



HAL
open science

Détection et identification de décharges partielles dans un câble aéronautique

Marine Karadjian, Nicolas Imbert, Catherine Munier, Michael J Kirkpatrick, Emmanuel Odic

► **To cite this version:**

Marine Karadjian, Nicolas Imbert, Catherine Munier, Michael J Kirkpatrick, Emmanuel Odic. Détection et identification de décharges partielles dans un câble aéronautique. 3ème Symposium de Génie Electrique (SGE 2018), Université de Lorraine [UL], Jul 2018, Nancy, France. hal-02981838

HAL Id: hal-02981838

<https://hal.science/hal-02981838>

Submitted on 28 Oct 2020

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.

Détection et identification de décharges partielles dans un câble aéronautique

M. KARADJIAN^{1,3}, N. IMBERT², C. MUNIER³, M. J. KIRKPATRICK¹, E. ODIC¹

¹GeePs | Group of electrical engineering - Paris, UMR CNRS 8507, CentraleSupélec, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, Sorbonne Université, Gif-sur-Yvette

²Airbus Helicopters, Aéroport Inter. Marseille Provence, Marignane

³Airbus Defense and Space, Bd Jean Moulin, ZAC La clef St Pierre, Elancourt

RESUME L'augmentation des niveaux de tension dans les réseaux aéronautiques embarqués peut engendrer le phénomène de décharges électriques. Il est montré que sur un câble aéronautique neuf, les décharges partielles peuvent être amorcées et entretenues à l'interface entre la surface externe de l'isolant avec un conducteur de masse (décharges externes), et entre l'âme et la face interne de l'isolant du câble (décharges internes). La localisation des décharges internes est confirmée par la dépendance des tensions d'amorçage avec la pression imposée et par les relevés électriques.

Mots-clés—*Décharges partielles, câble, aéronautique*

1. INTRODUCTION

Dans l'objectif de réduire la masse des avions et donc leur consommation, tout en garantissant la sécurité par une maintenance performante, un remplacement progressif des actionneurs traditionnels pneumatiques et hydrauliques par des actionneurs électriques tend à se généraliser [1]. Une augmentation de la puissance électrique du réseau de bord est donc nécessaire. Elle se traduit par une augmentation de la tension qui peut atteindre des niveaux susceptibles de provoquer, compte-tenu des contraintes environnementales, l'apparition de décharges partielles au niveau de différents éléments du réseau, dont les câbles. Ces phénomènes électriques peuvent entraîner un vieillissement prématuré des systèmes d'isolation, et à terme conduire à des défaillances.

Les décharges partielles dans le domaine aéronautique ont déjà fait l'objet de travaux, au niveau du système [2], [3], au niveau du vieillissement des matériaux [4] ou encore plus spécifiquement des connecteurs de puissance [5]. Les conditions d'apparition des décharges partielles ont été étudiées en fonction de la géométrie des électrodes [6] ou encore de la teneur en humidité de l'air [7].

Le travail présenté porte sur la détection et l'identification de décharges partielles sur un type de câble aujourd'hui exploité en aéronautique. Ce câble a été soumis à des conditions de pression correspondant aux contraintes subies par les systèmes dans les zones non pressurisées de l'appareil. Dans ces conditions, un champ électrique alternatif d'intensité croissante a été appliqué au système d'isolation. Les décharges ont été détectées par des mesures électriques externes. Les résultats obtenus seront présentés en termes de tension d'apparition de décharges partielles et leur localisation sera discutée.

2. CÂBLE ET ENVIRONNEMENT AERONAUTIQUE

2.1. Câble

Le câble aéronautique examiné correspond à un type de câble actuellement exploité sous une tension nominale de 115 V AC ou 28 V DC. Il est constitué de deux couches de polymère (polytétrafluoroéthylène-PTFE et polyimide-PI) rubanées et frittées sur une âme multibrins en cuivre plaqué nickel. Un cliché MEB d'une coupe du câble est présenté en Figure 1. La couche interne en contact des conducteurs torsadés est une couche de PI (30 µm). La couche externe, plus épaisse (195 µm), est en PTFE. Un polymère fluoré est utilisé pour assurer le collage entre les couches de PI et de PTFE. L'épaisseur totale du système d'isolation ainsi constitué est de 225 µm. Le diamètre externe du câble est de 1,9 mm.

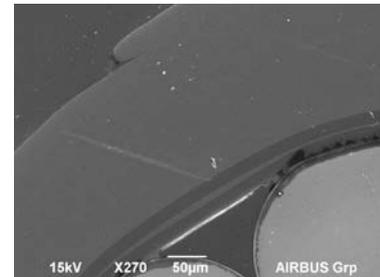


Figure 1 : Image MEB du câble aéronautique.

