



**HAL**  
open science

# Etude des mécanismes d'entretien et de propagation d'un arc électrique de court-circuit entre câbles endommagés dans les réseaux électriques d'aéronefs

Thibault André

► **To cite this version:**

Thibault André. Etude des mécanismes d'entretien et de propagation d'un arc électrique de court-circuit entre câbles endommagés dans les réseaux électriques d'aéronefs. Plasmas. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2017. Français. NNT : 2017TOU30050 . tel-01804832

**HAL Id: tel-01804832**

**<https://theses.hal.science/tel-01804832>**

Submitted on 1 Jun 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.



# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

---

**Présentée et soutenue par :**

**Thibault ANDRÉ**

**le** mercredi 19 avril 2017

**Titre :**

Étude des mécanismes d'entretien et de propagation d'un arc électrique de court-circuit entre câbles endommagés dans les réseaux électriques d'aéronefs

---

**École doctorale et discipline ou spécialité :**

ED GEET : Ingénierie des PLASMAS

**Unité de recherche :**

LAPLACE - UMR 5213

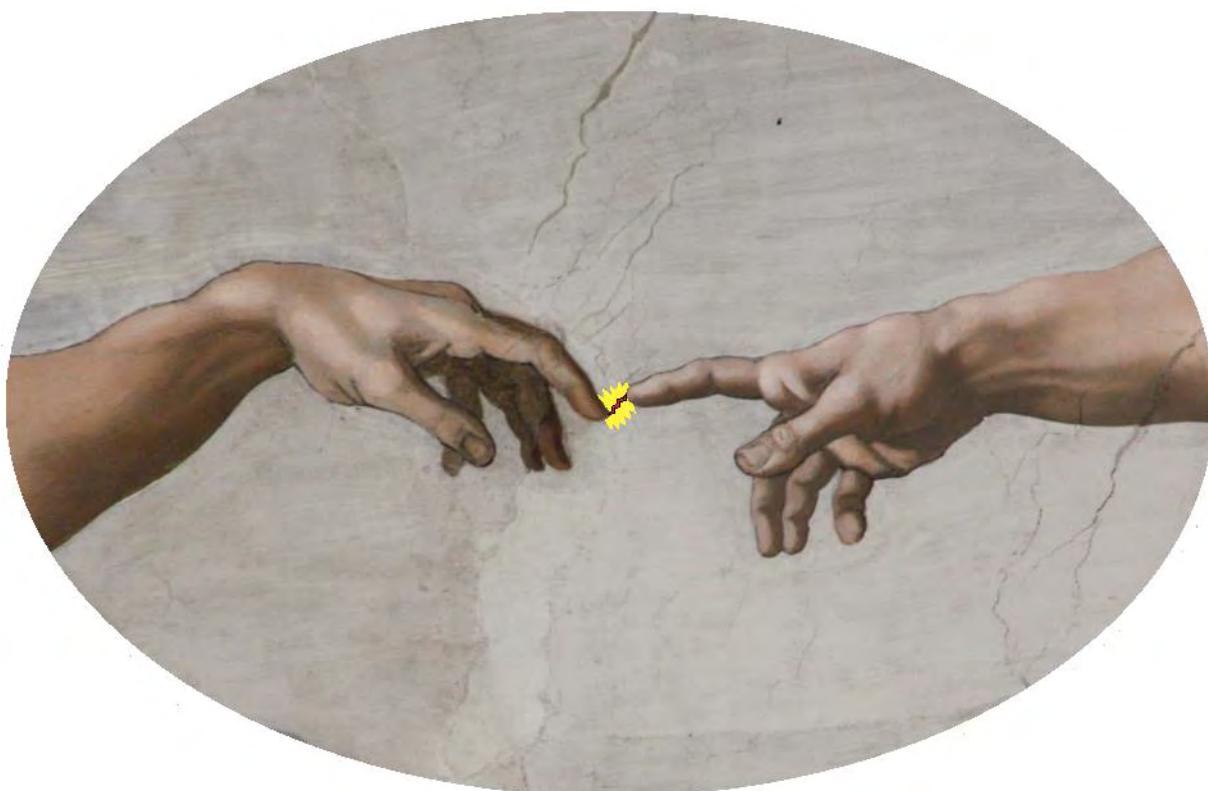
**Directeur/trice(s) de Thèse :**

Philippe Teulet, Professeur, Université Toulouse III  
Flavien Valensi, Maître de conférences, Université Toulouse III

**Jury :**

Vincent Rat, Directeur de recherche, Université de Limoges (rapporteur)  
Stéphane Pellerin, Professeur, Université d'Orléans (rapporteur)  
Virginie Dégardin, Professeur, Université Lille I (examinatrice)  
David Malec, Professeur, Université Toulouse III (examinateur)  
Thierry Zink, Ingénieur Airbus (invité)







## Remerciements

Je souhaite remercier en premier lieu l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail de thèse :

- Vincent Rat et Stéphane Pellerin, qui ont pris la peine de rapporter le manuscrit
- David Malec, qui m'a fait l'honneur de présider ce jury
- Virginie Dégardin, qui a examiné le manuscrit.

Je leur suis reconnaissant de l'attention qu'ils ont portée à cette étude, de leur bienveillance et de la qualité de nos échanges.

Je remercie particulièrement nos partenaires industriels, Thierry Zink et Roland Causse, du groupe Airbus, avec qui la collaboration a été très agréable et enrichissante. Ce projet n'aurait pu être mené à bien sans leur intérêt et leur confiance. Mes remerciements vont aussi à Pascal Peyre et à David Andissac, qui ont été nos premiers interlocuteurs.

Un immense merci à mes deux directeurs de thèse, Philippe Teulet et Flavien Valensi, pour la qualité de leur encadrement, sur le plan scientifique et technique comme sur le plan humain, au long de ces trois années et demie. La présence patiente et l'aide minutieuse de Flavien ont été déterminantes pour le déroulement efficace des campagnes expérimentales, et admirablement complétées par les conseils avisés et l'optimisme encourageant de Philippe. À tous deux, j'exprime ma profonde gratitude.

Je n'oublie pas les autres membres permanents de l'équipe, en remerciant Mathieu Masquère pour sa gentillesse et son soutien, Manitra Razafinimanana pour l'inattendu et la profondeur de nos discussions, et Yann Cressault pour son humour qui tombe toujours au bon moment ! Un merci tout particulier à Alain Gleizes, initiateur de l'étude de l'arc tracking au LAPLACE, pour sa précieuse contribution. Je remercie également Pierre Fort, technicien CNRS, pour toute l'aide qu'il nous a prodiguée dans la mise en place et l'amélioration progressive du dispositif expérimental.

Merci à tous les doctorants, de l'équipe et au-delà, que cette thèse m'a permis de rencontrer et de connaître. J'ai beaucoup apprécié la convivialité de nos moments de partage.

Enfin, ils sont cités en dernier mais ne sont assurément pas les derniers dans mon cœur, j'exprime ma reconnaissance à ma famille, à mes amis, et à toutes les personnes dont l'accompagnement, l'attachement et le dévouement discret (mais puissant !) m'ont donné de grandir et d'avancer au cours cette période de ma vie. Je rends grâce pour tout cela.

*« Duc in altum – Avance au large ! » (Luc V, 4)*



## TABLE DES MATIÈRES

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Introduction générale.....</b>  | <b>11</b> |
| <b>Chapitre I – L’arc tracking.....</b>  | <b>17</b> |
| I.1. Décharges électriques et plasma .....   | 19        |
| I.1.1. Généralités .....   | 19        |
| I.1.2. Cas de l’arc tracking .....   | 22        |
| I.2. Arcs de défaut et usure des câbles .....                                      | 22        |
| I.2.1. Arc série et arc parallèle .....  | 22        |
| I.2.2. Usure des câbles.....   | 23        |
| I.3. Techniques d’essai d’arc tracking.....  | 24        |
| I.3.1. Banc d’essai .....  | 24        |
| I.3.2. Méthodes d’amorçage.....  | 26        |
| I.4. Influence des conditions extérieures sur l’amorçage de l’arc .....            | 27        |
| I.4.1. Influence des conditions environnementales .....                            | 27        |
| I.4.2. Influence du courant .....  | 30        |
| I.5. Caractéristiques d’extinction de l’arc et de son réamorçage.....              | 30        |
| I.6. Endommagement dû à l’arc tracking .....                                       | 31        |
| I.7. Systèmes de protection et de détection .....                                  | 32        |
| I.7.1. Généralités .....   | 32        |
| I.7.2. Les AFCI (Arc Fault Circuit Interrupters) ou disjoncteurs intelligents..... | 33        |
| I.7.3. Autres technologies.....  | 33        |
| I.8. Contexte aéronautique et justification de l’étude.....                        | 35        |
| I.9. Conclusion .....  | 37        |
| <b>Chapitre II – Dispositif expérimental.....</b>                                  | <b>39</b> |
| II.1. Schéma général.....  | 41        |
| II.2. Moyens d’essai .....   | 42        |
| II.2.1. Enceinte .....   | 42        |
| II.2.1.1. Caractéristiques de l’enceinte .....                                     | 42        |
| II.2.1.2. Dimensionnement de l’enceinte .....                                      | 42        |
| II.2.2. Matériel expérimental.....   | 49        |
| II.2.3. Générateur .....   | 49        |

|   |           |
|---|-----------|
| II.2.4. Pompe et vannes .....   | 50        |
| II.3. Câbles testés .....   | 51        |
| II.4. Procédure d'essai et campagne de tests effectuée .....              | 52        |
| II.4.1. Préparation.....  | 52        |
| II.4.2. Déclenchement d'un essai et acquisition des données .....         | 53        |
| II.4.3. Récapitulatif de la campagne effectuée .....                      | 54        |
| II.5. Moyens d'acquisition .....  | 55        |
| II.5.1. Sondes de courant et de tension.....                              | 55        |
| II.5.2. Capteurs de flux radiatif .....                                   | 56        |
| II.5.3. Imagerie rapide .....   | 57        |
| II.5.4. Caméra infrarouge .....   | 58        |
| <b>Chapitre III – Résultats expérimentaux.....</b>                        | <b>61</b> |
| III.1. Observations générales.....  | 63        |
| III.2. Données électriques.....   | 64        |
| III.2.1. En l'absence de transfert de l'arc à la plaque en aluminium..... | 64        |
| III.2.1.1. En régime alternatif.....                                      | 64        |
| III.2.1.2. En régime continu .....  | 67        |
| III.2.2. En présence de transfert de l'arc à la plaque en aluminium.....  | 68        |
| III.3. Masse ablatée et taux d'érosion .....                              | 68        |
| III.4. Flux rayonné.....  | 70        |
| III.5. Imagerie rapide.....   | 72        |
| III.6. Conclusion.....  | 77        |
| <b>Chapitre IV – Bilan de puissance.....</b>                              | <b>79</b> |
| IV.1. Bilan général .....   | 81        |
| IV.2. Puissance totale .....  | 81        |
| IV.2.1. Calcul et résultats .....   | 81        |
| IV.2.2. Répartition de la puissance totale.....                           | 83        |
| IV.3. Puissance transférée aux électrodes .....                           | 84        |
| IV.3.1. Puissance totale transférée aux électrodes .....                  | 84        |
| IV.3.1.1. Généralités .....   | 84        |
| IV.3.1.2. Estimation de la chute de tension aux électrodes.....           | 84        |

|   |            |
|---|------------|
| IV.3.1.3. Résultats .....   | 88         |
| IV.3.2. Fusion et vaporisation des câbles .....                                       | 89         |
| IV.3.2.1. Calcul .....  | 89         |
| IV.3.2.2. Résultats .....   | 92         |
| IV.3.3. Conduction thermique dans les câbles et rayonnement .....                     | 94         |
| IV.4. Puissance déposée dans la colonne d'arc .....                                   | 94         |
| IV.4.1. Calcul .....  | 94         |
| IV.4.2. Généralités sur le rayonnement et données des capteurs de flux radiatif ..... | 94         |
| IV.4.3. Coefficient d'émission nette .....  | 97         |
| IV.4.3.1. Généralités .....   | 97         |
| IV.4.3.2. Application à notre cas.....  | 98         |
| IV.4.4. Synthèse sur la puissance rayonnée .....                                      | 104        |
| IV.4.5. Convection et conduction dans la colonne.....                                 | 105        |
| IV.5. Essais en régime continu.....   | 105        |
| IV.6. Synthèse du bilan de puissance .....  | 106        |
| <b>Chapitre V – Étude des interactions de l'arc avec la plaque en aluminium.....</b>  | <b>111</b> |
| V.1. Généralités sur la plaque en aluminium et le transfert de l'arc .....            | 113        |
| V.1.1. La plaque dans le dispositif expérimental .....                                | 113        |
| V.1.2. Le transfert de l'arc à la plaque en aluminium .....                           | 113        |
| V.2. Distances de ségrégation .....   | 114        |
| V.2.1. Description de l'étude.....  | 114        |
| V.2.2. Résultats .....  | 116        |
| V.3. Thermographie infrarouge.....  | 122        |
| V.3.1. Description de l'étude.....  | 122        |
| V.3.2. Résultats .....  | 123        |
| V.3.3. Conclusion.....  | 127        |
| <b>Conclusion générale et perspectives .....</b>                                      | <b>129</b> |
| <b>Références .....</b>   | <b>133</b> |
| <b>ANNEXE A – L'enceinte .....</b>  | <b>139</b> |
| <b>ANNEXE B – Le générateur .....</b>   | <b>143</b> |



## Introduction générale

Un court-circuit peut être à l'origine d'un arc électrique, qui se manifeste en général sous la forme d'une décharge à fort courant. Lorsque ce problème se produit entre deux câbles d'un réseau électrique, il existe un risque que l'arc se maintienne quelques dizaines à quelques centaines de millisecondes et se propage le long des câbles. Ce phénomène, appelé « arc tracking », s'accompagne de l'ablation des câbles, par la fusion et la vaporisation partielle du métal et la dégradation complète de l'isolant, mais aussi de l'endommagement de l'environnement immédiat par la projection de gouttelettes métalliques en fusion et de résidus incandescents. Ainsi, les conséquences ne sont pas seulement la coupure du courant et de l'information qui passait par le circuit, mais aussi les dommages que l'arc est susceptible d'occasionner, qui peuvent être très importants.

Tous les réseaux électriques sont concernés par ce problème, mais celui-ci se révèle particulièrement critique dans le domaine aéronautique, en raison du risque pour les personnes. Dans un avion, toutes les routes électriques font l'objet d'une redondance, ce qui limite les conséquences de la coupure d'un câble ou d'un harnais sur l'alimentation des différents systèmes. Par ailleurs, la durée d'un tel phénomène est limitée par des dispositifs de protection, ou par la rupture du circuit du fait de l'arc lui-même, ce qui empêche que les dégâts soient trop importants. Cependant, si les disjoncteurs utilisés réagissent d'autant plus vite que la surintensité du courant détectée est élevée, le temps de déclenchement peut être suffisamment long pour que le phénomène d'arc tracking ait eu le temps de se produire.

L'arc tracking est étudié depuis longtemps, et il a été montré que la nature de l'isolant se trouvait être la principale cause du maintien et de la propagation de l'arc. En effet, l'isolant principalement utilisé pendant de nombreuses années était le Kapton<sup>TM</sup>, un polyimide dont les atomes C, H, O et N étaient de nature à favoriser l'arc tracking. Depuis, le polyimide a été remplacé par un matériau à base de PTFE, c'est-à-dire un polymère de C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>. La présence d'atomes de fluor (élément fortement électronégatif) a considérablement diminué les risques, et ce remplacement a pu être considéré comme une solution satisfaisante à la question de l'arc tracking.

Cependant, la nouvelle génération d'avions s'accompagne de spécifications nouvelles qui imposent de se pencher à nouveau sur ce problème. En effet, la conception des avions modernes prend davantage en compte le confort des passagers et leurs besoins, tandis que les nécessités financières ainsi que les préoccupations d'ordre écologique obligent à faire des efforts de réduction de poids et d'augmentation de la puissance embarquée. Le développement d'appareils plus légers constitue une optimisation considérable des systèmes aéronautiques en ce qui concerne la consommation de carburant et donc l'impact sur l'environnement, ces considérations étant étroitement liées avec l'exigence de concevoir des avions plus électriques. Ainsi, la nouvelle conception d'aéronefs passe notamment par le remplacement

des circuits hydrauliques et d'air comprimé par des voies électriques, le remplacement du métal par des matériaux composites carbonés pour la structure, le remplacement du cuivre par de l'aluminium pour les câbles électriques, l'augmentation des niveaux de tension et l'utilisation beaucoup plus importante de courant continu.

En conséquence de ces orientations, le problème de l'arc tracking doit à nouveau être étudié par les concepteurs et les constructeurs d'avions ainsi que par les fabricants de câbles et de harnais. Le risque est principalement lié au vieillissement et à l'usure de l'isolant, et différentes études ont été menées afin de caractériser ce qui peut conduire à cette détérioration, et ainsi favoriser le risque d'arc tracking. Une autre voie de recherche, complémentaire, vise à limiter les risques de maintien et de propagation des arcs, par des systèmes de détection et de coupure de plus en plus performants, en vue d'une extinction de l'arc la plus rapide possible. En fait, les ingénieurs ne cherchent pas à empêcher totalement l'arc tracking, car la probabilité que ce phénomène se produise, bien qu'infime, ne pourra jamais être tout à fait nulle. Il s'agit alors de partir de l'hypothèse que l'arc tracking va effectivement se produire, et de faire en sorte que les conséquences sur le réseau électrique ainsi que les dommages causés soient les plus circonscrits possibles.

L'étude présentée dans ce manuscrit de thèse a été réalisée en collaboration avec la société Airbus Group. Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un programme de recherche plus large lancé par Airbus en 2013 : le projet MEFIC (pour Mastering of Electrical Failure and Installation Consequences). L'objectif général de ce programme était d'étudier les conséquences de l'apparition d'un arc de défaut entre câbles sur les installations et matériaux environnants (harnais filaires et voilure en aluminium ou matériau composite notamment). Le projet MEFIC comprenait quatre « work packages ». Les travaux réalisés lors de cette thèse correspondent aux « work packages » 1 (WP1 : Arcing Test Bench) et 3 (WP3 : Arc and Plasma Phenomenology Studies and Testings).

L'objectif est de mettre en place un dispositif expérimental dédié à des tests d'arc tracking entre deux câbles (identiques à ceux qui sont employés dans le câblage des avions), au moyen d'un générateur conçu selon des spécifications propres au domaine aéronautique. L'alimentation développée permet ainsi de générer un signal continu ou alternatif (d'une fréquence réglable entre 360 et 800 Hz), de courant et de tension ajustables, pendant une durée réglable jusqu'à 10 secondes. Trois types de câbles sont testés, un en aluminium et deux en cuivre. En régime continu, les deux câbles sont reliés au + et au - de l'alimentation, et à deux phases en régime alternatif. Le transfert éventuel de l'arc depuis les câbles vers une structure adjacente dans l'avion a été étudié au moyen d'une plaque en aluminium placée en regard de l'échantillon de câbles, au niveau de la partie volontairement endommagée, là où se produit l'arc. Cette plaque est connectée au neutre de l'alimentation en régime alternatif, et au - en régime continu. Tous les essais ont été réalisés dans une enceinte fermée de 270 litres, soit à pression atmosphérique, soit à 95 mbar, afin de reproduire les conditions de pression

réduite à haute altitude. Le volume de cette enceinte a été déterminé suite à un dimensionnement spécifique, de sorte que la montée en pression due à l'arc soit limitée au cours de l'essai.

Chaque test s'accompagne de l'acquisition systématique des signaux de courant et de tension, et deux capteurs de flux radiatif sont positionnés autour de l'arc. Une caméra rapide permet la visualisation du comportement de l'arc au cours de l'essai. Enfin, les échantillons de câbles sont pesés avant et après chaque test. Un bilan de puissance est réalisé pour les différentes configurations testées (courant, pression, câbles), afin d'estimer la répartition de la puissance totale entre les électrodes (c'est-à-dire les câbles) et la colonne de plasma.

Le chapitre I présente le phénomène d'arc tracking et les éléments de la physique des décharges et des arcs électriques pertinents pour son étude. Une étude bibliographique sur cette problématique et les paramètres qui s'y rapportent (le déclenchement de l'arc, l'usure des câbles, les modes de détection et de protection, etc.) est ensuite présentée.

Le dispositif expérimental permettant de réaliser des essais d'arc tracking est décrit dans le chapitre II. Ce dispositif comprend les moyens d'essais, à savoir le générateur et l'enceinte basse pression, et les équipements de mesure et d'acquisition des données. Les essais sont lancés depuis un ordinateur, qui permet le déclenchement simultané du générateur et du système d'acquisition de données (courant, tension, flux rayonné et imagerie).

Les résultats expérimentaux sont présentés dans le chapitre III. Ils comprennent tout d'abord les données de courant et de tension, dont la mesure est systématique lors des essais, ainsi que les données de flux rayonné (mesurées au moyen de capteurs de flux radiatif). Ils sont accompagnés de mesures de masse ablatée au cours de l'essai, et d'imagerie rapide. Cette dernière est réalisée au moyen de deux caméras, l'une positionnée face à l'arc et l'autre au-dessus, afin de visualiser la géométrie de l'arc.

Le chapitre IV décrit le bilan de puissance réalisé. La puissance totale, calculée grâce aux mesures électriques, se partage entre les électrodes et la colonne d'arc. La part transférée aux électrodes est estimée au moyen de la valeur de la chute de tension aux électrodes et du courant. La partie de cette puissance aux électrodes qui est à l'origine de la fusion et de la vaporisation des câbles (le matériau isolant comme le métal) est estimée grâce à un calcul thermodynamique à partir de la masse de câble ablatée, en considérant que la totalité a été fondue et que 1% a été vaporisé. La puissance transmise à la colonne d'arc est majoritairement rayonnée. Cependant, la partie émise en dessous de 200 nm (appelée Vacuum Ultra-Violet, ou VUV), ne peut être mesurée car elle est absorbée dès les premiers microns, par photodissociation des molécules de dioxygène dans l'air. Afin de pallier ce problème, nous avons recours au calcul du coefficient d'émission nette, qui prend en compte la totalité

du rayonnement émis par le plasma, et permet d'avoir accès à la part de VUV, à partir d'une estimation de la température et de la composition du plasma d'arc.

Le chapitre V porte sur le transfert de l'arc à la plaque en aluminium. La possibilité de ce transfert est étudiée en fonction de la distance entre les câbles et cette plaque, pour différentes durées d'arc jusqu'à 0,5 seconde. L'analyse du transfert à la plaque se base également sur un critère de température en face arrière de la plaque. Cette température a été estimée qualitativement en fonction de l'aspect du matériau et une campagne de mesures par thermographie infrarouge, réalisée pour quelques cas représentatifs, a permis de valider quantitativement ces observations.





# Chapitre I – L'arc tracking

Un arc électrique entre deux câbles d'un réseau électrique, à l'origine d'un phénomène d'arc tracking, est le plus souvent dû à l'usure de l'isolant des câbles. Cette usure résulte du vieillissement et des conditions extérieures (température, environnement, etc.), auxquels peut s'ajouter la formation d'un film conducteur, solide ou liquide, entre les câbles, favorisant l'amorçage d'un arc. Si celui-ci n'est pas détecté, ou si la coupure est trop tardive, les dommages sur l'environnement immédiat peuvent être très importants. Le système de protection privilégié contre ce danger est le disjoncteur, qui déclenche la coupure du circuit lorsqu'il détecte une augmentation du courant. Des disjoncteurs spécifiques aux défauts d'arc ont été développés, afin de prendre en compte les caractéristiques propres de l'amorçage d'un arc.



## I.1. Décharges électriques et plasma

### I.1.1. Généralités

L'application d'une tension continue entre deux électrodes (à une pression comprise entre 0,1 et 10 Torr, c'est-à-dire entre 0,13 et 13 mbar) permet de décrire différents régimes de décharge continue. Ces différents régimes de fonctionnement sont présentés sur la figure I-1, pour des courants compris entre  $10^{-18}$  et une centaine d'ampères, obtenus en faisant varier une résistance de charge à laquelle est appliquée la force électromotrice du générateur.

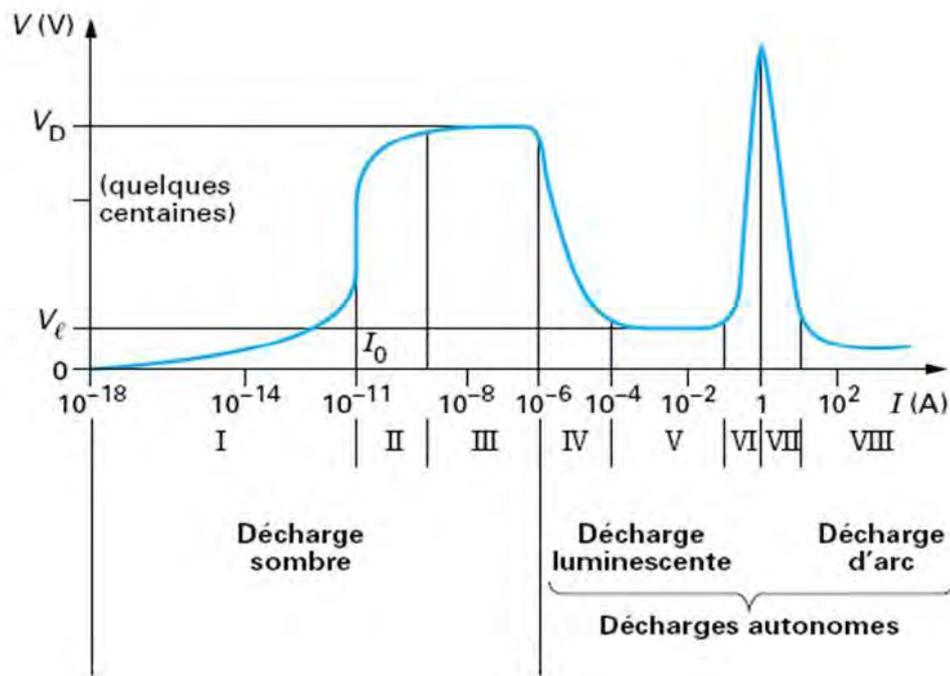


Figure I-1. Caractéristique courant-tension et différents régimes de la décharge à courant continu [1].

Les régions I et II de la figure I-1 correspondent à une décharge non autonome, le champ électrique est alors trop faible pour provoquer une ionisation par chocs électroniques, la décharge ne peut donc exister qu'en présence d'une source extérieure (rayons cosmiques, sources radioactives, émission photoélectrique ou thermoélectrique). L'augmentation du potentiel visible sur la région II correspond à une multiplication (ou avalanche) électronique, qui consiste en une ionisation en cascade des atomes et des molécules, comme le montre la figure I-2. L'augmentation du champ électrique interélectrode provoque ainsi une accélération croissante des électrons émis par la cathode, qui ont alors une énergie suffisante pour ioniser les particules du milieu. Ces ionisations donnent naissance à de nouveaux électrons migrant vers l'anode, et eux-mêmes à l'origine de nouvelles ionisations [2]. À partir de la région III, la décharge est auto-entretenu, c'est-à-dire qu'une source d'électrons extérieure n'est plus nécessaire. La tension correspondante  $V_D$  est appelée tension disruptive.

La tension disruptive est liée à la pression du gaz et à la distance interélectrode, selon une relation appelée loi de Paschen. Cette loi est habituellement représentée en traçant  $V_D$  en fonction du produit de la pression par la distance interélectrode (voir la figure I-3 pour le cas de l'air à 20°C).

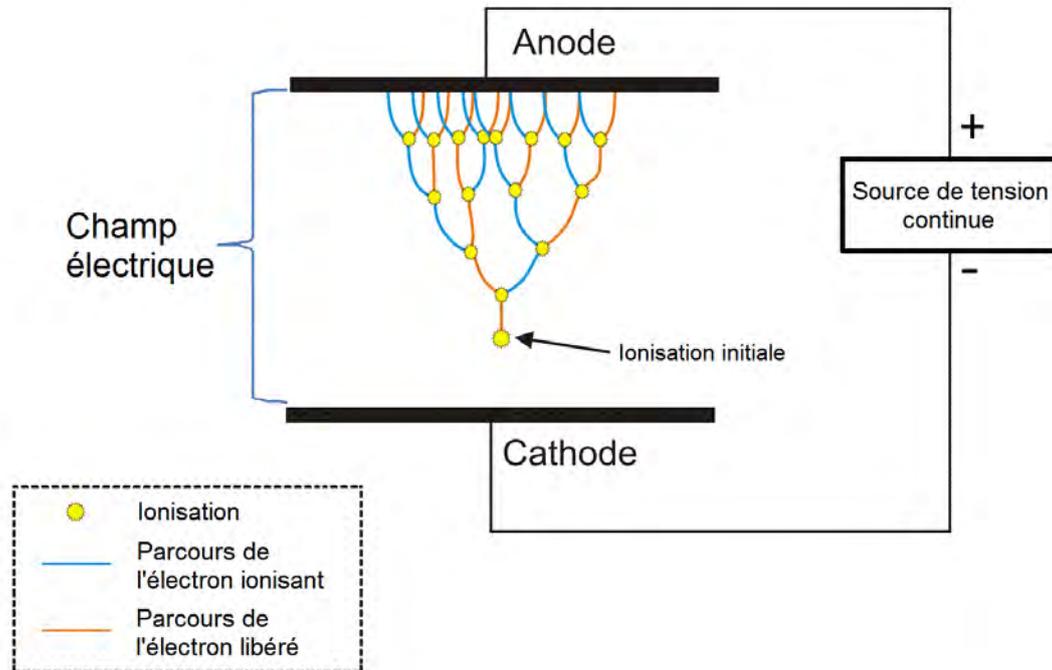


Figure I-2. Avalanche électronique.

Les zones IV, V et VI correspondent à une décharge luminescente, tandis que le régime d'arc est atteint dans la zone VIII. Elle se caractérise notamment par la diminution de la surface de la gaine cathodique. De ce fait, les cations qui sont issus des ionisations et migrent vers la cathode chauffent notablement cette dernière de façon localisée, faisant augmenter le phénomène de thermoémission, déjà présent lors de la phase de décharge luminescente.

Un arc électrique peut ainsi être défini comme une décharge électrique lumineuse à fort courant entre deux conducteurs. Cette décharge stable et auto-entretenu, est maintenue grâce à une différence de potentiel suffisante par rapport à l'énergie d'ionisation du gaz. Le courant qui traverse le milieu interélectrode entraîne une forte élévation de la température (plus de 10000 K). L'amorçage d'un arc électrique suppose que la tension et le courant soient suffisants.

La figure I-4 présente de façon simplifiée la répartition de la tension d'arc entre cathode et anode. La région des gaines, à proximité des électrodes, est très grossie, puisque ces zones  $d_c$  et  $d_a$  ont en général une épaisseur inférieure à 100 microns. En première approximation, le champ électrique dans la colonne d'arc (c'est-à-dire la région centrale, qui constitue un plasma thermique) est assez constant et uniforme, si bien que la tension croît régulièrement de la cathode vers l'anode.

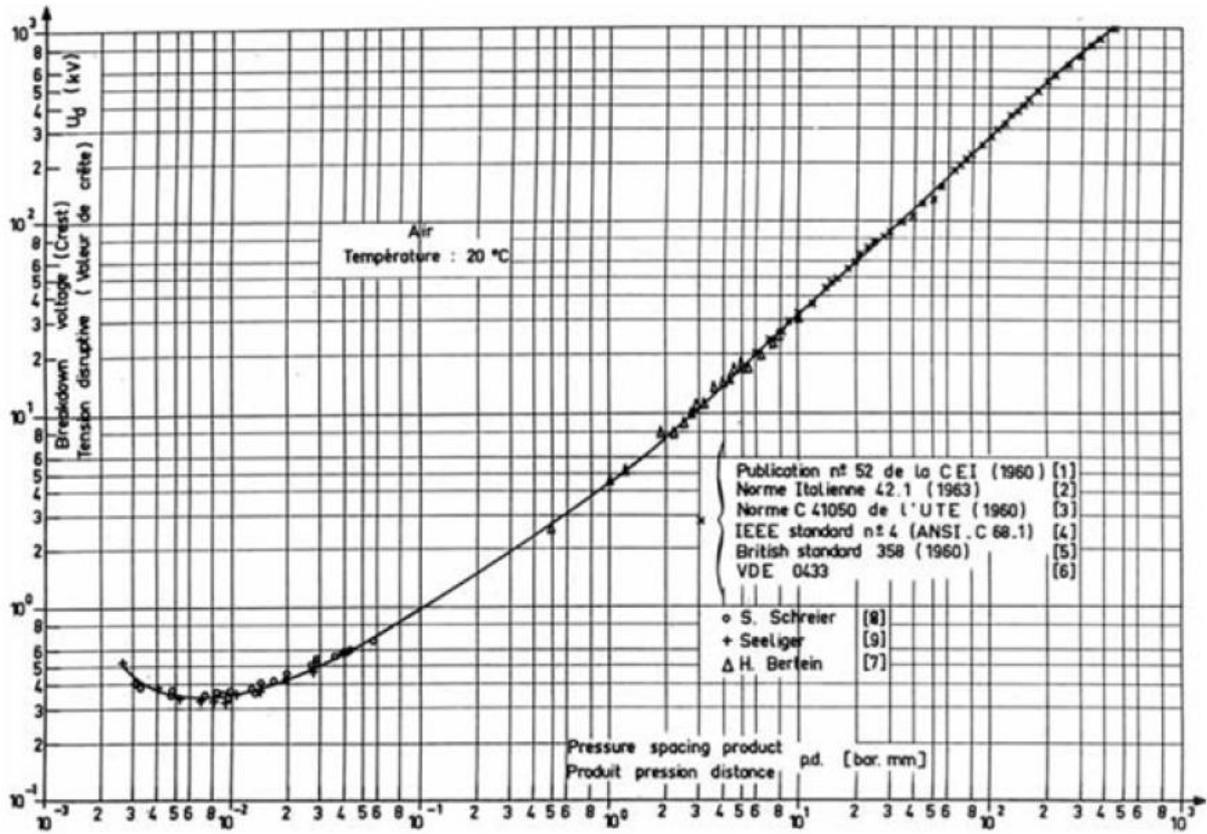


Figure I-3. Courbe de Paschen pour l'air à 20°C [3].

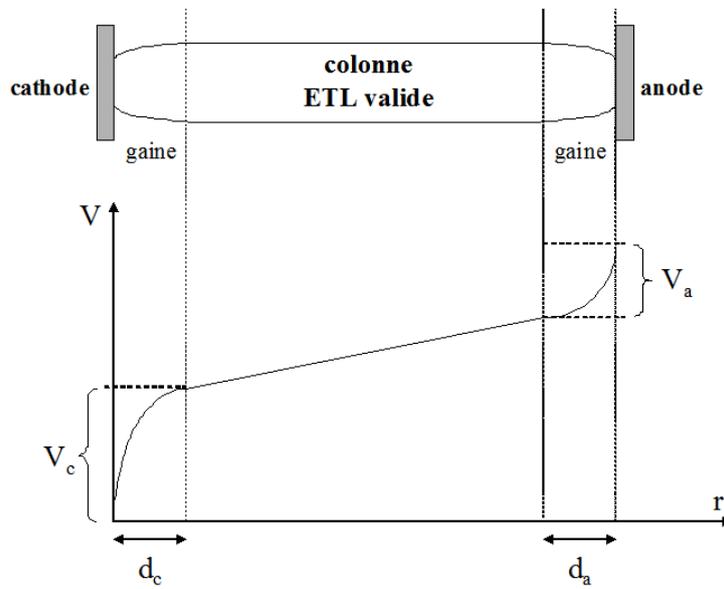


Figure I-4. Répartition approximative du potentiel entre cathode et anode d'un arc électrique [4].

### I.1.2. Cas de l'arc tracking

L'initiation du phénomène d'arc tracking, est dû à l'amorçage d'un arc entre deux câbles d'un réseau, dont la gaine isolante est détériorée. Cet arc de court-circuit évolue en phase dite « arc tracking » [5] lorsque l'arc se maintient entre les câbles et se propage le long de ceux-ci, en les dégradant par érosion. La durée de ce phénomène (de quelques millisecondes à quelques centaines de millisecondes) est limitée par le déclenchement d'un système de protection (en général un disjoncteur), qui ouvre le circuit dans un temps d'autant plus bref que l'intensité du courant est importante. Néanmoins, il peut être à l'origine d'un endommagement très important des structures environnantes.

## I.2. Arcs de défaut et usure des câbles

### I.2.1. Arc série et arc parallèle

Il existe deux types d'arcs de défaut : l'arc série et l'arc parallèle. L'arc série [6] (voir figure I-5.a.) se produit à l'intérieur d'un câble (notamment dans le cas de fils conducteurs sectionnés), ou au niveau de connexions mal serrées. Cet événement est dangereux car le courant d'arc demeure bien inférieur aux valeurs de la courbe de déclenchement des appareils de protection. La chaleur générée par le pont conducteur est susceptible de carboniser l'isolant à proximité de l'arc, favorisant des arcs intermittents et conduisant à des arcs stables, qui, outre des chutes de tension de la charge et la défaillance des composants, peuvent aboutir à une inflammation.

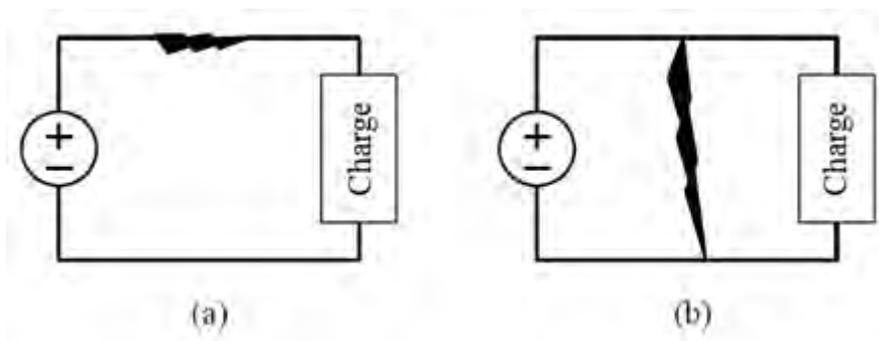


Figure I-5. Arc de défaut en série (a), et en parallèle (b).

Quant à l'arc parallèle [7] (voir figure I-5.b.), auquel correspond le phénomène d'arc tracking, il se produit typiquement entre deux câbles adjacents. Ce type d'arc se révèle plus dangereux que les arcs série, avec une énergie dégagée bien plus élevée et des températures qui dépassent les 10000 K. La puissance est limitée par l'impédance de la source, celle du câble et celle de l'arc lui-même. La dégradation de l'isolant, par pyrolyse ou carbonisation,

crée des chemins carbonés conducteurs, en même temps qu'elle expose du métal chaud, dont des gouttes en fusion peuvent être projetées et atteindre des matériaux inflammables.

### I.2.2. Usure des câbles

Les câbles d'une installation électrique sont soumis à diverses contraintes [8], [9], qui sont de nature à les détériorer progressivement, notamment l'isolant, rendant possible le phénomène d'arc tracking. Ces contraintes sont d'ordre :

- électrique : comme dans le cas de surintensités (qui provoquent une surchauffe de l'isolant), de décharges partielles ou de pertes diélectriques
- mécanique : tels les frottements, la vibration des connecteurs ou les contraintes de cisaillement, qui peuvent provoquer des craquellements, voire des ruptures
- environnemental : il s'agit notamment des variations de température (qui causent l'expansion ou la contraction des matériaux), de l'humidité ambiante (qui peut en outre être à l'origine de la formation de moisissure), mais aussi des attaques chimiques, du rayonnement ultra-violet, etc.

En plus de cette dégradation de l'isolant, un film conducteur, soit solide (comme des poussières métalliques ou un bout de métal), soit liquide, peut être présent entre deux câbles endommagés de potentiel différent, ou entre un câble endommagé et la structure adjacente, et favoriser des courts-circuits. Ce film conducteur est susceptible d'être contaminé par une atmosphère enrichie en sel (dans le cas de régions côtières), ou par des poussières carbonées issues du carburant.

Des tests de défaut [9] ont été menés afin de comparer le comportement de câbles neufs à celui de câbles utilisés depuis quatre ans, et ils révèlent notamment que la résistance de l'isolant à un arc de défaut est plus longue pour un câble neuf. Par ailleurs, la probabilité de réamorçage est moindre.

Vis-à-vis de ces conditions extérieures auxquelles les câbles sont soumis, la composition de l'isolant joue un grand rôle dans l'occurrence éventuelle du phénomène d'arc tracking. Ainsi, un bon matériau isolant doit être résistant face aux contraintes mentionnées précédemment, à savoir mécaniques, électriques et environnementales, mais aussi être léger et peu encombrant. Les principaux matériaux utilisés en aéronautique sont : les polyimides (en particulier le Kapton<sup>TM</sup>), le polytétrafluoroéthylène (PTFE), l'éthylène tétrafluoroéthylène (ETFE) et le fluoroéthylène propylène (FEP).

Lors d'une étude menée par Hammoud et al. [10], six types de câbles ont été testés, de composition d'isolant différente (PTFE, polyimides, et plusieurs combinaisons comprenant également du ETFE ou du FEP). Ces tests, menés à 400 Hz, à 23°C d'une part, et à 200°C d'autre part ont notamment mis en évidence la diminution de la rigidité diélectrique à haute

température par rapport à la température ambiante, qui s'explique par le « softening » et la dégradation du polymère, et par l'augmentation de la perte diélectrique. De plus, la dégradation des isolants s'accélère avec l'augmentation du stress diélectrique.

Chez Airbus, les isolants des câbles sont principalement constitués de polyimides et de PTFE. Cette combinaison s'explique par les bonnes propriétés thermiques des polyimides, leur grande rigidité diélectrique, leur caractère peu inflammable, leur légèreté et leur grande résistance à l'abrasion. Ils se révèlent en revanche désavantageux sur d'autres plans, notamment lorsqu'ils sont en contact avec de l'eau ou d'autres liquides, ou lorsqu'ils sont soumis à des contraintes mécaniques. Si un arc électrique se produit, son maintien, sa propagation ou son réamorçage se trouvent favorisés en raison du dépôt d'atomes de carbone sur les conducteurs lors de l'ablation. Le PTFE, quant à lui, est plus résistant à l'arc tracking en raison de la présence d'atomes de fluor, qui est un halogène donc fortement électronégatif. Il est également résistant aux très hautes températures. En revanche, il a des propriétés mécaniques peu optimales et demeure un matériau lourd.

### **I.3. Techniques d'essai d'arc tracking**

#### **I.3.1. Banc d'essai**

Un banc de test dédié au phénomène d'arc tracking se compose typiquement des éléments suivants :

- une source d'alimentation, en régime continu ou alternatif, avec une résistance variable afin d'obtenir le courant d'arc voulu
- un échantillon, comprenant au moins deux câbles préalablement endommagés de façon volontaire
- un équipement de mesure (courant et tension) et généralement d'imagerie.

Un dispositif simple est présenté en figure I-6. Certains dispositifs, pour des études prenant en compte l'influence de la pression, peuvent comporter une enceinte, dans laquelle est placé l'échantillon. C'est par exemple le cas pour le dispositif présenté en figure I-7, où par ailleurs l'échantillon est constitué d'un toron complet de sept câbles, dont deux sont volontairement endommagés, en retirant complètement l'isolant sur une longueur d'environ 3mm. Ces travaux sur l'arc tracking portent principalement sur la comparaison de différents types de câbles, et en particulier différents isolants. Enfin, bien qu'il ne s'agisse pas d'arc tracking, la figure I-8 présente un banc d'essai pour des arcs série, où l'âme métallique de l'échantillon est sectionnée, tandis que l'isolant est maintenu autour de la section.

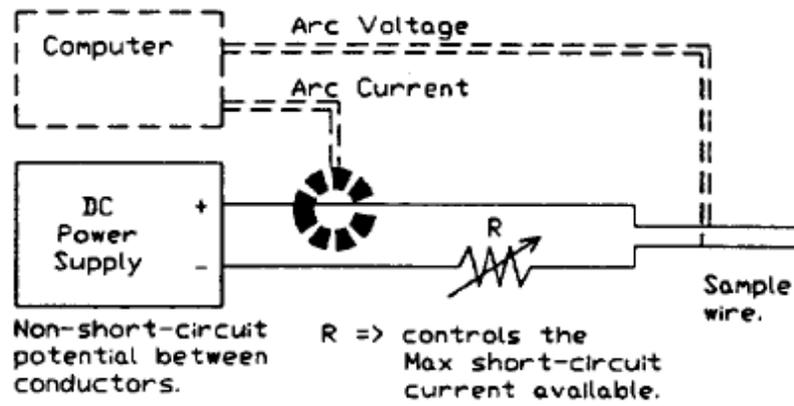


Figure I-6. Dispositif typique de banc d'essai d'arc tracking [11].

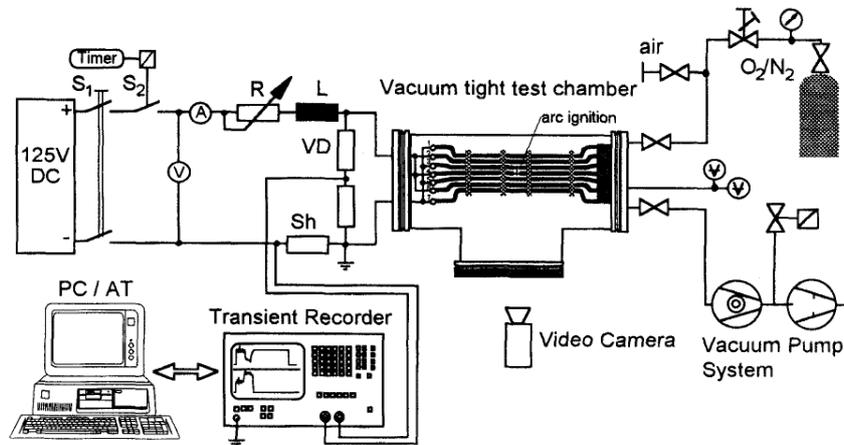


Figure I-7. Dispositif de test comprenant une enceinte [12].

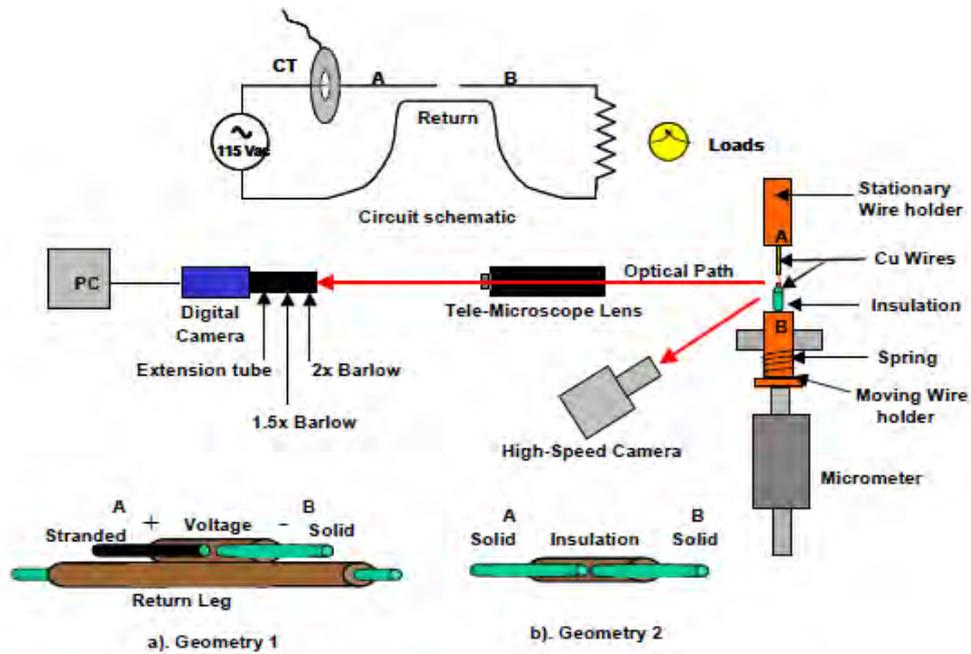


Figure I-8. Dispositif de test d'arcs série [13].

### I.3.2. Méthodes d'amorçage

Comme il a été décrit précédemment, le film conducteur entre deux câbles peut être solide ou liquide, selon l'environnement et la configuration des câbles. Partant de ce constat, deux types de méthode d'essai ont été développés : la méthode à sec (« Dry arc tracking ») et la méthode humide (« Wet arc tracking »).

