HAL
open science

Comportement d'un arc électrique impulsionnel de forte intensité : cas du disjoncteur modulaire

Gauthier Déplaude

▶ **To cite this version:**

Gauthier Déplaude. Comportement d'un arc électrique impulsionnel de forte intensité : cas du disjoncteur modulaire. Plasmas. Université Paris Saclay (COmUE), 2017. Français. NNT : 2017SACLS188 . tel-01829287

HAL Id: tel-01829287

https://theses.hal.science/tel-01829287

Submitted on 4 Jul 2018

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.

NNT : 2017SACLS188

Thèse de doctorat
de l'Université Paris-Saclay
préparée à l'Université Paris-Sud

École doctorale n°575
Physique et ingénierie : électrons, photons, sciences du vivant
Spécialité de doctorat : Physique

présentée par

M. Gauthier Déplaude

Comportement d'un arc électrique impulsionnel de forte intensité : cas du disjoncteur modulaire

Thèse présentée et soutenue à Obernai, le 3 juillet 2017.

Composition du jury :

M. Pascal André	Professeur, Université Clermont-Auvergne – Président
M. Yann Cressault	Maître de conférence, Université Paul Sabatier – Rapporteur
M. Dunpin Hong	Professeur, Université d'Orléans – Rapporteur
M. Philippe Dessante	Professeur, CentraleSupélec – Examinateur
M. Patrice Joyeux	Ingénieur, Hager Electro SAS – Examinateur
M. Philippe Testé	Chargé de recherche, CNRS – Directeur de thèse

Remerciements

Ce travail est le fruit d'une collaboration entre la société Hager Electro SAS et le Laboratoire de génie électrique de Paris.

Je remercie la société Hager Electro SAS qui m'a offert l'opportunité de réaliser ce travail dans d'excellentes conditions. Je remercie mes responsables directs, MM. Emmanuel Roussel et Patrice Joyeux, les responsables de l'équipe des pôles de compétences, MM. Jean-Marie Roiatti, Jean-Marc Poinsignon et Denis Deckert et les responsables du département R&D, MM. Jean-François Baptiste et Olivier Pradoura.

Je remercie également les nombreuses personnes qui, au sein du département, m'ont apporté leur aide. Parmi elles, M. Vincent Boiteux, dont les conseils avisés en mécanique m'ont permis de mettre au point une chambre d'arc « du tonnerre », M. Laurent Ponsard et toute son équipe pour leurs conseils, la réalisation des composants mécaniques et les leçons d'humilité, Mme Michèle Brand pour son aide précieuse quant à l'étude métallurgique des électrodes avant et après essai, M. Nicolas Freis qui a détecté disons certaines faiblesses dans la partie électronique du montage expérimental, M. Alexandre Pupier qui a réalisé une partie des essais de court-circuit sur disjoncteurs instrumentés et enfin M. Pierre Thibaut et Mme Marion Kubler, qui ont contribué de façon significative aux résultats présentés ci-dessous, durant leurs stages respectifs.

Je remercie mon encadrant industriel, M. Patrice Joyeux.

Je remercie le personnel du Laboratoire de génie électrique de Paris, en particulier mon directeur de thèse M. Philippe Testé et son équipe, MM. Thierry Leblanc et Romaric Landfried.

Enfin, je remercie MM. Pascal André, Yann Cressault, Philippe Dessante, Dunpin Hong qui ont accepté avec beaucoup de gentillesse de participer au jury de soutenance.

À mes parents,

À mes enfants

Table des matières

Introduction générale **13**

1 Contexte technique **17**
1.1 Cadre normatif 19
1.1.1 Conditions d'essai 19
1.1.2 Exigences 20
1.2 Le disjoncteur modulaire 23
1.2.1 Principe de limitation 23
1.2.2 Augmentation de la tension d'arc 23
1.2.3 Architecture produit 25
1.2.4 Dynamique de l'arc 28
1.3 L'arc dans le déion 29
1.3.1 Courbe de coupure 29
1.3.2 Phase de fractionnement 29
1.3.3 Phase de limitation : onde de courant 30
1.3.4 Phase de limitation : tension 32
1.3.5 Dynamique de la tension d'arc 33
1.4 Conclusion 35

2 Éléments bibliographiques **39**
2.1 Tension d'arc 40
2.1.1 Distance inter-électrodes 40
2.1.2 Tension aux électrodes 40
2.1.3 Caractéristique en courant 42
2.2 Revue des phénomènes en jeu 44
2.2.1 Par composantes 44
2.2.2 Par types d'interaction 47
2.3 Dynamique à forte intensité 49
2.3.1 Arc dans le vide 50
2.3.2 Arc dans l'air 54
2.3.3 Arc impulsionnel 57

2.3.4 Fractionnement de l'arc 59
2.4 Conclusion 62

3 Outils expérimentaux 65
3.1 Chambre d'arc 66
3.1.1 Électrodes 66
3.1.2 Supports d'électrode 67
3.1.3 Vue d'ensemble 69
3.1.4 Prises de potentiel 70
3.2 Montage électrique 71
3.2.1 Banc de court-circuit 71
3.2.2 Générateur d'impulsion haute-tension 73
3.2.3 Vue d'ensemble 73
3.3 Diagnostic électrique 74
3.3.1 Sonde de courant 74
3.3.2 Sonde de tension Zener 74
3.3.3 Correction des mesures de tension 77
3.3.4 Chaîne d'acquisition 79
3.4 Analyse des électrodes 80
3.4.1 Aspect des impacts aux pieds d'arc 80
3.4.2 Interprétation de l'aspect des impacts 82
3.4.3 Forme des pieds d'arc 83
3.4.4 Taille des pieds d'arc 84
3.4.5 Coupes métallographiques 85
3.5 Imagerie rapide 86
3.5.1 Configuration 86
3.5.2 Synchronisation 88
3.5.3 Traitement des images 89
3.6 Conclusion 91

4 Dynamique de la tension d'arc 95
4.1 Configuration expérimentale 96
4.1.1 Onde de courant 96
4.1.2 Découpage en phases 97
4.1.3 Paramètres d'essai 98
4.1.4 Lecture de la tension d'arc 99
4.2 Phase de montée 101
4.2.1 Pertinence de la mesure de tension 101
4.2.2 Tension d'arc 102
4.2.3 Comparaison avec le disjoncteur 104
4.3 Phase de descente 105

4.3.1 Tension d'arc 105
4.3.2 Impact de l'intensité maximale 107
4.3.3 Comparaison avec le disjoncteur 108
4.4 Phase d'extinction 109
4.4.1 Coalescence des bains fondus 109
4.4.2 Tension d'arc 111
4.5 Conclusion 112

5 Pieds d'arc et dynamique de la colonne 117
5.1 Impacts aux pieds d'arc 118
5.1.1 Rayon des impacts 118
5.1.2 Plaquettes de fractionnement 120
5.1.3 Temps de montée 121
5.1.4 Vitesse d'expansion 123
5.2 Profondeur des impacts 124
5.2.1 Érosion des électrodes 125
5.2.2 Plaquettes de fractionnement 126
5.3 Dynamique de la colonne 127
5.3.1 Influence de l'intensité maximale 131
5.3.2 Influence du temps de montée 133
5.4 Conclusion 134

6 Influence du matériau des électrodes 137
6.1 Acier non revêtu 138
6.1.1 Caractéristique dynamique 139
6.1.2 Impacts aux pieds d'arc 140
6.2 Revêtement de surface 142
6.2.1 Tension d'arc 142
6.2.2 Impacts aux pieds d'arc 146
6.2.3 Dynamique de la section d'arc 148
6.3 Influence de l'intensité maximale 152
6.3.1 Acier non revêtu 152
6.3.2 Acier cathode nickelée 153
6.4 Champ dans la colonne 154
6.5 Influence du substrat 156
6.5.1 Tension d'arc 156
6.5.2 Section des pieds d'arc 157
6.6 Arc répétés 159
6.7 Conclusion 160

Conclusion générale 165

Références **172**

```
Let's start from the beginning again,
Jeff. Tell me everything you saw --
and what you think it means.
```

Extrait du script de *Fenêtre sur cour,*
John Michael Hayes

Introduction générale

Le disjoncteur modulaire protège les installations électriques basse-tension contre les défauts de court-circuit. Il utilise les propriétés de l'arc électrique généré dans sa chambre de coupure lors de l'ouverture du circuit pour limiter l'intensité du courant et isoler le défaut. L'architecture de la chambre de coupure a été optimisée depuis plusieurs décennies par les différents industriels du secteur et permet aujourd'hui d'atteindre des performances élevées dans un encombrement très réduit.

Son fonctionnement correspond néanmoins à une situation complexe d'un point de vue technique et scientifique, car faisant appel à différents domaines de la physique, en forte interaction : la mécanique, l'électromagnétisme, la thermique, la physique des plasmas, la mécanique des fluides, et enfin la physique des matériaux. La situation est de plus extrêmement dynamique : quelques millisecondes s'écoulent entre l'ouverture du circuit et l'extinction de l'arc électrique, alors que l'intensité du courant varie de quelques ampères à plusieurs kiloampères. Enfin, l'environnement de cet arc est complexe de par sa géométrie et ses variabilités, inhérentes à un process de fabrication industriel à grande échelle.

Ainsi, appréhender un tel système à l'aide des outils de modélisation disponibles reste difficile et en pratique insuffisant. La mise au point d'une nouvelle chambre de coupure repose principalement sur le savoir-faire développé par les industriels du domaine [1]. Ce savoir-faire est le fruit de la rationalisation de l'expérience accumulée par les équipes de développement au fur et à mesure des mises au point successives, mais aussi des politiques de recherche appliquée, développées en interne et en externe, souvent en partenariat avec des laboratoires spécialistes de l'arc électrique [2].

La tâche est immense et différentes stratégies sont envisageables. La première consiste, en l'état actuel des connaissances scientifiques, à modéliser le plus fidèlement possible le système, complet ou partiellement, au coût d'hypothèses fortes et d'approximations importantes. Le résultat est alors confronté à l'expérience, ce qui permet d'une part de définir le domaine prédictif du modèle, malheureusement souvent limité, et d'autre part de mettre en évidence les ingrédients

indispensables au modèle pour donner satisfaction, c'est-à-dire les phénomènes physiques prépondérants. La seconde adopte une vision phénoménologique et peut se décliner en fonction du degré de réalisme adopté :

a) Le système réel est étudié. Le disjoncteur est soumis à différentes conditions de court-circuit et est généralement instrumenté pour apporter un meilleur diagnostic du comportement de l'arc. Les paramètres de la chambre de coupure (géométrie, matériaux, etc.) peuvent alors être variés.
b) Un système reproduisant de façon simplifié la chambre de coupure est étudié. Un tel système sera moins réaliste mais permettra en contrepartie d'améliorer la répétabilité des essais, de faciliter le diagnostic, de varier plus aisément les paramètres et donc de rendre l'interprétation des résultats d'essai plus aisée [3].
c) Un système simplifié représentant une composante particulière de la chambre de coupure est étudié, dans des conditions parfois très différentes de celles du disjoncteur. Cette simplication extrême de l'environnement de l'arc permet de mettre en évidence plus précisément son comportement.

Le travail que nous présentons ci-dessous se concentre sur la phase de limitation de l'intensité du courant de court-circuit. L'arc électrique, très confiné, interagit alors fortement avec son environnement et libère une énergie importante. Le diagnostic en conditions réelles est rendu difficile par l'opacité des parois de la chambre de coupure et par l'extrême sensibilité de l'arc électrique à toute modification de son environnement, ce qui limite les possibilités d'instrumentation de la chambre de coupure. Les données de la littérature en lien avec cette phase de limitation sont relativemet éparses, en particulier concernant :

— le mécanisme de commutation de l'arc électrique, qui correspond aux conditions initiales de cette phase [4],
— le comportement de l'arc électrique transitoire de forte intensité, en particulier dans l'air,
— les interactions avec les parois polymères,
— le comportement de l'arc de forte intensité pour des distances inter-électrodes très faibles et les interactions avec les électrodes,
— la tension de l'arc électrique lorsque les électrodes ne sont pas homogènes mais présentent par exemple un revêtement à leur surface.

Nous avons adopté une démarche phénoménologique et choisi de travailler sur une chambre d'arc modèle, représentant de façon simplifiée l'environnement de l'arc électrique durant la phase de limitation. Nous avons privilégié des outils simples, nécessitant un temps de mise au point réduit, notre objectif premier étant de dégrossir la situation et de faire émerger des pistes d'études ou des

voies de développement plus précises. Nous avons ensuite focalisé notre travail sur l'étude de l'influence des conditions de courant électrique et du matériau des électrodes, dans le cas d'une distance inter-électrodes faible.

Nous entamerons la restitution de ce travail par une présentation des conditions d'essai de court-circuit du disjoncteur et des exigences de performance normatives. Nous détaillerons son architecture et le fonctionnement de la chambre de coupure et nous donnerons quelques caractéristiques électriques typiques du disjoncteur durant la phase de limitation (chapitre 1).

Nous proposerons ensuite une vision synthétique des données scientifiques disponibles dans la littérature. Nous nous focaliserons d'abord sur la tension d'arc, et ce qu'elle signifie suivant les auteurs, puis nous décrirons brièvement les phénomènes physiques qui nous ont semblé pertinents au regard de notre application. Nous prendrons ensuite le temps de présenter en détail quelques travaux consacrés à l'étude du comportement dynamique de l'arc électrique de forte intensité (chapitre 2).

Les éléments apportés par ces deux premiers chapitres nous permettrons de proposer un montage expérimental pertinent (chapitre 3). Nous détaillerons également les outils de diagnostic employés, électriques mais également métallurgiques et optiques.

La restitution des résultats expérimentaux se fera en deux parties. Tout d'abord, le matériau utilisé pour les électrodes sera identique à celui des disjoncteurs que nous prendrons pour comparaison. Nous mettrons alors en évidence des comportements intéressants, dont nous tenterons de justifier la pertinence par rapport à la phase de limitation du disjoncteur. Cette partie étant assez conséquente, nous la scinderons en deux chapitres : le premier se focalisera sur le diagnostic électrique de l'arc (chapitre 4), le second sur les interactions entre l'arc et son environnement (chapitre 5). Nous nous intéresserons ensuite à l'influence du matériau des électrodes sur le comportement de l'arc électrique, en particulier sa tension. Nous chercherons alors à délimiter les rôles respectifs du subtrat et du revêtement de surface dans le cas d'électrodes en acier doux revêtues de nickel électrolytique (chapitre 6).

Nous nous attacherons à proposer en fin de chaque chapitre des conclusions partielles, qui apporteront un regard critique et une mise en perspective des résultats.

Enfin, nous conclurons en proposant une synthèse transverse de l'ensemble des résultats expérimentaux présentés et en esquissant un modèle de comportement de l'arc électrique impulsionnel de forte intensité sur des électrodes avec un revêtement de surface. Nous formulerons également les problématiques de

recherche principales mises à jour par ce travail.

Chapitre 1

Contexte technique

Le domaine de la basse tension commence au secondaire du transformateur HT/BT, qui est le dernier nœud du réseau électrique, ainsi que le représente la figure 1.1. Un tel transformateur délivre une puissance pouvant aller typiquement jusqu'à 1250 kVA et capable de délivrer en permanence un courant de plusieurs milliers d'ampères. Le réseau électrique se ramifie ensuite de ce transformateur jusqu'aux utilisateurs finaux, typiquement une maison avec un tableau électrique de 12 kVA. Le réseau est bien entendu adapté au fur et à mesure des ramifications, appelées lignes. Chaque ligne est caractérisée par son courant nominal I_n et son courant de court-circuit I_c. Le courant nominal est le courant que la ligne est capable de transporter en permanence avec une chute de tension admissible. Le courant de court-circuit est le courant susceptible de parcourir la ligne si un défaut d'isolation apparaît entre la phase et le neutre ou entre la phase et la terre (dans le cas d'un régime de neutre TT, en France par exemple). Il est ainsi souhaitable d'adapter le diamètre du câble utilisé pour le transport de l'électricité et ainsi réduire le coût global de l'installation.

Deux types de défauts peuvent apparaître sur une ligne :

— une surintensité : une ligne demande plus de courant que ce pour quoi elle a été dimensionnée, typiquement au-delà de 110 % de I_n,

— un court-circuit : l'impédance de la ligne chute brutalement ce qui entraine l'apparition d'une intensité très élevée, typiquement quelques centaines d'ampères à plusieurs kiloampères.

Les conséquences de ces défauts sont la détérioration ou la destruction de la ligne, pouvant entraîner des conséquences plus graves, tel un incendie ou une explosion par exemple.

Chaque ligne possède donc un organe de protection, appelé disjoncteur, qui détecte ces défauts et agit en conséquence en ouvrant le circuit électrique afin

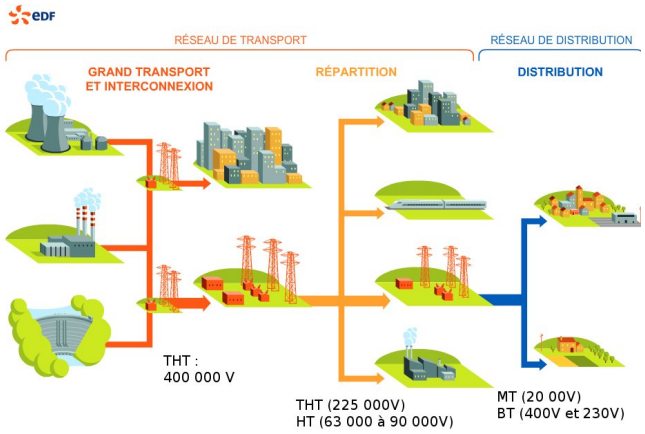


FIG. 1.1 – Organisation typique du réseau de transport et du réseau de distribution.

d'isoler le défaut : plutôt lentement dans le cas d'une surintensité, dans la mesure de ce que la ligne peut supporter et ce afin de ne pas dégrader la continuité de service, typiquement plusieurs dizaines de minutes, extrêmement rapidement dans le cas d'un court-circuit car les énergies en jeu sont énormes, typiquement quelques millisecondes. Bien entendu, de même que la section des conducteurs est adaptée aux caractéristiques de la ligne, les performances du disjoncteur aussi.

Notre travail prend pour référence d'application les disjoncteurs modulaires, en régime monophasé 230 V, que l'on trouve principalement en bout de ligne, avec typiquement un courant nominal I_n inférieur à 63 A et un courant de courant-circuit I_c inférieur 15 kA.

Nous détaillerons donc d'abord les conditions d'essai qui permettent de reproduire de tels défauts de court-circuit et les exigences des normes sur lesquelles se basent les industriels pour la mise au point de leur disjoncteurs. Puis nous décrirons le principe de fonctionnement du disjoncteur et les moyens qu'il met en œuvre pour parvenir à respecter ce cadre normatif. Ensuite, à travers une étude expérimentale menée sur une gamme élargie de produits du commerce et dont nous présenterons quelques cas représentatifs, nous apporterons quelques ordres de grandeurs concernant le comportement de l'arc électrique lors d'un essai de court-circuit. Ces ordres de grandeurs nous seront utiles pour définir les conditions pertinentes d'essai pour notre étude.

1.1 Cadre normatif

Les normes IEC, rédigée par la Commission électrotechnique internationale (Genève), forment le cadre normatif de référence le plus courament utilisé dans le domaine électrotechnique. Les habitudes d'installations varient cependant d'un pays à l'autre : la norme d'installation française NF C15-100 [5] impose l'utilisation du disjoncteur bipolaire phase-neutre alors que la norme allemande celle du disjoncteur unipolaire phase, le neutre étant simplement relié à un bornier dans le tableau électrique.

Pour des raisons de simplicité, en particulier celle de l'architecture produit, nous prendrons comme produit de référence le disjoncteur modulaire phase, le principe de fonctionnement en court-circuit étant similaire entre ces deux types de disjoncteurs.

Deux normes IEC coexistent pour les disjoncteurs : la norme NF EN 60898-1 [6] pour produits destinés aux installations domestiques et la norme IEC 60947-2 [7] pour les installations tertiaires. Les exigences de performance en court-circuit de ces deux normes sont similaires, aussi prendrons-nous la première comme référence pour la suite de ce travail.

1.1.1 Conditions d'essai

La figure 1.2 présente un schéma simplifié du montage expérimental utilisé couramment pour générer les conditions de court-circuit décrites dans la norme [6]. Le courant de court-circuit est simplement établi par la mise en court-circuit du secondaire d'un transformateur HT/BT.

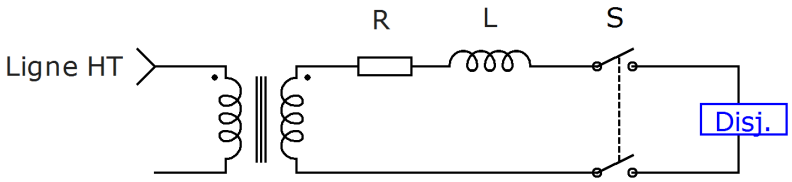


FIG. 1.2 – Schéma électrique simplifié du montage expérimental de l'essai de court-circuit.

La tension au secondaire du transformateur, que nous nommerons tension réseau, s'exprime par :

$$u_r(t) = U_r\sqrt{2}\ \sin(\omega t + \theta) \tag{1.1}$$

où U_r est la valeur efficace de la tension réseau, $f = \omega/2\pi$ la fréquence et θ le déphasage. Les impédances de ligne R et L permettent d'ajuster la forme de

l'onde de courant : son intensité efficace I_c, en régime permanent et en l'absence de protection, et son facteur de puissance $\cos\varphi$, qui correspond au déphasage entre le courant et la tension et dont la valeur est prescrite par la norme. Enfin, l'interrupteur S établit les conditions de court-circuit au temps $t = 0$, soit à un angle θ de la tension réseau.

Nous pouvons aisément déterminer l'intensité du courant de court-circuit présumé $i_0(t)$, c'est-à-dire lorsque le produit est remplacé par un câble de section suffisamment importante pour considérer son impédance comme négligeable, solution de l'équation différentielle :

$$L\frac{di_0(t)}{dt} + Ri_0(t) = u_r(t) \tag{1.2}$$

avec la condition initiale $i_0(0) = 0$.

La solution de cette équation est :

$$i_0(t) = I_c\sqrt{2}\ \left[\sin(\omega t + \theta - \varphi) - \sin(\theta - \varphi)\exp\left(-\frac{\omega t}{\tan\varphi}\right)\right] \tag{1.3}$$

Nous pouvons alors déterminer les valeurs de R et L nécessaires pour établir les conditions de court-circuit souhaitées I_c et $\cos\varphi$:

$$\begin{aligned} R &= \frac{U_r\cos\varphi}{I_c} \\ L &= \frac{U_r\sin\varphi}{I_c\ \omega} \end{aligned} \tag{1.4}$$

La figure 1.3 illustre cette solution pour un courant de court-circuit présumé $I_c = 6\ kA$, correspondant à un $\cos\varphi = 0{,}675$ d'après [6], une tension réseau $U_r = 253\ V$ à $f = 50\ Hz$, et avec un angle à l'établissement du courant $\theta = 45°$. Les valeurs d'impédance de ligne correspondantes sont $R = 28{,}5\ m\Omega$ et $L = 99{,}0\ \mu H$.

Dans la suite de notre travail, afin d'en simplifier l'exposé, nous nous placerons systématiquement dans les mêmes conditions de tension réseau.

1.1.2 Exigences

Trois types d'essais sont effectués pour vérifier les performances en court-circuit des disjoncteurs : au courant de court-circuit réduit (500 A ou $10I_n$, I_n étant l'intensité nominale du disjoncteur), à 1500 A et au pouvoir de coupure nominal I_c. Aussi surprenant que cela puisse paraître, la difficulté de mise au point du disjoncteur n'est pas nécessairement proportionnelle au courant de court-circuit : un produit se comportant de façon satisfaisante à 6 kA peut par exemple rencontrer des difficultés à $10I_n$, et inversement. Quoi qu'il en soit, nous

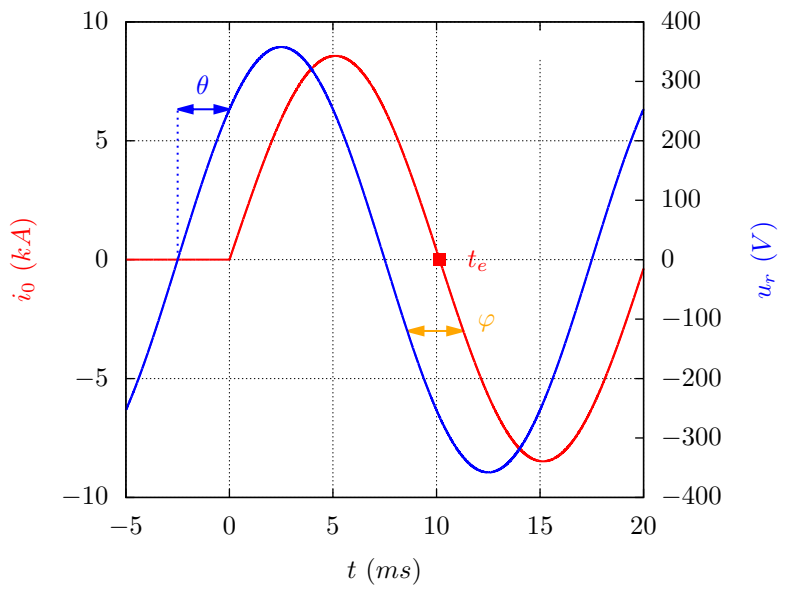


FIG. 1.3 – Tension réseau et intensité du courant présumé de court-circuit pour $I_c = 6\ kA$, $\cos\varphi = 0{,}675$, $U_r = 253\ V$, $f = 50\ Hz$, $\theta = 45°$, d'après les équations 1.1 et 1.3.

nous focaliserons ci-dessous sur les essais de court-circuit au pouvoir de coupure nominal I_c.

Lors du passage du courant de court-circuit, le disjoncteur doit réaliser l'ouverture du circuit électrique rapidement, sans générer outre mesure des projections de gaz chaud vers l'extérieur qui pourrait blesser un éventuel opérateur ou bien provoquer un départ d'incendie. L'avantage du courant alternatif apparait alors clairement sur la figure 1.3 : l'intensité du courant s'annule naturellement au temps t_e, de l'ordre de 10 ms. Un organe de protection capable de supporter cette onde de courant et d'ouvrir le circuit quelques fractions de millisecondes avant t_e, en établissant des conditions d'isolation diélectrique suffisantes pour éviter le réallumage de l'arc électrique par la tension de rétablissement, assurera ainsi l'ouverture du circuit électrique.

Considérons néanmoins l'énergie correspondant à une telle solution. Une image de l'énergie transmise à la ligne par l'onde de courant s'exprime habituellement par les contraintes thermiques I^2t. Les contraintes thermiques pour un courant de court-circuit présumé I_c jusqu'à son extinction naturelle à $t = t_e$ sont :

$$I^2 t_e = \int_0^{t_e} i(t)^2 dt \tag{1.5}$$

Cette grandeur, exprimée en kA^2s, correspond à l'énergie en Joules dissipée dans

un conducteur purement résistif de 1 $m\Omega$. La figure 1.4 donne la valeur de I^2t_e en fonction de I_c pour un angle $\theta = 45°$. Ces contraintes thermiques correspondent

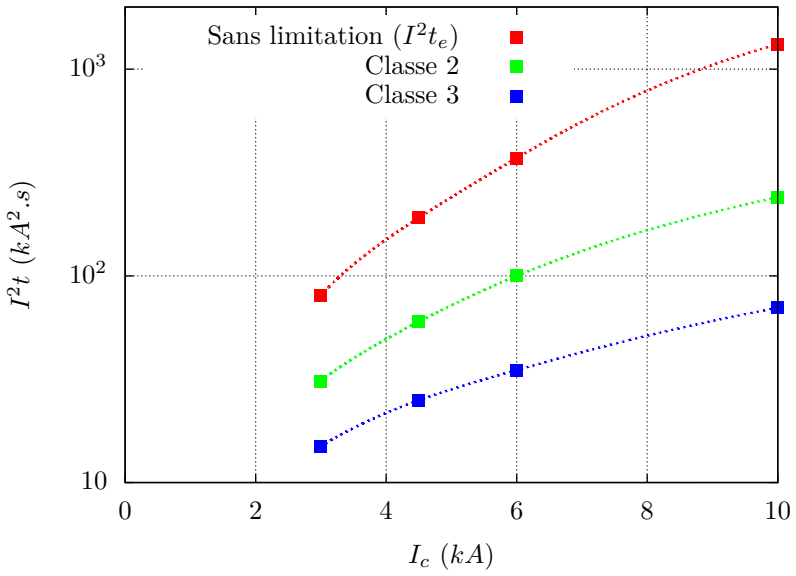


FIG. 1.4 – Contraintes thermiques pour un angle $\theta = 45°$ sans limitation, c'est-à-dire pour une ouverture du circuit au passage à zéro du courant, et pour les classes de limitation 2 et 3 d'un disjoncteur de calibre 16 A courbe B, définies dans [6].

à une énergie énorme qu'il sera en pratique difficile de dissiper, aussi bien pour la ligne impactée que pour le disjoncteur lui-même. Cette solution d'apparence simple nécessiterait en conséquence des sections de câbles plus importantes, et donc un coût d'installation élevé, et un disjoncteur extrêmement massif, donc coûteux.

C'est pourquoi le disjoncteur non seulement ouvre le circuit en présence du courant de court-circuit mais limite également les contraintes thermiques transmises à la ligne. A titre d'exemple, nous avons reporté dans la figure 1.4 les valeurs des contraintes thermiques maximales admises par la norme NF EN 60898-1 [6] pour les classes de limitation 2 et 3 d'un disjoncteur de calibre 16 A courbe B (annexe ZA).

Plusieurs essais sont réalisés sur un même disjoncteur. A l'issue de cette séquence d'essais, celui-ci doit bien entendu pouvoir être réarmé puis rouvert par l'organe de fermeture, mais également présenter une bonne tenue diélectrique, vérifiée à 1500 V quelques heures après les essais.

1.2 Le disjoncteur modulaire

1.2.1 Principe de limitation

L'intensité du courant de court-circuit correspondant au schéma électrique de la figure 1.2, en présence d'un disjoncteur de tension u_d, s'exprime par l'équation différentielle :

$$L\frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = u_r(t) - u_d(t) \tag{1.6}$$

où la tension réseau u_r et les impédances de ligne R et L sont définies par les équations 1.1 et 1.4 en fonction des paramètres d'essai. Nous négligeons alors le terme résistif pour exprimer cette équation sous la forme :

$$L\frac{di(t)}{dt} \simeq u_r(t) - u_d(t) \tag{1.7}$$

Cette formulation met en évidence le principe de limitation du disjoncteur. Lors de l'établissement du courant à $t = 0$, le disjoncteur est en position fermée et sa tension u_d est très faible devant la tension réseau. L'intensité du courant croît alors rapidement. Le disjoncteur détecte la présence du défaut de court-circuit et réagit par l'augmentation de sa tension u_d. Lorsque la tension développée par le disjoncteur est supérieure à la tension réseau, le courant décroît. Plus cette tension sera élevée, plus la décroissance sera rapide, conformément à l'équation 1.7. Un ordre de grandeur de tension typique développée par un disjoncteur est 450 V.

Nous pouvons visualiser très simplement cet effet sur la base d'un calcul analytique pour un disjoncteur modèle de caractéristique :

$$u_d(t) = U_1\Theta(t - t_1) \tag{1.8}$$

où U_1 est la tension développée par le disjoncteur avec un temps de réponse t_1, et Θ la fonction de Heaviside.

La figure 1.5 montre l'impact d'un tel disjoncteur dans le cas d'un essai de court-circuit correspondant aux conditions de court-circuit présumées de la figure 1.3, pour une tension $U_1 = 450\ V$ et un temps de réponse $t_1 = 1{,}6\ ms$. Les contraintes thermiques I^2t correspondent à l'aire sous la courbe de courant élevée au carré. Nous avons tracé ses valeurs pour différentes caractéristiques U_1 et t_1 sur la figure 1.6. Deux paramètres doivent donc être optimisés pour assurer la limitation du courant la plus efficace : un temps de réponse t_1 le plus faible possible et une tension U_1 la plus élevée possible.

1.2.2 Augmentation de la tension d'arc

La stratégie communément utilisée pour augmenter la tension du disjoncteur est basée sur la tension développée par l'arc électrique créé lors de l'ouverture

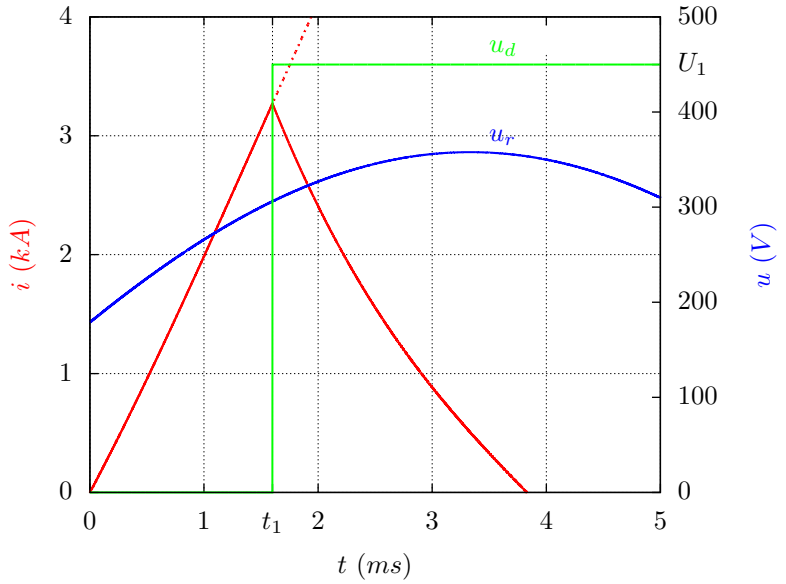


FIG. 1.5 – Limitation de l'intensité du courant par un disjoncteur modèle de tension $u_d(t) = U_1\Theta(t-t_1)$, avec $U_1 = 450\ V$ et $t_1 = 1{,}6\ ms$. Les conditions d'essai sont identiques à celles de la figure 1.3.

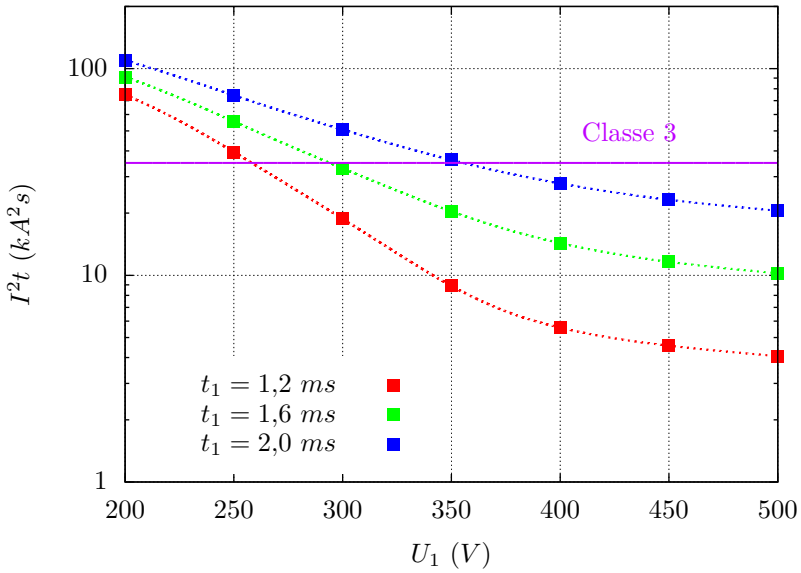


FIG. 1.6 – Contraintes thermiques calculées pour un disjoncteur modèle de tension $u_d(t) = U_1\Theta(t - t_1)$ à différentes valeurs de U_1 et t_1. Les conditions d'essai sont identiques à celles de la figure 1.3.

des contacts sur le défaut de court-circuit.

Nous rentrerons plus en détail dans la physique de l'arc électrique dans le chapitre suivant mais nous allons apporter quelques éléments simples, nécessaires pour expliquer le principe de fonctionnement du disjoncteur.

Un arc se caractérise par une tension qui est en première approximation indépendante de l'intensité du courant. Cette tension d'arc comporte une composante liée aux électrodes, U_E, et une composante liée à la colonne et dont la tension est proportionnelle à sa longueur, $E_0 d$:

$$U_{ARC} = U_E + E_0 d \tag{1.9}$$

Typiquement, le premier terme est de l'ordre de 18 V quand le second est de quelques volts par millimètres. La stratégie la plus efficace pour augmenter la tension d'arc ne consiste donc pas à allonger l'arc, difficile dans l'encombrement réduit d'un disjoncteur, mais à le fractionner en une multitude d'arcs afin de multiplier d'autant le terme prépondérant U_E. La figure 1.7 apporte une vue schématique d'une telle situation. On peut constater également que hormis sur les bords, chaque électrode est d'un côté cathode et de l'autre anode.

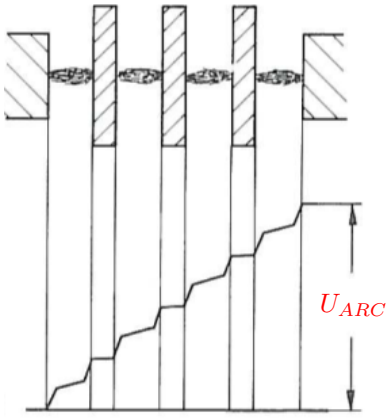


FIG. 1.7 – Illustration de l'augmentation de la tension d'arc par fractionnement de l'arc électrique.

1.2.3 Architecture produit

La figure 1.8 présente l'architecture typique d'un disjoncteur phase modulaire. Des rectangles de couleur mettent en évidence les différents sous-ensembles :

— les bornes à vis (en rouge) assurent le raccordement du disjoncteur au circuit électrique,

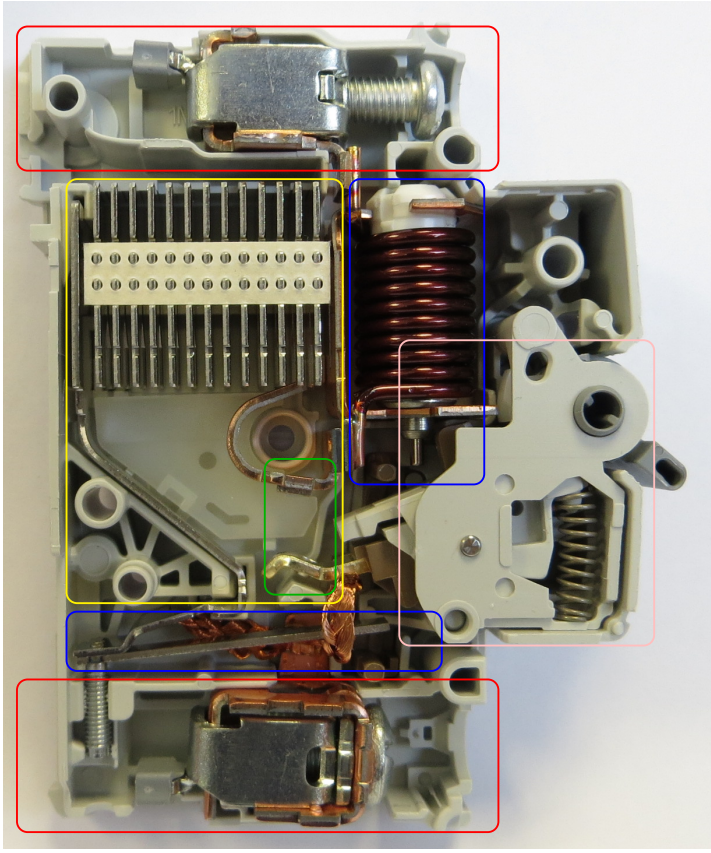


FIG. 1.8 – Architecture typique d'un disjoncteur phase modulaire. Les rectangles de couleur mettent en évidence les différents sous-ensembles, détaillés dans le texte.

— la serrure (en rose) maintient le disjoncteur fermé en fonctionnement normal et permet son ouverture lorsqu'elle est actionnée soit manuellement soit par un actionneur,
— les actionneurs thermiques et magnétiques (en bleu) détectent les défauts de surintensité ou de court-circuit, respectivement, et entraînent le déclenchement de la serrure le cas échéant,
— le point de contact (en vert), ouvert sur la figure, est actionné par la serrure et permet d'établir ou de couper le passage du courant électrique,
— la chambre de coupure (en jaune) voit apparaître l'arc électrique lors de l'ouverture du point de contact et en assure l'extinction.

Focalisons-nous à présent sur les sous-ensembles qui interviennent lors de l'essai de court-circuit, c'est-à-dire le point de contact et la chambre de coupure, que nous avons représentés schématisés sur la figure 1.9. Trois zones se distinguent :

1) Le point de contact (en jaune) est constitué d'une partie fixe, typiquement une pastille d'AgC, et d'une partie mobile, typiquement un cuivre argenté. Cette zone est en général assez peu confinée.
2) La préchambre est constituée de deux rails divergents, généralement en acier doux revêtu de cuivre ou de nickel, confinés entre deux parois polymères, typiquement en polyamide.
3) Le déion est l'assemblage de plaquettes de fractionnement maintenues espacées par un carton isolant. Ces plaquettes sont typiquement en acier doux revêtu de nickel ou cuivre. Contrairement aux rails de la préchambre, le déion occupe toute la largeur du produit, typiquement 15 mm.

Enfin n'oublions par le rôle des parois polymères qui assurent le maintien mécanique de l'ensemble tout en garantissant l'isolation entre les différentes parties, mais aussi qui définissent les volumes disponibles pour l'expansion de l'arc électrique ainsi que les échappements pour l'expulsion des gaz ionisés.

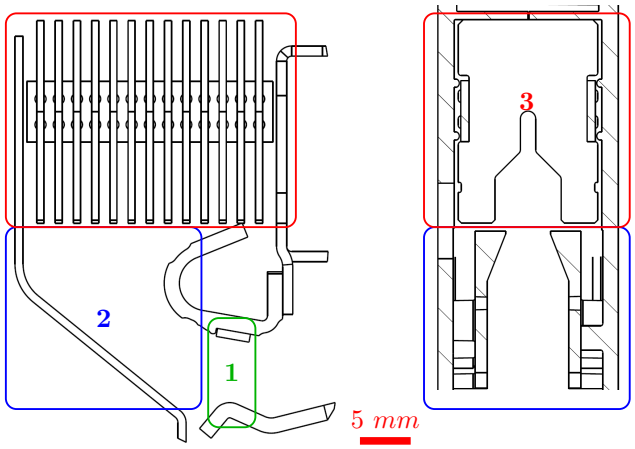


Fig. 1.9 – Géométrie typique d'une chambre de coupure. Pour une meilleure visibilité, les parois polymères sont masquées sur la vue de gauche et le point de contact et les rails divergents sont masqués sur la vue de droite. Les rectangles de couleurs indiquent les trois zones de la chambre de coupure détaillées dans le texte.

La norme NF EN 60898-1 [6] impose, en plus de garantir une tenue diélectrique post-coupure, de respecter une distance d'isolement de 4 mm entre les parties aval et amont du disjoncteur. Or la détermination de cette distance d'isolement néglige les distances inférieures à 1 mm (annexe B). La distance entre les plaquettes de fractionnement, qui varie entre 1 et 1,4 mm suivant le disjoncteur considéré, est donc très souvent égale à 1 mm, afin de réduire l'encombrement du déion en garantissant une distance d'isolement normative. Le concepteur qui souhaite donc augmenter le nombre de plaquettes de fractionne-

ment, pour augmenter la tension d'arc par exemple, n'aura d'autre choix, dans un encombrement limité, que d'en réduire l'épaisseur. En pratique celle-ci varie de 0,6 à 0,9 mm d'un disjoncteur modulaire à un autre.

1.2.4 Dynamique de l'arc

Lorsqu'un courant d'intensité suffisamment importante traverse le disjoncteur, les contacts s'ouvrent et un arc électrique apparait. Il s'allonge d'abord entre les contacts puis lorsque sa longueur est suffisante et sous l'effet des forces de Laplace et de mécanique des fluides, il quitte les contacts et se déplace dans la préchambre, entre les deux rails divergents, en direction du déion. Toujours sous l'effet de ces mêmes forces, l'arc électrique est projeté contre les plaquettes de fractionnement. Il se divise alors en une multitude d'arcs en série et pénètre dans le déion. Il y reste jusqu'à son extinction. Ces différentes phases sont illustrées dans la figure 1.10.

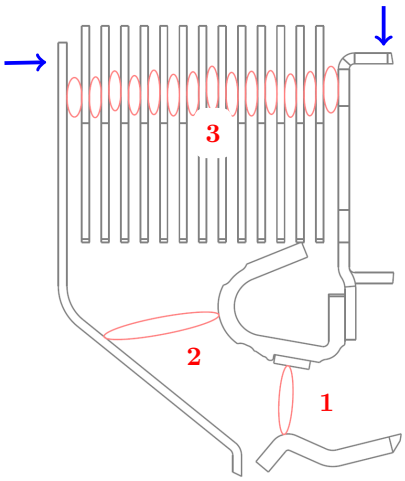


FIG. 1.10 – Phases de coupure : 1) apparition de l'arc électrique entre les contacts, 2) déplacement dans la préchambre et 3)fractionnement à l'entrée du déion et extinction dans le déion. Les flèches bleues indiquent la position des prises de potentiel pour la mesure de la tension aux bornes du déion Nu_a, présentée en fin de chapitre.

Evidemment il peut y avoir régression entre ces différentes phases, par exemple l'arc électrique fractionné peut réapparaître à l'entrée du déion et recommencer la phase de fractionnement. De telles régressions sont bien entendu néfastes à la limitation du courant de court-circuit.

Durant ce processus, l'arc électrique dont la température est très élevée vaporise une quantité de matière importante, aussi bien métallique que polymère. Des gaz chauds plus ou moins ionisés, mélange d'air, de métal et de vapeurs de

décomposition de polymères, s'échappent du disjoncteur. Une partie de ce mélange reste confinée à l'intérieur du disjoncteur et se dépose sur les parois après extinction de l'arc.

Enfin, la montée en température du produit durant l'essai est difficile à mesurer étant donnée la rapidité des phénomènes. Mais le disjoncteur reste brûlant de longues minutes après l'essai de court-circuit, particulièrement à proximité du déion. Cela indique qu'une partie importante de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur dans le déion.

1.3 L'arc dans le déion

1.3.1 Courbe de coupure

La figure 1.11 montre une courbe de coupure typique pour des conditions d'essai identiques à celles de la figure 1.3, à savoir $I_c = 6\ kA$ et $\theta = 45°$. Nous pouvons aisément identifier les phases décrites précédemment à l'aide de l'évolution de la tension aux bornes du disjoncteur u_d et de l'intensité du courant i. L'arc électrique apparaît lors de l'ouverture des contacts au temps t_0, facilement identifiable par un saut de tension d'environ 20 V, il s'allonge et se dirige ensuite vers l'entrée du déion dans lequel il se fractionne au temps t_1, la tension augmente alors très rapidement jusqu'à atteindre une valeur d'environ 450 V. L'intensité du courant diminue alors et au temps t_2, l'arc électrique s'éteint. Ces trois temps caractéristiques sont indiqués par des flèches vertes sur la figure 1.11.

La durée de la phase de fractionnement, qui correspond à l'augmentation de l'intensité du courant dans le déion, est donc extrêmement courte alors que celle de la phase de limitation représente plus de la moitié de la durée totale de l'essai t_2.

1.3.2 Phase de fractionnement

Il est difficile de déterminer la dynamique de cette phase car nous ne disposons pas d'évidence directe de ce phénomène. En revanche, nous pouvons estimer sa durée par celle du temps de montée de la tension du disjoncteur au temps t_1.

La figure 1.12 propose une vue détaillée extraite de la figure précédente 1.11, mettant en évidence les deux tentatives de fractionnement, la première étant infructueuse : la tension u_d passe d'environ 100 V à plus de 450 V en l'espace d'environ 0,1 ms. Cet ordre de grandeur de la durée de fractionnement δt_f est confirmé pour une intensité maximale du courant allant de 1,5 à 4 kA et pour différents disjoncteurs.

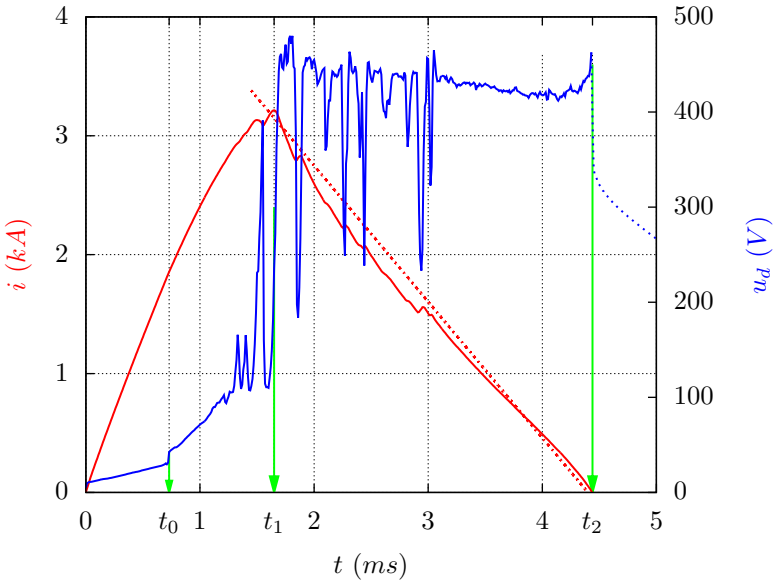


FIG. 1.11 – Courbe de coupure typique pour des conditions d'essai identiques à celles de la figure 1.3, à savoir $I_c = 6\ kA$ et $\theta = 45°$.

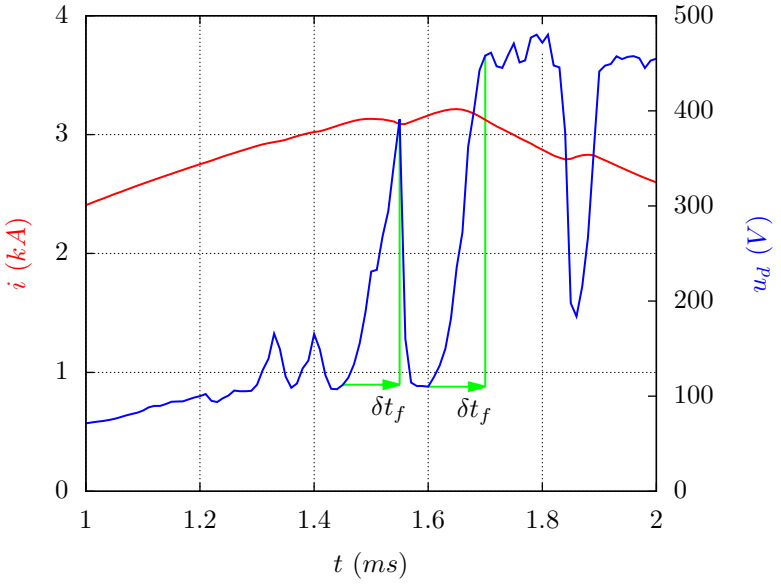


FIG. 1.12 – Augmentation de la tension aux bornes du disjoncteur u_d lors du fractionnement de l'arc à $i \simeq 3\ kA$. La durée de fractionnement δt_f est d'environ 0,1 ms.

