

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA



Faculté De Technologie
Département de Génie Electrique



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de master en électrotechnique

Option : Réseau électrique

Thème

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

Présenté par :

- MEDJBER Fouad.

Soutenu publiquement le 29 Juin 2024 devant le jury composé de :

Mr B. MAUCHE	Professeur	U.A.M. Bejaia	Président
Mr Kh. HAMOUR	MCB	U.A.M.Bejaia	Rapporteur
Mr Z. SAHLI	MCB	U.A.M.Bejaia	Examineur

Année Universitaire 2023/2024

Remerciement

Remerciement

Dans le cadre de la réalisation de cette étude, Je remercie avant tout ALLAH le tout puissant, de m'avoir donné la force, la patience et la volonté de mener à bien ce travail.

Mes remerciements les plus sincères s'adressent à mon promoteur Mr. HAMOUR Khaled pour ses conseils, ses remarques et orientations, sa patience et surtout sa disponibilité.

Ma profonde gratitude va aussi au membre de jury. Pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce travail.

Je tiens aussi à remercier toute l'équipe pédagogique de l'université de Bejaia, qui nous a permis d'utiliser leurs matériels durant la réalisation de nos essais.

J'espère que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette étude trouvent ici l'expression de mes sincères sentiments et chaleureux remerciements.

Dédicace

Dédicace

Je tiens à dédier ce modeste travail :

A ma lune et le fil d'espoir qui éclaire mon chemin, A la source de ma joie, Maman.

A celui qui m'a fait devenir un homme, Je resterai toujours reconnaissant pour tes innombrables efforts, Papa.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer ma gratitude et mon respect pour leurs sacrifices, qui m'ont permis d'être là.

A mon cher frère HAMZA et ma chère sœur CHAHRAZED.

A la mémoire de ma grand-mère, que DIEU l'accueille dans son vaste paradis.

A toutes les personnes de ma grande famille.

A mon cher ami ADEL.

A tous mes chers proches et amis qui m'ont encouragé et soutenu au cours de la réalisation de ce mémoire.

Sommaire

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX.....	
LISTE DES ABBREVIATIONS ET DES SYMBOLES.....	
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ISOLATEURS ELECTRIQUES.....	3
I.1 Introduction :.....	3
I. 2 Isolateurs à surface hydrophile :	3
I.2.1 Evolution des isolateurs hydrophiles	4
I.2.2 Performances des isolateurs hydrophiles	8
I.2.3 Fissuration radiale due à la croissance du ciment.....	10
I.2.4 Effet de corrosion des matériaux	11
I. 3 Isolateurs à surface hydrophobe :	11
I.3.1 Evolution des isolateurs hydrophobes	12
I.3.2 Structure des isolateurs hydrophobes.....	14
I.3.3 Classification de l'hydrophobicité	14
I.3.4 Hydrophobicité des surfaces isolantes	15
I.3.5 Perte de l'hydrophobicité.....	16
I.4.Conclusion	16
CHAPITRE II : L'EFFETS DES GOUTES D'EAU ET DE LA POLLUTION SUR L'ISOLATTEUR	18
II.1 Introduction	18
II.2 Pollution.....	18
II.2.1 Salinité.....	18
II.2.2 Couches de pollution	18
II.2.3 Degré de pollution	19
II.2.4 Sources de pollution	19
II.3 Performance électrique des isolateurs hydrophiles sous pollution.....	21
II.4 Performance électrique des isolateurs hydrophobes sous pollution	25
II.5 Dégradation des isolants polymères sous pollution.....	32
II.6.Conclusion	33
CHAPITRE III : Surface superhydrophobe	34
III.1 Introduction	34

III.2 Définition	34
III.3 Propriétés des surfaces superhydrophobes	34
III.4 Caractérisation des surfaces superhydrophobes	38
III.4.1 Angle de contact statique	38
III.4.2 Angle de contact dynamique	39
III.4.3 Angle d'hystérésis	39
III.4.4 Angle de glissement	39
III.4.5 Rugosité.....	40
III.4.6 Auto-nettoyage	40
III.5 Différents types des surfaces superhydrophobes naturelles et artificielles	41
III.5.1 Surfaces superhydrophobes naturelles	41
III.5.2 Surfaces superhydrophobes artificielles.....	45
III.6 Techniques de préparation de surfaces superhydrophobes	45
III.6.1 Dépôt électrochimique :	45
III.6.2 Photolithographie :	46
III.6.3 Processus sol-gel :	46
III.6.4 Traitement par plasma :	46
III.6.5 Dépôt par bain chimique :	46
III.7 Domain d'application des surfaces superhydrophobes	46
III.7.1 Dans la recherche scientifique :	47
III.7.2 Chez les industriels :	47
III.7.3 Chez les consommateurs :	48
III.8 Comportement électrohydrodynamique des gouttelettes d'eau sur une surface isolante superhydrophobe	49
III.9 Effet de la superhydrophobicité sur les caractéristiques de contournement des isolateurs de haute tension dans des conditions humides.....	51
III.10 Propriétés d'antigivrage des revêtements superhydrophobe pour les isolants électriques.....	53
III.11 Conclusion.....	55
CHAPITRE IV : PARTIE EXPERIMENTALE SUR L'EFFET DE L'ANGLE DE CONTACT DES GOUTTES D'EAU SUR LES SURFACES ISOLANTES	56
IV. 1 Introduction	56
IV. 2 Modèle expérimental et techniques de mesure	56
IV. 2. 1 Modèle expérimental.....	56
IV. 2. 2 Différents types d'isolations	57
IV. 2. 3 Arrangement des gouttes d'eau	58

IV. 2. 4 Mesure d'angle de contact et de surface de mouillage	59
IV. 2. 5 Station de mesure de la tension alternative	60
IV. 3 Résultats et discussion	61
IV. 3. 1 Angle de contact.....	61
IV. 3. 2 Surface de mouillage.....	62
IV. 3. 3 Performance électrique des surfaces isolantes sous tension alternative.....	64
IV. 3. 4 Tension d'expulsion sur surface superhydrophobe.....	69
IV. 4 Conclusion	71
CONCLUSION GENERALE	71
Résumé:	

Liste des figures

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1 : Comportement d'une gouttelette d'eau sur une surface isolante hydrophile en verre [3].....	3
Figure I. 2 : Isolateurs des lignes de transmission télégraphique [5].....	4
Figure I. 3 : Type d'isolateurs à broches en 1890-1897 [6].....	5
Figure I. 4 : Isolateurs à broches en plusieurs parties [8].....	6
Figure I. 5 : Les premiers isolateurs de suspension a) fabriqué par Fred Locke b) fabriqué par Hewlett.....	7
Figure I. 6 : Quelques alternatives aux broches cimentées de 1910 à 1935. Plusieurs de ces modèles ont été produits en quantités commerciales.	8
Figure I. 7 : Isolateurs en porcelaine à capuchon et à broche (Cap-Pin) standard.....	9
Figure I. 8 : Isolateurs en verre Cap-Pin.....	10
Figure I. 9 : Fissure radiale visible dans : a) la tête d'un isolant. b) la coque d'un isolant de suspension. [23]....	10
Figure I. 10 : Erosion du verre isolant	11
Figure I. 11 : Comportement d'une goutte d'eau sur une surface isolante hydrophobe (silicone) [25].....	12
Figure I. 12 : Détails de construction d'un isolateur composite.....	14
Figure I. 13 : Classe d'hydrophobicité suivant le guide STRI	15
Figure II. 1 : Couche de pollution sur des isolateurs en silicone et en verre.....	19
Figure II. 2 : Secteur de statistique des différentes sources de pollution en fonction de leur origine.....	20
Figure II. 3 : Dispositif d'essai pour isolateur de suspension 400 kV	22
Figure II. 4 : Principales caractéristiques des types d'isolateurs soumis à l'essai dans le brouillard salin et la pollution naturelle.....	22
Figure II. 5 : Circuit d'essai T: régulateur de tension; B: transformateur de test; R: résistance de protection; H: traversée HT; F: diviseur de tension capacitif; Y: multimètre; S: échantillon d'essai C; R0: dispositif de mesure du courant de fuite; E: chambre climatique.....	23
Figure II. 6 : Schéma de mesure de la tension de contournement de l'isolation polluée et de visualisation des décharges électriques résultantes.....	24
Figure II. 7 : Modèles et grandeurs caractéristiques des isolateurs utilisés.....	24
Figure II. 8 : Schéma de mesure de tension de contournement et de visualisation de la décharge électrique	25
Figure II. 9 : Arrangement des gouttes d'eau sur une surface en silicone hydrophobe.....	26
Figure II. 10 : $\hat{U}_c = f(\sigma v)$ d'une isolation hydrophobe recouverte de gouttes d'eau.....	27