Lors d'un phénomène d'arc tracking sec, le film conducteur présent entre les câbles endommagés a une résistance assez faible (matériau métallique). Les tests normalisés [14] qui en relèvent visent à faire apparaître ce qui se produit lors d'une usure progressive, en particulier dans le cas de frottements répétés contre une structure. Pour ce faire, on met en œuvre le glissement d'une lame en aluminium contre deux des sept câbles d'un toron, connectés à deux phases d'un réseau triphasé (voir la figure I-9).

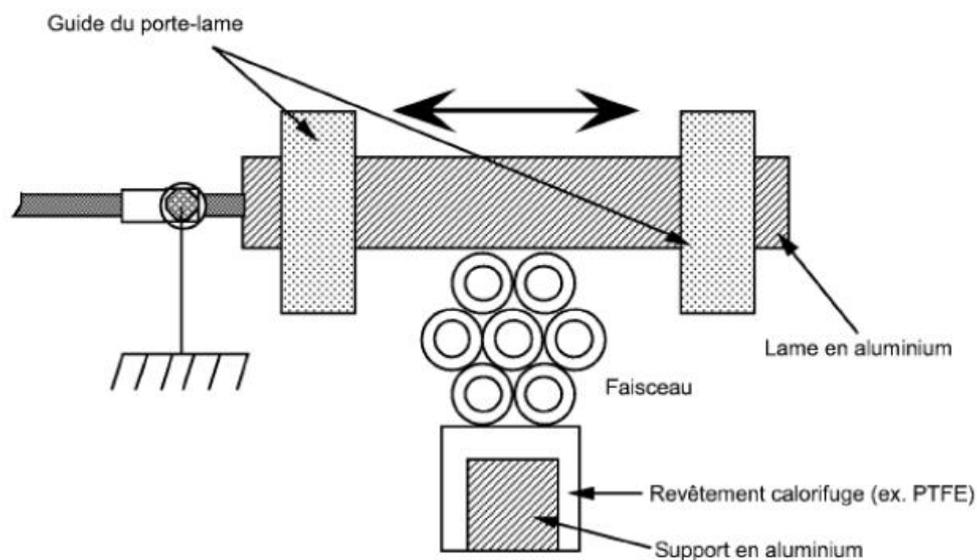


Figure I-9. Méthode d'amorçage à sec [14].

En ce qui concerne l'arc tracking dit humide, le film conducteur entre les câbles peut avoir une résistance élevée. La méthode de test normalisée [15] évaluant le comportement de l'isolant dans ce cas met en jeu un toron de sept câbles coupé et dénudé à une extrémité, au-dessus duquel est fixée une pipette remplie d'une solution aqueuse de chlorure d'ammonium à 2%. La chute de gouttes de cette solution sur la fente située entre les deux câbles supérieurs, connectés à deux phases d'un réseau triphasé, provoque un arc entre ceux-ci (voir la figure I-10). La technique d'amorçage que nous avons utilisée pour notre étude (voir chapitre II) s'apparente à cette dernière méthode.

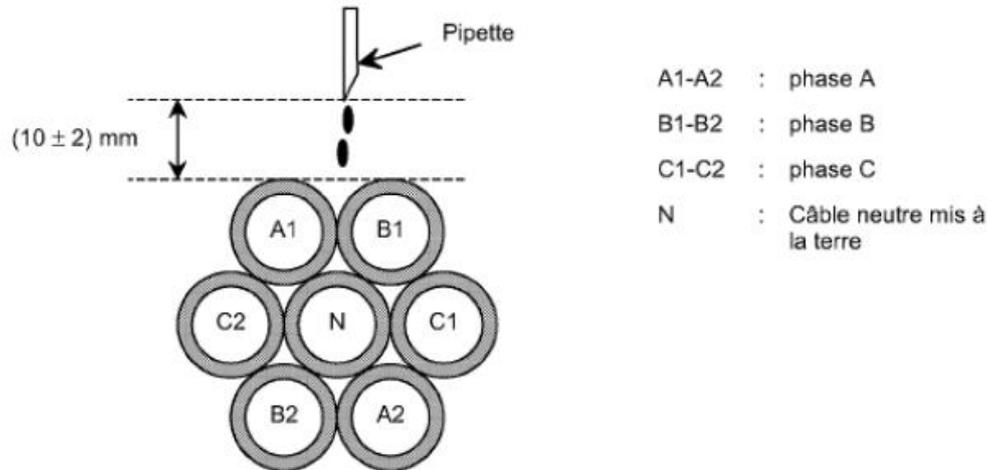


Figure I-10. Méthode d'amorçage humide [15].

## I.4. Influence des conditions extérieures sur l'amorçage de l'arc

Les études antérieures mettent en évidence la grande influence de divers facteurs sur l'amorçage et le comportement de l'arc tracking, liés au courant (sa valeur, son caractère continu ou alternatif, sa fréquence) ainsi qu'au contexte environnemental.

### I.4.1. Influence des conditions environnementales

#### *Température*

L'amorçage peut dépendre de la température dans une certaine mesure, mais celle-ci ne joue plus de rôle une fois l'arc établi, eu égard à la température très élevée de l'arc lui-même.

Une étude effectuée par Hammoud et al. [10] a révélé que la rigidité diélectrique des câbles diminue avec la température (les mêmes tests ont été menés à 23°C et à 200°C). Ainsi, la rigidité diélectrique du câble MIL-W-22759/34 passe de 28,9 kV à 20,7 kV entre ces deux températures. D'autres essais effectués par Kolker et al. [6] ont permis d'étudier le comportement de deux types de câbles SPT-2 (à base de PVC), dont la température maximale de fonctionnement était 60°C ou 105°C. Les tests d'arc de défaut qu'ils ont mis en œuvre ont ainsi montré que les câbles dont l'isolant était prévu pour résister jusqu'à 60° étaient davantage susceptibles d'enflammer le coton dans lequel ils étaient enroulés (le coton étant un indicateur d'inflammation). La comparaison de deux types de câbles, MIL-W81381 (à base de polyimide) et PFPI (polyimide partiellement fluoré) a été menée, à température ambiante et à 150°C, par Hammoud et al. [16], dans le cadre de tests de résistance à l'abrasion. Le défaut a été considéré comme effectif lorsque la baguette abrasive s'est trouvée en contact avec le conducteur, et le nombre de cycles nécessaires a été relevé (voir la figure I-11). Il apparaît

qu’à 150°C, il faut plus de deux fois moins de cycles pour que le défaut se produise, par rapport à la température ambiante.

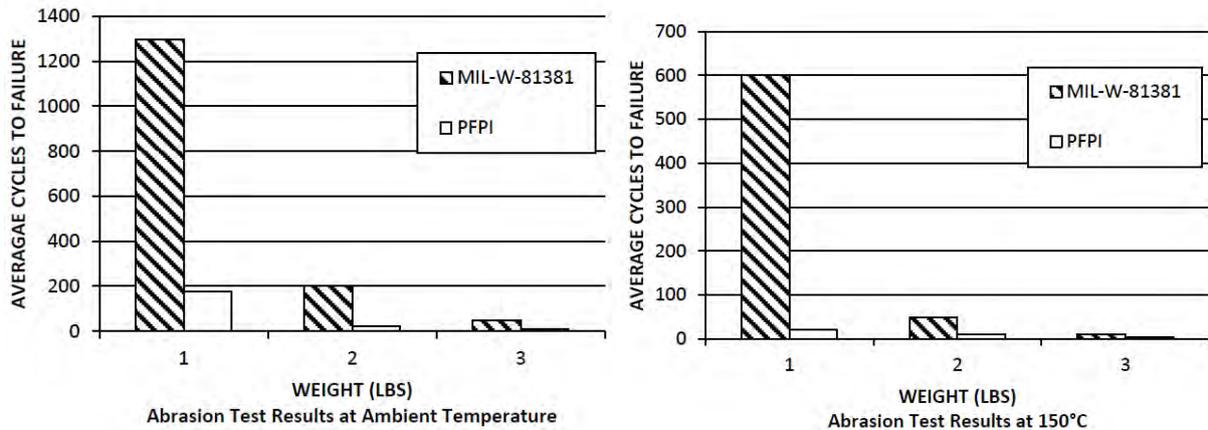


Figure I-11. Nombre de cycles d’abrasion nécessaires pour que le contact soit établi avec le conducteur, à température ambiante et à 150°C, pour deux câbles différents [16].

*Pression*

La même étude [16] a considéré l’influence de la pression sur ces deux types de câbles MIL-W-81381 et PFPI. Le test a consisté à alimenter l’échantillon en régime alternatif en augmentant la tension, à la vitesse de 50 V/s, jusqu’à ce que des décharges soient détectées entre les deux câbles (tension d’amorçage), après quoi la tension est diminuée jusqu’à ce que les décharges deviennent indétectables (tension d’extinction). Cette procédure a été effectuée à pression ambiante d’une part, et à pression réduite d’autre part, correspondant à une altitude de 60000 pieds, c’est-à-dire environ 18300 mètres. À cette altitude, la pression est de l’ordre de 70 mbar. Les résultats de tension d’amorçage et de tension d’extinction pour ces deux pressions sont présentés par la figure I-12, mettant en évidence que ces couples de tensions (amorçage-extinction) sont bien inférieurs à pression réduite qu’à pression atmosphérique.

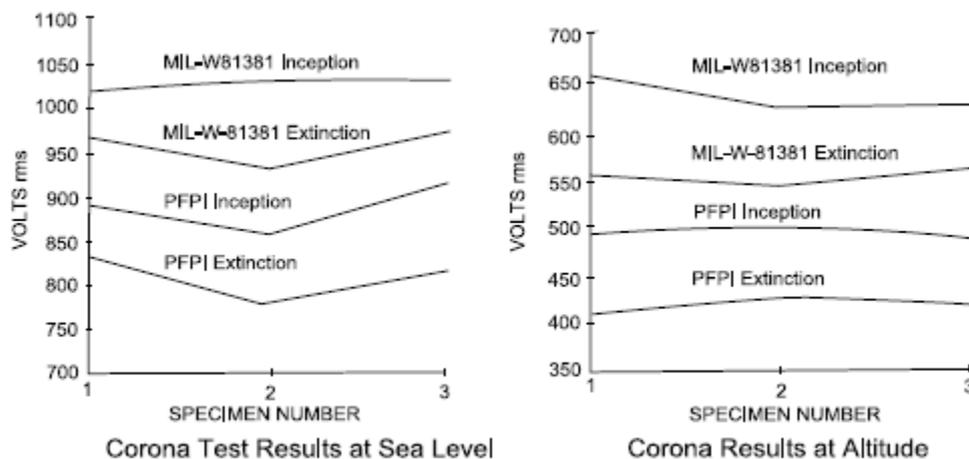


Figure I-12. Tension d’amorçage et d’extinction d’une décharge à pression ambiante et à pression réduite pour deux types de câbles différents [16].

Des tests d'arc tracking ont été effectués par Frontzek et al. [7], en faisant varier la pression ainsi que la composition de l'air. Les trois types de câbles testés, de jauge 20 (AWG), avaient des isolants constitués soit de ETFE extrudé, soit d'une combinaison de PTFE et de polyimide, et ont été soumis à un courant de 10 A, sous une tension de 125 à 132 V. Les figures I-13 et I-14 suivantes présentent les résultats de ces essais, qui ont porté respectivement sur les durées d'arc moyennes et sur la longueur d'isolant affectée du fait de l'arc. Ces résultats mettent notamment en évidence que dans le vide, pour un des câbles, la durée d'arc et la longueur d'isolant affectée par l'arc sont plus que doublées par rapport aux conditions ambiantes.

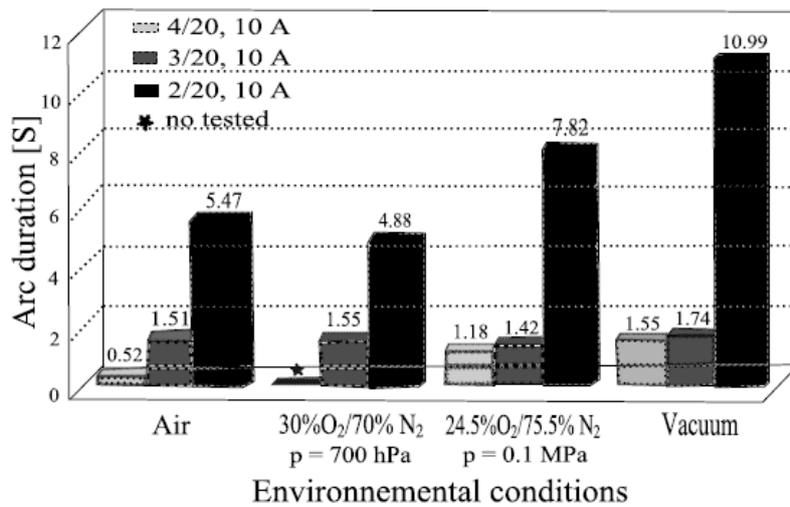


Figure I-13. Durée moyenne d'arc, pour différentes valeurs de pression et différentes compositions de gaz [7].

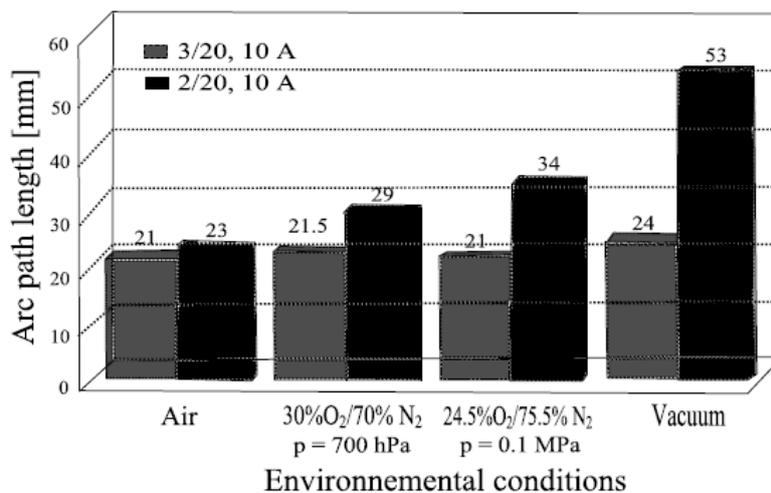


Figure I-14. Longueur d'isolant affectée par l'arc, pour différentes valeurs de pression et différentes compositions de gaz [7].

### I.4.2. Influence du courant

Hammoud et al. [17] ont comparé l'influence du courant lors de tests de court-circuit entre câbles MIL-W-81381 d'une part et HS-725 d'autre, tous deux de jauge 20 (AWG). Ces tests, dont les résultats sont présentés par la figure I-15, visaient à déterminer le temps moyen nécessaire pour que de la fumée apparaisse. Il est ainsi mis en évidence que plus le courant est élevé, plus ce temps est bref.

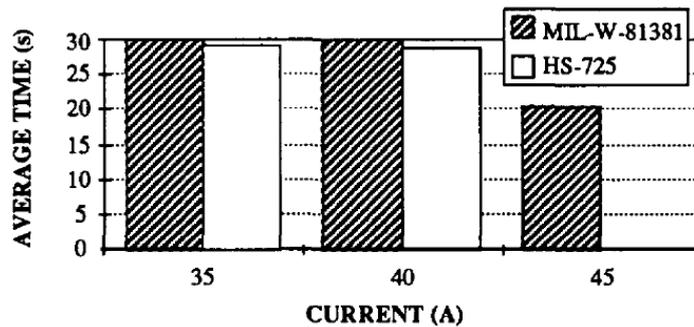


Figure I-15. Temps moyen nécessaire avant l'apparition de fumée, en fonction du courant [17].

### I.5. Caractéristiques d'extinction de l'arc et de son réamorçage

König et al. [18], dans le cadre des essais qu'ils ont réalisés, dénombrent quatre cas d'extinction de l'arc lors d'un phénomène d'arc tracking, extinction à la suite de laquelle l'arc est susceptible de se réamorcer, lors de la remise sous tension du système. Ces quatre configurations d'extinction possibles sont les suivantes :

- l'auto-extinction de l'arc ; dans le cas d'un arc bref qui s'auto-éteint et n'est pas suivi d'un réamorçage après la remise sous tension, il est probable que l'installation électrique n'ait subi que des dégâts minimes
- un court-circuit franc de conducteurs métalliques ; dans ce cas le passage d'un fort courant de défaut est aisément identifié par les systèmes de protection, qui provoquent la coupure instantanée, et les dégâts sont modérés
- un court-circuit de faible résistance
- la coupure du courant par un contacteur.

Ces deux dernières configurations sont susceptibles d'avoir les conséquences les plus critiques quant à l'endommagement des câblages aéronautiques causé par arc tracking. Lorsqu'un film conducteur de faible résistance (généralement un passage carboné) est généré entre les conducteurs, on peut s'attendre à un réamorçage de l'arc lors de la remise sous tension du faisceau de câbles concerné. En effet, une résistance de plusieurs centaines de milliohms à plusieurs ohms peut devenir la source d'une chaleur importante (en  $RI^2$ ) avec le

passage du courant. Selon la valeur de cette résistance et celle du courant, cette source peut suffire à provoquer une décharge lumineuse, ou à réamorcer un arc susceptible de passer en tracking, causant la perte de tout le harnais considéré. Si l'impédance de ligne est élevée, l'augmentation du courant sera modérée en cas de court-circuit, et dans ce cas le courant de défaut peut ne pas être détecté par les systèmes de protection, et la coupure n'est alors pas déclenchée.

Le film carboné n'est pas un bon conducteur entre les câbles, et il peut y avoir des lacunes dans le réseau de graphite, ce qui constitue un obstacle supplémentaire au passage du courant, surtout pour des basses tensions. Avec l'augmentation de celle-ci, le champ électrique peut entraîner le dépassement de la tension disruptive, et permettre le passage du courant. Comme il ne s'agit pas d'un court-circuit direct, la coupure peut ne pas être déclenchée par le système de protection, le phénomène étant perçu comme une charge résistive. La chaleur émise par effet Joule peut aboutir à un arc, qui est susceptible d'évoluer en tracking si le courant est suffisant.

## I.6. Endommagement dû à l'arc tracking

Les dégâts dus à l'arc tracking ne concernent pas seulement le faisceau de câbles qui le subit, mais aussi tout l'environnement de cet arc. La haute température du plasma que constitue un arc électrique et les forts transferts d'énergie vers les contacts se traduisent par l'ablation des câbles, la partie isolante comme la partie conductrice.

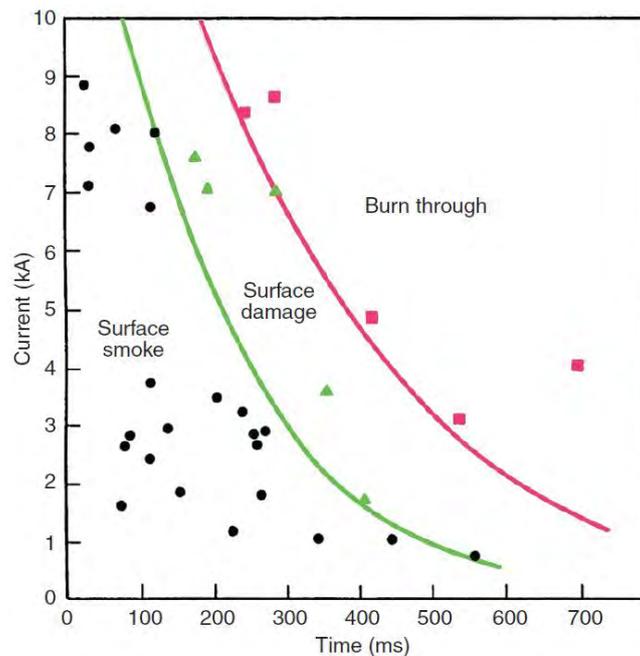


Figure I-16. Dommages causés par un arc de défaut, en fonction de sa durée et du courant [19].

L'arc est alors établi dans un plasma constitué d'un mélange d'air, de vapeurs métalliques issues des conducteurs, et de vapeurs organiques issues de la décomposition de l'isolant. Le premier risque engendré par cette ablation, est la rupture du câble ou des câbles (isolant et conducteur), qui s'accompagne de la projection importante de particules, notamment des gouttelettes de métal et des poussières organiques. Si l'arc n'est pas détecté et isolé, il peut être à l'origine de dégâts très prononcés, du fait de la très haute température de l'arc et des projections de résidus incandescents, et de la combustion de l'isolant pouvant provoquer celle de matériaux environnants. La présence d'oxygène est également responsable de l'oxydation de certains matériaux. La figure I-16 présente, pour une durée et un courant d'arc donnés, les dégâts susceptibles de se produire : la production de fumée à la surface, l'endommagement de la surface, ou l'inflammation [19]. Notons que cette figure correspond à des courants de court-circuit supérieurs à 1 kA, donc bien au-dessus des courants étudiés dans ce travail.

## **I.7. Systèmes de protection et de détection**

### **I.7.1. Généralités**

Tout circuit est aujourd'hui pourvu de systèmes de protection contre les surintensités, qui détectent les surcharges et les courts-circuits. La figure I-17 présente la caractéristique typique d'un disjoncteur 20 ampères. Tout couple courant-durée situé à droite de la courbe « Wire Protection Curve » est protégé, c'est-à-dire que le disjoncteur provoque l'ouverture du circuit avant d'atteindre ces conditions. Ainsi, la protection contre les surintensités est également effective dans le cas d'arcs de défaut, ou même d'autres conditions de surintensité. Cependant, le disjoncteur ne déclenche pas l'ouverture du circuit lorsque les conditions de durée et de courant correspondent à celles des régions notées 1 et 2 sur la figure.

Un arc correspondant aux conditions de la région 1 a une énergie suffisante pour provoquer l'inflammation de certains matériaux, ou de l'isolant organique, dans une durée assez brève. Comme le courant est au-dessus de la valeur nominale du circuit, un arc de cette région se produit entre phase et neutre, et est qualifié d'arc parallèle. La région 2 est une zone d'énergie plus faible, qui peut correspondre à un arc série. Le risque de combustion est moindre que dans la région 1, sauf si l'arc se maintient dans le temps.

En aéronautique, afin de réduire le diamètre des câbles, et donc de diminuer le poids de l'appareil, la nécessité d'augmenter la puissance embarquée amène à élever les niveaux de tension plutôt que de courant. Or la détection de la plupart des défauts électriques repose sur les surintensités, donc la probabilité qu'un disjoncteur traditionnel détecte un défaut d'arc se trouve diminuée. Si un arc électrique est identifiable par la puissance qu'il dissipe, une méthode de détection ne peut reposer sur la mesure de puissance, car on ne peut déterminer si

une augmentation est due à l'ajout d'une charge ou à un défaut électrique. Par ailleurs, les disjoncteurs traditionnels ne permettent pas de détecter un arc dont le courant est trop faible. Ces considérations ont amené au développement des détecteurs d'arc, ou AFCI (« Arc Fault Current Interruptor »).

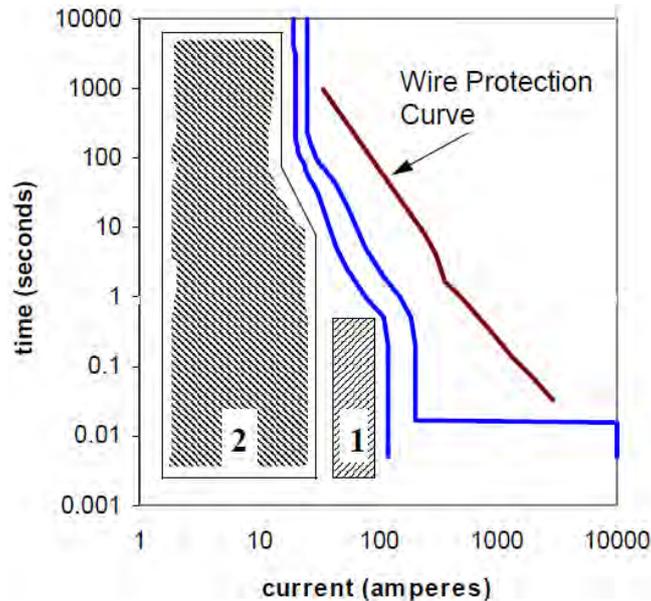


Figure I-17. Courbe de déclenchement d'un disjoncteur magnétothermique [20].

### I.7.2. Les AFCI (Arc Fault Circuit Interrupters) ou disjoncteurs intelligents

Par nature, un arc est un phénomène très instable et aléatoire, mais un certain nombre de comportements caractéristiques peuvent être identifiés. Un détecteur d'arc, par le contrôle constant des signaux de courant et de tension, permet de faire la différence entre la présence d'un arc et celle d'une charge. En fait, les caractéristiques d'un arc sont très similaires à celles d'une charge, il s'agit donc de trouver une combinaison de conditions qui indiquent la forte probabilité d'un arc et une faible probabilité d'une charge. À titre d'exemple, la figure I-18 présente le courant d'un arc parallèle (entre phase et neutre). Les quelques caractéristiques d'arc suivantes peuvent être énoncées, par rapport au courant idéal : une amplitude de courant réduite, des paliers lors des passages par zéro, des montées en courant plus abruptes. Il convient donc d'analyser toutes ces configurations possibles et de les prendre en compte dans un algorithme. Ainsi, c'est la confrontation avec le contenu du spectre énergétique du signal (acquis par transformée de Fourier [21]) qui permet, grâce à cet algorithme, de déterminer si un défaut se produit, et non plus le niveau de courant. La figure I-19 présente le schéma d'un circuit de ce type.

### I.7.3. Autres technologies

D'autres systèmes de détection des défauts électriques existent [22], comme les disjoncteurs contrôlés à distance (ou RCCB, remote controlled circuit breaker) et les SSPC

(Solid State Power Controller), ces derniers étant basés sur des semi-conducteurs de puissance tels que des MOSFET ou des IGBT. Ces composants ont à la fois une fonction de connexion des charges au bus principal et une fonction de protection des installations électriques des surcharges et des courts-circuits. La figure I-20 compare les principaux systèmes de protection contre les défauts électriques utilisés en aéronautique. Les quatre systèmes considérés (les disjoncteurs, les disjoncteurs d'arcs de défaut, les RCCB et les SSPC) sont comparés d'après leur temps de « trip » (déclenchement) instantané (le plus long étant celui du disjoncteur classique), le poids et le nombre de cycles de vie.

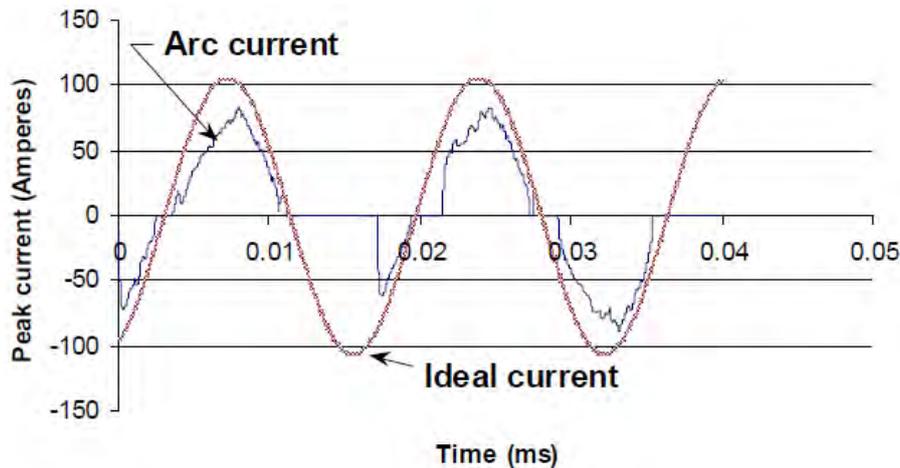


Figure I-18. Courant d'arc et courant idéal [20].

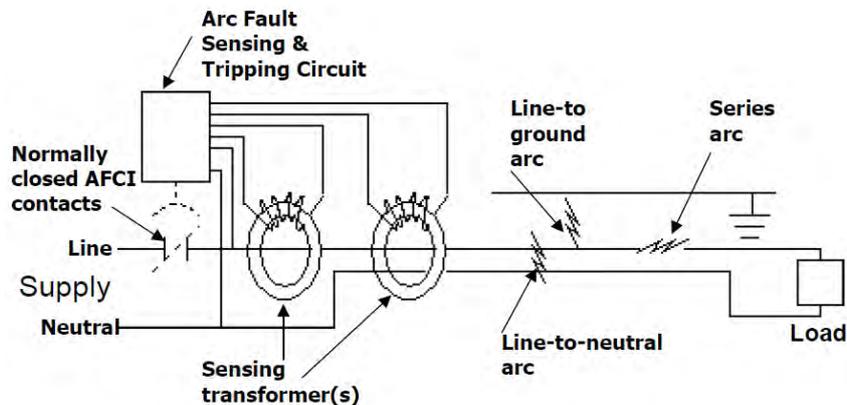


Figure I-19. Schéma de détection d'arc avec transformée du signal [20].

Une équipe s'est aussi intéressée aux pics de courant, plus élevés que le seuil des disjoncteurs mais de durée plus brève que le temps de « trip », en fonction de la fréquence d'occurrence de ces pics et de leur énergie [23]. Arunachalam et Diong [24] ont développé un modèle paramétrique de détection d'arc pour les systèmes de puissance DC et AC. La méthode étudiée a pour but d'identifier un défaut en utilisant un modèle autorégressif déterminé de façon pertinente. Mentionnons également une méthode de détection utilisant une

analyse en paquet d'ondelettes pour décomposer le signal de courant différentiel [25]. Notons enfin que d'autres phénomènes physiques liés à l'arc peuvent être pris en considération, comme son rayonnement électromagnétique. Ainsi des antennes ont été développées pour capter l'énergie électromagnétique rayonnée par l'arc [26]. Une autre étude [27] s'est intéressée à la mesure de la densité spectrale de courant et de tension (pour une alimentation en DC), sur une plage comprise en 300 kHz et 30 MHz, pour des essais d'arc tracking, dans le but d'en déterminer la signature caractéristique.

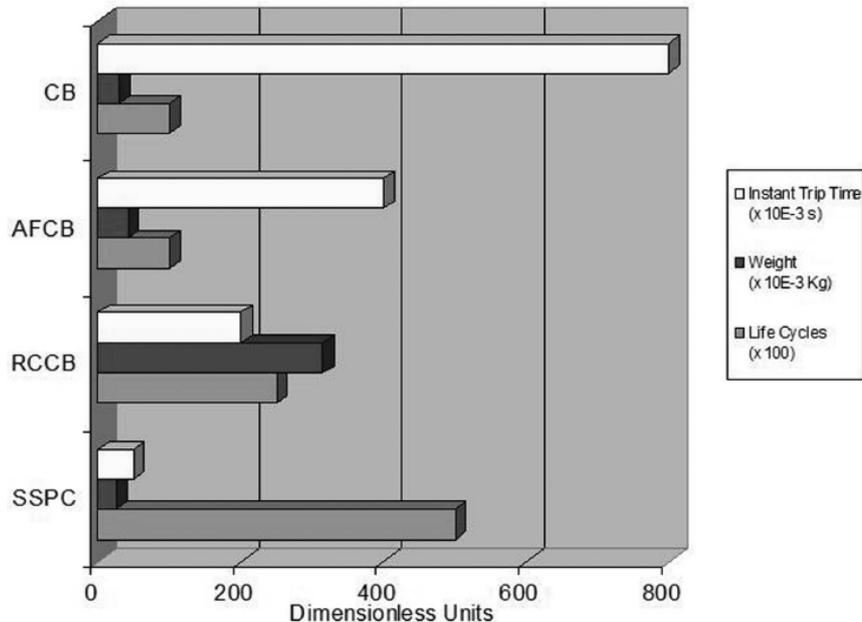


Figure I-20. Comparatif des systèmes de protection contre les défauts électriques utilisés en aéronautique [22].

## I.8. Contexte aéronautique et justification de l'étude

Les études concernant l'arc tracking, conduisant au remplacement des polyimides tels que le Kapton<sup>TM</sup> par des composés comme le PTFE dans la conception des isolants de câbles aéronautiques, ont conduit à considérer que le problème de l'arc tracking était résolu de façon satisfaisante.

Cette évolution s'inscrit dans l'histoire de l'aéronautique, qui est par ailleurs marquée depuis soixante ans par un effort constant d'augmentation de la puissance électrique embarquée [28], comme le montre la figure I-21. Cet accroissement au fil des décennies est notamment dû au passage de 28 V DC à 115 V AC dans les années 1950, de l'actionnement hydraulique à l'actionnement électrique des commandes de vol dans les années 1980 et au développement d'actionneurs à puissance électrique dans les années 2000 [29]. Ce phénomène se conjugue avec les efforts constants de réduction de la masse des appareils, pour

des raisons économiques liées à la consommation de carburant, ainsi que pour des raisons écologiques, dans l'optique de réduire l'impact sur l'environnement. Ces différentes évolutions se concrétisent par les transitions suivantes :

- le remplacement des circuits hydrauliques et d'air comprimé par des voies électriques, dont la génération, la distribution et l'utilisation sont plus aisées, en plus de l'exigence de réduction de poids
- le remplacement du métal par des matériaux composites carbonés pour la structure
- le remplacement du cuivre par de l'aluminium (plus léger) pour les câbles électriques
- l'augmentation des niveaux de tension
- l'utilisation beaucoup plus importante de courant continu.

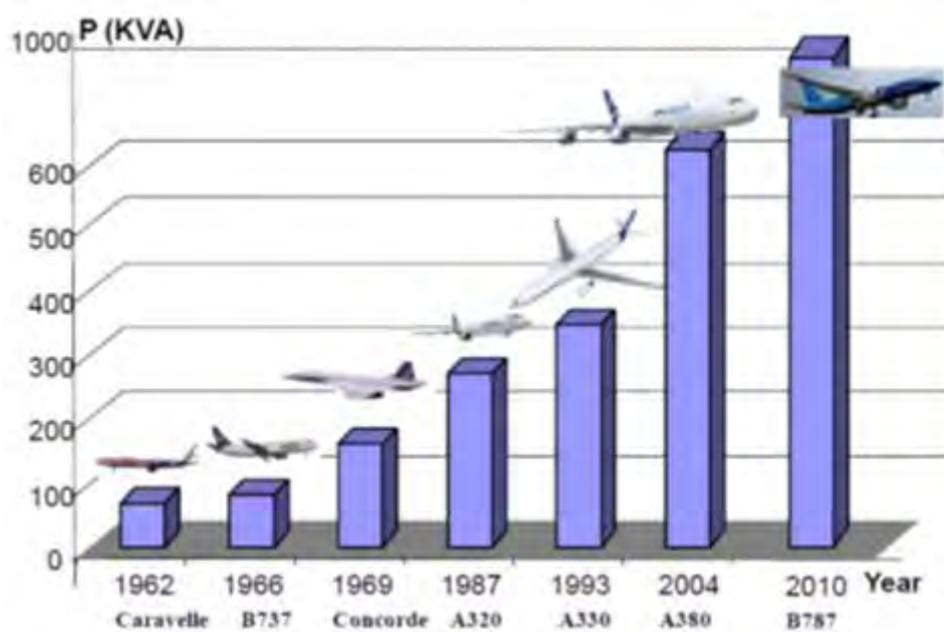


Figure I-21. Évolution de la puissance électrique embarquée dans les avions [28].

En plus des systèmes de l'avion, l'augmentation de la puissance embarquée à bord de la nouvelle génération d'avions est par ailleurs due à une prise en compte plus pressante du confort et du divertissement des passagers, qui engendre une demande en électricité en constante augmentation. Toutes ces considérations supposent de passer à de nouvelles conditions de réseau, soit en élevant les niveaux de courant, soit en élevant les niveaux de tension. Comme une augmentation du courant imposerait des câbles de section plus importante, et donc un accroissement du poids, c'est le choix d'une augmentation de la tension qui a été privilégié, bien qu'il s'agisse d'un facteur aggravant le risque d'arc tracking. Ces nouvelles conditions de réseau comprennent des tensions de 230 volts AC pour des fréquences variables entre 400 et 800 Hz, et des tensions de  $\pm 270$  ou 0-540 volts DC.

Les avionneurs sont donc conduits à se pencher de nouveau sur le problème de l'arc tracking dont la probabilité, bien que minime, est accrue du fait de ces évolutions, et c'est

dans ce contexte que s'inscrit la collaboration entre Airbus Group et le laboratoire LAPLACE pour cette étude. La problématique n'est pas de déterminer dans quelles probabilités un défaut de type arc tracking peut se produire, dans des conditions déterminées. On part de l'hypothèse qu'il va avoir lieu et on le déclenche volontairement, afin de comprendre les phénomènes mis en jeu.

## **I.9. Conclusion**

Ce chapitre de présentation sur l'arc tracking, et plus généralement sur les arcs de défaut dans les câblages, a notamment introduit l'influence des câbles eux-mêmes, en particulier la grande importance de l'isolant, mais aussi des conditions extérieures. Ainsi, malgré la présence de systèmes de protection et de coupure, un arc peut se produire sans être détecté, et endommager non seulement le faisceau de câbles concerné, mais aussi les structures environnantes, engendrant ainsi des opérations pénalisantes en termes de coûts et de temps pour l'opérateur.

La grande majorité des articles et communications publiés sur le problème de l'arc tracking ont un caractère essentiellement technologique et descriptif, et n'abordent pas les phénomènes physiques sous-jacents. De plus, la plupart des travaux antérieurs au milieu des années 90 traitent des câbles dont l'isolant est le plus souvent constitué de polyimides, qui sont très favorables à l'arc tracking, et ne sont plus utilisés seuls dans les avions récents. Dans une perspective un peu différente, mentionnons une étude très récente [30] sur un modèle 1D d'arc électrique, dans des conditions de courant et de pression qui reproduisent celles du domaine aéronautique.



## Chapitre II – Dispositif expérimental

Un dispositif expérimental a été développé pour créer un arc entre deux câbles adjacents, et son éventuel transfert à un matériau environnant. Le générateur a été conçu pour pouvoir faire varier l'intensité, la fréquence et la tension d'alimentation ainsi que la durée de mise sous tension. L'enceinte, permettant de réaliser des essais à pression atmosphérique et à pression réduite, a été dimensionnée afin de limiter la montée en pression sous l'effet de l'arc. Le déclenchement d'un essai est effectué grâce à un ordinateur, permettant la synchronisation de l'ensemble du dispositif, c'est-à-dire la génération de courant et l'acquisition simultanée des données électriques, de flux rayonné et d'imagerie rapide. L'ensemble du dispositif, son élaboration et son fonctionnement sont décrits au cours de ce chapitre. Nous y présentons également les câbles sur lesquels a porté cette étude, et les campagnes d'essais qui ont été réalisées.



## II.1. Schéma général

Le schéma général du dispositif expérimental utilisé dans ce travail de thèse est présenté sur la figure II-1 ci-dessous. Les différents éléments constituant ce dispositif sont détaillés dans les sections suivantes.

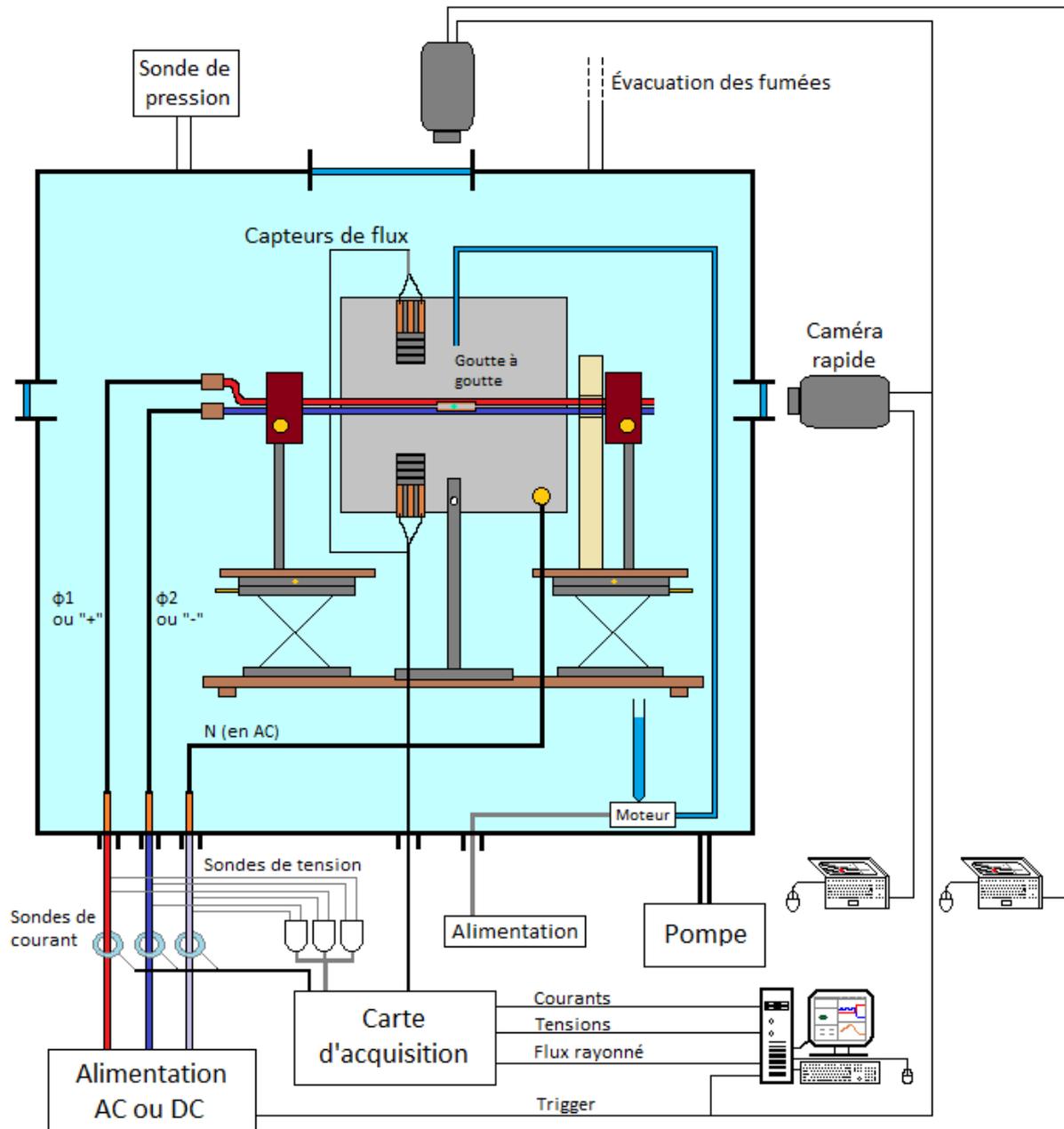


Figure II-1. Dispositif expérimental.

## **II.2. Moyens d'essai**

### **II.2.1. Enceinte**

La nécessité d'effectuer une partie des mesures à 95 mbar, en plus de la pression atmosphérique, a conduit à la conception d'une enceinte fermée. Cette valeur de pression réduite est la valeur de certification, correspondant à une altitude de 15000 m, tandis que l'altitude de croisière est de l'ordre de 11000 à 12000 m (où la pression est voisine de 200 mbar).

#### **II.2.1.1. Caractéristiques de l'enceinte**

Les tests sont réalisés à l'intérieur d'une enceinte cylindrique (voir la figure II-2) réalisée par la société Kurt J. Lesker. En acier inoxydable 304L, elle mesure 76 cm de diamètre et 60 cm de hauteur, ce qui représente un volume d'environ 270 litres, avec une épaisseur de paroi de 3,2 mm (voir Annexe A). L'enceinte est munie de huit ports de 40 mm de diamètre sur sa face inférieure. Trois d'entre eux sont notamment équipés de passages étanches pour les amenées courant depuis le générateur : un pour la phase 1, un pour la phase 2, l'autre pour le retour par le neutre. Un autre est relié à un système de vannes permettant le pompage et la remise en pression. Initialement, un passage étanche muni de broches était dédié à la mesure de tension, qui était effectuée à l'intérieur de l'enceinte. Bien que ce passage étanche ait été dimensionné pour fonctionner aux niveaux de tension fournis par le générateur, un court-circuit s'est produit à l'intérieur, ce qui nous a contraints à connecter les sondes de tension à l'extérieur de l'enceinte. Deux autres passages étanches sont utilisés pour la connexion des capteurs de flux, ainsi que pour l'alimentation d'un moteur actionnant le système de goutte à goutte pour l'amorçage de l'arc (voir §II.2.2). L'enceinte comporte également huit ouvertures latérales circulaires à mi-hauteur. Ces ouvertures sont ordinairement bouchées, mais celles qui sont situées perpendiculairement à l'axe de l'arc sont munies d'un hublot de 89 mm de diamètre et de 6 mm d'épaisseur, ce qui permet de filmer l'arc au moyen d'une caméra placée devant. Ces ouvertures latérales sont positionnées 38 mm au-delà de la paroi de l'enceinte, pour protéger les hublots des projections engendrées par l'arc tracking. Le couvercle, quant à lui, est pourvu de quatre ports de 40 mm de diamètre dont deux sont utilisés, l'un pour la sonde de pression, l'autre pour l'évacuation des fumées à la fin de chaque test, grâce à un système d'aspiration. Un hublot de 136 mm de diamètre est également positionné au centre du couvercle, permettant de filmer l'arc par le haut. Précisons enfin que l'ouverture et la fermeture du couvercle sont assistées mécaniquement par deux vérins.

#### **II.2.1.2. Dimensionnement de l'enceinte**

Cette enceinte a nécessité un dimensionnement particulier que nous avons réalisé. En effet, la présence d'un arc électrique génère une montée en température ainsi qu'une

augmentation de la masse de gaz dans l'enceinte (liée à l'érosion et à l'évaporation des câbles lors du tracking), ce qui est de nature à provoquer une élévation de la pression dans le réacteur. Le dimensionnement correct de l'enceinte (i.e. son volume intérieur) a donc été important afin de limiter l'augmentation de pression et de permettre la réalisation de mesures dans des conditions de fonctionnement stables pendant toute la phase d'arc tracking.



Figure II-2. Enceinte ouverte.

Sur la base de nos connaissances antérieures, nous avons considéré pour notre calcul un volume d'enceinte de 200 litres. En effet, lors de travaux antérieurs réalisés au LAPLACE concernant la synthèse de molécules carbonées complexes [31], une enceinte fermée de 60 litres a été développée, avec de l'argon ou de l'hélium sous 0,6 bar, au sein de laquelle était formé un arc entre deux électrodes en graphite sous une intensité de courant allant de 40 à 90 A. Avec cette configuration, et pour des temps d'arc voisins de la minute, la pression n'a varié que de quelques pourcents à quelques dizaines de pourcents (par exemple de 600 à 700 mbar) sur la totalité de la durée des expériences.

Le calcul a été réalisé grâce à d'une approche thermodynamique, en se plaçant dans les conditions les plus défavorables, c'est-à-dire à 350 A (le courant le plus fort), pour lesquelles l'énergie électrique déposée sera maximale. En considérant ces conditions, l'ordre de grandeur de la montée en pression a été évalué au moyen de codes thermodynamiques.

Avec un courant  $I = 350$  A et une tension d'arc  $U \approx 50$  V (valeur typique mesurée lors de travaux antérieurs [4]), avec l'hypothèse  $\cos \varphi = 1$ , la puissance électrique totale disponible est alors  $P_{elec} \approx 17,5$  kW. Si l'on considère une durée d'arc de l'ordre de la

seconde (ordre de grandeur du temps maximal de tracking observé lors de campagnes de mesures récentes [32]), l'énergie électrique totale déposée est alors  $E_{elec} \approx 17,5$  kJ. Nous avons fait l'hypothèse très simplificatrice que cette énergie peut être scindée en deux : 50% servant à chauffer le gaz et le plasma et 50% déposée aux électrodes, à l'origine du chauffage, de la fusion et de la vaporisation des matériaux. Nous avons ici négligé toute forme de pertes (rayonnement, conduction thermique dans les câbles, etc.).

Si l'on se donne un volume d'enceinte  $V = 200$  L sous une pression  $P = 0,095$  bar, la loi des gaz parfaits nous permet d'obtenir  $y$  le nombre de moles d'air dans le réacteur avant la formation de l'arc (i.e. pour  $T = 298$  K, sachant que  $P$  et  $T$  varieront par la suite) :

$$y = \frac{PV}{RT} = 0,77 \text{ mol} \quad (\text{II-1})$$

La masse molaire de l'air  $M_{air} = 28,965$  g.mol<sup>-1</sup> permet de calculer la masse d'air contenue dans le réacteur :  $m_{air} = y \times M_{air} = 22$  g. On peut alors déduire la masse volumique d'air dans l'enceinte :

$$\rho_{air} = \frac{m_{air}}{V} = 0,11 \text{ kg.m}^{-3} \quad (\text{II-2})$$

Cette grandeur reste constante tout au long des mesures pendant la phase d'arc tracking puisque nous travaillons à volume constant fermé.

