



**HAL**  
open science

# Étude des phénomènes de décharges partielles à partir d'un point triple sous conditions variées de pression et de température

Robert Szilágyi, Philippe Molinié, Michael J Kirkpatrick, E. Odic, Giacomo Galli, Philippe Dessante

► **To cite this version:**

Robert Szilágyi, Philippe Molinié, Michael J Kirkpatrick, E. Odic, Giacomo Galli, et al.. Étude des phénomènes de décharges partielles à partir d'un point triple sous conditions variées de pression et de température. 12ème conférence de la Société Française d'Electrostatique, Société Française d'Electrostatique, Jul 2023, Cherbourg en Cotentin, France. hal-04203413

**HAL Id: hal-04203413**

**<https://hal.science/hal-04203413v1>**

Submitted on 11 Sep 2023

**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.

# Étude des phénomènes de décharges partielles à partir d'un point triple sous conditions variées de pression et de température

R. Szilágyi, Ph. Molinié, M. J. Kirkpatrick, E. Odic, G. Galli, Ph. Dessante  
Laboratoire de Génie Électrique et Électronique de Paris (GeePs)  
Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS,  
91192, Gif-sur-Yvette, France

**Abstract**—Dans de nombreuses applications industrielles, la présence d'une jonction entre un conducteur sous tension, un isolant et un gaz (point triple) mène à un renforcement du champ électrique local en raison de la différence de permittivité des isolants solide et gazeux. Cette situation peut favoriser le déclenchement des décharges partielles (DP) susceptibles de contribuer à une dégradation progressive du système d'isolation et à terme de conduire à une défaillance (claquage diélectrique, contournement de l'isolant solide). En outre, les conditions environnementales (température, pression) parfois extrêmes dans certains secteurs (aéronautique, nucléaire) doivent être prises en compte à cause de leur influence sur les tensions-seuil d'amorçage de DP (*Partial Discharge Inception Voltage*, PDIV). En présence d'une alumine en tant qu'isolant solide, le présent travail démontre une réduction significative de la PDIV lorsque le système est chauffé aux températures de l'ordre de 300 °C à 400 °C. Cet effet est attribué à l'augmentation de la permittivité relative de l'alumine à ces températures, conduisant à un renforcement du champ électrique local dans le gaz au niveau du point triple. Le mécanisme proposé pour ce renforcement du champ électrique local est discuté en considérant des mesures de permittivité relative aux températures élevées.

**Mots-clés**— décharges partielles (DP), point triple, conditions variées de température et de pression, alumine

## I. INTRODUCTION

La jonction entre un isolant solide, un conducteur et le gaz environnant constitue un point triple comme illustré par la fig. 1.

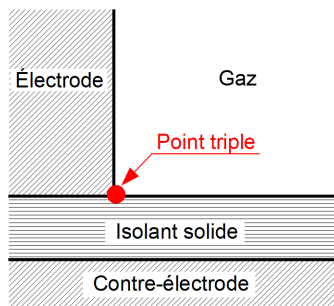


Fig. 1. Schéma d'un point triple.

Même si une attention est portée à la géométrie de la jonction pour contrôler le champ électrique local, ce dernier est renforcé en raison de la différence de permittivité des isolants solide et gazeux. Cette situation peut favoriser le déclenchement des décharges partielles (DP) initiées par des phénomènes d'ionisation de gaz. Ces DP sont susceptibles de contribuer à une dégradation progressive du système d'isolation et à terme de conduire à une défaillance (claquage diélectrique, contournement de l'isolant solide) [1], [2].

Des points triples sont souvent présents dans des applications industrielles dans lesquelles les diélectriques solides sont utilisés pour isoler des conducteurs haute tension des autres composants du système ou du potentiel de terre. En outre, les isolants solides et les gaz

environnants peuvent être exposés à des conditions environnementales (température, pression) parfois extrêmes comme par exemple dans le secteur aéronautique [3] ou nucléaire [4].

Au fil des années, diverses études ont été publiées concernant l'influence de la température et/ou de la pression sur les tensions-seuil d'amorçage de DP (*Partial Discharge Inception Voltage*, PDIV) [1], [3], [5]–[8]. En outre, d'autres études ont porté sur l'activité de DP amorcées à l'interface de différents isolants solides et gazeux [1], [9], [10]. Ces études ont démontré que le déclenchement des DP est facilité en augmentant la température et en diminuant la pression. Quant aux points triples, l'activité des DP y dépend du matériau de l'isolant solide (plus la permittivité est grande, plus le déclenchement des DP est facilité) ainsi que du gaz environnant (pression et nature du gaz).