1.3.3 Phase de limitation : onde de courant

La durée de la phase de limitation est :

$$\Delta t = t_2 - t_1 \tag{1.10}$$

ainsi que le montre clairement la figure 1.11. La figure 1.13 présente Δt en fonction du courant de court-circuit présumé I_c, pour un angle $\theta = 45°$. Cette durée est comprise entre 2,5 et 3,2 ms et ne varie que très peu en fonction de I_c. Cela signifie que l'efficacité de réduction du courant augmente lorsque I_c augmente. Cet effet peut être dû soit à un arc plus stable dans le déion conduisant à une meilleure limitation du courant, soit à une tension d'arc dans déion plus élevée lorsque I_c augmente.

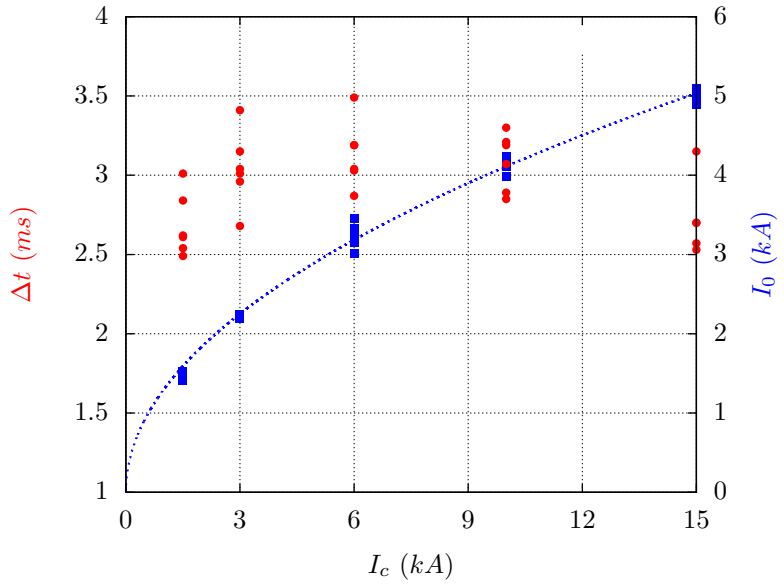


FIG. 1.13 – Durée totale de la phase de limitation Δt et intensité du courant à l'entrée de l'arc dans le déion I_0. La courbe en trait discontinu bleue est un guide pour l'oeil.

L'intensité du courant atteint sa valeur maximale I_0 à l'entrée de l'arc électrique dans le déion, soit $I_0 = i(t_1)$. Sa décroissance est ensuite remarquablement linéaire et elle peut être ajustée par la fonction :

$$i(t) \simeq I_0 - \frac{I_0}{\Delta t}(t - t_1) \tag{1.11}$$

Un tel ajustement est représenté en trait discontinu sur la figure 1.11. Ce comportement se retrouve systématiquement, avec des coefficients éventuellement différents, quels que soit le disjoncteur ou les conditions d'essai.

La figure 1.13 présente la valeur de l'intensité du courant à l'entrée du déion I_0 en fonction du courant de court-circuit présumé I_c, pour un angle $\theta = 45°$. Sa valeur est bien inférieure à l'intensité maximale présumée approximativement au moins égale à $I_c\sqrt{2}$. Elle est lié au temps t_1, c'est-à-dire à la rapidité du produit à réagir en cas de défaut de court-circuit et à amener l'arc électrique

jusqu'au déion. Or ce temps t_1 diminue lorsque I_c augmente car non seulement l'actionneur magnétique réagit alors plus vite mais les forces de Laplace qui poussent l'arc vers le déion sont également plus importantes.

Cette valeur I_0 est bien entendu la valeur pertinente physiquement car elle correspond à l'intensité réelle de l'essai, nous tracerons donc le reste de nos résultats en fonction de I_0 et non en fonction de I_c.

1.3.4 Phase de limitation : tension

La tension est animée de violents soubresauts durant la phase de limitation, clairement visibles sur la figure 1.11. Elle redescend parfois à une valeur très faible et l'intensité de courant remonte alors. Cela est interprété comme un réallumage, partiel ou total, de l'arc électrique à l'entrée du déion suivi d'un nouveau fractionnement. Abstraction faite de ces variations rapides et de grande amplitude, nous constatons que la tension a une tendance décroissante. Cette décroissance est généralement constatée mais parfois difficile à mettre en évidence, par exemple dans le cas d'une pénétration laborieuse de l'arc dans le déion ou bien lorsque la tension n'est pas stable dans le déion.

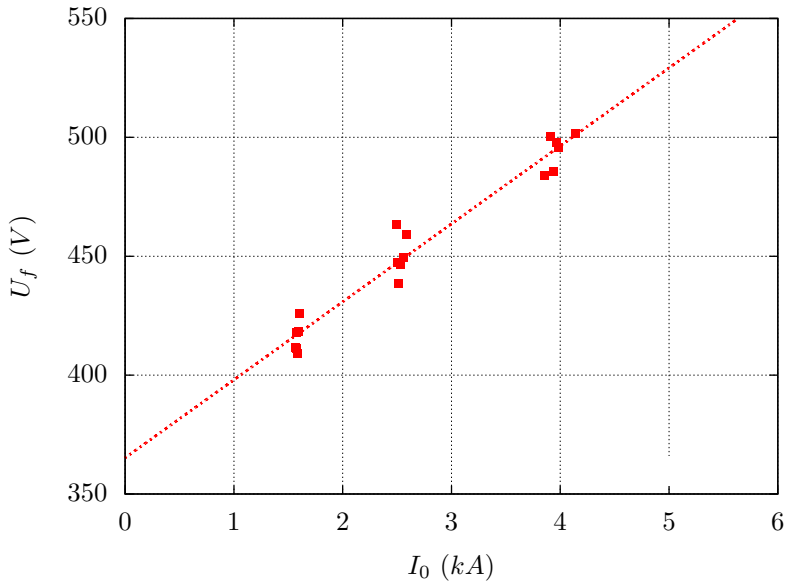


FIG. 1.14 – Tension maximale du disjoncteur durant la phase de limitation La courbe en trait discontinu rouge correspond à l'ajustement par l'équation 1.12, avec $U_0 = 365\ V$ et $\alpha = 33.10^{-3}\ V.A^{-1}$.

Nous caractériserons donc dans un premier temps cette tension par la valeur maximale atteinte, que nous nommerons U_f. Cette valeur maximale est en général atteinte au début de la phase de limitation lors du fractionnement, nous

l'indiçons donc par la lettre f. La figure 1.14 présente la tension maximale aux bornes du disjoncteur U_f en fonction du courant d'entrée dans le déion I_0. La tendance est remarquablement linéaire et peut être ajustée par la fonction :

$$U_f \simeq U_0 + \alpha I_0 \tag{1.12}$$

avec $U_0 = 365\ V$ et $\alpha = 33.10^{-3}\ V.A^{-1}$. Il semblerait donc que la tension du disjoncteur au début de la phase de limitation augmente avec l'intensité du courant lors du fractionnement. Cette constatation se généralise à l'ensemble des disjoncteurs et des conditions d'essai, avec des coefficients éventuellement différents.

1.3.5 Dynamique de la tension d'arc

Il est cependant difficile d'interpréter l'augmentation de la tension U_f avec l'intensité du courant à l'entrée du déion I_0. En effet, la tension aux bornes du disjoncteur durant la phase d'extinction peut s'exprimer très généralement par :

$$u_d(t) = L_d(t)\frac{di(t)}{dt} + R_d(t)i(t) + Nu_a(t) \tag{1.13}$$

où L_d et R_d sont respectivement l'inductance et la résistance du disjoncteur, u_a la tension moyenne d'un arc entre deux plaquettes de fractionnement, et N le nombre d'arcs après fractionnement. La dérivée de l'intensité est négligeable à $t = t_1$, ainsi :

$$U_f \simeq R_d(t_1)I_0 + NU_1 \tag{1.14}$$

où nous avons posé $U_1 = u_a(t_1)$, la tension d'arc moyenne lors du fractionnement, au début de la phase de limitation. La valeur de α déterminée précédemment peut ainsi correspondre à la résistance du disjoncteur $R_d(t_1)$ ou bien à une loi de variation de la tension d'arc U_1 avec l'intensité du courant. La valeur d'ajustement $\alpha = 33\ m\Omega$ semble élevée pour être due uniquement à l'impédance d'un disjoncteur.

Ainsi, afin de préciser ce point, nous avons instrumenté un disjoncteur de façon à mesurer la tension aux extrémités des tôles d'arcs, tel qu'indiqué sur la figure 1.10. La position des prises de potentiel est dans une configuration de mesure quatre fils. Un calcul simple montre que la chute de tension due au passage du courant électrique à travers les plaquettes de fractionnement est négligeable. La tension mesurée est donc Nu_a, telle que définie par l'équation 1.13.

La figure 1.15 présente le résultat d'un essai de court-circuit réalisé sur un tel disjoncteur instrumenté, dans des conditions de courant similaires à celles de la figure 1.11. Nous avons tracé la tension aux bornes du disjoncteur rapportée au nombre d'arcs après fractionnement u_d/N ainsi que la tension d'arc moyenne

d'un arc dans le déion u_a non pas en fonction du temps, mais en fonction de l'intensité du courant.

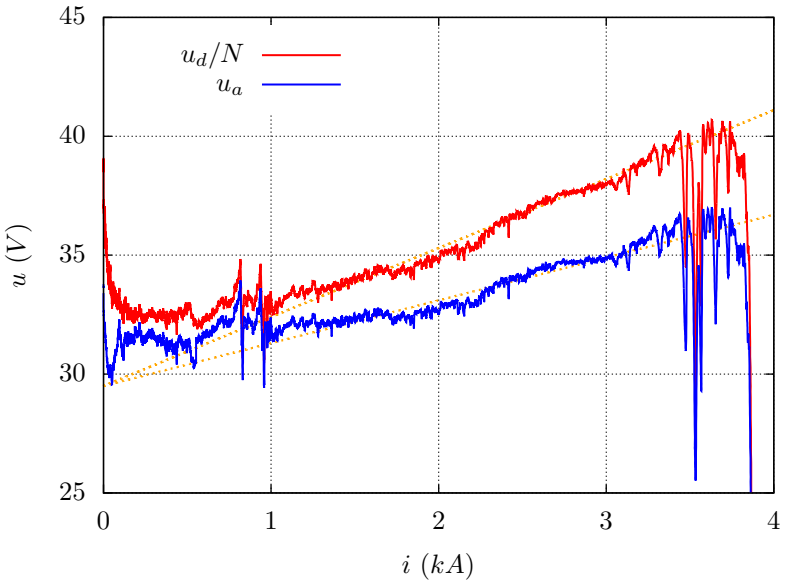


FIG. 1.15 – Tension aux bornes du disjoncteur rapportée au nombre d'arcs après fractionnement u_d/N et tension d'un arc dans le déion u_a, en fonction de l'intensité de courant durant la phase de limitation.

La courbe $u_a(i)$ présente un aspect globalement linéaire, hormis pour les faibles intensités de courant, avec une pente plus faible que la courbe $u_d(i)/N$. Cela signifie que la variation de tension du disjoncteur observée durant la phase de limitation n'est pas seulement imputable à la résistance du produit mais est également liée aux propriétés intrinsèques de l'arc électrique. Nous pouvons ajuster la tension d'arc par une fonction de la forme :

$$u_a(t) = U_0 + Gi(t) \tag{1.15}$$

avec $U_0 = 29{,}5\ V$ et $G = 1{,}8.10^{-3}\ V.A^{-1}$. En injectant ces valeurs dans l'équation 1.13 et en négligeant le terme inductif, nous pouvons déterminer la résistance du disjoncteur $R_d = 13{,}2\ m\Omega$, que nous considérerons constante en première approximation.

Fort de cet ordre de grandeur, nous sommes donc en mesure d'évaluer l'impact de la résistance électrique des amenées de courant R_d sur l'évolution de la tension maximale au bornes du disjoncteur U_f en fonction du courant maximal I_0, présenté en figure 1.14. La figure 1.16 présente donc la tension d'arc maximale dans le déion U_1, exprimée à partir des équations 1.14 et 1.12 en utilisant les coefficients d'ajustement U_0, α et R_d déterminés précédemment. Nous

y avons également reporté le résultats de plusieurs mesures de tension réalisées directement aux bornes du déion dont nous avons présenté un exemple en figure 1.15.

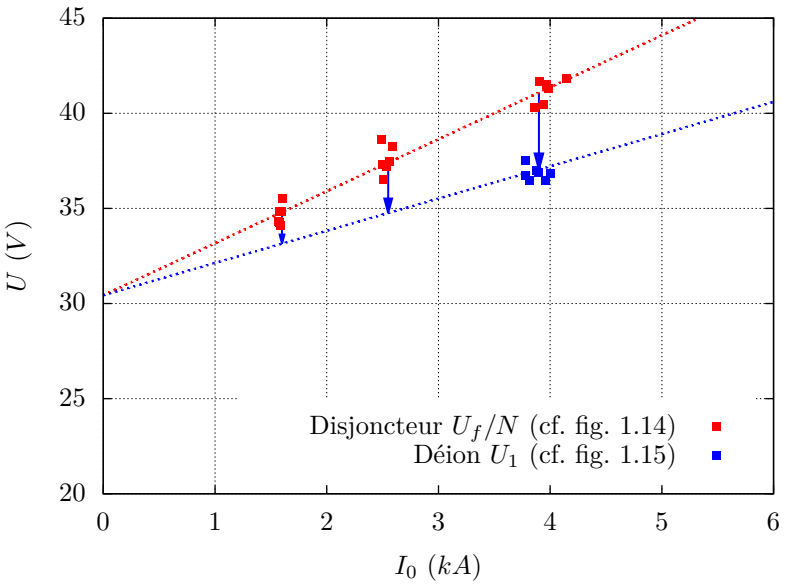


FIG. 1.16 – Tension maximale aux bornes du disjoncteur rapportée au nombre d'arcs après fractionnement U_f/N et tension maximale d'un arc dans le déion U_1, en fonction de l'intensité maximale du courant.

Cette courbe est donc caractéristique de la tension de l'arc électrique dans le déion à l'instant du fractionnement.

1.4 Conclusion

Le disjoncteur modulaire est confronté à une situation extrême : une ligne dimensionnée pour transporter un courant électrique de quelques ampères à quelques dizaines d'ampères voit apparaître, lors d'un défaut de court-circuit, un courant de quelques centaines à plusieurs milliers d'ampères. Il doit alors être capable de réagir suffisamment rapidement pour réduire l'intensité de ce défaut et l'isoler afin d'éviter la destruction de la ligne. Il est en outre capable d'affronter cette situation à plusieurs reprises sans nécessiter de maintenance, contrairement au fusible.

Pour ce faire, le disjoncteur utilise les propriétés de l'arc électrique qui se forme naturellement lors de l'ouverture du circuit. Cet objet, très destructeur et donc à manipuler avec précaution, est façonné dans la chambre de coupure du disjoncteur pour opposer une tension très importante à la tension réseau,

entrainant ainsi la limitation de l'intensité du courant puis l'ouverture définitive du circuit électrique. Le principe du fractionnement de l'arc électrique, utilisé par tous les industriels pour augmenter la tension du disjoncteur au-delà de la tension réseau, est ancien et a été optimisé depuis plus de 50 ans.

La mise au point d'une chambre de coupure reste néanmoins une tâche extrêmement délicate. En effet, son principe de fonctionnent repose sur un objet très complexe, l'arc électrique, et qui évolue dans des conditions tourmentées : très forte dynamique d'intensité, interactions importantes avec des matériaux complexes, confinement dans une géométrie elle aussi complexe. L'état de l'art des connaissances scientifiques, comme nous le montrerons dans le chapitre suivant, comporte de nombreuses zones d'ombre, et aucun modèle ne permet aujourd'hui de prédire le comportement de l'arc électrique de coupure de façon satisfaisante. L'expertise du concepteur repose donc en grande partie sur un savoir-faire capitalisé au fil des années par son entreprise.

Notre travail s'inscrit ainsi comme une tentative de rationalisation de cette expertise concernant la phase de limitation de l'intensité du courant de court-circuit. Nous avons donc dans ce premier chapitre dressé le portrait d'une chambre de coupure représentative puis apporté les quelques informations concernant le comportement de l'arc électrique que nous pouvons déduire des essais de court-circuit. Nous en synthétisons les principaux éléments ci-dessous.

Environnement de l'arc

L'arc électrique apparaît lors de l'ouverture du point de contact puis est transféré par des rails divergents vers l'entrée du déion. Il se fractionne alors en une multitude d'arcs en série (cf. figure 1.10).

Chaque arc est confiné entre deux plaquettes de fractionnement de dimensions 15×20 mm et d'épaisseur 0,8 mm, typiquement. La distance entre ces deux plaquettes est typiquement 1 mm. L'arc électrique est également confiné par des parois polymères sur deux côtés, les deux autres côtés restant plus ou moins ouverts selon le disjoncteur considéré (cf. figures 1.8 et 1.9).

Conditions de courant

Pour un courant présumé de court-circuit de 10 kA, l'intensité du courant à l'entrée du déion I_0 est de l'ordre de 4 kA (cf. figure 1.13).

Nous distinguons deux phases conduisant vers l'extinction de l'arc :

— Une phase de fractionnement : sa durée peut être estimée à $\delta t_f \simeq 0{,}1$ ms par le temps de montée de la tension aux bornes du disjoncteur lors du

fractionnement (cf. figure 1.12),

— Une phase de limitation : sa durée, qui ne dépend que très peu de I_0, est de l'ordre de 3 ms (cf. figure 1.13). La décroissance de l'intensité du courant durant cette phase est en première approximation linéaire (cf. figure 1.11).

Tension d'arc

La tension aux bornes du disjoncteur augmente rapidement durant la phase de fractionnement, typiquement 300 V en 0,1 ms, puis décroît légèrement durant la phase de limitation (cf. figure 1.11). La tension maximale atteinte par le disjoncteur U_f, généralement en début de la phase de limitation, augmente linéairement avec l'intensité du courant à l'entrée dans le déion I_0 (cf. figure 1.14).

Une mesure directe de la tension aux bornes du déion (cf. figure 1.10) permet de mettre en évidence que la décroissance de la tension durant la limitation du courant est liée certes à la résistance électrique du disjoncteur mais également à la variation de la tension d'arc avec l'intensité du courant (cf. figure 1.15). Nous utilisons cette mesure pour estimer la résistance électrique du disjoncteur durant la phase de limitation et ainsi préciser la variation de la tension moyenne de l'arc dans le déion à l'instant du fractionnement U_1 en fonction de l'intensité I_0 (cf. figure 1.16).

Nous utiliserons l'ensemble des éléments résumés ci-dessus dans un premier temps pour concevoir un montage expérimental représentatif que nous détaillerons dans le chapitre 3, puis dans un second temps pour valider la pertinence des résultats qu'il permettra d'obtenir.

Mais apportons tout d'abord un panorama des informations disponibles dans la littérature en lien avec les phases de fractionnement et de limitation du disjoncteur.

Chapitre 2

Éléments bibliographiques

L'arc électrique possède de nombreuses applications industrielles et de ce fait a été abondamment étudié. Le portrait que nous avons dressé de celui-ci, ainsi qu'il apparaît dans le disjoncteur modulaire lors d'un essai de court-circuit, le rend toutefois assez particulier au regard de la littérature. D'une part son intensité électrique est très élevée et varie rapidement, d'autre part il est en très forte interaction avec son environnement. Une communauté scientifique, en proche collaboration avec les industriels du domaine de la protection électrique, existe néanmoins et se consacre spécifiquement à l'étude de tels arcs, comme en témoigne par exemple l'*International conference on electrical contacts* (ICEC) qui se réunit tous les deux ans depuis 1961.

Nous nous focaliserons tout d'abord sur la tension de l'arc électrique. Nous préciserons quelles sont ses différentes composantes, ses principaux paramètres influents, et surtout ce à quoi elle correspond expérimentalement et ce qu'elle signifie suivant les auteurs.

Nous passerons ensuite en revue les phénomènes physiques en jeu, en portant une attention particulière aux interactions entre l'arc et son environnement et ce qu'elles impliquent sur la tension d'arc. Certaines informations seront présentées sans références bibliographiques car elles font partie d'un état de l'art établi et vulgarisé par de nombreux ouvrages [8][9][10][11][12].

Puis, nous nous intéresserons aux aspects dynamiques du comportement de l'arc électrique soumis à une onde de courant d'intensité élevée, nous rapprochant ainsi des conditions expérimentales de notre étude. La littérature scientifique est bien moins abondante dans ce domaine. Nous présenterons alors avec un regard critique une sélection d'articles qui apportent chacun un point de vue intéressant sur les phénomènes en jeu.

Enfin, nous tenterons en guise de conclusion d'établir un premier cadre de référence qui nous servira de base à l'interprétation de nos résultats expérimentaux.

2.1 Tension d'arc

Un arc électrique est un plasma thermique dont la température est typiquement de l'ordre de 10^4 K et qui présente de bonnes propriétés de transport électrique. Il se caractérise par une intensité du courant relativement élevée, de quelques ampères à plusieurs kiloampères ou plus, et une tension de l'ordre de quelques dizaines de volts.

2.1.1 Distance inter-électrodes

La tension aux bornes d'un arc U_{ARC} augmente avec la distance inter-électrodes d (qui correspond dans le cas d'un arc axi-symétrique à la longueur de l'arc lui-même). Les auteurs expriment généralement cette dépendance de façon linéaire en fonction de grandeurs macroscopiques moyennes :

$$U_{ARC} = U_E + E_0 d \tag{2.1}$$

E_0 est le champ électrique moyen dans le plasma, son ordre de grandeur est de quelques 10^3 $V.m^{-1}$, U_E est un terme qui ne dépend pas de la longueur de l'arc et que l'on peut donc naturellement associer à un phénomène de surface aux électrodes. Son ordre de grandeur est typiquement 18 V. Dans le cas d'arcs courts, c'est-à-dire pour une distance inter-électrodes de l'ordre de quelques millimètres, ce dernier terme sera très nettement prépondérant.

En pratique, l'équation 2.1 n'est valide que sur une certaine gamme de distance, ainsi que le suggère par exemple la figure 2.1 [9] ou bien plus récemment [13]. Elle constitue néanmoins une première approximation tout à fait raisonnable dans des conditions expérimentales souvent restreintes.

Elle permet également, en traçant la tension d'arc en fonction de la distance inter-électrodes d, d'estimer E_0 et U_E par régression linéaire, en prenant bien évidemment soin de travailler sur des distances inter-électrodes faibles.

2.1.2 Tension aux électrodes

Si le champ électrique E_0 semble relativement simple à concevoir comme nécessaire au transport des électrons dans le plasma de la cathode vers l'anode, le terme U_E est plus énigmatique. Les surfaces des électrodes sont à l'interface entre le métal et le plasma : la cathode émet les électrons, auxquel il faut fournir de l'énergie pour les extraire du métal, l'anode collecte les électrons, de façon

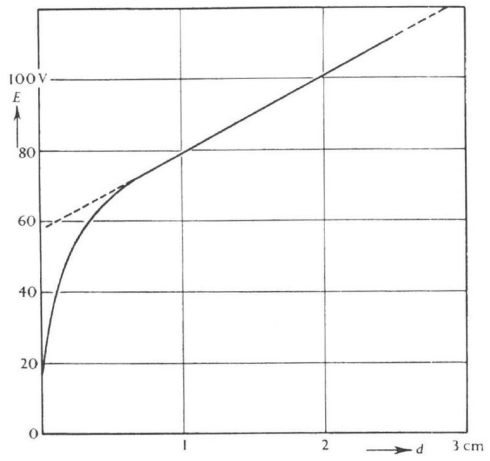


FIG. 2.1 – Tension d'arc du graphite dans l'air en fonction de la distance inter-électrodes d pour une intensité du courant constante $I_0 = 7\ A$ [9].

généralement considérée comme passive. L'énergie apportée par les électrons à l'anode engendre une montée en température de celle-ci, qui émet alors des vapeurs métalliques. Les processus en jeu sont complexes et nous y reviendrons plus en détail ci-dessous. Nous pouvons *a priori* exprimer le terme lié aux électrodes de façon générale :

$$U_E = U_C + U_A \tag{2.2}$$

où U_C et U_A sont respectivement la tension cathodique et anodique.

En pratique, ces tensions se développent à une distance extrêmement faible des électrodes, typiquement inférieure au micron, et il est donc difficile d'y accéder expérimentalement. Différentes approches ont été néanmoins utilisées. En général, les auteurs s'y hasardent assez indirectement négligeant souvent dans leurs interprétations les phénomènes anodiques. S'il est établi que cette tension est plus faible que la tension cathodique, il est difficile de la considérer comme négligeable. De rares travaux distinguent par une mesure directe ces deux tensions : Dickson [14] propose une méthode par mesure de la tension d'arc lors de l'extinction d'un arc électrique par rapprochement rapide des électrodes, cf. figure 2.2. Malheureusement cette méthode d'une part repose sur l'hypothèse que la tension anodique disparaît en premier lorsque les deux électrodes se rapprochent, et d'autre part est limitée à une configuration très particulière et ne peut pas être appliquée par exemple à une configuration de longueur d'arc constante.

D'autres méthodes ont donc été proposées pour tenter de distinguer ces deux tensions d'électrode. Certains auteurs utilisent une sonde de potentiel placée à proximité d'une électrode [15] ; d'autres établissent un bilan de puissance aux électrodes et à l'aide d'un modèle adéquat estiment la répartition de la tension

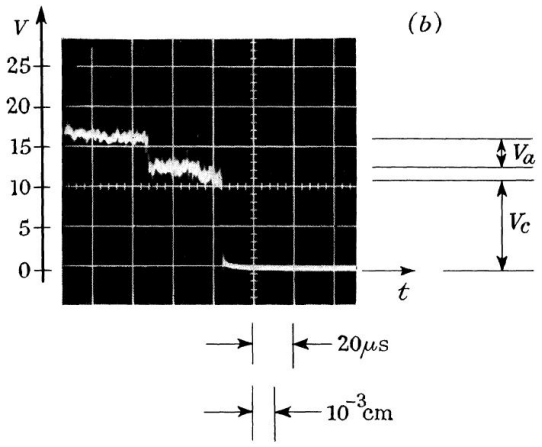


FIG. 2.2 – Dickson propose une mesure distinguant les tensions U_C et U_A lors de l'extinction d'un arc électrique par rapprochement rapide des électrodes [14].

entre cathode et anode. Pour cette méthode, des données expérimentales complémentaires sur la dégradation thermique des électrodes sont nécessaires : taille des zones fondues, érosion [16][13][17].

2.1.3 Caractéristique en courant

La tension d'arc dépend de l'intensité du courant électrique I. La littérature foisonne de caractéristiques $U_{ARC}(I)$ diverses et variées qui adoptent en général la forme présentée dans la figure 2.3 : une tension d'arc décroissante lorsque le courant augmente du courant minimum d'arc I_m jusqu'à quelques ampères, puis une tension constante U_0 jusqu'à quelques centaines d'ampères environ, enfin pour des courants supérieurs une tension croissante.

Ces caractéristiques, de par leur formulation simple, facilitent la comparaison des données et leur extrapolation mais masquent des conditions expérimentales spécifiques et parfois très différentes. Nous proposons de les distinguer de la façon suivante :

1) *Stabilisé :* L'arc électrique est stable dans son environnement et la caractéristique est soit une compilation de mesures réalisées à un courant constant donné, soit la variation de tension pour une variation très lente de courant. Cette configuration correspond en général à des intensités faibles et une érosion des électrodes négligeable.
2) *Dynamique :* Lorsque le courant est élevé, il est difficile de produire un arc dans des conditions stables, notamment à cause de la dégradation thermique des électrodes. Certains auteurs proposent alors des courbes dyna-

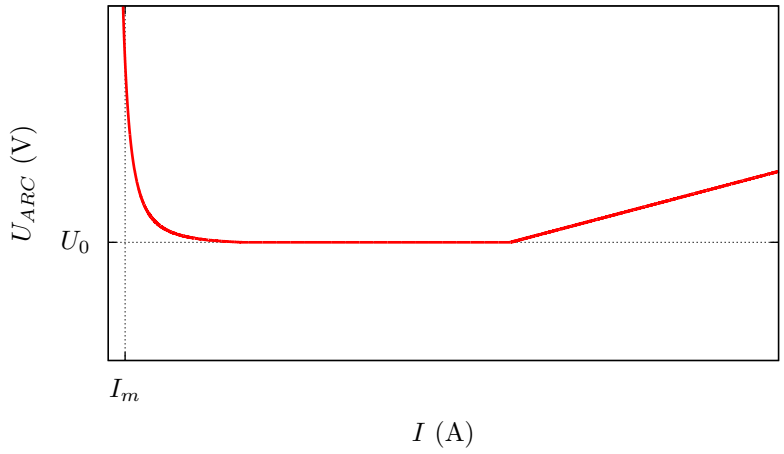


FIG. 2.3 – Allure typique de la tension d'arc en fonction de l'intensité du courant.

miques de la tension en fonction du courant, étant entendu qu'un aspect temporel est sous-jacent à celles-ci. Nous en verrons plusieurs exemples dans ce chapitre.

3) *Hybride :* Enfin, d'autres auteurs présentent une compilation de mesures réalisées à un instant donné en situation dynamique sous la forme d'une seule caractéristique $U_{ARC}(I)$. Soit ils considèrent que leur mesure est peu dépendante de la dynamique de l'arc [13], soit tout simplement ils présentent ainsi de manière plus concise un grand nombre de résultats expérimentaux [15][18].

Il semble donc relativement difficile d'appréhender avec confiance les données expérimentales disponibles dans la littérature étant donné l'impressionnante variété de conditions expérimentales utilisées par les nombreux expérimentateurs qui se sont frottés à cette épineuse mesure ainsi que les incertitudes quant à la façon dont ils sont parvenus à distinguer dans le fruit de leur travail la tension de colonne des tensions cathodique et anodique. Nous considérerons donc par la suite ces données en aucun cas comme des caractéristiques intrinsèques de tel matériau ou de tel arc mais comme des valeurs correspondant à des conditions expérimentales restreintes, souvent obtenues par le biais d'hypothèses difficiles à justifier.

2.2 Revue des phénomènes en jeu

La tension d'arc est le résultat d'un équilibre qui permet le passage de courant dans les conditions imposées par le circuit électrique. Nous passons en revue ci-dessous les principaux phénomènes qui entrent en jeu dans cet équilibre, tout d'abord en distinguant ses composantes (cathode, colonne et anode), puis en adoptant un point de vue global sur les interactions.

2.2.1 Par composantes

La figure 2.4 représente schématiquement un arc électrique confiné entre deux électrodes planes. On distingue habituellement la cathode, la colonne de l'arc et

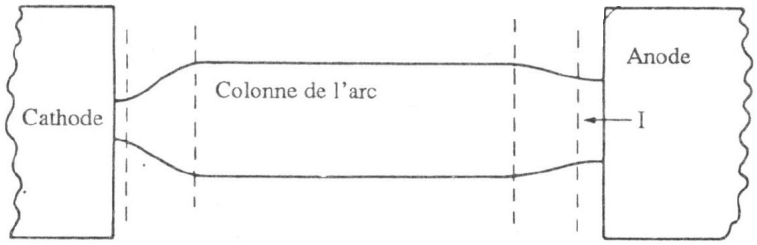


FIG. 2.4 – Représentation schématique d'un arc électrique entre deux électrodes planes (extraite de [8]).

l'anode. Nous détaillons ci-dessous leurs principales caractéristiques.

Cathode

Le travail de sortie Φ_s est l'énergie nécessaire à un électron pour s'extraire d'un matériau massif. Sa valeur varie peu pour les différents matériaux utilisés dans une chambre de coupure d'un disjoncteur, typiquement 4,5 eV. En revanche elle est fortement influencée par la chimie de la surface émettrice : la présence d'oxydes ou d'élément adsorbés peut faire varier sa valeur de plusieurs eV [11]. La théorie thermo-field permet de retrouver les bons ordres de grandeur de densité de courant d'émission électronique (typiquement 10^7 à 10^{10} $A.m^{-2}$). Elle combine deux modes d'émission :

— l'effet thermoélectrique : l'énergie nécessaire à l'émission est fournie par la température du matériau. Cet effet est prépondérant dans le cas de cathodes réfractaires,

— l'effet de champ : la présence d'un champ électrique intense à la surface de la cathode rend possible une émission électronique par effet tunnel.

Cet effet permet d'expliquer les densités de courant des cathodes froides, c'est-à-dire non réfractaires (*e.g.* cuivre, acier, nickel, argent). Ce champ a également pour effet d'accélérer une partie des ions du plasma vers la cathode.

Cette émission s'accompagne de celle d'atomes métalliques par la cathode, ensuite ionisés dans le flux d'électrons.

Les mécanismes physiques en jeu à l'interface de la cathode et du plasma sont complexes, difficiles à appréhender expérimentalement et de ce fait sujet à discussion [19][20][21]. Une approche souvent utilisée consiste à établir un bilan de puissance au pied cathodique, en considérant d'une part l'apport d'énergie par le flux d'ions et d'autre part les pertes liées à l'émission d'électrons et d'atomes mais aussi à la dissipation thermique. La tension cathodique U_C est alors le reflet de ce bilan de puissance, elle permet de maintenir le flux d'électron de la cathode vers le plasma.

De nombreux auteurs ont cherché à établir un lien entre la tension cathodique et les propriétés physico-chimiques intrinsèques du matériau de la cathode [22][23][24][25][26][27][18][28]. Deux tendances émergent de ces travaux, réalisés dans le vide :

— U_C augmente avec la température de fusion du matériau, qui est une image de l'énergie de cohésion,

— U_C augmente avec la conductivité thermique du matériau.

L'impact d'un gaz plasmagène sur cette tension reste énigmatique : Fett [29] constate l'évolution de la tension cathodique d'une valeur proche de l'énergie d'ionisation du métal de la cathode vers l'énergie d'ionisation du gaz plasmagène lorsque la pression augmente, Yokomizu ne constate à l'inverse aucun impact du gaz plasmagène [13]

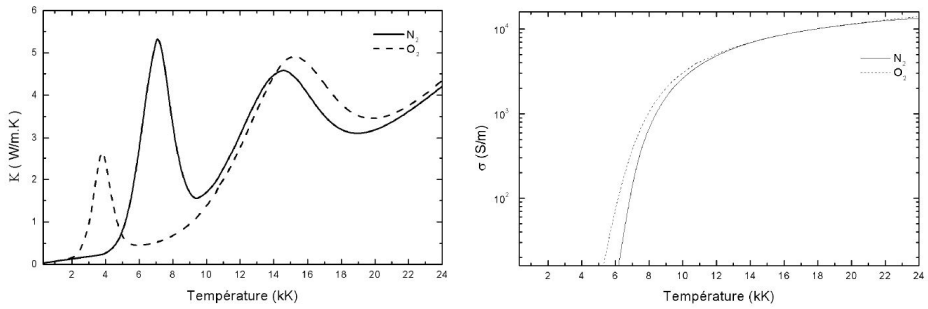
	λ $(W.m^{-1}.K^{-1})$	T_f $(°C)$	Φ_s (eV)	E_i^1 (eV)	U_C (V)
Fe	80.2	1568	4.5	7.9	22.7
Ni	90.7	1455	5.15	7.6	20.5
Cu	401	1085	4.65	7.7	23.4
N	–	–	–	14.5	–
O	–	–	–	13.6	–

Tab. 2.1 – Quelques caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés dans notre étude [30] et tension cathodique dans le vide à 300 A [18].

Le tableau 2.1 donne les tensions cathodiques typiques ainsi que les caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés couramment dans notre application.

Colonne

La modélisation des plasmas thermiques met en œuvre une vision de la colonne d'arc relativement facile à appréhender. Elle considére en particulier le plasma thermique comme un fluide à l'équilibre thermodynamique local (ETL). Celui-ci est alors caractérisé par une température unique, et éventuellement une fraction massique dans le cas d'un mélange de gaz, qui détermine l'ensemble de ses propriétés thermodynamiques et de transport [8]. A titre d'exemple, la figure



(a) Conductivité thermique. (b) Conductivité électrique.

FIG. 2.5 – Conductivité thermique et électrique d'un plasma d'azote et d'oxygène en fonction de la température, calculées dans le cadre du modèle ETL.

2.5 montre des courbes de conductivité thermique et électrique calculée dans le cadre de ce modèle pour un plasma d'azote et d'oxygène.

Anode

Les données disponibles dans la littérature concernant l'anode sont plus éparses. L'anode est en général considérée comme un simple collecteur d'électrons développant une tension U_A faible, et très souvent jugée négligeable.

En revanche, pour des courant élevés, typiquement des applications de type disjoncteur sous vide, on observe lorsque le courant augmente la transition de l'arc du mode diffus vers un mode concentré avec l'apparition d'un spot anodique [31]. Cet arc concentré à l'anode entraine une érosion très importante et diminue les performances de tenue diélectrique post coupure du disjoncteur sous vide.

Dans l'air, l'anode est systématiquement en fusion [8].

2.2.2 Par types d'interaction

Dissipation thermique

La majeure partie de l'énergie injectée dans l'arc est dissipée dans les électrodes par conduction thermique et montée en température. L'ordre de grandeur de ces pertes varie entre 80 % à plus de 95 % pour des applications de soudure à l'arc [32], c'est-à-dire lorsque les pertes sont maximisées.

La colonne participe également à ces pertes par rayonnement et par convection. Le modèle d'arc à l'ETL permet d'exprimer ces pertes par unité de volume en fonction de la température. C'est le coefficient d'émissivité nette ε_n, dont nous donnons un exemple dans la figure 2.6.

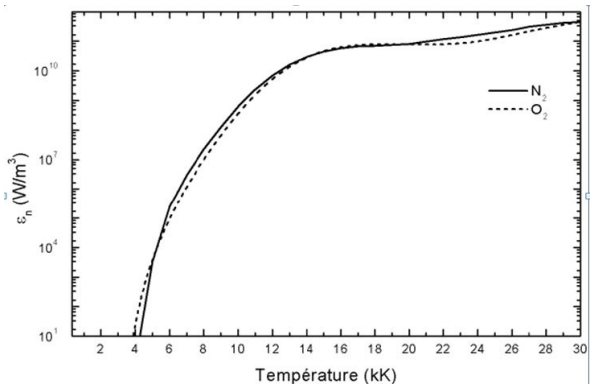


FIG. 2.6 – Coefficient d'émissivité net de l'azote et de l'oxygène.

Champ magnétique induit

La circulation du courant électrique donne naissance à une induction magnétique qui tend à confiner la colonne. Cet effet semble être notable pour des intensités de plusieurs kA. D'après Lowke [33], cet effet augmente sensiblement la tension d'arc pour les forts courants, comme le montre la figure 2.7.

Erosion des électrodes

Lorsque les électrodes atteignent la température de vaporisation, elles injectent de façon massive du métal dans le plasma, ce qui a pour conséquence de modifier ses propriétés thermodynamiques et de transport. La figure 2.8 montre par exemple l'impact de différents métaux sur la conductivité électrique d'un plasma d'air. En pratique, seules deux propriétés sont modifiées par la présence de vapeurs : la conductivité électrique, qui augmente pour des températures inférieures à 10^4 K, et l'émission nette, qui augmente également. Ces deux effets ont un impact contradictoire sur la tension d'arc.

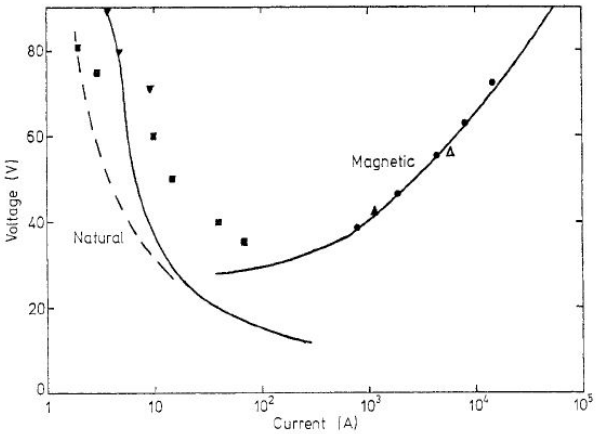


FIG. 2.7 – Allure de la tension d'arc en fonction du courant dans le modèle proposé par Lowke pour un arc dans l'air. Les points correspondent à différents travaux expérimentaux détaillés dans [33].

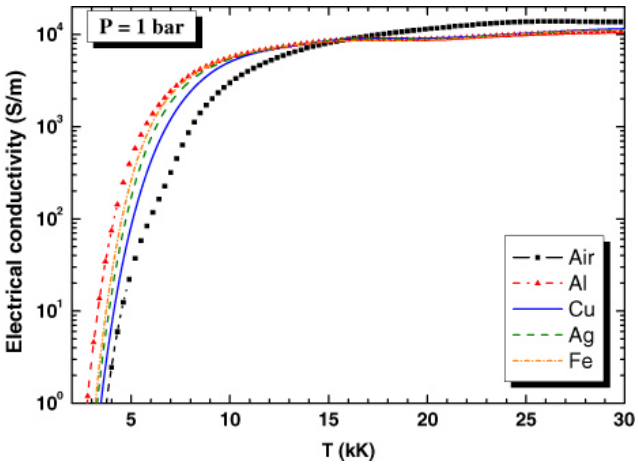


FIG. 2.8 – Conductivité électrique d'un mélange air-métal en fonction de la température pour différent métaux [34].

Les bains fondus aux pieds d'arc, à l'anode ou à la cathode sont en ébullition et agités de violents mouvements qui perturbent fortement la stabilité de la colonne. Des gouttelettes de métal en fusion sont éjectées.

Mouvement de l'arc

Une force de frottement visqueux s'oppose au déplacement de l'arc. Cette force est liée d'une part au freinage de la colonne par le gaz plasmagène, qui peut être expliqué par un modèle classique de dynamique des fluides, et d'autre part par un freinage sur la surface des électrodes, plus difficile à modéliser. Ce

dernier effet est notamment lié aux conditions physicochimiques des surfaces [35]. Enfin, ce déplacement ne s'effectue pas généralement pas de façon continue et est différent à la cathode et à l'anode.

D'un point de vue énergétique, les pertes par convections sont accrues lorsque l'arc se déplace, et d'un point de vue chimique, la fraction massique de métal dans la colonne diminue en raison d'une érosion plus faible aux pieds d'arc.

Confinement de l'arc

Le confinement de l'arc modifie la dynamique des fluides de l'environnement de l'arc, ce qui en général a pour effet d'augmenter sa pression et sa température. Lorsque l'arc est confiné dans une enceinte de dimension plus faible que celle de la colonne libre, celui-ci entraine un refroidissement accru de l'arc, notamment dans le cas des céramiques.

En outre, l'apport de nouvelles espèces chimiques par ablation des parois modifie les propriétés de la colonne. Dans le cas des polymères, ces éléments organiques ont une énergie d'ionisation en général plus élevée que l'air ou le métal et engendre une augmentation de la tension d'arc [36]. Cet effet est systématiquement utilisé dans les disjoncteurs.

2.3 Dynamique à forte intensité

Slepian observe dès 1929 l'augmentation de la tension d'arc avec l'intensité du courant [37][38][39]. Il étudie un arc court ($d \simeq 1.6\ mm$) dans l'air, en rotation rapide sur des électrodes en cuivre pour un courant jusqu'à 15 kA. La forme de l'onde de courant n'est pas précisée clairement mais il s'agit sans doute d'une demi-sinusoïde de fréquence 60 Hz. La vitesse de rotation de l'arc, de l'ordre de quelques centaines de $m.s^{-1}$, est telle qu'elle limite la dégradation thermique des électrodes, liée à l'énergie dégagée par l'arc, à une légère oxydation. L'auteur constate que la tension d'arc augmente linéairement avec le courant et il propose de l'exprimer ainsi :

$$U_{ARC} = U_0 + GI \tag{2.3}$$

sans toutefois préciser les conditions de mesure de cette caractéristique, dont on peut néanmoins raisonnablement penser qu'elle correspond à une caractéristique hybride. Il est également difficile d'interpréter les paramètres qu'il propose : $U_0 = 30\ V$ et $G = 0{,}79.10^{-3}\ V.A^{-1}$, mais qui constituent toutefois un premier ordre de grandeur.

Les travaux expérimentaux réalisés à fort courant, c'est-à-dire au-delà du kilo-ampère, correspondent systématiquement à des conditions transitoires. En effet, il semble difficile de concevoir des électrodes supportant un arc stabilisé, en régime permanent sous un courant de plusieurs milliers d'ampères. L'état des connaissances étant bien moins établi pour de tels arcs, nous présentons ci-dessous une sélection d'articles qui nous semblent pertinents au vu de notre application.

Nous présenterons tout d'abord des travaux réalisés avec une onde de courant similaire à une demi-sinusoïde de fréquence 50 ou 60 Hz, dans le vide puis dans l'air à pression atmosphérique. Nous discuterons ensuite de travaux récents réalisés dans l'air avec un temps de montée de l'intensité plus rapide. Enfin nous présenterons des travaux qui s'interessent à l'arc créé lors du fractionnement, en mettant l'accent sur les informations concernant la tension d'arc que l'on peut en extraire.

2.3.1 Arc dans le vide

Mitchell – 1970

Mitchell [40] s'intéresse à des arcs électriques dans le vide ($\simeq 3{,}7.10^{-2}$ Pa) pour une onde de courant proche d'une demi-sinusoïde de fréquence 50 Hz (avec une décroissance de type exponentielle) et d'intensité jusqu'à 20 kA. Il génère cet arc par surtension entre deux électrodes massives en cuivre de diamètre D compris en 6.5 et 75 mm et espacées jusqu'à 40 mm. Il mesure la tension d'arc, sans chercher à distinguer les tensions cathodique et anodique. Une telle mesure est présentée dans la figure 2.9.

Jusqu'à une intensité du courant de 8 kA cette caractéristique est linéaire et réversible. L'auteur propose un ajustement de cette caractéristique par l'équation 2.3 avec $U_0 = 20$ V et il montre que G est une fonction de la distance inter-électrodes d et du diamètre des électrodes D :

$$G = G(d,D) \approx \frac{d}{f(D)} \tag{2.4}$$

Cette fonction augmente avec d et dimimue avec D (pour $5 \leq d \leq 15$ mm et $25 \leq D \leq 75$ mm). Un ordre de grandeur de G est par exemple 3.10^{-3} $V.A^{-1}$ pour $d = 5$ mm et $D = 25$ mm.

Au-delà de ce courant, l'auteur observe la chose suivante. La tension de l'arc augmente au-delà de la courbe réversible U-I jusqu'au seuil de fusion de l'électrode (observé sans doute à l'anode), puis elle reste ensuite constante. Lorsque toute l'électrode est en fusion, la tension redescend, parfois alors même que le courant continue à croître, cette effet est visible sur la figure 2.9. De manière

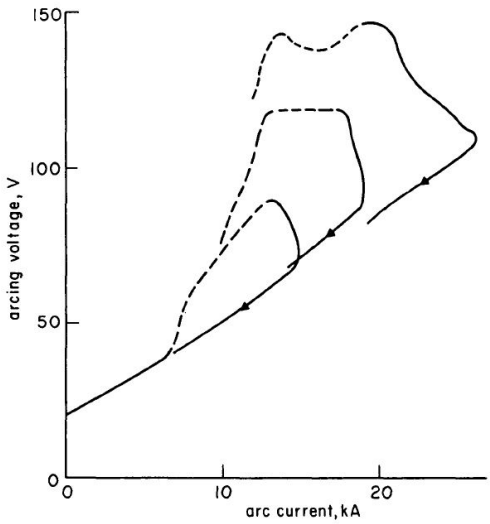


FIG. 2.9 – Caractéristique dynamique d'un arc généré par surtension dans un vide d'environ $3{,}7.10^{-2}$ Pa entre des électrodes massives de cuivre de diamètre 25 mm et distantes de 5 mm [40]. Les pointillés correspondent à un état instable de l'arc.

assez extraordinaire, la caractéristique $U_{ARC}(I)$ lorsque le courant décroît est confondue avec la caractéristique linéaire et réversible décrite précédemment.

L'auteur interprète ces observations en fonction de la répartition des atomes neutres dans la colonne. Lorsque le courant est inférieur à 8 kA, la production d'atome est assuré entièrement par la cathode. Les collisions entre les électrons et ces atomes entrainent une augmentation du champ électrique. La densité d'atomes augmentant avec le courant, ce champ électrique augmente de même. Ce champ électrique a pour effet de renvoyer les ions positifs vers la cathode. Lorsque le courant augmente au-delà d'un certain seuil, le champ électrique est tel que les ions émis par la cathode ne parviennent plus à assurer la neutralité du plasma à proximité de l'anode. Le flux d'énergie des électrons sur l'anode est alors tel que celle-ci entre en fusion, libérant des atomes métalliques. Ces atomes diffusent dans le plasma et provoquent une diminution du champ électrique. Malheureusement l'auteur n'apporte aucune explication sur le fait que dès que le courant redescend la tension suive une caractéristique commune quel que soit le courant maximum.

Mitchell présente une courbe intéressante dans le cas d'une anode recouverte de plomb et pour une distance inter-électrodes plus élevée, nous la présentons sur la figure 2.10. De façon surprenante, il n'apporte aucun commentaire sur cette courbe dans son article. Cependant, nous pouvons supposer que le fait que la tension d'arc atteint une valeur élevée dès les premiers instants de la

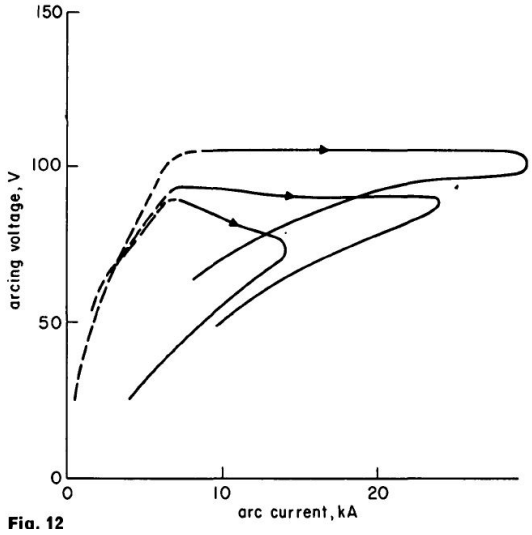


FIG. 2.10 – Caractéristique dynamique d'un arc généré par surtension dans le vide entre des électrodes massives de cuivre de diamètre 25 mm et distantes de 40 mm [40]. L'anode est recouverte de plomb par trempage à chaud. Les pointillés correspondent à un état instable de l'arc.

décharge tout en étant plus stable est liée à une fusion et une évaporation de l'anode qui intervient bien plus tôt que dans le cas d'une anode de cuivre. Il faut également noter que la tension d'arc est du même ordre de grandeur que dans le cas d'une anode en cuivre quand bien même la distance inter-électrodes est huit fois plus importante. Cela correspond à un champ électrique dans la colonne bien plus faible. Malheureusement les auteurs ne donnent aucune information sur l'épaisseur de la couche et sa dégradation au cours ou après l'essai.