Considérons à présent l'ablation et la vaporisation des câbles lors de la phase d'arc tracking, qui entraînent une augmentation de la quantité de matière (en phase vapeur au sein de l'arc électrique lorsque la température est élevée) dans le réacteur et donc une élévation de masse volumique totale dans l'enceinte. Nous avons supposé précédemment que 50% (i.e. 8.75 kJ) de l'énergie électrique disponible était déposée aux électrodes. Or les énergies nécessaires au chauffage, à la fusion puis à la vaporisation d'un gramme de cuivre et d'aluminium sont :

- $E_{Al} = 14127$  J.g<sup>-1</sup>
- $E_{Cu} = 6165$  J.g<sup>-1</sup>

Avec une énergie disponible de 8,75 kJ, on peut donc vaporiser pendant la phase de tracking (en supposant que toute l'énergie transférée aux électrodes sert à vaporiser les câbles) :

- $m_{Al} = 0,62$  g
- $m_{Cu} = 1,42$  g

Si on considère que la totalité de ce métal ablaté se retrouve en phase vapeur, on obtient les densités volumiques suivantes de cuivre et d'aluminium dans l'enceinte :

- $\rho_{Al} = \frac{m_{Al}}{V} = 0.0031 \text{ kg. m}^{-3}$
- $\rho_{Cu} = \frac{m_{Cu}}{V} = 0.0071 \text{ kg. m}^{-3}$

On remarque que ces masses volumiques sont faibles par rapport à celle de l'air ( $\rho_{air} = 0,11 \text{ kg. m}^{-3}$ ). Exprimées en pourcentages massiques, ces valeurs de densités de masse correspondent à des proportions d'air et de métal dans l'enceinte égales à :

- 97.3% d'air et 2.7 % d'aluminium, avec  $\rho_{total} = \rho_{air} + \rho_{Al} = 0,114 \text{ kg. m}^{-3}$
- 94.0% d'air et 6.0 % de cuivre, avec  $\rho_{total} = \rho_{air} + \rho_{Cu} = 0,118 \text{ kg. m}^{-3}$

Même en considérant que la totalité de l'énergie électrique disponible serve à vaporiser les câbles, on obtiendrait des densités de masse maximales deux fois plus grandes pour les métaux (soit  $\rho_{Al} = 0,0062 \text{ kg. m}^{-3}$  et  $\rho_{Cu} = 0,0142 \text{ kg. m}^{-3}$ ), ce qui reste relativement faible par rapport à la masse volumique de l'air. Ainsi donc, avec un volume d'air initial de 200 litres, les phénomènes d'ablation et de vaporisation des câbles contribuent assez peu à l'augmentation de pression.

Il reste toutefois à évaluer les effets liés à la montée en température au sein de l'enceinte. Cette étude a été réalisée dans l'air pur puisque la contribution des métaux vaporisés est faible. Afin d'estimer la montée en pression due à l'élévation de température, il faut comparer l'énergie déposée dans le gaz et le plasma contenus dans l'enceinte (que nous avons supposée égale à 50% de l'énergie électrique totale soit  $E_{plasma} = 8,75 \text{ kJ}$ ) avec l'énergie interne  $U$  que nous allons calculer par une approche thermodynamique. Exprimons tout d'abord l'énergie  $E_{col,m}$  déposée dans la colonne par unité de masse :

$$E_{plasma,m} = \frac{E_{plasma}}{m_{air}} \approx 4 \times 10^5 \text{ J. kg}^{-1} \quad (\text{II-3})$$

Pour obtenir l'énergie interne  $U$ , il faut déterminer la composition du plasma (en supposant un milieu en équilibre thermodynamique) en fonction de la température et à volume constant (c'est-à-dire à densité de masse constante  $\rho_{air} = 0,11 \text{ kg. m}^{-3}$ ). Pour réaliser ce calcul, nous utilisons une technique fondée sur la loi d'action de masse et le concept de base chimique [33], [34].

La figure II-3 présente la composition d'un plasma d'air dont la densité de masse est fixée constante à  $\rho_{air} = 0,11 \text{ kg. m}^{-3}$ .

À partir de cette composition, on peut obtenir l'énergie interne massique  $U_m$  en J/kg du plasma via la relation II-4 suivante :

$$U_m (\text{J. kg}^{-1}) = \frac{3}{2} kT \sum_{i=1}^N N_i + kT^2 \sum_{i=1}^N N_i \frac{\partial \ln Q_{i,int}}{\partial T} + \sum_{i=1}^N N_i E_i^{ref} \quad (\text{II-4})$$

avec  $N_i (\text{kg}^{-1}) = \frac{n_i}{\rho_{air}}$  et  $n_i (\text{m}^{-3})$  les densités massique et volumique de particules,  $Q_{i,int}$  la fonction de partition interne [35] de l'espèce chimique  $i$  et  $E_i^{ref}$  son énergie de référence (prise égale à l'enthalpie de formation à 0 K [36]).

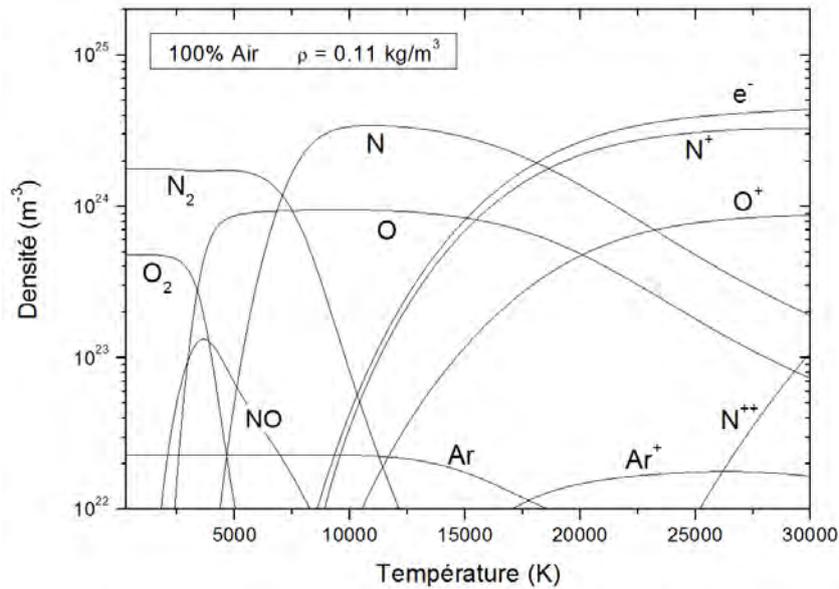


Figure II-3. Composition d'un plasma d'air à volume constant ( $\rho_{air} = 0,11 \text{ kg. m}^{-3}$ ).

La figure II-4 présente l'énergie interne massique d'un plasma d'air ( $\rho_{air} = 0,11 \text{ kg. m}^{-3}$ ) ainsi que les énergies internes des deux mélanges (97,3% d'air et 2,7 % d'aluminium, avec  $\rho_{total} = 0,114 \text{ kg/m}^3$  d'une part, et 94,0% d'air et 6,0 % de cuivre, avec  $\rho_{total} = 0,118 \text{ kg/m}^3$  d'autre part) pour lesquels sont prises en compte les quantités de métal vaporisées. Ces résultats montrent que la présence de vapeurs de cuivre ou d'aluminium (en proportion relativement faible) modifie très peu l'énergie interne (ce qui confirme l'effet quasi négligeable de la vaporisation des câbles).

Nous présentons également sur la figure II-5 l'énergie interne de l'air à volume constant dans l'intervalle de température 300-1000 K et nous avons reporté sur ce graphe la valeur de l'énergie massique déposée dans le gaz et le plasma contenus dans l'enceinte, soit  $E_{plasma,m} = 4 \times 10^5 \text{ J. kg}^{-1}$ .

La comparaison de l'énergie interne massique  $U_m$  et de l'énergie électrique déposée dans le gaz  $E_{plasma,m}$  montre que la température moyenne du milieu peut atteindre une valeur proche de 870 K. Il s'agit bien d'une température moyenne, car l'augmentation de température est essentiellement localisée dans la région de l'arc où elle est très forte, alors qu'elle affecte peu les régions plus éloignées dans l'enceinte.

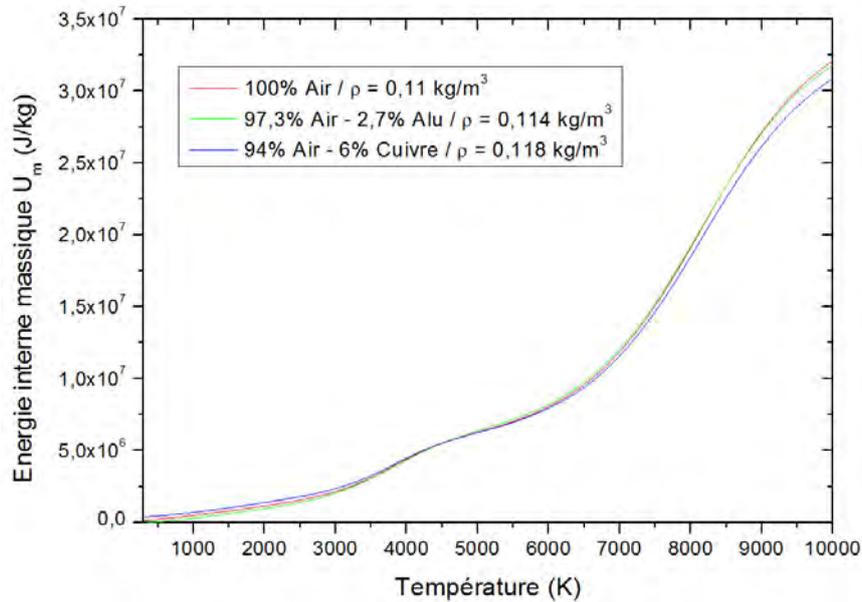


Figure II-4. Energie interne massique d'un plasma d'air à volume constant ( $\rho_{air} = 0,11 \text{ kg. m}^{-3}$ ) et de deux mélanges air – cuivre et air – aluminium (avec les proportions massiques correspondant aux quantités estimées de métal ablaté).

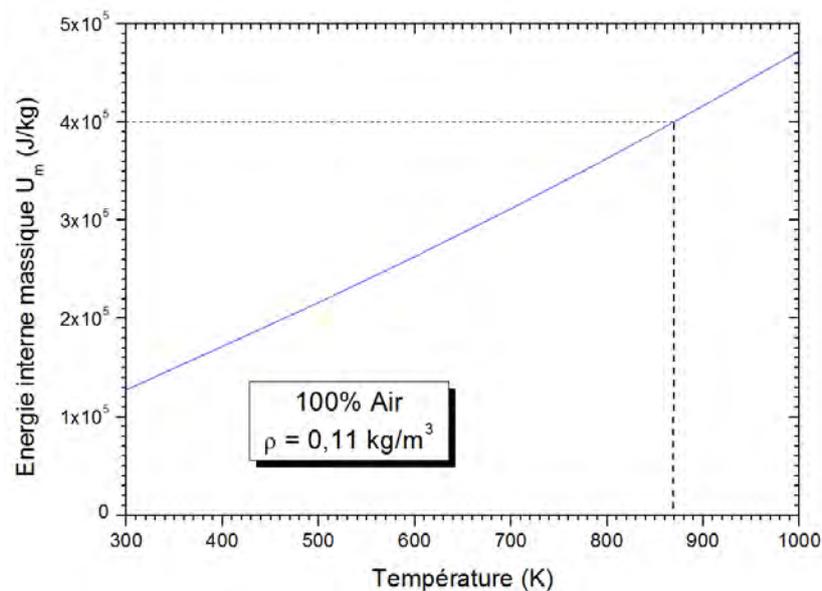


Figure II-5. Energie interne massique d'un plasma d'air à volume constant ( $\rho_{air} = 0,11 \text{ kg. m}^{-3}$ ). Zoom sur la zone basse température 300 – 1000K.

À partir de cette valeur moyenne de température, on peut estimer la montée en pression dans l'enceinte. Pour cela, nous avons tracé l'évolution de la pression d'un plasma d'air à volume constant ( $\rho_{air} = 0,11 \text{ kg. m}^{-3}$ ) en fonction de la température sur la figure II-6. Si la température atteint 870 K on constate que la pression dans l'enceinte est comprise entre 0,2 et 0,3 bar. La montée en pression semble donc significative puisque nos calculs montrent que l'on passe d'une pression initiale dans la cuve égale à 0,095 bar à une pression finale proche de 0,3 bar.

Ce résultat est toutefois à nuancer puisque nous nous sommes placés dans le cas le plus défavorable, avec une intensité de courant maximale, donc une énergie électrique déposée maximale, aboutissant à une montée en pression maximale. De plus, nous avons négligé dans notre estimation de la température et de la pression toute forme de pertes dues notamment au rayonnement et à la conduction thermique, et nous avons également supposé que l'énergie déposée dans la colonne d'arc se répartissait de manière homogène dans la totalité du volume d'air disponible. Cette dernière hypothèse nous permet de définir une température moyenne unique pour l'ensemble du système considéré mais elle ne traduit pas fidèlement la réalité des phénomènes physiques mis en jeu dans l'enceinte puisque l'énergie électrique n'est pas déposée de manière homogène dans tout le volume mais plutôt de façon très localisée au sein de la colonne d'arc qui occupe un faible volume de quelques dizaines de millimètres cubes. À cela s'ajoute que nos essais ont été programmés pour durer 500 millisecondes et non une seconde.

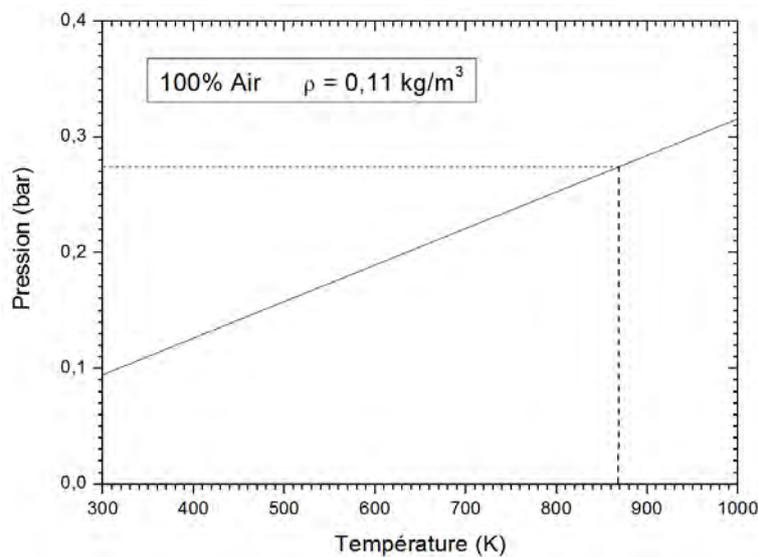


Figure II-6. Évolution de la pression en fonction de la température pour un plasma d'air à volume constant ( $\rho_{air} = 0,11 \text{ kg. m}^{-3}$ ). Zoom sur la zone basse température 300 – 1000 K.

Un volume de 270 litres a donc été adopté, qui a servi de base minimale au développement de l'enceinte, d'après ce calcul préliminaire. Par ailleurs, le positionnement

des différents équipements expérimentaux et leur manipulation ont imposé un diamètre d'enceinte relativement important.

### II.2.2. Matériel expérimental

Les câbles de test sont montés sur un support isolé électriquement de l'enceinte. L'extrémité de chaque câble est maintenue par une pince montée sur un élévateur. Une fois la hauteur réglée, la position horizontale peut être ajustée en x et en y au moyen de vis micrométriques. Nous avons garni chaque pince d'un tube en alumine au niveau du contact avec les câbles, afin qu'elle supporte une température élevée. De même, une plaque en alumine de 1 cm d'épaisseur est positionnée pour protéger la pince vers laquelle se dirige le panache d'arc tracking (c'est-à-dire du côté où les câbles ne sont pas connectés). Cette plaque de 9 cm sur 6 cm est munie d'un trou central circulaire de 1 cm de diamètre, dans lequel sont enfilés les câbles.

Un moteur, situé à l'intérieur de l'enceinte et alimenté à travers un passage étanche par une alimentation de laboratoire réglable, actionne un système mécanique de goutte-à-goutte favorisant l'amorçage de l'arc. De l'eau salée (à une concentration de 0,7%), stockée dans un réservoir de 10 millilitres en forme d'éprouvette, est injectée dans un tuyau fin dont l'extrémité est positionnée quelques centimètres au-dessus des câbles. À cette même fin, nous utilisons initialement un petit réservoir souple fermé, situé directement au-dessus des câbles. La chute de gouttes d'eau était causée par l'action d'un moteur qui provoquait une pression lente du réservoir. Ce système n'a pas pu être maintenu pour les essais à pression réduite car le réservoir, souple et fermé sur le dessus, se serait vidé avant l'essai pendant la descente en pression.

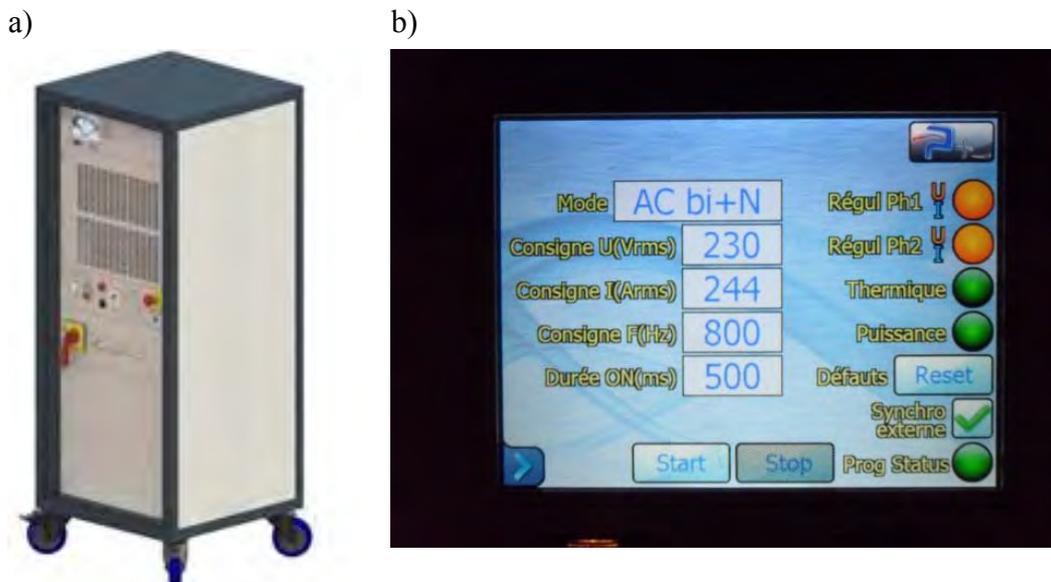
### II.2.3. Générateur

L'alimentation utilisée (voir la figure II-7.a.) a été réalisée par la société Puissance+ [37] (voir Annexe B). Elle se comporte comme une source de courant, dont le fonctionnement peut être programmé selon un des quatre modes de génération suivants :

- mode « DC » : courant continu
- mode « AC mono » : courant alternatif, système monophasé (phase 1 et neutre)
- mode « AC bi » : courant alternatif, système biphasé (phases 1 et 2) sans neutre
- mode « AC bi+N » : courant alternatif, système biphasé (phases 1 et 2) avec possibilité de retour par le neutre.

En mode DC, le courant de consigne peut être fixé entre 10 et 126 A, par pas de 2 ampères, et la tension à vide entre 100 et 700 V. Dans chacun des trois modes AC, le courant peut être fixé entre 34 et 350 A par pas de 2 ampères, et la tension simple à vide entre 100 et

230 V. La fréquence est réglable entre 360 et 800 Hz par pas de 2 hertz, et la phase 2 a un retard de 120 degrés par rapport à la phase 1. Quel que soit le mode, la durée d'alimentation peut être ajustée entre 10 millisecondes et 10 secondes, par pas de 10 millisecondes. Le décompte de la durée programmée n'est effectif qu'à partir du passage du courant, permettant que l'arc puisse durer le temps souhaité, dans le cas où il ne s'amorce pas dès le lancement de l'essai. En revanche, même si l'arc ne s'amorce pas du tout, la tension est coupée par le générateur au bout de 10 secondes dans tous les cas. Après un test, une période de temporisation de 180 secondes est imposée avant le déclenchement d'un nouveau test, afin de permettre le refroidissement des composants de puissance. Le choix du mode ainsi que la programmation des paramètres sont effectués grâce à un écran tactile (voir la figure II-7.b).



La majorité des tests de cette étude a été effectuée en mode AC, et au moyen du mode « AC bi+N », en connectant le neutre à une plaque en aluminium située à une distance déterminée des câbles (voir chapitre V). Si le générateur permet de réaliser des tests d'arc tracking en régime continu, il ne possède pas dans ce mode de potentiel « neutre » intermédiaire entre le « + » et le « - », auquel la plaque en aluminium serait connectée, de manière analogue aux essais de la campagne en régime alternatif. Cette spécification ne figurant pas dans le cahier des charges initial et ne pouvant pas être mise en place ultérieurement sur le générateur, nous n'avons pas réalisé de campagne approfondie en régime continu, et seuls quelques tests en mode DC ont été effectués.

#### II.2.4. Pompe et vannes

La pompe utilisée est une pompe à spirale SH-112 (voir la figure II-8.a.), fournie par la société Agilent. Depuis la pression atmosphérique, une durée approximative de sept minutes est nécessaire pour atteindre une pression de 95 mbar dans notre enceinte, tandis que la remise

en pression dure environ deux minutes. Un système de vannes (voir la figure II-8.b.) permet la descente et la remise en pression. Ainsi, pour descendre en pression on ouvre les vannes  $V_1$  et  $V_2$  ( $V_3$  étant fermée). On ferme la vanne  $V_2$  une fois le pompage terminé. La pression dans l'enceinte peut être ajustée au moyen de la vanne  $V_1$  (vanne de précision permettant un contrôle de l'ouverture),  $V_3$  étant ouverte. La remise en pression se fait en ouvrant les vannes  $V_1$  et  $V_3$ . Après la remise en pression, la vanne  $V_4$ , reliée à un système d'aspiration, est ouverte pour l'évacuation des fumées à l'issue de chaque essai.

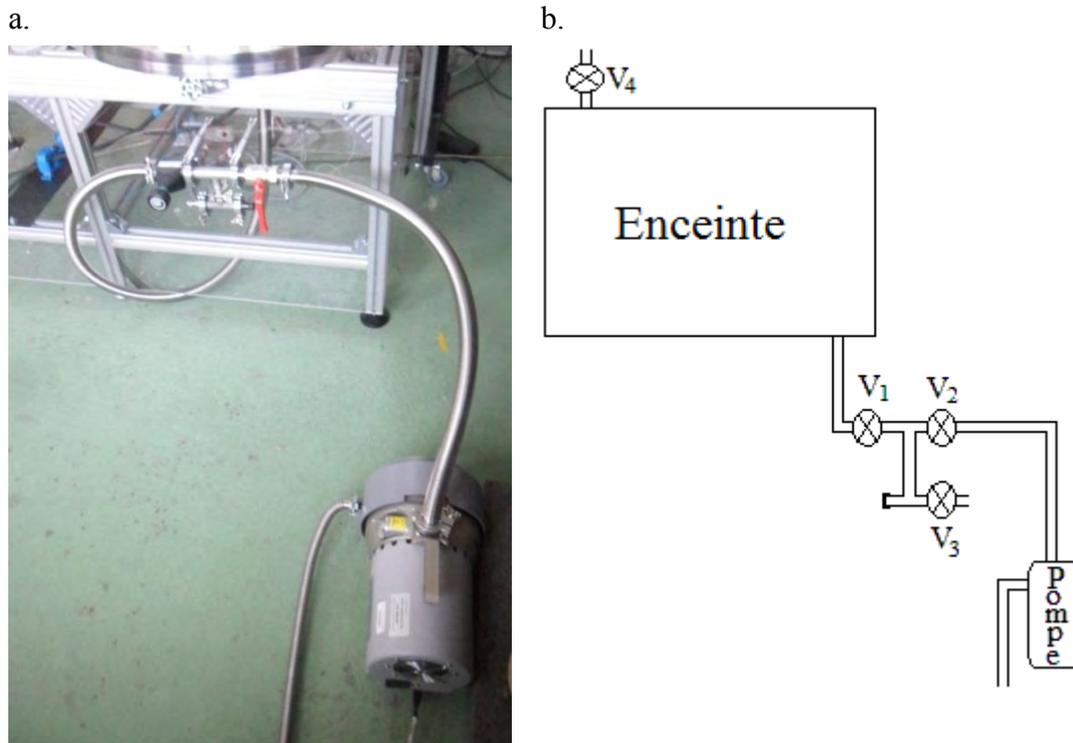


Figure II-8. Pompe et vannes (a), et schéma du système de vannes (b).

### II.3. Câbles testés

Trois câbles de type aéronautique ont été testés, dont le conducteur est constitué majoritairement soit d'aluminium, soit de cuivre. Le tableau II-1 ci-dessous présente quelques caractéristiques de ces câbles, que nous désignerons dans la suite de ce manuscrit par « câble aluminium », « câble cuivre 1 » et « câble cuivre 2 ». La composition de l'isolant est identique, elle consiste en une fine couche de Polyimide (Kapton<sup>TM</sup>) au contact du conducteur, et une couche de PTFE (polytétrafluoroéthylène). La principale différence entre les deux câbles de cuivre réside dans l'épaisseur de l'isolant, plus grande dans le cas du câble cuivre 2 que dans le cas du câble cuivre 1. Ces trois câbles sont prévus pour fonctionner au même courant nominal de 35 A.

Tableau II-1. Caractéristiques des différents câbles testés.

|                                   | <b>Câble aluminium</b>  | <b>Câble cuivre 1</b>                           | <b>Câble cuivre 2</b> |
|-----------------------------------|---|---|-----------------------|
| Conducteur                        | aluminium revêtu de cuivre nickelé ;<br>7 torons de 19 brins (0,275 mm de diamètre) | cuivre nickelé ; 61 brins (0,32 mm de diamètre) |                       |
| Diamètre du câble                 | entre 4,10 et 4,30 mm   | entre 3,13 et 3,33 mm                           | entre 3,68 et 4,21 mm |
| Diamètre du conducteur            | entre 3,55 et 3,85 mm   | entre 2,73 et 2,77 mm                           |                       |
| Épaisseur de l'isolant            | 0,25 mm   | 0,25 mm   | entre 0,5 et 0,7 mm   |
| Masse linéique                    | 0,39 g/cm   | 0,50 g/cm                                       | 0,62 g/cm             |
| Proportion massique de conducteur | 81 %  | 91 %  | 75 %                  |
| Courant nominal                   | 35 A  | 35 A  | 35 A                  |

## II.4. Procédure d'essai et campagne de tests effectuée

### II.4.1. Préparation

Une procédure spécifique a été développée tout au long de l'étude pour déclencher l'amorçage de l'arc. Les échantillons, deux câbles d'une vingtaine de centimètres de longueur, sont préparés en retirant sur chacun d'eux une petite partie d'isolant, de manière à découvrir l'âme du câble, sur une longueur d'environ 1 cm et une largeur d'environ 3 mm. Les deux câbles sont maintenus l'un contre l'autre, les parties métalliques mises à nu en regard, au moyen d'une bande de ruban adhésif (voir figure II-9), car les forces électromagnétiques dues à l'arc tendent à séparer les câbles et à causer ainsi l'extinction prématurée de l'arc. L'ensemble est maintenu fixé par deux pinces en céramique (voir §II.2.2.), et chaque câble est connecté au générateur (chacun à une phase en mode AC, ou l'un au + et l'autre au – en mode DC). L'amorçage de l'arc est favorisé par la chute de gouttes d'eau salée (à concentration de 0,7%) sur les parties métalliques (voir §II.2.2.).

Cependant, malgré le soin employé à créer les meilleures conditions pour l'amorçage d'un arc, il peut arriver que le courant ne passe pas et que la tension à vide demeure entre les

câbles. Ce phénomène peut être précédé d'une étincelle. À l'inverse, si les câbles sont trop rapprochés, un court-circuit franc peut se produire et il n'y a alors pas d'arc. Il n'est pas rare qu'une étincelle ou un arc bref (de quelques millisecondes à quelques dizaines de millisecondes) se produise et crée un pont fondu entre les câbles, donc un court-circuit franc. Ce cas de figure concerne principalement les courants les plus faibles, où la force de Laplace n'est pas suffisante pour éjecter les gouttes métalliques qui se forment entre les câbles. Parfois, il suffit de couper le pont fondu et de limer légèrement les parties métalliques en contact de chaque câbles, pour que lors de la tentative suivante l'arc se produise et donne lieu à du tracking.

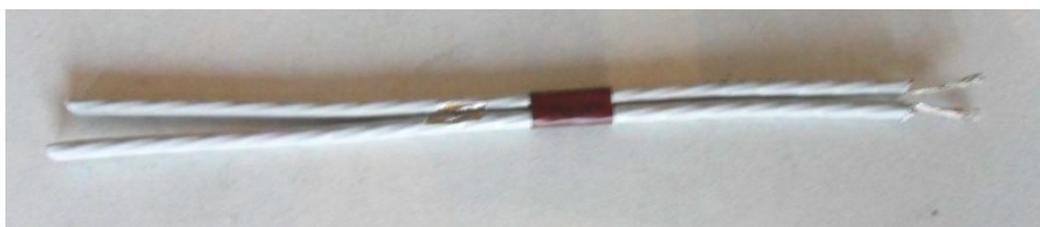


Figure II-9. Échantillon de câbles en aluminium.

Une plaque en aluminium carrée représentant le fuselage, de 10 cm de côté et de 1,2 mm d'épaisseur, est positionnée parallèlement aux câbles, verticalement. En mode AC, cette plaque est connectée au neutre de l'alimentation, tandis qu'elle est connectée au – de l'alimentation électrique en mode DC. Les informations concernant la plaque au sein du dispositif expérimental ainsi que l'étude des phénomènes associés à l'interaction de l'arc avec cette plaque sont présentées au chapitre V.

### II.4.2. Déclenchement d'un essai et acquisition des données

Les essais sont déclenchés depuis un ordinateur grâce à une interface, via un boîtier SCB 68. Les sondes de courant et de tensions ainsi que les fluxmètres sont connectés à une carte d'acquisition National Instrument PXI 6221 via ce même boîtier, permettant de fixer sur l'interface de l'ordinateur l'ensemble des paramètres de mesure, tels que la fréquence (20 kHz dans notre cas) et la durée d'acquisition, mais aussi le gain de chaque voie (pour les sondes de courant et de tension, et les facteurs correctifs des capteurs de flux). Lors du clic de déclenchement d'un essai, l'acquisition commence, et un signal de déclenchement est envoyé au générateur et aux caméras rapides, permettant un fonctionnement simultané. Afin que l'acquisition comprenne bien l'intégralité de l'essai, un délai de 100 ms à partir du déclenchement est fixé avant la mise sous tension effective par le générateur.

Quelques secondes avant de déclencher un essai, il est nécessaire de régler manuellement l'alimentation du moteur provoquant le goutte-à-goutte au-dessus des câbles, jusqu'à une tension de l'ordre de 4 à 5 volts, puis de l'interrompre lorsque le test est terminé. La durée d'acquisition est réglée à 3 secondes pour prendre en compte que l'arc peut ne pas se

déclencher immédiatement ; sa durée quant à elle n'excède pas 0,5 seconde (à l'exception de quelques essais réalisés au démarrage de l'étude pour lesquels la durée d'arc a pu atteindre jusqu'à une seconde).

### II.4.3. Récapitulatif de la campagne effectuée

Le tableau II-2 récapitule les conditions d'expérience de notre campagne d'essais en régime alternatif, pour chacun des trois types de câbles. Ces tests en AC constituent la majeure partie de cette étude, pour ce qui est de la quantité et de l'analyse des résultats. En ce qui concerne les essais réalisés en régime continu, beaucoup moins nombreux et systématiques qu'en AC, il s'agit davantage d'une étude exploratoire. Les conditions expérimentales de ces tests, effectués pour une durée programmée de 500 ms, avec une tension à vide de 540 V, sont présentées dans le tableau II-3.

Tableau II-2. Récapitulatif des conditions d'essais en régime alternatif, à la base de la campagne d'essai principale de ce travail.

|                |                               |
|----------------|-------------------------------|
| Type de signal | Alternatif (mode « AC bi+N ») |
| Fréquence      | 800 Hz                        |
| Durée          | 500 ms                        |
| Tension à vide | 230 V                         |
| Courants       | 174 A<br>244 A<br>350 A       |
| Pressions      | 1 bar<br>95 mbar              |

Comme cela sera présenté au chapitre V, l'étude des interactions entre l'arc et la plaque en aluminium, effectuée simultanément lors des campagnes d'essai, en AC comme en DC, prend en compte différentes durées d'arc : 100, 200, 300, 400 et 500 ms. Néanmoins, tous les essais ont été effectués en programmant une durée de 500 ms. La possibilité de programmer la durée d'alimentation du générateur concernait initialement la mise sous tension, indépendamment de l'arc, dont l'amorçage pouvait n'avoir lieu que quelques dizaines voire centaines de millisecondes après, dans certains cas. Pour cela, une durée d'alimentation de 2 ou 3 secondes était programmée, au cas où l'arc ne s'amorce pas immédiatement. Ce n'est que quelques mois après la mise en service du générateur et le début de l'étude qu'une modification logicielle a été effectuée, permettant que la durée d'alimentation programmée ne soit décomptée qu'à partir du passage du courant (et donc de l'amorçage de l'arc), et non plus dès la mise sous tension. Pour cette raison, une partie des essais à pression atmosphérique a une durée supérieure à 500 ms.

Tableau II-3. Conditions d'essais en régime continu.

| Pression atmosphérique  | Pression réduite              |
|---|-------------------------------|
| Câbles aluminium :<br>- 60 A<br>- 100 A<br>- 125 A<br>Câbles cuivre 1 :<br>- 74 A<br>- 100 A<br>- 125 A | Câbles aluminium :<br>- 125 A |

## II.5. Moyens d'acquisition

### II.5.1. Sondes de courant et de tension

Trois sondes de courants sont utilisées (voir figure II-10), afin de mesurer en AC le courant dans chaque phase (reliées aux câbles) et le courant dans le neutre (relié à la plaque en aluminium). Il s'agit de sondes à boucle fermée fonctionnant par effet Hall, de référence LF 505-S (fabriquées par la société LEM), qui permettent la mesure de courants continus aussi bien qu'alternatifs jusqu'à 500 A (en valeur efficace concernant l'AC). Leur temps de réponse inférieur à la microseconde convient bien aux échelles de temps de cette étude. Ces sondes présentent trois broches : une pour la mesure, et deux pour l'alimentation +/- 15 V.

De même, trois sondes de tension sont utilisées, dans le cas de l'AC pour mesurer la tension entre les deux phases, et entre chaque phase et le neutre. Le modèle utilisé (Pintek DP-25) est une sonde différentielle haute tension, fonctionnant en DC ou en AC, caractérisé par une bande passante de 25 MHz à -3dB, et par une mesure différentielle maximale de 1400 V (en DC ou en AC crête-à-crête, ou encore 450 V<sub>eff</sub>). Le temps de réponse est de 14 ns, avec une précision à ±2%.



Figure II-10. Sondes de courant.

Ces deux capteurs (courant et tension) se composent d'un circuit primaire (haute tension) et d'un circuit secondaire (circuit électronique) isolés galvaniquement.

### II.5.2. Capteurs de flux radiatif

Deux capteurs de flux radiatif, ou fluxmètres (voir figure II-11), sont montés sur un support situé dans le plan perpendiculaire à l'axe des câbles, et passant par la zone dénudée où s'amorce l'arc. Les fluxmètres sont positionnés à une distance de 9,5 cm des câbles (voir figure II-12). Cette distance a été choisie à la suite d'une série de tests. Elle correspond à la distance minimale pour laquelle le risque de détérioration des capteurs sous l'effet de l'arc demeure acceptable.

Les fluxmètres que nous utilisons, fournis par la société Captec, sont constitués de thermocouples. Ils ne nécessitent pas d'alimentation électrique et génèrent une tension proportionnelle à l'énergie thermique reçue, sur une gamme de rayonnement allant de 0,1 microns (borne inférieure de l'ultraviolet C) à 12 microns (infrarouge moyen). Leur fonctionnement se fonde sur la comparaison de leur émission propre (puissance en  $W/m^2$ ) avec celle de la source de rayonnement à mesurer, selon la loi de Stefan-Boltzmann :

$$\varphi = \sigma(T_2^4 - T_1^4) \quad (\text{II-5})$$

où  $\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann,  $T_1$  la température de la surface où le capteur est déposé (en K), et  $T_2$  la température de la source (en K). Le facteur par lequel multiplier la tension délivrée pour obtenir la puissance rayonnée par unité de surface est donné par le constructeur pour chaque capteur. Les transferts de chaleur par conduction et convection ne sont en revanche pas mesurés par ces capteurs. Leur temps de réponse est d'environ 80 millisecondes, du fait de la dimension des capteurs, même en choisissant la plus petite surface active. De ce fait, il est impératif que l'arc observé dure au moins une centaine de millisecondes pour que la mesure soit significative.

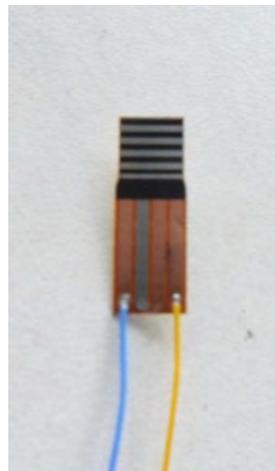


Figure II-11. Capteur de flux.

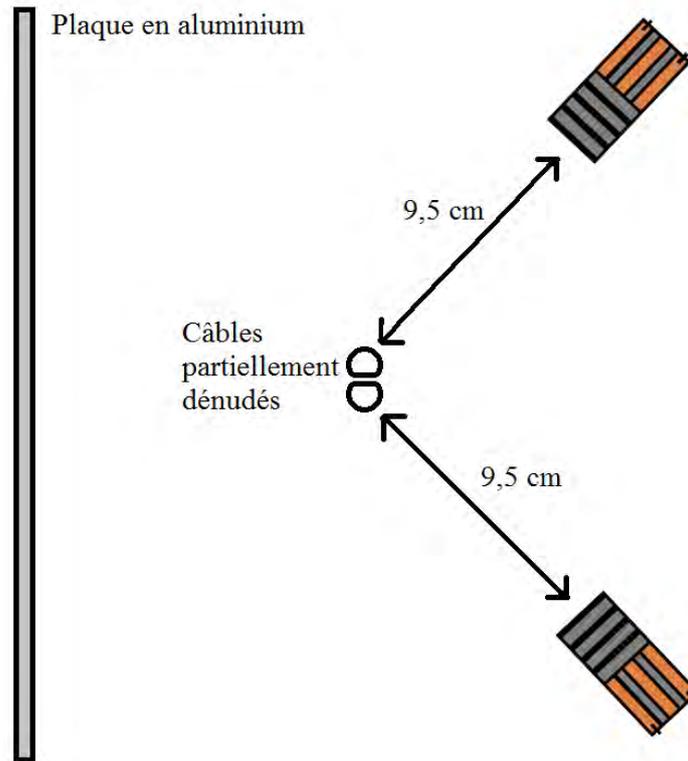


Figure II-12. Disposition des capteurs de flux.

Le rayonnement émis en dessous de 200 nm étant absorbé dans l'air dès les premiers microns, toute cette partie du spectre n'est donc pas mesurée par les fluxmètres (voir §IV.4). Notons aussi que ces capteurs doivent être remplacés fréquemment (typiquement au bout de trois ou quatre essais), car leurs performances se détériorent rapidement du fait de l'intensité du rayonnement de l'arc, de l'échauffement qu'il provoque et de la projection de gouttes de métal fondu qui endommagent parfois les capteurs.

### II.5.3. Imagerie rapide

Pour chaque essai l'arc est filmé au moyen d'une caméra rapide Phantom v9.1, placée devant un hublot latéral, face à l'arc. Pour certains essais une caméra Photron Fastcam Mini AX100 a été positionnée au-dessus du hublot supérieur, afin de disposer d'une visualisation de l'arc sous deux angles différents, de face et de dessus. Les principales caractéristiques techniques de ces deux caméras sont présentées dans le tableau II-4.

Les deux caméras sont utilisées à une vitesse de 1000 images par seconde. Le temps d'exposition est fixé à 10 ou 30 microsecondes pour la Phantom v9.1, et à 1,11 microseconde pour la Mini AX100. Les caméras sont positionnées à l'extérieur de l'enceinte, l'une horizontalement face à un hublot latéral, l'autre verticalement face au hublot supérieur. Le déclenchement de l'acquisition des caméras est effectué automatiquement depuis l'ordinateur, en même temps que le déclenchement du générateur.

Tableau II-4. Caractéristiques des deux caméras rapides utilisées.

|                                   | Phantom v9.1                             | Mini AX100                                 |
|-----------------------------------|--|--|
| Format maximal                    | 1632 × 1200 pixels                       | 1024 × 1024 pixels                         |
| Vitesse maximale à plein format   | 1000 images/seconde                      | 4000 images/seconde                        |
| Vitesse maximale à format partiel | 153.000 images/seconde (à 96 × 8 pixels) | 540.000 images/seconde (à 128 × 16 pixels) |
| Profondeur de couleur             | 14 bits monochrome                       | 12 bits monochrome                         |
| Taille des pixels                 |  | 20 microns                                 |
| Temps d'exposition minimal        | 2 microsecondes                          | 1,05 microseconde                          |
| Sensibilité                       | 2400 ISO/ASA monochrome                  | 40000 ISO monochrome                       |

#### II.5.4. Caméra infrarouge

Une caméra infrarouge FLIR SC6000 a également été utilisée dans le cadre d'une campagne de mesures thermographiques, concernant une plaque en aluminium positionnée à différentes distances des câbles, parallèlement à ceux-ci et sur laquelle l'arc était susceptible de se transférer. Cette caméra permet d'effectuer des acquisitions sur un domaine de longueur d'onde allant de 3 à 5  $\mu\text{m}$ . De même que pour les deux caméras présentées plus haut, la vitesse maximale d'acquisition est fonction de la taille des images, ainsi que de la durée d'acquisition. Dans notre cas, la taille d'image a été fixée à 320 × 240 pixels, pour une fréquence d'acquisition de 200 images par secondes, pendant 5 secondes. Nous ne disposions pas de trigger, et les acquisitions ont été déclenchées manuellement, environ une ou deux secondes avant le déclenchement simultané du reste du dispositif, constitué de l'alimentation, des caméras rapides et des sondes.

L'étalonnage préalable de la caméra est effectué au moyen d'un calibre infrarouge, muni d'une cible dont la température et l'émissivité sont connues. Ne disposant pas de hublot infrarouge, nous avons retiré le hublot devant lequel la caméra était placée, lors des essais à pression atmosphérique. Concernant les essais à 95 mbar, le hublot a dû être maintenu, même s'il absorbait une grande partie du signal infrarouge. Pour cette raison, deux étalonnages ont dû être effectués, l'un de façon directe pour les essais à pression atmosphérique, et l'autre en plaçant un hublot entre la caméra et la cible pour les essais à pression réduite. Cet étalonnage particulier et l'étude qui a suivi sont décrits plus loin (voir §V.3.1). Ajoutons enfin que la face arrière des plaques (celle qui était tournée vers la caméra) a été peinte en noir au moyen d'une peinture haute température, ce qui a permis de considérer une émissivité de 0,98.





## Chapitre III – Résultats expérimentaux

Lors de chaque essai, des données expérimentales sont acquises. Il s'agit de données électriques de courant et de tension d'arc, de flux rayonné, de mesure de masse ablatée (avant et après essai). Ces données participent notamment de l'établissement d'un bilan de puissance, qui sera explicité au chapitre IV, et de la détection du transfert éventuel de l'arc vers la plaque en aluminium. De l'imagerie rapide est pratiquée, permettant de visualiser la géométrie de l'arc dans l'espace, de face et par le haut. L'imagerie infrarouge sera présentée au chapitre V, dans le cadre de l'étude concernant plus spécifiquement le transfert de l'arc à la plaque en aluminium.



### III.1. Observations générales

Les campagnes de tests ont été menées successivement, à pression atmosphérique tout d'abord, puis à pression réduite. Chacune des configurations d'essai (caractérisée par la pression, le type de câble, le courant et la durée d'arc) a été traitée l'une après l'autre, de façon générale, et a fait l'objet d'un nombre d'essais variable entre moins d'une dizaine et une trentaine, selon les résultats obtenus et le comportement des câbles pour les différentes conditions d'essai.

Ainsi il est fréquent, dans les configurations à 174 A et particulièrement pour les câbles en cuivre, que le courant soit trop faible pour que les forces électromagnétiques éjectent les gouttes de métal en fusion qui se forment au niveau de l'arc. Cela aboutit alors à un pont fondu entre les câbles, et provoque un court-circuit franc qui coupe l'arc au bout de quelques dizaines de millisecondes, au maximum quelques centaines. La figure III-1 présente un cas où des câbles cuivre 1 se sont soudés. Dans d'autres cas très fréquents, l'arc ne s'amorce pas, et on a soit la tension à vide entre les câbles (précédée d'une éventuelle étincelle) sans passage du courant, soit au contraire un court-circuit franc entre les câbles. Pour ces raisons, les tests à 174 A sur les câbles cuivre 1 et cuivre 2 se sont révélés très délicats, à pression atmosphérique comme à pression réduite, et nous n'avons pas pu obtenir d'arc d'une durée de 500 ms.



Figure III-1. Câbles cuivre 1 soudés lors d'un essai.



Figure III-2. Gouttelette de métal éjectée après un essai avec des câbles aluminium.

En mode AC, on observe une forte érosion du métal à 174 A, mais qui ne suffit pas à couper les câbles en 500 ms. À 244 A, les câbles sont tout juste coupés lors des tests à

pression atmosphérique, tandis que l'isolant n'a pas été complètement érodé à 95 mbar. Pour les essais à 350 A enfin, les câbles sont coupés dans tous les cas, sauf pour les câbles cuivre 2 dont l'isolant très épais n'est jamais ablaté totalement.

Concernant les tests sur les câbles en cuivre, nous avons pu observer qu'ils donnent lieu à une production de fumée plus importante que les câbles en aluminium. Les tests sur les câbles en aluminium en revanche provoquent la projection de nombreuses gouttelettes de métal fondu de taille variable. Ces gouttelettes (voir figure III-2) sont recouvertes d'une couche blanche qui pourrait être de l'alumine ( $Al_2O_3$ ).

## **III.2. Données électriques**

Les données électriques sont acquises au moyen des trois sondes de courant (une pour chaque phase et une pour le neutre) et des trois sondes de tension (une entre chaque phase et le neutre, et une entre les deux phases). L'analyse de ces données permet de mieux comprendre le comportement de l'arc, et de caractériser l'accrochage de l'arc à la plaque en aluminium, qui est connectée au neutre du générateur dans le mode AC.

### **III.2.1. En l'absence de transfert de l'arc à la plaque en aluminium**

#### **III.2.1.1. En régime alternatif**

Lorsque l'arc est amorcé entre les câbles, le courant de la phase 1 est identique à celui de la phase 2, puisque chaque câble est connecté à une phase. L'intensité de ce courant est égale à la valeur de consigne. En l'absence de transfert à la plaque, aucun courant ne circule alors dans le neutre.

Pour les essais en AC, si la tension à vide est de 230 V, soit 400 V entre phases, la tension entre les câbles passe à une trentaine de volts aussitôt que l'arc s'amorce. Cette tension d'arc a une forme de créneau (voir figure III-3), présentant des paliers relativement constants et alternativement positifs et négatifs d'une demi-période, c'est-à-dire 0,625 ms à 800 Hz. Les changements d'alternance s'accompagnent d'un pic de tension, dont l'amplitude peut varier d'une alternance à l'autre de quelques volts à plusieurs centaines de volts. Ces pics coïncident avec les passages par zéro du courant, qui impliquent un réamorçage de l'arc pour que celui-ci se maintienne, et correspondent à la montée en tension nécessaire au claquage.

