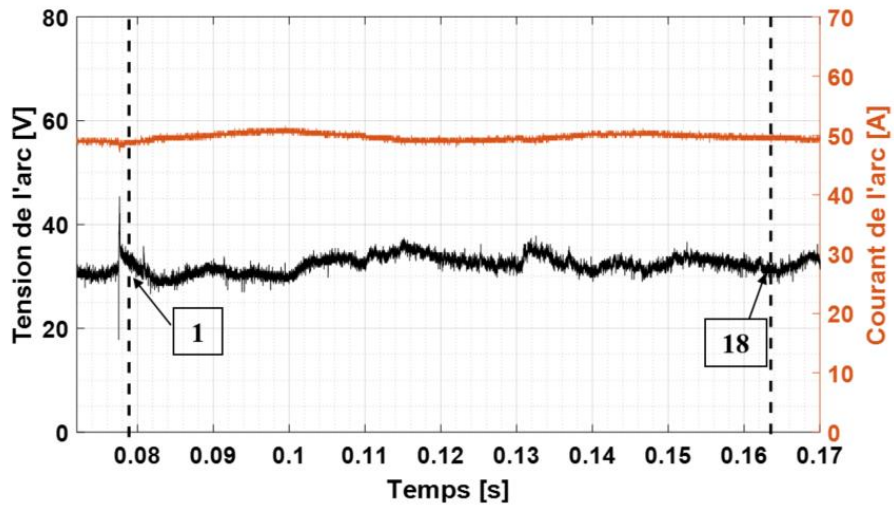


Figure 2.30 : évolution de la tension d'arc (courbe noire, axe gauche) et de l'intensité du courant d'arc (courbe orange, axe droit) pour l'arc considéré sur la figure 2.29. Les instants correspondent aux photographies de la figure 2.29.

2.4.1.5 Observation du déplacement de l'arc : $I \approx 50$ A, $d = 15$ mm et P dans la gamme [1-10] hPa

Dans ces nouvelles conditions de pression (en dessous de 10 hPa) et toujours pour une intensité du courant d'arc de l'ordre de 50 A le mode déplacement change singulièrement en deux modes différents :

- Le premier mode : Ceci est illustré sur la figure 2.31 pour une valeur de pression égale à 5 hPa. Dans ces conditions, une stagnation de l'arc a été observée aux alentours de sa position initiale. Ou l'arc se dirige à gauche ou l'arc se dirige à droite de cette position avec un déplacement dont l'amplitude maximale est de l'ordre de 3 cm. Les signaux électriques correspondant sont donnés sur la figure 2.32.
- Le deuxième mode : Ceci est illustré sur la figure 2.33 pour une valeur de pression égale à 1 hPa. Dans ces conditions, un mode de déplacement usuellement appelé « rétrograde », a été observé : il correspond à un déplacement dans le sens opposé au sens des forces de Lorentz (l'arrivée de courant est à gauche). Les signaux électriques correspondant sont donnés sur la figure 2.34.

À ces niveaux de pression on peut remarquer que le pied cathodique est constitué de multiples spots. Ces spots, à cette pression, sont plus éloignés les uns des autres qu'à pression plus élevée.

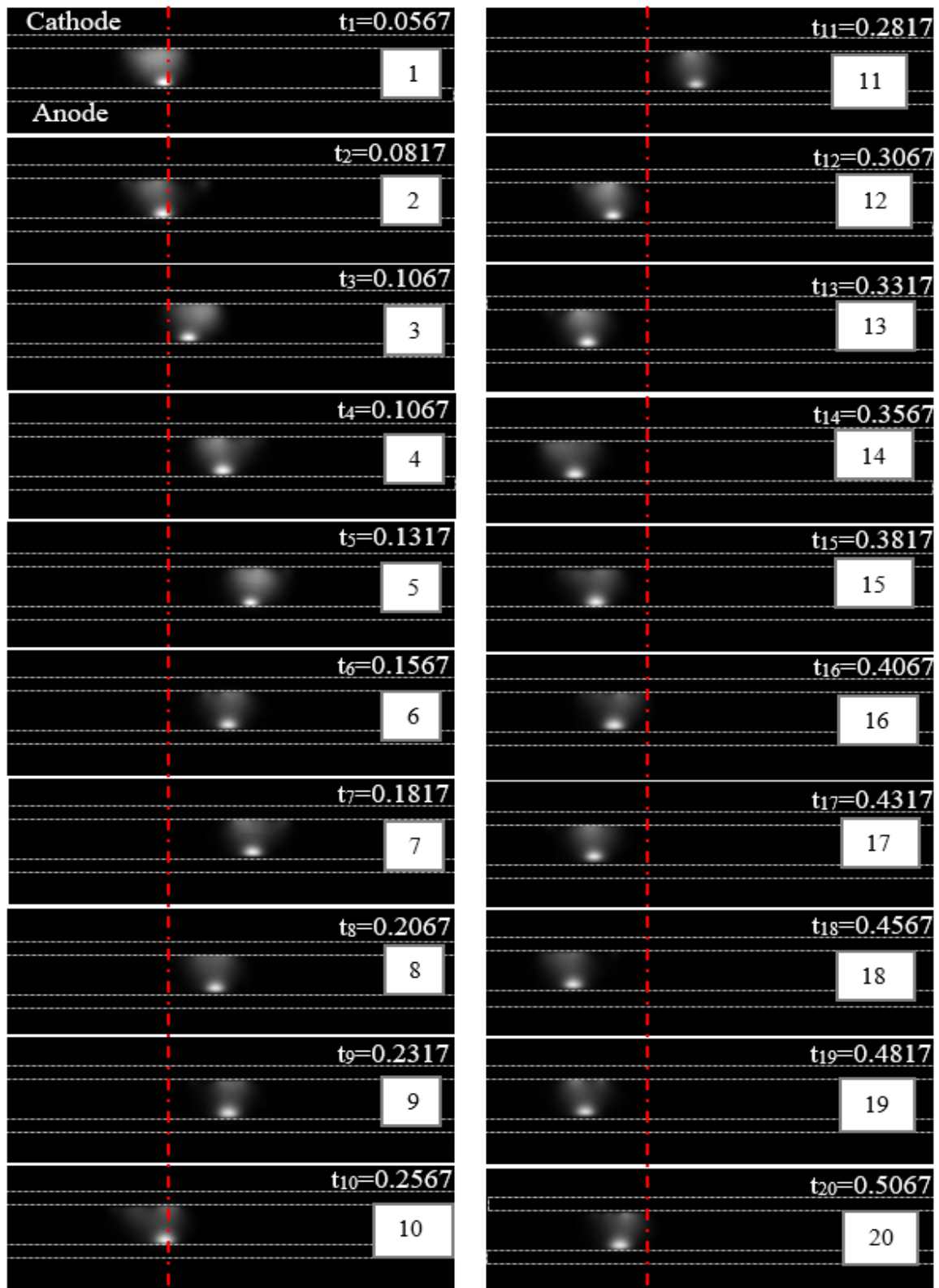


Figure 2.31 : déplacement de l'arc entre les deux barreaux en cuivre.
 Conditions expérimentales : Air - $P = 5$ hPa, distance inter-électrodes $d = 15$ mm.
 Réglages de la caméra : vitesse de la caméra : 5000 i/s, temps de pose : 50 μ s,
 taille de l'image en pixels : 1024 x 1024.

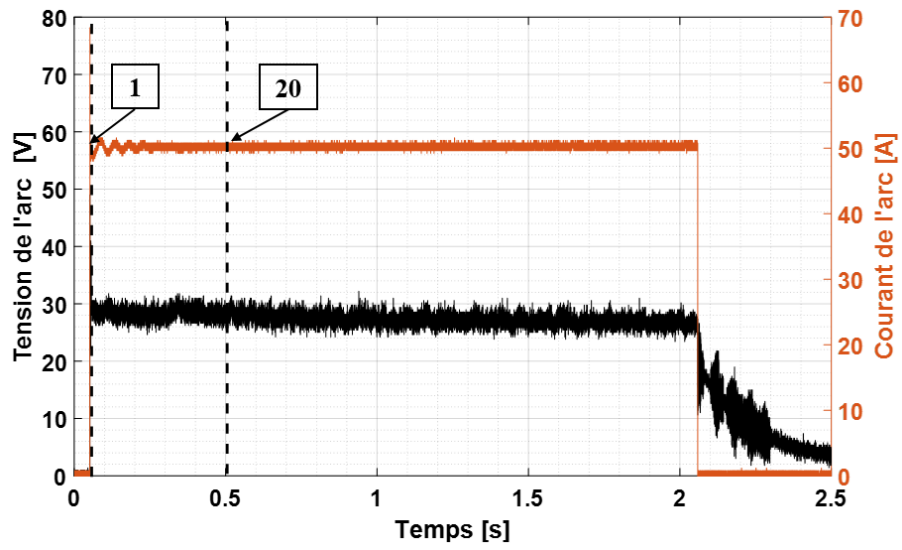


Figure 2.32 : évolution de la tension d'arc (courbe noire, axe gauche) et de l'intensité du courant d'arc (courbe orange, axe droit) pour l'arc considéré sur la figure 2.31. Les instants correspondent aux photographies de la figure 2.31.



Figure 2.33 : déplacement de l'arc entre les deux barreaux en cuivre.

Conditions expérimentales : Air - $P = 1$ hPa, distance inter-électrodes $d = 15$ mm.

Réglages de la caméra : vitesse de la caméra : 5000 i/s, temps de pose : 50 μ s, taille de l'image en pixels : 1024 x 1024.

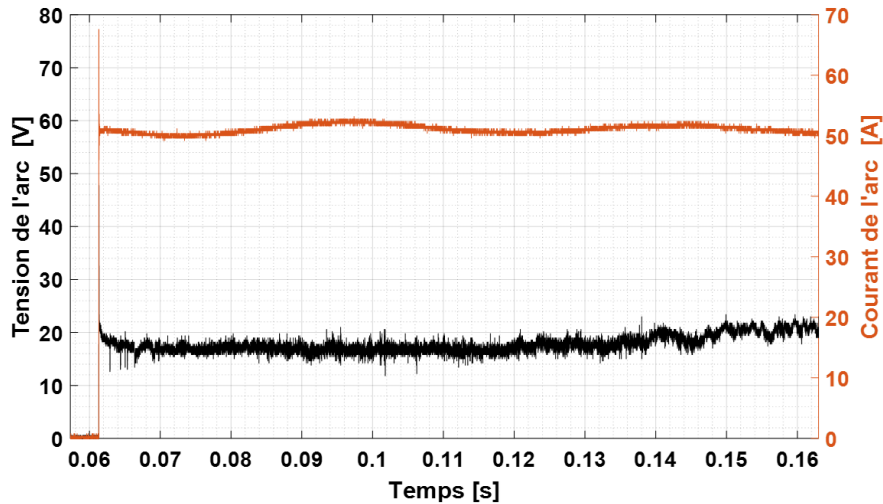


Figure 2.34 : évolution de la tension et le courant de l'arc correspondant aux images de la figure 2.33.

La figure 2.34 illustre l'évolution de la tension et du courant correspondant aux images de la figure 2.33 pour une pression de 1 hPa. Nous pouvons constater que durant le déplacement en mode continu de l'arc à cette pression les fluctuations de tension ne dépassent pas 10 V (pas d'augmentation de la tension liée à un allongement de « la colonne » car l'arc est diffus) et l'intensité du courant est lisse.

Quelques commentaires concernant la structure et la forme de l'arc dans ces conditions de pression :

Le comportement observé pour des intensités de courant plus fortes est légèrement différent de celui observé à 50 A. Sur la figure 2.35(a) qui correspond aux conditions expérimentales suivantes : $I_{CC} = 300$ A, $d = 30$ mm et $P = 0,6$ hPa on peut distinguer plusieurs spots cathodiques répartis sur une distance de plus de dix centimètres en surface de la cathode. La colonne d'arc « recouvre l'ensemble de ces spots. Le pied anodique est diffus. On peut distinguer deux halos lumineux à proximité de la surface de l'anode.

Sur la figure 2.35(b) qui correspond aux conditions expérimentales suivantes : $I_{CC} = 300$ A, $d = 15$ mm, $P = 0,6$ hPa, le pied cathodique de l'arc situé sur la droite est composé d'un ensemble de spots, certains de ces spots apparaissent et d'autres disparaissent régulièrement. Ils sont plus au moins proches les uns des autres, cela nous donne une impression que l'arc oscille autour d'un point. Par contre quelques spots cathodique (les 3 spots à gauche) qui s'écartent en donnant lieu à des nouveaux « arcs plus mobiles » qui se déplacent en mouvement rétrograde continu, une fois ces arcs arrivés à l'extrémité gauche des barreaux ils disparaissent et d'autres « prennent » le relais avec le même comportement.

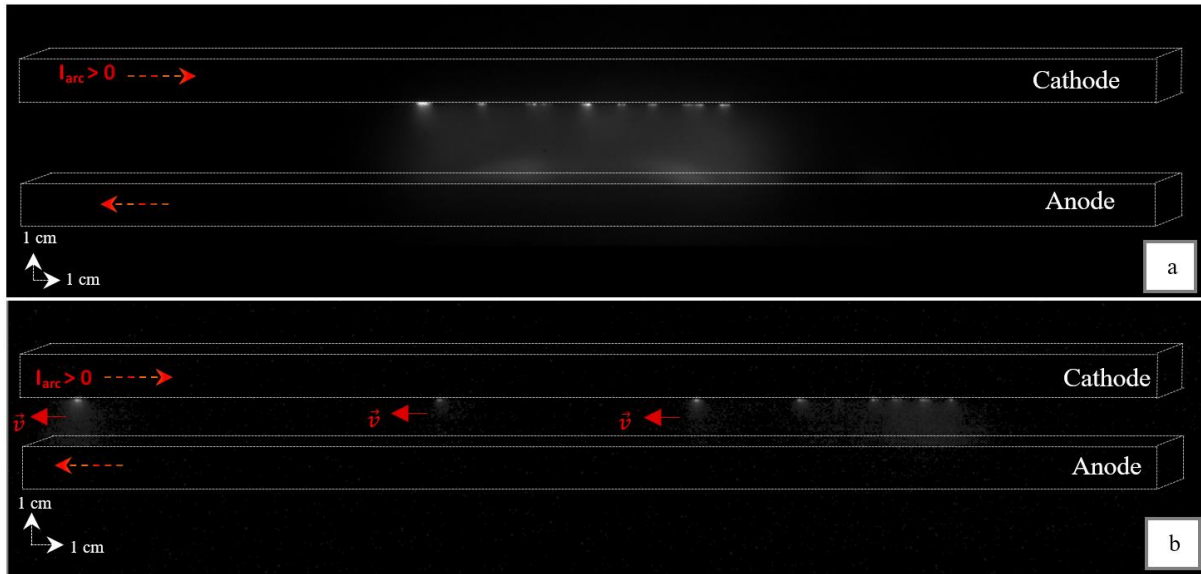


Figure 2.35(a) et (b) : photographies enregistrées en cinématographie rapide :
 (a) $I_{CC} = 300 \text{ A}$, $d = 30 \text{ mm}$ et $P = 0,7 \text{ hPa}$ – 5000 images/s, temps de pose $200 \mu\text{s}$.
 (b) $I_{CC} = 300 \text{ A}$, $d = 15 \text{ mm}$ et $P = 0,6 \text{ hPa}$ – 10000 images/s, temps de pose $3 \mu\text{s}$.

2.4.2 Synthèse qualitative sur le type de déplacement observé et la structure et le comportement des pieds d'arcs pour diverses conditions de courant d'arc et de distance inter-électrodes en fonction de la pression

2.4.2.1 Synthèse concernant le mode déplacement du pied anodique et cathodique de l'arc.

La figure 2.36 synthétise les observations concernant les modes de mouvement de l'arc en fonction de la pression, la distance inter-électrodes et pour différentes intensités du courant. On a distingué le mode de déplacement du pied cathodique et celui du pied anodique. Les modes de déplacement du pied cathodique et anodique de l'arc dépendent principalement du niveau de pression et de la distance inter-électrodes et dans une mesure moindre des différents niveaux de courant (un cas particulier pour une distance inter-électrodes réduite (3 mm) où le déplacement est globalement continu, sauf pour un courant de 300 A et une pression de 1000 hPa le pied anodique se déplace par saut et d'une façon continue). Sur l'ensemble des essais, le pied cathodique présente un mouvement continu dans toutes les conditions de tests, par contre le pied anodique se déplace par saut pour les pressions élevées et en mode continu à basse pression, la transition entre les deux modes de déplacement se fait dans une certaine plage de pression [100 - 200] hPa dans laquelle le pied anodique se déplace conjointement par sauts (dont les amplitudes diminuent quand la pression baisse) et d'une façon continue sur l'ensemble de son déplacement. Le changement se fait graduellement avec la pression. La pression pour laquelle le pied anodique change de mode de déplacement dépend de la distance inter-électrodes et un peu du niveau de courant.

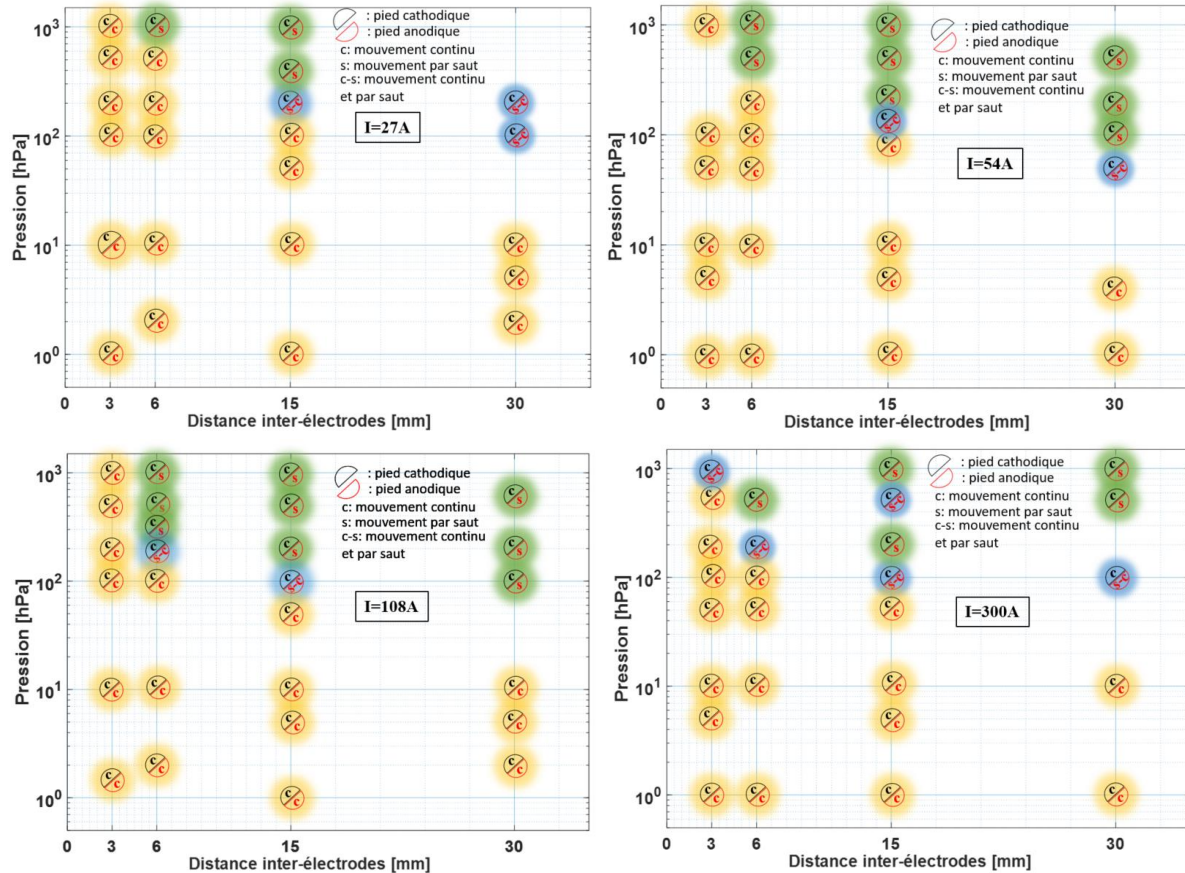


Figure 2.36 : les différents modes de déplacement des pieds cathodique et anodique de l’arc en fonction de la pression et de la distance inter-électrodes pour différentes valeurs de l’intensité du courant $I_{CC} = 27, 54, 108$ et 300 A.

2.4.2.2 Synthèse concernant la structure des pieds anodiques et cathodiques et le sens de déplacement de l’arc.

Les figures 2.37, 2.38, 2.39 et 2.40 synthétisent sous la forme de groupes de tableaux d’une part le sens de déplacement de l’arc et d’autre part la structure des pieds anodique et cathodique, en termes d’unicité du pied, de multiplicité des pieds d’arcs ou encore d’alternance de pied unique et multiples respectivement pour une intensité de courant d’environ 25A (tableau 2.37), 50 A (tableau 2.38), 100A (tableau 2.39) et 300 A (tableau 2.40). Chaque figure est composée de 4 tableaux correspondant à 4 valeurs de la distance inter-électrodes (30, 15, 6 et 3mm).

Pression en hPa	Direction de déplacement	Structure des pieds d'arc	
		Anode	Cathode
[100-1000]	→	Unique	Un seul pied
≈ 10 hPa	→	Multiplés pieds concentrés	Multiplés
≈ 5 hPa	Pas de déplacement moyen	Multiplés pieds concentrés	Multiplés pieds concentrés
≈ 2 hPa	Pas de déplacement moyen	Unique	Multiplés pieds concentrés

$I \approx 25 \text{ A}$ et $d = 30 \text{ mm}$

Pression en hPa	Direction de déplacement	Structure des pieds d'arc	
		Anode	Cathode
[250-1000]	→	Unique	Unique
[20-250]	→	Unique	Multiplés pieds concentrés
≈ 10 hPa	Pas de déplacement moyen	Multiplés / unique	Multiplés
< 10 hPa	←	Multiplés / unique	Multiplés

$I \approx 25 \text{ A}$ et $d = 15 \text{ mm}$

Pression en hPa	Direction de déplacement	Structure des pieds d'arc	
		Anode	Cathode
[100-1000]	→	Unique	Unique
≈ 10 hPa	Pas de déplacement moyen	Unique	Multiplés
≈ 2 hPa	←	Multiplés / unique	Multiplés / unique

$I \approx 25 \text{ A}$ et $d = 6 \text{ mm}$

Pression en hPa	Direction de déplacement	Structure des pieds d'arc	
		Anode	Cathode
[100-1000]	Pas de déplacement moyen	Unique	Unique
≈ 500 hPa	→	Unique	Unique
≈ 10 hPa	←	Unique	Unique
≈ 1.5 hPa	←	Multiplés / unique	Multiplés / unique

$I \approx 25 \text{ A}$ et $d = 3 \text{ mm}$

Figure 2.37 : sens du déplacement et structure des pieds d'arcs en fonction de la pression pour différentes valeurs de la distance inter-électrodes $I_{CC} \approx 25 \text{ A}$.

Pression en hPa	Direction de déplacement	Structure des pieds d'arc	
		Anode	Cathode
1000 hPa	Pas de déplacement moyen	Unique	Unique
[500-200]	→	Unique	Unique
[50-200]	→	Unique	Multiplés / unique
[10-200]	→	Multiplés / unique	Multiplés / unique
≈ 4 hPa	Pas de déplacement moyen	Multiplés / unique	Multiplés / unique
≈ 2 hPa	←	Unique	Multiplés / unique

$I \approx 50 \text{ A}$ et $d = 30 \text{ mm}$

Pression en hPa	Direction de déplacement	Structure des pieds d'arc	
		Anode	Cathode
[150-1000]	→	Unique	Unique
[10-150]	→	Unique	Multiplés / unique
≈ 5 hPa	Pas de déplacement moyen	Unique	Multiplés / unique
≈ 1 hPa	←	Multiplés	Multiplés

$I \approx 50 \text{ A}$ et $d = 15 \text{ mm}$

Pression en hPa	Direction de déplacement	Structure des pieds d'arc	
		Anode	Cathode
[50-1000]	→	Unique	Unique
[14-50]	→	Unique	Multiplés / unique
≈ 14 hPa	Pas de déplacement moyen	Unique	Multiplés / unique
≈ 10 hPa	←	Unique	Multiplés / unique
≈ 1 hPa	←	Multiplés / unique	Multiplés / unique

$I \approx 50 \text{ A}$ et $d = 6 \text{ mm}$

Pression en hPa	Direction de déplacement	Structure des pieds d'arc	
		Anode	Cathode
[100-1000]	→	Unique	Unique
[5-100]	→	Multiplés / unique	Multiplés / unique
≈ 3 hPa	←	Multiplés / unique	Multiplés / unique

$I \approx 50 \text{ A}$ et $d = 3 \text{ mm}$

Figure 2.38 : sens du déplacement et structure des pieds d'arcs en fonction de la pression pour différentes valeurs de la distance inter-électrodes $I_{CC} \approx 50 \text{ A}$.

Pression en hPa	Direction de déplacement	Structure des pieds d'arc	
		Anode	Cathode
[200-1000]	→	Unique	Unique
[10-200]	→	Unique	Multiples/unique
[5-10]	→	Multiples pieds concentrées	Multiples/unique
≈ 2 hPa	←	Unique	Multiples/unique

$I \approx 100 \text{ A}$ et $d = 30 \text{ mm}$

Pression en hPa	Direction de déplacement	Structure des pieds d'arc	
		Anode	Cathode
[200-1000]	→	Unique	Unique
[5-250]	→	Unique	Multiples/unique
≈ 5 hPa	Pas de déplacement moyen	Unique	Multiples/unique
≈ 1 hPa	←	Multiples	Multiples

$I \approx 100 \text{ A}$ et $d = 15 \text{ mm}$

Pression en hPa	Direction de déplacement	Structure des pieds d'arc	
		Anode	Cathode
[250-1000]	→	Unique	Unique
[100-250]	→	Unique	Multiples/unique
≈ 2 hPa	←	Multiples	Multiples

$I \approx 100 \text{ A}$ et $d = 6 \text{ mm}$

Pression en hPa	Direction de déplacement	Structure des pieds d'arc	
		Anode	Cathode
[500-1000]	→	Unique	Unique
[500-1000]	Pas de déplacement moyen	Unique	Unique
≈ 10 hPa	←	Unique	Unique
≈ 1 hPa	←	Multiples/unique	Multiples/unique

$I \approx 100 \text{ A}$ et $d = 3 \text{ mm}$

Figure 2.39 : sens du déplacement et structure des pieds d'arcs en fonction de la pression pour différentes valeurs de la distance inter-électrodes $I_{CC} \approx 100 \text{ A}$.

Pression en hPa	Direction de déplacement	Structure des pieds d'arc	
		Anode	Cathode
[100-1000]	→	Unique	Unique
[10-100]	→	Multiples pieds concentrées	Multiples/unique
[0.7-2]	→	Unique	Multiples
≈ 0.025 hPa	←	Unique	Multiples

$I \approx 300 \text{ A}$ et $d = 30 \text{ mm}$

Pression en hPa	Direction de déplacement	Structure des pieds d'arc	
		Anode	Cathode
[200-1000]	→	Unique	Unique
[5-200]	→	Multiples/unique	Multiples/unique
< 5 hPa	Pas de déplacement moyen	Multiples	Multiples

$I \approx 300 \text{ A}$ et $d = 15 \text{ mm}$

Pression en hPa	Direction de déplacement	Structure des pieds d'arc	
		Anode	Cathode
[200-1000]	→	Unique	Unique
[50-200]	→	Unique	Multiples/unique
[5-50]	→	Multiples/unique	Multiples/unique
[1-5]	Pas de déplacement moyen	Multiples	Multiples
0.03 hPa	→	Multiples	Multiples

$I \approx 300 \text{ A}$ et $d = 6 \text{ mm}$

Pression en hPa	Direction de déplacement	Structure des pieds d'arc	
		Anode	Cathode
[50-1000]	→	Unique	Unique
50 hPa	Pas de déplacement moyen	Multiples/unique	Multiples/unique
[5-50]	→	Multiples	Multiples
≈ 5 hPa	←	Multiples	Multiples
0.03 hPa	→	Multiples	Multiples

$I \approx 300 \text{ A}$ et $d = 3 \text{ mm}$

Figure 2.40 : sens du déplacement et structure des pieds d'arcs en fonction de la pression pour différentes valeurs de la distance inter-électrodes $I_{CC} \approx 300 \text{ A}$.

Commentaires généraux :

Comme prévu, autour de la pression atmosphérique l'arc se déplace dans le sens de la force de Lorentz et à basse pression il aura tendance à se déplacer dans le sens opposé (mouvement rétrograde). Ce changement de sens passe par une étape pour une certaine valeur de pression pour laquelle l'arc se maintient proche de sa position initiale.

Nous ne nous sommes pas intéressés avec précision à la pression à laquelle l'arc ne présente pas de déplacement moyen et c'est la raison pour laquelle dans les tableaux précédents il peut manquer certains cas correspondants.

À basse pression (inférieure à 1 hPa), on constate qu'il existe plusieurs colonnes d'arcs simultanément suite à la séparation des spots cathodiques.

2.4.3 Estimation du champ électrique dans la colonne d'arc

Dans ce paragraphe nous avons cherché à estimer la valeur du champ électrique dans la colonne d'arc et à estimer l'influence de la pression sur ces valeurs. Pour cela nous avons corrélié la longueur de colonne et la tension d'arc.

Il faut bien évidemment noter que la mesure de la longueur d'arc est entachée d'erreurs étant donné que nous ne disposons alors que d'une seule caméra et ne disposons donc que d'une projection de la colonne d'arc. Par ailleurs, il faut aussi avoir conscience que les mesures faites seront (en valeur relative) d'autant plus sujettes à caution que la valeur de la distance inter-électrodes sera faible. Ainsi nous n'avons gardé que les mesures obtenues pour $d = 15$ et 30 mm.

À partir des mesures de U_{arc} et de l nous avons calculé le champ électrique dans la colonne en utilisant l'expression simple usuelle :

$$E_{col} = \frac{U_{arc} - (V_A + V_C)}{l} \quad (2.3)$$

où E_{col} est le champ électrique moyen dans la colonne d'arc, U_{arc} est la tension d'arc, l est la longueur de la colonne de l'arc. V_A et V_C sont les chutes de tension anodique et cathodique.

A priori, ces valeurs dépendent de la pression. Nous avons ainsi utilisé les valeurs proposées dans Landfried *et al.*³³ qui sont rappelées dans le tableau 2.1. Il faut cependant noter que pour les longueurs de colonne d'arc importantes (plusieurs dizaines de millimètres par exemple) une approximation de la somme des chutes de tension anodique et cathodique à 20 V ne conduit pas à une modification importante des valeurs sur le champ électrique.

³³ R. Landfried *et al.*, « Parametric study of electric arcs in aeronautical condition of pressure », Eur . Phys. J. Appl. Phys. 67, 20802 (2014).

Tableau 2.1 : valeurs de V_A , V_C , V_A+V_C . Arc d'ouverture entre deux électrodes en cuivre, dans l'air pour diverses valeurs de la pression (Landfried *et al.*)

	10^4 Pa	$2,5 \cdot 10^4$ Pa	$5 \cdot 10^4$ Pa	10^5 Pa
V_A+V_C	[16,5 – 17,6] V	[16,3 – 17,5] V	[16,8 – 19,8] V	[17,9 – 21] V

La figure 2.41 présente les valeurs des champs moyens ainsi calculés dans la colonne d'arc. On a distingué champ « juste avant saut du pied anodique » et champ « juste après saut du pied anodique ».

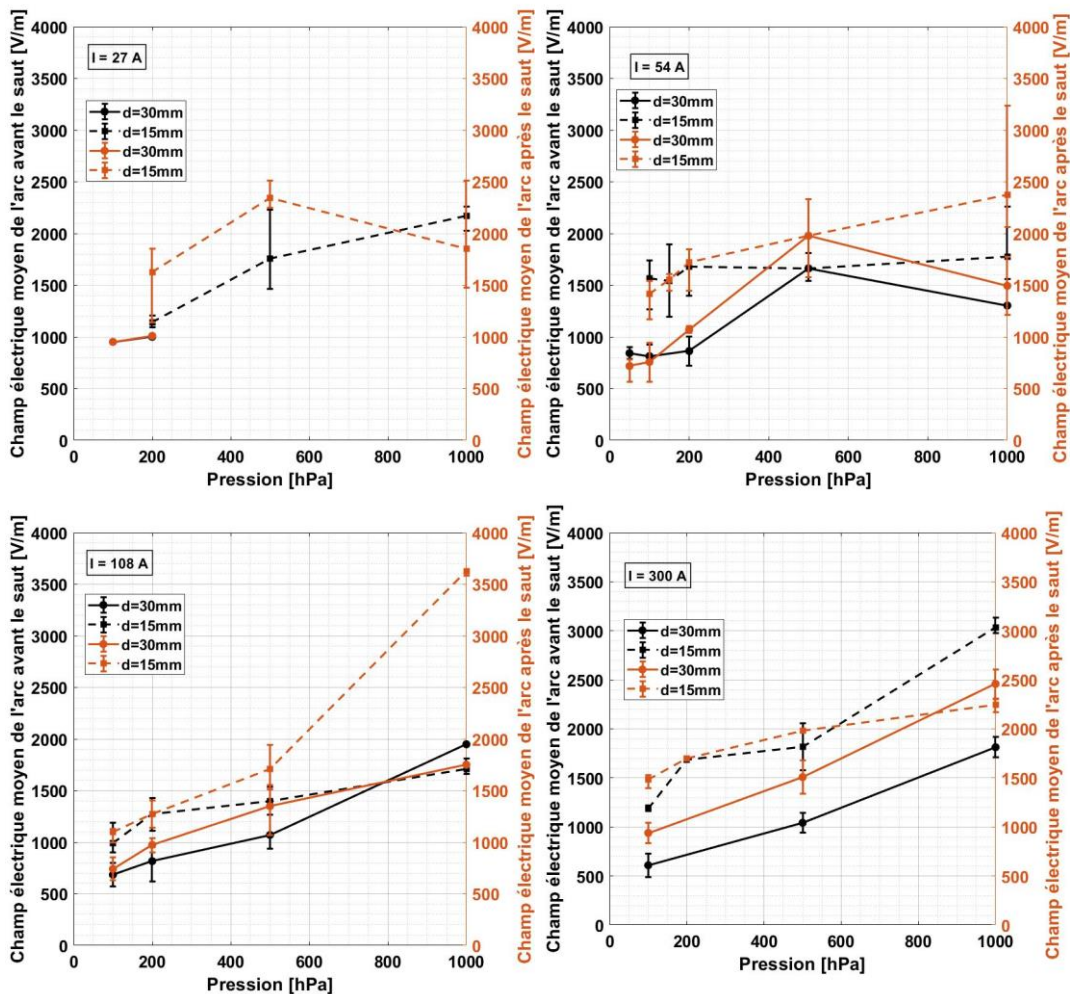


Figure 2.41 : champ électrique moyen dans la colonne d'arc en fonction de la pression pour différentes valeurs de l'intensité du courant.

On voit que pour les valeurs élevées du courant d'arc, le champ électrique est une fonction croissante de la pression. Ceci est moins vrai pour les courants plus faibles où on observe un maximum de champ pour une valeur de pression intermédiaire, 500 hPa. La distance inter-électrodes semble avoir une influence sur la valeurs du champ. On peut remarquer que les valeurs de champ obtenues pour $d = 15$ mm sont en général supérieures à celles obtenues à $d = 30$ mm.

D'autres travaux ont par ailleurs montré que le champ électrique pouvait atteindre des valeurs plus élevées pour des distances inter-électrodes inférieures à 8 mm.^{34 35}

On peut aussi observer que la variation du champ avant et après le saut est relativement peu visible. Seules certaines conditions mettent en évidence une variation significative des valeurs de champ.

2.4.4 Influence de la pression, de l'intensité du courant d'arc et de la distance inter-électrodes sur la vitesse de déplacement de l'arc.

Dans la suite nous présentons des résultats concernant la vitesse moyenne de déplacement de l'arc que nous avons défini de la façon suivante. Elle est calculée par rapport à la vitesse du pied cathodique comme suit :

- À partir de l'enregistrement de la caméra rapide nous mesurons la distance parcourue par le pied cathodique entre deux instants. L'instant initial correspond à l'apparition de l'arc sur les barreaux et l'instant final correspond à l'arrivée de l'arc à l'extrémité des barreaux, ou à l'extinction de l'arc par coupure de l'alimentation ou par allongement excessif de la colonne d'arc.
- On prend pour convention des valeurs de vitesses positives lorsque l'arc se déplace dans le sens des forces de Lorentz et négatives dans le sens opposé.
- Il faut bien préciser que ce sont des valeurs moyennes et que durant son mouvement, l'arc ne se déplace pas à des vitesses instantanées constantes.

Un exemple de vitesse de déplacement en fonction de la pression est donné sur la figure 2.42 pour un courant d'arc d'environ 30 A et pour une distance inter-électrodes de 15 mm. Plusieurs commentaires peuvent être faits : l'ordre de grandeur des vitesses est de 1 m/s. On observe la présence d'une pression pour laquelle la vitesse moyenne est nulle, pression que nous appelons « pression critique ». Dans notre exemple, elle vaut environ 6 hPa. Bien entendu, l'arc peut se déplacer à cette valeur de pression mais sa position moyenne est fixe. Il se peut que l'arc oscille autour de cette position dans une limite de deux ou trois centimètres.

³⁴ A. M. Gouega et al. "Study of the electrode gap influence on electrode erosion under the action of an electric arc" Eur. Phys Journal: Appl.Phys. Volume 11, Issue 2, August 2000 , pp. 111-12

³⁵ H. El Bayda " Étude du transfert d'énergie entre un arc de court-circuit et son environnement : application à l'Arc Tracking », Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, 2012

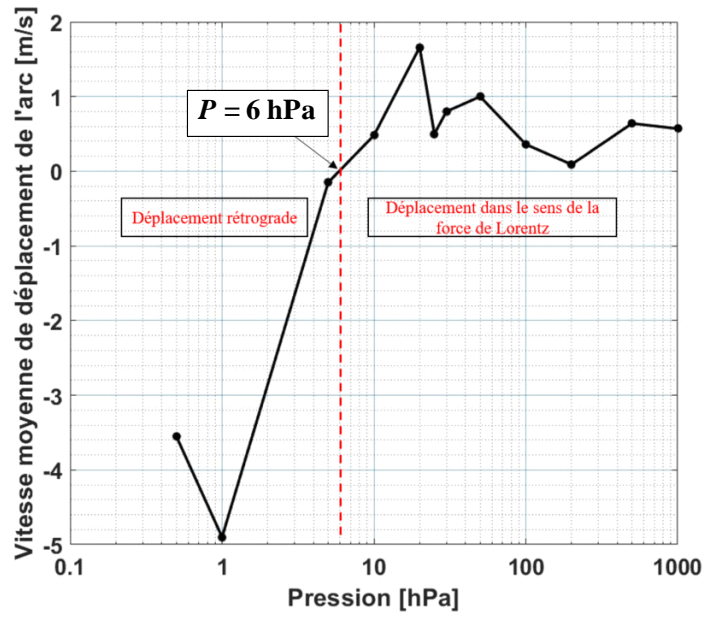


Figure 2.42 : vitesse moyenne de déplacement de l'arc en fonction de la pression pour $I_{CC} = 27$ A et $d = 15$ mm.

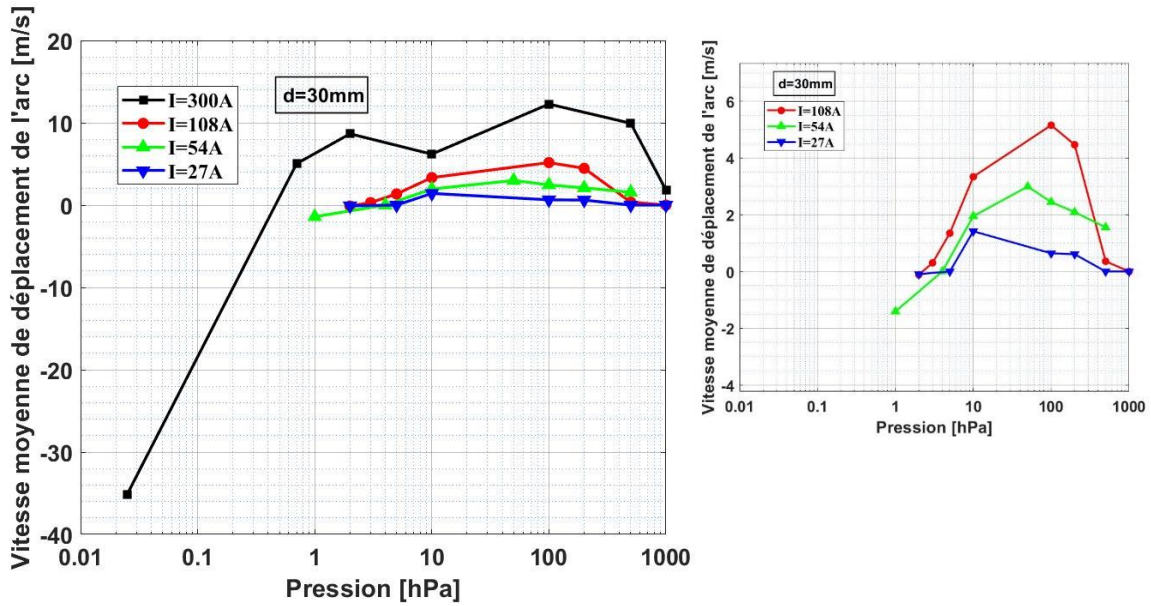


Figure 2.43 : vitesse moyenne de déplacement de l'arc en fonction de la pression pour $I_{CC} = 27, 54, 108, 300$ A et $d = 30$ mm.

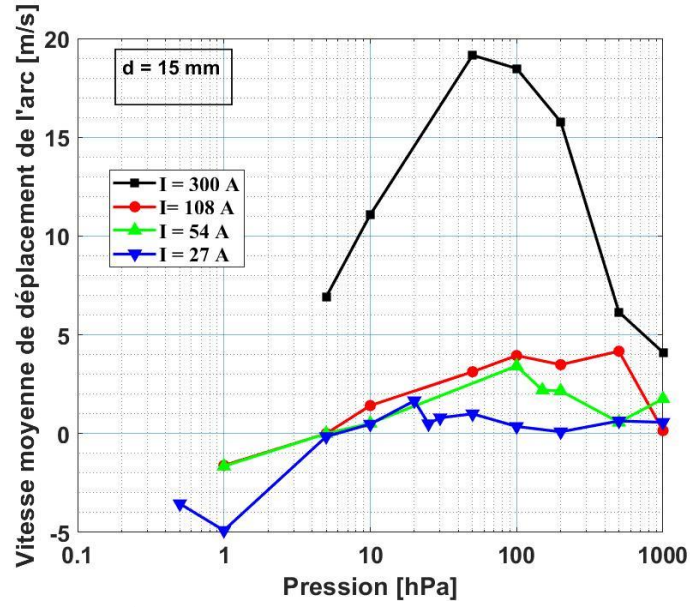


Figure 2.44 : vitesse moyenne de déplacement de l'arc en fonction de la pression pour $I_{CC} = 27, 54, 108, 300$ A et $d = 15$ mm.

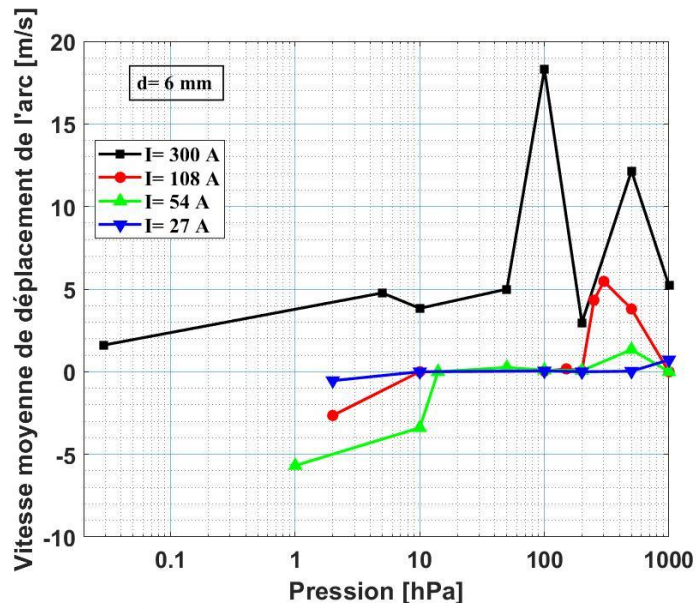


Figure 2.45 : vitesse moyenne de déplacement de l'arc en fonction de la pression pour $I_{CC} = 30, 54, 100, 300$ A et $d = 6$ mm

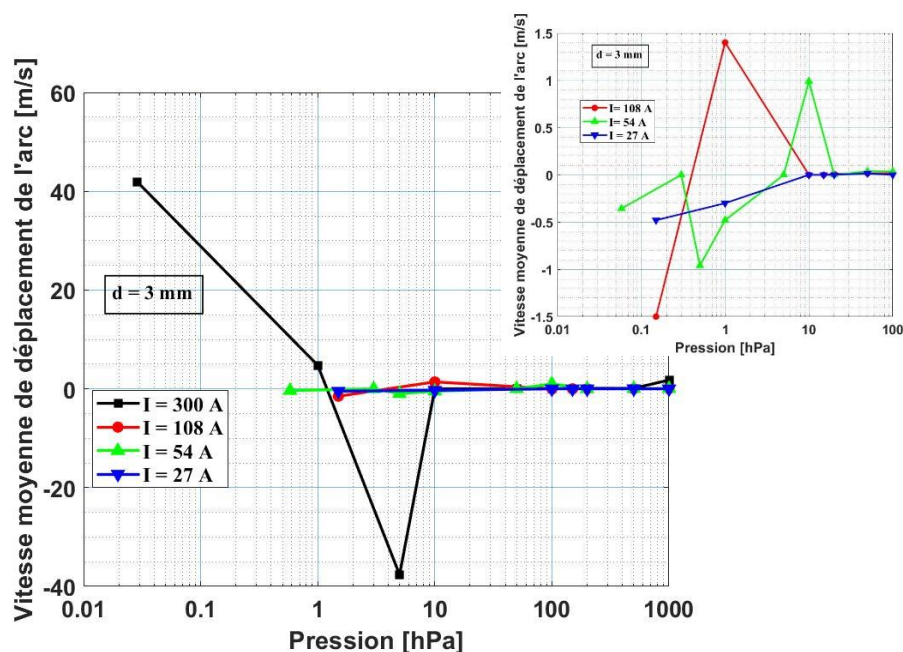


Figure 2.46 : vitesse moyenne de déplacement de l'arc en fonction de la pression pour $I_{CC} = 30, 54, 100, 300$ A et $d = 3$ mm.

Sur les figures 2.43 à 2.46, nous avons tracé la vitesse moyenne de l'arc en fonction de la pression pour plusieurs valeurs de l'intensité du courant de court-circuit : $I_{CC} = 27, 54, 108$ et 300 A et respectivement pour $d = 30, 15, 6$ et 3 mm.

Pour les distances inter-électrodes les plus grandes (30 et 15 mm), on observe que la vitesse passe par un maximum lorsque l'on descend la pression. Ce maximum existe quelle que soit la valeur du courant, même si l'effet est moins net pour les courants les moins élevés, et il correspond à une pression comprise entre quelques dizaines d'hectopascals et quelques centaines d'hectopascals. On voit aussi que la vitesse est d'autant plus importante que le courant est important, résultat logique puisque la force de Lorentz augmente avec le courant. L'existence d'un maximum peut être expliquée par la présence d'une force de frottement aérodynamique antagoniste au déplacement induit par la force de Lorentz, l'intensité de chacune de ces forces dépendant de la densité de l'air et des dimensions de la colonne qui elles-mêmes dépendent de la pression.

Lorsque l'on regarde la variation de la vitesse pour des distances inter-électrodes plus faibles ($d = 6$ et 3 mm), la présence d'un maximum est moins nette. Les vitesses atteintes sont plus faibles et leurs dépendances vis-à-vis de la pression sont moins franches, ce qui laisse penser que les interactions de l'arc avec les surfaces d'électrodes deviennent prépondérantes sur les effets de volume (dans le gaz). En fait, les jets de plasma, qui prennent naissance aux électrodes (lorsque nous observons la colonne d'arc, nous pouvons clairement distinguer deux jets de plasma) interagissent lorsque la distance inter-électrodes est petite. Pour des distances inter-électrodes plus importantes, on peut considérer que les jets de plasma provenant des électrodes n'interagissent pas de manière significative.

De manière générale, on peut dire que la pression critique se situe aux alentours de quelques hectopascals pour la majorité des distances inter-électrodes et courants considérés dans ce travail.

Toutefois, dans certaines conditions, notamment à 300 A, les variations de vitesses semblent être plus complexes : nous n'avons observé de mouvement rétrograde (= sens opposé au forces de Lorentz) que pour $d = 30$ mm et 3 mm. Pour cette dernière valeur de d , le déplacement revient même dans le sens « normal » des forces de Lorentz lorsque la pression descend sous 1 hPa, ce qui reste difficile à expliquer... On notera également que le mouvement rétrograde n'a pas été observé à 300 A pour $d = 15$ mm car l'arc étant tellement diffus, il était impossible de mesurer une vitesse moyenne pour des pressions inférieures à 5 hPa (voir figure 2.35). De même, il a été impossible de déterminer une vitesse pour ($I = 300$ A, $d = 6$ mm, $P < 5$ hPa). Seule une condition de basse pression a permis une mesure de la vitesse, il s'agit de $P = 0,3$ hPa. C'est l'occasion de signaler que les traits liant les différents points de mesures présentés ne jugent en rien de l'existence de points sur ces segments de droites.

2.4.5 Évolution des caractéristiques électriques moyennes de l'arc en fonction de différents paramètres : pression, distance inter-électrodes et intensité du courant.

L'objectif de cette partie est d'étudier l'évolution des valeurs moyennes de la tension d'arc, de la puissance dissipée (et aussi du courant) dans l'arc en fonction de la pression, du courant de court-circuit et de la distance inter-électrodes. Ces valeurs ont été calculées en ne prenant pas en compte les phases d'amorçage de l'arc et les phases d'extinction quand l'arc a atteint l'extrémité des barreaux, c'est-à-dire en ne considérant que la phase de mouvement de l'arc.

Sur la figure 2.47 on a tracé la tension moyenne et l'intensité moyenne du courant d'arc en fonction de la pression, pour différentes valeurs de l'intensité du courant de court-circuit 27, 54, 108, 300 A, ainsi que pour différentes distances inter-électrodes 3, 6, 15, 30 mm.

La figure 2.48 présente la puissance moyenne dissipée dans l'arc en fonction de la pression et de l'intensité du courant de court-circuit $I_{CC} = 27, 54, 108, 300$ A, pour différentes distance inter-électrodes $d = 3, 6, 15, \text{ et } 30$ mm.

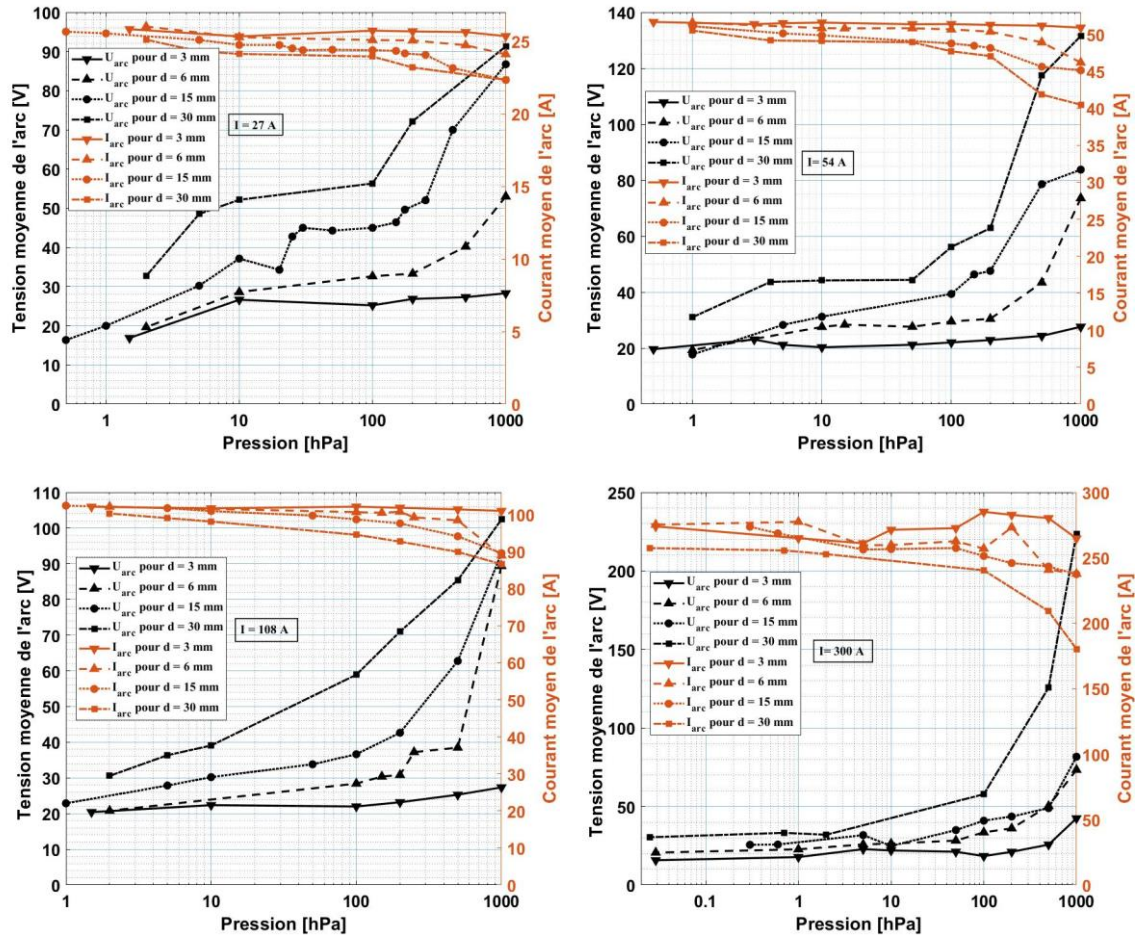


Figure 2.47 : Tension d'arc moyenne (courbe noire, axe à gauche) et intensité moyenne du courant dans l'arc (courbe orange, axe à droite) en fonction de la pression pour différentes valeurs de la distance inter-électrodes $d = 3, 6, 15,$ et 30 mm et différentes valeurs de l'intensité du courant de court-circuit $I_{cc} = 27$ A (en haut à gauche), $I_{cc} = 54$ A (en haut à droite), $I_{cc} = 100$ A (en bas à gauche) et $I_{cc} = 300$ A (en bas à droite).

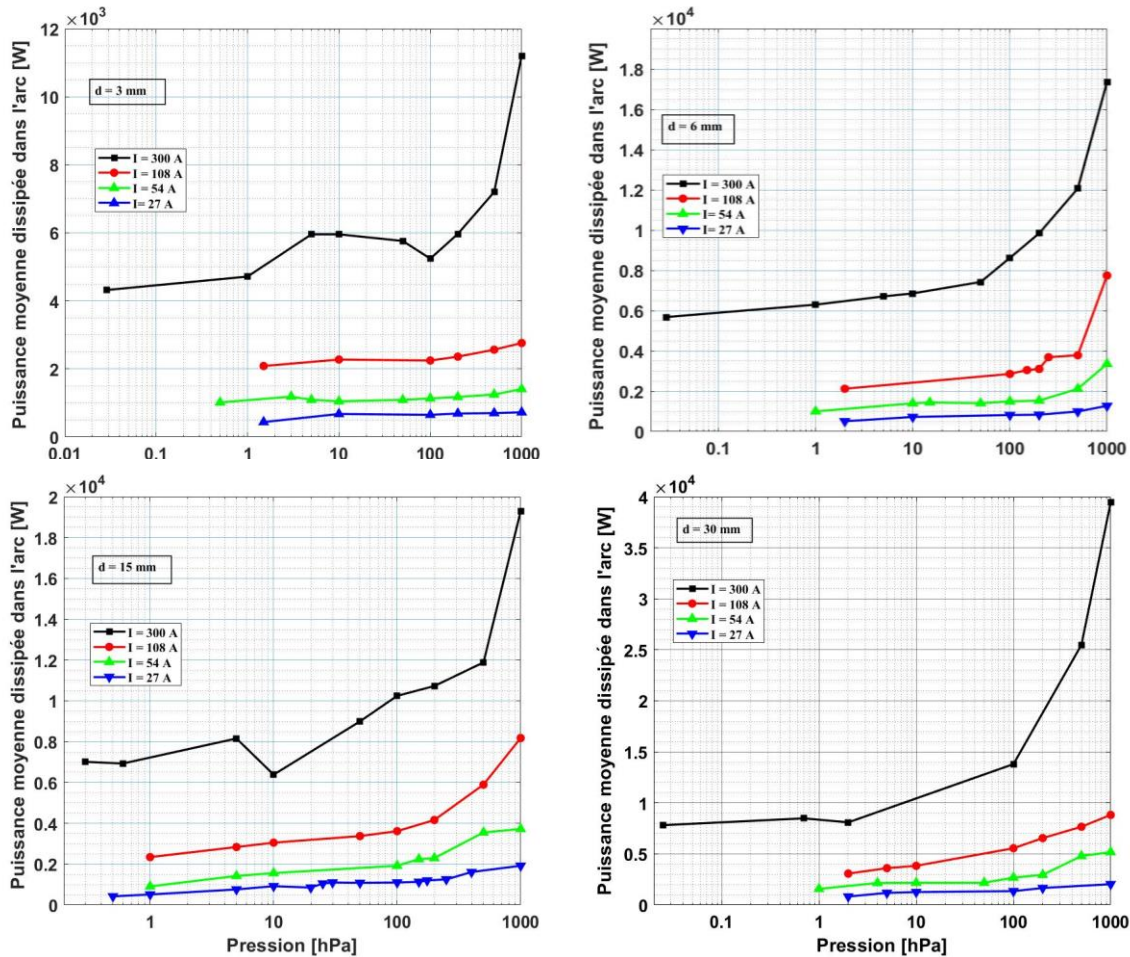


Figure 2.48 : puissance moyenne dissipée dans l'arc en fonction de la pression pour différentes valeurs de l'intensité du courant de court-circuit $I_{CC} = 27, 54, 108, 300$ A, pour différentes distances inter-électrodes : $d = 3$ mm en haut à gauche, $d = 6$ mm en haut à droite, $d = 15$ mm en bas à gauche et $d = 30$ mm en bas à droite.

Les résultats présentés montrent clairement que la tension d'arc augmente en fonction de la pression. On peut aussi remarquer que la tension moyenne, pour une distance inter-électrodes donnée ($d = 3, 6, 15,$ et 30 mm) est assez peu dépendante du courant (sauf aux fortes valeurs de la pression). Le fait que la tension croît avec la pression est certes lié à l'augmentation légère du champ électrique présentée sur la figure 2.41 mais est surtout la conséquence que l'allongement possible de la colonne d'arc est d'autant plus grand que la pression est importante.

À la pression atmosphérique l'arc présente un mode de déplacement par sauts, ce qui s'accompagne d'un allongement de la colonne d'arc. Ceci conduit à des écarts sur les valeurs moyennes de la tension d'arc entre les différentes valeurs de I_{CC} . Par exemple pour un courant de court-circuit de 300 A et une distance inter-électrodes de 30 mm, la tension moyenne d'arc arrive à 240 V. Cela est dû à une très forte distorsion de la colonne. Cette dernière diminue avec la pression : on peut voir que pour $d = 15$ mm où l'arc ne présente pas de distorsions importantes, la tension moyenne conserve une évolution identique pour toutes les valeurs de I_{CC} .

La puissance moyenne dissipée dans l'arc durant son déplacement entre les barreaux, à l'image de la tension, présente une évolution croissante en fonction de la pression et du courant de court-circuit pour les différentes distances inter-électrodes.

2.5 Conclusions

Dans ce chapitre nous avons étudié le déplacement d'un arc électrique entre deux barreaux parallèles sous l'action de son propre champ en régime DC. Certes, le choix de considérer des intensités de courant relativement faibles nous éloigne du domaine des applications telles que l'apparition d'un court-circuit entre deux barreaux. Cependant, ce choix a présenté l'avantage de pouvoir garder ce paramètre quasiment constant durant la durée de l'arc (dans une gamme certes restreinte), alors que l'emploi d'une intensité de courant d'arc nettement plus élevée (de l'ordre de quelques kA) n'aurait pu se faire (au laboratoire) que par une décharge capacitive et donc une intensité très variable au cours de l'arc.

Une grosse partie de l'étude présentée ici concerne l'observation du mode de déplacement de l'arc et de sa structure en fonction des différents paramètres (intensité du courant, distance entre les barreaux et pression). Plusieurs types de comportement ont été observés notamment au niveau du pied anodique qui peut, selon les circonstances, présenter un déplacement constitué de phases successives alternant temps de stagnation et sauts. Quand la pression diminue, le déplacement évolue vers un mode où les sauts peuvent coexister avec un déplacement continu. Finalement, le déplacement devient continu quand la pression diminue encore. Concernant le déplacement du pied cathodique nous n'avons observé qu'un déplacement continu. Plusieurs types de structure de pied d'arc ont aussi été observés en fonction de la valeur de la pression, de l'intensité du courant d'arc et de la distance inter-électrodes, allant du pied d'arc unique (à pression atmosphérique) et évoluant vers des pieds multiples concentrés ou diffus notamment quand la pression diminue.

Une deuxième partie de ce chapitre a consisté à essayer d'évaluer le champ électrique dans l'arc. Ceci passe par l'estimation de la longueur de la colonne, démarche d'autant plus « compliquée » que la distance inter-électrodes sera faible. Une troisième partie a concerné l'estimation de la vitesse de déplacement. Le choix de définir une vitesse de déplacement moyenne a été fait et l'influence de la pression sur cette vitesse a été mise en évidence en faisant apparaître une pression pour laquelle la vitesse présente une valeur maximale. Par ailleurs aux faibles valeurs de la pression, il a été parfois difficile, notamment quand l'arc est constitué d'une multitude de pieds d'arcs diffus sur toute l'électrode, de définir une vitesse. Enfin, l'influence des paramètres expérimentaux sur les grandeurs électriques moyennes (tension, puissance) a été étudiée.

Chapitre 3 :
Stabilité, extension spatiale et extinction d'un arc
électrique en conditions de pressions aéronautiques
sous une tension de 540 VDC

3.1 Introduction

Comme cela a été évoqué dans l'introduction de ce manuscrit, la forte augmentation de la composante DC de la tension d'alimentation dans les réseaux embarqués aéronautiques aura pour conséquence une complexification de la gestion de la commutation des circuits et de la protection du réseau, et rendra aussi encore plus cruciale la gestion des défauts d'arcs. En régime AC, l'arc s'éteint soit lorsque les contacts s'éloignent en augmentant la tension de l'arc à un niveau pour lequel la tension nécessaire à son maintien devient supérieure à la tension fournie par l'alimentation, soit lorsque le courant qui le traverse passe à zéro (toutes les demi-périodes), ce qui offre une opportunité supplémentaire d'extinction de l'arc. En régime DC, l'extinction de l'arc se produit uniquement lorsque la tension requise pour maintenir l'arc devient supérieure à ce que le circuit d'alimentation peut produire. Pour des tensions de quelques dizaines de volts, 28 ou 36 VDC, l'extinction naturelle de l'arc se produit pour une longueur d'arc proche de quelques millimètres. Dans ces conditions, s'il s'agit d'un défaut d'arc, celui-ci n'interagit qu'avec son environnement très proche et le risque d'endommager des composants à proximité (câbles, connecteur, etc.) reste réduit. Dans le cas de valeurs de tension d'alimentation beaucoup plus élevées, il est nécessaire d'observer le comportement de l'arc, aussi bien pour appréhender la zone concernée par le défaut d'arc que pour dimensionner des dispositifs de coupure. Ainsi, concernant les conséquences d'un défaut d'arc, l'initiation d'un incendie dû à un défaut d'arc, en présence de pulvérisation de carburant, a été étudiée pour une tension d'alimentation de 28 VDC ou de 270 VDC à pression atmosphérique³⁶. Il a été observé que l'augmentation de la tension d'alimentation de 28 VDC à 270 VDC provoque une augmentation importante du nombre de cas d'apparition d'incendie.

Dans le cas spécifique des réseaux embarqués dans les avions, une attention supplémentaire est à porter sur l'influence de la pression sur les propriétés de l'arc. Par exemple, dans le cas d'une tension d'alimentation de 36 VDC, il a été observé dans les travaux de R. Landfried *et al.*³³ qu'un ordre de grandeur de l'extension spatiale d'un arc électrique était d'environ 6 mm à pression atmosphérique et de 10 mm à une pression de $2 \cdot 10^4$ Pa.

Le but de ce chapitre est de présenter une première étude concernant l'influence de la pression sur l'extension et la stabilité d'un arc électrique « libre » sous une tension d'alimentation de 540 VDC en pression sub-atmosphérique dans la gamme [10^4 – 10^5] Pa. Le chapitre est organisé comme suit :

- Une première partie sera consacrée à la bibliographie concernant les propriétés des arcs électriques en régime DC et plus particulièrement l'arc d'ouverture, son extinction et son extension. La plupart des travaux antérieurs ont été réalisés à pression atmosphérique pour le domaine automobile. Les tensions mises en œuvre sont alors de l'ordre de 36–42 VDC.
- Dans la deuxième partie, le dispositif expérimental mis en œuvre est rapidement décrit puisque partiellement évoqué au chapitre 1.
- Dans la troisième partie, les résultats expérimentaux sont présentés. Ils concernent

³⁶ C. P. McCabe *et al.*, "A Study of Over-Current Protection, Electrical Arcing, and Fire Protection", 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 18th, 12 - 15 April 2010, Orlando, Florida.

l'influence de plusieurs paramètres sur l'extension spatiale, l'extinction et l'énergie dissipée dans un arc électrique pour ces conditions de pression. Les paramètres pris en compte sont les suivants : l'intensité du courant d'arc (dans la gamme 10 A -100 A) la valeur de la pression dans la gamme 100 hPa – 1000 hPa – on rappelle qu'une pression de $2 \cdot 10^4$ Pa correspond à l'altitude de croisière d'un avion commercial (12 000m), et de 10^4 Pa (équivalent à 15 000m)) - ainsi que la vitesse de déplacement des électrodes.

- La quatrième partie de ce chapitre illustre avec un dispositif industriel ce que nous avons observé dans la première partie du chapitre. Dans le cadre d'une collaboration industrielle nous avons mené des tests de coupure sur un dispositif adapté à la coupure à pression atmosphérique sous une tension continue élevée. Les essais de coupure que nous présentons ont été effectués à cette pression et aussi en dépression ce qui a permis de mettre en évidence les risques de mauvais fonctionnement d'un tel dispositif pour une application aéronautique.
- Le chapitre se termine par une synthèse des résultats obtenus et quelques propositions de perspectives.

3.2 Quelques points de discussion concernant l'arc électrique sous tension continue.

Dans ce court paragraphe nous faisons d'une part quelques remarques simples concernant l'arc électrique dans sa généralité et proposons un rapide rappel bibliographique sur l'extinction de l'arc en régime DC.

Plusieurs distinctions peuvent être faites quant aux différents types d'arcs qu'on peut rencontrer. Parmi tous les critères possibles on peut citer :

- Les arcs électriques dont on peut dire qu'ils sont « contraints », c'est-à-dire soit confinés, soit stabilisés (arc dans une chambre de coupure, arc stabilisé par parois refroidissantes comme cela est proposé sur la figure 3.1 ce qui contraint l'arc à avoir une forme « cylindrique » dans ce cas particulier, du moins quasi axisymétrique).
- Il peut s'agir d'arc libre, famille dans laquelle on peut ranger les défauts d'arc dans les réseaux embarqués. Un tel arc se forme librement dans l'espace. Sa forme dépend du type et de la forme du matériau d'électrode, de la distance inter-électrodes, des paramètres électriques de la décharge, de la composition chimique et des propriétés de convection du gaz de décharge.

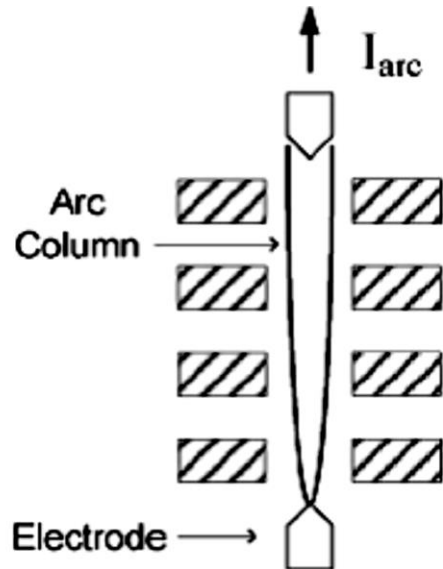


Figure 3.1 : exemple d'arc stabilisé par parois, géométrie axi-symétrique.

De la même façon, une autre distinction peut aussi être faite qui concerne la structure géométrique de l'arc. Ainsi, il est important de distinguer le cas où l'arc a une géométrie axisymétrique avec une longueur de colonne d'arc égale à la distance inter-électrodes (comme sur la figure 3.1) et le cas où au contraire la géométrie de l'arc n'est plus axisymétrique ce qui conduit bien souvent au fait que la longueur de la colonne d'arc soit notablement supérieure à la distance inter-électrodes. Une représentation schématique d'un tel arc est donnée sur la figure 3.2.

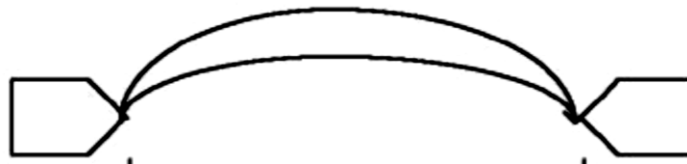


Figure 3.2 : exemple de géométrie d'un arc libre, non axisymétrique.

Bien souvent, ce type d'arc peut être extrêmement mobile et « chaotique ». Plusieurs facteurs sont responsables de ce comportement. Parmi ces facteurs on peut citer :

- la convection thermique,
- les forces magnétiques, soit voulues (pour mettre l'arc en mouvement dans des dispositifs tels que les disjoncteurs, les torches à cathode creuse), soit qui apparaissent du fait de la forme même de l'arc,
- l'érosion des électrodes (bain fondu et éjection de matière),
- les phénomènes d'extinction et de « ré-allumage » de l'arc notamment observés dans le cas d'un arc se déplaçant entre deux électrodes parallèles,
- l'interaction entre les surfaces des électrodes et les jets de plasma, par exemple il a été observé que pour des électrodes cylindriques en cuivre en vis-à-vis (configuration très

classique), la mobilité de l'arc augmentait avec la distance inter-électrodes. Ceci semble avoir pour causes les interactions entre les jets de plasmas et les surfaces en vis-à-vis. Dans le cas d'une distance inter-électrodes de 3 mm, les pieds d'arc sont immobiles (causant par ailleurs une forte érosion). Ceci est illustré sur les figures 3.3 et 3.4 extraites de Gouega *et al.*³⁴. La figure 3.3 est une photographie d'un arc dans l'air à pression atmosphérique entre deux électrodes en cuivre distantes de 3 mm. Dans ce cas, l'arc est immobile. Dans le cas d'une distance inter-électrodes de 12 mm les jets de plasma issus des électrodes n'interagissent plus avec les surfaces en vis-à-vis, l'arc se met alors en mouvement sur l'électrode. Ceci est représenté sur la figure 3.4.

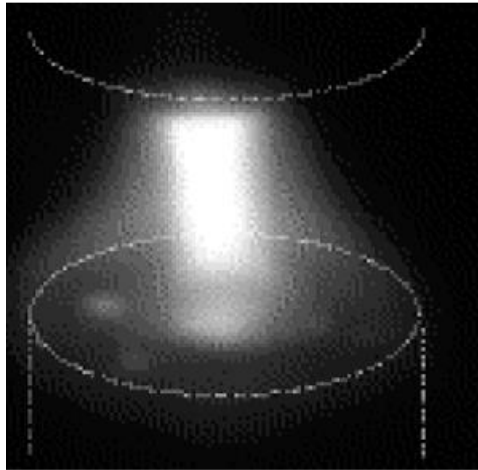


Figure 3.3 : exemple d'interactions entre les jets de plasma et les surfaces des électrodes en vis-à-vis (photographie extraite des travaux de Gouega *et al.*³⁴). Arc électrique entre deux électrodes en cuivre distantes de 3 mm, dans l'air à pression atmosphérique, $I = 400$ A. L'arc est immobile.

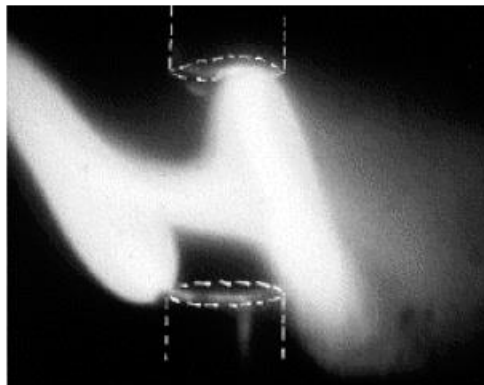


Figure 3.4 : exemple d'interactions entre les jets de plasma et les surfaces des électrodes en vis-à-vis (photographie extraite des travaux de Gouega *et al.*³⁴). Arc électrique entre deux électrodes en cuivre distantes de 12 mm, dans l'air à pression atmosphérique, $I = 400$ A. L'arc est instable et se déplace rapidement sur les électrodes.

La tension d'arc étant fortement dépendante de la longueur de la colonne, il conviendra dans la mesure du possible de bien distinguer la distance inter-électrodes de la longueur de la colonne ou du moins de garder cette différence à l'esprit. En effet, ces deux grandeurs peuvent être fortement

différentes comme cela est aussi montré sur la figure 3.5 (extraite de Stokes *et al.*³⁷) et sur la figure 3.6 (extraite de El Bayda *et al.*³⁸). Dans le premier cas les électrodes sont alignées et face à face alors que dans le second les électrodes sont parallèles et côte à côte.

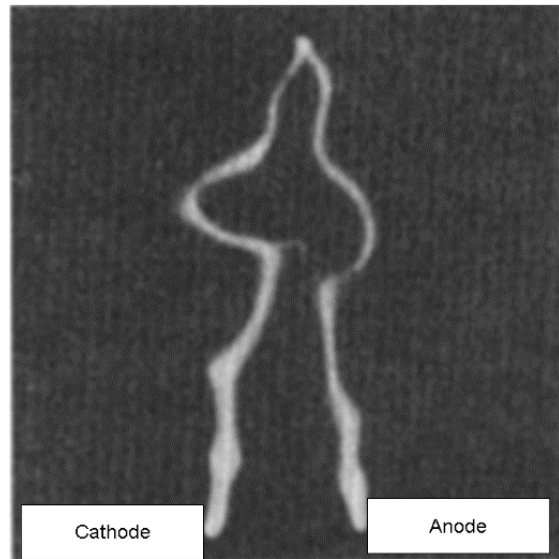


Figure 3.5 : exemple de photographie d'arc pour lequel la distance inter-électrodes est nettement inférieure à la longueur de la colonne. Les électrodes sont placées horizontalement en vis-à-vis (figure extraite des travaux de Stokes *et al.*³⁷).

