

Effets des rayonnements ionisants sur la tension d'amorçage des décharges électriques

G. Galli, M. J. Kirkpatrick and E. Odic

Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, Sorbonne Université, Laboratoire de Génie Electrique et Electronique de Paris, 91192, Gif-sur-Yvette, France.

RESUME - Des expériences ont été réalisées afin d'étudier l'effet des radiations ionisantes sur la tension d'amorçage des décharges électriques. Les mesures ont été effectuées sur une jeu d'électrodes de géométrie pointe-plan, la pointe jouant le rôle de la cathode, dans quatre conditions expérimentales : i) conditions ambiantes, ii) conditions protégées, iii) en présence d'une source bêta, iv) en présence d'une source gamma. Les résultats montrent une diminution de quelques centaines de volts de la tension d'amorçage lorsque des sources de radiations gamma ou bêta sont placées à proximité de la zone de décharge. Aucun changement n'a été observé dans la tension d'extinction entre les différentes conditions. De plus, une réduction notable de la dispersion des valeurs de tension d'amorçage a été constatée en présence de radiations ionisantes.

Mots-clés—Tension d'amorçage, décharges partielles, source de rayonnement, électrons germes.

1. INTRODUCTION

L'électrification des avions et la perspective de la propulsion électrique impliquent une tension du réseau de bord bien plus élevée qu'actuellement. Cette situation augmente le risque d'apparition de décharges partielles dans des systèmes variés, tels que les actionneurs électriques, les transformateurs, les câbles ou les connecteurs [1]. Sous certaines conditions, ces décharges accélèrent la dégradation des isolants solides [2] et sont susceptibles de conduire à des défaillances, voire à l'amorçage d'arcs électriques. Le risque d'apparition de décharges partielles est aggravé par les conditions environnementales, telles que la pression et la température. Ainsi, la tension d'amorçage est souvent représentée en fonction du produit de la pression du gaz et de la distance entre les électrodes (courbes de Paschen [3]). De plus, en altitude, les niveaux de radiation sont plus élevés qu'au sol [4] et il convient d'examiner l'influence de la présence de radiations ionisantes sur la tension d'amorçage des décharges électriques.

Cette tension se réfère à la tension seuil appliquée à un espace gazeux, y créant un champ électrique suffisamment intense pour induire des collisions ionisantes impliquant les électrons-germe et ainsi initier une décharge auto-entretenue. Ces électrons proviennent généralement de l'interaction des radiations ionisantes de fond (rayonnement cosmique) avec l'atmosphère [5], de la radioactivité locale ou bien d'autres sources externes comme des lampes UV utilisées pour déterminer cette tension [6].

Les travaux ici présentés ont donc porté sur l'étude de l'influence de la radiation ionisante de fond sur la tension d'amorçage des décharges électriques, par mesure des tensions

d'amorçage et d'extinction d'une décharge corona sous différentes pressions d'air et conditions de radiation ionisante.

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

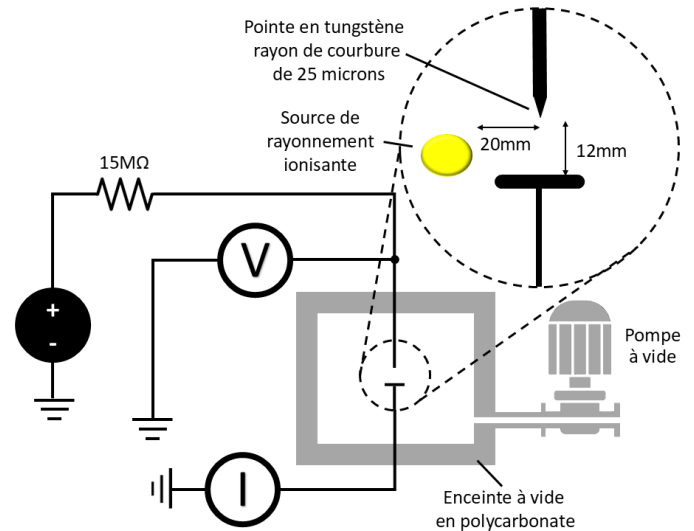


Fig. 1. Dispositif expérimental comprenant l'alimentation électrique, les électrodes et le système à vide.