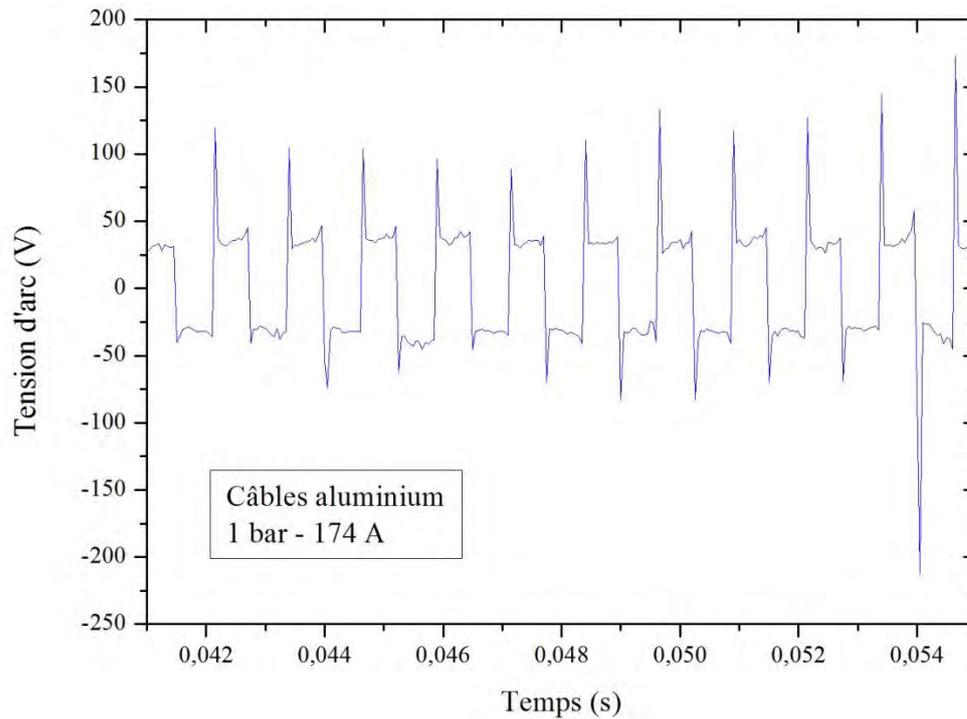


Figure III-3. Allure typique de la tension d'arc en AC (tension phase 1 – phase 2, zoom sur quelques périodes), ici pour un essai à 1 bar et 174 A sur des câbles en aluminium, en l'absence de transfert à la plaque en aluminium.

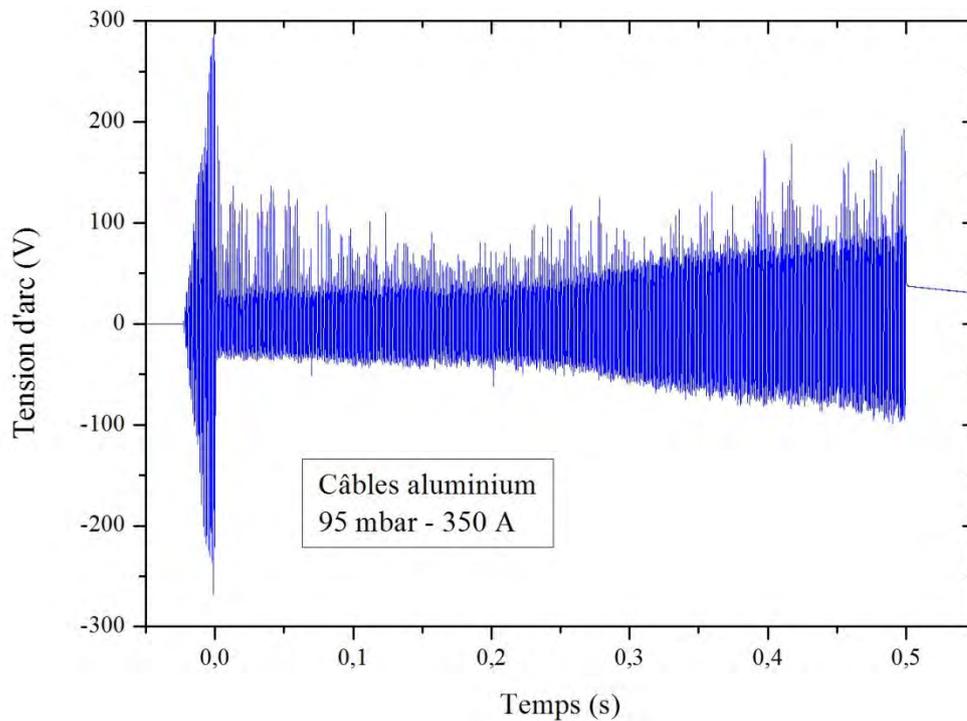


Figure III-4. Augmentation de la tension d'arc en AC (phase 1 – phase 2) au cours d'un essai à 95 mbar et 350 A sur des câbles en aluminium, en l'absence de transfert à la plaque en aluminium.

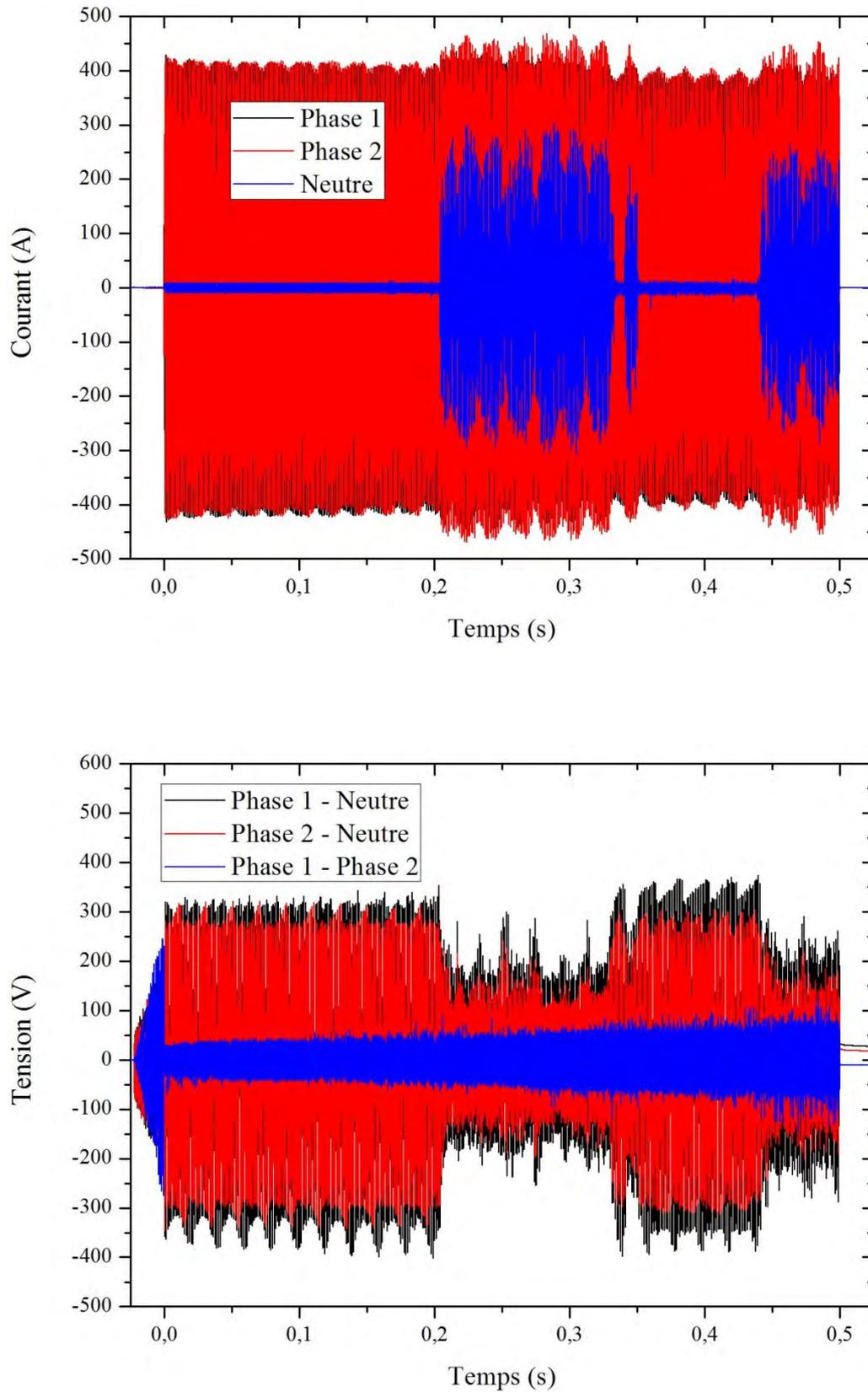


Figure III-5. Courbes de courant (a) et de tension (b) pour un essai à 1 bar à 350 A sur des câbles en aluminium, avec transfert de l'arc à la plaque en aluminium approximativement entre 0,2 et 0,35 s, puis après 0,45 s.

La valeur du plateau de tension d'arc a tendance à augmenter au cours d'un test (voir figure III-4), car elle dépend directement de la longueur de l'arc, et donc de la distance qui sépare les câbles. Ainsi, au début d'un essai, les câbles sont maintenus l'un contre l'autre, mais au fur et à mesure que la dégradation progresse et que les câbles se consomment, la longueur d'arc augmente, particulièrement si les câbles se coupent au cours de l'essai. Ce phénomène est d'autant plus rapide que le courant est plus élevé, et lors de nos tests d'une durée de 500 ms, nous l'avons observé plus particulièrement à 350 A, et à 95 mbar de façon bien plus marquée qu'à pression atmosphérique. Cette différence peut s'expliquer par le fait que l'arc est beaucoup plus diffus à pression réduite, comme nous l'avons observé grâce à l'imagerie rapide (voir §III.5), alors qu'à 1 bar il est plus localisé entre les extrémités des câbles.

### III.2.1.2. En régime continu

En mode continu, la tension d'arc forme un plateau tout au long de l'essai, d'une valeur moyenne de 25 V (voir figure III-6). Les câbles utilisés et le courant de consigne semblent avoir peu d'influence sur cette valeur, et les variations observées dépendent davantage du comportement très erratique de l'arc, unique pour chaque essai. La pression influe peu sur la tension d'arc également, puisqu'on obtient une valeur moyenne de 27,6 V à 1 bar et de 24,5 V à 95 mbar pour des câbles aluminium à 125 A.

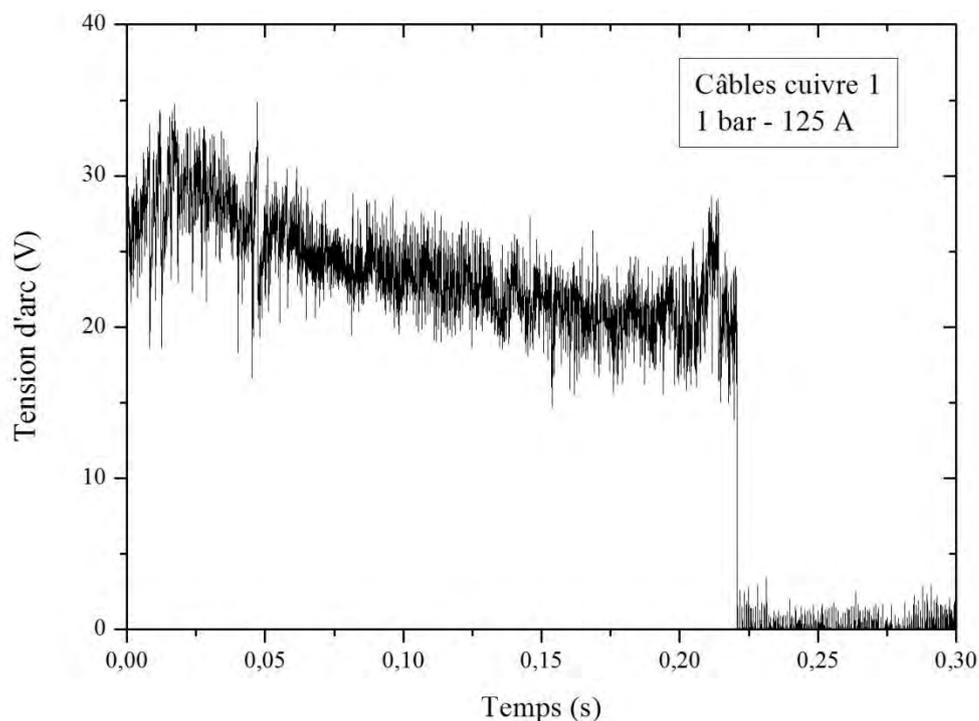


Figure III-6. Tension d'arc pour un essai en mode DC, sur des câbles cuivre 1 à 125 A, à pression atmosphérique. Cet arc a duré 222 millisecondes.

### III.2.2. En présence de transfert de l'arc à la plaque en aluminium

Pour tous les essais, une plaque en aluminium a été placée en regard de la partie dénudée des câbles. L'objectif est d'étudier, en fonction de la distance entre cette plaque et les câbles, la propension de l'arc à s'y transférer, selon le type de câble et la valeur du courant et de la pression. Une étude plus détaillée du transfert de l'arc à la plaque est présentée au chapitre V. Il s'agit ici de présenter les caractéristiques électriques du transfert, telles que permettent de l'observer les données fournies par les sondes de courant et de tension (voir figure III-5).

Le courant dans le neutre (connecté à la plaque) reste nul en l'absence de transfert. Son passage brutal à une valeur de plusieurs centaines d'ampères, indiquant la présence d'un courant de retour par le neutre, (voir figure III-5.a. vers 0,2 seconde, puis vers 0,45 seconde) est le signe de l'initiation du transfert de l'arc à la plaque. Lorsque le transfert cesse, le courant dans le neutre repasse à une valeur nulle (vers 0,35 seconde).

En l'absence de transfert, la tension entre chaque phase (les câbles) et le neutre (la plaque) est égale à la tension simple, c'est-à-dire  $230 V_{\text{eff}}$  (soit une tension maximale d'environ 325 V). Son passage brutal à une valeur inférieure (100 à  $150 V_{\text{max}}$  sur la figure III-5.b.) indique qu'un arc s'est établi entre les câbles et la plaque. À l'interruption du transfert, on retrouve à nouveau la tension simple entre les câbles et la plaque. En ce qui concerne la tension entre les deux phases (la tension de l'arc entre les câbles), son comportement est le même qu'en l'absence de transfert, tout au long de l'essai, avec une augmentation progressive de la tension (d'une trentaine de volts à environ 80 V pour l'essai de la figure III-3.b.) due à l'ablation des câbles qui entraîne un allongement de l'arc.

### III.3. Masse ablatée et taux d'érosion

Pour les tests en mode AC, chaque échantillon de câbles, c'est-à-dire les deux bouts de câbles partiellement dénudés et maintenus en contact par un brin de ruban adhésif (voir figure II-9), est pesé avant essai ( $m_{\text{avant}}$ ). L'ablation des câbles (l'isolant et la partie métallique) due à l'arc au cours de chaque essai entraîne une perte de masse ( $m_{\text{ablatee}}$ ), qui est quantifiée en repesant l'échantillon de câbles après l'essai ( $m_{\text{apres}}$ ) selon le calcul suivant (équation III-1) :

$$m_{\text{ablatee}} = m_{\text{avant}} - m_{\text{apres}} \quad (\text{III-1})$$

Cette masse ablatée est rapportée à un taux d'érosion  $\eta_{\text{erosion}}$  (en g/s), en la divisant par le temps d'arc  $t_{\text{arc}}$  (équation III-2) :

$$\eta_{erosion} (\text{g} \cdot \text{s}^{-1}) = \frac{m_{ablatee}}{t_{arc}} \quad (\text{III-2})$$

Cette conversion s'impose car les essais n'ont pas tous la même durée. En effet, la possibilité de programmer une durée d'arc de 500 ms n'a pas été effective dès le début de l'étude. Par ailleurs, le comportement erratique de l'arc et les conditions d'essai (par exemple un courant trop faible) peuvent mener à une extinction prématurée de l'arc, par coupure ou par court-circuit.

Le tableau III-1 présente les valeurs obtenues dans le cadre de nos essais en AC pour le taux d'érosion ainsi que la vitesse d'érosion. Cette dernière, exprimée en cm/s, correspond à la longueur de câble ablatée par unité de temps. Elle a été calculée en divisant le taux d'érosion par la masse linéique du câble considéré. Chaque valeur correspond à une moyenne calculée à partir de tous les essais réalisés dans des conditions identiques, c'est-à-dire le même type de câble, le même courant et la même pression. L'incertitude provient de la dispersion statistique associée à la mesure de masse de câble ablatée, variable entre chaque essai. Les résultats sont tracés sur le graphe de la figure III-7, en fonction du courant.

Tableau III-1. Valeurs moyennes du taux et de la vitesse d'érosion lors des essais en AC.

| Câble           | Courant (A) | Taux d'érosion (g/s) |             | Vitesse d'érosion (cm/s) |             |
|-----------------|-------------|----------------------|-------------|--------------------------|-------------|
|                 |             | P = 1 bar            | P = 95 mbar | P = 1 bar                | P = 95 mbar |
| Câble aluminium | 174         | 0,9 ± 0,3            | -           | 2,3 ± 0,8                | -           |
|                 | 244         | 1,5 ± 0,2            | 1,6 ± 0,1   | 3,8 ± 0,5                | 4,1 ± 0,3   |
|                 | 350         | 2,3 ± 0,3            | 2,6 ± 0,1   | 5,9 ± 0,8                | 6,7 ± 0,3   |
| Câble cuivre 1  | 174         | -                    | -           | -                        | -           |
|                 | 244         | 2,1 ± 0,6            | 2,0 ± 0,6   | 4,2 ± 1,2                | 4,0 ± 1,2   |
|                 | 350         | 3,2 ± 0,3            | 3,3 ± 0,2   | 6,4 ± 0,6                | 6,6 ± 0,4   |
| Câble cuivre 2  | 174         | -                    | -           | -                        | -           |
|                 | 244         | 2,1 ± 0,2            | -           | 3,4 ± 0,3                | -           |
|                 | 350         | 3,3 ± 0,3            | 3,2 ± 0,1   | 5,3 ± 0,5                | 5,2 ± 0,2   |

Les valeurs manquantes du tableau correspondent à des cas où il n'a pas été possible de recueillir les données de masse, car les essais n'ont pas fonctionné dans les configurations concernées. En effet, à 174 A et particulièrement pour les câbles en cuivre, un pont fondu se forme, ce qui provoque l'extinction de l'arc par court-circuit. Il arrive aussi que le courant ne passe pas, ou qu'un court-circuit franc se produise (voir § III.1). Par ailleurs, à l'issue d'un essai, on observe souvent une gouttelette de métal fondu qui est restée sur les câbles, et n'est donc pas prise en compte dans la mesure de masse ablatée. Cela entraîne une sous-estimation

de la matière fondue, et donc de la puissance nécessaire à cette fusion (voir §IV.3.2). Comme on peut s’y attendre, le taux et la vitesse d’érosion augmentent avec le courant. Le taux d’érosion est également plus élevé dans le cas du cuivre que pour l’aluminium. Si à pression atmosphérique le taux d’érosion semble identique entre les câbles cuivre 1 et cuivre 2, l’épaisseur d’isolant plus importante (et donc la masse linéique supérieure) des câbles cuivre 2 entraîne une diminution significative de la vitesse d’érosion, à même courant. Vu l’incertitude des valeurs obtenues, il est à noter que les résultats ne permettent pas de mettre en évidence une influence de la pression sur le taux d’érosion.

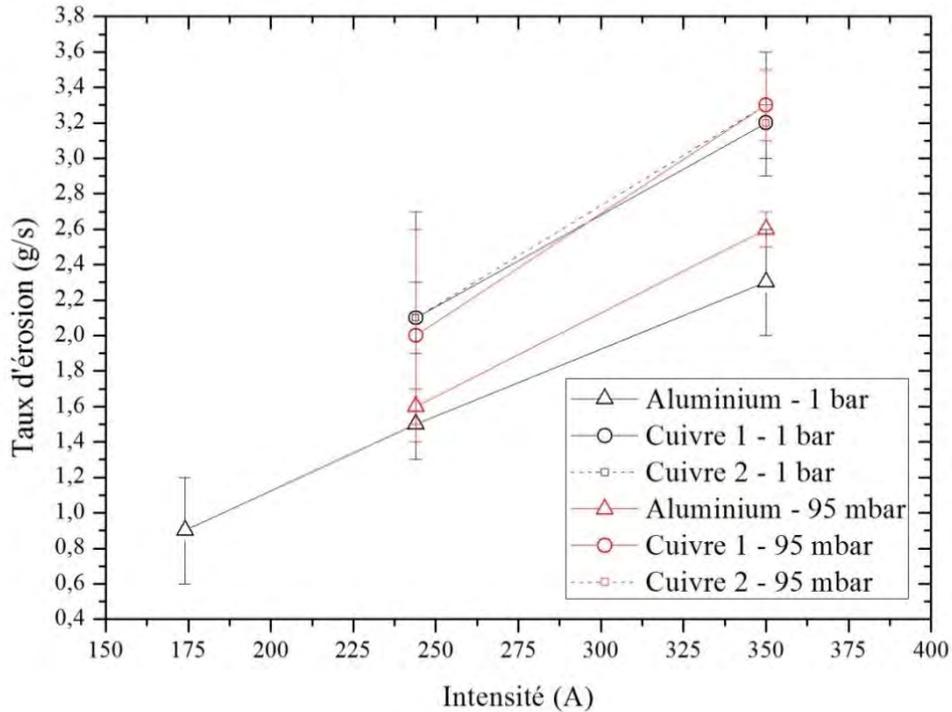


Figure III-7. Taux d’érosion moyen des câbles en fonction du courant.

#### III.4. Flux rayonné

Deux capteurs de flux radiatif ont été disposés à une distance de 9,5 cm de la partie dénudée des câbles. La figure III-8 présente des exemples de résultats, pour des câbles en aluminium à 174 A et des câbles cuivre 1 à 244 A. De façon systématique, le signal fourni par les capteurs de flux radiatif est extrêmement bruité. Sur la figure III-8.a, on observe que le bruit cesse de façon brusque un peu après 0,95 seconde, ce qui coïncide avec la coupure de l’arc, à l’issue du temps d’alimentation (une seconde dans ce cas). De plus, le signal est souvent variable d’un essai à l’autre même lorsque la configuration est identique, c’est-à-dire pour le même type de câble et au même courant. Néanmoins, pour un certain nombre d’essais effectués à pression atmosphérique, on peut observer que les valeurs de flux rayonné se situent approximativement entre 10.000 et 15.000  $W.m^{-2}$ , quelle que soit la configuration.

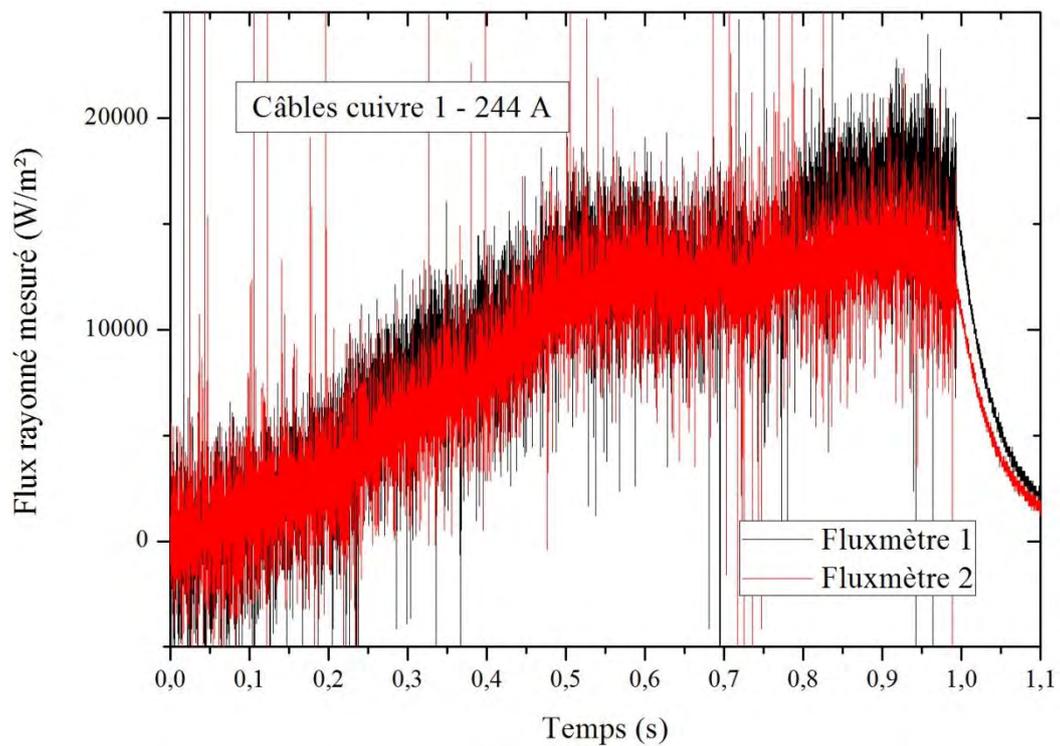
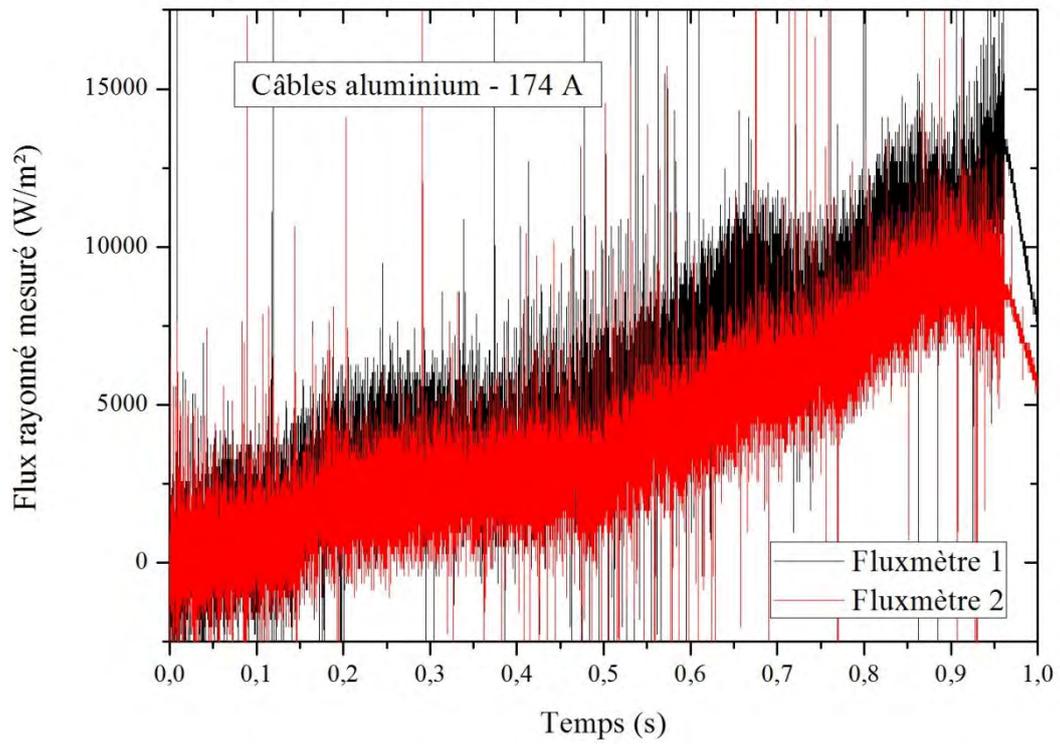


Figure III-8. Données des capteurs de flux radiatif : pour un essai sur des câbles en aluminium à 174 A (a), pour un essai sur des câbles cuivre 1 à 244 A (b), à pression atmosphérique.

Il arrive (comme c'est le cas pour les essais de la figure III-8) que les réponses des deux capteurs soient proches l'une de l'autre, ce qui augmente leur fiabilité. Mais les réponses peuvent, tout en ayant la même allure, s'écarter assez significativement l'une de l'autre, car ces mesures sont marquées par une grande incertitude, pour des causes multiples. En effet, l'arc, qui est fortement erratique, est susceptible de se déplacer sur plusieurs millimètres et donc de s'éloigner d'un capteur et de se rapprocher de l'autre. Parfois, la réponse manifestement trop faible d'un capteur, qui a généralement subi plusieurs essais, indique que ses performances ont décliné. Il est également possible que le rayonnement émis par l'arc soit partiellement caché par l'un des câbles pour un des capteurs, ce qui fausse évidemment la mesure.

Comme cela sera décrit plus loin (voir §IV.4.2), les données des capteurs de flux sont à la base d'un calcul de puissance rayonnée qui suppose que le plasma d'arc est quasi ponctuel (par rapport à la distance des capteurs). Cette hypothèse se trouve fortement mise à mal par les images fournies par la caméra supérieure (voir paragraphe suivant), qui montrent que l'arc est susceptible de se déployer sur les côtés sur une distance relativement importante.

### III.5. Imagerie rapide

Tous les essais ont été filmés à travers un hublot latéral, à l'opposé de la plaque. Cette acquisition permet de visualiser la géométrie de l'arc et son comportement. Il est ainsi possible d'identifier précisément l'instant où le transfert à la plaque s'initie ou s'interrompt, ou encore l'instant où l'arc coupe complètement l'échantillon, marquant le début de la phase où l'arc est libre entre deux extrémités de câbles. Les figures III-9 à III-15 sont extraites des fichiers vidéo obtenus au moyen des deux caméras, principalement de celle qui était positionnée derrière un hublot latéral, et filmait l'arc « de face ». Sur ces images, les câbles sont horizontaux, et l'arc progresse vers la droite (c'est-à-dire du côté où ils sont connectés au générateur).

La figure III-9 présente des images extraites d'un même essai effectué avec des câbles cuivre 1, à 244 A, à pression atmosphérique, et pendant une durée d'une seconde. Les trois instants consécutifs (200, 320 et 640 ms) représentent des phases d'arc différentes. À 200 ms, l'arc est confiné dans le faible espace entre les parties métalliques des câbles, dont l'ablation est encore limitée. À 320 ms, cette ablation est plus avancée, l'arc est plus long, plus large, et de nombreuses gouttelettes de métal sont projetées. À 640 ms, les câbles sont coupés, et l'arc, en phase de tracking établi, consomme les câbles à partir des extrémités libres. Pendant cette phase, l'arc présente dans ce plan une forme triangulaire (les deux « panaches » d'arc issus des câbles se rejoignent), tandis que de nombreuses gouttelettes de métal en fusion sont éjectées.

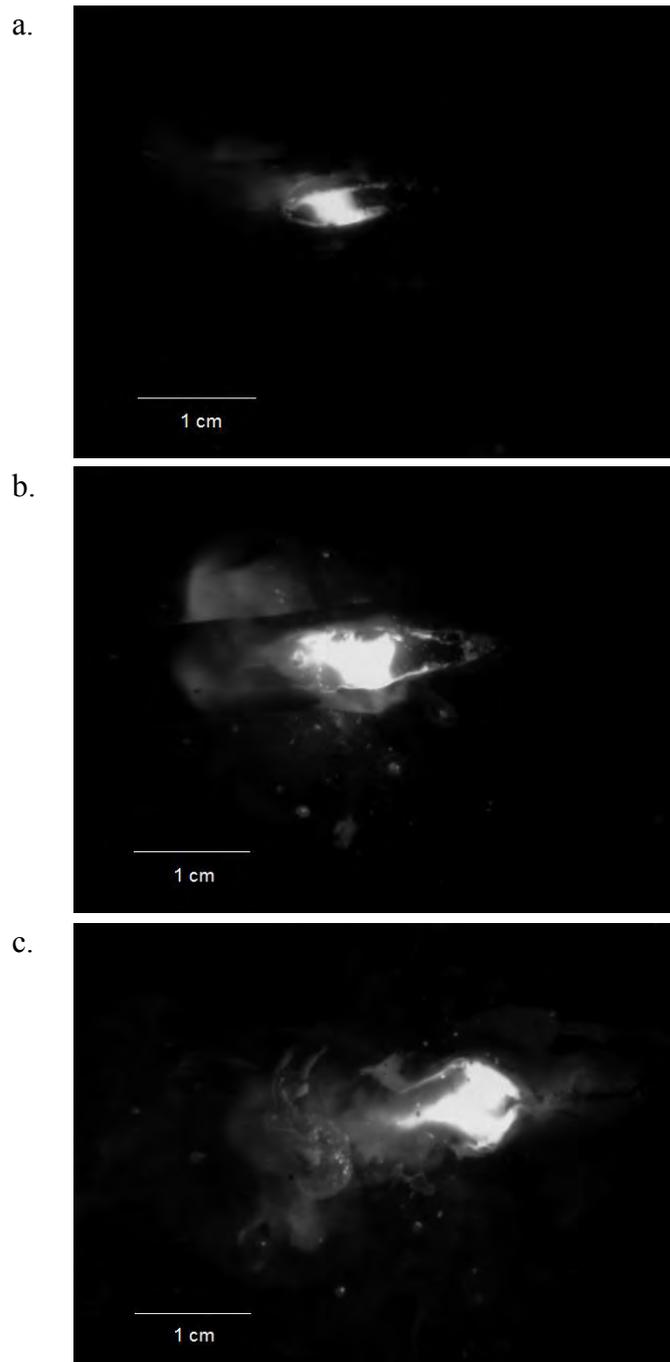


Figure III-9. Trois images extraites d'un même essai (câbles cuivre 1, à 244 A, à pression atmosphérique), à trois instants successifs : 200 ms (a), 320 ms (b) et 640 ms (c). Le temps d'exposition est de 10  $\mu$ s.

L'image de la figure III-10 est extraite d'un essai effectué avec des câbles en aluminium dans les mêmes conditions (à 244 A, à 1 bar), après la coupure des câbles. Avec des câbles en aluminium, la forme triangulaire de l'arc n'est pas constante pendant toute la phase de tracking établi. Il est fréquent que les deux « panaches » d'arc issus des câbles semblent ne pas se rejoindre. Ils apparaissent très souvent parallèles, comme sur cette figure, voire légèrement divergents entre eux.

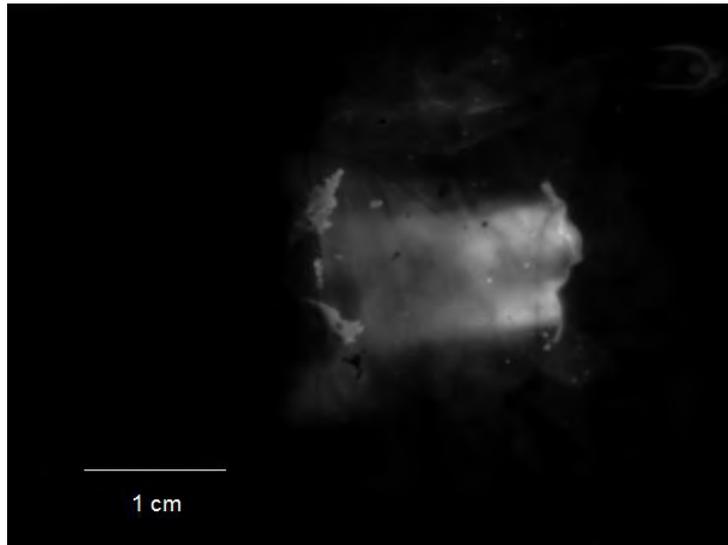


Figure III-10. Image extraite d'un essai sur des câbles aluminium, à 244 A, à pression atmosphérique. Le temps d'exposition est de 10  $\mu$ s.

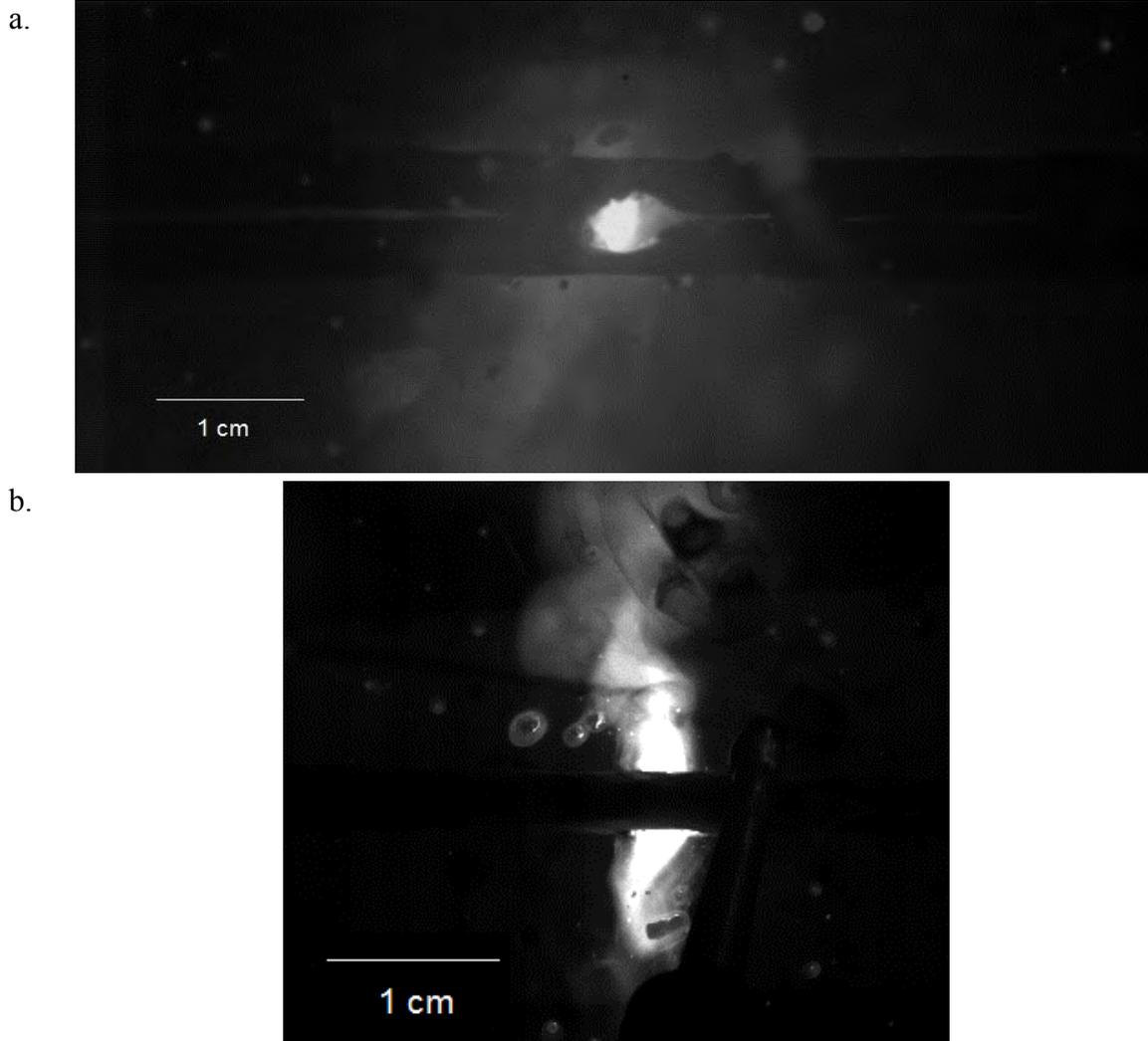


Figure III-11. Images extraites d'un essai sur des câbles aluminium à 350 A, à 1 bar. Les deux images correspondent au même instant : vue latérale (le temps d'exposition est de 30  $\mu$ s) (a), et vue de haut (le temps d'exposition est de 1,11  $\mu$ s) (b).

Pour quelques essais effectués à la fin de l'étude, une seconde caméra a été placée au-dessus de l'enceinte afin de filmer l'arc par le haut, à travers le hublot supérieur. Les deux images de la figure III-11 sont extraites d'un même essai sur des câbles aluminium à 350 A, à pression atmosphérique. L'une est prise de côté, comme les précédentes, tandis que l'autre est prise par le haut au même instant. Cette dernière permet de constater que l'arc se déploie sur les côtés, sur une distance qui avoisine ici le double de la section des câbles. Ce comportement n'était pas visible au moyen des images fournies par la caméra latérale, qui ont longtemps été les seules disponibles lors de cette étude. Cette information est précieuse pour une meilleure compréhension des phénomènes à l'origine de l'accrochage de l'arc à la plaque en aluminium, qui seront discutés au chapitre V.

Le transfert à la plaque est bien visible sur la figure III-12, qui correspond à un essai avec des câbles en aluminium à 244 A, à pression atmosphérique, enregistré grâce à la caméra positionnée derrière le hublot supérieur.



Figure III-12. Image extraite d'un essai sur des câbles en aluminium, à 244 A, à pression atmosphérique. Cette image est prise au moyen de la caméra supérieure, alors que l'arc s'est transféré à la plaque en aluminium. Le temps d'exposition est de 1,11  $\mu$ s.

À pression réduite, l'arc se comporte de façon beaucoup plus diffuse qu'à pression atmosphérique, c'est-à-dire que le plasma d'arc occupe un espace plus grand autour des câbles, même dans la phase initiale, lorsque l'arc se trouve entre les deux parties dénudées. Il est bien visible sur la figure III-13 (pour un essai sur des câbles cuivre 2 à 244 A), en comparaison aux images analogues qui précèdent, que le plasma est moins dense et moins lumineux qu'à pression atmosphérique. Ainsi, au contraire des figures III-9.a. et b. et III-11.a. où la colonne d'arc apparaît très distinctement entre les parties dénudées, on observe plutôt un nuage de plasma.

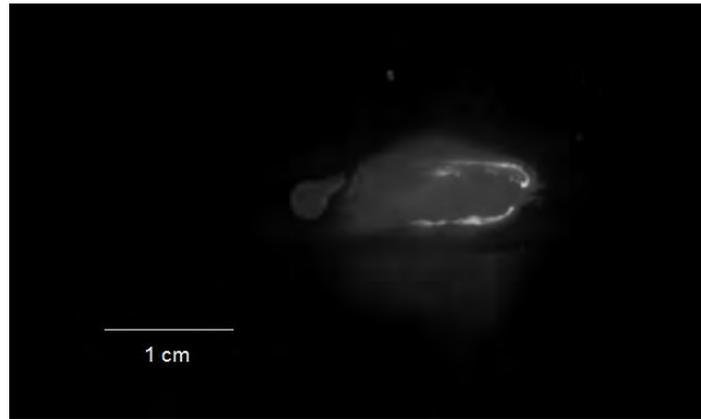


Figure III-13. Image extraite d'un essai sur des câbles cuivre 2, à 244 A, à 95 mbar. Le temps d'exposition est de 30  $\mu$ s.

Il en est de même pour le transfert à la plaque, tel que le montre la figure III-14, pour un essai sur des câbles en aluminium à 350 A, à comparer avec la figure III-12 pour une image analogue à pression atmosphérique. La figure III-15 présente une image extraite d'un essai réalisé à pression réduite, avec des câbles cuivre 1, à 350 A. L'arc est alors en phase de tracking établi, c'est-à-dire que les câbles sont complètement coupés. À 95 mbar, on n'observe jamais de forme triangulaire comme c'est souvent le cas à pression atmosphérique (voir figure III-9.c.), mais deux panaches qui paraissent ne pas se rejoindre, et dans le prolongement des câbles qui se consomment.

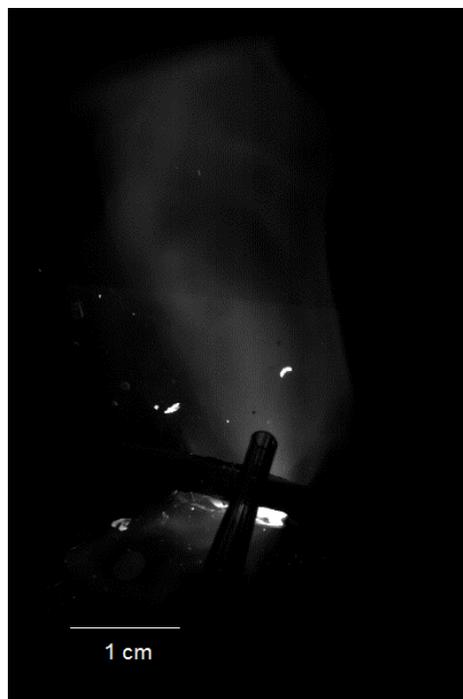


Figure III-14. Image extraite d'un essai sur des câbles en aluminium, à 350 A, à 95 mbar. Cette image est prise au moyen de la caméra supérieure, alors que l'arc s'est transféré à la plaque en aluminium. Le temps d'exposition est de 1,11  $\mu$ s. Le dispositif assurant la chute des gouttes d'eau salée est visible, perpendiculaire aux câbles.

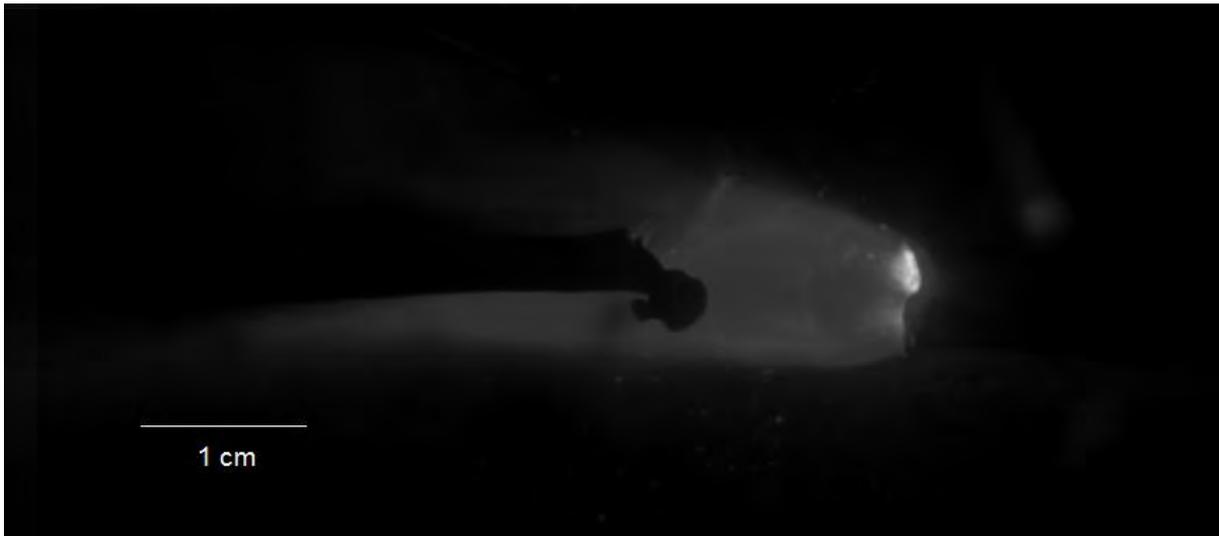


Figure III-15. Image extraite d'un essai sur des câbles cuivre 1, à 350 A, à 95 mbar. Les câbles sont complètement coupés et l'arc est en phase de tracking établi. Le temps d'exposition est de 30  $\mu$ s.

### III.6. Conclusion

Comme cela a été présenté, des données de nature diverse sont acquises au cours de chaque essai. Elles sont notamment constituées des mesures électriques de courant et de tension, recueillies au moyen des sondes, des mesures de flux rayonné grâce aux deux capteurs de flux radiatif, et de la mesure de masse des câbles avant et après essai, permettant de quantifier la masse d'échantillon ablatée. Ces résultats expérimentaux sont à la base de la plus grande partie du bilan de puissance que nous effectuons à partir de ces essais, et qui est décrit dans le chapitre IV.

L'imagerie rapide permet de visualiser la forme et le comportement de l'arc, à la fois de face et de haut, depuis le moment où le plasma est confiné entre les phases dénudées des câbles, jusqu'à la phase de tracking établi, où les câbles sont coupés et consumés par l'arc. Les résultats d'imagerie infrarouge seront présentés au chapitre V, qui traite spécifiquement de l'étude du transfert de l'arc à la plaque en aluminium.



## Chapitre IV – Bilan de puissance

Afin d'estimer les différentes contributions de puissance, nous avons établi un bilan définissant la répartition de la puissance électrique totale. Cette puissance est partagée entre d'une part les électrodes, c'est-à-dire les câbles, qui sont dégradés au cours des essais, et dissipent de la puissance par conduction et rayonnement, et d'autre part la colonne d'arc, où la puissance est dissipée par rayonnement, conduction et convection. Ce bilan s'appuie autant que possible sur les données expérimentales : les données de courant et de tension, la mesure de masse ablatée et les données des capteurs de flux rayonné. Le bilan de puissance est également basé sur des données issues de la littérature (chutes de tension aux électrodes notamment) ainsi que sur des données calculées comme les coefficients d'émission nette. Les termes inaccessibles à une mesure directe ont été inférés par soustraction. Ce chapitre concerne presque exclusivement les essais effectués en régime alternatif.