2.2. Contraintes environnementales

Les systèmes électriques embarqués dans les avions sont soumis à des variations de conditions environnementales liées notamment aux changements d'altitude et conditions extérieures. Pour la présente étude, seule la pression a été prise en compte ; les expériences ont été réalisées à température et humidité relative ambiantes. La gamme de pression explorée est comprise entre 100 mbar (correspondant à une altitude de 52 000 pieds) et la pression atmosphérique.

3. DECHARGES PARTIELLES

Les décharges partielles sont des décharges électriques auto-entretenues ne transitant pas vers l'arc électrique en raison de la divergence du champ électrique (décharge couronne) ou de la présence d'un isolant dans l'espace inter-électrodes. Sur un dispositif muni d'un isolant solide, ces décharges sont amorcées et entretenues soit à la périphérie de l'isolant à proximité d'un conducteur de masse, soit dans des volumes

gazeux présents au sein du système d'isolation et correspondant à des imperfections (cavité, décollement, ...). Le phénomène de décharge électrique résulte d'un mécanisme d'avalanche électronique dans un gaz initié par l'application d'un champ électrique intense. Compte-tenu de la nature du gaz, de sa pression P , des dimensions de l'intervalle gazeux et des mécanismes d'émission secondaire, la tension-seuil de claquage du gaz (ou d'apparition de décharges partielles) peut être *a priori* calculée en situation de champ électrique homogène. C'est la loi de Paschen, dont une expression analytique est proposée comme suit :

Équation (1)

$$V = \frac{\varepsilon_i \times \sigma}{e \times k_B \times T} \times P \times d \times \frac{1}{\ln(P \times d) + \ln\left(\frac{\sigma}{k_B \times T}\right) - \ln\left[\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right]}$$

avec ε_i le potentiel d'ionisation du gaz considéré, σ sa section efficace de collision ionisante, T sa température, γ le coefficient d'émission secondaire (dépendant de l'état de surface et de la nature du conducteur – seule l'émission par impact ionique sur la cathode est ici considérée), k_B la constante de Boltzmann, et d la distance sur laquelle le champ électrique est imposé dans le volume de gaz considéré.

4. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Un échantillon de câble aéronautique neuf (36 cm de longueur) a été inséré dans un tube métallique (5 cm de longueur - 2,4 mm de diamètre interne) dont les arrêtes ont été arrondies (Figure 2A). Une tension sinusoïdale de 50 Hz était imposée à l'âme du câble, alors que le tube métallique était connecté à la terre. Le champ électrique était donc appliqué au système d'isolation sur la fraction de câble insérée dans le tube (soit sur une longueur de 5 cm). L'ensemble a été introduit dans une enceinte étanche dans laquelle, à partir d'air ambiant, la pression pouvait être ajustée entre 10 mbar et la pression atmosphérique. Pour certaines mesures, la section de câble insérée dans le tube et le tube ont été immergés dans de l'huile isolante (huile synthétique Panolin Transfosynth 2 - tension disruptive (IEC 2.5 mm) : 60 kV). L'huile a été préalablement dégazée par mise sous basse pression (10 mbar) pendant une durée supérieure à 1 heure. L'immersion dans l'huile avait pour but d'éliminer les décharges externes, susceptibles de se produire entre la face externe du système d'isolation et la face interne du tube (électrode de masse) et ainsi de mettre en évidence des décharges internes dans le câble. A noter que les extrémités du câble émergeaient de l'huile et étaient donc soumises aux variations de pression (Figure 2C).

La tension appliquée a été relevée à l'aide d'une sonde Tektronix P6015A et le courant de décharge, mesuré au niveau du connecteur de masse du tube à l'aide d'un transformateur de courant rapide Tektronix CT1. En effet, dans cette gamme de pression, des impulsions de courant de faible durée (de l'ordre de 100 ns) sont associées au développement des décharges. La détection de la première impulsion de courant a été utilisée pour relever la tension d'apparition des décharges (*partial discharge inception voltage* PDIV) correspondant à la valeur instantanée du signal sinusoïdal appliqué. En régime de décharge établi (*repetitive partial discharge inception voltage* RPDIV), c'est la valeur crête de la tension appliquée qui a été retenue. Un dispositif analyseur de décharges partielles Omicron MPD 600 a également été utilisé, mettant en œuvre un coupleur capacitif d'une valeur de 1,1 nF dans un montage parallèle par rapport à l'objet sous test. Des diagrammes

« $\varphi/Q/N$ » (phase par rapport à la tension / charge apparente / occurrence des événements de décharge) ont ainsi été obtenus, permettant d'identifier le type de décharge [8].

Dans l'objectif d'identifier les types de décharges, et en particulier les décharges internes susceptibles de se produire au niveau des fils de l'âme du câble, un dispositif expérimental annexe a également été utilisé. Il s'agissait d'un modèle plan du câble constitué par un fil d'acier inox de 100 μm de diamètre disposé en regard d'une plaque isolante (résine époxy armée de fibre de verre de 1,55 mm d'épaisseur) dont une partie de la face opposée avait été métallisée pour connexion à la terre (Figure 2B). Des mesures mettant en œuvre l'analyseur de décharges partielles ont ainsi été effectuées sur toute la gamme de pression explorée en appliquant la tension alternative au niveau du fil.