Bien que ces études aient apporté des résultats intéressants, la plupart d'entre elles se concentrent sur l'influence de la nature des différents gaz ou matériaux utilisés en tant qu'isolant solide tandis que la température et/ou la pression restait constante. Cependant, dans les secteurs aéronautique ou nucléaire, les jonctions sont exposées à des températures pouvant atteindre 500 °C, alors que la pression peut descendre jusqu'à 100 mbar [4], [11].

L'objectif de cette étude est de parvenir à une meilleure compréhension des phénomènes survenant au niveau du point triple dans des conditions variées de température et de pression. Pour cela, des mesures de PDIV ont été réalisées sur un dispositif constitué d'un disque d'alumine inséré entre un disque d'inox connecté à la masse, et une électrode cylindrique de tungstène alimentée en haute tension. Plus précisément, les DP étaient amorcées dans la région de la jonction circulaire entre l'électrode de tungstène, le disque d'alumine, et le

gaz ( $N_2$ ) dans des conditions de pression comprises entre 50 *mbar* et 1000 *mbar* et de température comprises entre l'ambiante et 400 °C.

Le paragraphe II présente les bases théoriques de la courbe de Paschen et le paragraphe III décrit le dispositif expérimental. Dans le paragraphe IV, tous les résultats sont présentés et discutés. Enfin, le paragraphe V donne une conclusion ainsi que des perspectives des travaux futurs.

## II. BASES THÉORIQUES

Une décharge gazeuse peut être initiée sous la condition que des électrons germes (provenant du rayonnement cosmique, de la radioactivité naturelle, etc.) soient accélérés par un champ électrique externe. Si les électrons acquièrent une énergie suffisante lors de leur libre parcours et s'ils entrent en collision ionisante avec les atomes / molécules de gaz, une avalanche électronique peut se former et initier une décharge auto-entretenu dans des conditions impliquant un mécanisme d'émission secondaire permettant de renouveler les électrons-germe initiaux.

La courbe de Paschen, d'après le physicien allemand Friedrich Paschen qui l'a décrite en 1889, caractérise ces conditions. Elle représente la tension-seuil d'amorçage du claquage dans un gaz en fonction de la pression et de la distance inter-électrodes pour un champ électrique homogène. Une expression analytique de la courbe de Paschen est donnée par l'équation (1) [12] :

$$V = A \cdot p \cdot d \cdot \frac{1}{\ln(p \cdot d \cdot B) - \ln\left(\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right)} \quad (1)$$

dans laquelle  $V$  représente la tension de claquage,  $p$  la pression du gaz,  $d$  la distance inter-électrodes et  $\gamma$  le coefficient d'émission secondaire. Les constantes  $A$  et  $B$  peuvent être calculées selon les équations (2) et (3) :

$$A = \frac{\varepsilon_i \cdot \sigma}{k_B \cdot T} \quad (2)$$

$$B = \frac{\sigma}{k_B \cdot T} \quad (3)$$

dans lesquelles  $\varepsilon_i$  représente le potentiel d'ionisation de gaz,  $\sigma$  la section efficace de collision ionisante,  $T$  la température du gaz et  $k_B$  la constante de Boltzmann.

La fig. 2 montre la courbe de Paschen expérimentale [13] dans de l'azote à 25 °C ainsi que trois courbes calculées (équation (1)) dans le même gaz pour différentes températures (25 °C, 200 °C et 400 °C).

Comme pour tous les autres gaz, la courbe de Paschen de l'azote présente un minimum. A température ambiante, ce dernier correspond environ à 254 V à  $8,82 \cdot 10^{-3}$  *bar*·*mm*. La relative concordance entre les courbes expérimentales et calculées à 25 °C confirme que l'équation (1) décrit correctement le phénomène. Dans la branche gauche de la courbe, la tension de claquage augmente très fortement car le nombre de collisions successives possibles dans l'intervalle inter-électrodes n'est pas suffisant pour

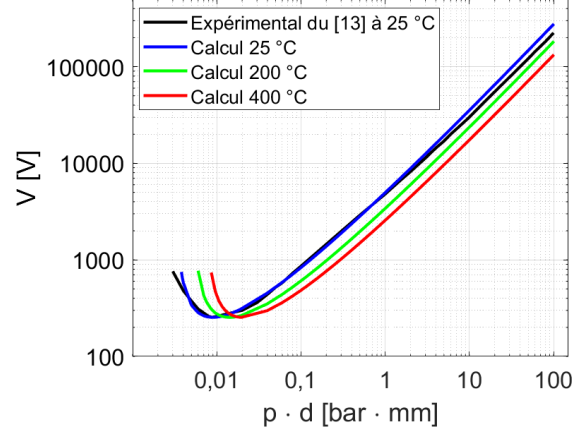


Fig. 2. Courbes de Paschen dans de l'azote : courbe expérimentale à 25 °C [13] et courbes calculées pour différentes températures (25 °C, 200 °C, 400 °C).