Le jeu d'électrodes est constitué d'une pointe en tungstène (rayon de courbure de 25 μm) faisant face à disque en cuivre (diamètre de 5 mm), tous deux alignés sur le même axe de révolution pointe-plan, et distants l'un de l'autre de 12 mm.

Une tension continue négative a été appliquée à la pointe en tungstène tandis que l'électrode en cuivre était mise à la terre. La géométrie et la polarisation du système d'électrodes ont été choisies selon les considérations suivantes : le volume de gaz soumis à un champ électrique élevé est très faible (immédiate proximité de l'extrémité de la pointe) par rapport à l'espace inter-électrodes ; la présence d'électrons-germe dans ce faible volume constitue alors un facteur limitant possible pour l'amorçage de la décharge électrique. D'autre part, la pointe constituant une cathode, un régime de décharge couronne spécifique est observé, caractérisé par des impulsions négatives de relativement faible amplitude dites impulsions de Trichel [7]. Ces impulsions sont détectables au moyen d'une sonde de courant rapide connectée à un oscilloscope. Contrairement au comportement d'une pointe positive constituant une anode, aucune propagation de la décharge vers l'électrode plane (régime de streamer dirigé vers la cathode) ne se produit dans cette situation, ce qui évite toute dégradation de l'état de surface de l'électrode plane en cuivre au cours des mesures,

garantissant ainsi la répétabilité des expériences et simplifiant la modélisation du système.

Comme illustré par la figure 1, le jeu d'électrodes était inséré dans une chambre étanche en polycarbonate permettant de maintenir constante une pression comprise entre 1 hPa et la pression atmosphérique.

L'expérience a été conçue pour mesurer les tensions d'amorçage et/ou d'extinction des impulsions Trichel dans différentes conditions de flux de rayonnement imposées dans l'espace inter-électrodes. Les mêmes mesures ont ainsi été réalisées dans quatre situations différentes : i) dans un laboratoire standard au niveau du sol sans sources de radiation ("radiation standard" dans les légendes des figures), ii) dans le même laboratoire au niveau du sol avec une source de radiation gamma, iii) dans le même laboratoire au niveau du sol avec une source de radiation β , iv) dans une installation souterraine blindée (Laboratoire « Saphir ») sur le site de la Commission de l'Énergie Atomique (CEA) à Saclay [8], avec de plus la mise en place d'un château de plomb ("radiation faible" dans les figures). Les sources β et gamma étaient distantes de 2 cm de la pointe.

3. RESULTATS SUR LES DONNEES DE TENSION D'AMORÇAGE ET D'EXTINCTION DANS DIFFERENTES CONDITIONS DE RAYONNEMENT

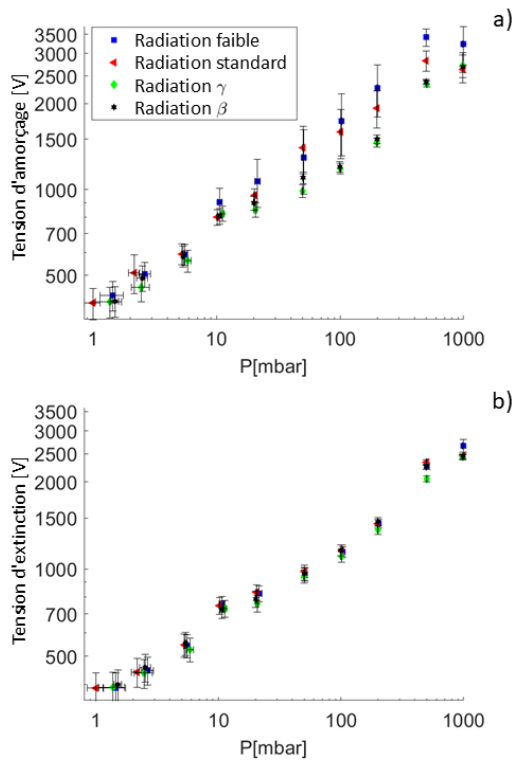


Fig. 2. Tensions d'amorçage (a) et d'extinction (b) de décharge couronne en régime de Trichelen fonction de la pression de l'air P pour les quatre conditions de flux de rayonnement dans l'air : à faible rayonnement (carrés bleus), à rayonnement standard (triangles rouges), à fort rayonnement γ (diamants verts) et à fort rayonnement β (étoiles noires).