Sherman – 1978

Quelques années plus tard, Sherman [41] montre, dans une configuration expérimentale similaire, que la tension d'arc peut s'exprimer non pas en fonction de la taille des électrodes mais en fonction du rayon de la taille de la zone cathodique R_C et exprime G de la façon suivante :

$$G = \frac{f(d)}{R_C} \tag{2.5}$$

et $f(d)$ est une fonction logarithmique croissante de d et R_C dépend du temps. Sherman propose un modèle pour G basé sur une hypothèse répartition du plasma en cône entre la cathode et l'anode, donnant d'excellents résultats pour une distance inter-électrodes d comprise entre 3 et 30 mm.

Kimblin – 1969

Ces deux travaux sont inspirés par ceux publiés par Kimblin [15] mais qui lui présente des caractéristiques $U_{ARC}(I)$ hybrides et non pas dynamiques. Un apport intéressant de Kimblin par rapport aux résultats résumés ci-dessus est qu'il estime la tension cathodique par une mesure du potentiel à proximité de la cathode. Ses mesures indiquent que la tension cathodique U_C au maximum du courant reste constante alors que la tension d'arc varie avec ce courant maximum. Cela signifie que les variations de tension d'arc observées ne sont pas imputables à la tension cathodique.

De ces travaux réalisés dans le vide, nous pouvons retenir les éléments suivants :

— la tension d'arc varie linéairement et de façon réversible avec le courant tant que l'anode n'entre pas en fusion, c'est-à-dire qu'elle se comporte comme un simple collecteur d'électrons et n'émet pas massivement des vapeurs métalliques,

— le coefficient de variation G augmente avec la distance et diminue avec la surface de l'électrode ou le rayon du pied cathodique,

— à un certain seuil de courant, l'anode commence à fondre et la tension augmente brutalement et de façon instable,

— lorsque l'anode est recouverte d'un métal à bas point de fusion, ce seuil est plus bas et la tension d'arc plus stable,

— il semblerait que lorsque l'anode est complètement fondue, la tension redescend vers sa courbe réversible. Indubitablement, lorsque le courant redescend on revient sur la courbe linéaire réversible,

— les variations de tension d'arc ne sont pas liées à une variation de la tension cathodique

Une interprétation des résultats en termes de densité en atome neutre de la colonne est mise en avant par ces trois auteurs pour expliquer l'augmentation de la tension d'arc jusqu'à la fusion de l'anode. Mais cette explication semble peiner à expliquer l'allure de la caractéristique après cette fusion. Nous nous contenterons donc de retenir que l'aspect non linéaire de la tension d'arc lorsque la montée du courant est liée à l'apport massif de métal dans la colonne.

2.3.2 Arc dans l'air

Strom – 1946

Strom [42] s'intéresse au comportement d'un arc long ($0{,}3 \lesssim d \lesssim 1{,}2\ m$), dans l'air, entre deux électrodes de laiton pour un courant alternatif de 60 Hz et d'intensité allant de 68 A à 21,7 kA. L'auteur présente en particulier plusieurs courbes de caractéristiques dynamiques de l'arc, telle celle de la figure 2.11.

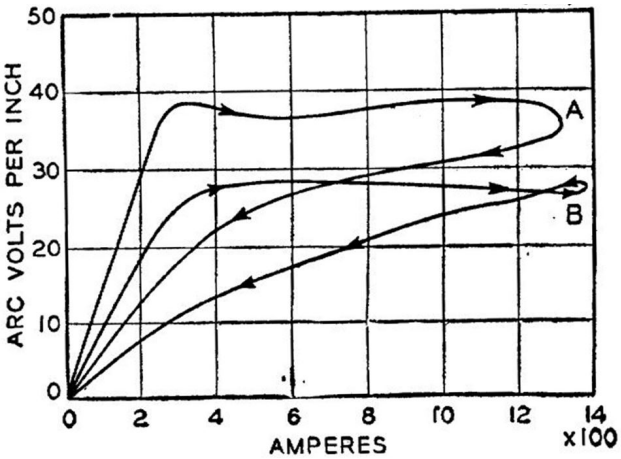


FIG. 2.11 – Caractéristique dynamique d'un arc de longueur $d \simeq 1{,}2\ m$ [42]. Les courbes A et B correspondent respectivement à la deuxième et à la sixième demi-période, pour une fréquence de 60 Hz. L'ordonnée correspond au champ électrique dans la colonne $E_0 = (U_{ARC} - U_E)/d$ avec $U_E \simeq 35\ V$.

Nous commenterons cette courbe de la façon suivante :

— La tension d'arc n'est pas constante avec l'intensité du courant et de plus décrit une hystérésis,

— On peut distinguer trois phases : 1) La tension augmente d'abord rapidement, 2) elle se stabilise ensuite jusqu'à ce que l'intensité du courant atteigne son maximum, et 3) elle décroit linéairement avec l'intensité du courant.

— Lors de demi-périodes successives, cette caractéristique évolue, plutôt vers le bas mais pas de manière répétable, indique l'auteur. Il convient de préciser ici que l'amorçage de l'arc est réalisé par explosion d'un fil fusible, cette évolution peut donc s'expliquer par une diminution du pourcentage de métal dans la colonne au cours du temps. La faible répétabilité peut sans doute être liée à la longueur de la colonne qui doit la rendre très instable, et donc de longueur variable, pour des courants aussi élevés.

— Il est en revanche troublant que le champ dans la colonne tende vers une valeur si basse lorsque que l'intensité du courant diminue.

L'auteur estime le champ électrique au maximum de l'intensité à $1{,}2.10^3 \lesssim E_0 \lesssim 1{,}5.10^3\ V.m^{-1}$ sur la gamme d'intensité qu'il explore et nous pouvons estimer $G/d \simeq 0{,}8\ V/A/m$ pour un courant maximum d'environ 1350 A d'après la figure 2.11.

La tension d'arc décrit une hystérésis avec l'intensité du courant dans un cas où l'influence des électrodes semble négligeable, du fait de la longueur importante de la colonne, ce qui suggère que cet effet est uniquement lié à la colonne d'arc. Cependant l'amorçage par fil fusible apporte une quantité de métal importante dans la colonne d'arc. Il n'est donc pas exclu que cette hystérésis soit liée à la présence de vapeurs métalliques dans la colonne.

Cette courbe est très ressemblante à la courbe 2.10 obtenue par Mitchell dans le vide entre des électrodes massives de cuivre et un revêtement de plomb à l'anode [40].

Nakayama – 2002

Nakayama [43] étudie un arc dans l'air entre deux électrodes en tungstène argenté de diamètre 8,5 mm et d'épaisseur 2 mm fixées sur des supports massifs en cuivre. L'arc est amorcé par fil fusible et l'intensité maximale du courant varie jusqu'à 13 kA, pour une forme d'onde similaire à une demi-sinusoïde de 50 Hz. La figure 2.12 présente la caractéristique dynamique de cet arc pour différentes

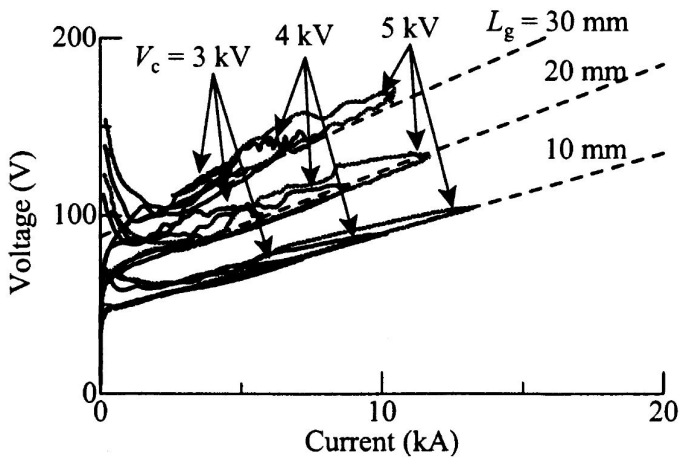


FIG. 2.12 – Caractéristique dynamique d'un arc dans l'air entre deux électrodes de tungstène argenté, pour une forme d'onde sinusoïdale de 50 Hz [43].

valeurs d'intensité maximale et pour plusieurs distances inter-électrodes d (10,

20 et 30 mm). Le sens de variation de l'intensité du courant n'est pas clairement indiquée par l'auteur. Si l'on exclut la variation de la tension pour les faibles intensité, liée soit à l'amorçage par explosion d'un fil fusible, soit à la caractéristique $U_{ARC}(I)$ aux faibles intensités, cette caractéristique est remarquablement linéaire, réversible et indépendante de l'intensité maximale du courant. Le coefficient G, tel que défini par l'équation 2.3, augmente avec la distance d. L'auteur propose les formules suivantes :

$$\begin{aligned} U_0 &= U_E + E_0 d \\ G &= G_0 + \alpha d \end{aligned} \tag{2.6}$$

où $U_E = 23\ V$, $E_0 = 2{,}15.10^3\ V.m^{-1}$, $G_0 = 3{,}27.10^{-3}\ V.A^{-1}$ et $\alpha = 0{,}13\ V.A^{-1}.m^{-1}$. Ces ajustements sont représentés en lignes pointillées sur la figure 2.12. Malheureusement l'auteur ne propose pas de base d'interprétation à ces résultats ni de détails concernant l'état de dégradation des surfaces après extinction de l'arc.

Yokomizu – 1996

Avant de commenter ces résultats, nous souhaitons présenter un article publié par un des co-auteur, Yokomizu, quelques années auparavant [13]. Celui-ci étudie un arc électrique à pression atmosphérique, entre des électrodes de diamètre 26 mm et d'épaisseur 5 mm déposées sur un support massif, sans doute en cuivre. L'onde de courant est de forme semi-sinusoïdale à 60 Hz pour une intensité maximale du courant de 200 A à 10 kA et à 120 Hz jusqu'à 120 kA. La distance inter-électrodes varie entre 0,2 et 3 mm. Le matériau des électrodes est le tungstène, le cuivre, le fer et un pseudo-alliage CuW(30/70). Plusieurs gaz plasmagènes sont utilisés : SF_6, argon et air. La tension d'arc est mesurée à l'intensité maximale du courant et Yokomizu utilise la méthode de variation de la distance pour déterminer U_E (cf. fig. 2.1). Leurs observations sont les suivantes :

— Pour le tungstène et le pseudo-alliage CuW, U_E est indépendant du courant jusqu'à 20 kA,
— Pour le cuivre et le fer, U_E est indépendant du courant jusqu'à 1 kA. Au-delà, l'érosion est trop importante pour tirer des conclusions,
— L'impact du gaz plasmagène sur U_E est soit mineur soit nul, alors même que ces gaz ont des propriétés très différentes,
— La tension des électrodes dans l'air U_E est d'environ 16,5 V pour CuW, Cu et Fe et est plus basse pour W (14 V).

Si nous rapprochons ces résultats de ceux de Nakayama, en considérant que le comportement de l'arc pour des électrodes en tungstène argenté est similaire à celui pour des électrodes en tungstène ou pseudo-alliage, malgré leur différence de taille (8.5 et 26 mm de diamètre respectivement), nous pouvons alors conclure

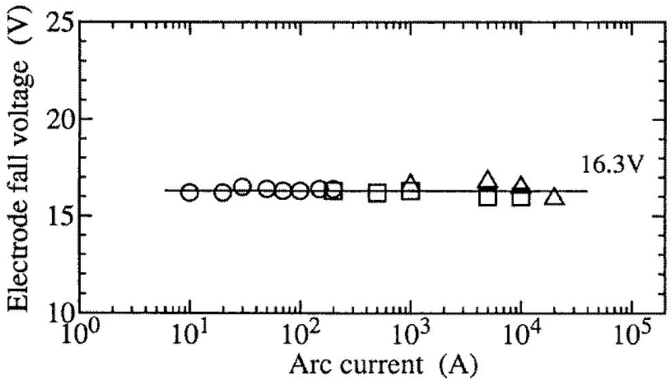


FIG. 2.13 – Tension aux électrodes U_E pour des électrodes en CuW(30/70) dans l'air. Les carrés et les triangles correspondent à des ondes de courants de 60 et 120 Hz respectivement (nous ignorerons les ronds).

que la variation de tension d'arc avec l'intensité du courant est bien imputable au champ électrique dans la colonne. En revanche, l'absence d'une quelconque variation de la tension d'arc à distance très faible avec l'intensité du courant contredit l'existence d'une valeur non-nulle de G_0. Les formules proposées par Nakayama sont donc limitées à une distance inter-électrodes comprise en 10 et 30 mm et ne peuvent être extrapolées pour des distances inférieures.

Ainsi, ces deux articles présentent un comportement de la tension d'arc similaire à celui observé dans le vide par Mitchell, Sherman et Kimblin, dans la mesure où l'on considère que les auteurs n'ont pas rapporté les résultats impliquant une fusion des électrodes. Cela signifie que l'impact de la présence ou non d'un gaz plasmagène et la nature de celui-ci n'a pas un impact majeur sur la caractéristique $U_{ARC}(I)$.

2.3.3 Arc impulsionnel

Ratovoson – 2015

Ce travail se démarque des précédents par le temps de montée plus rapide de l'onde de courant, d'un facteur dix environ. Ratovoson [44] étudie un arc dans l'air dans une configuration pointe - plan, où la pointe est la cathode. Elle est en graphite et de diamètre 6 mm, l'anode est en graphite ou en cuivre. L'onde de courant a un temps de montée $t_0 = 0{,}5\ ms$ et une constante de temps de descente exponentielle τ entre 24 et 91 ms. L'intensité maximale atteinte par le courant est comprise entre 500 à 2000 A. L'amorçage de l'arc se fait par haute-tension. Cette configuration est particulièrement intéressante car 1) l'ordre de grandeur du temps de montée est proche de celui du temps de fractionnement estimé dans

le disjoncteur $\delta t_f \simeq 0{,}1\ ms$, et 2) l'amorçage par haute-tension n'apporte pas de vapeurs métalliques au plasma ce qui simplifie l'interprétation. Malheureu-

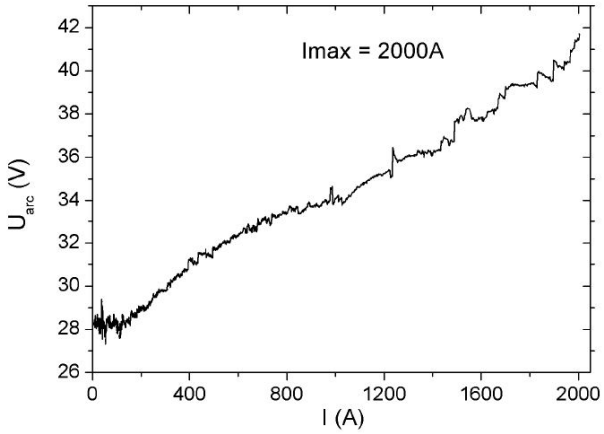


FIG. 2.14 – Caractéristique dynamique de la tension d'arc pour un arc amorcé par haute-tension entre une cathode de graphite et une anode de cuivre, à une distance inter-électrodes de 4 mm [44].

sement, les caractéristiques dynamiques $U_{ARC}(I)$ présentées ne montrent pas l'allure de la tension dans la phase de montée du courant.

L'auteur constate que la tension d'arc décroît lorsque le courant décroît puis se stabilise pour une intensité inférieure à 200 A. Il confirme que cette variation n'est pas liée au mode d'amorçage en réalisant quelques essais avec un amorçage par fil fusible. Le paramètre G tel que défini par l'équation 2.3 est d'environ $7.10^{-3}\ V.A^{-1}$ pour un arc de longueur $d = 4\ mm$.

L'auteur présente ensuite plusieurs résultats intéressants concernant la valeur de tension d'arc atteinte au maximum d'intensité du courant : $U_{ARC}(I_0)$ augmente avec le courant maximum I_0 et linéairement avec la distance inter-électrodes d, pour d compris entre 2 et 10 mm. De façon plus surprenante, l'auteur constate que la valeur $U_{ARC}(I_0) - U_0$ ne dépend ni du diamètre de l'anode ($D = 6$ ou 15 mm), ni de la nature de l'anode (graphite ou cuivre), quand bien même l'érosion est bien plus importante pour le cuivre. En revanche la tension d'arc décroit plus rapidement ensuite pour le cuivre que pour le graphite.

Le fait que ce phénomène soit constaté dans le cas d'électrodes en graphite, dont l'érosion est rapportée par l'auteur comme étant faible, laisse à penser que la présence de vapeur métallique dans le plasma n'est pas une explication nécessaire à la décroissance de la tension d'arc.

L'auteur propose deux pistes pour expliquer cette tendance :

1) La montée en température de la cathode modifie le bilan de puissance et donc U_C. Lorsque la cathode est froide, à l'amorçage de l'arc, un champ

plus important est nécessaire pour extraire les électrons, y compris dans le cas d'un matériau réfractaire comme le graphite. L'auteur émet cependant quelques doutes sur la validité des données expérimentales étayant cette hypothèse.

2) L'évolution de la tension d'arc est liée à l'évolution des propriétés de la colonne. Côté cathode, la température est très élevée puis diminue avec le courant : « Si l'arc ne peut s'expandre radialement, alors la conductivité électrique de la région chaude doit augmenter, ce qui se traduit par un échauffement de la région centrale. Les pertes d'énergie (rayonnement, gradients plus forts) augmentent, ce qui se traduit par l'accroissement du champ électrique local et donc de la tension aux bornes de la colonne. » Côté anode, la température de l'arc varie moins mais c'est sa section qui semble-t-il augmente avec le temps. Ces deux effets vont dans le sens d'une tension de colonne qui augmente avec I_0 mais qui diminue ensuite lorsque le courant diminue. Un modèle numérique d'un arc à l'ETL, mais dont peu de détails sont précisés, est utilisé pour étayer cette hypothèse et semble donner un accord correct dans le cas d'une anode en graphite.

L'absence d'informations sur la phase de montée du courant, des imprécisions concernant la présentation des résultats ainsi que des doutes dans l'interprétation des mesures restreignent malheureusement l'intérêt de ce travail.

2.3.4 Fractionnement de l'arc

Lindmayer – 2004

Lindmayer [4] s'intéresse aux arcs électriques créés dans des conditions proches de celles de l'arc de coupure dans le disjoncteur, en particulier au processus de fractionnement. Son montage expérimental permet d'estimer le temps de fractionnement de l'arc sur une plaquette par une mesure déportée du courant traversant celle-ci : Mutzke [45] estime ce temps à $\delta t_f = 0{,}1\ ms$ pour une intensité de 0,55 kA, ainsi que le met en évidence la figure 2.15. Cet ordre de grandeur corrobore celui avancé dans le chapitre précédent pour le disjoncteur. Cependant, aucune perspective n'est donnée concernant la dépendance de ce temps avec les paramètres du système dont il dépend très certainement (intensité du courant, géométrie des amenées de courant et des plaquettes de fractionnement, échappements, etc.).

Lindmayer propose un modèle de fractionnement basé sur les observations réalisées par Burkhardt [46] et dont il propose une vision schématique très claire, voir figure 2.16. Lors de l'essai de coupure, l'arc est accéléré par les forces de Laplace. Les plaquettes de fractionnement bloquent le mouvement de la colonne mais de part et d'autre les pieds avancent. Cela correspond à un allongement

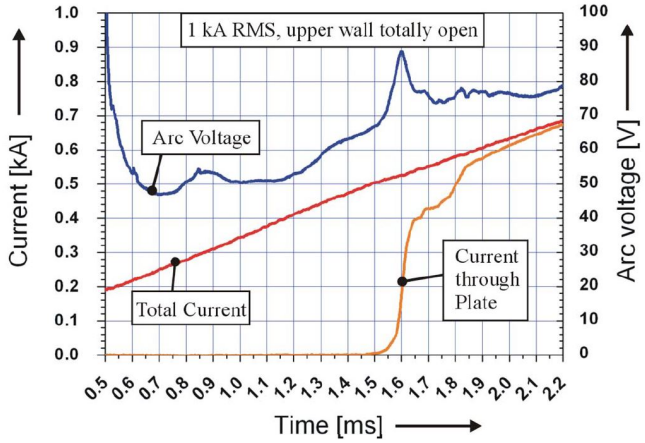


FIG. 2.15 – Mise en évidence de la durée de la phase de fractionnement de l'arc électrique avec une plaquette de fractionnement [45].

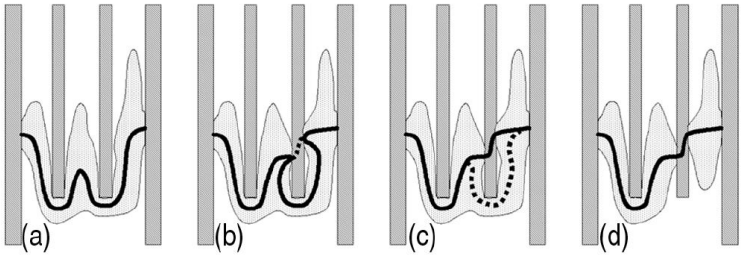


FIG. 2.16 – Mécanisme de fractionnement de l'arc tel que décrit par Lindmayer [4] d'après Burkhardt [46].

de la colonne et donc de la tension d'arc. À un moment donné, deux nouveaux pieds sont créés sur la plaquette, à une certaine distance du bord. L'arc peut alors de nouveau se déplacer.

Afin de modéliser le mouvement de l'arc dans une telle configuration, Lindmayer introduit un modèle de gaine, exprimé sous la forme d'une caractéristique tension - densité de courant $U_E(J)$. La forme proposée permet de créer un mécanisme de butée et donc de retarder le fractionnement de l'arc lorsque la colonne atteint la plaquette. Afin de reproduire l'accrochage du pied d'arc, Mutzke[45] introduit une surtension à la création du pied d'arc pour une densité de courant d'environ 1,2.10^4 $A.m^{-2}$. Cette surtension contraint l'arc à se courber encore plus avant de créer un pied. L'ordre de grandeur validé par l'auteur, en confrontant le résultat de ses modélisations à l'expérience, est de 39,4 V pour une tension de gaine après établissement de l'arc de 20 V. Malheureusement, il n'est pas proposé d'interprétation physique permettant de faire le lien avec les propriétés des gaines décrites dans la littérature, et les données expérimentales de valida-

tion publiées sont très peu nombreuses. Il est donc très difficile de se faire une idée quant à la réelle pertinence de ce modèle et à l'étendue de son domaine de validité.

Yang – 2010

Yang [47] propose un travail similaire mais, en faisant l'économie de la mesure de courant dans la plaquette, il utilise une chambre de coupure plus réaliste. Il propose un modèle d'arc qui ne traite de façon particulière que la gaine cathodique et utilise des ordres de grandeurs de surtension pour le fractionnement plus réalistes, à savoir 8.1 V lors de la création du pied. L'aspect le plus original

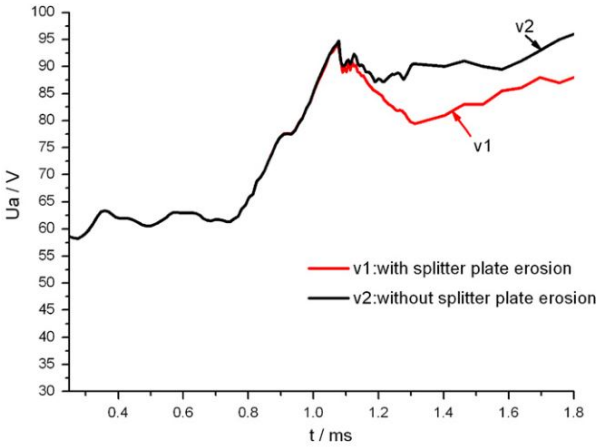


FIG. 2.17 – Modélisation de la variation de la tension d'arc lors du fractionnement (à $t \simeq 1{,}0\ ms$) avec et sans prise en compte de l'érosion des électrodes. La courbe avec prise en compte de l'érosion présente un accord correct avec les données expérimentales [47].

de son travail est la prise en compte de l'érosion des plaquettes après le fractionnement de l'arc et le calcul de l'impact des vapeurs métalliques sur la tension de la colonne d'arc. L'auteur montre ainsi que la prise en compte de l'érosion permet de reproduire fidèlement la baisse de tension consécutive au fractionnement de l'arc.

Mais de nouveau, le très grand nombre de paramètres intervenant dans le modèle et le peu de données expérimentales présentées pour sa validation rendent difficile de juger de la réelle pertinence de ce travail. Néanmoins il permet de démontrer que la chute de tension après le fractionnement de l'arc peut être liée non pas à une caractéristique $U_{ARC}(I)$ donnée, mais à une évolution de la composition chimique du plasma liée à la dégradation thermique des électrodes.

2.4 Conclusion

Les auteurs des travaux présentés ci-dessous s'accordent à constater une augmentation de la tension d'arc avec l'augmentation de l'intensité du courant, pour une intensité du courant d'au moins quelques centaines d'ampères, et ce en l'absence de confinement par des parois, c'est-à-dire sans contraindre physiquement le rayon de la colonne d'arc. Deux comportement bien distincts émergent : soit la caractéristique $U_{ARC}(I)$ dynamique est linéaire et réversible , soit elle présente une hystérésis, avec une tension d'arc plus élevée lors de la montée du courant. De manière surprenante, le comportement constaté lors de la descente du courant est similaire dans les deux cas. Nous allons donc ci-dessous synthétiser les informations disponibles dans la bibliographie par type de phase, que nous définirons en fonction du sens de variation du courant et de l'aspect réversible ou non du comportement de la tension.

Phase de montée linéaire

La tension d'arc augmente linéairement avec le courant tant que les électrodes restent passives, c'est-à-dire ne présentent pas de signe d'évaporation massive.

Ce comportement est constaté par Mitchell dans le vide jusqu'à 8 kA (électrodes en cuivre, anode passive) et par Nakayama dans l'air jusqu'à 13 kA (électrodes en tungstène, que l'on peut supposer passives). Dans ces deux cas l'onde de courant est similaire à une sinusoïde de 50 Hz, ce qui correspond à un temps de montée $t_0 = 5\ ms$. Le coefficient G, définit par l'équation 2.3 ($U_{ARC} = U_0 + GI$), dépend notamment des paramètres géométriques de l'arc : il augmente avec la distance inter-électrodes d et diminue avec le diamètre des élelectrodes. Son ordre de grandeur, que nous exprimerons rapporté à la longueur de l'arc, est $G/d \simeq 1\ V.A^{-1}.m^{-1}$.

Phase de montée hystérétique

Lorsque l'évaporation des électrodes est massive, la tension d'arc atteint une valeur plus élevée et ne dépend plus linéairement de l'intensité du courant.

Ce phénomène est constaté dans le vide par Mitchell lorsque l'anode en cuivre commence à s'évaporer pour une intensité du courant supérieure à 8 kA et pour un courant bien plus faible lorsque l'anode est revêtue de plomb (que l'on peut supposer s'évaporer bien plus facilement). Strom constate également ce comportement pour un arc très long dans l'air ($d > 1\ m$), amorcé par un fil fusible entre des électrodes de laiton. Aucune explication n'est présentée sur la valeur de tension atteinte lors de cette phase ni sur son éventuelle dépendance vis-à-vis de paramètres géométriques ou temporels. Elle est dans tous les cas

supérieure à la tension pour la même intensité lorque le courant décroît et elle semble à peu près constante durant cette phase.

Phase de descente

La tension d'arc varie linéairement avec l'intensité du courant, quelle que soit l'allure de la tension durant la phase de montée.

La caractéristique $U_{ARC}(I)$ dynamique descendante semble même similaire, sinon identique par exemple pour Mitchell, à la caractéristique de montée du courant en l'absence d'évaporation significative. Elle ne dépend donc pas de la valeur de courant maximal atteint, c'est-à-dire que la phase de descente semble complètement indépendante de l'histoire de l'arc et de l'état des électrodes.

Dans tous les cas, la tension cathodique U_C semble rester constante. Kimblin le montre dans le vide à l'aide d'une sonde de potentiel et Yokomizu dans l'air par des mesures de la tension d'arc en fonction de la distance. De plus, il ne semble pas y avoir un impact majeur de la présence ou non d'un gaz : les tendances et les ordres de grandeurs sont similaires dans les deux cas. En revanche, l'impact du temps reste assez mystérieux car assez peu exploré. Si les ordres de grandeurs utilisés pour le courant descendant correspondent à notre application, les temps de montée sont généralement bien plus long que l'ordre de grandeur mesuré par Lindmayer, hormis Ratovoson mais qui malheureusement ne propose pas de mesure de la tension durant cette phase.

Différentes pistes d'explication sont avancées pour expliquer la dépendance de la tension d'arc avec le courant. La plupart concernent la tension de colonne : un confinement de la colonne par le champ magnétique induit ou par la taille réduite des électrodes, une répartition non uniforme des vapeurs métalliques dans la colonne, l'impact des vapeurs métalliques sur la conductivité de la colonne d'arc et sur les pertes par rayonnement. Seul Ratovoson avance l'hypothèse d'une tension cathodique qui diminue avec l'échauffement de la cathode par l'arc.

Mais trop peu de travaux expérimentaux sont disponibles pour réellement conforter l'une ou l'autre de ces explications.

Si la littérature apporte des pistes intéressantes pour comprendre le comportemet d'un arc dans des conditions transitoires à fort courant, il faut garder à l'esprit que les conditions de l'arc de court-circuit ne sont pas représentées, en particulier concernant les points suivants :

— Le temps de fractionnement de l'arc dans le disjoncteur est de l'ordre de 0,1 ms, ce qui est bien plus rapide que la dynamique utilisée ci-dessus,

avec un temps de montée d'environ 5 ms. Il n'existe aucune évidence que le taux de variation du courant ait son importance sur la tension, mais quoiqu'il en soit il joue certainement sur la dynamique de vaporisation des électrodes, qui à son tour impacte la tension d'arc,

— Les électrodes utilisées sont systématiquement très massives, alors que dans une chambre de coupure de disjoncteur elles sont au contraire très fines. Nous pouvons donc nous attendre à une montée en température bien plus rapide et une érosion plus importante des électrodes dans notre application, et partant, une hystérésis sans doute plus prononcée.

— L'impact du matériau sur le phénomène reste relativement peu documenté. Or il s'agit d'un aspect qui constitue un levier facile à mettre en oeuvre dans la conception d'une chambre de coupure.

Chapitre 3

Outils expérimentaux

Le chapitre 1 présente les caractéristiques du disjoncteur modulaire lors d'un essai de court-circuit et ce que nous pouvons induire du comportement de l'arc électrique après fractionnement dans le déion. En effet, il est difficile d'observer directement le comportement de l'arc électrique de coupure dans le disjoncteur : sa géométrie est très complexe et ses parois sont opaques. L'incrustation de parois transparentes permet d'appréhender ce comportement mais malheureusement modifie de façon importante le comportement de l'arc. Ainsi, de façon complémentaire à l'instrumentation du disjoncteur modulaire, nous avons souhaité développer un montage expérimental le plus simple possible, permettant une observation aisée de l'arc mais néanmoins représentatif du comportement de l'arc électrique dans le disjoncteur.

Nos prérequis sont les suivants :

1) des électrodes réalistes, non seulement concernant leur matériau et leurs dimensions, mais aussi le fait que ces électrodes soient isolées thermiquement,
2) une distance inter-électrodes réaliste et constante durant l'essai, typiquement 1 mm,
3) un arc statique, *i.e.* dont le mouvement est limité, ce qui correspond à l'état recherché dans un disjoncteur après fractionnement,
4) des conditions de courant réaliste,
5) un mode d'amorçage « propre », *i.e.* qui n'apporte pas d'éléments étrangers à l'arc entre électrodes comme par exemple le fait l'explosion d'un fil fusible, afin de simplifier l'interprétation des résultats d'essai.

Notre travail constituant une première approche, nous avons également apporté deux simplifications majeures. Dans un disjoncteur il y a typiquement entre dix et quinze arcs en série après fractionnement dans le déion. Nous nous limiterons à un seul. Ainsi, alors que dans le disjoncteur, chaque plaquette de

fractionnement est d'un côté cathode, d'un côté anode, ce qui très certainement impacte la stabilité de l'arc mais aussi la montée en température des plaquettes, dans notre montage expérimental, une électrode sera soit cathode soit anode. Ensuite, nous travaillerons sans aucun confinement de l'arc électrique, en dehors de celui des électrodes elles-mêmes. Ce choix simplifie énormément l'étude car il nous affranchit des phénomènes suivants : montée en pression de la chambre d'arc, modification de la composition chimique de la colonne d'arc par ablation des parois, refroidissement de l'arc par les parois. Il nous permettra également un accès visuel aux phénomènes et donc un meilleur diagnostic, ce qui est primordial en première approche.

Nous détaillerons ci-dessous les différents éléments du montage expérimental et des outils de diagnostic associés en justifiant nos choix de conception.

3.1 Chambre d'arc

3.1.1 Électrodes

La géométrie des électrodes est présentée figure 3.1 : un coupon de largeur $l = 15\ mm$ et de longueur $L = 50\ mm$ est plié en son milieu avec un angle de $\theta = 160°$ et un rayon interne de $r_0 = 3\ mm$. La largeur a été choisie proche de la celle des plaquettes de fractionnement du disjoncteur. La longueur est en revanche environ deux fois supérieure aux valeurs constatées pour la hauteur des plaquettes de fractionnement, mais est nécessaire au maintien mécanique des électrodes, comme nous le détaillerons ci-dessous. L'épaisseur des électrodes e_0 peut être aisément variée entre 0,5 et 2 mm. L'ensemble des résultats présentés dans ce document a été réalisé pour une épaisseur d'électrode $e_0 = 0{,}8\ mm$, qui est une valeur typique d'épaisseur des plaquettes de fractionnement du disjoncteur modulaire.

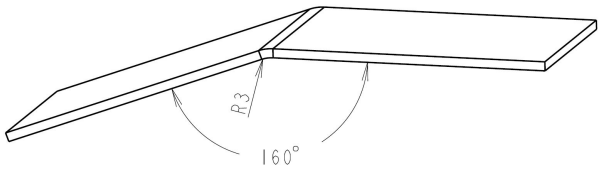


FIG. 3.1 – Géométrie des électrodes, de largeur 15 mm et de longueur avant pliage 50 mm.

Comme nous le verrons ci-dessous, le pli des électrodes est nécessaire à la localisation puis à la stabilisation de l'arc électrique au centre des électrodes. Afin de rester proche d'une configuration des électrodes plan - plan représentative de

celle des plaquettes de fractionnement, nous avons choisi une valeur de θ la plus proche possible de 180° mais garantissant tout de même une bonne répétabilité de la position de l'amorçage, soit $\theta = 160°$. Ce pli est réalisé avec une bonne reproductibilité, typiquement $\pm 1°$, à l'aide d'une presse manuelle équipée d'un système poinçon - matrice.

Dimension	**Valeur**
Largeur l	15 mm
Longueur L	50 mm
Épaisseur e_0	0,8 mm
Angle θ	160°
Rayon pli r_0	3 mm

TAB. 3.1 – Récapitulatif des caractéristiques dimensionnelles des électrodes.

La géométrie très simple des électrodes permet l'utilisation de matériaux d'origine variée. Ainsi il est possible de poursuivre les différents objectifs :

— Compréhension de l'existant : les coupons sont prélevés directement sur les feuillards utilisés pour la découpe des plaquettes de fractionnement, ainsi le matériau des électrodes sera strictement identique à celui des plaquettes de fractionnement

— Évaluation de matériaux disponibles industriellement : les coupons sont issus de matériaux disponibles sous forme de feuillard et donc adaptés à l'outil industriel

— Étude exploratoire de matériaux non disponibles ou difficilement disponibles industriellement : il est évidemment possible de réaliser par usinage des éprouvettes à partir d'échantillons de dimensions quelconques

3.1.2 Supports d'électrode

Chaque électrode est montée dans un support, ainsi que le représente la figure 3.2. Celui-ci est composé des éléments suivants : un bloc de maintien (2), représenté en coupe sur la figure 3.2, une contre-électrode (3, tronquée sur la figure), un ressort de compression et un palier de guidage (4).

L'électrode est maintenue en appui contre le bloc de maintien par une contre-électrode en laiton CuZn36 de diamètre 6 mm avec un épaulement de diamètre 10 mm, ainsi que le montre la figure 3.2. Cette dernière assure également le passage du courant électrique. Elle est délibérément très longue (300 mm) afin de minimiser les forces de Laplace exercées par les amenées de courant sur l'arc.

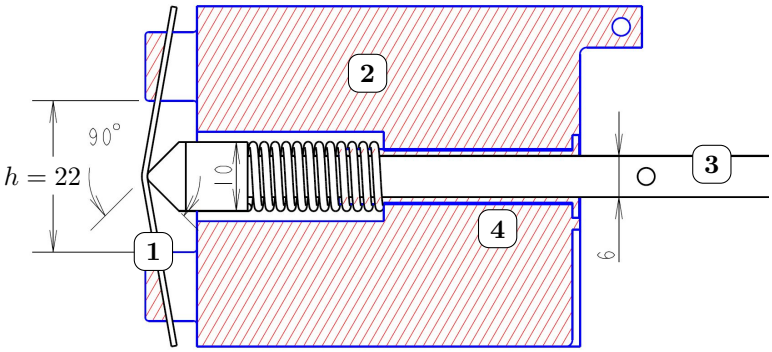


FIG. 3.2 – Électrode montée dans son support. Le bloc de maintien (2) ainsi que la palier de guidage (4) sont représentés en coupe afin de mettre en évidence le système de compression mécanique de la contre-électrode (3) sur l'électrode (1).

La force de contact entre l'électrode et la contre-électrode est assurée par la compression du ressort, qui a été dimensionné pour obtenir une force d'environ 30 N. Cette valeur relativement importante nous a semblé nécessaire pour garantir un bon passage du courant vers l'électrode et ainsi éviter une éventuelle dégradation du contact électrique. La contre-électrode est guidée par un palier lisse polymère afin de garantir un positionnement répétable. Son extrémité est usinée en pointe avec un angle de 90° et un rayon de l'ordre de 1 mm.

Le bloc de maintien a une géométrie relativement complexe pour permettre un bon positionnement de l'électrode ainsi qu'un montage / démontage commode. Il est réalisé par la technique du frittage de poudre polymère, qui a l'avantage de donner accès aisément à des formes complexes avec un état de surface correct. Le polymère est un PA6 qui possède de bonnes propriétés mécaniques, ce qui a permis en particulier de réduire l'épaisseur des parois et donc l'encombrement autour de l'arc, et également de bonnes propriétés de tenue en température.

La hauteur d'ouverture du système de maintien de $h = 22$ mm, indiquée sur la figure 3.2, a été choisie bien supérieure à la largeur des électrodes afin d'éviter tout effet de confinement de l'arc électrique. De fait, nous n'avons constaté aucune dégradation de cette pièce sous l'effet de la chaleur dégagée par l'arc électrique. Après un nombre important d'essai, seul un léger voile de suie recouvre cette pièce. Nous pouvons donc considérer que la présence de ce bloc polymère n'aura aucun impact sur le comportement de l'arc électrique.

Enfin, un soin particulier a été pris à ce qu'aucun composant magnétique (vis acier par exemple) ne soit présent à proximité de l'arc électrique.

3.1.3 Vue d'ensemble

Les deux électrodes montées dans leur support respectif sont positionnées face-à-face avec un angle relatif de 90° suivant l'axe x, ainsi que le représente la figure 3.3.

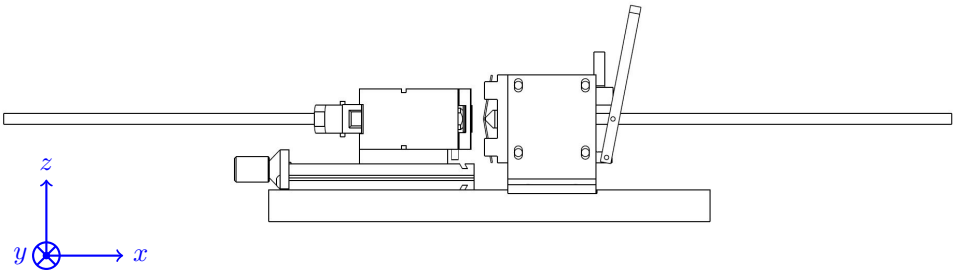


FIG. 3.3 – Vue d'ensemble du montage mécanique, orienté face caméra, et orientation des axes du repère (x,y,z).

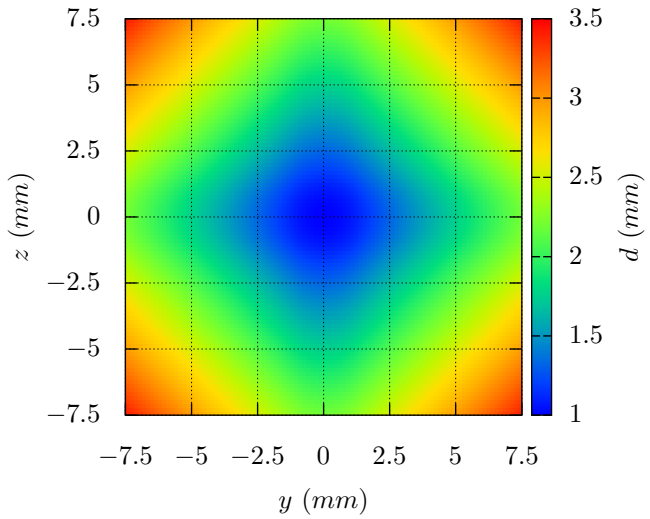


FIG. 3.4 – Distance inter-électrodes d dans le plan xy pour deux électrodes de géométrie définie par la figure 3.1 placées face à face avec un angle relatif de 90° et une distance minimale $d_0 = 1\ mm$.

De cette façon, l'écartement entre les deux électrodes possède une valeur minimale dans une zone de taille restreinte, ce qui permet de localiser puis stabiliser l'arc électrique. La distance inter-électrodes n'est donc pas uniforme dans cette configuration, ainsi que le montre la figure 3.4 qui représente la distance

inter-électrodes d en fonction des coordonnées y et z. Cependant, afin de simplifier l'écriture, nous désignerons dans la suite de ce travail par distance inter-électrodes, la distance minimale d_0.

Pour des raisons d'encombrement (notamment des contre-électrodes), le montage est posé « à plat », ce qui correspond à des électrodes verticales et un arc horizontal, configuration similaire donc à celle du disjoncteur. L'électrode de gauche est la cathode, son pli est vertical, l'électrode de droite est l'anode, son pli est horizontal. Des essais préliminaires ont montré que ce choix n'a pas d'impact sur les comportements observés, nous le conserverons donc pour l'ensemble des essais présentés dans ce document.

Le support de droite est fixe, mais sa position est réglable en x, y et z, ce qui permet d'aligner les deux supports en l'absence des électrodes afin d'obtenir l'axialité des contre-électrodes, nécessaire à une bonne stabilité de l'arc électrique. Le support de gauche est montée sur une table de guidage micrométrique permettant de varier aisément sa position en x, c'est-à-dire la distance inter-électrodes d_0 de la manière suivante :

— les deux électrodes sont mises en contact. L'établissement du contact est déterminé électriquement par un circuit annexe composé d'une pile, une résistance et une diode électroluminescente (LED). Ce circuit très simple nous a semblé suffisamment sensible.

— Les deux électrodes, en contact, sont écartées jusqu'à extinction de la LED, la distance inter-électrodes d_0 est alors très proche de zéro.

— La distance inter-électrodes est ajustée par la valeur indiquée sur la molette de la platine micrométrique (1 tour = 0,5 mm).

Enfin, le raccordement au circuit électrique se fait à l'extrémité des contre-électrodes.

3.1.4 Prises de potentiel

La figure 3.5 montre la position des prises de potentiel sur les électrodes. Nous utilisons des pinces extrêmement fines, qu'il est aisé de mettre en place avant chaque essai. Cette position est légèrement différente pour la cathode et pour l'anode mais dans les deux cas relativement loin de l'arc électrique et hors du passage du courant, ce qui correspond bien à une configuration de mesure quatre fils. La tension mesurée sera donc bien la tension d'arc et aucune correction liée aux chutes de tension dans les amenées de courant ne sera nécessaire.

La boucle de mesure correspond approximativement à un cercle de périmètre 100 mm. La tension induite dans cette boucle pour les dI/dt utilisés sera donc négligeable par rapport aux valeurs de tension mesurées. Nous vérifierons néanmoins ce point expérimentalement.

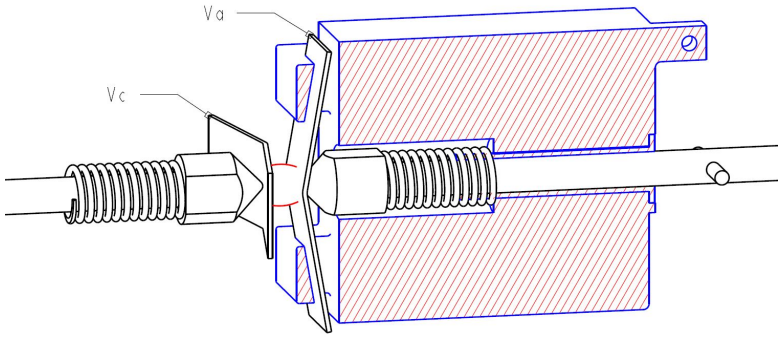


FIG. 3.5 – Position des prises de potentiel sur les électrodes, en configuration quatre fils.

3.2 Montage électrique

3.2.1 Banc de court-circuit

La figure 3.6 donne le schéma électrique du banc de court-circuit utilisé. Une onde de courant électrique de forte intensité est générée par la décharge rapide d'un assemblage de condensateur réglable C1. Une impédance de ligne, composée d'une résistance R1 et d'une inductance L1 réglables, permet d'ajuster la forme de cette onde.

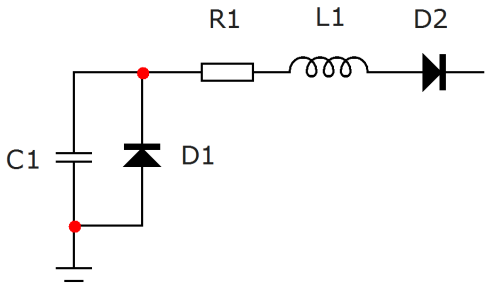


FIG. 3.6 – Schéma électrique du banc de court-circuit capacitif. Le système de charge du condensateur C1 ainsi que les organes de commutation et de sécurité ne sont pas représentés.

Les condensateurs sont des condensateurs électrolytiques de tension nominale 350 V. Ils sont protégés contre une polarisation inverse par une diode de roue libre D1. Le système de charge des condensateurs n'est pas représenté sur la figure 3.6, il permet d'ajuster la tension de charge des condensateurs entre 50 et 350 V. Ce circuit RLC fonctionne en régime pseudopériodique puis, au moment où la diode de roue libre intervient, l'intensité du courant décroît de

façon exponentielle.

L'équation de l'onde de courant s'exprime commodément par une fonction de la forme :

$$I(t) = 2A.(1 - e^{-2t/\tau_0}).e^{-t/\tau_1} \tag{3.1}$$

Cette formulation permet de mettre en évidence les trois paramètres caractéristiques de l'onde de courant :

— A est proportionnel à l'intensité maximale du courant mesurée expérimentalement I_0,

— τ_0 correspond approximativement au temps de montée t_0 mesuré expérimentalement,

— τ_1 correspond à la constante de temps exponentielle de diminution du courant.

La figure 3.7 donne l'allure de l'onde de courant pour un réglage du banc de court-circuit correspondant à une forme d'onde similaire à celles que nous utiliserons, à savoir $\tau_0 = 0{,}30\,ms$ et $\tau_1 = 1{,}35\,ms$. La valeur maximale de l'intensité du courant I_0 peut être ajustée par la valeur de tension de charge des condensateurs.

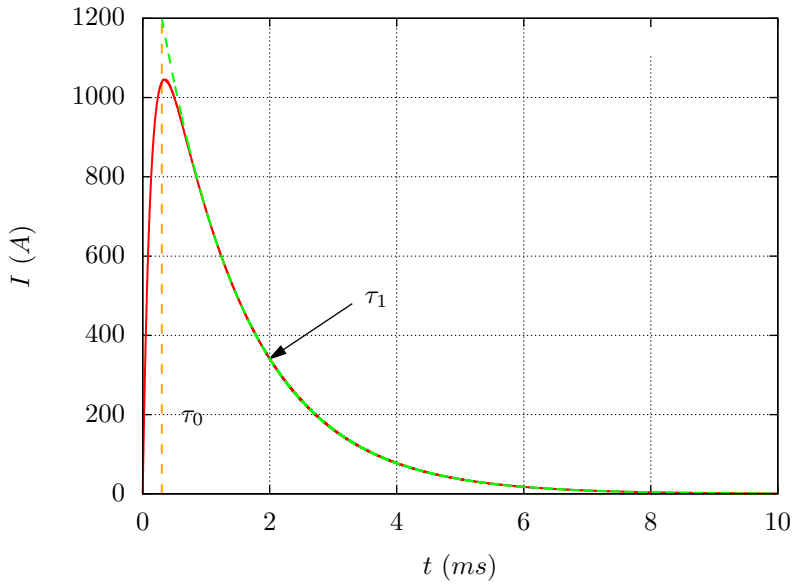


FIG. 3.7 – Forme typique d'une onde de courant générée par le banc de court-circuit capacitif correspondant à la figure 3.6 et dont l'équation est donnée en 3.1.

Enfin, la diode D2 protège le banc de court-circuit contre l'impulsion haute-tension utilisée pour l'amorçage de l'arc.

3.2.2 Générateur d'impulsion haute-tension

Le schéma électrique du générateur d'impulsion utilisé pour l'amorçage de l'arc électrique est présenté en figure 3.8.

Un convertisseur DC/DC de marque Spellman, non représenté sur le schéma, fournit une tension continue de 10 kV. La sortie de cette source est activée par un bouton-poussoir S1, non représenté sur le schéma.