permettre une avalanche suffisamment fournie. Pour des valeurs relativement élevées de  $p \cdot d$  (branche droite de la courbe), la tension de claquage augmente linéairement en raison d'un champ électrique plus faible dû à une plus grande distance inter-électrodes et/ou à un libre parcours moyen réduit en raison d'une pression plus élevée entraînant des collisions plus fréquentes.

L'influence de la température du gaz sur le claquage et ainsi sur la courbe de Paschen est habituellement prise en compte en utilisant la loi des gaz parfaits, suivant un modèle proposé par Dunbar *et al.* [14]. L'idée de base est d'ajuster les données en abscisse pour refléter le fait que, si la température change à une pression donnée, la densité du gaz (et par conséquent le libre parcours moyen pour les collisions) change aussi. Ainsi, avec l'augmentation de la température, les courbes de Paschen sont décalées vers la droite ce qui mène à une diminution de la tension de claquage pour des valeurs données de  $p \cdot d$ . Dans le modèle représenté par les équations (1-3), cet ajustement est implicite.

Cet effet peut également être décrit en utilisant les équations de la loi des gaz parfaits (équation (4)), du libre parcours moyen (équation (5)), et du champ électrique (équation (6)) qui est ici supposé être homogène :

$$N = \frac{p}{k_B \cdot T} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{1}{\sigma \cdot N} \quad (5)$$

$$E = \frac{\varepsilon_i}{q_e \cdot \lambda} \propto \frac{V}{d} \quad (6)$$

dans lesquelles  $N$  est la densité du gaz,  $\lambda$  le libre parcours moyen,  $E$  le champ électrique et  $q_e$  la charge élémentaire.

Ces équations montrent qu'une augmentation de la température entraîne une diminution de la densité du gaz, ce qui implique une augmentation du libre parcours moyen. Par conséquent, pour un potentiel d'ionisation donné, l'intensité du champ électrique et donc la tension nécessaire pour provoquer une décharge diminue également.

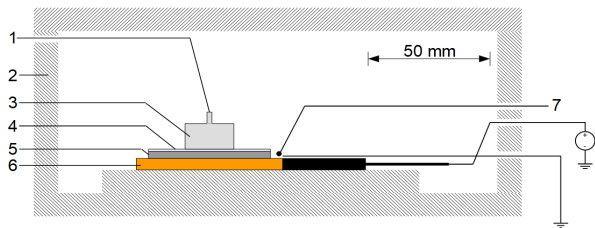
Ainsi, en traçant les tensions de claquage de la fig. 2 en fonction du produit  $N \cdot d$  et non plus en fonction du produit  $p \cdot d$ , toutes les courbes calculées se confondent, indépendamment de la température.

Enfin, il faut préciser que dans le cas d'un point triple, le champ électrique est hétérogène, et par conséquent, une déviation des courbes de Paschen sera observée.

### III. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

#### A. DISPOSTIF D'ESSAI ET CIRCUIT DE MESURE

Pour étudier le point triple à température élevée et à différentes pressions / densités du gaz, nous avons placé dans une enceinte étanche le dispositif expérimental décrit par fig. 3.



1 – connexion HT, 2 – boîte réfractaire, 3 – électrode de tungstène, 4 – disque d'alumine, 5 – disque d'inox, 6 – plaque chauffante, 7 – thermocouple

Fig. 3. Schéma de l'arrangement du point triple comprenant la plaque chauffante à l'intérieur de la boîte réfractaire.

L'alumine a été choisie en raison de sa résistance aux températures élevées et sa rigidité électrique [15], [16]. Plus précisément, les mesures ont été réalisées sur un disque d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 99,7 % de pureté, 50 mm de diamètre, 1 mm d'épaisseur) (4) inséré entre un disque d'inox (même diamètre) (5) connecté à la masse, et une électrode cylindrique de tungstène ayant un profil de Rogowski (30 mm de diamètre) (3) alimentée en haute tension AC 50 Hz (1). Ce système repose sur une plaque chauffante en céramique (nitrure de silicium) (6), alimentée séparément en DC (0-64 V, 0-6 A). Elle permet d'atteindre des températures allant jusqu'à 1000 °C mais dans ce travail, la température maximale (mesurée près du point triple) était de 400 °C. La température du disque d'inox a été

mesurée par un thermocouple (7) et cette mesure a été utilisée comme entrée pour le réglage de la plaque chauffante réalisé par LabVIEW en utilisant un régulateur PI. L'arrangement du point triple a été placé dans une boîte réfractaire (2) constituée d'une alumine poreuse à faible conductivité thermique pour homogénéiser la température autour du point triple et pour protéger la chambre étanche en PMMA dans laquelle se trouvait la boîte réfractaire.