## IV.1. Bilan général

La décomposition du bilan de puissance général que nous avons considéré est présentée sur la Figure IV-1 ci-dessous. Chaque terme du bilan est explicité dans les sections suivantes de ce chapitre, à partir des essais effectués en mode AC, qui constituent la partie prépondérante de ce travail. Les résultats obtenus en régime continu sont présentés à part à la fin de ce chapitre, car ils sont beaucoup moins nombreux et ont fait l'objet d'une analyse moins poussée, en l'absence de données de masse ablatée et de flux rayonné.

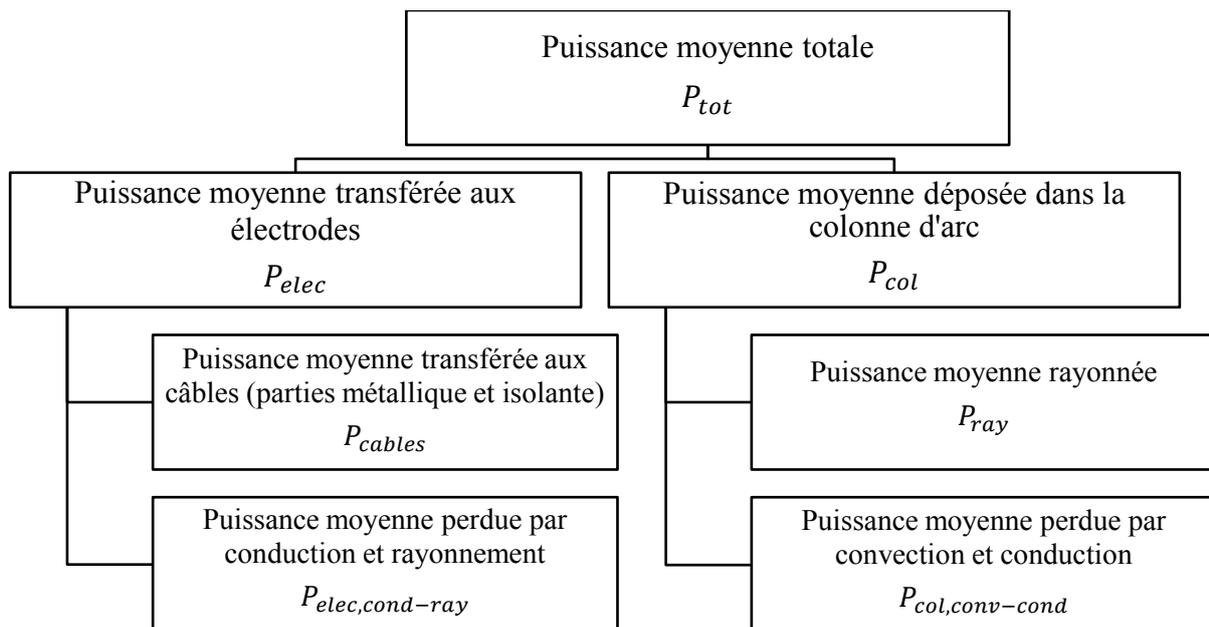


Figure IV-1. Bilan de puissance général.

## IV.2. Puissance totale

### IV.2.1. Calcul et résultats

La puissance totale est déterminée à partir des données électriques, selon le calcul suivant (IV-1) :

$$P_{tot} = \frac{1}{t_{arc}} \int_{t_{arc}} u(t)i(t)dt \quad (IV-1)$$

où  $u(t)$  est la tension entre phase 1 et phase 2 (c'est-à-dire la tension d'arc),  $i(t)$  le courant de phase (c'est-à-dire le courant d'arc), et  $t_{arc}$  la durée d'arc pendant laquelle l'intégration est effectuée. Cette période d'intégration est choisie lorsque l'arc est établi, et en l'absence de transfert à la plaque en aluminium.

Le tableau IV-1 et la figure IV-2 présentent les valeurs obtenues pour la puissance totale dans le cadre de nos essais en mode AC. Chaque valeur correspond à une moyenne calculée à partir de tous les essais réalisés dans des conditions identiques, c'est-à-dire le même type de câble, le même courant et la même pression. Les trois valeurs indiquées en italique n'ont été calculées qu'à partir d'un seul essai, en raison des difficultés à obtenir des résultats dans les configurations correspondantes (voir §III.1). L'incertitude sur les valeurs provient de la dispersion statistique associée aux données de tension, variables entre chaque essai.

L'intégration de l'équation IV-1 a été effectuée au début de la phase d'arc, sur 200 à 300 ms, et en l'absence de transfert à la plaque en aluminium. Pour les essais où l'ablation est rapide et où la tension d'arc a tendance à augmenter (surtout à 350 A, mais aussi à 244 A), parfois jusqu'à dépasser 80 V à 400 ms à 95 mbar, nous nous sommes alors limités aux 100 ou 150 millisecondes initiales, où la valeur des plateaux de la tension d'arc est relativement constante.

Pour chaque couple câble-courant, hormis ceux qui ne comprennent qu'un seul test, la puissance totale à 95 mbar est entre 19 et 23% plus faible qu'à pression atmosphérique. Le courant étant identique, cela s'explique par le fait que la tension d'arc est moindre à pression réduite.

Tableau IV-1. Valeurs moyennes de puissance totale.

| Câble           | Courant (A) | Puissance totale (W) |             |
|-----------------|-------------|----------------------|-------------|
|                 |             | P = 1 bar            | P = 95 mbar |
| Câble aluminium | 174         | 5099 ± 750           | 4043 ± 400  |
|                 | 244         | 7630 ± 900           | 6195 ± 400  |
|                 | 350         | 12502 ± 1100         | 10126 ± 600 |
| Câble cuivre 1  | 174         | 4201 ± 400           | <i>4115</i> |
|                 | 244         | 6738 ± 1000          | 5464 ± 300  |
|                 | 350         | 11501 ± 1000         | 9363 ± 500  |
| Câble cuivre 2  | 174         | <i>5680</i>          | <i>5780</i> |
|                 | 244         | 7898 ± 400           | 6091 ± 100  |
|                 | 350         | 12246 ± 1100         | 9762 ± 600  |

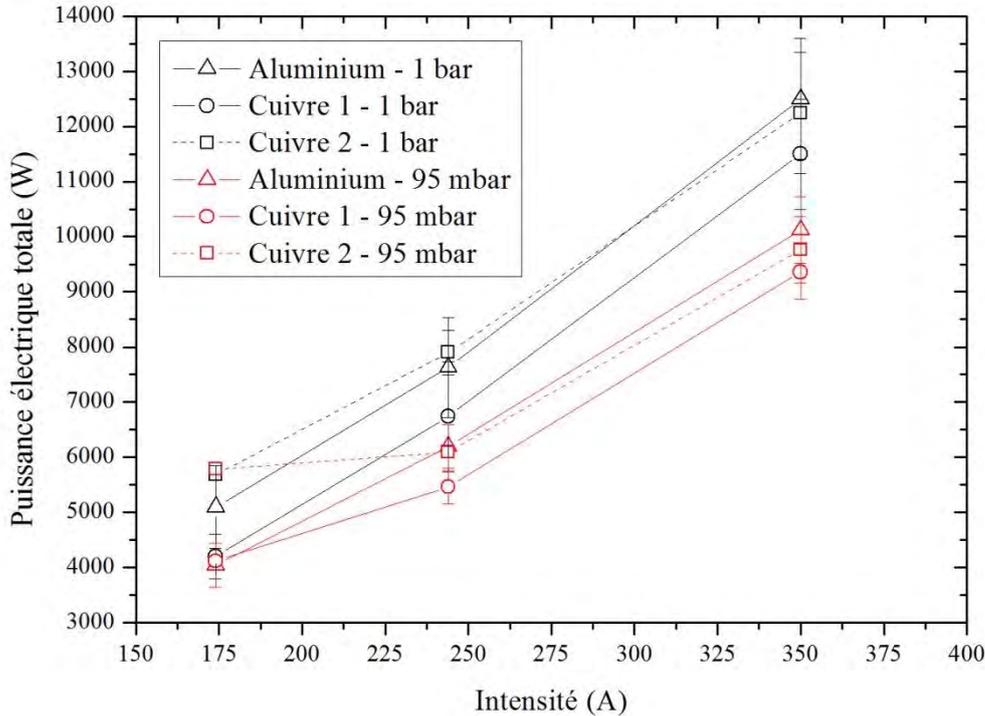


Figure IV-2. Puissance totale moyenne en fonction du courant.

### IV.2.2. Répartition de la puissance totale

La tension d'arc  $u(t)$  se répartit entre les électrodes et la colonne d'arc, et peut être exprimée ainsi (IV-2) :

$$u(t) = U_{elec} + u_{colonne}(t) \quad (IV-2)$$

où  $U_{elec}$  est la chute de tension aux électrodes, dans la zone anodique et la zone cathodique (elle est supposée indépendante du courant) et  $u_{col}(t)$  la tension de la colonne d'arc. La chute de tension aux électrodes correspond à la somme des potentiels  $V_a$  et  $V_c$  (voir équation IV-3), qui sont respectivement les chutes de tensions anodique et cathodique (voir §I.1.1) :

$$U_{elec} = V_a + V_c \quad (IV-3)$$

Une partie de la puissance totale  $P_{tot}$  est transférée aux électrodes que constituent les câbles. Les câbles sont chauffés à la fois par l'arc électrique et par l'effet Joule dû au courant de décharge. Cet échauffement du métal atteint la température de fusion et de vaporisation, et provoque donc une forte érosion des câbles, aussi bien de la partie métallique que de la couche isolante. Le reste de la puissance perdue dans les câbles est dissipé par conduction et rayonnement thermiques. L'autre partie de la puissance totale est déposée dans la colonne d'arc, où elle est rayonnée, ou dissipée par conduction et convection. Notons que des réactions chimiques peuvent également être initiées par l'arc [38].

### IV.3. Puissance transférée aux électrodes

#### IV.3.1. Puissance totale transférée aux électrodes

##### IV.3.1.1. Généralités

La puissance totale  $P_{elec}$  transférée aux électrodes est liée aux chutes de tension anodique et cathodique [39], [40], et on peut considérer qu'elle est approximativement égale au produit de la chute de tension et du courant (IV-4) :

$$P_{elec} = U_{elec} \times I_{eff} \quad (IV-4)$$

où  $I_{eff}$  est la valeur efficace du courant de phase, donc du courant d'arc. Il est donc nécessaire d'estimer la valeur de la chute de tension aux électrodes  $U_{elec}$ , qui est importante dans l'étude de l'érosion de la surface des électrodes. Nous allons pour cela considérer la relation entre la tension d'un arc et sa longueur. Cette question a déjà été traitée par plusieurs auteurs [41], [42], et dans notre cas nous supposons une simple relation de proportionnalité entre la tension de la colonne d'arc et sa longueur, qui peut être exprimée comme suit :

$$u_{col} = E_{col} \times l \quad (IV-5)$$

où  $E_{col}$  est le champ électrique moyen au sein de la colonne de plasma, et  $l$  la longueur de la colonne d'arc. On suppose que  $E_{col}$  ne dépend pas du courant [43], [44] ni de la forme de l'arc. La combinaison de (IV-2) et (IV-5) donne la relation suivante (IV-6) :

$$u = U_{elec} + E_{col} \times l \quad (IV-6)$$

On suppose ainsi que la tension d'arc totale  $u$  est une fonction linéaire de la longueur d'arc  $l$ .

##### IV.3.1.2. Estimation de la chute de tension aux électrodes

D'après l'équation (II-4), il apparaît que l'extrapolation à une longueur d'arc nulle donne une estimation de la chute de tension aux électrodes  $U_{elec}$ , correspondant à un cas où la tension d'arc serait égale à la chute de tension aux électrodes, c'est-à-dire à la somme des chutes de potentiel anodique et cathodique.

Nous avons effectué une estimation de cette chute de tension au moyen d'un test dédié, à 95 mbar. Concernant la pression atmosphérique, nous nous sommes appuyés sur les études qui ont déjà été menées sur le sujet [4], [32] concernant l'aluminium et le cuivre, et qui fournissent des valeurs de l'ordre de 18 à 20 V, en accord avec les valeurs que l'on peut trouver dans la littérature [43]–[48]. Ce test a consisté à fixer deux morceaux de câbles bout à bout, dans le prolongement d'un de l'autre, de manière à ce que les parties conductrices soient

tout juste en contact. Différents essais ont été réalisés en soumettant les câbles à nos conditions d'essais, c'est-à-dire nos trois courants d'étude (174 A, 244 A et 350 A), sous 230 V AC. L'arc série qui se forme dans ces conditions entre les deux câbles les dégrade progressivement, ce qui l'oblige à s'allonger. Ces essais ont été tentés sur des câbles aluminium et cuivre 1, mais ils n'ont pas fonctionné pour ces derniers. En effet, soit une étincelle se produisait et le courant ne passait plus, soit au contraire un court-circuit franc avait lieu, si bien que pour ce type de câble aucun essai n'a donné lieu à un arc qui se maintienne. Pour les câbles aluminium, en revanche, l'amorçage s'est révélé aisé à chaque fois.



Figure IV-3. Photo de l'arc lors d'un test de détermination de la chute de tension aux électrodes, pour des câbles aluminium, à 174 A et à 95 mbar. Cette image correspond à un temps d'arc de 490 ms. Le temps d'exposition est de 30  $\mu$ s.

La figure IV-3 présente une image d'arc durant un de ces essais, où on distingue bien l'arc entre les deux câbles. En s'appuyant sur ce que fournit l'imagerie rapide, on peut donc mesurer la longueur d'arc et la corrélérer avec la tension d'arc acquise simultanément. La figure IV-4 présente la tension d'arc lors d'un de ces essais, où l'on peut observer l'augmentation de l'amplitude de la tension qui accompagne l'allongement de l'arc. Ainsi, vers 0,3 seconde, peu après l'amorçage de l'arc, l'amplitude de la tension d'arc est d'environ 25 V, tandis qu'à 0,7 seconde elle atteint 70 V.

Signalons que lors de ces tests, dont la configuration diffère de celle des essais de l'étude et pour lesquels nous avons filmé à la vitesse de 4000 images par seconde, le comportement de l'arc tel qu'on peut l'observer grâce à l'imagerie rapide permet parfaitement de distinguer le caractère alternatif du courant. En effet, les mouvements de l'arc vers la gauche puis vers la droite à la fréquence de 800 Hz sont nettement visibles, séparés par une extinction de l'arc lors des passages par zéro du courant. Dans ce contexte, où l'arc n'a pas nécessairement la forme d'un canal entre les deux câbles, la mesure de sa longueur est difficile à plusieurs titres. Précisons qu'il s'agit en fait de la longueur qui sépare les extrémités des deux câbles qui est mesurée, ce qui n'est pas forcément évident car le pied d'arc peut être

caché par une partie de l'isolant, auquel cas la longueur est sous-estimée. De plus, les câbles ne sont pas aisés à maintenir dans cette position car ils ne sont fixés que par une extrémité, l'autre étant en suspension. Il peut donc arriver que l'axe de la caméra ne soit pas parfaitement perpendiculaire à celui de l'arc, ce qui conduit également à une sous-estimation de la longueur. La figure IV-5 présente les résultats de ces essais à 174 A et 95 mbar, pour lesquels la relation linéaire entre la tension et la longueur d'arc apparaît de façon relativement satisfaisante.

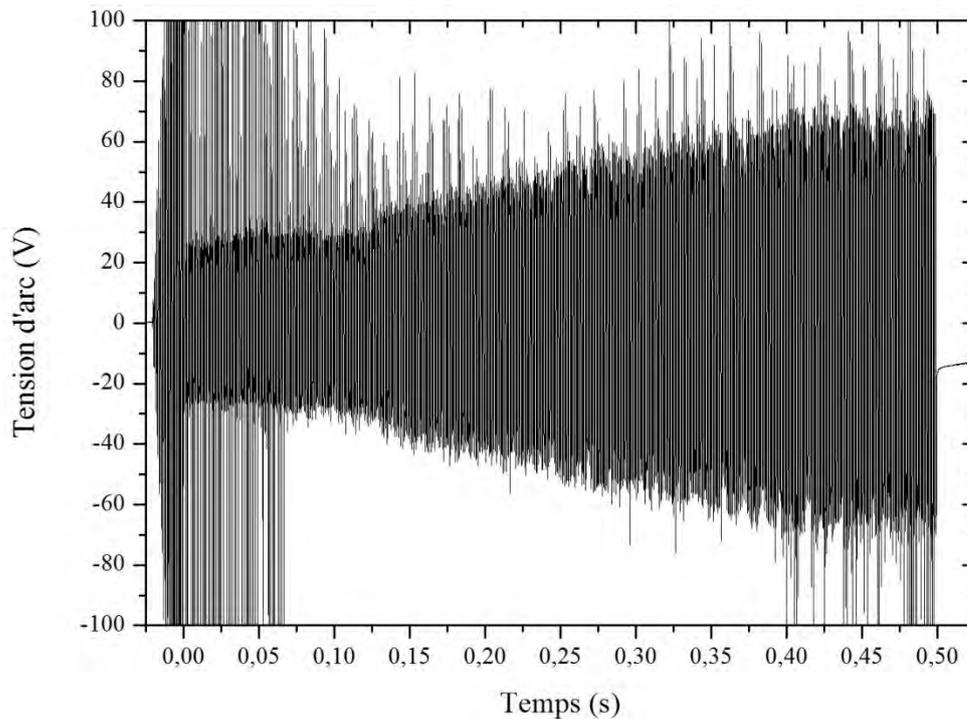


Figure IV-4. Tension d'arc lors d'un test de détermination de la chute de tension aux électrodes, pour des câbles aluminium, à 174 A et 95 mbar.

À 244 et 350 A, les tests effectués n'ont pas permis de mettre en évidence la linéarité entre la tension et la longueur d'arc. En effet, avec l'augmentation du courant, le comportement erratique de l'arc est encore plus marqué. Ainsi, sa forme n'étant pas celle d'un canal entre les câbles, la mesure de la distance séparant les extrémités des câbles ne correspond pas à la longueur d'arc, qui devient impossible à mesurer.

Finalement, nous avons adopté la valeur de 12 V obtenue lors de nos essais à 95 mbar avec des câbles aluminium à 174 A. Comme la chute de tension n'est pas supposée dépendre de l'intensité, nous l'avons utilisée pour les trois valeurs de courant. À la pression atmosphérique, nous avons conservé les valeurs données par la littérature et confirmées lors de nos travaux antérieurs sur l'arc tracking [4], [32], c'est-à-dire 19 V pour l'aluminium et 18 V pour le cuivre (voir figure IV-6). Comme ces deux valeurs sont très proches, et variables de quelques volts selon les sources, nous avons supposé qu'à pression réduite (95 mbar) la valeur de la chute de tension aux électrodes était la même pour le cuivre que pour

l'aluminium, c'est-à-dire 12 V (rappelons qu'aucun test n'a fonctionné à basse pression pour des câbles en cuivre).

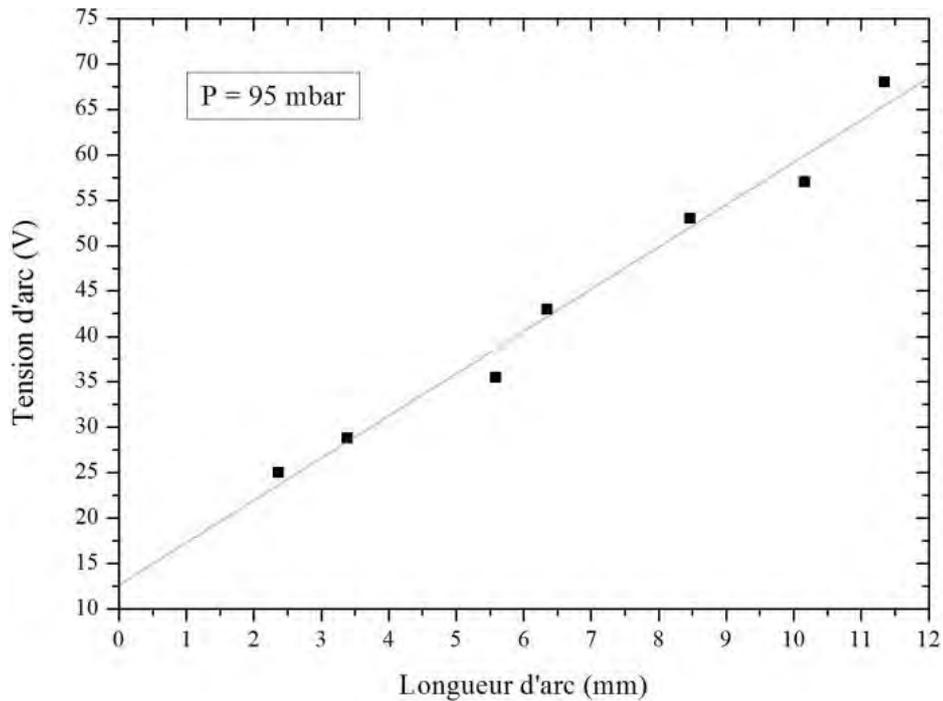


Figure IV-5. Tension d'arc en fonction de la longueur d'arc pour des câbles aluminium, à 95 mbar. Ce test a été effectué à 174 A.

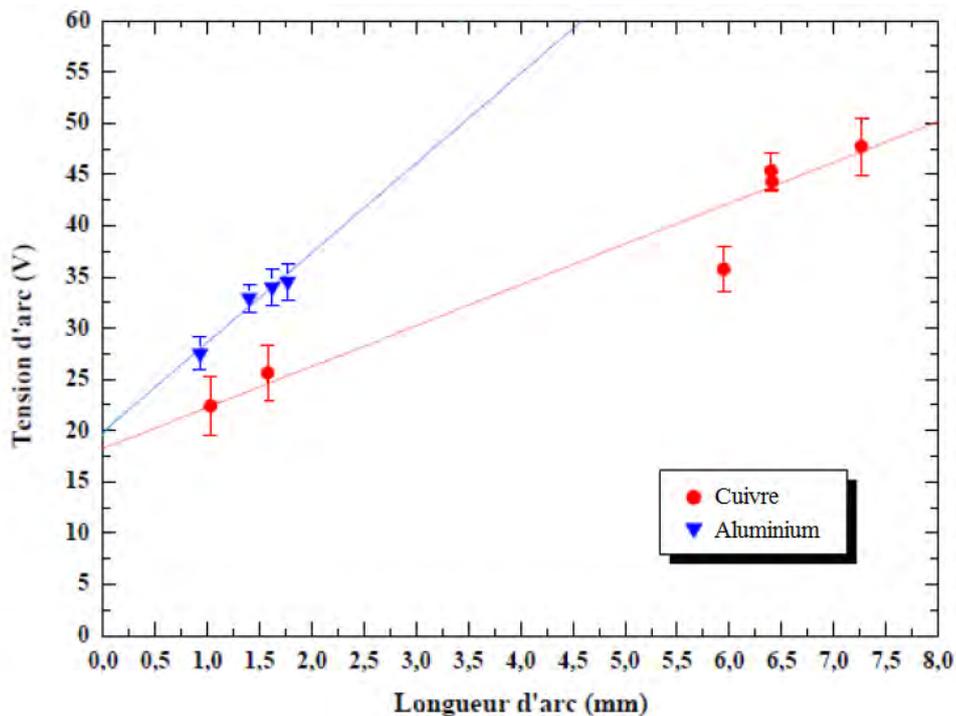


Figure IV-6. Tension d'arc en fonction de la longueur d'arc pour des câbles aluminium et cuivre, à pression atmosphérique [32].

### IV.3.1.3. Résultats

Le tableau IV-2 recense les valeurs de puissance transférée aux électrodes dans toutes les configurations que nous avons étudiées. Elles sont calculées selon l'équation IV-4, au moyen des valeurs de chutes de tension aux électrodes définies au paragraphe précédent. À pression atmosphérique, pour un courant donné, les valeurs sont identiques entre les câbles cuivre 1 et cuivre 2, car la chute de tension est identique. De même, à pression réduite, pour tous les câbles la valeur de puissance transférée aux électrodes ne dépend que du courant. Ainsi, il est à noter que ce calcul est indépendant des tests d'arc tracking effectués, et que les résultats sont issus de données fixées. L'incertitude donnée provient de l'incertitude associée à la mesure de la chute de tensions aux électrodes (de l'ordre de 10 à 15%). À droite de chacune de ces valeurs de puissance en watts figure le pourcentage qu'elle représente par rapport à la puissance totale moyenne dans la même configuration. Comme précédemment, chaque valeur correspond à la moyenne des valeurs obtenues pour tous les essais de la configuration considérée (câble-courant-pression), et les valeurs en italique correspondent aux cas où le calcul n'a été possible que pour un unique essai. Ces résultats sont représentés sur le graphe de la figure IV-7.

À pression atmosphérique, la puissance électrique est majoritairement transférée aux électrodes, mais cette part décroît avec le courant. Elle est plus élevée pour le cuivre que pour l'aluminium, mais cette différence disparaît à fort courant. La part transférée aux électrodes, en pourcentage du total, est plus faible à pression réduite. En effet, bien que la puissance totale soit plus faible de 20% par rapport à la pression atmosphérique, le passage de la chute de tension aux électrodes de 18-19 V à 12 V est à l'origine de la diminution de cette part.

Tableau IV-2. Valeurs moyennes de puissance transférée aux électrodes, et proportion que cette puissance représente par rapport à la puissance électrique totale.

| Câble           | Courant<br>(A) | Puissance aux électrodes |                                |             |                                |
|-----------------|----------------|--------------------------|--------------------------------|-------------|--------------------------------|
|                 |                | P = 1 bar                |                                | P = 95 mbar |                                |
|                 |                | Valeur (W)               | Par rapport<br>à $P_{tot}$ (%) | Valeur (W)  | Par rapport<br>à $P_{tot}$ (%) |
| Câble aluminium | 174            | 3306 ± 330               | 65                             | 2088 ± 210  | 52                             |
|                 | 244            | 4636 ± 460               | 61                             | 2928 ± 290  | 47                             |
|                 | 350            | 6650 ± 670               | 53                             | 4200 ± 420  | 41                             |
| Câble cuivre 1  | 174            | 3132 ± 310               | 75                             | 2088 ± 210  | <i>51</i>                      |
|                 | 244            | 4392 ± 440               | 65                             | 2928 ± 290  | 54                             |
|                 | 350            | 6300 ± 630               | 55                             | 4200 ± 420  | 45                             |
| Câble cuivre 2  | 174            | 3132 ± 310               | 55                             | 2088 ± 210  | 36                             |
|                 | 244            | 4392 ± 440               | 56                             | 2928 ± 290  | 48                             |
|                 | 350            | 6300 ± 630               | 51                             | 4200 ± 420  | 43                             |

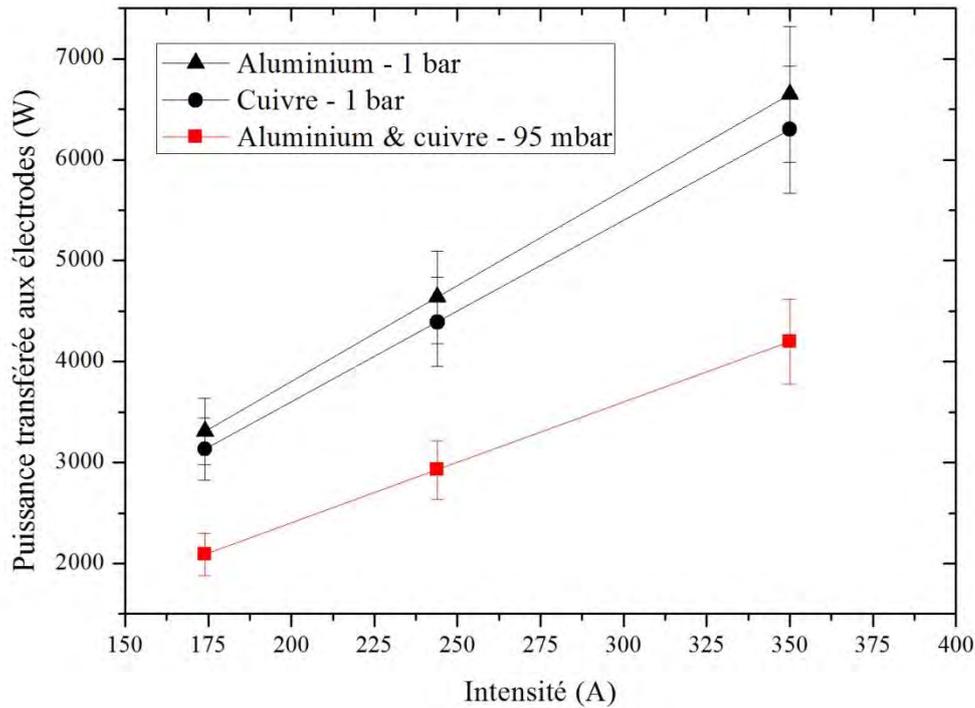


Figure IV-7. Puissance moyenne transférée aux électrodes en fonction du courant.

### IV.3.2. Fusion et vaporisation des câbles

#### IV.3.2.1. Calcul

Une partie de la puissance transférée aux électrodes est à l'origine de la fusion et de la vaporisation du métal, et l'énergie correspondante  $E_{metal}$  peut être exprimée comme suit (IV-7) :

$$E_{metal} = E_{fus} + E_{vap} \quad (IV-7)$$

où  $E_{fus}$  est l'énergie nécessaire pour la fusion du métal, et  $E_{vap}$  l'énergie nécessaire pour sa vaporisation.

#### *Fusion du métal*

L'énergie nécessaire à la fusion du métal peut être exprimée de la façon suivante (IV-8) :

$$E_{fus} = Q_{fus} + m_{fus} \times L_{fus} \quad (IV-8)$$

où  $Q_{fus}$  est la quantité de chaleur nécessaire pour que le métal passe de la température ambiante à sa température de fusion,  $m_{fus}$  est la masse de métal fondu,  $L_{fus}$  est la chaleur latente de fusion du métal considéré.

$Q_{fus}$  peut être développé de la façon suivante (IV-9) :

$$Q_{fus} = m_{fus} \times \int_{T_{amb}}^{T_{fus}} C_{sol}(T) dT \quad (\text{IV-9})$$

où  $T_{amb}$  et  $T_{fus}$  sont la température ambiante et la température de fusion du métal respectivement, et  $C_{sol}(T)$  la capacité thermique massique à l'état solide du métal considéré, qui varie avec la température. En combinant les équations (IV-8) et (IV-9), nous obtenons la relation suivante (IV-10) :

$$E_{fus} = m_{fus} \times \left( L_{fus} + \int_{T_{amb}}^{T_{fus}} C_{sol}(T) dT \right) \quad (\text{IV-10})$$

Il est manifeste que la totalité de la masse de métal ablatée a été fondue au cours de l'essai, aussi nous donnons à  $m_{fus}$  la valeur de la masse ablatée, mesurée après chaque essai. Comme nous raisonnons en termes de puissance afin de pouvoir comparer les tests entre eux, nous avons en fait considéré le taux d'érosion, en divisant la masse ablatée par la durée d'arc.

#### *Vaporisation du métal*

De la même façon, l'énergie nécessaire à la vaporisation de métal fondu peut être exprimée ainsi (IV-11) :

$$E_{vap} = Q_{vap} + m_{vap} \times L_{vap} \quad (\text{IV-11})$$

où  $Q_{vap}$  est la quantité de chaleur nécessaire pour que le métal passe de sa température de fusion à sa température d'ébullition,  $m_{vap}$  est la masse fondue qui se retrouve vaporisée,  $L_{vap}$  est la chaleur latente de vaporisation du métal considéré.  $Q_{fus}$  peut être développé de la façon suivante (IV-12) :

$$Q_{vap} = m_{vap} \times \int_{T_{fus}}^{T_{vap}} C_{liq}(T) dT \quad (\text{IV-12})$$

où  $T_{vap}$  est la température d'ébullition du métal considéré, et  $C_{liq}(T)$  la capacité thermique massique à l'état liquide du métal considéré. Contrairement à l'état solide,  $C_{liq}$  ne varie pas avec la température, donc l'équation (IV-12) peut être réécrite ainsi (IV-13) :

$$Q_{vap} = m_{vap} \times C_{liq}(T_{vap} - T_{fus}) \quad (\text{IV-13})$$

La combinaison des équations (IV-11) et (IV-13) nous donne donc (IV-14) :

$$E_{vap} = m_{vap} \times \left( L_{vap} + C_{liq}(T_{vap} - T_{fus}) \right) \quad (\text{IV-14})$$

Le tableau IV-3 présente les données thermodynamiques du cuivre et de l'aluminium nécessaires à ces calculs. Ces données peuvent être trouvées dans les tables NIST-JANAF [36] ou le CRC Handbook [49].

Si toute la masse ablatée est fondue, seule une petite partie du métal fondu et éjecté est vaporisée. En effet, l'observation de nombreuses gouttelettes dans le cas des câbles aluminium indique que la proportion de métal vaporisé doit être faible, mais celle-ci demeure inconnue. En faisant une analogie avec d'autres procédés plasma, des procédés comprenant des arcs transitoires et une vaporisation partielle des électrodes (comme les disjoncteurs basse tension [50]), il paraît cohérent de considérer une quantité de métal effectivement vaporisée de l'ordre de un à quelques pourcents. Les résultats présentés (voir tableau IV-5) ont été calculés avec une valeur de 1% de la masse ablatée effectivement vaporisée. Ici encore, comme nous établissons un bilan de puissance, cette valeur de masse a été divisée par la durée d'arc, afin que les essais puissent être comparés.

À l'incertitude sur la quantité de métal vaporisé s'ajoute une incertitude sur la masse de métal fondu. En effet, nous avons observé de manière régulière la présence d'une goutte de métal fondu et resolidifié au bout des câbles testés, qui n'a pas été éjectée à la fin de l'essai. Présente avant et après le test, elle n'est pas prise en compte dans la mesure de masse ablatée, et entraîne une sous-estimation de la masse de métal fondu, et donc de l'énergie correspondante dans le bilan. Compte-tenu de sa forme et sa position, il n'est pas aisé d'en évaluer précisément le volume.

Tableau IV-3. Données thermodynamiques pour le cuivre et l'aluminium [36], [49].

|  | Aluminium   | Cuivre      |
|--|-------------|-------------|
| Masse molaire  | 26,98 g/mol | 63,55 g/mol |
| Température de fusion $T_{fus}$  | 660°C       | 1084°C      |
| Température d'ébullition $T_{vap}$   | 2518°C      | 2570°C      |
| Chaleur latente de fusion $L_{fus}$  | 400 J/g     | 205 J/g     |
| Chaleur latente de vaporisation $L_{vap}$                                    | 10875 J/g   | 4725 J/g    |
| Énergie nécessaire au chauffage à l'état solide (de $T_{amb}$ à $T_{fus}$ )  | 667 J/g     | 467 J/g     |
| Énergie nécessaire au chauffage à l'état liquide (de $T_{fus}$ à $T_{vap}$ ) | 2186 J/g    | 768 J/g     |
| Énergie totale nécessaire pour la fusion                                     | 1,1 kJ/g    | 0,7 kJ/g    |
| Énergie totale nécessaire pour la fusion puis la vaporisation                | 14,1 kJ/g   | 6,2 kJ/g    |

### *Dégradation de l'isolant*

L'ablation de la partie isolante doit aussi être prise en compte. Comme l'isolant des câbles que nous avons testés est majoritairement composé de PTFE, en nous fondant sur [51], nous avons adopté la valeur de 2,6 kJ/g, nécessaire au chauffage et à la pyrolyse du PTFE, conduisant à la formation de C<sub>2</sub>F<sub>4</sub> et de vapeurs de PTFE.

### *Taux d'érosion et proportions massiques*

Pour ces calculs thermodynamiques concernant le métal et l'isolant, nous nous sommes appuyés sur la masse ablatée de câble, qui a été mesurée lors de chaque essai. À partir de cette masse la proportion de métal et d'isolant est prise en compte, selon les valeurs qui figurent dans le tableau IV-4. Plus exactement, ce sont les valeurs de taux d'érosion (voir §III.3), en grammes par seconde, qui ont été pris en compte, ce qui permet de rapporter les résultats à une valeur de puissance en watts, qu'il est possible de comparer d'un essai à l'autre indépendamment de la durée de l'arc.

Tableau IV-4. Proportions massiques de métal et d'isolant pour chaque type de câble.

| Câble                         | Aluminium | Cuivre 1 | Cuivre 2 |
|-------------------------------|-----------|----------|----------|
| Proportion massique de métal  | 81 %      | 91 %     | 75 %     |
| Proportion massique d'isolant | 19 %      | 9 %      | 25 %     |

### **IV.3.2.2. Résultats**

Le tableau IV-5 et la figure IV-8 présentent les valeurs moyennes de la puissance  $P_{cables}$  à l'origine de la dégradation des câbles. Pour chaque essai, cette puissance est la somme de la puissance de fusion du métal, de la puissance de vaporisation du métal, et de la puissance de dégradation de l'isolant, en tenant compte des proportions massiques de métal et d'isolant pour chaque câble. Chaque valeur correspond à la moyenne de tous les essais d'une même configuration (câble-courant-pression), et l'incertitude provient de la dispersion statistique des résultats de mesure de masse de câble ablatée, dont ces résultats sont issus.

Tableau IV-5. Valeurs moyennes de la puissance  $P_{cables}$  à l'origine de la dégradation des câbles (par fusion et vaporisation du conducteur et ablation de l'isolant), et proportion que cette puissance représente par rapport à la puissance totale transférée aux électrodes.

| Câble           | Courant (A) | Puissance à l'origine de la dégradation des câbles |                              |             |                              |
|-----------------|-------------|--|------------------------------|-------------|------------------------------|
|                 |             | P = 1 bar  |                              | P = 95 mbar |                              |
|                 |             | Valeur (W)   | Par rapport à $P_{elec}$ (%) | Valeur (W)  | Par rapport à $P_{elec}$ (%) |
| Câble aluminium | 174         | 1345 ± 600   | 41                           | -           | -                            |
|                 | 244         | 2155 ± 300   | 46                           | 2356 ± 150  | 80                           |
|                 | 350         | 3337 ± 350   | 50                           | 3814 ± 150  | 91                           |
| Câble cuivre 1  | 174         | -  | -                            | -           | -                            |
|                 | 244         | 1882 ± 500   | 43                           | 1809 ± 500  | 62                           |
|                 | 350         | 2888 ± 250   | 46                           | 2947 ± 150  | 70                           |
| Câble cuivre 2  | 174         | -  | -                            | -           | -                            |
|                 | 244         | 2560 ± 300   | 58                           | -           | -                            |
|                 | 350         | 3896 ± 300   | 62                           | 3810 ± 150  | 91                           |

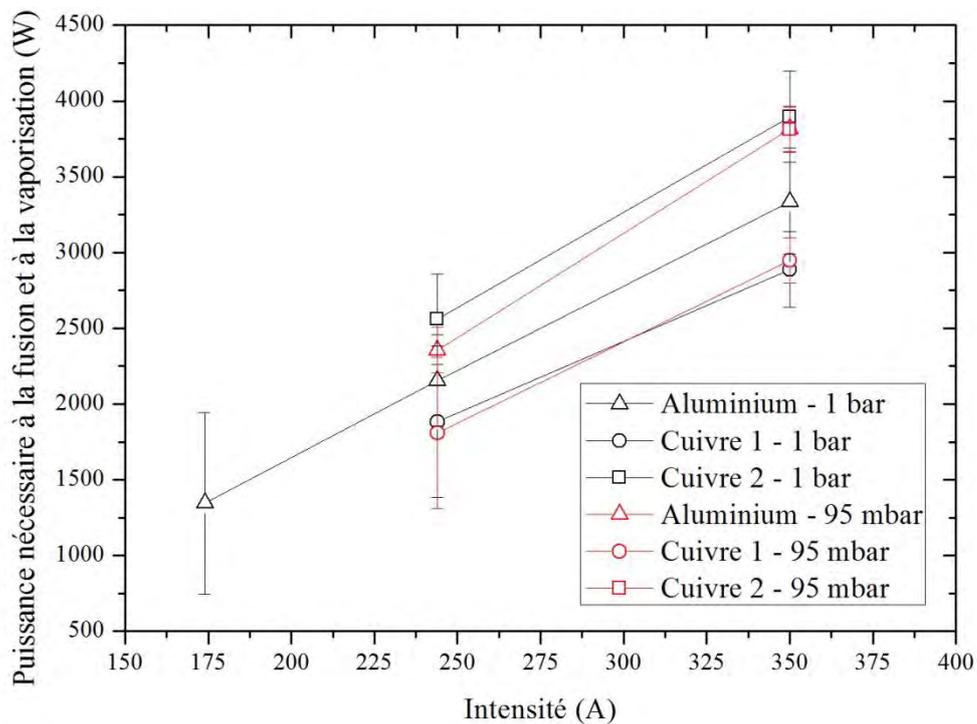


Figure IV-8. Puissance moyenne à l'origine de la dégradation des câbles, en fonction du courant.

À pression atmosphérique environ la moitié de la puissance transférée aux électrodes est à l'origine de la dégradation des câbles, et cette part augmente avec le courant. Tous ces résultats sont obtenus en considérant que 1% de la masse ablatée a été vaporisée. Cependant,

l'importante quantité de fumée émise dans le cas du cuivre semble indiquer que la part vaporisée est plus importante que dans le cas de l'aluminium. Il est donc possible que le pourcentage de cuivre effectivement vaporisé soit sous-estimé dans notre bilan. La puissance  $P_{cables}$  est plus importante pour le câble cuivre 2, en raison de l'épaisseur d'isolant plus importante. À pression réduite, pour tous les types de câbles, cette puissance représente la majeure partie de la puissance transférée aux électrodes. En effet, tandis que la puissance transmise aux électrodes est beaucoup plus faible à pression réduite qu'à pression atmosphérique, la masse de câble ablatée reste inchangée, ce qui amène la puissance  $P_{cables}$  à représenter une part dominante de la puissance transférée aux électrodes.

### IV.3.3. Conduction thermique dans les câbles et rayonnement

La puissance  $P_{elec,cond-ray}$ , qui est transférée aux câbles mais pas à l'origine de leur dégradation (fusion et vaporisation du métal, ablation de l'isolant), est perdue par conduction et rayonnement thermiques. Elle est calculée comme suit par soustraction (IV-15) :

$$P_{elec,cond-ray} = P_{elec} - P_{cables} \quad (IV-15)$$

## IV.4. Puissance déposée dans la colonne d'arc

### IV.4.1. Calcul

La puissance totale  $P_{col}$  déposée dans la colonne d'arc est calculée en déduisant la puissance transférée aux câbles de la puissance totale (IV-16) :

$$P_{col} = P_{tot} - P_{elec} \quad (IV-16)$$

Le tableau IV-6 et la figure IV-9 présentent les valeurs de  $P_{col}$  que nous avons obtenues lors de nos essais, en moyenne pour chaque configuration. L'incertitude n'apparaît pas car ces valeurs ne sont pas expérimentales, mais résultent de la soustraction d'autres termes. Les valeurs indiquées en italique ont été obtenues avec un nombre d'essais très réduit, et sont largement entachées d'erreur. C'est notamment le cas pour le câble cuivre 2 à 174 et 95 mbar, où la valeur de puissance est supérieure à celle obtenue pour 244 A, de manière anormale. Une partie de cette puissance est rayonnée tandis que l'autre est dissipée par convection et conduction.

### IV.4.2. Généralités sur le rayonnement et données des capteurs de flux radiatif

Tout le rayonnement émis à une longueur d'onde inférieure à 200 nm est absorbé dans l'air dès les premiers microns, en raison de la photodissociation et de la photoionisation dues

principalement aux molécules d'oxygène. Comme cette gamme de longueur d'onde n'est mesurable que dans le vide, où cette absorption n'a pas lieu, elle est appelée Vacuum Ultra Violet (VUV). En raison de ce phénomène, bien qu'ils intègrent le rayonnement entre 100 nm et 12  $\mu\text{m}$ , les fluxmètres, situés à plusieurs centimètres de l'arc, ne captent pas la partie VUV du rayonnement émis par l'arc.

Tableau IV-6. Valeurs moyennes de puissance déposée dans la colonne d'arc, et proportion que cette puissance représente par rapport à la puissance électrique totale.

| Câble           | Courant (A) | Puissance déposée dans la colonne d'arc |                             |             |                             |
|-----------------|-------------|---|-----------------------------|-------------|-----------------------------|
|                 |             | P = 1 bar                               |                             | P = 95 mbar |                             |
|                 |             | Valeur (W)                              | Par rapport à $P_{tot}$ (%) | Valeur (W)  | Par rapport à $P_{tot}$ (%) |
| Câble aluminium | 174         | 1793                                    | 35                          | 1955        | 48                          |
|                 | 244         | 2994                                    | 39                          | 3267        | 53                          |
|                 | 350         | 5852                                    | 47                          | 5926        | 59                          |
| Câble cuivre 1  | 174         | 1069                                    | 25                          | 2027        | 49                          |
|                 | 244         | 2346                                    | 35                          | 2536        | 46                          |
|                 | 350         | 5201                                    | 45                          | 5163        | 55                          |
| Câble cuivre 2  | 174         | 2548                                    | 45                          | 3692        | 64                          |
|                 | 244         | 3506                                    | 44                          | 3163        | 52                          |
|                 | 350         | 5946                                    | 49                          | 5562        | 57                          |

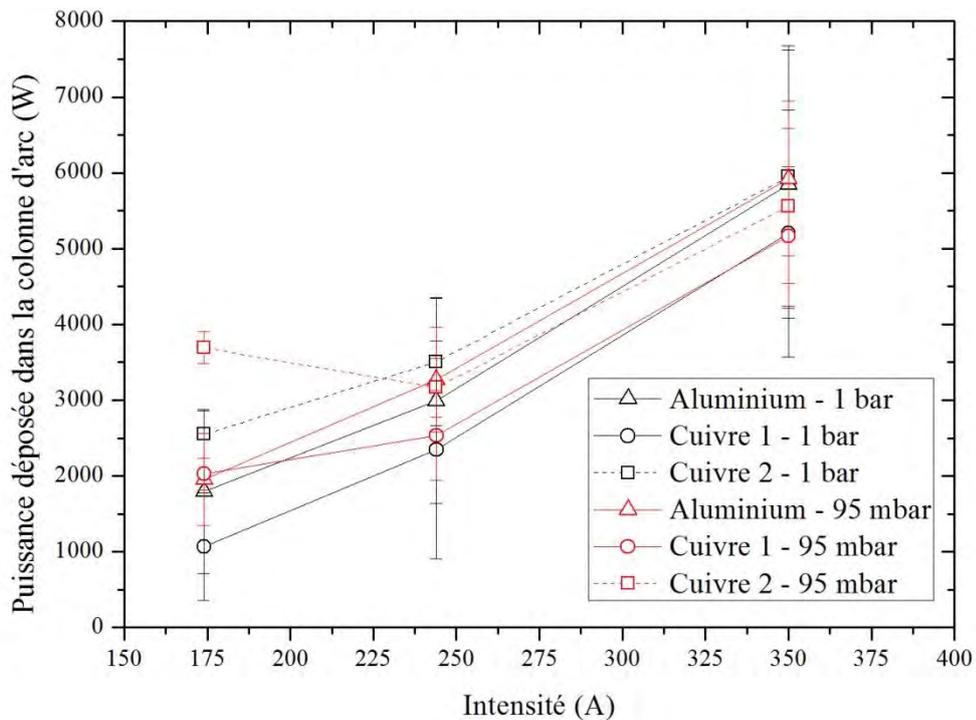


Figure IV-9. Puissance moyenne déposée dans la colonne d'arc en fonction du courant.

La densité de puissance mesurée par les capteurs de flux est transformée en puissance totale en supposant que l'arc est quasi ponctuel et en intégrant la densité de puissance (en supposant qu'elle n'est issue que de la colonne d'arc) sur la surface d'une sphère de rayon égal à la distance moyenne qui sépare l'arc des capteurs (ici 9,5 cm). L'hypothèse d'une source ponctuelle paraît acceptable vu la taille du plasma (de 1 à 3 mm, dans la phase initiale). Le signal recueilli est converti selon le facteur de calibration des capteurs, de sorte que la puissance rayonnée est obtenue en fonction du temps. La puissance rayonnée moyenne  $P_{ray,capteurs}$  peut alors être exprimée comme suit (IV-17) :

$$P_{ray,capteurs} = 4\pi d^2 F_{mes} \quad (IV-17)$$

où  $d$  est la distance qui sépare l'arc des capteurs (9,5 cm dans notre cas), et  $F_{mes}$  la valeur moyenne donnée par les capteurs de flux. Si les réponses des deux capteurs sont proches l'une de l'autre (ce qui augmente leur fiabilité),  $F_{mes}$  est la valeur moyenne des deux capteurs. Si les réponses ne sont pas tout à fait les mêmes, on peut aussi affecter la valeur moyenne à  $F_{mes}$ , en considérant que, l'arc étant fortement erratique et se déplaçant sur plusieurs millimètres, il a pu s'éloigner d'un capteur et se rapprocher de l'autre. Dans d'autres cas, on peut ne prendre en compte qu'un seul des deux capteurs. La valeur choisie sera alors la plus élevée, considérant que la valeur la plus faible est soit fournie par un capteur qui a déjà subi plusieurs essais, et dont les performances ont décliné, soit issue d'une mesure faussée par un effet d'ombrage si le rayonnement de l'arc est partiellement caché par l'un des câbles par exemple. Dans la mesure où cela est possible, cette valeur  $F_{mes}$  est prise sur une période où la valeur de flux rayonné est relativement constante.