Les figures 2a et 2b présentent les tensions d'amorçage et d'extinction pour les impulsions Trichel en fonction de la pression du gaz sous quatre conditions de flux de radiation dans l'air. Pour les tensions-seuil d'amorçage, on observe qu'un écart pouvant atteindre 800 V entre les différentes conditions de radiations devient notable à partir de 50 mbar et jusqu'à 500 mbar. En revanche, la tension d'extinction ne montre pas de différence majeure. La présence d'une source de radiations (γ , β -) fait chuter les tensions d'amorçage vers les valeurs de tension d'extinction, et réduit la dispersion des valeurs mesurées. Les

résultats suggèrent que dans la plage de pression de 50 mbar à 500 mbar (figure 3), la présence de radiations ionisantes facilite l'amorçage des décharges en apportant un flux continu d'électrons-germes. L'effet est observé sur une plage spécifique de pression. Ceci peut être interprété par des considérations reposant sur le changement de volume de gaz pour lequel une condition de champ réduit critique (200 Td) est satisfaite en fonction de la pression.

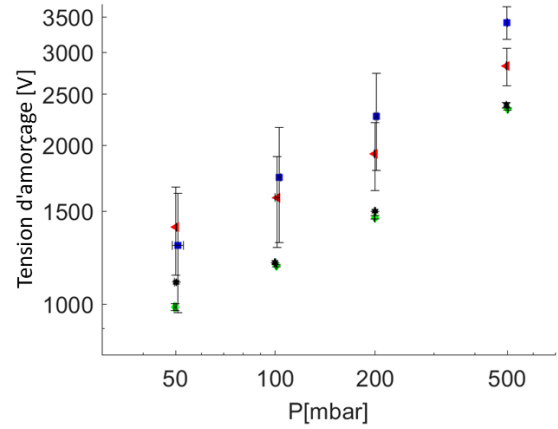


Fig. 3. Zoom de la figure 2a dans la plage 20-500 mbar

4. DISCUSSION DES RESULTATS ET THEORIE PROPOSEE

Comme le montre la section précédente, dans la plage de pression allant de 50 mbar à 500 mbar, une réduction significative de la tension d'amorçage (entre 500 V et 1 kV en fonction de la pression) a été observée lors des expériences avec des niveaux accrus de rayonnement ionisant.

Dans cette section, des explications sont proposées pour cette différence ou pour l'absence de celle-ci observée dans les cas de pression allant de 1 mbar à 20 mbar et pour la pression atmosphérique. Ces explications seront étayées par des observations photographiques de la décharge, des simulations de champ électrique et d'autres arguments plus qualitatifs concernant les différents cas et l'incertitude expérimentale associée.

La caractérisation du système par des simulations de champ électrique permet d'estimer la taille de la zone proche de l'électrode haute tension dans laquelle le champ électrique réduit est suffisant pour conduire à l'ionisation en présence d'un électron germe et ainsi à la formation d'une décharge électrique ; une estimation du flux radiatif traversant cette zone peut alors être réalisée. La comparaison ultérieure du taux de dose calculé avec les mesures de la littérature effectuées dans l'atmosphère (allant du niveau de la mer à 35 km) peut alors montrer comment le taux de dose ajouté dans le présent travail se compare à ceux mesurés dans l'atmosphère.

a. Différences entre la tension d'amorçage et la tension d'extinction dans des conditions standard

Comme discuté dans la dernière section, la tension d'extinction est, en partant de la situation d'une décharge auto-entretenue existante et en diminuant la tension appliquée, la tension maximale pour laquelle une décharge électrique ne peut pas être maintenue. Étant donné que le gaz a déjà été ionisé dans cette situation, la tension mesurée est indépendante de la probabilité de la présence d'électrons germes ; les électrons nécessaires au maintien de la décharge sont déjà garantis par émission secondaire. En comparant la tension d'extinction et la tension d'amorçage pour les cas de rayonnement standard et pour des pressions inférieures à 20 mbar (figure 4), on peut observer