Figure II. 11 : Phases de développement d'une décharge électrique sur une surface en silicone recouverte de gouttes d'eau	27
Figure II. 12 : Tension de contournement d'une isolation hydrophobe en fonction du nombre de rangées de gouttes et la distance entre elles.	28
Figure II. 13 : Tension de contournement en fonction de la distance entre les rangées de gouttes d'eau recouvrant une surface en silicone hydrophobe.	28
Figure II. 14 : Tension de contournement en fonction de la largeur et la position d'une bande parallèle à la droite joignant les électrodes	29
Figure II. 15 : Phases de décharge de rupture dans le cas d'une zone sèche parallèle à la ligne des deux électrodes.....	30
Figure II. 16 : Tension de contournement en fonction du nombre de rangées perpendiculaires à l'axe des électrodes.	31
Figure II. 17 : Phases de contournement d'une surface hydrophobe à une seule rangée de gouttes d'eau en contact avec la pointe sous tension.	31
Figure II. 18 : Vieillessement le plus courant des isolants SiR.....	33
Figure III. 1 : Illustration du comportement de mouillage proposé par Young.	35
Figure III. 2 : Illustration du comportement de mouillage proposé par Wenzel.....	36
Figure III. 3 : Illustration du comportement de mouillage proposé par Cassie-Baxter.....	37
Figure III. 4 : Comportements d'une goutte d'eau sur (a) une surface superhydrophile ($\theta = 0^\circ$), (b) une surface hydrophile ($\theta < 90^\circ$), (c) une surface hydrophobe ($\theta > 90^\circ$) et (d) une surface superhydrophobe ($\theta > 150^\circ$).....	38
Figure III. 5 : Images d'une goutte d'eau sur une surface superhydrophobe sous différents modes d'évaluation de l'angle de contact statique.....	38
Figure III. 6 : Mesure d'angle de contact d'avancé et de recul	39
Figure III. 7 : Angle d'avancé et de recul sur un plan incliné juste avant le début du mouvement de la goutte ...	40
Figure III. 8 : La forme d'une goutte sur différentes texturations de surface.....	40
Figure III. 9 : Mécanisme d'auto-nettoyage..	41
Figure III. 10 : a) Feuille de lotus. b) Images microscopiques montrant des micro et nanostructures morphologiques de la surface de la feuille de lotus	42
Figure III. 11 : Morphologie de la feuille flottante de <i>Salvinia molesta</i>	42
Figure III. 12 : (a, b) Images SEM de la surface d'un pétale de rose rouge, montrant des micropapilles et des nanofolds sur chaque sommet de papilles. c) Forme d'une gouttelette d'eau à la surface du pétale, indiquant sa superhydrophobicité avec un angle de contact de $152,4^\circ$	43

Figure III. 13 : a) Images optiques de canard (Anatidés). b) Image optique d'un morceau de plume de canard avec une goutte d'eau. c) Structures multi-échelles de plumes de canard.....	43
Figure III. 14 : a) Image d'un poisson dans l'eau. b) Image MEB d'écailles de poisson montrant les micropapilles. Des nanostructures peuvent être observées sur les papilles. c) Goutte de l'huile sur une surface en écailles de poisson	44
Figure III. 15 : a) Gerris en équilibre sur l'eau. b) Image MEB des pattes du Gerris. c) Grossissement plus élevé des micros poiles	44
Figure III. 16 : a) Image d'un papillon bleu irisé, b-c) Images MEB montrent des micro-échelles hiérarchiques sur la surface de l'aile d'un papillon.	45
Figure III. 17 : Produits superhydrophobe.	49
Figure III. 18 : Angle de contact des gouttelettes d'eau sur la surface superhydrophobe	50
Figure III. 19 : Comportement électrohydrodynamique de gouttelettes d'eau sur la surface superhydrophobe et la surface en silicone RTV.....	50
Figure III. 20 : Dispositif expérimental (a) Echantillon avec deux électrode (b) Echantillon dans une chambre de brouillard	51
Figure III. 21 : Processus de contournement de la surface a) en silicone superhydrophobe. b) en silicone hydrophobe	52
Figure III. 22 : Tension de contournement de différentes surfaces sous test de brouillard salin	53
Figure III. 23 : Image de l'écoulement de l'eau sur les surfaces de (a) surface isolante superhydrophobe (b) surface isolante en silicone RTV	54
Figure III. 24 : Accumulation de glace sur les isolants avec (a) revêtement superhydrophobe et (b) avec revêtement en caoutchouc silicone RTV après 3 heures de givrage.....	54
Figure. IV. 1 : Modèle expérimental.....	57
Figure. IV. 2 : Surfaces des isolations.	57
Figure. IV. 3 : Etapes de confection d'une surface en verre superhydrophobe.	58
Figure. IV. 4 : Arrangement en lignes droites des gouttes d'eau recouvrant la surface des isolations.	59
Figure. IV. 5 : Logiciel ImageJ.	59
Figure. IV. 6 : Schémas de mesure de la tension alternative.	60
Figure. IV. 7 : Angle de contact d'une goutte d'eau de V=20ul, sur les trois surfaces isolantes (a-Verre ; b-Silicone ; c-Superhydrophobe).	61

Figure. IV. 8 : Variation de l'angle de contact ($^{\circ}$) en fonction de volumes d'eau (μL).	62
Figure. IV. 9 : Variation de surface de mouillage (mm^2) en fonction de volumes d'eau (μL).	63
Figure. IV. 10 : Surface de mouillage des gouttes d'eau de volumes distincts ($a=5\mu\text{L}$, $b=20\mu\text{L}$, $c=60\mu\text{L}$, $d=100\mu\text{L}$) déposées sur une surface hydrophile.....	63
Figure. IV. 11 : Surface de mouillage des gouttes d'eau de volumes distincts ($a=5\mu\text{L}$, $b=20\mu\text{L}$, $c=60\mu\text{L}$, $d=100\mu\text{L}$) déposées sur une surface hydrophobe.....	64
Figure. IV. 12 : Surface de mouillage des gouttes d'eau de volumes distincts ($a=5\mu\text{L}$, $b=20\mu\text{L}$, $c=60\mu\text{L}$, $d=100\mu\text{L}$) déposées sur une surface superhydrophobe.....	64
Figure. IV. 13 : Variation de la tension de contournement (kV) en fonction de volumes d'eau (μL)	64
Figure. IV. 14 : Application d'une tension sur une surface hydrophile en présence de 16 gouttes d'eau, de $40\mu\text{L}$ de volume, sous arrangement en lignes droites.....	65
Figure. IV. 15 : Application d'une tension sur une surface hydrophobe en présence de 16 gouttes d'eau, de $40\mu\text{L}$ de volume, sous arrangement en lignes droites.....	66
Figure. IV. 16 : Phases essentielles d'expulsion de 16 gouttes d'eau, de $40\mu\text{L}$ de volume, en dehors de l'isolateur superhydrophobe sous arrangement en lignes droites.....	67
Figure. IV. 17 : Relation entre la tension de contournement (kV) et l'angle de contact des gouttes d'eau ($^{\circ}$) pour les trois surfaces des isolations.....	67
Figure. IV. 18 : Variation de la tension appliquée (de contournement, d'expulsion de la première et de la dernière goutte) (kV) en fonction de volumes d'eau (μL)	68
Figure. IV. 19 : Rapport de tension (%) par rapport à la tension appliquée (de contournement, d'expulsion de la première goutte, de la dernière goutte et de la moitié des gouttes) (kV)	69

Liste des tableaux

LISTE DES TABLEAUX

Tableau.I.1 : Isolateurs en polymère commerciaux de première génération.....	13
Tableau.I.2 : Critères de classification de l'hydrophobicité.....	15
Tableau.II.1 : Degrés de pollution selon la norme CEI 60664-1.....	19
Tableau.II.2 : Tableau récapitulatif des principales sources de pollution et leurs classifications.....	20

Liste des abréviations et des symboles

LISTE DES ABBRVIATIONS ET DES SYMBOLES

HT : Haute Tension.

CD : Ligne de fuite.

LC : Ligne de contournement.

CE : Epoxys Cycloaliphatique.

EPR*: Ethylene Propylène Rubber.

SIR**: Silicone Rubber.

STRI: Swedish Transmission Research Institute.

EPDM : Ethylene Propylène Diene Monomer.

UV : Ultra-Violet.

RTV: Room Température Volcanizing.

PDMS: Revêtement Hybrid 'Polydimethylsiloxoné '.

Ldv : Eléctrode sous tension.

Ldg : Terre.

Ldd : Séparant les centres des deux gouttes d'eau.

Lrr : Long des électrodes.

T : Régulateur de tension.

B : Transformateur de test.

R : Résistance de protection.

H : Traversée HT.

F : Diviseur de tension capacitif.

Y : Multimètre.

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie électrique est sans aucun doute été depuis longtemps, l'une des formes d'énergie prédominante dans tous les secteurs de l'industrie, et presque tous les aspects de notre vie, à la maison comme au travail, dépendent de sa disponibilité [1]. Elle conserve sa position privilégiée grâce à la haute tension, qui joue un rôle crucial en permettant son transfert sur de longues distances avec des pertes minimales. Bref, c'est une énergie irremplaçable.