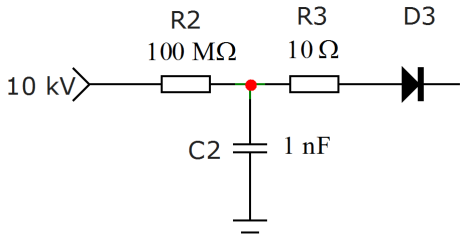


FIG. 3.8 – Schéma électrique du générateur d'impulsion haute-tension. La source haute-tension 10 kV ainsi que les organes de commutation et de sécurité ne sont pas représentés.

L'intensité maximale que peut délivrer cette source est 1 mA, nous utilisons donc un condensateur céramique C2 de capacité 1 nF comme réservoir d'énergie afin de pouvoir fournir un courant plus élevé. Deux résistances sont alors nécessaires : la première R_2 définit la constante de temps de charge du condensateur C2 lorsque le bouton-poussoir S1 est enclenché, la seconde R_3 impose l'intensité et la durée de l'impulsion haute-tension lors de l'amorçage de l'arc. La tension de claquage et donc le courant d'amorçage, dépendra du gap aux bornes de ce circuit. Ce mode de fonctionnement un peu sommaire est néanmoins très efficace et très robuste. En pratique, une tension de 10 kV nous permettra de générer une décharge pour une distance inter-électrodes $d_0 < 1{,}5\ mm$.

Enfin la diode D3 protège le générateur d'impulsion haute-tension du courant électrique délivré par le banc de court-circuit capacitif présenté ci-dessus.

3.2.3 Vue d'ensemble

Le schéma figure 3.9 donne une vue d'ensemble des deux montages couplés. L'éclateur E1 représente le gabarit d'essai. L'éclateur E2 est nécessaire à l'amorçage de l'arc lorsqu'une sonde de tension est présente. En effet, la sonde de tension shunte l'éclateur E1, et en l'absence de l'éclateur E2, empêche la montée en tension du condensateur C2, et donc l'amorçage.

Après réglage des valeurs de C1, R1 et L, ainsi que de la distance inter-électrodes d_0, le principe d'utilisation est le suivant :

— le condensateur C1 est chargé à la tension souhaitée U_{C1}

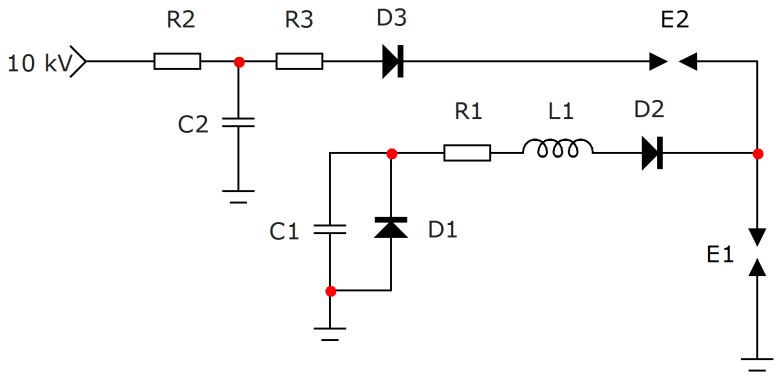


FIG. 3.9 – Couplage du banc de court-circuit capacitif et du générateur d'impulsion haute-tension. L'éclateur E1 représente le gabarit d'essai. L'éclateur E2 est nécessaire à l'amorçage de l'arc lorsqu'une sonde de tension est présente.

— lorsque la valeur souhaitée U_{C1} est atteinte, la sortie du convertisseur haute tension est activé

— le condensateur C2 se charge et lorsque sa tension dépasse la tension de claquage du gabarit d'essai, l'arc est amorcé et le condensateur C1 se décharge dans l'arc électrique

Il convient également de rappeler que pour des raisons de sécurité la masse de ce circuit est raccordée à la terre.

3.3 Diagnostic électrique

3.3.1 Sonde de courant

Nous mesurons l'intensité du courant à l'aide d'une sonde rogowski de marque PEM modèle CWT30. Cette sonde possède une bande passante de 16 MHz et est sensible à des variations d'intensité jusqu'à 40 $kA.\mu s^{-2}$. Son offset est limité à 2 A, mais nous le corrigerons néanmoins systématiquement lors du traitement des données d'essai. Le conducteur électrique est centré dans la boucle de mesure de la sonde afin d'atteindre l'incertitude de ±0,2 % annoncée par le fabriquant.

3.3.2 Sonde de tension Zener

La présence d'une impulsion de haute-tension rend difficile la mesure de la tension d'arc. En effet nous souhaitons mesurer une tension d'environ 20 V avec précision, mais celle-ci est précédée d'une impulsion de plusieurs kV. Les premiers essais réalisés avec une sonde haute-tension n'étant pas très concluants,

nous avons choisi de développer une sonde passive de rapport 10 réalisant un écrêtage de l'impulsion haute-tension.

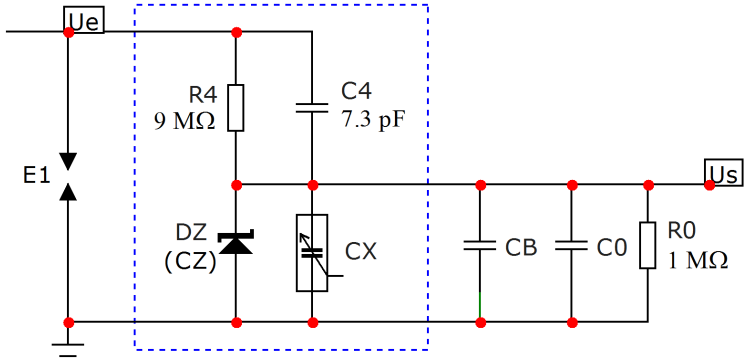


FIG. 3.10 – Schéma électrique de principe de la sonde de tension Zener développée pour mesurer la tension d'arc. La sonde est encadrée par une ligne bleue pointillée. L'éclateur E1 représente le gabarit d'essai, le condensateur CB la capacitance parasite du câble BNC et les impédances C0 et R0 l'impédance d'entrée de l'oscilloscope.

Le principe de cette sonde est présenté sur la figure 3.10 : il s'agit d'un pont diviseur de rapport 10 constitué des résistances R4 et R0 aux bornes de laquelle est ajoutée une diode Zener DZ, caractérisée par sa tension Zener V_Z, qui assure l'écrêtage de la haute-tension. Ainsi, lorsque la tension d'entrée de la sonde U_e est supérieure à $10V_Z$, la diode est en conduction Zener et la tension de sortie est limitée :

$$U_s = V_Z \qquad si\ U_e > 10V_Z \tag{3.2}$$

puis lorsque la tension d'entrée de la sonde U_e est inférieure à $10V_Z$, la diode Zener se bloque et la sonde agit comme un simple pont diviseur de tension :

$$\frac{U_s}{U_e} = \frac{1}{1 + R_4/R_0} = \frac{1}{10} \qquad si\ U_e < 10V_Z \tag{3.3}$$

Il est néanmoins nécessaire de considérer les capacités parasites suivantes :

— la capacitance de la diode Zener C_Z, de l'ordre de 35 pF à 1 MHz d'après le fabriquant,

— la capacitance du câble BNC, C_B, reliant la sonde à l'oscilloscope, de l'ordre de quelque 50 $pF.m^{-1}$,

— la capacitance d'entrée de l'oscilloscope C_0, donnée à 13 pF par le constructeur.

Afin de contrebalancer leur effet et d'obtenir une bande-passante la plus grande possible, nous équilibrons donc le pont diviseur résistif par un pont capacitif à

l'aide d'un condensateur réglable CX, de façon à obtenir :

$$R_4C_4 = R_0(C_Z + C_X + C_B + C_0) \tag{3.4}$$

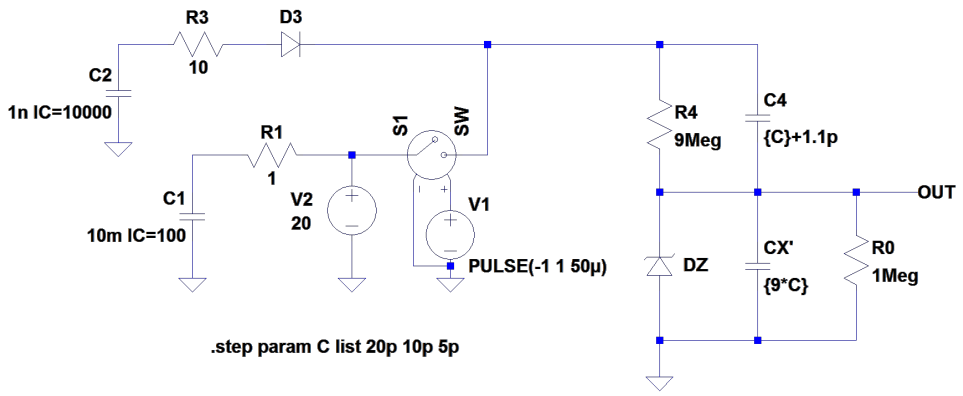


FIG. 3.11 – Simulation SPICE mettant en évidence l'apparition d'un artefact de mesure lors de l'amorçage de l'arc par une impulsion haute-tension. Le pont diviseur résistif est équilibré par les condensateurs. Le condensateur CX' représente la capacité $C_Z + C_X + C_B + C_0$ de l'équation 3.4. La capacité de l'étage d'entrée de la sonde C4 est variée entre 6,1 et 21,1 pF.

En pratique, de même que pour une sonde passive classique, nous réglons la valeur du condensateur CX sur un signal carré $0 - 10\ V$ de fréquence 10 kHz et nous vérifions que son rapport de division est bien de 10. Nous vérifions ensuite avec un signal sinusoïdal $0 - 10\ V$ que la bande passante à 3 dB est au moins égale à 1 MHz.

Toutefois, la présence de ce pont capacitif génère le problème suivant : lors de l'impulsion haute-tension, les condensateurs en parallèle de la diode Zener se chargent, puis à la fin de l'impulsion, lorsque la diode Zener se bloque, se déchargent dans la résistance R0. Cela génère un artefact de mesure sur la tension dont la constante de temps est de l'ordre R_4C_4. La figure 3.11 montre une simulation SPICE reproduisant ce phénomène et mettant en évidence l'impact de la capacité du pont diviseur sur la durée de l'artefact, représenté sur la figure 3.12. Nous avons donc sélectionné une diode Zener de capacitance la plus faible possible et réduit la longueur du câble BNC pour parvenir à la valeur de $C_4 = 7{,}3\ pF$ indiquée sur la figure 3.10. La constante de temps correspondante est de 65,7 μs.

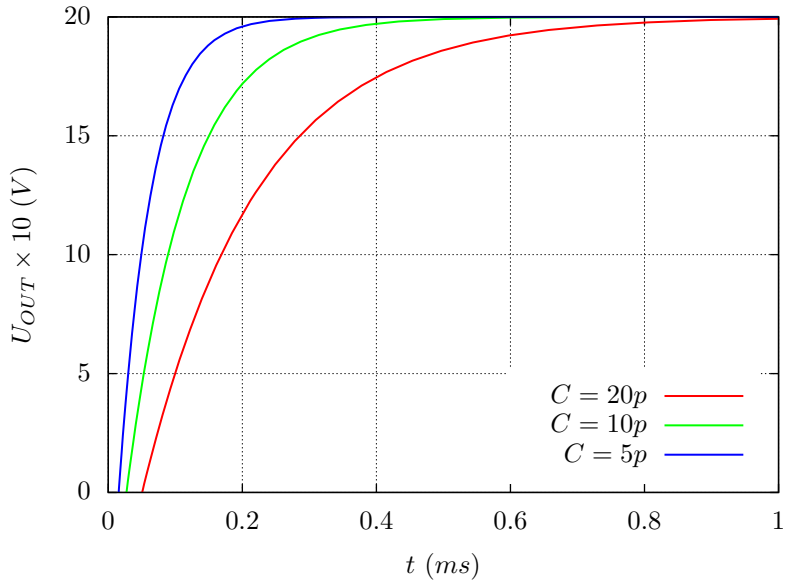


FIG. 3.12 – Tension mesurée par la sonde $10.U_s$ en fonction de la valeur de condensateur de l'étage d'entrée, selon le modèle SPICE présenté figure 3.11.

3.3.3 Correction des mesures de tension

L'artefact de la sonde de tension, ainsi que nous l'avons mis en évidence ci-dessus, est lié essentiellement aux capacités en parallèle de la diode Zener et à la tension Zener de la diode DZ. Il n'est donc pas lié à la valeur de haute-tension utilisée pour l'amorçage de l'arc. Cet artefact sera donc reproductible et partant, nous pouvons envisager de corriger les mesures de tension.

Afin de caractériser expérimentalement cet artefact de mesure, nous avons réalisé le montage électrique présenté dans la figure 3.13. Nous mesurons la tension aux bornes du gabarit d'essai E1 lors d'une impulsion haute-tension. La tension d'arc présente en conditions d'essai réelle est simulée par une pile 9V. Nous avons réalisé cinq essais pour une distance inter-électrodes $d_0 = 1\ mm$: les courbes expérimentales sont identiques, hormis pour des temps très courts inférieurs à 0,1 ms. Nous avons également confirmé que les courbes restent inchangées pour une distance inter-électrodes d_0 variant de 0,5 à 1,5 mm.

La figure 3.14 montre la fonction de transfert de la sonde U_s/U_{9V}. Nous sommes en mesure d'ajuster cette courbe de façon satisfaisante pour les temps supérieurs à 0,1 ms par une fonction de la forme :

$$f(t) = 1 - e^{(t-t_0)/\tau} \tag{3.5}$$

avec $t_0 = 8{,}8\mu s$ et $\tau = 70{,}2\mu s$, représentée sur la même graphique. Le paramètre

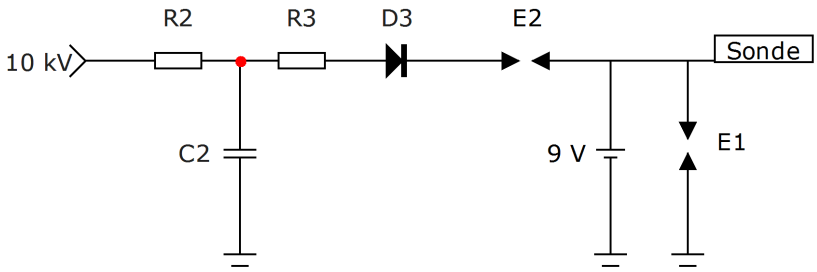


FIG. 3.13 – Schéma électrique du montage utilisé pour caractériser l'artefact de la sonde.

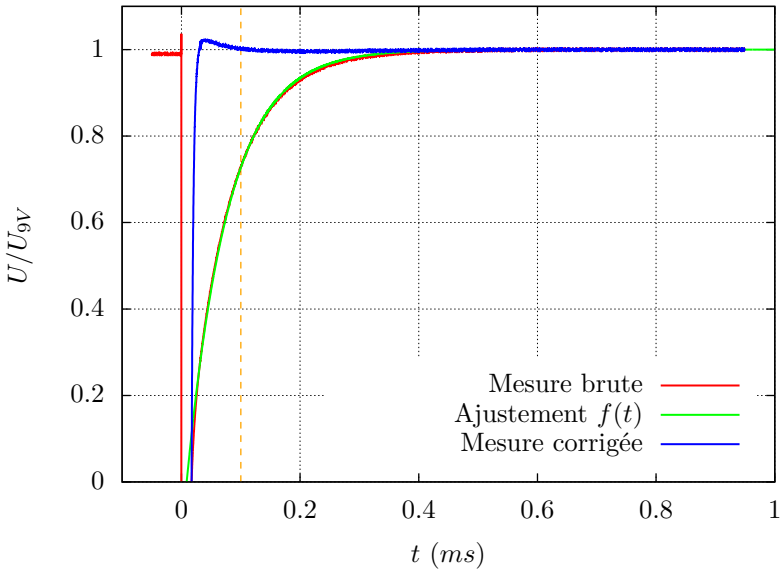


FIG. 3.14 – Artefact de tension mesurée par la sonde lors d'une impulsion haute-tension pour le montage présenté figure 3.13. La tension, rapportée à la tension de la pile 9V, est ajustée puis corrigée par la fonction de l'équation 3.5. La ligne pointillée orange indique le temps à partir duquel nous considérerons que cette correction est valide.

t_0 correspond au délai de blocage de la diode Zener, bien supérieur à la constante de temps de l'impulsion haute-tension $R_3C_2 = 10\ ns$, d'après la figure 3.8. Le paramètre τ correspond à la constante de temps des capacités parasites, nous retrouvons l'ordre de grandeur précédent $R_4C_4 = 65{,}7\ \mu s$.

Nous corrigerons donc systématiquement nos courbes expérimentales de ten-

sion de la façon suivante :

$$U(t) = \begin{cases} - & \text{si } t < 0{,}1\ ms \\ 10U_s(t)/f(t) & \text{si } t > 0{,}1\ ms \end{cases} \tag{3.6}$$

L'effet d'une telle correction, avant troncage pour $t < 0{,}1\ ms$, est mise en évidence sur la mesure de tension de la figure 3.14.

Toutes les courbes expérimentales de tension présentées dans les chapitres suivants ont subi cette correction, nous omettrons donc de le préciser. Il convient cependant de garder présent à l'esprit que les données seront tronquées pour $t < 0{,}1\ ms$, corrigées pour $0{,}1 < t < 0{,}5\ ms$, et brutes pour des temps supérieurs à $0{,}5\ ms$, l'impact de la correction devenant alors négligeable.

3.3.4 Chaîne d'acquisition

Les sondes de courant et de tension décrites ci-dessus sont branchées sur un oscilloscope USB de marque Picoscope, modèle 5442B. Sa résolution est de 15 bits, ce qui pour une pleine échelle de tension de 40 V correspond à une résolution de $40/2^{15} \simeq 1{,}2.10^{-3}\ V$.

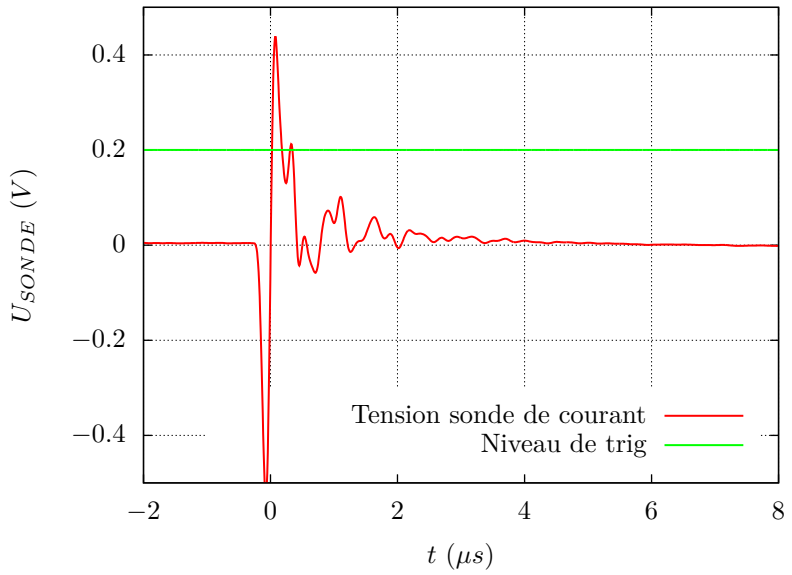


FIG. 3.15 – Déclenchement de l'oscilloscope sur le front montant très rapide de la perturbation de la sonde de courant induite par l'amorçage de l'arc par haute-tension.

Le déclenchement de l'oscilloscope est réalisé sur un front montant des perturbations induites lors de l'amorçage de l'arc électrique par l'impulsion haute-tension sur le signal de sortie de la sonde de courant. L'allure typique de cette

perturbation est montrée sur la figure 3.15. Le temps de montée extrêmement rapide de cette perturbation assure une excellente précision et répétabilité de ce déclenchement, bien inférieure à 1 μs.

3.4 Analyse des électrodes

L'analyse des traces laissées par l'arc électrique sur les électrodes apporte de précieuses informations complémentaires aux mesures électriques.

Le premier outil d'analyse optique est certes l'œil, mais l'utilisation d'une simple loupe binoculaire calibrée apporte tout de même un réel plus et permet de réaliser des mesures dimensionnelles. Nous utilisons une loupe binoculaire de marque Nikon modèle SMZ800 équipée d'un appareil photo, avec un grossissement typique de x10 à x30 suivant les électrodes. Cet outil nous donne une première approche de l'état de surface des électrodes après essai, notamment sur la topographie à laquelle nous pouvons avoir accès en inclinant légèrement l'électrode sous la loupe. Nous ferons également appel ponctuellement à des outils permettant d'observer plus en finesse la surface des électrodes : le microscope optique et le microscope électronique à balayage.

Afin de faciliter la lecture, l'ensemble des images d'électrode que nous présenterons dans ce document seront orientées suivant le repère (x,y,z) définit dans la figure 3.3 :

— axe z vers le haut,

— axe y vers la droite pour la cathode et vers la gauche pour l'anode.

La figure 3.16 donne un exemple de cette orientation dans le cas d'une cathode.

3.4.1 Aspect des impacts aux pieds d'arc

La figure 3.16 montre l'aspect typique de l'impact de l'arc électrique sur une électrode. Il est possible de distinguer aisément :

a) la zone affectée par l'arc électrique, de forme elliptique,

b) à l'intérieur de cette zone, une zone à l'aspect fondu,

c) un halo de dépôt carboné autour de la zone impactée par l'arc,

d) des gouttelettes de métal déposées radialement autour du pied d'arc,

et des couleurs allant du bleu au brun foncé en passant par l'orange qui correspondent à l'oxydation des surfaces sous l'effet de la température (les indices (a) à (d) font référence à la figure 3.16).

La limite de la zone affectée par l'arc est très franche, ainsi que le montre la figure 3.17. Cette image, réalisée par microscopie électronique à balayage à la périphérie de l'impact de l'arc électrique sur une cathode, montre avec évidence la frontière entre la zone affectée par l'arc, à gauche de l'image, et la zone non

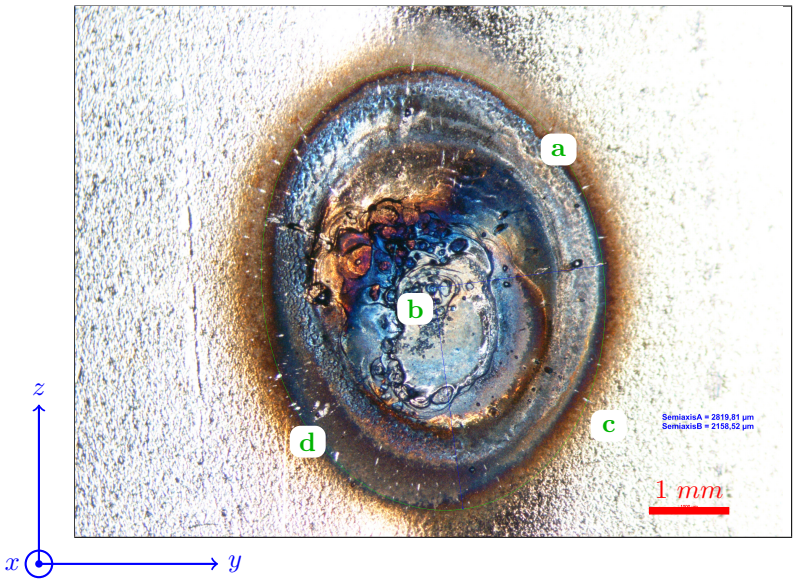


FIG. 3.16 – Aspect typique de l'impact de l'arc électrique sur une électrode (ici une cathode). Il s'agit d'une image réalisée à l'aide d'une loupe binoculaire, l'échelle est indiquée par une barre rouge de longueur 1 mm. Les indices (a) à (d) font référence au texte.

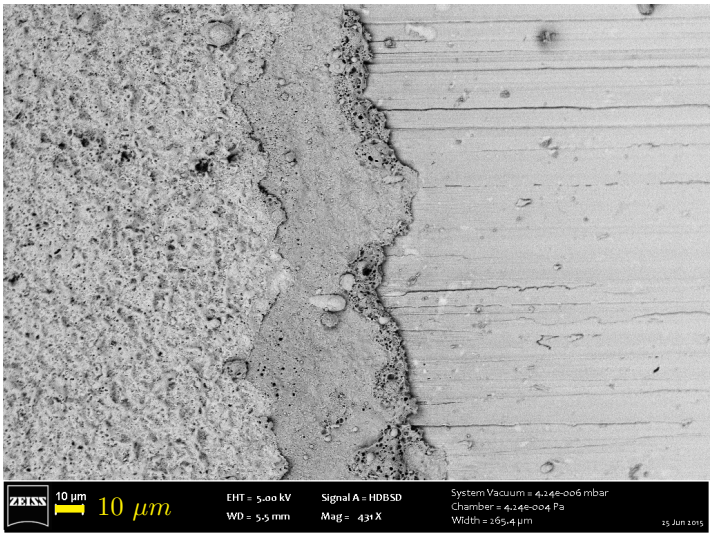


FIG. 3.17 – Limite de la zone affectée par l'arc à la cathode. Il s'agit d'une image réalisée par microscopie électronique à balayage, l'échelle est indiquée par une barre jaune de longueur 10 μm.

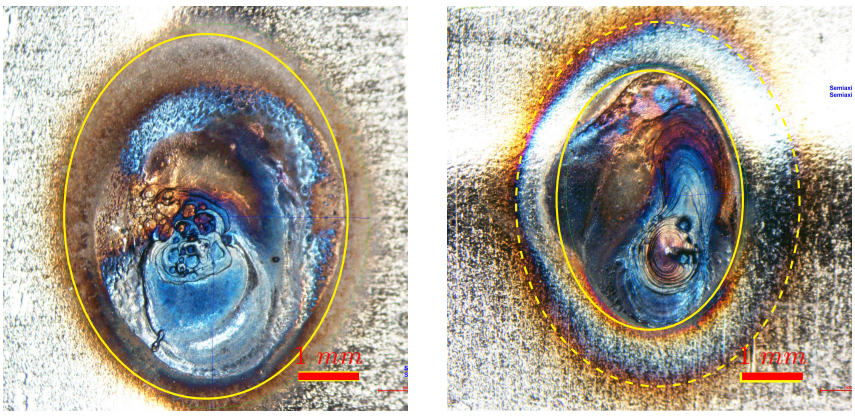
affectée par l'arc, à droite de l'image, dont l'état de surface est identique à celui de l'électrode avant essai. Nous avons confirmé cette observation sur un grand

nombre d'électrodes, aussi bien cathodes qu'anodes, à l'aide d'un microscope optique, plus facile et rapide à mettre en œuvre.

En revanche la limite de la zone d'aspect fondue est difficile à déterminer de façon précise pour la cathode, alors que pour l'anode l'ensemble de la zone affectée par l'arc présente un aspect fondu.

3.4.2 Interprétation de l'aspect des impacts

La figure 3.18 montre l'aspect des impacts aux pieds d'arc après un essai réalisé pour une onde de courant similaire à celle présentée dans la figure 3.7 et pour une distance inter-électrodes $d_0 = 1\ mm$.



(a) Cathode. (b) Anode.

FIG. 3.18 – Aspect des impacts aux pieds d'arc pour une onde de courant similaire à celle présentée dans la figure 3.7 et pour une distance inter-électrodes $d = 1\ mm$. La barre rouge indique une échelle de 1 mm.

La zone impactée par l'arc à la cathode est ajustée par une ellipse, représentée par une ligne continue jaune sur la figure 3.18a. Le grand axe de cette ellipse est orienté suivant l'axe vertical z, c'est-à-dire le long du pli de l'électrode, également orienté selon l'axe z pour la cathode. Il est intéressant de noter que la même ellipse, reportée à l'anode et représentée cette fois-ci par une ligne discontinue jaune, correspond à la limite du halo brunâtre entourant le pied d'arc anodique.

Etant donné la très faible distance inter-électrodes comparée à la taille des pieds d'arc, nous pouvons supposer que la colonne d'arc est cylindrique, ce que confirme les observations par imagerie rapide de l'arc électrique, et que la taille du pied d'arc à l'anode est le même que celui à la cathode, c'est-à-dire que la limite du pied d'arc à la cathode correspond à la limite de la zone affectée par l'arc, alors qu'à l'anode la limite du pied d'arc correspond à ce halo brunâtre

entourant la zone fondue. En effet, l'anode se comportant comme un simple collecteur d'électrons, son état de surface n'est pas nécessairement modifié aux bords du pied d'arc, alors que dans le cas de la cathode, le processus même d'émission électronique requiert une modification de la surface.

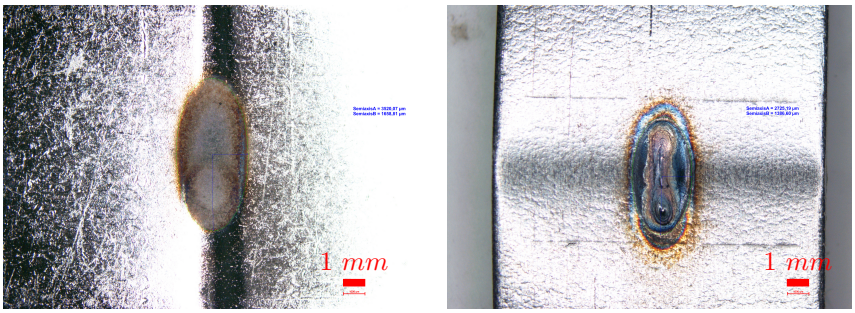
A l'anode, une zone d'aspect fondue se distingue aisément. Cette zone peut également être ajustée par une ellipse, représentée par une ligne continue jaune.

Ces constatations sont bien entendu représentatives de l'ensemble des électrodes analysées.

3.4.3 Forme des pieds d'arc

La forme elliptique des pieds d'arc est lié aux deux effets suivants :

1) Les électrodes présentant un pli et étant positionnées face-à-face avec un angle relatif de 90° ainsi que le représente la figure 3.5, la distance entre les électrodes n'est pas constante mais présente un minimum local au centre des électrodes, comme le montre la figure 3.4. La distance reste également faible à proximité de ce minimum le long du pli des électrodes. L'arc aura donc tendance à naturellement s'allonger suivant ces deux directions afin de limiter la longueur de sa colonne. En revanche, force est de constater qu'il s'allonge systématiquement suivant le pli de la cathode et non selon le pli de l'anode.
2) L'arc peut se déplacer lors d'un essai. L'impact laissé par le pied d'arc est alors représentatif de ce mouvement et non plus directement lié à la section de l'arc. Un exemple est donné en figure 3.19 dans le cas d'une cathode en cuivre nickelé face à une anode en acier nickelé. Lorsqu'il y a mouvement, celui-ci est généralement le long de l'axe z.



(a) Cathode. (b) Anode.

FIG. 3.19 – Aspect des impacts aux pieds d'arc dans le cas d'un mouvement prononcé de l'arc durant l'essai. La barre rouge indique une échelle de 1 mm.

L'imagerie rapide, dont nous détaillerons les méthodes dans le paragraphe suivant, apportera des informations complémentaires qui aideront à l'interprétation de la forme des impacts. Cependant, nous ne filmerons que suivant l'axe y, ce qui limitera ces informations à la seule direction z. Nous pouvons néanmoins affirmer que l'allongement des impacts sur les électrodes est généralement suivant z et que cet impact semble généralement lié à un mouvement de l'arc que nous pouvons confirmer par imagerie rapide. Parfois, les traces aux électrodes sont allongées suivant y, et bien que nous ne puissions le confirmer par imagerie rapide, sont à l'évidence causées par un déplacement des pieds d'arc. Lorsque ce mouvement est faible, nous le négligerons dans l'évaluation des surfaces, et lorsque ce mouvement est important, nous invaliderons l'essai.

Nos observations nous permettent d'affirmer que le mouvement de l'arc suivant l'axe z est sensible à l'intensité maximale du courant I_0 ainsi qu'à la distance inter-électrodes d_0, alors que le mouvement suivant l'axe y dépend essentiellement du matériau des électrodes et de l'axialité des voies de courant.

3.4.4 Taille des pieds d'arc

Deux zones sont discernables avec précision : la surface affectée par l'arc à la cathode, qui est partiellement fondue en son centre, et la surface affectée par l'arc à l'anode, qui est entièrement fondue. Ces deux zones sont mises en évidence par une ligne continue jaune sur la figure 3.18. Nous avons aussi émis l'hypothèse que la surface affectée à la cathode correspond à la surface du pied d'arc à la cathode mais également à l'anode, comme le souligne le trait pointillé jaune sur la figure 3.18b.

Partant, nous caractériserons les dimensions des pieds d'arc à l'aide des deux grandeurs :

— la section de pied d'arc S_P, mesurée à la cathode mais que nous supposons être également celle à l'anode,

— la section du bain fondu S_F, mesurée à l'anode, qui nous donne une indication sur l'énergie apportée par l'arc sur l'anode mais aussi sur la cathode.

Afin de limiter l'impact d'un éventuel mouvement de l'arc sur l'évaluation de ces sections, nous mesurerons non pas la surface de l'ellipse, telle que indiquée par exemple sur la figure 3.18, mais la largeur du pied d'arc suivant l'axe y (horizontal), qui est la direction la moins enclin au mouvement de l'arc. Nous calculerons ensuite la section ou le rayon du pied d'arc à partir de cette mesure.

Enfin, les sections S_P et S_F correspondent à la taille maximale atteinte par les pieds d'arc cathodique et anodique durant l'essai. Nous pouvons supposer en première approximation que cette taille maximale est atteinte à la valeur maximale de l'intensité du courant, mais nous verrons cela plus en détails en nous appuyant sur les informations dynamiques apportées par l'imagerie rapide.

3.4.5 Coupes métallographiques

En complément des observations de surface réalisées à la loupe binoculaire, l'analyse métallographique des électrodes est utilisée pour observer l'état métallurgique des pieds d'arc.

La méthode de préparation des coupes métallographiques est tout à fait classique. Elle consiste en un enrobage dans une résine, un polissage mécanique progressif suivi d'une révélation chimique. L'observation est ensuite réalisée à la loupe binoculaire ou au microscope optique suivant le grandissement désiré. Pour des raisons pratiques de maintien dans l'enrobage, les électrodes sont coupées perpendiculairement à leur pli, approximativement au milieu de l'impact de l'arc.

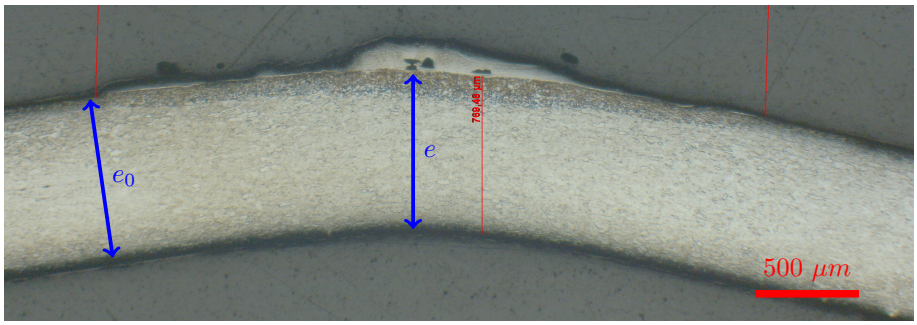


FIG. 3.20 – Coupe métallographique d'une cathode dans un état similaire à celle de la figure 3.16. La barre d'échelle rouge indique une longueur de 500 μm. Les flèches bleues e_0 et e indiquent les mesures réalisées pour évaluer la profondeur du bain fondu.

La figure 3.20 montre un exemple de coupe métallographique d'une cathode dans un état similaire à celle de la figure 3.16. Nous pouvons distinguer aisément au centre de l'image, de haut en bas, la zone fondue-resolidifiée, d'aspect blanchâtre, la zone affectée thermiquement (ZAT), d'aspect plus sombre, et la zone non affectée thermiquement, c'est-à-dire dont la microstructure est identique à celle du matériau avant essai.

La profondeur fondue P_F est évaluée par la mesure de l'épaisseur minimale non fondue sur le plan de coupe e retranchée de l'épaisseur initiale de l'électrode e_0 :

$$P_F = e - e_0 \tag{3.7}$$

La figure 3.20 illustre ces deux mesures sur une vue d'ensemble, même si en pratique, afin d'améliorer la précision des mesures, celles-ci sont réalisées à plus fort grandissement.

La préparation des échantillons métallographiques est relativement laborieuse et la pertinence de la grandeur P_F toute relative, en effet elle n'est représentative de la profondeur fondue maximale que pour un plan de coupe du

pied d'arc. Nous n'utiliserons donc cette méthode qu'à des fins essentiellement qualitatives.

3.5 Imagerie rapide

L'imagerie rapide permet de faire le lien entre les mesures électriques dynamiques et les analyses post-essai des électrodes.

3.5.1 Configuration

Nous utilisons une caméra rapide de marque Photron modèle SA1.1. Son axe de visée est orienté suivant l'axe y, c'est-à-dire perpendiculairement à l'arc électrique, à la distance minimale de mise au point de notre objectif, à savoir environ 320 mm. La figure 3.21 montre la position de la caméra par rapport aux électrodes, vu de dessus. La cathode sera donc l'électrode de gauche sur les images. La taille d'image nécessaire à une bonne visualisation des phénomènes autorise une vitesse d'acquisition comprise entre 30 000 et 40 000 images par seconde. La résolution des images sera typiquement de l'ordre de 20 $\mu m.px^{-1}$.

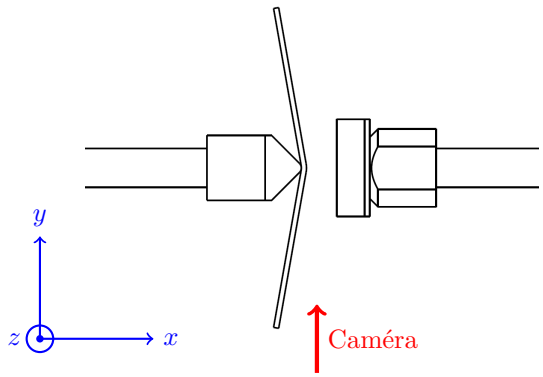


FIG. 3.21 – Vue de dessus des électrodes et des contre-électrodes. La cathode est à gauche. La flèche rouge indique la direction de visée de la caméra rapide.

Aucun dispositif d'éclairage n'est utilisé, la lumière reçue par le capteur de la caméra est uniquement celle émise par l'arc électrique. Cela est assez rudimentaire mais apporte suffisamment d'informations dans le cadre de cette étude. La gestion de la luminosité est cependant relativement difficile étant donnée la grande dynamique d'intensité du courant de l'arc électrique, de quelques ampères à quelques kiloampères. Nous choisissons tout d'abord le temps de pose le plus faible possible, c'est-à-dire proche de la vitesse d'acquisition, et ce afin de moyenner l'information plutôt que de la filtrer. Puis, afin de limiter globa-

lement la luminosité, le diaphragme est fermé au maximum, ce qui a de plus pour effet bénéfique d'augmenter la profondeur de champ et donc permet d'obtenir des vidéos nettes à chaque instant. Nous programmons ensuite une réponse non-linéaire du capteur, appelée double-pente, correspondant à une inhibition partielle du capteur pour les fortes intensités, et qui a pour effet d'éviter la saturation des images. En contrepartie, la caractéristique de cette réponse non-linéaire n'étant pas connue, nous ne serons pas en mesure de comparer les intensités lumineuses pour différentes configurations. Enfin, nous utilisons des filtres de densité neutre pour ajuster globalement le flux de lumière reçu en fonction de l'intensité maximale du courant pour chaque essai, afin d'éviter toute saturation des images, même localisée. Enfin, lors de la visualisation des images nous en corrigeons le gamma pour rendre plus visibles les événements de faible luminosité, notamment en fin de décharge.

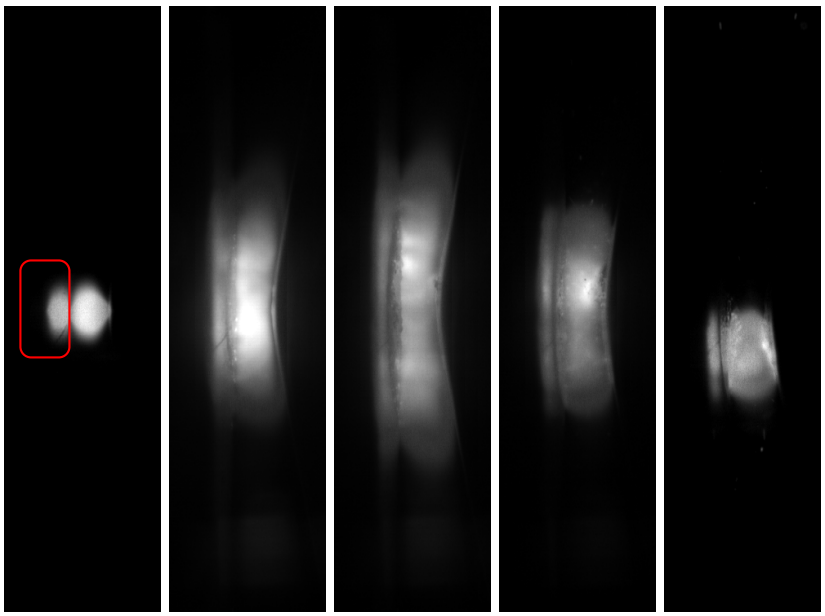


FIG. 3.22 – Images extraites d'une vidéo typique d'arc électrique, pour une onde de courant similaire à celle présentée dans la figure 3.7 et une distance inter-électrodes $d_0 = 1\ mm$. Les images correspondent de gauche à droite aux temps 0, 0,3 1 2 et 5 ms. Le rectangle rouge met en évidence sur la première image la position du reflet sur la cathode, également visible sur les images suivantes. Le gamma de chaque image est optimisé.

La figure 3.22 présente des images typiques extraites d'une vidéo d'arc électrique, pour une onde de courant similaire à celle présentée dans la figure 3.7 et une distance inter-électrodes $d_0 = 1\ mm$. Les bains fondus à la cathode et à l'anode sont clairement visibles. Il est important de noter sur la cathode la

présence d'un reflet, indiqué par un rectangle rouge sur la première image, lié à l'orientation de l'électrode.

3.5.2 Synchronisation

Le déclenchement de la caméra rapide est assuré par le rayonnement de l'impulsion haute tension sur un câble BNC en partie déblindé et relié à l'entrée de déclenchement TTL de la caméra. Cette méthode originale possède deux avantages : 1) elle garantit une isolation galvanique entre la caméra et le montage électrique, et 2) le temps de montée de cette perturbation étant très court, elle permet donc une excellente synchronisation du déclenchement de la caméra avec celle de l'oscilloscope, qui lui est déclenché par le front montant de la perturbation générée par l'impulsion haute-tension sur la pince de mesure du courant.

Pour nous en assurer, nous avons réalisé l'essai suivant : nous générons une impulsion haute-tension dans le gabarit d'essai que nous filmons en paramétrant la caméra rapide à sa vitesse maximale de 675 000 images par seconde et un temps de pose de 1 μs. La taille d'image est très restreinte pour une telle vitesse, mais, moyennant une visée correcte du gabarit d'essai, permet de visualiser en fonction du temps l'intensité lumineuse de la décharge.

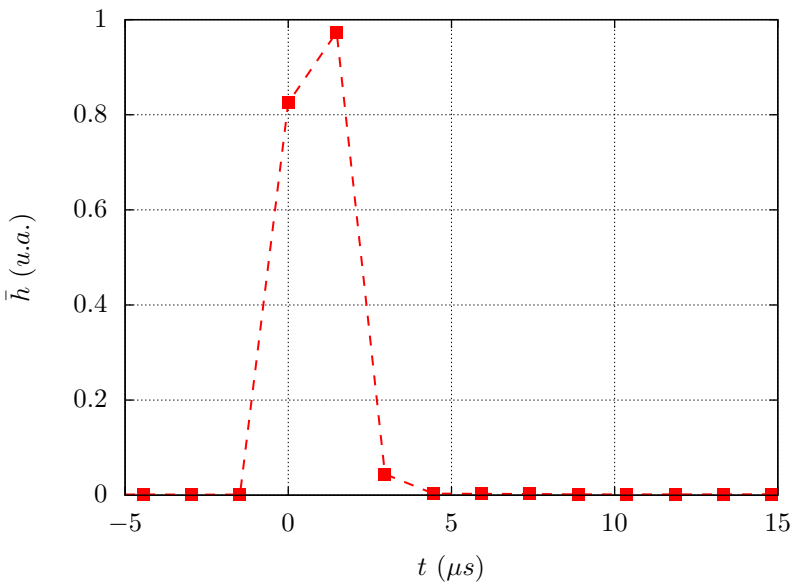


FIG. 3.23 – Intensité lumineuse de l'impulsion haute-tension indiquant l'excellente synchronisation du déclenchement de la caméra.

La figure 3.23 montre l'intensité lumineuse de l'impulsion haute-tension en fonction du temps dans ces conditions d'essai. La synchronisation est excellente :

la luminosité est nulle pour $t < 0$ et augmente brusquement pour $t = 0$. Etant donné le temps de pose de 1 μs, cela signifie que la synchronisation du déclenchement entre la caméra et l'oscilloscope sera de l'ordre de la microseconde, ce qui est entièrement satisfaisant pour nos essais.

Nous pouvons aussi déduire de cette mesure la durée approximative de la décharge haute-tension, à savoir 3 à 4 μs. Cette valeur est bien supérieure à la valeur nominale de 10 ns du générateur d'impulsion présenté figure 3.8 mais est du même ordre de grandeur que celle obtenue par ajustement de l'artefact de la sonde d'après l'équation 3.5 : $t_0 = 8.83\mu s$.

En revanche il n'y a pas de synchronisation entre l'horloge interne de la caméra et celle de l'oscilloscope. Etant donnée la durée très courte des phénomènes auxquels nous nous intéressons, la dérive relative de ces deux échelles est sans doute minime. Pour corroborer ce fait, nous constatons systématiquement que chaque événement détecté sur les courbes de tension d'arc peut être corrélé à l'image près avec un événement sur les vidéos d'imagerie rapide. Nous considérerons donc les deux échelles de temps de la caméra et de l'oscilloscope comme étant synchrones.

3.5.3 Traitement des images

La visualisation des vidéos d'imagerie rapide est une activité certes exaltante mais malheureusement très coûteuse en temps et peu précise : il est difficile de comparer visuellement ces vidéos. Nous avons donc développé un outil de traitement d'image qui permet d'extraire les deux paramètres suivants en fonction du temps :

— Z_A : la position moyenne de l'arc en z,

— R_L : le rayon lumineux moyen de l'arc dans le plan xz,

Nous en détaillons le principe ci-dessous.

Considérons l'image typique présentée dans la figure 3.24. Chaque pixel est indexé par i et j, relatifs respectivement aux axes x et $-z$, et correspond à une valeur de niveau de gris de 12 bits de profondeur, c'est-à-dire comprise en 0 et 4095, ou intensité lumineuse h_{ij}.

Tout d'abord, nous analysons la première image de la vidéo, c'est-à-dire celle de l'amorçage de l'arc (cf. figure 3.22, première image) :

— nous déterminons la position initiale moyenne de l'arc suivant l'axe z : pixel j_0,

— nous détectons la position du reflet sur la cathode suivant l'axe x : i_0. Nous tronquerons alors toutes les images de la vidéo pour $i < i_0$,

— nous déterminons l'échelle de l'image : lors de l'amorçage de l'arc, sa longueur en pixels correspond à la distance inter-électrodes d_0 ce qui nous

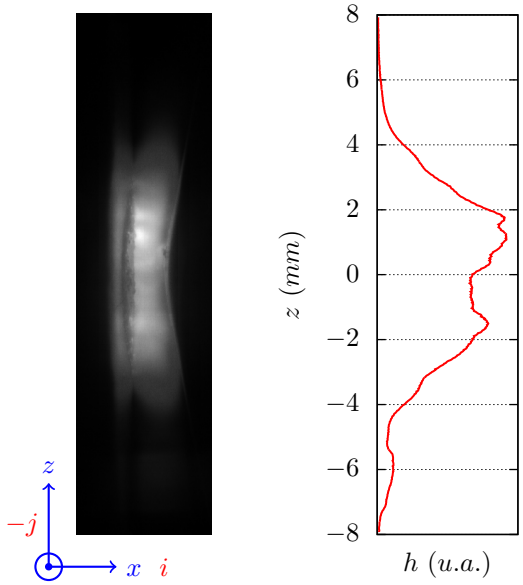


FIG. 3.24 – Image typique de l'arc électrique sur le gabarit d'essai. Les pixels de l'image sont indexés par les indices i et j indiqués en rouge sur le référentiel (x,y,z). Le graphique de droite donne la distribution verticale de l'intensité lumineuse $h(z)$ de l'image.

permet de calculer la taille d'un pixel δ.

La colonne de l'arc présentant grossièrement une symétrie axiale suivant x, nous calculons ensuite pour chaque image la distribution d'intensité lumineuse moyenne suivant l'axe z :

$$h(j) = \frac{\sum_i h_{ij}}{\sum_{ij} h_{ij}} \tag{3.8}$$

La figure 3.24 montre cette distribution correspondant à l'image présentée à sa gauche. Nous pouvons alors calculer l'espérance et l'écart-type de cette distribution :

$$E[j] = \sum_j h(j).j \tag{3.9}$$

$$\sigma[j] = \sqrt{E[j^2] - E[j]^2} \tag{3.10}$$

Après renormalisation de l'axe z

$$z = -\delta(j - j_0) \tag{3.11}$$

nous obtenons la position moyenne de l'arc pour chaque image, autrement dit en fonction du temps :

$$Z_A(t) = E[z](t) \tag{3.12}$$

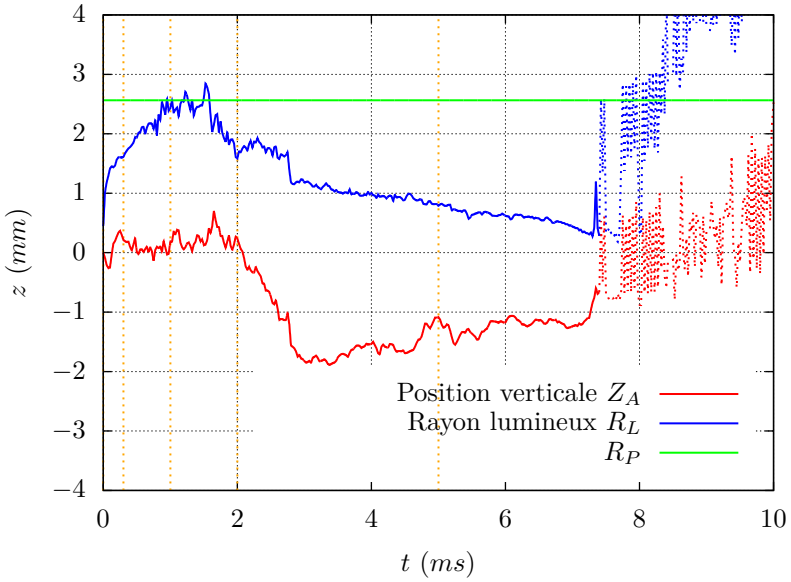


FIG. 3.25 – Position moyenne Z_A et rayon lumineux moyen R_L de l'arc en fonction du temps calculé à partir des vidéos d'imagerie rapide.