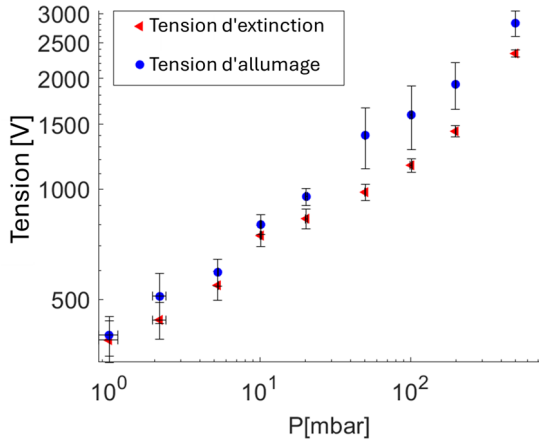


Fig. 4. Tension d'amorçage (cercles bleus) et tension d'extinction (triangles rouges) en fonction de la pression du gaz P pour un rayonnement standard dans l'air.

que les deux tensions sont équivalentes, compte tenu de l'incertitude expérimentale reflétée dans les barres d'erreur. Il est possible que toute différence entre les tensions d'amorçage et d'extinction à ou en dessous de 20 mbar ne soit tout simplement pas discernable dans les données en raison des valeurs de tension relativement faibles et de l'incertitude expérimentale élevée. En principe, l'observation d'une faible ou d'aucune différence entre la tension d'amorçage et la tension d'extinction pour un cas donné indique que des électrons germes adéquats sont presque toujours présents dans ou autour de la zone avec un champ électrique réduit suffisant. Par conséquent, l'interprétation de ces résultats indique que des électrons germes suffisants sont présents dans cette zone à des pressions égales ou inférieures à 20 mbar, même sans source supplémentaire.

b. Observation et calcul de l'étendue de la zone de décharge

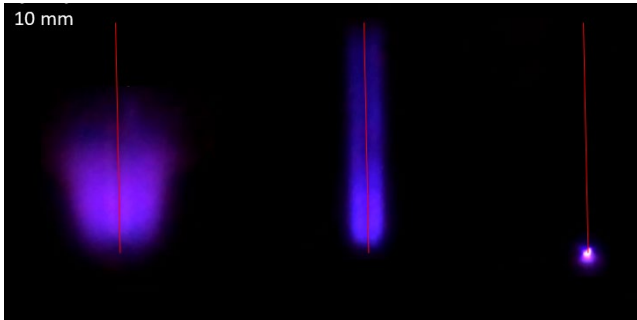


Fig. 5. Photographies de la décharge à (gauche) 2 mbar, (centre) 20 mbar et (droite) 200 mbar. La tension a été augmentée au-dessus de la PDIV pour augmenter la luminosité de la décharge ; l'électrode de pointe a été recréée en rouge dans la figure car elle n'est pas visible en raison de la faible luminosité.

Comme expliqué dans la section précédente, des expériences ont d'abord été réalisées en laboratoire au niveau de la mer sans aucun type de blindage contre les radiations ni l'ajout de sources de radiation, afin de trouver une courbe de référence. Au cours de ces expériences, trois régimes de décharge ont été observés pour la plage de pression choisie (1 mbar - 200 mbar) ; des photographies de ces trois régimes sont présentées dans la Figure 5. La région de décharge diminue bien sûr avec l'augmentation de la pression du gaz, avec une transition abrupte à haute pression (~ 100 mbar) vers un régime de décharge localisée comme on peut le voir à droite de la Figure 5. Les photographies ont été obtenues en augmentant la pression dans la plage comprise entre 1 mbar et 1 bar et en adaptant, pour chaque pression, la tension afin que la décharge soit visible à la caméra. La Figure 5 illustre donc un comportement qualitatif et

