

Effet de l'angle de contact des gouttes d'eau recouvrant différents types de surfaces isolantes sur leur performance électrique sous haute tension

Khaled HAMOUR ¹, Lydia TAOURI ²

¹ Laboratory of Electrical Engineering, Department of Technologie, University A. Mira de Bejaia, 06000 Bejaia, Algeria

² Departement of chemistry, University A. Mira de Bejaia, 06000 Bejaia, Algeria

RESUME - Dans cette étude, l'influence de l'angle de contact des gouttes d'eau sur diverses surfaces isolantes, notamment le verre hydrophile, la silicone HTV hydrophobe et la surface superhydrophobe, a été étudiée en présence d'un champ électrique. L'impact du volume des gouttes sur leurs performances a également été évalué. Les résultats obtenus ont révélés que la surface superhydrophobe, grâce à son angle de contact très élevé, présente une remarquable capacité à repousser l'eau tout en maintenant une tension de contournement stable, même avec des volumes croissants des gouttes d'eau. Cette propriété réduit de manière significative les risques de décharges électriques indésirables et améliore la fiabilité des isolateurs de haute tension dans des environnements humides.

Mots-clés—Surface superhydrophobe, hydrophobe, hydrophile, angle de contact, tension de contournement.

1. INTRODUCTION

Afin de limiter les perturbations affectant les réseaux de transport d'énergie électrique en raison de la pollution humide, qui altère les performances des isolateurs, des solutions d'isolation présentant des propriétés hydrophiles et hydrophobes ont été développées [1].

Les isolateurs hydrophiles tels que les céramiques, en raison de leur rapidité de mouillage sous conditions de pollution humide, sont particulièrement sujets au contournement par des arcs électriques [2,3]. En revanche, les isolateurs hydrophobes comme les polymères, caractérisés par leur légèreté et leur haute capacité d'imperméabilité, présentent une résistance accrue. Bien que ces derniers surpassent les céramiques en termes de performances électriques, ils restent vulnérables à une détérioration lorsqu'ils sont exposés de manière prolongée à des conditions de forte humidité [4,5]. Cette situation favorise l'apparition de dépôts de gouttes d'eau, qui intensifient le champ électrique entre leurs bornes. La réduction de leur ligne de fuite sèche qui en découle augmente le risque de courts-circuits qui provoque ainsi des décharges de contournement [6]. Par ailleurs, la répétition de ces arcs électriques entraîne un échauffement de leur surface, susceptible de provoquer des dégradations irréversibles telles que des fissures ou des érosions.

Les surfaces superhydrophobes, déjà utilisées dans divers secteurs industriels, se distinguent par un angle de contact remarquablement élevé des gouttes d'eau sur leur surface [7].

Cette particularité leur confère une capacité à empêcher l'adhésion de l'humidité et garantissant ainsi un état de sécheresse constant. En tant qu'isolateurs électriques, ces surfaces maintiennent durablement leurs propriétés isolantes, même dans des environnements à forte humidité ambiante [8].

L'objectif de ce travail est d'exploiter les propriétés de la superhydrophobicité en tant qu'isolant et d'étudier l'influence de l'angle de contact des gouttes d'eau sur différents types de surfaces isolantes afin d'évaluer leurs performances électriques.

2. MODELE EXPERIMENTAL ET TECHNIQUE DE MESURE

Le dispositif expérimental utilisé dans ce travail est illustré dans la figure Fig.1. Ceci est composé d'une plaque d'isolation a étudié 1 et deux électrodes 2. Ces dernières sont en acier inoxydable, de forme parallélépipédique et très arrondies à leurs extrémités. Elles ont pour dimensions : (120 x 30 x 8) mm3. Elles sont suspendues à 10 mm au-dessus de la surface de l'isolation à l'aide de deux supports isolants 3. L'ouverture entre le matériau et chacune des deux électrodes ainsi que celle d'accès au bac, situé juste en dessous du dispositif, ont été établies. Leur but est de faciliter l'évacuation aux gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation et leur récupération par le bac 4 quel que soit leur volume.