Nous utilisons ensuite la mesure du rayon de pied d'arc sur la cathode R_P pour calculer le rayon lumineux de l'arc à partir de l'écart-type :

$$R_L(t) = \frac{R_P}{\sigma_M}\sigma[z](t) \tag{3.13}$$

où σ_M est la valeur maximale atteinte par $\sigma[z](t)$ au cours de l'essai.

La figure 3.25 montre le résultat de ce traitement pour l'essai correspondant aux images de la figure 3.22. Nous avons reporté la valeur de R_P afin de mettre en évidence la renormalisation du rayon lumineux de l'arc R_L. La position temporelle des images présentées dans la figure 3.22 est indiquée par des traits discontinus orange. Enfin, lorsque l'arc s'éteint, les valeurs de Z_A et R_L sont représentées en trait discontinu.

Nous pourrons ainsi suivre en fonction du temps, en plus de l'intensité du courant et de la tension d'arc, le rayon et la position moyenne de l'arc.

3.6 Conclusion

Nous souhaitons clore ce chapitre par une mise en perpective des outils décrits successivement ci-dessus. Nous apporterons une vision globale du montage expérimental et de sa pertinence *a priori* en vue d'une comparaison avec l'extinction de l'arc entre les plaquettes de fractionnement du disjoncteur.

Principes de conception

Deux simplifications fortes, un seul arc et un environnement ouvert, ont permis de poursuivre un objectif réaliste : étudier un arc impulsionnel de forte intensité, statique, *i.e.* dont le mouvement est limité, entre des électrodes isolées thermiquement, ces dernières pouvant être réalisées à partir de matériaux issus du processus industriel.

Banc de court-circuit

Un banc de court-circuit capacitif permet de générer une onde de courant de forte intensité. Il s'agit d'un montage très classique (cf. figure 3.6) mais qui possède cependant la particularité d'avoir un temps de montée très court (cf. figure 3.7).

Amorçage par haute-tension

L'amorçage de l'arc par rupture diélectrique entre les électrodes apporte l'avantage de simplifier le système à étudier : les vapeurs métalliques entrant dans la composition chimique du plasma sont uniquement issues des électrodes.

Le générateur d'impulsion haute-tension utilisé est très simple (cf. figure 3.8) et s'est révélé particulièrement robuste. Il permet un amorçage de l'arc électrique répétable, condition nécessaire à des essais répétables. La décharge haute-tension est cependant difficile à caractériser expérimentalement et une incertitude substiste quant à ses caractéristiques, en particulier sa durée.

Ce mode d'amorçage nécessite les adaptations suivantes :

— La géométrie des électrodes doit permettre de localiser la décharge. Nous avons choisi de créer une distance inter-électrodes minimum locale en optant pour une configuration d'électrodes en « coupons pliés croisés » (cf. figure 3.5), qui permet de réaliser les élecrodes à partir de matériaux de type feuillard (cf. figure 3.1). La contrepartie est que l'espace entre les électrodes n'est pas constant. Toutefois, étant donné le rayon d'arc observé, il ne varie que très faiblement (cf. figure 3.4).

— Le couplage entre le générateur d'impulsion haute-tension et le banc de court-circuit capacitif est réalisé par deux diodes (cf. figure 3.9). Celle qui protège le générateur d'impulsion est tout à fait banale mais celle qui protège le banc de court-circuit est un peu plus conséquente : elle doit supporter une tension inverse impulsionnelle de 10 kV et un courant de plusieurs kiloampères en direct.

— Nous avons passé sous silence les problématiques CEM causées par cette impulsion haute-tension pour nous concentrer sur la problématique de mesure de la tension d'arc. Après quelques essais infructueux avec des sondes

du commerce, nous avons choisi de développer notre propre sonde de tension (cf. figure 3.10). Ses performances se sont révélées adaptées à notre étude, mais la sonde introduit un artefact qui malgré une correction possible, interdit l'accès à la tension d'arc durant les premiers dixièmes de millisecondes de la décharge (cf. figure 3.14)

Gabarit

Le courant électrique est amené au dos des électrodes, en leur centre, par des contre-électrodes axiales (cf. figure 3.2). Le courant électrique traverse donc l'électrode avant d'arriver au pied d'arc et la dissipation de chaleur est minimisée, de façon réaliste par rapport à l'application. Les contre-électrodes sont délibérément très longues (cf. figure 3.3) afin de minimiser les forces de Laplace qui pourraient induire un mouvement de la colonne d'arc.

Le recours à l'impression 3D pour la réalisation des bloc de maintien polymère, a permis d'utliser des formes complexes permettant notamment un excellent accès visuel à l'arc pour son observation par imagerie rapide.

Enfin, une table de guidage à vis micrométrique permet de régler précisément la distance inter-électrodes avant chaque essai.

Diagnostic

Les deux sondes, courant et tension, sont raccordées à un oscilloscope possédant une résolution suffisante à l'observation de la grande dynamique de variation des grandeurs électriques.

L'observation des électrodes après essai par des moyens classiques du laboratoire de Métallurgie, en surface mais aussi en coupe, nous permet d'appréhender les différences de comportement de l'arc en fonction du matériau des électrodes.

Enfin, une caméra rapide, utilisée sans éclairage, permet après optimisation de la luminosité des images une observation tout à fait instructive de la colonne d'arc et de ses pieds, et ce tout au long de la décharge malgré une grande dynamique d'intensité lumineuse, nous permettant de faire le lien entre les mesures électriques et les observations post-essai des impacts aux pieds d'arc sur les électrodes.

Nous avons opportunément tiré parti des perturbations CEM engendrées par l'impulsion haute-tension pour déclencher de façon synchrone l'oscilloscope et la caméra (cf. figures 3.15 et 3.23).

Traitement des données

Plus de 2000 essais ont été réalisés au cours de ce travail avec pour chaque essai un oscillogramme d'intensité du courant et de tension d'arc, une paire

d'électrodes et une vidéo par imagerie rapide.

Le traitement des oscillogrammes consiste en une correction de l'offset de la pince de courant et de l'artefact de la sonde de tension (cf. figure 3.14).

Il est difficile de comparer visuellement ces vidéos, dont les conditions de réalisation ne sont pas toujours similaires. Un algorithme de traitement nous a permis d'estimer la dynamique de la colonne d'arc au cours de l'essai (cf. figures 3.24 et 3.25) et de comparer qualitativement les différents essais, en complément des données électriques.

L'analyse qualitative des électrodes (cf. figures 3.16 et 3.20), nous permis d'identifier des caractéristiques quantitatives des pieds d'arc (cf. figure 3.18), que nous avons utilisées ensuite pour comparer les essais et renormaliser le rayon estimé de la colonne d'arc.

L'ensemble de ces outils ainsi que les méthodes d'analyse des électrodes et de traitement des vidéos d'imagerie rapide ont été développés dans le cadre de l'étude présentée dans ce document. Nous avons privilégié des outils simples, en faveur de leur robustesse, avec pour seul objectif de limiter le temps passé à mettre au point et réparer des moyens d'essai pour passer plus de temps à réaliser des expériences.

Ce choix s'est révélé judicieux d'un point de vue pratique pour cette première approche, mais ce sont, en définitive, les résultats expérimentaux que nous apporterons au cours des chapitres suivants qui valideront de la pertinence du montage expérimental.

Chapitre 4

Dynamique de la tension d'arc

Un des objectifs de ce chapitre est d'évaluer la pertinence de notre montage expérimental par rapport à notre objet d'étude, à savoir le comportement de l'arc de court-circuit dans le déion entre l'instant de fractionnement et son extinction.

Afin de faciliter cette comparaison nous n'utiliserons pour les essais présentés dans chapitre qu'un seul et même matériau pour les électrodes, identique à celui utilisé dans les disjoncteurs choisis pour comparaison. Ce matériau, que nous qualifierons de matériau de référence, est un acier doux revêtu d'une couche de nickel électrolytique d'épaisseur 1 μm. Évidemment cette matière est loin d'être une matière modèle. Les propriétés physico-chimique de l'acier ne sont pas précisément connues et la présence d'un revêtement de surface et l'impact que l'on suppose qu'il peut avoir sur les phénomènes rend l'interprétation des résultats plus ardue.

Nous tâcherons néanmoins de décrire les comportements rencontrés de la façon la plus intelligible et construite possible afin de proposer en fin de ce chapitre une première vision du comportement de l'arc.

Nous détaillerons tout d'abord la configuration expérimentale utilisée pour les essais présentés dans ce chapitre et nous proposerons un découpage en trois phases, basé en partie sur notre étude bibliographique, qui nous permettra de présenter nos résultats de façon ordonnée. Nous nous intéresserons alors à la tension de l'arc électrique et à son évolution durant ces trois phases. Nous proposerons systématiquement une comparaison avec le comportement de l'arc électrique dans le disjoncteur.

4.1 Configuration expérimentale

Le développement du montage expérimental a été dicté par le souhait de représenter au plus près l'application tout en simplifiant le système. La contrepartie est que ce choix implique les difficultés expérimentales suivantes :

— Stabilité de l'arc : l'arc n'est pas confiné dans un enceinte mais libre, sans aucun procédé de stabilisation hormis l'axialité des voies de courant. Il sera donc très sensible à une quelconque perturbation ou déséquilibre, notamment pour les intensités élevées.

— Température des électrodes : l'épaisseur et la masse des électrodes est faible et leur dissipation très limitée. Si la température des électrodes augmente de façon importante, elles pourront céder sous la pression des contre-électrodes, entrainant la destruction du gabarit.

4.1.1 Onde de courant

Travailler à fort courant s'est donc révélé particulièrement difficile. Nous sommes toutefois parvenus à une stabilité permettant d'exploiter et de travailler sans trop de problème jusqu'à une intensité de 1 kA. Cet ordre de grandeur est pertinent par rapport au comportement de l'arc tel qu'il est décrit dans la littérature, où l'augmentation de la tension avec l'intensité du courant est en général constatée à partir de quelques centaines d'ampères. En revanche il reste un peu faible par rapport à notre application, comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, l'intensité maximale du courant de l'arc de coupure varie de quelques centaines d'ampères jusqu'à environ 4 kA.

Forme d'onde	$\mathbf{t_0}$ **(ms)**	$\mathbf{I_0}$ **(A)**
1	0,35	1080
2	0,35	1870
3	0,35	2700
4	2,94	1080

TAB. 4.1 – Récapitulatif des différentes formes d'ondes utilisées pour les essais présentés dans ce chapitre : temps de montée t_0 et intensité maximale du courant I_0.

Notre configuration de travail de base correspondra donc à une intensité maximale $I_0 = 1\ kA$ avec un temps de montée $t_0 = 0{,}35\ ms$. Elle nous permettra d'obtenir des résultats fiables. Nous explorerons l'impact du courant jusqu'à environ 3 kA pour la même dynamique en temps, malgré des résultats moins

répétables lié à l'instabilité de l'arc. Nous explorerons également l'aspect temporel avec une dynamique de montée du courant plus lente. Nous limiterons cette exploration à 1 kA car au-delà la montée en température des électrodes devient trop importante. Le tableau 4.1 récapitule de façon synthétique les caractéristiques des ondes de courant utilisées.

4.1.2 Découpage en phases

La figure 4.1 montre l'onde de courant mesurée lors de cinq essais réalisés dans les mêmes conditions, à savoir une distance inter-électrodes $d_0 = 1\ mm$ et une intensité du courant maximale $I_0 \simeq 1080A$. La répétabilité est excellente jusqu'à environ 4 ms.

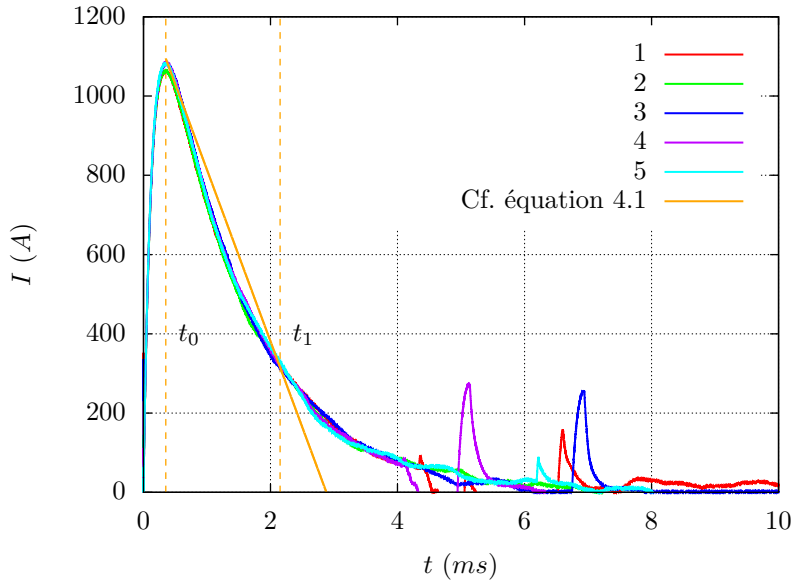


FIG. 4.1 – Intensité du courant d'arc pour une distance inter-électrodes $d_0 = 1\ mm$ et une intensité maximale $I_0 \simeq 1080\ A$. Chaque courbe représente un essai sur une paire d'électrodes distincte.

Ainsi que le suggère notre étude bibliographique, nous distinguons tout d'abord la phase de montée ($t < t_0$) de la phase de descente ($t > t_0$). Nous avons représenté sur la figure 4.1 une telle décroissance linéaire correspondant à l'équation 4.1 pour $\Delta t = 2{,}5\ ms$:

$$I(t) = I_0 \left(1 - \frac{t - t_0}{\Delta t}\right) \tag{4.1}$$

L'onde de courant est relativement réaliste au début de la phase de descente, mais décroît bien trop lentement vers la fin de cette phase. Nous appellerons t_1 le temps au-delà duquel la forme de l'onde de courant n'est plus réaliste par

rapport à notre application. Nous distinguerons donc trois phases : la phase de montée ($t < t_0$), la phase de descente ($t_0 < t < t_1$) et la phase d'extinction ($t_1 < t$). Les deux premières phases sont réalistes par rapport à notre application et correspondent respectivement aux phases de fractionnement et de limitation définies dans le chapitre 1, mais ce n'est pas le cas de la dernière qui correspond à une décroissance du courant bien trop lente. Il convient de préciser que si t_0 est une grandeur caractéristique de l'onde de courant, t_1 est une indication approximative du réalisme de celle-ci par rapport à notre application.

La valeur de $t_0 = 0{,}35\ ms$ est quant à elle, bien que légèrement plus élevée, dans le même de ordre de grandeur que la durée de la phase de fractionnement estimée dans le disjoncteur (cf. figure 1.12) et par [45] à $\delta t_f \simeq 0{,}1\ ms$.

Phase	**dI/dt**	**t**	**n °**
Montée	> 0	$t < t_0$	1
Descente	< 0	$t_0 < t < t_1$	2
Extinction	< 0	$t_1 < t$	3

TAB. 4.2 – Distinction des différentes phases de vie de l'arc en fonction du sens de variation du courant et de l'aspect réaliste ou non de la forme d'onde.

Nous utiliserons ce découpage en phase pour faciliter la lecture des courbes et l'exploitation de nos résultats d'essai. Le tableau 4.2 en propose une vision synthétique. La dernière colonne indique le numéro de phase auquel nous ferons parfois référence afin d'alléger l'écriture, ainsi que pour indicer les grandeurs caractéristiques que nous définirons.

4.1.3 Paramètres d'essai

Il se trouve à notre grand soulagement que nous constatons globalement une excellente répétabilité des essais. Evidement toutes nos courbes ne sont pas strictement superposées mais les tendances sont bien répétables. Nous avons donc pu limiter la statistique à cinq essais par configuration.

Nous avons également constaté que les résultats obtenus sont sensibles à l'état de propretés des électrodes. Le matériau que nous utilisons pour les électrodes est issu de notre processus industriel. Il peut donc présenter à sa surface des résidus d'huile liés au process de découpe ou utilisée pour la protection anticorrosion, voire des traces de doigts laissées par l'opérateur lors du prélèvement ou de la manipulation des échantillons.

La propreté de leur surface est donc inégale et nous nous sommes rendus compte qu'en utilisant les électrodes sans préparation de surface, nous avions des

comportements variables. Afin de confirmer cet effet, nous avons réalisé des essais en salissant sciemment les surfaces par des matières organiques (typiquement de l'huile) et en comparant avec des électrodes donc la surface a été nettoyée. Afin de nous affranchir de cette variabilité, nous utilisons le protocole de nettoyage suivant : 1) trempage des électrodes dans de l'éthanol, 2) essuyage par du papier optique et 3) séchage à l'air sec.

Enfin, nous ne réaliserons qu'un seul essai par couple d'électrodes. Le comportement de l'arc pour plusieurs décharges successives sur une même paire d'électrodes sera abordé dans le chapitre 6.

Le tableau 4.3 récapitule les paramètres utilisés pour les essais présentés dans ce chapitre.

Paramètres d'essai	
Matériaux des électrodes	Référence
Epaisseur des électrodes	0,8 mm
Préparation de surface	Essuyage éthanol
Distance inter-électrodes	1 mm
Forme d'onde	cf. tab. 4.1
Répétition	Non

TAB. 4.3 – Récapitulatif des paramètres d'essai utilisés pour les essais présentés dans ce chapitre.

4.1.4 Lecture de la tension d'arc

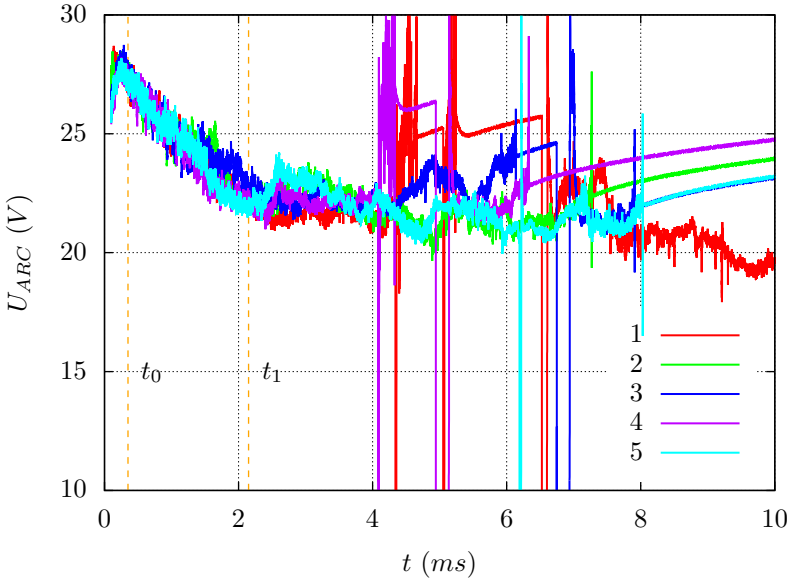
La figure 4.2 montre les tensions d'arc correspondant aux ondes de courant présentées dans la figure 4.1. Deux représentations sont proposées :

— en (a), la représentation temporelle $U_{ARC}(t)$ permet de distinguer très clairement la phase de descente et la phase d'extinction,

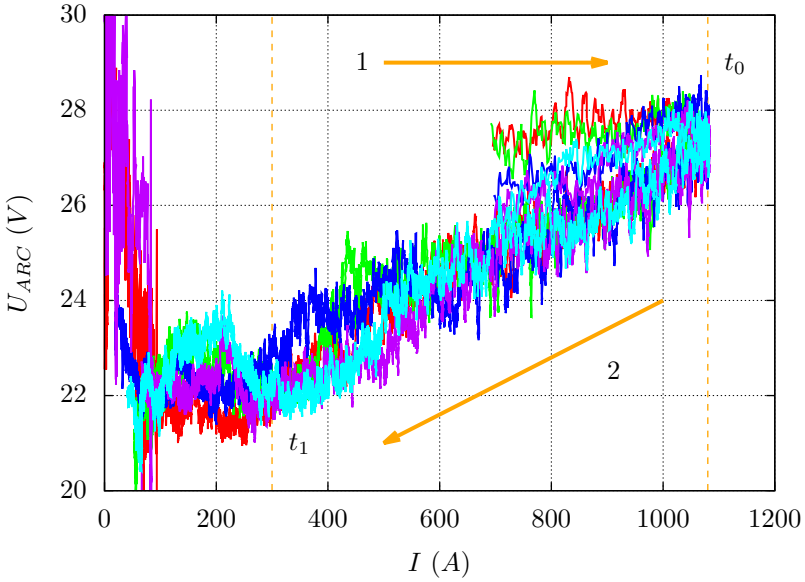
— en (b), la représentation sous la forme d'une caractéristique $U_{ARC}(I)$ dynamique permet de distinguer bien mieux le comportement durant la phase de montée, bien qu'elle soit tronquée pour $I \lesssim 700\ A$ à cause de l'artefact lié à la sonde et corrigé à partir de 0,1 ms.

Nous nous appuierons sur l'une ou l'autre représentation en fonction de ce que nous souhaiterons mettre en évidence ou discuter.

La situation semble relativement confuse au premier regard, en voici une grille de lecture. Malgré la dispersion des mesures ainsi que le tronquage des données, il apparait que, pour une intensité du courant donnée, la tension d'arc



(a) Représentation temporelle de la tension d'arc.



(b) Caractéristique $U_{ARC}(I)$ dynamique.

FIG. 4.2 – Tension d'arc pour une distance inter-électrodes $d_0 = 1\ mm$ et une intensité du courant maximale $I_0 \simeq 1080A$. Chaque courbe représente un essai sur une paire d'électrodes distincte.

lors de la montée du courant est supérieure ou égale à la tension d'arc lors de la descente (cf. figure 4.2b). Puis lorsque l'intensité du courant diminue, la tension

d'arc décroît de façon approximativement linéaire avec le courant et avec une excellente répétabilité (cf. figure 4.2b). La tension durant la phase d'extinction est ensuite en moyenne constante mais présente des instabilités (cf. figure 4.2a) que nous discuterons plus en détails par la suite. Nous sommes donc en présence d'un comportement hystérétique similaire à celui-ci présenté dans le chapitre 2.

4.2 Phase de montée

4.2.1 Pertinence de la mesure de tension

Le choix d'un temps de montée t_0 si court entraîne des variations de courant très rapides, de l'ordre de 10^6 à 10^7 $A.s^{-1}$. Une inductance parasite pourra donc avoir pour conséquence l'apparition d'un artefact de tension de l'ordre du volt, qui est justement l'ordre de grandeur des variations que nous constatons (cf. figure 4.2).

Nous avons donc souhaité nous assurer que notre chaîne de mesure ne produisait pas d'artefact lié à cette dynamique de courant. Pour ce faire, nous substituons à l'arc électrique une plaquette en cuivre d'épaisseur 1 mm maintenue serrée entre les deux électrodes. L'amorçage du courant est réalisé non plus par un pulse haute-tension mais par commutation d'un thyristor ajouté en série avec le gabarit. La position des prises de potentiel et la chaîne de mesure sont identiques.

Nous estimons la résistance électrique de cette plaquette de cuivre de la façon suivante :

$$R_0 = \frac{d_0}{\sigma_0 S_0} \tag{4.2}$$

où $d_0 = 1$ mm, σ_0 est la conductivité électrique du cuivre à $20°C$ et S_0 est la section de passage du courant que l'on estime circulaire et de diamètre 1 mm. La figure 4.3 montre la tension mesurée aux bornes des électrodes (U) à laquelle a été retranchée cette estimation de la chute de tension résistive de la plaquette ($R_0 I$), en fonction de l'intensité du courant I.

L'allure de $U - R_0 I$ indique un comportement résistif pour une intensité maximale de 600 A avec une légère déviation pour les courants plus élevés. Dans tous les cas, cette déviation est inférieure à 0,02 V. Cette déviation est en partie liée à la variation de la conductivité du cuivre en fonction de la température et à la variation des résistances de contact entre la plaquette de cuivre et les électrodes, deux phénomènes qui ne sont pas présents dans le cas d'un arc électrique.

Nous pouvons donc considérer que l'incertitude liée à une éventuelle inductance parasite est de l'ordre de quelques dizaines de mV et donc bien inférieure aux variations de tension auxquelles nous nous intéresserons.

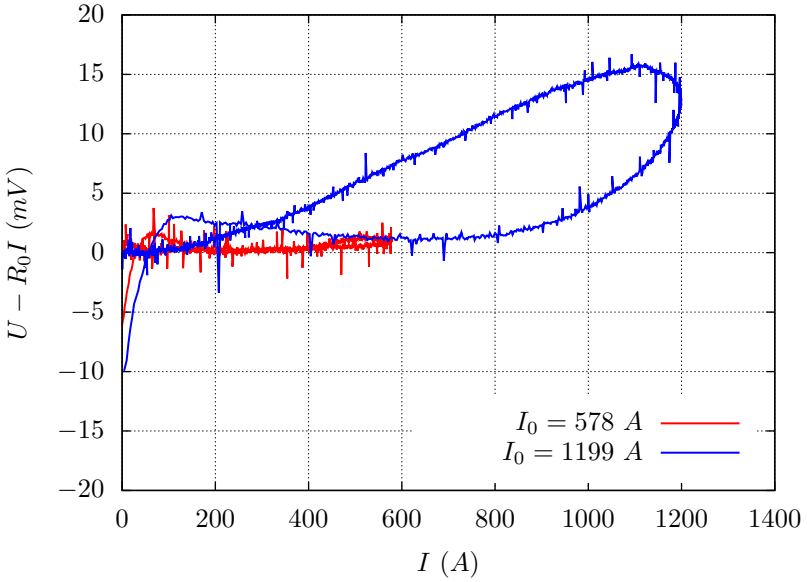


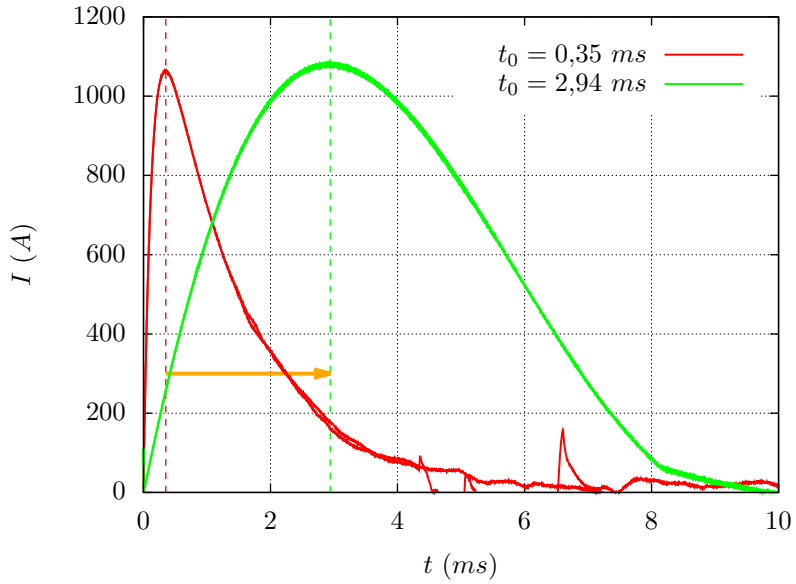
FIG. 4.3 – Tension résiduelle d'une plaquette de cuivre d'épaisseur 1 mm maintenue serrée entre les deux électrodes : U est la tension mesurée et R_0 est calculé d'après l'équation 4.2.

4.2.2 Tension d'arc

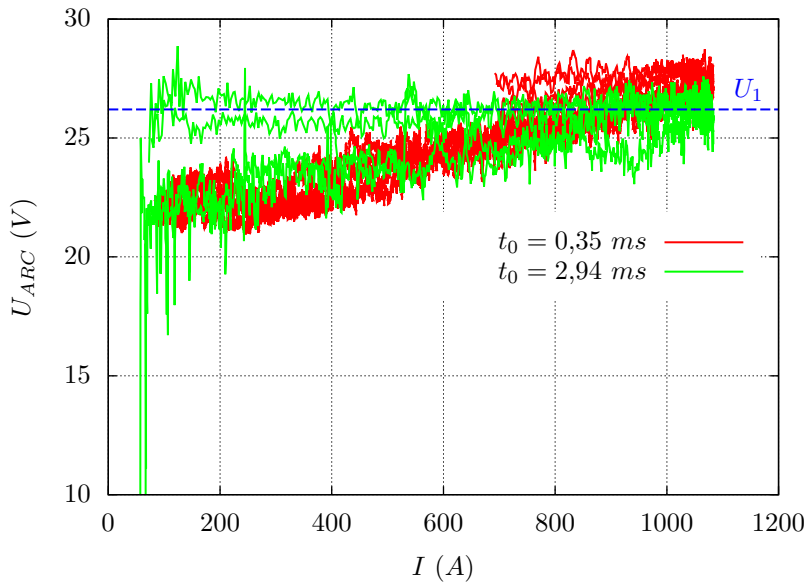
La phase de montée du courant dure 0,35 ms. Or notre sonde présente un artefact sur les premiers 0,5 ms de la décharge, artefact que nous corrigeons entre 0,1 et 0,5 ms. C'est-à-dire que toute l'information que nous avons sur la tension d'arc durant la montée est obtenue après correction de cet artefact. Etant donné la variabilité des tensions relevées (cf. figure 4.2b), il nous a semblé nécessaire de proposer une mesure plus directe de la variation de tension durant cette phase.

Il nous est malheureusement difficile de nous affranchir de l'artefact de notre sonde de tension. Nous avons donc choisi d'allonger la durée de la phase de montée t_0 en augmentant l'inductance du circuit pour la même intensité maximale I_0. Or lorsque t_0 augmente l'énergie injectée dissipée par le système à un courant donné augmente. Nous avons donc choisi un paramètre t_0 le plus grand possible par rapport à ce que notre gabarit et les électrodes nous ont semblé être en mesure de supporter, à savoir $t_0 = 2{,}94$ ms. La figure 4.4a montre l'intensité du courant en fonction du temps pour cette nouvelle forme de l'onde de courant.

La figure 4.4b montre l'évolution de la tension d'arc en fonction du courant pour deux temps de montée : 0,35 et 2,94 ms. Lorsque le temps de montée est plus long, la tension d'arc est en première approximation constante durant la



(a) Intensité du courant.



(b) Tension d'arc pour une distance inter-électrodes 1 mm.

FIG. 4.4 – Intensité du courant et tension d'arc pour deux temps de montée t_0. La ligne pointillée bleue est la tension moyenne U_1 durant la phase 1 pour l'onde correspondant à $t_0 = 2{,}94$ ms.

phase de montée. Nous pouvons écrire :

$$U_{ARC} \simeq U_1 \tag{4.3}$$

où U_1 est une constante. Il semblerait également que cette tension U_1 augmente lorsque le temps de montée diminue. Cela est bien visible en comparant les deux courbes de la figure 4.4b.

Nous avancerons donc comme hypothèse que lors de la phase de montée, la tension d'arc n'est pas sensible à l'intensité du courant mais à son taux de variation moyen, que l'on peut estimer en première approximation égale à I_0/t_0.

4.2.3 Comparaison avec le disjoncteur

Afin d'étayer cette hypothèse, nous traçons U_1, la tension durant la phase 1, définie précédemment (cf. équation 4.3), en fonction de I_0/t_0 pour les deux valeurs de temps de montée et les valeurs de I_0 correspondant aux formes d'onde du tableau 4.1. Il s'agit de la figure 4.5.

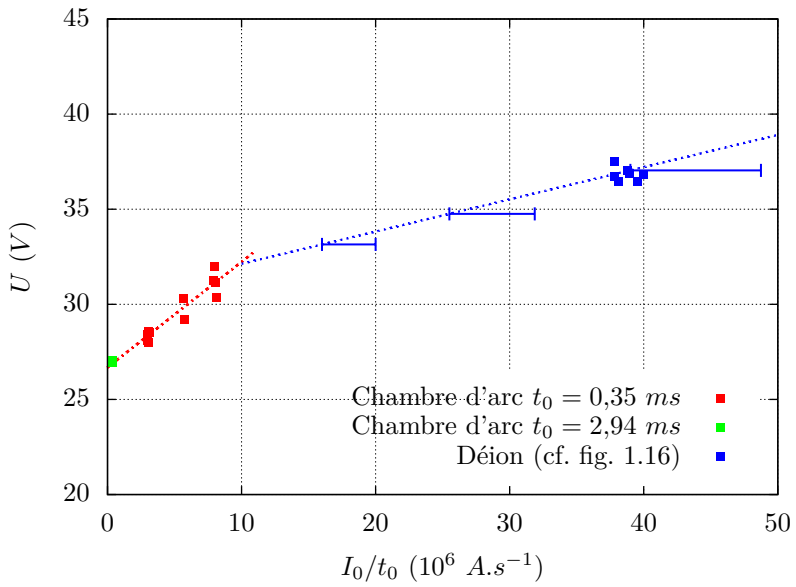


FIG. 4.5 – Tension d'arc maximale atteinte lors de la phase de montée dans notre chambre d'arc, pour deux temps de montée t_0, comparée à la tension d'arc maximale estimée dans le déion, en fonction de la dynamique de montée du courant.

Nous avons également reporté sur cette même figure la tension d'arc maximale dans le déion U_1, présentée précédemment sur la figure 1.16. Pour mémoire, cette tension (représentée par un trait discontinu bleu sur la figure 4.5) est calculée à partir de mesures aux bornes du disjoncteur pour une intensité I_0 variant entre 1,5 et 4 kA, et à l'aide une estimation de la résistance électrique des amenées de courant réalisée à 4 kA. Nous estimons le temps de montée t_0 dans le cas du déion par la valeur du temps de fractionnement $\delta t_f = 0{,}1$ ms.

Or celui-ci n'est pas mesuré directement mais a été estimé par l'observation de l'évolution de la tension aux bornes du disjoncteur (cf. figure 1.12). Cette valeur est donc sans doute une estimation haute de t_0. Les barres d'incertitudes de la figure 4.5 indiquent donc la variation de la position de U_1 pour une valeur de $0{,}8\delta t_f < t_0 < \delta t_f$ (0,8 étant une valeur arbitraire pour indiquer la tendance).

L'ensemble des données de cette figure correspond à une configuration d'électrodes similaire : même matière, même épaisseur, même distance inter-électrodes.

L'introduction du temps de montée t_0 dans l'abscisse de ce graphique permet d'aligner les données obtenues à l'aide de la chambre d'arc à différents temps de montée sur une même tendance croissante.

Lorsqu'on extrapole U_1 vers des valeurs de I_0/t_0 proches de zéro, celle-ci tend vers une valeur d'environ 26,7 V. Cette valeur est bien supérieure à celle atteinte pour les courants faibles à la fin de la phase de descente, qui apparaît être de l'ordre de 22 V sur la figure 4.2b. C'est-à-dire que la différence de tension d'arc durant la phase de montée et la phase de descente ne disparait pas lorsque la dynamique I_0/t_0 devient très lente, ou bien de façon extrêmement non linéaire. Il semblerait donc que si la dynamique de montée du courant est une piste intéressante pour expliquer la tension d'arc durant la phase de montée, celle-ci n'est pas suffisante.

Si les données extraites du disjoncteur sont dans le prolongement des données de la chambre d'arc, il semble difficile de proposer un ajustement linéaire commun. Deux pistes d'explication sont envisageables :

1) la tendance n'est effectivement pas linéaire, mais pourrait par exemple suivre une loi logarithmique,
2) les phénomènes ne sont pas comparables dans la chambre d'arc et dans le déion : dans le premier cas l'arc apparaît entre les électrodes et reste quasi immobile lorsque l'intensité du courant augmente, dans le second cas l'arc s'accroche sur le bord de la plaquette de fractionnement puis se déplace vers son centre. Nous pouvons donc nous attendre à une érosion aux pieds d'arc différente dans les deux cas.

Nous apporterons dans le chapitre suivant des élements concernant l'érosion des électrodes, qui nous permettront de préciser cette dernière piste d'explication.

4.3 Phase de descente

4.3.1 Tension d'arc

L'aspect remarquable du comportement de la tension durant la phase de descente est sa linéarité avec le courant, bien visible en représentation $U_{ARC}(I)$,

ainsi que le montre la figure 4.6. L'équation

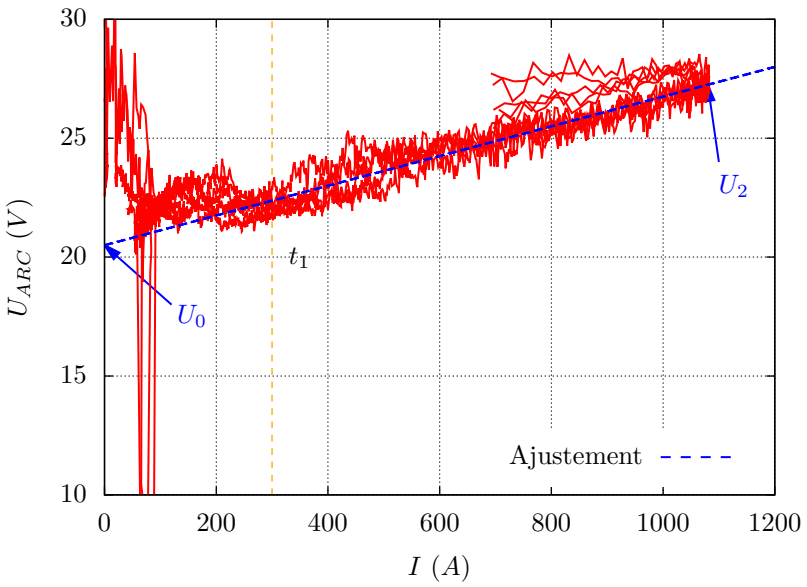


FIG. 4.6 – Tension d'arc pour une distance inter-électrodes de 1 mm et un temps de montée $t_0 = 0.35$ ms. La série de cinq essais réalisés sur des paires d'électrodes distinctes est représentée en une seule et même couleur afin de mettre en évidence l'ajustement par une fonction linéaire.

$$U_{ARC} = U_0 + GI \qquad (idem\ 2.3)$$

où $U_0 = 20{,}5$ V et $G = 6{,}25.10^{-3}$ $V.A^{-1}$ correspond à un ajustement linéaire plus que satisfaisant pour la phase de descente, c'est-à-dire pour $t < t_1$. Elle est représentée sur cette même figure.

L'ordre de grandeur de G est correct comparé aux valeurs présentées dans le chapitre 2. La valeur de U_0 quant à elle n'a pas beaucoup de sens. En effet elle correspond à une extrapolation de la tension d'arc lors de la phase de descente pour les intensités faibles, or il apparait clairement que pour des temps supérieurs à t_1 la tension d'arc stagne à une valeur d'environ 22 V.

Si l'équation proposée 2.3 est l'expression mathématique la plus simple pour ajuster la courbe expérimentale $U_{ARC}(I)$ lors de la phase de descente, elle se base sur un paramètre de la phase d'extinction dénué de sens, ce qui est pour le moins hasardeux. Donc, afin, de surcroit, de mettre en évidence la nature temporelle sous-jacente de cette courbe, nous pouvons au lieu d'utiliser le paramètre U_0 qui est la valeur de la tension extrapolé à courant nul, utiliser la valeur de la tension d'arc au démarrage de la phase de descente, c'est-à-dire lorsque le courant est

maximal, soit :

$$U_{ARC} = U_2 + G(I - I_0) \tag{4.4}$$

où $U_2 = 27{,}3\ V$.

Par continuité avec la phase de montée, nous serions tenté de rapprocher les équations 4.3 et 4.4 de la façon suivante :

$$U_2 \simeq U_1 \tag{4.5}$$

ce qui signifie simplement que la tension d'arc au début de la phase de descente est approximativement la tension d'arc de la phase de montée. Nous reviendrons sur ce point ci-dessous.

4.3.2 Impact de l'intensité maximale

L'instabilité de l'arc sur notre gabarit pour des intensités élevées rend difficile l'interprétation des courbes de tension d'arc. Nous avons choisi d'indiquer sur les courbes expérimentales la stabilité de l'arc entre les électrodes de la façon suivante : lorsque l'arc est stable et bouge peu entre les électrodes, le trait est continu, lorsque l'arc se déplace de façon importante, en général en début de décharge, le trait est discontinu.

La figure 4.7 représente la tension d'arc pour une distance inter-électrodes de 1 mm et trois valeurs d'intensité maximale du courant I_0. Les courbes sont décalées de 5 V afin d'améliorer la lisibilité de la figure. L'axe des abscisses n'est plus l'intensité I mais l'intensité réduite I/I_0. En effet, comme le démontre très clairement les courbes de la figure 4.7, les courbes de tension d'arc sont de cette façon parfaitement alignées durant la phase de descente. Nous pouvons donc exprimer la tension d'arc de la façon suivante :

$$U_{ARC} = U_2 + k(\frac{I}{I_0} - 1) \tag{4.6}$$

où U_2 varie de 27,3 V à 29,2 V lorsque I_0 augmente et $k = 6.7$ est une constante indépendante de l'intensité maximale I_0. Cette équation est représentée sur la figure 4.7 par des traits continus bleu ciel.

Si nous rapprochons l'équation 4.6 de l'équation 4.4, nous pouvons exprimer G de la façon suivante :

$$G = \frac{k}{I_0} \tag{4.7}$$

Le taux de variation de la tension d'arc durant la phase de descente G est donc inversement proportionnel à l'intensité maximale du courant, c'est-à-dire que G, qui est une grandeur caractéristique de la phase de descente, dépend de la phase de montée. Un aspect temporel est donc sous-jacent.

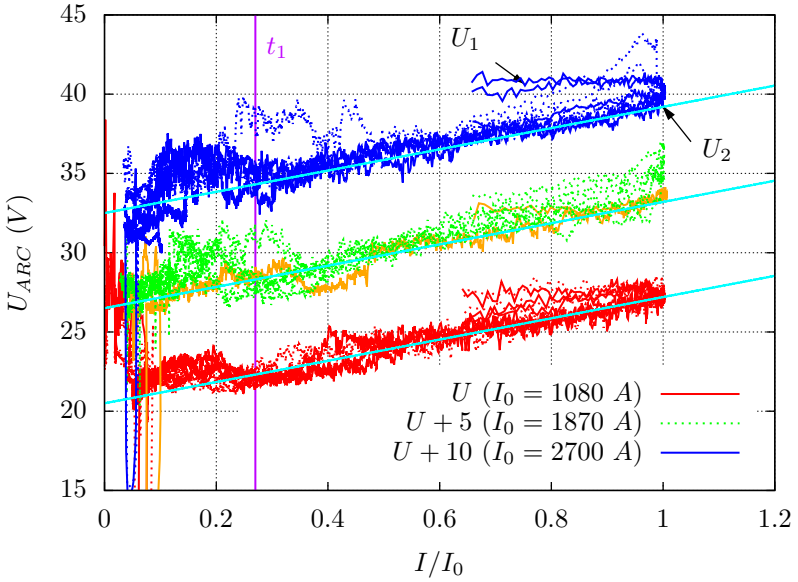


FIG. 4.7 – Tension d'arc pour une distance inter-électrodes de 1 mm et trois valeurs d'intensité maximale I_0. Les courbes sont décalées de 5 V pour une meilleure visibilité. Les courbes en trait discontinu correspondent à des comportements instables de l'arc.

D'autre part, l'équation 4.5 semble raisonnable pour une intensité maximale $I_0 = 1080$ A, mais elle devient bien discutable lorsque I_0 augmente. Nous constatons de façon plus générale que lorsque l'intensité atteint son maximum la tension d'arc semble diminuer brutalement avant de rejoindre la droite décrite par l'équation 4.6. Cela est particulièrement visible sur la courbe à $I_0 = 2700$ A de la figure 4.7. Nous poserons donc de façon plus général à l'équation 4.5 :

$$U_2 \lesssim U_1 \tag{4.8}$$

4.3.3 Comparaison avec le disjoncteur

Malheureusement la comparaison de ces résultats avec le comportement du disjoncteur s'avère difficile. En effet, comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, l'arc électrique dans le déion se révèle particulièrement instable pour des courants faibles. Aussi allons-nous limiter notre comparaison à une intensité maximale dans le déion d'environ 4 kA.

En revanche, afin de nous affranchir de la chute de tension liée à l'impédance des voies de courant du disjoncteur, nous avons réalisé des essais de court-circuit sur un disjoncteur instrumenté de façon à mesurer la tension aux bornes du déion durant l'essai, ainsi que nous l'avons décrit avec force détails dans le chapitre

1. Nous avons accès de cette façon, en négligeant la chute de tension dans les plaquettes du déion, à la tension d'arc lors de la phase de descente et d'extinction dans le disjoncteur.

La figure 4.8 compare ces mesures (qui sont les mêmes que celle présentées dans les figures 1.15 et 1.16) à celles réalisées avec notre chambre d'arc : la tension d'arc dans le déion en fonction de l'intensité réduite I/I_0 présente la même pente k, mais la courbe est décalée vers le haut d'environ 9 V. Les droites représentées en vert clair représentent l'équation 4.6.

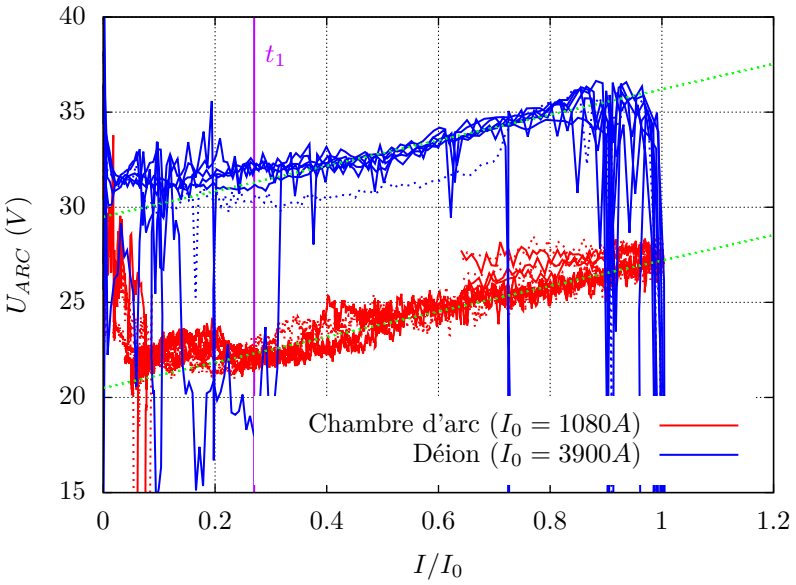


FIG. 4.8 – Tension d'arc dans le déion comparée à la tension d'arc dans la chambre d'arc.

4.4 Phase d'extinction

La forme de l'onde de courant durant la phase d'extinction n'est pas réaliste. Comme nous l'avons vu en début de ce chapitre, l'intensité du courant décroît bien trop lentement comparé à notre application. Nous observons néanmoins des comportements qu'il nous a semblé intéressant de rapporter ici.

4.4.1 Coalescence des bains fondus

Les courbes de tension d'arc présentées en début de ce chapitre (figure 4.2) montrent de très fortes fluctuations durant la phase d'extinction : la tension chute parfois brutalement en-dessous du volt. La figure 4.9 permet de regarder

plus en détails ces variations pour un essai extrait de cette figure. L'observation par imagerie rapide de l'arc électrique et des électrodes durant cet essai permet d'expliquer les brusques variations de tension, que nous avons repérées par des indices alphabétiques sur la courbe :

a) Extinction de l'arc, la tension mesurée est alors celle du circuit ouvert. Les bains fondus aux pieds d'arc sont très proéminents et continuent de croître légèrement.

b) Les bains fondus se touchent et le courant électrique peut de nouveau circuler dans le pont fondu ainsi créé.

c) Explosion du pont fondu qui donne naissance à un nouvel arc. Une quantité très importante de gouttelettes en fusion est expulsée.

d) Extinction définitive de l'arc, les bains fondus sont toujours présents mais pas assez proéminents pour créer un nouveau pont fondu.

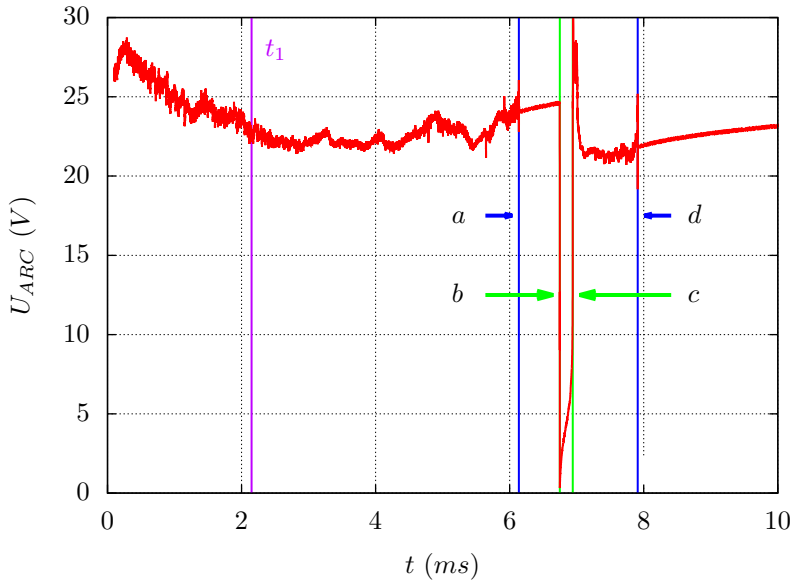


FIG. 4.9 – Exemple de fluctuations de la tension durant la phase d'extinction pour une forme d'onde correspond à celle de la figure 4.1. L'interprétation des événemements indexés par les lettres a, b, c et d est donnée dans le texte.

Le grand nombre d'essai réalisés dans diverses configurations nous a permis d'identifier différents cas où le gonflement des bains fondus aux pieds d'arc a un impact sur le réamorçage ou l'extinction de l'arc. Ce processus se déroule en deux étapes :

1) Les bains fondus aux pieds d'arc entrent en contact et créent ainsi un pont fondu entre les deux électrodes. Cela peut avoir lieu lorsque l'arc est

présent, auquel cas il y a extinction, ou bien, comme nous l'avons détaillé ci-dessus, immédiatement après extinction de l'arc.

2) Le pont fondu ainsi créé peut, suivant la dynamique de courant et de température, se solidifier, soudant ainsi les deux électrodes l'une à l'autre, ou bien exploser et amorcer un nouvel arc.

Ce comportement est particulièrement spectaculaire et n'a pourtant, à notre connaissance, jamais été reporté dans la littérature.

Nous n'avons pas d'évidence expérimentale directe de l'existence de ce phénomène dans le disjoncteur. Nonobstant, l'observation des plaquettes de fractionnement d'un disjoncteur après coupure, dont un exemple typique est donné en figure 4.10, met en lumière une topographie de surface tout à fait cohérente avec un tel comportement. De plus lors d'essais de court-circuit à des courants présumés bien supérieurs à la valeur nominale du produit, certains disjoncteurs, lorsqu'ils survivent à l'essai, présentent des plaquettes de fractionnement soudées entre elles par des ponts fondus.