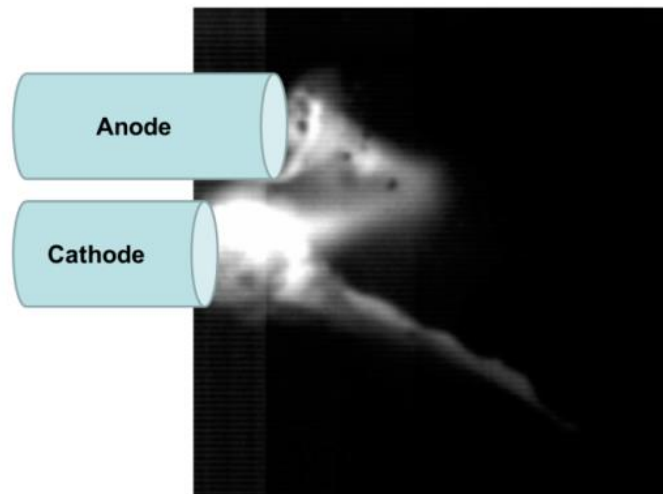


Figure 3.6 : exemple de photographie d'arc pour lequel la distance inter-électrodes est nettement inférieure à la longueur de la colonne. Les électrodes sont placées horizontalement et côte à côte (cas d'un arc dans un faisceau de câbles) (figure extraite des travaux de El Bayda *et al.*³⁵).

³⁷ A. Stokes and W Oppenlander, « Electric arcs in open air », J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 24, 1991, pp. 26-35

³⁸ El Bayda *et al.*, "Energy losses from an arc tracking in aeronautic cables in DC circuits », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 20, No. 1, February 2013

Il faut noter que dans le cas des défauts d'arc, la configuration présentée sur la figure 3.6 est tout à fait représentative d'un arc entre deux câbles d'un même faisceau.

Les travaux sur les arcs en régime DC sous des tensions de quelques dizaines à quelques centaines de volts dans des conditions de pressions aéronautiques ne sont pas nombreux. Pour des tensions d'alimentation élevées (540 VDC par exemple), il faut remonter aux années 1950 (travaux de Phillips *et al.*³⁹, Quill *et al.*⁴⁰, T.R. Stuelnagel⁴¹ et B.S. Beal *et al.*⁴²) pour trouver des travaux traitant de nos conditions expérimentales. Ces travaux concernaient les systèmes de traction et l'avionique. Dans ce domaine il s'agissait de caractériser les composants (contacteurs, disjoncteurs), et les éventuelles surtensions survenant lors d'un claquage en présence d'une inductance élevée. Plus récemment, certains auteurs ont étudié l'influence de la pression sur les dispositifs de commutation habituels (Klonowski *et al.*⁴³). Cependant, la plupart des travaux récents concernant l'arc électrique en régime DC sont liés à l'évolution des tensions embarquées ([36 – 42] VDC) dans le domaine automobile.

La manière la plus simple pour étudier l'extension spatiale et l'extinction d'un arc électrique est de conduire des expériences en augmentant la distance inter-électrodes et en observant la distance à laquelle l'extinction de l'arc se produit. Cette distance dépendra de divers paramètres tels que la dynamique de séparation des électrodes, la nature et de la pression du gaz environnant ainsi que de la charge dans le circuit (présence ou absence d'inductance). Plusieurs auteurs ont proposé des expressions donnant la distance inter-électrodes maximale (souvent assimilée à la longueur maximale de l'arc car la distance inter-électrodes ne fait que quelques mm) en fonction de divers paramètres tels que la tension d'alimentation, la vitesse d'ouverture et l'intensité du courant d'arc.

La plupart des résultats récents ont été réalisés à pression atmosphérique pour le domaine automobile. Les études menées concernent souvent des arcs de faible intensité du courant ($I < 10\text{ A}$) à des tensions comprises entre 14 et 42 VDC⁴⁴, le matériau d'électrode utilisé est un matériau de contact du type Au, Ag ou Ag-MeO (Ag-SnO₂ ou Ag-CdO par exemple)^{45, 46}. Dans ce cas des

³⁹ V.E. Phillips *et al.* "Peak voltage for DC Arc Interruption for Aircraft", *Trans. AIEE* 63, pp. 944 -949, 1944

⁴⁰ J.S. Quill *et al.* « DC Arc Interruption for Aircraft » *Trans. AIEE* 63, pp. 883-888, 1944

⁴¹ T.R. Stuelnagel, « An Environment free 120 VDC High Performance Limit Switch », *Trans. AIEE* 69, pp. 1289-1293 (1950)

⁴² B.S. Beal *et al.* "New circuit breaker for aircraft electric systems" *Electrical Engineering* (Volume: 71, Issue: 9, Sept. 1952), pp.776-779

⁴³ T. Klonowski *et al.* "Characterization of HVDC contactors in depressurized environment", More Electrical Aircraft, Toulouse 5-6 février 2019.

⁴⁴ J. Swingler *et al.*, The evolution of contact erosion during an opening operation at 42 V, in Proceedings of 51th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2005

⁴⁵ T.J. Schoepf, "Electrical contacts in the automotive 42 V DC PowerNet", in Proceedings of the 21th International Conference on Electrical Contact, 2002, pp. 43-55

⁴⁶ L. Doublet *et al.*, "Electrical arc phenomena and its interaction on contact material at 42 V DC for automotive applications", in Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contact, 2004, pp. 8-14

expressions ont été proposées donnant la durée de l'arc (et donc la longueur de l'arc à l'extinction). Certaines sont proposées dans le tableau 3.1. Dans ces conditions expérimentales, la longueur maximale de l'arc peut atteindre quelques millimètres et elle est une fonction croissante de l'intensité du courant d'arc. De rares travaux concernent des électrodes en cuivre et des intensités plus élevées^{47, 48}. Dans ce cas ($I_{arc} > 100 A$) on a observé que la longueur de l'arc n'était pas forcément une fonction croissante de l'intensité du courant, mais que des instabilités déformant la colonne apparaissaient pour ces intensités élevées et pouvaient conduire à l'extinction de l'arc.

Tableau 3.1 : synthèse de résultats concernant la longueur d'un arc à l'extinction pour des arcs en régime DC (faibles intensités du courant).

	Extension spatiale de l'arc				Commentaires
N. Ben Jemaa <i>et al.</i> ⁴⁹	$d = g_0 + v \times T_0$				$U = 42 VDC$ and $I_{arc} \leq 30A$ and $v \geq 6 cm/s$ $g_0 \approx 1 mm$ for $L = 0 mH$ and $3 mm$ for $L = 10 mH$ $T_0 \approx -1 ms$ for $L = 0 mH$ and $T_0 \approx 3 to 9 ms$ for $L = 10 mH$
M. Hasegawa <i>et al.</i> ^{50 51}	$d \propto I_{arc}$ $d \propto v$				$I_{arc} \leq 10A$
H. Liang <i>et al.</i> ⁵²	$d = a \times v \times U^{-b}$				$U \leq 48 V DC$ and $I_{arc} \leq 2A$ a and b depends on I_{arc} and L
L. Doublet <i>et al.</i> ¹³	14 V DC	14 V DC	42 V DC	42 V DC	$I_{arc} \leq 40 A$ $v \leq 40 cm/s$
	Resistive	Inductive	Resistive	Inductive	
	$d \propto v^{0.7 to 0}$	$d \propto v^{0.6}$	$d \propto I_{arc}^{0.66}$	$d \propto v^{0.3}$	
D. Sallais <i>et al.</i> ⁵³	d is independent on v for resistive load d is proportional to v for inductive load				$I_{arc} \leq 40 A$ $v \leq 70 cm/s$ $U = 42 VDC$
P. Colombo <i>et al.</i> ⁴⁷	$d = v \times t_b \times \exp(I_{arc}/I_b)$				I_{arc} in the range 75 – 150 A $v \approx 60 cm/s$ $U = 42 VDC$
J. W. McBride	$d = K \times (U - U_0^m) \times I_{arc}^n$ with $m = 1 to 2$ and $n = 0.5 to 1$				I_{arc} in the range 1,7– 6,7 A $v \approx 1 to 40 cm/s$ $U = 110 VDC$

⁴⁷ P. Colombo *et al.*, “Arcing study in high current electromechanical switching for future 14–4 2V Dual Voltage Systems”, SAE Technical Paper 2002-01-0520, 2002.

⁴⁸ Ph. Teste *et al.*, « Study of the properties of high intensity switching under 36 VDC. Influence of the contact material”, Eur. Phys. J. Appl. Phys. 41, 251 (2008).

⁴⁹ N. Benjemaa *et al.*, “Break Arc Study for the New Electrical Level of 42 V in Automotive Applications”, Proceeding the IEEE Holm Conference 2001, pp. 50–55

⁵⁰ M. Hasegawa *et al.*, “Break arc behaviors of Ag and AgSnO2 contact pairs under different contact opening speeds in DC load circuits”, 27th International Conference on Electrical Contacts, June 22 – 26, 2014, Dresden, Germany

⁵¹ M. Hasegawa *et al.*, « Influences of Contact Opening Speeds in the Range of 0.5 to 200 mm/s on Break Arc Behaviors of AgSnO2 Contacts in DC Conditions », IEEE Holm Conference on Electrical Contacts 2015.

⁵² H. Liang *et al.* “Research on the Relationship between Contact Breakaway Initial Velocity and Arc Duration”, IEEE Holm Conference on Electrical Contacts 2003.

⁵³ D. Sallais *et al.* “An arc study at high DC current levels in automotive applications”, Proceedings the IEEE Holm Conference 2005, pp. 329-334.

<i>et al.</i> ⁵⁴	$d_x = A \left(V - V_{\min} - \frac{VI_{\min}}{I} \right)^m \cdot I^n_{\min}$	
-----------------------------	--	--

Plus récemment, des travaux académiques^{33, 55} ont été menés pour caractériser les arcs électriques pour des pressions de l'ordre de $[10^4-10^5]$ Pa et pour des tensions de l'ordre de $[36 - 42]$ VDC et un courant d'arc de l'ordre de quelques dizaines d'ampères.

Dans le cas d'un arc électrique à symétrie axiale, la longueur de la colonne est égale à la distance inter-électrodes. La tension de l'arc en fonction de la longueur de la colonne d'arc est tracée et prend alors l'expression bien connue suivante:

$$U_{arc} = V_A + V_C + \int_0^d |E(z)| dz \quad (3.1)$$

Où U_{arc} est la tension d'arc, V_A et V_C sont respectivement les chutes de tension anodique et cathodique, d la longueur de la colonne d'arc et E le champ électrique dans la colonne d'arc.

Sur la figure 3.7, une représentation schématique d'un arc électrique idéal est donnée avec la distribution axiale de la tension dans la colonne d'arc.

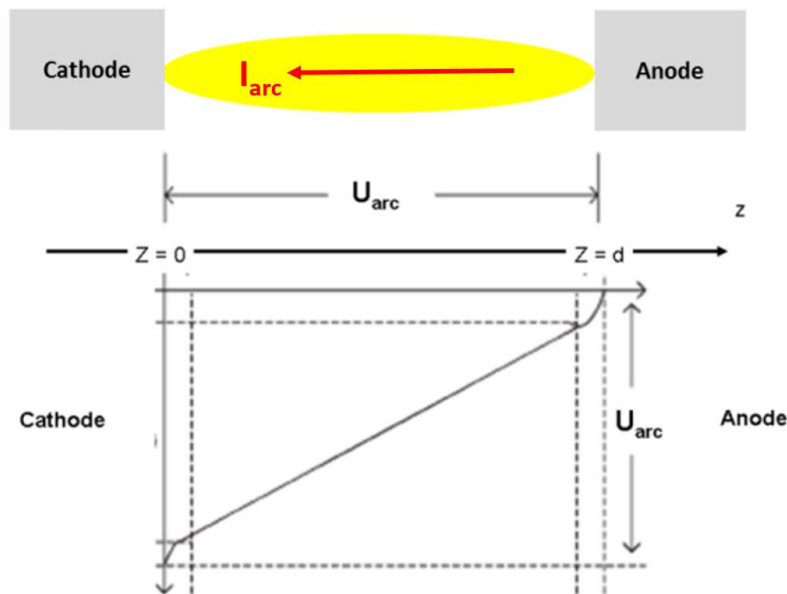


Figure 3.7 : représentation schématique d'un arc électrique idéal et de la distribution axiale de la tension dans la colonne d'arc.

En régime DC, l'arc électrique s'éteint lorsque la tension nécessaire pour le maintenir est supérieure à la tension que le circuit (alimentation et charge) peut produire. En considérant un circuit non inductif, la valeur maximale de la longueur de l'arc, notée d_{max} , est schématiquement

⁵⁴ J.W McBride, S.M Sharkh, "Influence of contacts opening velocity on arc characteristics", Proceedings of the 16th International Conference on Electrical Contact 1992, pp. 395-400.

⁵⁵ R. Boukadoum *et al.*, "Role of the pressure in the DC electric arc characteristics application: case of the more electrical aircraft", in Proceedings of 28th International Conference on Electrical Contact, 2016, pp. 153-158

donnée par :

$$d_{max} = \frac{U_{alim} - (V_A + V_C)}{|E|} \quad (3.2)$$

Où U_{alim} est la tension d'alimentation et E le champ électrique moyen dans la colonne d'arc.
 Un enregistrement de l'évolution typique de l'intensité du courant et de la tension d'arc sous une tension d'alimentation de 36 / 42 VDC est présenté sur la figure 3.8.

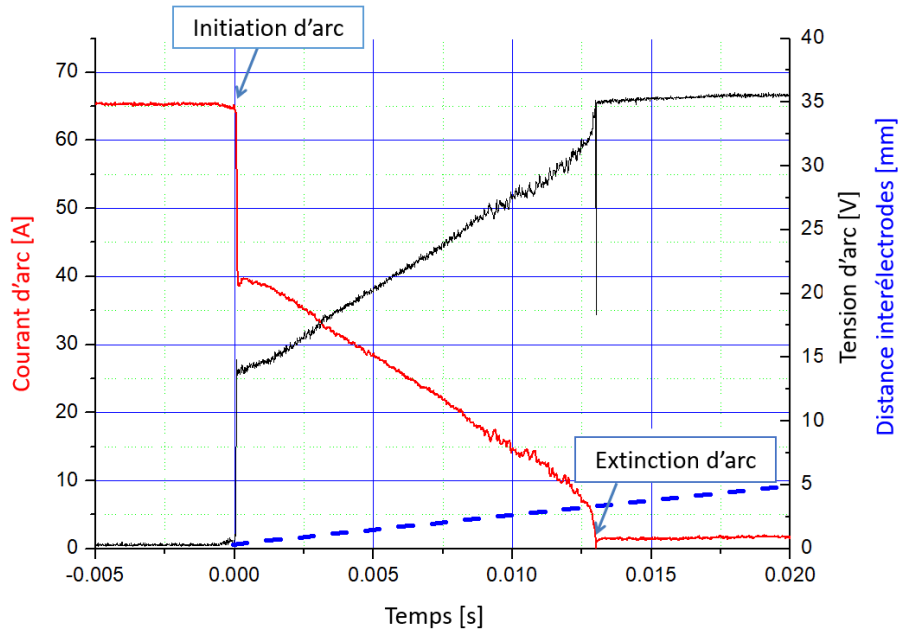


Figure 3.8 : évolution de l'intensité du courant et de la tension d'un arc électrique entre deux électrodes en cuivre dans l'air à pression atmosphérique pour une tension d'alimentation égale à 36 VDC.

Au début de l'arc et en raison de la séparation des électrodes (et de la relative importance des chutes de tension anodique et cathodique en regard avec la tension d'alimentation), l'intensité du courant diminue fortement (moins 35%) et continue de diminuer régulièrement pendant la séparation des électrodes. La durée de l'arc reste assez courte et la coupure (correspondant à la longueur d'extinction) se produit pour une distance inter-électrodes égale à environ 3 mm. Sous cette valeur de tension d'alimentation, seuls de très petits arcs peuvent se produire car la valeur de la tension d'alimentation est du même ordre que la somme de la chute de tension aux électrodes ($V_A + V_C$). Dans le cas de petits arcs, l'arc a peu d'instabilité. Cela se remarque dans la forme de la tension qui est régulière. Le modèle d'arc proposé sur la figure 3.7 s'applique alors (quelques millimètres de longueur pour une tension d'alimentation de 36 VDC). Pour de telles conditions (distance inter-électrodes faibles), les valeurs moyennes du champ dans la colonne E ont été mesurées³³ dans des conditions aéronautiques de pression. Les résultats sont brièvement résumés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : champ électrique moyen E dans la colonne d'arc pour des valeurs faibles de la distance inter-électrodes - résultats extraits de Landfried *et al.*³³

	$I_{arc} \approx 30 \text{ A}$	$I_{arc} \approx 100 \text{ A}$
$P = 250 \text{ hPa}$	2,3 – 4,7 kV/m	1,4 -1,9 kV/m
$P = 1000 \text{ hPa}$	4,7 – 5 kV/m	1 – 2,1 kV/m

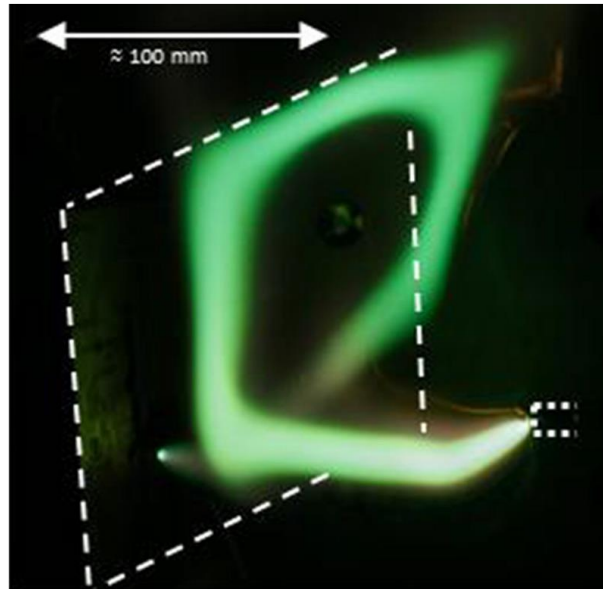


Figure 3.9 : photographie d'un arc électrique dans l'air. $P = 2 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ et $I_{CC} \approx 100 \text{ A}$ sous 540 VDC.

L'utilisation de ces valeurs pour extrapoler la longueur de l'arc pour une tension d'alimentation de 540 VDC génère une dispersion importante sur la valeur maximale de la distance inter-électrodes d_{max} . Par exemple, pour $I_{arc} \approx 30 \text{ A}$ et $P = 2,5 \cdot 10^4 \text{ Pa}$, d_{max} sera dans la plage [11–22] cm et pour $I_{arc} \approx 100 \text{ A}$, une estimation de d_{max} est dans la plage [28–38] cm. De plus, pour une distance inter-électrodes plus importante (et donc une colonne d'arc plus longue), des instabilités apparaissent et l'arc peut être très chaotique comme cela est illustré sur la figure 3.9 qui est une photographie d'un arc électrique entre une plaque carrée de cuivre (à gauche en pointillés avec 20 cm de chaque côté) et une électrode cylindrique en cuivre (à droite en pointillés de 8 mm de diamètre) pour $P = 2 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ et $I_{CC} \approx 100 \text{ A}$ (avant arc). Non seulement l'arc n'a pas une forme axisymétrique et la colonne d'arc a une longueur 2 à 3 fois plus importante que la distance inter-électrodes, mais en plus l'extension transverse de l'arc peut également être très importante (de l'ordre de la distance inter-électrodes).

Le but de ce travail est donc de proposer la mesure de telles caractéristiques dans le cas d'une alimentation 540 VDC.

3.3 Description du dispositif expérimental.

L'objectif du dispositif mis en œuvre est de permettre la création et la caractérisation électrique d'un arc électrique dans des conditions de pression contrôlée. Un défaut qui conduit à la perte de continuité électrique dans un circuit (rupture de câble, connexion ou connecteur défectueux) génère un arc électrique de défaut en série. Cependant, quelle que soit la cause ou le mode d'amorçage de l'arc, l'extension spatiale de l'arc dépendra principalement des paramètres tels que la tension d'alimentation, la pression environnante et encore l'intensité du courant d'arc. Par conséquent, nous avons opté pour une méthode qui permet d'amorcer un arc série en provoquant une coupure dans la continuité électrique d'un circuit parcouru par un courant I_{CC} . Cela pourrait par exemple correspondre en termes de défauts d'arc à la défaillance de connexion ou à la rupture d'un câble. Le matériau des électrodes est du cuivre OFHC (Oxygen Free High Conductivity).

Le dispositif expérimental peut ainsi être divisé en deux parties principales :

- La partie électrique présentée par le schéma sur la figure 3.10 et déjà décrite au chapitre 1.
- La partie mécanique pour laquelle une photographie est proposée sur la figure 3.11.

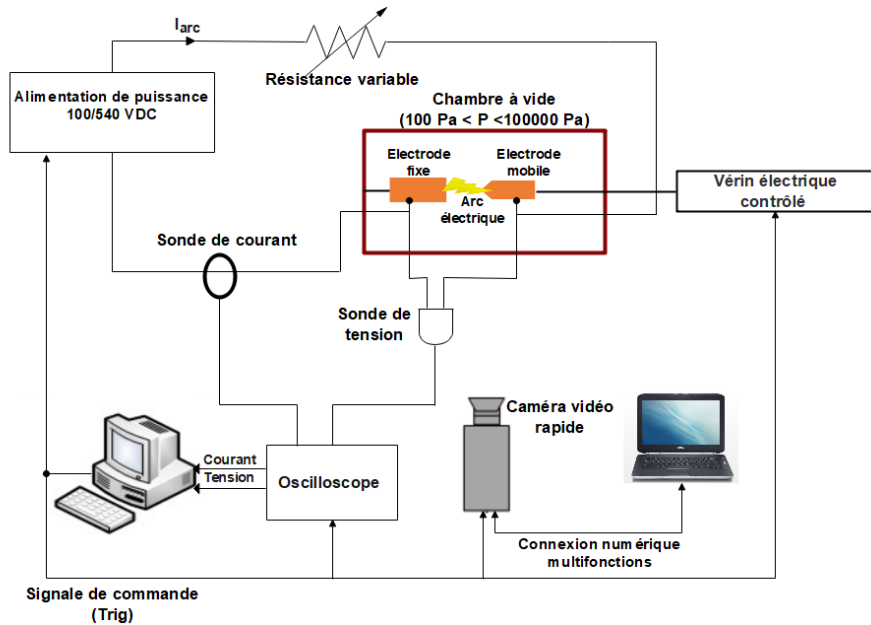


Figure 3.10 : schéma du dispositif expérimental.

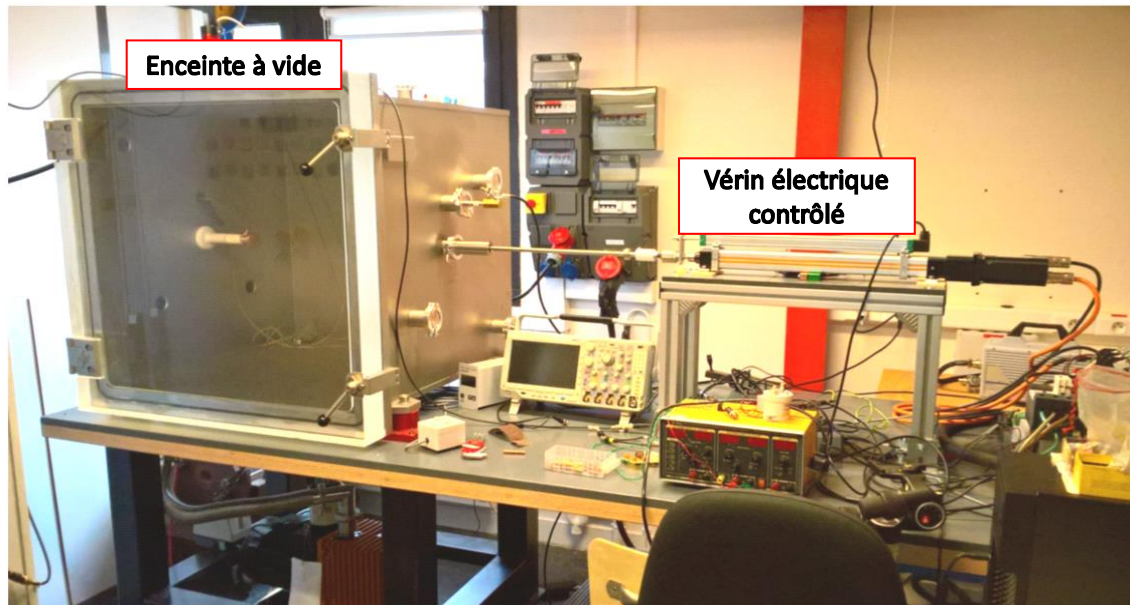


Figure 3.11 : photographie de la partie mécanique de l'expérience.

3.3.1 Protocole expérimental

- On prépare les électrodes (nettoyage avec du papier abrasif et de l'alcool à 95% pour éliminer les particules laissées par l'abrasion), et on les met en contact (vérification de contact avec un contrôleur).
- Sur le programme LabVIEW, on fixe la vitesse de l'ouverture du vérin (dans notre cas 50 ou 600 mm/s) et le temps d'attente pendant lequel un courant I_{CC} passe dans le circuit avant que le vérin ne soit actionné pour ouvrir le contact. Ce temps est fixé à environ 200 ms.
- On ajuste la valeur de la résistance variable pour avoir un courant I_{CC} souhaité.
- On fixe la valeur de la tension d'alimentation à la valeur désirée (jusqu'à 540 VDC), la durée du pulse de tension, d'une durée de 3s (*par exemple*).
- On ajuste la caméra rapide pour une prise d'image optimale.

3.3.2 Équipements électriques

Nous utilisons le même générateur d'impulsions que celui présenté dans le chapitre 2. Dans cette étude, la charge électrique utilisée est une charge variable résistive. La charge permet d'ajuster les intensités de courant de court-circuit souhaitées dans le circuit. Un dispositif électronique permet le réglage de la durée de l'impulsion de courant et assure ainsi une sécurité redondante dans le cas où l'arc ne s'éteindrait pas "naturellement" lors de la séparation des contacts.

3.3.3 Dispositif mécanique

Le dispositif mécanique se compose de deux électrodes cylindriques coaxiales en cuivre OFHC. La cathode est une électrode fixe cylindrique de 40 mm de diamètre (sur le côté gauche de chaque photographie qui sera présentée) et l'anode est une électrode mobile de diamètre 8 mm avec une extrémité hémisphérique dont le rayon de courbure est d'environ 5 mm. Un vérin électrique contrôlé permet une ouverture à vitesse réglable dont la vitesse maximale est de 600 mm/s. La distance d'ouverture maximale est d'environ 35 cm. Le vérin permet de déplacer une des électrodes placée dans l'enceinte à vide au travers d'une traversée étanche coulissante. Comme nous l'avons vu précédemment l'enceinte est équipée d'un système de pompage permettant d'atteindre facilement les pressions du domaine aéronautique (vide primaire compris entre 10^3 Pa et 10^5 Pa). La porte de l'enceinte en polycarbonate permet l'observation de la structure de l'arc avec la caméra rapide.

Du fait de la distance d'ouverture maximale permise par le vérin et des niveaux de tension considérés (540 VDC max), ce dispositif devrait nous permettre d'étudier les conditions d'extinction de l'arc. En ce qui concerne les défauts d'arc, ce dispositif ne permet pas l'étude de défauts qui peuvent survenir dans des cas tels que des dommages de câbles. En revanche, il autorise l'étude des défauts liés à des déconnexions intempestives et permet également l'étude de l'extension spatiale que les défauts d'arc peuvent prendre.

3.3.4 Mesures et observations

Les données suivantes sont automatiquement enregistrées :

- l'intensité du courant d'arc est mesurée sur un shunt à l'aide d'une sonde de tension différentielle (bande passante de 70MHz),
- la tension d'arc est mesurée à l'aide d'une sonde différentielle similaire,
- la distance est mesurée à l'aide d'un capteur de déplacement potentiométrique intégré sur le vérin avec une précision de $\pm 100 \mu\text{m}$.

Plusieurs données sont déterminées *a posteriori* :

- la distance inter-électrodes maximale (ou distance d'extinction). L'allumage de l'arc est détecté par une forte augmentation de la valeur de tension et l'extinction est détectée lorsque l'intensité du courant atteint zéro. La valeur de la distance inter-électrodes ne correspond pas à la longueur maximale de la colonne d'arc, car l'arc peut avoir des formes très perturbées,
- l'énergie dissipée dans l'arc,
- la «longueur de stabilité de l'arc» que l'on définit comme l'intervalle inter-électrodes pour lequel se produisent les premières instabilités de tension. Il est évident que cette valeur ne peut être définie avec précision. Cependant, au-delà de cette distance, la colonne d'arc présente des formes perturbées. Si en deçà de cette longueur, il paraît légitime de considérer que distance inter-électrodes et longueur de colonne sont deux grandeurs pratiquement

égales, au-delà, les déformations de la colonne générées par divers phénomènes (forces électromagnétiques, convection thermique...) rendent difficile l'estimation de la longueur de la colonne par l'observation avec une unique caméra. Par ailleurs du fait même de ces instabilités, l'arc peut être amené à s'éteindre « naturellement ».

Pour déterminer la distance inter-électrodes maximale et l'énergie dissipée dans l'arc, il est nécessaire de déterminer l'instant exact d'allumage et l'instant d'extinction. L'allumage de l'arc est détecté par une forte augmentation de la valeur de tension et l'extinction est détectée lorsque l'intensité du courant atteint zéro.

3.4 Résultats

Comme présenté précédemment, la tension de l'arc, l'intensité du courant et la distance inter-électrodes ont été relevées pour plusieurs conditions expérimentales. Entre trois et dix mesures ont été effectuées pour chaque ensemble de paramètres.

3.4.1 Observation du comportement des arcs électriques et exemples d'enregistrement

Dans cette partie nous allons présenter quelques exemples de résultats afin d'illustrer la notion de stabilité et d'instabilité de l'arc. Sur la figure 3.12 nous avons représenté l'évolution de la tension d'arc, de l'intensité et de la distance inter-électrodes pour les conditions suivantes : la tension d'alimentation vaut 270 VDC, l'intensité du courant de court-circuit vaut 25 A, la pression vaut 10^5 Pa.

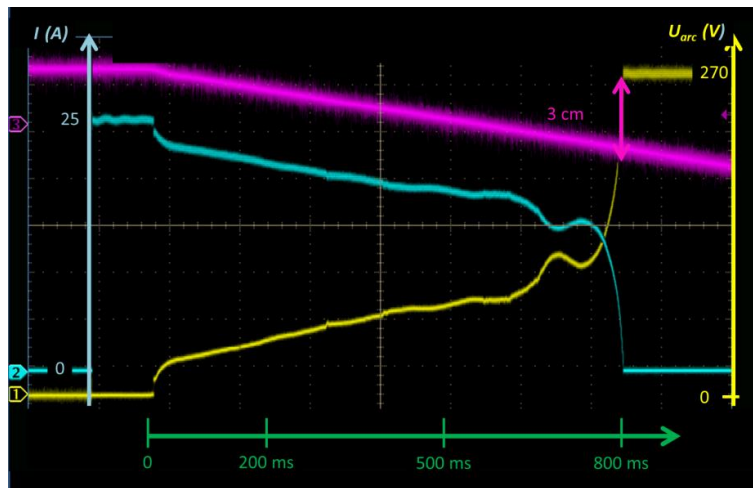


Figure 3.12 : évolution de l'intensité du courant d'arc (en bleu), de la tension de l'arc (en jaune) et de la distance inter-électrodes (en violet) dans le cas d'un arc électrique entre deux électrodes en cuivre dans l'air ($I_{cc} \approx 25$ A, $P = 10^5$ Pa), La tension d'alimentation est de 270 VDC. L'arc est stable durant pratiquement toute sa durée (800 ms).

Dans ce cas, l'arc est stable. La colonne d'arc est droite. L'extinction de l'arc se fait pour une distance inter-électrodes d'environ 30 mm et une durée d'arc d'environ 800 ms.

Sur la figure 3.13 nous avons tracé les évolutions des mêmes grandeurs dans le cas d'un arc particulièrement instable. Les conditions expérimentales sont les suivantes : la tension d'alimentation vaut 540 VDC, l'intensité du courant de court-circuit vaut 100 A et la pression vaut 10^5 Pa.

Les instabilités de la colonne d'arc se traduisent par des pics de tension dont l'amplitude peut atteindre plusieurs dizaines de volts.

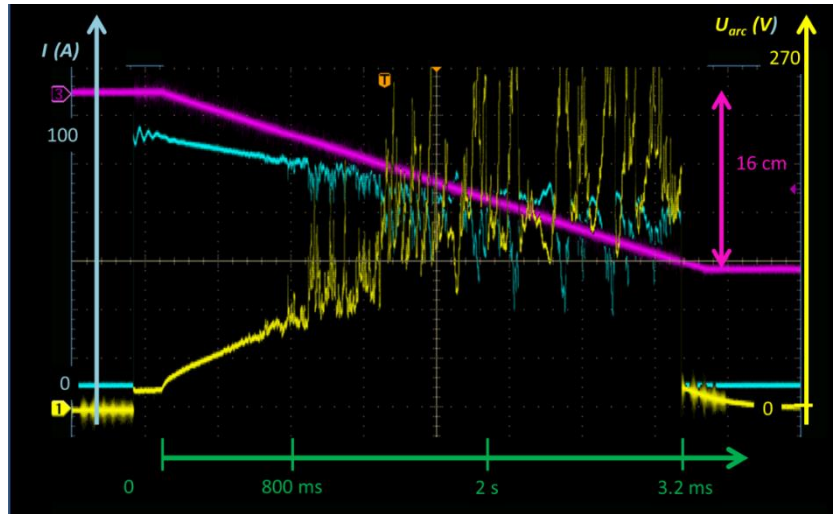


Figure 3.13 : évolution de l'intensité du courant d'arc (en bleu), de la tension de l'arc (en jaune) et de la distance inter-électrodes (en violet) dans le cas d'un arc électrique entre deux électrodes en cuivre dans l'air ($I_{CC} \approx 100$ A, $P = 10^5$ Pa), La tension d'alimentation est de 540 VDC.

À partir de $t = 800$ ms environ sur la figure 3.13, on voit apparaître des perturbations sur les signaux de tension (en jaune) et de courant (en bleu). Ces pics de tension sont liés aux instabilités de la colonne d'arc. Ces pics de tension peuvent atteindre plusieurs dizaines de volts.

Sur la figure 3.14 un exemple typique d'évolution de l'intensité du courant (courbe bleue), de la tension d'arc (courbe jaune) est donné pour une intensité de courant avant la phase d'ouverture égale à 100 A et une pression égale à $P = 2 \cdot 10^4$ Pa.

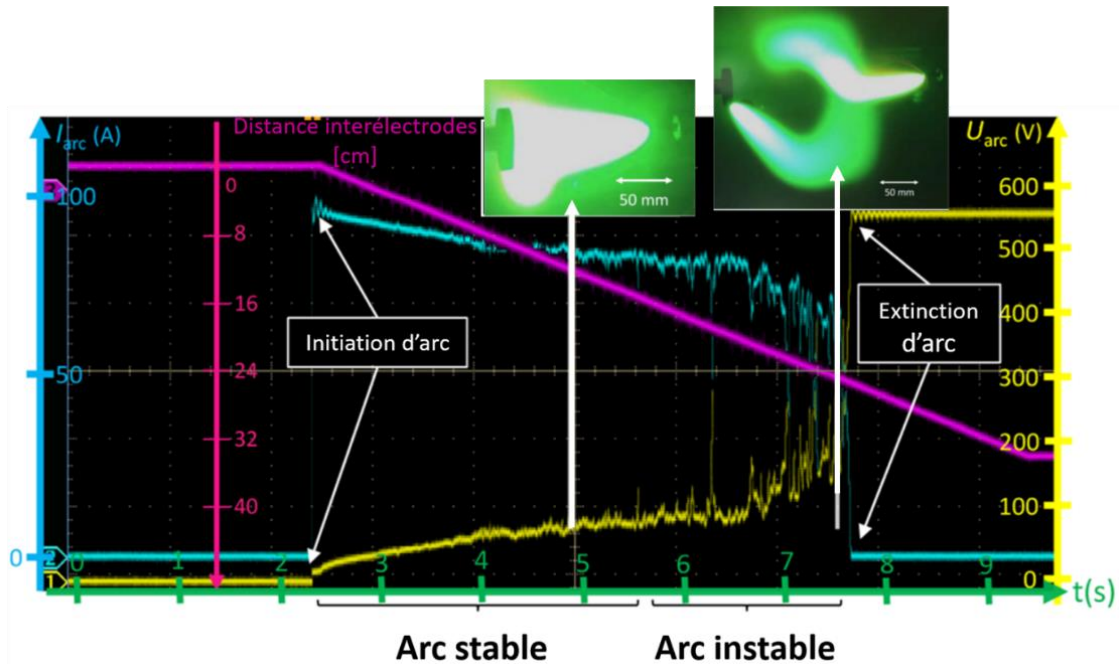


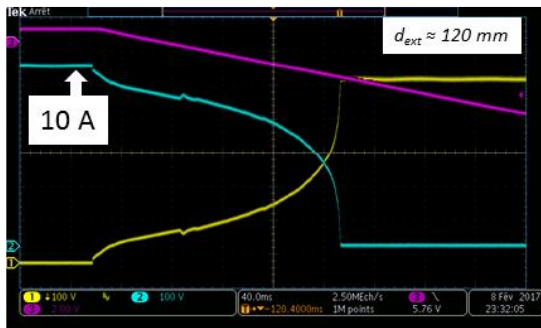
Figure 3.14 : évolution de l'intensité du courant d'arc (en bleu), de la tension de l'arc (en jaune) et de la distance inter-électrodes (en violet) dans le cas d'un arc électrique entre deux électrodes en cuivre dans l'air ($I_{cc} \approx 100 \text{ A}$, $P = 2 \cdot 10^4 \text{ Pa}$), La tension d'alimentation est de 540 VDC.

Contrairement à ce qui se passe à 36 VDC (voir figure 3.8), l'intensité du courant d'arc varie peu à l'instant d'ouverture des électrodes car la somme des chutes de tension anodique et cathodique représente moins de 5% de la tension d'alimentation. Elle diminue également assez lentement durant l'ouverture (moins 20% pour une ouverture d'environ 20 cm).

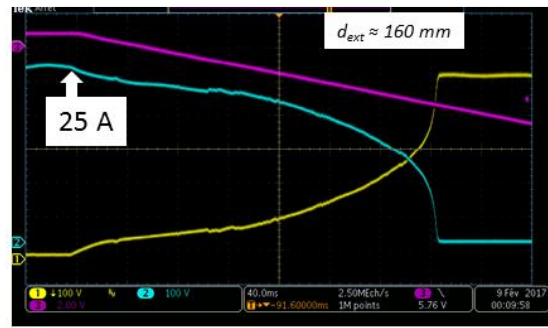
Deux phases peuvent être distinguées:

- Une première phase pendant laquelle la tension augmente de façon régulière en corrélation avec la distance entre les électrodes. Dans cette phase, l'arc électrique est stable comme on peut l'observer sur la figure 3.14 (cf. la photographie de l'arc électrique pendant la phase de stabilité). L'instant où la photo a été prise est repéré par un trait blanc sur la figure. L'arc électrique durant cette phase a une forme quasi-axisymétrique, que l'on qualifie de « stable » dans ce travail. Sa longueur est d'environ 125 mm et son extension transversale est de l'ordre de [55–110] mm.
- Dans une seconde phase, des instabilités apparaissent. Ces instabilités se traduisent par des fluctuations importantes de la tension d'arc (40 volts ou plus) et un allongement brutal de la colonne d'arc. Sur la figure 3.14, une photographie d'un arc « instable » a été présentée (en haut à droite) et l'instant où elle a été prise marqué par une autre flèche blanche sur la figure. La distance inter-électrodes est égale à 250 mm mais la longueur de l'arc est beaucoup plus grande. L'extension transversale est du même ordre de grandeur.

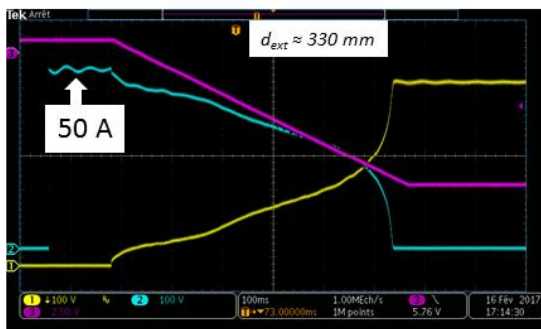
Dans les deux figures suivantes, 3.15 et 3.16, nous présentons les évolutions de la tension et du courant d'arc pour deux valeurs de pression : à pression atmosphérique et à $P = 2 \cdot 10^4$ Pa. Pour chaque valeur de pression, quatre valeurs de courant sont considérées : (a) 10 A, (b) 25 A, (c) 50 A et (d) 100 A. Ces valeurs de courant correspondent au courant circulant dans les électrodes avant ouverture. Tous ces résultats ont été effectués pour une même vitesse d'ouverture, à savoir 600 mm/s. On peut d'ores et déjà constater que les arcs observés à cette vitesse d'ouverture (à l'exception du cas (d) de la figure 3.16 : $I_{cc} = 100$ A à pression atmosphérique) sont stables, c'est-à-dire qu'ils ne présentent pas d'instabilité de leur colonne et donc pas de fluctuations sur les signaux courant /tension. Nous reviendrons sur ce point dans la suite.



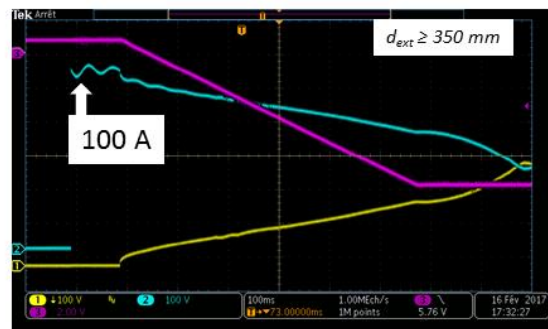
(a) - $I_{cc} = 10$ A et $v = 600$ mm/s



(b) - $I_{cc} = 25$ A et $v = 600$ mm/s

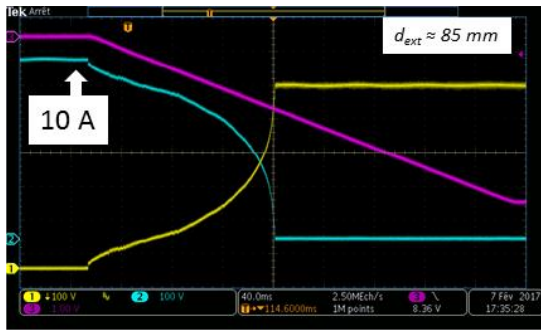


(c) - $I_{cc} = 50$ A et $v = 600$ mm/s

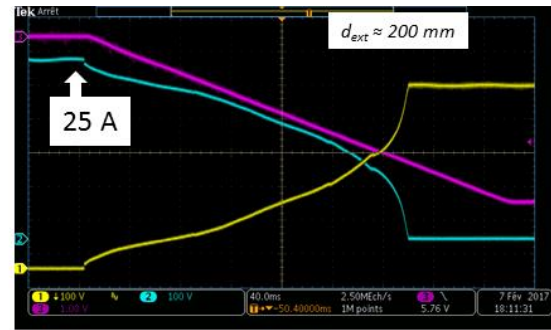


(d) - $I_{cc} = 100$ A et $v = 600$ mm/s

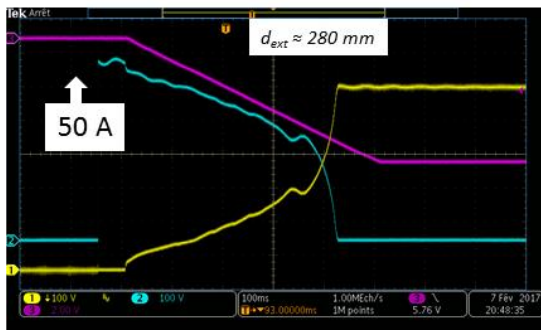
Figure 3.15 : évolutions de l'intensité du courant d'arc (en bleu), de la tension de l'arc (en jaune) et de la distance inter-électrodes (en violet) dans le cas d'un arc électrique entre deux électrodes en cuivre dans l'air à $P = 2 \cdot 10^4$ Pa : (a) $I_{cc} = 10$ A, (b) $I_{cc} = 25$ A, (c) $I_{cc} = 50$ A, (d) $I_{cc} = 100$ A.



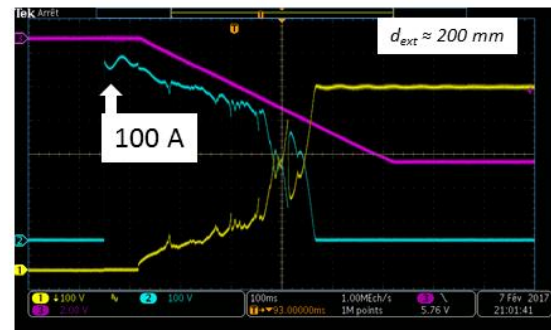
(a) - $I_{cc} = 10 \text{ A}$ et $v = 600 \text{ mm/s}$



(b) - $I_{cc} = 25 \text{ A}$ et $v = 600 \text{ mm/s}$



(c) - $I_{cc} = 50 \text{ A}$ et $v = 600 \text{ mm/s}$



(d) - $I_{cc} = 100 \text{ A}$ et $v = 600 \text{ mm/s}$

Figure 3.16 : évolutions de l'intensité du courant d'arc (en bleu), de la tension de l'arc (en jaune) et de la distance inter-électrodes (en violet) dans le cas d'un arc électrique entre deux électrodes en cuivre dans l'air à $P = 10^5 \text{ Pa}$: (a) $I_{cc} = 10 \text{ A}$, (b) $I_{cc} = 25 \text{ A}$, (c) $I_{cc} = 50 \text{ A}$, (d) $I_{cc} = 100 \text{ A}$.

3.4.2 Estimation de la longueur de stabilité de l'arc

Dans cette partie, nous présentons les résultats concernant la « longueur de stabilité de l'arc » (définie dans la section 3.4). Nous avons tracé sur la figure 3.17 la « longueur minimale de stabilité de l'arc » en fonction de la pression pour différentes valeurs de I_{cc} : 10, 25, 50 et 100 A. Sur cette figure, seule la plus petite valeur de la longueur de stabilité mesurée lors des essais a été tracée de sorte qu'à une pression donnée et un courant donné ne correspond qu'une seule mesure. En dessous de cette valeur de longueur de stabilité, l'arc est stable. Les résultats présentés ne concerneront évidemment que les cas pour lesquels la vitesse de séparation des électrodes était égale à 50 mm/s puisque comme nous l'avons évoqué précédemment, les arcs sont stables à la vitesse d'ouverture de 600 mm/s.

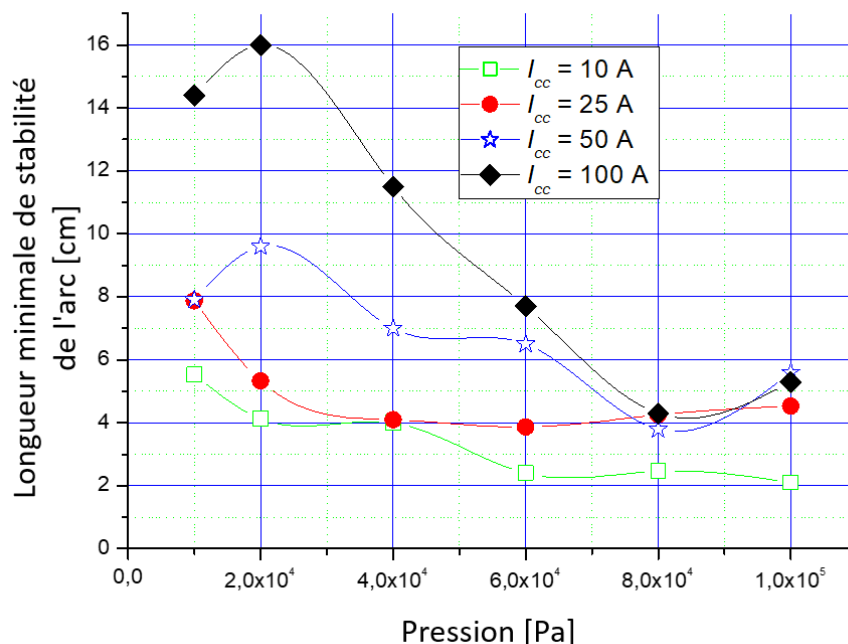


Figure 3.17 : plus petite valeur de la longueur de stabilité de l'arc en fonction de la valeur de pression, pour différentes valeurs de courant I_{cc} : 10, 25, 50 et 100 A. La vitesse d'ouverture est de 50 mm/s.

Globalement, la stabilité de l'arc est d'autant plus importante que la pression est faible. De plus, la stabilité de l'arc apparaît comme une fonction croissante de l'intensité du courant.

Pour toutes les valeurs de courant considérées dans ce travail, l'arc électrique est d'autant plus instable que la pression est élevée et la longueur moyenne de stabilité est de l'ordre de [2– 6] cm. L'influence de l'intensité du courant d'arc est plus prononcée pour les valeurs de pression inférieures à $8 \cdot 10^4$ Pa. Il est intéressant de noter que sous cette valeur de pression, l'arc est d'autant plus stable que l'intensité du courant est élevée.

Pour une vitesse d'ouverture égale à 600 mm/s, aucune instabilité sur la tension d'arc n'a été observée avant l'extinction de l'arc exception faite des fortes intensités (100 A) à pression atmosphérique. Dans ce cas la longueur de stabilité est alors sensiblement égale à la distance inter-électrodes pour laquelle l'extinction se produit.

3.4.3 Durée et distance inter-électrodes à l'extinction de l'arc en fonction de la pression

L'extinction de l'arc se produit lorsque l'arc devient trop long, soit par allongement de sa colonne lors de l'agrandissement de la distance inter-électrodes lorsqu'il est stable ou de l'apparition d'instabilités qui conduisent à un allongement de sa colonne sous l'influence d'effets thermiques ou électromagnétiques (la longueur maximale de l'arc étant limitée par la tension que peut délivrer l'alimentation). Sur les figures 3.18 et 3.19, la distance inter-électrodes pour laquelle l'extinction de l'arc se produit a été tracée en fonction de la pression pour diverses valeurs de l'intensité du courant de court-circuit I_{cc} (10, 25, 50, 100 A) et deux vitesses de séparation des électrodes (50 et

600 mm/s). De plus, la distance inter-électrodes lors de l'extinction a été tracée (en haut à droite sur les deux figures) en fonction de I_{cc} . La vitesse de séparation des électrodes restant constante (50 ou 600 mm/s) on peut raisonnablement affirmer que la durée d'arc est à l'image de la distance inter-électrodes.

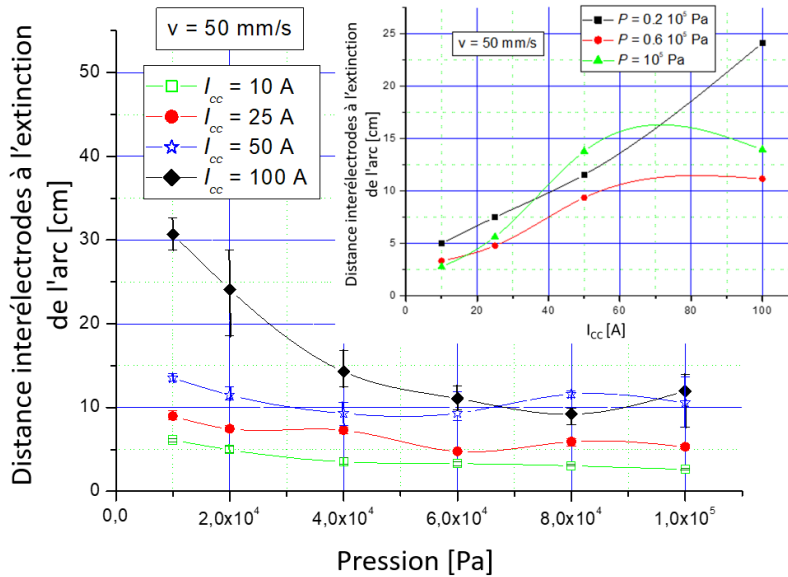


Figure 3.18 : distance inter-électrodes à l'extinction de l'arc électrique en fonction de la pression pour différentes valeurs de courant de court-circuit I_{cc} : 10, 25, 50, 100 A. La vitesse d'ouverture des électrodes est de 50 mm/s.

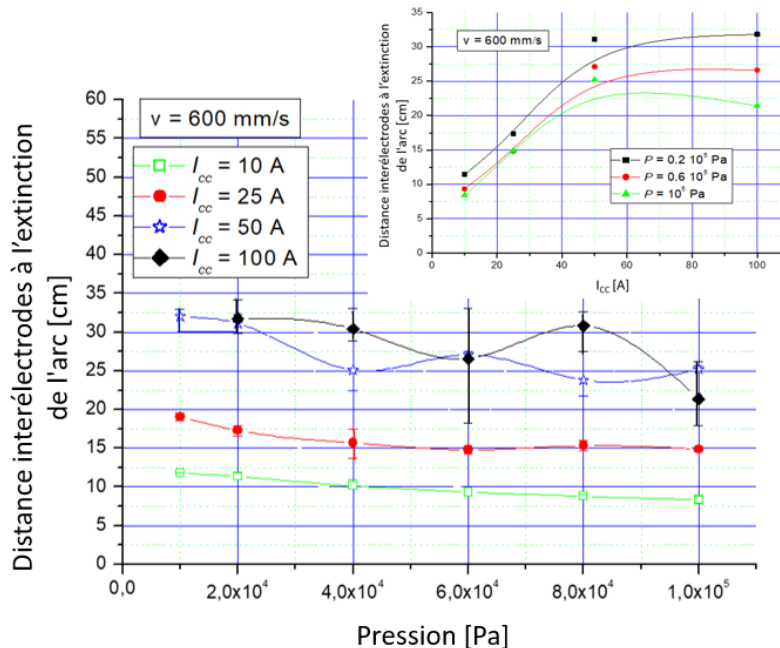


Figure 3.19 : distance inter-électrodes à l'extinction de l'arc électrique en fonction de la pression pour différentes valeurs de courant I_{cc} : 10, 25, 50, 100 A. La vitesse d'ouverture est de 600 mm/s.

Sur la figure 3.19, on note que pour $I_{cc} = 100$ A et $P = 100$ hPa, l'ouverture maximale possible n'est pas suffisante pour conduire à l'extinction de l'arc. En conséquence, aucun point de mesure

n'apparaît dans ces conditions expérimentales. On rappelle que pour une vitesse de séparation de 600 mm/s la distance inter-électrodes à l'extinction correspond à la fois à la longueur de stabilité et à la longueur de l'arc.

Sur la figure 3.18, on peut souligner que pour des valeurs de courant jusqu'à 50 A, la distance inter-électrodes à l'extinction de l'arc reste indépendante de la pression. La dépendance à la pression n'est remarquable que pour la valeur de courant la plus élevée considérée dans ce travail, c'est-à-dire 100 A et pour une basse pression, c'est-à-dire sous $4 \cdot 10^4$ Pa.

En haut à droite des figures 3.18 et 3.19, nous avons tracé la distance inter-électrodes à l'extinction en fonction de la valeur de courant I_{CC} pour 3 valeurs de pression. On peut remarquer que pour des valeurs de courant inférieures à 50 A, la relation entre la distance inter-électrodes à l'extinction et le courant I_{CC} est linéaire, pour toutes les valeurs de pression considérées. Au contraire, lorsqu'on considère des valeurs d'intensité de courant supérieures à 50 A, on observe deux comportements : une relation linéaire pour la basse pression et une saturation pour la pression de $6 \cdot 10^4$ Pa à la pression atmosphérique. L'augmentation de la vitesse de séparation favorise le phénomène de saturation, même à fort courant.

Lorsque la vitesse de séparation des électrodes est égale à 600 mm/s (figure 3.19) on peut observer que la distance inter-électrodes à l'extinction est tout à fait indépendante de la pression pour chaque valeur de courant. Quand on regarde le graphique proposé en haut à droite de cette figure, il convient de noter qu'un phénomène de saturation existe : la distance inter-électrodes à l'extinction reste à peu près constante pour des valeurs de courant supérieures à 50 A pour toutes les valeurs de pression.

Il est important de souligner que la vitesse de séparation a une influence sur la distance inter-électrodes à l'extinction. Son augmentation de 50 mm/s à 600 mm/s provoque une augmentation de 100% au moins sur la distance inter-électrodes à l'extinction de l'arc.

Compte tenu des vitesses d'ouverture présentées ici et des valeurs de distance inter-électrodes à l'extinction, on notera que la durée de l'arc peut atteindre plusieurs secondes : par exemple, à $v = 50$ mm/s, $I_{CC} = 100$ A et $P = 10^4$ Pa, la durée est proche de 6,3 s, durée très importante si on considère qu'il s'agit d'un défaut. Une telle durée conduit évidemment à la fusion partielle des électrodes traduisant une élévation de température très importante.

3.4.3.1 Observations et commentaires

Il faut rappeler que dans le cas d'une faible vitesse de séparation ($v = 50$ mm/s) la longueur de l'arc peut être très différente de la distance inter-électrodes.

La distance inter-électrodes à l'extinction et la vitesse d'ouverture étant proportionnelles, les commentaires concernant l'extinction de l'arc peuvent être appliqués à la durée de l'arc.

Il est important de souligner que la distance inter-électrodes à l'extinction de l'arc peut facilement dépasser dix ou vingt centimètres : l'arc électrique présente un fort risque d'interaction avec son environnement.

La longueur moyenne de l'arc à l'extinction est d'autant plus importante que la vitesse de séparation est importante. Différentes explications concernant l'influence de la vitesse d'ouverture peuvent être proposées. La durée de l'arc à basse vitesse est beaucoup plus importante que la durée à grande vitesse. Cela laisse suffisamment de temps au développement des phénomènes contribuant à la déformation de l'arc qui peuvent être d'origines diverses : magnéto-hydrodynamique ou encore déformation de la colonne sous l'effet de la convection thermique libre, qui résulte de l'interaction entre le gaz froid et le plasma chaud de la colonne d'arc⁵⁶. Dans notre cas, l'orientation des électrodes (et donc de l'arc électrique lui-même) est horizontale. Cela conduit à une courbure de sa colonne qui pourrait être différente dans une orientation verticale mais que nous n'avons pas étudié ici. Effectivement, la mise en place d'un banc expérimental avec un système d'ouverture tel que le nôtre dans une configuration verticale est très complexe ; notamment en ce qui concerne l'alignement du vérin avec les traversées de l'enceinte à vide mais aussi du fait de l'encombrement vertical qu'il suppose. De plus l'enceinte à vide est très lourde (550 kg) et de ce fait n'est pas mobile. Il n'est donc pas aisé de lui faire faire une simple rotation.

Globalement, la distance inter-électrodes à l'extinction est une fonction décroissante de la pression. On peut noter que la variation relative de distance à l'extinction est la plus élevée pour $I = 100$ A et $v = 50$ mm/s : elle passe d'environ 100 mm à pression atmosphérique à presque 300 mm à 100 hPa.

On voit que lorsque I_{CC} augmente au-delà d'une certaine valeur, c'est-à-dire 50 A, la distance inter-électrodes à l'extinction de l'arc peut être considérée comme constante. Pour d'autres matériaux d'électrode, plusieurs auteurs⁵⁴ ont observé que pour un courant I_{CC} inférieur à 40 A, la durée de l'arc était une fonction croissante du courant I_{CC} . Par ailleurs, la constance de la distance d'extinction a déjà été observée à pression atmosphérique pour des tensions d'alimentation de l'ordre de 40 VDC⁵⁷ et a été attribuée à l'apparition d'instabilités d'origine électromagnétique qui déstabilisent l'arc.

À une valeur de courant élevée, les barres d'erreur sur les distances d'extinction sont importantes en raison des instabilités qui induisent une mesure moins reproductible qu'à faible courant.

3.4.4 Énergie dissipée dans l'arc en fonction de la pression

Sur les figures 3.20 et 3.21, l'énergie dissipée dans l'arc a été tracée en fonction de la pression pour différentes intensités de courant d'arc et pour respectivement les deux vitesses de séparation ($v = 50$ mm/s et 600 mm/s). Pour des valeurs de courant inférieures à 50 A (inclus), on constate que la variation de pression n'entraîne pas une grande variation sur l'énergie dissipée dans l'arc électrique. En revanche, pour un courant de 100 A, l'impact de la variation de pression est considérablement élevé, notamment pour les basses pressions.

Pour les deux vitesses d'ouverture considérées et pour les valeurs de courant inférieures à 50 A

⁵⁶ A.M. Howatson *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. 9, 1101 (1976)

⁵⁷ T. Klonowski *et al.*, IEEE Trans. Vehic. Technol. 56, 2017 (2007)

(inclus), on peut remarquer que la pression n'a pas d'influence drastique sur l'énergie dissipée dans l'arc. De plus, lorsque la vitesse d'ouverture est faible, l'arc vit plus longtemps ce qui fait qu'il peut transporter une énergie plus élevée. Une augmentation de la durée de l'arc se traduit par une colonne d'arc plus convective. Ce phénomène de convection régit la longueur de la colonne d'arc et on comprend alors que plus d'énergie est nécessaire pour maintenir un arc plus long.

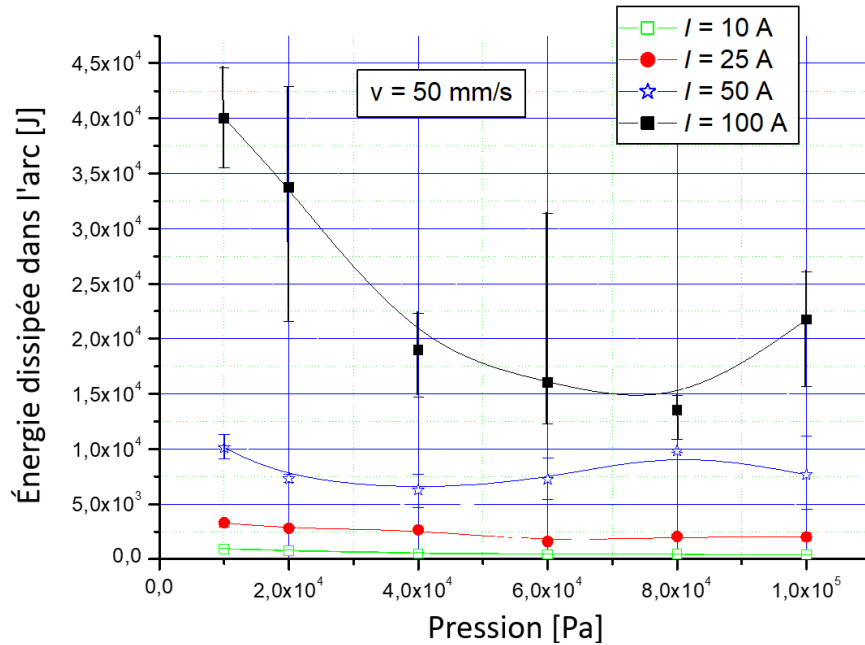


Figure 3.20 : énergie dissipée dans l'arc en fonction de la pression pour différentes valeurs I_{cc} (10, 25, 50, 100 A). La vitesse d'ouverture est de 50 mm/s.

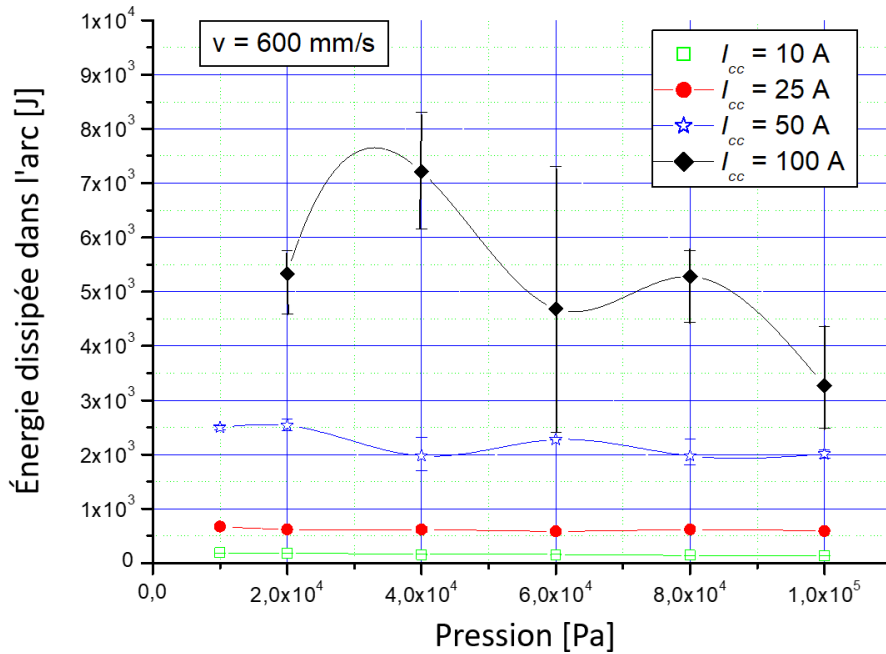


Figure 3.21 : énergie dissipée dans l'arc en fonction de la pression pour différentes valeurs I_{cc} (10, 25, 50, 100 A). La vitesse d'ouverture est de 600 mm/s.

L'énergie dissipée dans l'arc pour une vitesse de séparation de 50 mm/s est nettement supérieure à celle de 600 mm/s, ceci s'explique par le fait que la durée d'existence de l'arc est plus grande pour la vitesse de séparation à 50 mm/s. Un autre facteur qui peut augmenter l'énergie dissipée dans l'arc dans le cas de la vitesse de séparation de 50 mm/s est la présence d'instabilités d'arc. Ces instabilités sont caractérisées par une extension de la colonne d'arc par rapport à la distance inter-électrodes à l'extinction. La conséquence directe de cette extension est une chute de tension plus importante dans la colonne d'arc qui génère plus de dissipation d'énergie dans la colonne d'arc. Au contraire, dans le cas d'une vitesse de séparation de 600 mm/s, la longueur de l'arc est égale à la distance inter-électrodes à l'extinction de l'arc.

L'énergie dissipée dans l'arc peut atteindre des valeurs très importantes (10 kJ ou plus). Comme déjà observé pour une tension d'alimentation inférieure (42 VDC)³³, l'énergie ne dépend pas fortement des valeurs de pression pour de faibles intensités de courant. En comparant les résultats actuels à ceux présentés en référence³³ en ce qui concerne l'influence de la tension d'alimentation : pour une tension d'alimentation de 36/42 VDC, $I_{CC} = 70$ A et $v = 300$ mm/s, l'énergie moyenne dissipée dans l'arc varie avec la pression entre 6 et 12 J. Dans le cas présent (540 VDC), pour $I_{CC} = 50$ A et $v = 50$ mm/s, elle varie dans la gamme [5 - 10] kJ, pratiquement 1000 fois plus grand. De même, dans Landfried *et al.*³³ pour $I_{CC} = 300$ A, l'énergie moyenne varie dans la plage [60 - 120] J. Dans ce travail pour $I_{CC} = 100$ A, elle varie dans la plage [13 - 40] kJ. À partir de ces données, on peut remarquer que l'influence de l'augmentation de la tension ne conduit pas à une augmentation linéaire de l'énergie dissipée par l'arc. Lorsqu'on augmente d'un ordre de grandeur la tension d'alimentation, l'énergie dissipée par l'arc gagne trois ordres de grandeur.

L'énergie, la distance inter-électrodes à l'extinction de l'arc et la durée de l'arc évoluent de manière similaire avec la pression.

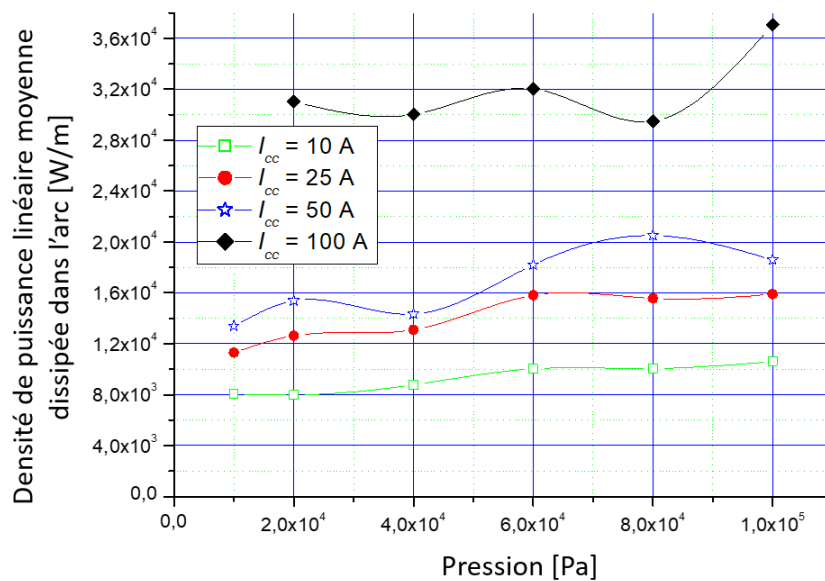


Figure 3.22 : densité de puissance linéaire moyenne dissipée dans l'arc en fonction de la pression pour différentes valeurs I_{CC} (10, 25, 50, 100 A). La vitesse d'ouverture est de 600 mm/s.

Sur la figure 3.22, nous avons tracé la densité de puissance linéaire moyenne dissipée dans l'arc en fonction de la pression pour la vitesse de séparation maximale de $v = 600$ mm/s. On observe alors clairement l'influence de la pression sur ce paramètre : plus la pression est élevée, plus l'arc est énergétique.

3.5 Caractérisation d'un contacteur HVDC en environnement dépressurisé

3.5.1 Introduction

L'évolution des tensions embarquées dans les futurs réseaux aéronautiques, va rendre indispensable l'emploi de composants particulièrement fiables pour la commutation et la coupure tout en tenant compte des contraintes spécifiques liées aux conditions de pression aéronautique (50 hPa - 1000 hPa). Cette évolution nécessitera des dispositifs capables d'établir, de supporter et d'interrompre des courants dans les conditions normales du réseau, y compris dans des conditions de surcharges. Un enjeu important pour les professionnels du secteur aéronautique sera la mise au point de dispositifs de coupure capables de fonctionner et d'assurer une isolation galvanique d'une part dans les nouvelles conditions de tension et d'autre part dans les conditions de pression aéronautique.

Confronté à ce problème, l'approche la plus pragmatique consiste à effectuer des essais de coupure dans de telles conditions de pression avec des dispositifs habituellement utilisés dans des conditions de réseaux similaires.

Dans cette partie, nous présentons des tests que nous avons réalisés en conditions aéronautiques pour un contacteur habituellement utilisé dans les applications ferroviaires (Alstom CITI 802). Les tests de coupure ont été réalisés pour des intensités de courant jusqu'à 300 A sous 540 VDC et des charges inductives jusqu'à 1 mH.

3.5.2 Description de l'appareil et rappel concernant les principes de la coupure DC

L'appareil considéré dans cette partie est le contacteur « Alstom CITI 802 ». Un contacteur est un interrupteur à commande électrique utilisé pour commuter un circuit d'alimentation électrique. Il est généralement contrôlé par un circuit qui a un niveau de puissance beaucoup plus bas que le circuit commuté. Dans le cas du dispositif étudié, son pouvoir de coupure est de 750 VDC / 300 A avec une constante de temps $L/R = 15$ ms. Une photographie du contacteur de test est donnée sur la figure 3.23. Il s'agit d'un contacteur à double contact et deux chambres de coupure identiques sont signalées sur la figure. Dans ces deux compartiments, l'arc électrique est « amené » vers une chambre de « déionisation » sous l'action du champ magnétique des aimants permanents et de la convection. Les deux chambres ne sont pas étanches à l'air afin de faciliter l'entrée de l'arc dans la chambre de coupure. Schématiquement, en régime DC, l'extinction de l'arc se produit lorsque la tension de l'arc est supérieure à la tension qui peut être fournie par le circuit (alimentation DC et

éventuelle charge inductive). Par conséquent pour la coupure d'un arc DC il existe deux possibilités soit l'augmentation de la tension d'arc par l'allongement de sa colonne soit le fractionnement de l'arc en plusieurs petits arcs. Ainsi la tension d'arc augmente du fait de l'addition des chutes de tension anodique et cathodique.



Figure 3.23 : photographie du contacteur présentant deux chambres de coupure (« déions »).

La phase de coupure passe principalement par trois étapes : l'apparition de l'arc électrique entre les contacts suite à leur ouverture, le déplacement de l'arc entre deux « cornes » vers la chambre de coupure et finalement le fractionnement et l'extinction de l'arc dans la chambre de coupure. Le rôle de la chambre de « déionisation » et du fractionnement de l'arc est illustré sur la figure 3.24.

Sur cette figure, les deux cas suivants sont représentés :

- un arc électrique unique de longueur d , qui se produit à l'entrée de la chambre de coupure suite à l'ouverture de contacts. Dans ce cas, la tension d'arc (tension entre l'anode et la cathode) s'écrit sous la forme :

$$U_{AC} = |E_{col}| \times d + (V_A + V_C) \quad (3.3)$$

Où E_{col} est le champ électrique dans la colonne d'arc, d est la longueur de l'arc (approximativement égale à la distance entre l'anode et la cathode). V_A et V_C sont respectivement les chutes de tension anodique et cathodique.

- plusieurs arcs électriques intervenant entre n plaquettes métalliques, chacune ayant une épaisseur ep . Dans ce cas, la tension aux bornes du contacteur s'écrit sous la forme :

$$U_{AC} = |E_{col}| \times (d - n \times ep) + (V_A + V_C) \times (n + 1) \quad (3.4)$$

Un ordre de grandeur pour E_{col} est d'environ 10^3 V/m et pour $V_A + V_C$ d'environ 20 V. Cette dernière valeur montre l'importance de la division de l'arc électrique en plusieurs arcs. Par exemple pour $n = 10$ et $ep = 1$ mm on pourra avoir une augmentation de la tension aux bornes du contacteur de l'ordre de 190 V.

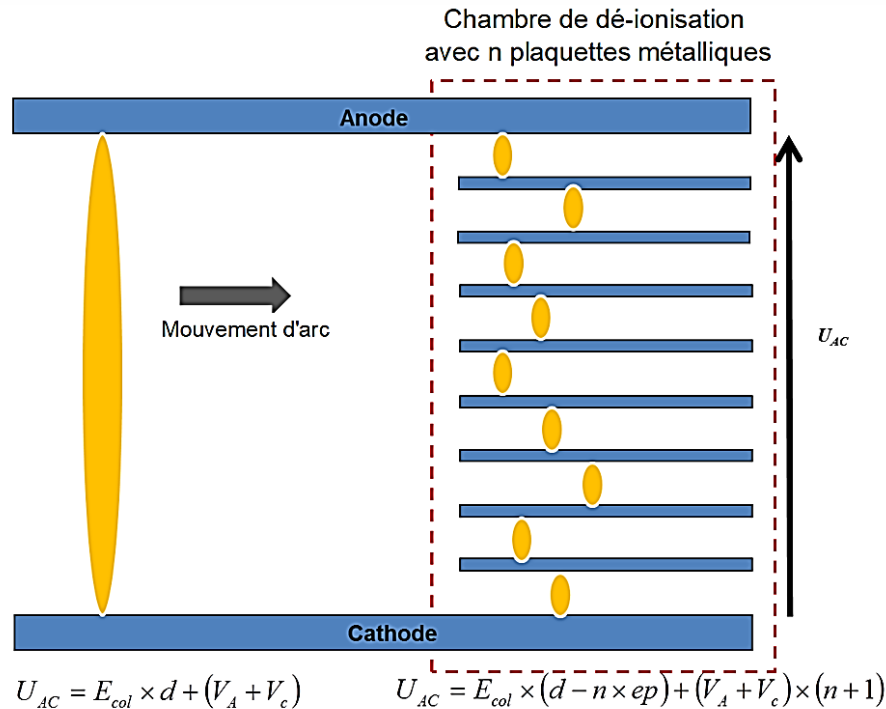


Figure 3.24 : représentation schématique simplifiée de l'arc dans la chambre de coupure. À gauche : un arc unique se déplaçant vers l'ensemble des plaquettes sous l'action des forces magnétiques et de convection. À droite de multiples petits arcs dans la chambre de dé-ionisation.