Cependant, il s'avère que les mesures données par les capteurs de flux sont très difficiles à exploiter, en raison du caractère extrêmement bruité du signal (voir §III.4), et variable d'un essai à l'autre. Cependant, les résultats d'un nombre important d'essais effectués à pression atmosphérique donnent des valeurs de flux rayonné approximativement entre 10.000 et 15.000 W.m<sup>-2</sup>. D'après l'équation (IV-17), cela correspond à une puissance rayonnée mesurée de l'ordre de 1000 à 1700 W.

L'utilisation de la caméra rapide située au-dessus de l'enceinte, et filmant l'arc d'en haut, a montré que celui-ci peut s'éloigner des câbles et se déployer sur les côtés (voir §III.5), ce qui rend déraisonnable l'hypothèse d'un arc ponctuel, et l'extrapolation des résultats des capteurs de flux sur une sphère. Face à ce constat, qui s'ajoute à la difficulté de s'appuyer sur ces résultats, mais également au fait que le rayonnement émis à des longueurs d'ondes inférieures à 200 nm est inaccessible à la mesure, nous avons choisi de prendre en compte une autre approche pour estimer la puissance rayonnée, sur la base de la méthode du coefficient d'émission nette, développée dans la suite de ce chapitre.

### IV.4.3. Coefficient d'émission nette

#### IV.4.3.1. Généralités

Comme cela a été mentionné précédemment, tout le spectre émis en deçà de 200 nm est absorbé dans l'air dès les premiers microns. Il est possible d'estimer la contribution de cette gamme de longueur d'onde en recourant à une approche théorique telle que le coefficient d'émission nette (CEN).

Le CEN [52], [53] est une méthode de calcul bien adaptée au domaine des plasmas thermiques, pour lequel le rayonnement est un phénomène important du bilan d'énergie. Ce coefficient est calculé comme la divergence du flux radiatif total au centre d'une sphère de plasma homogène et isotherme de rayon  $R_p$ . Il reflète ainsi le rayonnement qui serait émis au centre, et absorbé dans cette sphère. Le cas fictif où  $R_p$  est nul correspond donc à l'absence d'absorption du rayonnement. Homogène à une puissance par unité de volume et par unité d'angle solide, il est exprimé en  $\text{W.m}^{-3}.\text{sr}^{-1}$ . La puissance rayonnée est intégrée sur une large gamme d'énergie correspondant aux longueurs d'onde comprises entre 30 nm et 5  $\mu\text{m}$ . À titre d'exemple, la figure IV-10 présente le CEN  $\epsilon_N$  d'un plasma d'air pour plusieurs valeurs de  $R_p$  à pression atmosphérique.

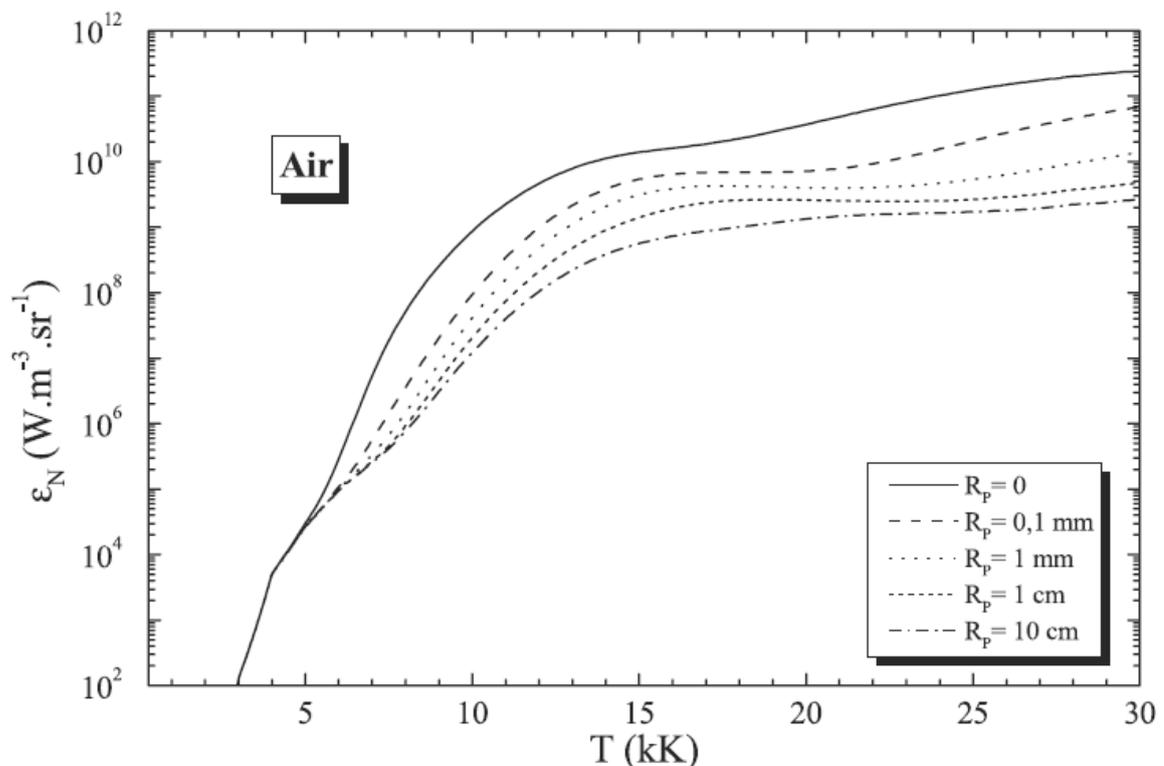


Figure IV-10. CEN d'un plasma d'air, pour plusieurs valeurs de rayon [53].

La forte augmentation que l'on constate jusqu'à environ 15000 K est due à l'augmentation de la densité électronique et des densités des états excités avec la température,

ce qui entraîne une intensification de l'émission du plasma, tant du continuum que des raies. On remarque également que pour les températures supérieures à environ 5000 K, et pour un rayon de plasma de 1 mm, les valeurs de CEN sont inférieures d'un facteur environ 10 par rapport au cas où le rayon est nul. Cela signifie que 90% du rayonnement est absorbé dès le premier millimètre autour du point émetteur.

#### **IV.4.3.2. Application à notre cas**

Nous avons choisi d'utiliser le coefficient d'émission nette dans notre étude, en complément des données fournies par les capteurs de flux. Comme la partie conductrice de nos câbles est majoritairement constituée, soit d'aluminium, soit de cuivre, nous avons donc à considérer des mélanges air-aluminium et des mélanges air-cuivre. Il est très difficile d'estimer le pourcentage de vapeurs métalliques dans le plasma dans le cas de l'arc tracking. En effet, le caractère très erratique de l'arc ne permet pas de mener une étude spectroscopique dans de bonnes conditions. De plus, la concentration de vapeur métallique est telle que les raies correspondantes, dans le cadre d'une étude de spectroscopie d'émission, sont fortement auto-absorbées. Néanmoins, par analogie avec d'autres procédés plasmas [54], nous pouvons estimer que la proportion massique de métal dans le plasma est de l'ordre de quelques pourcents. Nous choisissons donc de considérer deux configurations de mélange air-métal : soit 90% d'air et 10% de métal, soit 99% d'air et 1% de métal. Concernant le rayon du plasma, une valeur de 2 millimètres semble appropriée à notre cas, compte tenu de la disposition des câbles et de leur diamètre, et des informations que nous fournit l'imagerie rapide.

Le calcul du coefficient d'émission nette est effectué sur une gamme spectrale donnée. Il est ainsi possible de comparer le CEN total (sur tout le spectre, c'est-à-dire entre 30 nm et 5 microns) avec un CEN partiel, correspondant aux longueurs d'onde supérieures à 200 nm, excluant donc le rayonnement VUV [55]. Cette comparaison donne une idée de la part relative de puissance absorbée dès les premiers microns, par rapport à ce qui est reçu par les capteurs de flux. L'ensemble des courbes de coefficient d'émission nette, total et partiel, sont présentées sur les figures IV-11 à IV-18. Les calculs ont ainsi été effectués pour les deux pressions que nous avons étudiées (1 bar et 95 mbar), les deux types de mélanges (air-aluminium et air-cuivre), et les deux configurations (90% d'air et 10% de métal, et 99% d'air et 1% de métal) pour un rayon de plasma de 2 millimètres.

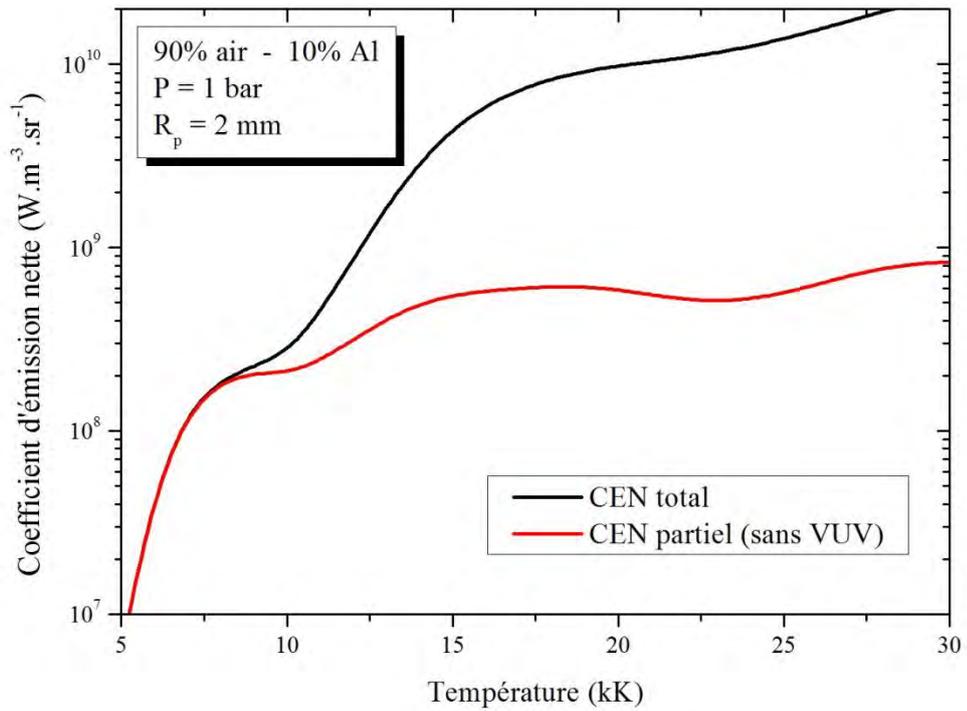


Figure IV-11. Variations du CEN total et du CEN partiel pour un mélange de 90% d'air et 10% d'aluminium (proportions massiques), et un plasma de 2 mm de rayon, à 1 bar.

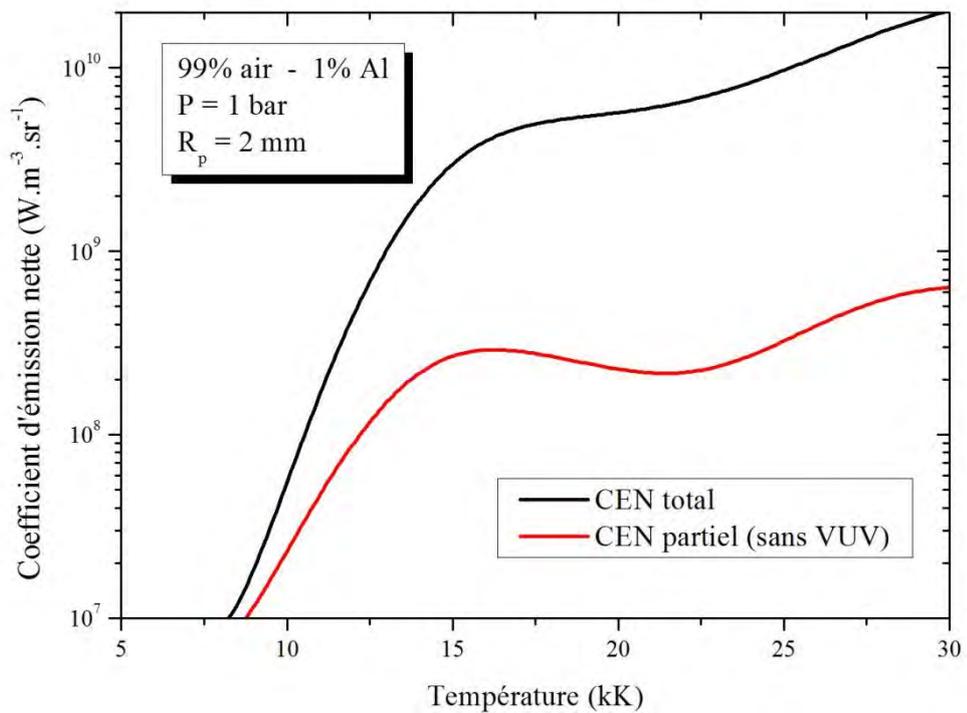


Figure IV-12. Variations du CEN total et du CEN partiel pour un mélange de 99% d'air et 1% d'aluminium (proportions massiques), et un plasma de 2 mm de rayon, à 1 bar.

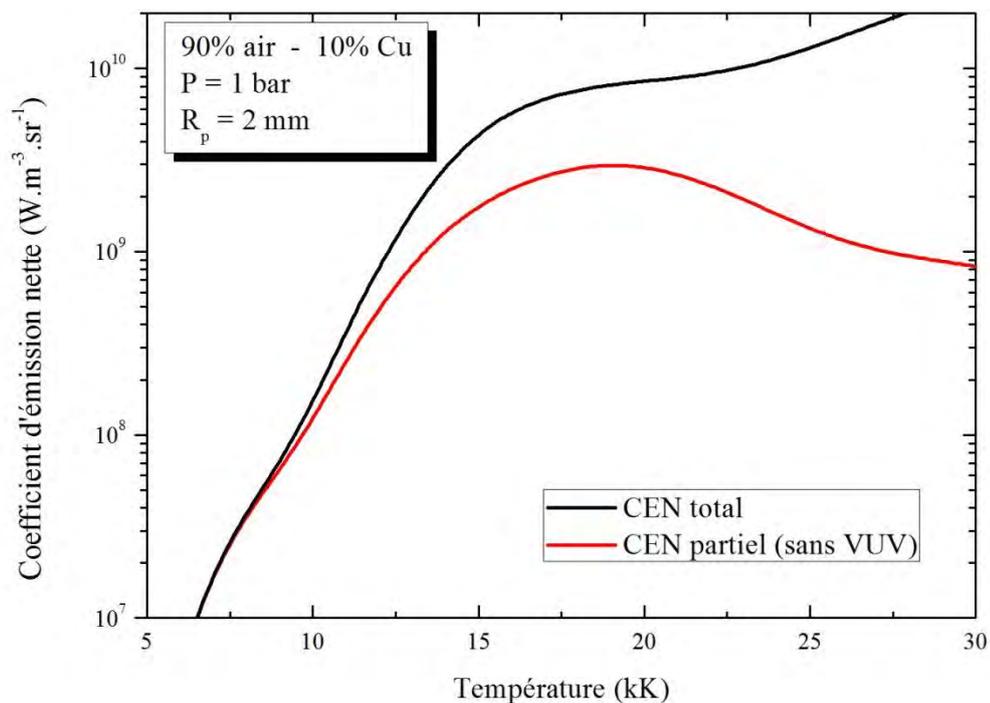


Figure IV-13. Variations du CEN total et du CEN partiel pour un mélange de 90% d'air et 10% de cuivre (proportions massiques), et un plasma de 2 mm de rayon, à 1 bar.

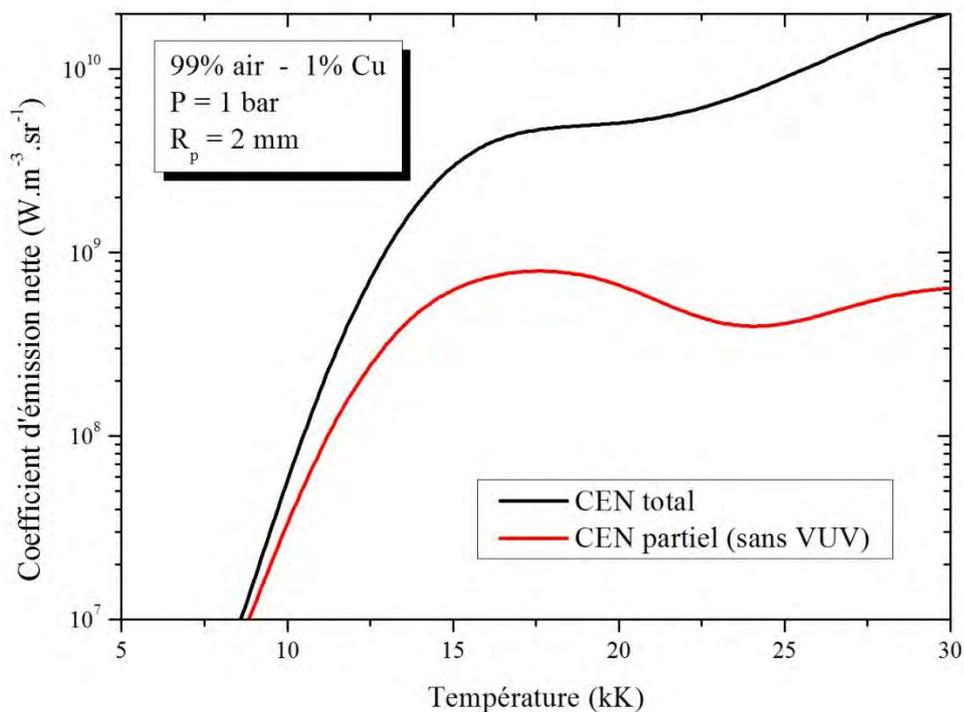


Figure IV-14. Variations du CEN total et du CEN partiel pour un mélange de 99% d'air et 1% de cuivre (proportions massiques), et un plasma de 2 mm de rayon, à 1 bar.

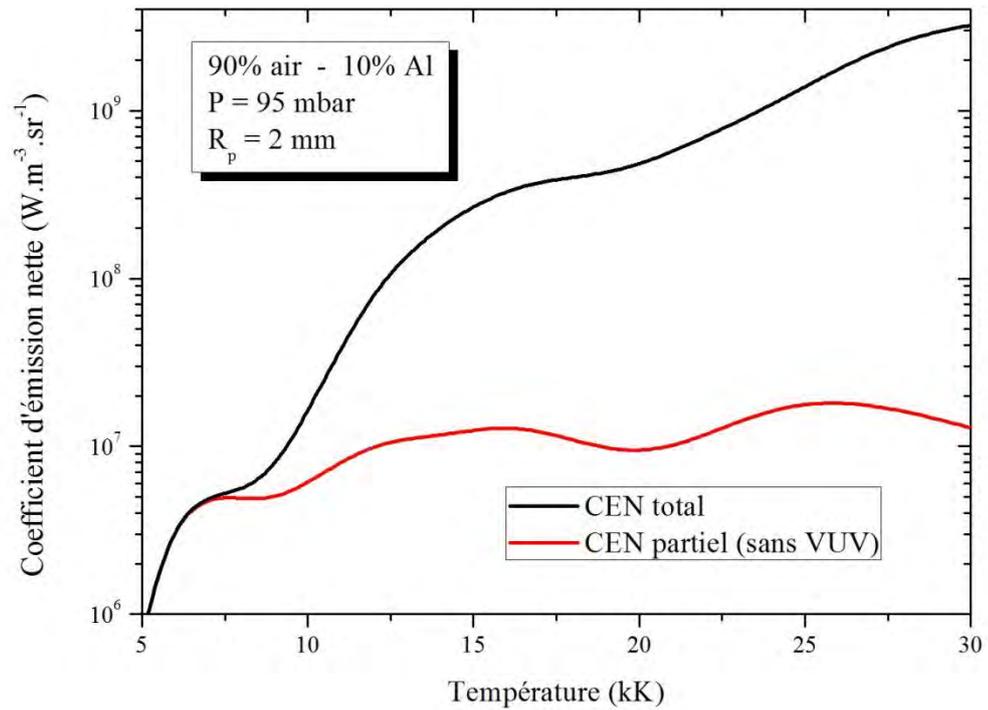


Figure IV-15. Variations du CEN total et du CEN partiel pour un mélange de 90% d'air et 10% d'aluminium (proportions massiques), et un plasma de 2 mm de rayon, à 95 mbar.

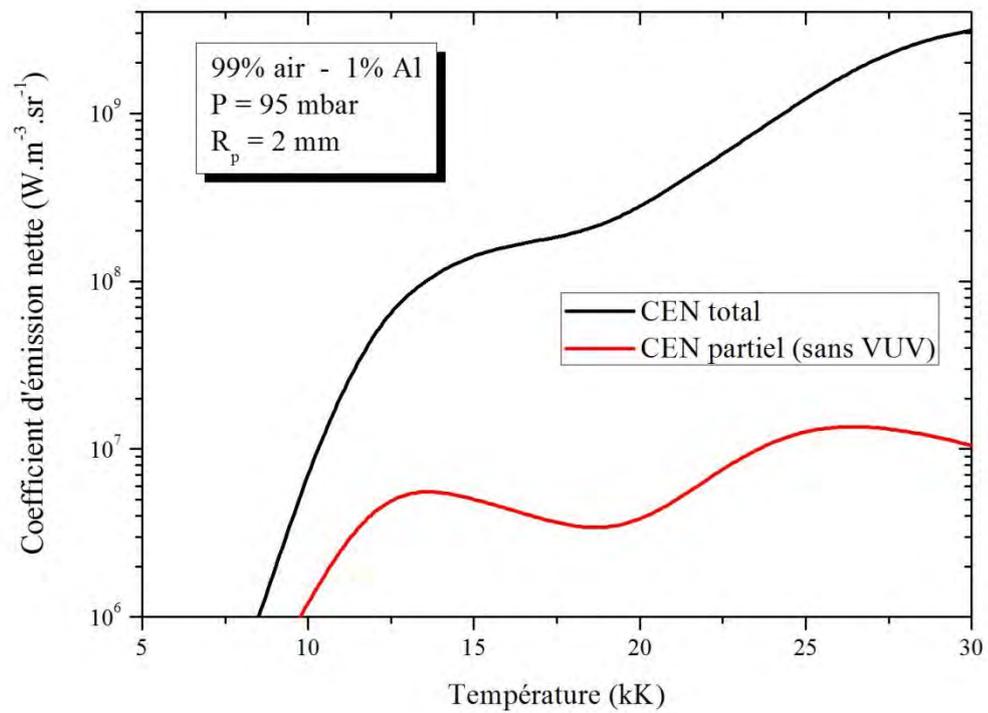


Figure IV-16. Variations du CEN total et du CEN partiel pour un mélange de 99% d'air et 1% d'aluminium (proportions massiques), et un plasma de 2 mm de rayon, à 95 mbar.

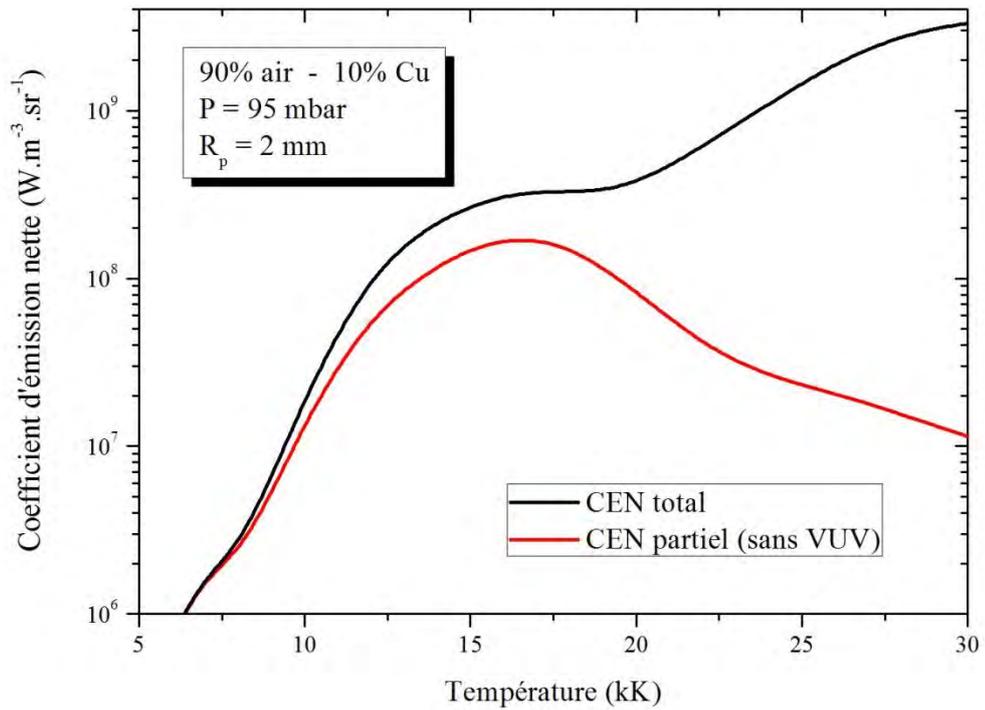


Figure IV-17. Variations du CEN total et du CEN partiel pour un mélange de 90% d'air et 10% de cuivre (proportions massiques), et un plasma de 2 mm de rayon, à 95 mbar.

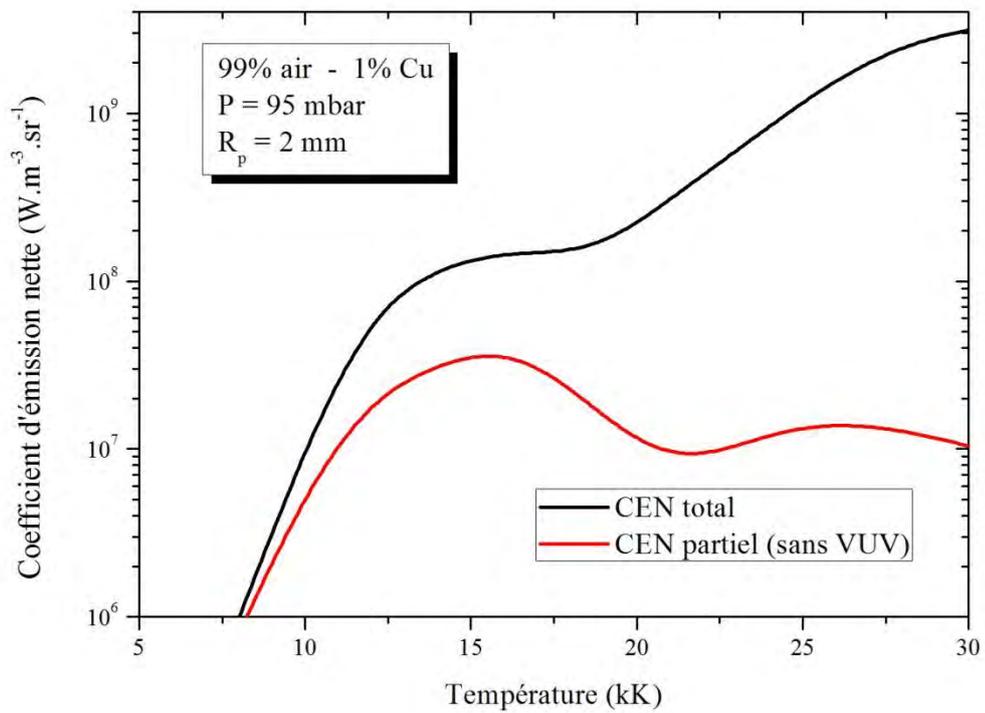


Figure IV-18. Variations du CEN total et du CEN partiel pour un mélange de 99% d'air et 1% de cuivre (proportions massiques), et un plasma de 2 mm de rayon, à 95 mbar.

À l'incertitude sur la quantité de métal présente dans le plasma s'ajoute l'incertitude sur la température de l'arc. Au cœur du plasma, la valeur de 15000 K semble une assez bonne approximation. Le tableau IV-7 présente le rapport entre les CEN total et partiel dans toutes les configurations possibles que nous avons considérées.

Tableau IV-7. Rapport entre les CEN total et partiels à 15 kK.

|                  | P = 1 bar | P = 95 mbar |
|------------------|-----------|-------------|
| 90% air – 10% Al | 8,0       | 21,5        |
| 99% air – 1% Al  | 11,2      | 28,1        |
| 90% air – 10% Cu | 2,5       | 1,8         |
| 99% air – 1% Cu  | 4,7       | 3,8         |

En se fixant une géométrie et un volume de plasma conformes aux conditions de notre étude, il est possible d'estimer la puissance rayonnée totale  $P_{ray}$ . Ainsi, en considérant un plasma cylindrique de rayon  $R_p = 2$  mm, de hauteur  $h = 3$  mm, on obtient (IV-18) :

$$P_{ray} = 4\pi \times \pi R_p^2 h \times CEN(T, composition) \quad (I \quad V-18)$$

où le coefficient d'émission nette dépend, comme nous l'avons mentionné précédemment, de la température (pour laquelle nous avons adopté la valeur de 15 kK) et de la composition du plasma. Les valeurs obtenues pour toutes les configurations considérées sont présentées dans le tableau IV-8.

Tableau IV-8. Valeurs de la puissance rayonnée totale  $P_{ray}$  calculée à partir du coefficient d'émission nette total à 15 kK.

|                  | P = 1 bar | P = 95 mbar |
|------------------|-----------|-------------|
| 90% air – 10% Al | 2056 W    | 126 W       |
| 99% air – 1% Al  | 1416 W    | 67 W        |
| 90% air – 10% Cu | 2051 W    | 126 W       |
| 99% air – 1% Cu  | 1402 W    | 63 W        |

Il est à noter que les valeurs de coefficient d'émission nette total (et donc de puissance rayonnée totale), à pression et à proportion air-métal fixées, sont très proches entre l'aluminium et le cuivre. Par ailleurs, pour un métal et une proportion air-métal fixés, la puissance est environ vingt fois moindre à 95 mbar qu'à pression atmosphérique.

#### IV.4.4. Synthèse sur la puissance rayonnée

On remarque que la puissance rayonnée calculée au moyen du coefficient d'émission nette total, à pression atmosphérique, est du même ordre de grandeur que celle qui est obtenue à partir des données des capteurs de flux, qui ne prennent pourtant pas en compte le rayonnement VUV émis en deçà de 200 nm. Cela pourrait s'expliquer par le fait que le rayonnement VUV absorbé est en partie réémis dans le spectre visible ou dans l'infrarouge. Il serait alors détecté par les capteurs de flux. L'énergie du rayonnement VUV absorbé qui ne serait pas réémise est quant à elle perdue par convection et conduction. Elle participe alors au chauffage du gaz et du plasma. Finalement, le rayonnement émis dans le domaine du VUV est donc indirectement pris en compte par les autres termes de puissance.

Que l'on considère la méthode expérimentale au moyen des capteurs de flux radiatif ou la méthode théorique qui s'appuie sur le CEN, une incertitude assez importante pèse sur le résultat. Cette incertitude, due aux mesures de flux rayonné, au manque de connaissance sur la température et la composition du plasma, ainsi qu'à l'hypothèse d'un plasma ponctuel ou cylindrique, peut être estimée à au moins 20%. À pression atmosphérique, une valeur moyenne de 1500 W a finalement été adoptée, pour les trois câbles et les trois courants (voir tableau IV-9). La proportion que cette puissance représente par rapport à la puissance déposée dans la colonne d'arc décroît avec le courant. À fort courant, la différence entre les câbles se réduit, et cette proportion devient sensiblement la même pour les trois câbles (entre 20 et 30%).

Tableau IV-9. Valeurs moyenne de la puissance rayonnée par l'arc, et proportion par rapport à la puissance déposée dans la colonne d'arc.

| Câble           | Courant (A) | Puissance rayonnée par l'arc |                             |             |                             |
|-----------------|-------------|------------------------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------|
|                 |             | P = 1 bar                    |                             | P = 95 mbar |                             |
|                 |             | Valeur (W)                   | Par rapport à $P_{col}$ (%) | Valeur (W)  | Par rapport à $P_{col}$ (%) |
| Câble aluminium | 174         | 1500                         | 84                          | 100         | 5                           |
|                 | 244         |                              | 50                          |             | 3                           |
|                 | 350         |                              | 26                          |             | 2                           |
| Câble cuivre 1  | 174         | -                            | -                           |             | 5                           |
|                 | 244         | 1500                         | 64                          |             | 4                           |
|                 | 350         |                              | 29                          |             | 2                           |
| Câble cuivre 2  | 174         | -                            | -                           |             | 3                           |
|                 | 244         | 1500                         | 43                          |             | 3                           |
|                 | 350         |                              | 25                          |             | 2                           |

Les capteurs de flux n'ont pas été utilisés à pression réduite. En effet, les résultats obtenus lors des premiers essais, inexploitable en raison du bruit, nous ont conduits à les abandonner. Nous sommes donc contraints de nous appuyer sur les valeurs qui découlent du calcul du CEN (voir tableau IV-8), et nous choisissons d'adopter une valeur de 100 W. Il est très clair que l'incertitude est particulièrement grande, davantage encore qu'à pression atmosphérique. En effet, le caractère diffus de l'arc, le volume plus important qu'il occupe, et les panaches qui se déploient sur les côtés (visibles grâce à la caméra supérieure), fragilisent très fortement les hypothèses sur lesquelles s'appuie le calcul à partir du CEN.

#### IV.4.5. Convection et conduction dans la colonne

La puissance déposée dans la colonne d'arc qui n'est pas rayonnée est perdue par convection et conduction. Cette puissance  $P_{col,conv-cond}$  est estimée par déduction (IV-19) :

$$P_{col,conv-cond} = P_{col} - P_{rad} \quad (IV-19)$$

### IV.5. Essais en régime continu

Pour ce qui concerne les essais en mode DC, le bilan n'a pas été établi de façon aussi systématique que ce qui est décrit précédemment. En effet, les essais ont été réalisés en nombre beaucoup plus restreint qu'en régime alternatif, et les données de masse ablatée et de flux n'ont pas été recueillies. Ces quelques tests ont principalement été effectués dans l'optique de l'étude des interactions entre l'arc et la plaque (voir le chapitre suivant), et n'ont pas été développés comme les tests en AC en raison de l'impossibilité de connecter la plaque en aluminium à un potentiel « zéro ».

Néanmoins, les essais réalisés permettent le calcul de la puissance électrique totale, au moyen des données de courant et de tension enregistrées, ainsi que celui de la puissance transférée aux électrodes, au moyen de la chute de tension. Les valeurs de chute de tension aux électrodes adoptées sont les mêmes qu'en AC, à savoir 19 V pour l'aluminium et 18 V pour le cuivre à pression atmosphérique, et 12 V pour l'aluminium à 95 mbar, en prenant en compte une incertitude de 10% sur ces valeurs. Ces résultats sont présentés dans le tableau IV-10 pour les tests effectués à pression atmosphérique. On observe que la part de la puissance transférée par rapport à la puissance totale ne dépend pas (ou peu) du courant, contrairement au mode AC où cette part diminuait. Elle paraît plus importante pour le cuivre que pour l'aluminium. Cette part est plus élevée que pour les tests en AC, mais il est à noter que les courants considérés étaient plus grands.

À 95 mbar, seulement une configuration a été testée : des câbles en aluminium à 125 A. Sur cinq essais exploitables, on obtient une puissance totale moyenne de 3058 W, d'où une

puissance moyenne transférée aux électrodes de 1500 W, c'est-à-dire 49% du total. Cette proportion est du même ordre que ce qui est obtenu en alternatif.

Tableau IV-10. Bilan succinct des essais effectués en mode DC à pression atmosphérique.

| Câble           | Courant (A) | Puissance totale (W) | Puissance transférée aux électrodes |                             | Puissance déposée dans la colonne d'arc |                             |
|-----------------|-------------|----------------------|-------------------------------------|-----------------------------|---|-----------------------------|
|                 |             |                      | Valeur (W)                          | Par rapport à $P_{tot}$ (%) | Valeur (W)                              | Par rapport à $P_{tot}$ (%) |
| Câble aluminium | 60          | 1630 ±130            | 1140 ±110                           | 70                          | 490 ±50                                 | 30                          |
|                 | 100         | 2698 ±200            | 1900 ±190                           | 70                          | 798 ±80                                 | 30                          |
|                 | 125         | 3448 ±300            | 2375 ±240                           | 69                          | 1073 ±110                               | 31                          |
| Câble cuivre 1  | 74          | 1842 ±200            | 1332 ±130                           | 72                          | 510 ±50                                 | 28                          |
|                 | 100         | 2610 ±150            | 1800 ±180                           | 69                          | 810 ±80                                 | 31                          |
|                 | 125         | 2947 ±120            | 2250 ±230                           | 76                          | 697 ±70                                 | 24                          |

#### IV.6. Synthèse du bilan de puissance

Toutes les valeurs de puissance de notre bilan en régime alternatif, qui ont été présentés successivement au cours de ce chapitre, sont rassemblées dans les tableaux IV-11 et IV-12, pour les essais à pression atmosphérique et à pression réduite respectivement.

Tableau IV-11. Tableau récapitulatif des valeurs du bilan de puissance à 1 bar.

| Câble           | Courant (A) | $P_{tot}$ (W) | $P_{elec}$ (W) | $P_{cables}$ (W) | $P_{elec,cond-ray}$ (W) | $P_{col}$ (W) | $P_{ray}$ (W) | $P_{col,conv-cond}$ (W) |
|-----------------|-------------|---------------|----------------|------------------|-------------------------|---------------|---------------|-------------------------|
| Câble aluminium | 174         | 5099          | 3306           | 1345             | 1961                    | 1793          | 1500          | 293                     |
|                 | 244         | 7630          | 4636           | 2155             | 2481                    | 2994          |               | 1494                    |
|                 | 350         | 12502         | 6650           | 3337             | 3313                    | 5852          |               | 4352                    |
| Câble cuivre 1  | 174         | 4201          | 3132           | -                | -                       | 1069          | 1500          | -                       |
|                 | 244         | 6738          | 4392           | 1882             | 2510                    | 2346          |               | 846                     |
|                 | 350         | 11501         | 6300           | 2888             | 3412                    | 5201          |               | 3701                    |
| Câble cuivre 2  | 174         | 5680          | 3132           | -                | -                       | 2548          | 1500          | 1048                    |
|                 | 244         | 7898          | 4392           | 2560             | 1832                    | 3506          |               | 2006                    |
|                 | 350         | 12246         | 6300           | 3896             | 2404                    | 5946          |               | 4446                    |

Tableau IV-12. Tableau récapitulatif des valeurs du bilan de puissance à 95 mbar.

| Câble           | Courant (A) | $P_{tot}$ (W) | $P_{elec}$ (W) | $P_{cables}$ (W) | $P_{elec,cond-ray}$ (W) | $P_{col}$ (W) | $P_{ray}$ (W) | $P_{col,conv-cond}$ (W) |
|-----------------|-------------|---------------|----------------|------------------|-------------------------|---------------|---------------|-------------------------|
| Câble aluminium | 174         | 4043          | 2088           | -                | -                       | 1955          | 100           | 1855                    |
|                 | 244         | 6195          | 2928           | 2356             | 572                     | 3267          |               | 3167                    |
|                 | 350         | 10126         | 4200           | 3814             | 386                     | 5926          |               | 5826                    |
| Câble cuivre 1  | 174         | 4115          | 2088           | -                | -                       | 2027          |               | 1927                    |
|                 | 244         | 5464          | 2928           | 1809             | 1119                    | 2536          |               | 2436                    |
|                 | 350         | 9363          | 4200           | 2947             | 1253                    | 5163          |               | 5063                    |
| Câble cuivre 2  | 174         | 5780          | 2088           | -                | -                       | 3692          |               | 3592                    |
|                 | 244         | 6091          | 2928           | -                | -                       | 3163          |               | 3063                    |
|                 | 350         | 9762          | 4200           | 3810             | 390                     | 5562          |               | 5462                    |

À conditions expérimentales identiques, la puissance totale à pression réduite est inférieure d'environ 20% par rapport aux essais à pression atmosphérique. Ces valeurs de puissance totale peuvent être considérées comme assez précises puisqu'elles ne sont issues que des mesures de courant et de tension. Environ 60% de cette puissance totale est transférée aux électrodes à pression atmosphérique, tandis que cette valeur est légèrement inférieure à 50% à 95 mbar, en moyenne. Approximativement la moitié de cette puissance transmise aux électrodes est à l'origine de la dégradation des câbles (par fusion et vaporisation partielle), tandis que cette proportion est plus élevée à pression réduite.

Des incertitudes assez importantes pèsent sur ce bilan de puissance, qui trouvent tout d'abord leur origine dans le caractère très erratique de l'arc et son comportement aléatoire. Ainsi, des variations parfois significatives ont pu être observées entre différents essais qui ont pourtant été effectués dans des configurations identiques. Ces variations expérimentales ont entraîné une dispersion des valeurs de masse ablatée, des mesures de tension, et des données des capteurs de flux radiatif, bruitées et difficilement exploitables. Les valeurs de chute de tension aux électrodes sont également délicates à appréhender, tant d'un point de vue expérimental qu'en ce qui concerne les données de la littérature.

Concernant la puissance à l'origine de la dégradation des câbles, notamment la fusion et la vaporisation partielle du métal, nous avons considéré que 1% de la masse de métal fondu était effectivement vaporisée. Au-delà du caractère incertain de cette proportion, nous n'avons pas pris en compte le chauffage du métal entre la température de fusion et la température d'ébullition (sans qu'il y ait vaporisation), qui peut représenter une part de puissance importante.

Des incertitudes d'un autre ordre se sont ajoutées lorsque nous avons employé le coefficient d'émission nette, issu d'un calcul prenant en compte la température du plasma et

sa composition (proportion air-métal), deux données dont nous n'avons une idée qu'approximative.

Concernant les tests sur les câbles en aluminium, il a été mentionné qu'on observe une couche blanche à la surface des gouttes de métal projetées (voir §III.1). Il est probable que cette couche soit constituée d'alumine ( $Al_2O_3$ ). La formation d'alumine n'a pas été prise en compte, or la réaction d'oxydation de l'aluminium est fortement exothermique, et ce phénomène serait de nature à modifier notre bilan de puissance de façon significative.





## Chapitre V – Étude des interactions de l'arc avec la plaque en aluminium

Une plaque en aluminium a été positionnée à proximité de l'arc, en regard de la partie dénudée des câbles. Lors des essais en mode AC (prépondérants dans ce travail), cette plaque est connectée au neutre du générateur, tandis qu'elle est connectée au – en mode DC. Pour chaque essai, l'occurrence de transfert a été étudiée, selon la distance entre les câbles et la plaque en aluminium, ainsi que la durée au bout de laquelle le transfert se produit. Plus cette distance est faible, plus l'arc a de chances de s'accrocher rapidement à la plaque. À pression réduite, les distances d'accrochage sont plus que doublées par rapport à la pression atmosphérique. Pour des raisons de confidentialité, les valeurs de distances sont présentées en unités arbitraires (u.a.). L'accrochage à la plaque se caractérise également au moyen d'un critère de température en face arrière de la plaque, qui a été étudié par imagerie infrarouge pour quelques essais.



## V.1. Généralités sur la plaque en aluminium et le transfert de l'arc

### V.1.1. La plaque dans le dispositif expérimental

La plaque en aluminium utilisée est de forme carrée, de 10 cm de côté et de 1,2 mm d'épaisseur. Plusieurs exemplaires sont découpés à partir d'une plaque d'un mètre sur un mètre. La plaque est remplacée après un essai où le transfert a causé une déformation, ou si le pied d'arc a généré un point de fusion visible en face arrière. Dans les cas où l'endommagement après un essai s'est révélé minime (quelques gouttelettes de métal fondu projetées, de la poussière déposée), la plaque peut être maintenue pour l'essai suivant après un simple brossage, éventuellement pendant plusieurs essais. La plaque est montée sur un support auquel elle est vissée, et disposée parallèlement aux câbles, verticalement, à une distance précise. Cette distance est mesurée entre la surface de la plaque en aluminium (côté câbles) et le bord des câbles (côté plaque).

Pour des raisons de confidentialité, toutes les valeurs de distances données dans ce travail seront présentées en unités arbitraires (u.a.). La distance de référence (1 u.a.) correspond aux conditions suivantes :

- des câbles cuivre 1 (le cuivre étant utilisé pour le câblage des avions depuis plus longtemps que l'aluminium)
- la pression atmosphérique
- un courant de 244 A (courant intermédiaire de notre étude).

### V.1.2. Le transfert de l'arc à la plaque en aluminium

En mode AC, la plaque est connectée au neutre de l'alimentation, tandis que les câbles sont connectés aux deux phases. Une différence de potentiel de 230  $V_{\text{eff}}$  est donc imposée entre les câbles et la plaque, ce qui rend possible le transfert de l'arc depuis les câbles vers la plaque. L'accrochage de l'arc à la plaque se traduit par un retour du courant par le neutre et une chute de la différence de potentiel entre les câbles et le neutre, détectés au moyen des sondes de courant et de tensions (voir §III.2.1.2).

L'utilisation d'une caméra rapide positionnée au-dessus de l'enceinte et filmant l'arc à travers le hublot supérieur a permis de constater que l'arc a tendance à se déployer sur les côtés, et donc à se rapprocher de la plaque, voire à la « lécher » si elle est suffisamment proche. Ce comportement du plasma, auquel s'ajoute la différence de potentiel avec la plaque, est à l'origine de l'accrochage qui est susceptible de se produire au cours d'un essai. Le transfert ne dure pas nécessairement jusqu'à la fin d'un test, il peut s'interrompre après une durée aléatoire, et éventuellement réapparaître plus tard au cours de l'essai.

En mode DC, la configuration est différente, en raison de l'absence d'un potentiel « zéro », intermédiaire entre le + et le - du générateur, auquel la plaque aurait été connectée, et qui aurait permis une étude analogue à ce qui a été fait en régime alternatif. De ce fait, et ainsi qu'il avait été prévu initialement, la plaque a été connectée au - du générateur, lors du nombre restreint de tests effectués en mode DC. Il est clair que cette configuration est beaucoup plus défavorable à un transfert que pour les essais en mode AC, car la plaque est au même potentiel qu'un des deux câbles, donc l'arc n'a a priori pas « d'intérêt » à s'accrocher depuis les câbles vers la plaque. Le transfert a été détecté en plaçant une sonde de courant à l'intérieur de l'enceinte, sur le fil reliant la plaque à l'arrivée du -, comme le montre la figure V-1.

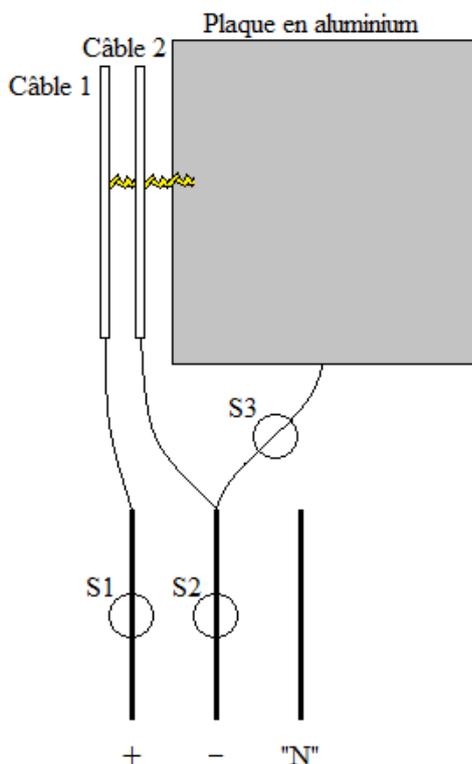


Figure V-1. Disposition des trois sondes de courant pour les essais en régime continu.