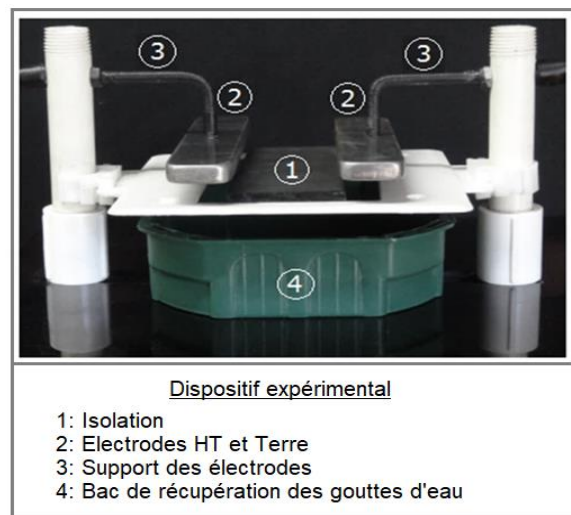


Fig. 1. Modèle expérimental.

Dans ce travail, nous avons choisi des matériaux isolants couramment utilisés dans le domaine de la haute tension, à savoir le verre et le silicone. Les figures 2a et 2b montrent respectivement une plaque en verre à surface hydrophile et une plaque en silicone HTV à surface hydrophobe. La figure 1c illustre une plaque en verre recouverte d'une couche superhydrophobe. les dimensions des plaques sont de 12 cm x 5 cm x 0,5 cm.

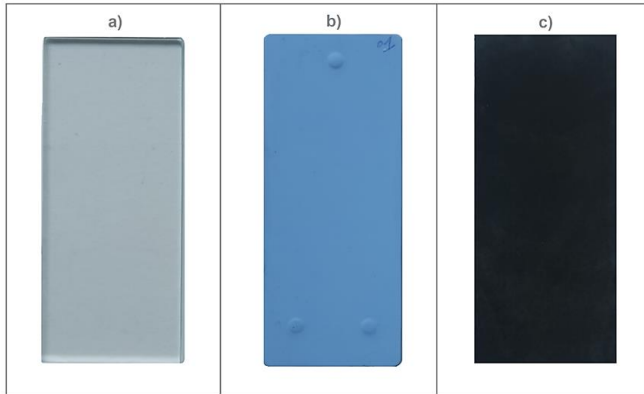


Fig. 2. Surfaces des isolations.

La surface superhydrophobe est obtenue en étalant, dans un premier temps, manuellement et uniformément une quantité de gel en silicone fraîche sous forme d'une couche très fine sur la face supérieure d'une plaque en verre (Fig. 3a). Dans un deuxième temps, une autre quantité du même produit est déposée sur un morceau de bois et à laquelle nous mettons le feu (Fig. 3b). En dernier lieu, la plaque en verre, est approchée de la flamme pour la recouvrir de suie émanant de la carbonisation de la silicone (Fig. 3b). La figure. 3c montre la plaque totalement noircie et nettoyée à l'eau du robinet.

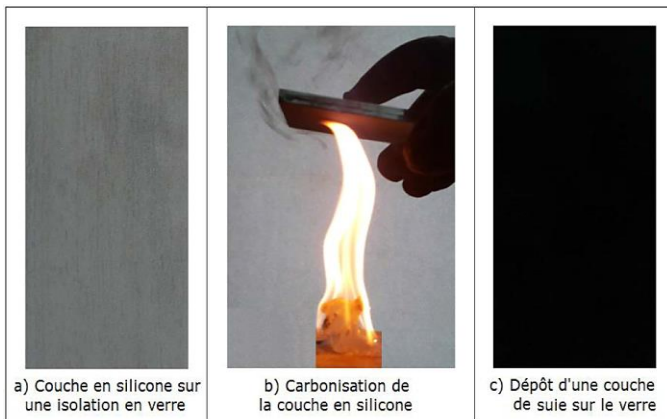


Fig. 3. Etapes de confection d'une surface en verre superhydrophobe.