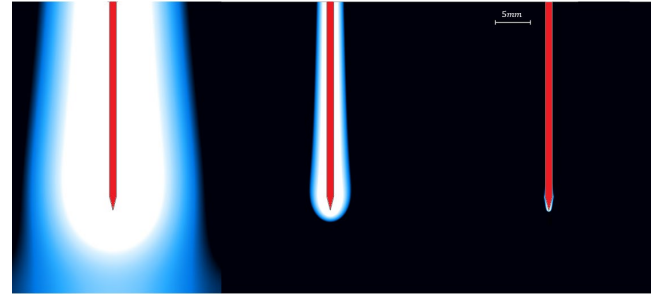


Fig. 6. Simulation du champ électrique réduit (T_d) pour différentes conditions de 2 à 200 mbar (de gauche à droite). Les trois simulations ont été réalisées en utilisant les valeurs expérimentales de tension d'amorçage et de pression (figure 2a) : (gauche) 510 V et 2 mbar ; (centre) 953 V et 20 mbar ; (droite) 1927 V et 200 mbar.

non quantitatif de la décharge car le niveau de tension est toujours supérieur à celui de la tension d'amorçage présentée dans la Figure 2a, de sorte que la décharge soit non seulement détectable mais aussi visible. Afin d'obtenir une estimation plus quantitative du volume d'ionisation de la décharge électrique, une simulation du champ électrique a été réalisée à l'aide de COMSOL.

L'objectif de la simulation était de calculer le volume de gaz dans lequel l'ionisation par impact électronique devrait dépasser l'attachement à partir des données de pression et de tension d'amorçage de la Figure 2a. L'ionisation dépassant l'attachement se produira dans les conditions où le champ électrique est suffisamment fort pour que le coefficient d'ionisation (α) soit supérieur au coefficient d'attachement (η). Le coefficient d'ionisation et le coefficient d'attachement définissent respectivement, en fonction du champ électrique, pour un gaz donné, combien d'électrons sont créés par ionisation par mètre et combien d'électrons libres sont perdus par mètre.

Pour avoir une décharge électrique, il est nécessaire que α soit supérieur à η ; les données de Yunzhu An et al. [9] montrent que, pour l'air sec, α est supérieur à η pour des valeurs de champ électrique réduit supérieures à 200 Td ($1 \text{ Td} = 10^{-21} \text{ Vm}^2$).

La Figure 6 montre une carte du champ électrique réduit dans l'espace autour de l'aiguille (polarisée négativement, d'un diamètre de 1 mm avec une pointe conique de 2 mm de long et un rayon de courbure de $25 \mu\text{m}$) et entre l'aiguille et le plan de masse. La simulation est axisymétrique en 2D avec un axe de symétrie placé verticalement au centre de l'aiguille. Les valeurs supérieures à 300 Td (zone de forte ionisation) sont représentées en blanc, celles inférieures à 150 Td (zone sans ionisation) en

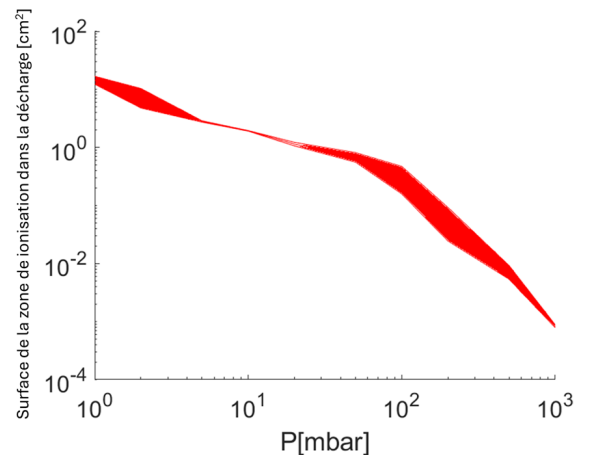


Fig. 7. Surface autour de l'aiguille haute tension perpendiculaire à la source ponctuelle de rayonnement avec un champ électrique réduit supérieur à 200 Td en fonction de la pression du gaz, calculée à partir de la simulation COMSOL décrite précédemment dans cette section et présentée dans la Fig. 6.

noir, et les valeurs intermédiaires sont représentées par une palette de couleurs allant du blanc au noir en passant par différentes nuances de bleu. La Figure 6 montre que, comme dans les images présentées dans la Figure 5, la zone d'ionisation de la décharge diminue significativement avec l'augmentation de la pression.