3.5.3 Description des conditions d'essai

Le circuit électrique présenté sur la figure 3.25 est constitué de l'alimentation DC (540 VDC), d'une résistance et d'une inductance en série avec le contacteur testé qui est placé dans une enceinte. L'intensité du courant et la tension du contacteur sont enregistrées pendant la phase de coupure. Différentes valeurs de l'inductance (0 mH, 0,5 mH et 1 mH) et de l'intensité du courant (100, 200 et 300 A) ont été testées. Différentes valeurs de pression ont été utilisées également.

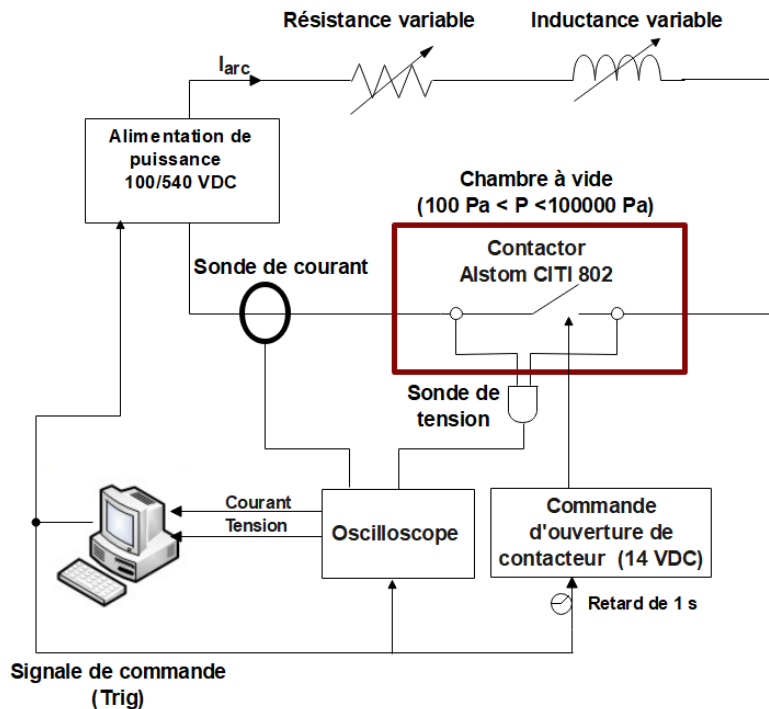


Figure 3.25 : schéma du dispositif expérimental utilisé pour tester la capacité de coupure du contacteur « Alstom CITI 802 » en environnement dépressurisé.

Remarque : il s'agit d'un contacteur dédié au régime DC, il faut respecter impérativement les signes de branchement du contacteur, car en cas de polarité inversée, l'interaction du champ des aimants avec l'arc aura tendance à l'empêcher de rentrer dans la chambre de coupure, ce qui détériorera les performances du contacteur dans un premier temps (et le contacteur lui-même après plusieurs essais). Une alimentation de tension continue 14 VDC est utilisée pour la commande de l'ouverture du contacteur, lorsque la tension n'est pas appliquée, un ressort de rappel maintient le contacteur en position fermée (état de repos).

3.5.4 Résultats

Les résultats présentés dans cette partie concernent :

- l'évolution de l'intensité du courant de l'arc et de la tension aux bornes du contacteur,
- l'influence de la charge inductive à la pression atmosphérique et à 200 hPa sur la durée de coupure et l'énergie dissipée dans le contacteur,
- l'influence de la pression sur la capacité de coupure du contacteur à 300 A.

3.5.4.1 Évolution de l'intensité du courant de l'arc et de la tension aux bornes du contacteur

Des exemples d'évolutions typiques de l'intensité du courant et de la tension du contacteur sont présentés sur la figure 3.26. Pour chaque ouverture de contact, on peut observer une augmentation de la tension qui s'accompagne d'une faible diminution de l'intensité du courant. L'intensité du courant ne diminue fortement que lorsque l'arc pénètre dans la chambre de coupure et plus précisément lorsqu'il se divise en plusieurs arcs électriques en série, conduisant à l'extinction de l'arc (la tension demandée par l'arc dans le contacteur est supérieure à la tension de l'alimentation).

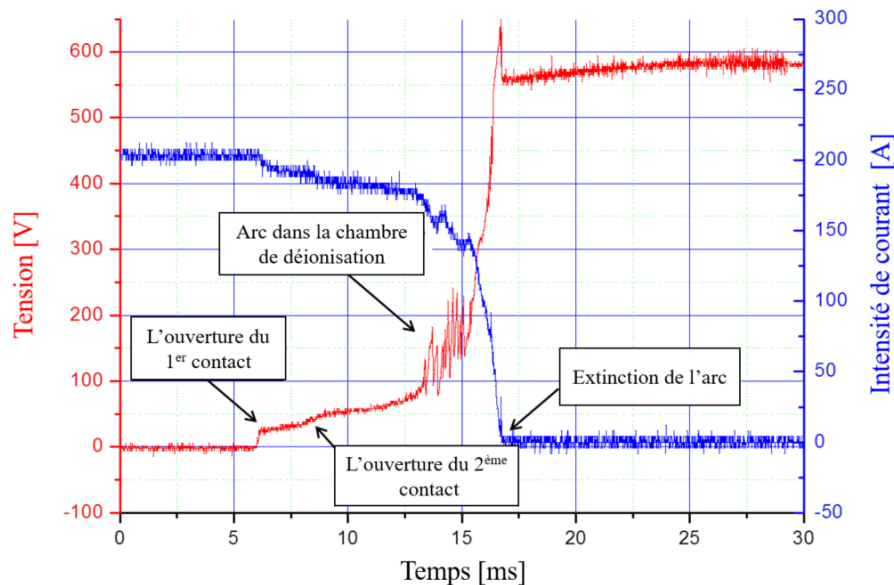


Figure 3.26 : exemple d'évolution typique de l'intensité du courant et de la tension lors d'une phase de coupure.

3.5.4.2 Influence de la charge inductive à la pression atmosphérique et à 200 hPa sur la durée de coupure et de l'énergie dissipée dans le contacteur

Sur les figures 3.27 et 3.28, les délais de coupure et l'énergie dissipée dans le contacteur ont été tracés en fonction de la valeur de charge inductive respectivement pour $P = 1000$ hPa et $P = 200$ hPa. On observe une légère augmentation du temps de coupure lorsque la pression diminue. Cette influence n'est réellement visible que pour des valeurs élevées de l'inductance où dans ce cas la durée de l'arc est plus grande pour 200 hPa que pour 1000 hPa (environ + 30% à + 50 % de la durée à pression atmosphérique).

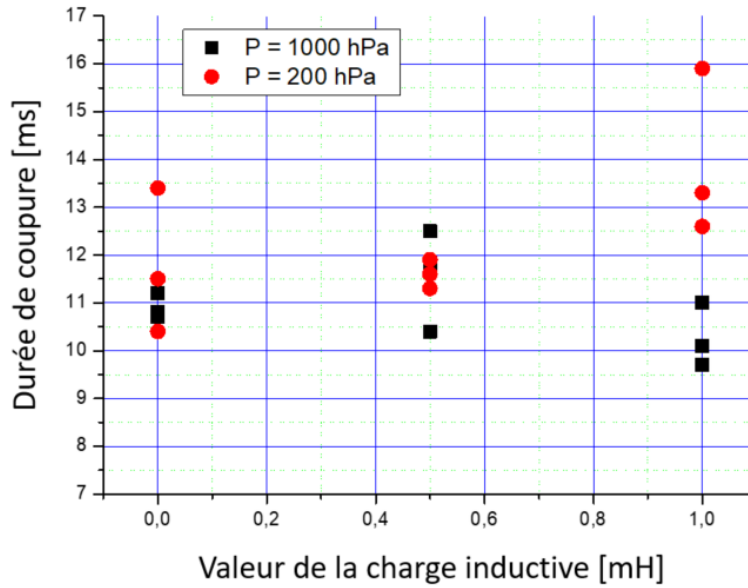


Figure 3.27 : durée de coupure en fonction des valeurs de la charge inductive pour $I = 300 \text{ A}$ – $P = 1000 \text{ hPa}$ et 200 hPa .

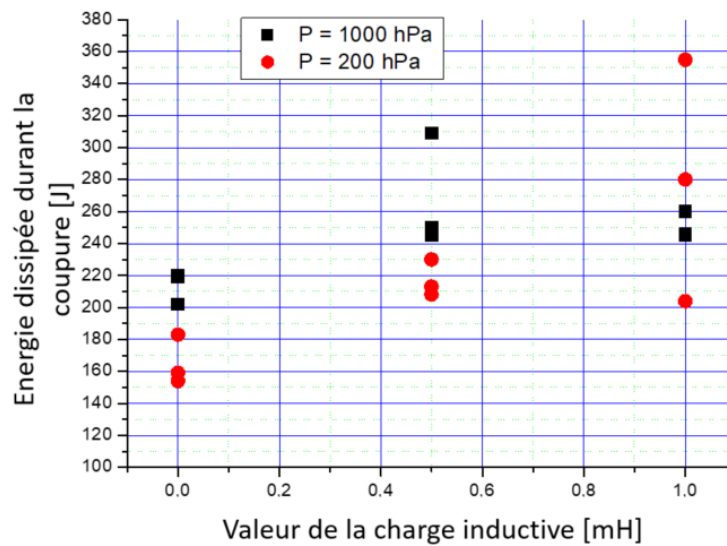


Figure 3.28 : énergie dissipée durant la coupure en fonction des valeurs de charge inductive pour $I = 300 \text{ A}$ – $P = 1000 \text{ hPa}$ et 200 hPa .

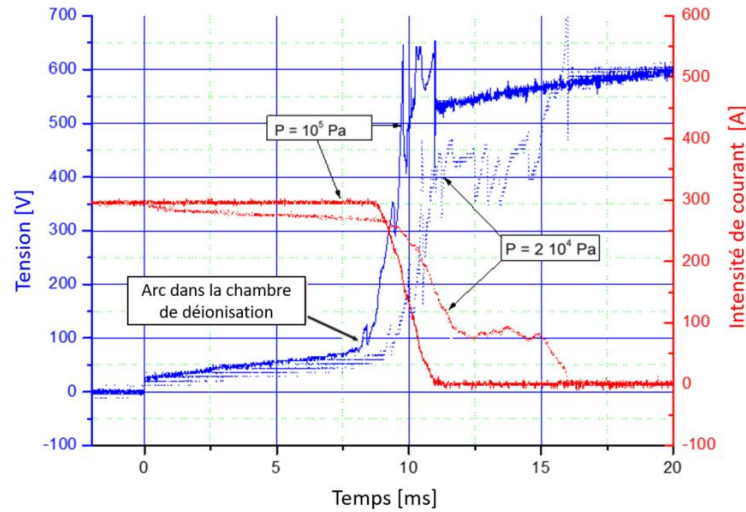


Figure 3.29 : évolution de $U(t)$ et $I(t)$ lors de la coupure pour deux valeurs de pression : 200 hPa et 1000 hPa. $L = 1$ mH.

Sur la figure 3.29, nous avons représenté l'évolution de la tension d'arc ainsi que du courant d'arc dans deux conditions de pression : à pression atmosphérique (1000 hPa) et à 200 hPa. On voit apparaître l'influence de la pression sur la durée de l'arc qui vaut un peu plus de 11 millisecondes à pression atmosphérique et presque 16 millisecondes lorsque la pression est basse (presque 50% d'augmentation). On remarque aussi que l'enchaînement des événements est également modifié : l'arrivée de l'arc dans la chambre de coupure est retardée (du fait de la basse pression la vitesse de déplacement de l'arc est moindre) et l'extinction de celui-ci lorsqu'il a atteint la chambre de coupure est également modifiée. Contrairement à ce qu'il se passe à pression atmosphérique où l'on peut voir le courant chuter linéairement de 300 A à 0 en environ 2 millisecondes, à basse pression, une première chute de courant linéaire (avec une pente moindre) a lieu mais le courant stagne à une valeur d'environ 80-100 A pendant au moins 3 ms avant de finalement tomber à 0. Plusieurs éléments peuvent être avancés pour l'expliquer. D'abord l'effet d'une pression plus basse est de modifier la force de Laplace s'exerçant naturellement sur un arc à pression atmosphérique et donc cela conduit l'arc à être moins bien « poussé » vers la chambre de coupure (chapitre 2). Ensuite, la possibilité d'avoir un allongement de la colonne d'arc à basse pression, la coupure de l'arc lié à son découpage en de multiples arcs en vue de multiplier les chutes de tension aux électrodes devient moins efficace : les distances entre plaquettes sont dimensionnées pour des arcs, une fois fractionnés, dont les longueurs de colonne seront voisines des distances inter-électrodes, or à basse pression, ce n'est plus le cas. Enfin, on peut se forger l'idée que la pression diminuant, l'extension « radiale » de l'arc et des pieds d'arcs est plus importante qu'à pression atmosphérique si bien que la surface des plaquettes se trouve insuffisante pour faire « rentrer tout le pied » et on se retrouve dans une situation où certaines plaquettes sont court-circuitées, ce qui se traduit par une difficulté supplémentaire pour éteindre l'arc.

Dans des dispositifs de coupure, ce qui compte c'est à la fois le temps mis pour éteindre l'arc, qui

juge de son efficacité, mais également la puissance et l'énergie dissipée au cours de l'arc dans le dispositif, qui juge de la possibilité de reproduire de multiples fois la coupure. Sur les figures 3.30 et 3.31 nous proposons l'évolution de la puissance instantanée (en noir, axe de gauche) ainsi que l'énergie (en rouge, axe de droite) dissipées par l'arc au cours de la coupure pour une valeur de pression « normale », pression atmosphérique, et pour une valeur de pression basse, 200 hPa. Dans les deux cas, nous avons placé une inductance de 1 mH afin d'observer nettement les effets de la pression (pour des valeurs plus basses de l'inductance mise en jeu, l'effet est moins net et aurait nécessité plus d'essais et donc plus de contacteurs (ce qui à la vue de leur prix unitaire, aurait été très coûteux). Premièrement, ce qui interpelle, ce sont les valeurs maximales de la puissance instantanée qui sont du même ordre de grandeur, environ 100 kW. Si on ne regarde que ces valeurs, alors on s'attend à des dégâts moindres au niveau des chambres de coupure pour les basses pressions dans la mesure où les pieds des arcs sont moins concentrés. Pourtant lors de nos essais, nous avons pu constater que les contacteurs devenaient non fonctionnels après plusieurs essais en basse pression. Cela peut s'expliquer aisément lorsque l'on regarde l'évolution de l'énergie dissipée dans le contacteur, particulièrement à partir de l'entrée dans la chambre de dé-ionisation, on mesure une énergie dissipée de l'ordre de 140 J alors qu'à pression basse elle est de l'ordre de 260 J environ. Ceci est une conséquence directe du temps passé dans la chambre de déionisation.

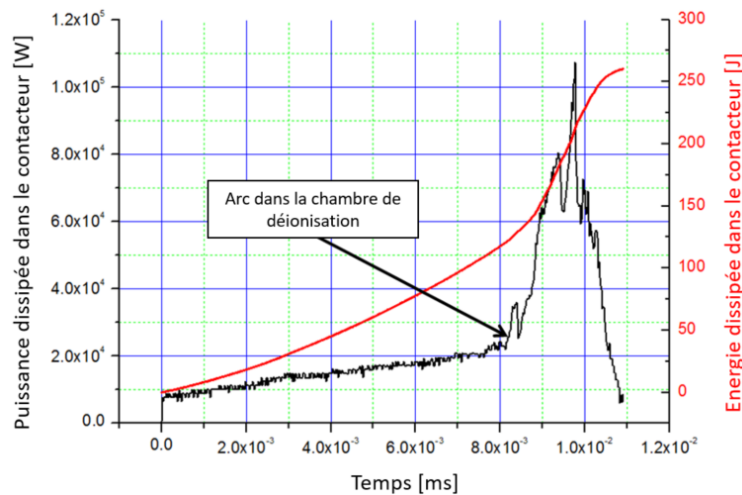


Figure 3.30 : évolution de la puissance et de l'énergie dissipée dans le contacteur durant la coupure à $P = 1000$ hPa, $L = 1$ mH, $I = 300$ A

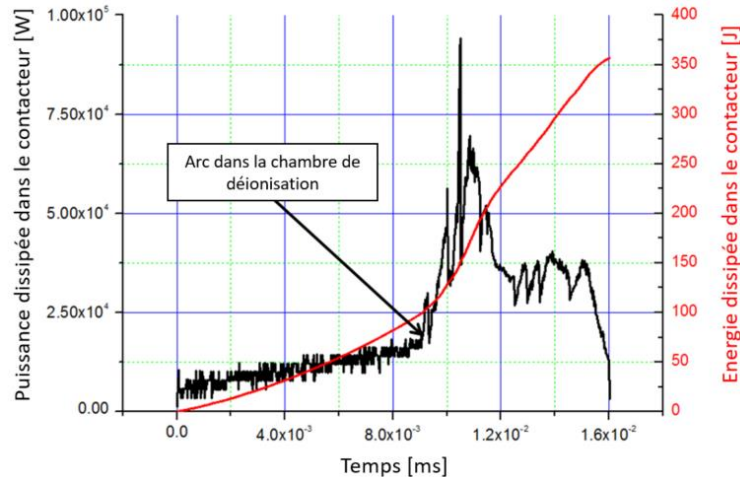


Figure 3.31 : évolution de la puissance et de l'énergie dissipée dans le contacteur durant la coupure à $P = 200$ hPa, $L = 1$ mH.

3.5.4.3 Influence de la pression sur la capacité de coupure du contacteur pour $I = 300$ A

Bien que l'objectif initial ait été de tester le fonctionnement de ce contacteur pour des pressions avoisinant celles rencontrées en altitude de vol, soit approximativement 200 hPa, nous avons poussé l'étude, par simple curiosité, pour des pressions plus faibles, jusqu'à 50 hPa. C'est l'objet des trois figures suivantes où le courant de court-circuit est de 300 A et l'inductance mise en jeu est de 1 mH. Sur les figures 3.32 et 3.33 sont respectivement représentés le temps de coupure et l'énergie dissipée par l'arc en fonction de la valeur de la pression. On retrouve les mêmes ordres de grandeurs pour des pressions entre 200 hPa et la pression atmosphérique. En revanche, lorsque la pression est encore diminuée, on observe que la durée de coupure moyenne monte jusqu'à 170 millisecondes soit plus de 10 fois la durée à pression atmosphérique. L'énergie dissipée qui est de l'ordre de 300 J à pression atmosphérique grimpe à plus de 4000 J à 50 hPa. Pour comprendre ces différences, il faut regarder la figure 3.34 où sont tracées les évolutions de $U(t)$ et de $I(t)$ à 50 hPa ($I_{CC} = 300$ A et $L = 1$ mH). On voit alors très nettement l'arrivée de l'arc dans la 1^{ère} chambre de dé-ionisation en environ 25 millisecondes (déjà 2,5 fois plus que la durée de coupure à pression atmosphérique) et ensuite l'arrivée dans la seconde chambre de dé-ionisation à $t = 40$ ms. C'est à ce moment que le plus gros problème survient : l'arc ne s'éteint que 80 millisecondes après. Comme nous l'avons évoqué précédemment, la densité volumique des forces susceptibles de le mettre en mouvement sous l'effet de son propre courant (force de Laplace) est réduite à basse pression, de plus, la conception de ce type de contacteur (évacuation vers le haut) fait que la convection thermique renforce son efficacité. Or, lorsque la pression est abaissée, le phénomène de convection peut devenir moins important. Tout cela cumulé tend à maximiser le temps de stagnation de l'arc dans les chambres de dé-ionisation (ou à leurs entrées) ce qui accentue la détérioration du système, rend inefficace la coupure et minimise la durée de vie du contacteur.

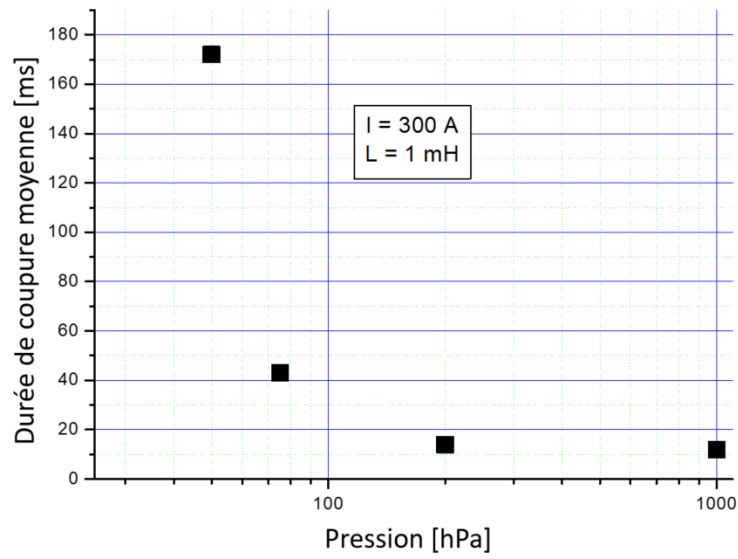


Figure 3.32 : durée de coupure moyenne en fonction de la pression pour $I = 300$ A et $L = 1$ mH.

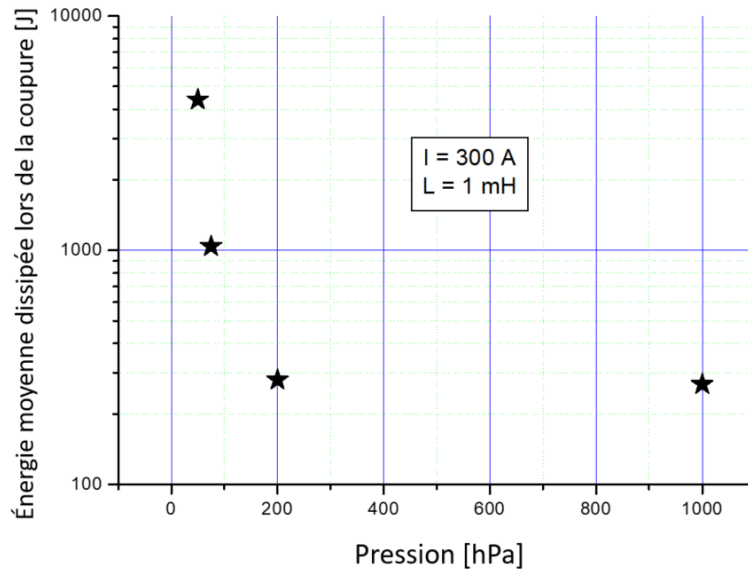


Figure 3.33 : énergie moyenne dissipée lors de la coupure en fonction de la pression pour $I = 300$ A et $L = 1$ mH.

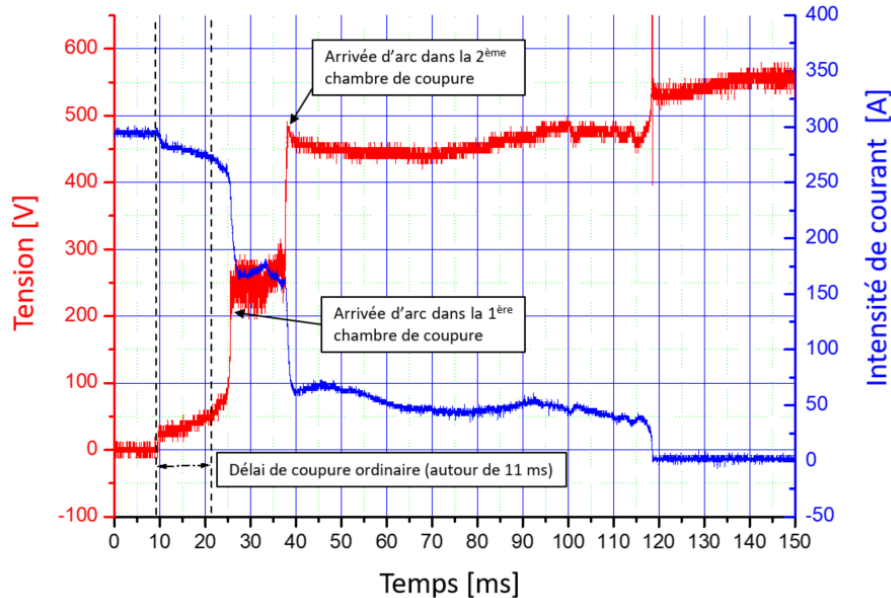


Figure 3.34 : évolution de $U(t)$ et $I(t)$ lors de la coupure pour $P = 50 \text{ hPa}$, $L = 1 \text{ mH}$.

L'étude présentée a mis en évidence plusieurs éléments importants liés à l'intégration d'un dispositif de commutation ou de commutation électromécanique dans un réseau aéronautique «HVDC» où la coupure d'un arc électrique se produit dans un système non étanche. Au-dessus de 200 hPa, la pression n'a pas d'effet dégradant sur l'efficacité de la coupure. Il est important de noter que ce niveau de pression correspond à une altitude de 11000 m, bien plus élevée que les altitudes de vol des hélicoptères ou des nouveaux avions de type VTOL ou STOL. En revanche, en dessous d'une pression de 200 hPa, qui peut correspondre aux altitudes auxquelles volent les avions de ligne ou les Bizjets (business jet), les technologies de commutation en environnement dépressurisé risquent de ne plus représenter les solutions privilégiées.

3.6 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'influence de la pression et de la valeur de l'intensité du courant sur le comportement d'un arc électrique (stabilité, durée ...) pour différentes valeurs de la vitesse de séparation des électrodes. Ceci peut correspondre à des ouvertures de contacts ou à des phénomènes involontaires tels qu'une déconnexion de câbles dans le cas d'un arc en régime DC sous 540 VDC. Pour cela un système de création d'arc par ouverture à l'aide d'un vérin électrique a été utilisé et nous nous sommes concentrés sur des pressions dans la gamme [100 hPa-1000 hPa], des intensités de courant d'arc dans la gamme [10 A -100 A] et deux vitesses de séparation : 50 mm/s et 600 mm/s.

Une étude de l'influence de divers paramètres sur la stabilité de l'arc a été entreprise. L'arc est considéré comme stable quand schématiquement il a une forme quasi axisymétrique, bouge peu sur les électrodes et la longueur de sa colonne est approximativement égale à la distance inter-électrodes. Cette étude a montré que plus la pression était faible et la séparation des électrodes

rapides plus l'arc pouvait s'étendre de façon « stable » sur de longues distances (jusqu'à plusieurs dizaines de centimètres).

Différente de la longueur de stabilité, la distance inter-électrodes pour laquelle l'arc s'éteint a été mesurée dans diverses conditions. Là encore, les conditions expérimentales pour lesquelles l'arc peut s'étendre spatialement le plus sont : la basse pression, une vitesse maximale de déconnexion et une intensité maximale du courant.

Une estimation de l'énergie dissipée dans l'arc et de la densité de puissance linéaire moyenne dissipée dans l'arc ont aussi été proposées, montrant une faible dépendance vis-à-vis de la pression pour des valeurs d'intensités du courant jusqu'à 50 A. La dépendance est plus marquée pour une intensité de 100 A. Une application de ce qui a été vu précédemment a enfin été donnée dans le cas d'un contacteur utilisé habituellement pour les mêmes gammes de tension et de courant mais à pression atmosphérique, mettant clairement en évidence l'effet de la baisse de pression sur un tel dispositif.

Chapitre 4 :
Caractérisation paramétrique de l'arc : influence de
l'intensité, de la distance inter-électrodes et de la
pression

4.1 Introduction

Le chapitre quatre est la « suite » logique du chapitre 3 dans le sens où il complète la caractérisation d'un arc libre en s'intéressant plus particulièrement à la caractérisation des paramètres électriques d'un tel arc toujours dans les mêmes conditions de pression [100 hPa – 1000 hPa] et de courant [10A - 100A]. Le chapitre commence par une étude bibliographique qui concerne plus particulièrement la caractéristique $U_{arc} = f(I_{arc}, d, P)$. Suite à cette étude, il a paru intéressant de compléter les travaux déjà menés d'une part en vue d'étendre la gamme d'étude en terme d'intensité du courant d'arc et de distance inter-électrodes et d'autre part, étant donné que peu de travaux ont été menés pour des pressions en dessous de la pression atmosphérique, d'étendre aussi la gamme de pression en s'intéressant au domaine des pressions aéronautiques. Nous nous sommes donc plus particulièrement intéressés au cas des fortes distances inter-électrodes (supérieures à 10 mm) et aux intensités de courant là aussi supérieures à 10A ainsi qu'aux pressions allant de 100 hPa à 1000 hPa. La méthode utilisée est alors décrite elle se compose d'une phase de collecte de données expérimentales et d'une phase d'exploitation en vue d'obtenir le champ électrique dans la colonne en fonction des différents paramètres de l'étude. Enfin une expression générale de la tension d'arc en fonction de l'intensité du courant, de la distance inter-électrodes et de la pression est proposée. Bien conscient qu'il ne peut s'agir d'une expression très précise, nous avons aussi tenté d'en donner les limites.

4.2 Rappel bibliographique

4.2.1 Introduction

La très grande variété des applications de l'arc électrique est telle que de nombreux travaux ont été réalisés afin de déterminer les caractéristiques électriques d'un arc, qu'il s'agisse d'arcs libres ou contraints, d'arcs alimentés en continu (DC) ou en alternatif (AC). Parmi les très nombreux travaux concernant la caractérisation électrique des arcs électriques, une part importante des publications concerne l'étude de l'arc dans un procédé précis (four à arc, torche à plasma, ...). Dans ces contextes spécifiques il s'avère que les contraintes technologiques du procédé (écoulement gazeux imposé, présence d'un champ magnétique mettant l'arc en mouvement, injection de particules...) représentent les paramètres déterminants en ce qui concerne les valeurs prises par la tension d'arc. Il est clair que ce ne sont pas ces arcs qui ont fait l'objet de notre étude. Nous nous sommes principalement intéressés au cas des arcs libres. La question de la nature de l'alimentation électrique (continue ou alternative) peut paraître, au premier abord, importante mais très peu d'articles concernent ce point. Cependant, les nombreux travaux de modélisation des arcs en régime continu ou alternatif utilisent les mêmes sources bibliographiques. On peut citer les travaux de Sawicki⁵⁸ qui a étudié dans quelles conditions les caractéristiques obtenues pour des arcs alimentés en régime DC pouvaient être utilisées pour des arcs alimentés en régime AC. Il a ainsi

⁵⁸ A. Sawicki, Biuletyn Instytutu S SpaWalnictwa, vol. 6, 2013

obtenu que jusqu'à des fréquences de 20 kHz, les tensions d'arc étaient similaires dans ces deux régimes. Avant de présenter une synthèse critique des principaux travaux sur le sujet, il est intéressant de présenter l'allure générale de la tension d'arc en fonction de l'intensité du courant d'arc. Elle prend la forme donnée sur la figure 4.1 sur laquelle nous avons rapporté la courbe proposée par Hall *et al.*⁵⁹. Sur cette figure, il s'agit d'un arc dans l'air à pression atmosphérique entre deux électrodes d'acier distantes de 9,5 mm. On distingue usuellement deux zones :

- une zone de faibles intensités du courant pour laquelle la tension d'arc est une fonction décroissante de l'intensité,
- une zone de plus fort courant dans laquelle la tension dépend peu du courant ou est légèrement décroissante.

La limite entre ces deux zones est « floue » et dépend de nombreux paramètres tels que la distance inter-électrodes, le matériau d'électrodes et le gaz plasmagène (nature, composition et pression). Ainsi, sera-t-il indispensable, lors de cette étude d'avoir à l'esprit les limites de validité des modèles proposés principalement en termes de valeurs des intensités considérées. Certains auteurs se sont plus particulièrement intéressés au domaine des faibles intensités (souvent dans la gamme [1 – 50] A) alors que d'autres, en fonction du domaine d'application, se sont intéressés au domaine des forts courants (jusqu'à plusieurs kA).

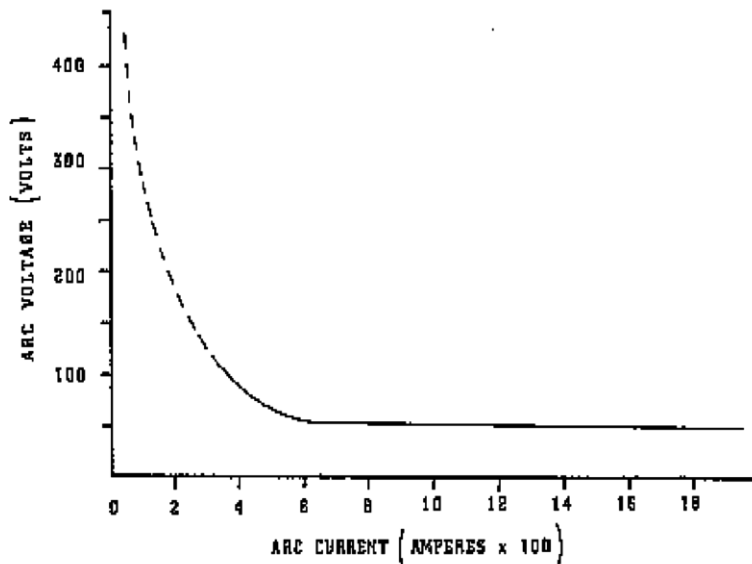


Figure 4.1 : caractéristique $U_{arc} = f(I_{arc})$ typique (extraite de Hall *et al.*).

Dans la bibliographie proposée par la suite, nous précisons les domaines de validité. D'une façon générale la caractéristique $U = f(I, d)$ pour un arc prend la forme suivante :

$$U_{arc} = A + B \times d + \frac{C + E \times d}{I_{arc}^n} \quad (4.1)$$

Où A représente la somme des chutes de tension anodique et cathodique et B le champ électrique moyen dans la colonne d'arc. Les diverses constantes (A et B mais aussi C , E et n) pouvant dépendre

⁵⁹ P.M.Hall et al., Proc. of the fifty WVU Conf. on Coal Mine Electrotechnology, Morgantown, WV 1978

du matériau d'électrode, du gaz plasmagène et des conditions environnementales. Si la distance inter-électrodes est suffisamment importante l'expression devient :

$$U_{arc} = d \times \left(B + \frac{E}{I_{arc}^n} \right) \quad (4.2)$$

Pour les forts courants le terme contenant I_{arc} devient négligeable et on aura une tension d'arc par unité de longueur qui deviendra constante :

$$U_{arc} = Bd \quad (4.3)$$

Pour des courants faibles, il vient :

$$U_{arc} = \frac{E \times d}{I_{arc}^n} \quad (4.4)$$

Dans la suite nous allons présenter un résumé de plusieurs articles. Autant que possible, pour chaque référence analysée, nous avons cherché :

- à présenter la méthode utilisée par les auteurs : description du dispositif expérimental (le cas échéant), de la méthode ... et ainsi à faire apparaître le plus clairement possible les conditions expérimentales (pression, courant, distance inter-électrodes, matériaux..) et/ou les hypothèses et limitations,
- à synthétiser les résultats obtenus et à les utiliser au mieux dans le sens de notre étude tout en gardant un regard critique sur les travaux présentés.

Dans certains cas, du fait de la similitude ou de l'aspect complémentaire des travaux, plusieurs articles seront présentés en parallèle.

4.2.2 Présentation « détaillée » de quelques travaux concernant la relation courant/tension dans le cas d'un arc électrique

4.2.2.1 Travaux d'Ayrton⁶⁰, Eather⁶¹ et Baker⁶²

L'objectif de ces travaux était d'obtenir une caractérisation électrique d'un arc électrique stable dans l'air pour des électrodes en carbone (de diamètre pouvant atteindre 18 mm). Dans l'étude présentée par Ayrton, les intensités de courant d'arc ne dépassent pas 50 A et la distance inter-électrodes d reste dans la gamme [0,5 – 8] mm. De nombreuses courbes $U_{arc} = f(I_{arc})$ pour diverses valeurs de distances inter-électrodes d sont présentées. La mesure de la tension d'arc est réalisée en régime permanent, après plusieurs minutes d'arc. L'auteur observe qu'en général 10 à 20 minutes sont nécessaires pour stabiliser la tension d'arc. La tension se stabilise sur une valeur qui peut être inférieure ou supérieure à celle mesurée dans les premières minutes d'arc. Un exemple

⁶⁰ H. Ayrton, *The Electric Arc*. London, U.K.: Electrician, 1902

⁶¹ R. H Eather "THE SILENT AND HISSING D.C. ELECTRIC ARC", *Aust. J. Phys.*, 1963, vol 16, pp. 228-39

⁶² S. C. Baker "Direct-reading metal spectroscopy with a dc arc", *British journal of Applied Physics*, vol. 5, June 1954, pp. 215-219

d'évolution de tension d'arc est donné sur la figure 4.2. On s'aperçoit que la différence de tension entre l'amorçage de l'arc et sa stabilisation en tension est dans le cas présenté de l'ordre de plus de 20 volts, ce qui est considérable. Aucune explication n'est fournie, et ce phénomène n'a pas été évoqué par ailleurs.

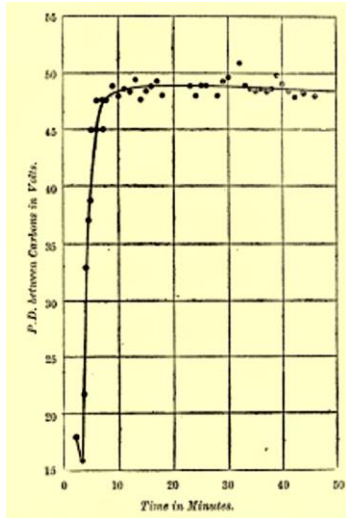


Figure 4.2 (à gauche) : évolution de la tension d'arc entre deux électrodes en carbone à pression atmosphérique. $I_{arc} = 10$ A et $d = 3$ mm (courbe extraite de Ayrton⁶⁰).

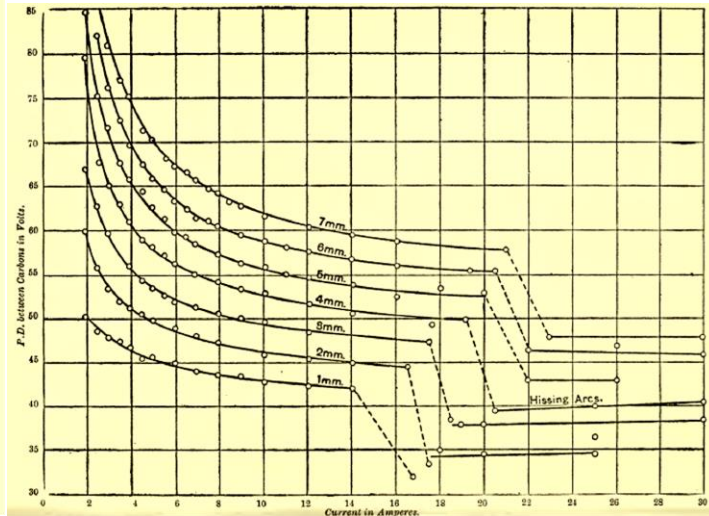


Figure 4.3 (à droite) : tension d'arc en fonction de l'intensité du courant dans l'arc ; électrodes en carbone, air à pression atmosphérique (courbe extraite de Ayrton⁶⁰).

Un exemple typique de caractéristiques est donné sur la figure 4.3. Dans ce cas l'anode a un diamètre de 11 mm et la cathode de 9 mm. Il convient de noter la discontinuité dans la tension pour des valeurs de courant de l'ordre de 15 à 20 A. Ceci est interprété par l'auteur comme un changement de type d'arc (passage d'un arc silencieux à un arc « siffleur ») accompagné d'un changement dans la stabilité de l'arc. Eather a observé ce phénomène pour des électrodes en fer et en carbone. Baker, qui a travaillé pour des intensités de courant d'arc dans la gamme [0,5 - 20] A, a observé cette discontinuité pour des électrodes en acier et en carbone mais ne l'a pas vu pour des électrodes en cuivre comme cela est montré sur la figure 4.4. Cependant Eather a observé cette transition dans le cas du cuivre pour des intensités plus faibles comme cela est représenté sur la figure 4.5.

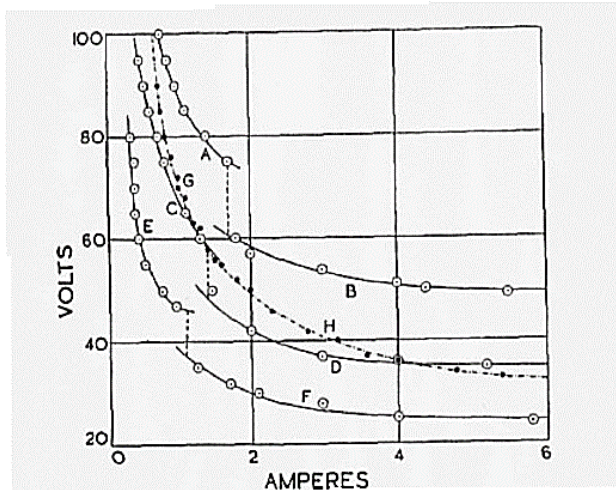


Figure 4.4 (à gauche) : $U_{arc} = f(I_{arc})$ pour des électrodes en acier et en cuivre pour diverses valeurs de la distance inter-électrode (courbe extraite des travaux de Baker⁶²).

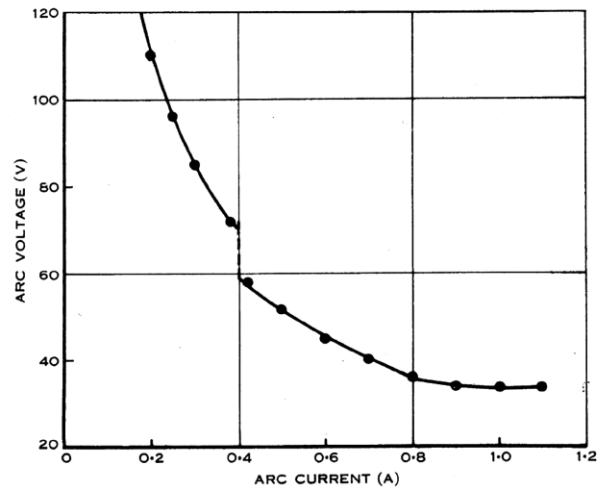


Figure 4.5 (à droite) : $U_{arc} = f(I_{arc})$ pour des électrodes en cuivre et une distance inter-électrodes de 1 mm (courbe extraite des travaux de Eather⁶¹).

Il a par ailleurs constaté que l'intensité du courant d'arc pour laquelle la transition se faisait (appelée « critical current »), variait linéairement avec la distance inter-électrodes comme cela est montré sur la figure 4.6. De plus, cette transition a été observée dans de l'azote (N_2) ce qui permet d'exclure un lien avec des phénomènes d'oxydation.

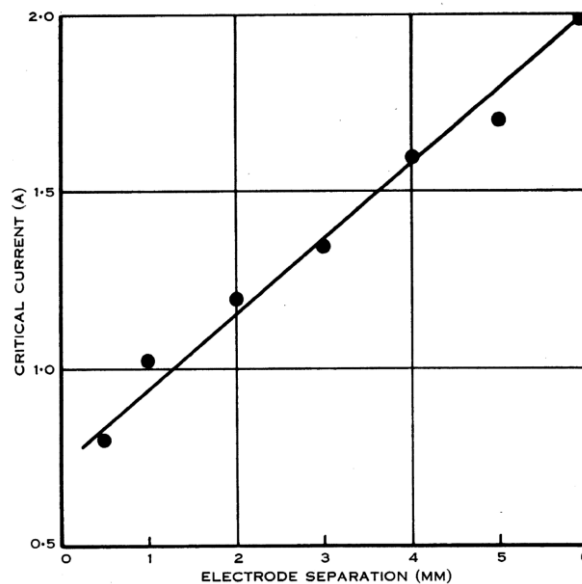


Figure 4.6 : valeur de l'intensité du courant d'arc (« critical current »), pour laquelle se fait la transition en fonction de la distance inter-électrodes – Cas d'électrodes en fer (courbe extraite des travaux de Eather⁶¹).

Dans le cas du fer ou du cuivre, Eather attribue cette transition à l'apparition de vapeur métallique dans la colonne d'arc (ceci étant lié à la diminution du potentiel d'ionisation du gaz du fait de la présence de vapeur métallique). En ce qui concerne le carbone, Ayrton attribue ce phénomène au caractère exothermique de la réaction d'oxydation du carbone conduisant à la formation de dioxyde de carbone. Par la suite, l'auteur propose une expression qui relie la tension

à l'intensité et à la distance inter-électrodes :

$$U_{arc} = a_1 + b_1 \times d + \frac{c_1 + d_1 \times d}{I_{arc}} \quad (4.5)$$

où a_1 , b_1 , c_1 , d_1 sont des constantes, d et I_{arc} sont la distance inter-électrodes et l'intensité du courant d'arc respectivement.

4.2.2.2 Travaux de Steinmetz⁶³

Dans le cas d'arcs réalisés entre des électrodes de différents matériaux (carbone, magnétite Fe3O4, zinc, cadmium) l'auteur propose une expression reliant tension d'arc, intensité du courant et distance inter-électrodes.

$$U_{arc} = a_2 + \frac{c_2 \times (d + d_2)}{\sqrt{I_{arc}}} \quad (4.6)$$

où a_2 , c_2 , d_2 sont des constantes pouvant dépendre du matériau d'électrode. À titre d'exemple les résultats expérimentaux donnant $U_{arc} = f(d)$ pour différentes valeurs de I_{arc} ainsi que le tracé correspondant à la formule donnée par l'équation 4.6 sont tracés sur la figure 4.7 extraite de cette publication. L'équation 4.6 ne permet pas de décrire les arcs pour lesquels la distance inter-électrodes est inférieure à quelques centaines de micromètres.

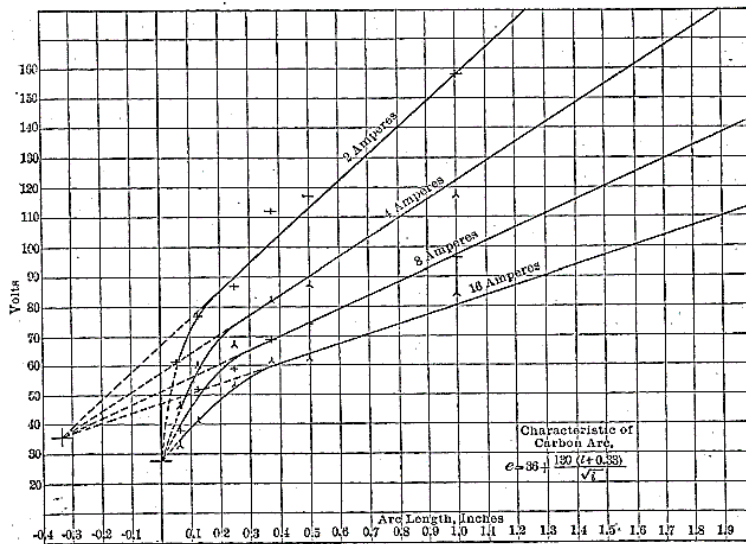


Figure 4.7 : tension d'arc en fonction de la distance inter-électrodes pour diverses valeurs de l'intensité du courant d'arc (courbe extraite de Steinmetz).

⁶³ C. P. Steinmetz, "Transformation of electric power into light", *Trans. Amer. Inst. Elect. Eng.*, vol. 25, pp. 789-813, 1906.

4.2.2.3 Travaux de Nottingham⁶⁴

La formule proposée par Nottingham est très souvent reprise dans la littérature, c'est pourquoi nous proposons ici un résumé le plus précis possible de ces travaux.

Objectifs et description de la méthode :

Comme précédemment, l'objectif des travaux de Nottingham était de proposer une expression de la tension d'arc en fonction de l'intensité du courant d'arc et de la distance inter-électrodes. Les intensités de courant d'arc concernées par ces travaux sont dans la gamme [1 - 10 A] et les distances inter-électrodes sont comprises entre 1 et 10 mm. L'auteur utilise des résultats expérimentaux obtenus pour des arcs libres dans l'air à pression atmosphérique. Cependant, ni le dispositif expérimental, ni le protocole ne sont décrits. Aucune référence à un article précédent permettant de remonter à ces informations n'est donnée. À titre d'exemple on présente, pour des électrodes en cuivre, la figure 4.8 extraite de l'article $U_{arc} = f(d)$ pour des intensités de courant d'arc comprises entre 1 et 10 A (d est comprise entre 1 et 10 mm).

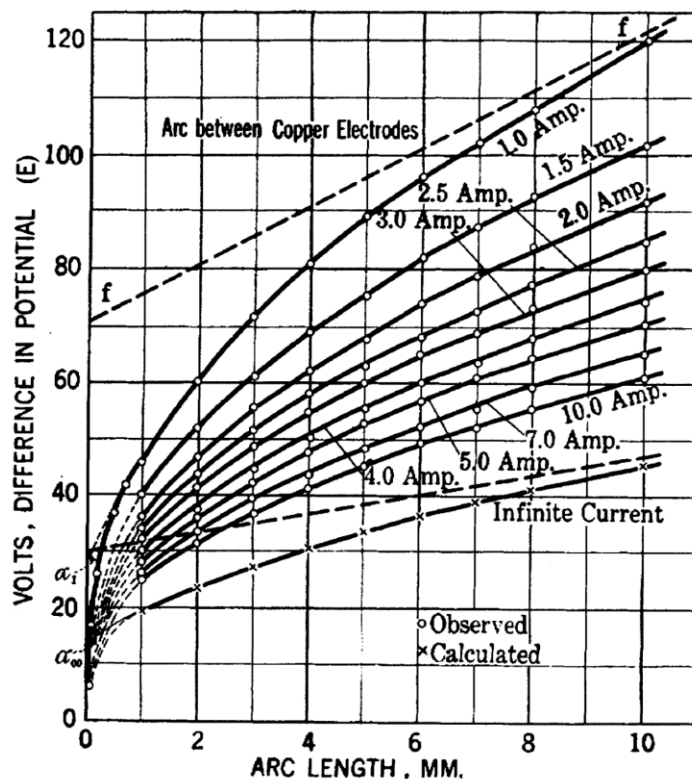


Figure 4.8 : $U_{arc} = f(d)$ pour des intensités de courant d'arc comprises entre 1 et 10A (d est comprise entre 1 et 10 mm). Figure extraite des travaux de Nottingham⁶⁴.

⁶⁴ W. B. Nottingham "A new equation for the static characteristic of the normal electric arc" *Trans AIEE*, 1923, pp. 302-310

Il explique sa méthode en se servant d'un exemple sur des électrodes en cuivre puis l'applique à d'autres matériaux d'électrodes. Sa méthode consiste à proposer différents « ajustements » linéaires par parties correspondant à divers intervalles de la distance inter-électrodes, l'ajustement étant réalisé à I_{arc} constant. Il s'inspire des deux expressions proposées par Ayrton⁶⁰ et Steinmetz⁶³. Il rappelle que l'on peut écrire, en prenant une longueur fixe de l'arc électrique, ces équations sous la forme :

$$U_{arc} = A + \frac{B}{i_{arc}^n} \quad (4.7)$$

où A et B sont des constantes dépendant de la longueur de l'arc (considérée égale à la distance inter-électrodes). « n » un paramètre déterminé à partir de la caractéristique $U_{arc}(I_{arc})$ pour chaque matériau d'électrode.

Le tableau 4.1 rapporte les valeurs de n pour diverses valeurs de U_{arc} et I_{arc} dans le cas d'électrodes en cuivre et d'une distance inter-électrodes de 3 mm. Une valeur moyenne pour d dans la gamme [1 – 10] mm est aussi précisée.

Tableau 4.1 : valeurs de n pour diverses valeurs de U_{arc} et I_{arc} dans le cas d'électrodes en cuivre et une distance inter-électrodes de 3 mm. Une valeur moyenne pour d dans la gamme [1-10] mm est aussi précisée. (extrait de Nottingham)

Anode—Copper		Cathode—Copper
Arc Length 3.0 mm.		
$A = 27.5 \quad B = 44.0$		
i Amperes	E Volts	$n = \frac{\log \frac{44.0}{E - 27.5}}{\log i}$
1.0	71.5	
1.5	61.0	0.677
2.0	55.5	0.652
2.5	51.5	0.668
3.0	49.0	0.653
4.0	45.0	0.660
5.0	42.5	0.670
7.0	39.5	0.669
10.0	37.0	0.667

Average $n_s = 0.665$
Average for curves of 1.0 to 10.0 mm.
arc length..... $n_{ave.} = 0.670$

Tableau 4.2 : valeurs de n pour divers couples de matériaux d'électrodes (extrait de Nottingham).

Anode	Cathode	Oxide ⁷ or Non Oxide on Anode	n	Abs. Temp. of Boiling pt. or Sublimation pt.
Carbon	Copper	..	0.985	3770
Cadmium	Carbon	Oxide	0.720	2770
Copper	Copper	Oxide	0.670	2580
Aluminum	Carbon	Al_2O_3	0.650	2480
Nickel	Carbon	Oxide	0.640	2450
Silver	Carbon	Non oxide	0.624	2370
Zinc	Carbon	Oxide	0.570	2170
Lead	Carbon	Non oxide	0.480	1850
Antimony	Carbon	Non oxide	0.460	1710
Bismuth	Carbon	Non oxide	0.445	1690

Quelques remarques :

- En changeant le matériau de l'anode (du carbone), il montre que l'anode est prédominante dans la valeur de « n » puisqu'il trouve 0.985 pour le couple cuivre (cathode)/carbone (anode).
- Il montre que ce paramètre « n » semble fortement corrélé à la température de vaporisation du matériau d'anode (pour les 10 matériaux étudiés). Il semble également prendre en compte la présence ou non d'oxyde en surface d'anode. Cependant l'état d'oxydation n'est pas caractérisé.
- Les valeurs de « n » pour différents couples de matériaux d'électrodes sont données dans le tableau 4.2 et le paramètre « n » est tracé en fonction de la température de vaporisation de différents matériaux sur la figure 4.9 tracée à partir des travaux de Nottingham.

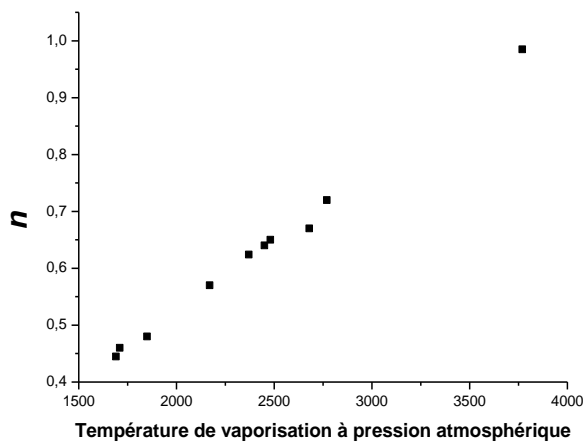


Figure 4.9 (à gauche) : valeur de « n » en fonction de la température de vaporisation du matériau d'anode (tracé à partir des données de Nottingham).

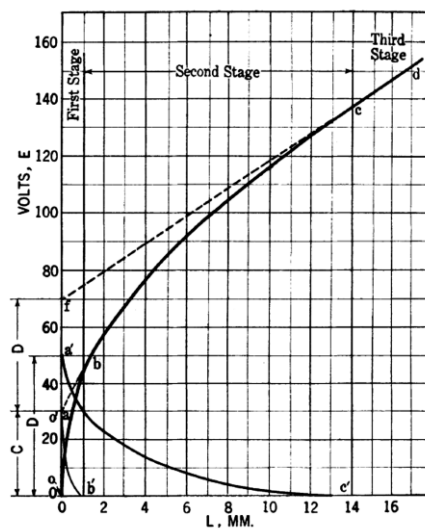


Figure 4.10 (à droite) : courbe $U_{arc} = f(d)$ typique à courant constant (extrait de Nottingham).

À partir d'une courbe typique (donnée sur la figure 4.10) donnant $U_{arc} = f(d)$ à courant constant, il « découpe » la caractéristique en trois plages de distance inter-électrodes :

- $0,7 \text{ mm} < d < 1 \text{ mm}$
- $1 \text{ mm} < d < 13 \text{ mm}$
- $13 \text{ mm} < d < 15 \text{ mm}$

Dans chaque zone, il recherche un ajustement pour lequel la tension d'arc dépendra linéairement et exponentiellement de la distance inter-électrodes d .

Résumé des résultats obtenus :

Il obtient finalement une expression de la tension sous la forme suivante :

$$U_{arc} = C \times (1 - \exp(-d_3 \times d)) + D \times (1 - \exp(-\delta \times d)) + \gamma \times d \quad (4.8)$$

Ensuite, il combine cette équation qui donne $U_{arc}(d)$ à I_{arc} constant et l'équation précédente qui donne $U_{arc}(I_{arc})$ à d constant, on obtient une équation liant les trois paramètres. Les valeurs des différents coefficients sont ensuite obtenues par différents « ajustements ». À titre d'exemple il a obtenu l'équation suivante pour des électrodes de cuivre.

$$U_{arc} = \left(14,5 + \frac{28-14,5}{I_{arc}^{0,667}}\right) \times (1 - \exp(-6 \times d)) + \left(15,5 + \frac{42,5-15,5}{I_{arc}^{0,667}}\right) \times \left(1 - \exp\left(-d \times \left(0,235 + \frac{0,373-0,235}{I_{arc}^{0,667}}\right)\right)\right) + \left(1,7 + \frac{5-1,7}{I_{arc}^{0,667}}\right) \times d \quad (4.9)$$

En passant à la limite quand d tend vers 0, il vient :

$$U_{arc} = \left(14,5 + \frac{13,5}{I_{arc}^{0,667}}\right) \times 6 \times d + \left(15,5 + \frac{27}{I_{arc}^{0,667}}\right) \times \left(d \times \left(0,235 + \frac{0,138}{I_{arc}^{0,667}}\right)\right) + \left(1,7 + \frac{3,3}{I_{arc}^{0,667}}\right) \times d \quad (4.10)$$

Il convient de noter que U_{arc} tend vers 0 quand d tend vers zéro. Ceci montre la nécessité de bien rester dans la gamme de validité pour les faibles distances inter-électrodes. Ce point sera par ailleurs rediscuté dans le paragraphe dédié aux valeurs des chutes anodiques et cathodiques. Le tableau 4.3 présente un comparatif des valeurs de tensions d'arc calculées (E_c) et mesurées (E_0). Il faut cependant rappeler qu'aucun protocole de mesure n'est précisé et qu'aucune dispersion des résultats n'est donnée.

Tableau 4.3 : comparatif des valeurs de tensions d'arc calculées et mesurées. Cas d'électrodes en cuivre (extrait de Nottingham)

Arc Length L	1 mm.		2 mm.		3 mm.		4 mm.		5 mm.		6 mm.		7 mm.		8 mm.		10 mm.	
Current 1 amp.	E_0	E_c	E_0	E_c	E_0	E_c	E_0	E_c	E_0	E_c	E_0	E_c	E_0	E_c	E_0	E_c	E_0	E_c
1.5	40.0	39.73	52.0	51.81	61.0	60.83	69.0	68.64	75.5	75.34	82.0	81.65	87.5	87.30	93.0	92.43	102.0	101.82
2.0	36.0	36.23	47.0	47.11	55.5	55.36	62.0	62.04	68.0	67.87	74.0	73.70	79.0	78.75	84.0	83.33	92.0	92.30
2.5	34.0	33.73	43.5	43.74	51.5	51.38	58.0	57.74	63.0	63.29	68.5	68.40	73.0	72.85	77.5	77.13	85.0	85.30
3.0	32.5	32.15	41.5	41.38	49.0	48.58	55.0	54.69	60.0	59.84	65.0	64.75	69.0	69.00	73.5	73.13	80.0	80.47
4.0	30.0	29.98	38.0	38.21	45.0	44.88	50.5	50.52	55.5	55.56	60.0	59.90	64.0	63.85	68.0	67.65	74.5	74.60
5.0	28.5	28.51	36.5	36.26	42.5	42.38	48.0	47.83	53.0	52.46	57.0	56.75	61.0	60.70	64.5	64.18	70.5	70.64
7.0	26.5	26.58	33.5	33.71	39.5	39.41	44.0	44.19	48.5	48.54	52.5	52.55	56.0	56.10	59.5	59.43	65.5	65.60
10.0	25.5	25.15	31.5	31.61	37.0	36.89	41.5	41.44	45.5	45.52	49.5	49.18	52.5	52.45	55.5	55.53	61.0	61.46

Sur les figures 4.11 et 4.12, on a représenté la tension d'arc U_{arc} en fonction de I_{arc} pour diverses valeurs de la distance inter-électrodes, tensions calculées par la formule 4.9. Il faut noter que la formule a été utilisée hors des gammes proposées par Nottingham à savoir $I_{arc} \in [1 - 10 \text{ A}]$ et $d \in [1 - 10 \text{ mm}]$. L'intervalle de validité a été rappelé sur la figure.

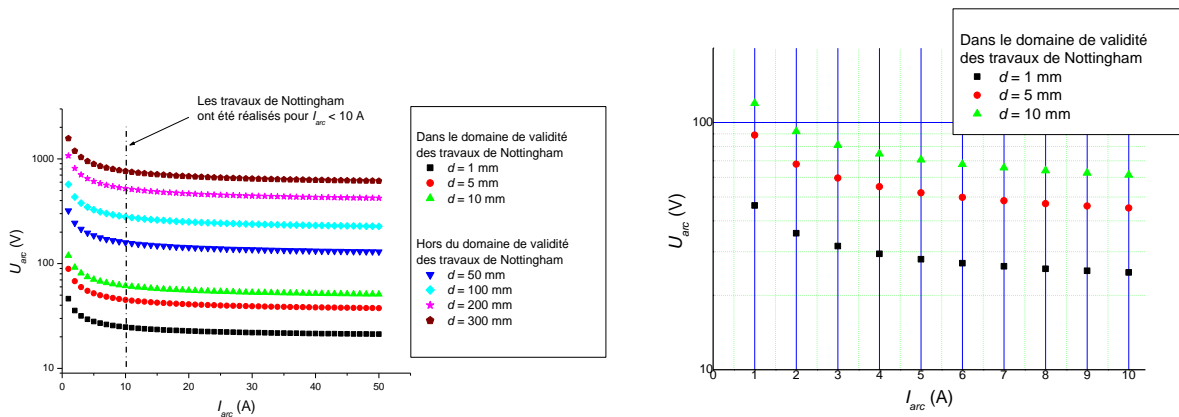


Figure 4.11 (à gauche) : courbe $U_{arc} = f(I_{arc})$ pour diverses valeurs de la distance inter-électrodes. Valeurs calculées à partir de la formule 4.9 - Cas d'électrodes en cuivre.

Figure 4.12 (à droite) : zoom de la courbe $U_{arc} = f(I_{arc})$ pour diverses valeurs de la distance inter-électrodes et pour un courant compris entre 1 et 10 A. Valeurs calculées à partir de la formule 4.9 et dans sa zone de validité - Cas d'électrodes en cuivre.

4.2.2.4 Travaux de Stokes et al.³⁷

L'intérêt de l'article de Stokes *et al.* réside dans la variété des conditions expérimentales en terme d'intensité de courant d'arc et de distances inter-électrodes et aussi dans l'étude de l'influence de la configuration géométrique (horizontale ou verticale) des électrodes. En effet, Stokes *et al* ont étudié les caractéristiques électriques ($U(I)$) d'arcs électriques dans l'air à pression atmosphérique pour des intensités de courant d'arc dans la gamme [100 - 20 000] A et des distances inter-électrodes dans la gamme [5 - 500] mm.

Description de la méthode :

Deux types « d'onde de courant » ont été utilisés :

- Un pulse de courant présentant une décroissance « exponentielle » de l'intensité de 1000 A à 0,1 A. Il doit s'agir d'une décharge de capacité.
- Un courant sinusoïdal avec des amplitudes ayant des valeurs décroissantes de 20 000 A jusqu'à 30 A.

Les tensions d'alimentation valent plusieurs kilovolts. Les électrodes utilisées sont en cuivre et en aluminium.

Quelques remarques avant la description des résultats :

- Nous n'avons aucune idée du circuit d'alimentation. On ne sait pas s'il y a des inductances et on ne connaît aucune constante de temps du circuit.
- Aucun exemple de relevé de tension et d'intensité du courant au cours du temps n'est donné. On ne sait pas comment les arcs sont générés : HT, ouverture, ... Du coup on a une certaine difficulté pour savoir comment les caractéristiques sont obtenues : est-ce à distance fixe au cours du temps ou au contraire au cours d'une ouverture. Il semblerait que la distance soit fixe au cours de l'arc.
- Les durées d'arcs ne sont pas vraiment précisées.
- Les auteurs mettent en garde le lecteur que dans bien des cas, la distance inter-électrodes ne correspond pas à la longueur de l'arc du fait de déformations de la colonne sous l'effet de la convection dans le cas d'arc de « longue durée » (quelques 100 ms) et de faible intensité du courant pour lesquelles les forces de convection ont « le temps » d'apparaître et sous l'action des forces magnétiques pour les arcs à fort courant qui influent sur la forme de l'arc dès les premières millisecondes. Ainsi la distance inter-électrodes peut parfois être deux fois plus faible que la longueur réelle de la colonne. Ceci est illustré sur les Figure 4.13 et 4.14 qui sont des photographies d'un même arc ($I = 10 \text{ A}$, $d = 100 \text{ mm}$, les électrodes sont en aluminium) à deux moments après son amorçage :
 - la figure 4.13 : 10 ms après l'amorçage
 - la figure 4.14 : 1000 ms après l'amorçage.



Figure 4.13 (à gauche) : photographie d'un arc entre deux électrodes d'aluminium. $I = 10 \text{ A}$, $d = 100 \text{ mm}$ - Photographie prise 10 ms après l'amorçage del'arc (extrait de Stokes et al.).

Figure 4.14 (à droite) : photographie d'un arc entre deux électrodes d'aluminium. $I = 10 \text{ A}$, $d = 100 \text{ mm}$ - Photographie prise 1000 ms après l'amorçage de l'arc (extrait de Stokes et al.).

Résultats présentés :

Les caractéristiques $U_{arc} = f(I_{arc})$ correspondent non pas à une valeur moyenne mais à l'ensemble des points et présentent d'assez fortes fluctuations notamment pour les faibles intensités. Un exemple est donné sur la figure 4.15 obtenue pour une distance inter-électrodes de 100 mm et des électrodes en cuivre.

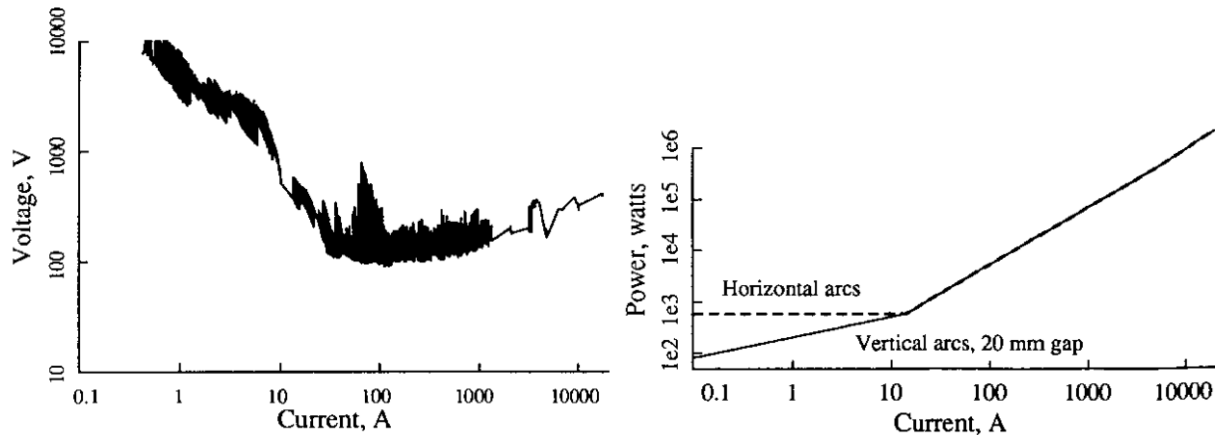


Figure 4.15 (à gauche) : $U_{arc} = f(I_{arc})$ obtenue pour $d = 100 \text{ mm}$ et des électrodes en cuivre (extrait de Stokes et al.).

Figure 4.16 (à droite) : représentation schématique de la caractéristique $P = f(I)$ selon la configuration (verticale ou horizontale) des électrodes (extrait de Stokes et al.).

Du fait de ces fluctuations, les auteurs ont préféré se concentrer sur la puissance dissipée dans l'arc qui présente de moindres fluctuations. Ainsi, ils ont constaté que :

- pour un courant d'arc d'intensité supérieure à une valeur de transition (notée I_t dans l'article) et donnée par : $I_t = 10 + 0,2 \times d$ (où d est la distance inter-électrodes en millimètres) la puissance ne dépendait pas de la configuration géométrique des électrodes

et notamment du fait que l'arc était horizontal ou vertical. Ils expliquent ceci par la prédominance des forces magnétiques sur les forces de convection. Ainsi, pour $I \geq I_t$ la puissance est donc indépendante de l'orientation des électrodes et vaut : $P(I) = (20 + 0,534 \times d) \times I^{1,12}$.

Ce qu'on peut interpréter comme :

$$U_{arc}(d, I) = (20 + 0,534 \times d) \times I^{0,12} \quad (4.11)$$

- pour $I \leq I_t$ la puissance dissipée dans l'arc est constante dans le cas d'une configuration horizontale des électrodes et vaut $P(I_t)$ et ne l'est plus dans le cas d'une configuration verticale et dans ce cas ils la trouvent sous la forme suivante :

$$P(I) = P(I_t) \times \left(\frac{I}{I_t}\right)^{0,4} \quad (4.12)$$

Ceci est illustré sur la figure 4.16 dans le cas d'un arc avec une distance inter-électrodes de 20 mm. En vue de déterminer des conditions d'existence stable de l'arc électrique, les auteurs, pour des conditions de distance inter-électrodes et de courant donnés se sont intéressés à la valeur minimum que pouvait prendre la tension d'arc. La figure 4.17 représente cette valeur en fonction de l'intensité du courant d'arc pour diverses distances inter-électrodes (5, 20, 100 et 500 mm). On a par ailleurs rappelé la valeur de 500 V pour se donner une idée de ce à quoi nous pouvons nous attendre. Jusqu'à 30 A, la tension d'arc est une fonction décroissante de l'intensité du courant d'arc. Au-delà, la tension croit avec l'intensité. Il est aussi intéressant d'observer que les valeurs de tension d'arc obtenues par les auteurs sont relativement faibles par rapport à celles proposées par Ayrton⁶⁰ et Cobine⁶⁵.

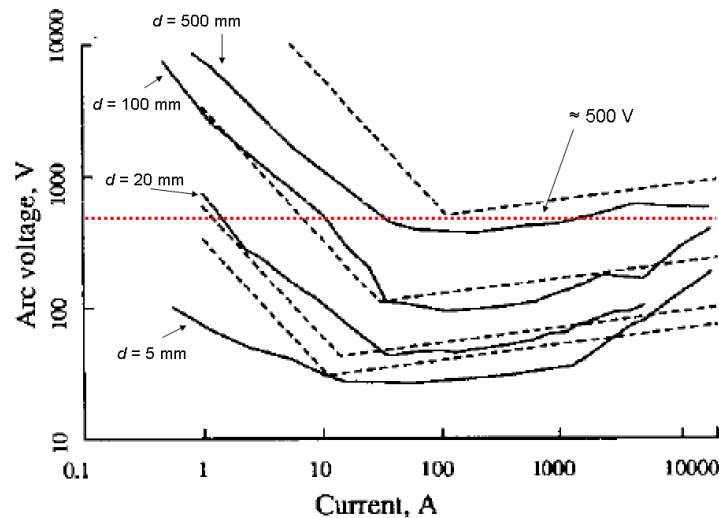


Figure 4.17 : valeur minimale de la tension d'arc en fonction du courant pour diverses valeurs de la distance inter-électrodes (électrodes en cuivre). En lignes continues, les résultats expérimentaux et en lignes pointillées les résultats obtenus par les formules 4.11 et 4.12 données ci-dessus.

⁶⁵ J.D. Cobine, *Gaseous Conductors*, 1958, New York : Dover

Les auteurs ont par ailleurs vérifié à l'aide d'observations en cinématographie rapide que la valeur minimale de tension d'arc mesurée correspondait bien à des structures d'arc telles que la longueur de la colonne d'arc était pratiquement égale à la distance inter-électrodes. De plus, ils écrivent que le matériau d'électrode n'a pas d'influence sur la valeur minimale de la tension d'arc. Ceci, malgré tout, n'est pas évident car ils observent expérimentalement des différences notables entre les tensions mesurées pour des électrodes en cuivre et des électrodes en aluminium pour les faibles intensités et les distances inter-électrodes de quelques millimètres.

Utilisation des résultats :

En utilisant les expressions proposées dans cet article, nous avons tracé sur les figures 4.18 et 4.19 les tensions d'arcs en fonction de I_{arc} pour différentes valeurs de distance inter-électrodes d . Par ailleurs la figure 4.19 est un zoom de la figure 4.18 pour les faibles valeurs de la distance inter-électrodes d permettant ainsi de mieux constater le comportement de la tension autour de la valeur du courant de transition noté I_t . On constate là encore que les expressions proposées dans l'article ne font pas intervenir la nature des électrodes.

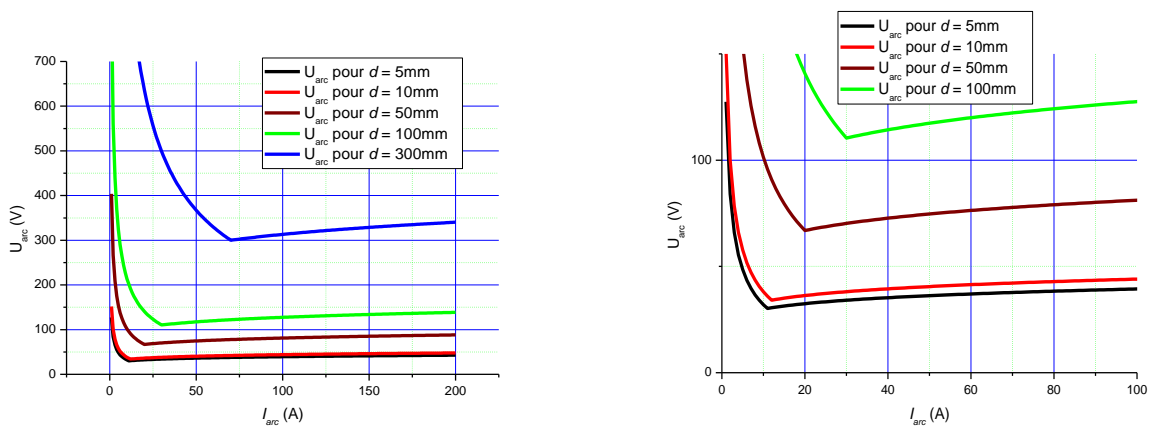


Figure 4.18 (à gauche) : $U_{arc} = f(I_{arc})$ calculée à partir des expressions proposées par Stokes et al. pour diverses valeurs de la distance inter-électrodes (configuration verticale).

Figure 4.19 (à droite) : zoom de la figure 4.18 pour les faibles valeurs de d .

$$\text{Pour } I \leq I_t, \text{ on a } U_{arc}(d, I) = (20 + 0,534 \times d) \times I^{0,12} \quad (4.13)$$

$$\text{Pour } I \geq I_t, \text{ on a } U_{arc}(d, I) = (20 + 0,534 \times d) \times \frac{I_t^{0,72}}{I^{0,6}} \quad (4.14)$$

$$\text{Avec } I_t = 10 + 0,2 \times d \text{ (} d \text{ en mm)}$$

Sur les figures 4.20 et 4.21 (la figure 4.21 étant un zoom de la figure 4.20 aux faibles valeurs de d), nous avons tracé la tension d'arc en fonction de la distance inter-électrodes pour plusieurs valeurs de l'intensité. Il faut noter qu'*a priori* les distances inter-électrodes utilisées pour les expériences menées par Stokes *et al.* étaient supérieures à 5 mm. Il faut donc garder à l'esprit que sur ces figures le domaine de validité des formules 4.13 et 4.14 a été étendu, sans justification.