Dans le cadre de cette investigation, un recouvrement en rangées de gouttes d'eau en lignes droites sur la surface de l'isolation a été choisi. Disposées en lignes droites, parallèlement aux électrodes sous tension et terre (Fig. 4), ces rangées sont composées chacune d'un ensemble de 4 gouttes alignées de telle sorte que les distances entre les centres de celle-ci et les électrodes sous tension (L_{dv}) et terre (L_{dg}) ainsi que celle séparant les centres des deux gouttes d'eau adjacentes sur la ligne de fuite (L_{dd}) ou le long des électrodes (L_{rr}) sont maintenues constantes tout au long de l'expérimentation. Ce type d'arrangement est choisi afin de simuler le phénomène rencontré dans la nature lors de condensation ou de pluie naturelle.

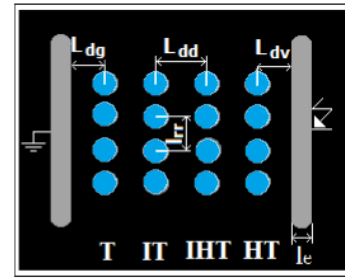


Fig. 4. Arrangement en lignes droites des gouttes d'eau recouvrant la surface des isolations.

La mesure de la tension de contournement et celle d'expulsion de chacune des gouttes d'eau de l'isolation, est effectuée à l'aide de la station d'essai, illustrée par la figure 5. Celle-ci est constituée d'un transformateur de haute tension (0,08 A/135 kV), un diviseur de tension capacitif (C_o/C_u), un voltmètre de crête (V_{cr}) à affichage numérique et une surface d'isolation (S).

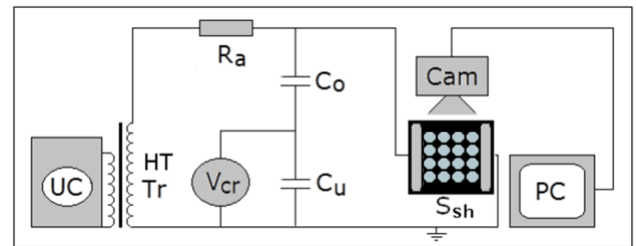


Fig. 5. Schémas de mesure de la tension alternative.

Pour chacun des paramètres d'influence investigués dans ce travail, une série de 15 essais a été réalisée et la valeur retenue est la moyenne arithmétique de l'ensemble de celles obtenues sur la même série de mesure.

La mesure d'angle de contact est effectuée par le logiciel ImagJ. Ceci, nous permet de visualiser, traiter et d'analyser des images en 2D et 3D.

3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Mesure d'angle de contact

La figure 6 illustre le comportement d'une goutte d'eau de volume 20 μ L déposée sur chacune des surfaces mentionnées précédemment. La surface hydrophile, présente un angle de contact est d'environ 27° (Fig. 6a). Sur la surface HTV, la goutte adopte une forme hémisphérique avec un angle de contact avoisinant 101° (Fig. 6b). En revanche, sur la surface superhydrophobe, la goutte prend une forme presque sphérique, avec un angle de contact très élevé, atteignant environ 160° (Fig. 6c).

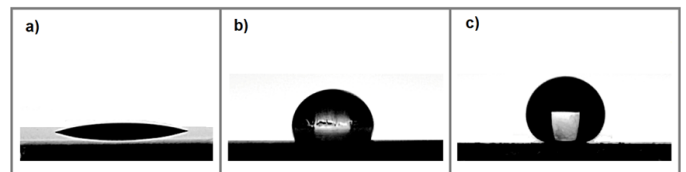


Fig. 6. Angle de contact d'une goutte d'eau de $V=20 \mu$ L, sur les trois surfaces isolantes. (a) : Verre ; (b) : Silicone ; (c) : Superhydrophobe.

Par conséquent, le verre, étant un matériau hydrophile, présente une forte affinité de sa surface avec des gouttes eau déposées dessus, engendrent un étalement assis large, ce qui correspond à une déformation complète de ces gouttes sur ce type de surfaces (Fig. 7). Par conséquent, la surface en silicone

présente des caractéristiques hydrophobes intermédiaires, les gouttes perlent sur sa surface et leur forme hémisphérique est maintenue quel que soit la taille de la goutte (Fig. 8). Contrairement à la surface hydrophile, la surface superhydrophobe minimise au maximum le contact avec l'eau, cela signifie que l'eau n'adhère pas à sa surface et les gouttes d'eau maintiennent leur forme sphérique sur cette surface quel que soit leur volume déposé (Fig. 9).