FIG. 4.10 – Aspect du déion après un essai de coupure pour une intensité maximale d'environ 4 kA.

L'onde de courant utilisée durant cette phase n'est pas pertinente mais permet tout de même de mettre en évidence un phénomène d'extinction ou de réamorçage de l'arc par pont fondu cohérent avec des observations de disjoncteurs après un essai de court-circuit. Ce mécanisme est dans le cadre de la limitation du courant dans le disjoncteur absolument néfaste. Son étude présente donc un fort intérêt.

4.4.2 Tension d'arc

Abstraction faite de l'apparition de ponts fondus, la tension d'arc durant la phase d'extinction semble se stabiliser à partir de t_1. Cet effet est bien visible sur la figure 4.9, où la tension se stabilise à environ 22 V, mais aussi sur l'ensemble

des courbes de la figure 4.2a. La tension d'arc dans le disjoncteur présentée dans la figure 4.8 se stabilise aussi aux environs de t_1.

Ce changement de comportement de la tension pour les intensités plus faibles est cohérent avec la caractéristique $U_{ARC}(I)$ générique de la littérature, cf. figure 2.3. Néanmoins, nos courbes étant tracées en fonction de I/I_0, cela suggère que cet effet n'est donc pas lié à une valeur d'intensité mais à un temps. Le peu de données récoltées et la faible répétabilité du comportement de l'arc durant cette phase nous empêche de conclure positivement sur ce point. Nous pouvons cependant considérer en première approximation que la tension est constante durant la phase d'extinction, nous définissons cette valeur :

$$U_{ARC} \simeq U_3 \tag{4.9}$$

4.5 Conclusion

Le montage expérimental que nous avons présenté dans le chapitre précédent nous a permis d'explorer une gamme d'intensité du courant I_0 de 1 à environ 4 kA, pour un temps de montée $t_0 \simeq 0{,}35\ ms$. Nous avons également pu travailler avec un temps de montée plus long, $t_0 = 2{,}94\ ms$, mais en nous limitant à $I_0 \simeq 1\ kA$. En effet, au-delà de cette valeur, l'énergie dissipée par l'arc électrique dans les électrodes devient trop importante et peut engendrer une destruction du montage expérimental. Pour la même raison, nous nous sommes limités à une durée de la phase de descente $\Delta t = 2{,}5\ ms$. Des essais préliminaires n'ont pas permis de mettre en évidence l'impact sur la tension d'arc de faibles variations de Δt et une augmentation importante de cette durée, d'un facteur dix par exemple, n'était pas envisageable sans endommager notre montage expérimental.

L'objectif de ce chapitre étant d'évaluer la pertinence des comportements observés sur notre gabarit en comparaison avec ceux du disjoncteur, présentés dans le chapitre 1, nous nous sommes limités à une seule configuration d'électrodes : même matériau, même épaisseur, même distance inter-électrodes (cf. tableau 4.3).

Le comportement de l'arc est apparu relativement répétable, hormis bien sûr pour la phase d'extinction qui est tributaire des mouvements des bains fondus. Cela nous a permis de limiter la statistique à cinq essais par configuration (cf. figure 4.2a).

Nous présenterons ci-dessous les comportements de la tension d'arc que nous avons observés, phase par phase, puis nous discuterons de leur pertinence par rapport au comportement de l'arc électrique dans le disjoncteur durant la phase de limitation lors d'un essai de court-circuit.

Phase de montée

Cette phase correspond à la montée de l'intensité du courant après l'amorçage de l'arc électrique par une impulsion haute-tension. Sa durée est de $t_0 = 0{,}35\ ms$, ce qui est bien plus court que les valeurs constatées dans la littérature, en général 4 à 5 ms . Cette phase correspond à la phase de fractionnement du disjoncteur, dont la durée est estimée à $\delta t_f = 0{,}1\ ms$.

La dynamique d'intensité est très importante dans cette phase : sa dérivée dI/dt peut être estimée par I_0/t_0 qui est de l'ordre de plusieurs $10^6\ A.s^{-1}$. Nous nous sommes donc assurés que la configuration de mesure de tension n'était pas sensible à une éventuelle inductance parasite (cf. figure 4.3).

La présence d'un artefact durant le premier dixième de milliseconde de la mesure de tension nous masque malheureusement une grande partie de ce qui se passe durant cette phase lorsque $t_0 = 0{,}35\ ms$ (cf. figure 4.2). Nous avons donc conforté nos observations avec des essais pour un temps de montée bien plus long, $t_0 = 2{,}94\ ms$, en nous limitant à un courant maximal $I_0 \simeq 1\ kA$.

La tension d'arc est dans tous les cas plus importante durant la phase de montée que durant la phase de descente ou d'extinction. Elle semble rester constante, hormis durant l'artefact de la sonde durant lequel il est impossible de mesurer la tension. Nous nommons cette valeur constante U_1.

Nous constatons ensuite que U_1 dépend de la forme de l'onde de courant, en particulier qu'elle semble augmenter avec la dynamique de montée de l'intensité I_0/t_0 (cf. figure 4.5).

Phase de descente

La phase de descente correspond à la diminution de l'intensité du courant, sa durée est de $\Delta t = 2{,}5\ ms$, indépendamment de la valeur maximale atteinte par l'intensité I_0. Dans la littérature, la durée de cette phase est de l'ordre de 5 ms. Dans le disjoncteur, cette phase correspond à la phase de limitation, dont la durée est comprise en 2,5 et 3,2 ms. Les conditions d'essai sont donc réalistes par rapport à l'application et comparables à la littérature. En revanche, nous limitons l'étude de cette phase au temps t_1 et non pas jusqu'à l'extinction de l'arc, car alors le taux de décroissance du courant n'est plus approximativement linéaire (cf. figure 4.1).

La tension d'arc varie linéairement avec l'intensité du courant. Nous avons mis en évidence que lorsque l'intensité maximale du courant I_0 augmente, cette variation devient moins prononcée : la tension d'arc varie linéairement avec I/I_0, à savoir :

$$U_{ARC} = U_2 + k(\frac{I}{I_0} - 1) \qquad (idem\ 4.6)$$

où k est une constante et $U_2 \lesssim U_1$. Nous constatons que $U_1 - U_2$ augmente lorsque I_0 augmente (cf figure 4.7).

Phase d'extinction

Cette phase correspond à la fin de la décharge des condensateurs et n'est pas représentative de la dynamique de courant durant la phase de limitation dans le disjoncteur. Nous avons cependant mis en évidence un phénomène pertinent : le bains en fusion aux pieds d'arc sont si proéminents qu'ils peuvent réduire l'espace inter-électrodes et en venir à se toucher, ce qui peut conduire à une extinction de l'arc électrique, transitoire ou définitive, ou bien à un réallumage (cf. figure 4.9).

La tension durant cette phase est approximativement constante. Nous la nommons U_3.

La figure 4.11 donne l'aspect général de la caractéristique dynamique $U_{ARC}(I/I_0)$ durant ces trois phases.

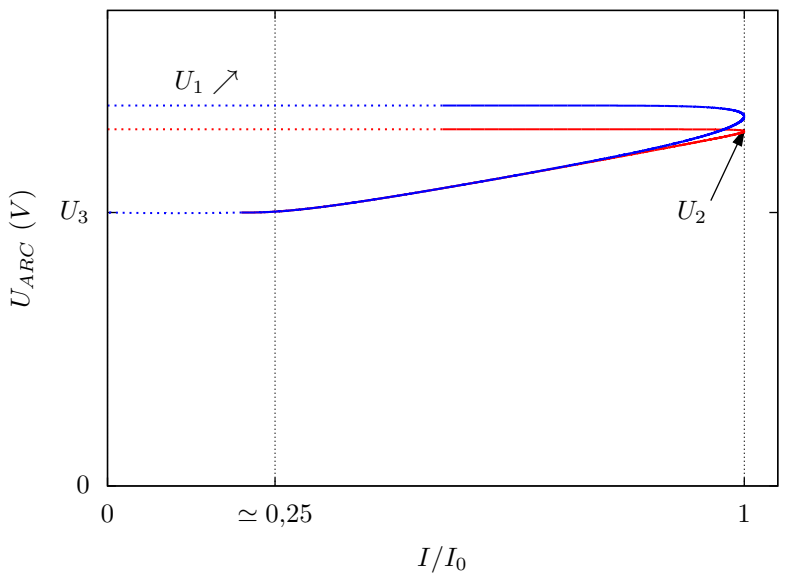


FIG. 4.11 – Aspect général de la caractéristique dynamique de l'arc électrique pour une onde de courant avec un temps de montée $t_0 = 0{,}35\ ms$ et une intensité maximale I_0 comprise en 1 et 3 kA. Les traits discontinus correspondent à un comportement de la tension soit extrapolé, soit instable. Deux courbes sont représentées, elles correspondent à des valeurs de I_0 différentes.

La phase de montée correspond à la phase de fractionnement du disjoncteur, qui voit sa tension augmenter fortement par la multiplication des pieds d'arcs. Il est donc difficile de faire un lien quelconque entre la constance de la tension d'arc observée lors de nos essais avec celle du disjoncteur. En revanche, nous avons montré que la tension maximale atteinte par le disjoncteur, et qui correspond approximativement à la tension atteinte à la fin de la phase de fractionnement, augmente avec l'intensité maximale du courant I_0. En considérant l'ordre de grandeur de la durée de la phase de fractionnement $\delta t_f = 0{,}1ms$, nous constatons un accord relativement correct entre l'augmentation de la tension avec I_0/t_0 entre les données du disjoncteurs et les données d'essai.

Durant la phase de descente, un autre obstacle à la comparaison des données d'essai au disjoncteur apparait : la stabilité de l'arc dans le déion pour les intensités inférieures à 4 kA. L'arc électrique entre plus difficilement dans le déion pour les faibles intensité I_0, le début de la phase de limitation n'est donc pas franc, puis le grand nombre de réallumages à l'entrée du déion rend la comparaison hasardeuse : dans un cas, celui du montage expérimental, l'arc électrique est relativement stable entre les électrodes dans le second cas, celui du disjoncteur, l'arc électrique va et vient à maintes reprises entre l'entrée du déion et les plaquettes de fractionnement. Ce n'est donc que pour une intensité I_0 élevée, lorsque l'arc est bien stable dans le déion, que nous pouvons comparer les courbes. La comparaison est saisissante : la tendance est la même mais avec un décalage de tension (cf. figure 4.8).

Enfin l'étude de la phase d'extinction, bien que correspondant à une forme d'onde de courant très différente de celle du disjoncteur, permet de faire un lien intéressant avec ce dernier. En effet, le déion, lorsque le disjoncteur est soumis à un essai de court-circuit au-delà de ses capacités, peut présenter des ponts fondus solidifiés entre plusieurs plaquettes de fractionnement. Le mécanisme de croissance puis de coalescence mis en évidence sur notre gabarit d'essai peut constituer un scénario tout à fait plausible de la création de tels ponts.

Chapitre 5

Pieds d'arc et dynamique de la colonne

Si la tension de l'arc électrique est la caractéristique qui nous intéresse avant tout pour notre application, il semble évident que nous ne pouvons comprendre ses variations sans tenir compte de l'évolution globale du système générant l'arc électrique. Il est de plus difficile d'ignorer les phénomènes aux électrodes, dont nous avons montré dans la partie précédente une illustration frappante : les bains fondus aux pieds d'arc sont si importants qu'ils peuvent, par les mouvements dont ils sont violemment animés, provoquer l'extinction ou le réamorçage de l'arc électrique.

En effet, dans un souci de réalisme vis-à-vis de notre application, nous nous sommes placés dans des conditions expérimentales particulièrement éprouvantes pour les électrodes : leur épaisseur est faible (1 mm), elles sont isolées thermiquement et elles sont impactées par un arc électrique d'une intensité de plusieurs kiloampères. Les électrodes sont donc certainement proches de la limite de ce qu'elles peuvent endurer, ce qui correspond bien au fait que les industriels ont optimisé les plaquettes de fractionnement au plus près de leurs limites afin de réduire l'encombrement du déion et d'optimiser ses performances. La dimension des traces laissées par l'arc électrique sur les électrodes, les pieds d'arc, est une indication de la puissance surfacique apportée par celui-ci et qui engendre donc cette dégradation des électrodes.

Il semble évident que de même que l'intensité du courant varie fortement et rapidement durant l'essai, les dimensions des pieds d'arcs évoluent. Il est difficile d'observer cette évolution : non seulement la configuration des électrodes rend peu accessible visuellement les pieds d'arcs, mais de surcroît la luminosité de la colonne de l'arc électrique est telle qu'elle nécessite des conditions expérimentales particulières pour visualiser les pieds d'arcs. En revanche il est aisé d'observer

par imagerie rapide la dynamique de la colonne d'arc. Nous utiliserons donc cette méthode pour apporter une dimension temporelle.

Nous présenterons tout d'abord l'évolution du rayon des pieds d'arc cathodique et anodique en fonction de l'intensité maximale du courant I_0 pour un temps de montée $t_0 = 0{,}35\ ms$, puis nous évaluerons l'impact du temps de montée sur ces rayons. Nous comparerons ces résultats à des mesures réalisées sur des plaquettes de fractionnement extraites de disjoncteurs soumis à un essai de court-circuit. Nous estimerons ensuite la profondeur des bains fondus aux pieds d'arc, que nous comparerons de même à l'érosion des plaquettes de fractionnement. Enfin, nous nous appuierons sur le traitement des images des vidéos rapides de la colonne d'arc pour apporter une vision dynamique de l'évolution des rayons des pieds d'arcs.

Nous nous attacherons, au long de ce chapitre, non seulement de mettre en évidence les phénomènes, mais également de valider leur pertinence par rapport à notre application.

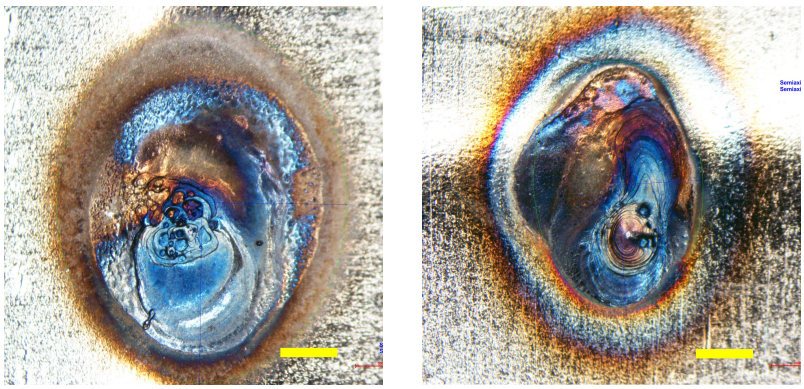
5.1 Impacts aux pieds d'arc

5.1.1 Rayon des impacts

La figure 5.1 montre l'aspect des pieds d'arc après un essai à $I_0 = 1080\ A$ dont les courbes de courant et de tension correspondent aux figures 4.1 et 4.2 respectivement. Les images sont présentées dans l'orientation expérimentale, c'est-à-dire que le pli de l'électrode est vertical pour la cathode (faiblement visible) et horizontal pour l'anode (bien visible).

Comme nous l'avons détaillé dans le chapitre 3, la zone affectée par l'arc à la cathode correspond à la zone avec une coloration d'oxydes à l'anode. La délimitation de cette zone est fiable car l'identification de la modification de la surface par l'arc est aisée et la limite franche. La forme elliptique semble être causée par un mouvement de l'arc. Afin de limiter l'impact du mouvement de l'arc sur l'estimation de la taille de cette zone nous mesurerons son rayon sur un axe horizontal, le mouvement de l'arc étant principalement vertical : c'est ce que nous appellerons le rayon du pied d'arc cathodique R_P. Nous pouvons supposer qu'étant donné la très faible distance inter-électrodes, ce rayon est très proche à la cathode et à l'anode.

Le pied cathodique présente une zone fondue. La détermination de la limite, et donc de la taille, de cette zone est très incertaine. En revanche, à l'anode, la zone fondue est très clairement délimitée et donne des résultats répétables. Nous



(a) Cathode. (b) Anode.

FIG. 5.1 – Aspect des impacts aux pieds d'arc dans la configuration correspondant à la figure 4.1. La barre jaune indique l'échelle 1 mm.

estimerons donc de la même manière la taille de cette zone par la mesure de son rayon horizontal : c'est le rayon du bain fondu à l'anode R_F.

Le rayon du pied d'arc cathodique R_P correspond donc au rayon maximal atteint par le pied d'arc lors de la décharge et l'on peut considérer en première approximation qu'il est égal au rayon maximal de la colonne et du pied d'arc anodique. Le rayon du bain fondu à l'anode R_F donne quant à lui une indication de l'énergie dissipée par l'arc sur les électrodes.

La figure 5.2 montre l'évolution de ces deux rayons en fonction de l'intensité maximale I_0. Ces mesures correspondent aux essais présentés dans la figure 4.7. Les rayons R_P et R_F augmentent avec l'intensité maximale I_0. Les courbes en trait discontinu de la figure 5.2 correspondent aux ajustements linéaires :

$$R_P = 1.40 + 0{,}90.10^{-3} I_0 \tag{5.1}$$

$$R_F = 0.95 + 0{,}55.10^{-3} I_0 \tag{5.2}$$

où les rayons sont exprimés en mm et I_0 en ampères. A noter qu'étant donné la faible étendue des valeurs I_0 explorée, un ajustement linéaire des surfaces correspondant à ces rayons aurait également donné un résultat tout à fait convaincant. Quoi qu'il en soit, le rapport de la surface de la zone fondue sur la surface de la zone affecté par l'arc à la cathode est à peu près constante pour la gamme d'intensité maximale explorée :

$$\left(\frac{R_F}{R_P}\right)^2 \simeq 0{,}42 \tag{5.3}$$

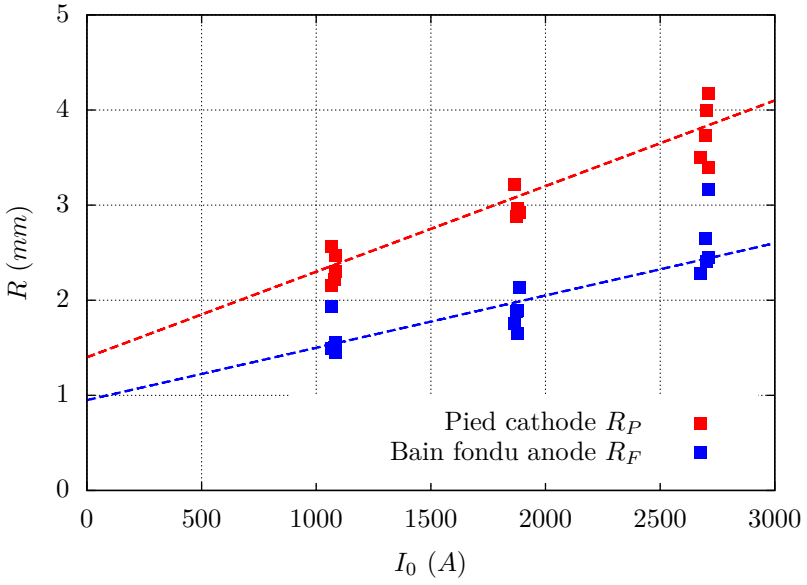


FIG. 5.2 – Evolution des rayons des pieds d'arc en fonction de l'intensité maximale du courant pour un temps de montée $t_0 = 0{,}35\ ms$.

5.1.2 Comparatif avec les plaquettes de fractionnement

La figure 5.3 montre l'aspect des plaquettes de fractionnement après un essai de coupure. Il s'agit des trois plaquettes au centre du déion et chacune est présentée côté cathode et anode. La rangée du haut correspond à une intensité maximale $I_0 \simeq 1{,}5\ kA$, celle du bas $I_0 \simeq 4\ kA$. Leur aspect varie énormément en fonction de I_0. Lorsque I_0 est faible, l'aspect du pied d'arc est très différent à l'anode et à la cathode : on distingue une zone fondue très petite à l'anode alors que quasiment toute la plaquette a été explorée par l'arc à la cathode. Pour un I_0 plus important, l'aspect des plaquettes côté anode et cathode est très similaire : quasiment l'ensemble de la surface est fondue.

Nous avons réalisé sur ces plaquettes une mesure similaire du rayon du pied d'arc à la cathode et du rayon du bain fondu à l'anode tel que réalisé sur les électrodes de notre gabarit. Cette fois-ci nous ne mesurons pas directement un rayon, mais la surface de la zone d'intérêt à partir de laquelle nous calculons un rayon équivalent ($R = \sqrt{S/\pi}$). La figure 5.4 présente ces mesures comparées à celle obtenues précédemment sur notre gabarit :

a) Le rayon équivalent de la zone affectée par l'arc à la cathode R_P est bien supérieur dans le disjoncteur que sur notre gabarit. En effet nous avons vu que d'une part il y a très certainement un mouvement important de l'arc sur les surfaces des plaquettes de fractionnement pour des courants

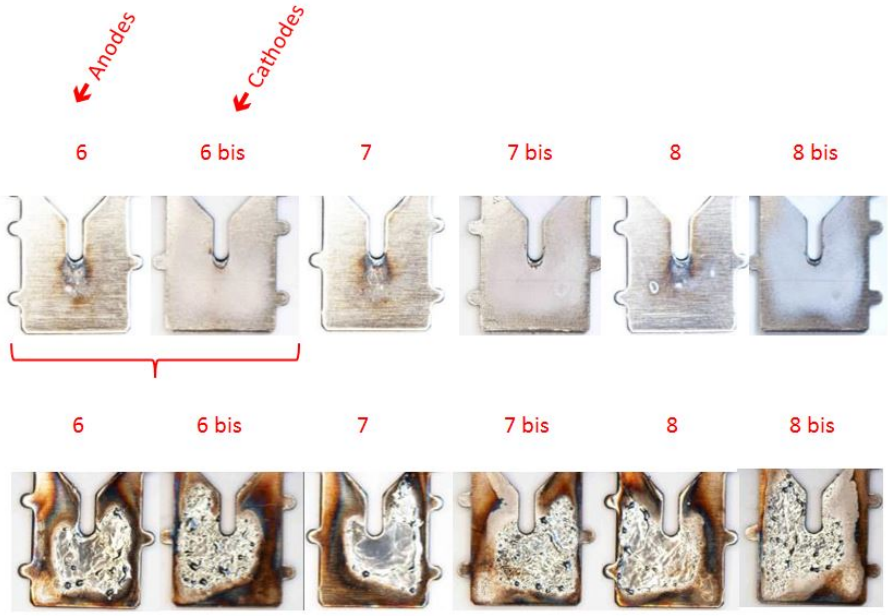


FIG. 5.3 – Aspect des trois plaquettes de fractionnement situées au centre du déion à l'issue d'un essai de court-cricuit correspondant à une intensité maximale I_0 de 1,5 et 4 kA. Chaque plaquette est présentée côté anode et côté cathode.

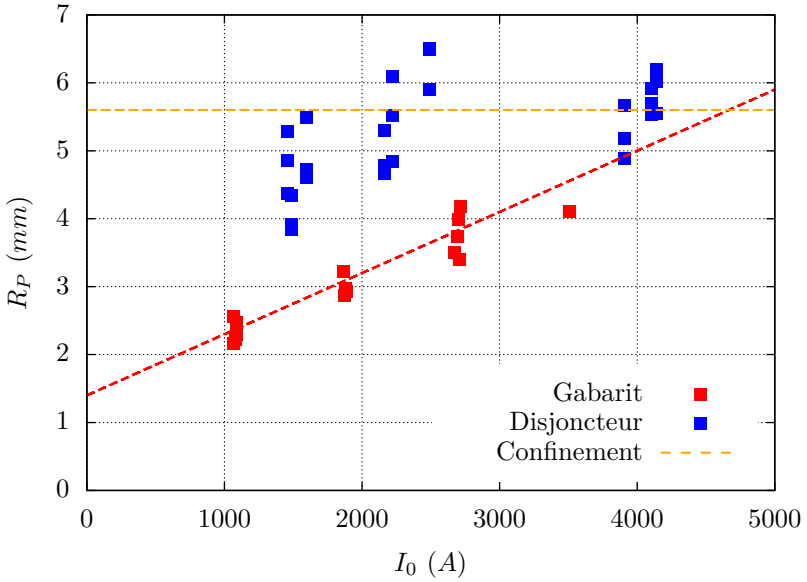
I_0 faibles, c'est-à-dire que nous surestimons de manière importante R_P par notre mesure, et que d'autre part nous avons au contraire cherché à limiter l'impact du déplacement de l'arc sur nos mesures dans le cas des électrodes testées sur notre gabarit. Toutefois, à courant I_0 élevé, les données obtenues pour le disjoncteur sont dans l'extrapolation des données pour notre gabarit, ce qui est cohérent avec un mouvement moindre dans le déion.

b) Le rayon équivalent du bain fondu à l'anode R_F estimé dans le disjoncteur suit une tendance très similaire à celle constatée sur notre gabarit, hormis pour les faibles valeurs de I_0.

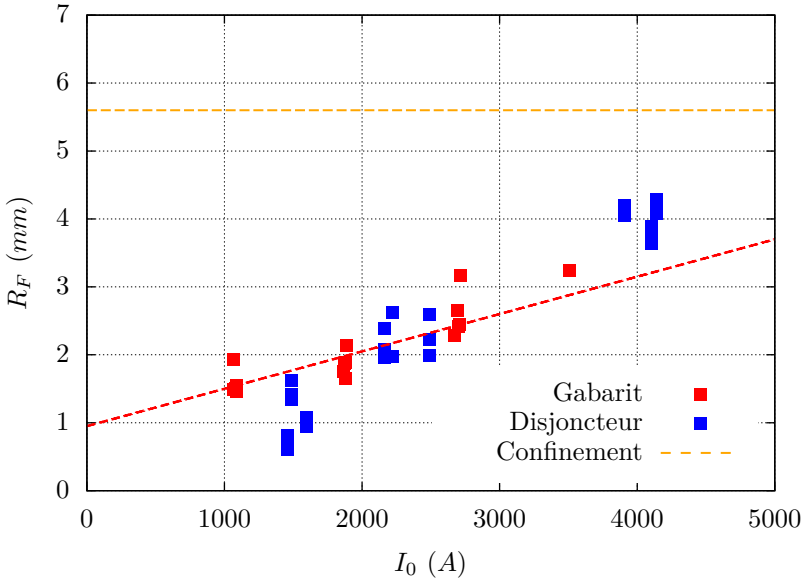
Les ordres de grandeurs ainsi que les tendances sont cohérentes entre les disjoncteurs et les mesures réalisées avec notre gabarit.

5.1.3 Influence du temps de montée

Les rayons mesurés pour caractériser les pieds d'arc sont donc à l'évidence liés à l'intensité maximale du courant I_0. L'aspect fondu des surfaces sous-entend néanmoins qu'un aspect temporel est présent. La figure 5.5 compare les rayons relevés pour une même intensité maximale I_0 mais deux temps de montée t_0 dif-



(a) Rayon du pied d'arc à la cathode R_P.



(b) Rayon du bain fondu à l'anode R_F.

FIG. 5.4 – Rayons R_P et R_F estimés sur les trois plaquettes centrales du disjoncteur et comparés aux rayons mesurés sur les électrodes dans notre gabarit.

férents : les rayons R_P et R_F augmentent lorsque le temps de montée augmente, c'est-à-dire lorsque l'énergie injectée dans le système, grossièrement proportion-

nelle à $U_{ARC}.I_0.t_0$, augmente. Cela indique également que le rayon atteint pour $t_0 = 0{,}35\ ms$ n'est pas un rayon d'équilibre correspondant à une valeur de courant donnée, mais une valeur dynamique dépendant du temps.

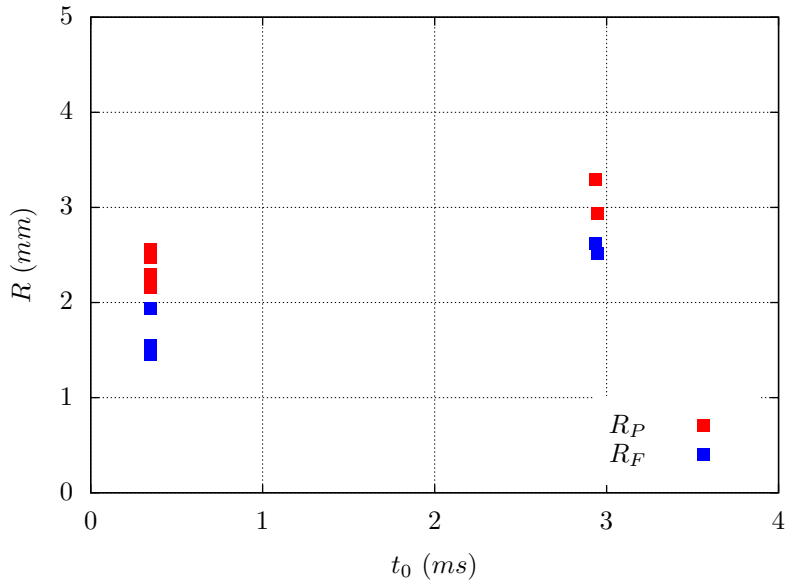


FIG. 5.5 – Evolution des rayons R_P et R_F avec le temps de montée t_0 pour une intensité du courant maximale $I_0 = 1080\ A$.

5.1.4 Vitesse d'expansion

Les traces laissées par l'arc sur les électrodes sont le reflet de son expansion : lors de l'amorçage de l'arc son rayon est très faible (sans doute inférieur au dixième de millimètre) et il atteint une valeur de plusieurs millimètres à son maximum. Nous pouvons alors caractériser cette expansion par une vitesse moyenne S_P/t_0 où $S_P = \pi R_P^2$. Cette formulation sous-entend que le maximum du rayon du pied d'arc est atteint au maximum de l'intensité du courant. Nous verrons dans la partie suivante que cette hypothèse est correcte en première approximation.

De la même façon que nous avons représenté la valeur de tension d'arc durant la phase de montée en fonction de la dynamique de montée du courant I_0/t_0, nous présentons dans la figure 5.6 la vitesse d'expansion en fonction de I_0/t_0.

La grandeur S_P/t_0 semble se comporter de façon linéaire avec le paramètre I_0/t_0, c'est-à-dire qu'en valeur moyenne, la dynamique d'expansion de l'arc est proportionnelle à la dynamique de montée du courant.

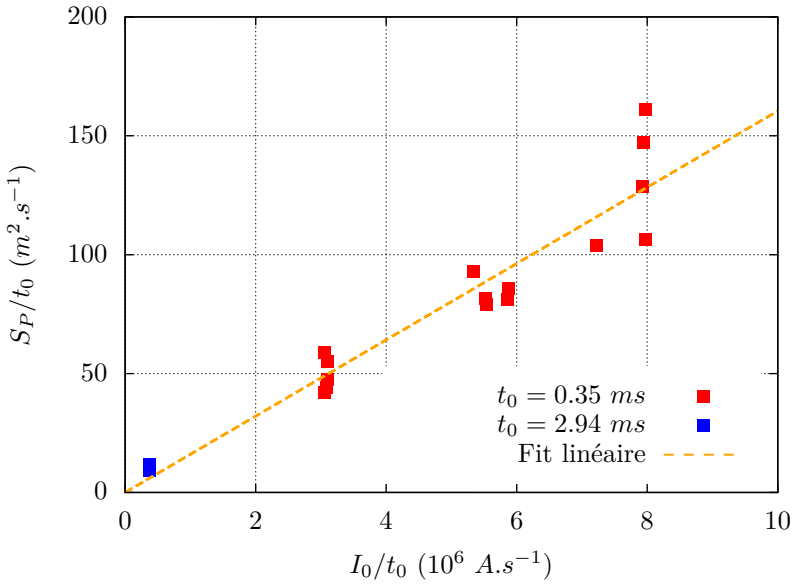


FIG. 5.6 – Vitesse moyenne d'expansion de l'arc électrique en fonction de la dynamique de montée du courant.

5.2 Profondeur des impacts

L'estimation de l'érosion des électrodes causée par l'arc électrique est généralement délicate. Plusieurs méthodes se rencontrent dans la littérature :

— Pesée des échantillons avant et après essai : méthode très simple et pertinente lorsque que la masse érodée est importante par rapport à la masse de l'échantillon et lorsqu'il est évident que la matière érodée ne s'est pas redéposée sur l'échantillon. Dans notre cas, étant donné la faible distance inter-électrodes, cette méthode n'apporte pas de données concluantes.

— Mesures des cratères aux pieds d'arc par profilométrie : plus complexe à mettre en œuvre mais apporte néanmoins des données tridimensionnelles intéressantes. En revanche, cette méthode ne permet pas de distinguer dans le cratère les états métallurgiques de la matière.

— Coupes métallographiques : relativement laborieuse à mettre en œuvre pour ne donner des informations que sur un plan de coupe, mais donne en contrepartie des informations précises sur l'état métallurgique des électrodes, qui est un reflet de leur histoire thermique.

Nous adopterons cette dernière méthode, que nous avons détaillée dans le chapitre 3. En effet, celle-ci nous a paru la plus pertinente pour comparer qualitativement l'érosion entre les électrodes sur notre gabarit et les plaquettes de fractionnement du déion.

5.2.1 Érosion des électrodes

La figure 5.7 montre une coupe métallographique de deux électrodes ayant subi un arc correspondant à l'onde de courant 1 d'après le tableau 4.1. Les deux électrodes sont coupées perpendiculairement au pli et approximativement au centre des pieds d'arc. Les plans de coupes, présentés ici sur un même plan sont, sur le gabarit, perpendiculaires l'un à l'autre. Les deux électrodes sont positionnées sur la figure 5.7 à la distance inter-électrodes $d = 1\ mm$, la cathode est à gauche.

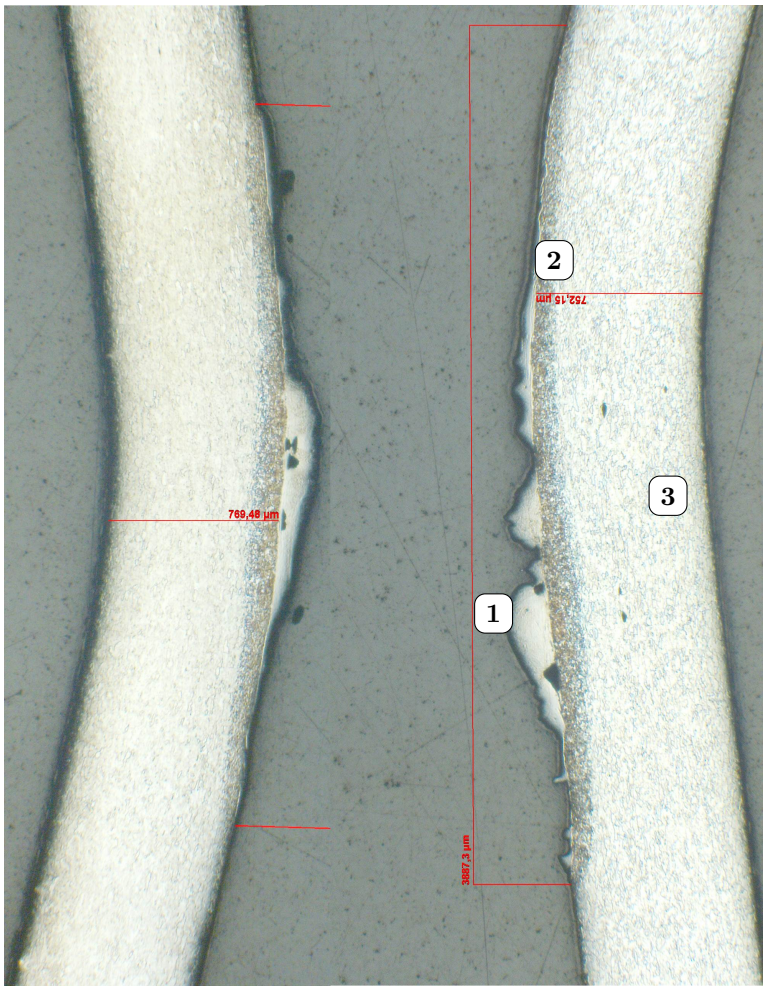


FIG. 5.7 – Erosion des plaquettes pour un arc correspondant à l'onde de courant 1 d'après le tableau 4.1. La cathode est à gauche. Les deux plaquettes sont présentées à une distance de 1 mm qui est celle de l'essai, cela nous donne un ordre de grandeur. Les deux plans de coupes présentés ici dans un même plan sont en réalité à 90 degrés l'un de l'autre.

La révélation au nital de la microstructure de l'acier met en évidence trois zones :

1) Zones fondues : le métal a fondu puis s'est solidifié lors de l'extinction de l'arc. Sa couleur blanche indique l'absence de carbone, ce qui signifie que celui-ci s'est évaporé durant la décharge.
2) Zones affectées thermiquement (ZAT) : le cycle thermique a conduit à une modification de la taille des grains du métal à proximité des zones fondues. Cette zone est assez peu profonde.
3) Zone non affectée : aucune modification de la microstructure n'est visible

L'identification de ces trois zones est aisée et leur délimitation claire.

Nous avons réalisé des coupes métallographiques sur au moins deux paires d'électrodes par configuration présentée dans ce chapitre. La profondeur érodée est estimée à l'endroit où l'épaisseur de l'électrode non fondue est la plus faible. Il est malheureusement difficile de dégager une tendance claire hormis le fait que la profondeur érodée est dans tous les cas limitée à environ 0,1 mm. Cela est relativement superficiel par rapport à l'épaisseur de notre électrode de 0,8 mm.

5.2.2 Comparatif avec les plaquettes de fractionnement

Nous avons choisi d'évaluer l'érosion des électrodes en nous limitant aux trois plaquettes de fractionnement centrales du déion, qui sont généralement parmi les plus impactées par l'arc. Nous travaillons alors sur un plan de coupe situé au milieu de cette plaquette comme le montre la figure 5.8.

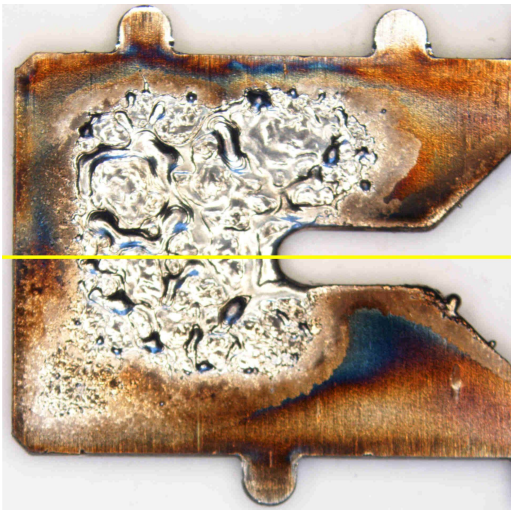


FIG. 5.8 – Position du plan de coupe (trait jaune) sur une plaquette de fractionnement.

La figure 5.9 donne l'exemple d'une telle coupe métallographie pour un dis-

joncteur ayant réalisé un essai de court-circuit pour une intensité maximale d'environ 3 kA. L'entrée du déion est à droite et la cathode est en haut. Le cadre rouge correspond à la section nominale de la plaquette avant essai de coupure.

Tout d'abord, nous constatons que l'érosion des plaquettes est très importante à l'entrée du déion et bien plus réduite ensuite. Les zones identifiées sur les électrodes sont également présentes ici à la différence que la matière fondue semble avoir été chassée vers le fond du déion, sans doute sous l'effet de la pression de l'arc électrique.

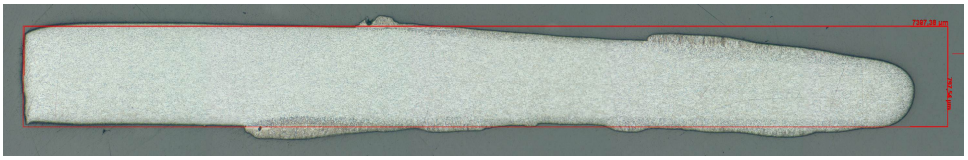


FIG. 5.9 – Aspect d'une plaquette de fractionnement après un essai de coupure. L'entrée du déion est à droite et la cathode en haut. Le cadre rouge correspond à la section nominale de la plaquette avant essai de coupure.

Nous évaluons alors l'épaisseur de la plaquette pour différentes distances par rapport au fond du déion. La figure 5.10 représente graphiquement ces mesures, réalisées sur les trois plaquettes au centre du déion pour deux valeurs d'intensité maximale I_0, environ 2,5 et 4 kA.

Ces mesures indiquent une profondeur d'érosion allant jusqu'à environ 0,2 mm. Etant donné que dans le disjoncteur les plaquettes de fractionnement sont à la fois cathode et anode et qu'elles subissent donc une érosion sur chaque face, cet ordre de grandeur est comparable à celui constaté sur notre gabarit où les électrodes ne subissent une érosion que sur une seule face.

5.3 Dynamique de la colonne

L'évaluation de la taille des pieds d'arc et de l'érosion apporte des informations très intéressantes sur le comportement de l'arc. Cependant, dans une configuration où la dynamique de courant est importante, nous souhaiterions également pouvoir avoir accès à la dynamique d'évolution de la taille de ces pieds d'arcs.

L'imagerie rapide de l'arc permet justement d'apprécier cette dynamique. Nous avons présenté dans le chapitre 3 le traitement des images nous permettant d'estimer le rayon lumineux R_L de l'arc en fonction du temps. Rappelons simplement ici que ces courbes sont normalisées de façon à faire coïncider le maximum du rayon lumineux avec le rayon du pied d'arc mesuré sur la cathode

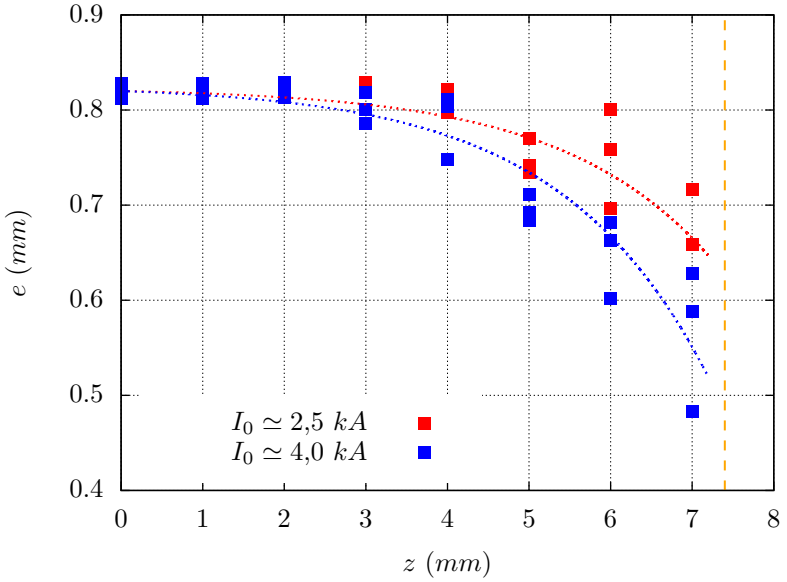


FIG. 5.10 – Epaisseur des trois plaquettes de fractionnement au centre du déion en fonction de la distance par rapport au fond du déion. La ligne pointillée orange indique la longueur nominale de la plaquette sur le plan de coupe. Les lignes pointillées rouge et bleue sont des simples guides pour l'œil.

après essai, c'est-à-dire :

$$\max(R_L) \simeq R_P \tag{5.4}$$

ce qui sous-entend qu'en première approximation nous considérons que l'arc est cylindrique et que le rayon de la colonne et de ses deux pieds d'arc sont égaux.

La figure 5.11 présente l'évolution du rayon lumineux de l'arc pour une intensité maximale du courant $I_0 = 1080\ A$ et un temps de montée $t_0 = 0{,}35\ ms$. Il s'agit des mêmes essais que les figures 4.1 et 4.2. Lorsque le mouvement de l'arc est important, nous représentons les courbes en pointillés. Lorsque le calcul du rayon n'est pas possible car l'arc est partiellement hors champ, les données sont simplement tronquées. Les données sont également tronquées en temps à partir d'environ 6 ms, lorsque les ponts fondus apparaissent, pour des raisons de lisibilité des courbes. Nous indiquons sur cette courbe les valeurs de t_0 (maximum d'intensité) et t_1 (fin de la phase de descente et début de la phase d'extinction) mais aussi la position approximative du maximum atteint par le rayon lumineux de l'arc t_L.

Nous constatons sur cette figure :

— la répétabilité du rayon R_L en fonction du temps est excellente, ce qui est conforme à la répétabilité constatée pour le courant et la tension d'arc,

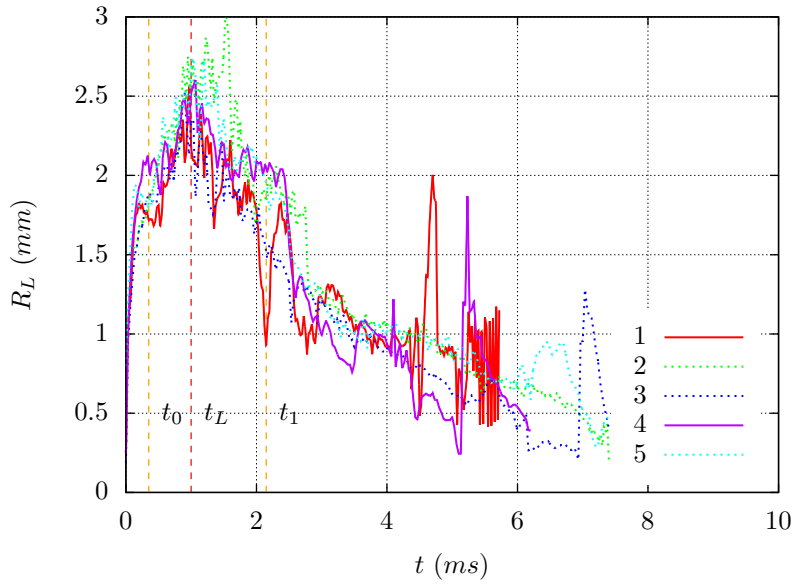


FIG. 5.11 – Evolution du rayon lumineux de l'arc lors d'un essai à $I_0 = 1080$ A et $t_0 = 0{,}35$ ms.

— le rayon augmente très rapidement lors de la phase de montée ($t < t_0$),
— le rayon augmente encore légèrement durant la phase de descente jusqu'au temps caractéristique t_L. En première approximation, on peut quasiment considérer que le rayon est constant durant la phase de descente.
— Durant la phase d'extinction (c'est-à-dire après t_1), le rayon diminue très rapidement.

Il apparaît clairement sur cette courbe que le rayon de l'arc n'est pas proportionnel à l'intensité du courant : les variations de R_L semblent décalées dans le temps, typiquement d'environ $t_L - t_0 = 0{,}65$ ms. Cela signifie que l'arc ne peut adapter instantanément son rayon à l'intensité qu'il transporte mais qu'une inertie est bien présente.

Afin d'estimer la façon dont la colonne adapte sa section avec l'intensité du courant, nous représentons la section lumineuse de l'arc $S_L = \pi R_L^2$ en fonction de l'intensité du courant, ainsi que le montre la figure 5.12. Sa forme est relativement remarquable :

— la section de l'arc est proportionnelle à l'intensité du courant durant la phase de montée,
— elle continue d'augmenter au début de la phase de descente jusqu'au temps t_L,
— elle diminue ensuite proportionnellement à l'intensité du courant jusqu'à l'extinction de l'arc.

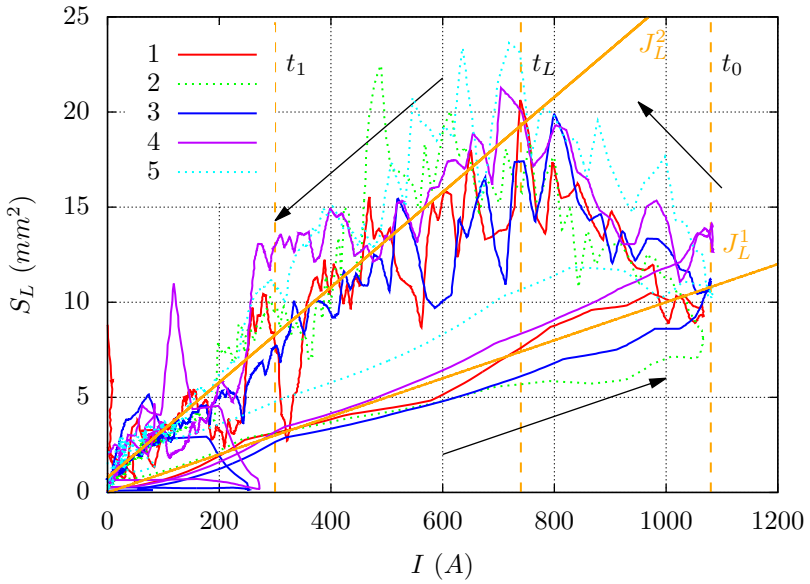


FIG. 5.12 – Evolution de la section lumineuse de l'arc en fonction de l'intensité du courant $S_L(I)$ lors d'un essai à $I_0 = 1080$ A et $t_0 = 0{,}35$ ms. Les flèches noires indiquent le sens de parcours de la courbe avec le temps.

La densité de courant moyenne dans la colonne d'arc, que l'on peut définir comme :

$$J_L = \frac{I}{S_L} \tag{5.5}$$

est donc approximativement constante durant la phase de montée :

$$J_L^1 \simeq 1.10^8 \ A.m^{-2},$$

puis durant la phase de contraction de l'arc :

$$J_L^2 \simeq 0{,}4.10^8 \ A.m^{-2},$$

lors de la décroissance de l'intensité du courant. Ces deux valeurs sont représentées par des droites de couleur orange sur la figure 5.12. Elles sont du même ordre de grandeur que les valeurs de densité de courant proposées dans la littérature [48].

Nous utiliserons donc par la suite une représentation en densité de courant moyenne $J_L(I)$ qui nous semble plus pertinente. Cette grandeur peut être liée aisément à la tension d'arc dans le cadre d'un modèle simpliste de l'arc. Si nous considérons 1) la colonne d'arc comme un conducteur caractérisé par une conductivité électrique σ homogène, une longueur L et une section constante S_L,

et 2) les zones cathodique et anodique caractérisées par une tension constante U_E, alors la tension d'arc peut s'exprimer de la façon suivante :

$$U_{ARC} = U_E + \frac{L}{\sigma} J_L \tag{5.6}$$

5.3.1 Influence de l'intensité maximale

Nous avons vu précédemment que le paramètre I/I_0 semblait une grandeur pertinente pour comparer le comportement en tension de l'arc pour différentes valeurs de I_0. Nous présentons donc dans la figure 5.13 l'impact de l'intensité maximale I_0 sur la densité moyenne J_L de la même façon. Cependant, afin de préserver la lisibilité des données expérimentales, nous présentons dans deux graphiques distincts la phase de montée (a) et la phase de descente et d'extinction (b).