Une représentation schématique des dispositifs expérimentaux est donnée en Figure 2.

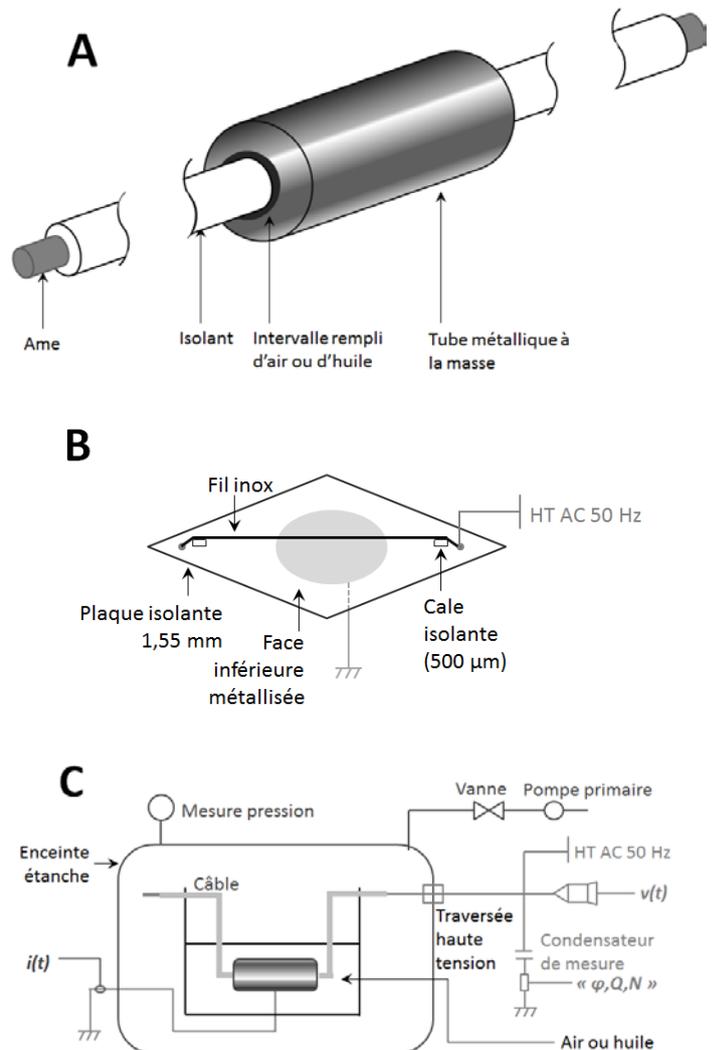


Figure 2 : A – section de câble insérée dans le tube de masse, B – modèle fil/plan, C – dispositif expérimental global.

5. RESULTATS

La Figure 3 présente les valeurs de PDIV et de RPDIV mesurées sur le même type de câble en fonction de la pression, dans les deux situations : système dans l'air, et système immergé dans l'huile isolante.

Dans le cas du dispositif immergé dans l'huile isolante, on observe que les valeurs de tension sont plus élevées, et également dépendantes de la pression, ce qui signifie que les décharges internes sont établies dans un volume gazeux ouvert sur l'extérieur. Il ne peut donc pas s'agir de vacuoles étanches dans le volume de l'isolant.

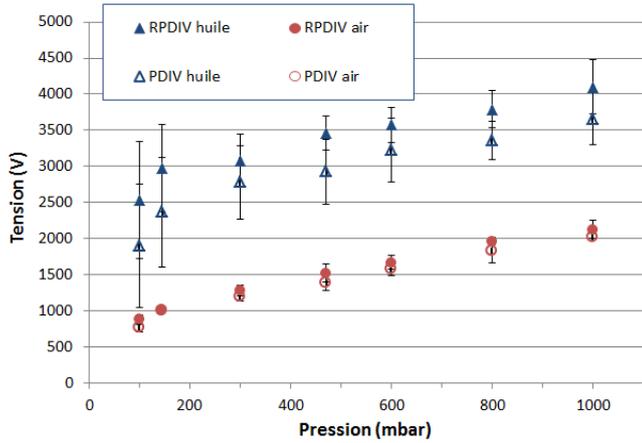


Figure 3 : PDIV (tension instantannée) et RPDIV (tension crête) en fonction de la pression avec ou sans immersion dans l'huile

L'hypothèse la plus probable est qu'il s'agit de décharges internes localisées dans l'intervalle d'air entre des brins de l'âme et l'isolant du câble. En effet, l'isolant étant rubané autour des torons torsadés de l'âme, il existe plusieurs interstices entre les fils conducteurs de l'âme et la face interne de l'isolant dans lesquels pourront avoir lieu des décharges partielles (cf. Figure 1).