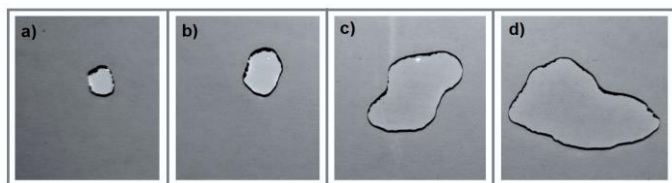


Fig. 7. Surface de mouillage des gouttes d'eau de volumes distincts (a = 5µL, b = 20µL, c = 60µL, d = 100µL) déposées sur une surface hydrophile.

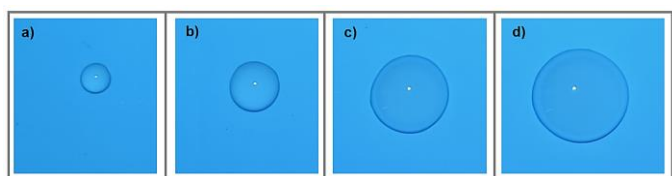


Fig. 8. Surface de mouillage des gouttes d'eau de volumes distincts (a=5µL, b =20µL, c = 60µL, d = 100µL) déposées sur une surface hydrophobe.

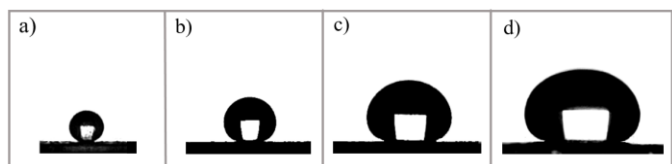


Fig. 9. Surface de mouillage des gouttes d'eau de volumes distincts (a = 5µL, b = 20µL, c = 60µL, d = 100µL) déposées sur une surface superhydrophobe.

Les figures 10 et 11 présentent respectivement les histogrammes des surfaces de mouillage des gouttes d'eau et de leurs angles de contact, en fonction de volume des gouttes, sur les trois types de surfaces isolantes testées. Ces représentations graphiques mettent en évidence les différences de comportement mouillant liées à la nature physico-chimique des surfaces. En effet, une surface hydrophobe tend à limiter l'étalement des gouttes d'eau, ce qui se traduit par une surface de mouillage réduite et un angle de contact plus élevé.

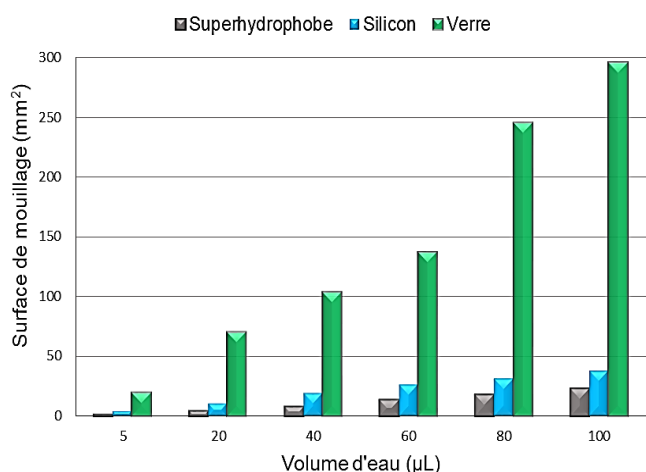


Fig.10. Surface de mouillage en fonction de volumes d'eau.