En combinant les données de la Figure 2a (courbe rouge de la tension d'amorçage en fonction de la pression du gaz sans radiation ajoutée) avec la simulation décrite ci-dessus et représentée dans la Figure 6, la zone susceptible d'être affectée par les particules ionisantes émises par une source ponctuelle a été calculée. Un critère de 200 Td a été utilisé et la surface autour de l'électrode ponctuelle à travers laquelle les particules émises par une source proche pourraient passer et ensuite conduire à une avalanche d'électrons a été évaluée et tracée en fonction de la pression du gaz dans la Figure 7.

Comme le montre la figure, la taille de la zone autour de l'électrode ponctuelle dans laquelle toute particule ionisante passant par là pourrait donner lieu à une décharge électrique diminue de quelques centimètres carrés à basse pression à moins d'un millimètre carré à pression atmosphérique. L'épaisseur de la courbe correspond à l'incertitude des mesures de la tension d'amorçage, comme indiqué par les barres d'erreur dans la Figure 2a. En utilisant les informations de la Figure 7 et les taux d'émission connus des particules ionisantes provenant des sources radioactives bêta et gamma utilisées dans les expériences décrites dans la section III, le taux de dose des particules ionisantes passant suffisamment près de l'électrode ponctuelle dans les expériences peut alors être évalué. Ce calcul sera discuté dans le contexte du niveau de rayonnement ionisant connu en fonction de l'altitude dans l'atmosphère terrestre dans la section suivante.

c. Calcul de la dose de rayonnement de surface et comparaison avec les mesures dans l'atmosphère

Comme discuté précédemment, deux sources radioactives ont été utilisées dans ce travail pour augmenter le taux de génération d'électrons germes : des sources bêta et gamma ont été placées à une distance de 2 cm du volume de décharge électrique et les effets résultants sur les tensions d'amorçage et d'extinction des décharges électriques ont été déterminés comme discuté dans la section III.

À partir des valeurs de référence des deux sources de radiation (activité en MBq (A), énergie de radiation émise en keV (E)) et de la distance en cm (r) par rapport au volume cible, une valeur pour la dose de rayonnement de surface en $\mu\text{Gr h}^{-1} \text{ cm}^2$ peut être calculée en utilisant les valeurs de surface (S) de la figure 7 et les formules suivantes [12] :

$$D_{S\gamma} = \frac{A \cdot E}{0.6r^2} \cdot S \quad (1)$$

$$D_{S\beta} = \frac{7.53 \cdot 10^{-2} A}{r^2} \cdot S \quad (2)$$

Il est intéressant d'évaluer l'effet de la radiation sur la tension d'amorçage en ce qui concerne la fiabilité des équipements électriques utilisés à haute altitude, par exemple dans le domaine aéronautique. Pour cette raison, la dose de rayonnement ajoutée par les sources radioactives aux expériences présentées dans la section III sera ici comparée à la dose de rayonnement mesurée dans l'atmosphère.

La figure 8 montre les données de dose de rayonnement gamma et bêta provenant de la littérature en fonction de l'altitude dans l'atmosphère. La dose de rayonnement gamma a été

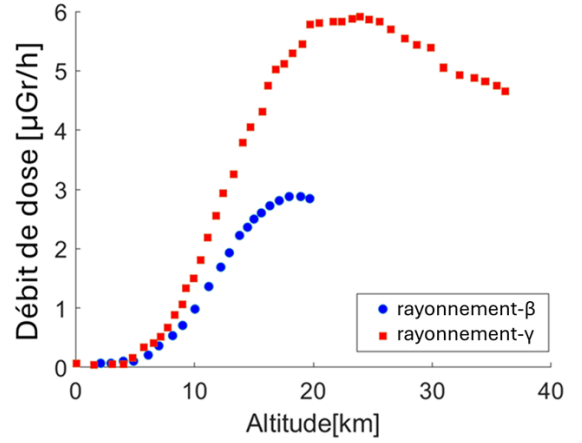


Fig. 8. Débit de dose gamma et bêta mesuré en fonction de l'altitude dans l'atmosphère [10-11].