Pour confirmer cette hypothèse, des diagrammes « $\phi/Q/N$ » ont été relevés dans les deux situations sous une pression de 300 mbar et à une tension proche de la RPDIV.

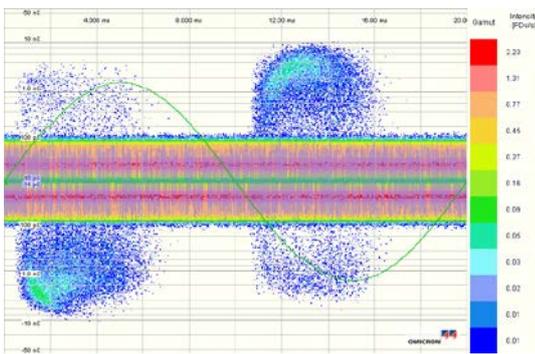


Figure 4 : Diagramme $\phi/Q/N$ de décharges dans l'air (300 mbar-1,3 kV crête)

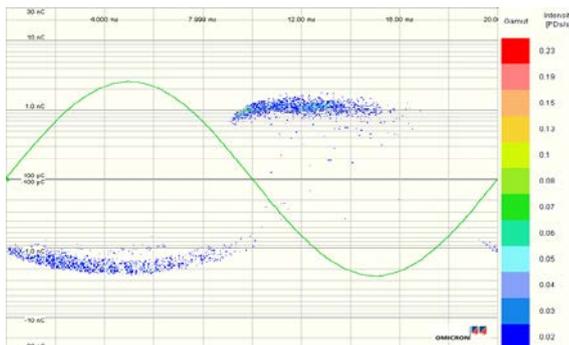


Figure 5 : Diagramme $\phi/Q/N$ de décharge dans l'huile (300 mbar-2,4 kV crête)

Dans l'air (Figure 4), la figure présente une activité intense de décharge partielle avec une forte distribution en charge, symétrique sur les deux alternances. Il n'est pas possible de distinguer les décharges internes des décharges externes. Dans l'huile (Figure 5), les décharges externes sont éliminées, et seules les décharges internes sont visualisées. On constate également une symétrie sur les deux alternances, mais avec une bien plus faible dispersion en charge.

Afin de valider le fait que cette dernière figure « $\phi/Q/N$ » est bien caractéristique d'une décharge produite entre un conducteur du toron et l'isolant, le même type de mesure a été mis en place avec le dispositif fil-plan isolé figurant un modèle plan du câble (avec un intervalle gazeux de 500 μm ménagé entre le fil et l'isolant). Le diagramme présenté en Figure 6 a été obtenu pour la même pression (300 mbar). Même si le facteur d'échelle n'est pas conservé (diamètre du fil, épaisseur et matériau d'isolant, dimensions de l'intervalle gazeux), on constate une similitude qualitative quant à la distribution et à la symétrie des charges sur chaque alternance avec ce qui avait été obtenu avec le câble immergé dans l'huile. Il s'agit donc ici d'un premier élément de confirmation de la localisation des décharges internes. Reste à vérifier que les valeurs de tension imposée aux bornes des intervalles gazeux sont compatibles avec un amorçage de décharges. C'est l'objet de la discussion développée en section 6.

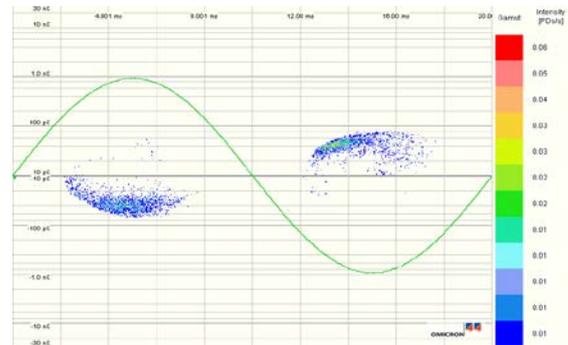


Figure 6 : Diagramme $\phi/Q/N$ de décharge en géométrie plane fil-plan (300 mbar-1,2 kV crête)

6. DISCUSSION

Afin de valider la localisation des décharges internes et externes dans le dispositif constitué par le câble alimenté inséré dans un tube de masse, un modèle numérique électrostatique du système a été réalisé. Ce modèle tient compte de la géométrie et des matériaux mis en œuvre. A noter que la distribution des brins conducteurs de l'âme est ici théorique et que celle-ci peut varier d'un câble à un autre. Le tableau ci-dessous donne les principales caractéristiques du système d'isolation.

Tableau 1 : Principales caractéristiques des éléments du système.