Cependant, sa distribution reste toujours un processus complexe qui nécessite des composants robustes et fiables, parmi lesquels les isolateurs (en verre, silicone, porcelaine ...), qui supportent et séparent les conducteurs à haute tension tout en empêchant les courants de fuite. C'est pourquoi la qualité et la fiabilité de transport d'énergie sont étroitement liées à la performance électrique de ces isolants.

Ces matériaux sont classifiés selon la nature de leur surface, principalement déterminée par un paramètre clé : l'angle de contact de la goutte d'eau, qui influence directement le comportement de l'eau et des polluants recouvrant l'isolateur. En fonction de cet angle, les surfaces peuvent être hydrophiles, hydrophobes ou superhydrophobes.

Pour évaluer la performance électrique des isolations hydrophiles et hydrophobes, plusieurs travaux de recherches ont été menés, tant en laboratoire que sur site. Il a été démontré que les isolations hydrophobes surpassent celles hydrophiles en termes de performance [2]. Cependant, une dégradation fréquente des isolateurs hydrophobes a été observée sous des conditions humides, ce qui a incité les chercheurs à développer des isolations superhydrophobes.

L'objectif principal de ce modeste travail est d'examiner l'influence de l'angle de contact des gouttes d'eau sur la performance électrique de différents types de surfaces isolantes sous haute tension. Pour ce faire, nous avons réalisé une série d'essais sur trois types d'isolants : hydrophiles, hydrophobes et superhydrophobes. Ces essais visaient à observer et évaluer le comportement des gouttes d'eau sur leurs surfaces respectives, puis à comparer les résultats en analysant la performance électrique de chaque isolant.

Pour mener à bien notre recherche et par intérêt méthodologique, nous avons structuré ce mémoire en quatre chapitres :

Un premier chapitre est une revue bibliographique, où nous avons traité des aspects théoriques sur les deux premiers types d'isolateurs, en donnant leurs définition, caractéristiques, évolution dans le temps et quelque causes de déformation.

Dans le deuxième chapitre nous nous sommes focalisés sur la présentation des phénomènes de pollution et leurs conséquences sur la performance des équipements électriques. Et pour une meilleure compréhension, nous avons cité plusieurs travaux de recherche faite dans ce sens.

Nous avons consacré dans le troisième chapitre à la caractérisation des surfaces superhydrophobes, présentant leurs propriétés, leurs types, les techniques de leur préparation, ainsi que pour les domaines d'applications. Nous avons clôturé ce chapitre par un aperçue sur le comportement des gouttelettes d'eau sur ce type de surfaces en tant que isolateur électrique.

Le dernier chapitre est réservé principalement pour l'étude expérimentale, incluant l'interprétation, l'explication et la discussion des résultats obtenus lors de nos essais en laboratoire.

Ce travail se clôture par une conclusion générale qui synthétise l'intégralité du travail réalisé.

Chapitre I

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ISOLATEURS ELECTRIQUES

ELECTRIQUES

I.1 Introduction

Les isolateurs des lignes de transmission aériens peuvent être considérés comme bon marché par rapport à d'autres équipements de Haute Tension 'HT'. Cependant, ces isolateurs jouent un rôle crucial dans la protection des équipements les plus chers qui subsistent le réseau électrique. De plus, un réseau de transmission aérien fiable dépend en partie des isolateurs extérieurs [1]. Cependant, ces isolateurs doivent être conçus non seulement pour résister aux contraintes électriques mais aussi pour tolérer les forces mécaniques appliquées par l'environnement pour remplir avec succès leurs fonctions. Il existe deux principaux types d'isolateurs couramment utilisés dans les réseaux électriques, à savoir Les isolateurs hydrophiles et hydrophobes.

I. 2 Isolateurs à surface hydrophile

Les isolateurs hydrophiles comme le verre et la porcelaine ont été les premiers matériaux isolants utilisés dans les lignes de transmission électrique [2]. Leur utilisation remonte à plus d'un siècle, et leur fiabilité en fait un choix sûr pour ces applications. Les surfaces hydrophiles, sont des substrats à haute énergie de surface qui attirent l'eau et permettent le mouillage de la surface (Figure I. 1). L'angle de contact qui définit le comportement de mouillage des surfaces est généralement une mesure sur ce type de surfaces est inférieur à 90° . Des travaux ont montré que l'angle de contact d'une gouttelette d'eau sur une surface en verre est de 34° et peut varier suivant la taille de la gouttelette [3].

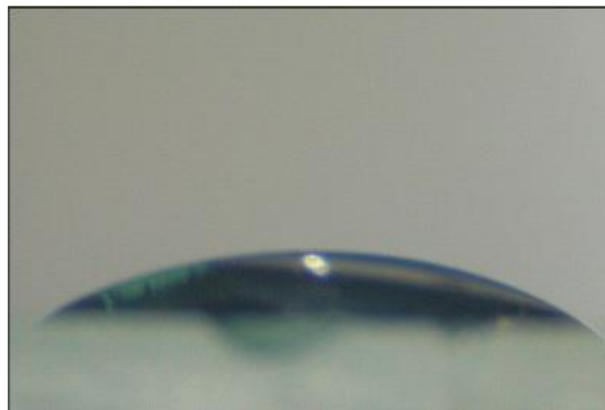


Fig. I. 1 : Comportement d'une gouttelette d'eau sur une surface isolante hydrophile en verre [3]

I.2.1 Evolution des isolateurs hydrophiles

Le verre et la porcelaine ont été initialement utilisés comme matériaux isolants dans les lignes télégraphiques bien avant l'émergence des lignes de transmission d'énergie électrique. Ces isolateurs télégraphiques sont apparus vers 1835 et avaient déjà atteint un stade de développement avancé d'ici 1878, alors que la première ligne de transmission d'énergie électrique n'ont été opérationnelles qu'après 1882 [4].

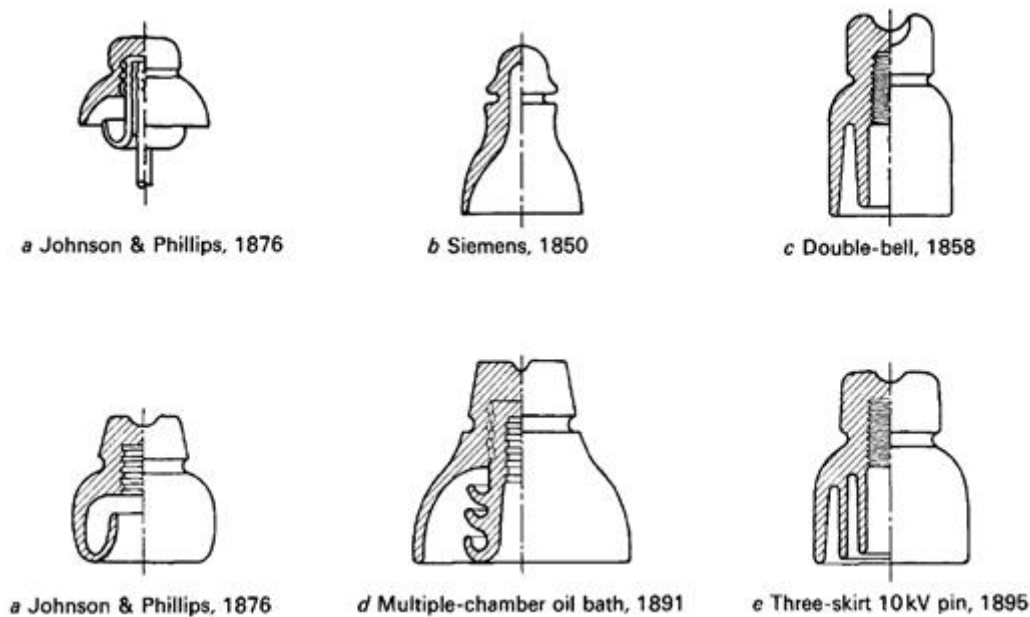


Fig. I. 2 : Isolateurs des lignes de transmission télégraphique [5].

I.2.1.1 Isolateurs à broches unipares

Dans les années 1850, les premiers isolateurs à broches en verre et en porcelaine ont été développés. Les électriciens de l'époque, influencés par l'expérience des lignes télégraphiques, craignaient que la transmission à haute tension soit limitée par des fuites électriques à la surface des isolants humides. La ligne Willamette Falls utilisait un isolant liquide CD 180 comportant une coupelle d'huile interne. L'idée était que cette couche d'huile interromprait le chemin de fuite sur la surface en verre entre le fil de liaison et la broche [6]. La conception de l'isolateur pour les lignes de transmission d'énergie électrique, n'étaient que de simples copies à grande échelle à ceux des lignes télégraphiques. Les contraintes électriques et mécaniques auxquelles les isolateurs télégraphiques devaient résister étaient manifestement négligeables par rapport à celles liées aux lignes électriques. Les nouvelles exigences ont rapidement mis en évidence de graves défauts à la fois dans les matériaux et dans la conception de l'isolateur. En particulier, la perforation des céramiques sous contraintes électriques, due à des défauts ou des fissures, engendrées par une dilatation thermique différentielle ou des effets corrosifs dans le métal ou

le ciment, ainsi que le contournement provoqué par l'accumulation de saleté combinée à l'humidité, ont tous souligné la nécessité d'une évolution dans les méthodes de conception et de fabrication des isolateurs [5].