L'échantillonage durant la phase de montée est relativement médiocre, mais il semble néanmoins qu'à partir d'une valeur de $I/I_0 \simeq 0{,}3$ la densité de courant est constante et ne dépend pas de la valeur de I_0 :

$$J_L^1 \simeq 1.10^8 \ A.m^{-2}$$

Les courbes correspondant aux trois valeurs de I_0 se superposent ensuite de façon satisfaisante lors de la phase de descente (cf. figure 5.13b). Nous proposons un ajustement de type exponentiel représenté par la courbe couleur verte sur la même figure. Son équation est :

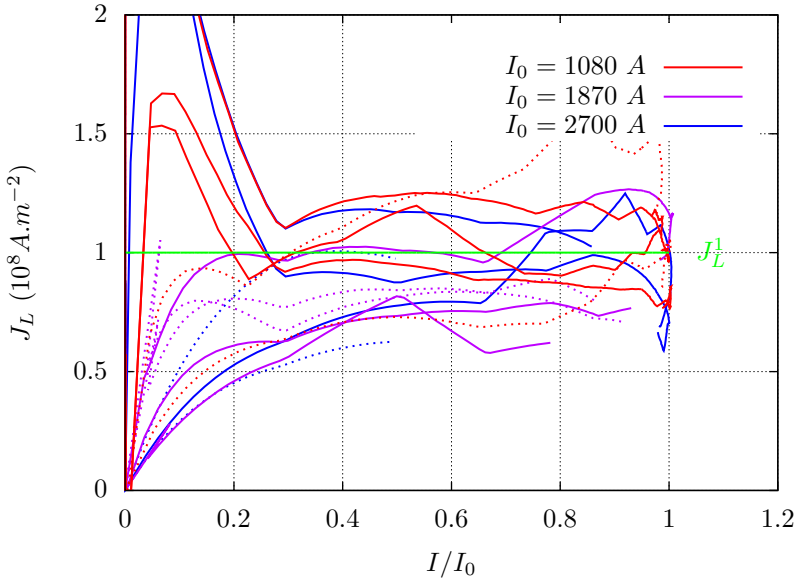
$$J_L = J_L^2 + (J_L^1 - J_L^2) \ \frac{e^{x/\theta} - 1}{e^{1/\theta} - 1} \tag{5.7}$$

où $x = I/I_0$. Les paramètres sont les conditions aux limites de densité de courant lors de la phase de montée, $J_L^1 = 1.10^8 \ A.m^{-2}$, et durant la contraction de l'arc, $J_L^2 = 0{,}3.10^8 \ A.m^{-2}$, ainsi qu'un paramètre sans dimension $\theta = 0{,}17$ qui permet d'ajuster la courbure de l'exponentielle.

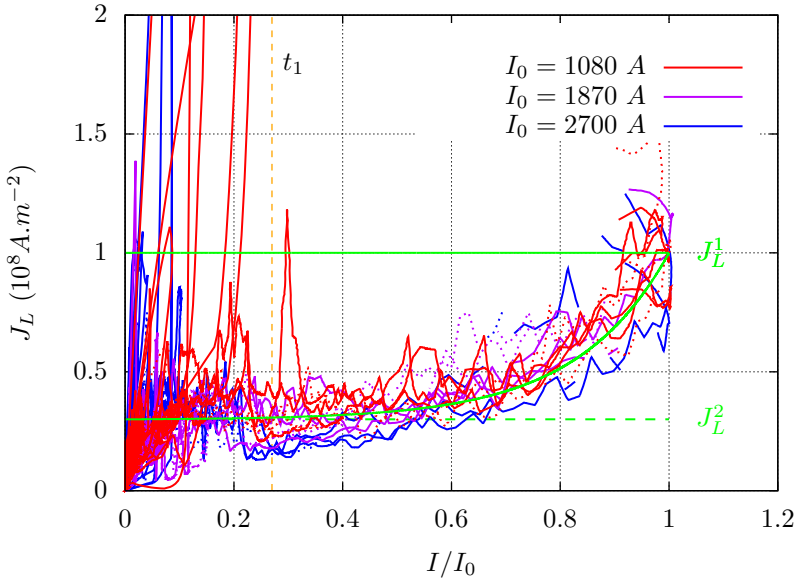
Le choix d'une telle fonction exponentielle et la signification physique de cet ajustement est relativement discutable. Nous pouvons cependant le défendre en adoptant un point de vue temporel. Nous avons vu que la décroissance de l'intensité du courant est relativement linéaire durant la phase de descente (cf. équation 4.1) et est caractérisée par un temps $\tau \simeq 2{,}5 \ ms$. Nous pouvons alors exprimer le paramètre θ de façon temporelle :

$$\theta\tau = 0{,}43 \ ms \tag{5.8}$$

Le paramètres $\theta\tau$ correspond donc à la constante de relaxation de l'arc d'une densité élevée vers une densité plus faible lors de la phase de descente. Du point



(a) Phase de montée.



(b) Phase de descente.

FIG. 5.13 – Densité de courant moyenne apparente J_L en fonction du courant réduit I/I_0. Afin d'améliorer la lisibilité des données, la phase de montée est représentées séparément de la phase de descente, respectivement (a) et (b). La courbe verte montre l'ajustement proposé dans l'équation x.

de vue du rayon de l'arc, ce paramètre correspond au fait que le rayon augmente quand bien même le courant commence à redescendre. En cela il est lié au temps caractéristique $t_L - t_0 \simeq 0{,}65\ ms$.

5.3.2 Influence du temps de montée

Afin d'aller plus avant dans la compréhension de cette courbe et de la dynamique qu'elle représente, nous comparons les données de la figure 5.13 pour un temps de montée $t_0 = 0{,}35\ ms$ aux données extraites de l'essai correspondant à l'onde de courant présentée dans la figure 4.4a, c'est-à-dire pour un temps de montée $t_0 = 2{,}94\ ms$ plus long et une intensité maximale $I_0 = 1080\ A$. C'est la figure 5.14. Afin d'alléger la figure, nous avons représenté la courbe correspondant à $t_0 = 0{,}35\ ms$ par son ajustement présenté précédemment.

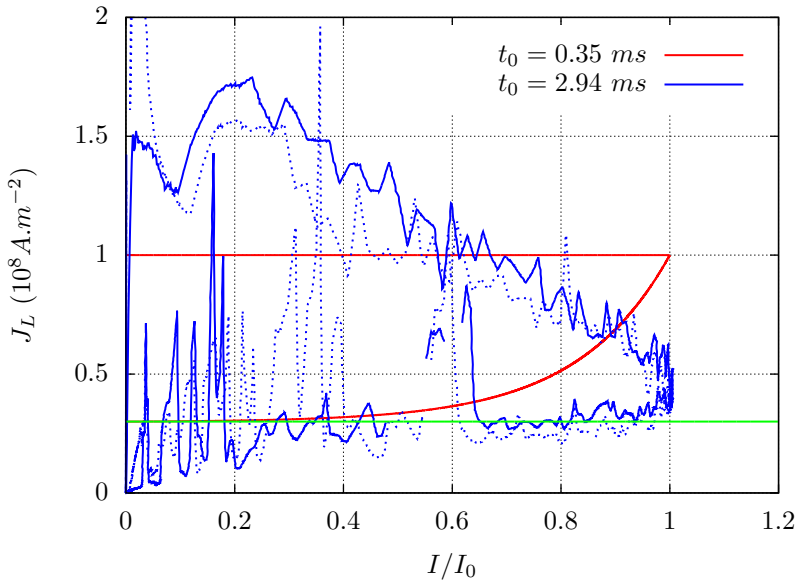


FIG. 5.14 – Densité de courant moyenne apparente J_L en fonction du courant réduit I/I_0 pour deux valeurs du temps de montée t_0.

La différence entre les deux courbes est frappante. Lorsque le temps de montée est plus long, la densité de courant a le temps de descendre jusqu'à atteindre la valeur J_L^2 définie précédemment. La phase de descente et d'extinction se déroule alors à densité quasiment constante.

5.4 Conclusion

Nous présentons ci-dessous une vision synthétique des enseignements de ce chapitre, en distinguant l'étude des pieds d'arc, qui correspond à un point de vue statique mais qui permet une comparaison avec les plaquettes de fractionnement du disjoncteur, de l'étude de la colonne, qui apporte un éclairage dynamique indéniablement enrichissant. Nous tenterons également de lier ces résultats au comportement dynamique de la tension d'arc pour le même matériau, présenté dans le chapitre précédent.

Analyses des impacts

Nous avons tout d'abord rappelé le modèle d'interprétation des impacts aux pieds d'arc à la cathode et à l'anode présenté dans le chapitre 3 (cf. figure 5.1).

Nous constatons que le rayon de l'impact à la cathode, qui correspond au rayon maximal du pied d'arc atteint lors de la décharge R_P, augmente linéairement avec l'intensité maximale du courant I_0. Le rapport entre le rayon de l'impact à la cathode et à l'anode, qui est une indication de la puissance surfacique apportée par l'arc sur les électrodes rapportée à la puissance dissipée par l'arc électrique, est approximativement indépendant de cette intensité maximale (cf. figure 5.2). Lorsque le temps de montée est plus important, le rayon du pied d'arc R_P augmente (cf. figure 5.5).

Nous proposons alors une loi d'évolution de la vitesse d'expansion moyenne S_P/t_0 (S_P étant la section du pied d'arc correspondant à R_P) en fonction de la dynamique de montée de l'intensité I_0/t_0. La tendance est linéaire et assez convaincante, même si des données supplémentaires seraient tout de même nécessaires pour la confirmer (cf. figure 5.6).

L'observation des impacts en profondeur est relativement laborieuse et nous n'apportons donc que des conclusions qualitatives : la profondeur des bains fondus semble augmenter avec l'intensité maximale du courant, est parfois légèrement plus importante à l'anode qu'à la cathode et est, dans tous les cas présentés ici, inférieure à 0,1 mm.

Lors de la phase de limitation de l'essai de court-circuit, l'arc électrique est plus ou moins mobile entre les plaquettes de fractionnement du disjoncteur en fonction de l'intensité maximale de l'onde de courant. Malgré cela, les observations des impacts laissés par l'arc sur ces plaquettes sont cohérents avec les résultats obtenus sur le gabarit, aussi bien concernant le rayon des impacts (cf. figure 5.4) que leur profondeur (cf. figures 5.7 et 5.9).

Dynamique de la colonne

La section des pieds d'arc est nulle à l'amorçage de l'arc électrique. Il est donc évident que, de même que l'intensité électrique est transitoire, la section des pieds d'arc va fortement évoluer durant la décharge. Étant donné la très faible distance inter-électrodes, nous avons émis l'hypothèse que le rayon des pieds d'arc et celui de la colonne évoluent de façon proportionnelle, ce que confirme le visionnage des vidéos d'imagerie rapide. Nous renormalisons alors les mesures dynamiques de la section moyenne de la colonne d'arc S_L par le rayon de l'impact laissé sur la cathode par l'arc électrique, ainsi que nous l'avons détaillé dans le chapitre 3.

Il apparait alors immédiatement que les variations du rayon de l'arc électrique ne suivent pas celles de l'intensité du courant, mais qu'un décalage existe, particulièrement visible à la valeur maximale atteinte à l'instant t_L (cf. figure 5.11). Ce décalage est de l'ordre de 0,65 ms lorsque $t_0 = 0{,}35$ ms. Il existe donc une certaine inertie : la colonne ne s'adapte pas immédiatement à la valeur de l'intensité de façon à conserver une densité de courant constante. Cette dernière varie au cours de la décharge. Afin de mettre ce point en évidence nous proposons une représentation de la section de l'arc électrique S_L en fonction de l'intensité du courant I (cf. figure 5.12). La dérivée de cette courbe est alors liée à la densité de courant moyenne $J_L = I/S_L$. Il apparait alors que la densité de courant varie effectivement durant la décharge tout en adoptant une valeur constante durant la phase de montée, puis une valeur constante plus faible durant la phase de contraction de l'arc. Le décalage entre l'instant de l'intensité maximale du courant t_0 et l'instant où la section de l'arc est maximale t_L correspond à la transition entre ces deux valeurs.

La densité de courant se comporte de façon semblable lorsque I_0 varie, pour un même t_0, lorsqu'elle est exprimée en fonction de I/I_0 (cf. figure 5.13). Nous proposons un ajustement de cette courbe durant la phase de descente qui nécessite, hormis les deux valeurs de densité de courant en début et fin de décharge, l'introduction d'une constante de temps que l'on peut estimer à 0,43 ms(cf. figure 5.13b). Cette constante de temps est de l'ordre de grandeur de la différence en t_0 et t_L, évaluée à 0,65 ms.

Enfin nous comparons l'évolution de la densité de courant pour un temps de montée plus important $t_0 = 2{,}94$ ms au lieu de 0,35 ms. Dans ce cas, la densité de courant décroît durant la phase de montée et reste ensuite constante durant toute la phase de descente (cf. figure 5.14). Autrement dit, la phase de montée est suffisamment longue pour que la densité de courant atteigne une valeur faible à la fin de la phase de montée, alors que lorsque t_0 est plus court la densité de courant ne diminue que durant la phase de descente.

Le chapitre précédent nous a montré que la tension d'arc non seulement évolue avec l'intensité du courant, mais qu'elle présente un comportement hystérétique : elle est approximativement constante durant la phase de montée, puis décroit linéairement avec l'intensité du courant durant la phase de descente. Il semble difficile d'envisager une quelconque explication à ce comportement sans tenir compte de l'évolution des électrodes avec le temps. En effet, leur aspect fondu est si prononcé qu'il nous faut envisager certainement que la fusion puis l'évaporation des électrodes aux pieds d'arc interviennent de la façon suivante :

— L'apport de vapeurs métalliques modifie la composition chimique du plasma de la colonne d'arc et partant ses propriétés, comme nous l'avons détaillé dans le chapitre 2. L'impact sur la tension d'arc est en revanche difficile à prédire car il résulte de deux phénomènes antagonistes : l'apport de vapeur métallique améliore la conductivité électrique du plasma, mais augmente également le rayonnement, ce qui a pour effet de diminuer la température du plasma et donc sa conductivité électrique,

— La tension cathodique dépend de la composition chimique au pied d'arc cathodique. Or celle-ci évolue, en particulier dans le cas du matériau de référence, qui est un acier doux revêtu d'une couche de nickel d'épaisseur 1 μm : il semble bien évident que cette couche va s'évaporer au cours de la décharge, laissant apparaitre l'acier sous-jacent.

La tension cathodique sera donc une valeur hybride entre la tension cathodique du substrat et celle du revêtement : elle devra correspondre à une tension cathodique « moyenne » de la chimie de l'électrode au pied cathodique de l'arc. Durant la phase de montée, le revêtement est d'abord intact, puis commence à fondre et à s'évaporer au centre du pied d'arc cathodique, alors que dans le même temps, le pied d'arc s'étend vers des zones périphériques où le revêtement est encore intact. Durant la phase de contraction, le pied d'arc revient vers le centre de l'impact, là où le revêtement a très certainement disparu.

Ajoutons pour terminer qu'il est difficile, au vu de la figure 5.14 en particulier, de faire un quelconque lien entre les variations de la tension d'arc et celle de la densité de courant au cours de la décharge.

Chapitre 6

Influence du matériau des électrodes

Nous avons mis en évidence dans le chapitre précédent quelques caractéristiques du comportement de l'arc électrique dans une configuration proche de celle de l'arc de court-circuit dans le disjoncteur. Afin de valider la pertinence de nos observations avec l'application, nous nous sommes restreint à l'utilisation d'un seul matériau, identique à celui des disjoncteurs utilisés pour comparaison. Or l'optimisation du matériau est une piste relativement simple à mettre en oeuvre lors du développement d'un disjoncteur car elle n'implique aucune modification du processus de fabrication. Il convient donc de pousser plus avant notre étude en identifiant autant que possible quelles sont les propriétés du matériau qui permettront d'optimiser ses performances pour la limitation du courant de court-circuit. Ce faisant, nous tâcherons de distinguer l'influence du substrat de celle du revêtement de surface.

Nous présenterons dans un premier temps le comportement d'un acier proche du matériau de référence, sans revêtement, en le comparant aux résultats obtenus précédemment pour cet acier de référence. Nous mettrons en évidence les différences de comportement et nous validerons ainsi l'intérêt d'étudier l'influence du matériau sur les propriétés de l'arc. Dans un second temps, nous évaluerons l'influence d'un traitement de surface, le nickelage électrolytique, sur le comportement de l'arc, en différenciant cathode et anode. Puis nous évaluerons l'influence de l'intensité maximale du courant I_0. Nous verrons ensuite l'influence de la distance inter-électrodes d dans le cas d'un acier sans revêtement. Nous pourrons alors estimer plus précisément le champ électrique dans la colonne. Enfin nous chercherons à évaluer l'influence du substrat dans le cas d'un revêtement de nickel à la cathode. Nous choisirons le cuivre comme substrat de comparaison, ainsi que des électrodes en nickel massif. Pour finir, nous présen-

terons brièvement des premiers résultats concernant l'influence de la répétition de l'arc sur une même paire d'électrodes.

Le nombre de configurations étant plus grand que dans le chapitre précédent, nous proposons ci-dessous un tableau de synthèse indiquant le substrat, le revêtement, les paramètres d'essai et indiquant les figures concernées. Le lecteur pourra s'y reporter en cas de doute.

Substrat	**Revêtement**	**Paramètres**	**Figures**
Acier DC04	∅	Standards	6.1, 6.2
Acier DC04	Ni : anode ou cathode	Standards	6.3, 6.4, 6.5, 6.9
Acier DC04	Ni : cathode	$I_0 \simeq 1$ à 3,5 kA	6.11, 6.12
Acier DC04	∅	$d = 0{,}5$ à 1,5 mm	6.13
Acier DC04	Ni : cathode	Standards	6.14, 6.15
Cuivre Cu-OF	Ni : cathode	Standards	6.14, 6.15
Nickel	∅	Standards	6.14, 6.15
Acier DC04	Ni : cathode	4 arcs successifs	6.16

TAB. 6.1 – Synthèse des configurations utilisées pour les figures présentées dans ce chapitre. Les paramètres standards correspondent à ceux définis dans le tableau 4.3, hormis bien entendu le matériau des électrodes.

6.1 Acier non revêtu

Le substrat choisi est un acier DC04. Il s'agit d'un acier doux, courant dans l'industrie et similaire à ceux utilisés dans le disjoncteur. La norme NF EN 10139 [49] le décrit en détail, en particulier sa composition chimique que nous rappelons dans le tableau 6.2. Nous comparerons dans un premier temps cet acier

	C	**P**	**S**	**Mn**
Fraction massique max sur coulée (%)	0,08	0,030	0,030	0,40

TAB. 6.2 – Composition chimique de l'acier DC04 d'après la norme NF EN 10139[49].

au matériau de référence étudié en détail dans le chapitre précédent. Rappelons

simplement que ce dernier est également un acier doux, mais revêtu d'un dépôt électrolytique de nickel d'épaisseur 1 μm.

6.1.1 Caractéristique dynamique

La figure 6.1 présente la caractéristique dynamique $U_{ARC}(I/I_0)$ de l'acier DC04, pour une forme d'onde 1, tel que définie dans le tableau 4.1. Cinq essais ont été réalisés et sont représentés avec une seule et même couleur car très répétables. Nous avons choisi de représenter cette caractéristique en fonction de I/I_0 en cohérence avec les tendances présentées dans le chapitre précédent. Nous rediscuterons plus loin de la pertinence de ce choix.

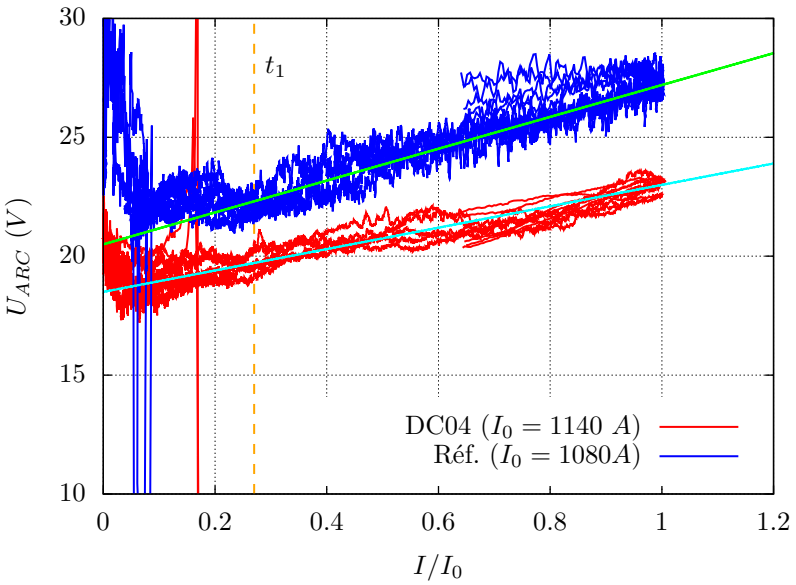


FIG. 6.1 – Caractéristique dynamique $U_{ARC}(I/I_0)$ de l'acier DC04 comparée à la caractéristique du matériau de référence.

Il apparait au premier coup d'œil que la tension d'arc de l'acier DC04 est globalement plus faible mais varie de façon similaire avec l'intensité du courant. La décroissance de la tension d'arc constatée lors de la décroissance de l'intensité du courant n'est pas conditionnée par la présence d'un revêtement de surface. En revanche l'aspect hystérétique de la caractéristique semble être absent, ou du moins n'est pas visible entre $\simeq 700$ A et I_0 (qui est la plage que nous laisse entrevoir la sonde de tension). De fait, la tension d'arc durant la phase de montée semble bien plus répétable que pour le matériau de référence. Dans le cas du matériau de référence, le comportement de l'arc électrique durant la phase de montée est très certainement fortement influencé par la présence d'un revêtement.

De même que dans le chapitre précédent, nous ajustons cette caractéristique lors de la phase de descente par la fonction :

$$U_{ARC} = U_2 + k(\frac{I}{I_0} - 1) \qquad (idem\ 4.6)$$

Cet ajustement est représenté par un trait continu sur la figure 6.1. Le tableau 6.3 donne les paramètres correspondants, comparés à ceux obtenus pour le matériau de référence.

Matériau	$\mathbf{U_2}$ (V)	**k** (V)
DC04	23,0	4,5
Réf.	27,3	6,7

TAB. 6.3 – Coefficients d'ajustement des caractéristiques dynamiques de l'acier DC04 et du matériau de référence, d'après l'équation 4.6.

La tension d'arc au début de la phase de descente est plus faible d'environ 4,3 V pour l'acier DC04 comparé au matériau de référence, puis la constante de décroissance k est plus faible d'environ 2,2 V. Il est cependant difficile d'interpréter plus avant cette différence de comportement car ces deux matériaux diffèrent par leur substrat et par la présence ou non d'un revêtement à leur surface.

Toutefois, cette différence donne un ordre de grandeur intéressant : celui de l'amélioration des performances de la chambre de coupure liée à la modification du matériau des plaquettes de fractionnement. Un gain de 4,3 V par plaquette de fractionnement représente une amélioration conséquente de la limitation du courant de court-circuit dans le disjoncteur. Le choix d'un matériau optimisé aura donc toute son importance.

Nous tenterons d'apporter des éléments de réponse dans la suite de ce chapitre aux trois questions suivantes :

— L'hystérésis et la répétabilité de la phase de montée sont-elle liée à la présence d'un revêtement de surface ?
— Qu'est-ce qui détermine la tension au début de la phase de descente U_2 ?
— Qu'est-ce qui détermine la pente k ?

6.1.2 Impacts aux pieds d'arc

La seconde différence frappante entre ces deux matériaux concerne la taille et l'aspect des impacts aux pieds d'arc. La figure 6.2 représente la section de la zone fondue à l'anode S_F en fonction de la section du pied d'arc à la cathode S_P, telles que définies dans le chapitre précédent. La taille des pieds d'arc S_P est fortement réduite pour l'acier DC04 et quasiment toute la surface des pieds

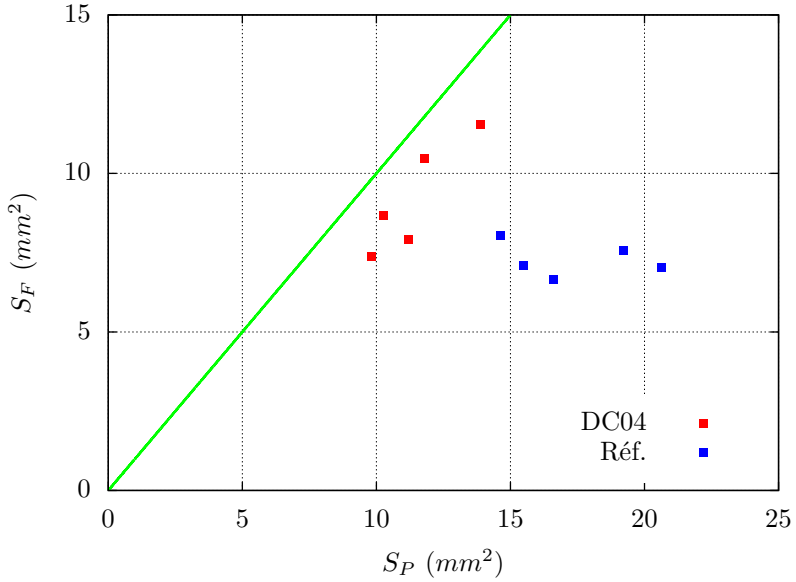


FIG. 6.2 – Section de la zone fondue à l'anode S_F en fonction de la section du pied d'arc à la cathode S_P, pour l'acier DC04 comparé au matériau de référence.

d'arc est fondue à l'anode. Ce dernier point est certainement une conséquence d'une densité de puissance apportée par l'arc électrique sur les électrodes plus importante. L'érosion des électrodes et donc l'évaporation du métal et son probable impact sur la colonne d'arc et ses propriétés seront donc très différentes pour ces deux matériaux.

Nous tenterons d'apporter des éléments de réponse dans la suite de ce chapitre aux questions suivantes : cette différence de comportement est-elle liée à la présence d'un revêtement de nickel à la surface du matériaux de référence ou bien à des propriétés du substrat différentes ? Quelle sera la conséquence de cette différence de comportement sur la tension de l'arc électrique durant les différentes phases de vie de l'arc ?

Cette première partie, en plus de présenter les caractéristiques de l'acier DC04, montre l'impact du matériau sur le comportement de l'arc électrique, en particulier sa tension d'arc et l'érosion des électrodes. Elle démontre tout l'intérêt d'un choix de matériau optimisé pour le concepteur soucieux d'améliorer les performances de son produit. Plusieurs points soulevés restent toutefois à éclaircir :

— du point de vue des performances : qu'est-ce qui détermine les paramètres

U_2 et k ainsi que la section de l'arc ? Peut-on établir un lien entre la section de l'arc et sa tension ?

— du point de vue du matériau : quel est l'impact respectif du substrat et du revêtement ?

6.2 Revêtement de surface

Nous avons choisi le revêtement de surface le plus communément répandu pour les plaquettes de fractionnement. Il s'agit d'un nickelage semi-brillant très courant dans l'industrie, que ce soit pour des pièces d'aspect ou pour des applications électriques. Son épaisseur est de 7,5 $\pm$ 1 μm dans la zone d'intérêt, c'est-à-dire au centre de l'extérieur du pli de l'électrode. Cette épaisseur est bien plus importante que celle habituellement rencontrées dans les disjoncteurs modulaires. Nous souhaitons en effet rendre plus visible l'effet de ce revêtement afin de l'étudier plus aisément.

Ce revêtement a été déposé par électrolyse après mise en forme des électrodes, en vrac. Ainsi, lorsque nous comparons l'acier DC04 avec et sans traitement, le substrat correspond non seulement à la même nuance d'acier mais est issu de la même bande de matière. Étant donné la stabilité et l'homogénéité des matériaux obtenus par les procédés de laminage, cela garanti un substrat identique lors de nos comparaisons.

Le tableau 6.4 résume les différents matériaux utilisés dans cette partie.

Matériau	**Substrat**	**Revêtement**	Épaisseur du revêtement
DC04	DC04	$\varnothing$	–
DC04 + Ni	DC04	Ni	7,5 $\pm$ 1 μm
Réf.	acier doux	Ni	$\simeq 1\mu m$

TAB. 6.4 – Matériaux utilisés pour évaluer l'impact du revêtement de nickel électrolytique sur le comportement de l'arc électrique.

6.2.1 Tension d'arc

La figure 6.3 ci-dessous présente la comparaison de la caractéristique dynamique $U_{ARC}(I/I_0)$ pour l'acier DC04 avec et sans revêtement. Dans les deux cas, cinq essais sont réalisés et étant donné l'excellente répétabilité des résultats, ils sont représentés en une seule et même couleur.

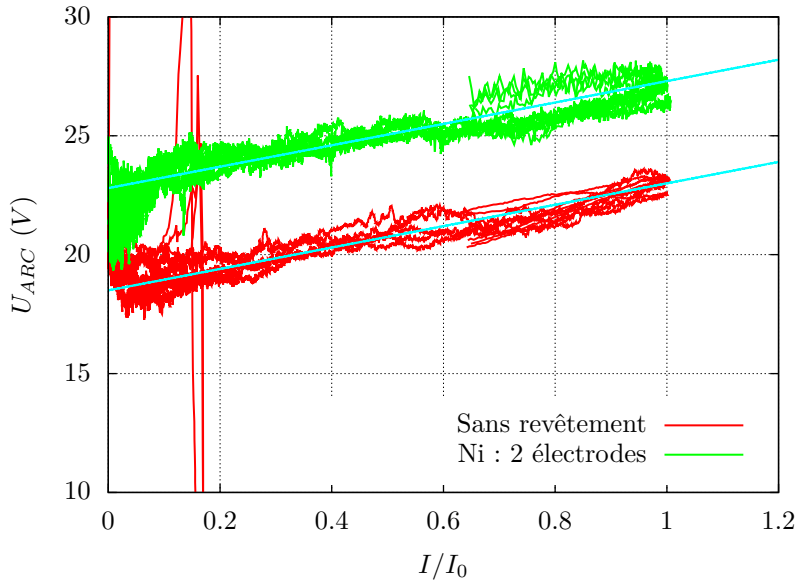


FIG. 6.3 – Impact du nickelage électrolytique des électrodes sur la caractéristique dynamique $U_{ARC}(I/I_0)$.

Le comparatif est saisissant : la courbe semble avoir simplement été décalée de quelques volts vers le haut, la pente restant identique. Nous ajustons ces courbes de même que précédemment à l'aide de l'équation 4.6. Ces ajustements sont représentés par un trait continu sur la figure 6.3, le tableau 6.5 donne les paramètres correspondants.

Matériau	$\mathbf{U_2}$ (V)	**k** (V)
DC04	23,0	4,5
DC04 + Ni : 2 électrodes	27,3	4,5
Réf.	27,3	6,7

TAB. 6.5 – Coefficients d'ajustement des caractéristiques dynamiques de l'acier DC04 avec et sans revêtement de nickel, ainsi que du matériau de référence, d'après l'équation 4.6.

En revanche ce qui se passe durant la phase de montée est plus difficile à interpréter, car l'artefact lié à l'amorçage par haute-tension masque les données pour $I < 700$ A. Il semblerait toutefois qu'un aspect hystérétique apparaisse avec le revêtement de surface.

La figure 6.4 présentent les mêmes courbes que la figure précédente auxquelles deux configurations ont été ajoutées : lorsque l'anode seule est revêtue et lorsque

la cathode seule est revêtue. Le nombre d'essais par configuration est de cinq. La répétabilité est de nouveau excellente et nous représentons donc ces cinq essais avec une seule et même couleur.

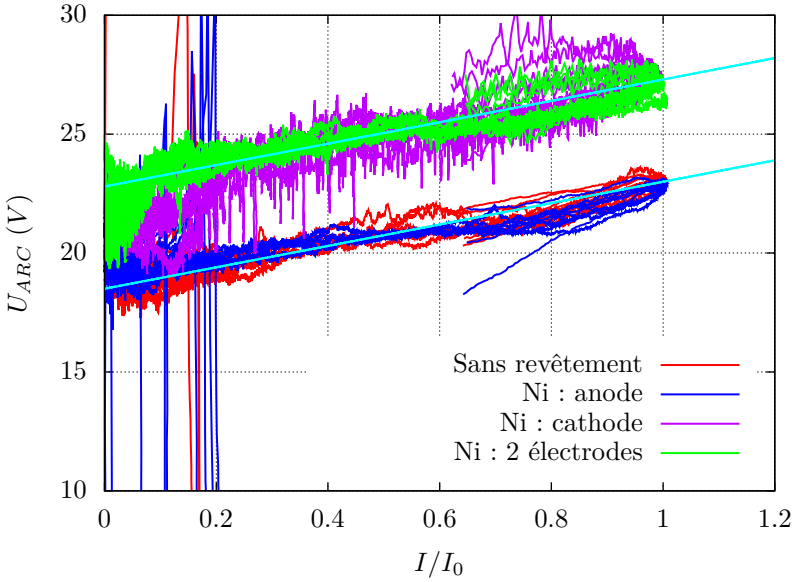


FIG. 6.4 – Impact du nickelage électrolytique de l'anode ou de la cathode seule sur la caractéristique dynamique $U_{ARC}(I/I_0)$.

Le résultat est très clair : alors que le nickelage de l'anode n'a aucun impact sur la tension d'arc, le nickelage de la cathode apporte environ le même gain de tension d'arc que celui constaté lorsque les deux électrodes sont revêtues. C'est donc bien la modification de la surface de la cathode qui provoque l'augmentation de la tension d'arc.

Enfin, regardons plus en détails sur la figure 6.5 deux courbes extraites de la figure précédente, pour une configuration d'électrodes en acier DC04 nickelé. Nous constatons que la première courbe (essai 1) suit une tendance linéaire jusquà une valeur d'intensité très faible alors que la tension d'arc de la seconde (essai 2) chute rapidement pour une valeur $I/I_0 \simeq 0{,}1$, indiquée par une flèche. Après examen des électrodes, nous constatons que les électrodes de l'essai 1 présentent un revêtement de nickel certes érodé mais non transpercé, alors que les électrodes de l'essai 2 présentent localement une zone où le revêtement a été transpercé et où l'acier est apparent. Nous n'avons pas d'évidence expérimentale directe de ce phénomène mais il semble que la baisse rapide de tension d'arc correspond au moment où la couche de nickel est transpercée.

Comparons à présent ces résultats avec le comportement du matériau de référence présenté dans la figure 6.1 : 1) l'aspect hystérétique de la phase de

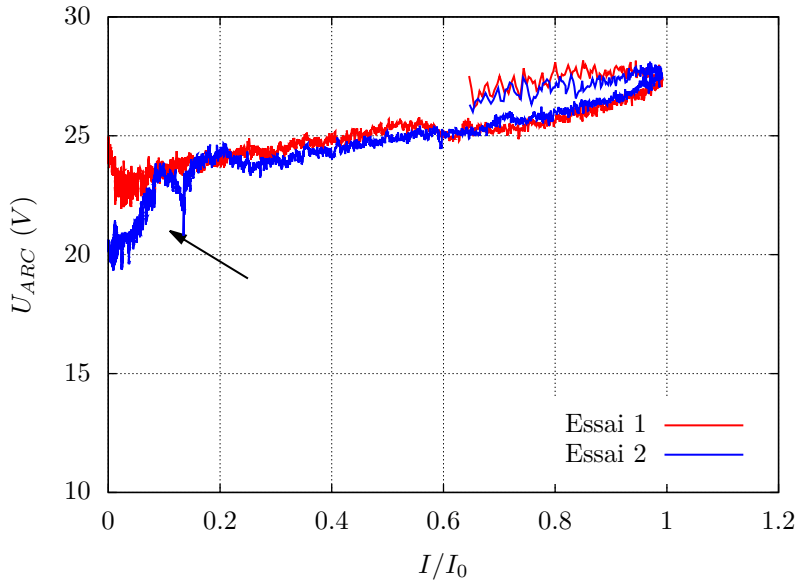


FIG. 6.5 – Impact du nickelage électrolytique de l'anode ou de la cathode seule sur la caractéristique dynamique $U_{ARC}(I/I_0)$.

montée et la valeur de tension d'arc au démarrage de la phase de descente U_2 est la même que pour le matériau de référence, 2) la pente k de la phase de descente est la même que celle de l'acier DC04 sans revêtement mais est différente de celle du matériaux de référence.

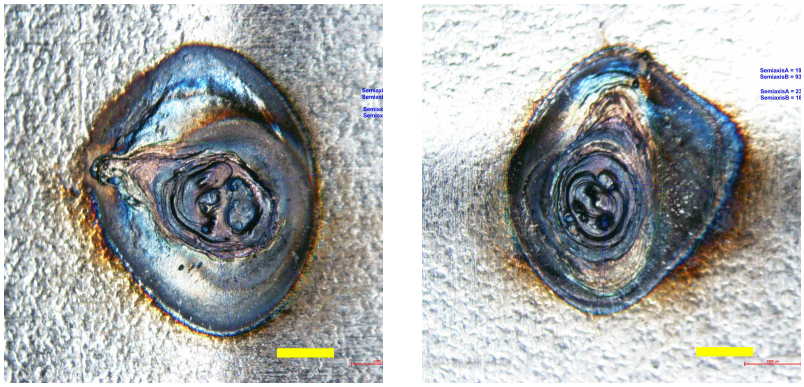
Cela suggère que la tension d'arc lors de la phase de montée est fortement influencée par la chimie de la surface des électrodes alors que la dynamique de décroissance de la tension durant la phase de descente est essentiellement liée aux propriétés du substrat. Nous constatons également que lors d'un essai avec l'acier DC04 revêtu, l'épaisseur de nickelage est suffisante pour que le revêtement ne soit pas transpercé lors de l'essai. Cela signifie que ce sont les propriétés physiques massiques du substrat qui entrent en jeu et non pas ses propriétés de surface ou sa chimie, qui pourrait impacter l'arc de évaporation du métal. Parmi les propriétés massiques du substrat les plus évidentes sont les propriétés thermodynamiques, de transport et magnétiques.

Toutefois une seconde explication est possible. L'épaisseur du revêtement de nickel pour le matériau de référence est bien plus faible que celui de l'acier DC04, respectivement 1 et 7,5 μm. La couche de nickel du matériau de référence est transpercée durant l'essai, comme l'atteste l'analyse post-essai des électrodes. La décroissance de la tension d'arc, et donc la pente k, dans le cas d'électrodes en matériau de référence correspond donc à une situation où la chimie de la surface des électrodes est fortement modifiée durant l'essai : elle est tout d'abord en

nickel puis s'enrichit en acier au fur et à mesure de l'essai. La variation de la tension d'arc durant la phase de descente est donc peut-être le reflet de cette évolution.

6.2.2 Impacts aux pieds d'arc

La figure 6.6 montre l'aspect des impacts aux pieds d'arc pour des électrodes en acier DC04 sans revêtement, ce qui correspond aux courbes rouges de la figure 6.4. De même que précédemment, les électrodes sont présentées dans la même orientation que sur le gabarit. La cathode est à gauche et la barre jaune indique une échelle de 1 mm. Les deux pieds d'arc présentent un aspect similaire et un aspect fondu très prononcé, l'anode étant légèrement plus petite.

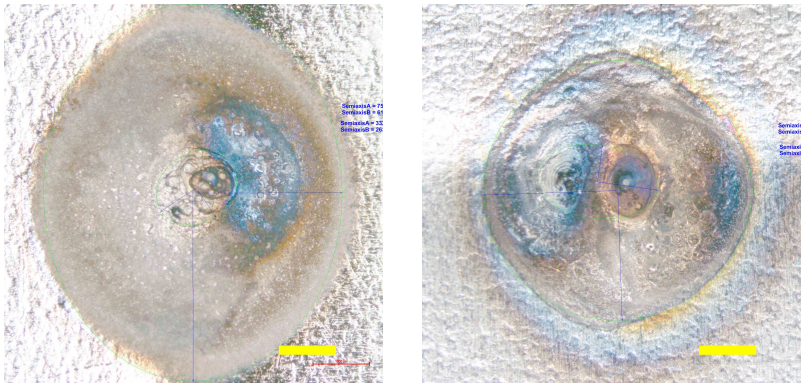


(a) Cathode. (b) Anode.

FIG. 6.6 – Aspect des pieds d'arc pour des électrodes sans revêtement. La barre jaune indique l'échelle 1 mm.

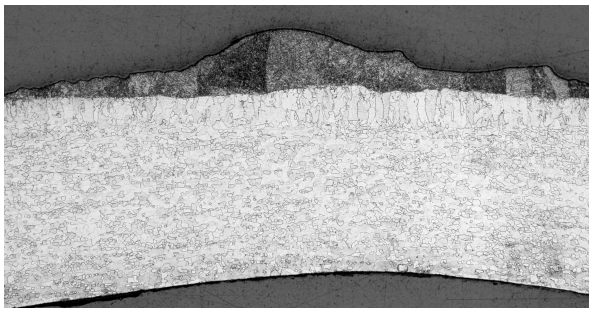
La figure 6.7 montre l'aspect des pieds d'arc pour des électrodes en acier DC04 avec un revêtement uniquement à la cathode, ce qui correspond aux courbes violettes de la figure 6.4. La différence est saisissante : la section du pied d'arc à la cathode est bien plus importante et l'aspect fondu des surfaces est fortement réduit, y compris à l'anode. L'analyse des vidéos montre clairement que cette augmentation de section des pieds d'arc correspond bien à une augmentation de la section de l'arc et non à un éventuel mouvement.

L'augmentation de la section du pied d'arc réduit la puissance dissipée par l'arc sur les électrodes et limite ainsi la fusion et l'érosion de celles-ci. C'est ce que montre très clairement la figure 6.8. Il s'agit d'une coupe métallographique de la cathode pour des électrodes en acier DC04 sans ou avec revêtement, issues de la série d'essais présentée dans la figure 6.3. La présence d'un revêtement de nickel réduit quasiment à néant la profondeur de la zone fondue. L'effet est similaire à l'anode.

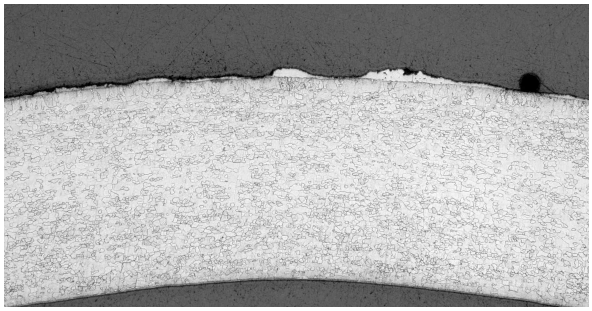


(a) Cathode. (b) Anode.

FIG. 6.7 – Aspect des pieds d'arc lorsque la cathode seule est nickelée. La barre jaune indique l'échelle 1 mm.



(a) Acier DC04.



(b) Acier DC04 nickelé.

FIG. 6.8 – Profondeur de la zone fondue à la cathode pour l'acier DC04 avec ou sans revêtement.

Afin de quantifier l'augmentation des sections de pied d'arc apportée par le revêtement, nous avons relevé les sections S_F et S_P, définies précédemment, pour les quatre configurations de la figure 6.4. Nous les présentons dans la figure

6.9. Le nickelage de l'anode seule n'a aucun impact sur les sections mesurées. Les

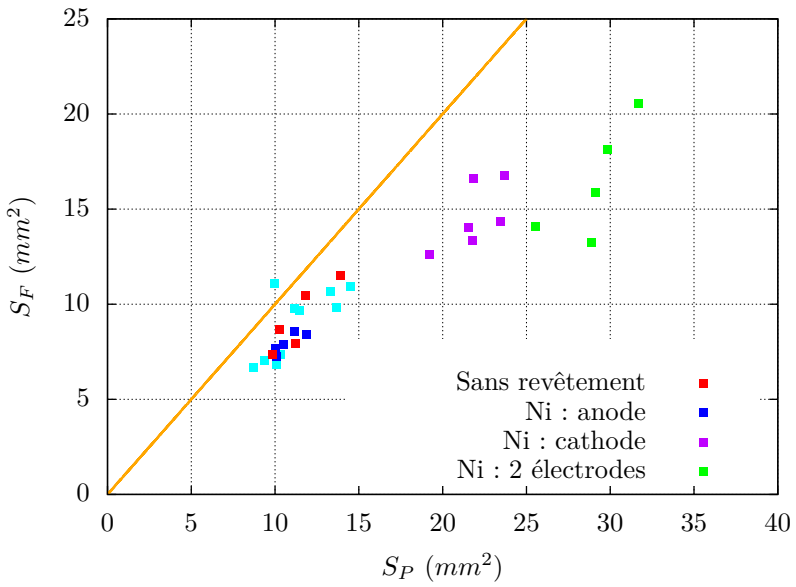


FIG. 6.9 – Section du pied d'arc à la cathode S_P et section de la zone fondue à l'anode S_F pour l'acier DC04 sans revêtement, avec un revêtement uniquement à la cathode ou à l'anode ou bien avec les deux électrodes revêtues.

sections S_F et S_P augmentent de façon significative avec la présence de nickel à la cathode, et encore plus lorsque les deux électrodes sont revêtues. Ces mesures suggèrent donc que la présence de nickel à la cathode favorise l'expansion de l'arc, la section du pied d'arc est alors doublée voir triplée.

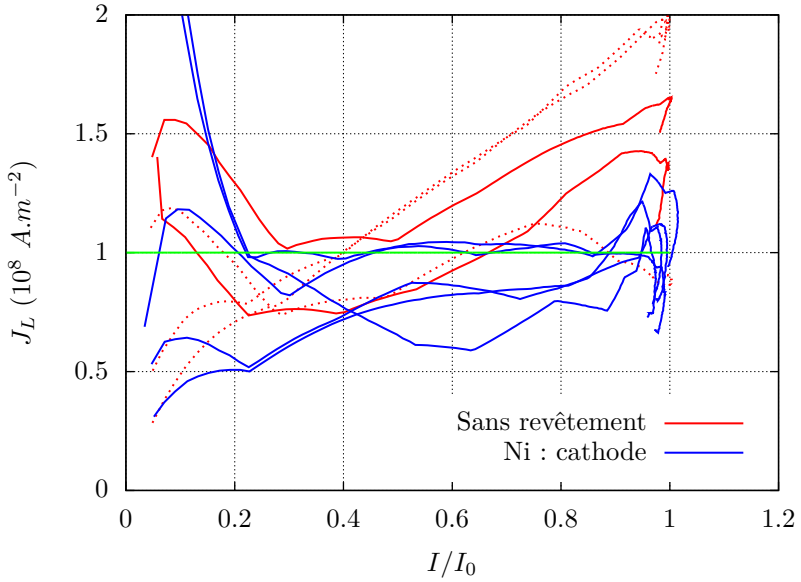
6.2.3 Dynamique de la section d'arc

La figure 6.10 compare la densité de courant moyenne J_L, définie précédemment par :

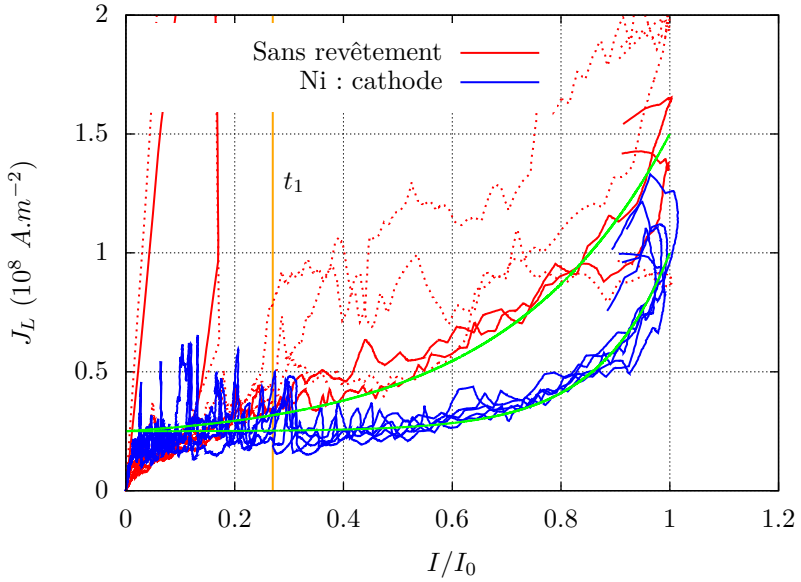
$$J_L = \frac{I}{S_L} \ , \qquad (idem\ 5.5)$$

dans le cas d'électrodes en acier DC04 sans revêtement et lorsque la cathode seule est revêtue de nickel. Nous représentons séparément la phase de montée et la phase de descente, respectivement en (a) et (b), afin d'améliorer la lisibilité des courbes. Lorsque l'instabilité de l'arc électrique est importante, l'essai est représenté par un trait pointillé.

Durant la phase de montée (en 6.10a), l'incertitude est importante car la vitesse d'acquisition des images est faible par rapport à la vitesse d'expansion de l'arc. Il semblerait cependant que les densités de courant soient similaires pour



(a) Phase de montée.



(b) Phase de descente.

FIG. 6.10 – Densité de courant moyenne J_L pour l'acier DC04 avec et sans revêtement nickel à la cathode. La ligne verticale t_1 indique la fin de la phase de descente et le début de la phase d'extinction.

les deux configurations d'électrodes au début de cette phase puis se différencient vers la fin de celle-ci. À partir de $I/I_0 \simeq 0{,}5$, la densité de courant augmente

lorsque la cathode est sans revêtement alors qu'elle reste constante lorsque la cathode est nickelée. La section de l'arc croît donc avec la même dynamique au début de la décharge, quel que soit l'état de surface de la cathode, puis à un moment donné, ici $I/I_0 \simeq 0{,}6$, son expansion est freinée lorsque la cathode n'est pas revêtue, ce qui entraîne une augmentation de la densité de courant. La densité de courant atteinte à la fin de la phase de montée J_L^1 est de $1{,}5.10^8$ $A.m^{-2}$ pour les électrodes sans revêtement contre 1.10^8 $A.m^{-2}$ lorsque la cathode est nickelée.

Durant la phase de descente, les deux configurations présentent une tendance similaire, que l'on peut ajuster par la fonction présentée précédemment :

$$J_L = J_L^2 + (J_L^1 - J_L^2)\,\frac{e^{x/\theta} - 1}{e^{1/\theta} - 1} \qquad (idem\ \ 5.7)$$

où $x = I/I_0$. En imposant la même valeur à courant faible J_L^2, ce qui parait raisonnable au vue des courbes expérimentales, nous obtenons les valeurs présentées dans le tableau ci-dessous. Nous avons également reporté dans ce tableau à titre de comparaison les valeurs obtenues avec le matériau de référence.