Matériau	Dimensions (μm)	ϵ_r
PTFE	195 (épaisseur)	2,1
PI	30 (épaisseur)	3,4
Huile synthétique	250 (épaisseur)	2,1
Fils conducteurs du toron (19)	290 (diamètre)	-

Une première représentation du système modélisé est donnée en Figure 7, où la cartographie de potentiels est

indiquée ainsi qu'un certain nombre de lignes de champ électrique. Les lignes de champ surlignées en blanc et indicées (i) et (ii) sont celles pour lesquelles la condition de champ homogène a été considérée comme valide. La tension imposée à l'intervalle gazeux séparant le conducteur et la face interne de l'isolant a été calculée selon la ligne de champ (i). Il s'agira donc du critère d'apparition de décharges partielles internes. En absence d'huile synthétique, la tension imposée à l'intervalle gazeux séparant la face externe du système d'isolation et la face interne du tube de masse a été calculée selon la ligne de champ (ii). Il s'agira alors du critère d'apparition de décharges partielles externes. Pour l'ensemble « tube/câble » immergé dans l'huile avec une pression environnante de 300 mbar, la tension de 2170 V à l'âme du câble correspond à la valeur de PDIV mesurée. Dans la situation de mesures réalisées sans huile isolante, pour la même pression de 300 mbar, la PDIV est de 1190 V.

Dans le cas de la Figure 7, le câble est centré dans le tube métallique. Lorsque le système est dans l'air, et dans les conditions de PDIV (1190 V imposés à l'âme du câble), le potentiel obtenu aux bornes de l'intervalle gazeux interne de 80 µm (i) est de 255 V. Dans l'intervalle gazeux externe, qui mesure 250 µm, le potentiel obtenu est de 700 V. Lorsque le système est immergé dans l'huile, et dans les conditions de PDIV (2170 V imposés à l'âme du câble), le potentiel obtenu pour (i) est de 650 V ; le volume dans lequel la ligne de champ (ii) est présente est rempli d'huile (*a priori* absence de gaz, et impossibilité de produire une décharge). En se référant à la courbe de Paschen, les potentiels obtenus dans l'air par cette modélisation par imposition d'une tension de 1190 V sont inférieurs à la tension d'amorçage. Aucune décharge ne devrait avoir lieu. Or, dans les expériences, des décharges sont détectées dans ces mêmes conditions de pression et de tension. Ainsi, un deuxième modèle a été réalisé, dans lequel le câble est décentré dans le tube.

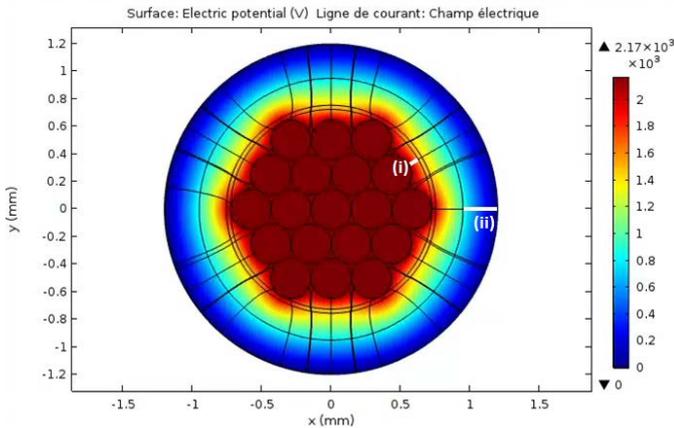


Figure 7 : Cartographie de potentiels du système « câble inséré dans le tube de masse ». Câble centré dans le tube. Valeurs de tension pour l'immersion dans l'huile isolante (2,17 kV).

Ce deuxième modèle (Figure 8) montre le cas d'un câble en contact avec le tube, situation qui représente mieux la réalité expérimentale. Deux situations A et B sont considérées suivant l'orientation du point de contact du câble isolé par rapport à la géométrie du toron conducteur. De la même façon que précédemment, le potentiel imposé correspond à la valeur de PDIV mesurée pour l'ensemble tube/câble dans l'air ou immergé dans l'huile avec une pression environnante de 300 mbar. Les lignes de champ surlignées en blanc et indicées (iii), (iv), (v), (vi), (vii) et (viii) sont celles pour lesquelles la condition de champ homogène a été considérée comme valide.

Les valeurs obtenues dans chaque cas sont présentées dans le Tableau 2 pour les calculs relatifs aux expériences réalisées dans l'air et dans le Tableau 3 pour les calculs relatifs aux expériences réalisées avec le système câble/tube immergé dans l'huile.

Les potentiels calculés le long des lignes de champ électrique dans :

- les intervalles gazeux internes sont repérés par les lettres de (a) à (c) dans l'air et les chiffres de (1) à (3) dans l'huile ;
- les intervalles gazeux externes sont repérés par les lettres de (d) à (h) dans l'air.