obtenue à l'aide d'un capteur de radiation avec une surface de $62,25 \text{ cm}^2$ [10] tandis que la dose de rayonnement bêta a été obtenue à l'aide d'un capteur de radiation avec une surface de 4 cm^2 [11]. La valeur obtenue dans cette étude à 10 km était de $1 \mu\text{Gr h}^{-1}$ pour le rayonnement bêta et de $1,5 \mu\text{Gr h}^{-1}$ pour le rayonnement gamma. Concernant la valeur au niveau de la mer pour les deux types de radiation, une valeur de $0,0296 \mu\text{Gr h}^{-1}$ [13] a été adoptée ici pour la comparaison.

La figure 8 montre le résultat du calcul du produit de la dose de rayonnement bêta et gamma à partir des équations (1) et (2) par la surface des résultats de simulation de la figure 7 en fonction de la pression du gaz. Quatre points sont mis en évidence sur l'axe des y pour permettre la comparaison entre la radiation ajoutée artificiellement et celle naturellement présente dans l'atmosphère, au niveau de la mer et à 10 km. Comme expliqué dans les sections précédentes, la surface d'ionisation diminue fortement avec l'augmentation de la pression (figure 7) et donc le produit de cette surface avec la dose de rayonnement ajoutée à l'expérience par les sources bêta et gamma et traversant la zone autour de l'électrode ponctuelle diminue également fortement avec l'augmentation de la pression.

À pression atmosphérique, la dose de rayonnement ajoutée via les deux sources de radiation devient équivalente ou inférieure à la dose de rayonnement au niveau de la mer pour

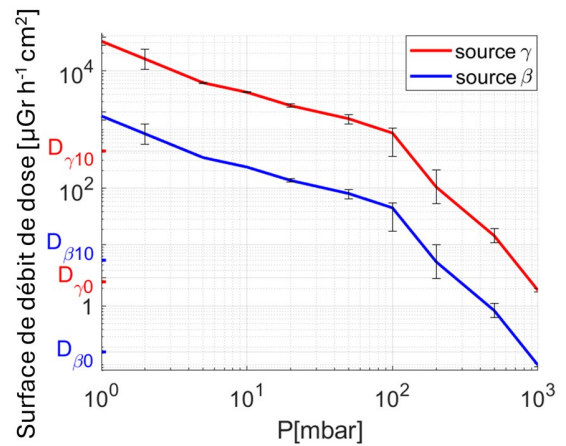


Fig. 9. Produits du débit de dose bêta (bleu) et gamma (rouge) avec la surface d'ionisation (figure 7) en fonction de la pression du gaz. Les quatre points mis en évidence en rouge et en bleu sur l'axe des y représentent les valeurs de surface de débit de dose trouvées dans la Figure 8, pour le rayonnement gamma au niveau de la mer ($D_{\gamma 0}$) et à 10 km ($D_{\gamma 10}$), ainsi que pour le rayonnement bêta au niveau de la mer ($D_{\beta 0}$) et à 10 km ($D_{\beta 10}$).

chaque type de radiation, ce qui peut expliquer pourquoi à pression atmosphérique, aucune différence notable n'est observée dans la figure 2a.

La figure 9 montre également que la dose de rayonnement entre 200 mbar et 500 mbar est cohérente avec les valeurs de dose de rayonnement mesurées entre le niveau de la mer et 10 km d'altitude, pour les deux types de radiation.

Il est donc possible de conclure que les effets de l'ajout de sources radioactives aux expériences décrites ici sont de rendre la formation d'une décharge électrique plus probable à une pression de gaz modérée, tandis qu'à pression atmosphérique, la radiation naturelle déjà présente est déjà suffisante et aucun effet n'est observé. À plus basse pression, les tests présentés ici n'ont pas été concluants car l'erreur expérimentale était relativement élevée par rapport aux tensions d'amorçage plus faibles pour ces conditions.