## V.2. Distances de ségrégation

### V.2.1. Description de l'étude

Le tableau V-1 récapitule l'ensemble des conditions d'essai déjà énoncées précédemment pour le mode AC, notamment en ce qui concerne les types de câbles, les conditions de courant et de pression. Pour chacune des configurations testées, la caractérisation du transfert de l'arc à la plaque en aluminium en fonction de la distance s'effectue selon un critère de temps. Ainsi, la distance de transfert est étudiée pour des durées

d'arc de 100, 200, 300, 400 et 500 ms. La mise en œuvre pratique consiste à effectuer des essais d'arc tracking d'une durée totale de 500 ms à une distance donnée de la plaque, et à déterminer à quel instant le transfert se produit. Par exemple, si le transfert a lieu à 237 ms, on considère alors que dans cette configuration et pour la distance considérée, il n'y a pas de transfert jusqu'à 200 ms, mais le transfert se produit pour une durée de 300 ms. Pour chaque configuration, des essais ont été réalisés sur une gamme de distances voisines, dont la borne supérieure est la distance minimale pour laquelle aucun transfert de ne se produit, pour les trois essais effectués. La borne inférieure est la distance la plus grande pour laquelle le transfert a lieu au moins une fois avant 100 ms.

Tableau V-1. Récapitulatif de l'ensemble des conditions d'essai en régime alternatif.

|                |  |
|----------------|--|
| Type de signal | Alternatif (mode « AC bi+N »)                  |
| Câbles         | Aluminium<br>Cuivre 1<br>Cuivre 2              |
| Fréquence      | 800 Hz   |
| Durée d'arc    | 100 ms<br>200 ms<br>300 ms<br>400 ms<br>500 ms |
| Tension à vide | 230 V  |
| Courants       | 174 A<br>244 A<br>350 A                        |
| Pressions      | 1 bar<br>95 mbar                               |

En raison du comportement très erratique de l'arc, le transfert n'a jamais lieu au même instant pour une configuration donnée, mais la variation temporelle par plages de 100 millisecondes permet une certaine reproductibilité des résultats. Pour notre étude, nous avons fixé un nombre minimal de trois essais par couple configuration-distance, pour déterminer si le transfert à la plaque a lieu ou non. Bien qu'insuffisant d'un point de vue statistique, il a été vérifié qu'il était suffisant pour obtenir une précision acceptable sur la distance de ségrégation. Lorsque plusieurs durées ont été obtenues pour l'occurrence de transfert de l'arc à la plaque, la durée la plus courte a été retenue, car elle représente le cas le plus sévère.

À cela s'ajoute un critère de température, qui impose de vérifier si une valeur de 200°C en face arrière de la plaque est atteinte ou dépassée. Ce critère est étudié plus loin (§V.3).

### V.2.2. Résultats

Les dommages observés sur la plaque en aluminium dépendent très largement des conditions d'essais. La figure V-2 présente l'état de la plaque après un test avec des câbles en aluminium, à 1 bar et pour une distance de 1 u.a. Pour cet essai, l'arc a duré 993 ms, soit près du double de la durée fixée de 500 ms (la fonction permettant de régler la durée d'alimentation à partir du passage du courant n'ayant pas encore été installée à ce moment-là), et le transfert, qui s'est initié et interrompu plusieurs fois, a duré au total 850 ms environ. Dans ces conditions, la montée en température a provoqué la fusion de l'aluminium au niveau du pied d'arc, ce qui a été suffisant pour trouser la plaque, en raison de la durée prolongée de l'arc et du transfert. Dans le cas de la figure V-3, bien que le courant soit plus fort (350 A), la distance est un peu plus élevée (1,48 u.a.) et le transfert a duré moins longtemps (160 ms au total), aboutissant à un point fondu visible en face arrière. On remarque aussi la projection sur la face avant de nombreuses gouttelettes d'aluminium fondu, de taille variable.

Les figures V-4, V-5 et V-6 présentent, pour les trois câbles testés, la plus grande distance pour laquelle le transfert se produit, en fonction du temps d'arc (100 ms, 200 ms, 300 ms, 400 ms ou 500 ms), et pour les trois courants d'étude (excepté à 174 A pour les câbles en cuivre, pour les raisons déjà énoncées précédemment). Lorsque la durée d'arc augmente, la distance minimale d'accrochage est plus importante. En effet, l'allongement de la distance nécessite une durée d'arc plus longue pour qu'un phénomène d'accrochage ait lieu. De même, un arc qui dure plus longtemps, à une distance donnée, laisse plus de temps à un éventuel transfert de se produire.

À pression atmosphérique, pour des câbles en aluminium à 174 A, nous avons observé un transfert de l'arc à la plaque dès 9 ms à une distance de 1 u.a. Pour les mêmes câbles, à 350 A, un transfert a été obtenu jusqu'à une distance de 1,74 u.a., après 141 ms d'arc. Cette distance maximale de transfert est plus faible pour les câbles en cuivre, puisque dans les mêmes conditions (à pression atmosphérique et à 350 A), elle n'atteint que 1,07 u.a. pour les câbles cuivre 1, avec un transfert à 41 ms, et 1,04 u.a. pour les câbles cuivre 2, avec un transfert à 43 ms. À cet égard, on remarque que la plage de distances de transfert est plus étendue pour les câbles en aluminium que pour les câbles en cuivre, notamment à fort courant, puisqu'il n'y a que 0,04 u.a. entre la distance où le transfert se produit avant 100 ms, et celle où aucun transfert ne se produit (du moins sur les trois essais que nous avons effectués).

En comparaison, à pression réduite, nous avons obtenu un transfert de l'arc à une distance de 1,67 u.a. au bout de 18 ms, à 174 A pour des câbles en aluminium, tandis qu'un transfert jusqu'à 3,70 u.a. a été obtenu avec les mêmes câbles à 350 A, après 463 ms. Comme à pression atmosphérique, cette distance maximale est moins grande pour les câbles en cuivre,

car elle vaut 2,78 u.a. pour les câbles cuivre 1, avec un transfert à 99 ms, et 2,96 u.a. pour les câbles cuivre 2, avec un transfert à 115 ms, à 350 A. Là aussi, la plage de distance de transfert, entre un transfert rapide (en moins de 100 ms) et l'absence de transfert, est plus réduite pour les câbles en cuivre par rapport aux câbles en aluminium.



Figure V-2. État de la plaque en aluminium (10 × 10 cm) après un essai avec des câbles en aluminium, à 174 A, 1 bar et une distance de 1 u.a. : la face arrière (a) et le côté câbles (b).  
Durée de l'arc : 993 ms, durée du transfert : environ 850 ms au total.

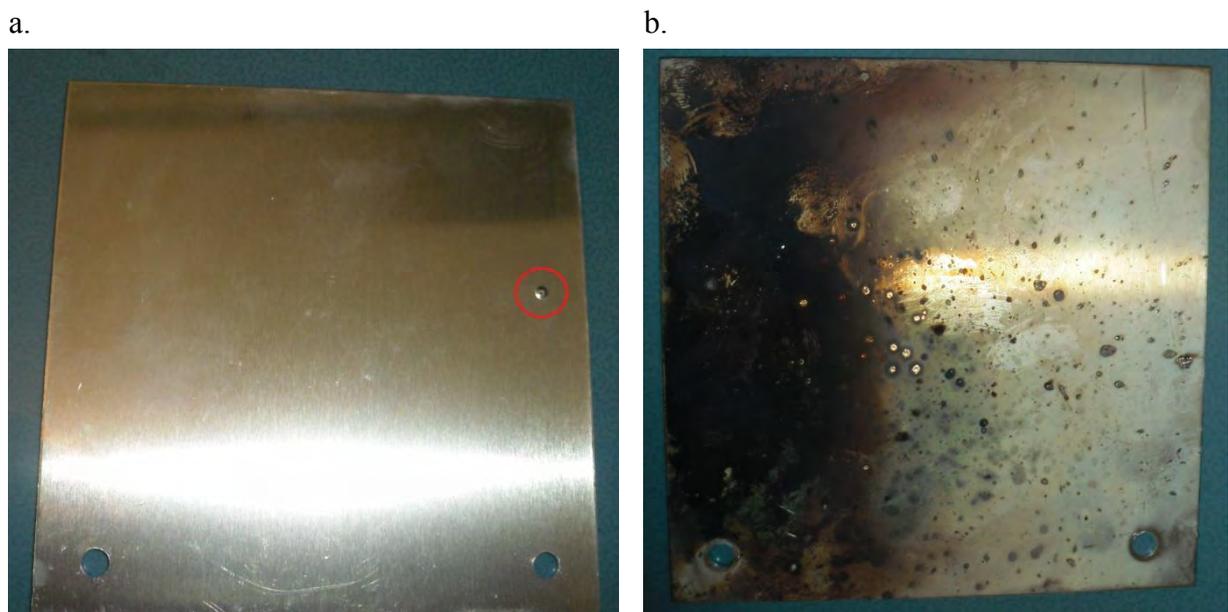


Figure V-3. État de la plaque en aluminium (10 × 10 cm) après un essai avec des câbles en aluminium, à 350 A, 1 bar et une distance de 1,48 u.a. : la face arrière (a) et le côté câbles (b).  
Durée de l'arc : 500 ms, durée du transfert : environ 160 ms au total.

Les figures V-4, V-5 et V-6 mettent également en évidence que le passage à 95 mbar engendre une augmentation (plus du double) des distances de transfert par rapport à la pression atmosphérique. Comme il a été signalé précédemment, les images obtenues avec les caméras rapides montrent que l'arc est beaucoup plus diffus à pression réduite. En effet, les électrons doivent parcourir une distance plus importante qu'à pression atmosphérique avant de provoquer l'ionisation d'une molécule du gaz. Cet allongement du libre parcours moyen des particules est à l'origine d'une augmentation du volume du plasma, qui occupe un espace plus étendu tout en étant moins dense. En revanche, si l'arc est susceptible de se transférer à la plaque sur des distances beaucoup plus grandes à pression réduite, les dommages subis par la plaque sont généralement bien moins importants.

Concernant les essais en mode continu, les quelques essais réalisés ont mis en évidence des distances beaucoup plus petites. Ainsi, à pression atmosphérique, aucun transfert n'a eu lieu à une distance supérieure à 0,07 u.a., et ces transferts ne se sont produits que pour les courants testés les plus élevés : à 125 et 100 A pour les câbles en aluminium, à 125 A pour les câbles cuivre 1. Pour les essais où l'arc s'est transféré à la plaque, pour une majorité des cas ce transfert a duré moins d'une dizaine de millisecondes. De façon surprenante, aucun transfert n'a eu lieu lors des essais en mode DC effectués à 95 mbar (qui ont tous été réalisés sur des câbles en aluminium, à 125 A).

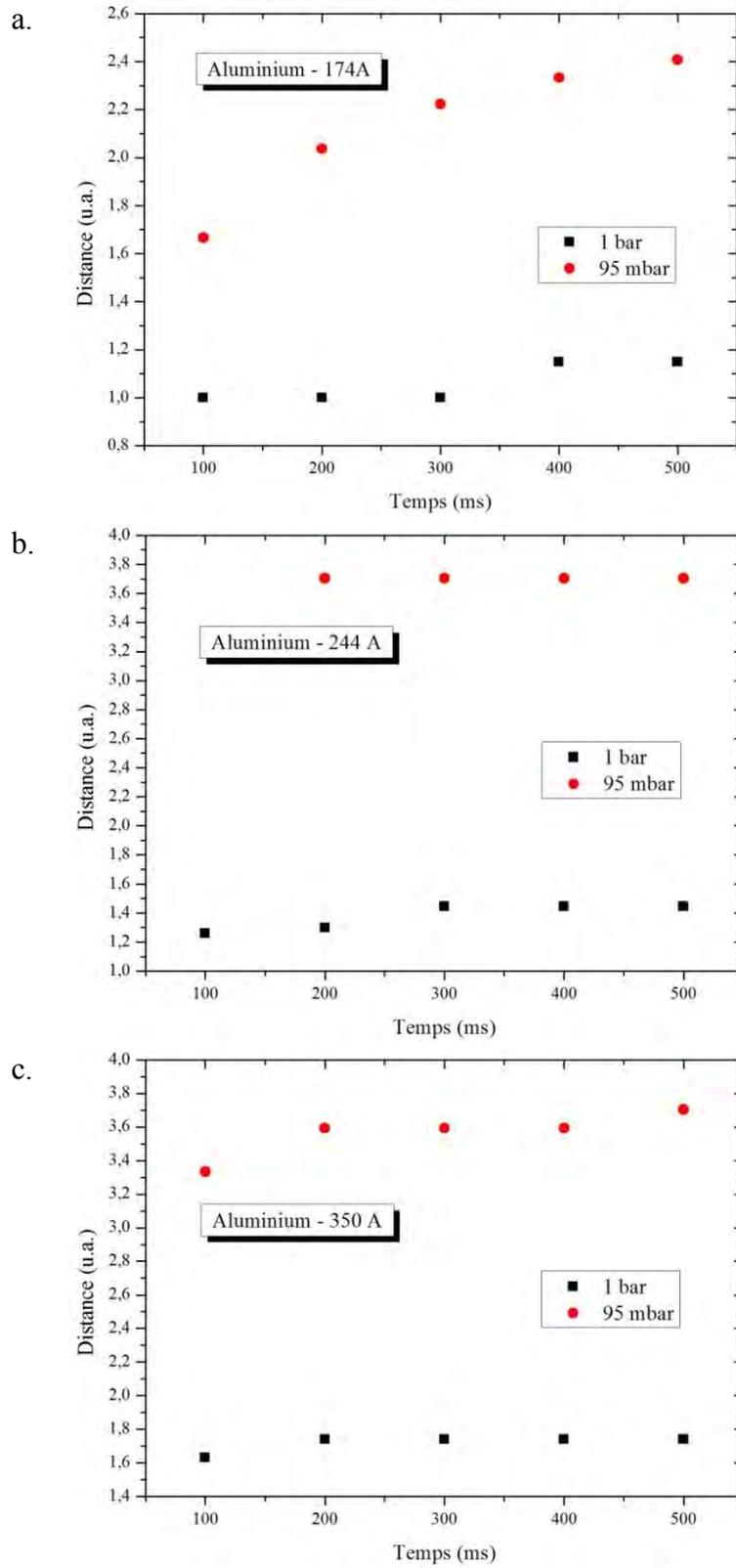


Figure V-4. Distance de transfert la plus grande obtenue, en fonction du temps d'arc, pour les câbles en aluminium, aux trois courants d'étude : 174 A (a), 244 A (b) et 350 A (c).

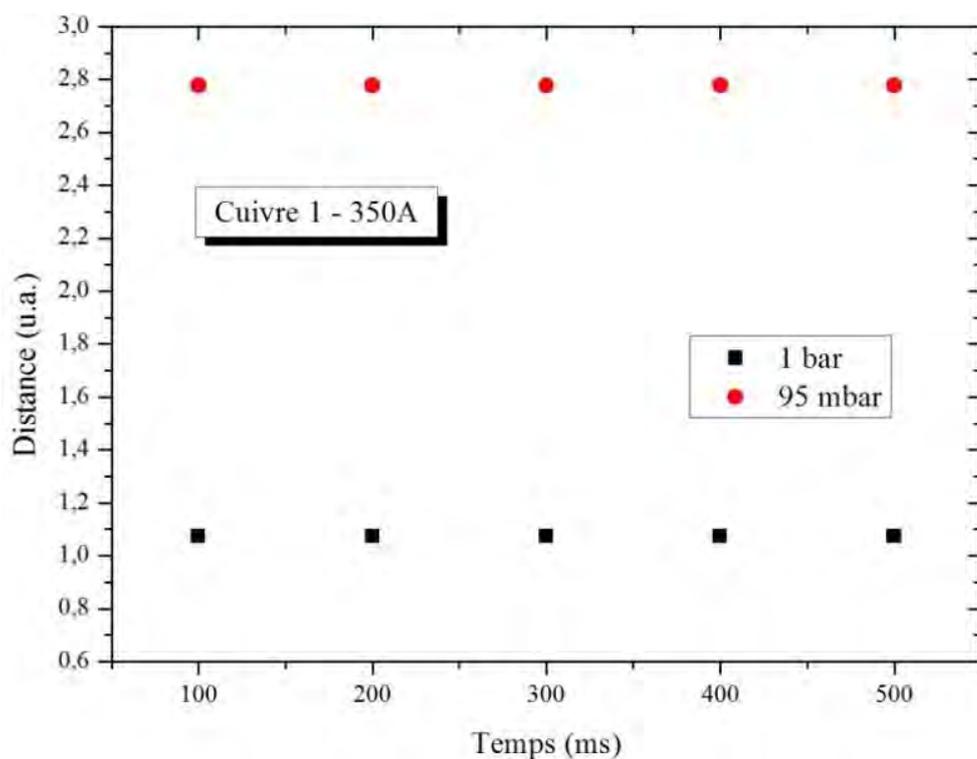
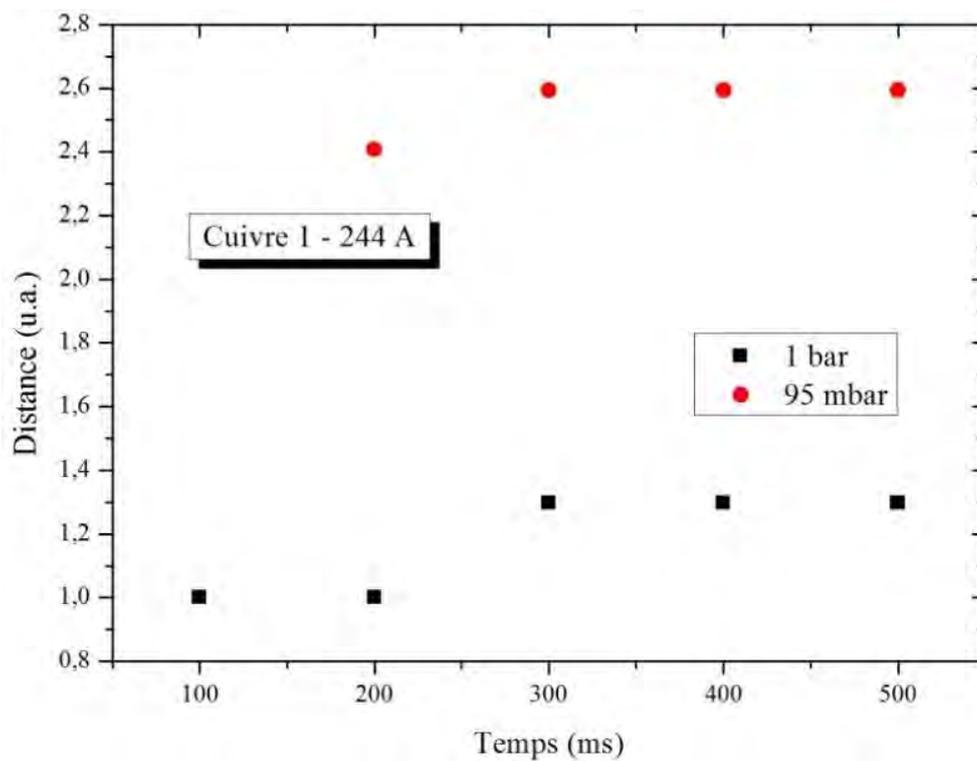


Figure V-5. Distance de transfert la plus grande obtenue, en fonction du temps d'arc, pour les câbles cuivre 1, à 244 A (a) et 350 A (b).

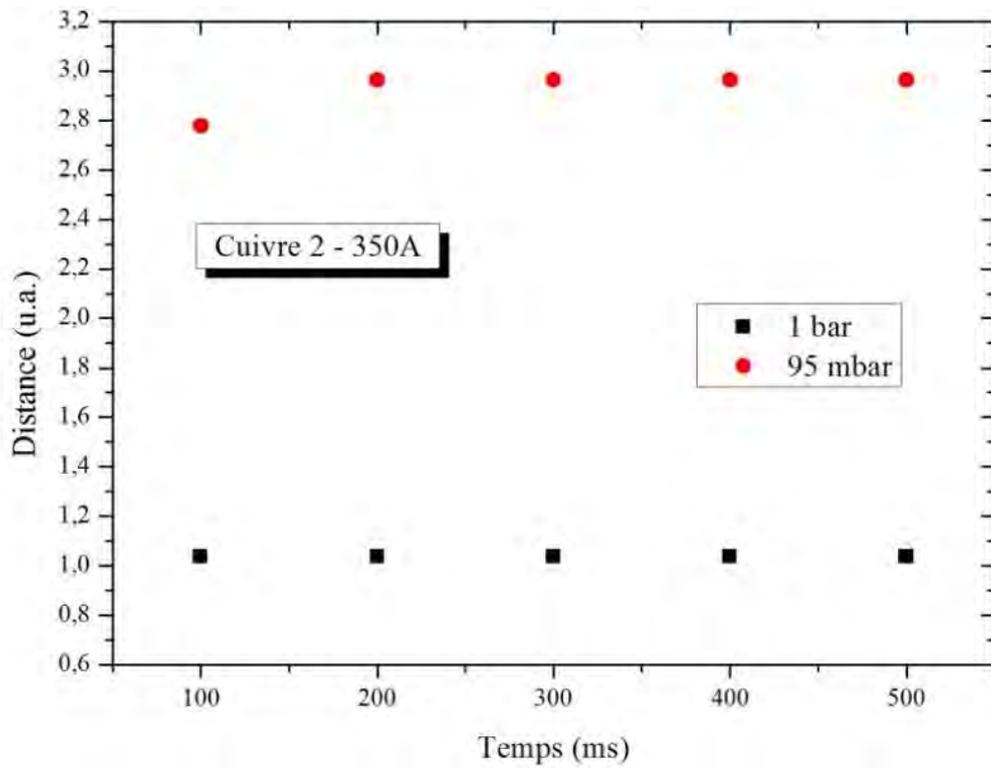
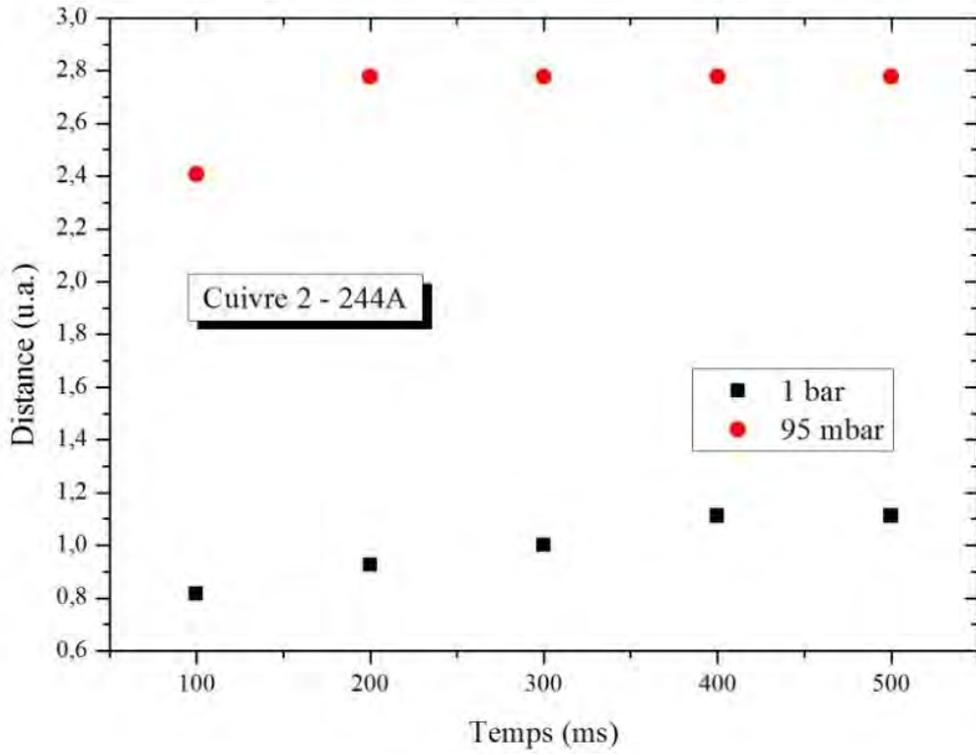


Figure V-6. Distance de transfert la plus grande obtenue, en fonction du temps d'arc, pour les câbles cuivre 2, à 244 A (a) et 350 A (b).

### V.3. Thermographie infrarouge

L'étude de la distance d'accrochage de l'arc depuis les câbles vers la plaque en aluminium s'accompagne d'un critère de température. Ce critère, imposant de vérifier si la température de la face arrière de la plaque atteint ou dépasse 200°C, est dû à des modifications pouvant commencer à apparaître dans la structure de l'aluminium à partir de cette température, ainsi qu'aux risques liés à la présence potentielle d'un réservoir de carburant à proximité.

Cette étude ne concerne pas les essais où le transfert a percé la plaque, ni même ceux où un point fondu était visible en face arrière, puisqu'il est alors évident que la température de fusion de l'aluminium a été atteinte, à savoir 660°C. Il s'agit plutôt de se mettre dans des conditions d'essais où le transfert n'a pas été très long, et s'est produit sans causer de dommages importants visibles sur la plaque.

#### V.3.1. Description de l'étude

La caméra infrarouge (voir §II.5.4) est positionnée devant l'ouverture faisant face à la plaque, de manière à en visualiser le côté arrière (voir figure V-7). Cette face de la plaque est peinte en noir avec une peinture thermorésistante (jusqu'à 600°C), de sorte que son émissivité soit proche de 0,98. Comme les hublots ne sont pas conçus pour laisser passer le spectre infrarouge, le hublot est retiré pour les essais à pression atmosphérique, et la mesure de température de la plaque au cours de l'essai peut être réalisée de façon directe. À pression réduite où il est impossible de retirer le hublot, la forte atténuation du signal infrarouge nous conduit à réaliser un étalonnage spécifique, effectué au moyen d'un calibre infrarouge muni d'une cible de température et d'émissivité connues.

Ainsi, lorsque la température de la cible du calibre est de 100°C, la température mesurée à travers le hublot est de 19,8°C (soit quelques degrés de plus que la température ambiante au moment des mesures). Pour une température de la cible de 200°C (ce qui constitue le critère de ségrégation dans notre étude), la température mesurée est de 23,5°C. Enfin, pour une température réelle de 350°C, la température mesurée à travers le hublot atteint 46,2°C. Pour les essais à pression atmosphérique et à pression réduite, nous avons donc utilisé la gamme de température s'étendant respectivement de 60 à 210°C, et de 10°C à 90°C.

Une série d'une dizaine d'essais a été réalisée, sur des câbles en aluminium, dans des configurations où le transfert avait de fortes chances de se produire. Cette campagne avait pour but de caractériser la montée de la température en face arrière de la plaque en aluminium, à la fois quantitativement et dans le temps, au regard du critère de 200°C mentionné précédemment (correspondant à 23,5°C à travers le hublot pour les essais à

95 mbar). Comme nous n'avons pas de trigger pour la caméra infrarouge, le déclenchement a été effectué de façon indépendante du reste du dispositif, à une ou deux secondes d'intervalle.

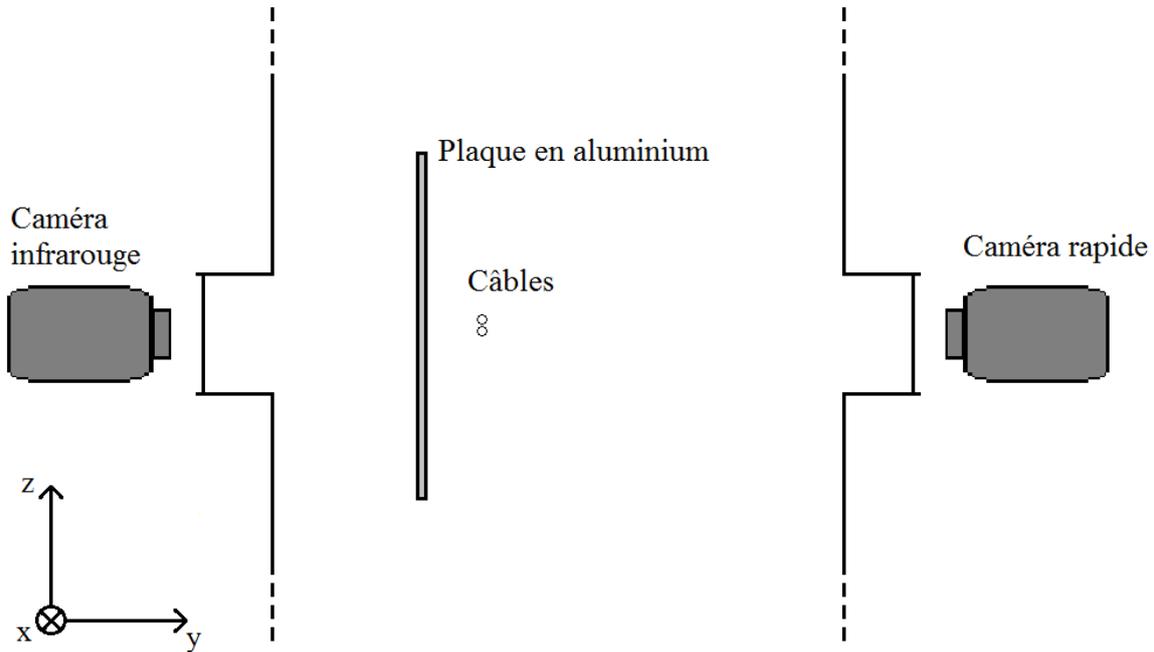


Figure V-7. Disposition des caméras (alignées selon l'axe y) autour de l'enceinte, par rapport aux câbles (alignés selon l'axe x) et à la plaque en aluminium.

La durée d'arc, mais surtout l'instant à partir duquel le transfert se produit sont établis avec précision grâce aux données électriques de courant et de tension, avec l'appui de l'imagerie rapide. Cette donnée permet d'identifier le début du transfert sur le fichier issu de l'enregistrement par la caméra thermique, à partir de l'initiation de l'arc (repérable sur le fichier de façon assez précise en général, contrairement à l'initiation du transfert). À partir de ces résultats, la montée en température et l'instant où les 200°C sont éventuellement atteints, sont déterminés et mis en relation avec le début du transfert de l'arc, afin d'étudier la rapidité de l'échauffement de la plaque.

### V.3.2. Résultats

Le tableau V-2 présente les résultats obtenus lors des cinq principaux essais de thermographie infrarouge. La dernière colonne indique la durée au bout de laquelle une température de 200°C en face arrière de la plaque en aluminium a été atteinte, à partir du début du transfert. Pour quatre de ces essais, cette durée est inférieure à 100 ms, ce qui montre la grande rapidité de l'échauffement de la plaque. Malgré le nombre limité de tests effectués avec la caméra infrarouge, on peut donc considérer que si le transfert à la plaque s'effectue au court d'un essai, il y a une forte probabilité que cette température critique soit atteinte en face arrière.

Les figures V-8 et V-9 correspondent au seul essai effectué à 1 bar présenté dans ce tableau (à 174 A, pour une distance de 0,74 u.a. entre les câbles et la plaque). La figure V-8 est extraite des données obtenues au moyen de la caméra thermique. On y distingue deux points d’échauffement au milieu de la plaque, correspondant à deux pieds d’arc, issu du transfert de l’arc entre les câbles vers la plaque. Un autre point d’échauffement est visible sur le bord droit de la plaque, mais il apparaît plus tardivement et disparaît plus tôt au cours de l’essai. La figure V-9, correspondant au même essai, décrit l’évolution de la température de la plaque au niveau des points d’échauffement centraux. En raison de la gamme de température utilisée, deux plateaux de saturation apparaissent, avant le transfert (où la température est inférieure à 60°C), et au cours du transfert, pendant la durée où la température est supérieure à 210°C.

Tableau V-2. Résultats des principaux essais effectués avec la caméra infrarouge où une température de 200°C a été atteinte en face arrière de la plaque en aluminium.

| Conditions d’essai |         |           | Durée d’arc | Début du transfert | 200°C atteints |
|--------------------|---------|-----------|-------------|--------------------|----------------|
| Pression           | Courant | Distance  |             |                    |                |
| 95 mbar            | 350 A   | 3,41 u.a. | 500 ms      | 91 ms              | 16 ms          |
| 95 mbar            | 174 A   | 1,30 u.a. | 179 ms      | instantané         | 70 ms          |
| 95 mbar            | 174 A   | 1,11 u.a. | 339 ms      | 2 ms               | 133 ms         |
| 95 mbar            | 174 A   | 0,74 u.a. | 210 ms      | instantané         | 52 ms          |
| 1 bar              | 174 A   | 0,74 u.a. | 363 ms      | 307 ms             | 22 ms          |

Les figures V-10 et V-11 correspondent à l’essai effectué à 1 bar, 174 A et pour une distance de 1,11 u.a. entre les câbles et la plaque. Sur la figure V-10, le point d’échauffement sur la plaque indique l’emplacement du pied d’arc. La zone d’échauffement de droite, à l’extérieur de la plaque, correspond aux câbles. La montée en température de la plaque est présentée sur la figure V-11. Comme il s’agit d’un test à pression réduite, le hublot de l’enceinte a été maintenu, et les 200°C correspondent à 23,5°C, d’après l’étalonnage que nous avons effectué.

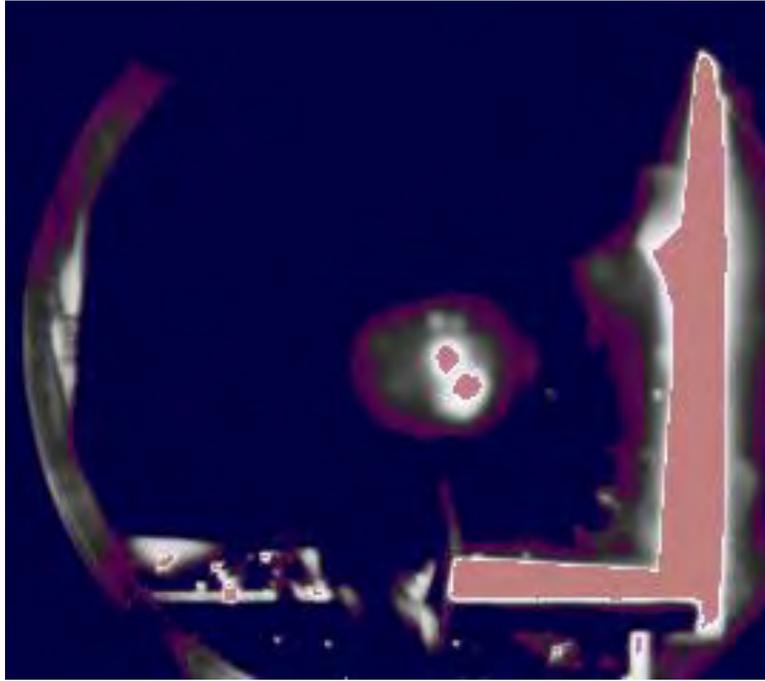


Figure V-8. Image extraite de l'essai à 1 bar, à 174 A, où la plaque est à 0,74 u.a. des câbles ; le transfert a débuté 45 ms plus tôt.

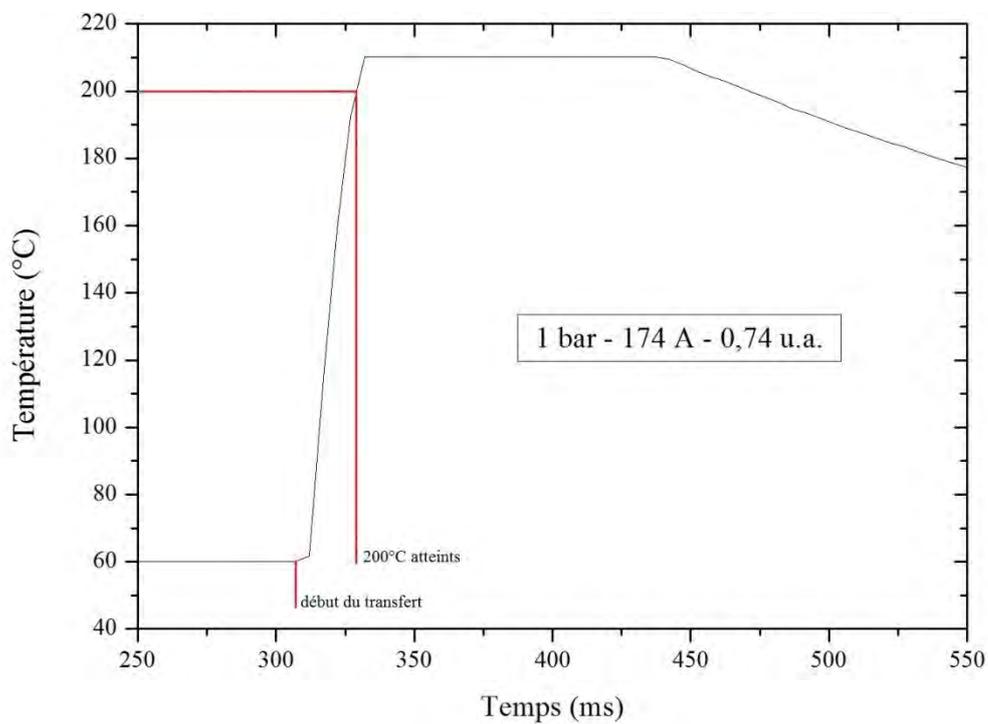


Figure V-9. Courbe d'évolution de la température sur le point chaud en face arrière de la plaque, correspondant à l'essai de la figure V-8, avec un plateau de saturation inférieur (à 60°C) et un plateau de saturation supérieur (à 210°C).



Figure V-10. Image extraite de l'essai à 95 mbar, à 174 A, où la plaque est à 1,11 u.a. des câbles ; le transfert a débuté 283 ms plus tôt.

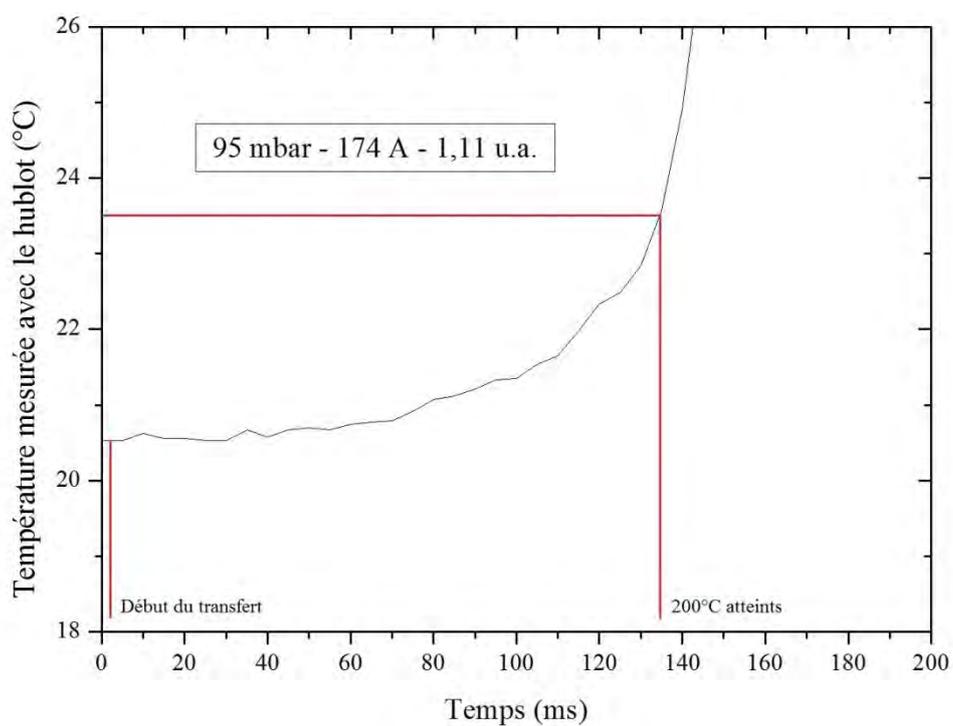


Figure V-11. Courbe d'évolution de la température sur le point chaud en face arrière de la plaque, correspondant à l'essai de la figure V-10.

### V.3.3. Conclusion

On peut conclure, sur la base de la majorité des essais réalisés, que dès l'instant qu'un transfert de l'arc se produit depuis les câbles vers la plaque en aluminium, une température de 200°C est atteinte en quelques dizaines de millisecondes. Ce résultat est observé à pression atmosphérique comme à pression réduite, même si les dommages à la plaque sont généralement moins importants dans ce dernier cas. Ajoutons que certains des tests effectués en l'absence de transfert ont montré que la plaque s'échauffe assez peu par conduction (un échauffement à 33°C a été mesuré pour un test à pression atmosphérique, à 174 A, sur des câbles en aluminium, à une distance de 1,22 u.a., l'arc ayant duré 341 ms sans transfert à la plaque), mais que des impacts de gouttes de métal en fusion projetées peuvent être critiques (une température de 196°C a été atteinte en face arrière de la plaque pour un test sur des câbles en aluminium à 174 A, à une distance de 1,00 u.a.).



## **Conclusion générale et perspectives**

Ce travail de thèse a porté sur une approche expérimentale visant à reproduire un arc électrique de défaut entre deux câbles d'un réseau aéronautique. Le défaut étudié consiste en le maintien et la propagation de l'arc le long des câbles, ce phénomène étant appelé « arc tracking ». Il s'accompagne de l'érosion du métal comme de la gaine isolante en raison de la haute température du plasma d'arc, supérieure à 10000 K. Ce problème est dû à l'usure progressive de l'isolant, qui peut permettre le passage du courant entre deux câbles d'un harnais. Le temps de déclenchement des dispositifs classiques de détection et de protection étant de plusieurs centaines de millisecondes, il peut suffire à ce que des dégâts très importants se produisent du fait de la projection de particules incandescentes ou de gouttelettes de métal en fusion, pouvant provoquer un endommagement considérable.

L'arc tracking a été largement étudié dans les dernières décennies, comme le montre la recherche bibliographique réalisée, aboutissant notamment au remplacement des polyimides par du PTFE comme matériau principal constituant l'isolant des câbles. Alors qu'il était bien maîtrisé par les concepteurs et les constructeurs d'aéronefs, le problème a ressurgi avec la nouvelle génération d'appareils dits « plus électriques » voire « tout électriques », dont la puissance électrique embarquée est en constante augmentation, mais qui voit aussi notamment le remplacement du cuivre par de l'aluminium dans les câbles, le développement du réseau DC et l'utilisation de matériaux composites plutôt que de métal pour la structure. Une part importante des études publiées s'intéresse principalement aux facteurs qui peuvent être de nature à favoriser l'apparition du phénomène d'arc tracking, ou encore aux systèmes de détection, si bien que les travaux qui portent réellement sur les propriétés de l'arc tracking sont peu nombreux et ce travail trouve toute sa place dans ce contexte.

Une partie très importante de cette thèse a été consacrée à la conception d'un dispositif expérimental permettant de réaliser des essais d'arc tracking entre deux câbles de type aéronautique endommagés volontairement. En effet, si des travaux sur l'arc tracking ont déjà été réalisés au LAPLACE depuis plusieurs années, il a été nécessaire de concevoir un générateur de puissance représentatif des réseaux électriques d'aéronefs, pouvant délivrer un signal continu aussi bien qu'alternatif pendant une durée fixée, ainsi qu'une enceinte fermée pour la mise en œuvre de tests à pression atmosphérique ou à pression réduite. L'originalité principale de ce travail réside dans l'étude du transfert éventuel de l'arc depuis les câbles vers une plaque en aluminium, située à une distance déterminée, et en fonction de la durée d'arc considérée. Ce dispositif s'accompagne d'équipements de mesures électriques et de flux rayonné, couplés à de l'imagerie rapide sous deux axes différents (l'arc étant vu de face et de haut, au moyen de deux caméras), qui permettent d'étudier l'arc lui-même, mais aussi de caractériser le transfert de l'arc à la plaque en aluminium lorsqu'il se produit.

De nombreux essais ont été réalisés, majoritairement en mode alternatif, sous 230 V, pour un courant de 174, 244 ou 350 A, et une durée d'arc programmée de 500 millisecondes, à pression atmosphérique et à 95 mbar. Trois types de câbles ont été testés, un en aluminium et deux en cuivre, d'épaisseur d'isolant différente. Ces essais ont permis d'établir que l'arc est beaucoup plus diffus, à pression réduite, c'est-à-dire qu'il occupe un espace plus étendu tout en étant moins dense, ses limites étant difficiles à déterminer sur les images, par opposition aux essais effectués à 1 bar. Ce comportement de l'arc le conduit à se transférer à la plaque en aluminium à des distances plus de deux fois plus grandes à pression réduite par rapport à la pression atmosphérique. On observe également que le cuivre produit davantage de fumée que l'aluminium, qui donne lieu à la projection de gouttelettes de métal fondu beaucoup plus nombreuses.

Un bilan de puissance a été réalisé, permettant d'établir que dans des conditions expérimentales identiques la puissance totale disponible est environ 20% plus faible à 95 mbar qu'à 1 bar. La puissance transmise aux électrodes est supérieure à la moitié de la puissance électrique disponible pour les essais à pression atmosphérique, tandis qu'elle est légèrement inférieure à 50% à pression réduite. À 1 bar, la puissance rayonnée est voisine de 1500 W. Cette donnée provient des mesures de flux radiatif, bien que celles-ci soient très bruitées, et la valeur fournie par le calcul issu du coefficient d'émission nette confirme cet ordre de grandeur. Dans tous les cas, une incertitude assez importante affecte cette donnée, due à l'insuffisance des connaissances sur le plasma d'arc dans la configuration de l'arc tracking (notamment sa température et sa composition), mais aussi car ce modèle, qui considère une géométrie cylindrique, n'est pas totalement adapté à notre cas où l'arc se comporte parfois de manière très erratique.

Le transfert de l'arc à la plaque en aluminium a été caractérisé en température en face arrière de la plaque, et les tests d'imagerie infrarouge que nous avons réalisés nous amènent à conclure que lorsqu'un transfert de l'arc vers la plaque se produit, une température de 200°C est atteinte en face arrière de la plaque en quelques dizaines de millisecondes. Des travaux plus poussés impliquant des méthodes inverses pourraient permettre d'estimer de manière plus précise l'énergie transmise à la plaque durant le transfert. Pour une étude ultérieure, il serait également intéressant de remplacer la plaque en aluminium par une plaque en matériau composite, afin de reproduire de façon plus représentative l'environnement d'un harnais de câbles installé dans un avion de dernière génération. Par ailleurs, il serait profitable que cette plaque soit de dimensions supérieures à celles pour lesquelles nous avons opté, car il n'a pas été rare que l'arc s'accroche très près du bord.

Les essais en régime continu ont été beaucoup moins nombreux qu'en régime alternatif. En dehors du fait que la quasi intégralité du temps d'expérimentation a dû être consacrée au mode AC, les quelques tests réalisés en DC n'ont pas donné beaucoup de résultats en ce qui concerne les distances de transfert à la plaque, puisque cette dernière était connectée au – du

générateur, donc au même potentiel qu'un des deux câbles, alors qu'elle était connectée au neutre en régime alternatif. Il serait ainsi intéressant de compléter ultérieurement cette étude, en particulier en ce qui concerne les distances de ségrégation, par des essais en régime continu analogues à ceux qui ont été effectués en alternatif. Il faudra pour cela disposer dans ce mode d'un potentiel « zéro », intermédiaire entre le + et le -, qui jouerait un rôle équivalent à ce qu'a été le neutre dans ce travail pour le mode AC.

La proportion de métal vaporisé a été estimée à 1% de la masse de métal ablatée, pour l'aluminium comme pour le cuivre, alors que les câbles ont un comportement de dégradation différent, qui semble indiquer que la part vaporisée est plus importante dans le cas du cuivre. Afin d'affiner cette partie du bilan, on peut envisager pour des travaux ultérieurs un système permettant de recueillir les gouttes de métal fondu projeté, et d'en estimer la quantité, au regard de la masse de câble ablatée globale. Par ailleurs, le terme de puissance correspondant à la formation d'alumine, par combustion de l'aluminium, manque à notre bilan. Or, cette réaction très exothermique dissipe une grande quantité d'énergie. En première approximation, on peut envisager de scier une gouttelette projetée et resolidifiée et de mesurer l'épaisseur de la couche d'alumine, afin d'estimer la quantité de métal oxydée. Il serait également intéressant de réaliser quelques essais sous azote ou sous argon (dans une enceinte de volume plus réduit) afin de s'affranchir du phénomène d'oxydation de l'aluminium ainsi que de l'absorption du rayonnement émis à des longueurs d'onde inférieures à 200 nm dans l'air.

Si l'étude de l'influence de la pression sur le comportement de l'arc et sur son interaction avec son environnement immédiat constitue l'originalité de ce travail, il est à noter que d'autres facteurs, tels que la température et l'hygrométrie n'ont pas été prises en compte, alors qu'elles sont probablement de nature à modifier les conditions d'accrochage de l'arc à une structure avoisinante.