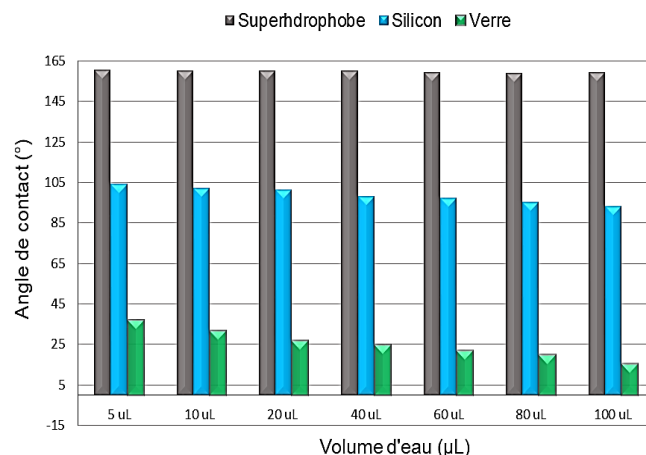


Fig. 11. Angle de contact en fonction de volumes d'eau.

L'analyse des données révèle que les gouttes déposées sur les surfaces les plus hydrophobes conservent une forme sphérique plus prononcée, tandis que celles déposées sur des surfaces moins hydrophobes présentent un étalement plus important. Dans ce contexte, une relation inverse est observée entre l'angle de contact et la surface de mouillage : plus l'angle de contact est élevé, plus la surface de mouillage est faible, ce qui traduit un caractère hydrophobe plus marqué. Ces résultats permettent de quantifier de manière comparative l'hydrophobicité des différentes surfaces isolantes, et d'évaluer leur performance électrique dans des environnements où la résistance à l'humidité, l'expulsion de l'eau ou les propriétés auto-nettoyantes sont des critères déterminants.

3.2. Mesure de la tension de contournement

Dans cette partie, nous avons étudié la tension de contournement des trois surfaces susmentionnées. En premier lieu, nous avons réalisé des contournements sur ces surfaces sans présence des gouttes d'eau sur elles. Ces résultats serviront comme référence à des tensions de contournements en présence des gouttes d'eau. La deuxième étape, consiste à déposer 16 gouttes d'eau sur les isolations horizontales au moyen d'une micropipette et en absence de tension. Ensuite, la tension est appliquée au système en l'augmentant progressivement par pas de 0.5 kV jusqu'à le contournement total.

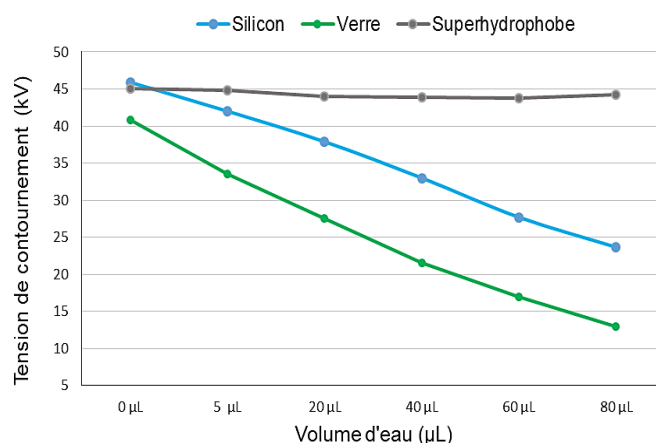


Fig. 12. Tension de contournement en fonction de volumes d'eau.

La figure 12 illustre l'évolution de la tension de contournement mesurée sur les trois types de surfaces isolantes en fonction du volume des gouttes d'eau déposées. Cette représentation permet d'analyser l'impact de la quantité d'eau sur la performance électrique de chaque surface. Il en résulte une décroissance notable de la tension de contournement sur les surfaces hydrophile et hydrophobe à mesure que le volume des gouttes augmente. Pour la surface hydrophobe (silicone), la tension de contournement passe de 44 kV en l'absence d'eau à environ 23 kV lorsque 16 gouttes de 80 μ L sont présentes. De manière similaire, la surface hydrophile (verre) voit sa tension de contournement chuter de 40 kV à seulement 13 kV dans les mêmes conditions. Cette diminution de la tension de contournement reflète une altération significative des propriétés isolantes des matériaux, induite par la présence accrue d'eau à leur surface. L'accumulation de gouttes favorise la formation de chemins conducteurs, souvent visibles sous la forme de filaments d'eau persistants, même après le déclenchement du contournement. Ces filaments facilitent le passage du courant électrique en réduisant la rigidité diélectrique locale (Fig. 13 et 14). En revanche, la surface superhydrophobe se distingue par une tension de contournement relativement stable, autour de 45 kV, indépendamment du volume d'eau appliqué. Ce comportement souligne son efficacité à repousser l'eau sous l'effet du champ électrique, limitant ainsi l'étalement et la coalescence des gouttes, et empêchant la formation de chemins conducteurs continus à sa surface.