La Fig. 4 montre le schéma du dispositif expérimental contenant la boîte réfractaire avec l'arrangement du point triple. L'amplificateur HT (Trek 20/20C-HS) commandé par un générateur de fonctions (50 Hz, sinusoïdal), était relié au montage via une résistance série de protection de 10 M $\Omega$ , et une traversée électrique passant la chambre étanche. Cette traversée, isolée par du PMMA, constituait un second point triple. Toutefois, des expériences de contrôle n'ont montré qu'aucune activité de décharge n'était détectable jusqu'à une tension de 4,8 kV (20 °C) et 4,5 kV (500 °C).

La tension appliquée a été mesurée en utilisant une sonde de tension (Tektronix P6015A), et la détection des DP (valeur seuil de détection de 3 pC) a été réalisée en utilisant un analyseur de décharges (OMICRON MPD 600). Cet analyseur était connecté en parallèle à l'arrangement du point triple par un condensateur de couplage (250 pF). Pour assurer des mesures exactes, un étalonnage de la tension et de la charge de l'analyseur de décharges a été réalisé avant chaque expérience, grâce à une impulsion calibrée de charge. Enfin, les données enregistrées par l'analyseur de décharge ont été visualisées en utilisant le logiciel fourni par Omicron.

Toutes les expériences ont été effectuées dans une chambre étanche permettant d'ajuster la pression d'azote, gaz choisi pour éviter des effets indésirables liés à l'oxydation des électrodes dans la boîte réfractaire, en préservant des propriétés électriques proches de celles de l'air. Une pompe à vide ainsi qu'une alimentation en azote ont été connectées à la chambre étanche ; la pression a été mesurée par un capteur de pression (type Pirani).

La surveillance minutieuse des températures et un réglage adapté de la plaque chauffante étaient primordiaux pour cette étude. Des mesures de la température au point triple et dans le gaz proche (2 mm) de ce dernier ont démontré que la différence de la température entre ces deux points de mesures était faible et en tout cas inférieure à l'erreur systématique engendrée par le capteur de pression. Par conséquent, la densité du gaz au point triple et sa proximité peut être considérée comme homogène et l'analyse des

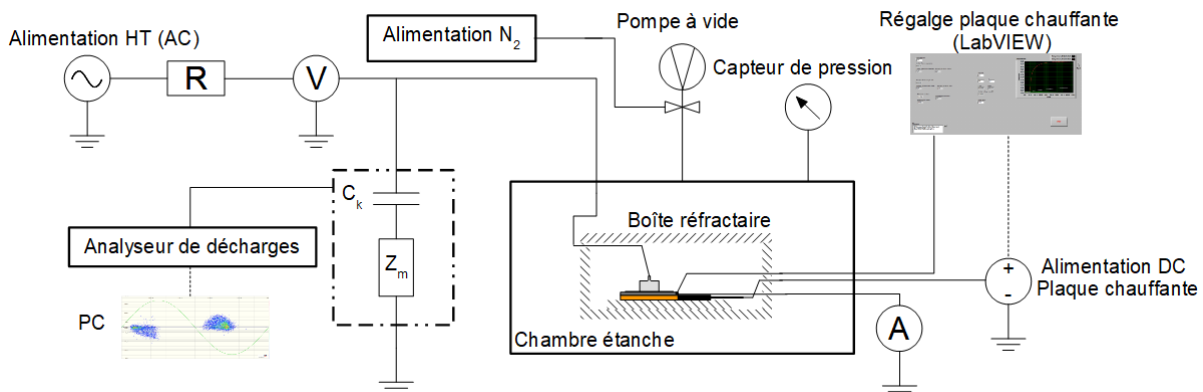


Fig. 4. Schéma du dispositif expérimental.

résultats en fonction de la pression / densité du gaz est donc justifié.