Par-delà le caractère éminemment erratique et aléatoire de l'arc, la finalité de ces investigations, pour les ingénieurs, est de tendre vers un modèle prédictif, qui soit de nature à établir une corrélation entre le transfert d'énergie (en fonction des conditions de réseau et de l'environnement) et l'endommagement causé par l'arc.



## Références

- [1] A.-M. Pointu, J. Jolly, et J. Perrini, *Plasmas froids de décharges - Applications et diagnostic*. Techniques de l'ingénieur, 1997.
- [2] S. Vacquié, *L'arc électrique*. Paris: CNRS, 2000.
- [3] T. W. Dakin, G. Luxa, G. Oppermann, J. Vigreux, G. Wind, et H. Winkelkemper, « Breakdown of gases in uniform fields. Paschen curves for nitrogen, air and sulfur hexafluoride », *Electra*, n° 32, p. 61-82, 1974.
- [4] H. El Bayda, « Etude du transfert d'énergie entre un arc de court-circuit et son environnement : application à l'Arc Tracking », Thèse de doctorat Génie électrique, Université Toulouse III Paul Sabatier, 2012.
- [5] F. Dricot et H. J. Reher, « Survey of arc tracking on aerospace cables and wires », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 1, n° 5, p. 896-903, 1994.
- [6] D. Kolker, S. Campolo, et N. DiSalvo, « A study of time/current characteristics of the ignition processes in cellulosic material caused by electrical arcing for application in 240v arc-fault circuit interrupters », in *53rd IEEE Holm conference on Electrical contacts*, 2007, p. 105-114.
- [7] F. R. Frontzek, D. Konig, M. D. Judd, et H. J. Reher, « Fault arc propagation on cables for space applications in vacuum, oxygen-enriched air and air », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 2, n° 2, p. 190-197, 1995.
- [8] M. Dutoya, G. Mazeau, et C. Vlacich, *Method and device for detecting electric arc phenomenon on at least one electric cable*. Google Patents, 2009.
- [9] W. Yongxing, D. Enyuan, C. Jiyuan, Z. Jiyan, et D. Koenig, « Arc tracking properties of the aging wires in aircraft », in *2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics (ISSCAA)*, 2008, p. 1-5.
- [10] A. Hammoud, M. Staven, J. Suthar, et J. Laghari, « Effects of thermal and electrical stressing on the breakdown behavior of space wiring », in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1995. Annual Report., Conference on*, 1995, p. 266-269.
- [11] T. J. Stueber, A. Hammoud, M. W. Stavnes, et K. Hrovat, « Evaluation of pyrolysis and arc tracking on candidate wire insulation designs for space applications », in *Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 1994, p. 473-476.
- [12] J. Hanson et D. Koenig, « Fault arcs effects in cable bundles for space applications in vacuum », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 4, n° 4, p. 394-399, 1997.
- [13] J. J. Shea, « Conditions for series arcing phenomena in PVC wiring », in *Proceedings of the Fifty-First IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, 2005, p. 167-175.

- [14] AFNOR, Série aérospatiale, « Câbles électriques à usage aéronautique - Méthodes d'essais - Partie 604: résistance à l'amorçage et à la propagation d'arc électrique, essai à sec. » NF EN 3475-604, 2003.
- [15] AFNOR, Série aérospatiale, « Câbles électriques à usage aéronautique - Méthodes d'essais - Partie 605: essai de court-circuit humide ». NF EN 3475-605, 2003.
- [16] A. N. Hammoud, M. W. Stavnes, J. R. Ide, et E. Muegge, « Performance of partially fluorinated polyimide insulation for aerospace applications », in *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report.*, 1995, p. 262–265.
- [17] A. N. Hammoud *et al.*, « Evaluation of wiring constructions for space applications », in *Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh, PA USA*, 1994, p. 592–595.
- [18] D. Konig, F. R. Frontzek, H. J. Reher, et M. D. Judd, « A new test method for the assessment of the arc tracking properties of wire bundles in air, oxygen enriched atmospheres and vacuum », in *Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Pittsburgh, PA USA*, 1994, p. 145–150.
- [19] H. B. Land III, C. L. Eddins, et J. M. Klimek, « Evolution of arc fault protection technology at APL », *Johns Hopkins APL Tech. Dig.*, vol. 25, n° 2, p. 140–153, 2004.
- [20] G. D. Gregory, K. Wong, et R. Dvorak, « More about arc-fault circuit interrupters », in *Conference Record of the Industry Applications Conference, 38th IAS Annual Meeting.*, 2003, vol. 2, p. 1306–1313.
- [21] J. A. Momoh et R. Button, « Design and analysis of aerospace dc arcing faults using fast fourier transformation and artificial neural network », in *Power Engineering Society General Meeting, IEEE*, 2003, vol. 2, p. 788–793.
- [22] D. Izquierdo, A. Barrado, C. Raga, M. Sanz, et A. Lazaro, « Protection Devices for Aircraft Electrical Power Distribution Systems: State of the Art », *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 47, n° 3, p. 1538-1550, juill. 2011.
- [23] R. Grassetti, R. Ottoboni, et M. Rossi, « A novel algorithm for the parallel arc fault identification in DC aircraft power plants », in *2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, 2012, p. 148 -153.
- [24] S. Arunachalam et B. Diong, « A Parametric Model Approach to Arc Fault Detection for DC and AC Power Systems », in *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*, 2006, vol. 5, p. 2249-2255.
- [25] H. Zhang, T. Chen, et W. Li, « Arc Fault Signatures Detection on Aircraft Wiring System », in *2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2006, vol. 2, p. 5548-5552.
- [26] C. Kim et R. Sowah, « Arcing Fault Detection with Experimental Verification using Antenna for Signal Capture of Radiated Electromagnetic Energy », in *10th Joint Federal Aviation Administration (FAA)/United States Department of Defense*

- (DoD)/National Aeronautics and Space Administration (NASA) Conf. Aging Aircraft, 2007.
- [27] V. Degardin, L. Kone, F. Valensi, P. Laly, M. Lienard, et P. Degauque, « Characterization of the High-Frequency Conducted Electromagnetic Noise Generated by an Arc Tracking Between DC wires », *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 58, n° 4, p. 1228-1235, août 2016.
- [28] X. Roboam, « New trends and challenges of electrical networks embedded in “more electrical aircraft” », in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2011, p. 26-31.
- [29] O. Langlois, E. Foch, X. Roboam, et H. Piquet, « De l’avion plus électrique à l’avion tout électrique : état de l’art et prospective sur les réseaux de bord », *J3eA*, vol. 4, p. 001, 2005.
- [30] R. Boukadoum, A. Barbet, P. Dessante, R. Landfried, T. Leblanc, et P. Teste, « Simple 1D Model of a Short Gap DC Electric Arc in Aeronautical Pressure Conditions », in *IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, 2016, p. 179-186.
- [31] D. E. Gourari, « Synthèse par arc électrique de nanotubes de carbone hybrides incorporant de l’azote et/ou du bore », Thèse de doctorat, Université Toulouse III Paul Sabatier, 2015.
- [32] T. Heckmann, « Étude expérimentale du plasma et des transferts d’énergie lors de l’apparition d’un arc électrique au sein d’un faisceau de câbles en aéronautique », Mémoire de Master de l’Université Toulouse III Paul Sabatier, 2013.
- [33] D. Godin et J. Y. Trépanier, « A Robust and Efficient Method for the Computation of Equilibrium Composition in Gaseous Mixtures », *Plasma Chem. Plasma Process.*, vol. 24, n° 3, p. 447-473, sept. 2004.
- [34] D. Godin, « Calcul de compositions chimiques de plasmas à l’équilibre thermodynamique : application à la modélisation de l’ablation dans les disjoncteurs », Université de Montréal, Mémoire de Maîtrise ès Sciences, 1998.
- [35] M. I. Boulos, P. Fauchais, et E. Pfender, *Thermal Plasmas: Fundamentals and Applications*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [36] M. W. Chase Jr, C. A. Davies, J. R. Downey Jr, D. J. Frurip, R. A. McDonald, et A. N. Syverud, *J Phys Chem Ref Data JANAF Thermodyn. Tables*, vol. 14, supplement n°1, 1985.
- [37] L. Figuet, « Alimentation électrique de puissance AC+DC - Spécifications techniques du produit ». Puissance +, 19-mars-2015.
- [38] X. Zhang, G. Pietsch, et E. Gockenbach, « Investigation of the thermal transfer coefficient by the energy balance of fault arcs in electrical installations », *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 21, n° 1, p. 425-431, janv. 2006.

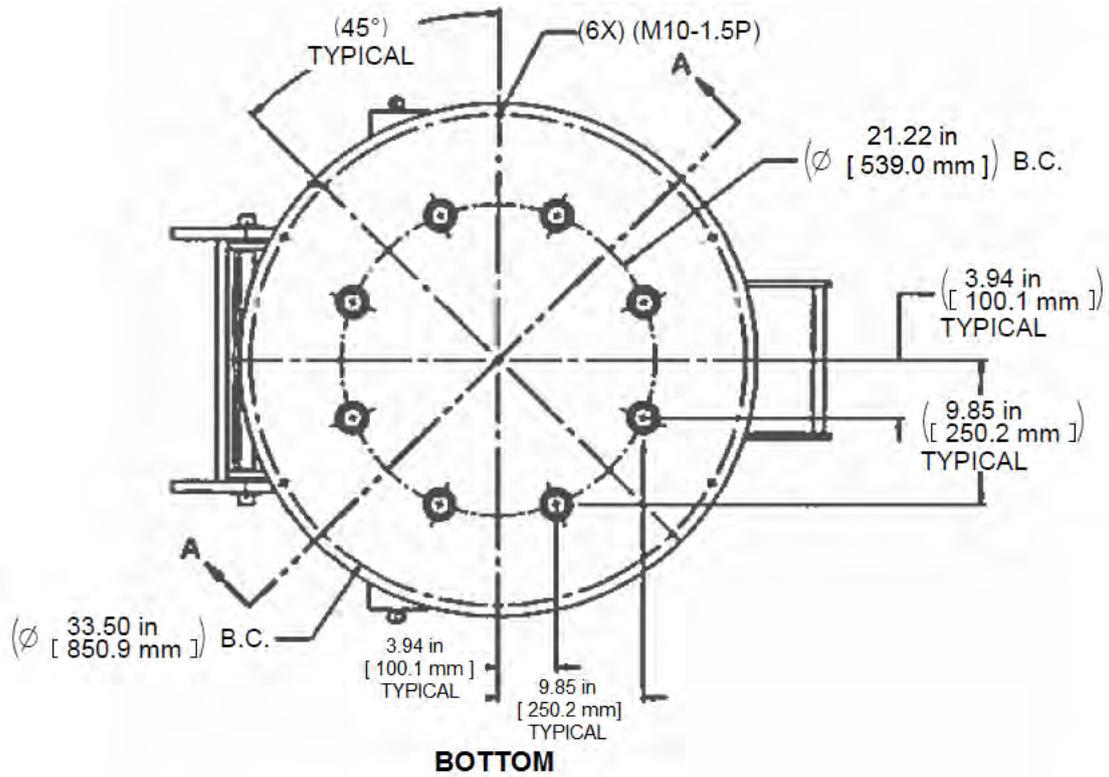
- [39] V. A. Nemchinsky, « Plasma parameters near a small anode in a high-pressure arc (gas metal arc welding) », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 27, n° 12, p. 2515-2521, 1994.
- [40] M. B. C. Quigley, P. H. Richards, D. T. Swift-Hook, et A. E. F. Gick, « Heat flow to the workpiece from a TIG welding arc », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 6, n° 18, p. 2250-2259, 1973.
- [41] R. F. Ammerman, T. Gammon, P. K. Sen, et J. P. Nelson, « Dc arc models and incident energy calculations », in *2009 Record of Conference Papers - Industry Applications Society 56th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, 2009*, p. 1-13.
- [42] W. B. Nottingham, « A new equation for the static characteristic of the normal electric arc », *J. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 42, n° 1, p. 12-19, janv. 1923.
- [43] Y. Yokomizu, T. Matsumura, R. Henmi, et Y. Kito, « Total voltage drops in electrode fall regions of, argon and air arcs in current range from 10 to 20 000 A », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 29, n° 5, p. 1260-1267, 1996.
- [44] R. Hemmi, Y. Yokomizu, et T. Matsumura, « Anode-fall and cathode-fall voltages of air arc in atmosphere between silver electrodes », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 36, n° 9, p. 1097-1106, 2003.
- [45] D. J. Dickson et A. von Engel, « Resolving the Electrode Fall Spaces of Electric Arcs », *Proc. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 300, n° 1462, p. 316-325, sept. 1967.
- [46] O. Diaz et V. Cooray, « Effect of pressure on the electrode fall for impulse arcs in argon between copper electrodes », in *30th ICPIG int. Conf Phen. ionized Gases*, 2011.
- [47] M. S. Agarwal et R. Holmes, « Arcing voltage of the metal vapour vacuum arc », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 17, n° 4, p. 757-767, 1984.
- [48] J. E. Daalder, « Erosion and the origin of charged and neutral species in vacuum arcs », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 8, n° 14, p. 1647-1659, 1975.
- [49] D. R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 90ème édition. CRC Press Inc., 2009.
- [50] F. Lago, J. J. Gonzalez, P. Freton, et A. Gleizes, « A numerical modelling of an electric arc and its interaction with the anode: Part I. The two-dimensional model », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 37, n° 6, p. 883-897, 2004.
- [51] D. Godin, J. Y. Trépanier, M. Reggio, X. D. Zhang, et R. Camarero, « Modelling and simulation of nozzle ablation in high-voltage circuit-breakers », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 33, n° 20, p. 2583-2590, 2000.
- [52] J. J. Lowke, « Predictions of arc temperature profiles using approximate emission coefficients for radiation losses », *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, vol. 14, n° 2, p. 111-122, févr. 1974.

- 
- [53] Y. Naghizadeh-Kashani, Y. Cressault, et A. Gleizes, « Net emission coefficient of air thermal plasmas », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 35, n° 22, p. 2925-2934, 2002.
- [54] B. Swierczynski, J. J. Gonzalez, P. Teulet, P. Freton, et A. Gleizes, « Advances in low-voltage circuit breaker modelling », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 37, n° 4, p. 595-609, 2004.
- [55] Y. Cressault, A. Gleizes, et G. Riquel, « Calculation of the radiation emitted by isothermal arc plasmas in air and air-metal mixtures », in *Proceedings of the 20th International Symposium on Plasma Chemistry*, Philadelphia, USA, 2011.

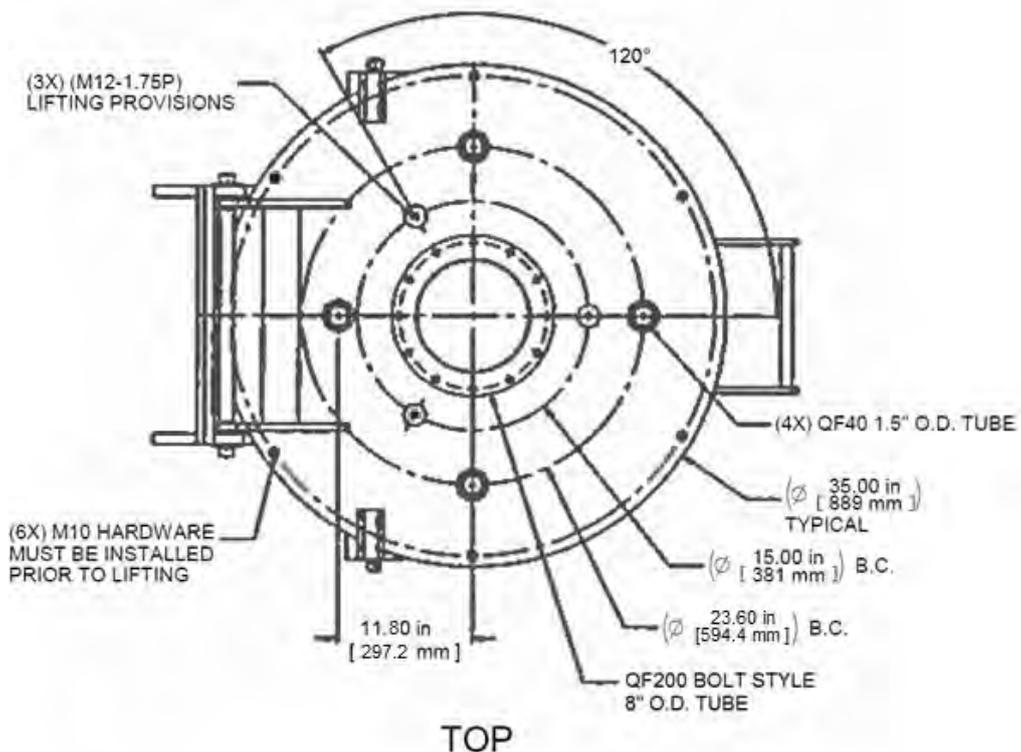


# ANNEXE A – L'enceinte

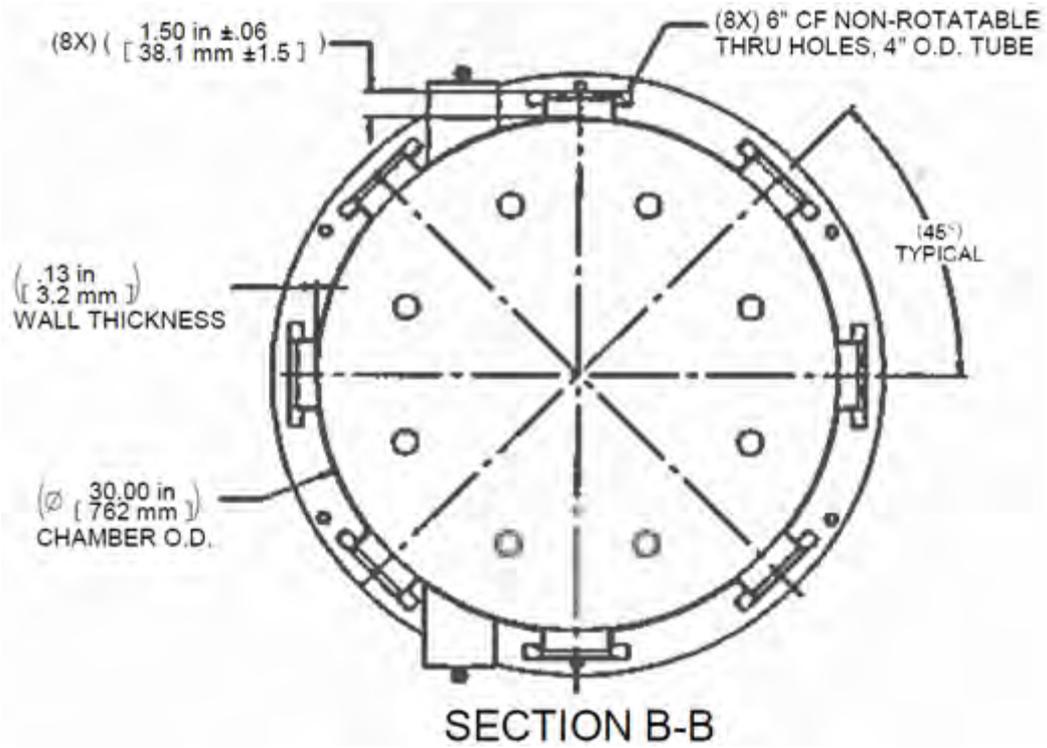
## Vue de dessous



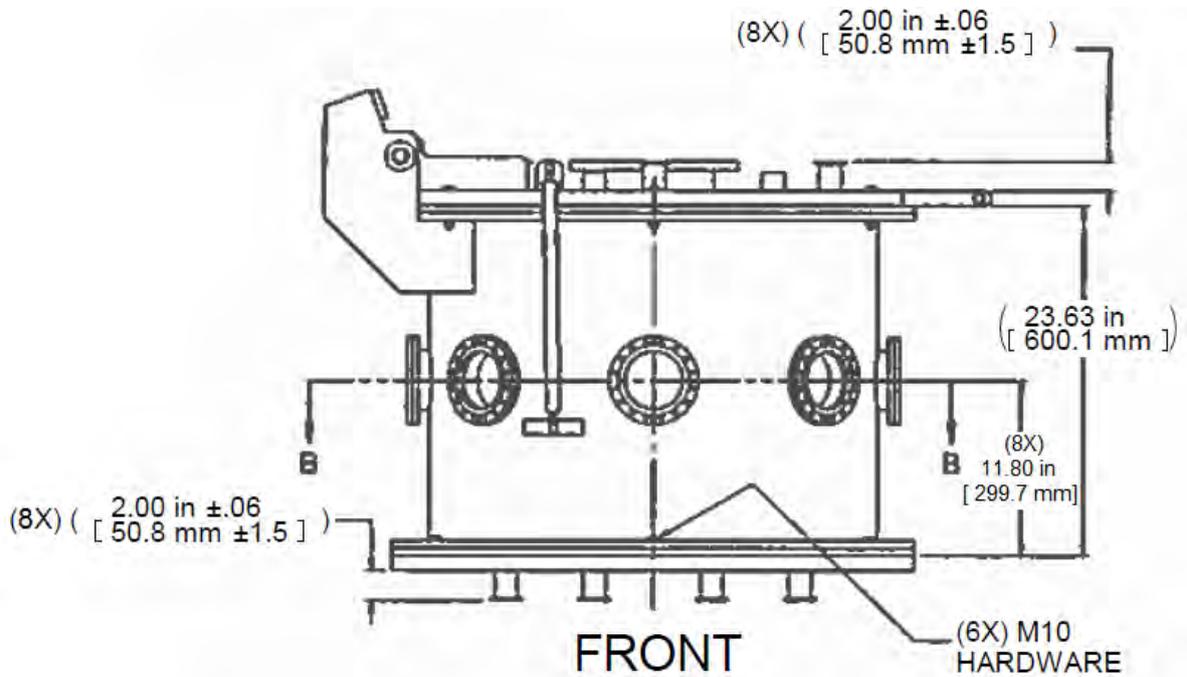
## Vue de dessus

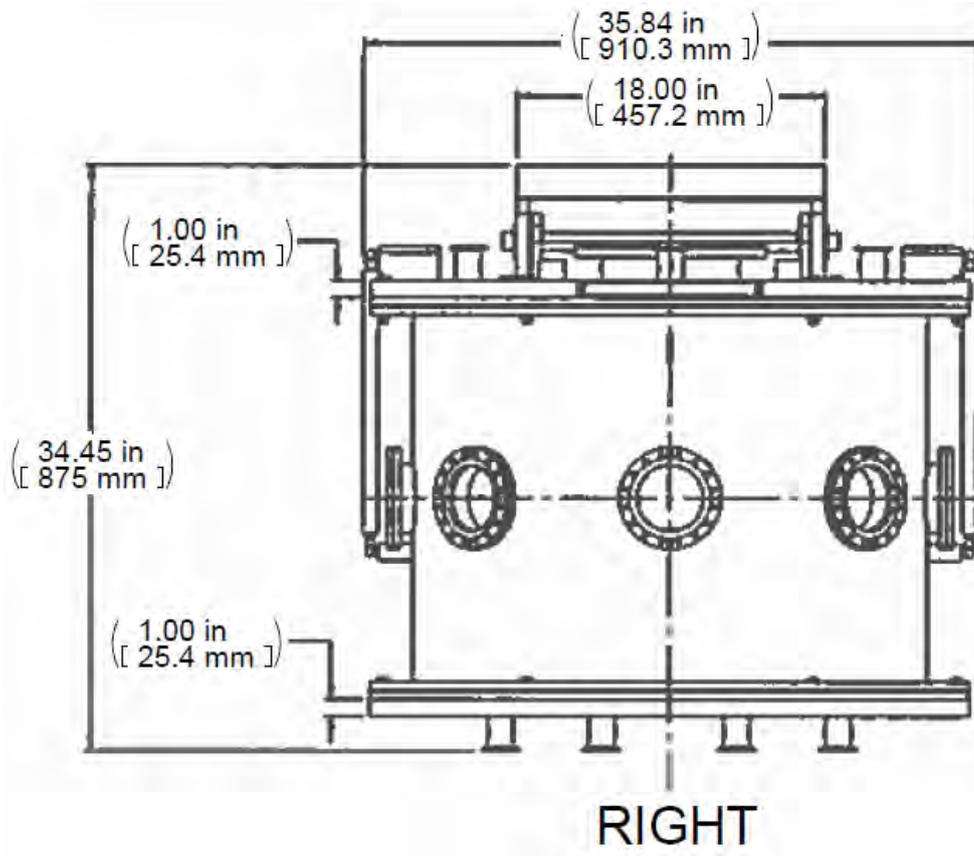


Section à mi-hauteur



Vue de face



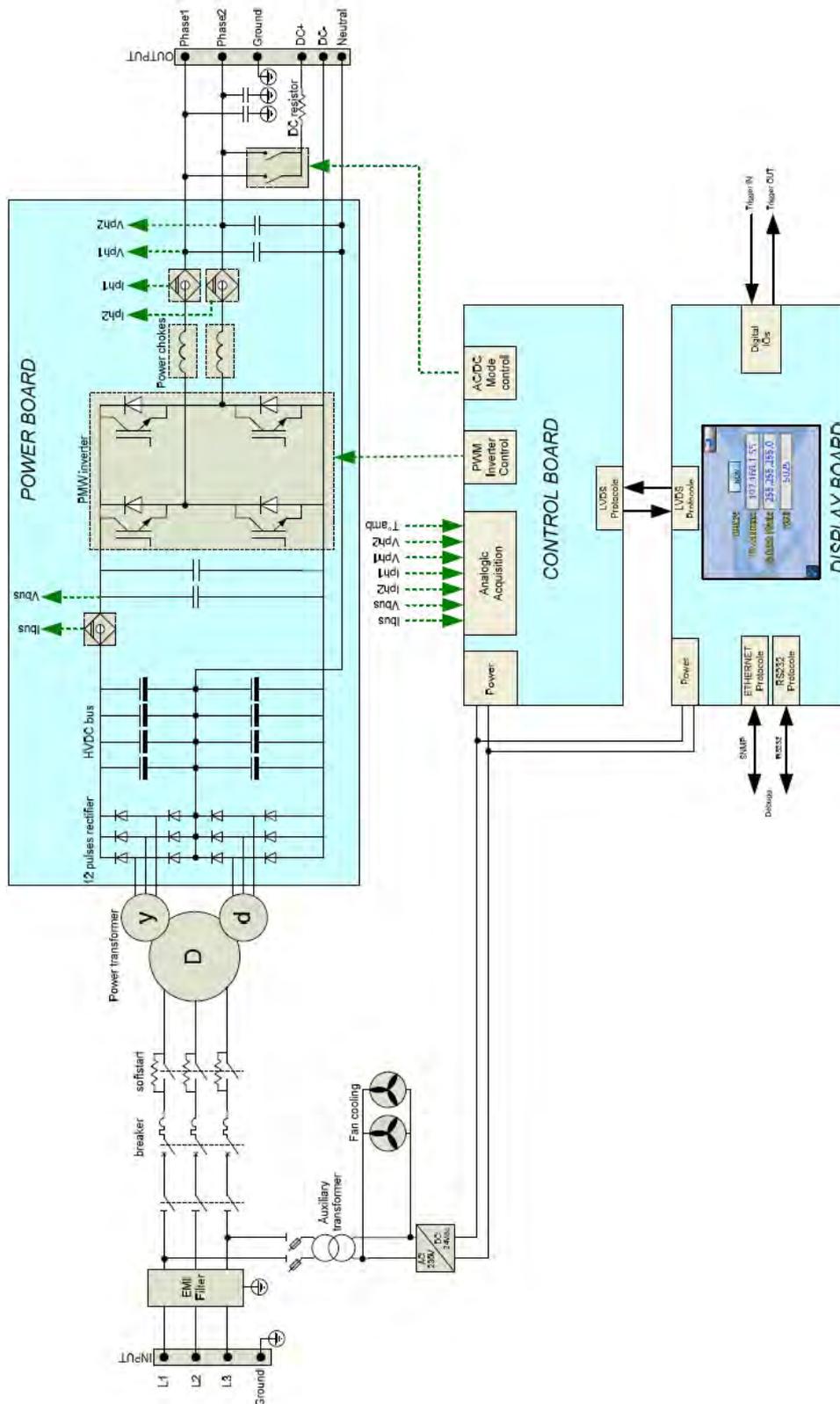
Vue de droite



# ANNEXE B – Le générateur

## Synoptique général

Le synoptique suivant présente la structure du générateur :



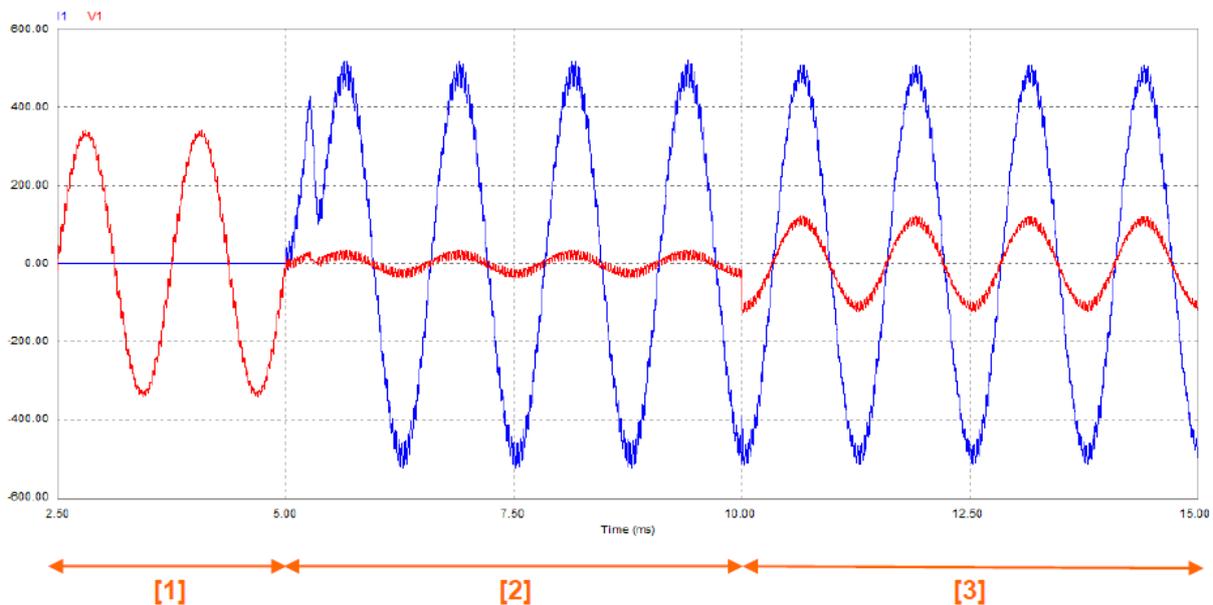
L'armoire est constituée de trois sous-ensembles principaux :

- Le **Display Board** : carte  $\mu$ II qui embarque un écran tactile de dimension 5.7'' de diagonale, disposée en face avant de l'équipement. Cette carte joue notamment le rôle d'interface homme-machine à travers divers écrans de contrôle. Elle supervise la carte de commande à travers un lien de communication spécifique.
- Le **Control Board** : c'est la carte mère du convertisseur. Elle intègre des fonctions d'acquisition et de commande rapprochée permettant le pilotage de la partie puissance. L'intelligence embarquée sur la carte prend notamment en charge la gestion des sécurités électroniques, la gestion des drivers de puissance ainsi que les asservissements numériques du convertisseur.
- Le **Power Board** : c'est la partie puissance du générateur. Elle intègre notamment les composants de puissance nécessaire à la conversion de l'énergie (IGBT, diode, capteur, etc.) ainsi que les fonctions de filtrage.

### Mode de fonctionnement en mode AC monophasé

Dans ce mode, la charge est connectée entre la phase 1 du générateur et le neutre du générateur. En charge, le courant de la phase 1 est contrôlé à la valeur de consigne par régulation numérique. À vide, la tension de la phase 1 est contrôlée à la valeur de consigne par régulation numérique.

Les formes d'ondes U/I typiques dans ce mode de fonctionnement sont représentées ci-dessous :



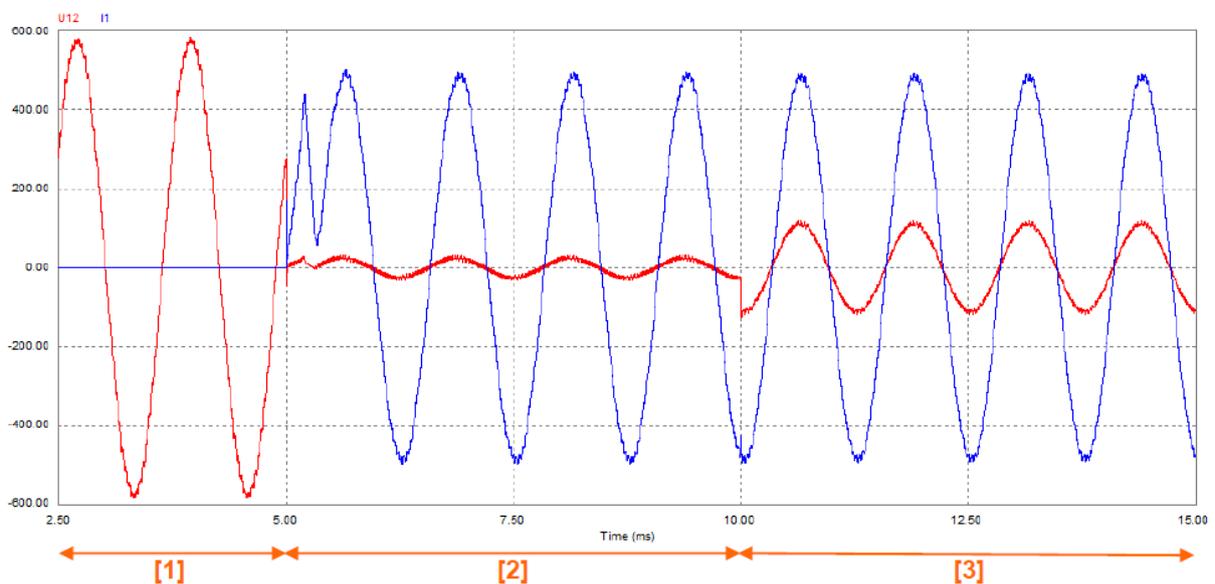
- **[1]** : fonctionnement à vide :  $V_1=230V_{\text{eff}}/800\text{Hz}$
- **[2]** : fonctionnement en court-circuit à  $t_1=5\text{ms}$  :  $I_1=350A_{\text{eff}}/800\text{Hz}$  –  $V_1=17.5V_{\text{eff}}$  –  $R_{\text{charge}}=50\text{mohms}$ .

- **[3]** : fonctionnement en présence d'arc à  $t_2=10\text{ms}$ :  $I_1=350\text{A}_{\text{eff}}/800\text{Hz}$  –  $V_1=80\text{V}_{\text{eff}}$  –  $R_{\text{charge}}=230\text{mohms}$ .

### Mode de fonctionnement en mode AC biphasé

Dans ce mode, la charge est connectée entre la phase 1 du générateur et la phase 2 du générateur. En charge, le courant de la phase 1 est contrôlé à la valeur de consigne par régulation numérique. À vide, la tension de la phase 1 et de la phase 2 sont contrôlées à la valeur de consigne par régulation numérique.

Les formes d'ondes U/I typiques dans ce mode de fonctionnement sont représentées ci-dessous :

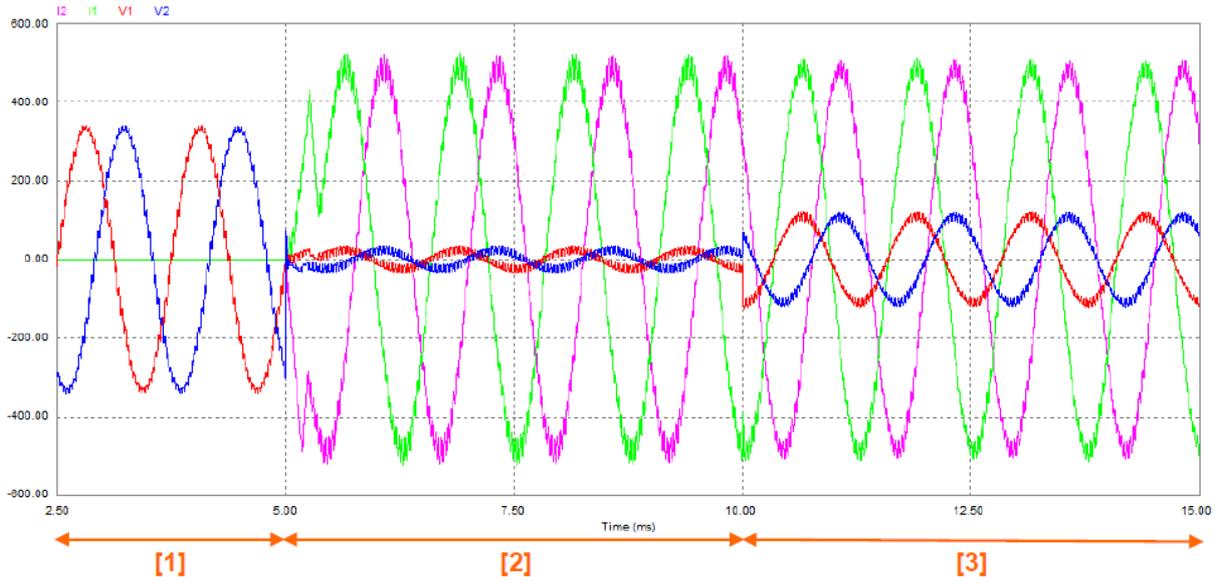


- **[1]** : fonctionnement à vide :  $U_{12}=400\text{V}_{\text{eff}}/800\text{Hz}$
- **[2]** : fonctionnement en court-circuit à  $t_1=5\text{ms}$  :  $I_1=350\text{A}_{\text{eff}}/800\text{Hz}$  –  $U_{12}=17.5\text{V}_{\text{eff}}$  –  $R_{\text{charge}}=50\text{mohms}$ .
- **[3]** : fonctionnement en présence d'arc à  $t_2=10\text{ms}$  :  $I_1=350\text{A}_{\text{eff}}/800\text{Hz}$  –  $U_{12}=80\text{V}_{\text{eff}}$  –  $R_{\text{charge}}=230\text{mohms}$ .

### Mode de fonctionnement en mode AC biphasé+Neutre

Dans ce mode, la charge est connectée entre la phase 1 et le neutre et également entre la phase 2 et le neutre. En charge, le courant de la phase 1 et de la phase 2 sont contrôlés à la valeur de consigne par régulation numérique de manière indépendante. À vide, la tension de la phase 1 et de la phase 2 sont contrôlées à la valeur de consigne par régulation numérique.

Les formes d'ondes U/I typiques dans ce mode de fonctionnement sont représentées ci-dessous :

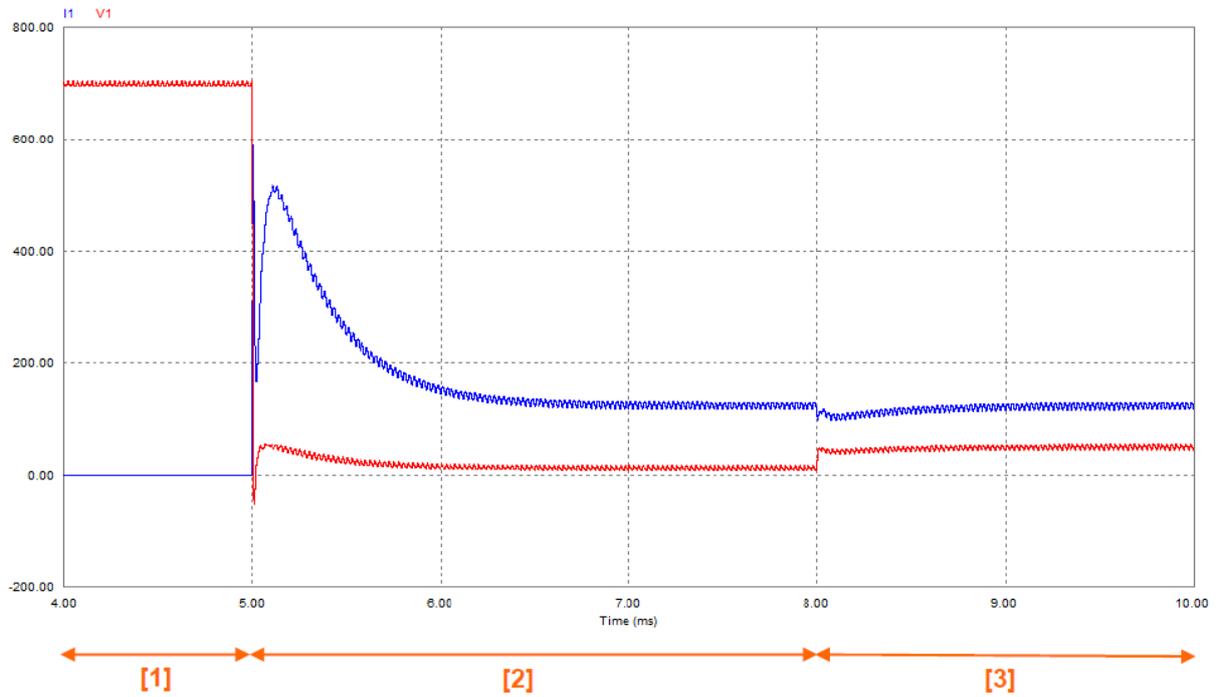


- **[1]** : fonctionnement à vide :  $V_1=V_2=230V_{\text{eff}}/800\text{Hz}$
- **[2]** : fonctionnement en court-circuit à  $t_1=5\text{ms}$ :  $I_1= I_2=350A_{\text{eff}}/800\text{Hz}$  –  $V_1=V_2=17.5V_{\text{eff}}$  –  $R_{\text{charge}}=50\text{mohms}$ .
- **[3]** : fonctionnement en présence d'arc à  $t_2=10\text{ms}$ :  $I_1= I_2=350A_{\text{eff}}/800\text{Hz}$  –  $V_1=V_2=80V_{\text{eff}}$  –  $R_{\text{charge}}=230\text{mohms}$ .

### Caractéristique de sortie en fonctionnement DC

Dans ce mode, la charge est connectée entre le pôle positif et le pôle négatif du générateur. En charge, le courant du pôle + est contrôlé à la valeur de consigne par régulation numérique. À vide, la tension de sortie est contrôlée à la valeur de consigne par régulation numérique.

Les formes d'ondes U/I typiques dans ce mode de fonctionnement sont représentées ci-dessous :



- **[1]** : fonctionnement à vide :  $V_{dc}=700V_{dc}$
- **[2]** : fonctionnement en court-circuit :  $I_{dc}=125A_{dc}$  –  $V_{dc}=12.5V_{dc}$  –  $R_{charge}=100mohms$ .
- **[3]** : fonctionnement en présence d'arc :  $I_{dc}=125A_{dc}$  –  $V_{dc}=50V_{dc}$  –  $R_{charge}=400mohms$ .



## **Study of the maintaining and propagation mechanisms of a short circuit electric arc between damaged cables in aircraft electrical networks**

Fault electric arcs occurring between two damaged wires may lead to a phenomenon called “arc tracking”, which consists in a maintaining and propagating arc along the cables, causing their progressive ablation. In an aeronautical network, such a fault may have serious consequences if it happens within a wiring harness, especially as it is likely to transfer to a nearby structure.

An experimental setup has been developed to study this phenomenon. It consists of a power supply designed in accordance with aeronautical specifications, which enables to generate a direct or alternating signal during an adjustable time. In order to reproduce flight conditions in a better way (low pressure at high altitude), tests are carried out within a closed chamber, whether at 1 bar pressure, or at 95 mbar pressure. Three types of cables are tested, one mainly made of aluminium and two mainly made of copper. In direct regime, they are connected to the + and the – poles of the generator, and to two phases in alternating regime. An aluminium plate, representing the aircraft structure and connected to the neutral in alternating regime, is placed in front of the stripped part of the cables, where the arc occurs, enabling a potential transfer of the arc from the cables toward the plate.

Every test involves a systematic acquisition of the current and voltage signals, and two radiative flux sensors are positioned around the arc. A fast camera enables a viewing of the arc behaviour during the test. Finally, the sample is weighed before and after each test.

A power balance is realised for the various tested configurations (current, pressure, cables), in order to estimate the distribution of the total power between the electrodes (fusion and vaporisation of the cables, but also conduction and radiation) and the plasma column (radiation, conduction, convection). The amount of power that is transferred to the electrodes is estimated with the value of the electrode voltage drop and the current. Part of this power makes the cables melt and vaporise (the insulating material as well as the metal), it is estimated with a thermodynamic calculation based on the ablated mass of cable, considering that the whole has been molten, and 1% vaporised. The amount of power transmitted to the arc column is partly radiated, but the wavelength spectrum emitted below 200 nm is absorbed through the very first microns in air, and estimation is made involving the calculation of the net emission coefficient.

A significant part of the study was related to the transfer of the arc toward the aluminium plate, as a function of the distance between the cables and that plate, and according to a temperature criterion at the back side, by means of infrared thermography. Thus, it was shown that at low pressure, the arc is much less localised, and tends to transfer to the aluminium plate at distances around twice bigger than at atmospheric pressure. However, the total available power is around 20% smaller, and the damage caused to the aluminium plate is less severe.

## **Étude des mécanismes d'entretien et de propagation d'un arc électrique de court-circuit entre câbles endommagés dans les réseaux électriques d'aéronefs**

Les arcs électriques de défaut se produisant entre deux câbles endommagés peuvent donner lieu à un phénomène appelé « arc tracking », qui se caractérise par le maintien et la propagation de cet arc le long des câbles, entraînant leur ablation progressive. Dans un réseau aéronautique, un tel défaut peut avoir de graves conséquences lorsqu'il apparaît au sein d'un toron de câbles, d'autant plus qu'il est susceptible de se transférer à une structure avoisinante.

Un dispositif expérimental a été développé pour l'étude de ce phénomène. Il est constitué d'une alimentation conçue selon des spécifications propres au domaine aéronautique, permettant de générer un signal continu ou alternatif pendant une durée réglable. Afin de se rapprocher des conditions de vol (pression réduite à haute altitude), les essais sont effectués au sein d'une enceinte fermée, soit à 1 bar, soit à 95 mbar. Trois types de câbles sont testés, un en aluminium et deux en cuivre. En régime continu, ils sont reliés au + et au - de l'alimentation, et à deux phases en régime alternatif. Une plaque en aluminium, représentant la structure de l'avion et connectée au neutre du générateur en régime alternatif, est placée en regard de la partie dénudée des câbles, là où se produit l'arc, permettant un éventuel transfert de l'arc depuis les câbles vers cette plaque.

Chaque test s'accompagne de l'acquisition systématique des signaux de courant et de tension, et deux capteurs de flux radiatif sont positionnés autour de l'arc. Une caméra rapide permet la visualisation du comportement de l'arc au cours de l'essai. Enfin, les échantillons de câbles sont pesés avant et après chaque test.

Un bilan de puissance est réalisé pour les différentes configurations testées (courant, pression, câbles), afin d'estimer la répartition de la puissance totale entre les électrodes (fusion et vaporisation des câbles, conduction, rayonnement) et la colonne de plasma (rayonnement, conduction, convection). La part transférée aux électrodes est estimée au moyen de la valeur de la chute de tension aux électrodes et du courant. Une partie de cette puissance aux électrodes est à l'origine de la fusion et de la vaporisation des câbles (le matériau isolant comme le métal). Celle-ci est estimée grâce à un calcul thermodynamique à partir de la masse de câble ablatée, en considérant que la totalité a été fondue et que 1% a été vaporisé. La puissance transmise à la colonne d'arc est en partie rayonnée, mais le spectre de longueurs d'onde inférieures à 200 nm est absorbé dès les premiers microns d'air, et une estimation est effectuée à partir du calcul coefficient d'émission nette.

Une partie importante de l'étude a porté sur le transfert de l'arc à la plaque en aluminium, en fonction de la distance entre les câbles et cette plaque et selon un critère de température en face arrière, mesurée par thermographie infrarouge. Il a ainsi été montré qu'à pression réduite l'arc est beaucoup plus diffus, et a tendance à s'accrocher à la plaque en aluminium à des distances environ deux fois plus grandes qu'à pression atmosphérique. Cependant, la puissance totale disponible étant inférieure d'environ 20%, les dégâts à la plaque en aluminium sont moins importants.