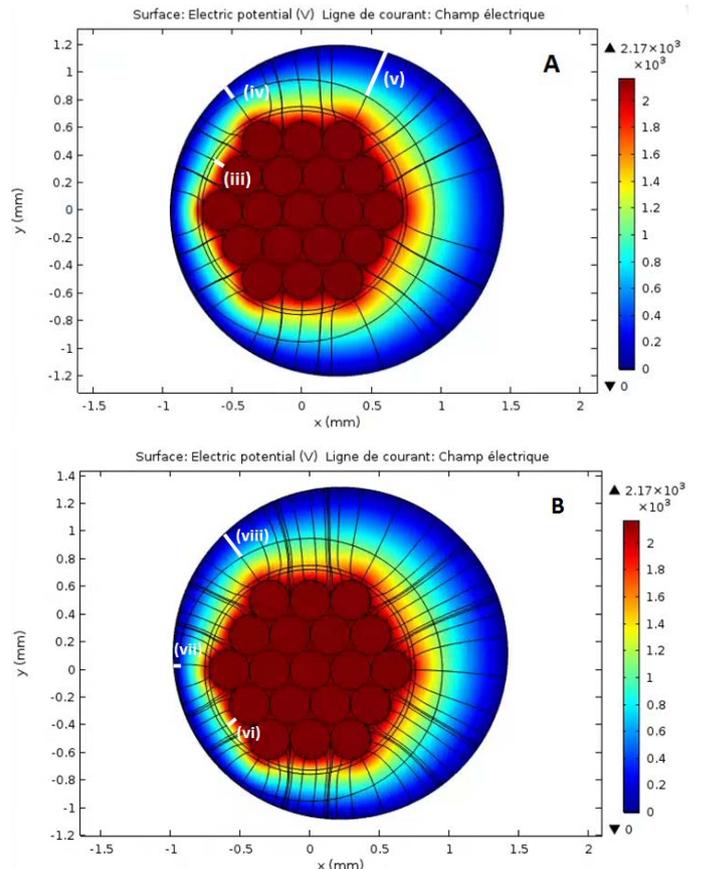


Figure 8 : Cartographie de potentiels du système « câble inséré dans le tube de masse ». A : décentré en contact 1 – B : décentré en contact 2. Valeurs de tension pour l'immersion dans l'huile isolante (2,17 kV).

Tableau 2 : Câble dans l'air sous une pression de 300 mbar. Tensions imposées aux intervalles gazeux internes et externes le long des lignes de champ identifiées (Figure 7 et Figure 8) pour une tension appliquée de 1190 V.

	Centré	Décentré, en contact 1	Décentré, en contact 2
Interne (80 µm)	255 V (i) (a)	505 V (iii) (b)	550 V (vi) (c)
Externe (250 µm)	700 V (ii) (d)	515 V (iv) (108 µm) (e) 785 V (v) (264 µm) (f)	250 V (vii) (27 µm) (g) 660 V (viii) (222 µm) (h)

Tableau 3 : Câble immergé dans l'huile en présence d'une pression de 300 mbar imposée à ses extrémités. Tensions imposées aux intervalles gazeux internes le long des lignes de champ identifiées (Figure 7 et Figure 8) pour une tension appliquée de 2170 V.

	Centré	Décentré, en contact 1	Décentré, en contact 2
Interne (80 μm)	655 V (i) (1)	970 V (iii) (2)	1020 V (vi) (3)

En conservant l'hypothèse d'un champ électrique homogène (compte-tenu des lignes de champ choisies), ces valeurs de tension peuvent alors être confrontées à la courbe de Paschen. La Figure suivante présente cette courbe tracée suivant l'Équation 1 et comparée à une moyenne des valeurs expérimentales de la littérature [9]. On constate que, pour le câble centré (cf. Figure 7) sous une tension de 1190 V, les tensions imposées dans les intervalles gazeux interne et externe (respectivement repérés par les lettres (a) et (d)) se situent clairement sous la courbe de Paschen. En revanche, si le câble est décentré, et suivant l'orientation du toron par rapport au point de contact avec le tube, les tensions aux bornes de l'intervalle gazeux interne seront bien au-dessus de la courbe (points (b) et (c)); dans l'intervalle gazeux externe, seul le point (e) sera sur la courbe. Ainsi, des décharges peuvent être détectées, aussi bien internes qu'externes, dans certaines configurations géométriques. Le positionnement du câble dans le tube de masse ne pouvant être contrôlé, il est alors logique d'observer une dispersion des valeurs de tension imposée aux bornes du gaz. Ainsi, en se concentrant sur les décharges internes, c'est-à-dire amorcées dans un intervalle gazeux de dimension fixée ici à 80 μm , une dispersion d'une amplitude de presque 300 V est constatée dans l'air sous 1190 V; en immersion dans l'huile, cette dispersion a une amplitude de 360 V sous 2170 V. Ce facteur géométrique explique donc, au moins en partie, les amplitudes des barres d'erreurs de la Figure 3.