Fig. I. 3 : Type d'isolateurs à broches en 1890-1897 [6].

I.2.1.2 Isolateurs à broches en plusieurs parties

Les premiers isolants étaient de qualité plutôt médiocre et les échecs étaient fréquents. À mesure que les tensions de transmission augmentaient au-dessus de 20 kV, il s'est avéré que les types à broche unique ne convenaient plus et des isolateurs de type broche en porcelaine en plusieurs parties, constitués de deux ou plusieurs coques vitrées ou cimentées ensemble ont été développés et appliqués [6]. Une ligne de transmission de 55 kV a été construite et exploitée avec succès aux États-Unis en 1902 à l'aide d'isolateurs en porcelaine en plusieurs parties. Le seul matériel de connexion requis pour ces premiers systèmes était le fil de liaison pour attacher le conducteur aux isolateurs. Ce type de construction tel que Le M-3250 produit par Thomas et M-2795, M-2998 produit par Fred Locke a continué à être utilisé pour des tensions de transmission jusqu'à 90 kV (Figure I. 4). Cependant, ces isolateurs devenaient déjà trop grands pour être utilisés pour des tensions de transmission supérieures à 100 kV et devenaient rapidement impraticables pour une utilisation sur les lignes de transmission [7]. Les isolateurs fonctionnaient bien lorsque le temps était sec ou après qu'une bonne pluie avait nettoyé les surfaces. Mais le brouillard était mortel. Le courant électrique ramperait sur la surface humide et chaufferait le soufre utilisé pour cimenter le dessus en porcelaine au fond en verre. Le soufre fondu a coulé sur la traverse, y mettant le feu et brûlant souvent tout le poteau. Le problème était particulièrement grave le long des routes poussiéreuses et à proximité de sources de pollution [6].



Fig. I. 4 : isolateurs à broches en plusieurs parties [8].

I.2.1.3 Isolateurs de suspension

Après deux décennies de combats avec des isolateurs à broches, l'industrie était bloquée. L'augmentation de la tension électrique imposait des isolants de plus grande taille et de poids plus élevé. Cependant, cette évolution conduisait à des défis de manipulation, les plus gros isolateurs devenant trop lourds pour la plupart des monteurs de lignes [9]. L'ère des isolateurs et du matériel de suspension modernes a vraiment commencé en 1903 avec l'invention du premier isolateur de suspension au monde par Fred Locke, fondateur de la société Locke Insulator Mfg. [7]

Les premiers isolateurs de suspension étaient similaires à ceux utilisés aujourd'hui, à une différence près : ils étaient rigides plutôt qu'articulés, avec chaque goupille d'isolant attachée directement au capuchon de l'isolateur.

Lorsque les isolateurs de suspension sont apparus pour la première fois, les ingénieurs des lignes de transmission ont improvisé les connecteurs et les attaches des conducteurs à partir de morceaux de conducteurs en cuivre toronnés reliés par des pinces à câble métallique.

Bientôt, les isolateurs à suspension rigide disparaissaient entièrement au profit des nouveaux isolateurs de suspension à connexions flexibles connus alors sous le nom de type "Buck-Hewlett", plus tard simplement sous le nom de "Hewlett", ceux-ci sont apparus pour la première fois vers 1907. En suite, Fred Locke a développé la connexion d'isolateur de suspension à chape. Celles-ci sont devenues presque universellement acceptées en 1915, de nombreuses installations réalisées en fournissent un service satisfaisant. L'isolateur avait des liaisons de connexion en cuivre ou en acier forgé à bout boutonné couplées par des raccords en bronze ou galvanisés. [10]

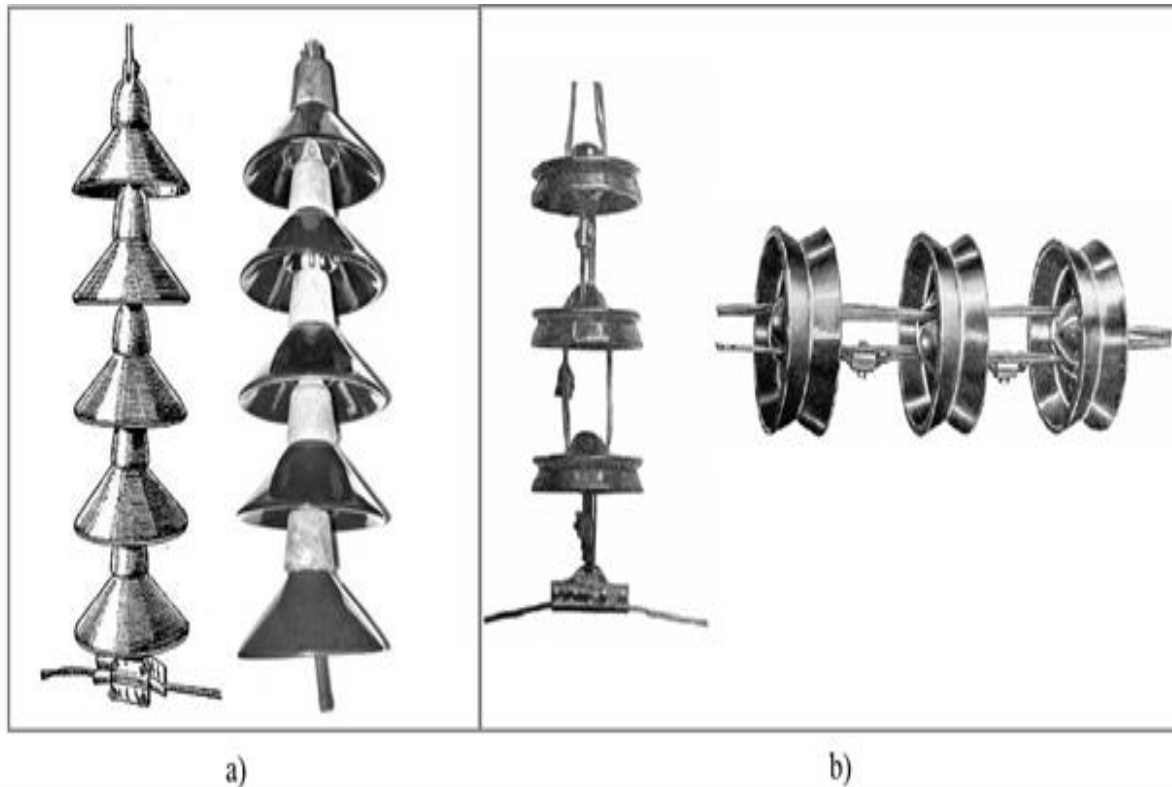


Fig. I. 5 : Les premiers isolateurs de suspension, a) : fabriqué par Fred Locke, b) : fabriqué par Hewlett

La fabrication des isolateurs de type suspension, universellement utilisé pour soutenir les lignes de transmission, ce fut une étape cruciale dans la conception des isolateurs cap-and-pin. La caractéristique unique de cette conception est qu'elle convertit une charge de traction appliquée en une contrainte de compression radiale sur le diélectrique céramique. Plusieurs de ces modèles, ont été produits en quantités commerciales 1910 à 1935 (Figure I. 6). [5] Mais les fabricants en savaient peu sur la conception d'isolateurs pour résister à la contrainte électrique de la haute tension. Ils ont souvent simplement suivi les désirs du client. Les tensions de transmission électrique ont augmenté à un rythme rapide. Ce n'est que lorsque plusieurs lignes ont subi des pannes d'isolateurs anormales. Ils ont découvert que le ciment utilisé pour assembler les isolateurs se dilatait beaucoup plus que la porcelaine, ce qui entraînait une force qui fissurait et faisait souvent éclater l'isolant. [11]