## B. PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

Pour éliminer les sources d'incertitude sur la composition du gaz à l'intérieure de l'enceinte (par ex. dégazage du matériau à température élevée), elle a été purgée trois fois en pompant jusqu'à 3 *mbar*, puis remplie de nouveau avec de l'azote (pureté de 99,8 %) jusqu'à la pression atmosphérique. Cette procédure a été appliquée chaque fois que la température a été changée.

Chaque expérience a été réalisée en partant de la température la plus basse (température ambiante) à la température la plus élevée (400 °C) et, pour chaque température, de la pression la plus élevée (pression atmosphérique) à la pression la plus basse (50 *mbar*) en pompant le gaz pour atteindre des valeurs de pression / densité plus faibles.

Pour des conditions données de température et de pression / densité, une procédure standardisée a été appliquée afin de détecter la tension-seuil d'amorçage de DP (PDIV). La Fig. 5 montre l'organigramme de cette procédure.

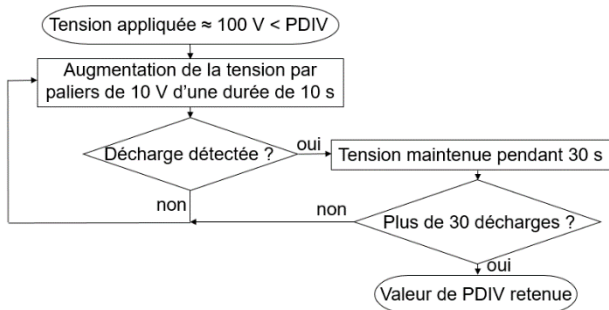


Fig. 5. Organigramme de la procédure de la détection de PDIV.

Comme illustré par la fig. 5, la tension appliquée est d'abord ajustée environ 100 V (RMS) au-dessous de la valeur de PDIV attendue (qui provenait des mesures précédentes). Ensuite, la tension appliquée est augmentée par paliers de 10 V d'une durée de 10 s. Si une décharge est détectée, la tension est maintenue pendant 30 s et la valeur de PDIV (valeur crête) est retenue dès que 30 décharges sont détectées sur cet intervalle de temps. Sinon, la tension est de nouveau augmentée par paliers de 10 V.

## C. MESURE DE LA PERMITTIVITÉ RELATIVE

En complément des mesures de PDIV, des mesures de permittivité relative ont été réalisées sur le même disque d'alumine et dans la même gamme de températures mais pour différentes fréquences comprises entre 20 Hz et 1 kHz. La capacité  $C$  du système formé par la plaque d'alumine entre ses électrodes a été mesurée par un LCR-Meter (Wayne Kerr LCR Meter 4300). On en déduit la permittivité relative, en considérant l'épaisseur  $e$  du disque d'alumine, la surface  $A$  de l'électrode de tungstène ainsi que la permittivité du vide  $\epsilon_0$ .

## IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION

### A. PDIV DU POINT TRIPLE : DÉPENDANCE DE LA TEMPÉRATURE EN FONCTION DE LA PRESSION

La fig. 6 démontre les résultats de mesure de PDIV pour différentes températures en fonction de la pression. Chaque point de mesure a été calculé à partir de la valeur moyenne de 15 mesures (cinq répétitions pour chaque pression et trois répétitions de chaque température). Les barres d'erreur sont calculées pour un écart-type de  $1\sigma$ .

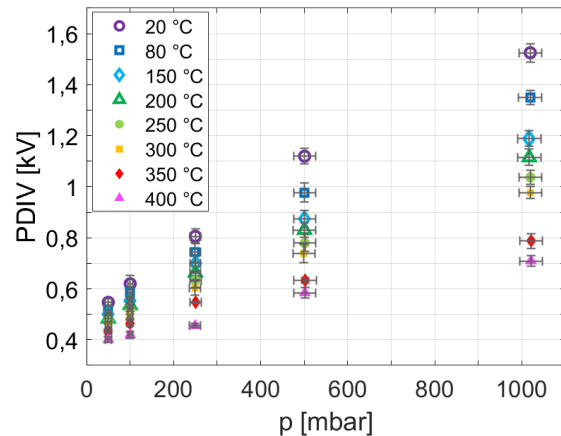


Fig. 6. PDIV en fonction de la pression pour différentes températures.

Les résultats sur la fig. 6 montrent, comme attendu, que la PDIV augmente pour toutes les températures avec la pression. En outre, les résultats montrent qu'une augmentation de la température mène à une diminution de la PDIV ce qui est en conformité à la théorie proposée par Dunbar. Par exemple, la différence de PDIV entre 20 °C et 400 °C à pression atmosphérique s'élève à 820 V.