Enfin, la distribution des brins conducteurs de l'âme doit également être prise en compte. Une seconde distribution est proposée dans les cas du câble centré et excentré, comme illustré par la Figure 10. On notera que cette distribution est plus proche de celle du cliché présenté en Figure 1. En se concentrant sur les décharges partielles internes : les lignes de champ surlignées en blanc (indiquées (ix) et (x)) définissent la distance d (ici $d = 135 \mu\text{m}$) et sont utilisées pour calculer le potentiel dans l'intervalle gazeux. Ce potentiel correspond à l'application d'une tension de PDIV de 1190 V pour un système dans l'air à 300 mbar et d'une tension de PDIV de 2170 V pour l'ensemble tube/câble immergé dans l'huile avec une pression environnante de 300 mbar. Les valeurs obtenues pour différents cas sont présentées dans le Tableau 4 et reportés en Figure 9 (points (i), (j), (4) et (5)).

Tableau 4 : Câble dans l'air sous une pression de 300 mbar ou immergé dans l'huile. Tensions imposées aux intervalles gazeux internes le long des lignes de champ identifiées (Figure 10).

	Centré	Décentré
Interne (135 μm) Tube dans l'air PDIV = 1190 V	135 V (ix) (i)	320 V (x) (j)
Interne (135 μm) Tube immergé dans l'huile PDIV = 2170 V	365 V (ix) (4)	610 V (x) (5)

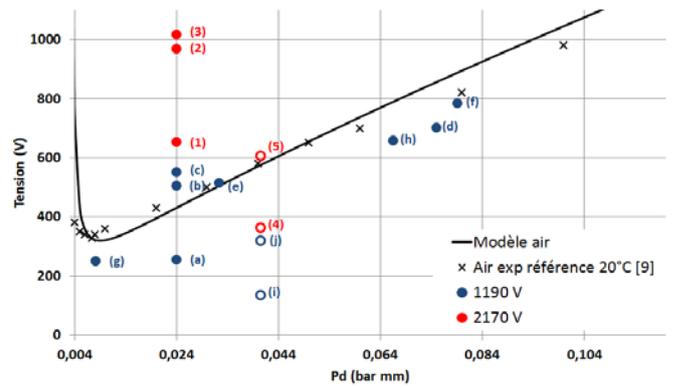


Figure 9 : Valeurs de tension imposée aux intervalles gazeux internes et externes dans l'air comparés à la courbe de Paschen. En bleu : ensemble câble/tube dans l'air. En rouge : ensemble câble/tube immergé dans l'huile isolante. Distribution de conducteurs dans l'âme correspondant à la modélisation des Figure 7 et Figure 8 en symboles pleins, et de la Figure 10 en symboles vides.

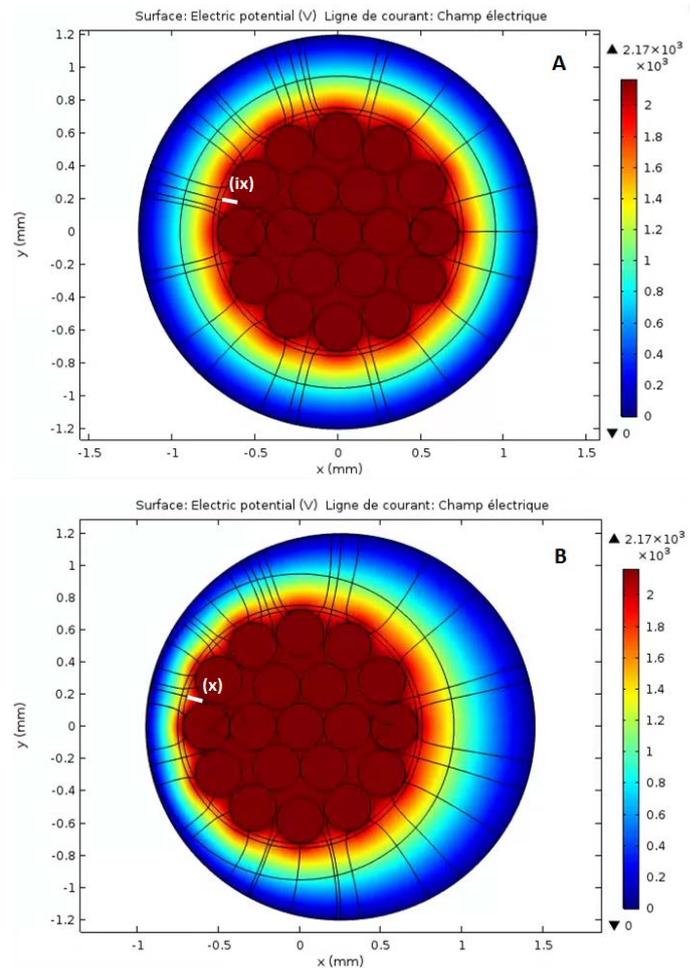


Figure 10 : Cartographie de potentiels du système « câble inséré dans le tube de masse ». A : centré - B : décentré. Valeurs de tension pour l'immersion dans l'huile isolante (2,17 kV).