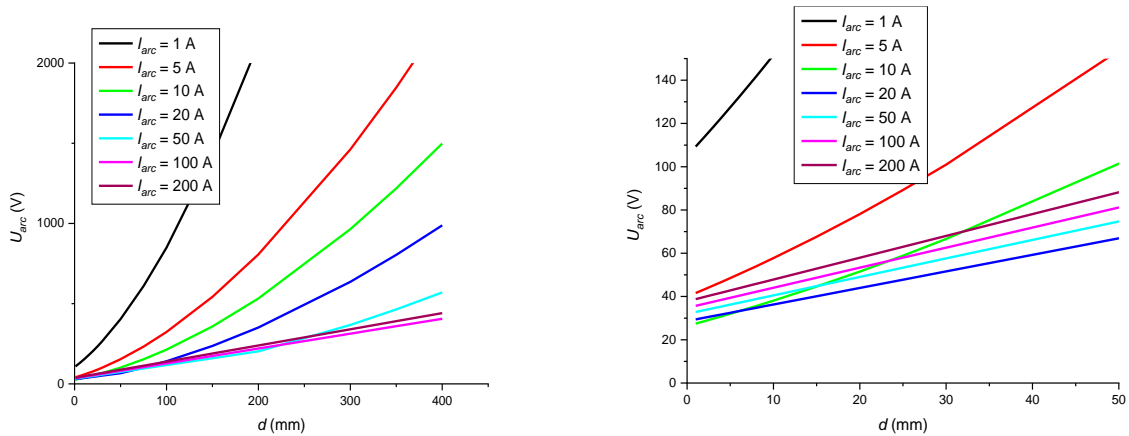


Figure 4.20 (à gauche) : $U_{arc} = f(d)$ calculée à partir des expressions proposées par Stokes et al. pour diverses valeurs du courant d'arc.

Figure 4.21 (à droite) : zoom de la figure 4.20 pour les faibles valeurs de d

4.2.2.5 Travaux de Paukert⁶⁶

Les travaux de Paukert sont très souvent cités (c'est pour cela que nous en parlons ici). Cependant ce court article est difficile à trouver et on ne peut trouver aisément que les tableaux donnant l'expression de la tension d'arc en fonction du courant pour diverses valeurs de la distance inter-électrodes. Par ailleurs, il s'agit du seul article de cet auteur sur le sujet. Dans le tableau 4.4 nous avons reporté les valeurs de la tension d'arc en fonction de la distance inter-électrodes pour les deux gammes de courant que distingue l'auteur. En effet, une distinction est faite selon que l'intensité du courant d'arc est supérieure ou inférieure à 100 A. Nous n'avons pas d'information sur la façon dont ces valeurs ont été obtenues.

Tableau 4.4 : expression de la tension d'arc en fonction de l'intensité du courant d'arc pour diverses valeurs de la distance inter-électrodes (extrait de Paukert).

Electrode Gap(mm)	Arc voltage($I \leq 100A$)	Arc voltage($100A \leq I \leq 100kA$)
1	$36.32I_{arc}^{-0.124}$	$13.04I_{arc}^{0.098}$
10	$105.25I_{arc}^{-0.239}$	$16.68I_{arc}^{0.163}$
50	$262.02I_{arc}^{-0.310}$	$28.35I_{arc}^{0.190}$
100	$481.20I_{arc}^{-0.350}$	$34.18I_{arc}^{0.194}$
200	$661.34I_{arc}^{-0.383}$	$52.63I_{arc}^{0.264}$

Comme on peut le constater, dans un premier temps, pour les « faibles » intensités, l'effet de l'intensité du courant sur la valeur de la tension diminue jusqu'à 100 A. Au-delà de ce « seuil », l'auteur considère que le changement de signe dans l'exposant donnant l'expression de la tension d'arc est lié à une augmentation du rôle des effets magnétiques. Ceci est en accord avec les travaux de Stokes *et al.*³⁷. Par ailleurs les formules proposées ne conduisent pas à une fonction continue

⁶⁶ J. Paukert, "The Arc Voltage and Arc Resistance of LV Fault Arcs", *Proceedings of the 7th International Symposium on Switching Arc Phenomena*, 1993, pp. 49-51

avec l'intensité... (Ce qui n'est pas réaliste). À titre d'illustration nous avons tracé les tensions d'arc U_{arc} en fonction de I_{arc} pour les diverses valeurs de d dans la gamme [1 - 200] mm sur la figure 4.22. Nous avons de la même façon représenté la tension d'arc U_{arc} en fonction de d pour les diverses valeurs de I_{arc} dans la gamme [1 - 200] A sur la figure 4.23.

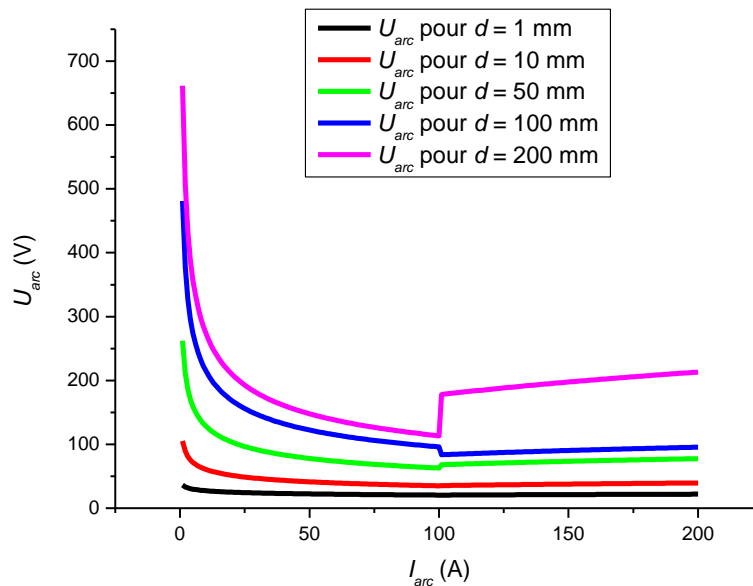


Figure 4.22 : $U_{arc} = f(I_{arc})$ calculée à partir des expressions proposées par Paukert¹⁰ pour diverses valeurs de la distance inter-électrodes.

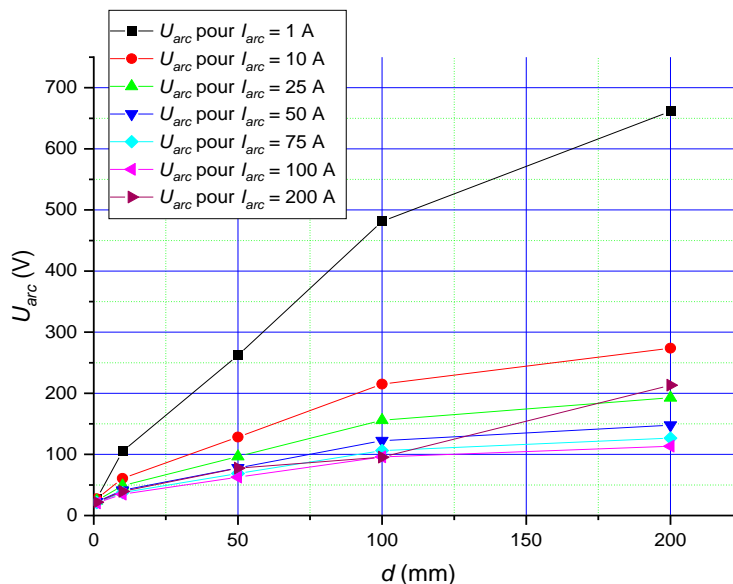


Figure 4.23 : $U_{arc} = f(d)$ calculée à partir des expressions proposées par Paukert¹⁰ pour diverses valeurs de l'intensité du courant d'arc.

4.2.2.6 Travaux de Rieder⁶⁷

Comme nous avons pu le voir dans la description de certains travaux, notamment ceux de Stokes *et al.* ou de Paukert, la tension d'arc est souvent considérée comme peu dépendante de la nature des électrodes. Il convient de souligner que cette hypothèse sera d'autant plus valide que les distances inter-électrodes seront importantes et que dans ces conditions la chute de tension dans la colonne, qui dépend principalement de la distance inter-électrodes, de la nature et de la pression du gaz plasmagène, sera prédominante sur les chutes de tension anodiques et cathodiques qui, elles, dépendent fortement de la nature du matériau d'électrode. Certains travaux dont ceux de Rieder ont pris en compte la nature des électrodes. Dans cet article, Rieder étudie les caractéristiques électriques d'arcs dans l'air à pression atmosphérique pour des intensités comprises entre 0,3 et 100 A, des distances inter-électrodes allant jusqu'à 25 cm et des électrodes en Ag, Cu et W. Son étude est basée sur des résultats expérimentaux à partir desquels il propose des expressions pour la tension d'arc en fonction de divers paramètres. La tension est ainsi exprimée sous la forme suivante :

$$U_{arc} = \alpha + (\beta + d) \times E(I_{arc}) \quad (4.15)$$

Où d est la distance inter-électrodes (supposée égale à la longueur de l'arc), $E(I_{arc})$ peut être assimilée au champ électrique dans la colonne d'arc et I_{arc} est l'intensité du courant d'arc. α est une constante indépendante du matériau. β est une constante homogène à une distance.

Par ailleurs le champ s'exprime sous la forme suivante :

$$E_{arc} = \gamma \ln \left(\frac{I_{arc}}{\delta} \right)^{-3} \quad (4.16)$$

Où δ et γ sont des constantes elles-aussi indépendantes du matériau. Le matériau d'électrode apparaît dans la valeur de β . Ainsi, Rieder propose :

$$\begin{cases} \alpha = 26V \\ \beta_{Ag} = 1.1cm, \beta_{Cu} = 1.3cm, \beta_W = 1.6cm \\ \gamma = 540 \text{ kV/m} \\ \delta = 7.4 \text{ mA} \end{cases}$$

Sur la figure 4.24 (extraite de l'article), la tension d'arc en fonction de la distance inter-électrodes pour diverses valeurs de l'intensité du courant d'arc est présentée dans le cas d'un arc entre deux électrodes en cuivre.

⁶⁷ W. Rieder « Leistungsbilanz der Elektroden und Charakteristiken frei brennender Niederstrombögen », *Zeitschrift für Physik* Bd. 146 S 629-643 (1956)

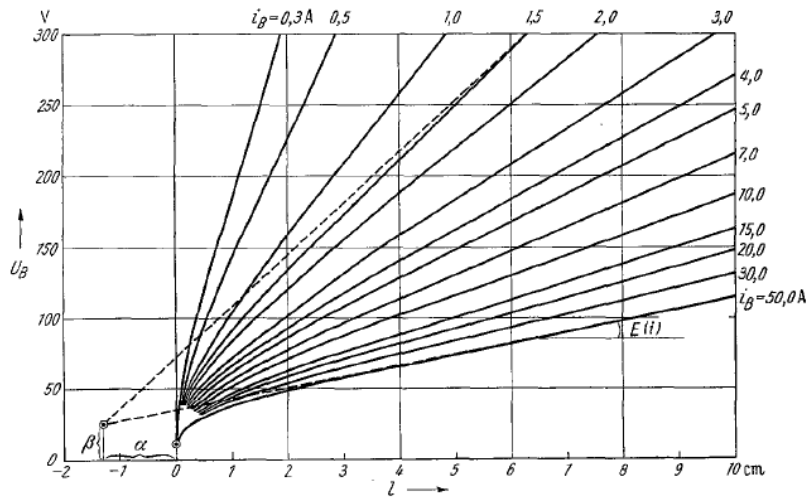


Figure 4.24 : tension d'arc en fonction de la distance inter-électrodes pour diverses valeurs de l'intensité du courant d'arc dans le cas d'un arc entre deux électrodes en cuivre dans l'air à pression atmosphérique (courbe extraite de Rieder)

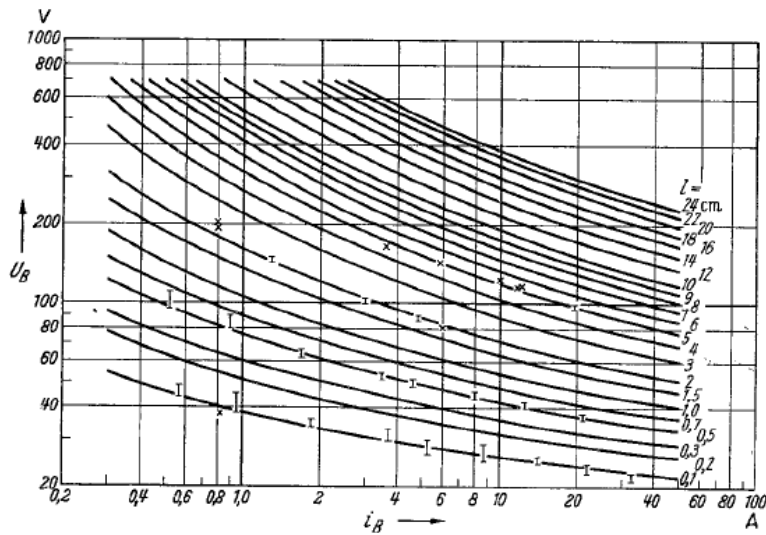


Figure 4.25 : tension d'arc en fonction de l'intensité du courant d'arc pour diverses valeurs de la distance inter-électrodes dans le cas d'un arc entre deux électrodes en cuivre (courbe extraite de Rieder).

La figure 4.25 également extraite de l'article présente quant à elle la tension d'arc en fonction de I_{arc} pour diverses valeurs de d .

4.2.2.7 Travaux de Mossop *et al.*⁶⁸

Les travaux présentés par Mossop *et al.* font partie des quelques rares travaux se rapportant au domaine de l'aéronautique et donc pour lesquels les mesures de tensions d'arc ont été réalisées

⁶⁸ I. A. Mossop, F. D. Gill, "The current and voltage relationships of a static DC arc between copper and silver electrodes in air at 1-760 mm Hg",

pour diverses valeurs de la pression. Les travaux consistent d'une part dans la mesure de tensions d'arc dans diverses conditions expérimentales détaillées après et d'autre part dans l'établissement de relations liant la tension moyenne de l'arc aux divers paramètres expérimentaux (pression, intensité, distance inter-électrodes, ...). L'arc est amorcé par haute tension permettant ainsi de réaliser des mesures à distance inter-électrodes constantes. La mesure de la tension aux bornes des électrodes est faite environ 10 ms après l'impulsion haute tension utilisée pour amorcer l'arc et la valeur prise correspond d'après les auteurs à une valeur stable de la tension. Les auteurs ont en effet constaté que durant les premières millisecondes de l'arc, la tension d'arc mesurée (toute chose égale par ailleurs) décroissait au cours du temps avant de se stabiliser. Une représentation schématique de l'évolution du courant et de la tension est donnée sur la figure 4.26. La méthode préconisée présente d'après les auteurs plusieurs avantages :

- En amorçant l'arc pour une distance inter-électrodes non nulle, on s'affranchit des phénomènes propres à l'ouverture du contact (pont fondu, présence de vapeur métallique dans la colonne).
- En réalisant la mesure plusieurs millisecondes après le claquage, on obtient une tension correspondant à un arc stable.

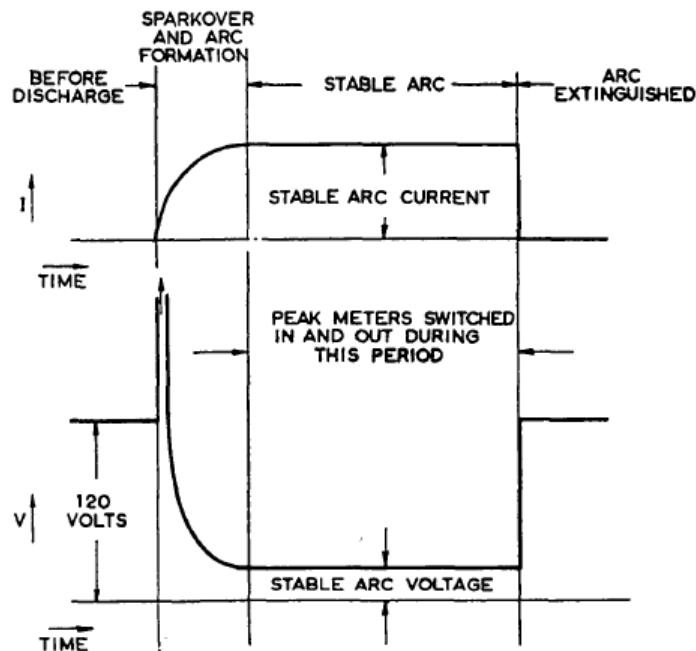


Figure 4.26 : représentation schématique de l'évolution du courant d'arc et de la tension d'arc – Mise en évidence d'un temps nécessaire à la stabilisation de la tension (extrait de Mossop *et al.*).

Les conditions expérimentales sont les suivantes :

- La pression peut varier dans la gamme [4 - 760] mm Hg (soit [5 - 1000] hPa) qui correspond environ à une altitude allant du niveau de la mer (soit à P_{am}) jusqu'à environ 30 000 m (soit à $P = 5$ hPa).
- Les électrodes sont en cuivre ou en argent.
- L'intensité du courant d'arc est dans la gamme [1 - 20] A.

- La valeur maximale de la distance inter-électrodes est 2 mm.

Un grand nombre d'arcs a été réalisé (13000 arcs) et les résultats représentent une synthèse de l'ensemble des mesures. Les résultats sont présentés dans le cas des électrodes en argent sous la forme classique de graphe donnant soit la tension d'arc en fonction de l'intensité du courant pour diverses distances inter-électrodes, soit la dérivée de la tension d'arc (ce qui correspond au champ électrique moyen dans la colonne) en fonction de la pression pour diverses valeurs de la distance inter-électrodes et de l'intensité du courant d'arc. Deux exemples sont donnés sur les figures 4.27 et 4.28.

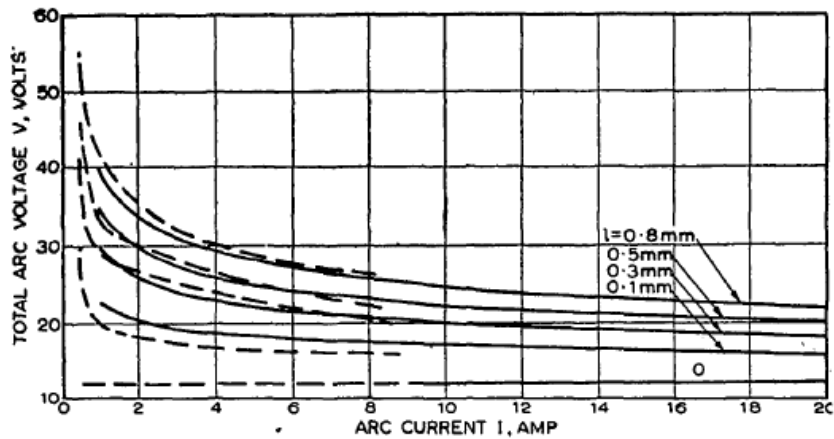


Figure 4.27 : comparaison entre les mesures de tension d'arc effectuées par Mossop *et al.* et celles effectuées par Holm⁶⁹ dans l'air, à pression atmosphérique entre des électrodes en argent.

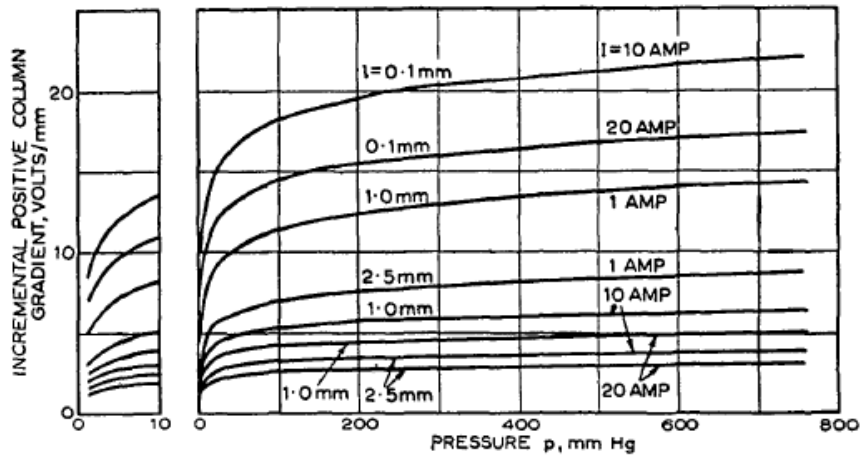


Figure 4.28 (à droite) : évolution du champ électrique dans la colonne d'arc en fonction de la pression pour diverses valeurs du courant d'arc. Les électrodes sont en argent (extrait de Mossop *et al.*).

En ce qui concerne le cas des électrodes en cuivre les résultats sont représentés sous la forme d'un abaque donné sur la figure 4.29 qui permet de remonter à la valeur de la tension à partir des

⁶⁹R. Holm "Electric Contacts", Springer Verlag, 1967

paramètres expérimentaux. Par ailleurs les auteurs proposent une expression analytique provenant d'un "ajustement" donné par la formule 4.17. Ainsi, pour des électrodes en cuivre la tension d'arc est donnée sous la forme :

$$U_{arc} = a \times I_{arc}^q \times d + V_m \quad (4.17)$$

Avec $a = b \times p^k \times \exp(-g \times p)$ et $q = f \times p^w \times \exp(-h \times p)$
 Où $b = 0,14$, $f = 0,11$, $V_m = 15,9$, $k = 1,2$, $w = 0,38$, $g = 0,004$, $h = 0,0019$

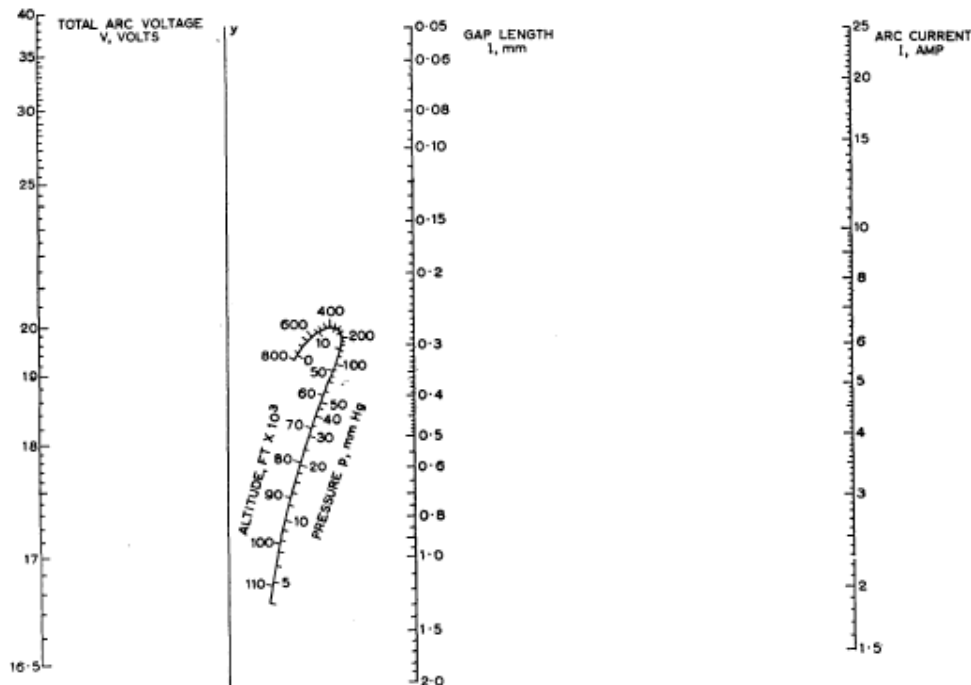
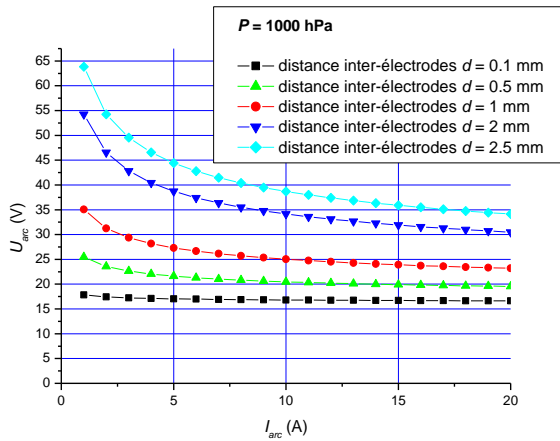


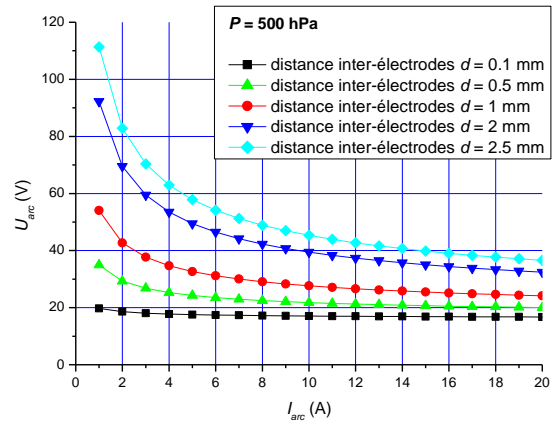
Figure 4.29 : abaque reliant la tension d'arc, le courant d'arc, la distance inter-électrodes et la pression dans le cas d'un arc réalisé entre deux électrodes en cuivre (extrait de Mossop *et al.*).

Dans la suite nous avons tracé la tension d'arc en utilisant la formule 4.17 proposée par les auteurs dans le cas d'électrodes en cuivre. Il est important de noter que parfois (et cela est alors précisé) nous ne nous sommes pas contraints aux intervalles de validité annoncés par les auteurs et que les résultats présentés hors de ces intervalles doivent être considérés avec la plus grande prudence.

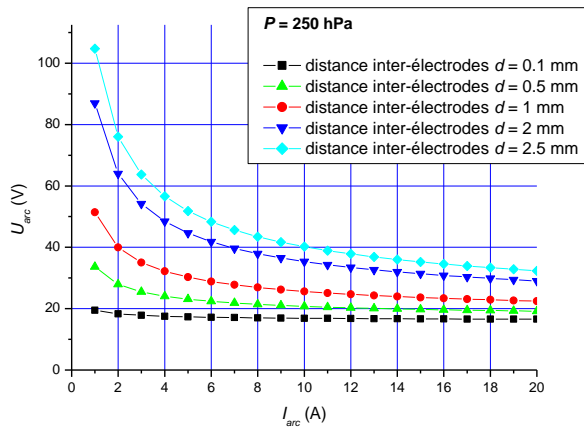
Dans la figure 4.30, nous proposons 4 exemples de tracés de la tension à partir de la formule 4.17 en fonction de l'intensité du courant d'arc pour diverses valeurs de la distance inter-électrodes et de la pression. Les domaines de validité de la formule 4.17 sont respectés. Les résultats sont présentés pour quatre valeurs différentes de la pression : (a) 1000 hPa, (b) 500 hPa, (c) 250 hPa, (d) 100 hPa.



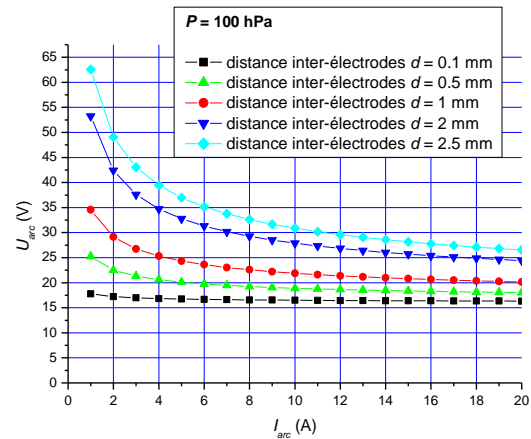
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 4.30 : caractéristiques $U_{arc} = f(I_{arc})$ d'après la formule 4.17 pour diverses valeurs de la distance inter-électrodes et diverses valeurs de pression : (a) 1000 hPa, (b) 500 hPa, (c) 250 hPa, (d) 100 hPa

Sur la figure 4.31, nous proposons deux exemples de tracés de la tension d'arc à partir de la formule 4.17 en fonction de la pression pour deux valeurs de l'intensité du courant d'arc ((a) : 1A et (b) : 20A). Pour chaque valeur de courant, nous avons tracé la tension d'arc pour deux valeurs de la distance inter-électrodes (1 et 2 mm). Les domaines de validité de la formule 4.17 sont respectés.

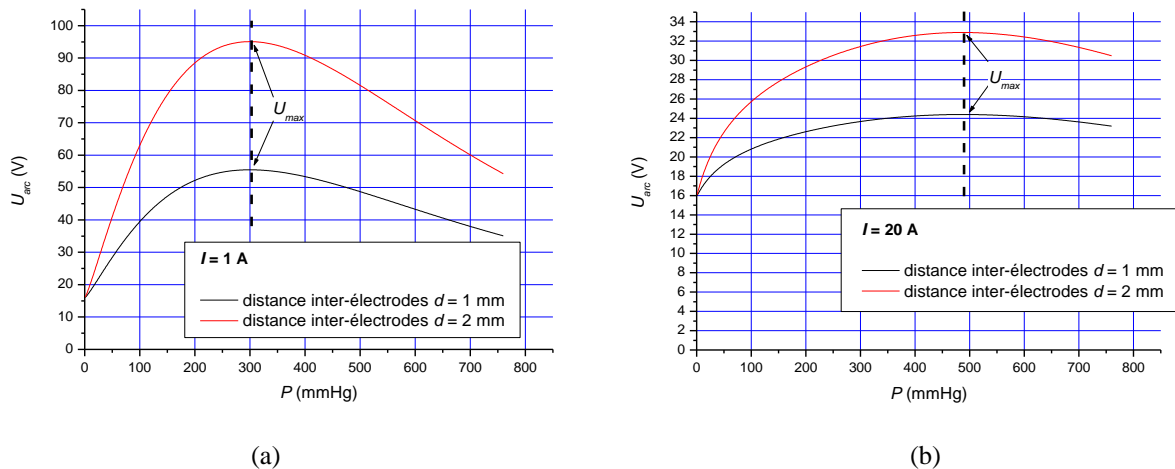


Figure 4.31 (a) et (b) : caractéristiques $U_{arc} = f(P)$ d'après la formule 4.17 pour diverses valeurs de la distance inter-électrodes et pour diverses pressions : (a) $I_{arc} = 1$ A, (b) $I_{arc} = 20$ A.

À distance inter-électrodes et intensité fixées, un maximum pour la tension d'arc apparaît. La pression pour laquelle ce maximum de tension apparaît dépend uniquement de l'intensité du courant (aux alentours de 300 mm Hg pour 1 A et proche de 500 mm Hg pour 20A), et non de la distance inter-électrodes comme le montre la formule 4.17.

Dans la suite nous avons étendu (par pure curiosité et sans justification scientifique) les domaines d'application de la formule 4.17, à savoir :

- La formule a été utilisée pour des distances inter-électrodes valant 10, 50 et 100 mm.
- La formule a été utilisée jusqu'à des intensités de courant d'arc valant 200 A.

Il faut donc considérer les résultats « hors » domaine de validité avec prudence.

Sur la figure 4.32, nous présentons quatre exemple de tracés de la tension à partir de la formule 4.17 en fonction de l'intensité du courant d'arc pour diverses valeurs de la distance inter-électrodes (100 μ m, 500 μ m, 1 mm, 2 mm, 2,5 mm, 10 mm, 50 mm et 100 mm) et de la pression : (a) 1000 hPa, (b) 500 hPa, (c) 250 hPa, (d) 100 hPa. Les domaines de validité de la formule 4.17 ont été étendus.

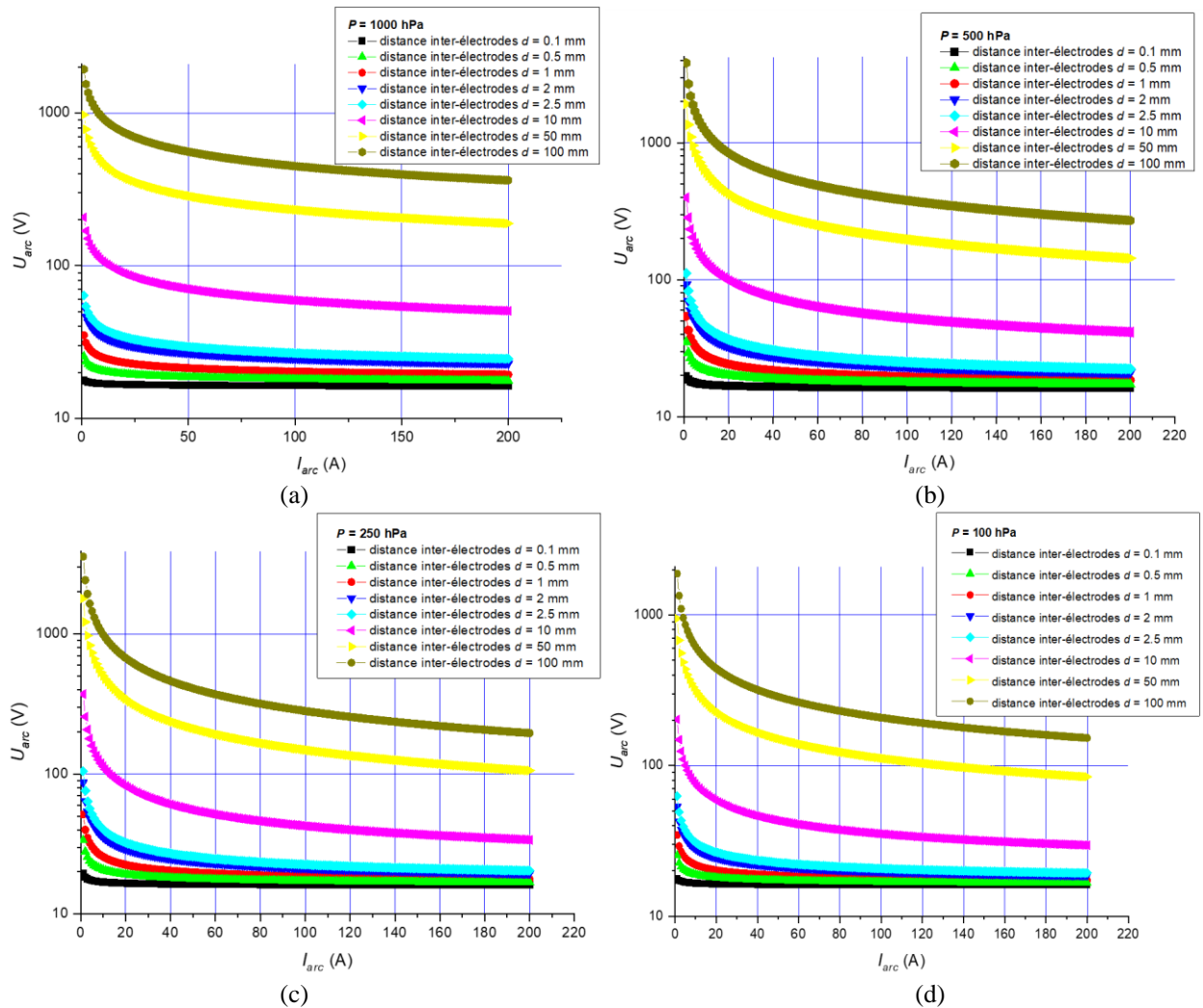
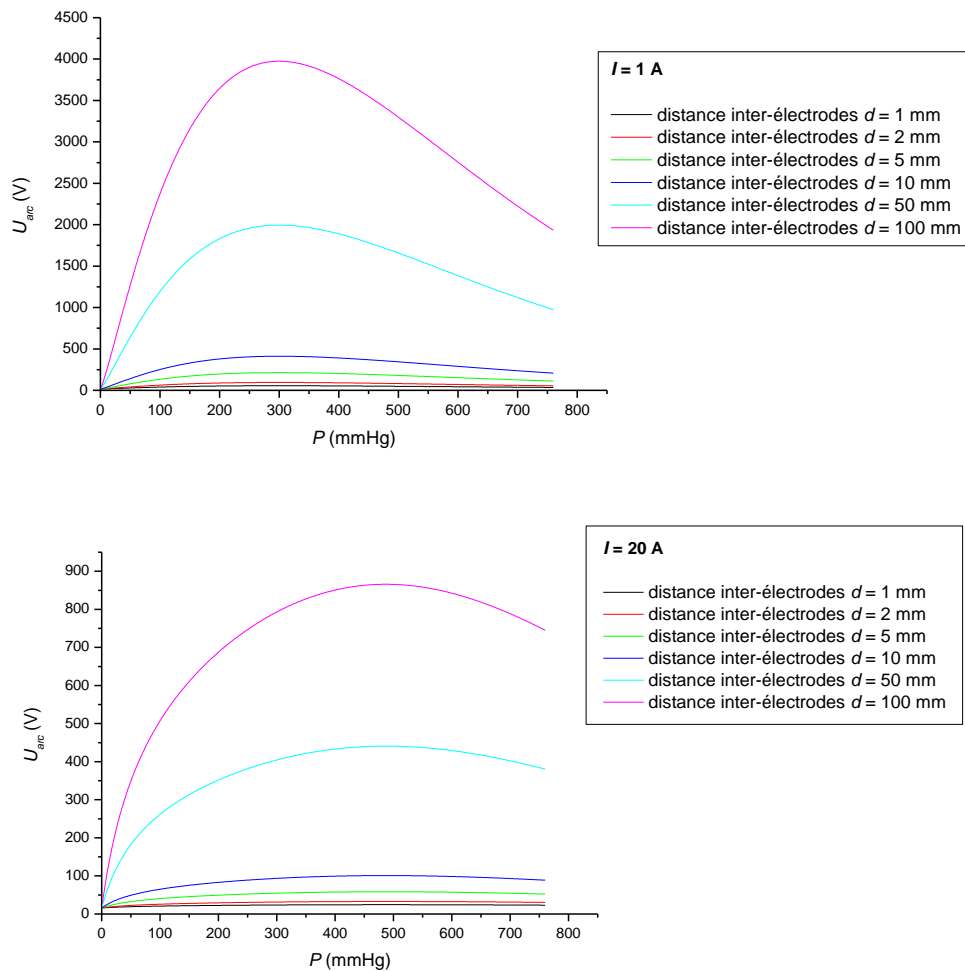


Figure 4.32 : caractéristiques $U_{arc} = f(I_{arc})$ d'après la formule 4.17 pour diverses valeurs de la distance inter-électrodes (100 μ m, 500 μ m, 1 mm, 2 mm, 2,5 mm, 10 mm, 50 mm et 100 mm) et diverses valeurs de pressions : (a) 1000 hPa, (b) 500 hPa, (c) 250 hPa, (d) 100 hPa.

Sur la figure 4.33, nous présentons deux exemples de tracés de la tension à partir de la formule 4.17 en fonction de la pression pour deux valeurs de l'intensité du courant d'arc ((a) : 1 A et (b) : 20 A) et diverses valeurs de la distance inter-électrodes (jusqu'à 100 mm). Les domaines de validité de la formule 4.17 ont été étendus arbitrairement.



**Figure 4.33 (a) en haut et (b) en bas : caractéristiques $U_{arc} = f(P)$ d'après la formule 4.17 pour diverses valeurs de la distance inter-électrodes et pour diverses pressions :
(a) $I_{arc} = 1 \text{ A}$, (b) $I_{arc} = 20 \text{ A}$**

4.2.2.8 Synthèse et autres travaux

Les paragraphes précédents ont proposé une bibliographie basée sur les principaux articles dédiés pratiquement exclusivement à la caractérisation électrique d'un arc électrique pour des arcs de « faibles » intensités du courant. Dans le tableau 4.5 nous rappelons les expressions données par trois des principaux auteurs évoqués précédemment et comparons sur la figure 4.34 les caractéristiques qu'ils proposent.

Tableau 4.5 : expression de $U_{arc} = f(I, d)$ à pression atmosphérique pour $I < 100$ A

Authors	$U_{arc} = f(I_{arc}, d)$
Nottingham et al. (d in mm)	$U_{arc} = \left(14,5 + \frac{13,5}{I_{arc}^{0,667}}\right) \times (1 - \exp(-6 \times d))$ $+ \left(15,5 + \frac{27}{I_{arc}^{0,667}}\right)$ $\times \left(1 - \exp\left(-d \times \left(0,23 + \frac{0,138}{I_{arc}^{0,667}}\right)\right)\right) + \left(1,7 + \frac{3,3}{I_{arc}^{0,667}}\right) \times d$
Stokes et al. (d in mm)	<p>For $I_{arc} \leq I_t$: $U_{arc}(I_{arc}, d) = (20 + 0.534 \times d) \times I_{arc}^{0.12}$</p> <p>For $I_{arc} \geq I_t$: $U_{arc}(I_{arc}, d) = (20 + 0.534 \times d) \times \frac{I_t^{0.72}}{I_{arc}^{0.6}}$</p> <p>with $I_t = 10 + 0.2 \times d$ (d in mm)</p>
Rieder et al. (d in cm)	$U_{arc} = \alpha + (\beta + d) \times E(I_{arc})$ <p>with $E(I_{arc}) = \gamma \left(\ln\left(\frac{I_{arc}}{\delta}\right)\right)^{-3}$</p> <p>and $\alpha = 26$ V, $\beta = 1.3$ cm, $\gamma = 540 \frac{kv}{m}$, $\delta = 7.4$ mA</p>

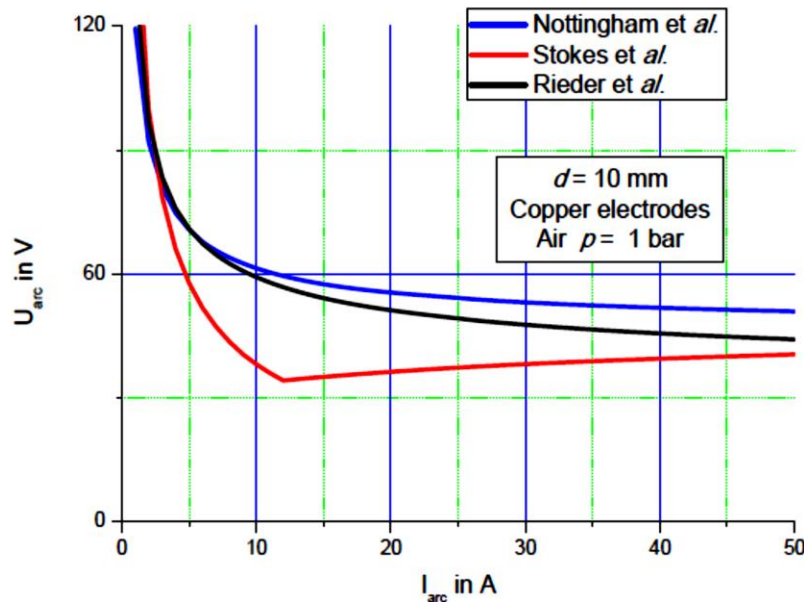


Figure 4.34 : comparaison des courbes $U_{arc} = f(I, d)$ proposées par Nottingham, Stokes et Rieder.

D'autres travaux existent qui concernent l'estimation ou la mesure de la tension d'arc. Il s'agit de travaux soit pour lesquels les paramètres et principalement l'intensité du courant se situent hors de la gamme de courant qui nous intéresse, soit dont le sujet ne portait pas spécifiquement sur la caractérisation électrique de l'arc électrique ce qui justifie d'en regrouper et synthétiser la présentation. Ainsi pour des intensités de courant d'arc plus élevées de nombreuses expressions ont été proposées et sont rappelées dans le tableau 4.6.

Tableau 4.6 : synthèse des résultats obtenus par différents auteurs concernant l'expression de la tension d'arc U_{arc} en fonction de la distance inter-électrodes d et du courant d'arc I_{arc} pour différentes gammes de courant d'arc.

Source bibliographique	Équation (d en cm)	Commentaires
Warrington ^{70, 71}	$U_{arc} = \frac{286 \times d}{I_{arc}^{0.4}}$	I_{arc} dans la gamme [196 A – 960] A
Blackburn et Domin ⁷²	$U_{arc} = 1444 \times d$	La tension d'arc est indépendante du courant d'arc pour I_{arc} dans la gamme [70 - 20 000] A
Goda et al. ⁷³	$U_{arc} = \left(950 + \frac{5000}{I_{arc}}\right) \times d$	d est dans la gamme [3 - 4] m I_{arc} dans la gamme [5 – 50] kA rms
Terzija et al. ⁷⁴	$U_{arc} = \left(855 + \frac{4501}{I_{arc}}\right) \times d$	I_{arc} dans la gamme [2 – 12] kA d est de l'ordre de quelques m
L.E. Fisher ⁷⁵	$U_{arc} = 40 \times I_{arc}^{0.15} \times \sqrt{d}$	I_{arc} dans la gamme [0,6 – 20] kA d est de l'ordre de quelques cm
A. Gaudreau et al. ⁷⁶	$U_{arc} = 35 + 0.0066 \times I_{arc} + 0.16 \times d$	I_{arc} dans la gamme [1 – 20] kA d est de l'ordre de quelques [1 – 16] cm
Eaton et al. ⁷⁷	$U_{arc} = \frac{56 \times d}{I_{arc}^{0.33}}$	I_{arc} dans la gamme [100 – 800] A d est de l'ordre de quelques mètres (jusqu'à environ 9 m)

⁷⁰ A. Warrington, "Reactance relays negligibly affected by arc impedance", *Electrical World*, Sept. 1931, pp. 502-505

⁷¹ A. Warrington, *Protective Relays. Their theory and practice, Volume one*, Chapman & Hall Ltd., London, 1976

⁷² J. Blackburn, T. Domin, *Protective relaying. Principles and applications*, third edition, Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton, 2007

⁷³ Y. Goda, M. Iwata, K. Ikeda and S. Tanaka, "Arc Voltage Characteristics of High Current Fault Arcs in Long Gaps", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 15, NO. 2, APRIL 2000

⁷⁴ V. Terzija and H-J Koglin "On the Modeling of Long Arc in Still Air and Arc Resistance Calculation", IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 19, NO. 3, JULY 2004

⁷⁵ L.E. Fisher, Resistance of low voltage AC arcs, IEEE Transactions on Industry and General Applications, Vol. IGA-6, n°.6, Nov-Dec 1970, pp 607-616

⁷⁶ A. Gaudreau and B Koch, « Evaluation of LV and MV arc parameters », IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 23, NO. 1, JANUARY 2008

⁷⁷ J.R. Eaton et al. "Experimental Studies of Arcing Faults on a 75 kV Transmission System," Transaction AIEE, December 1931.

4.2.3 Conclusion partielle concernant la bibliographie et définition des objectifs poursuivis lors de ce chapitre :

En conclusion de cette partie bibliographique, il est intéressant de noter que peu de travaux (exception faite de Mossop *et al.*) ont été proposés pour des pressions strictement inférieures à la pression atmosphérique, la majorité des travaux ont été faits à pression atmosphérique. Par ailleurs les gammes d'intensités de courant d'arc et de distance inter-électrodes pour lesquelles les travaux les plus complets ont été réalisés $[1A - 20A] \times [1mm - 10mm]$. Les travaux de Mossop *et al.* quant à eux, ont été réalisés pour des distances inter-électrodes particulièrement faibles (1 et 2 mm). Il nous a donc paru intéressant de concentrer nos travaux sur trois « axes » :

- augmenter les gammes de courant (jusqu'à 100A),
- augmenter les distances inter-électrodes (jusqu'à plusieurs cm – au moins 10 cm dans la mesure du possible),
- baisser la pression pour explorer la gamme [100 hPa- 1000 hPa].

4.3 Description du dispositif expérimental et de la démarche :

L'objectif général de cette partie est donc d'essayer de proposer une ou des relations permettant d'exprimer la tension d'arc en fonction des paramètres que sont la pression, la distance inter-électrodes et l'intensité du courant d'arc, pour un arc le plus proche possible d'un arc "stationnaire". Bien sûr un tel travail nécessite de nous appuyer sur un ensemble de mesures expérimentales. Le dispositif mis en œuvre à cet effet, a été en partie décrit dans le chapitre 1 en ce qui concerne l'enceinte à vide et l'alimentation électrique. En ce qui concerne le dispositif mécanique mis en œuvre pour réaliser l'arc, nous avons opté pour un système d'ouverture à l'aide d'un vérin électrique comme cela a été décrit au chapitre 3. En ce qui concerne l'utilisation d'un tel système en vue d'obtenir les caractéristiques $U_{arc} = f(I_{arc}, P, d)$ quelques remarques préliminaires concernant les avantages et désavantages s'imposent.

Les avantages de la méthode :

L'amorçage de l'arc par ouverture permet de ne pas avoir à employer de la haute tension par exemple qui rendrait plus difficile les mesures. On aurait pu aussi envisager un amorçage par explosion d'un fil métallique fin. Là encore l'explosion du fil aurait perturbé la composition de l'arc au début de celui-ci. Bien que représentant aussi quelques inconvénients, l'amorçage par ouverture s'est avéré souple d'emploi.

Le fait d'avoir pour objectif d'étudier l'influence de la distance inter-électrodes sur la tension nous a poussés à utiliser un vérin électrique qui nous permet durant l'arc de commander la dynamique du vérin. Ceci est un point important comme on le verra plus loin, permettant ainsi d'avoir des ouvertures à différentes vitesses voire des ouvertures en « escalier » avec des temps de

pause de quelques dizaines/centaines de millisecondes à chaque « marche ».

Les inconvénients de la méthode :

L'ouverture par vérin ne se fait pas de façon aisée à vitesse constante avec un montage mécanique simple (de taille « réduite »). Du coup, la vitesse d'ouverture dans les premiers instants de l'arc se fait à vitesse variable. On a cependant constaté que dès que la distance inter-électrodes avait dépassé 1 à 2 mm, la vitesse d'ouverture du vérin pouvait être considérée comme constante et égale à la consigne qui lui était donnée.

Le fait de créer l'arc par ouverture d'un contact pose la question importante de la valeur des chutes de tension anodique et cathodique. Afin d'estimer les chutes de tension anodique et cathodique lors de la création d'un arc par ouverture d'un contact, il est nécessaire de se concentrer sur la tension d'arc lorsque la distance inter-électrodes est très petite. Un exemple est donné sur la figure 4.35 (extraite de Landfried *et al.*³³) sur laquelle on a tracé l'évolution de la tension (axe de gauche) et de l'intensité du courant d'arc (axe de droite) en fonction de la distance inter-électrodes lors d'une ouverture d'un contact constitué de deux électrodes en cuivre OFHC.

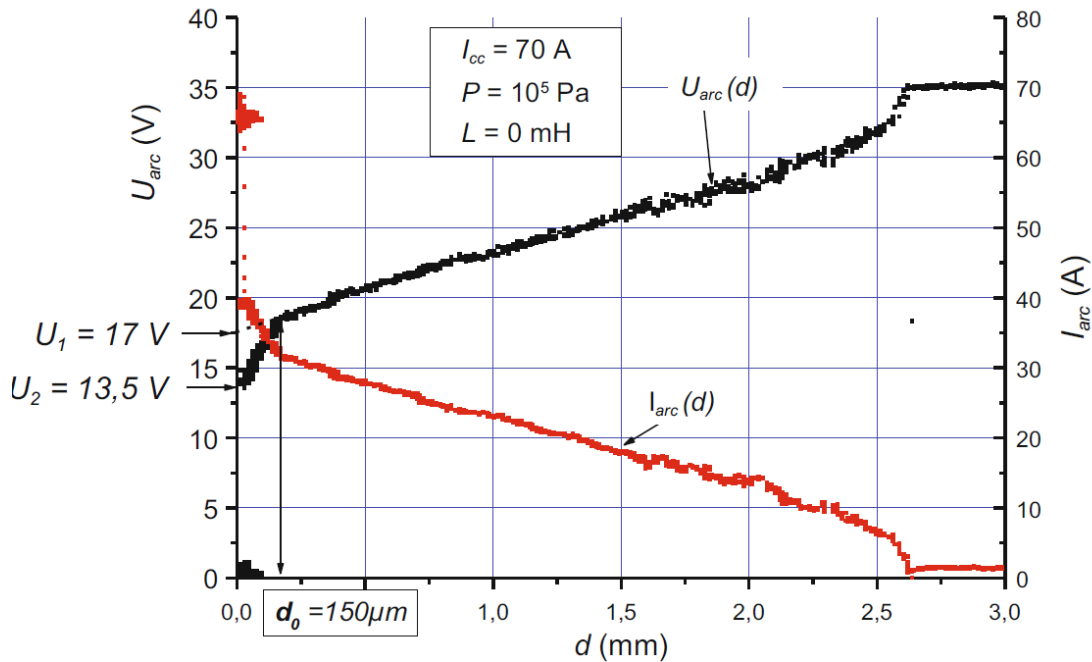


Figure 4.35 (extraite de Landfried *et al.*) : exemple de variations de la tension d'arc (axe de gauche) et de l'intensité du courant d'arc (axe de droite) en fonction de la distance inter-électrodes (lors d'une ouverture). L'intensité du courant avant ouverture vaut environ 70 A. Pression atmosphérique.

On peut ainsi observer un changement dans le comportement de la tension d'arc en fonction de d . Dans ce cas, il se produit pour $d_0 \approx 150 \mu\text{m}$. Pour cette valeur de d il y a une rupture de pente. Différentes explications ont été proposées :

i) Von Engel et Zhu⁷⁸ ont estimé que pendant la phase d'ouverture, d'abord la chute de tension cathodique apparaissait. Ils ont considéré que le changement important de la tension d'arc, illustrée dans la figure 4.35 par la variation de tension entre $d = 0^+$ et $d = d_0$, correspond à la création de la région anodique. Dans ces conditions, ils ont proposé que U_2 qui est la valeur de U_{arc} pour $d \approx 0^+$ mm (mesure de la différence de potentielle entre les deux électrodes dans les tout premiers instants où le contact s'ouvre) est alors égal à V_c et $U_1 - U_2$ est égal à V_A où U_1 est l'intersection entre l'axe des tensions et la prolongation de la tension d'arc au-delà de d_0 ;

ii) Gray⁷⁹, Boddy et Utsumi⁸⁰ et Piccoz⁸¹ ont proposé une autre interprétation à ces observations : ils considèrent que pour les petites valeurs de d , la tension mesurée correspond à la tension d'un arc pratiquement dans la vapeur du matériau de la cathode (c'est-à-dire un arc dans une phase vapeur). Pour des valeurs de d supérieures, l'arc brûle dans l'air et non plus uniquement dans la vapeur de cuivre (ici). Dans ces conditions, U_2 représente la somme ($V_A + V_C$) dans la phase métallique et U_1 représente la même somme dans la phase gazeuse.

Le tableau 4.7 résume les résultats obtenus expérimentalement dans Landfried *et al.* selon l'interprétation choisie. Il s'agit d'un arc d'ouverture entre deux électrodes en cuivre pour diverses valeurs de la pression.

Tableau 4.7 : valeurs de V_A , V_C , $V_A + V_C$ selon les interprétations proposées i) ou ii). Arc d'ouverture entre deux électrodes en cuivre, dans l'air pour diverses valeurs de la pression.

	10 ⁴ Pa	2.5 x 10 ⁴ Pa	5 x 10 ⁴ Pa	10 ⁵ Pa
V_A selon l'interprétation i)	[1,7 – 3,9] V	[1,9 – 4,4] V	[3,4 – 4,9] V	[3,7 – 5,2] V
V_C selon l'interprétation i) ou $V_A + V_C$ en phase métallique selon l'interprétation ii)	[13,7 – 14,8] V	[12,8 – 15,5] V	[13,2 – 16,4] V	[13,7 – 16] V
$V_A + V_C$ dans l'air selon l'interprétation ii)	[16,5 – 17,6] V	[16,3 – 17,5] V	[16,8 – 19,8] V	[17,9 – 21] V

On peut ainsi constater que selon le point de vue de Gray, la somme des chutes anodique et cathodique en phase métallique dépend peu de la pression alors que cette somme pour l'air semble croître avec la pression. Dans les conditions de pression qui nous intéressent, Novak et Ellena⁸² ont trouvé que $V_A + V_C$ valait 14,5 V. Ils ont également constaté que cette valeur était pratiquement

⁷⁸ A. Von Engel, S.L. Zhu « Fall regions and electrode effects in atmospheric arcs of vanishing length », 1981 J. Phys. D: Appl. Phys. 14 2225

⁷⁹ E.W. Gray, J. Appl. Phys. 43, 4573 (1972) « Voltage fluctuations in low-current atmospheric arcs », Journal of Applied Physics 43, 4573 (1972); <https://doi.org/10.1063/1.1660966>

⁸⁰ P.J. Boddy, T. Utsumi « Fluctuation of Arc Potential Caused by Metal-Vapor Diffusion in Arcs in Air », J. Appl. Phys. 42, 3369 (1971)

⁸¹ D. Piccoz « Contribution à l'étude des phénomènes de répulsion et de soudure concernant les contacts dans un appareil de coupe », thèse de doctorat Université Paris 6, 1997.

⁸² J P Novak and G Ellena « Arc field measurement with a simple experimental arrangement », 987 J. Phys. D: Appl. Phys. 20 462

indépendante de la pression. Cela peut s'expliquer par leur technique de mesure qui consiste à prendre la tension d'arc pour une longueur nulle (au moment où le contact s'ouvre), c'est-à-dire à considérer U_2 , dont on peut constater dans le tableau 4.7 que la valeur dépend peu de la pression. D'autres auteurs ont obtenu des valeurs de la somme des chutes anodique et cathodique pour des arcs dans l'air entre deux électrodes en cuivre en mesurant la longueur de l'arc (pour des longueurs de quelques millimètres) et en extrapolant la valeur des tensions pour $d = 0$ mm. Ce qui consiste à considérer que $V_A + V_C = U_1$. Par cette méthode El Bayda *et al.*³⁵ ont obtenu une valeur de 20 V pour le cuivre. De même Gouega *et al.*³⁴ ont obtenu une valeur similaire pour des arcs amorcés à l'aide d'un pulse haute tension et une distance inter-électrodes fixe durant l'arc et en extrapolant ensuite la courbe donnant la tension moyenne en fonction de la distance inter-électrodes. Les courbes obtenues par El Bayda *et al.* et Gouega *et al.* sont reportées sur la figure 4.36.

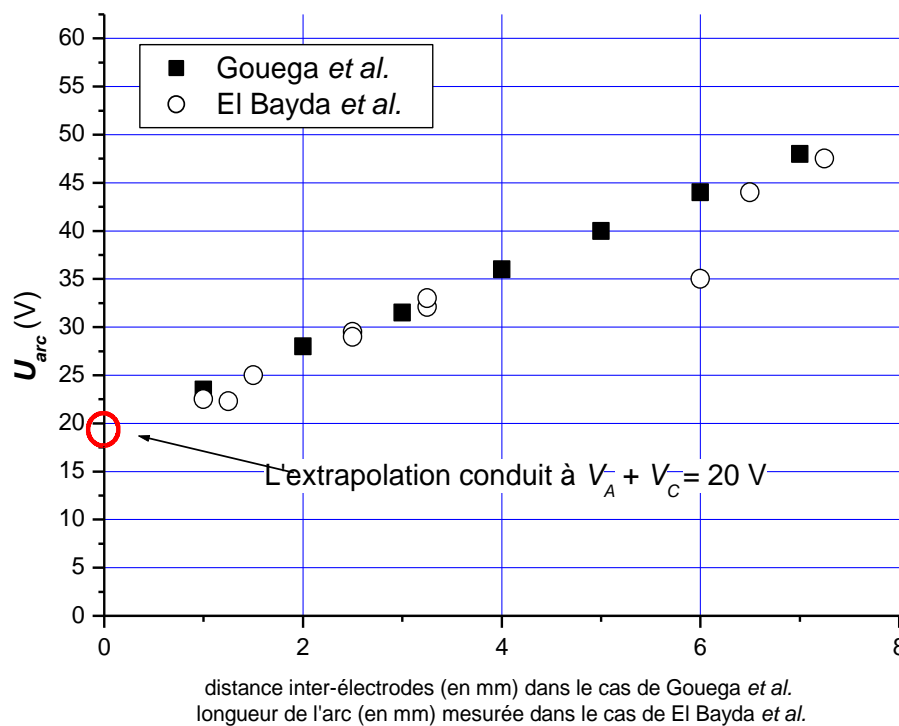


Figure 4.36 : exemples de tension d'arc en fonction de la distance inter-électrodes pour les travaux de Gouega *et al.* (électrodes en cuivre coaxiales, I dans la gamme [200 – 800] A) et de la longueur de l'arc pour les travaux de El Bayda *et al.* (électrodes en cuivre côte à côte, I dans la gamme [30 – 120] A).

En conclusion, l'amorçage par ouverture présente l'avantage de sa simplicité, mais complique les interprétations concernant les chutes anodique et cathodique et d'une façon générale l'interprétation des phénomènes aux faibles distances inter-électrodes. Les conséquences de ce point seront développées plus loin.

La démarche très simple a donc consisté à effectuer un grand nombre d'arcs d'ouverture en enregistrant les évolutions de la tension d'arc, de l'intensité du courant d'arc et de la distance inter-électrodes pour différentes valeurs de la pression. Ceci nous donne des courbes telles que celles

déjà présentées au chapitre précédent. Cependant si au cours de ce chapitre nous nous sommes intéressés aux caractéristiques telles que la distance d'extinction, l'énergie dissipée etc... dans cette partie nous avons regardé plus en détail la valeur de la tension d'arc.

4.4 Quelques exemples de résultats « bruts » et mise en évidence des difficultés

Nous avons réalisé plusieurs arcs dans différentes conditions et notamment avec différentes vitesses d'ouverture (50 mm/s et 600 mm/s) et différents profils d'ouverture (ouverture par paliers successifs). Comme nous l'avons déjà évoqué au chapitre 3, certaines conditions d'ouverture conduisent à des arcs stables (figure 3.16 par exemple) et d'autres à des arcs pour lesquels des instabilités apparaissent (figure 3.12 par exemple). Une première conclusion est que plus l'ouverture est rapide, plus l'arc semble stable. Ceci a par ailleurs été vérifié (et montré au chapitre 3) à l'aide d'observations en cinématographie rapide. L'objectif étant de caractériser la dépendance de la tension d'arc avec la longueur de celui-ci et ne disposant pas au moment des expériences de deux caméras rapides, une première approche naturelle aurait pu consister à ne prendre en compte que les arcs réalisés pour des vitesses d'ouverture « élevées » (600 mm/s) puisque pour ces arcs, la distance inter-électrodes (mesurables) est pratiquement égale à la longueur de l'arc. Sur la figure 4.37 nous avons tracé un exemple de mesure lors d'une ouverture par paliers. L'avantage d'une telle méthode est qu'on se rapproche à chaque palier d'un arc en régime établi. Le désavantage de cette méthode c'est qu'on obtient des valeurs de la tension pour des distances « quantifiées » et donc que cela nécessite un très grand nombre d'essais pour balayer toute la gamme de distance.

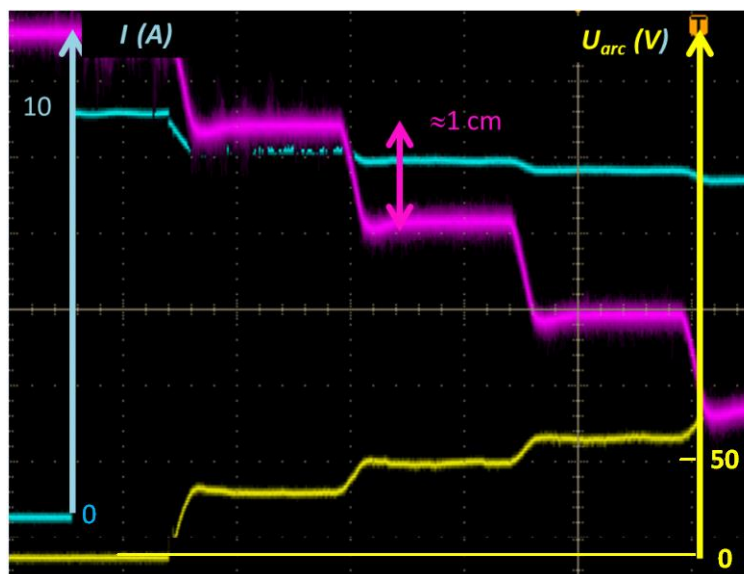


Figure 4.37 : évolution de l'intensité du courant d'arc (en bleu), de la tension de l'arc (en jaune) et de la distance inter-électrodes (en violet) dans le cas d'un arc électrique entre deux électrodes en cuivre dans l'air ($I_{cc} \approx 10$ A, $P = 10^5$ Pa). Chaque palier dure environ 150 ms.

Afin de savoir si nous pouvions simplifier le protocole de mesure en effectuant des tirs à vitesses d'ouverture élevées (ce qui conduit à des arcs « stables ») il était indispensable de savoir si les mesures conduisaient aux mêmes tensions d'arc que celles obtenues dans le cas d'une ouverture par paliers. Un exemple de comparaison est donné sur la figure 4.38 sur laquelle nous avons comparé pour des intensités de l'ordre de 10A les tensions obtenues selon les trois modes d'ouverture ($v = 50$ mm/s, $v = 600$ mm/s et ouverture par paliers). Il est apparu que les tensions mesurées pour une vitesse d'ouverture $v = 50$ mm/s étaient très proches de celles mesurées par paliers alors que les tensions obtenues pour $v = 600$ mm/s étaient supérieures. Ceci a aussi été vérifié dans le cas de valeurs de l'intensité du courant supérieures à 10A.

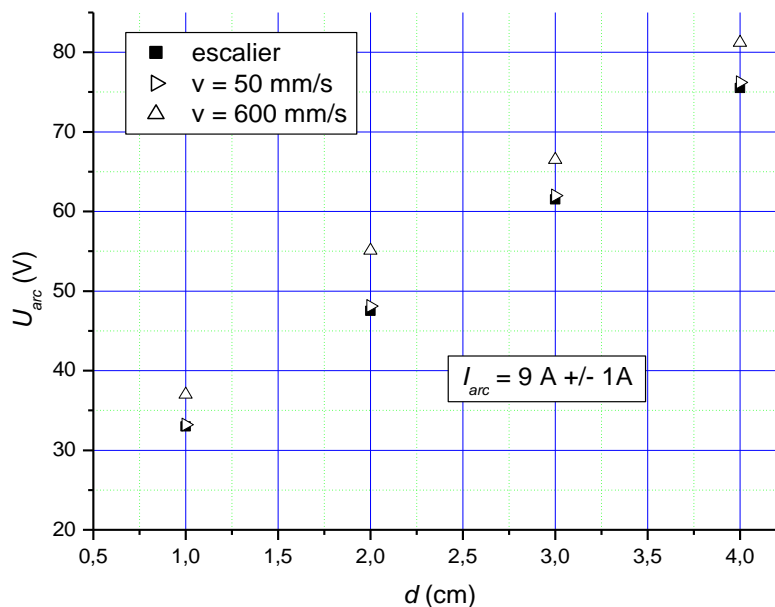


Figure 4.38 : comparaison du mode d'ouverture sur les tensions d'arc mesurées selon les trois modes d'ouverture pour $I_{cc} \approx 10$ A.

En conséquence, pour la suite nous avons décidé de considérer les résultats obtenus en utilisant une vitesse d'ouverture de 50 mm/s. Ceci présente l'avantage de pouvoir aisément balayer une grande gamme de distance inter-électrodes tout en permettant d'obtenir des tensions d'arc proche de celle obtenu pour un arc « établi ». Cependant c'est avec cette vitesse que nous obtenons le plus d'instabilités lors de l'ouverture rendant difficile l'exploitation de signaux de tensions fortement perturbés.

4.5 Choix et limites de la méthode :

Pour des conditions expérimentales données (I_{arc} , P), on réalise plusieurs essais : hors des zones d'instabilités on a pu observer une grande reproductibilité puis on accumule les essais et, pour chaque essai, on extrait pour chaque intervalle de distance d'une longueur de 1 mm la valeur minimale de la tension et l'intensité correspondante. Ces valeurs minimales de tension se

rapprochent (et parfois doivent correspondre) de la tension qui correspond à un moment où la distance inter-électrodes est très proche de la longueur de la colonne d'arc. En accumulant sur plusieurs essais on obtient un nuage de points compris dans une enveloppe donnant pour chaque valeur de la distance inter-électrodes une valeur maximale et minimale de la tension d'arc. Il est clair par ailleurs que chaque couple (tension, distance) est aussi associé à une valeur de l'intensité du courant d'arc. Si on constate une dispersion forte des valeurs de I_{arc} associées cela signifie qu'une instabilité de l'arc a perturbé le signal et cela est en fait souvent accompagné d'une valeur de la tension nettement plus importante que la moyenne. Dans ce cas, cela apparaît clairement en regardant le nuage de points obtenus et un « tri à la main » permet de supprimer les valeurs aberrantes. Les figures 4.39 et 4.40 donnent deux exemples d'enveloppes (plus parlant que de représenter un nuage de points) décrivant U_{arc} en fonction de d . Bien sûr, plus l'enveloppe est épaisse plus la dispersion est importante. La figure 4.39 représente un cas de faible dispersion, la figure 4.40 représente un cas de forte dispersion.

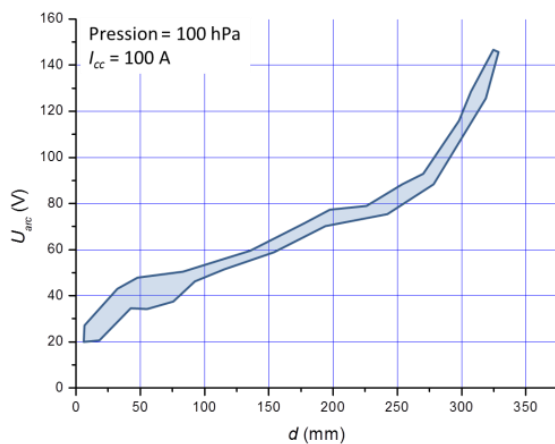


Figure 4.39 : enveloppe des points utilisés pour l'ajustement. $P = 100$ hPa, et $I_{cc} = 100$ A – cas d'une faible dispersion.

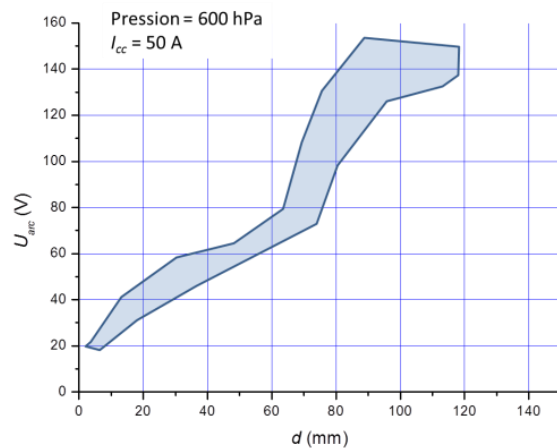


Figure 4.40 : enveloppe des points utilisés pour l'ajustement. $P = 600$ hPa, et $I_{cc} = 50$ A – cas d'une forte dispersion.

Pour une valeur donnée de la pression on obtient ainsi un ensemble de triplés (d , U_{arc} , I_{arc}) avec d étant un nombre entier de millimètres.

L'ajustement est ensuite réalisé pour chaque valeur de la pression à partir de cet ensemble de points. Pour une pression donnée, le nombre de points est évidemment proportionnel aux nombres d'essais réalisés et aussi à la longueur maximale de l'arc. À titre d'exemple l'ajustement pour une pression de 200 hPa est fait sur un ensemble de 1600 triplets.

Remarque : La précision de nos mesures de tension aux faibles valeurs de d (et donc de U_{arc}) est de l'ordre de 10 à 15 %. À noter que comme nous l'avons précisé avant, de nombreux travaux existent déjà pour les faibles valeurs de d et que nous avons entrepris de nous intéresser aux distances inter-électrodes plus grandes. Il en va de même pour la mesure de la distance inter-

électrodes ce qui nous conforte dans notre choix.

Comme cela a été évoqué auparavant, de nombreuses expressions ont été proposées pour exprimer U_{arc} en fonction de d et I_{arc} . Comme nous nous intéressons aux « fortes » valeurs de d et aux valeurs de I_{arc} au moins de l'ordre de la dizaine d'ampères nous avons opté pour une formule « classique » pour exprimer U_{arc} :

$$U_{arc} = V_0 + d \times E \quad (4.18)$$

Où V_0 est la somme des chutes de tension anodique et cathodique et E est le champ dans la colonne d'arc.

Nous inspirant des travaux de Mossop *et al.*⁶⁸ nous avons fait l'hypothèse d'une dépendance du champ avec l'intensité du courant d'arc en écrivant de façon simple :

$$E = c \times I_{arc}^n \quad (4.19)$$

c et n étant, pour une valeur de la pression donnée deux constantes à déterminer. Ce qui conduit donc à l'expression similaire à celle de Mossop *et al.*⁶⁸ :

$$U_{arc} = V_0 + d \times c \times I_{arc}^n \quad (4.20)$$

Nous avons alors au maximum trois « paramètres » d'ajustement : V_0 , c et n . Nous avons proposé deux configurations :

- i) La valeur de V_0 est inconnue et devient donc un paramètre d'ajustement.
- ii) La valeur de V_0 varie avec la pression et est incluse dans la gamme proposée par Landfried *et al.*³³ (donné sur le tableau 4.7) et représentée sur la figure 4.40.

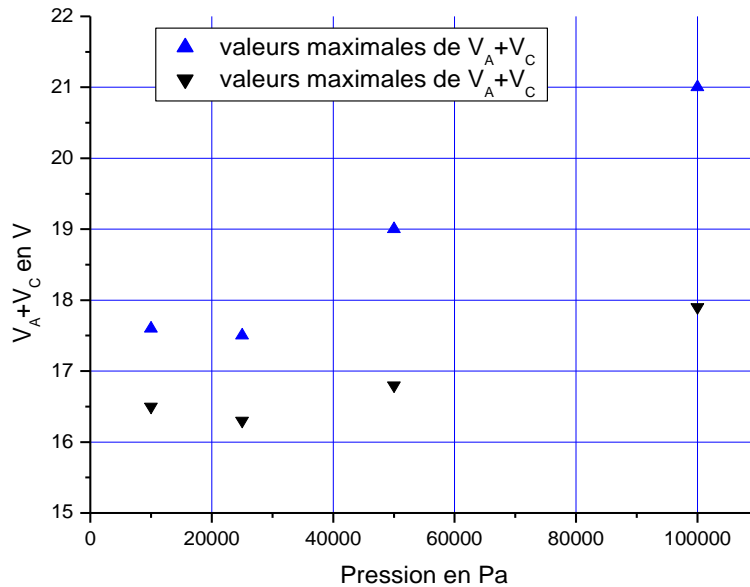


Figure 4.40 : variation de V_0 avec la pression (cuivre dans l'air) selon Landfried *et al.*³³.

Une troisième proposition (non explorée au cours de ce travail) aurait été de supposer que la valeur de V_0 est indépendante de la pression et vaut 20 V, hypothèse proposée par T. André¹.

Les courbes 3D n'étant pas très lisibles, on propose sur les figures 4.41 et 4.42 deux exemples de comparaison des points expérimentaux et de l'ajustement calculé pour deux valeurs de l'intensité du courant d'arc. I_{arc} voisin de 80 A sur la figure 4.41 ($P = 1000$ hPa) et I_{arc} voisin de 10 A sur la figure 4.42 et $P = 100$ hPa. Il s'agit de deux cas montrant les « défauts typiques » inhérents à cette méthode :

- dans le cas de la figure 4.41 la dispersion des points expérimentaux (liée aux nombres d'essais pris en compte) aux fortes valeurs de la distance inter-électrodes montrent qu'on ne peut bien sûr espérer de l'ajustement qu'une bonne correspondance qu'avec une valeur moyennée.
- dans le cas de la figure 4.42, le fait d'être proche de la borne inférieure de la gamme d'intensité du courant considérée (10 A) montre que, bien que les points expérimentaux soient moins dispersés que dans le cas précédent, comme l'ajustement est fait sur une grande plage d'intensité de courant d'arc, la valeur obtenue pour l'ajustement semble « à l'œil » au-dessus du nuage des points expérimentaux.