5. CONCLUSIONS

La présence de sources de rayonnement ionisant a permis de réduire la variabilité de la tension d'amorçage observée pour les impulsions de Trichel lors de l'utilisation d'une procédure d'augmentation de la tension avec un temps d'attente de 30 secondes à chaque étape. En l'absence de sources ionisantes et dans une installation blindée, la variation de la tension d'amorçage était plus élevée qu'avec l'ajout d'une source radioactive, et présentait une valeur moyenne plus élevée, tandis que la tension d'extinction de la décharge n'était pas affectée. Cela indique que l'utilisation de la tension d'extinction comme critère pour la conception d'équipements est une méthode plus fiable et prudente qui prend en compte le rayonnement ionisant présent à haute altitude.

Sur la base des données expérimentales, une étude par simulation numérique a été réalisée dans le but de définir la taille de la zone près de l'électrode ponctuelle susceptible de former une ionisation pour chaque paire de valeurs expérimentales (pression, tension d'amorçage), avec un critère de 200 Td pour définir la zone d'initiation de la décharge. Les valeurs de dose de rayonnement correspondant à la variation de pression ont été calculées pour les cas de sources de rayonnement ajoutées et comparées aux doses de rayonnement mesurées dans l'atmosphère et tirées de la littérature. Des études futures sont prévues pour mieux caractériser le nombre d'électrons libres produits par chaque source par unité de volume, ainsi que l'effet de flux de particules ionisantes plus élevés sur la valeur minimale de la tension d'amorçage de la courbe de Paschen. En parallèle, des travaux sont en cours pour créer un modèle analytique permettant d'intégrer complètement le nombre d'électrons germes dans le gaz en fonction de la pression et du champ électrique appliqué.

6. REFERENCES

- [1] V. Madonna et al., "Electrical Machines for the More Electric Aircraft: Partial Discharges Investigation", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 57, no. 2, pp. 1389-1398, March-April 2021, doi: 10.1109/TIA.2020.3046434J.
- [2] M. Florkowski, M. Kuniewski, "Partial Discharge-Originated Deterioration of Insulating Material Investigated by Surface-Resistance and Potential Mapping", *Energies* 2023, 16(16), 5973, <https://doi.org/10.3390/en16165973>.
- [3] F. Paschen, *Wied. Ann.*, 37, 69, 1889.
- [4] J.-A. Hwang, "Space Radiation Measurement on the Polar Route onboard the Korean Commercial Flights," *J. Astron. Space Sci.*, vol. 27, no. 1, pp. 43–54, 2010. DOI: 10.5140/JASS.2010.27.1.043.
- [5] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation M. S. Naidu, "sources and effects of Ionizing radiation", *UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes*, 2010.

- [6] M. S. Naidu, "High Voltage Engineering". *Tata McGraw-Hill Education*, 2013.
- [7] Y. Zhang, "Trichel pulse in various gases and the key factor for its formation," *Sci Rep* 7, 10135, 2017. DOI: 10.1038/s41598-017-10118-2.
- [8] A. Sari, "Neutron interrogation of actinides with a 17MeV electron accelerator and first results from photon and neutron interrogation non-simultaneous measurements combination," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 312, pp. 30–35, Oct. 2013.
- [9] A. Yunzhu, S. Menghan, H. Yuanchao, H. Shangmao, H. Tao, H. Baina, Y. Minghao, Y. Kaiqiang and L. Yitong, "The Influence of Humidity on Electron Transport Parameters and Insulation Performance of Air", *Frontiers in Energy Research*, 2022.
- [10] J.F. Bottollier-Depois, Q. Chau, P. Bouisset, G. Kerlau, L. Plawinski, L. Lebaron-Jacobs, "Assessing exposure to cosmic radiation on board aircraft", *Advances in Space Research*, Volume 32, Issue 1, 2003.
- [11] Bilski, Pawel & Olko, Pawel & Horwacik, Tomasz, "Air-crew exposure to cosmic radiation on board of Polish passenger aircraft", *Nukleonika*. 4. 77-83, 2004.
- [12] Martin, Alan et al., "An Introduction to Radiation Protection", 6th ed. CRC Press, 2018. Web. 14 Oct. 2018.
- [13] Phillips, T., et al., "Space Weather Ballooning", *Space Weather*, 14, 697–703, 2016, doi:10.1002/2016SW001410.