### B. PDIV DU POINT TRIPLE : DÉPENDANCE DE LA TEMPÉRATURE EN FONCTION DE LA DENSITÉ DU GAZ

La fig. 7 montre les résultats de mesure de PDIV pour différentes températures en fonction de la densité du gaz. Pour faciliter la lecture, tous les points appartenant aux mêmes températures sont reliés par une ligne de tendance (polynôme du second degré).

En supposant que la densité du gaz proche du point triple soit homogène, on devrait s'attendre à ce que toutes les lignes de tendance se rejoignent lorsqu'elles sont tracées en fonction de la densité du gaz, conformément aux calculs discutés dans le paragraphe II. Néanmoins, en augmentant la température jusqu'à 400 °C, toutes les courbes se trouvent légèrement au-dessous des courbes précédentes et un écart plus important entre 300 °C et 350 °C peut être observé. Par conséquent, à une pression donnée, l'augmentation du libre parcours moyen dû à l'augmentation de la température n'explique plus à elle seule la diminution de la PDIV.

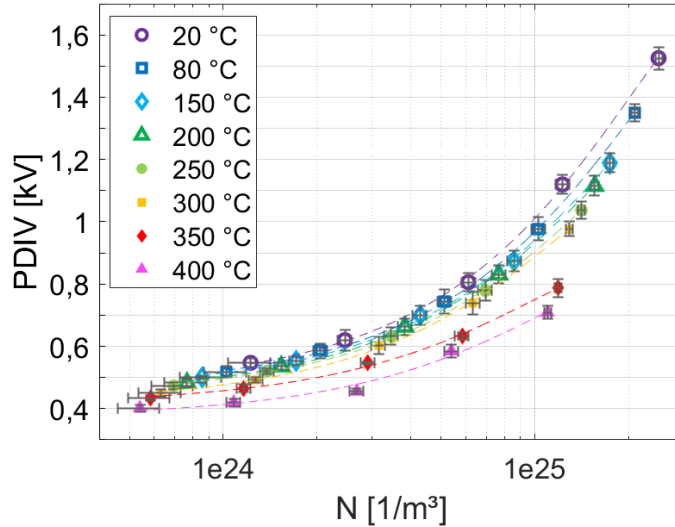


Fig. 7. PDIV en fonction de la densité du gaz pour différentes températures.

Il faut pour cela considérer l'augmentation de la permittivité relative et la diminution de la résistivité volumique de l'alumine avec la température.

### C. INFLUENCE DE LA MODIFICATION DE LA PERMITTIVITÉ RELATIVE SUR LA PDIV

L'augmentation de la permittivité relative de l'alumine avec la température est bien documentée dans la littérature [10], [15], [17]. Elle est cependant très dépendante des caractéristiques précises du matériau (pureté, caractère monocristallin ou polycristallin, taille des grains...). Nous avons donc procédé à des mesures sur nos échantillons, pour la même gamme de température que nos expériences, et pour différentes fréquences. Les résultats sont donnés en fig. 8.

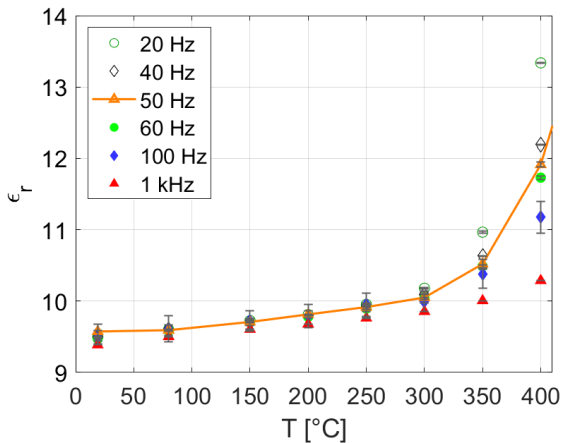


Fig. 8. Permittivité relative de l'alumine (99,7 %) pour différentes températures et fréquences. Le trait plein souligne le cas de 50 Hz.

Les conditions expérimentales de cette étude (fréquence 50 Hz) sont représentées en trait plein sur la fig. 8. La permittivité relative varie alors entre  $\epsilon_r \approx 9,6$  (20 °C) et  $\epsilon_r \approx 11,9$  (400 °C).

Cette augmentation de permittivité aux températures élevées peut être expliquée par une augmentation de la conductivité, permettant des déplacements de porteurs de charge, soit à travers l'ensemble de l'échantillon, soit sur une

distance limitée (polarisation interfaciale). La quantité de charges transportée par conduction étant d'autant plus grande que la tension est appliquée pendant un temps long, ce phénomène d'augmentation de la permittivité relative est plus net pour les basses fréquences [15].