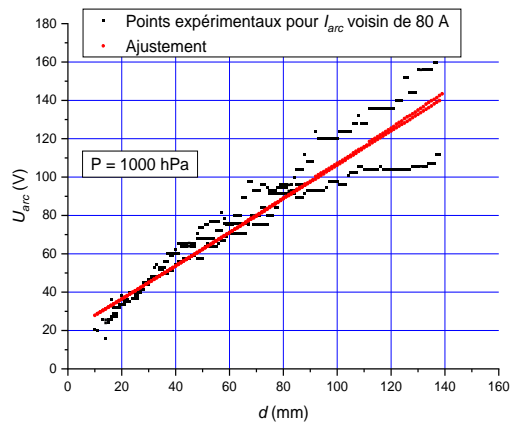


Figure 4.41 : comparaison entre les points expérimentaux et l'ajustement 3D – Représentation 2D à I_{arc} et pression données (pour plus de lisibilité) – $P = 1000$ hPa et $I_{arc} \approx 100$ A.

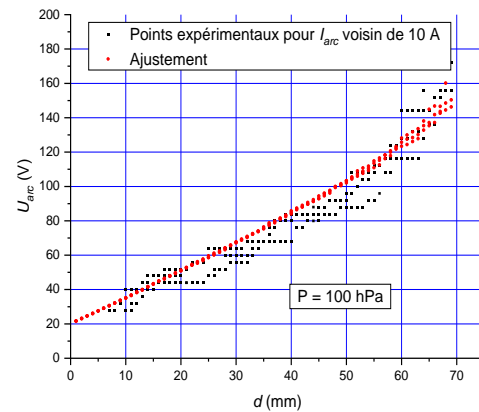


Figure 4.42 : comparaison entre les points expérimentaux et l'ajustement 3D – Représentation 2D à I_{arc} et pression données (pour plus de lisibilité) – $P = 100$ hPa et $I_{arc} \approx 10$ A.

En conclusion, il est évident qu'étant donnée la dispersion des valeurs expérimentales aux limites des domaines considérés, on ne peut prétendre qu'à l'estimation d'une valeur d'une part moyennée mais dont il faudra prendre garde aux bords des domaines de validité.

4.6 Présentation des résultats concernant les valeurs de V_0 et du champ électrique dans la colonne d'arc

Dans cette partie la valeur de la pression est constante et nous présentons les résultats obtenus sur V_0 et E selon que les hypothèses i) ou ii) ont été prises en compte.

4.6.1 Valeur de $V_A + V_C$

4.6.1.1 Dépouillement sans contrainte sur la valeur de $V_A + V_C$

Les valeurs sont présentées sur la figure 4.43. Les valeurs moyennes ainsi que les valeurs maximales et minimales sont présentées.

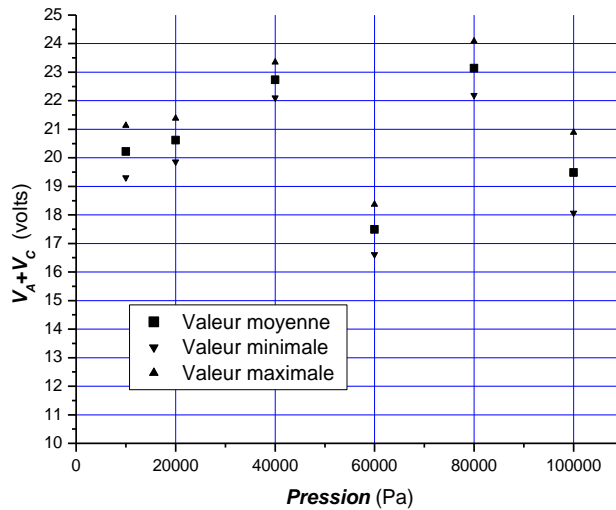


Figure 4.43 : valeur moyenne, maximale et minimale pour V_0 en fonction de la pression sans poser de contrainte sur la valeur de V_0 a priori.

4.6.1.2 Dépouillement avec contrainte sur V_0 .

Les valeurs sont présentées sur la figure 4.44. Les valeurs moyennes ainsi que les valeurs maximales et minimales sont présentées. Bien sûr les valeurs maximales et minimales que nous avons prises sont celles extraites de Landfried *et al.* et ne sont pas un résultat de « l'ajustement ».

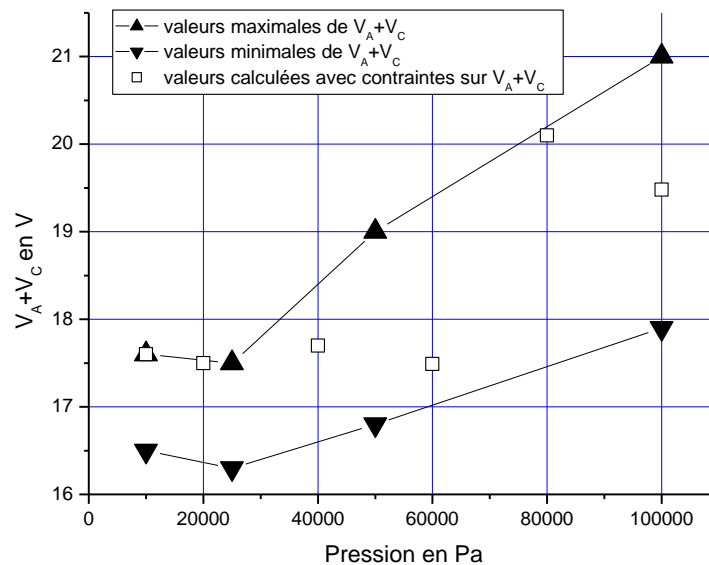


Figure 4.44 : valeurs moyennes, maximales et minimales pour V_0 en fonction de la pression en faisant l'hypothèse ii).

On constate des différences assez importantes dans les valeurs obtenues selon la démarche adoptée.

Ceci en soit n'est pas étonnant étant donné que la somme des chutes anodiques et cathodiques sont particulièrement liées à des arcs de faibles longueurs et que, comme nous l'avons déjà dit précédemment, les mesures réalisées ne permettent pas d'avoir une bonne précision pour les faibles distances inter-électrodes et que l'étude d'arcs courts ne rentrait pas dans nos objectifs premiers.

4.6.2 Calculs des champs électriques moyens dans la colonne d'arc

Nous avons là encore calculé les valeurs du champ moyen dans la colonne pour différentes valeurs de la pression. L'ensemble des résultats est donné en annexe pour chacune des pressions 100, 200, 400, 600, 800 et 1000 hPa. Nous présentons dans ce paragraphe les résultats obtenus pour 100 et 1000 hPa car les résultats obtenus pour ces deux valeurs de la pression sont représentatifs des deux comportements observés.

4.6.2.1 $P = 100 \text{ hPa}$

Les figures 4.45 et 4.46 représentent le champ électrique dans la colonne calculé sans contrainte sur V_A+V_C (figure 4.45) et avec contrainte sur V_A+V_C (figure 4.46). Sur ces figures les valeurs minimales et maximales des champs sont aussi représentées.

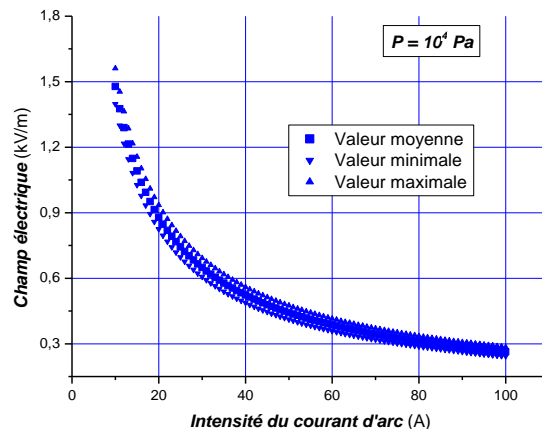
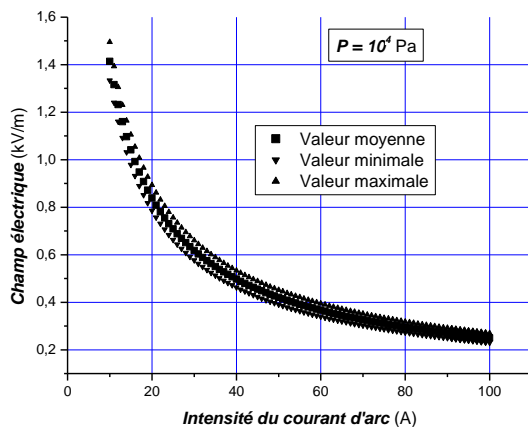


Figure 4.45 : valeurs moyenne, maximale et minimale du champ dans la colonne à $P = 100 \text{ hPa}$ dans le cas d'un dépouillement sans contrainte sur V_A+V_C .

Figure 4.46 : valeurs moyenne, maximale et minimale du champ dans la colonne à $P = 100 \text{ hPa}$ dans le cas d'un dépouillement avec contrainte sur V_A+V_C .

4.6.2.2 $P = 1000 \text{ hPa}$

Les figures 4.47 et 4.48 représentent le champ électrique dans la colonne calculé sans contrainte sur V_A+V_C (figure 4.47) et avec contrainte sur V_A+V_C (figure 4.48). Sur ces figures les valeurs minimales et maximales des champs sont aussi représentées.

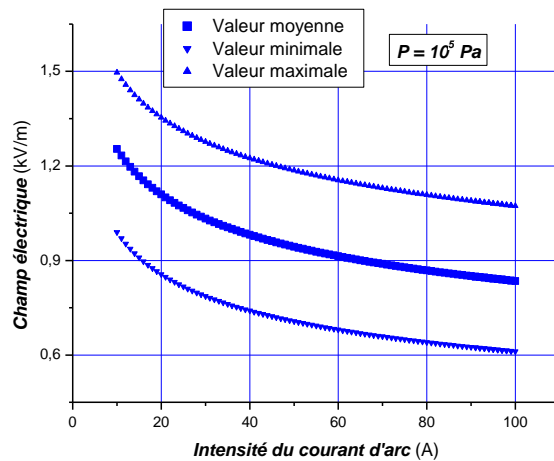
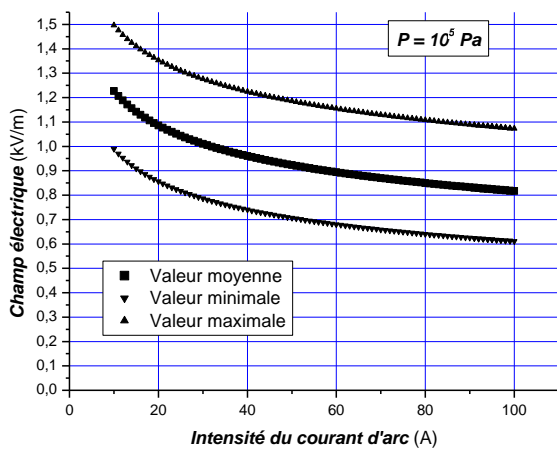


Figure 4.47 : valeurs moyenne, maximale et minimale du champ dans la colonne à $P = 1000$ hPa dans le cas d'un dépouillement sans contrainte sur V_A+V_C .

Figure 4.48 : valeurs moyenne, maximale et minimale du champ dans la colonne à $P = 1000$ hPa dans le cas d'un dépouillement avec contrainte sur V_A+V_C .

4.6.2.3 Synthèse : influence de la pression

Les figures 4.49 et 4.50 représentent le champ électrique dans la colonne en fonction de l'intensité du courant d'arc, pour 6 valeurs de la pression, calculé sans contrainte sur V_A+V_C (figure 4.49) et avec contrainte sur V_A+V_C (figure 4.50).

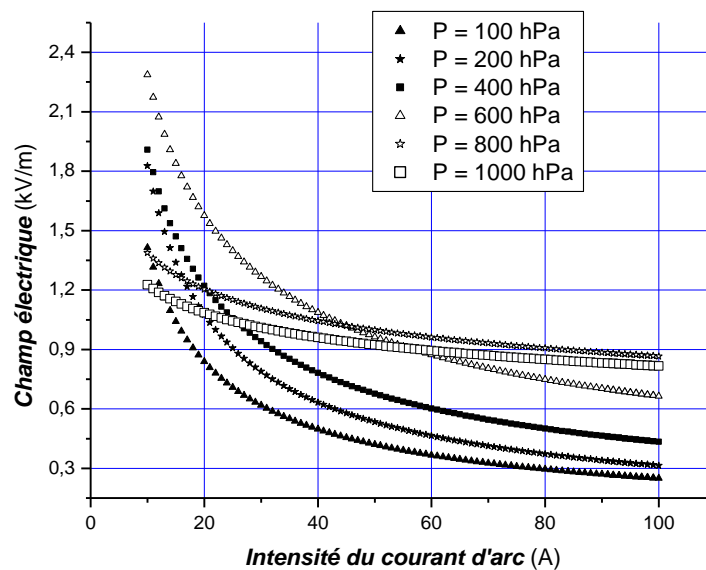


Figure 4.49 : valeurs moyenne du champ dans la colonne en fonction de l'intensité du courant d'arc pour diverses valeurs de la pression dans le cas d'un dépouillement sans contrainte sur V_A+V_C .

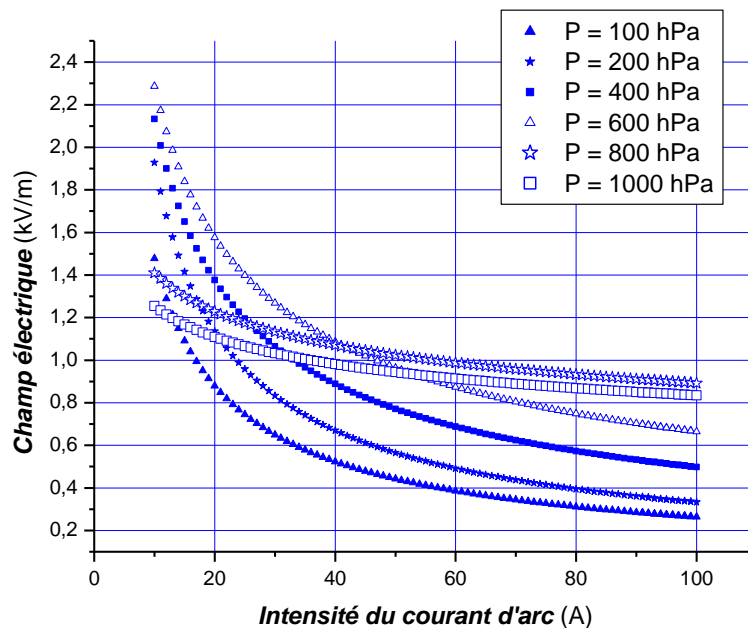


Figure 4.50 : valeurs moyenne du champ dans la colonne en fonction de l'intensité du courant d'arc pour diverses valeurs de la pression dans le cas d'un dépouillement avec contrainte sur V_A+V_C .

4.6.2.4 Influence du mode de dépouillement sur les valeurs prises par le champ électrique

Sur les figures 4.51 et 4.52 nous comparons les valeurs du champ dans la colonne obtenues pour $P = 100$ hPa et $P = 1000$ hPa selon que l'ajustement a été réalisé suivant les hypothèses i) ou ii). Si la méthode employée avait une influence assez importante sur les valeurs des chutes anodique et cathodique l'influence est beaucoup plus réduite sur le champ dans la colonne.

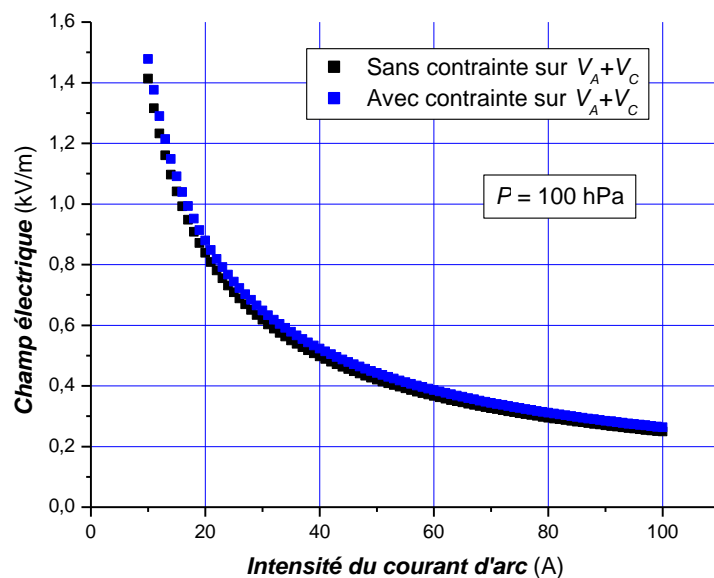


Figure 4.51 : valeur moyenne du champ dans la colonne en fonction de l'intensité du courant d'arc pour $P = 100$ hPa – Comparaison des valeurs obtenues selon les hypothèses faites pour l'ajustement (i) ou ii).

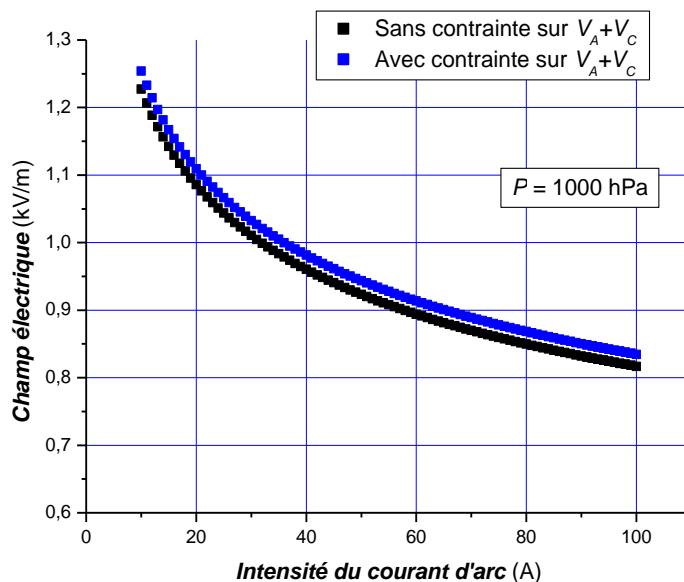


Figure 4.52 : valeur moyenne du champ dans la colonne en fonction de l'intensité du courant d'arc pour $P = 1000$ hPa – Comparaison des valeurs obtenues selon les hypothèses faites pour l'ajustement (i) ou ii).

Pour la suite, étant donné que nous nous intéressons à des arcs d'une longueur au moins égale à 1 cm, nous ne comparerons plus systématiquement les résultats selon la méthode employée pour l'ajustement et, dans la majorité des cas nous présenterons les résultats obtenus avec la méthode ii).

4.6.2.5 Influence de la pression sur le champ électrique dans la colonne.

Pour deux valeurs de l'intensité du courant d'arc ($I_{arc} = 20\text{A}$ et $I_{arc} = 80\text{A}$) nous avons tracé sur la figure 4.53 le champ électrique en fonction de la pression.

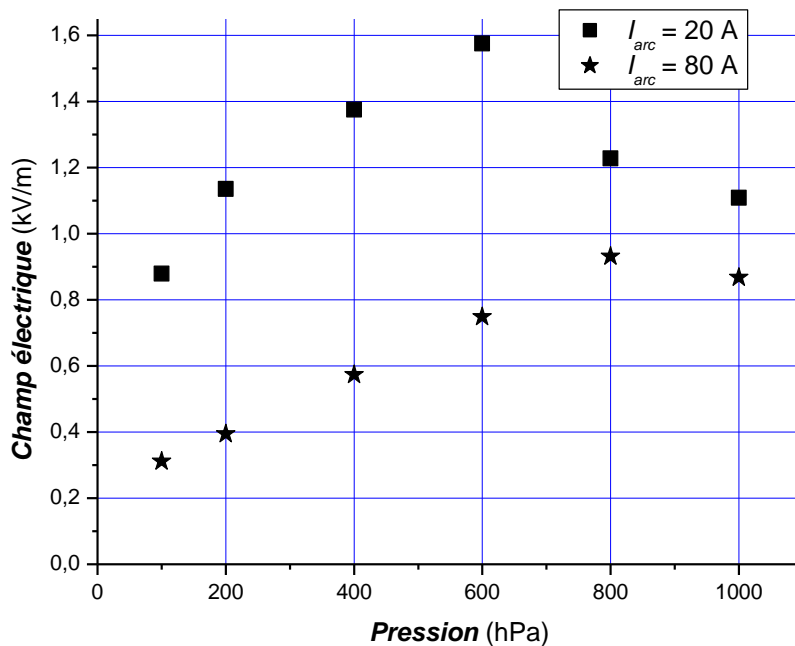


Figure 4.53 : valeur du champ moyen dans la colonne en fonction de la pression pour deux valeurs de l'intensité du courant d'arc (20 A et 80 A).

4.6.2.6 Proposition d'une expression « générale »

Pour chaque pression nous avons obtenu des expressions sous la forme : $U_{arc} = V_0 + d \times c \times I_{arc}^n$. Bien sûr les coefficients apparaissant dans ces expressions dépendent de la valeur de la pression. Les valeurs de V_0 ont été présentées précédemment, les valeurs de c et de n sont présentées respectivement sur les figures 4.54 et 4.55 en fonction de la pression. Une proposition d'ajustement de ces valeurs est aussi présentée sous forme d'une ligne bleue continue. On s'est appliqué à essayer de bien faire « ajuster » pour les fortes pressions car c'est là que les variations de c et n ont le plus d'influence.

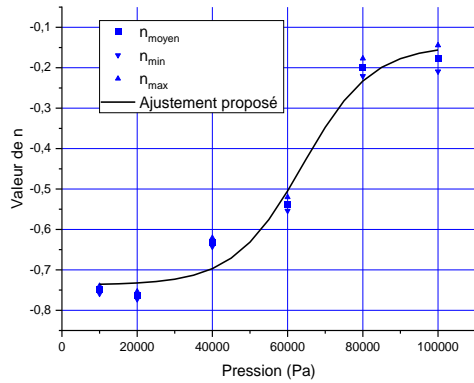


Figure 4.54 : valeur de n en fonction de la pression et « ajustement » proposé.

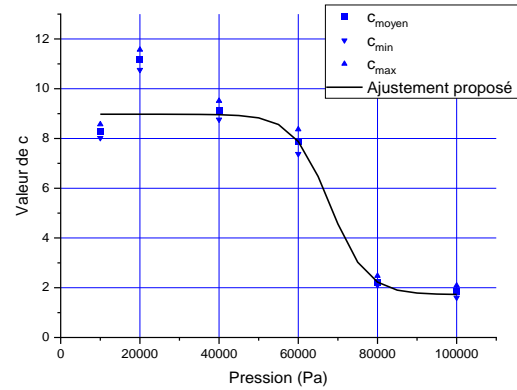


Figure 4.55 : valeur de c en fonction de la pression et « ajustement » proposé.

Ainsi on peut proposer une expression sous la forme :

$$U_{arc} = V_0(p) + d \times c(p) \times I_{arc}^{n(p)} \quad (4.21)$$

Les expressions de c et n sont sous la forme :

$$c(p) = \frac{a}{\left(1 + b \times \exp\left(\frac{p-p_1}{p_0}\right)\right)} + c \quad (4.22)$$

$$n(p) = \frac{a'}{\left(1 + b' \times \exp\left(-\frac{p-p'_1}{p'_0}\right)\right)} + c' \quad (4.23)$$

Les valeurs des constantes sont les suivants :

- $a = 7.25$,
- $b = 12$,
- $p_1 = 79450$ (min : 57950, max : 100950),
- $p_0 = 4\,621$ (min : -1090, max : 10330),
- $c = 1.725$,
- $a' = 0.5927$ (min : 0.09034, max : 1.095),
- $b' = 13,692$ (min : -74,31, max : 101,7),
- $p'_1 = 40000$,
- $p'_0 = 9170$ (min : -14 960, max : 33 300),
- $c' = -0.7373$ (min : -0.9602, max : -0.5145).

Étant donné les « ajustements » successifs réalisés, il est clair qu'on ne peut prétendre à une correspondance remarquable entre points expérimentaux (eux-mêmes dispersés). Afin d'illustrer la « précision » de notre proposition de formule nous avons tracé sur les figures 4.56 et 4.57 les zones de compatibilité pas « trop mauvaise » entre notre formule et les points expérimentaux pour

des pressions valant 100 et 400 hPa. L'ensemble des courbes est par ailleurs présenté en annexe de ce chapitre. Nous nous sommes fixés un seuil de compatibilité à 20% entre la valeur donnée par la formule et la moyenne des valeurs expérimentales. Ceci peut paraître élevé mais il ne faut pas oublier que les fortes valeurs de la tension d'arc correspondent à des fortes valeurs de la distance inter-électrodes et s'accompagnent assez systématiquement d'une dispersion assez importante des mesures du fait de la déformation de la colonne d'arc (dispersion parfois supérieure à 20%). Les courbes « tracées à la main » donnent une représentation schématique des zones pour lesquelles la formule peut convenir compte tenu des écarts acceptés. Deux types d'écart important supérieur à 20% apparaissent :

- pour les fortes intensités aux faibles valeurs de la distance inter-électrodes. Ceci est dû au fait qu'il est difficile d'avoir un « ajustement » convenable pour des valeurs de la tension élevée. Ces tensions élevées sont mesurées principalement pour les intensités du courant élevées qui permettent d'avoir des distances inter-électrodes importantes sans extinction de l'arc.

- pour les valeurs maximales de la distance inter-électrodes aux faibles intensités. Dans ce cas les valeurs mesurées sont nettement supérieures aux valeurs proposées par « l'ajustement ». Ceci est dû au fait que pour ces distances inter-électrodes, la distance inter-électrodes est assez différente de la longueur de la colonne. L'arc est instable. Ceci montre bien qu'il est clairement nécessaire de mieux appréhender les limites pour lesquelles on peut confondre longueur de la colonne et distance inter-électrodes. Dans cette étude nous avons certainement surestimé ces valeurs.

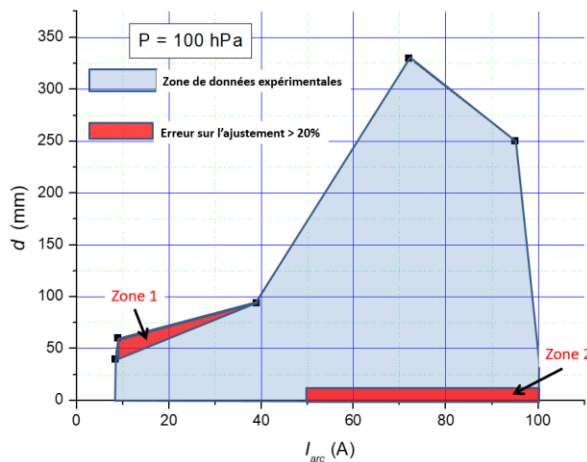


Figure 4.56 : zone de « compatibilité » entre valeurs expérimentales moyennes et valeurs données par la formule pour $P = 100$ hPa.

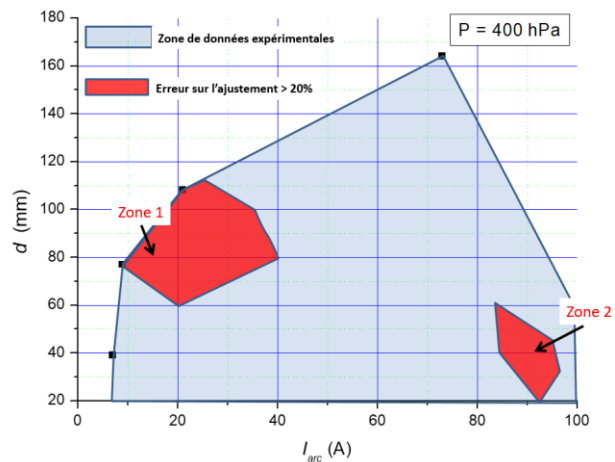


Figure 4.57 : zone de « compatibilité » entre valeurs expérimentales moyennes et valeurs données par la formule pour $P = 400$ hPa.

4.7 Conclusions

Ce chapitre était dédié à la caractérisation électrique d'un arc « libre » dans l'air pour des pressions allant de 100 hPa à 1000 hPa. Le rappel bibliographique a montré la richesse et la diversité des travaux réalisés pour des intensités de courant d'arc inférieures à 20 A et des distances inter-électrodes inférieures à 10 mm. Il a mis aussi en évidence la relative pauvreté des caractérisations pour des pressions strictement inférieures à la pression atmosphérique. C'est donc dans l'optique de caractériser l'arc pour des intensités plus élevées, des distances inter-électrodes plus grandes et des pressions plus basses que nous avons réalisé nos travaux.

Les travaux entrepris se sont divisés en deux phases :

- i) Une phase expérimentale au cours de laquelle nous avons réalisé des arcs dans différentes conditions de pression, courant, etc. Le choix d'étudier des arcs d'ouverture nous a facilité le travail en termes de nombre d'essais réalisés, mais compliqué l'interprétation des résultats aux faibles valeurs de la distance inter-électrodes. Il faut noter cependant que ce n'est pas ce domaine qui nous intéressait. Au cours de cette phase nous avons donc accumulé les essais en vue de constituer une banque de données permettant de lier tension d'arc, intensité du courant et distance inter-électrodes pour 6 valeurs différentes de la pression. Le constat que la tension d'arc à vitesse d'ouverture égale à 50 mm/s était très proche de la tension mesurée lors d'une ouverture par paliers a permis là aussi de réduire le nombre d'essais.
- ii) La seconde phase a consisté à « ajuster » les résultats expérimentaux. Dans un premier temps nous avons eu à réaliser un tri dans les valeurs mesurées. En effet, une des difficultés rencontrées se situe dans l'estimation de la longueur de la colonne. Nous avons estimé que la longueur de la colonne était proche de la distance inter-électrodes lorsque la tension d'arc passait par un minimum au cours de l'ouverture. Les films réalisés en cinématographie rapide tendent à confirmer cette hypothèse. Cependant, la lourdeur rencontrée à filmer de façon exhaustive tous les essais et le fait de ne disposer au moment des essais que d'une seule caméra rapide n'a pas permis de nous assurer à coup sûr de la validité de notre hypothèse. Une fois extraites les valeurs minimales de la tension (à distance inter-électrodes données), nous avons « ajusté », pour chaque valeur de la pression, ces points expérimentaux (environ 1500 par valeur de pression) avec une formule similaire à celle proposée par Mossop *et al.* qui proposent une dépendance linéaire de la tension avec la distance et une dépendance du champ électrique en I^n . Enfin, pour finir, nous avons proposé une formule générale permettant de prendre en compte les dépendances des différents paramètres vis-à-vis de la pression.

4.8 Annexe au chapitre

1) Tracé des champs électriques moyens dans la colonne d'arc sans contrainte sur V_A+V_C .

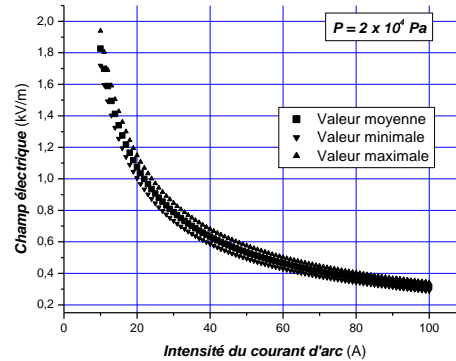
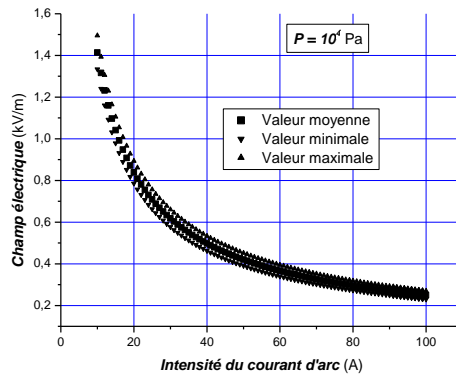


Figure A.1 : valeurs moyenne, maximale et minimale du champ dans la colonne à $P = 100 \text{ hPa}$ dans le cas d'un dépouillement sans contrainte sur V_A+V_C .

Figure A.2 : valeurs moyenne, maximale et minimale du champ dans la colonne à $P = 200 \text{ hPa}$ dans le cas d'un dépouillement sans contrainte sur V_A+V_C .

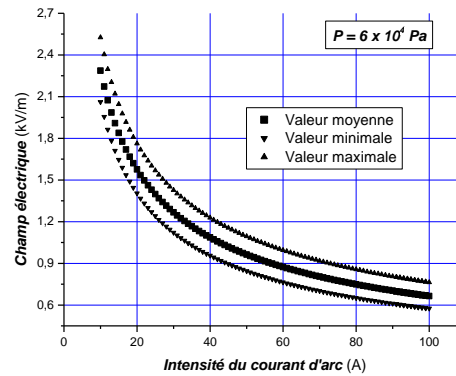
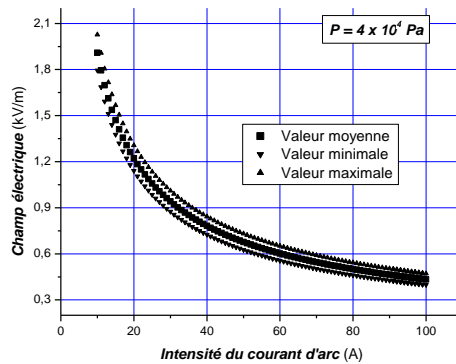


Figure A.3 : valeurs moyenne, maximale et minimale du champ dans la colonne à $P = 400 \text{ hPa}$ dans le cas d'un dépouillement sans contrainte sur V_A+V_C .

Figure A.4 : valeurs moyenne, maximale et minimale du champ dans la colonne à $P = 600 \text{ hPa}$ dans le cas d'un dépouillement sans contrainte sur V_A+V_C .

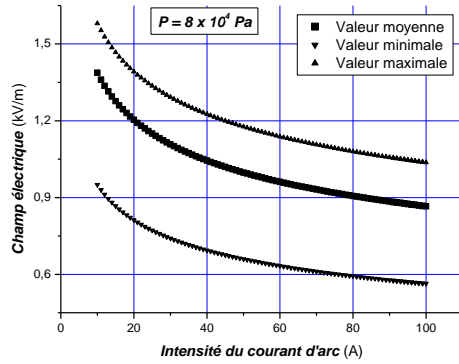


Figure A.5 : valeurs moyenne, maximale et minimale du champ dans la colonne à $P = 800$ hPa dans le cas d'un dépouillement sans contrainte sur V_A+V_C .

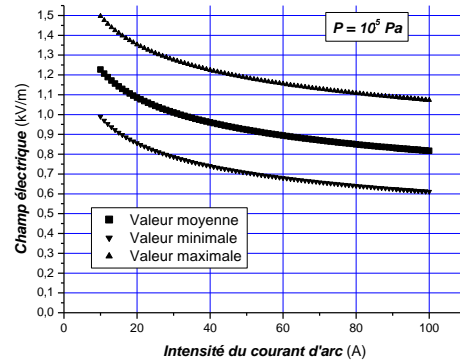


Figure A.6 : valeurs moyenne, maximale et minimale du champ dans la colonne à $P = 1000$ hPa dans le cas d'un dépouillement sans contrainte sur V_A+V_C .

2) Tracé des champs électriques moyens dans la colonne d'arc avec contrainte sur V_A+V_C .

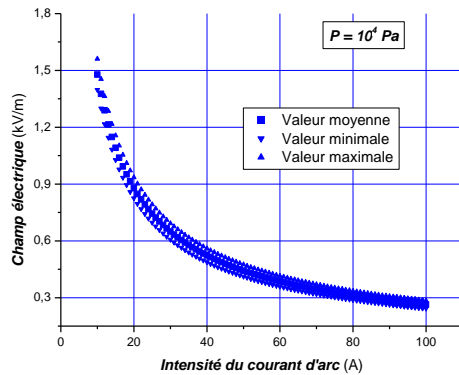


Figure A.7 : valeurs moyenne, maximale et minimale du champ dans la colonne à $P = 100$ hPa dans le cas d'un dépouillement avec contrainte sur V_A+V_C .

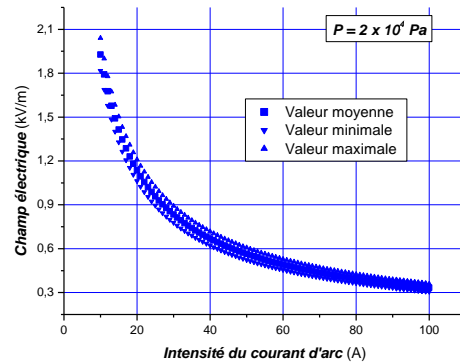


Figure A.8 : valeurs moyenne, maximale et minimale du champ dans la colonne à $P = 200$ hPa dans le cas d'un dépouillement avec contrainte sur V_A+V_C .

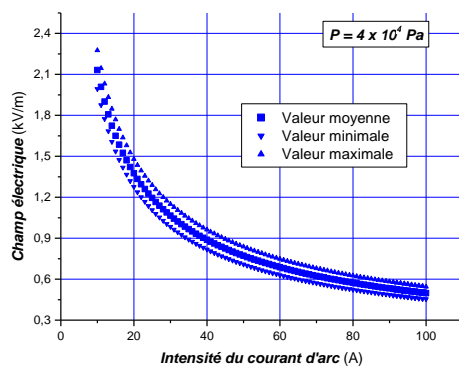


Figure A.9 : valeurs moyenne, maximale et minimale du champ dans la colonne à $P = 400$ hPa dans le cas d'un dépouillement avec contrainte sur V_A+V_C .

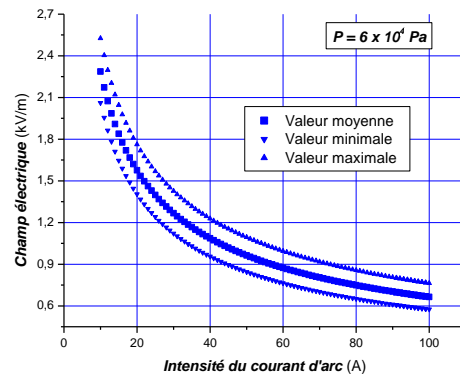


Figure A.10 : valeurs moyenne, maximale et minimale du champ dans la colonne à $P = 600$ hPa dans le cas d'un dépouillement avec contrainte sur V_A+V_C .

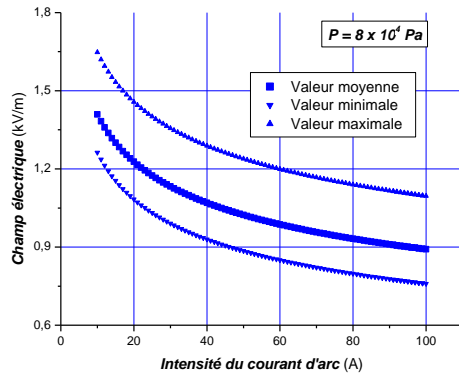


Figure A.11 : valeurs moyenne, maximale et minimale du champ dans la colonne à $P = 800$ hPa dans le cas d'un dépouillement avec contrainte sur $V_A + V_C$.

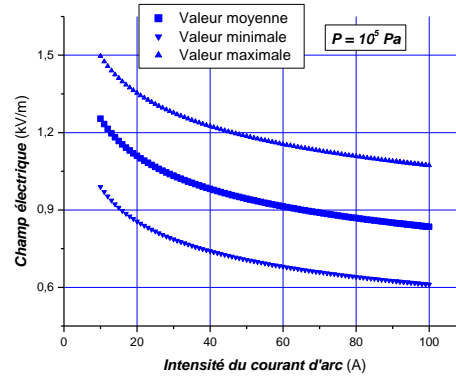


Figure A.12 : valeurs moyenne, maximale et minimale du champ dans la colonne à $P = 1000$ hPa dans le cas d'un dépouillement avec contrainte sur $V_A + V_C$.

3) Zones de « compatibilité » entre la formule et les points expérimentaux.

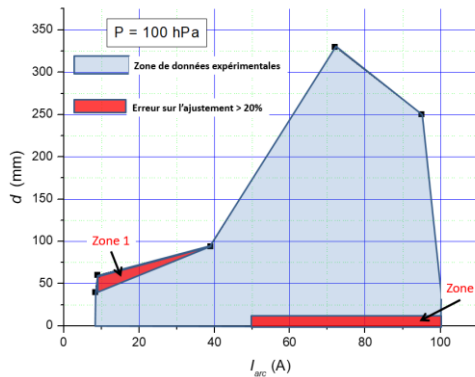


Figure A.13 : zone de « compatibilité » entre valeurs expérimentales moyennes et valeurs données par la formule pour $P = 100$ hPa.

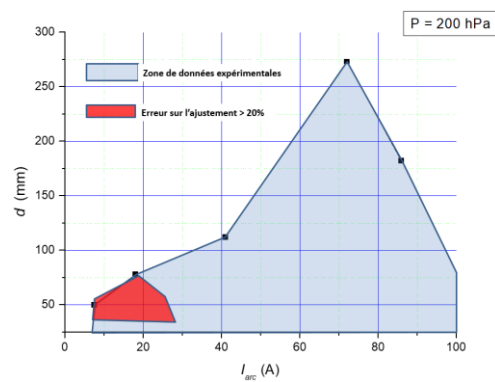


Figure A.14 : zone de « compatibilité » entre valeurs expérimentales moyennes et valeurs données par la formule pour $P = 200$ hPa.

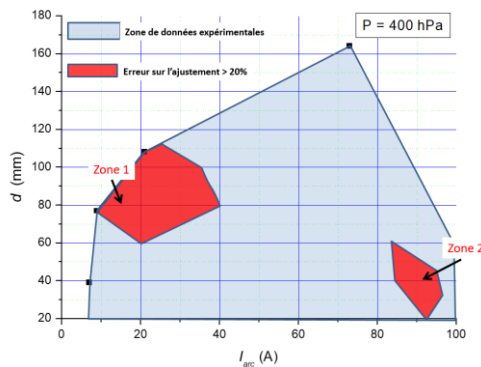


Figure A.15 : zone de « compatibilité » entre valeurs expérimentales moyennes et valeurs données par la formule pour $P = 400$ hPa.

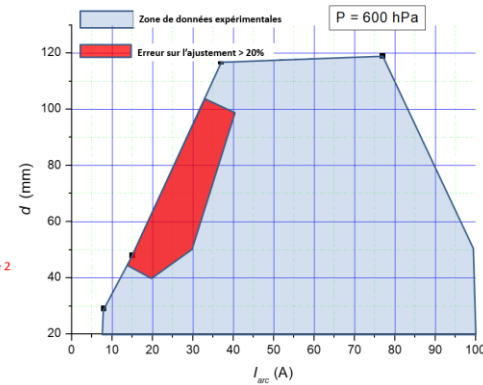


Figure A.16 : zone de « compatibilité » entre valeurs expérimentales moyennes et valeurs données par la formule pour $P = 600$ hPa.

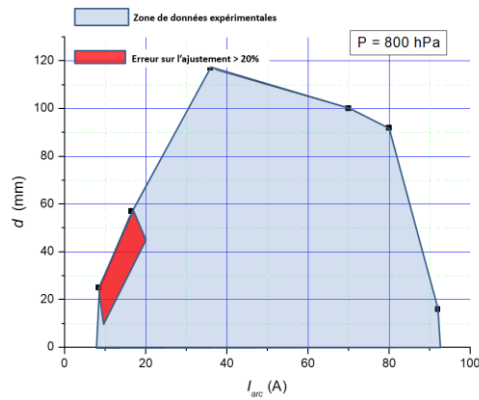


Figure A.17 : zone de « compatibilité » entre valeurs expérimentales moyennes et valeurs données par la formule pour $P = 800$ hPa.

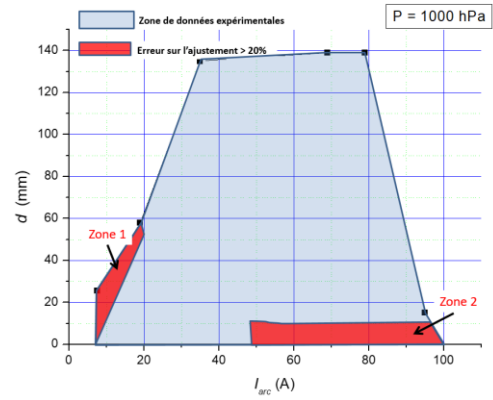


Figure A.18 : zone de « compatibilité » entre valeurs expérimentales moyennes et valeurs données par la formule pour $P = 1000$ hPa.

Chapitre 5 :
**Contribution à l'étude des défauts d'arcs – évolution
du défaut d'arc : des phénomènes précurseurs de
l'arc jusqu'à son extinction (ou non) dans le cas de
l' « arc tracking » humide au sein d'un faisceau de
câbles**

5.1 Introduction

L'augmentation actuelle du nombre (et de la puissance) des systèmes électriques embarqués a pour conséquence que les réseaux filaires vont jouer un rôle de plus en plus important. On entend bien sûr par réseau filaire tout ce qui constitue les liaisons, à savoir aussi bien le câble lui-même que le système de connectique attenante (l'un n'allant pas sans l'autre). En particulier dans le domaine de l'aéronautique, la défaillance ou l'endommagement d'un câblage peut causer des dysfonctionnements voire la destruction d'un équipement (voire de l'avion lui-même)... Le risque lié à ce type de défaillance peut être diminué si on est capable de diagnostiquer « l'état de santé » du réseau, d'en prévoir l'évolution à court terme et si on prend des mesures adaptées pour en éviter l'aggravation (empêcher l'aggravation d'un défaut « naissant »). Par conséquent, il est nécessaire de disposer de connaissances concernant les différents types de défauts ainsi que sur leurs évolutions possibles, de disposer de techniques et de méthodes pour assurer le diagnostic des éléments constitutifs du réseau et la surveillance de leur état de vieillissement et de dégradation.

La dégradation des câbles et de la connectique attenante peut avoir de nombreuses causes liées aussi bien à l'installation ou la maintenance même, qu'aux contraintes d'exploitation potentiellement agressives ainsi qu'au vieillissement normal des matériaux. Parmi les causes de dégradations on peut donc citer :

- des erreurs « humaines » (défauts lors du montage, de la fabrication ou de la maintenance).
- des problèmes mécaniques : vibration, tension, compression, torsion, écrasement pouvant ainsi par exemple conduire à une déconnexion partielle ou totale au niveau d'un connecteur ou au craquèlement ou encore à la blessure de l'isolant...
- des conditions environnementales sévères conduisant à divers phénomènes de dégradations tels que :
 - l'exposition à l'humidité ou à des produits chimiques (entraînant des phénomènes d'oxydation ou de corrosion des conducteurs (contacts, connecteurs...) et des dégradations des isolants,
 - l'exposition à des températures ambiantes très élevées ou très basses (ou à des fortes variations de températures) du fait de conditions environnementales sévères.
- des problèmes de vieillissement « naturel » ou sous l'action de défauts tels que les décharges partielles ou des défauts de fonctionnement (surintensité entraînant par exemple des échauffements locaux excessifs). Parmi les vieillissements naturels des parties métalliques des contacts on peut citer les phénomènes de diffusion, la formation d'intermétalliques, l'électro-migration et enfin la modification des propriétés mécaniques menant à des relaxations de pression de contact.

Ces sollicitations accélèrent l'usure des câbles et des connecteurs en modifiant leurs propriétés initiales et peuvent aussi conduire à la mise hors d'usage de ces composants (voire la destruction pour partie de l'aéronef). De plus, ces dégradations peuvent être localisées sur une courte portion

de câble ou au niveau des connecteurs mais elles peuvent aussi avoir une extension spatiale importante.

De très nombreux types de défaut peuvent ainsi apparaître^{83 84} : points chauds liés par exemple à des surintensités, décharges partielles, craquèlement, usure ou carbonisation de l'isolant, connexion défailante du fait de vibrations, de mauvais vissage, défaut d'isolement entre conducteur, torsion ou mauvaise courbure du faisceau de câble... Quelques exemples sont donnés sur la figure 5.1, de même que la figure 5.2 donne une description statistique des causes et lieu des défauts et que la figure 5.3 propose une liste des organes et composants touchés par les défauts. Par ailleurs, chaque type de défauts n'évolue pas selon le même schéma ni ne conduit aux mêmes conséquences. À titre d'exemple simpliste : l'apparition de décharges partielles (pouvant être liée à la nature et/ou au vieillissement de l'isolant) au sein d'un connecteur ou d'un faisceau de câbles évolue avec des constantes de temps et s'accompagne de phénomènes (vieillissement des isolants, extension de la décharge...) qui sont différents des constantes de temps et des phénomènes liés à un « dévissage progressif » d'un câble de son bus bar ou à la dégradation par humidité d'un faisceau de câble ayant un isolant dégradé. Cependant, si certaines dégradations ne représentent pas une menace immédiate pour le fonctionnement des câbles (apparition par exemple sous la forme de modifications d'abord bénignes des propriétés du câble du point de vue de la géométrie ou des propriétés des matériaux), elles peuvent sur la durée évoluer vers des défauts plus graves. Ces défauts non-francs peuvent dans une certaine mesure être interprétés comme des signes précurseurs de défauts plus importants et nécessitent là encore des études spécifiques afin d'en estimer l'évolution et les effets sur des durées importantes.

⁸³ M. Dutoya, G. Mazeau, et C. Vlacich, Method and device for detecting electric arc phenomenon on at least one electric cable. Google Patents, 2009.

⁸⁴ W. Yongxing, D. Enyuan, C. Jiyan, 5. Jiyan, et D. Koenig, « Arc tracking properties of the aging wires in aircraft », in 2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics" (ISSCAA), 2008, p. 1–5.

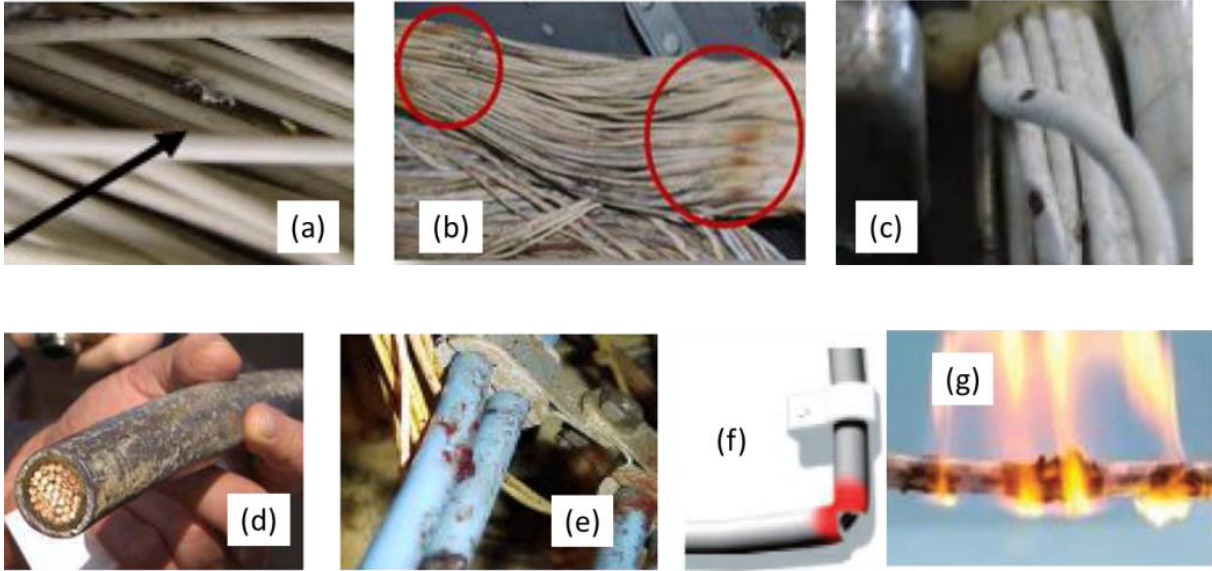


Figure 5.1 : quelques exemples de défauts :

- (a) Présence d'un objet (débris) conducteur au sein du faisceau de câble
- (b) Vieillessement du faisceau
- (c) Usure de l'isolant
- (d) Corrosion
- (e) Présence de liquide de contamination dans le faisceau
- (f) Mauvaise positionnement du câble (trop forte tension)
- (g) Carbonisation de l'isolant

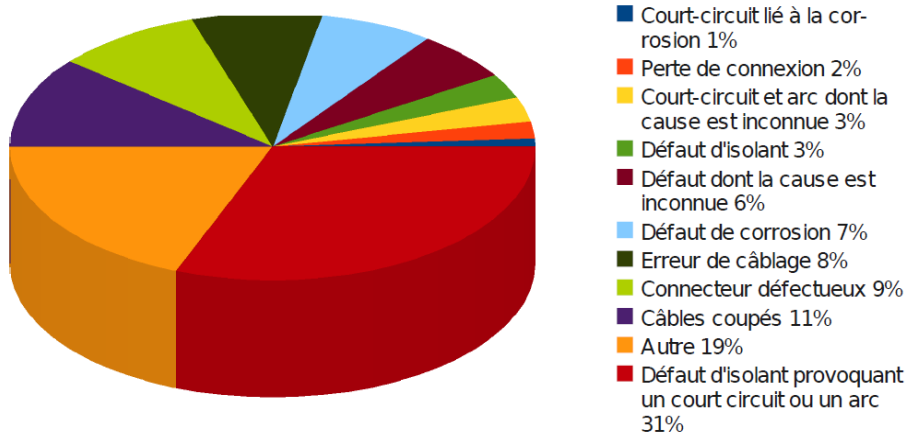


Figure 5.2 : cause et lieux d'apparition des défauts d'arc

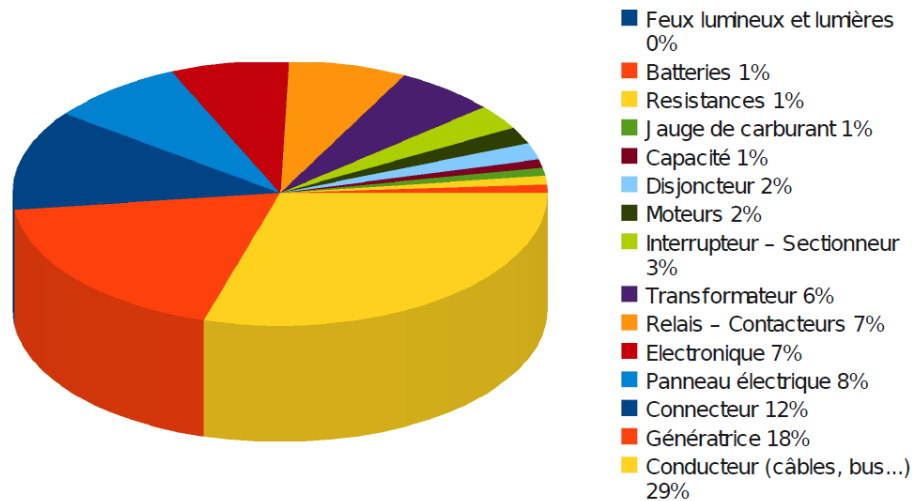


Figure 5.3 : organes et composants sujets aux défauts d'arc

Depuis de nombreuses années, de multiples travaux sont menés dans les différents domaines impliqués dans cette problématique. Parmi ces domaines de nombreux travaux ont été menés dans le domaine de l'étude de l'apparition de décharges partielles au sein d'un faisceau de câbles ou d'un connecteur. Ce phénomène de décharge partielle participe sur le long terme à la dégradation des composants et pourrait conduire à l'initiation d'un défaut d'arc beaucoup plus nuisible. Ainsi, F. Koliatene⁸⁵ et E. Silly⁸⁶ se sont intéressés à la caractérisation des décharges partielles et au vieillissement de matériau isolant tel que le polyimide en conditions de pression et de température aéronautique, allant respectivement de 100 hPa à 1000 hPa et de -60 °C à 200°C. R. Boukadoum⁸⁷ s'est intéressé à la caractérisation de décharges partielles dans un connecteur aéronautique, étudiant notamment l'influence des conditions de pression, température et humidité sur l'apparition des décharges en DC et AC mais aussi l'influence du vieillissement en température et sous décharges sur ces mêmes conditions d'apparition. M. Karadjian⁸⁸ quant à elle s'est intéressée au cas des décharges partielles entre câbles en apportant une attention tout particulière au rôle de l'isolant et à son vieillissement.

Au cours de ce travail nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux défauts liés à la présence d'un arc électrique. Depuis de nombreuses années, des travaux ont été menés dans ce domaine et logiquement ce chapitre commencera par un rappel bibliographique concernant les différents types de défauts d'arcs rencontrés, les travaux précédemment proposés en régime AC (très brièvement), et régime DC (de façon plus détaillée) ainsi que les normes actuellement

⁸⁵ F. Koliatene : « Contribution à l'étude de l'existence de décharges partielles dans les systèmes de l'avionique ». – Thèse Université Paul Sabatier 2009

⁸⁶ E. Silly : « Etude et caractérisation des décharges partielles et du vieillissement du polyimide en environnement aéronautique », Thèse Université Paul Sabatier, 2012

⁸⁷ R. Boukadoum « Étude des décharges partielles et de leur transition à l'arc dans la connectique aéronautique du futur » Université Paris Sud, 2018

⁸⁸ M. Karadjian : « Endurance et tenue diélectrique de l'isolation de câbles électriques pour l'aéronautique », thèse Université Paris Sud, 2018

existantes (principalement en régime AC). Dans un deuxième temps nous définirons les objectifs poursuivis et décrirons et justifierons le dispositif expérimental mis en œuvre. Les résultats seront présentés ensuite en deux étapes : une première étape consistant à présenter de façon détaillée dans un cas le plus représentatif possible les différents événements qui se produisent et une seconde étape plus synthétique qui présentera l'influence de divers paramètres sur les phénomènes observés. Enfin nous terminerons ce chapitre par une synthèse suivie d'une proposition de travaux à mener.

5.2 Rappels : les défauts d'arc, quelques travaux sur le sujet, les dispositifs utilisés usuellement et les normes en régime AC.

5.2.1 Les différents défauts et leurs caractéristiques

Le type de défaut d'arc est défini par sa structure et sa localisation dans le circuit. Les arcs peuvent donc être classés en quatre catégories en fonction de la nature de l'alimentation AC ou DC et de l'emplacement série ou parallèle de l'arc par rapport à la charge, cette classification est présentée sur la figure 5.4.

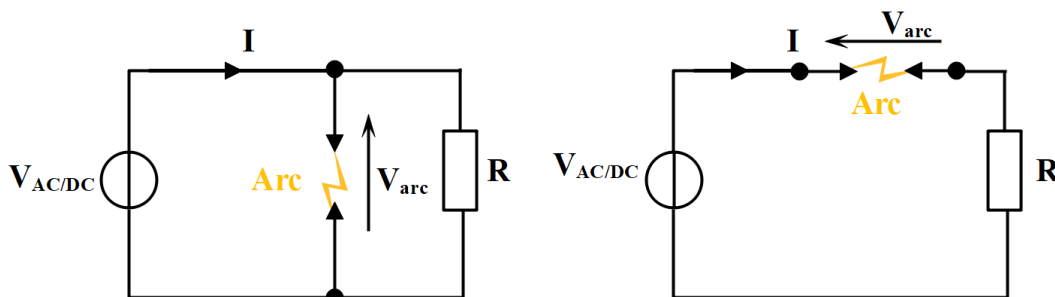


Figure 5.4 : les types des défauts d'arc AC/ DC en parallèle sur le schéma à gauche et en série sur le schéma à droite.

Défaut d'arc parallèle :

Le défaut d'arc parallèle peut se produire entre deux câbles ou entre un câble et une structure pour un circuit DC (isolant blessé, existence d'une zone ou d'un objet conducteur entre deux câbles, ...) et, dans les cas d'un circuit AC il peut se produire entre deux phases ou entre une phase et le neutre. Le courant de défaut dans ce cas est très élevé, il est limité par l'impédance interne de l'alimentation, des câbles et celle de l'arc. La valeur importante atteinte par l'intensité du courant d'arc conduit à un défaut particulièrement énergétique par rapport au défaut d'arc série. Ce type de défaut peut s'accompagner de plus d'une propagation de l'arc le long du faisceau de câbles par exemple (phénomène dit d'arc tracking⁸⁹) et peut s'avérer particulièrement destructeur non seulement pour le faisceau lui-même mais aussi pour l'environnement du fait de l'échauffement

⁸⁹ F. Dricot *et al.* « Survey of arc tracking on aerospace cables and wires », IEEE Trans. on Dielectric Insulation, 1994, vol. 1, n°5, pp 896-903

lié par exemple au rayonnement de l'arc lui-même mais encore aux projections de métal fondu sur des éléments possiblement inflammables. La durée d'un tel défaut peut atteindre quelques centaines de millisecondes. Elle est limitée par le système de protection (disjoncteur).

Défaut d'arc série :

L'arc série peut se produire au niveau d'une connexion défailante à l'intérieur d'un câble⁹⁰ dont les conducteurs seraient sectionnés, ... L'intensité du courant d'arc dans ce type de défaut est inférieure à l'intensité normale du circuit dans lequel le défaut se produit (du fait de l'impédance de l'arc) et ne conduit pas au déclenchement des systèmes de protection classiques (disjoncteurs). La puissance dégagée par un tel défaut est certes nettement inférieure à celle dissipée dans le cas d'un arc parallèle mais la durée du défaut peut être considérablement plus longue et conduire à des dommages tout aussi importants.

5.2.2 Rappel bibliographique sur quelques travaux menés en AC et DC

D'une façon générale, la littérature concerne principalement les défauts d'arc et leur propagation en régime AC^{91, 92} et seuls quelques travaux dont nous rappellerons les objectifs et les principaux résultats plus loin concernent les arcs en régime DC.

Les facteurs principaux ayant une influence sur l'apparition et la propagation du défaut d'arc sont nombreux. Nous avons évoqué précédemment les facteurs susceptibles de générer un défaut. Il faut bien sûr noter que les conditions environnementales ainsi que le type du courant (alternatif ou continu) jouent un rôle de premier ordre. Mais on peut aussi dénombrer ceux favorisant le développement et la propagation de ce défaut ; parmi ces facteurs on peut citer l'existence d'un « film » entre deux câbles⁹³. Ce film liquide ou solide peut par ailleurs être contaminé par des éléments augmentant sa conduction (sel, poussières carbonées...) et conduisant à la présence d'un courant de fuite entre deux câbles facilitant l'apparition du défaut d'arc et surtout la nature de l'isolant des câbles ainsi que de leur état de vieillissement. De nombreuses études ont ainsi été menées sur l'influence de ces paramètres sur la propagation du défaut d'arc ou sur la dégradation des propriétés des isolants vis-à-vis d'un échauffement important lié à un arc ou au passage d'un courant. Parmi les principales on peut citer Y. Wang *et al.*⁹⁴ qui ont étudié l'influence du vieillissement du câble sur sa « résistance » vis-à-vis de l'action d'un arc. D'autres études ont concerné plus particulièrement l'influence de la nature chimique de l'isolant sur la résistance aux phénomènes d'échauffement et de propagation de l'arc. En effet, les arcs de court-circuit de courte durée peuvent partiellement « pyrolyser » (carbonisation thermique) l'isolation, générant un courant de fuite le long de l'isolation⁹⁵. Les petits courants de fuite ainsi induits contribuent à la

⁹⁰ D. Koller *et al.* "A study of time/current characteristics of the ignition processes in cellulosic material caused by electrical arcing for application in 240 V arc fault circuit interrupters", 53ième IEEE Holm Conference, 2007, pp. 105-114

⁹¹ J. Andrea: "Génération, modélisation et détection des défauts d'arc électrique : application aux systèmes embarqués aéronautiques », thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2011

⁹² J. Shea : « Identifying Causes for Certain Types of Electrically Initiated Fires in Residential Circuits », Conference Proceedings on "Aged Electrical Systems," NFPA, Chicago, Oct. 2006.

⁹³ Rajini, V.; Kanchana, K.; Gowrishree, V.; Udayakumar, K. Comparison of surface tracking in polymeric insulating materials. In Proceedings of the 2004 International Conference on Power System Technology, PowerCon 2004, Singapore, Singapore, 21–24 November 2004; Volume 2, pp. 1513–1517.

⁹⁴ Wang Yongxing, Dong Enyuan, Cong Jiyuan, Zou Jiyuan, et D. Koenig, « Arc tracking properties of the aging wires in aircraft », in 2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics, 2008. ISSCAA 2008, 2008, p. 1-5.

⁹⁵ S. Kumagai *et al.* "Tracking and erosion of HTV silicone rubber and suppression mechanism of ATH." IEEE Trans. Dielectr.

dégradation des matériaux, peuvent aussi de nouveau générer des arcs, carbonisant ou enflammant les substances à proximité.

Concernant la nature des isolants, plusieurs types de matériaux ont été utilisés dans le secteur du câblage aéronautique : polyimides (Kapton), polytétrafluoroéthylène (sigle PTFE, marque commerciale Teflon), Ethylene tetrafluoroethylene (sigle ETFE) etc... et plusieurs études ont été menées sur la rigidité diélectrique, la durée de vie de différents types de câbles⁹⁶ ou la propension à faciliter un réamorçage d'arc par exemple...

Concernant les défauts d'arc et leur propagation en régime DC nous pouvons citer les travaux de König *et al*⁹⁷, El Bayda³⁵ et André¹.

5.2.2.1 *Quelques mots concernant les travaux de König et al.*⁹⁷

En 1994 les auteurs ont travaillé sur la mise en place d'un protocole d'étude de l'arc et de sa propagation. Dans leur étude, l'arc est amorcé par la fusion d'un mince filament de cuivre/argent reliant les deux câbles présentant une blessure. Ce mode d'amorçage avait pour but d'en diminuer l'influence... Les conditions environnementales testées prévoyaient de faire varier la composition et la pression du gaz (3 compositions différentes en % d'O₂ et trois pressions différentes). La tension d'alimentation était voisine de 130 VDC et l'intensité du courant comprise entre 7,5 et 30 A. Les auteurs ont observé quatre cas typiques d'extinction d'arcs décrits sur la figure 5.5 :

- extinction d'arc causée par un court-circuit métallique des conducteurs présentant une résistance particulièrement faible. Ceci est noté (M) sur la figure 5.5(a). Le courant continue de passer mais l'arc finit par s'éteindre.
- extinction d'arc causée par un court-circuit de faible résistance. Ceci est noté (R) sur la figure 5.5(a).
- auto-extinction de l'arc (b).
- extinction d'arc suite à la coupure du courant par actionnement d'un contacteur (c).

Les auteurs ont par ailleurs observé que le défaut pouvait réapparaître après extinction du circuit et remise en marche de celui-ci.

Electr. Insul. 2001, 8, 203–211.

⁹⁶ A. Hammoud et M. Stavnes : « A. N. Hammoud, M. W. Stavnes, J. R. Ide, et E. Muegge, « Performance of partially fluorinated polyimide insulation for aerospace applications », in Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report., 1995, p. 262–265.

⁹⁷ D. König, F. R. Frontzek, H. J. Reher, et M. D. Judd, « A new test method for the assessment of the arc tracking properties of wire bundles in air, oxygen enriched atmospheres and vacuum », in Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh, PA USA, 1994, p. 145–150

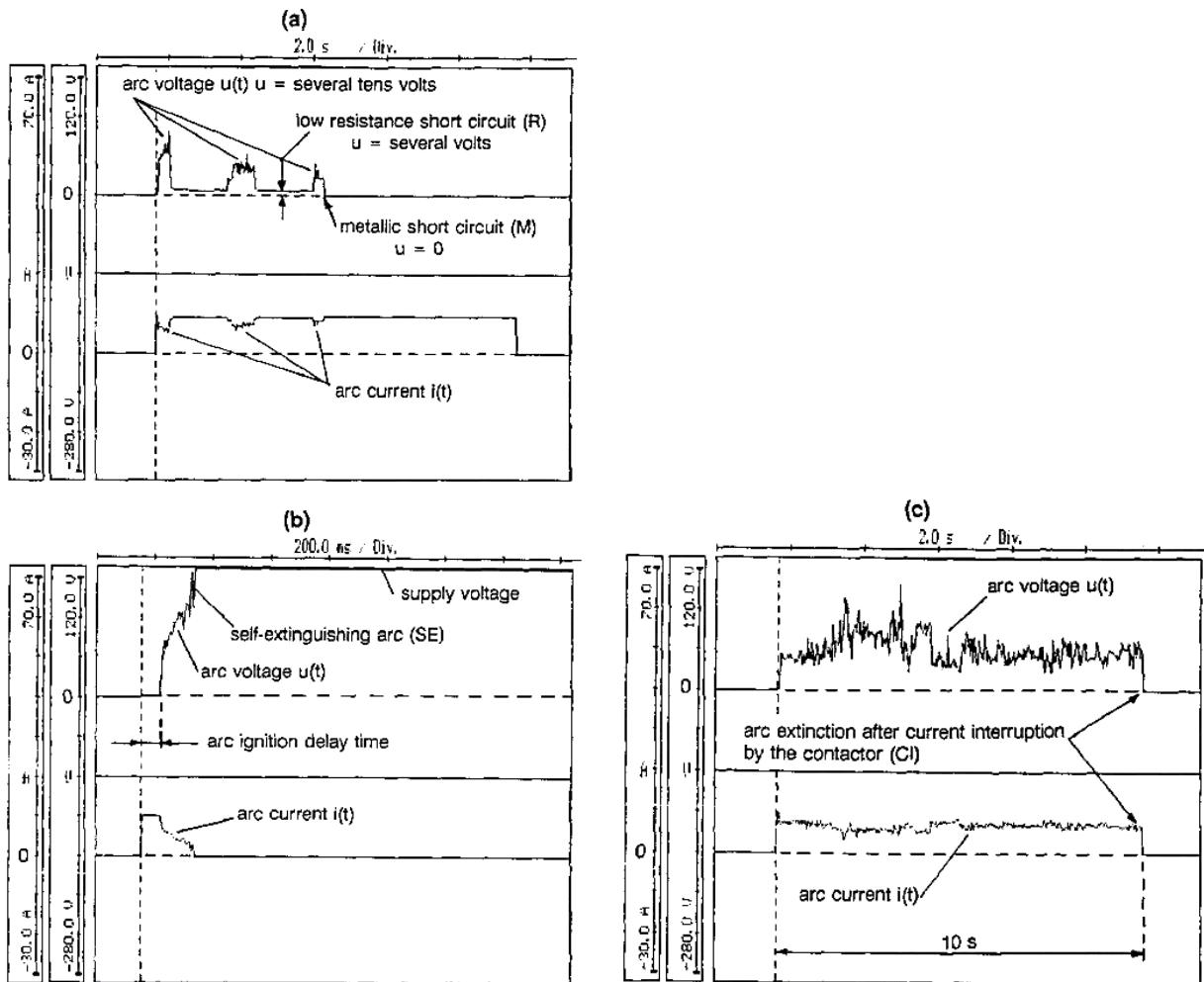


Figure 5.5 : évolutions typiques du courant et de la tension entre les conducteurs durant l'extinction de l'arc observées par König et al.⁹⁷

- (a) : extinction d'arc causée par un court-circuit avec un pont conducteur ou une résistance de court-circuit faible,
- (b) : auto extinction de l'arc,
- (c) : extinction d'arc suite à la coupure du courant par contacteur de commande,

5.2.2.2 Quelques mots concernant les travaux de H. El Bayda³⁵ et de T. André⁹⁸

Ces travaux ont plus porté sur l'évaluation de l'énergie transférée dans le cas d'un arc ayant lieu entre deux câbles adjacents dans un toron, en courant continu. Un dispositif expérimental a permis de réaliser des mesures électriques, des observations en cinématographie et des mesures de l'énergie rayonnée. Les mesures ont été menées en DC et en AC, pour deux valeurs de la pression en régime AC. La dégradation des câbles a été estimée par pesée avant et après les essais. L'ensemble de ces études a permis l'établissement d'un bilan d'énergie. Les auteurs ont ainsi pu estimer les proportions d'énergie transférée aux câbles à base de cuivre et d'aluminium (environ

⁹⁸ T. André et al. « Arc tracking energy balance for copper and aluminum aeronautic cables », J. Phys.: Conf. Ser. 825 012001

40 % de l'énergie totale), d'énergie rayonnée (de 25 à 30%) et de l'énergie dissipée par convection et /ou conduction (25 à 35%). Ils ont par ailleurs déduit que dans le cas des câbles en aluminium, une énergie de combustion due à la formation d'oxydes s'ajoutait à l'énergie électrique provoquant ainsi une destruction plus forte des câbles mais des durées plus faibles (par rapport au cas de câbles en cuivre). Une étude de l'interaction arc/environnement (plaque de composite ou plaque d'aluminium) a aussi été proposée en vue d'estimer l'énergie apportée par l'arc à son environnement proche. À titre d'exemple la figure 5.6 montre l'étendue des dommages causés à une plaque à proximité de l'arc (face arrière et face avant).

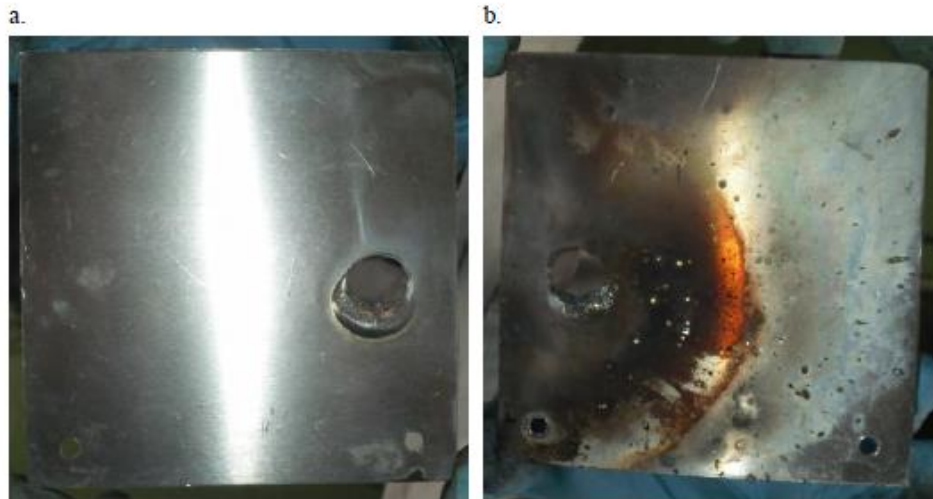


Figure 5.6 : état d'une plaque en aluminium localisée à proximité du faisceau ayant subi un défaut d'arc. Durée de l'arc (environ 1s). (L'arc s'est transféré sur la plaque pendant environ 850 ms). (extraite de la thèse de T. André) .

Dans le paragraphe suivant nous allons présenter un exemple typique de montage expérimental utilisé pour l'étude de l'apparition et de la propagation de l'arc. Ce type de dispositif est typiquement similaire à celui présenté par König *et al.*⁹⁷

5.2.3 Dispositif typique utilisé lors des études d'arc tracking

Le banc de test est composé :

- d'une alimentation DC ou AC,
- d'une charge réglable (la plupart du temps résistive) pour le contrôle de l'intensité du courant de court-circuit. Il est important de noter que peu d'études ont été menées avec une charge de type R, L ,
- de l'échantillon à tester constitué d'un faisceau de câbles,
- d'une instrumentation adaptée (mesure de courant, tension et système de visualisation)
- d'une chambre à vide associée à un système de pompage.