Matériau	$\mathbf{J_L^1}$ $(A.m^{-2})$	$\mathbf{J_L^2}$ $(A.m^{-2})$	θ
DC04	$1{,}5.10^8$	$0{,}25.10^8$	0,30
DC04 + Ni : Cathode	$1{,}0.10^8$	$0{,}25.10^8$	0,13
Réf.	$1{,}0.10^8$	$0.30.10^8$	0.17

TAB. 6.6 – Paramètres d'ajustement de la densité de courant moyenne J_L pour l'acier DC04 sans revêtement, l'acier DC04 avec nickelage de la cathode et pour le matériau de référence, d'après l'équation 5.7.

La constante de décroissance de la densité θ passe de 0,30 à 0,13 avec le nickelage de la cathode, ce qui correspond au fait que la section de l'arc à plus de facilité à continuer à augmenter au début de la phase de descente lorsque la cathode est nickelée. Nous pouvons également noter que les paramètres d'ajustement obtenus pour l'acier DC04 avec nickelage de la cathode sont bien plus porches de ceux obtenus pour le matériau de référence que ceux obtenus pour le même acier sans revêtement. Cela suggère que c'est la nature de la surface de la cathode qui pilote la section de l'arc, et donc la densité de courant, et non pas le substrat.

Le revêtement de nickel à la cathode apporte un gain de tension constant sur l'ensemble de la caractéristique dynamique $U_{ARC}(I/I_0)$ d'environ 4,3 V, sans

modifier sa pente. Il facilite l'expansion de l'arc durant la phase de montée mais également au début de la phase de descente, ce qui a pour conséquence de limiter la densité de courant et de ce fait la fusion et l'érosion des électrodes. A l'inverse, le revêtement nickel à l'anode n'a de conséquence ni sur la tension d'arc, ni sur l'expansion de l'arc. Enfin, l'acier DC04 revêtu de nickel présente un comportement similaire en tous points au matériau de référence, hormis concernant la pente de la caractéristique $U_{ARC}(I/I_0)$.

Il apparait donc que la tension d'arc durant la phase de montée et au démarrage de la phase de descente $U_1 \simeq U_2$ (d'après 4.5) ainsi que la dynamique d'expansion de l'arc est uniquement lié à la présence d'un revêtement nickel à la cathode. La surface de l'anode ne joue qu'un rôle secondaire, voire aucun. Concernant la tension d'arc, deux explications peuvent alors être avancées :

1) la tension cathodique du nickel est plus élevée que celle de l'acier DC04,
2) la densité de courant lorsque la cathode est nickelée est plus faible, l'érosion moindre, ce qui modifie la conductivité électrique de la colonne, et donc augmente la tension de la colonne d'arc.

La tension cathodique du nickel est généralement considérée comme proche de celle du fer, et donc celle de l'acier doux, ce qui est en contradiction avec notre première explication. Une augmentation de la tension de colonne d'arc de 4,3 V pour une longueur de colonne de 1 mm semble cependant peu probable. Nous mettrons donc en avant la première explication dans la suite de ce travail :

$$U_C(\text{nickel}) - U_C(\text{acier}) \simeq \text{quelques volts} \tag{6.1}$$

La constante de décroissance de la tension d'arc k n'est en revanche pas affectée par la présence d'un revêtement pour l'acier DC04 mais est plus importante pour le matériau de référence. De nouveau, deux explications peuvent être avancées :

1) la pente k est liée aux propriétés du substrat,
2) le revêtement nickel du matériau de référence est transpercé durant l'essai, la tension cathodique de l'arc évolue donc de la tension cathodique du nickel vers celle de l'acier. La pente k est le reflet de cette évolution.

Si la première explication est sans doute vraie dans l'absolu, il semble difficile à défendre étant donné que les aciers DC04 et du matériau de référence sont très proches. Nous privilégierons donc la seconde explication :

$$\begin{aligned} &U_C(\text{substrat + revêtement}) \simeq \\ &\qquad \alpha_1(t)U_C(\text{substrat}) + \alpha_2(t)U_C(\text{revêtement}) \end{aligned} \tag{6.2}$$

où $\alpha_1(t)$ et $\alpha_2(t)$ sont des fonctions du temps qui décrivent la dynamique de dégradation du revêtement.

6.3 Influence de l'intensité maximale

Nous avons vu ci-dessus que le comportement de l'arc est essentiellement impacté par la présence d'un revêtement à la cathode. Si cette configuration asymétrique n'est évidemment pas une solution viable industriellement, elle permet de simplifier le système étudié et donc l'interprétation des phénomènes rencontrés. Nous allons donc dans cette partie étudier l'impact de l'intensité maximale du courant I_0 sur la tension d'arc, en comparant l'acier DC04 sans revêtement et l'acier DC04 avec un revêtement à la cathode seulement.

6.3.1 Acier non revêtu

La figure 6.11 montre la caractéristique dynamique $U_{ARC}(I/I_0)$ pour trois valeurs d'intensité maximale I_0 et pour une même valeur de temps de montée $t_0 \simeq 0{,}35\ ms$. Cinq essais sont réalisés par configuration et sont représentés en une seule et même couleur. Nous avons choisi la même représentation que la figure 4.7, à savoir un décalage des courbes de 5 V afin d'améliorer la lisibilité.

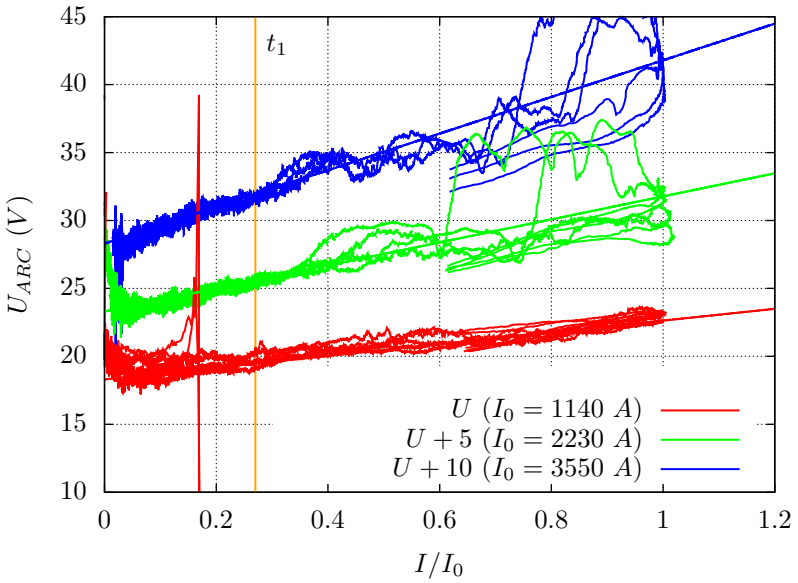


FIG. 6.11 – Impact de l'intensité maximale de l'onde de courant I_0 sur la caractéristique dynamique $U_{ARC}(I/I_0)$ pour l'acier DC04.

Malgré un fort mouvement de l'arc pour les courants élevés qui entraine des fluctuations de la tension d'arc et donc une incertitude relativement grande, il est évident que nous ne retrouvons pas l'alignement de ces courbes constaté pour la

matière de référence (cf. figure 4.7). En revanche un ajustement par l'équation :

$$U_{ARC} = U_0 + GI \qquad (idem\ 2.3)$$

donne des résultats acceptables avec les coefficients $U_0 = 18.3\ V$ et $G = 3{,}8.10^{-3}\ V.A^{-1}$ pour l'ensemble des courbes. Ces ajustements sont représentés sur la figure 6.11 par des droites de la même couleur que la configuration concernée.

Il est également intéressant de noter que les courbes ne présentent pas un aspect hystérétique et que la tension d'arc durant la phase de montée semble être, à une intensité donnée, la même que celle durant la phase de descente. Cette remarque est toutefois à nuancer à cause d'une part du fait que nous n'avons pas accès aux courant inférieurs à $\simeq 700\ A$ et d'autre part qu'un fort mouvement de l'arc perturbe les courbes pour les intensités maximales I_0 élevées.

6.3.2 Acier cathode nickelée

La figure 6.12 présente des essais réalisés dans les mêmes conditions, mais cette fois-ci la surface de la cathode est revêtue de nickel. Afin de rendre plus aisée la comparaison de ces données avec celle présentée dans la figure précédente 6.11 mais sans pour autant rendre illisible le graphique, nous avons tracé seulement les ajustements.

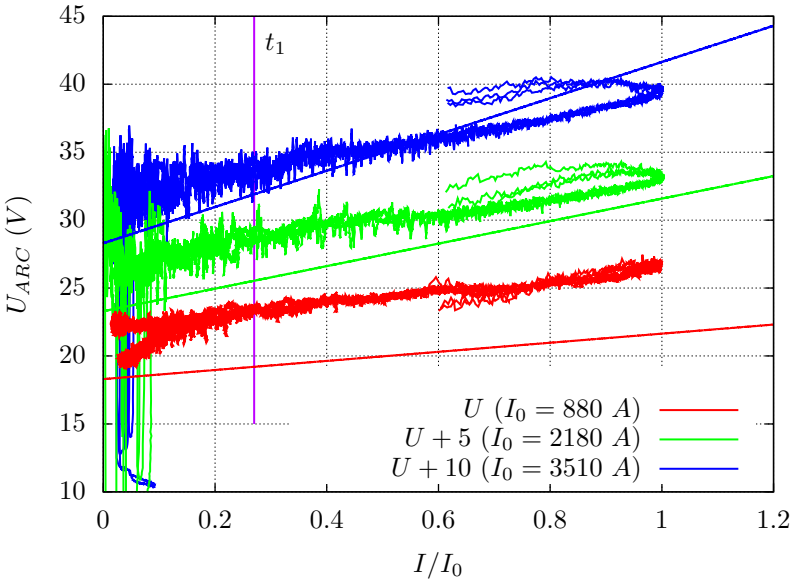


FIG. 6.12 – Impact de l'intensité maximale de l'onde de courant I_0 sur la caractéristique dynamiques $U_{ARC}(I/I_0)$ pour l'acier DC04 avec un revêtement à la cathode. Les droites en traits continus représentent les ajustements des caractéristiques dynamiques de l'acier DC04.

Le décalage de 4,3 V constaté pour une cathode avec ou sans revêtement nickel pour $I_0 \simeq 1\ kA$ n'est pas le même pour des valeurs de I_0 plus élevées : il semble s'atténuer lorsque I_0 augmente. La pente k semble également ne plus augmenter avec I_0 mais conserver une valeur constante lorsque I_0 augmente. Le comportement de la tension durant la phase de montée est également intéressant à observer : la tension d'arc durant la phase de montée est plus élevée que dans la phase de descente à même intensité, et ce semble-t-il d'autant plus que l'intensité maximale I_0 est élevée. Bref, nous retrouvons un comportement très similaire à celui constaté dans le chapitre précédent pour le matériau de référence (cf. en particulier figure 4.7).

La tension d'arc de l'acier DC04 présente donc un comportement réversible et dépend linéairement de l'intensité du courant I, quelle que soit la valeur de l'intensité maximale I_0. Lorsqu'un revêtement de nickel est présent à la cathode, la tension d'arc présente un comportement linéaire en I/I_0. Ce constat est identique à celui du chapitre précédent pour le matériau de référence. Comme nous le discutions alors, la présence d'un revêtement de surface à la cathode ajoute donc une composante temporelle à la caractéristique $U_{ARC}(I)$. Nous pouvons ainsi exprimer de façon générale la tension dynamique de l'arc comme la somme d'un terme de courant et d'un terme temporel, avec le formalisme suivant :

$$U_{ARC} = U_{REV}(I) + U_{TRANS}(t) \tag{6.3}$$

où le premier terme est qualifié de réversible et ne dépend pas du temps mais que de I, et le deuxième terme est qualifié de transitoire et s'exprime plus généralement en fonction du temps.

6.4 Champ dans la colonne

Afin de préciser l'ordre de grandeur du champ électrique moyen dans la colonne d'arc nous avons réalisé des essais à différentes distance inter-électrodes d : 0,5, 1 et 1,5 mm. Nous avons utilisé la forme d'onde 1, à savoir $I_0 \simeq 1\ kA$ et $t_0 = 0{,}35\ ms$. Les électrodes sont en acier DC04, sans revêtement. La figure 6.13 présente ces courbes en représentation $U_{ARC}(I)$, et non pas $U_{ARC}(I/I_0)$ comme précédemment car nous avons montré que dans le cas d'un acier sans revêtement une dépendance en I est plus pertinente qu'une dépendance en I/I_0. Nous avons représenté les cas où l'arc est très instable par des courbes en trait pointillé.

Il apparaît clairement que lorsque d augmente, la tension d'arc augmente, comme nous pouvions nous y attendre, mais la pente de la caractéristique dyna-

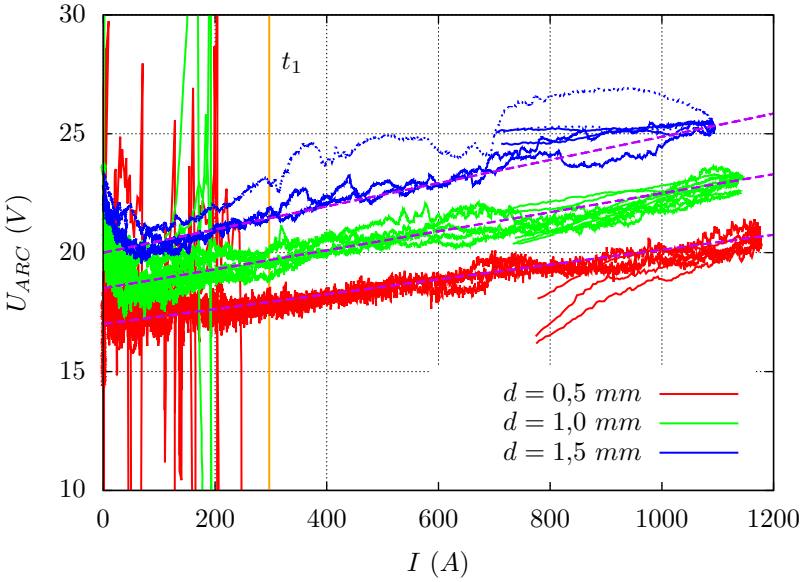


FIG. 6.13 – Caractéristique dynamique $U_{ARC}(I)$ de l'acier DC04 pour différentes distances inter-électrodes d.

mique $U_{ARC}(I)$ augmente également. Nous pouvons alors exprimer son équation :

$$U_{ARC} = U_0 + GI \qquad (idem\ \ 2.3)$$

avec deux paramètres dépendant à présent de la distance inter-électrodes d :

$$\begin{aligned} U_0 &= U_E + E_0 d \\ G &= G_0 + \alpha d \end{aligned} \qquad (idem\ \ 2.6)$$

Les paramètres suivants :

$$\begin{aligned} U_E &= 15{,}5\ V \\ E_0 &= 3.10^3\ V.m^{-1} \\ G_0 &= 2{,}25.10^{-3}\ V.A^{-1} \\ \alpha &= 1{,}75\ V.A^{-1}.m^{-1} \end{aligned}$$

permettent un ajustement correct des courbes expérimentales. Ces ajustements sont représentés en trait pointillé dans la figure 6.13.

Les valeurs de U_E et E_0 sont cohérentes avec ce que l'on peut trouver dans la littérature [18]. Il est plus difficile de se faire une opinion sur les deux autres termes. Le fait que G dépende de la distance inter-électrodes d est cohérent avec les résultats présentés par Mitchell [40] et Nakayama [43], et nous retrouvons les bons ordres de grandeur. Nous trouvons une valeur de α bien plus importante

que Nakayama (à savoir 0,13) ce qui est cohérent avec la fonction logarithmique proposée par Shermann [41] car nous travaillons à des distances inter-électrodes bien plus faible que Nakayama (à savoir 10 à 30 mm pour ce dernier). Gardons donc bien présent à l'esprit que les paramètres d'ajustement ci-dessus n'ont de validité que dans la gamme expérimentale explorée.

6.5 Influence du substrat

Afin de mettre en évidence l'impact du substrat sur la tension d'arc, nous avons choisi de comparer l'acier DC04 avec un matériau très différent : le cuivre. En particulier sa conductivité thermique est bien plus importante et il est amagnétique. Il s'agit d'un cuivre Cu-OF, tel que défini par la norme NF EN 13599 [50]. Nous avons également ajouté à cette comparaison le nickel massif. Des essais préliminaires utilisant des électrodes en nickel massif de deux puretés différentes (99,0 % et 99,98 %) n'ont mis en évidence aucune différence de comportement. Nous avons donc utilisé pour nos essais le nickel de pureté 99,0 %, par ailleurs plus facile à mettre en œuvre pour la préparation des électrodes. Le tableau 6.7 synthétise les différents matériaux utilisés dans cette partie.

Matériau	Nuance du substrat	Épaisseur du revêtement
DC04	DC04	∅
DC04 + Ni : cathode	DC04	$7{,}5 \pm 1\ \mu m$
Cu + Ni : cathode	Cu-OF	$9 \pm 1\ \mu m$
Nickel	Ni > 99,0%	∅

TAB. 6.7 – Matériaux utilisés pour évaluer l'impact du substrat sur le comportement de l'arc électrique.

De même que précédemment, nous nous focaliserons sur des configurations où seule la cathode est revêtue. Nous constatons également que lorsque nous générons des arcs entre des couples d'électrodes de substrats différents, l'arc est très instable et ne permet pas d'obtenir des résultats exploitables. Nous nous limiterons donc à des configurations de substrats symétriques.

6.5.1 Tension d'arc

La figure 6.14 présente la caractéristique dynamique $U_{ARC}(I)$ des différents matériaux listés dans le tableau 6.7. L'onde de courant correspond à une intensité maximale du courant $I_0 \simeq 1\ kA$ et un temps de montée $t_0 = 0{,}35\ ms$. Cinq essais

sont réalisés par configuration et nous les représentons avec une seule et même couleur car la répétabilité des résultats le permet sans compromettre la lisibilité de la figure.

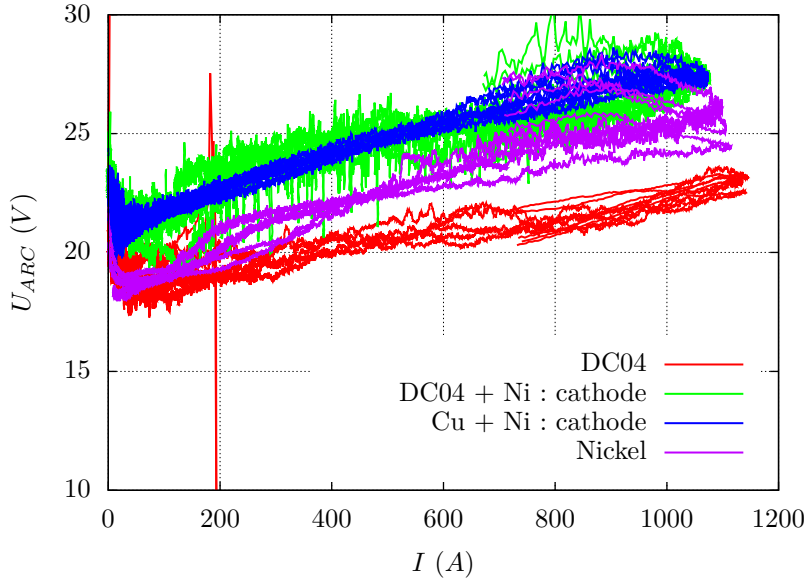


FIG. 6.14 – Caractéristique dynamique $U_{ARC}(I)$ de l'acier DC04, de l'acier DC04 et du cuivre Cu-OF avec un nickelage à la cathode, et du nickel massif.

La courbe du cuivre avec cathode nickelée est grossièrement superposée à celle correspondant à l'acier DC04 avec cathode nickelée. Cela signifie que le gain apporté par le nickelage n'est affecté au premier ordre ni par la nature du substrat, cuivre ou acier DC04, à la cathode, c'est-à-dire sous le revêtement de nickel, ni par la nature de l'anode. Précisons que dans ces deux cas, la couche de nickel n'est pas transpercée durant l'essai.

La courbe du nickel pur est à son tour relativement surprenante : la tension d'arc est, durant la phase de montée, proche de celle des électrodes avec la cathode revêtue par du nickel, puis elle chute de plusieurs volts avant d'atteindre le maximum d'intensité I_0. La tension d'arc du nickel décroit ensuite avec une pente G similaire à celle des trois autres matériaux. Enfin cette tension d'arc chute à nouveau de quelques volts à la fin de la phase de descente, entre 200 et 300 A.

6.5.2 Section des pieds d'arc

La figure 6.15 donne le comparatif des sections des pieds d'arc S_F et S_P, relevées sur les électrodes correspondant aux essais présentés ci-dessus, figure

6.14.

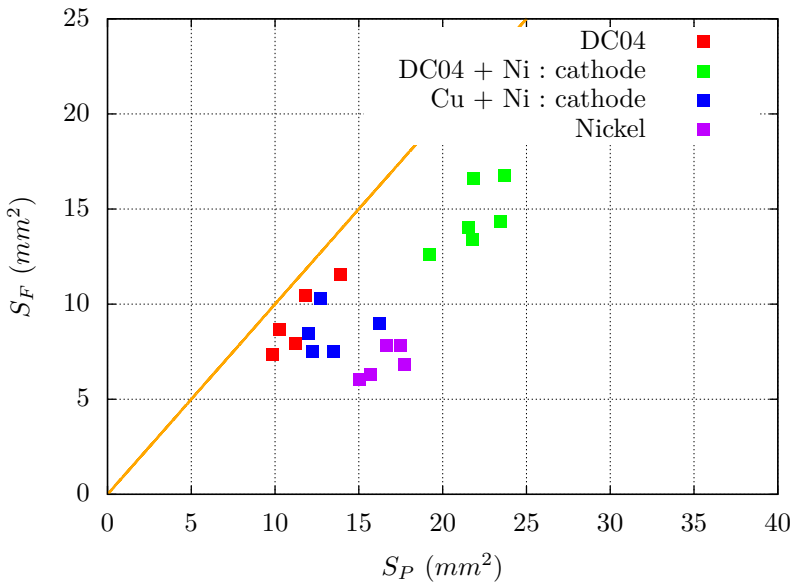


FIG. 6.15 – Section du pied d'arc à la cathode S_P et section de la zone fondue à l'anode S_F pour l'acier DC04, l'acier DC04 et le cuivre Cu-OF avec un nickelage à la cathode, et le nickel massif.

Dans le cas d'une cathode revêtue de nickel, la section du pied d'arc S_P est bien plus faible lorsque le substrat est le cuivre comparé au substrat acier DC04. Cela semble logique étant donné la meilleure conduction thermique des électrodes en cuivre qui limitera l'expansion de l'arc électrique.

La section de pieds d'arc S_P du nickel est quant à elle plus importante que l'acier DC04 sans revêtement mais plus petite que celle l'acier DC04 revêtu de nickel à la cathode. Étant donné que les propriétés physiques du nickel et de l'acier DC04 sont très proches, cette constatation est relativement surprenante. Nous entrevoyons deux pistes d'explication :

1) la nature chimique de la couche de nickel déposée électrolytiquement apporte quelque chose de plus que le nickel massif,

2) la combinaison acier DC04 revêtu de nickel est plus performante que l'acier DC04 ou le nickel seul.

Quoi qu'il en soit, nous retrouvons le fait remarqué précédemment qu'il ne semble pas y avoir de corrélation directe entre les sections de pieds d'arc et les tensions d'arc observées.

6.6 Arc répétés

Nous aborderons pour finir ce chapitre l'évolution de la tension d'arc lors de décharges successives sur une même paire d'électrodes. Chaque paire d'électrodes subit quatre arcs successifs, sans aucune manipulation du montage, et nous réalisons cinq essais par configuration d'électrodes. L'onde de courant correspond à une intensité maximale du courant $I_0 \simeq 1\ kA$ et un temps de montée $t_0 = 0{,}35\ ms$. Les électrodes sont en acier DC04, avec ou sans revêtement nickel à la cathode.

Dans le cas de l'acier DC04 sans revêtement, le comportement de la tension d'arc et de la section de l'arc au cours du temps est similaire lors des quatre essais successifs. On constate cependant que la stabilité de l'arc s'améliore au fur et à mesure des décharges.

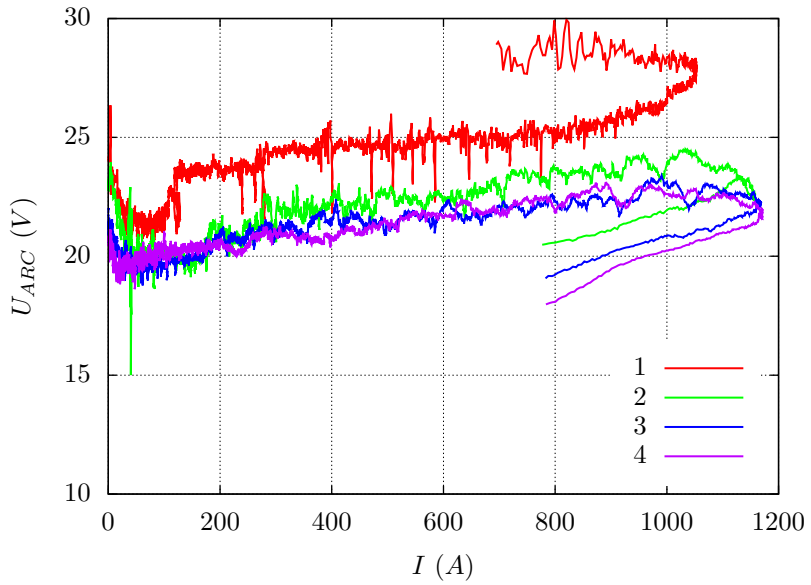


FIG. 6.16 – Caractéristique dynamique $U_{ARC}(I)$ lors de quatre arcs successifs, correspondant aux courbes numérotées de 1 à 4, générés entre une même paire d'électrodes en acier DC04 avec nickelage de la cathode.

Lorsque la cathode est nickelée, la tension d'arc évolue avec les décharges successives, ainsi que le montre la figure 6.16. La tension d'arc lors du premier arc est plus élevée, lors du deuxième arc, la tension est très fortement diminuée, puis à partir du troisième arc, la tension montre un comportement similaire à la tension des électrodes en acier DC04 sans revêtement. Nous avons pour cette raison limité le nombre d'arc successifs à quatre.

En revanche, toujours lorsque la cathode est nickelée, la section de l'arc en fonction du temps est la même pour tous les arcs successifs, quand bien même la tension d'arc diminue. Nous constatons donc de nouveau une décorrélation entre les observations de tension d'arc et de section de l'arc.

6.7 Conclusion

Nous avons entamé ce chapitre par la mise en évidence de l'impact du matériau des électrodes sur le comportement de l'arc électrique. La comparaison de l'acier de référence avec un acier doux couramment utilisé dans l'industrie est en effet édifiante.

La valeur maximale de tension d'arc au début de la phase de descente, U_2, ainsi que le taux de décroissance de cette tension avec l'intensité du courant réduit I/I_0, k, varient de plusieurs volts (cf. tableau 6.3). Cette différence est conséquente et, extrapolée à la tension d'arc du disjoncteur lors de l'essai de coupure, aura un impact énorme sur la limitation du courant de court-circuit.

La section des pieds d'arc, S_P, varie du simple au double (cf. figure 6.2), avec pour conséquence une fusion des électrodes plus ou moins prononcée. Or une fusion plus importante aux pieds d'arc lors d'un essai de coupure aura les conséquences suivantes :

— une érosion accrue et, la matière fondue étant chassée des pieds d'arc (cf. figure 5.9), un amincissement des plaquettes de fractionnement pouvant aller jusqu'à leur destruction,

— un plasma plus conducteur qui en s'échappant du disjoncteur peut provoquer des ruptures diélectriques,

— des bains fondus plus importants qui peuvent conduire soit à des extinctions momentanées de l'arc, ce qui réduit l'efficacité de la limitation et, lorsque le pont fondu explose, génère une grande quantité de gouttelettes de métal fondu, soit à une extinction prématurée de l'arc par pont fondu, ce qui évidemment augmente les contraintes thermiques.

Ces constatations confirment l'intérêt d'optimiser le matériau utilisé pour les plaquettes de fractionnement.

Nous structurons la suite de nos conclusions extraites de ce chapitre en cinq points clés.

L'acier doux

Les résultats obtenus avec des électrodes en acier doux DC04, contrairement à ceux présentés dans le chapitre précédent pour l'acier de référence, sont comparables aux données disponibles dans la littérature :

— La tension d'arc dynamique suit une caractéristique linéaire $U_{ARC} = U_0 + GI$, avec des paramètres U_0 et G similaires à ceux disponibles dans la littérature, non plus une caractéristique dynamique linéaire en I/I_0 comme pour le matériau de référence,

— Le coefficient G varie linéairement avec la distance inter-électrodes d, en cohérence avec la formule linéaire de [43] et logarithmique de [41].

Dans la plage de temps que la sonde de tension nous laisse entrevoir, la tension d'arc à un instant donné ne dépend donc que de la valeur de l'intensité du courant.

Revêtement nickel : tension d'arc

Le revêtement nickel sur cet acier apporte un gain conséquent de tension d'arc, environ 4,3 V. Il double également la section maximale de l'arc. Ces changements ne sont liés à la présence d'un revêtement qu'à la cathode. Le revêtement de l'anode ne modifie en rien la tension d'arc mais augmente encore légèrement la section de l'arc quand la cathode est nickelée.

Cette augmentation de tension ne semble pas liée à la section de la colonne d'arc mais bien à la présence de nickel à la surface de la cathode. En effet nous constatons que si le revêtement de nickel vient à être transpercé durant un essai, la tension d'arc chute rapidement de plusieurs volts. Nous constatons également que lors d'essais successifs sur une même paire d'électrodes, la tension d'arc de l'acier avec revêtement lors du troisième essai correspond à la tension de l'acier sans revêtement, quand bien même sa section d'arc reste la même.

L'explication défendue dans ce chapitre est donc celle d'une tension cathodique plus importante pour l'acier nickelé que pour l'acier. Malheureusement les données de tension d'arc pour le nickel et le fer disponibles dans la littérature ne permettent pas de conforter cette explication : la tension d'arc du nickel y est du même ordre de grandeur que celle du fer.

La tension d'arc du nickel présentée figure 6.14, malgré son comportement énigmatique, permet toutefois d'envisager une explication satisfaisante. Nous constatons que cette tension d'arc est proche de celle de l'acier nickelé en début de décharge puis est proche de celle de l'acier non revêtu en fin de décharge. Bien que nous ne soyons pas en mesure d'apporter une explication à ce comportement celui peut expliquer nos observations : l'acier nickelé a bien la même tension cathodique que le nickel en début de décharge. Pour une raison que nous

ignorons, cette tension cathodique chute et se rapproche de celle de l'acier, ce qui est cohérent avec les données de la littérature.

Revêtement nickel : section d'arc

L'expansion de l'arc est bien plus facile lorsque la cathode est nickelée, hormis en début de décharge, pour une intensité $I/I_0 \simeq 0{,}6$, où la section d'arc semble augmenter de façon similaire pour des électrodes en acier doux avec ou sans revêtement de nickel à la cathode (cf. figure 6.10).

Il est clair que cette section d'arc plus grande n'a pas d'impact majeur sur la tension d'arc, comme le montrent clairement les essais d'arcs répétitifs présentés figure 6.16. En revanche il est difficile de déterminer ce qui cause cette différence de comportement.

La conséquence est une fusion bien moindre des électrodes lorsque la cathode est nickelée, ce qui est clairement bénéfique pour notre application, comme expliqué ci-dessus.

Revêtement nickel : érosion du revêtement

Le comportement de l'arc pour des électrodes en acier doux nickelé est en tout point similaire à celui du matériau de référence hormis pour la pente de décroissance de la tension d'arc avec l'intensité du courant (cf. tableaux 6.5 et 6.6).

Nous proposons d'interpréter cette différence par l'évolution de la couche de nickel au cours de l'essai. En effet, l'épaisseur du revêtement de nickel déposé sur l'acier doux est suffisamment importante pour que celui-ci soit certes érodé au cours de l'essai, mais pas transpercé (cf. figure 6.5, essai 1). En revanche, l'épaisseur du revêtement de nickel du matériau de référence est bien plus faible (cf. tableau 6.4), et, comme l'atteste l'analyse des électrodes après essai, celui-ci est systématiquement transpercé durant l'essai. Or lorsque la couche de nickel est transpercée, la tension cathodique passe de celle du revêtement de nickel à celle de l'acier. La décroissance plus rapide de la tension d'arc avec l'intensité du courant observée pour le matériau de référence par rapport à l'acier doux nickelé est donc le reflet de cette évolution de la tension cathodique.

D'un point de vue pratique, concernant l'application au disjoncteur, cela signifie qu'une épaisseur plus importante permet de maintenir plus longtemps une tension d'arc élevée.

Substrat

Le substrat sous-jacent au revêtement de nickel semble avoir un impact mineur sur la tension d'arc, tant que le revêtement n'est pas transpercé. En effet,

si nous avons constaté cela pour le cuivre, qui est un matériau très différent de l'acier doux, notamment de par ses caractéristiques thermodynamiques, de transport et magnétiques, il est alors probable que cette affirmation puisse se généraliser à d'autres substrats.

La tension d'arc maximale est donc uniquement liée à la présence de nickel à la cathode.

En revanche la dépendance de cette tension d'arc avec l'intensité du courant G est identique pour l'acier doux, l'acier doux et le cuivre avec revêtement de la cathode, et le nickel (cf. figure 6.14). Le substrat a donc aucun impact sur G. Nous avons montré précédemment que le revêtement nickel n'a également aucun impact sur G, Il semblerait donc que ce coefficient dépendent uniquement ici de la géométrie des électrodes, ainsi que le suggère la littérature.

Conclusion générale

Nous nous sommes intéressés au comportement de l'arc électrique de court-circuit durant la phase de limitation du disjoncteur modulaire basse-tension. Durant cette phase l'arc électrique est fractionné en plusieurs arcs dans un assemblage de multiples plaquettes de fractionnement, appelé déion. L'établissement d'un courant électrique d'une intensité de plusieurs kiloampères dans le déion s'effectue en environ 0,1 ms durant la phase de fractionnement. Cette intensité diminue ensuite linéairement pendant environ 3 ms jusqu'à extinction de l'arc électrique.

La majeure partie des résultats que nous avons présentés ont été obtenus à l'aide d'un montage expérimental développé dans le cadre de l'étude de cette phase de limitation. Un arc électrique impulsionnel de forte intensité est généré par haute-tension entre deux plaquettes métalliques, de géométrie et dans une configuration similaires à celle des plaquettes de fractionnement, mais sans confinement.

La pertinence de ce montage, que nous avons argumentée *a priori* dans le chapitre 3 puis confortée expérimentalement dans les chapitres 4 et 5, est suffisante pour considérer avec intérêt les phénomènes mis en évidence. Nous avons présenté une vision synthétique de ces phénomènes en conclusion des chapitres 4, 5 et 6. Voici les principaux points que nous pouvons mettre en avant :

— La variation de la tension aux bornes du disjoncteur durant la phase de limitation de l'essai de court-circuit est en majeure partie liée aux caractéristiques intrinsèques de l'arc électrique.

— La tension d'arc lors de la phase de montée du courant est principalement influencée par la chimie de surface de la cathode mais également par la dynamique de montée dI/dt moyenne. La nature du substrat et la surface de l'anode semble jouer un rôle secondaire.

— La tension d'arc durant la phase de descente varie linéairement avec l'intensité du courant. Cette variation est liée à la variation du champ électrique dans la colonne et ne dépend pas de l'intensité maximale du courant. En revanche, lorsque la chimie de surface de la cathode évolue au cours de la

décharge elle entraîne une variation de la tension cathodique qui impacte alors la variation de la tension d'arc.

— Les bains fondus aux pieds d'arcs sont si proéminents comparés à la faible distance inter-électrodes qu'ils peuvent, vers la fin de la décharge, lorsque l'intensité du courant atteint quelques centaines d'ampères, se toucher et engendrer l'extinction prématurée de l'arc électrique ou son réamorçage par explosion du pont fondu ainsi créé.

Nous constatons que le revêtement de nickel électrolytique à la cathode apporte par rapport à l'acier une tension d'arc plus élevée, que nous interprétons de façon la plus simple possible comme une tension cathodique plus élevée. Aucune donnée bibliographique ne permet malheureusement d'étayer cette observation : la tension cathodique de l'acier et celle du nickel sont généralement reportées comme étant proches. De plus la comparaison entre l'acier, l'acier nickelé et le nickel ne nous a pas permis de dégager une tendance convaincante. Il convient néanmoins de rappeler que les propriétés physico-chimiques du revêtement électrolytique de nickel, bien que non connues, sont très certainement différentes de celles du nickel massif, ce qui peut expliquer cette apparente incohérence.

Lorsque le revêtement est suffisamment fin pour laisser apparaître le substrat durant la décharge, la décroissance de la tension d'arc est alors aussi liée à une transition entre la tension cathodique du revêtement (plus élevée dans le cas du nickelage) et celle du substrat. Cet effet est également visible lors de décharges successives entre les mêmes électrodes.

Nous constatons également que le revêtement de nickel électrolytique apporte par rapport à l'acier un rayon aux pieds d'arc plus important, ce qui limite la densité de puissance surfacique apportée par l'arc sur les électrodes. Cela a pour effet de limiter la fusion aux pieds d'arc ce qui réduit l'érosion, la probabilité de coalescence des bains fondus, la projection de gouttelettes de métal en fusion, mais également limite l'évaporation du revêtement lui-même et donc prolonge son effet positif sur la tension cathodique. Nous n'avons pas établi de lien de premier ordre entre l'évolution de la section de l'arc et celle de la tension d'arc au cours de la décharge.

Nous avons engagé ce travail de recherche fort du constat du manque de données disponibles dans la littérature concernant le comportement de l'arc électrique impulsionnel, dans l'air, pour un temps de montée et une distance inter-électrodes faibles, et concernant la tension d'arc des matériaux employés par les industriels dans leurs disjoncteurs pour les plaquettes de fractionnement, en particulier l'acier doux et le nickelage électrolytique.

Le montage expérimental que nous avons présenté dans le chapitre 3 nous

a permis d'apporter des éléments nouveaux sur cette problématique en abordant de façon simultanée ses différents aspects. Il conviendrait à présent, en s'appuyant sur les éléments apportés ci-dessus de poursuivre ce travail en distinguant les trois problématiques suivantes, chacune nécessitant un travail de recherche approfondi et toutes correspondant à une situation dynamique :

a) Comment se comporte un arc impulsionnel de forte intensité dans l'air ? Les électrodes sont dans une configuration modèle (*p.e.* cuivre pointe-plan) et la colonne éventuellement stabilisée, afin de se focaliser sur l'onde de courant (temps de montée, intensité maximale, temps de descente) et la distance inter-électrodes.

b) Quelle est l'influence de la fusion des électrodes sur la tension d'arc, après l'amorçage de l'arc ? L'onde de courant peut être plus simple, un créneau par exemple, éventuellement à plus faible intensité. Différents matériaux massifs peuvent être étudiés (acier, cuivre, nickel) avec l'aide de méthodes spectroscopiques ou d'imagerie rapide avec filtres interférentiels.

c) Quelle est la tension cathodique d'un revêtement et comment évolue-t-elle lors de la dégradation de celui-ci ? De nouveau, une forme d'onde de courant beaucoup plus simple peut être utilisée afin de se focaliser sur le revêtement (nature, épaisseur).

D'un point de vue expérimental deux points nécessiteraient alors une attention particulière au regard de ce que nous avons présenté ci-dessus. Tout d'abord la stabilité de l'arc à fort courant doit être améliorée afin d'obtenir des résultats plus simples à exploiter et de limiter la statistique. Un compromis difficile à trouver car cette stabilisation de l'arc se fait au détriment de la représentativité du montage expérimental. Ensuite, et c'est sans doute le point le plus important, l'accès à la tension d'arc doit être rendue possible dès les premiers instants de la décharge. Il est envisageable d'améliorer le concept existant de filtrage de l'impulsion haute-tension pour réduire la durée de l'artefact voire de proposer d'autres solutions qui se révèleront peut-être plus performantes. Une autre piste est de se passer de haute-tension et de travailler par exemple avec un transfert d'arc d'une zone d'amorçage à une zone d'étude. Cette dernière option aurait également l'avantage d'être plus réaliste par rapport à l'application.

Références

[1] "Cahiers Techniques Schneider Electric." http://www2.schneider-electric.com/sites/corporate/fr/produits-services/cahiers-techniques/cahiers-techniques.page.

[2] "Association Arc Électrique." http://www.association-arc-electrique.org.

[3] J. Quéméneur, *Etude des forces à l'origine du déplacement d'un arc électrique dans un disjoncteur basse-tension.* Thèse de doctorat, Université Toulouse 3, 2016.

[4] M. Lindmayer, E. Marzahn, A. Mutzke, T. Rüther, and M. Springstubbe, "The process of arc-splitting between metal plates in low voltage arc chutes," in *Holm Conference on Electrical Contacts*, 2004.

[5] "Installations électriques à basse tension," NF C15-100:2015-06, AFNOR, Juin 2015.

[6] "Petit appareillage électrique – Disjoncteurs pour la protection contre les surintensités pour installations domestiques et analogues – Partie 1 : Disjoncteurs pour le fonctionnement en courant alternatif," NF EN 60898-1:2003-07, UTE, Juillet 2003.

[7] "Appareillage à basse tension – Partie 2 : Disjoncteurs ," IEC 60947-2:2016-06, IEC, Juin 2016.

[8] S. Vacquié, *L'arc électrique.* Éditions Eyrolles, 2000.

[9] A. von Engel, *Ionized Gases.* AIP Press, 1965.

[10] T. E. Browne, *Circuit interruption : Theory and Techniques.* Marcel Dekker, Inc., 1984.

[11] A. Anders, *Cathodic Arcs : From Fractal Spots to Energetic Condensation.* Springer, 2008.

[12] P. G. Slade, *Electrical Contacts : Principles and Applications.* CRC Press, 1999.

[13] Y. Yokomizu, "Total voltage drops in electrode fall regions of sf6, argon and air arcs in current range from 10 to 20 000 a," *J. Phys. D : Appl. Phys.*, vol. 29, p. 1260, 1996.

[14] D. J. Dickson and A. von Engel, "Resolving the electrode fall spaces of electric arcs," *Proc. R. Soc. Lond. A*, vol. 300, p. 316, 1966.

[15] C. Kimblin, "Anode voltage drop and anode spot formation in dc vacuum arcs," *J. Appl. Phys.*, vol. 40, p. 1744, 1969.

[16] R. Hajossy, "Cathode and anode falls of arcs with fusible electrodes," *J. Phys. D : Appl. Phys.*, vol. 27, p. 2095, 1994.

[17] R. Hemmi, Y. Yokomizu, and T. Matsumura, "Anode-fall and cathode-fall voltages of air arc in atmosphere between silver electrodes," *J. Phys. D : Appl. Phys.*, vol. 36, p. 1097, 2003.

[18] A. Anders, B. Yotsombat, and R. Binder, "Correlation between cathode properties, burning voltage, and plasma parameters of vacuum arcs," *J. Appl. Phys.*, vol. 89, p. 7764, 2001.

[19] B. Jüttner, "Cathode spots of electric arcs," *J. Phys. D : Appl. Phys.*, vol. 34, p. R103, 2001.

[20] I. I. Beilis, "State of the theory of vacuum arcs," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 29, p. 657, 2001.

[21] M. Benilov, "Understanding and modelling plasma-electrode interaction in high-pressure arc discharges : a review," *J. Phys. D : Appl. Phys.*, vol. 41, p. 144001, 2008.

[22] M. Reece, "Burning voltage of arcs in high vacuum," *Nature*, vol. 181, p. 475, 1958.

[23] I. G. Kesaev, "Laws governing the cathode drop and the threshold currents in an arc discharge on pure metals," *Sov.Phys.-Tech.Phys.*, vol. 9, p. 1146, 1965.

[24] A. K. Vijh, "Effect of the electrode material on the cathode fall in a pure-metal arc," *Sov.Phys.-Tech.Phys.*, vol. 18, p. 985, 1974.

[25] M. Agarwal and R. Holmes, "Arcing voltage of the metal vapour vacuum arc," *J. Phys. D : Appl. Phys.*, vol. 17, p. 757, 1984.

[26] I. Beilis, "Cathode potential drop of an arc discharge in vapor of the electrode," *Sov. Phys. Doklady*, vol. 33, p. 125, 1988.

[27] A. Nemirovskii, "Arc voltage as a function of cathode thermophysical properties," *J. Phys. D : Appl. Phys.*, vol. 25, p. 798, 1992.

[28] G. Markov, "Cathode drop of the potential of a vacuum arc of metals," *J. Eng. Phys. Therm.*, vol. 75, p. 229, 2002.

[29] G. H. Fett, "Cathode drop of an arc," *J. Appl. Phys.*, vol. 12, p. 436, 1941.

[30] D. R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics.* CRC Press, 2008.

[31] R. L. Boxman, *Handbook of Vacuum Arc Science & Technology : Fundamentals and Applications.* Noyes Publications, 1995.

[32] S. Kou, *Welding Metallurgy.* Wiley, 2002.

[33] J. J. Lowke, "Simple theory of free-burning arcs," *J. Phys. D : Appl. Phys.*, vol. 12, p. 1873, 1979.

[34] Y. Cressault, A. Gleizes, and G. Riquel, "Properties of air–aluminum thermal plasmas," *J. Phys. D : Appl. Phys.*, vol. 45, p. 265202, 2012.

[35] L.-C. Cheng and J.-Z. Xie, "The effect of first quasi-immobility of magnetically-driven arcs between oxidized electrodes," in *International Conference on Electrical Contacts*, 1982.

[36] D. Gonzalez, H. Pursch, and F. Berger, "Experimental investigation of the interaction of interrupting arcs and gassing polymer walls," in *Holm Conference on Electrical Contacts*, 2011.

[37] J. Slepian, "Extinction of an a-c. arc," *Trans. AIEE*, p. 1398, 1928.

[38] J. Slepian, "Theory of the deion circuit-breaker," *Trans. AIEE*, vol. 48, p. 523, 1929.

[39] B. G. Jamieson, "Field tests of the deion circuit breaker," *Trans. AIEE*, p. 535, 1929.

[40] G. Mitchell, "High-current vacuum arcs part i - an experimental study," *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 117, p. 2315, 1970.

[41] J. Sherman, R. Webster, J. Jenkins, and R. Holmes, "The voltage self-generated magnetic field and current distribution in a high-current vacuum arc," *J. Phys. D : Appl. Phys.*, vol. 11, p. 379, 1978.

[42] A. P. Strom, "Long 60-cycle arcs in air," *Trans. AIEE*, vol. 65, p. 113, 1946.

[43] K. Nakayama, Y. Yokomizu, T. Matsumura, E. Kanamori, and K. Kuwamura, "Mechanism of voltage rise of high-current arc at atmospheric pressure due to deion plates," *Elec. Eng. Japan*, vol. 145, p. 1016, 2002.

[44] P. Ratovoson, *Caractérisation expérimentale d'un arc impulsionnel.* Thèse de doctorat, Université Toulouse 3, 2015.

[45] A. Mutzke, T. Rüther, M. Kurrat, M. Lindmayer, and E.-D. Wilkening, "Modeling the arc splitting process in low-voltage arc chutes," in *Holm Conference on Electrical Contacts*, 2007.

[46] G. Burkhardt, *Über das Lichtbogenverhalten in Löschblechkammern und deren Bemessung.* Thèse de doctorat, Hochschule für Elektrotechnik Ilmenau, 1962.

[47] F. Yang, M. Rong, Y. Wu, A. B. Murphy, J. Pei, L. Wang, Z. Liu, and Y. Liu, "Numerical analysis of the influence of splitter-plate erosion on an air arc in the quenching chamber of a low-voltage circuit breaker," *J. Phys. D : Appl. Phys.*, vol. 43, p. 434011, 2010.

[48] B. Swierczynski, J. J. Gonzalez, P. Teulet, P. Freton, and A. Gleizes, "Advances in low-voltage circuit breaker modelling," *J. Phys. D : Appl. Phys.*, vol. 37, p. 595, 2004.

[49] "Feuillards non revêtus laminés à froid en aciers doux pour formage à froid," NF EN 10139:1997-12, AFNOR, Décembre 1997.

[50] "Plaques, tôles et bandes en cuivre pour usages électriques," NF EN 13599:2002-05, AFNOR, Mai 2002.

Titre : Comportement d'un arc électrique impulsionnel de forte intensité : cas du disjoncteur modulaire

Mots-clés : Électrotechnique, Disjoncteurs électriques, Courts-circuits, Arc électrique

Résumé : Le disjoncteur modulaire protège les installations électriques basse-tension contre les défauts de court-circuit. L'arc électrique, généré dans la chambre de coupure du disjoncteur lors de l'ouverture du circuit, est fractionné en plusieurs arcs dans un assemblage de multiples plaquettes métalliques, afin de limiter l'intensité du courant et d'isoler le défaut.

Le travail exposé dans ce document se concentre sur la phase de limitation de l'intensité du courant de court-circuit. Une chambre d'arc modèle représente de façon simplifiée l'environnement de l'arc électrique durant cette phase. L'arc est amorcé par une impulsion haute-tension entre deux plaquettes métalliques fixes, l'onde de courant est transitoire et de forte intensité.

La pertinence du montage expérimental est validée par la confrontation des phénomènes qu'il permet d'observer à ceux rencontrés dans le disjoncteur. Une attention particulière est portée à la tension d'arc, qui est une caractéristique déterminante pour la performance de la limitation. L'influence du matériau des électrodes est étudiée, en distinguant le substrat d'un éventuel revêtement.

* * *

Title : Behaviour of a high-current transient electric arc: case of miniature circuit-breaker

Keywords : Electrical engineering, Miniature circuit breaker, Short-circuit, Electric arc

Abstract : The modular circuit breaker protects low-voltage electrical installations against short-circuit faults. The electric arc generated in the arc chamber of the circuit breaker upon opening of the circuit is divided into several arcs in an assembly of multiple metallic plates, in order to limit the current and isolate the fault.

The work set out in this paper focuses on the short-circuit current limitation phase. A model arc chamber represents in a simplified way the environment of the electric arc during this phase. The arc is initiated by a high-voltage pulse between two fixed metal plates, the current wave is transient and of high intensity.

The relevance of the experimental setup is validated by comparison of the phenomena that it allows to observe with those encountered in the circuit breaker. Particular attention is paid to the arc voltage, which is a determining feature for the performance of the limitation. The influence of the material of the electrodes is studied, distinguishing the substrate from a possible coating.

Université Paris-Saclay
Espace Technologique – Bât. Discovery
Route de l'Orme aux Merisiers – RD 128
91190 Saint-Aubin