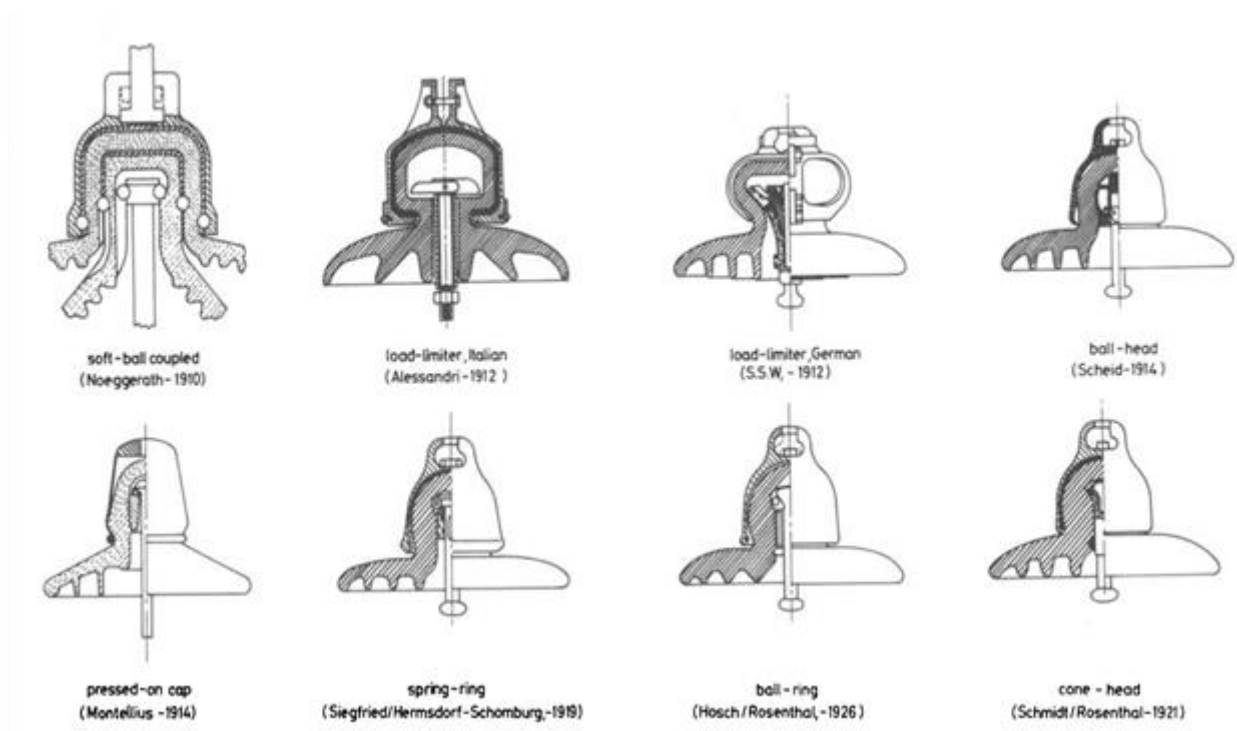


Fig. I. 6 : Quelques alternatives aux broches cimentées, de 1910 à 1935. Plusieurs de ces modèles ont été produits en quantités commerciales.

Ce n'est que en 1962, après avoir reconnu que les performances de l'isolant pouvaient être prédites à partir d'essais en laboratoire, que les formes étaient d'abord examinées scientifiquement et comparées dans des ordres de mérite reproductibles. L'agent principal était le Salt Fog Test [12], dont l'une des conséquences était l'abandon de plusieurs formes fantaisistes, y compris des poteaux et des disques hélicoïdaux, qui avaient été conçus sur de fausses hypothèses physiques et étayés par des tests invalides comme la procédure de pluie artificielle. L'isolant à vitrage résistif ou stabilisé a été introduit pendant cette période et a donné d'excellentes performances, aussi bien en pollution artificielle que réelle. [13-14-15]

I.2.2 Performances des isolateurs hydrophiles

I.2.2.1 Performances des isolateurs hydrophiles en porcelaine

La porcelaine a été le matériau isolant prédominant depuis les débuts des systèmes d'alimentation électrique. Ce matériau inorganique présente une forte liaison intermoléculaire entre ses composants, ce qui lui confère une longue durée de vie. Les isolants en porcelaine bénéficient d'une technologie bien établie et d'une longue expérience opérationnelle, démontrant leur résistance à la dégradation par l'activité de décharge de surface. Cette stabilité élevée est le résultat des matériaux céramiques présentant des performances mécaniques élevées [16-17-18-19].

Par conséquent, une ligne de fuite suffisante et des géométries de hangar complexes sont nécessaires lors du fonctionnement dans des conditions humides et contaminées ; autrement, une ligne de contournement (LC) non contrôlée s'écoulera en raison de la surface hydrophile inhérente des matériaux inorganiques [20]. Cette LC incontrôlée peut conduire à un contournement [5, 21].

La Figure I. 7 montre une forme typique d'isolateurs en porcelaine à capuchon et à broche, avec les composants essentiels : (une coque en porcelaine émaillée pour former une surface lisse, un capuchon et une broche en acier galvanisé), tous assemblés avec du ciment. Ces isolateurs sont couplés en série afin de former une chaîne de lignes de fuite nécessaire pour une tension de spécifique du système.

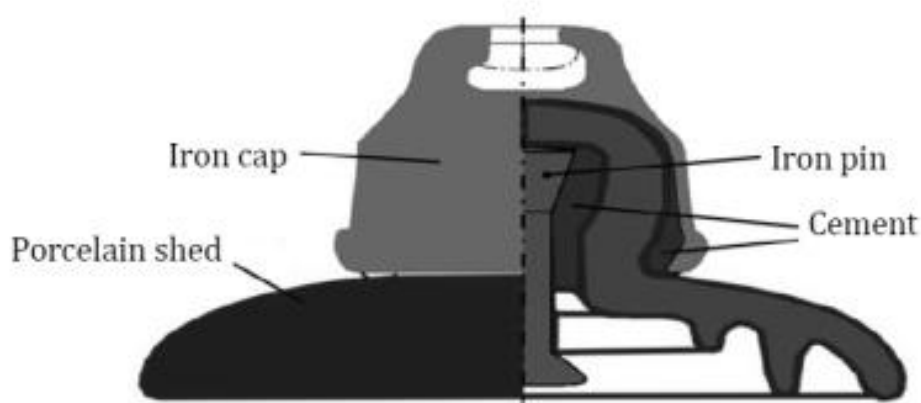


Fig. I. 7 : Isolateurs en porcelaine à capuchon et à broche (Cap-Pin) standard.

I.2.2.2 Performances des isolateurs hydrophiles en verre

Le verre est un alliage dur, fragile (cassant) et transparent à la lumière visible. C'est un matériau amorphe qui présente un désordre structural important. Au sens chimique et physique, le verre n'est pas un solide, mais plutôt un liquide solidifié. Les molécules sont totalement désordonnées et ne forment pas de réseau cristallin. Cet état est souvent cité comme étant la raison de la transparence de ce matériau [22].

Les isolants en verre (Figure I. 8) ont une surface qui présente des propriétés mécaniques améliorées par rapport aux isolateurs en porcelaine à capuchon et broches [5]. Les matériaux vitreux additionnés d'oxydes semi-conducteurs fournissent une résistivité de surface bien définie de l'ordre de plusieurs mégohms. Cependant, le verre a un point de fusion inférieur à celui de la porcelaine, ce qui le rend plus vulnérable à l'érosion de surface due à la chaleur produite par les décharges de surface [20].



Fig. I. 8 : Isolateurs en verre Cap-Pin.

I.2.3 Fissuration radiale due à la croissance du ciment

Les pannes électriques dans de nombreux isolateurs de suspension sur les lignes de transmission et de distribution sont souvent dues à des fissures radiales dans les coques des isolateurs. Ces fissures se trouvent généralement cachées dans la section de tête de l'isolateur, comme illustré dans la figure I. 9(a), bien qu'elles puissent parfois être visibles dans la coque de l'isolateur, comme indiqué dans la figure I. 9(b).

Une analyse approfondie et des tests en laboratoire ont révélé que les fissures sont causées par une force d'expansion générée par le ciment isolant. Cette expansion volumique est le résultat de l'utilisation d'un ciment inapproprié dans l'assemblage de l'isolateur, qui peut prendre dix ans ou plus avant de se manifester sur le terrain. Une diminution de la résistance mécanique de l'isolateur est également observée en association avec la dilatation du ciment [23].