Le schéma de dispositif de test proposé est présenté dans la figure 5.7. Il est extrait de l'article de

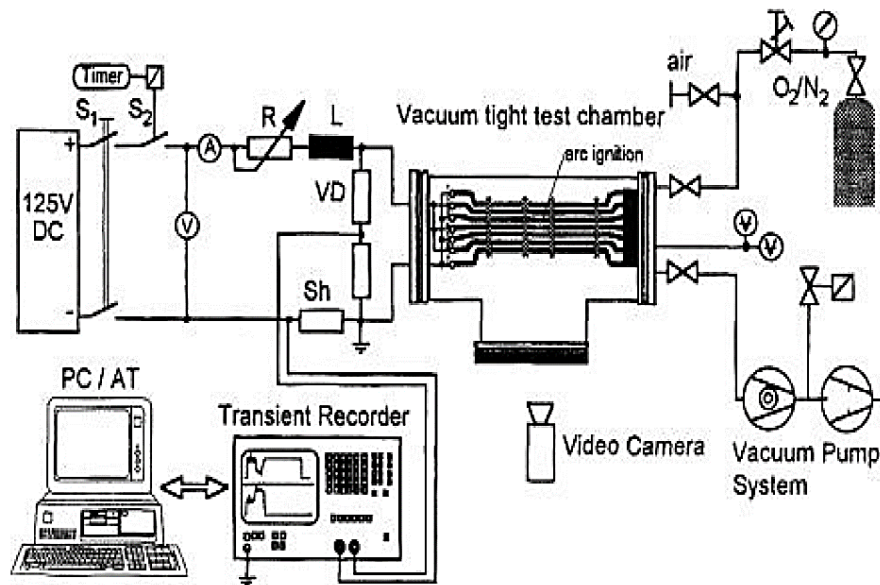


Figure 5.7 : banc d'essai d'arc tracking DC trouvé dans la littérature (extraite de J. Hanson *et al.*)

Deux modes d'amorçage sont utilisés : l'amorçage dit « humide » et l'amorçage dit « sec ».

Mode d'amorçage dans la configuration « Arc tracking » humide :

L'étude de l'« arc tracking » humide est basé sur un amorçage de l'arc à l'aide d'un fluide de contamination généralement de l'eau distillée à laquelle est rajoutée du sel, ce mélange aqueux a une certaine conductivité qui conduit à l'amorçage de l'arc. La configuration de test typique pour un réseau AC est présentée sur la figure 5.8 et correspond aux préconisations de la norme (prEN 3475-605) dont certaines grandes lignes seront évoquées plus loin.

⁹⁹ Josef Hanson and Dieter Koenig « Fault Arcs Effects in Cable Bundles for Space Applications in Vacuum » IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation bbl. 4 NO. 4, August 1997

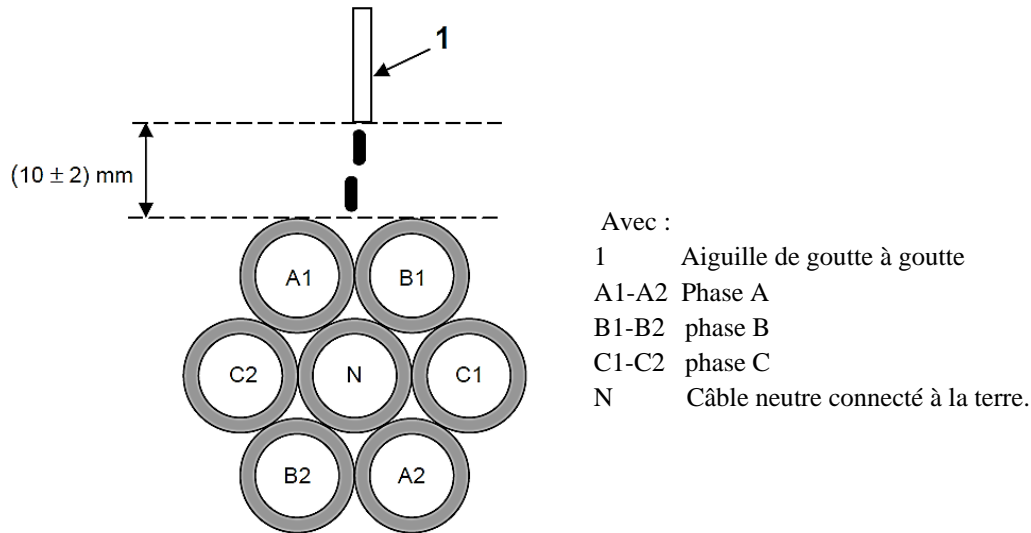


Figure 5.8 : configuration de l'échantillon [prEN 3475-605]

Ainsi, dans cette configuration le milieu faisant le lien conducteur entre les différents câbles aura une résistance relativement élevée liée à la conductivité du liquide de contamination. *Mode d'amorçage dans la configuration « arc tracking sec » :*

L'arc tracking sec est un type de défaut amorcé par un système de lames. Le lien conducteur entre les câbles testés est en métal et donc de résistance bien plus faible que celle présente dans le cas de l'amorçage humide. L'objectif de ce mode d'amorçage est de reproduire une usure progressive de l'isolant des câbles par l'action répétée d'un objet conducteur usant les isolants. Il s'agit lors de ce test, d'une « lame » en aluminium qui vient « couper » progressivement les isolants de deux des câbles constituant le faisceau. Ces deux câbles ont bien sur des polarités différentes. Une représentation schématique de ce principe d'amorçage est donnée sur la figure 5.9 extraite de la thèse de T. André.

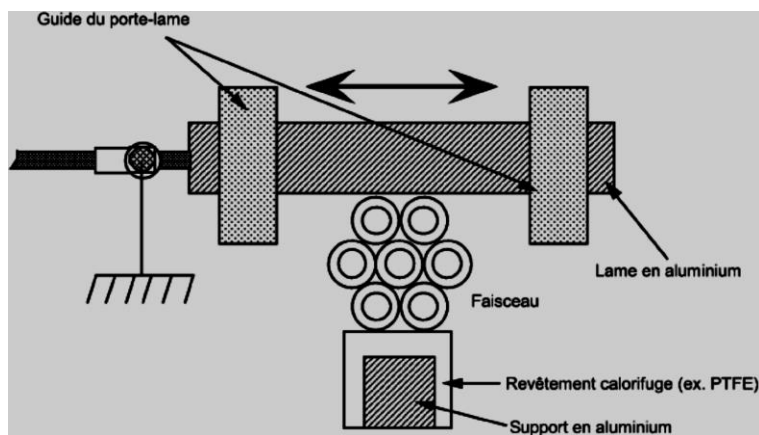


Figure 5.9 : représentation schématique du dispositif d'amorçage dans le cas de l'arc tracking sec (image extraite de la thèse de T. André)

Une seconde méthode d'initiation de l'arc en mode « amorçage à sec » a été proposée par D. König *et al.*. Cette méthode est basée sur l'amorçage de l'arc entre deux câbles d'un faisceau en utilisant un fil fin qui explosera au passage du courant. Ceci est décrit sur la figure 5.10.

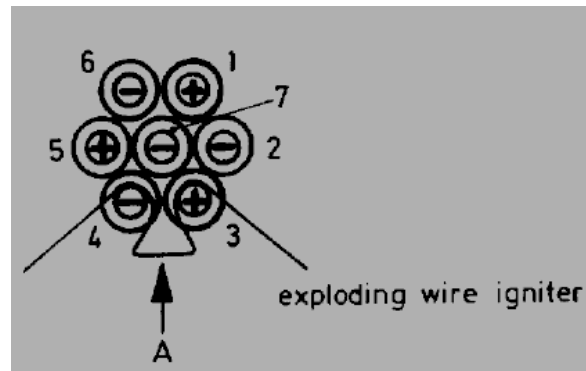


Figure 5.10 : représentation schématique du dispositif d'amorçage dans le cas de l'« arc tracking » sec – Configuration proposée par [D. König *et al.*]

Remarque concernant les tests en régime DC :

Concernant les tests en régime DC, il n'existe aucune norme spécifiant une méthode de test pour l'évaluation de défaut d'« arc tracking » humide et sec. Cependant plusieurs modes d'amorçage et configurations du faisceau ont été proposés notamment dans le cas de l'amorçage sec.

Concernant la configuration des câbles au sein du faisceau on peut citer la configuration proposée par König *et al.* qui est représentée sur la figure 5.10. El Bayda et T. André ont fait des études uniquement avec deux câbles voisins de polarité différentes. En ce qui concerne l'amorçage de l'arc, König *et al.* provoquent l'arc à l'aide de l'explosion d'un film fin conducteur entre deux câbles. El Bayda et André ont quant à eux essayé deux types d'amorçage : soit à l'aide de gouttes d'eau salée ou à l'aide d'un fil explosé, voire en combinant les deux méthodes.

Malgré le manque d'informations concernant une future norme en DC, il paraît intéressant de rappeler les grandes lignes des normes existantes sur le régime AC.

Dans la suite, nous présentons deux normes concernant l'« arc tracking » humide. Nous avons choisi de ne pas nous focaliser sur les normes « arc tracking » qui conduit à des amorçages brutaux de l'arc et de ce fait ne permet pas d'étude approfondie des phénomènes précurseurs à l'amorçage de l'arc.

5.2.4 Les normes de test d'arc tracking humide [prEN 3475-603] [prEN 3475-605]

Les normes de test d'« arc tracking » humide ont pour but de spécifier une méthode d'évaluation du comportement de l'isolation des câbles soumis à un arc électrique initié par un fluide de contamination le long de la surface de l'isolation. L'objectif principal de ce test est de produire, de

manière contrôlée, des effets de défaillance continue qui sont représentatifs de ceux qui peuvent se produire en service lorsqu'un faisceau de câbles typique est endommagé et soumis à une contamination par un fluide aqueux de sorte qu'un arc électrique se produit, entre deux ou plusieurs câbles et d'examiner l'aptitude de l'isolant des câbles à usage aéronautique face à un défaut d' « arc tracking ». Ce test concerne les défauts d'arc de type série sur un réseau AC, spécifié initialement pour les réseaux de 115 VAC mais peut être appliqué sur des réseaux 230 VAC.

Deux normes ont été élaborées par l'Association des industries aérospatiales et de défense d'Europe - Normalisation (ASD-STAN) :

- Série aérospatiale - Câbles électriques à usage aéronautique - Méthodes d'essais - Partie 603 : Résistance à l'amorçage et à la propagation d'arc électrique, essai humide (prEN 3475-603)
- Série aérospatiale - Câbles électriques à usage aéronautique - Méthodes d'essais - Partie 605 : Essai de court-circuit humide (prEN 3475-605)

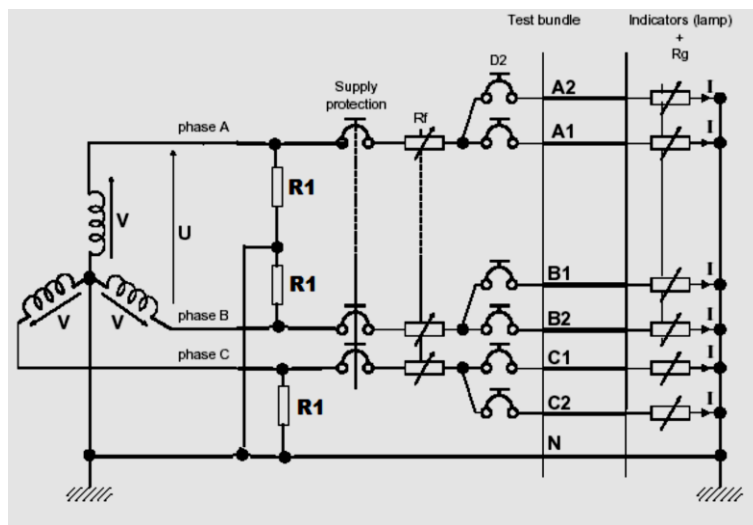


Figure 5.11 : schéma de circuit de test AC [prEN 3475-605].

La configuration d'échantillon présentée (essais humide) est similaire pour les deux méthodes d'essais. Cette configuration est formée de 3 phases répartie sur 6 câbles et un neutre au milieu (cf. figure 5.11). Le système de distribution de fluide de contamination fournit un débit constant de (100 ± 10) mg par minute qui correspond à 10 gouttes par minute.

Six niveaux de courant de défaut ont été spécifiés pour les tailles de câbles concernées (voir tableau 5.1). Il est généralement admis qu'il n'est pas nécessaire d'évaluer des tailles plus importantes car le phénomène de court-circuit devient dominant à de faibles impédances de ligne.

Tableau 5.1 : niveaux de courant de défaut pour câbles en cuivre et aluminium de tailles différentes

Type of cables	Size code	AWG ^a	Prospective fault currents					
			Amperes (A)					
Copper conductors	001/002	26/24	8	15	25	40	60	80
	004/006	22/20	20	30	45	60	80	160
	010 to 051	18 to 10	40	60	80	100	125	250
Copper Clad Aluminium conductors	002/004	24/22	8	15	25	40	60	80
	006/010	20/18	20	30	45	60	80	160
	012/090	16 to 8	40	60	80	100	125	250

L'échantillon doit être positionné sur un plan incliné à un angle de 10° par rapport à l'horizontale avec les connexions d'arrivée de courant électrique à l'extrémité supérieure.

Méthodes de tests de la résistance à l'« arc tracking » humide [prEN 3475-603]

L'objectif de cette méthode de test est de reproduire un défaut entre deux câbles de phases différentes au milieu d'un faisceau composé de sept câbles, ce défaut peut apparaître suite à une dégradation de l'isolant sur deux câbles en présence de liquide de contamination, donc cette configuration de test ne contient que deux conducteurs actifs (cf. figure 5.12).

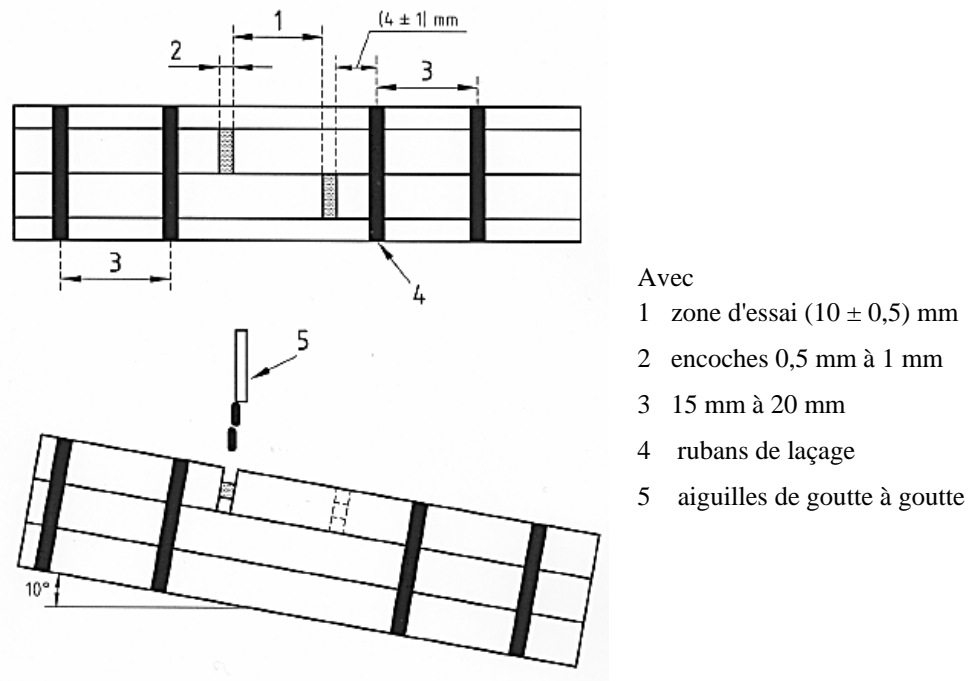


Figure 5.12 : configuration de test, l'alimentation est à gauche du faisceau [prEN 3475-603].

Le fluide de contamination est une solution avec de l'eau distillée ou ionisée, 2% en masse de chlorure d'ammonium et (0,1 ± 0,01)% en masse d'isooctylphénol-polyéthoxy-éthanal. L'isolant des deux câbles adjacents A1 et B1 est endommagé volontairement au milieu de faisceau (figure 5.12), les défauts sur l'isolant sont espacés de 10 mm, avec une largeur de défaut de 0.5 à 1 mm pour chacun, les gouttes de fluide de contamination arrivent sur le premier défaut d'isolant du côté

de l'arrivée de courant.

Méthodes tests de court-circuit humide [prEN 3475-605]

La norme sur les méthodes de tests de court-circuit humide [FprEN 3475-605] est une norme proche de la norme présentée précédemment avec quelques différences. L'objectif principal de ce test est de produire un défaut au bout d'un faisceau (voir figure 5.13). Dans ce cas tous les conducteurs sont actifs et peuvent générer des arcs tous ensemble ou séparément entre deux câbles qui présentent une impédance la plus faible entre eux.

Le fluide de contamination est une solution d'eau distillée et $(3 \pm 0,5)\%$ en poids de chlorure de sodium (NaCl). L'échantillon doit être positionné sur un plan incliné à un angle de 10° par rapport à l'horizontale avec les connexions d'arrivée de courant électrique à l'extrémité supérieure.

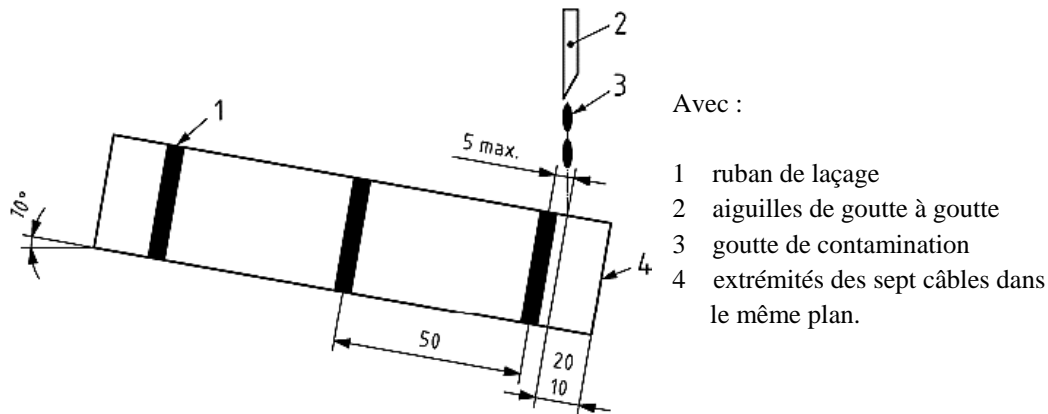


Figure 5.13 : configuration de test [prEN 3475-605].

Le liquide de contamination arrive de 10 à 20 mm avant le défaut, les câbles sont tous actifs donc sont tous susceptibles de faire passer le courant de défaut, soit tous les câbles en même temps ou bien entre deux ou plusieurs câbles.

5.3 Objectifs de notre étude et description de la démarche :

Objectifs de l'étude :

À l'origine de cette étude, l'objectif que nous poursuivions n'était pas de nous intéresser à la caractérisation de différents isolants de câbles mais plutôt de nous intéresser aux différents phénomènes physiques apparaissant en fonction de divers paramètres tels que l'intensité du courant, la tension d'alimentation, etc... dans le cas d'une alimentation en régime DC. L'objectif long terme était d'entreprendre des travaux concernant les modes de détection des défauts. Le domaine abordé étant particulièrement vaste, il était dès lors indispensable de faire différents choix concernant « les orientations » de l'étude à mener. Comme cela a été évoqué dans l'introduction

générale et comme nous allons le voir par la suite, les premiers essais ont mis en évidence dans le cas d'un amorçage par voie humide de l'arc de défaut tout un ensemble de phénomènes précurseurs de l'apparition de cet arc. Ces phénomènes sont capables de causer des dommages importants au faisceau de câbles. Cela nous a paru particulièrement intéressant de commencer l'étude par l'observation de ces phénomènes et de leur chronologie. En outre, n'étant pas focalisé sur la résistance à l'« arc tracking » de tel ou tel isolant, nous avons décidé de nous inspirer (en l'absence de norme sur le DC) de la configuration décrite sur la figure 5.13, configuration qui sera décrite plus en détail dans la suite. La démarche employée a donc été de produire, de manière progressive et « contrôlée » (au sens du protocole), des effets de dégradation continue de l'isolation au sein d'un faisceau de câbles représentatifs de ceux qui peuvent se produire dans un cas réel, à bord d'un avion par exemple, lorsqu'un faisceau de câbles typique est endommagé et soumis à une contamination par un fluide aqueux de telle sorte qu'un phénomène d'« arc tracking » se produit entre les câbles, tout en observant les phénomènes conduisant à l'apparition de l'arc et mesurant les signaux susceptibles de représenter une « signature » de la dégradation et cela dans le but de trouver des pistes de sa détection ou éviter les cas sévères.

Description de la démarche : « norme » sur laquelle nous nous sommes appuyés pour réaliser les tests d'arc tracking humide :

Dans la littérature scientifique et jusqu'à présent, il n'y a aucune norme qui concerne les essais d'arc tracking humide en régime continu pour les niveaux de tension souhaités dans le cadre de cette étude, à savoir entre 28 VDC et 500 VDC. En conséquence nous avons fait le choix d'utiliser une norme européenne qui spécifie une méthode d'évaluation du comportement des isolants de câbles soumis à un arc électrique initié et entretenu par un fluide contaminant [**prEN 3475-605**]. Cette norme, qui concerne l'arc tracking humide, est destinée aux essais en courant alternatif pour le domaine aéronautique. Dans le cadre des travaux de ce chapitre nous avons ajusté la configuration du faisceau de câbles utilisé pour cette norme en régime alternatif (AC) et l'avons « adapté » en proposant deux configurations pour les essais en régime continu (DC) comme cela est décrit sur les figures 5.14 et 5.15.

Par ailleurs sur la figure 5.14(a), nous avons non seulement représenté la répartition des câbles au sein du faisceau en fonction de leurs polarités mais aussi la configuration choisie pour effectuer l'amorçage « humide » de l'arc. Cette configuration reprend une des configurations proposées par la norme. Dans une norme similaire le défaut est créé en milieu de faisceau entre deux câbles avec un défaut d'isolation. Ces deux câbles sont dits « actifs » alors que les autres sont dits « passifs ».

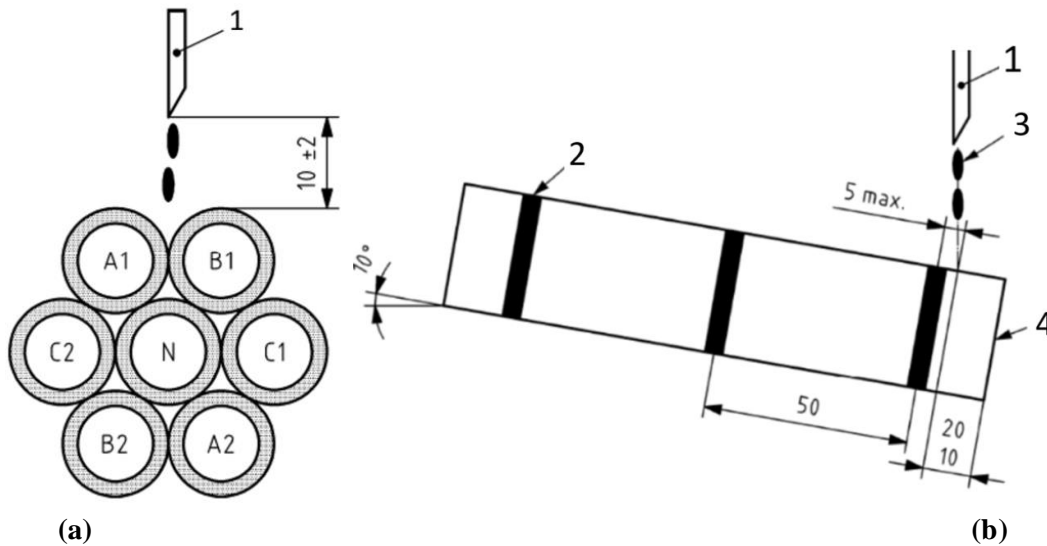


Figure 5.14 : (a) : vue de face du faisceau de cuivre permettant de montrer la répartition des câbles en fonction de leurs polarités (configuration préconisée dans la norme [FprEN 3475-605] en régime AC :

- A1-A2 : Phase A
- B1-B2 : phase B
- C1-C2 : phase C
- N : neutre connecté à la terre

Figure 5.14 : (b) : géométrie de référence pour le positionnement du faisceau de câbles (AC/DC) et des différents éléments :

- 1 : Aiguille qui permet l'arrosage du faisceau
- 2 : Élément de fixation des câbles,
- 3 : gouttes d'eau salée
- 4 : Extrémités des sept câbles dans le même plan

Le plan sur lequel l'échantillon est positionné est incliné de 10° par rapport à horizontal, cela permet au fluide de contamination de couler sur le défaut, tout d'abord pour initier l'arc mais également pour le maintenir durant l'essai, sachant que le défaut a besoin d'être humidifié en permanence, étant donnée la quantité de chaleur dégagée au passage du courant dans le défaut conduisant à l'évaporation continue du fluide de contamination. Dans le cas où le défaut "s'assèche", l'arc tracking peut s'arrêter et se comporter comme un circuit ouvert, par conséquence la norme définit le débit de l'écoulement des gouttes qu'il faut respecter (1goutte/10s) durant l'intégralité de l'essai.

La figure suivante montre deux configurations d'échantillons différentes adaptées pour des essais en régime de courant continu (DC).

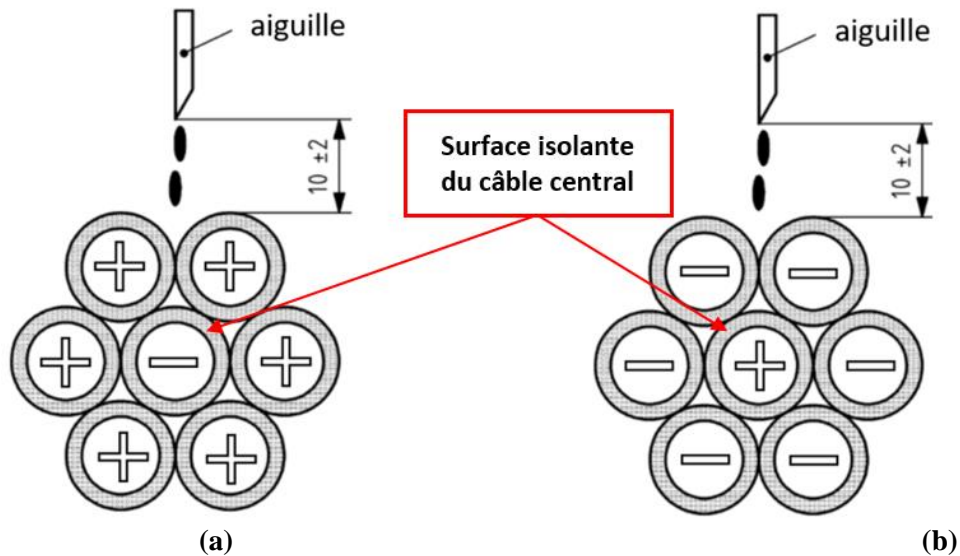


Figure 5.15 : configuration des échantillons adaptés au courant continu, (a) : configuration cathode au centre
(b) : configuration anode au centre.

5.4 Description du banc expérimental mis en œuvre

Le banc expérimental mis en œuvre est présenté sur la figure 5.16. Il s'agit d'un banc d'essai d'arc tracking humide, basé sur l'initiation d'un défaut sur un faisceau de câbles par contamination d'un fluide (dans notre cas de l'eau salée à salinité contrôlée à savoir 30g/L)

Pour fixer l'arrivée des gouttes d'eau dans une position bien précise, le banc comporte 3 axes permettant de contrôler la position de l'aiguille de l'arrivée de l'eau sur le harnais, afin d'initier le défaut d'arc en respectant la norme [FprEN 3475-605].

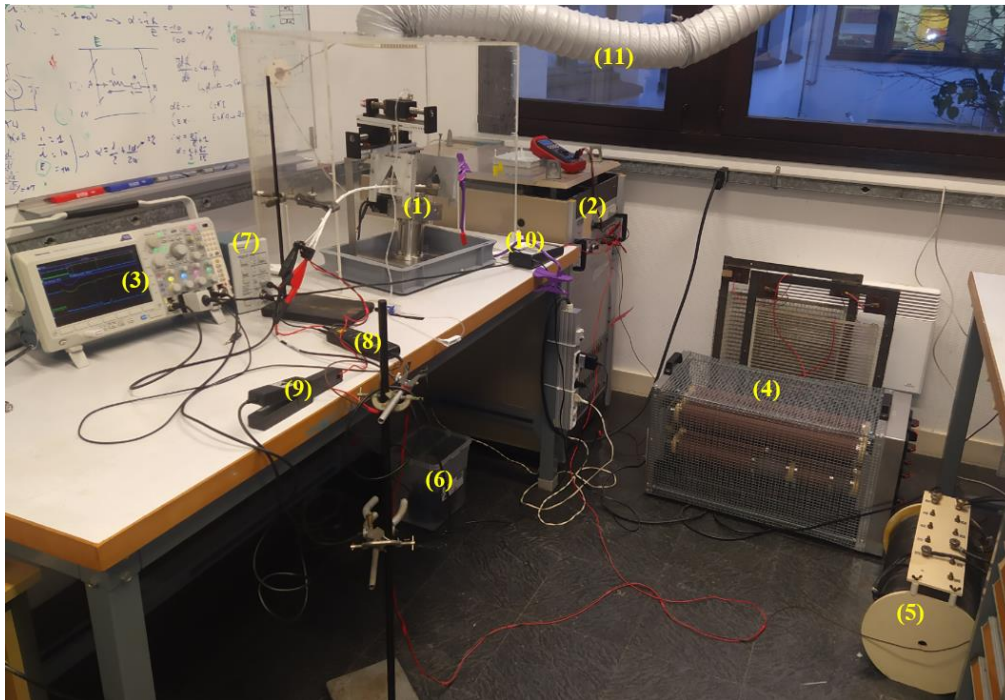


Figure 5.16 : photographie du dispositif expérimental permettant l'étude de l'arc tracking humide à pression atmosphérique.

Le banc expérimental est constitué de :

1. Dispositif mécanique pour l'arc tracking humide dimensionné pour respecter la norme.
2. Alimentation électrique (490VDC-30A).
3. Oscilloscope Tektronix (500MHz, 4 voies).
4. Résistance variable pour le contrôle du courant maximum (courant de court-circuit) qui passe dans le défaut.
5. Inductance variable (rajoutée dans la partie d'études sur l'impact de l'inductance sur l'évolution de l'arc tracking humide).
6. Réserve de liquide de contamination (comporte 3L d'eau salée dans notre étude).
7. Sonde de courant TCPA300, Capacités de mesure AC/DC (bande passante de 100 MHz).
8. Sonde différentielle THDP0200 : tension maximale de 1500 V DC (bande passante de 200 MHz), mise sur le défaut (pour la mesure de la tension de défaut $V_{\text{défaut}}$)
9. Seconde sonde de courant Tektronix A622 mesure un courant maximal de 100A (bande passante de 100 kHz) pour réaliser une seconde mesure.
10. Sonde différentielle de tension (bande passante de 70MHz) pour la mesure de la tension d'alimentation U_{alim} .
11. Système d'évacuation des fumées engendrées par le défaut.

La figure 5.17 détaille la partie « mécanique » du dispositif pour les essais d'arc tracking humide,

qui respecte la norme citée dans la partie précédente, le faisceau de câbles est mis sur un plan isolé avec une inclinaison de 10° , l'échantillon doit être parallèle au plan isolé sur la zone de test.

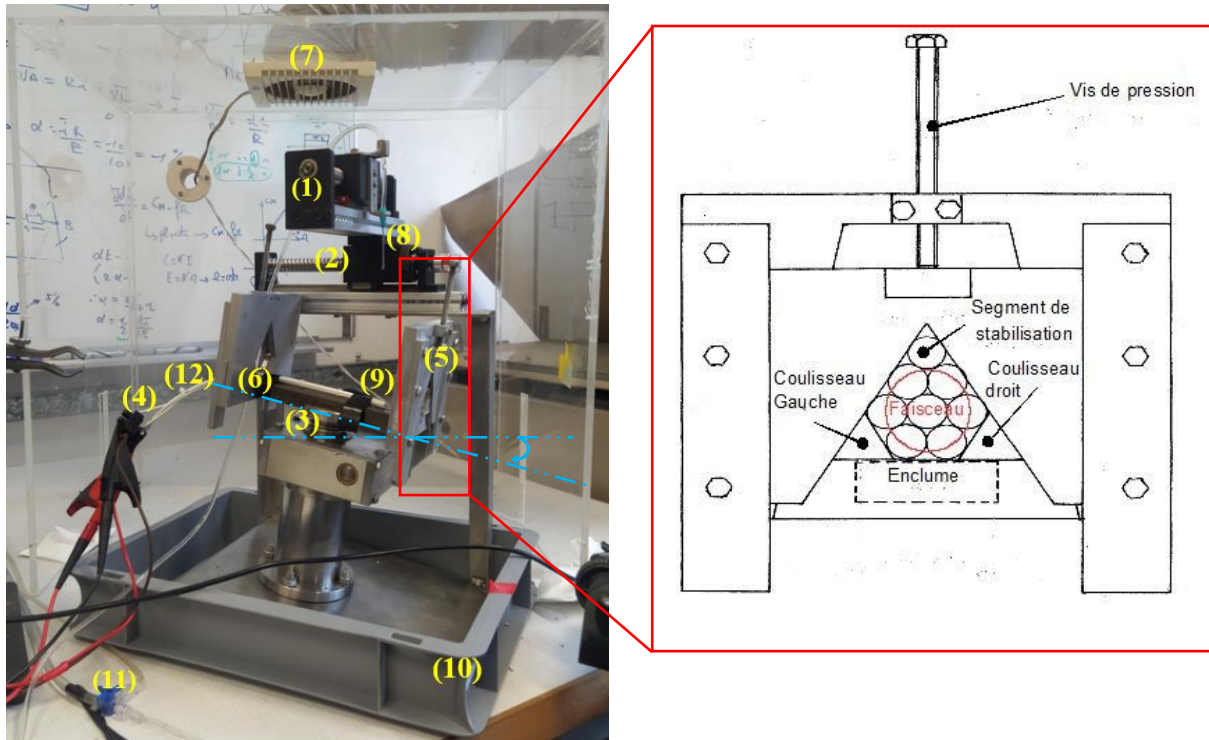


Figure 5.17 : photographie du dispositif expérimental mécanique permettant l'étude de l'« arc tracking » humide.

Le dispositif mécanique est constitué :

1. d'un système de positionnement de l'aiguille sur l'axe X,
2. d'un système de positionnement de l'aiguille sur l'axe Y,
3. d'un système de positionnement de l'aiguille sur l'axe Z (l'axe Z n'est pas perpendiculaire à l'axe Y, ils forment un angle de 80°),
4. d'une arrivée de courant, elle représente le point de raccordement de l'alimentation avec l'échantillon,
5. d'un serre-câbles,
6. d'un plan isolé sur lequel le faisceau de câbles est positionné, il a une pente d'inclinaison α de 10° ,
7. d'un système d'extraction de fumée,
8. d'une aiguille permettant l'arrivée du liquide de contamination positionnée au-dessus du défaut,
9. d'un faisceau de câbles : le liquide de contamination arrive à 10-20 mm du bout de faisceau comme ceci est montré sur la figure 5.14,
10. d'un bac de rétention, pour recueillir le liquide de contamination qui s'écoule du banc d'essai,

11. d'un robinet 3 voies pour contrôler le débit du liquide de contamination,
12. de l'échantillon de tests.

Description du faisceau de câbles utilisé :

Pour préparer l'échantillon on coupe sept longueurs distinctes sur une longueur de câble d'environ 0,5 à 0,6m. On dénude une des extrémités de l'isolant pour permettre la connexion électrique. À chaque essai, la longueur du faisceau diminue régulièrement, en général de 4 à 5 cm en moyenne (dégâts générés par l'arc tracking) et jusqu'à 10 - 15cm dans le cas où il y a un départ de feu intense.

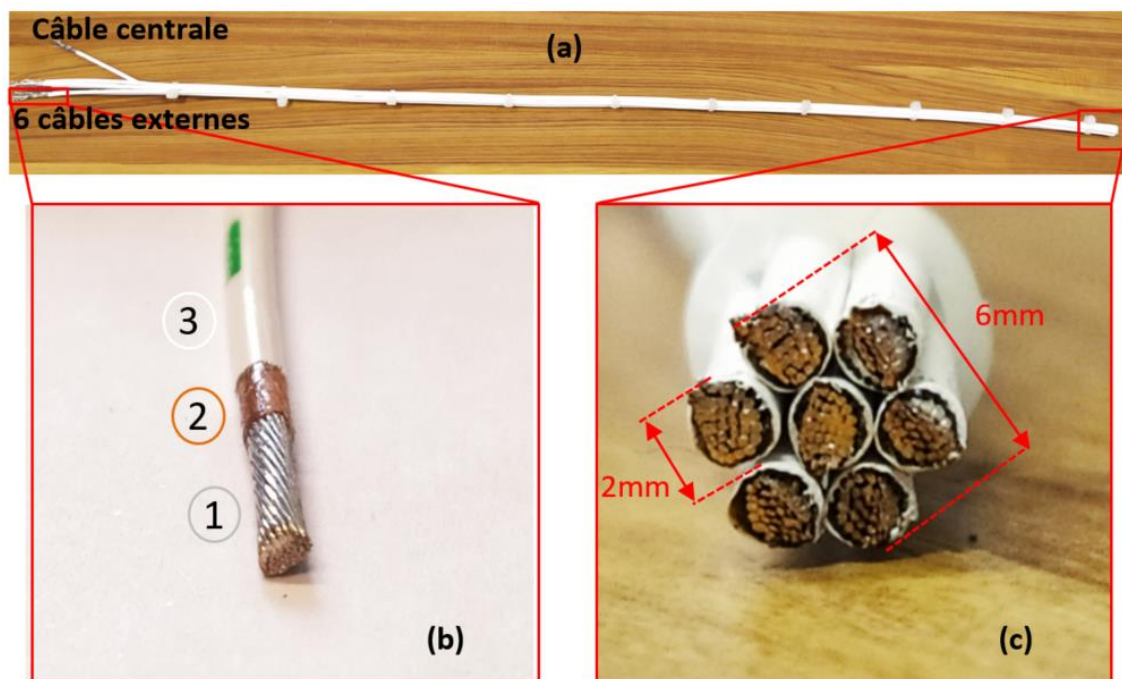


Figure 5.18 : (a) Photographie de faisceaux à sept câbles, (b) photographie d'un câble dénudé (1 : conducteur multibrin en cuivre nickelé, 2 : Isolation Polyimide 3 : Isolation PTFE), (c) photographie de la zone d'essai.

Plusieurs photographies du faisceau de câbles sont données sur la figure 5.18 sur laquelle on peut voir (en haut) l'ensemble du faisceau avec les câbles groupés (vue de haut), un câble seul partiellement dénudé et le faisceau vu de face au niveau du cisaillement. Dans le cas étudié ici, l'isolant des câbles est principalement composé de Polyimide qui peut rester stable dans une plage étendue de température entre -269 °C à 400 °C . Les âmes des câbles sont souples formées de plusieurs brins torsadés, chaque câble est constitué de 37 brins de cuivre étamé.

Les dimensions et caractéristiques des câbles sont les suivantes (mesurées au pied à coulisse pour une précision de $\pm 50\text{ }\mu\text{m}$) :

- diamètre du câble 2 mm,

- diamètre de l'âme du câble : 1,7 mm,
- nombre des brins conducteurs dans chaque câble : 37 brins,
- diamètre des brins : 0,25 mm,
- épaisseur de l'isolant : 0,30 mm (donc quand les câbles sont collés les uns contre les autres la distance inter-électrodes est de l'ordre de 0,6 mm)
- deux couches isolantes superposées (la plus épaisse est celle en polyimide de couleur orange sur la figure)

Les dimensions du faisceau :

- longueur : 50-60 cm initialement,
- diamètre de 6 mm,
- nombre de câbles : 7 câbles regroupés en parallèle, un au centre et 6 l'entourent de l'extérieur.

Description du système de goutte à goutte :

Le système de goutte à goutte est constitué d'une pompe d'aquarium positionnée dans un bac à eau permettant une alimentation de l'aiguille. La fréquence des gouttes qui arrivent au niveau du défaut est contrôlée par le perfuseur, selon la norme elle doit être à une goutte toutes les dix secondes qui correspond à (100 ± 10) mg/min et on la maintient fixe durant l'intégralité des essais, le bac à eau contient le liquide de contamination qui est composé de 3 L de l'eau distillé et 90 g de NaCl. Dans le cas des essais en basse pression l'aiguille à l'intérieur de l'enceinte est alimentée à travers un passage étanche dans la paroi de l'enceinte. Un schéma de fonctionnement du système est donné sur la figure 5.19.

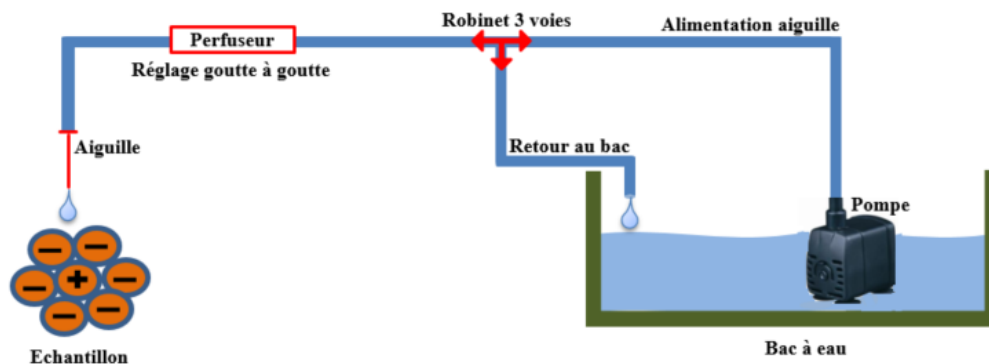


Figure 5.19 : schéma du système de goutte à goutte.

Description détaillée du protocole de mise en marche du système de goutte à goutte :

- Régler le perfuseur pour avoir un passage maximum de l'eau.
- Positionner le robinet 3 voies pour un circuit de la pompe avec retour au bac uniquement (la sortie vers le perfuseur étant obturée).

- Mettre la pompe en marche et faire débiter jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'air dans les tuyaux.
- Sans arrêter la pompe, positionner le robinet 3 voies pour alimenter l'aiguille (le retour au bac étant obturé).
- Laisser débiter jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'air dans la partie qui va à l'aiguille.

Description des circuits électriques étudiés lors des essais d'arc tracking humide :

Les figures 5.20 et 5.21 présentent les deux principaux cas que nous nous sommes proposés d'étudier.

- Le premier cas est décrit sur la figure 5.20. Il s'agit d'un circuit résistif. Le défaut est en série avec l'alimentation et est connecté avec la seconde partie du circuit. La tension de défaut est donc égale à la tension d'alimentation avant l'apparition de courant dans le défaut.
- Le deuxième cas est décrit sur la figure 5.21. Il s'agit là encore d'un circuit résistif constitué de deux résistances en série. Le défaut sera créé en parallèle avec une des deux charges. En conséquence la tension de défaut sera égale à la chute de tension au niveau d'une des deux charges.

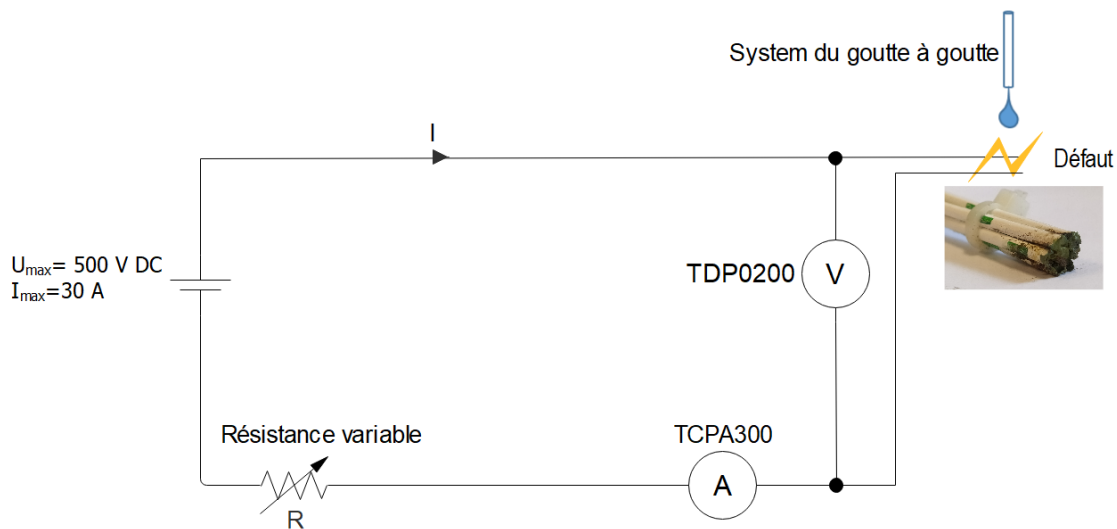


Figure 5.20 : schéma électrique du dispositif expérimental permettant l'étude de l'arc tracking humide avec une charge purement résistive.

Dans le premier cas nous aurons les relations suivantes :

$$U_{alim} = V_R + V_{défaut} \quad \Rightarrow \quad V_{défaut} = U_{alim} - R \times I \quad (5.1)$$

Avec :

I : le courant dans le défaut.

U_{alim} : la tension de la source d'alimentation.

$V_{défaut}$: la tension aux bornes du défaut.

V_R : la tension aux bornes de la résistance variable R .

R : la résistance en série avec le défaut. Cette résistance permet le contrôle de l'intensité maximale du courant dans le défaut

Le schéma électrique suivant montre une position de défaut bien particulière dans le réseau pour laquelle la tension aux bornes du défaut est plus faible que la tension d'alimentation.

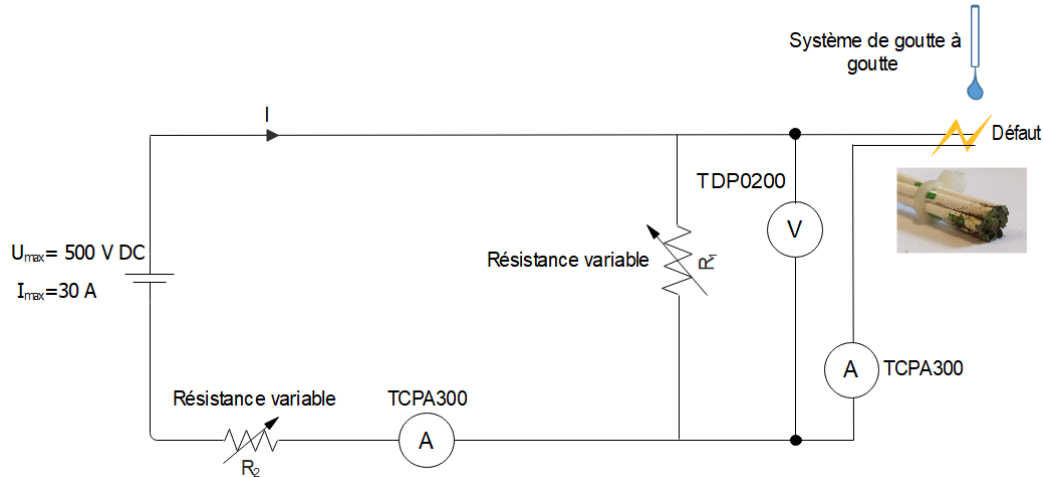


Figure 5.21 : schéma électrique du dispositif expérimental permettant l'étude de l'arc tracking humide avec une charge purement résistive.

Dans le second cas nous pouvons écrire la relation suivante :

$$U_{alim} = V_{R_2} + V_{défaut} \quad (5.2)$$

Avec, en absence de courant dans le défaut :

$$V_{défaut} = U_{alim} \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (5.3)$$

Avec l'ajustement des valeurs des résistances on pourra avoir aux bornes du défaut des tensions différentes de la tension d'alimentation. Ainsi, le fait d'alimenter les réseaux à une tension donnée n'imposera pas la tension au niveau du défaut. On pourra ainsi être alimenté sous 500 VDC et avoir quelques dizaines de volts au niveau du défaut, c'est bien la raison pour laquelle nous avons opté pour des essais en basse tension également.

En faisant l'hypothèse (qui sera discutée plus loin) que le défaut peut avoir un comportement résistif on aura :

$$U_{alim} = V_{R_2} + V_{défaut} = V_{R_2} + \frac{(R_1 // R_{défaut})}{R_2 + (R_1 // R_{défaut})} \times U_{alim} \quad (5.4)$$

$$V_{défaut} = \frac{R_1 R_{défaut}}{R_1 R_2 + R_2 R_{défaut} + R_1 R_{défaut}} \times U_{alim} \quad (5.5)$$

En appliquant le principe du diviseur de tension sur le circuit présenté sur la figure 5.21 on montre que la tension aux bornes du défaut $V_{\text{défaut}}$ ne dépend pas que du niveau de tension de l'alimentation mais dépend aussi des charges et de la résistance du défaut lui-même.

Prenons un exemple pour estimer l'ordre de grandeur du niveau de tension vu par le défaut. Pour une tension d'alimentation de 500 VDC, une résistance $R_1 = 5 \Omega$, $R_2 = 20 \Omega$ et pour un courant de défaut nul (avant l'arrivée de liquide de contamination sur le défaut), l'expression de la tension aux bornes du défaut ($V_{\text{défaut}}$) est donnée par l'équation 5.3.

Dans cet exemple, la tension d'alimentation est de 500V DC alors que celle que l'on retrouve aux bornes du défaut est cinq fois plus faible, soit 100 VDC.

Dans la partie suivante, les principaux aboutissements des travaux expérimentaux seront présentés. Le circuit électrique utilisé pour les essais est celui présenté sur la figure 5.20.

5.5 Résultats

La partie concernant la présentation des résultats peut se décomposer en plusieurs « sous-parties » :

Une première sera dédiée à la description des différentes phases observées durant divers essais menés avec la configuration décrite sur la figure 5.20. Les différentes phases seront décrites dans leur ordre d'apparition le plus fréquemment observé. On illustrera ces phases d'une part à l'aide des signaux électriques enregistrés et d'autre part à l'aide de photographies.

Une deuxième sous-partie concernera l'impact des conditions expérimentales sur le déclenchement et le déroulement de la phase de défaut. Ainsi on présentera l'influence de la tension d'alimentation, de l'intensité maximale du courant de défaut, de la nature de la charge (purement résistive ou aussi inductive), de la configuration des câbles, de la nature du liquide de contamination sur l'apparition et l'évolution du défaut.

5.5.1 Présentation des différentes phases observées lors de l'évolution de l'arc tracking humide

Remarque préliminaire : dans les essais présentés dans cette partie, le liquide de contamination est de l'eau salée à 3% de NaCl comme cela est préconisé par la norme.

Au cours des essais d'arc tracking, nous avons pu observer plusieurs phases suffisamment distinctes pour pouvoir les répertorier et en faire une description détaillée. C'est l'objet des sous parties suivantes.

5.5.1.1 Phase dite de « Grésillement »

Les études de caractérisation que nous avons effectuées ont mis en évidence une phase précurseur de la phase de l'arc. Nous l'avons dénommée phase de « grésillement ». Elle se caractérise par diverses propriétés :

- un bruit de type « grésillement » (d'où sa dénomination) dans une gamme de fréquence audible (20Hz-20kHz),
- des points lumineux qui apparaissent et disparaissent à la surface de l'isolant du câble central (soit anode ou cathode). Ceci est illustré sur les figures 5.22 et 5.23. Au cours du temps, le nombre de points lumineux augmente. Cet ensemble de points lumineux prend la forme d'un anneau lumineux sur la surface de l'isolant du câble central comme le montre la figure 5.24.



Figure 5.22 : mise en évidence des points lumineux lors de la phase dite de « grésillement ».
Conditions expérimentales : $U_{alim} = 100\text{VDC}$, $I_{max} = 10\text{A}$ – configuration cathode au centre.



Figure 5.23 : mise en évidence des points lumineux lors de la phase dite de « grésillement ». Conditions expérimentales : $U_{atim} = 270\text{VDC}$, $I_{max} = 10\text{A}$ - Configuration anode au centre.

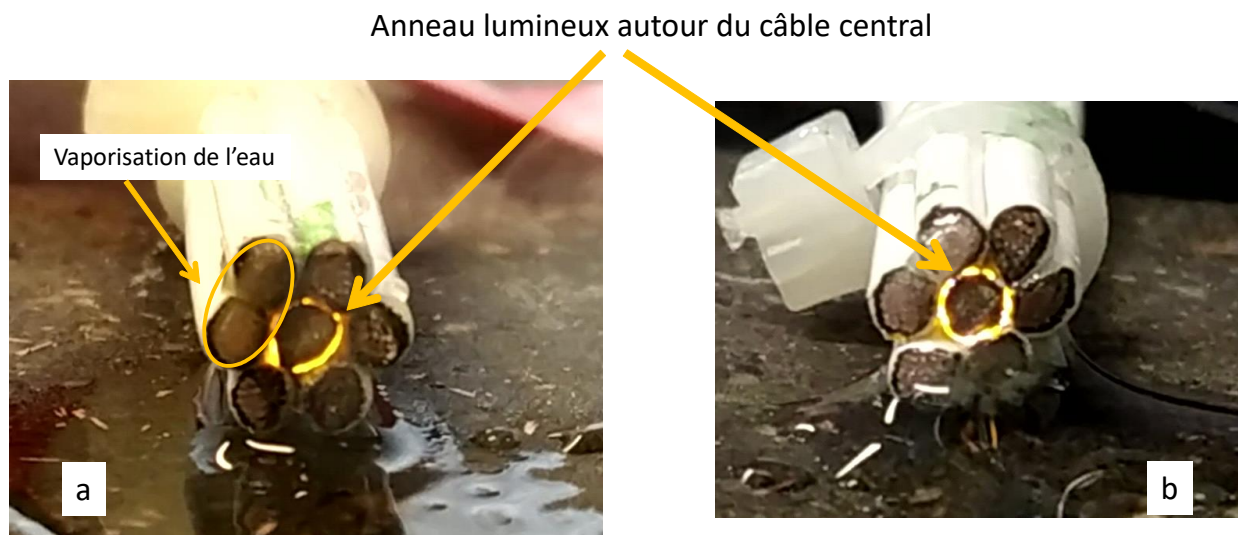


Figure 5.24 : observation d'un anneau lumineux qui apparaît au cours du temps :
a : $U_{atim} = 270\text{ VDC}$, $I_{max} = 10\text{ A}$ – Configuration avec anode au centre,
b : $U_{atim} = 270\text{ VDC}$, $I_{max} = 2\text{ A}$ – Configuration avec anode au centre.

Les perturbations des signaux de tension aux bornes du défaut et de courant durant le grésillement peuvent être très limitées comme sur la figure 5.25 et plus importantes dans le cas de la figure 5.26 (par la suite nous allons adapter nos mesures pour bien visualiser le courant durant ce phénomène). À noter que dans le cas de la figure 5.25 la phase de grésillement n'avait commencé qu'environ 20s avant la mesure présentée sur la figure alors que dans le cas de la figure 5.26 cette phase avait débuté environ 10 minutes avant la mesure. D'une façon générale, on observe que plus le temps de grésillement est important plus l'intensité des perturbations des signaux est importantes. Ces deux figures permettent ainsi d'illustrer également l'évolution du phénomène au cours du

temps.

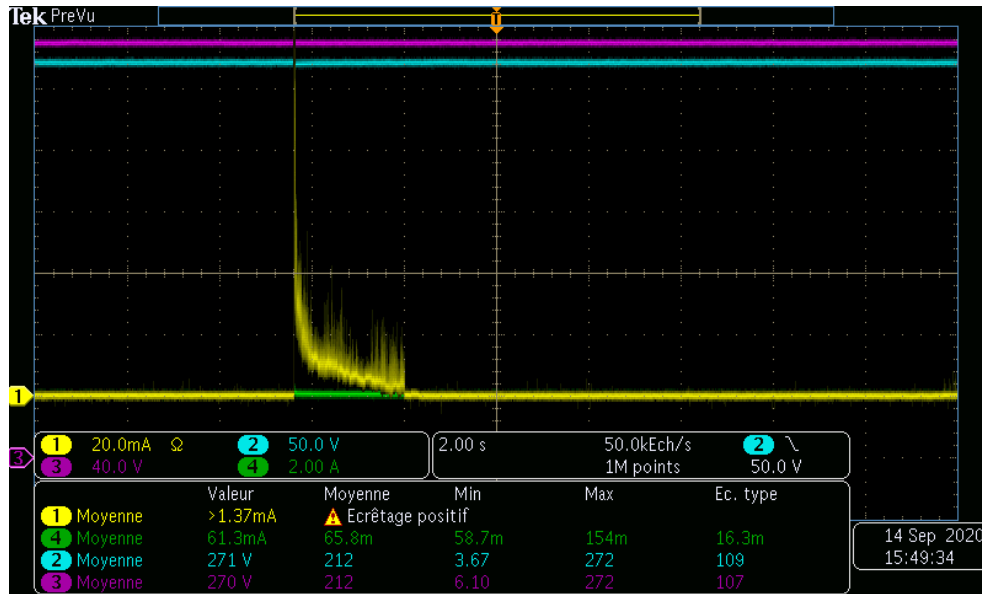


Figure 5.25 : signaux de tension et de courant durant la phase de grésillement. Configuration anode au centre. Le phénomène de grésillement a commencé depuis 20s environ. Conditions expérimentales : $U_{alim} = 270$ VDC, $I_{max} = 10$ A.

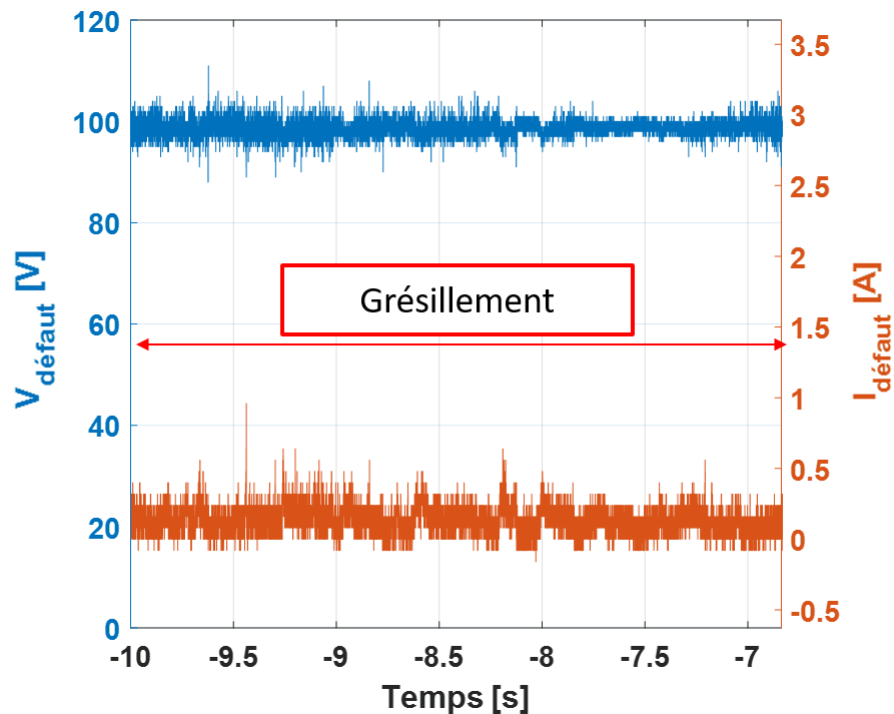


Figure 5.26 : signaux de tension et de courant durant la phase de grésillement. Conditions expérimentales : $U_{alim} = 100$ VDC, $I_{max} = 10$ A, configuration anode au centre. Le phénomène de grésillement a commencé depuis 10 minutes environ.

La durée de la phase de grésillement est fortement dépendante des conditions de tension

d'alimentation. D'une façon générale plus la tension est élevée plus la phase de grésillement est courte. Ainsi, il est important de noter que cette phase de grésillement est apparue principalement dans l'intervalle de valeur de tension d'alimentation comprise entre 28 et 270 VDC. Pour des tensions plus élevées (et l'eau salée comme liquide de contamination), il semble moins probable d'observer cette phase (pour une tension de 500VDC le défaut passera directement en phase d'arc sans passer par la phase de grésillement).

La température atteinte au niveau de ces zones est suffisamment élevée pour causer différents phénomènes. Certains auteurs¹⁰⁰ ont évoqué dans le cas de défaut en AC et donc sans qu'on sache s'il s'agit exactement du même phénomène, des températures pouvant atteindre 1000°C. Ces résultats sont obtenus dans les conditions d'essais suivantes : un générateur triphasé (220/110 V, 400 Hz, $P_{nominale} = 18,75$ kVA), un échantillon de 7 câbles connectés à l'alimentation, deux câbles dont une partie du conducteur a été mise à nue sur 1,2 mm de long. Les deux câbles endommagés sont adjacents l'un à l'autre mais les coupures sont séparées longitudinalement d'environ 10 mm, le matériau d'isolant est en polyimide, cependant les auteurs ne donnent pas de détails sur l'endroit où apparaissent les points lumineux ni leurs formes précises.

Dans notre cas, on observe que la température atteinte est suffisante pour causer une dégradation des matériaux isolants utilisés (polyimide) en formant des zones carbonisées.

Nous allons maintenant décrire plus en détail les différentes « étapes » de la phase de grésillement.

Première étape : début du passage du courant en lien avec la goutte d'eau salée sans phénomène lumineux

Cette première étape est une phase qui précède celle du grésillement. Elle est caractérisée par un passage de courant dans la gamme [50 mA-1A] sans phénomène lumineux.

Les variations de courant semblent coïncider avec l'arrivée du liquide de contamination sur le défaut qui crée des chemins conducteurs entraînant la vaporisation de l'eau et formant une sorte de « mousse » au niveau du défaut. La figure 5.27 est une photographie illustrant cette « mousse ». Les niveaux de tension et de courant sont présentés sur la figure 5.29.

Si on se concentre sur cette première étape, on observe que le niveau de tension reste stable autour d'une valeur constante (50 V dans les conditions de la figure 5.27). D'un point de vue acoustique, on peut entendre un son d'une intensité faible lié probablement à l'évaporation des gouttes d'eau. Cette première étape (apparition de la mousse) peut apparaître plusieurs minutes après avoir lancé l'expérience pour les tensions de faible niveau : 28 à 50 VDC. Elle apparaît beaucoup plus tôt (quelques secondes ou moins) dans le cas des tensions d'alimentation de l'ordre de 100 VDC ou plus. De même, la durée de cette étape sera d'autant plus longue (jusqu'à plusieurs minutes) que la tension d'alimentation sera faible.

¹⁰⁰ P. L. Cahill, J. H. Dailey « Aircraft electrical wet wire arc tracking Technical report, DOT/FAA/CT-88/4, 1988

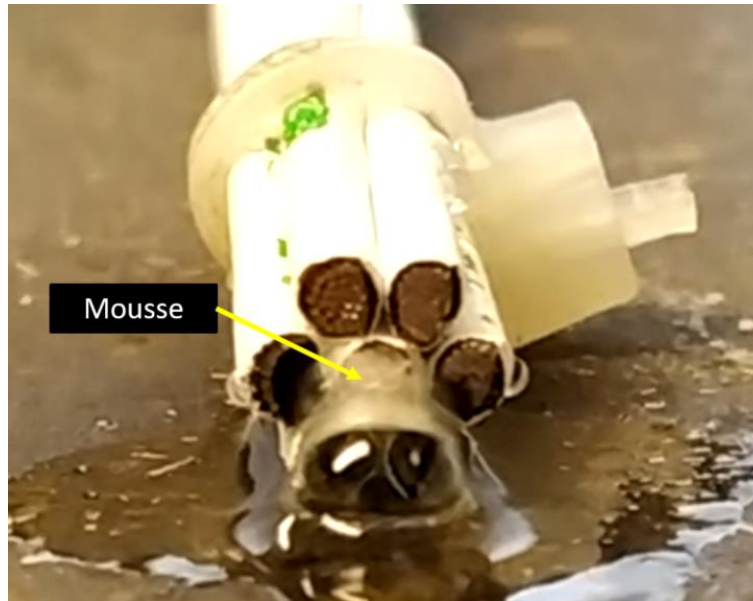


Figure 5.27 : photographie de la première étape : apparition de la « mousse ». Conditions expérimentales : $U_{alim} = 50 \text{ VDC}$, $I_{max} = 20 \text{ A}$, configuration cathode au centre.

Dans la figure 5.28, nous présentons un exemple d'enregistrement à vide pour avoir une idée du niveau de bruit introduit par les appareils de mesure dans la gamme observée. En effet, en observant les signaux présentés sur la figure 5.29, on peut s'interroger sur la nature des perturbations (amplitudes des signaux) et sur leurs origines : est-ce du bruit lié aux appareils de mesure ou bien la manifestation d'un phénomène physique ? Lorsque l'on observe les courbes verte et jaune (mesures de courant sur différents calibres) et bleue et violette (mesures de tension aux bornes de l'alimentation et du défaut) de la figure 5.28 et qu'on les compare aux signaux présentés sur la figure 5.29, on voit clairement que le bruit des appareils de mesure est suffisamment faible pour que l'on puisse attribuer les perturbations à un phénomène physique, le début du grésillement qui se caractérise par un passage de courant sans phénomène lumineux.

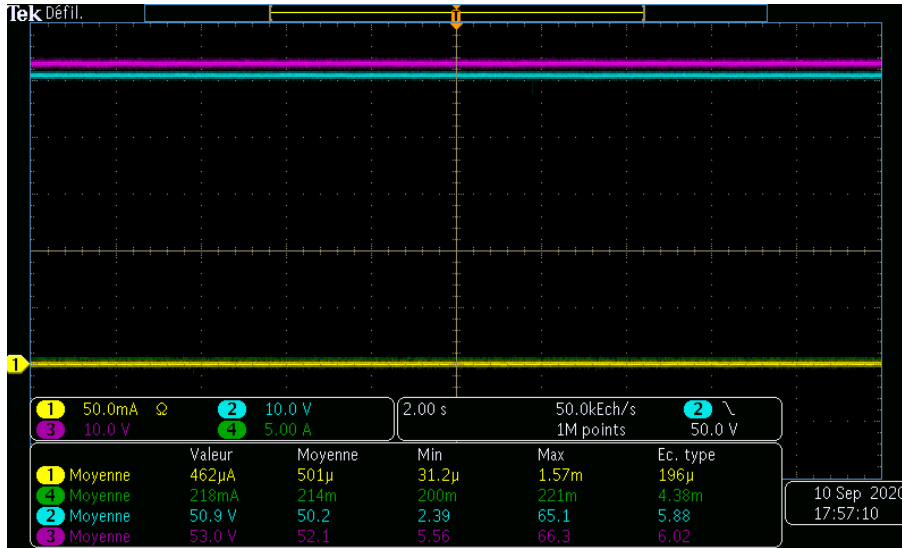


Figure 5.28: exemple d'enregistrement des signaux de courant et de tension avant l'initiation de défaut, les courbes jaune et verte présentent le courant dans le défaut avec deux calibres différents, courbe violette : tension aux bornes de l'alimentation, courbe bleue : tension aux bornes du défaut. Conditions expérimentales : $U_{alim} = 50$ VDC, $I_{max} = 20$ A.

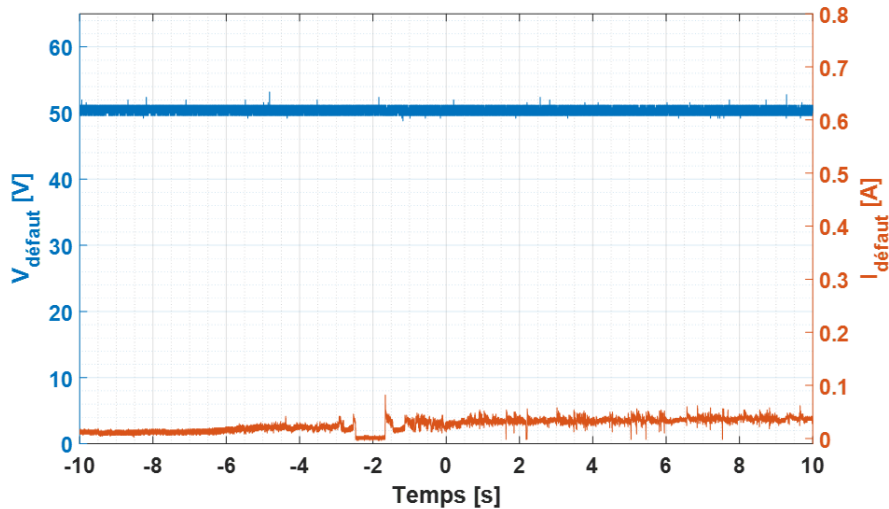


Figure 5.29 : évolution des courants et tension de défaut en fonction de temps durant la première étape du grésillement

Conditions expérimentales : $U_{alim} = 50$ VDC, $I_{CC} = 20$ A, configuration cathode au centre.

Cette première étape peut être caractérisée par une résistance, si l'on fait l'hypothèse qu'il s'agit d'un passage de courant par conduction, que l'on peut estimer de façon simple :

$$R_{\text{défaut}} = \frac{V_{\text{défaut}}}{I_{\text{défaut}}} \quad (5.6)$$

Dans le cas de l'étape 1 de la figure 5.29, les valeurs moyennes de la tension, de la résistance de défaut et de la puissance dissipée dans le défaut sont représentées en fonction du courant dans le défaut sur la figure 5.30.

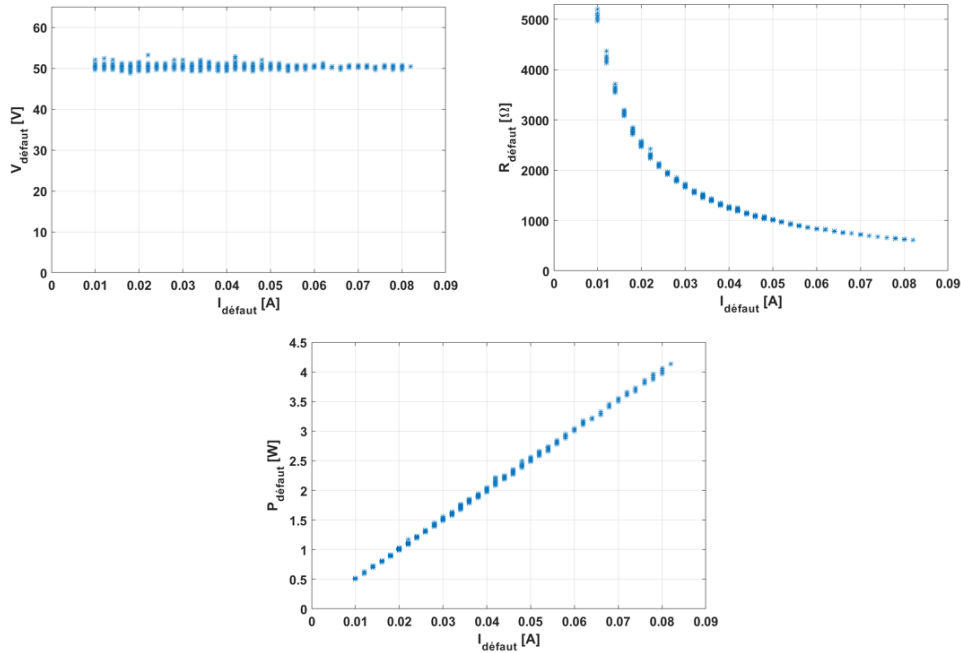


Figure 5.30 : évolution de la tension de défaut, résistance du défaut et puissance dissipée en fonction de courant de défaut durant la première étape du grésillement.
Conditions expérimentales : $U_{\text{lim}} = 50 \text{ VDC}$, $I_{\text{CC}} = 20 \text{ A}$, configuration cathode au centre.

Dans cette étape de grésillement la résistance de défaut présente une fonction décroissante en fonction du courant de défaut, pour un courant entre 10 mA et 80 mA la résistance de défaut varie entre 5200 et 614 Ω . Il est probable que les gouttes d'eau s'évaporant régulièrement grâce à l'échauffement engendré par le passage du courant, de plus en plus de NaCl s'accumule et fait augmenter la conductivité du milieu et donc diminuer la résistance de défaut. On peut aussi observer que la tension de défaut ne présente aucune variation durant cette étape. Cela est certainement dû à la très faible intensité de courant qui passe dans le défaut, de l'ordre de 100 mA. La puissance moyenne dissipée dans le défaut est quant à elle une fonction proportionnelle du courant. Elle varie entre 0,5 et 4 W ($P_{\text{défaut}} = V_{\text{défaut}} \times I_{\text{défaut}}$).

Juste après l'étape d'évaporation de l'eau et d'apparition de la mousse on voit apparaître des points lumineux.

Deuxième étape: apparition de points lumineux / augmentation du nombre de points lumineux

Durant cette deuxième étape, des points lumineux apparaissent accompagnés de perturbations plus importantes que celles mesurées lors de la première étape sur le signal de tension. La figure 5.31 présente deux photographies du faisceau de câbles et met en évidence la présence de points lumineux tout autour du câble central.

Les point lumineux apparaissent et disparaissent sur plusieurs endroits au niveau de la surface de l'isolant du câble central et cela que se soit pour une configuration anode au centre ou cathode au centre. Le nombre de points augmente en fonction du temps. On peut voir sur les deux figures une

disparité dans la taille et dans l'intensité lumineuse des différents points observés.

Les perturbations sur les signaux de tension, bien que plus élevées que précédemment, restent faibles et la tension au niveau du défaut est très proche de la tension d'alimentation quelle que soit la valeur de celle-ci (de 50 à 500 VDC) ce qui exclut le fait que ces phénomènes lumineux observés soient des décharges électriques. Conjointement, la valeur du courant chute quand un point lumineux apparaît. La durée de vie de chaque point lumineux peut être très grande (jusqu'à plusieurs secondes entre chaque apparition).

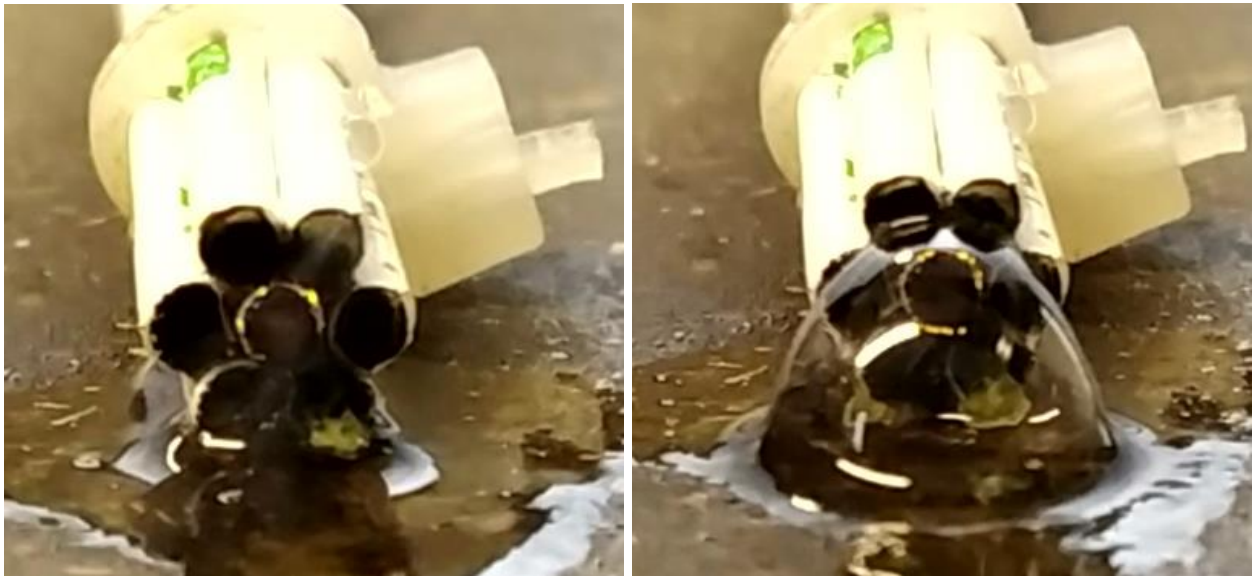


Figure 5.31 : photographie illustrant les phénomènes correspondant aux signaux électriques de la figure 5.32 : points lumineux + arrivée de la goutte. Conditions expérimentales : $U_{alim} = 50$ VDC, $I_{max} = 20$ A. Configuration cathode au centre.