Cette augmentation de la permittivité avec la température entraîne, pour une densité du gaz et tension donnée, un renforcement du champ électrique local proche du point triple. Il est donc logique que la PDIV diminue plus avec la température que ce qui était attendu du seul fait de la diminution de la densité du gaz.

Il faut noter également que les impuretés favorisent cette augmentation de la permittivité. Nous avons mesuré une permittivité relative  $\epsilon_r \approx 31$  sur une alumine de pureté 96 % à 400 °C. Ce résultat peut être corrélé à une baisse correspondante de PDIV pour cette alumine, pour laquelle elle est environ 305 V plus basse que pour l'échantillon avec une pureté de 99,7 %. Ainsi pour l'alumine de pureté 96 %, la différence de la PDIV entre 20 °C et 400 °C à pression atmosphérique s'élève à environ 1340 V au lieu de 820 V pour l'alumine de pureté 99,7 %.

On remarque enfin que l'augmentation de la permittivité relative est plus prononcée à partir de 300 °C, cf. fig. 8. Ceci explique le fait que, sur la fig. 7, la courbe pour 350 °C est plus détachée de celle obtenue à 300 °C. Néanmoins, la différence entre les courbes à 350 °C et 400 °C devrait donc être plus importante compte tenu du profil des courbes de permittivité relative avec la température. Cette divergence peut être expliquée, au moins partiellement, par l'influence de l'oxydation de la surface de l'électrode de tungstène. En effet, bien que la chambre étanche ait été purgée trois fois avant chaque expérience, il faut tenir compte du fait qu'un peu d'air était susceptible d'y pénétrer durant les expériences au-dessus de 300 °C. Il est donc possible qu'une couche d'oxyde de tungstène puisse influencer le processus d'émission secondaire en raison de la modification du travail de sortie du matériau de l'électrode [18] ce qui peut entraîner une augmentation de la PDIV.

De ce fait, les valeurs de PDIV, pour les températures au-delà de 300 °C, présentées dans cette étude sont potentiellement surestimées.

## V. CONCLUSION

Le présent travail porte sur les effets de température et de pression / densité du gaz sur la tension-seuil d'amorçage de DP (PDIV) au point triple dans des conditions de haute tension (50 Hz AC) en utilisant comme isolant solide un disque d'alumine de pureté 99,7 %.

Il a été observé que la PDIV diminuait avec la température. Cette diminution s'accroît fortement pour des températures dépassant 300 °C. Ainsi, à pression atmosphérique, une réduction de 820 V de la PDIV a été mesurée lorsque la température passait de 20 °C à 400 °C. En représentant les données en fonction de la densité du gaz, un effet supplémentaire a été observé : une diminution supplémentaire de la PDIV à températures élevées au-delà de ce qu'on peut attendre du simple fait d'une densité du gaz plus faible. Cet effet est attribué à l'augmentation de la permittivité relative de l'alumine aux températures élevées qui mène, pour une tension appliquée donnée, à un renforcement du champ électrique local proche du point triple. Cette idée a été validée par des mesures diélectriques sur l'alumine qui ont démontré la contribution du matériau isolant à la diminution de la PDIV pour les températures les plus élevées en raison d'une augmentation de la permittivité relative.

L'utilisation d'une alumine avec une moindre pureté (96 %), présentant une augmentation de permittivité plus forte à haute température, entraîne une diminution plus importante de la PDIV à 400 °C. Ce résultat confirme notre modèle.

Ces résultats sont d'un intérêt particulier pour les applications industrielles mettant en œuvre des systèmes présentant un point triple exposé à des conditions de température élevée sous pression variable. Dans le cas étudié (céramique), le mécanisme de défaillance peut être un contournement (flash-over) initié par des DP dont la tension d'amorçage peut décroître fortement avec la température.

La suite de notre travail portera donc sur ces mécanismes conduisant, à partir des décharges initiées au point triple, à la transition vers le claquage de surface des alumines, dans les mêmes conditions de températures élevées.