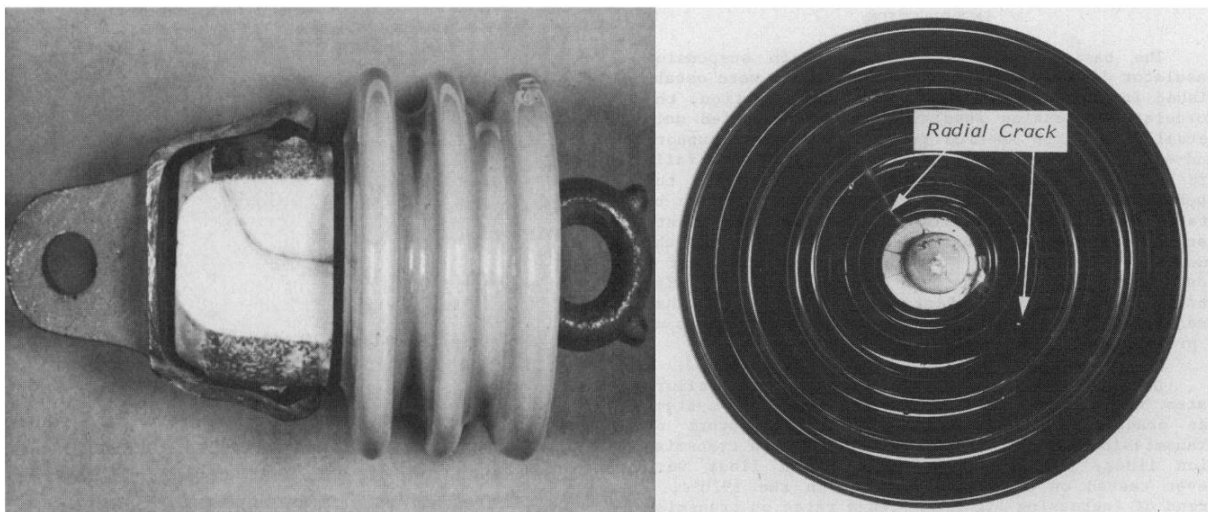


Fig. I. 9 : Fissure radiale visible dans : a) la tête d'un isolant. b) la coque d'un isolant de suspension. [23]

I.2.4 Effet de corrosion des matériaux

Une décharge par effet corona peut survenir en raison d'une gradation de contrainte électrique inappropriée près de l'extrémité de ligne d'une chaîne d'isolateurs, au niveau du capuchon de l'isolateur. Ensuite, le capuchon métallique est exposé à la corrosion alors que la décharge dégrade progressivement la couche de galvanisation protectrice. En parallèle, un courant de fuite peut circuler à la surface de l'isolant en présence de contamination et de conditions atmosphériques humides, formant ainsi une solution saline à la surface. La corrosion des broches, causée par l'action électrolytique, peut affaiblir la résistance mécanique et transversale de la broche. De tels dommages peuvent entraîner un événement grave, comme la chute d'un conducteur. La figure I .10 illustre un exemple de matériel présentant un niveau de corrosion très élevé.

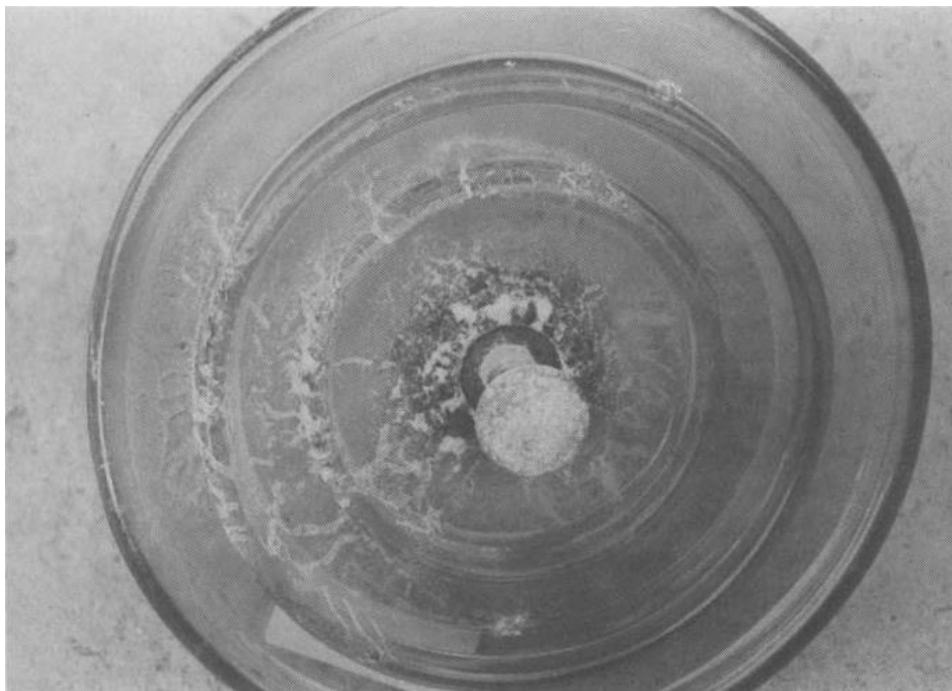


Fig. I. 10 : Erosion du verre isolant 6

I. 3 Isolateurs à surface hydrophobe :

L'hydrophobie se réfère à la non-solubilité dans l'eau. Un composé est qualifié d'hydrophobe lorsqu'il repousse l'eau ou est repoussé par elle.

Ces dernières années, l'utilisation des isolateurs hydrophobes dans les réseaux de transport et de distribution d'électricité a été observée en raison des nombreux avantages qu'ils présentent par rapport aux isolateurs hydrophiles, tels qu'une grande résistance à la contamination, une légèreté accrue et une bonne résistance mécanique, etc. [24].

Contrairement aux surfaces hydrophiles, les surfaces hydrophobes se démarquent par leur capacité élevée à repousser l'eau, connue sous le nom d'hydrophobicité : l'eau ne pénètre pas les isolations, mais perle à la surface. Ces surfaces se caractérisent par un angle de contact élevé d'une goutte d'eau déposée sur celle-ci. Des études ont démontrées que l'angle de contact d'une goutte d'eau sur une surface d'élastomère silicone hydrophobe peut varier entre 95° et 105° en fonction de la taille de la goutte (Figure I. 11) [25].

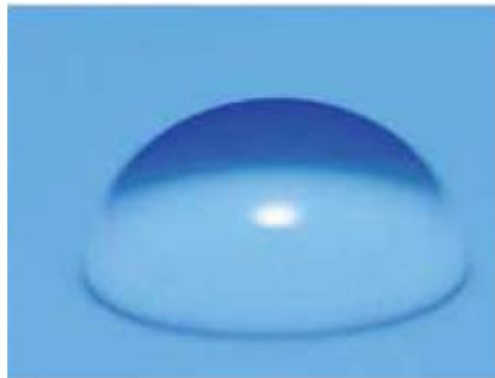


Fig. I. 11 : Comportement d'une goutte d'eau sur une surface isolante hydrophobe (silicone) [25]

I.3.1 Evolution des isolateurs hydrophobes

Les premiers polymères utilisés pour l'isolation électrique étaient le bisphénol et les résines époxy cycloaliphatiques. Le résine époxy bisphénol a été introduite sur le marché au milieu des années 1940 [26] et a été le premier polymère utilisé pour l'isolation électrique, restant encore aujourd'hui un choix courant pour les isolants électriques destinés aux applications intérieures. Les époxys cycloaliphatiques (CE) ont été introduits en 1957 [27], avec leur utilisation pour l'isolation extérieure démarrant en Angleterre en 1963 [28]. Ils surpassent le bisphénol en raison de leur meilleure résistance à la formation de carbone [29]. Cependant, les premiers isolateurs CE commerciaux installés aux États-Unis ont rapidement tombés en panne après leur installation dans des environnements extérieurs. Depuis lors, de nouvelles formulations de CE ont été développées pour améliorer les performances électriques.

Au début des années 1960, les isolateurs de classe de distribution (CE) ont été introduits pour la première fois sur le marché américain sous le nom de GEPOL [30]. Cependant, ces unités ont connu des échecs en raison de dommages de surface et de perforations [29]. Par la suite, le CE a été utilisé dans des traversées expérimentales de disjoncteurs de stations de 500 kV [31], ainsi que dans des traversées de 115 kV dans les années 1970, et pour les isolateurs de suspension par le biais du développement de la transmission limitée (TDL) en Angleterre. Les isolateurs à suspension TDL ont utilisé des hangars inclinés pour favoriser un lavage naturel de la contamination. À partir du milieu des années 60, les isolateurs 'CE' ont été soumis à des tests

de tension de service pouvant atteindre 400 kV au Royaume-Uni, où ils ont été utilisés comme isolateurs de suspension/déformation et bras transversaux [32]. Cependant, pour diverses raisons telles que de mauvaises performances à froid et une réduction de poids insuffisante, le CE n'a pas été largement adopté aux États-Unis pour les isolateurs de suspension haute tension extérieurs. Néanmoins, de nos jours, le CE est utilisé dans les systèmes d'alimentation intérieurs voire semi-fermés.

Dans les années 1960, un isolant composé de hangars en porcelaine soutenus par une tige en fibre de verre en résine époxy a été mis au point. Cependant, son utilisation n'a pas été généralisée en raison de l'évolution des matériaux isolants polymères plus légers. Dès 1964, des isolateurs extérieurs en polymère pour les lignes de transmission ont été développés en Allemagne [33], ainsi que par d'autres fabricants en Angleterre, en France, en Italie et aux États-Unis. En Allemagne, des unités destinées aux essais sur le terrain ont été fournies dès 1967. À la fin des années 1960 et au début des années 1970, les fabricants ont lancé la première génération d'isolateurs polymères commerciaux pour lignes de transmission (voir le tableau 1).