Les perturbations de faibles amplitudes sur la tension accompagnée d'une chute significative du courant permettent de caractériser l'apparition des premiers points lumineux comme on peut le voir sur la figure 5.32.

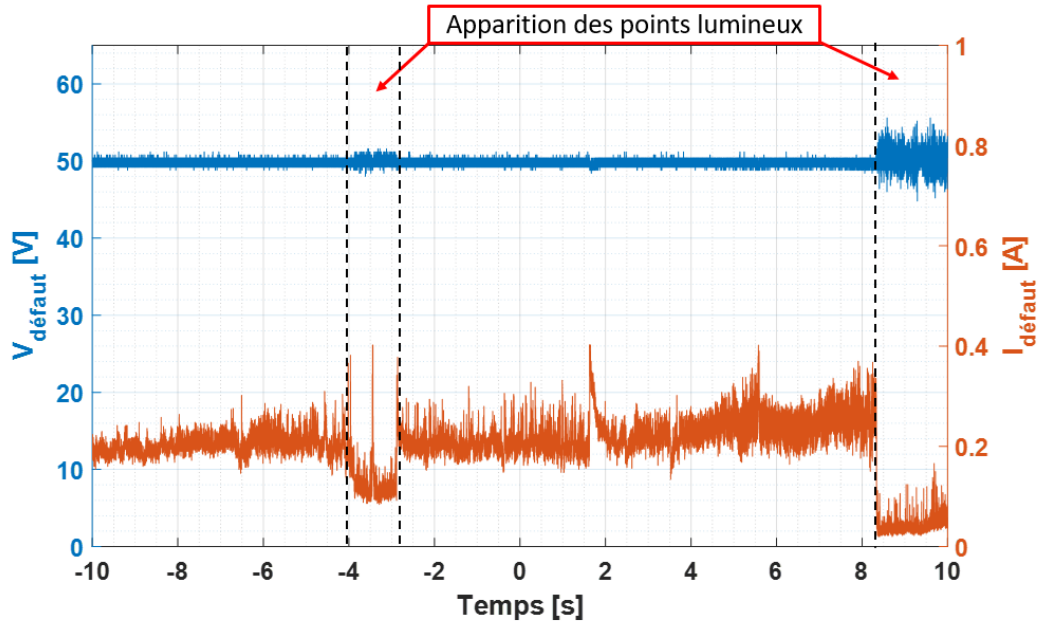


Figure 5.32 : étape transitoire, apparitions puis disparitions successives des points lumineux.

La figure suivante 5.33 présente un enregistrement des signaux de défaut uniquement en présence continue de points lumineux.

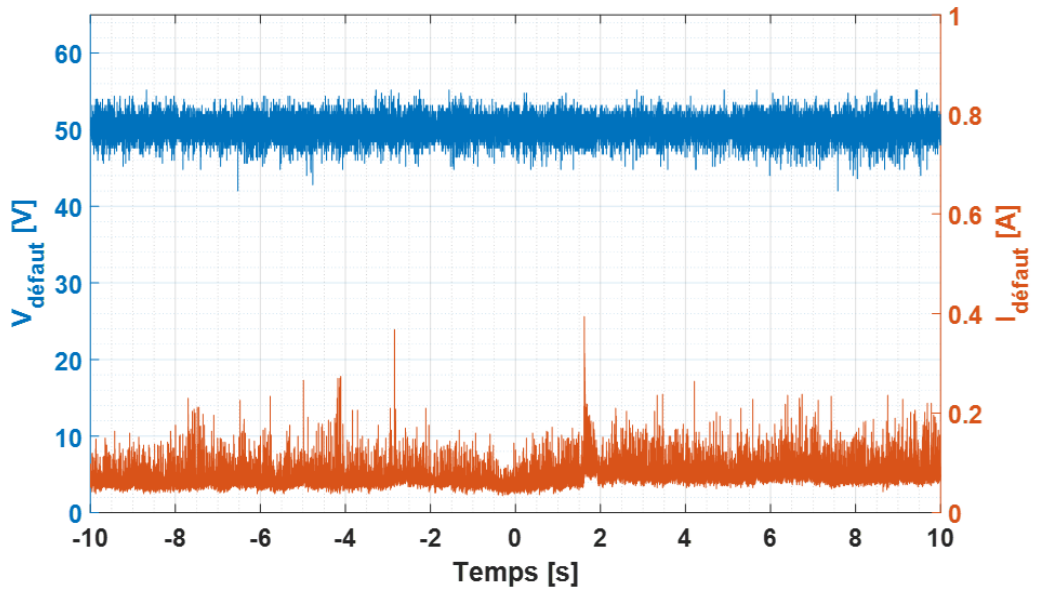


Figure 5.33 : évolution des courant et tension de défaut en fonction du temps, $U_{alim} = 50$ VDC, $I_{max} = 20$ A, configuration cathode au centre.

La figure 5.36 présente une synthèse des phénomènes qui se produisent lors de la chute de la goutte d'eau sur le faisceau de câbles : peu après la chute de la goutte d'eau salée, le signal de tension est beaucoup moins perturbé et ensuite quand la goutte est vaporisée, les perturbations reprennent et on est en présence de points lumineux. De même la chute de la goutte d'eau provoque une augmentation de l'intensité du courant de défaut qui perdure jusqu'à l'évaporation.

Avec le temps, les points lumineux causent des dégradations et de la carbonisation au niveau de la surface de l'isolant du câble central. Cela engendre une augmentation du nombre de points lumineux. Ceci s'accompagne d'une augmentation de la valeur du courant.

À partir de figure 5.36 on peut constater que lors de la présence de points lumineux, le courant diminue dans le défaut suite à l'évaporation de l'eau. L'arrivée d'une nouvelle goutte va humidifier le défaut, et en conséquence on repasse à la 1^{ère} étape dont on rappelle qu'elle correspond à la disparition des points lumineux et à la formation de la « mousse ». Une fois l'eau évaporée, on repasse à la 2^{ème} étape ...etc.

Si au cours de ces phases, on arrête l'écoulement, alors *in fine* il n'y a plus de courant qui circule dans le défaut (circuit ouvert).

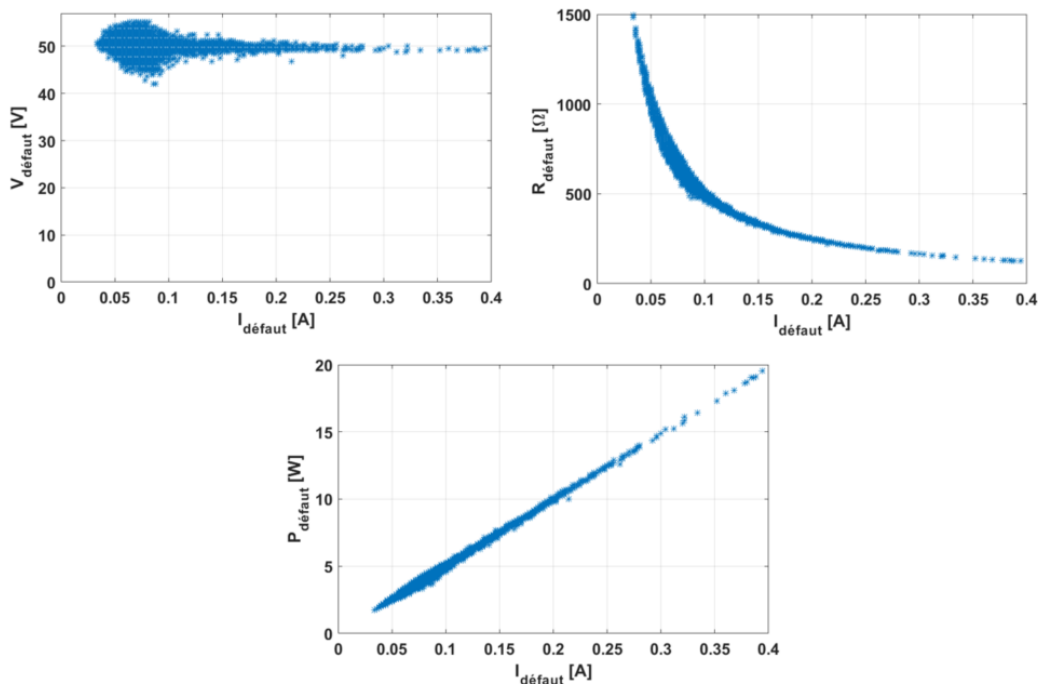


Figure 5.34 : valeurs moyennes de la tension de défaut, de la résistance de défaut et de la puissance dissipée en fonction du courant de défaut durant la deuxième étape du grésillement. Conditions expérimentales : $U_{\text{alim}} = 50 \text{ VDC}$, $I_{\text{max}} = 20 \text{ A}$, configuration cathode au centre.

Sur la figure 5.34, nous avons représenté les valeurs de la tension de défaut, de la résistance de défaut et de la puissance dissipée en fonction du courant de défaut en présence de points lumineux (deuxième étape du grésillement). La résistance de défaut présente une fonction décroissante en fonction de courant de défaut, pour un courant entre 34 mA et 400 mA, la résistance varie de 1500 Ω à 125 Ω . Des perturbations sur la tension de défaut sont apparues mais pour une tension moyenne de 50 VDC. La puissance moyenne dissipée dans le défaut est une fonction proportionnelle du courant elle varie entre 1,7 et 19 W.

La fin de la deuxième étape consiste en l'apparition d'une multitude de points lumineux sur la surface de l'isolant du câble central qui peut conduire à la formation d'un anneau lumineux situé au niveau de l'isolant du câble en outre cela concerne les deux configurations anode au centre ou

cathode au centre. La formation de cet anneau s'accompagne d'une nette augmentation de la valeur maximum des pics de courant qui peuvent atteindre jusqu'à quelques ampères comme cela est illustré par le tableau 5.2. De plus, les perturbations augmentent avec le nombre de points lumineux. Ce phénomène s'observe systématiquement pour des tensions d'alimentation dans la gamme [50 - 270] VDC. Il est illustré sur la figure 5.35 composée de deux photographies correspondant à une configuration cathode au centre à gauche et configuration anode au centre à droite pour une tension d'alimentation de 50 VDC et $I_{max} = 20$ A.



Figure 5.35 : photographie de la fin de la deuxième étape où les points lumineux sont nombreux et forment des arcs de cercles autour de l'électrode centrale. Configuration cathode au centre à gauche et configuration anode au centre à droite. Conditions expérimentales : $U_{alim} = 50$ VDC, $I_{max} = 20$ A

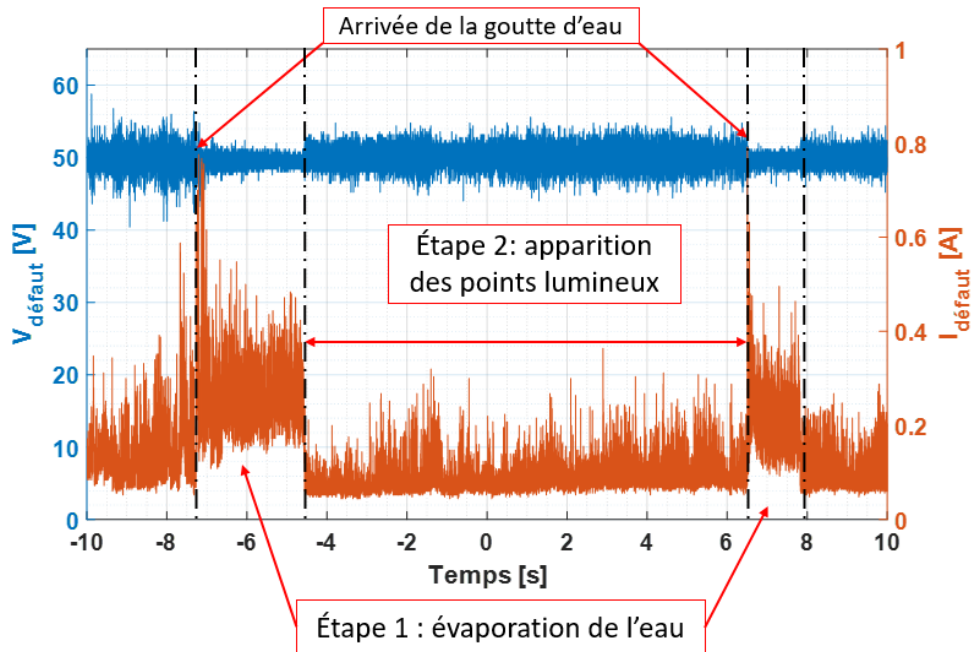


Figure 5.36 : évolution des courant et tension de défaut en fonction du temps $U_{alim} = 50$ VDC, $I_{max} = 20$ A, configuration cathode au centre.

À la fin de cette étape, la présence de points lumineux est continue. Des points apparaissent et d'autres disparaissent mais globalement le nombre de points lumineux augmentent. D'une façon générale les perturbations sur le signal de tension sont bien plus importantes que lors de l'étape précédente. Ceci est illustré sur la figure 5.36 sur laquelle nous avons représenté l'évolution des signaux de tension et de courant lors de cette étape.

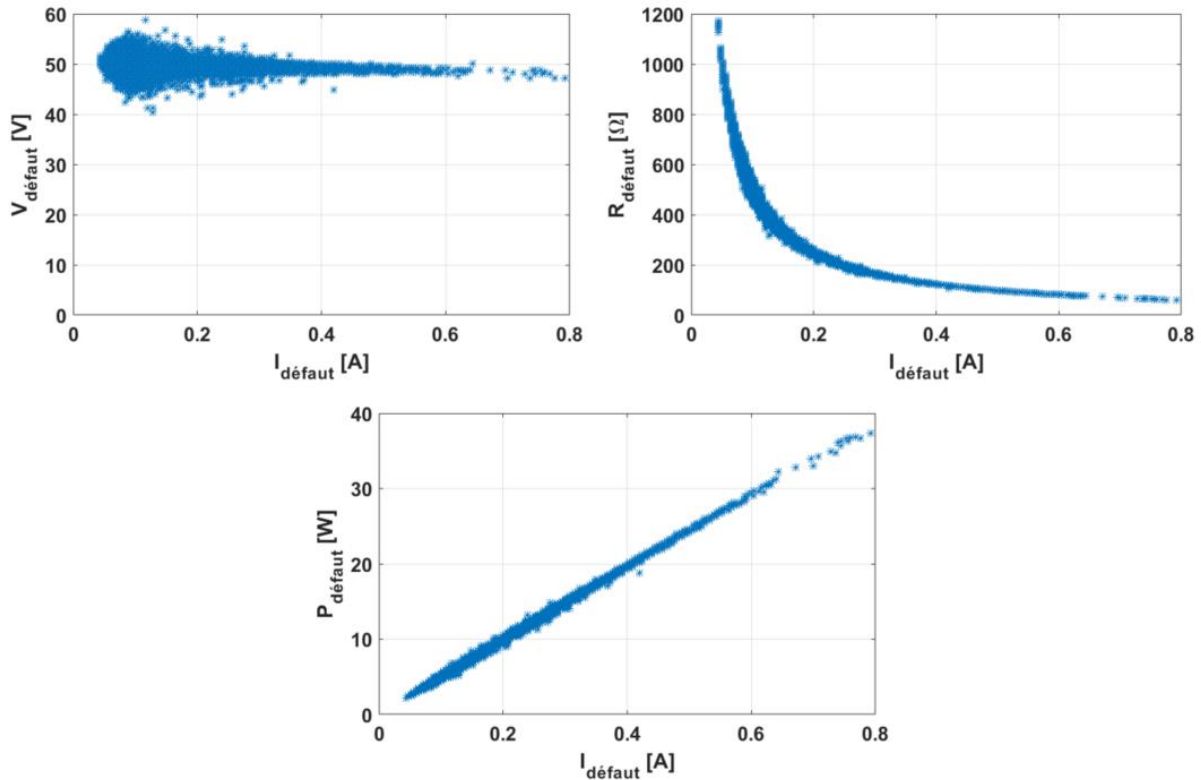


Figure 5.37 : valeurs moyennes de la tension de défaut, de la résistance du défaut et de la puissance dissipée en fonction de courant en présence de points lumineux continus.
Conditions expérimentales : $U_{\text{alim}} = 50 \text{ VDC}$, $I_{\text{max}} = 20 \text{ A}$, configuration cathode au centre.

Sur la figure 5.37 nous avons représenté les valeurs moyennes de la tension de défaut, de la résistance de défaut et de la puissance dissipée dans le défaut en fonction de l'intensité du courant de défaut lors de cette étape. La configuration expérimentale est toujours la même : $U_{\text{alim}} = 50 \text{ VDC}$, $I_{\text{max}} = 20 \text{ A}$, configuration cathode au centre.

Lorsque l'on observe les points lumineux, et plus particulièrement leurs dimensions ainsi que leurs intensités lumineuses, il semble que la surface de chaque point ainsi que leur intensité lumineuse (et donc sûrement l'intensité du courant) soit du même ordre de grandeur pour chacun. Ainsi l'ajout d'un point lumineux revient à ajouter une résistance de défaut en parallèle de celles déjà présentes (points lumineux déjà présents). Le comportement de la résistance globale du défaut évolue comme l'inverse du nombre de points et donc du courant de défaut ce qui semble être montré par la figure 5.37.

Tableau 5.2 : valeurs moyennes, minimales et maximales du courant traversant le défaut, de la tension à ses bornes, de sa résistance et de la puissance dissipée par ce dernier.

	Valeur moyenne	Valeur minimale	Valeur maximale
$I_{\text{défaut}}$ [mA]	111	44	792
$V_{\text{défaut}}$ [V]	50,1	40,4	58,8
$P_{\text{défaut}}$ [W]	5,6	2,2	37,4
$R_{\text{défaut}}$ [Ω]	571	59,6	1172

La puissance est une fonction linéaire en fonction du courant, elle varie dans l'intervalle [2- 37] W avec une valeur moyenne dissipée dans le défaut de 5,6 W. Des perturbations importantes sur la tension de défaut sont mesurées, dont la valeur varie entre 40,4 et 58,8 VDC et s'accompagnent de pics de courant qui peuvent atteindre 800 mA.

Troisième étape : apparition de points lumineux sur la surface de l'âme anodique : dégradation de l'anode

Dans cette étape les points lumineux ne se situent pas seulement sur les isolants mais se déplacent également sur l'intégralité des sections métalliques des câbles de polarité anodique. Les perturbations sur les signaux électriques augmentent fortement comme cela est illustré sur la figure 5.39. Les pics d'intensité du courant dans le défaut peuvent atteindre 6 A, avec une fréquence d'apparition plus élevée que pour les étapes précédentes. L'interaction des points lumineux durant le grésillage avec les âmes des câbles de polarité anodique engendre une dégradation (décomposition) importante du métal. Le résultat de cette dégradation est une matière très fine qui se rejette durant le défaut.

La figure 5.38 met en évidence les points lumineux présents sur la section métallique à deux instants différents. On constate que ces points lumineux changent de position régulièrement. Ainsi, au bout de plusieurs minutes, la matière dégradée recouvre l'intégralité de la surface de l'échantillon. Cette étape dure de quelques minutes à plusieurs dizaines de minutes avant que le défaut n'entre dans une autre étape (arc, point chaud ou court-circuit).

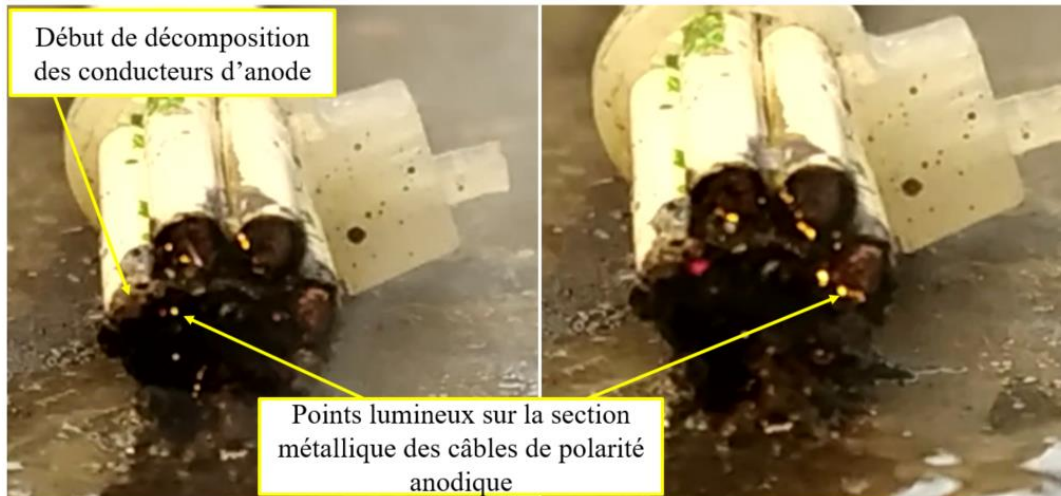


Figure 5.38 : photographie de la section du faisceau durant la troisième étape du grésillement, où les points lumineux sont localisés partout sur la section de l'anode.
 Conditions expérimentales : $U_{atim} = 50$ VDC, $I_{max} = 20$ A, configuration cathode au centre.

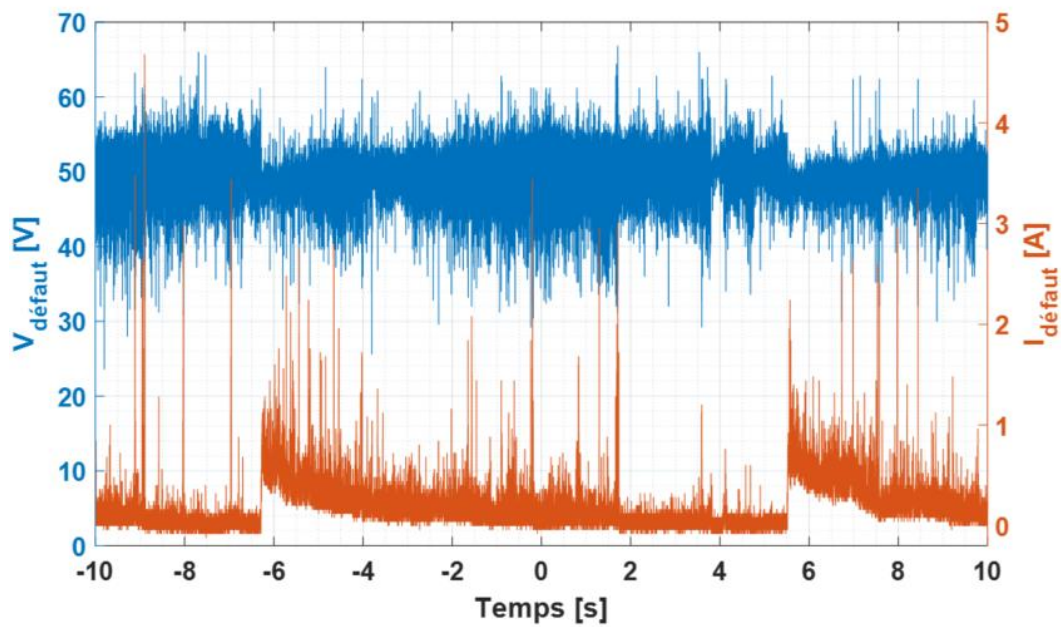


Figure 5.39 : évolution des courant et tension de défaut en fonction de temps en présence de points lumineux sur toute la section de l'anode, conduisant à sa dégradation. Conditions expérimentales : $U_{atim} = 50$ VDC, $I_{max} = 20$ A, configuration cathode au centre.

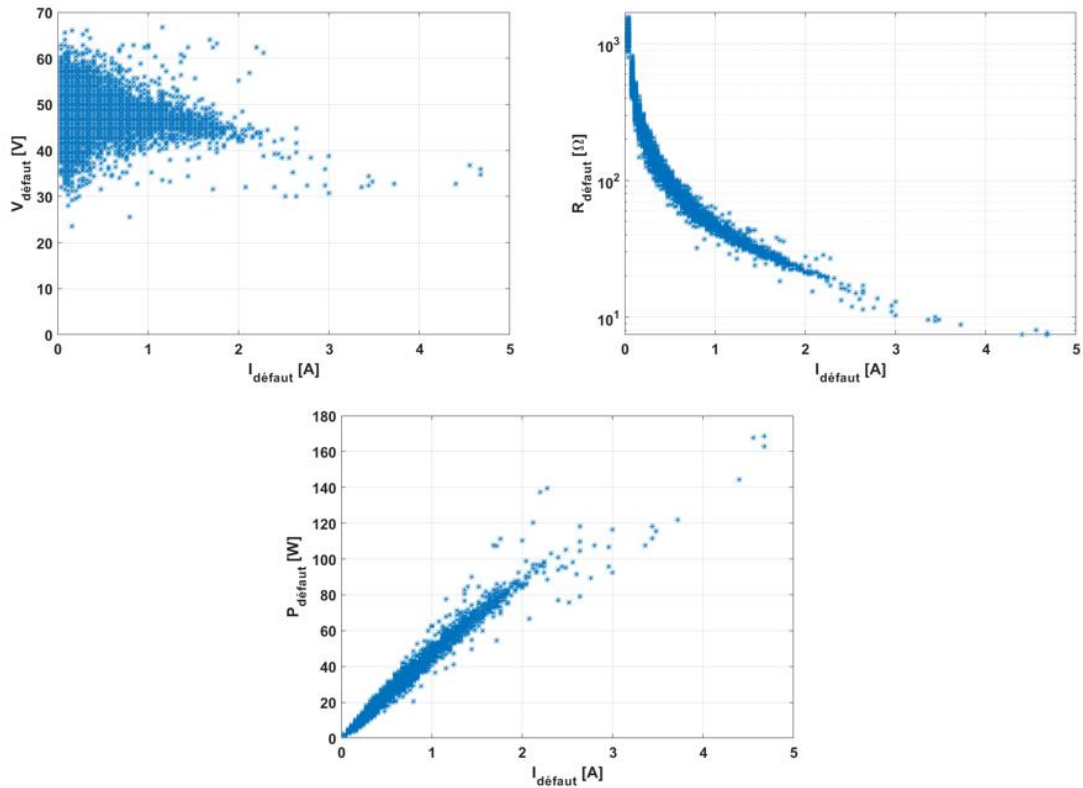


Figure 5.40 : valeurs moyennes de la tension de défaut, de la résistance de défaut et de la puissance dissipée en fonction du courant de défaut en présence de points lumineux sur la section de l'anode conduisant à sa dégradation.

Conditions expérimentales : $U_{alim} = 50$ VDC, $I_{max} = 20$ A, configuration cathode au centre.

Sur la figure 5.40 nous avons représenté les valeurs moyennes de la tension de défaut, de la résistance de défaut ainsi que de la puissance dissipée dans le défaut en fonction de l'intensité du courant de défaut lors de cette étape. La configuration expérimentale est toujours la même : $U_{alim} = 50$ VDC, $I_{max} = 20$ A, configuration cathode au centre.

Il est important de noter que cette dernière étape de grésillement apparaît seulement pour des tensions d'alimentation dans la gamme [28-100] VDC, dans le cas des tensions plus élevés nous constatons une apparition immédiate de la phase d'arc qui sera présentée dans la partie suivante.

Le tableau 5.3 résume les valeurs moyennes, minimales et maximales du courant, de la tension, de la résistance de défaut et de la puissance dissipée dans le défaut durant cette troisième étape du grésillement.

Tableau 5.3 : valeurs moyennes, minimales et maximales du courant, tension, résistance et puissance
Conditions expérimentales : $U_{alim} = 50$ VDC, $I_{max} = 20$ A, configuration cathode au centre.

	Valeur moyenne	Valeur minimale	Valeur maximale
$I_{défaut}$ [mA]	196	40	4680
$V_{défaut}$ [V]	50	23,6	66,8
$P_{défaut}$ [W]	9,7	1,3	168,5
$R_{défaut}$ [Ω]	568	7,4	1570

Dans cette étape de grésillement, la résistance de défaut présente encore une fonction décroissante en fonction de courant de défaut, pour un courant qui varie entre 40 mA et 4,7 A la résistance de défaut varie entre 1570 Ω et 7,4 Ω , La puissance est une fonction linéaire du courant de défaut et varie dans l'intervalle [1 – 168,5] W.

La figure 5.41 est une photographie de notre échantillon après une heure de grésillement. Elle met en évidence l'importance de la détérioration du câble sous les seuls effets de ce phénomène.



Figure 5.41 : photographie de l'état de dégradation de conducteur sous l'effet du grésillement.
Conditions expérimentales : $U_{alim} = 50$ VDC, $I_{max} = 20$ A, configuration cathode au centre.

Dans le cas de la configuration anode au centre du faisceau, les points lumineux du grésillement se déplacent également sur l'âme du câble central comme montré sur les photographies de la figure 5.42, ayant là encore comme conséquence la dégradation du câble central de polarité anodique du faisceau.

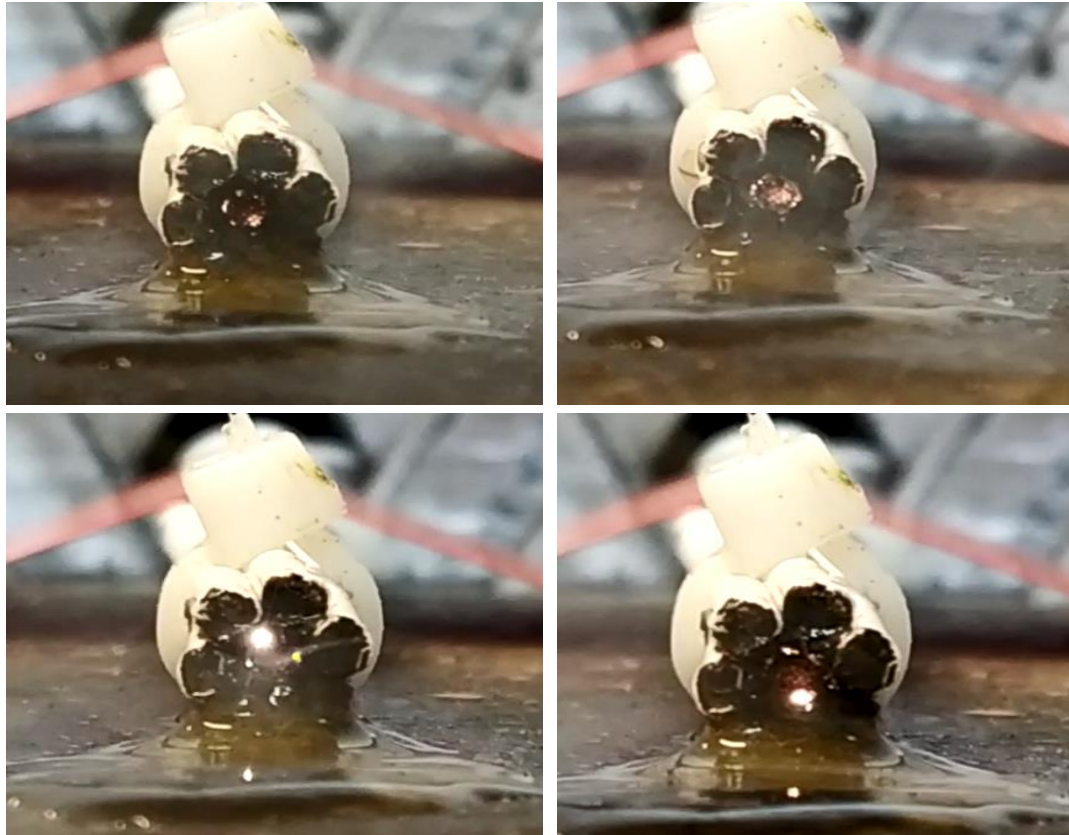


Figure 5.42 : photographie du grésillement sur l'âme de l'anode lors de la 3^{ème} étape pour une configuration anode au centre où les points lumineux sont localisés sur l'anode. Conditions expérimentales : $U_{atim} = 50$ VDC, $I_{max} = 10$ A.

L'impact de ce phénomène n'est pas seulement sur les isolants, mais aussi sur les âmes des câbles. Ainsi, dans le cas où le câble au centre du faisceau est une anode, on peut observer une décomposition remarquable du matériau conducteur. Il se crée alors une phase « pâteuse » qui « dégouline » hors de l'isolant et peut ainsi dans certaines conditions conduire à la destruction d'une dizaine de millimètres de la partie métallique simplement durant cette phase de grésillement. Cette phase de dégradation accélérée est observée quand l'apparition des points lumineux sur la surface des brins qui constituent l'anode se produit.

Dans ce cas on notera une moindre dégradation de l'isolant. Dans le cas d'une configuration avec la cathode au centre, le grésillement se déplace sur les âmes des 6 câbles extérieurs de l'échantillon, qui forment l'anode, en conséquence ils vont se dégrader d'une façon plus ou moins distribuée. Nous avons constaté que l'âme de l'anode se dégradait tout en laissant l'isolant quasi intact : on entend par là que la finalité est un isolant vidé de son conducteur sur plusieurs millimètres.

Résumé intermédiaire :

Trois étapes de grésillement ont été distinguées suivant les critères qui sont : les niveaux de perturbations sur les signaux électriques de défaut et les manifestations physiques que sont les points lumineux ainsi que leurs localisations sur le défaut.

- La 1^{ère} étape présente peu de perturbations sur les signaux électriques, elle est caractérisée par une évaporation lente du liquide de contamination et l'apparition d'une sorte de « mousse » sur le défaut. En revanche durant la fin de la 1^{ère} étape, caractérisée par une évaporation plus rapide du liquide de contamination dû à l'apparition des points lumineux sur la surface de l'isolant du câble central, cela augmente les perturbations des signaux électriques, la valeur du courant est légèrement plus faible qu'au début de cette étape.
- La 2^{ème} étape est caractérisée par un nombre plus grand de point lumineux, la fin de cette étape est distinguée par l'apparition d'une forme d'anneau lumineux sur le contour du câble central dont l'effet est d'augmenter les perturbations électriques avec des pics de courant dont la valeur peut atteindre l'ampère.
- La 3^{ème} étape est caractérisée par l'apparition des points lumineux sur la section de l'anode, un courant plus élevé que pour les autres étapes de grésillement avec des pics de courant qui grimpent à quelques ampères, et des perturbations importantes sur le signal de tension. Cette étape est caractérisée également par une décomposition de l'anode.

Sur l'ensemble des phases de grésillement la résistance de défaut décroît en fonction du courant de défaut, la principale différence est l'intervalle de variation lors des étapes : la valeur de la résistance de défaut est lors de la 1^{ère} étape plus élevée que celle de la deuxième étape qui elle-même est plus élevée que lors de la 3^{ème} étape. En ce qui concerne la puissance dissipée dans le défaut, elle présente une fonction croissante en fonction de courant de défaut et elle peut atteindre des valeurs de l'ordre de la centaine de watts.

La phase de grésillement est suivie par une phase d'arc qui sera présentée dans la section suivante.

5.5.1.2 Phase dite « d'arc »

Une des phases qui suit systématiquement celle du grésillement est celle où un arc électrique apparaît entre le câble central et un ou plusieurs câbles externes. La figure 5.43 propose des photographies réalisées en cinématographie rapide extraites d'un même film (5000 images par seconde et un temps de pose de 1/5000 soit 200 μ s) de la section du faisceau de câbles. Le temps de pose a été choisi suffisamment court pour que la lumière émise par l'arc ne sature pas l'image. Les conditions expérimentales sont les suivantes : $U_{alim} = 100$ VDC, $I_{max} = 10$ A et une configuration cathode au centre.

Sur les photographies comprises entre les instant $t = 0$ ms et $t = 5,6$ ms on se trouve dans le cas d'un grésillement intense avec de nombreux points lumineux (visibles à l'œil nu) et pourtant du fait du temps de pose très court, on ne voit seulement que quelques points, les plus lumineux d'entre eux. Cette observation met en évidence que contrairement à ce que l'on aurait pu croire à l'œil nu, les points lumineux et par conséquent la valeur du courant circulant dans chaque point n'est probablement pas la même, la résistance de chacun est donc certainement différente. Sur les photographies comprises entre $t = 6$ ms et 107,2 ms, la luminosité très importante correspond à la phase d'arc électrique. Du point de vue des signaux électriques, figure 5.44, l'intensité du courant

dans le cas de l'arc peut être proche de I_{max} (valeur débitée quand l'arc est remplacé par un court-circuit) et la tension de défaut chute pour atteindre des valeurs dans la gamme [20 – 40] VDC.

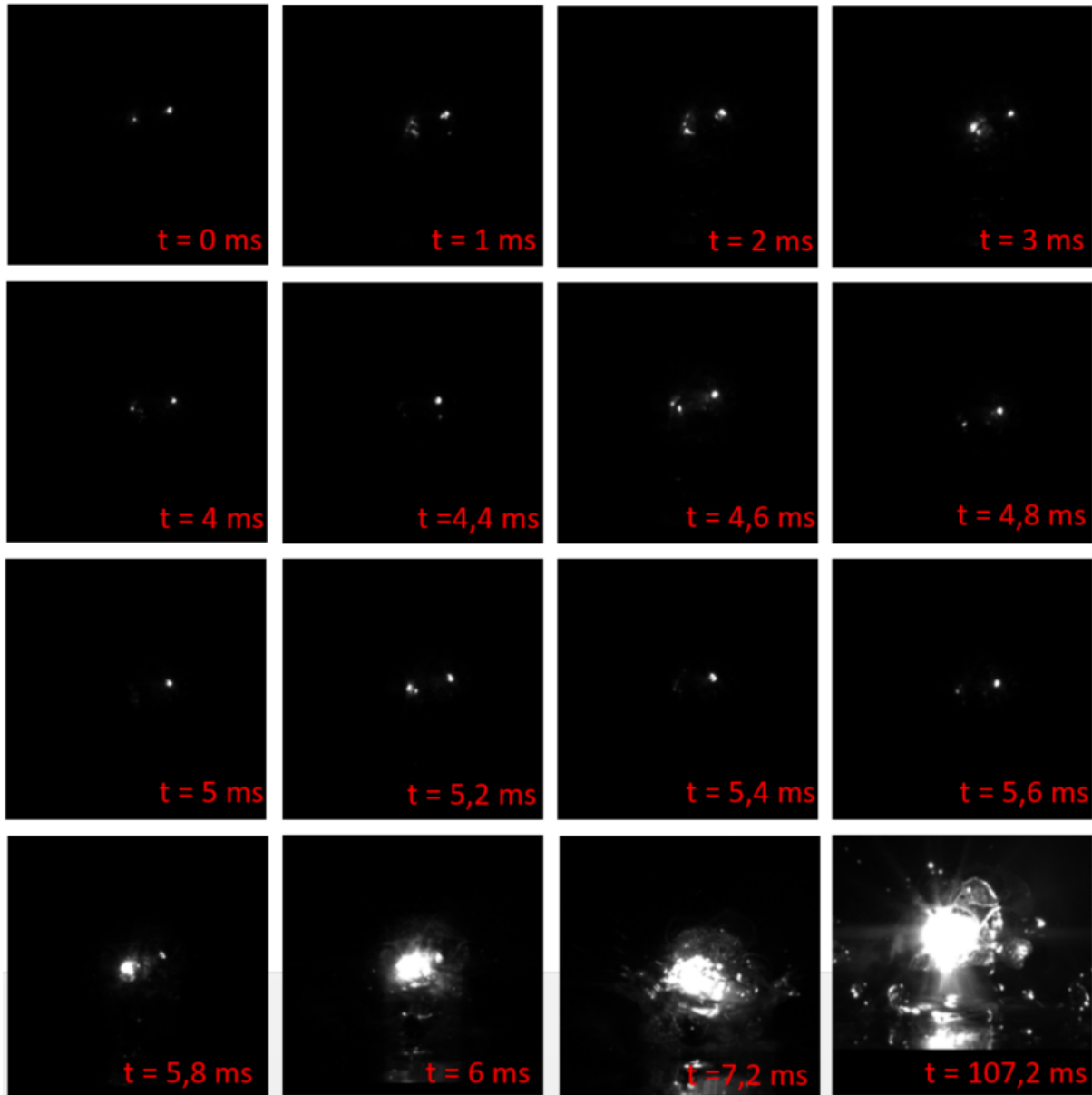


Figure 5.43 : enregistrement avec la camera rapide de la phase de grésillement ($t = [0 - 5,8]$ ms) et de la phase d'arc ($t = [5,8 - 107,2]$ ms) temps de pose = 200 μ s.

Conditions expérimentales : $U_{alim} = 100$ VDC, $I_{max} = 10$ A, configuration cathode au centre.

Un exemple d'évolution des signaux électriques lors de la phase d'arc (tension de défaut et intensité du courant dans le défaut) précédé par une phase de grésillement est donné sur la figure 5.44 pour les conditions expérimentales suivante : $U_{alim}=100$ V DC, $I_{max}=10$ A, cathode au centre. Ces signaux correspondent aux photographies de la figure 5.43.

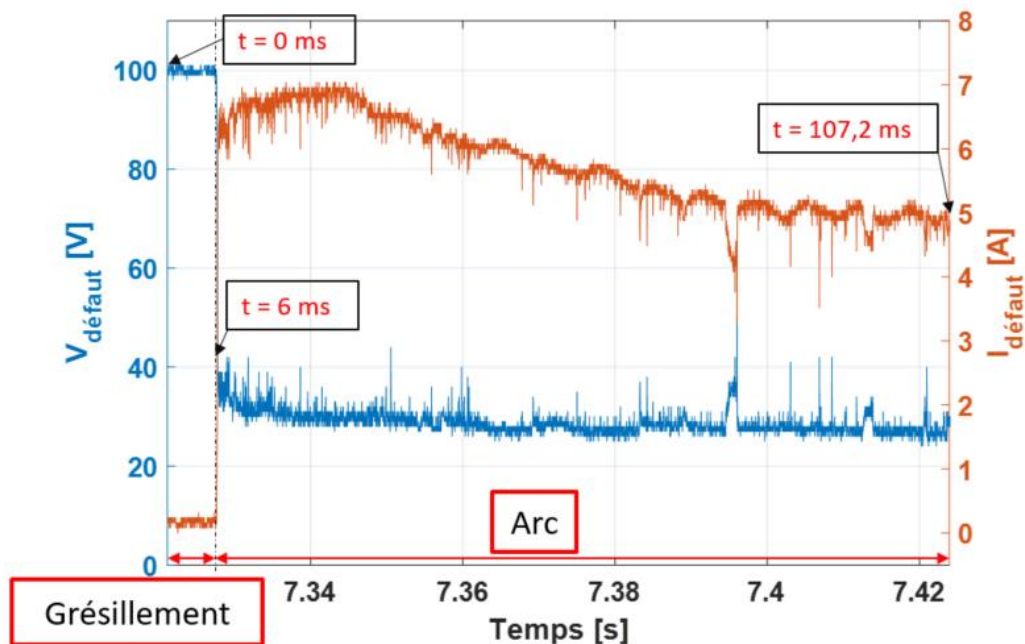


Figure 5.44 : exemple d'évolution de la tension de défaut et de l'intensité du courant dans le défaut lors d'une phase d'arc précédée par un phase de grésillement.
Conditions expérimentales : $U_{alim} = 100$ VDC, $I_{max} = 10$ A, configuration cathode au centre.

Le signal de tension est perturbé du fait des instabilités de l'arc (variation de longueur de la colonne d'arc par exemple ou encore multi-pieds très mobiles ce qui probablement affecte les chute de tension aux niveaux des pieds). Sur la figure 5.45 nous avons représenté les valeurs moyennes de la tension de défaut, de la résistance de défaut ainsi que de la puissance dissipée dans le défaut en fonction de l'intensité du courant de défaut lors de la phase d'arc. La configuration expérimentale est toujours la même : $U_{alim} = 100$ VDC, $I_{max} = 10$ A, cathode au centre.

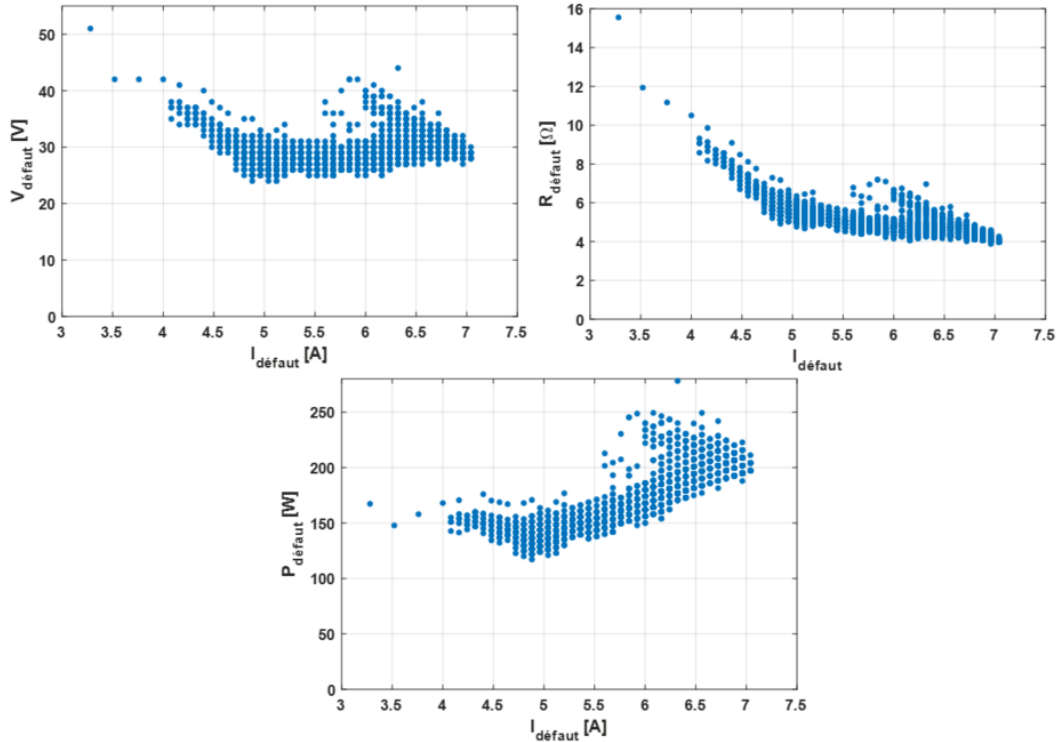


Figure 5.45 : tension aux bornes du défaut, résistance du défaut et puissance dissipée en fonction du courant de défaut durant la phase d'arc.

Conditions expérimentales : $U_{alim} = 100$ VDC, $I_{max} = 10$ A, configuration cathode au centre.

Le tableau 5.4 résume les valeurs moyennes, minimales et maximales du courant, de la tension, de la résistance et de la puissance dissipée dans le défaut durant cette phase de l'arc.

Tableau 5.4 : valeurs moyennes, minimales et maximales du courant, tension, résistance et puissance
Conditions expérimentales : $U_{alim} = 100$ VDC, $I_{max} = 10$ A, configuration cathode au centre.

	Valeur moyenne	Valeur minimale	Valeur maximale
$I_{défaut}$ [A]	5,7	3,3	7
$V_{défaut}$ [V]	28,8	24	51
$P_{défaut}$ [W]	165,6	114,1	278,1
$R_{défaut}$ [Ω]	5,1	3,9	15,5

Résumé intermédiaire :

La phase d'arc est caractérisée par une tension de 20 - 40 VDC, un courant important de 3,3 à 7 A (qui dépend du courant I_{max}) et une résistance de défaut dans la gamme [3,9- 15,5] Ω. Durant cette phase la puissance dissipée dans le défaut atteint 278 W, valeur maximale observée lors des différentes étapes d'évolution du défaut. Elle peut durer entre quelques dizaines de millisecondes à 2 secondes selon les conditions de l'essai. Cette phase d'arc peut être précédée par une phase de grésillement lorsque le niveau de tension imposé n'est pas trop élevé, moins de 100 VDC, et sera

suivie dans beaucoup de cas d'une phase de point chaud que l'on détaillera dans la partie suivante.

5.5.1.3 Phase de point chaud et départ de feu

Suite à l'arc, deux phénomènes peuvent se produire : apparition d'un point chaud et/ou départ de feu. Nous avons regroupé le point chaud et les départs de feu dans une même phase car ils sont étroitement liés. Un point chaud est une zone du conducteur où la température est particulièrement élevée (caractérisé par une émission de lumière rouge) comparée à son environnement, il est statique et apparait souvent après un arc en causant un départ de feu dans la majorité des cas. Électriquement on ne peut distinguer un point chaud seul et un point chaud avec un départ de feu. Cette phase est caractérisée par un courant dont l'intensité est proche du courant de court-circuit I_{CC} et une tension dans la gamme [2 - 14] VDC, donc généralement de plus faible valeur qu'une tension d'arc habituelle.



Figure 5.46 : photographie d'un point chaud accompagné par un départ de feu.
Conditions expérimentales : $U_{dim} = 100$ VDC, $I_{max} = 10$ A, configuration cathode au centre.

La figure 5.46 est une photographie d'une telle situation. Sur la photographie de gauche on distingue la zone de point chaud (âme du câble central), on voit aussi le départ de feu (16 s après l'apparition du point chaud) sur celle de droite.

L'apparition, l'entretien et la propagation du feu sont liés à l'existence d'un point chaud et/ou à la réapparition au cours du feu d'un arc électrique. En l'absence de ces phénomènes on constate l'extinction naturelle (au bout de 1 à 2 s) probablement du fait de la caractéristique thermique de l'isolant des câbles anti-feux et de l'existence de l'humidité due à l'arrivée du liquide de contamination sur le défaut. Une photographie du faisceau de câble après un essai ayant conduit à un départ de feu est présentée sur la figure 5.47. On peut voir que les sept câbles sont touchés par le feu sur une longueur d'environ 5,5 cm pour une durée de 22 s, donc la vitesse moyenne de propagation du feu était de 2,5 mm/s, cette longueur aurait pu être plus importante si nous n'avions pas arrêté l'essai en coupant l'alimentation. Une partie du métal d'un câble est fondue ce qui assure que la température de fusion a bien été dépassée, c'est-à-dire plus de 1085 °C dans le cas de cuivre.



Figure 5.47 : photographie de l'échantillon après l'arrêt de l'essai, avec fusion du métal suite au point chaud.

La figure 5.48 montre l'évolution de la tension et du courant de défaut durant la phase de point chaud accompagnée par un départ de feu.

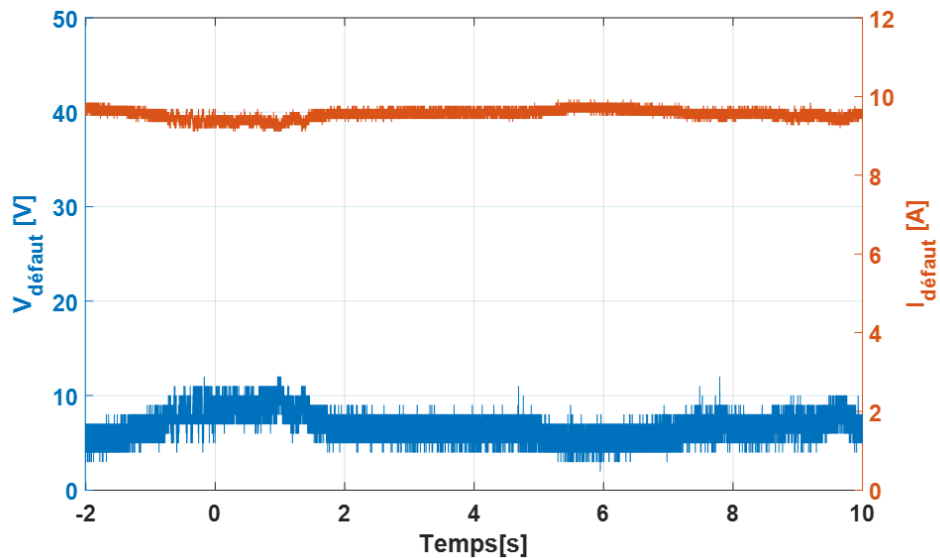


Figure 5.48 : évolution de la tension et du courant de défaut durant la phase de point chaud accompagnée par un départ de feu.

Conditions expérimentales : $U_{alim} = 100$ VDC, $I_{max} = 10$ A, configuration cathode au centre.

La résistance du défaut durant la phase de point chaud est très faible et elle ne varie que peu en fonction du courant de défaut [0.21-1.32] Ω , la tension de défaut diminue également en fonction du courant. La puissance dans cette phase est une fonction décroissante en fonction du courant de défaut, ce comportement est totalement différent des autres phases, et cela est dû au fait que la tension présente une baisse de 10 V pour une amplitude du signal de courant de 0,8 A.

Le tableau 5.5 suivant présente les valeurs maximale, minimale et moyenne de la tension, du courant et de la puissance dissipée dans le défaut durant la phase de point chaud.

Tableau 5.5 : valeurs moyennes, minimales et maximales du courant, de la tension, de la résistance et de la puissance. Conditions expérimentales : $U_{alim} = 100$ VDC, $I_{max} = 10$ A, configuration cathode au centre.

	Valeur moyenne	Valeur minimale	Valeur maximale
$I_{défaut}$ [A]	9,6	9,1	9,9
$V_{défaut}$ [V]	6,8	2	12
$P_{défaut}$ [W]	64,4	19,4	112,3
$R_{défaut}$ [Ω]	0,7	0,2	1,3

Contrairement aux points lumineux, en général le point chaud est fixe et son extension spatiale plus importante.

La puissance dissipée dans le point chaud est moins importante que celle dissipée dans l'arc. Cependant la durée du point chaud est plus importante que celle d'un arc (jusqu'à 10 s pour un point chaud et moins de 2 s pour un arc). Ainsi l'énergie dissipée dans le point chaud est bien plus grande. C'est ce phénomène qui causera le départ de feu : l'arc conduit au point chaud et le point chaud au départ de feu.

Dans certains cas, on a constaté des alternances entre l'arc, le point chaud et le départ de feu. De telles situations peuvent s'éterniser et dans ces cas, nous avons été amenés à stopper l'alimentation pour ne pas laisser le feu se propager de façon dangereuse.

Résumé intermédiaire :

La phase de point chaud est toujours apparue à la suite d'une phase d'arc, la puissance dissipée dans le défaut lors de cette phase est plus faible par rapport à celle de la phase de l'arc, mais elle dure plus longtemps, ceci cause dans la majorité des cas l'apparition, l'entretien et la propagation du feu. Pour un courant important de défaut (10 – 20 A), elle pourra conduire à la fusion des conducteurs des câbles électrique. Cette phase est caractérisée par une tension plus faible que la tension de l'arc (2 - 12 V), et des signaux moins perturbés, le courant de défaut est légèrement inférieur à celui de court-circuit. La fusion de métal entre deux électrodes conduit à un court-circuit par un pont fondu, qui est l'un des deux cas de court-circuit.

5.5.1.4 Phase finale de court-circuit ou de circuit ouvert

Quand l'expérience n'est pas arrêtée pour cause de propagation intempestive du feu, on a observé deux possibilités pour l'état final: un court-circuit ou bien un circuit ouvert.

Le court-circuit est bien évidemment caractérisé par une résistance quasiment nulle au niveau du défaut. En présence d'une impédance en série dans le circuit, elle limitera la valeur maximale du courant. En son absence, la valeur du courant pourrait être très élevée. Nous ne nous intéressé qu'au

premier cas.

Le court-circuit :

Le court-circuit a bien évidemment une faible valeur de résistance qui peut conduire à la fusion du métal et ensuite à la création d'un pont fondu entre les câbles (soudure). D'autres cas de court-circuit ont été observés : dans ces cas on n'observe pas nettement de pont fondu mais on constate la présence de matière verdâtre humide qui laisse penser à de l'oxyde de cuivre en présence d'eau salée. Bien évidemment seule une analyse chimique de type mesure avec un XPS pourrait nous permettre de caractériser le type de matière (d'oxyde) formé mais ce n'est pas l'objet de l'étude menée ici.

Le court-circuit causé par un arc, des points chauds ou un feu accompagné par un point chaud entraîne la disparition des phénomènes en question car la puissance dissipée dans le défaut diminue fortement. Un court-circuit est observé comme phase finale dans la majorité des cas d'essai. Dans de très rares cas (au nombre de 3), la phase finale observée était un circuit ouvert. Il faut garder à l'esprit que dans notre démarche, le courant est limité et qu'une intensité plus importante pourrait conduire de nouveau à un point chaud, à un arc, etc...

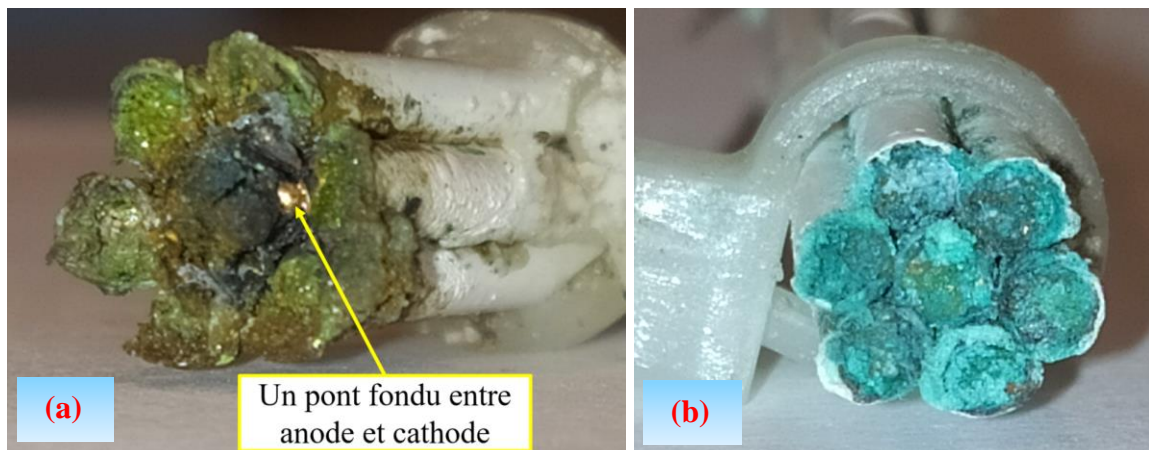


Figure 5.49 : photographie de l'échantillon après court-circuit : (a): court-circuit par un pont fondu, (b) : court-circuit par matière humide dérivée de la dégradation des câbles.

La figure 5.49 présente deux cas de court-circuit :

- (a) Un pont métallique fondu est constitué entre l'un des câbles anode périphérique et le câble cathode au centre.
- (b) un mélange humide très conducteur formé par de l'oxyde de cuivre, de l'isolant en dégradation et du sel.

Il est à noter qu'en l'absence d'une résistance en série avec le défaut la valeur du courant sera très élevée. Il faut être conscient que cette valeur initiale du courant (liée à la valeur de la résistance) peut avoir une influence directe sur le déroulement des événements finaux (départ de feu...).

Le circuit ouvert :

L'état final peut aussi correspondre à un circuit ouvert. D'un côté le grésillement décompose le métal à l'anode plus vite que les isolants. Ainsi, la distance entre l'anode et la cathode augmente et d'un autre côté le liquide de contamination se vaporise sous l'effet de courant de grésillement, cela conduit à l'augmentation de la résistance du défaut jusqu'à avoir un circuit ouvert à la fin de l'essai. Ceci est illustré sur la figure 5.50 qui présente une photographie d'un faisceau de câbles après l'essai. On voit bien que la partie métallique du câble anode (au centre) a disparu.

Cette figure illustre l'apparition d'un circuit ouvert après la phase de grésillement pour une configuration anode au centre, une tension d'alimentation de 50 VDC et un courant maximum de 10 A.

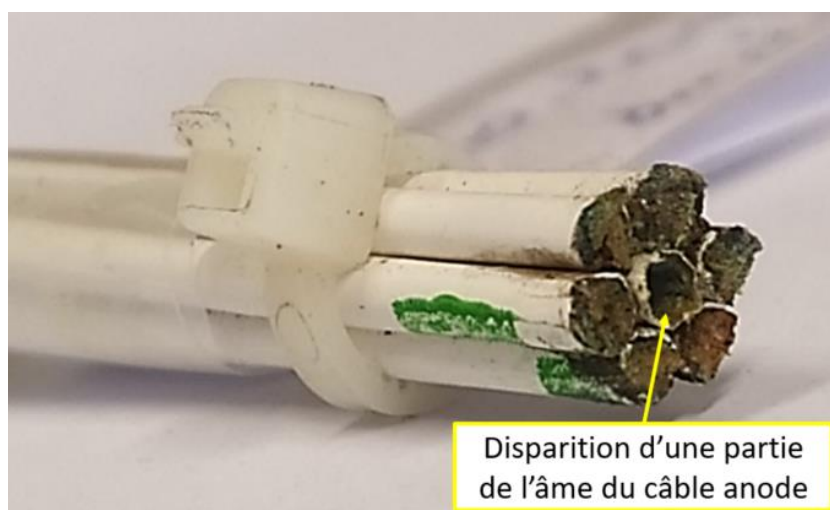


Figure 5.50 : photographie d'un échantillon après un essai ayant conduit à un circuit ouvert. Disparition d'une partie de l'âme du câble anode suite à sa décomposition favorisée par le grésillement
Conditions expérimentales : $U_{lim} = 50$ VDC ; $I_{max} = 10$ A, configuration anode au centre.

Le cas de défaut en circuit ouvert apparaît exclusivement pour une configuration d'échantillon anode au centre et pour des tensions d'alimentation inférieures ou égales à 50 VDC. Un circuit ouvert est rarement observé comme phase finale par rapport au court-circuit ou départ de feu.

Résumé intermédiaire :

Nous avons constaté deux principales phases finales de l'évolution de défaut, un court-circuit ou un circuit ouvert. De plus, dans certains cas on a pu observer un départ et une propagation de feu. Dans ce cas l'essai est arrêté par mesure de sécurité.

Le court-circuit est causé par un pont fondu visible ou bien avec une matière verdâtre humide, ce cas est le plus fréquent pour différentes conditions d'essais. Le circuit ouvert est causé par la perte de matière de l'anode qui conduit à l'augmentation de la résistance de défaut par l'augmentation de la distance inter-électrodes jusqu'à l'annulation du courant, ce cas apparaît rarement et uniquement pour des niveaux de tension inférieurs ou égaux à 50 VDC.

5.5.2 Présentation de quelques exemples permettant d'illustrer diverses chronologies possibles des événements.

Malgré la diversité des situations rencontrées, nous allons présenter dans cette partie quelques cas typiques de courbes représentatives des différentes phases de l'évolution du défaut. Pour cela nous avons choisi plusieurs exemples avec différents niveaux de tension d'alimentation.

Premier exemple : $U_{alim}=50\text{ VDC}$, $I_{max}=10\text{ A}$ - configuration cathode au centre

Dans ce premier cas présenté sur la figure 5.51, après une phase de « grésillement » durant laquelle la tension au niveau du défaut est « voisine » de la tension d'alimentation avec des perturbations dues au passage du courant dans le défaut et qui aura duré 28 minutes, on voit apparaître une succession d'arcs d'une durée de quelques ms à quelques dizaines de ms entrecoupée de nouvelles phases de grésillement. La phase d'arc est bien visible non seulement à l'œil nu, mais aussi sur les signaux sur lesquels on voit la tension de défaut chuter à un peu plus de 12 V et l'intensité du courant croître brutalement à 7 A (proche de I_{cc} qui est de 10 A).

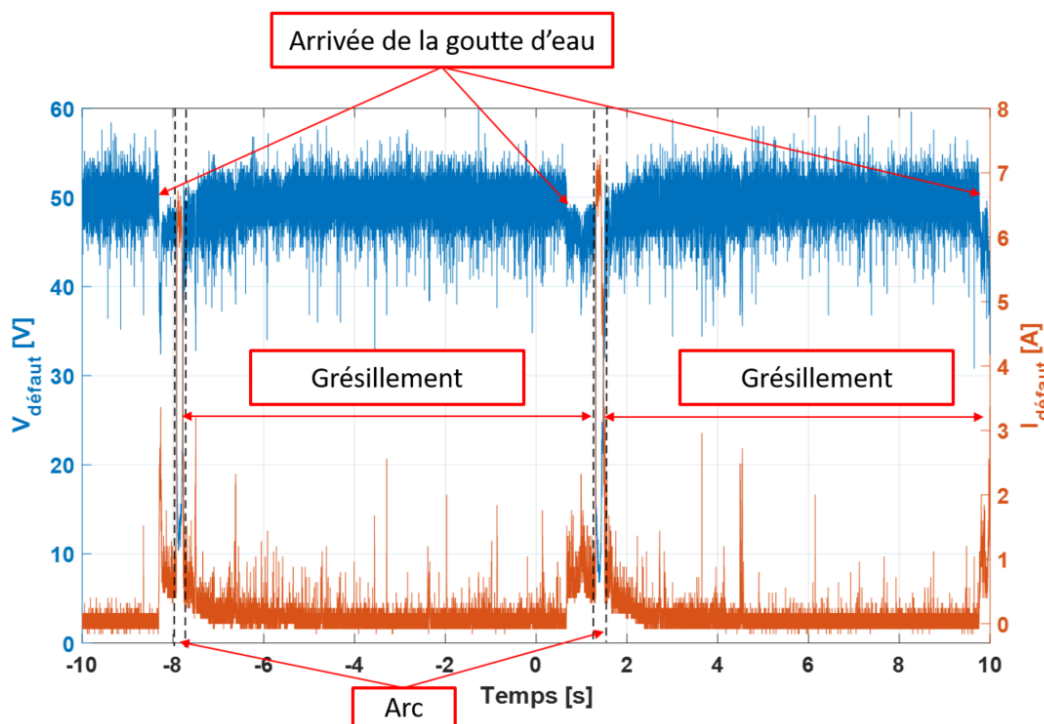


Figure 5.51 : exemple d'évolution du phénomène de grésillement avec l'apparition de brefs arcs.
Conditions expérimentales : $U_{alim} = 50\text{ VDC}$, $I_{max} = 10\text{ A}$, configuration cathode au centre.

A la fin de l'essai le défaut se transforme en court-circuit. La figure 5.52 présente un enregistrement de signaux de courant et de tension de défaut dans un court-circuit pour les mêmes conditions d'essai.

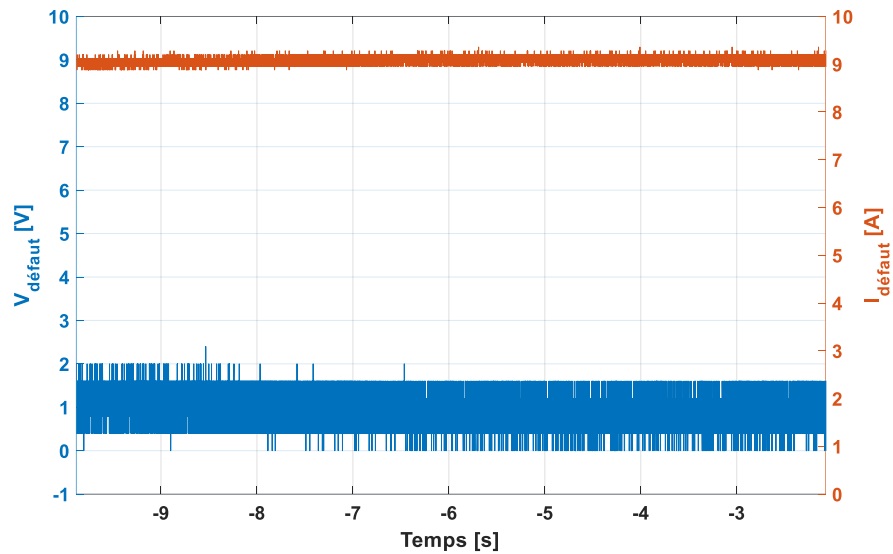


Figure 5.52 : exemple d'un état final de court-circuit du défaut, après 2 min de la prise d'enregistrement de la figure 5.51. Conditions expérimentales : $U_{atim} = 50$ VDC, $I_{max} = 10$ A, configuration cathode au centre.

La figure 5.53 présente une photographie de l'évolution du défaut dont les signaux électriques sont ceux de la figure 5.51. Une photographie du défaut en court-circuit (c) correspondant à l'état final observé, est également présentée.

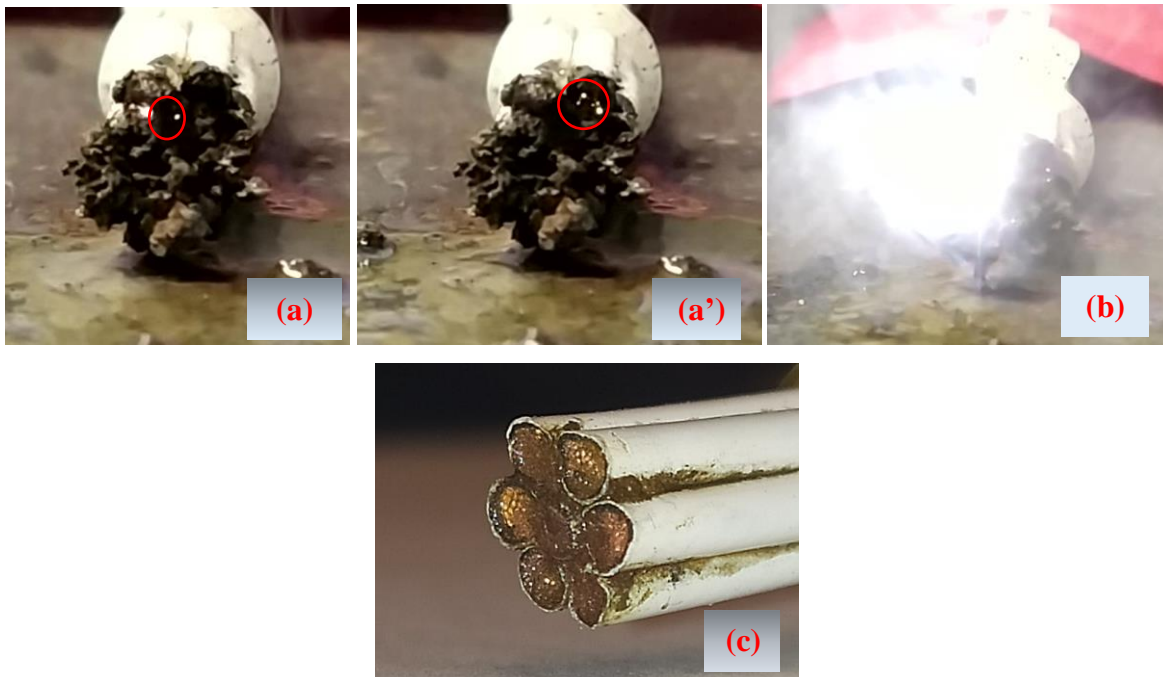


Figure 5.53 : photographies des différentes phases d'évolution du défaut d'arc tracking
Conditions expérimentales identiques à la figure 5.52.
(a)-(a') : phase de grésillement, (b) : phase d'arc, (c) : l'état final du défaut est un court-circuit.

Deuxième exemple : $U_{atim} = 100$ VDC, $I_{max} = 10$ A - configuration anode au centre

Sur cet exemple présenté sur la figure 5.54, après une longue phase de grésillement d'environ 10 min, on a eu un premier arc électrique de « courte durée » (environ 250 ms) suivi d'une nouvelle phase de grésillement ; enfin, un arc électrique durant environ 2s suivi d'un phénomène de point chaud (forte intensité –faible tension). Pour finir ce point chaud se transforme en court-circuit sans qu'il y ait un départ de feu.

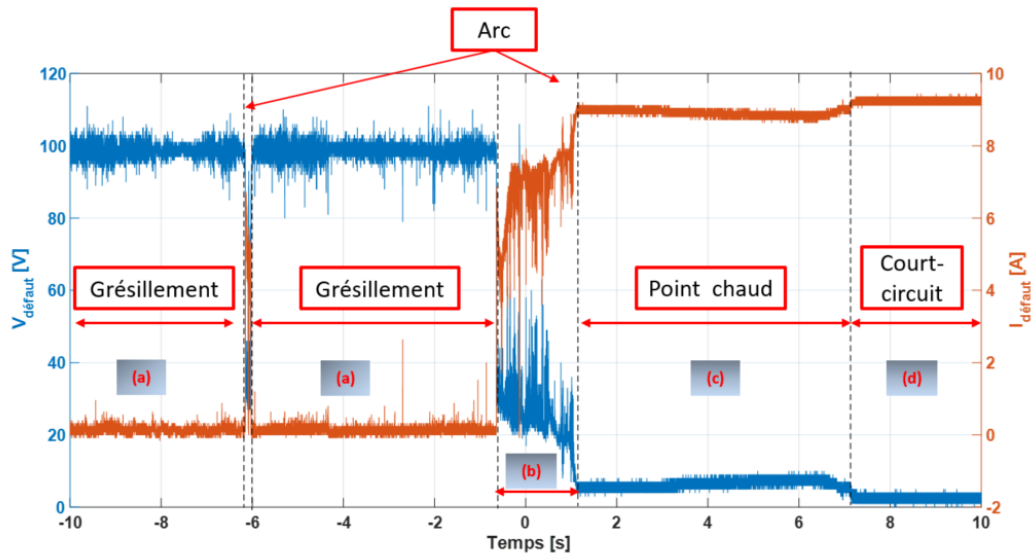


Figure 5.54 : exemple d'évolution du phénomène.
Conditions expérimentales : $U_{atim} = 100$ VDC, $I_{max} = 10$ A, configuration anode au centre.

La figure 5.55 présente des photographies des différentes phases relatives à la figure 5.54.

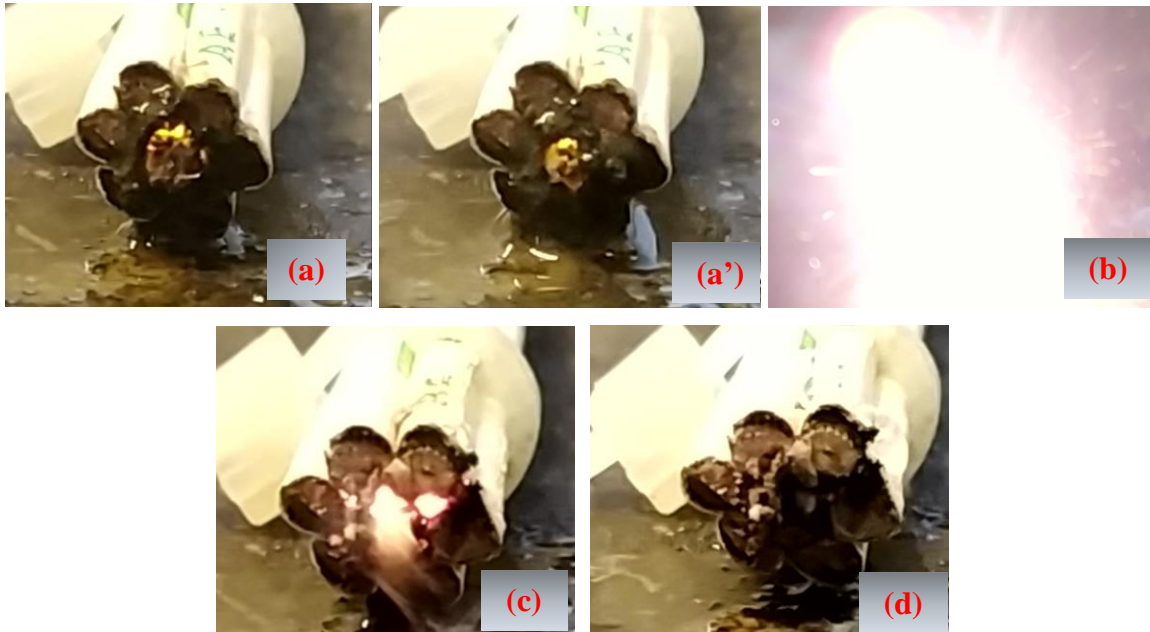


Figure 5.55 : photographies des différentes phases.

Conditions expérimentales identiques à la figure 5.54.

(a)-(a') : phase de grésillement, (b) : phase d'arc, (c) : phase de point chaud, (d) : état final : court-circuit.

Troisième exemple : $U_{alim} = 270 \text{ VDC}$, $I_{max} = 10 \text{ A}$ - configuration anode au centre

Sur cet exemple présenté sur la figure 5.56, la phase de grésillement est suivie de phases successives d'arcs électriques et de points de chauds pour finir (cela n'apparaît pas à l'image en court-circuit).