La figure 15 montre les images des phases essentielles d'expulsion des 16 gouttes d'eau de 40 μ L recouvrant la surface superhydrophobe. La figure 15a présente le dépôt initial des gouttes d'eau hors tension électrique. En augmentant progressivement la tension, on observe, à 14 kV, que 11 gouttes ont déjà été éjectées latéralement vers les bords des électrodes, haute tension et terre (Fig. 15b). À 20,5 kV (Fig. 15c), la surface est entièrement débarrassée de l'ensemble des gouttes, démontrant une répulsion efficace sous champ électrique. Le contournement s'est produit à vide, en l'absence d'eau, sous une tension de 45 kV (Fig. 15d), laissant la surface parfaitement sèche et propre après l'essai (Fig. 15e). Ce phénomène démontre la capacité des surfaces superhydrophobes à conserver leurs caractéristiques autonettoyantes avant et après le contournement.

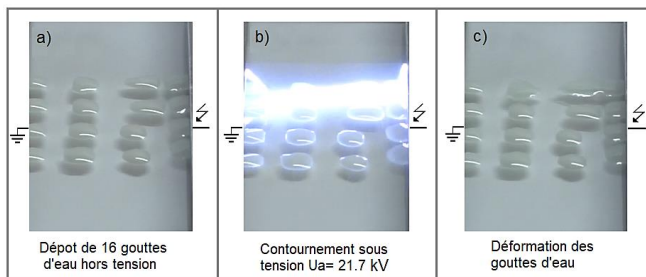


Fig. 13. Phase de contournement d'une surface hydrophile en présence de 16 gouttes d'eau, de 40 μ L de volume, sous arrangement en lignes droites.

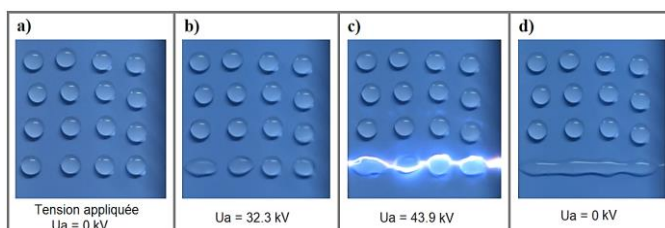


Fig. 14. Phase de contournement d'une surface hydrophobe en présence de 16 gouttes d'eau, de 40 μ L de volume, sous arrangement en lignes droites.

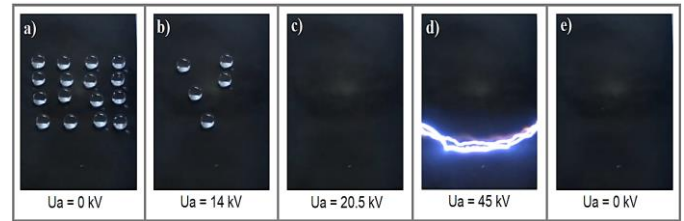


Fig. 15. Phase de contournement d'une surface superhydrophobe en présence de 16 gouttes d'eau, de 40 μ L de volume, sous arrangement en lignes droites.

La figure 16 illustre la relation entre la tension de contournement et l'angle de contact des gouttes d'eau, 60 μ L de volume, pour les trois types de surfaces isolantes. On observe que la tension de contournement est proportionnelle avec l'angle de contact des gouttes d'eau. Le verre, avec un angle de contact relativement faible, présente une tension de contournement d'environ 17 kV. La silicone, avec un angle de contact modéré, montre une tension de contournement plus élevée, autour de 27 kV. Enfin, la surface superhydrophobe, avec un angle de contact très élevé, atteint une tension de contournement d'environ 44 kV. Cela indique que l'angle de contact des gouttes d'eau influence d'une manière directe sur la tension de contournement.