## RÉFÉRENCES

- [1] C. Tran Duy *et al.*, 'Partial discharges at a triple junction metal/solid insulator/gas and simulation of inception voltage', *Journal of Electrostatics*, vol. 66, no. 5, pp. 319–327, May 2008, doi: 10.1016/j.elstat.2008.01.011.
- [2] E. Odic, A. Goldman, M. Goldman, M. Dhainaut, and R. Dussart, 'Current distribution of AC surface discharges and associated chemistry', *Journal of Electrostatics*, vol. 64, no. 7, pp. 477–484, Jul. 2006, doi: 10.1016/j.elstat.2005.10.026.
- [3] D. L. Schweickart, D. F. Grosjean, D. G. Kasten, S. A. Sebo, and X. Liu, 'Low-Pressure Partial-Discharge Measurements: Monitoring the Insulation Integrity of Aircraft Power Wiring Systems', in *2008 IEEE International Power Modulators and High-Voltage Conference*, May 2008, pp. 568–571. doi: 10.1109/IPMC.2008.4743722.
- [4] G. Galli *et al.*, '049) Characterization and Localization of Partial-Discharge-Induced Pulses in Fission Chambers Designed for Sodium-Cooled Fast Reactors', *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 65, no. 9, pp. 2412–2420, Sep. 2018, doi: 10.1109/TNS.2018.2861566.
- [5] F. Koliatene, T. Lebey, J. P. Cambronne, and S. Dinculescu, 'Impact of the aeronautic environment on the Partial Discharges Ignition: A basic study', in *Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Vancouver, BC: IEEE, Jun. 2008, pp. 603–606. doi: 10.1109/ELINSL.2008.4570404.
- [6] E. Sili, J. P. Cambronne, N. Naude, and R. Khazaka, 'Polyimide lifetime under partial discharge aging: effects of temperature, pressure and humidity', *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, vol. 20, no. 2, pp. 435–442, Apr. 2013, doi: 10.1109/TDEI.2013.6508745.
- [7] Y. Li, Q. Zhang, Y. Zhao, T. Wang, G. Liu, and K. Wang, 'The influence of temperature on Partial Discharges and wormhole effect of oil-paper insulation under DC voltage', in *2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, Jun. 2017, pp. 100–103. doi: 10.1109/EIC.2017.8004704.
- [8] R. H. Khawaja and T. R. Blackburn, 'Partial Discharge Patterns in Oil-Impregnated Paper and Pressboard Insulation at High Temperature', *Australasian Universities Power Engineering Conference*, p. 6, 2008.
- [9] M. Michelarakis, P. Widger, A. Beroual, and A. (Manu) Haddad, 'Electrical Detection of Creeping Discharges over Insulator Surfaces in Atmospheric Gases under AC Voltage Application', *Energies*, vol. 12, no. 15, p. 2970, Aug. 2019, doi: 10.3390/en12152970.
- [10] M. A. Handala, 'Etude de la décharge de surface sous tension alternative 50 Hz - Effets sur une interface isolante air/solide', p. 136.
- [11] M. Karadjian, N. Imbert, C. Munier, M. Kirkpatrick, and E. Odic, 'Partial Discharge Detection in an Aeronautical Power Cable', in *2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium*, Cincinnati, Ohio: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Jul. 2018. doi: 10.2514/6.2018-5033.
- [12] A. Küchler, *High Voltage Engineering: Fundamentals - Technology - Applications*. in VDI-Buch. Springer Vieweg, 2018. doi: 10.1007/978-3-642-11993-4.
- [13] T. W. Dakin, 'Breakdown Of Gases In Uniform Fields Paschen Curves For Nitrogen, Air And Sulfur Hexafluoride', *Cigre* 32, p. 22, 1974.
- [14] W. G. Dunbar and J. W. Seabrook, 'High Voltage Design Guide for Airborne Equipment', BOEING AEROSPACE CO SEATTLE WA, Jun. 1976. Accessed: Sep. 08, 2022. [Online]. Available: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA029268>
- [15] L.-Y. Chen and G. W. Hunter, 'Temperature Dependent Dielectric Properties of Polycrystalline 96%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>', *MRS Proc.*, vol. 833, p. G7.6, 2004, doi: 10.1557/PROC-833-G7.6.
- [16] D. R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics, 86th edition 2005-2006*, 87th edition. CRC, 1998.
- [17] L.-Y. Chen, 'Dielectric Performance of a High Purity HTCC Alumina at High Temperatures - A Comparison Study with other Polycrystalline Alumina', *Additional Conferences (Device Packaging, HiTEC, HiTEN, & CICMT)*, vol. 2014, pp. 000271–000277, Jan. 2014, doi: 10.4071/HITEC-WP26.
- [18] M. T. Greiner, L. Chai, M. G. Helander, W.-M. Tang, and Z.-H. Lu, 'Transition Metal Oxide Work Functions: The Influence of Cation Oxidation State and Oxygen Vacancies', *Advanced Functional Materials*, vol. 22, no. 21, pp. 4557–4568, 2012, doi: 10.1002/adfm.201200615.