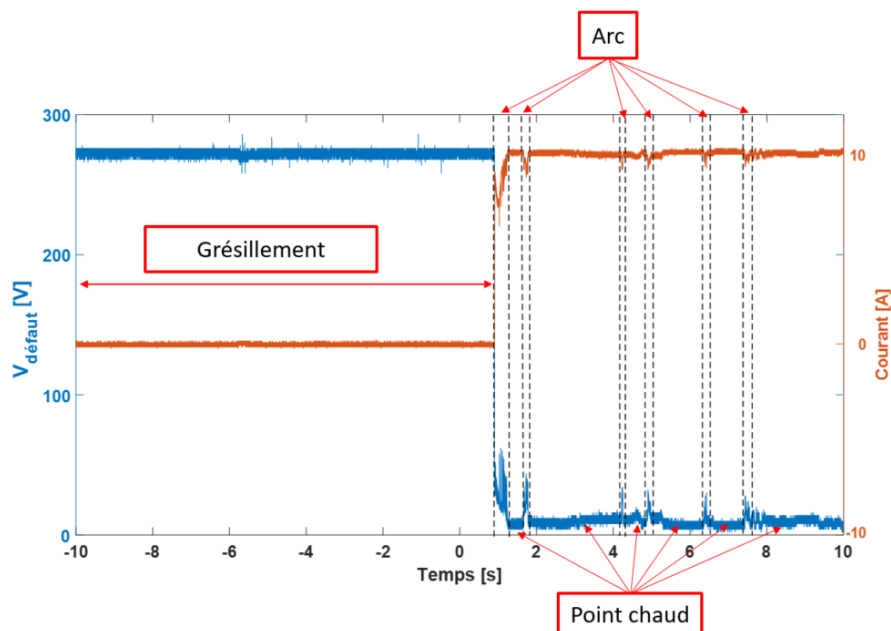


Figure 5.56 : exemple d'évolution du phénomène.

Conditions expérimentales : $U_{alim} = 270 \text{ VDC}$, $I_{max} = 10 \text{ A}$, configuration anode au centre.

La figure 5.57 présente des photographies des différentes phases relatives à la figure 5.56.

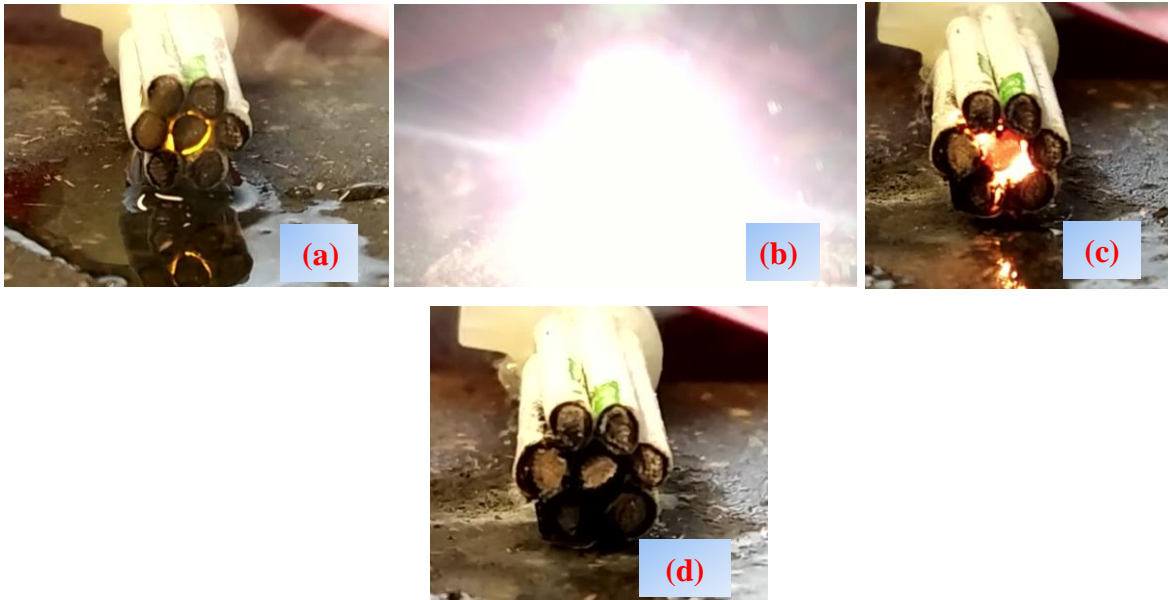


Figure 5.57 : photographies des différentes phases.

Conditions expérimentales identiques à la figure 5.56.

(a) : phase de grésillement, (b) : phase d'arc, (c) : phase de point chaud, (d) : court-circuit

Quatrième exemple : $U_{alim} = 500 \text{ VDC}$, $I_{max} = 10 \text{ A}$ - configuration anode au centre

Pour des tensions d'alimentation plus élevées (500 VDC par exemple) la phase de grésillement peut être très brève. La figure 5.58 présente un tel cas. Après l'arrivée du liquide de contamination sur le défaut l'arc est apparu très rapidement dans ce cas (sans avoir une phase précurseur à l'arc), en causant une fusion du métal du câble central, s'ensuit une phase de point chaud s'accompagnant d'un départ de feu.

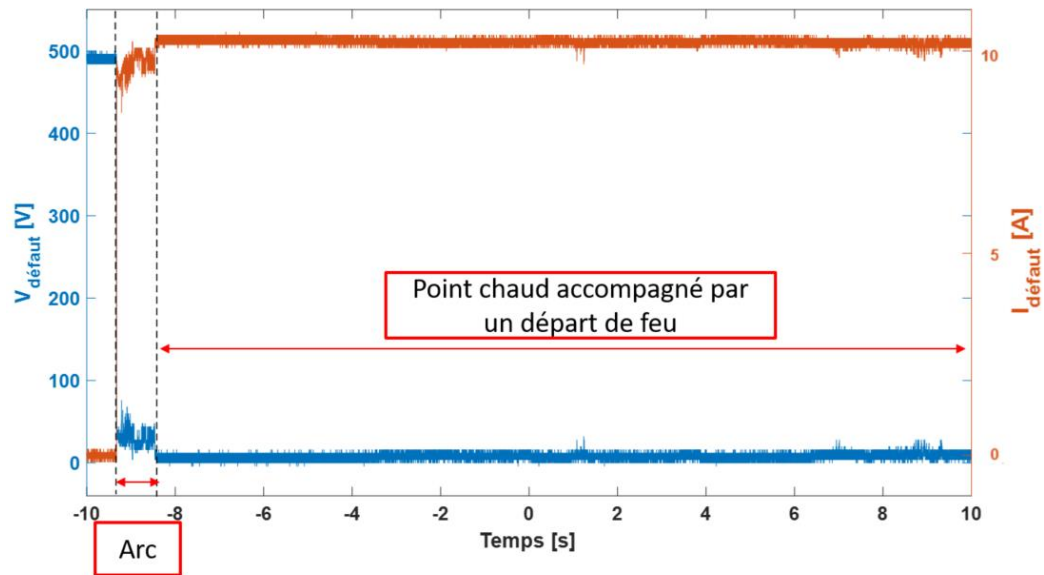


Figure 5.58 : exemple d'évolution du défaut, sans passer par la phase de grésillement, apparition directe d'un arc, puis d'un point chaud accompagné par un départ de feu et à la fin formation d'un court-circuit.
Conditions expérimentales : $U_{alim} = 500 \text{ VDC}$, $I_{max} = 10 \text{ A}$, configuration anode au centre.

La figure 5.59 présente différentes photographies du faisceau de câbles qui correspond à la figure 5.58.



Figure 5.59 : photographies des différentes phases.
Conditions expérimentales identiques à la figure 5.58.

(a) : phase d'arc, (b) : phase de point chaud, (b') : phase de point chaud accompagné par un départ de feu limité.

Cinquième exemple : $U_{alim} = 50 \text{ VDC}$, $I_{max} = 10 \text{ A}$ - configuration anode au centre

Pour des basses tensions d'alimentation (50 VDC par exemple) la phase de grésillement peut être très longue, de 20 min jusqu'à 1h 30min, et peut conduire à des phases finales complètement différentes. La figure 5.60 suivante représente un exemple de court-circuit dû à un pond fondu après un arc.

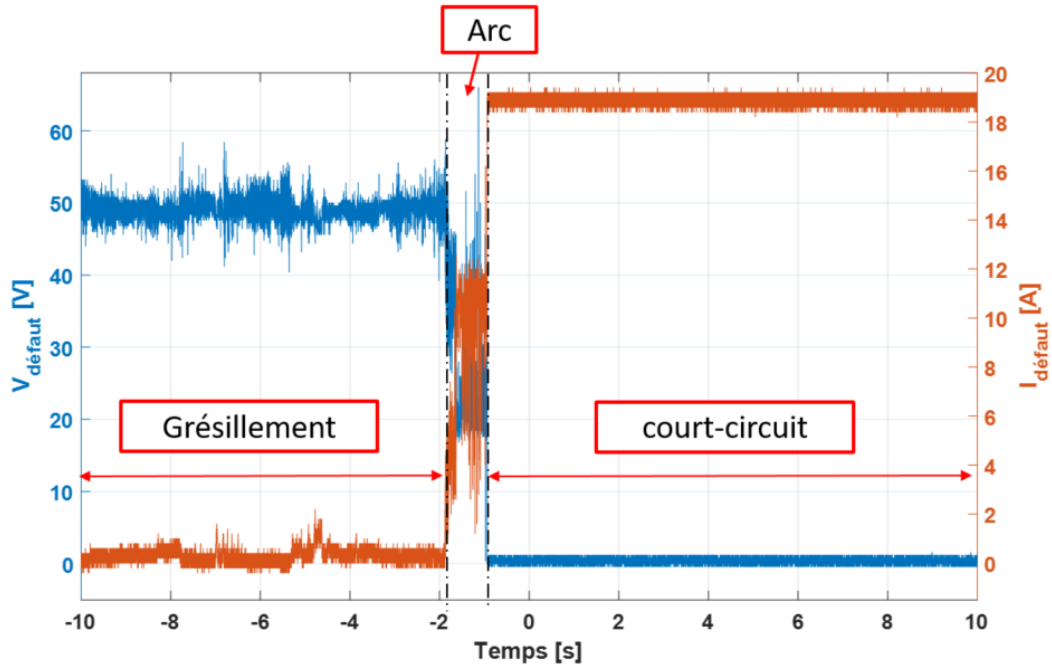


Figure 5.60 : évolution du courant et de la tension d'un défaut en fonction de temps vers un état final de court-circuit par un pond fondu après une phase d'arc, $U_{alim} = 50$ VDC, $I_{max} = 20$ A, configuration cathode au centre.

La figure 5.61 suivante représente un exemple d'évolution de défaut qui a pour phase finale circuit-ouvert après un arc pour une configuration anode au centre $U_{alim} = 50$ VDC ; $I_{max} = 10$ A.

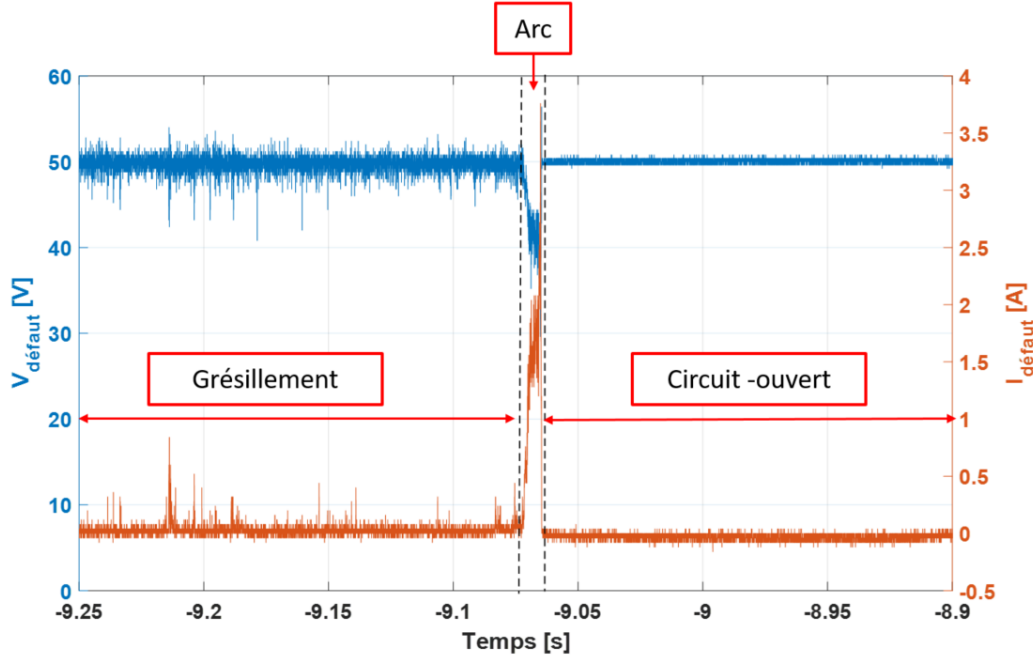


Figure 5.61 : évolution de défaut en circuit ouvert, $U_{alim} = 50$ VDC ; $I_{max} = 10$ A, configuration anode au centre.

Commentaires :

Durant l'évolution du défaut, la phase d'arc peut apparaitre comme première phase consécutive à

la phase de grésillement avec une très brève durée durant la phase de point chaud. L'arc est la phase la plus sévère de défaut car il peut causer un court-circuit, des points chauds dégénéralant en départs de feu et également en les renforçant (dans le cas où l'arc fait une réapparition durant le point chaud ou le feu). La durée d'arc peut-être considérable et approcher dans certains cas les 2s. Les arcs qui apparaissent durant la phase de grésillement et la phase de point chaud ont en général une durée plus courte. Dans le cas de tension d'alimentation élevés (270 – 500 VDC), l'arc aura une énergie thermique suffisante pour fondre le métal des conducteurs dans un délai d'une seconde.

5.5.3 Impact des conditions d'essais sur l'évolution du défaut

5.5.3.1 *Présentation de l'ensemble des essais réalisés en vue d'une synthèse*

Dans cette partie nous allons synthétiser les observations faites concernant l'influence de divers paramètres sur l'évolution du défaut au cours de l'expérience. Le tableau 5.6 donne une liste quasiment exhaustive des conditions de chaque expérience. Dans ce tableau les conditions expérimentales sont systématiquement décrites en termes de configuration du faisceau de câbles, de caractéristiques de l'alimentation, de nature du liquide de contamination (quand il n'y a pas d'indication le liquide de contamination est le l'eau salée). Les différentes phases qui sont apparues durant l'essai et leur ordre chronologique sont aussi décrits. La durée de l'essai est précisée.

Tableau 5.6 : descriptif synthétique des essais réalisés.

A	K	U_{alim} [V]	I_{max} [A]	Grésill- ement	Arc	Point chaud-	Dépar t de feu	Circui t- ouvert	Court- circuit	Durée
I		28	10	1	2	3	4			01:17:00 *
	I	28	10	1 **	2	3			4	00:20:50*
I		50	10	1				2		00:22:00
II		50	10	1	2			3		01:00:00
	I	50	10	1	2	3	4			00:47:00*
	II	50	10	1	2				3	00:23:00
	III	50	10	1	2				3	00 :30 :00
I		50	20	1	2			3		01:07:15
	I	50	20	1	2				3	00:59:41
I		100	10	1	2	3	4			00:08:22*
I		100	10	1	2	3			4	00:11:22
	I	100	10	1	2	3	4		5	00:03:00
	II	100	10	1	2				3	00:02:00
I		100	20	1	2	3	4			00:00:45*
II		100	20	1	2				3	00:20:43
	I	100	20	1	2				3	00:02:00
	II	100	20	1	2	3	4		5	00:05:30
I		270	1.03	1	2				3	00:01:57
II		270	1.03	1	2	3			4	00:06:38
	I	270	1.03		1	2			3	00:05:11
	II	270	1.03		1	2			3	00 :03 :52
I		270	2.57	1 **	2	3.			4	00:02 :07
II		270	2.57	1	2	3			4	00:01:35
	I	270	2.57		1	2	3			00:05 :50*
	II	270	2.57		1	2			3	00 :06 :50
I		270	10	1	2	3			4	00:01:00
	I	270	10		1	2	4		5	00:00:51
	II	270	10		1	2	3			00:00:58*
I		490	0.91		1	2			3	00:05:37
II		490	0.91		1	2			3	00:03:24
	I	490	0.91		1	2			3	00:03:14
	II	490	0.91		1	2			3	00:01:48
	III	490	0.91	1	2	3			4	00 :03 :43
I		490	2.78		1	2	3			00:03:50*
	I	490	2.78		1	2	3			00:10:00*
	II	490	2.78		1	2			3	00:01:17
	III	490	2.78		1	2			3	00:17:00

	I	490	10.4		1	2	3		4	00:01:07
	II	490	10.4		1	2	3			00:01:40*
I		490	10.4		1	2	3		4	00:00:28
II		490	10.4		1	2	3		4	00:00:46
I^R		490	10.4	1	2	3	4		5	00:01:00
II^R		490	10.4	1	2	3	4		5	00:01:42
	I^R	490	10.4	1	2	3	4		5	00:00:33
	II^R	490	10.4	1	2	3	4		5	00:00:53
I^R		270	10	1	2	3	4		5	00:01:10
II^R		270	10	1	2	3	4		5	00:00:35
	I^R	270	10	1	2	3	4		5	00:01:01
	II^R	270	10	1	2	3			4	00:00:35
	III_R	270	10	1	2				3	00:00:46
	IV	270	10	1	2	3	4			00:01:32*
I^D		270	10	1	2	3	4			00:03:06*
	I^D	270	10	1	2	3			4	00:01:15
	II^D	270	10	1	2	3	4			00:06:23*
I^D		490	10.4	1	2	3	4			00:00:58*
	I^D	490	10.4	1	2	3	4			00:01:27*

Aide à la lecture du tableau :

A : configuration anode au centre.

K : configuration cathode au centre.

I, II, III... : le numéro de répétition d'un essai dans les mêmes conditions.

D : Le liquide de contamination est l'eau distillée

R : Le liquide de contamination est l'eau de robinet

Durée : représente le temps écoulé entre l'instant de l'apparition de courant dans le défaut et son état final ou arrêt de l'expérience.

***** : arrêt volontaire de l'essai pour empêcher la propagation du feu sur une grande partie des câbles.

****** : apparition d'un bref arc durant la phase de grésillement (donc grésillement puis arc puis grésillement...).

U_{alim} : tension d'alimentation, I_{max} : courant de court-circuit.

1, 2, 3, ... : succession des phases en ordre chronologique d'apparition.

Pour les plus fortes valeurs de tension d'alimentation (490 VDC) le grésillement n'apparaît que très rarement et notamment dans le cas où on limite l'intensité maximale de l'alimentation à des valeurs faibles (0,91 A). Un seul et unique cas a été rencontré pour lequel la phase de grésillement enregistrée fut courte, environ 10 ms, que l'on a pu estimer à partir de l'enregistrement vidéo. Les

signaux électriques ne révèlent aucune information dans ces conditions. La figure suivante montre les photographies de la phase de grésillement observée dans ce très rare cas.

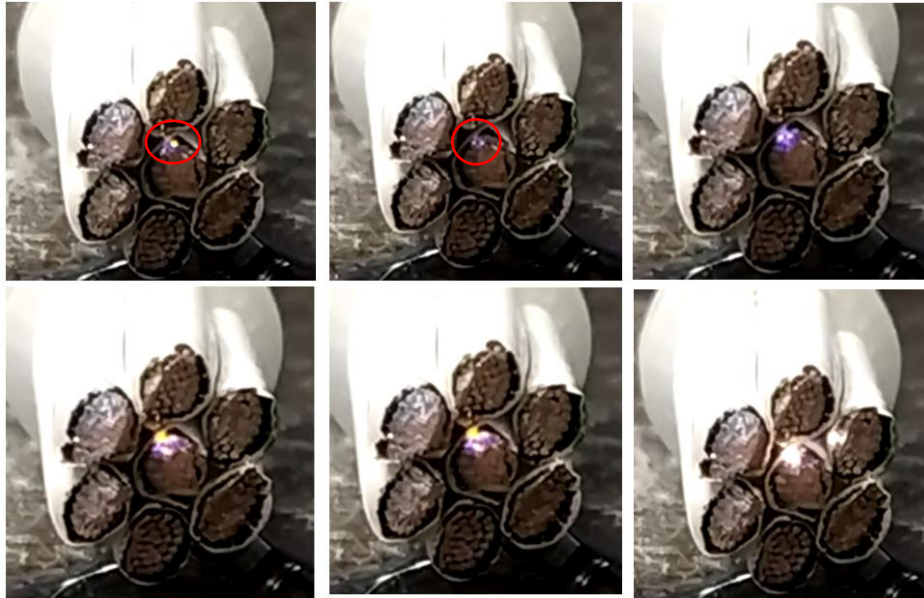


Figure 5.62 : photographies de grésillement pour une tension $U_{alim} = 490$ VDC, $I_{max} = 0,91$ A, configuration cathode au centre.

Sur la figure 5.62, une photographie de cette très brève apparition de la phase de grésillement (qui est très peu probable dans ces condition d'essais : tension élevée et liquide de contamination eau salée), on peut voir tout au début l'apparition des points lumineux sur l'isolant du câble central pour une durée très limitée suivie par une phase d'arc.

5.5.3.2 Influence de la tension d'alimentation

Le tableau 5.6 montre que le niveau de tension du réseau est un facteur crucial concernant l'apparition et la durée du grésillement. Durant cette phase, l'impédance du défaut est importante et l'intensité du courant dans le défaut est faible (bien inférieure à l'intensité maximale de l'alimentation). La phase de grésillement est apparue systématiquement pour les basses tensions indépendamment des niveaux de courants considérés.

La valeur de l'intensité maximale que l'alimentation peut débiter a plus d'impact sur l'évolution du défaut durant la phase d'arc et de point chaud que durant le grésillement. En effet durant l'arc et la phase de point chaud, l'impédance du défaut est « faible » et on peut atteindre des intensités élevées, uniquement limitées par le circuit d'alimentation. Dès lors, avec une intensité plus importante dans le défaut, l'énergie dissipée sera elle aussi plus importante et par conséquent le risque de départ de feu sera accru. Inversement, avec une intensité limitée à de faibles valeurs, (moins d'un ampère) on aura moins de cas de départ de feu même pour une tension de 490 VDC.

5.5.3.3 Influence de la nature de la charge (résistive /inductive)

Les réseaux aéronautiques contiennent des inductances que l'on retrouve dans les différents systèmes tels que les convertisseurs de puissance ou les filtres. De ce fait nous avons effectué des essais d'arc tracking pour une charge RL dans le but de reproduire les conditions d'un réseau aéronautique réel. Le circuit utilisé est décrit sur la figure 5.63.

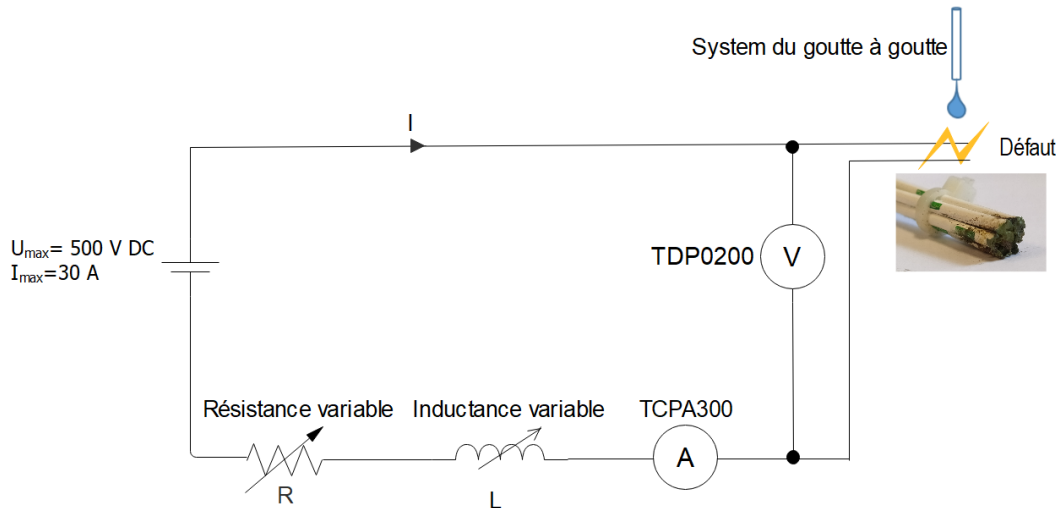


Figure 5.63 : schéma électrique du dispositif expérimental permettant l'étude de l'« arc tracking » humide avec une charge RL variable.

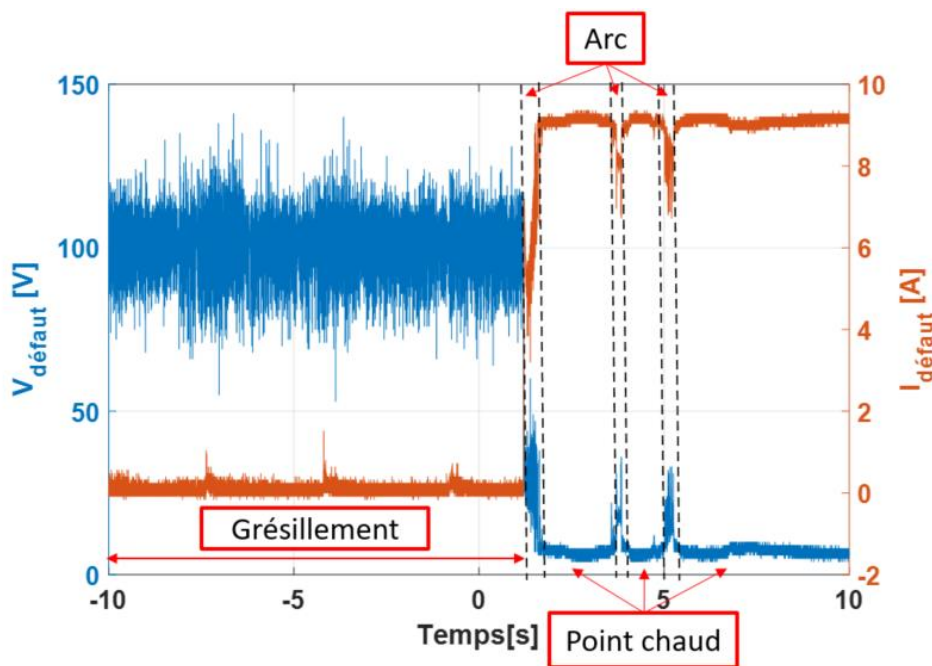


Figure 5.64 : phases d'évolution du phénomène de l'« arc tracking » humide $U_{\text{alim}} = 100 \text{ VDC}$, $I_{\text{max}} = 10 \text{ A}$. Configuration cathode au centre, $L = 888 \mu\text{H}$.

Les valeurs d'inductance que nous avons utilisées lors des essais sont de : $202 \mu\text{H}$, $888 \mu\text{H}$ et $2,5 \text{ mH}$.

Le déroulement et la chronologie des différentes phases précédemment observées ne semblent pas modifiés par la présence d'une inductance. En revanche les perturbations sur la tension de défaut engendrées lors de la phase de grésillement sont beaucoup plus importantes en présence d'une inductance comparativement à un essai sur charge purement résistive (voir figure 5.26). À titre d'illustration la figure 5.64 présente l'évolution des tensions et des courants de défaut pour un circuit inductif mettant ainsi en évidence les fortes perturbations, de l'ordre de + ou- 30 V autour de la valeur moyenne sur le signal de tension.

5.5.3.4 Influence de la polarité du câble central

Nous avons déjà évoqué les principaux résultats concernant la polarité du câble central : à savoir la décomposition de l'anode quelle que soit la polarité du câble central et également l'apparition de points lumineux directement sur la partie conductrice de l'anode.

La lecture du tableau 5.6 permet de constater que la configuration de l'échantillon a un impact notable sur l'évolution du phénomène de grésillement et sur l'évolution du défaut et ce plus particulièrement pour les « basses » tensions d'alimentation. En revanche, pour les tensions élevées (au-delà de 100 VDC) la polarité ne semble pas avoir d'impact sur l'évolution du défaut.

On peut également remarquer que pour les niveaux de tensions élevées la phase de grésillement ne dure pas suffisamment longtemps ce qui conduit à ne jamais atteindre la troisième étape (apparition des points lumineux sur l'âme du câble) dans laquelle la décomposition de l'anode liée à la polarité de l'échantillon est observée.

5.5.3.5 Influence de la nature du liquide de contamination

Dans la réalité, un défaut peut être exposé à des sources d'humidité très variables, par exemple un niveau de salinité peu important (donc une conductivité réduite). Dans le cadre des essais précédents nous avons utilisé de l'eau salée à une concentration de 3% de Na-Cl comme préconisé dans la norme. Nous avons aussi réalisé des essais en utilisant de l'eau du robinet et de l'eau distillée comme liquides de contamination. Le tableau 5.7, rappelle les valeurs des conductivités et des résistivités de l'eau de mer, de l'eau salée à 5% et de l'eau de robinet. La principale différence observée réside dans la présence d'une phase de grésillement nette même pour des valeurs élevées de la tension d'alimentation ($U_{alim} = 490$ VDC et $I_{max} = 10$ A).

Tableau 5.7 : caractéristique de la conductivité de l'eau de mer, de l'eau salée à 5% et de l'eau de robinet.

Solution	Conductivité
Eau de mer	56 mS/cm
Eau salée NaCl à 5 %	70 mS/cm
Eau de robinet, variations possible en UE	100 – 3000 μ S/cm

Le tableau 5.8 résume les principales observations en fonction de la nature de l'eau utilisée. On y montre l'influence de la nature de liquide de contamination sur la phase de grésillement.

Tableau 5.8 : Influence de la nature du liquide de contamination sur la phase de grésillement.

Eau salée	Eau du robinet	Eau distillée
<ul style="list-style-type: none"> Grésillement avec des courants aux alentours de 200 mA, Pas de grésillement pour certaines conditions de tension et de courant 	<ul style="list-style-type: none"> Grésillement pour tous les niveaux de tension 270/490 VDC Commence par des courants aux alentours 100 mA Au début du grésillement pas de point lumineux juste vaporisation de l'eau 	<ul style="list-style-type: none"> Grésillement pour tous les niveaux de tension 270/490 VDC Commence par des courants très faibles 50mA Au début du grésillement pas de point lumineux juste vaporisation de l'eau

À titre d'illustration, la figure 5.65 présente une série de photographies de la section du faisceau de câbles lors de la phase de grésillement quand la contamination est faite avec de l'eau du robinet. Les caractéristiques de l'alimentation sont $U_{alim} = 490$ VDC et $I_{max}=10$ A.

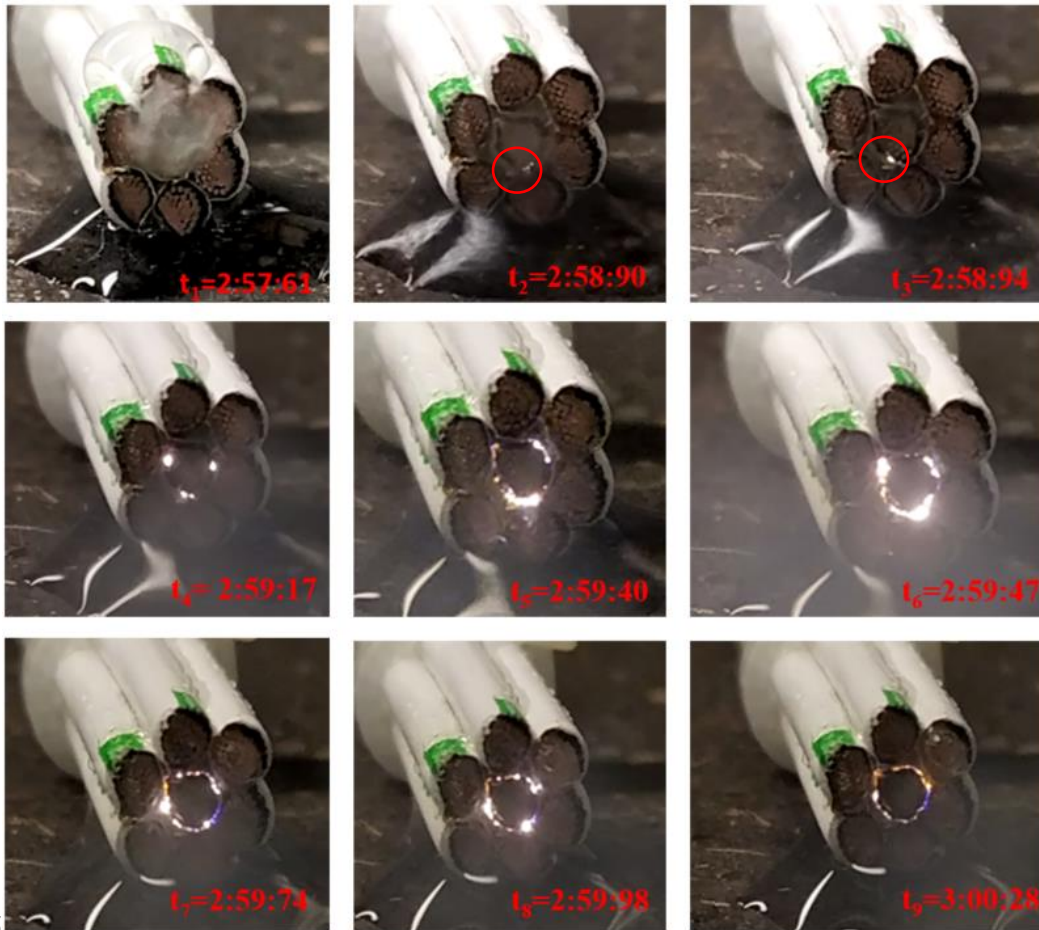


Figure 5.66 : photographies lors de la phase de grésillement quand l'eau du robinet est utilisée. Conditions expérimentales : $U_{alim} = 490$ VDC, $I_{max} = 10$ A, polarité anode au centre.

Pour le domaine de tension exploré, on constate que l'utilisation d'eau du robinet a tendance à faire durer plus longtemps la phase de grésillement (vaporisation de l'eau puis apparition de points

lumineux) comparativement au cas où l'on utilise de l'eau salée à 3% de NaCl. Cependant, on retrouve les différentes phases observées avec de l'eau salée mais elles apparaissent pour des tensions plus élevées : apparition du grésillement, augmentation du nombre de points lumineux conduisant à un « anneau lumineux » autour de l'isolant du câble central.

La phase après le grésillement est décrite à l'aide de la figure 5.67 sur laquelle on peut voir un point chaud et un départ de feu.



Figure 5.67 : photographies d'un point chaud à gauche et d'un départ de feu accompagné par un point chaud à droite, l'état final est un court-circuit par pont fondu. Les conditions expérimentales : $U_{alim} = 490$ VDC, $I_{max} = 10$ A, polarité anode au centre.

La figure 5.68 suivante montre un enregistrement correspondant à l'enchaînement des différents évènements possibles.

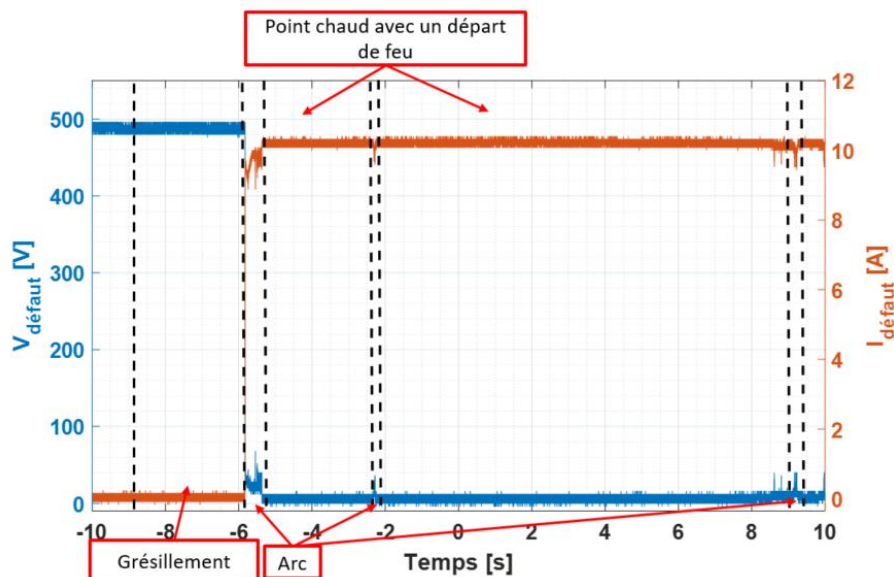


Figure 5.68 : évolution du courant et de la tension d'un défaut en fonction de temps vers un état final de court-circuit par un pont fondu. Les conditions expérimentales : $U_{alim} = 490$ VDC, $I_{max} = 10$ A, polarité anode au centre.

Résumé intermédiaire :

Dans cette partie, nous avons étudié les influences respectives de différents paramètres. Parmi les plus influents on peut citer :

- la tension d'alimentation,
- le courant de court-circuit.

Et dans une moindre mesure :

- la polarité du câble central de l'échantillon,
- la nature de la charge,
- la nature du liquide de contamination.

5.6 Conclusions

L'objectif poursuivi lors de cette étude n'était pas de caractériser différents types de câbles (isolant + matériau conducteur) vis-à-vis de leurs aptitudes à « résister » à l'apparition d'un défaut d'arc. Il s'agissait plutôt d'observer et d'étudier l'évolution des différents phénomènes physiques apparaissant en fonction de divers paramètres tels que l'intensité du courant, la tension d'alimentation, la pression etc... dans le cas d'une alimentation en régime DC.

Pour cela un dispositif permettant de reproduire les conditions imposées dans les normes AC a été mis au point. Sur ce dispositif deux modes d'amorçage sont disponibles : amorçage dit par voie humide et amorçage par voie sèche (guillotine). De plus le dispositif a été conçu pour pouvoir prendre place dans l'enceinte permettant de descendre en pression.

Les travaux présentés dans ce chapitre ne concernent hélas, pour des questions de temps, que des résultats obtenus par amorçage par voie humide à pression atmosphérique.

Les premiers essais ont mis en évidence tout un ensemble de phénomènes précurseurs à l'apparition de l'arc et nous nous sommes donc naturellement penchés sur l'observation et l'étude de ces phénomènes. Ces phénomènes nous ont paru intéressants dans la mesure où ils se sont avérés capables de causer des dommages importants au faisceau de câbles.

Les différentes phases qui apparaissent ont été décrites en détail et plus particulièrement une phase dite de « grésillement » qui précède la phase d'arc. Cette phase précurseur de l'arc et dont la durée peut être de quelques millisecondes à plusieurs minutes s'avère plus « discrète » en terme de signaux électriques que la phase d'arc elle-même, mais peut engendrer des dégâts importants. L'étude détaillée de l'évolution de cette phase a été faite mettant en évidence l'apparition et la multiplication de zones lumineuses, associées au passage de courant entre les câbles du faisceau. Lors de cette phase, la dégradation de l'anode peut être d'autant plus importante que la durée de la phase sera longue. Nous avons divisé cette phase en trois étapes possibles distinguables selon les critères suivants : les niveaux de perturbations sur les signaux électriques, les phénomènes physiques observables et leurs localisations :

- La 1^{ère} étape présente peu de perturbations sur les signaux électriques, elle est caractérisée par une évaporation lente du liquide de contamination et l'apparition d'une sorte de « mousse » sur le défaut. À la fin de cette étape, on assiste à l'apparition des points lumineux (qui provoque le « grésillement » sur la surface d'isolant du câble central) et à l'augmentation des perturbations des signaux électriques.

- La 2^{ème} étape est caractérisée par un nombre plus grand de points lumineux. La fin de cette étape se distingue par l'apparition d'une forme d'anneau lumineux sur la surface de l'isolant du câble central. Ceci s'accompagne de plus de perturbations des signaux électriques avec des pics de courant dont l'intensité peut atteindre l'ampère.
- La 3^{ème} étape est caractérisée par l'apparition des points lumineux sur la surface de l'anode, une intensité du courant de défaut plus élevée que pour les autres étapes de grésillement avec des pics de courant dont l'ordre de grandeur peut atteindre quelques ampères. Cette étape est caractérisée également par une décomposition de l'anode.

Les phases observées ensuite : une phase d'arc électrique suivie soit d'un court-circuit soit de l'apparition d'un point chaud lui-même pouvant conduire à un départ de feu. L'état final est majoritairement un état de court-circuit entre certains câbles du faisceau. Ceci est potentiellement lié à la limitation de courant que nous nous sommes imposés. En l'absence de cette limitation il est fort probable que cet état ne soit pas final et que les durées d'arc et de points chauds soient fortement augmentées.

La figure 5.69 permet de synthétiser les différentes évolutions possibles que nous avons observées entre les multiples phénomènes susceptibles de se produire.

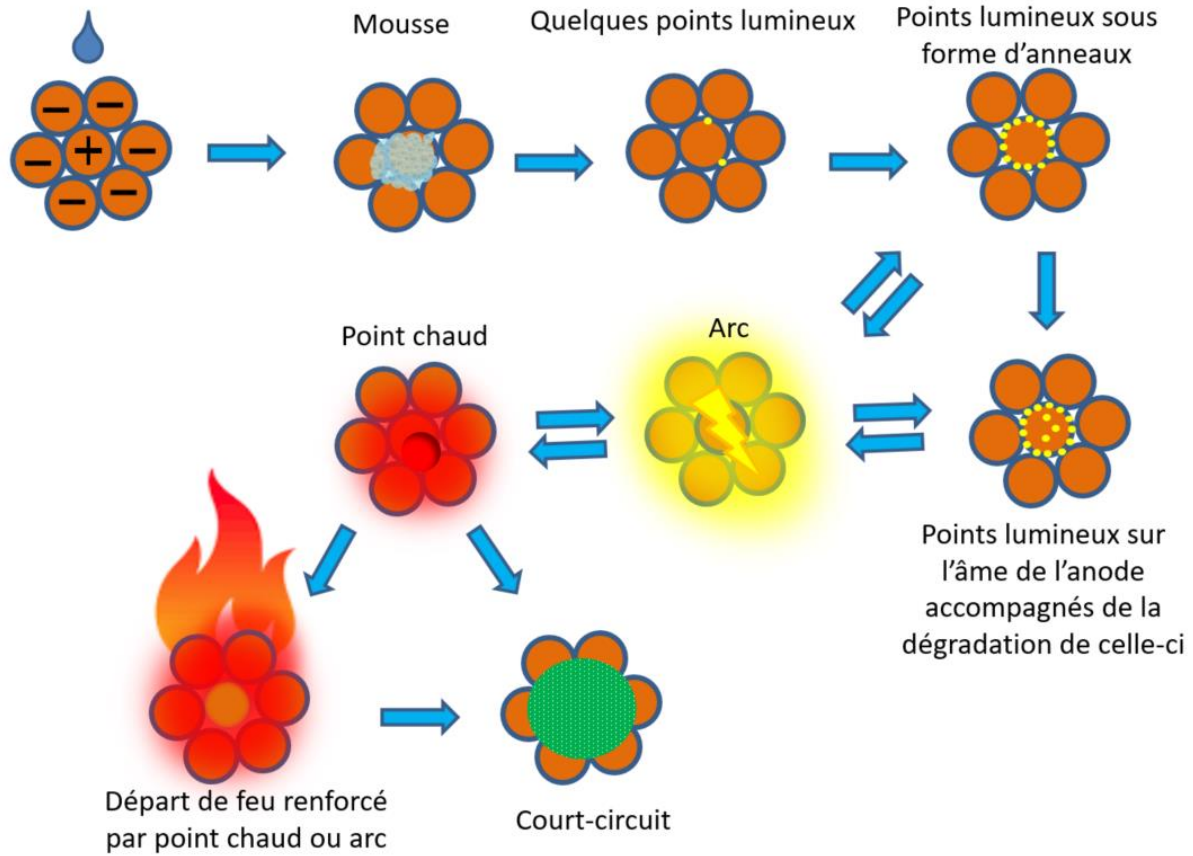


Figure 5.69 : schéma de synthèse des principales étapes de l'évolution d'un défaut.

Il paraît important de noter que des dommages conséquents peuvent être causés au faisceau de câbles bien avant l'apparition d'un défaut d'arc. Ceci met en évidence l'intérêt qu'il pourrait y avoir à détecter un tel phénomène de façon à prévenir un endommagement.

Conclusion générale

Les travaux menés durant cette thèse ont été réalisés dans le contexte de l'évolution vers un « avion plus électrique », nécessitant des sauts technologiques importants au niveau des réseaux électriques embarqués pour assurer principalement des fonctions non propulsives (pressurisation, dégivrage, démarrage des moteurs, commandes de vol, actionnement des trains d'atterrissage, etc.). Le niveau de tension va augmenter fortement passant à 230 VAC et à +/- 270 VDC ou 0 – 540 VDC (au lieu de 28 VDC et 110 VAC actuellement). Avec ces nouvelles conditions les problèmes liés à l'apparition des défauts d'arc revêtent un aspect crucial. Non seulement l'amorçage d'un arc sera plus aisé, mais son maintien sera facilité, augmentant aussi la durée pendant laquelle il se propagera et endommagera le système. Les travaux ont porté sur des études de caractérisation expérimentale de l'arc électrique en condition aéronautique. Ils se divisent sur quatre axes principaux : l'étude expérimentale du déplacement de l'arc, l'étude de la stabilité, l'extension spatiale et l'extinction de l'arc électrique, l'étude de la caractérisation $U=f(I)$ et l'étude de l'apparition et de l'évolution du défaut d'arc initié par voie humide.

Dans la partie de caractérisation du déplacement d'arc entre deux barreaux sous l'effet de son propre champ magnétique, nous avons présenté une description des différents comportements de l'arc en fonction de plusieurs paramètres tels que : la pression (de quelques hectopascals à la pression atmosphérique), l'intensité du courant et la distance inter-électrodes sous une tension d'alimentation de 540 VDC. Parmi ces paramètres la pression est le facteur le plus influent sur le comportement de l'arc :

- plusieurs modes de déplacement ont été observés concernant le pied anodique : par sauts (avec coexistence de deux pieds lors du saut), de façon continue ou un mélange des deux suivant la pression (le pied cathodique de l'arc se déplaçant d'une façon continue quelles que soient les conditions étudiées).
- La vitesse de déplacement et le sens de déplacement changent en fonction de la pression : d'un déplacement dans le sens de la force de Lorentz vers un mouvement rétrograde en passant par une stagnation de l'arc où il reste à sa position initiale.
- La structure de l'arc se modifie : les pieds d'arc sont concentrés à pression atmosphérique et de plus en plus diffus quand la pression diminue. On observe même plusieurs arcs en parallèles lorsque la pression est de l'ordre d'un hectopascal.

Nous avons étudié l'influence de la pression, de la valeur de l'intensité du courant et des conditions de séparation des électrodes sur la longueur de stabilité, la distance inter-électrodes à l'extinction et de l'énergie dissipée dans l'arc.

- Concernant l'instabilité de l'arc, nous avons constaté que l'arc développe une instabilité à partir d'une certaine valeur de distance inter-électrodes pour une faible vitesse d'ouverture des électrodes (50 mm/s), la longueur de la colonne d'arc peut arriver au double de la distance inter-électrodes, en revanche pour une vitesse d'ouverture des électrodes élevée (600 mm/s) aucune instabilité d'arc n'est observée, donc la longueur de la colonne d'arc est égale à la distance inter-électrodes avec une forme quasi axisymétrique, l'arc est considéré dans ce cas comme « stable ».
- L'étude de l'impact de la pression sur la longueur inter-électrodes à l'extinction a montré qu'en basse pression la distance inter-électrodes à l'extinction augmente, particulièrement pour une intensité de courant élevée, évidemment cela conduit à une durée de vie de l'arc plus longue et par conséquent une énergie dissipée dans l'arc plus importante.

Nous avons étudié l'influence des conditions de pression et l'influence d'une charge inductive sur la capacité de coupure d'un contacteur habituellement utilisé dans le milieu ferroviaire :

- Nous avons observé une légère augmentation du temps de coupure avec la diminution de la pression. Cette augmentation du temps de coupure n'est réellement notable que si la valeur de l'inductance est élevée.
- L'influence de la pression : nous avons constaté une augmentation de 50 % sur la durée de coupure de l'arc à une pression de 200 hPa par rapport à la pression atmosphérique. Au-dessus de 200 hPa, la pression n'a pas d'effet dégradant sur l'efficacité de la coupure, ce dispositif pourra donc être utilisé pour des applications avioniques, sur des hélicoptères par exemple, mais n'est pas adapté pour des avions qui dépassent des altitudes qui correspondent à des pressions en dessous de 200hPa.

Une contribution à la caractérisation de l'arc électrique « libre » dans l'air a été présentée, pour des distances inter-électrodes plus grandes, des pressions plus basses et des courants plus élevés que ceux existant dans la littérature scientifique. Une partie a été consacrée à l'étude bibliographique qui rassemble de multiples travaux sur ce sujet. L'objectif général de cette caractérisation est de proposer une relation permettant d'exprimer la tension d'arc en fonction des paramètres que sont la pression, la distance inter-électrodes et l'intensité du courant d'arc, pour un arc le plus proche possible d'un arc « stationnaire », en se basant sur un ensemble de mesures expérimentales. La méthode utilisée se compose d'une phase de collecte de données expérimentales sur lesquelles nous appliquons un « ajustement » et d'une phase d'exploitation en vue d'obtenir le champ électrique dans la colonne en fonction des différents paramètres. Nous avons proposé une formule générale

permettant de prendre en compte les dépendances des différents paramètres vis-à-vis de la pression. Comme il ne peut s'agir d'une expression très précise, nous avons aussi tenté d'en donner les limites.

Une partie de ce manuscrit était dédiée aux études de l'évolution des défauts d'arc initiés par voie humide sur des câbles de type aéronautique. Nous avons présenté un rappel bibliographique concernant les différents types de défauts d'arcs rencontrés, les travaux précédemment proposés en régime AC et en régime DC ainsi que les normes actuellement existantes (principalement en régime AC). Au cours des essais d'arc tracking humide, nous avons pu observer plusieurs phases d'évolution :

- une phase précurseur de la phase de l'arc, dénommée phase de « grésillement ». Cette phase est divisée en trois étapes. La phase de grésillement peut conduire à une forte décomposition des câbles sous polarité anodique, d'où l'intérêt qu'il pourrait y avoir à détecter un tel phénomène de façon à prévenir un endommagement.
- Une phase d'arc suit systématiquement la phase de grésillement.
- Une phase de point chaud et/ou de départ de feu : la phase de point chaud est la cause directe d'apparition d'un départ de feu sur l'ensemble des tests que nous avons effectués. Dans le cas où le feu n'est pas renforcé par un point chaud ou par la réapparition d'un arc, il s'éteint de lui-même (vu la nature de l'isolant des câbles).
- Une phase finale de court-circuit ou de circuit ouvert : le court-circuit est la phase finale la plus fréquente sur l'ensemble des essais, il est engendré par un pond fondu entre les câbles ou bien à travers une matière verdâtre humide. Le circuit ouvert est une phase finale moins observée, on rappelle qu'elle est causée par la rupture de continuité électrique du circuit suite à la décomposition de la matière de l'anode durant la phase de grésillement.

Plusieurs facteurs peuvent influencer l'évolution de défaut d'arc tracking tels que : la tension d'alimentation et le courant qui sont les facteurs les plus influents, la polarité du câble central de l'échantillon, la nature du liquide de contamination et la nature de la charge.

Perspectives

Les travaux présentés au cours de ce manuscrit représentent une contribution à la caractérisation de l'arc en condition sub-atmosphérique, qu'il s'agisse d'un arc de coupure ou d'un défaut d'arc. Plusieurs domaines ont été explorés ouvrant ainsi de nouvelles pistes de recherche.

Concernant l'étude du déplacement de l'arc entre deux barreaux :

- L'augmentation de l'intensité du courant d'arc présente un intérêt certain. Dans ce but l'emploi d'un banc de capacités présent au laboratoire est envisagé permettant ainsi de générer une impulsion de courant semi-sinusoïdale et d'atteindre une intensité crête de l'ordre de 20 kA pour une durée de l'ordre de 20 ms.
- Pour se rapprocher des applications « aéronautiques » il serait aussi intéressant d'étudier l'influence du matériau d'électrode et de sa géométrie ainsi que l'influence de la présence « d'obstacles » sur le trajet de l'arc.

Concernant la caractérisation de l'arc libre en condition de pression aéronautique :

- Les circuits concernés soit par la coupure soit par l'apparition de défauts ne sont évidemment pas uniquement résistifs. Une prochaine étape pourrait être d'introduire une inductance dans le circuit, tout en ayant conscience que notre dispositif de création de l'arc (par séparation de deux électrodes) est déjà sous dimensionné dans certaines conditions.
- Les défauts d'arc ont la plupart du temps des extensions spatiales plus faibles que les longueurs d'arc que nous avons mesurées. Une attention particulière pourrait être portée sur le comportement d'arcs électriques de longueur de l'ordre de quelques millimètres et notamment sur les conditions d'apparition des instabilités.
- Déjà entreprises par différents auteurs (T. André¹ et H. El Bayda³⁵), l'étude des interactions entre l'arc et le milieu extérieur avoisinant pourrait représenter un intérêt certain notamment quand on observe des longueurs d'arcs pouvant être particulièrement grandes.
- En vue d'améliorer la précision de l'« ajustement » il serait intéressant d'étudier plus en détail la dépendance de la somme des chutes de tension anodique et cathodique avec la pression (et aussi le courant). Pour cela il faudra se concentrer sur la réalisation d'arcs électriques de faibles longueurs pour améliorer la précision de la mesure de la tension et aussi améliorer la précision de la mesure de la distance inter-électrodes.

- Il serait intéressant aussi de s'intéresser au « pic » de champ électrique observé en fonction de la pression. Ce « pic » ayant déjà été observé par Mossop *et al.* aux faibles valeurs de I_{arc} et d , une première étape pourrait consister à entreprendre un modèle simple d'un arc de faibles longueurs (quelques millimètres au plus).

Concernant l'étude des défauts d'arc :

- Une phase suivante va consister à les mener dans l'enceinte pour des pressions plus basses sachant que le dispositif expérimental a été conçu pour pouvoir rentrer dans l'enceinte à vide dont nous disposons. Il sera intéressant de voir dans quelle mesure la baisse de pression peut influencer sur les phases précurseurs de l'arc : non seulement sur leur existence ou chronologie mais aussi sur leur intensité. Par ailleurs, ces travaux ne représentent qu'une étape préliminaire en vue de répertorier les différents phénomènes qu'il serait important de savoir détecter suffisamment tôt en vue d'éviter l'apparition du défaut ou du moins les dégradations (voire les départs de feu) qui pourraient suivre. Les étapes suivantes sont multiples et devraient s'orienter d'avantage vers des travaux concernant la détection de ces différents phénomènes observés non seulement à l'apparition de l'arc mais aussi et surtout avant. Cela passe par la recherche de signatures propres à ces phénomènes qu'il s'agisse d'une signature électrique temporelle ou fréquentielle, acoustique, optique...

Plus généralement, nous avons récemment fait l'acquisition au GeePs d'une nouvelle caméra rapide pouvant fonctionner à des pressions de l'ordre de 100 hPa voire moins. Une telle caméra va s'avérer très utile dans tous les domaines abordés dans ce manuscrit afin de pouvoir reconstituer une image 3D de l'arc pour estimer avec précision la longueur de celui-ci notamment en présence d'instabilités. Cela conduira à une meilleure estimation du champ électrique dans la colonne. Hélas, les conditions des derniers mois n'ont pas permis de mener à bien cette étude. Enfin il peut paraître utile de réaliser des études telles que celles que nous avons menées avec des tensions plus importantes.

Référence

- [1] André « Étude des mécanismes d'entretien et de propagation d'un arc électrique de court-circuit entre câbles endommagés dans les réseaux électriques d'aéronefs », thèse Université Paul Sabatier, 2017
- [2] J. W. McBride *et al.*, « Review of arcing phenomena in low voltage current limiting circuit breakers », IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology, vol. 148, n°1, pp. 1-7, 2001.
- [3] K. Yukimura *et al.*, “High deposition rate of amorphous carbon film using a magnetically driven shunting arc discharge”, *Surface & Coatings Technology* 196 (2005) 203– 206
- [4] S W Chau *et al.* “Experimental study on copper cathode erosion rate and rotational velocity of magnetically driven arcs in a well-type cathode non-transferred plasma torch operating in air”, 2007, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 40 1944
- [5] J. A. Dobbing *et al.*, « A SWEPT STROKE EXPERIMENT WITH A ROCKET SLED”, 1978 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 10.1109/IEMC.1978.7566889
- [6] K. Koyama *et al.*, « Arc Behavior Driven by Electromagnetic Force between Rail Electrodes », IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 29, NO. 1. JANUARY 1993
- [7] P. R. Zeller *et al.*, « Arc Structure, Arc Motion, and Gas Pressure Between Laterally Enclosed Arc Runners », IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS AND PACKAGING TECHNOLOGIES, VOL. 24, NO. 3, SEPTEMBER 2001
- [8] M. Lisnyak : “ Theoretical, numerical and experimental study of DC and AC electric arcs ”, Thèse de l’Université d’Orléans, 2018
- [9] M. Gray *et al.*, “Structure of propagating arc in a magnetohydrodynamic rail plasma actuator”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 49 015202
- [10] M. Gray *et al.* « Study of the dynamic behavior of the rail plasma actuator arc », 2018, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 51 315203
- [11] Y. Choi *et al.*, “Effects of anchoring and arc structure on the control authority of a rail plasma actuator », *J. Phys. D: Appl. Phys.* 50 (2017) 355203
- [12] AE Guile *et al.* “Arc movement due to the magnetic field of current flowing in the electrodes.” Proceedings of the IEE-Part A: Power Engineering, vol. 104, no. 18, pages 533–540, 1957.
- [13] P. E. SECKER *et al.*, “ARC MOVEMENT IN A TRANSVERSE MAGNETIC FIELD AT ATMOSPHERIC PRESSURE”, The Institution of Electrical Engineers Paper No. 3044 S Aug. 1959
- [14] J.-P. Chabrierie *et al.* « Study of the arc root displacement and three-dimensional modelling of the thermal phenomena occurring in a hollow cathode submitted to an electric moving arc”, January 1999, *Journal of Physics D: Appl. Phys.* 28(5):888
- [15] O. L. Yasko “Correlation of the characteristics of electric arcs moving in transverse magnetic fields”, 1969 *Proc. IEE* 116 3 453
- [16] R N Szenté *et al.*, « The influence of the cathode surface on the movement of magnetically driven electric arcs », *J. Phys. D: Appl. Phys.* 23 (1990) 1193-1200
- [17] H.C. Spink *et al.* « The Movement of High-Current Arcs in Transverse External and Self-Magnetic Fields in Air at Atmospheric Pressure”, Aeronautical research council current papers, 1965
- [18] Guile *et al.* « High-current arcs in transverse magnetic fields in air at atmospheric pressure”, *PROC. IEE*, Vol. 116, No. 4, APRIL 1969
- [19] SV Bobashev *et al.* “ Generation of high-velocity plasma flows in railgun channels filled with gases of various density.” *Technical Physics Letters*, vol. 36, no. 1, pages 72–75, 2010
- [20] G. Daumov *et al.* “Some generalization relating to the study of electric arc”, *Zhurnal Prikladnoi*

Mekhaniki i Tekhnicheskoi Fiziki, No. 2, pp. 97-105, 1965.

- [21] Guile A E et al. , Further correlation of experimental data for electric arcs in transverse magnetic fields », *PROC. IEE*, Vol. 115, No. 9, september 1968
- [22] R. N Szente et al. « Arc velocity and cathode erosion rate in a magnetically driven arc burning in nitrogen », *J. Phys. D: Appl. Phys.* 21 (1988) 909-913.
- [23] T. J. Lewis and P. E. Seeker, “Influence of the cathode surface on arc velocity,” *J. Appl. Phys.*, vol. 32, pp. 54-64, 1960.
- [24] A. H. Hitchcock, M. S. I. Rageh, A. E. Guile et al., “Effects of cathode oxide films on forward and retrograde motion of arcs,” *Gas Discharge*, pp. 293-295, 1978.
- [25] C. Lichun et al. “Motion of magnetically driven arcs on oxidized electrodes”, *IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, HYBRIDS. AND MANUFACTURING TECHNOLOGY. VOL. CHMT-5, NO. 1, MARCH 1982*
- [26] A M Essiptchouk *et al.*, « A new formula for the rotational velocity of magnetically driven arcs », *J. Phys. D: Appl. Phys.* 33 (2000) 2591–2597
- [27] A. E. Robson, “The motion of a low-pressure arc in a strong magnetic field”, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 11, pp. 1917-1923, 1978.
- [28] R. P. Carter et al., “Arc motion reversal in crossed electric and magnetic fields in an argon atmosphere from 200 to 900 Torr”, *J. Appl. Phys.*, Vol. 44, No. 11, November 1973
- [29] M. G. Drouet, « The physics of retrograde motion of the electric arc », *Japanese Journal of applied pPhysics*, vol. 20, n°6, 1981.
- [30] M. G. Drouet, “The Physics of the Retrograde Motion of the Electric Arc”, *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. PS-13, NO. 5. OCTOBER 1985*
- [31] B. Jüttner *et al.* , “The retrograde motion of arc cathode spots in Vacuum », *J. Phys. D: Appl. Phys.* 33 (2000) 2025–2036.
- [32] Blix et al. « The Magnetic Deflection of short Arcs Rotating between Annular Electrodes above and below Atmospheric Pressure », *AERONAUTICAL RESEARCH COUNCIL Current Papers*, 1966
- [33] R. Landfried *et al.*, « Parametric study of electric arcs in aeronautical condition of pressure », *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 67, 20802 (2014).
- [34] A. M. Gouega et al. “Study of the electrode gap influence on electrode erosion under the action of an electric arc” *Eur. Phys Journal: Appl.Phys.* Volume 11, Issue 2, August 2000 , pp. 111-12
- [35] H. El Bayda “ Étude du transfert d'énergie entre un arc de court-circuit et son environnement : application à l'Arc Tracking », *Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier*, 2012
- [36] C. P. McCabe *et al.*, “A Study of Over-Current Protection, Electrical Arcing, and Fire Protection”, 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 18th, 12 - 15 April 2010, Orlando, Florida.
- [37] A. Stokes and W Oppenlander, « Electric arcs in open air », *J. Phys. D: Appl. Phys.* Vol. 24, 1991, pp. 26-35
- [38] El Bayda *et al.*, “Energy losses from an arc tracking in aeronautic cables in DC circuits », *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 20, No. 1, February 2013
- [39] V.E. Phillips *et al.* “Peak voltage for DC Arc Interruption for Aircraft”, *Trans. AIEE* 63, pp. 944 - 949, 1944
- [40] J.S. Quill *et al.* « DC Arc Interruption for Aircraft » *Trans. AIEE* 63, pp. 883-888, 1944
- [41] T.R. Stuelnagel, « An Environment free 120 VDC High Performance Limit Switch », *Trans. AIEE* 69, pp. 1289-1293 (1950)
- [42] B.S. Beal *et al.* “New circuit breaker for aircraft electric systems” *Electrical Engineering (Volume: 71, Issue: 9, Sept. 1952)*, pp.776-779
- [43] T. Klonowski *et al.* “Characterization of HVDC contactors in depressurized environment”, More

- Electrical Aircraft, Toulouse 5-6 février 2019.
- [44] J. Swingler *et al.*, The evolution of contact erosion during an opening operation at 42 V, in Proceedings of 51th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2005
- [45] T.J. Schoepf, “Electrical contacts in the automotive 42 V DC PowerNet”, in Proceedings of the 21th International Conference on Electrical Contact, 2002, pp. 43–55
- [46] L. Doublet *et al.*, “Electrical arc phenomena and its interaction on contact material at 42 V DC for automotive applications”, in Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contact, 2004, pp. 8–14
- [47] P. Colombo *et al.*, “Arcing study in high current electromechanical switching for future 14–4 2V Dual Voltage Systems”, SAE Technical Paper 2002-01-0520, 2002.
- [48] Ph. Teste *et al.*, « Study of the properties of high intensity switching under 36 VDC. Influence of the contact material », Eur. Phys. J. Appl. Phys. 41, 251 (2008).
- [49] N. Benjemaa *et al.*, “Break Arc Study for the New Electrical Level of 42 V in Automotive Applications”, Proceeding the IEEE Holm Conference 2001, pp. 50–55
- [50] M. Hasegawa *et al.*, “Break arc behaviors of Ag and AgSnO₂ contact pairs under different contact opening speeds in DC load circuits”, 27th International Conference on Electrical Contacts, June 22 – 26, 2014, Dresden, Germany
- [51] M. Hasegawa *et al.*, « Influences of Contact Opening Speeds in the Range of 0.5 to 200 mm/s on Break Arc Behaviors of AgSnO₂ Contacts in DC Conditions », IEEE Holm Conference on Electrical Contacts 2015.
- [52] H. Liang *et al.* “Research on the Relationship between Contact Breakaway Initial Velocity and Arc Duration”, IEEE Holm Conference on Electrical Contacts 2003.
- [53] D. Sallais *et al.* “An arc study at high DC current levels in automotive applications”, Proceedings the IEEE Holm Conference 2005, pp. 329-334.
- [54] J.W McBride, S.M Sharkh, “Influence of contacts opening velocity on arc characteristics”, Proceedings of the 16th International Conference on Electrical Contact 1992, pp. 395–400.
- [55] R. Boukadoum *et al.*, “Role of the pressure in the DC electric arc characteristics application: case of the more electrical aircraft”, in Proceedings of 28th International Conference on Electrical Contact, 2016, pp. 153–158
- [56] A.M. Howatson *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. 9, 1101 (1976)
- [57] T. Klonowski *et al.*, IEEE Trans. Vehic. Technol. 56, 2017 (2007)
- [58] A. Sawicki, Biuletyn Instytutu S SpaWalnictwa, vol. 6, 2013
- [59] P.M.Hall *et al.*, Proc. of the fifty WVU Conf. on Coal Mine Electrotechnology, Morgantown, WV 1978
- [60] H. Ayrton, *The Electric Arc*. London, U.K.: Electrician, 1902
- [61] R. H Eather “THE SILENT AND HISSING D.C. ELECTRIC ARC”, *Aust. J. Phys.*, 1963, vol 16, pp. 228-39
- [62] S. C. Baker “Direct-reading metal spectroscopy with a dc arc”, *British journal of Applied Physics*, vol. 5, June 1954, pp. 215-219
- [63] C. P. Steinmetz, “Transformation of electric power into light”, *Trans.Amer. Inst. Elect. Eng.*, vol. 25, pp. 789-813, 1906.
- [64] W. B. Nottingham “A new equation for the static characteristic of the normal electric arc” *Trans AIEE*, 1923, pp. 302-310
- [65] J.D. Cobine, *Gaseous Conductors*, 1958, New York : Dover
- [66] J. Paukert, “The Arc Voltage and Arc Resistance of LV Fault Arcs”, *Proceedings of the 7th International Symposium on Switching Arc Phenomena*, 1993, pp. 49-51
- [67] W. Rieder « Leistungsbilanz der Elektroden und Charakteristiken frei brennender Niederstrombögen », *Zeitschrift für Physik* Bd. 146 S 629-643 (1956)

- [68] I. A. Mossop, F. D. Gill, "The current and voltage relationships of a static DC arc between copper and silver electrodes in air at 1-760 mm Hg",
- [69] R. Holm "Electric Contacts", Springer Verlag, 1967
- [70] A. Warrington, "Reactance relays negligibly affected by arc impedance", *Electrical World*, Sept. 1931, pp. 502-505
- [71] A. Warrington, *Protective Relays. Their theory and practice, Volume one*, Chapman & Hall Ltd., London, 1976
- [72] J. Blackburn, T. Domin, *Protective relaying. Principles and applications*, third edition, Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton, 2007
- [73] Y. Goda, M. Iwata, K. Ikeda and S. Tanaka, "Arc Voltage Characteristics of High Current Fault Arcs in Long Gaps", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 15, NO. 2, APRIL 2000
- [74] V. Terzija and H-J Koglin "On the Modeling of Long Arc in Still Air and Arc Resistance Calculation", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 19, NO. 3, JULY 2004
- [75] L.E. Fisher, Resistance of low voltage AC arcs, *IEEE Transactions on Industry and General Applications*, Vol. IGA-6, n°.6, Nov-Dec 1970, pp 607-616
- [76] A. Gaudreau and B Koch, « Evaluation of LV and MV arc parameters », *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 23, NO. 1, JANUARY 2008
- [77] J.R. Eaton et al. "Experimental Studies of Arcing Faults on a 75 kV Transmission System," *Transaction AIEE*, December 1931.
- [78] A. Von Engel, S.L. Zhu « Fall regions and electrode effects in atmospheric arcs of vanishing length », 1981 *J. Phys. D: Appl. Phys.* 14 2225
- [79] E.W. Gray, *J. Appl. Phys.* 43, 4573 (1972) "Voltage fluctuations in low-current atmospheric arcs", *Journal of Applied Physics* 43, 4573 (1972); <https://doi.org/10.1063/1.1660966>
- [80] P.J. Boddy, T. Utsumi "Fluctuation of Arc Potential Caused by Metal-Vapor Diffusion in Arcs in Air", *J. Appl. Phys.* 42, 3369 (1971)
- [81] D. Piccoz « Contribution à l'étude des phénomènes de répulsion et de soudure concernant les contacts dans un appareil de coupure », thèse de doctorat Université Paris 6, 1997.
- [82] J P Novak and G Ellena "Arc field measurement with a simple experimental arrangement", 1987 *J. Phys. D: Appl. Phys.* 20 462
- [83] M. Dutoya, G. Mazeau, et C. Vlacich, Method and device for detecting electric arc phenomenon on at least one electric cable. Google Patents, 2009.
- [84] W. Yongxing, D. Enyuan, C. Jiyuan, S. Jiyuan, et D. Koenig, « Arc tracking properties of the aging wires in aircraft », in 2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics" (ISSCAA), 2008, p. 1-5.
- [85] F. Koliatene : « Contribution à l'étude de l'existence de décharges partielles dans les systèmes de l'avionique ». – Thèse Université Paul Sabatier 2009
- [86] E. Silly : « Etude et caractérisation des décharges partielles et du vieillissement du polyimide en environnement aéronautique », Thèse Université Paul Sabatier, 2012
- [87] R. Boukadoum « Étude des décharges partielles et de leur transition à l'arc dans la connectique aéronautique du futur » Université Paris Sud, 2018
- [88] M. Karadjian : « Endurance et tenue diélectrique de l'isolation de câbles électriques pour l'aéronautique », thèse Université Paris Sud, 2018
- [89] F. Dricot *et al.* « Survey of arc tracking on aerospace cables and wires », *IEEE Trans. on Dielectric Insulation*, 1994, vol. 1, n°5, pp 896-903
- [90] D. Koller *et al.* "A study of time/current characteristics of the ignition processes in cellulosic material caused by electrical arcing for application in 240 V arc fault circuit interrupters", 53ième IEEE Holm Conference, 2007, pp. 105-114
- [91] J. Andrea: "Génération, modélisation et détection des défauts d'arc électrique : application aux systèmes embarqués aéronautiques », thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2011
- [92] J. Shea : « Identifying Causes for Certain Types of Electrically Initiated Fires in Residential

- Circuits”, Conference Proceedings on “Aged Electrical Systems,” NFPA, Chicago, Oct. 2006.
- [93] Rajini, V.; Kanchana, K.; Gowrishree, V.; Udayakumar, K. Comparison of surface tracking in polymeric insulating materials. In Proceedings of the 2004 International Conference on Power System Technology, PowerCon 2004, Singapore, Singapore, 21–24 November 2004; Volume 2, pp. 1513–1517.
- [94] Wang Yongxing, Dong Enyuan, Cong Jiyuan, Zou Jiyuan, et D. Koenig, « Arc tracking properties of the aging wires in aircraft », in 2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics, 2008. ISSCAA 2008, 2008, p. 1-5.
- [95] S. Kumagai *et al.* “Tracking and erosion of HTV silicone rubber and suppression mechanism of ATH.” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2001, 8, 203–211.
- [96] A. Hammoud et M. Stavnes : « A. N. Hammoud, M. W. Stavnes, J. R. Ide, et E. Muegge, « Performance of partially fluorinated polyimide insulation for aerospace applications », in Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report., 1995, p. 262–265.
- [97] D. Konig, F. R. Frontzek, H. J. Reher, et M. D. Judd, « A new test method for the assessment of the arc tracking properties of wire bundles in air, oxygen enriched atmospheres and vacuum », in Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh, PA USA, 1994, p. 145–150
- [98] T. André *et al.* « Arc tracking energy balance for copper and aluminum aeronautic cables article », J. Phys.: Conf. Ser. 825 012001
- [99] Josef Hanson and Dieter Koenig « Fault Arcs Effects in Cable Bundles for Space Applications in Vacuum” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation bbl. 4 NO. 4, August 1997
- [100] P. L. Cahill, J. H. Dailey « Aircraft electrical wet wire arc tracking Technical report, DOT/FAA/CT-88/4, 1988.

Résumé

Titre : Contribution à l'étude des arcs électriques sur réseau HVDC (540 VDC) en conditions aéronautiques

Mots clés : HVDC, arc électrique, aéronautique, coupure, défauts d'arc

Résumé : Les travaux menés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre de l'augmentation de la part de l'énergie électrique embarquée dans les réseaux aéronautiques et des augmentations de tension qui en découlent (passage à 230V AC et à +/- 270V DC ou 0-540V DC). Dans ces conditions les aviateurs vont être confrontés à des difficultés techniques concernant la commutation de fortes intensités en régime DC sous de fortes tensions et au risque de défaut d'arc électrique au sein des réseaux. Les travaux présentés dans ce travail concernent la caractérisation des arcs électriques alimentés sous 540 VDC en conditions de pression aéronautiques de 100 hPa à 1000 hPa. Les études menées dans cette thèse sont principalement à caractère expérimental et pour ce faire, une plateforme expérimentale a été mise au point en vue de réaliser dans des conditions de pression contrôlables des arcs en régime DC sous des tensions continues (jusqu'à 540 VDC) et des intensités pouvant atteindre 300 A. Les principaux axes de recherche sont les suivants : i) la caractérisation d'un arc électrique sous 540 VDC (extinction de l'arc, extension spatiale de l'arc, énergie dissipée dans l'arc et caractérisation électrique), ii) l'étude du déplacement d'un arc en conditions de pression aéronautique, iii) l'étude des phénomènes qui précèdent l'apparition du défaut d'arc électrique dans le cas d'un amorçage de défauts d'arc par voie humide comme cela est préconisé dans les normes aéronautiques

Title : Contribution to the study of electrical arcs on HVDC (540 VDC) in aeronautical conditions

Keywords : HVDC, electric arc, aeronautic, switching, arc fault

Abstract : The work carried out in this thesis concerns the consequences of the increase of the part of electrical energy embbed in aeronautical networks and of the resulting voltage increases (change to 230V AC and +/- 270V DC or 0-540V DC). Under these conditions, aircraft manufacturers will be faced with technical difficulties concerning the switching of high currents in DC under high voltages and the risk of arcing faults within the networks. The work presented here concerns the characterization of electric arcs supplied under 540 VDC under aeronautical pressure conditions from 100 hPa to 1000 hPa. The studies carried out in this thesis are mainly of an experimental nature and for this purpose, an experimental platform has been developed in order to carry out under controlled pressure conditions, arcs in DC regime under DC voltages (up to 540 VDC) and currents up to 300 A. The main lines of research are as follows: i) characterization of an arc under 540 VDC (arc extinction, spatial extension of the arc, energy dissipated in the arc and electrical characterization), ii) study of the displacement of an arc under aeronautical pressure conditions, iii) study of the phenomena that precede the appearance of the arc fault in the case of wet arc fault initiation as recommended in aeronautical standards.