Il apparaît tout d'abord que sous 1190 V, aucune décharge interne n'est possible (points (i) et (j) sous la courbe de Paschen), que le câble soit centré ou décentré dans le tube. Sous 2170 V, le potentiel dans le gaz est trop faible dans le cas du câble centré (point (4) sous la courbe de Paschen); en revanche, pour le câble décentré, le potentiel est suffisamment élevé (point (5) quasiment « sur » la courbe de Paschen) pour

amorcer des décharges internes. Ce résultat justifie le fait que les décharges internes ne sont amorcées que pour des tensions plus élevées que celles constatées pour les décharges externes comme illustré par la Figure 3.

7. CONCLUSION

Il est montré que sur un câble aéronautique neuf, des décharges partielles peuvent être amorcées et entretenues sur une gamme de pression comprise entre 100 mbar et la pression atmosphérique.

Les décharges partielles externes sont amorcées dans l'intervalle gazeux localisé entre la face externe de l'isolant du câble alimenté et l'électrode de masse ici constituée par un tube conducteur. Les décharges partielles internes se développent dans un interstice compris entre les conducteurs filaires de l'âme et la face interne de l'isolant du câble. Leur PDIV est plus élevée que celle des décharges partielles externes. Il est aussi montré que ces interstices subissent les variations de pression de l'environnement, notamment via les zones de connectique. Dans les conditions explorées au cours de ce travail, aucun défaut de type vacuole (vide inclus dans le volume du système d'isolation) n'a pu être mis en évidence.

La localisation des décharges externes et internes a été d'abord abordée grâce à l'acquisition de diagramme $\phi/Q/N$. Cette localisation a été validée par confrontation entre d'une part les valeurs de tension imposée aux bornes des intervalles gazeux calculées à l'aide d'un modèle électrostatique en prenant comme potentiel imposé à l'âme conductrice la PDIV (mesurée expérimentalement), et d'autre part les valeurs de tension disruptive fournies par la courbe de Paschen. Cette démarche a imposé de se limiter aux zones où existait un champ électrique susceptible d'être considéré comme homogène. Toutefois, elle a abouti à un modèle qui, en tenant compte des facteurs géométriques du système (contact du câble isolé avec le tube de masse, distribution des conducteurs de

l'âme et par conséquent prise en compte des dimensions et de la géométrie des interstices entre conducteurs et isolant), permet d'interpréter les résultats expérimentaux. Ces résultats sont actuellement exploités dans le cadre de l'étude du vieillissement de ces câbles et de l'évolution de leur tenue vis-à-vis des décharges partielles.

8. REFERENCES

- [1] X. Roboam (2011). New trends and challenges of electrical networks embedded in "more electrical aircraft." *2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 26–31. <http://doi.org/10.1109/ISIE.2011.5984130>
- [2] F. Koliatène "Contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique", Thèse de doctorat Université Paul Sabatier – Toulouse III. 2009
- [3] F. Alrumayan et al., "Partial Discharge Testing of Aerospace Electrical Systems", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* (April 2010), 46 (2), pg. 848-863
- [4] E. Sili "Etude et caractérisation des décharges partielles et du vieillissement du polyimide en environnement aéronautique" Thèse de doctorat Université Paul Sabatier – Toulouse III. 2012
- [5] R. Boukadoum, R.Landfried, T.Lebanc, E.Odic, Ph. Teste, O.Gavard "Comparison of the effect of different types of aging on partial discharge inception voltage in aerospace power connectors", 35th IEEE Electrical Insulation Conference 2017, 11-14 June 11-14 2017, Baltimore, MD, USA
- [6] B. Held, N. Soulem, R. Peyrous, and N. Spyrou, "Self-Sustained Conditions in Inhomogeneous Fields," *J. Phys. III*, vol. 7, no. 10, pp. 2059–2077, 1997.
- [7] L. Benmamas, R. Boukadoum, R. Landfried, T. Leblanc, E. Odic, P. Teste «Effect of humidity on Partial Discharge Inception Voltage», *Proc ICPIG 2017*, 9-14 July 2017, Estoril, Portugal , P309
- [8] F.H. Kreuger et al., « Classification of partial discharges », in *IEEE Trans. Elec. Insul.*, 1993, vol. 28, 6, p. 917-931.
- [9] T.W. Dakin et al., Breakdown of gases in uniform field. Paschen curves for nitrogen, air and sulfur hexafluoride (1974) *Elektra* Vol. 32, pp.61-82