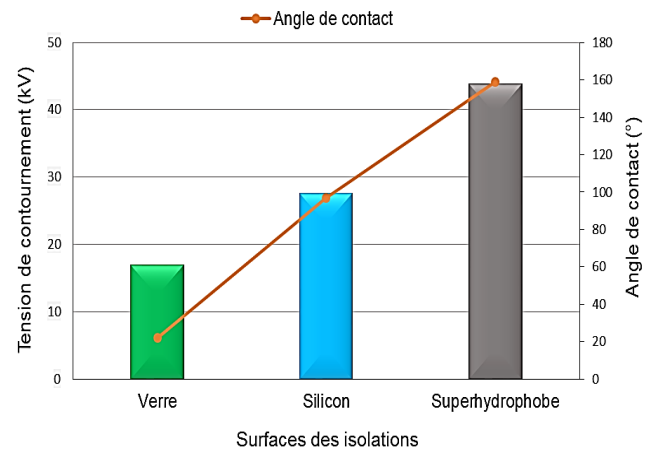


Fig. 16. Tension de contournement et l'angle de contact des gouttes d'eau pour les trois surfaces des isolations.

4. CONCLUSIONS

L'étude comparative des trois types de surfaces isolantes (hydrophile, hydrophobe et superhydrophobe) a permis de mettre en évidence l'influence directe de la mouillabilité, caractérisée par l'angle de contact, sur la performance électrique des matériaux en milieu humide. Les résultats montrent qu'une surface de mouillage étendue et un angle de contact faible, favorisent l'étalement des gouttes d'eau. Ce phénomène conduit à la formation précoce de chemins conducteurs et, par conséquent, à une diminution marquée de la tension de contournement. À l'inverse, les surfaces superhydrophobes, caractérisées par des angles de contact élevés et des surfaces de mouillage réduites, maintiennent une stabilité de contournement significative même en présence de volumes d'eau importants. Cette résistance au contournement résulte de leur capacité à limiter les interactions entre les gouttes et la surface, empêchant la formation d'un chemin conducteur continu sous l'effet du champ électrique. Ces résultats confirment l'intérêt des traitements des surfaces superhydrophobes pour renforcer la performance des isolateurs dans des environnements exposés à l'humidité.

5. REFERENCES

- [1] D. Kind, H. Käner, « High-voltage insulation technology », in Braunschweig, Germany: Vieweg, vol. 621, 1985.
- [2] Z. Zhang, et al. « Study on AC flashover performance for different types of porcelain and glass insulators with non-uniform pollution », in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no 3, p. 1691-1698, 2013.
- [3] F Bouchelga, R Boudissa, S Kornhuber, KD Haim. « DC performance of non-uniformly transversal polluted glass insulation under parallel electrical discharges' effect », Electrical Engineering, vol. 102, no 4, p. 2453-2463, 2020.
- [4] Z. X. Cheng, et al., « Observation of corona and flashover on the surface of composite insulators », in IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, vol. 2, 2003.
- [5] R. S. Gorur, J. Mishra, R. Tay, and R. McAfee, «Electrical performance of RTV silicone rubber coatings », IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 3, no. 2, p. 299–306, 1996.
- [6] K. Karakoulidis, M. G. Danikas and P. Rakitzis. « Deterioration phenomena on polymeric insulating surfaces due to water droplets », in J. Electr. Eng, vol. 56, no 7-8, p. 169-175, 2005.
- [7] X. Zhang, F. Shi, J. Niu, Y. Jiang, Z. Wang., « Superhydrophobic surfaces: from structural control to functional application », in Journal of Materials Chemistry, vol. 18, no 6, p. 621-633, 2008.
- [8] Y. Li, H. Jin, S. Nie, C. Tong, N. Gao., « Effect of superhydrophobicity on flashover characteristics of silicone rubber under wet conditions », in AIP Advances 8, 015313, p. 1 – 11, 2018.