Tableau.I.1 : Isolateurs en polymère commerciaux de première génération [34]

Entreprise	Matériau	Année	pays
Ceraver	EPR*	1975	(France)
Ohio Brass	EPR	1976	(USA)
Rosenthal	SIR**	1976	(Germany)
Sediver	EPR	1977	(USA)
TDL	CE	1977	(England)
Lapp	EPR	1980	(USA)
Reliable	SIR	1983	(USA)

* EPR Ethylene Propylène Rubber

** Silicone Rubber

I.3.2 Structure des isolateurs hydrophobes

L'idée fondamentale consiste à fusionner divers matériaux qui peuvent répondre, grâce à la combinaison de leurs propriétés spécifiques, aux différentes fonctions remplies par les isolateurs.

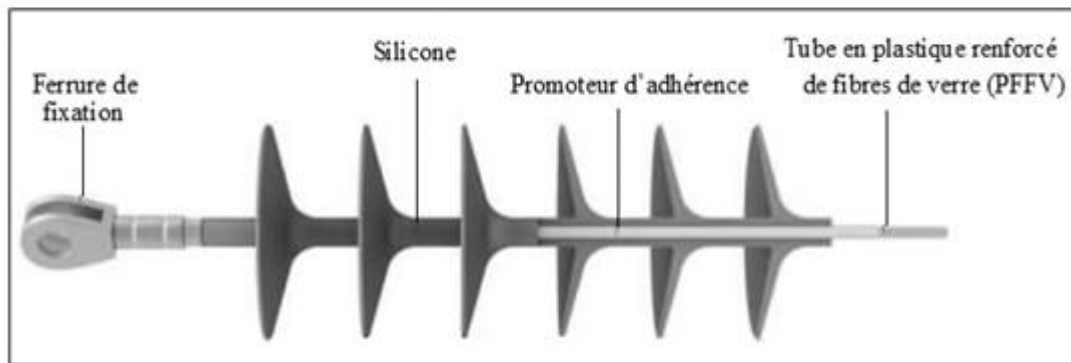


Fig. I. 12 : Détails de construction d'un isolateur composite

Un isolateur composite se compose principalement d'une partie isolante comprenant un noyau interne fabriqué à partir d'un matériau approprié, d'un revêtement extérieur, et d'une partie métallique solidaire du noyau et qui permet de transmettre la charge mécanique et assurer la fixation de l'isolateur au pylône, au conducteur ou à un autre isolateur (voir Figure I. 12) [35-36].

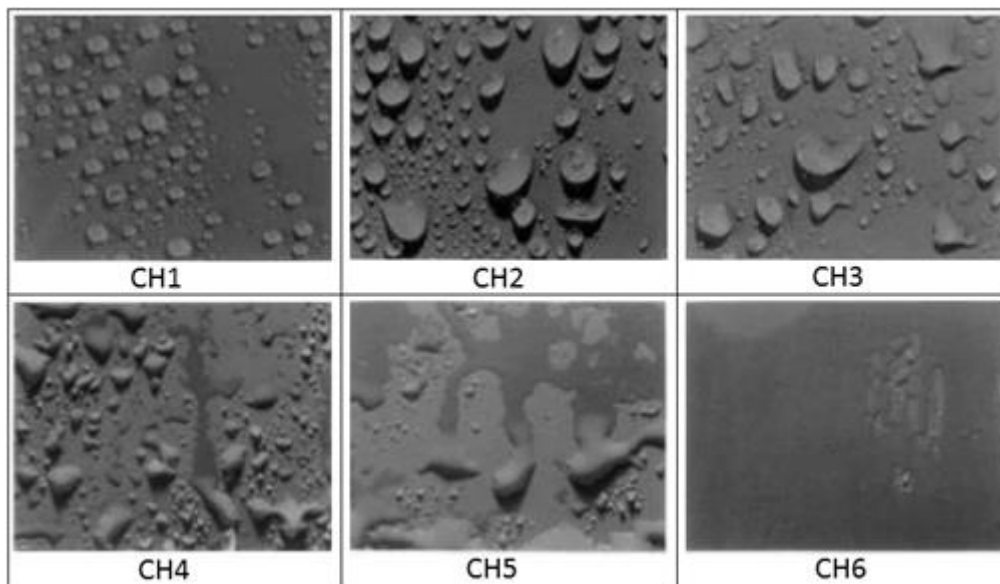
Les isolateurs composites offrent une excellente hydrophobicité, ce qui les rend particulièrement adaptés aux zones fortement polluées et aux environnements urbains où ils sont plus résistants au vandalisme [34].

I.3.3 Classification de l'hydrophobicité

Une méthode couramment utilisée pour évaluer l'état hydrophobique d'une surface est l'utilisation du guide des classes d'hydrophobicité établi par le STRI (Swedish Transmission Research Institute). Ce guide fournit une mesure manuelle simple des propriétés hydrophobes de l'isolant. Le degré de mouillabilité d'une surface est classé en sept catégories (HC-1 à HC-7), HC-1 étant la classe la plus hydrophobe et HC-7 la plus hydrophile. Cette méthode implique de maintenir une surface diélectrique inclinée à 35 degrés par rapport à l'horizontale, puis de pulvériser de l'eau sur celle-ci. Après la pulvérisation, la surface est laissée en repos pendant 45 secondes avant de prendre des clichés pour comparaison avec le guide STRI et attribuer une classe d'hydrophobicité entre HC-1 et HC-7. Chaque classe est caractérisée par des paramètres décrits dans le Tableau 1.1 et son apparence est illustrée dans la (Figure I. 13). Le guide STRI a été inclus dans les spécifications techniques de la CEI sous la référence IEC TS 62073.

Tableau.I.2 : Critères de classification de l'hydrophobicité [37]

CH	Description
1	Les gouttes sont formées discrètes $\Theta \approx 80^\circ$ ou plus pour la majorité des gouttes.
2	Les gouttes sont formées discrètes $50^\circ < \Theta < 80^\circ$ ou plus pour la majorité des gouttes.
3	Habituellement, elles ne sont plus circulaires.
4	Zones complètement mouillées. Ensemble, elles couvrent moins de 90% de la zone d'essai. Des gouttes discrètes et des traces mouillées provenant des canaux d'eau.
5	Certaines zones complètement mouillées, qui couvrent moins de 90% de la zone d'essai.
6	Les zones mouillées couvrent plus de 90% de la zone d'essai.
7	Film d'eau continu sur toute la zone testée.

**Fig. I. 13** : Classe d'hydrophobicité suivant le guide STRI

I.3.4 Hydrophobicité des surfaces isolantes

La propriété hydrophobe d'un matériau isolant revêt une importance capitale lorsqu'il s'agit des performances opérationnelles de l'équipement électrique. Sur une surface hydrophobe, aucun film d'eau ne se forme, ce qui entraîne un faible courant de fuite entre la haute tension et l'électrode de masse. Par conséquent, les surfaces polymères hydrophobes contribuent à prolonger la durabilité des matériaux isolants. Cette caractéristique particulière

des polymères diélectriques garantit l'hydrophobicité de l'isolateur en service. L'hydrophobicité des matériaux polymères peut influencer leur performance, en particulier dans des conditions d'humidité et de pollution [38] [39] [40].

I.3.5 Perte de l'hydrophobicité

Les études sur le terrain et en laboratoire ont révélé que les surfaces isolantes en silicone et en EPDM perdent leur hydrophobicité initiale et deviennent hydrophiles lorsqu'elles sont soumises aux arcs au niveau des bandes sèches. L'exposition à l'humidité, à la pluie ou à la pollution provoque également la perte d'hydrophobicité de ces surfaces en raison de la diffusion des chaînes moléculaires de faible masse. Cependant, le silicone peut retrouver son hydrophobicité dans certaines conditions. Plusieurs travaux de recherche se sont concentrés sur la perte et le rétablissement de l'hydrophobicité des matériaux composites [40] [41] [42] [43]. La perte et le rétablissement de l'hydrophobicité causés par l'exposition des diélectriques composites aux décharges partielles (corona ou plasma) ont été l'objet de nombreuses recherches. Les traitements au plasma ont été utilisés pour améliorer l'hydrophobicité de l'élastomère de silicone afin d'assurer une meilleure compatibilité avec d'autres matériaux. Dans ces domaines, la restauration de l'hydrophobicité est considérée comme un défi, et de nombreux efforts ont été déployés pour élucider le mécanisme fondamental sous-jacent. La complexité de l'exposition aux décharges corona et plasma est due en partie au fait que le polymère est simultanément soumis à un mélange d'espèces énergétiques et de rayonnement (tels que les électrons, les ions et l'ozone), ce qui entraîne un grand nombre de réactions.

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état d'art sur l'évolution des isolateurs électriques, depuis leur utilisation pour la première fois dans les lignes télégraphiques, jusqu'à ce jour. Il en résulte que, la performance électrique des isolateurs des lignes aériennes de transmission d'énergie électrique est souvent affectée par leurs propriétés de surface. Les isolateurs hydrophiles, ayant une affinité élevée pour l'eau et un faible angle de contact, diffèrent des isolateurs hydrophobes qui repoussent l'eau avec un angle de contact élevé. Ces caractéristiques influencent significativement les applications et les performances de ces matériaux, notamment en termes de mouillabilité, d'adhésion et de résistance à l'humidité.

Chapitre II

CHAPITRE II : L'EFFETS DES GOUTES D'EAU ET DE LA POLLUTION SUR L'ISOLATTEUR

II.1 Introduction

La pollution représente un défi majeur à prendre en compte, car lorsque les polluants se déposent sur une surface isolante, ils forment des couches de rejets qui la recouvrent, entraînant ainsi une importante diminution de sa résistivité superficielle. Cela peut conduire à des phénomènes de contournement. Dans les zones fortement polluées, l'humidité, qu'elle soit sous forme de rosée, de brouillard ou de pluie, provoque la formation d'un film conducteur uniforme sur les surfaces hydrophiles des isolateurs en céramique, ou de gouttes d'eau contaminées sur les surfaces hydrophobes. Le dimensionnement approprié des isolateurs est donc essentiel pour garantir la fiabilité et la qualité de l'isolation à haute tension [44].

II.2 Pollution

La pollution est une contamination de l'environnement par des molécules ou des particules, qui résultent des activités humaines [45]. Celle-ci engendre une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en totalité ou en partie comme le sous-produit de l'action humaine

Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou au travers des ressources en produits agricoles, en eau, et autres produits biologiques.

II.2.1 Salinité

La salinité est définie comme la concentration du sel dans l'eau. Elle correspond à la masse de sel divisée par le volume de la solution, généralement exprimée en kg/m^3 .

Les sols sont considérés salins dès que la conductivité électrique dépasse 1mS/cm à 25°C [46].

II.2.2 Couches de pollution

C'est une couche conductrice électrolytique mise sur la surface de l'isolateur. Elle dépend du climat et des facteurs météorologiques des régions [47,48]. Celle-ci peut apparaître sous forme de poussières de terre, sable ou encore de l'engrais tout dépend du positionnement des lignes électriques.



Fig. II. 1 : Couche de pollution sur des isolateurs en silicone et en verre [49]

II.2.3 Degré de pollution

La norme CEI 60664-1 définit 4 degrés de pollution. Afin d'évaluer les lignes de fuite et les distances d'isolement, les quatre degrés de pollution suivants sont définis pour le microenvironnement:

Tableau.II.1 : Degrés de pollution selon la norme CEI 60664-1.

Degré de pollution	Description
1	Il n'existe pas de pollution ou il se produit seulement une pollution sèche, non conductrice. La pollution n'a pas d'influence.
2	Il ne se produit qu'une pollution non conductrice. Cependant, on doit s'attendre de temps en temps une conductivité temporaire provoquée par de la condensation.
3	Présence d'une pollution conductrice ou d'une pollution sèche, non conductrice, qui devient conductrice par suite de la condensation qui peut se produire.
4	La pollution produit une conductivité persistante causée par la poussière conductrice ou par la pluie ou la neige.

II.2.4 Sources de pollution

Les principales origines de pollution susceptibles d'être rencontrées comprennent la pollution naturelle, qu'elle soit marine ou désertique, ainsi que la pollution industrielle. Cependant, la pollution mixte constitue le principal défi pour les ouvrages électriques, car elle résulte de la combinaison des deux types de pollution, naturelle et industrielle [50].

La composition changeante des agents polluants est influencée par les sources de contamination et les conditions environnementales auxquelles sont exposés les isolants [51]. Conformément à la norme CEI 815 [52], les principales sources de pollution sont répertoriées dans le tableau ci-dessous.

Tableau.II.2 : Tableau récapitulatif des principales sources de pollution et leurs classifications

Origine et classification de la pollution		Types de polluants
Pollution naturelle	Pollution marine	Embruns marins (couche de sel)
	Pollution désertique	Particules de sable, terre, poussière
	Pollution du sol et zones agricoles	Poussières du sol, (pollen, insectes, engrais)
Pollution industrielle		Poussière industrielle, dépôts ferromagnétiques, gaz présent dans les fumées
Pollution mixte		Une combinaison des pollutions précédentes, elle représente le cas le plus nocif.

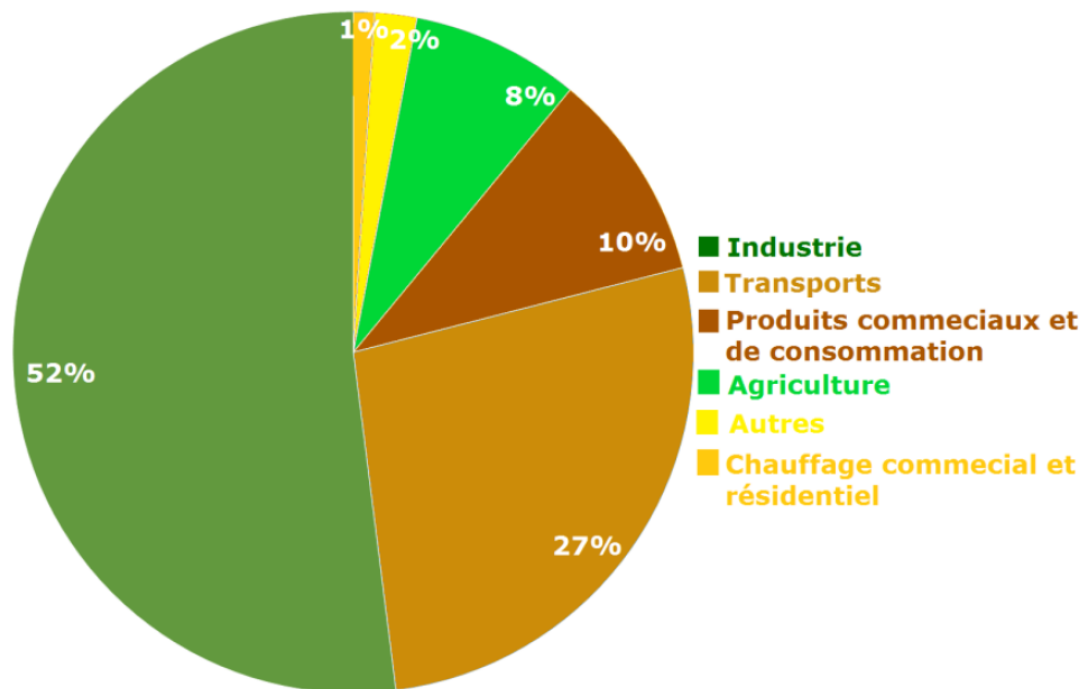


Fig. II. 2 : Secteur de statistique des différentes sources de pollution en fonction de l'origine de celle-ci (1: Chauffage commercial et résidentiel, 2: Autres, 3: Agriculture, 4: Produits commerciaux et de consommation, 5: Transports, 6: Industrie).

II.3 Performance électrique des isolateurs hydrophiles sous pollution

Dans le passé, la méthode utilisée pour évaluer les performances de pollution des isolants était un test d'exposition naturelle. Les isolateurs ont été mis sous tension à la tension de fonctionnement dans un site fortement contaminé et leur performance a été enregistrée. C'est une méthode utile et réaliste, mais elle présente un certain nombre d'inconvénients : le test dure plusieurs mois, les résultats sont comparatifs et les isolateurs à comparer doivent être mis sous tension en même temps, en raison de la variation des conditions météorologiques et de taux de pollution.

C. H. A. ELY et P. J. LAMBETH [53], ont mis au point en 1964, un test des isolateurs de haute tension sous pollution artificielle, tout en simulant l'une des conditions météorologiques naturelles provoquant un contournement, qui ne présente pas les mêmes inconvénients par rapport à la méthode d'exposition à la pollution naturelle.

L'isolant testé est mis sous tension à sa tension de service maximale puis soumis à un brouillard d'eau salée, auquel il doit résister pendant une heure. Ce brouillard est produit par des sprays montés en deux colonnes sur les côtés opposés de l'isolant. La figure II. 3. L'eau salée est atomisée par l'air comprimé en gouttelettes d'une taille similaire à celles d'un brouillard naturel. Les conditions peuvent être aggravées en augmentant la salinité de la solution d'eau salée. Le critère de performance est que l'isolant résistera sans contournement sous la salinité maximale de la solution pendant au moins trois essais sur quatre. Six isolateurs de conceptions différentes ont été utilisés pour comparer les résultats des méthodes d'essai naturelles et artificielles. Les auteurs ont trouvé une similitude entre les résultats des deux méthodes, et ont démontré la validité de la technique de pollution artificielle.

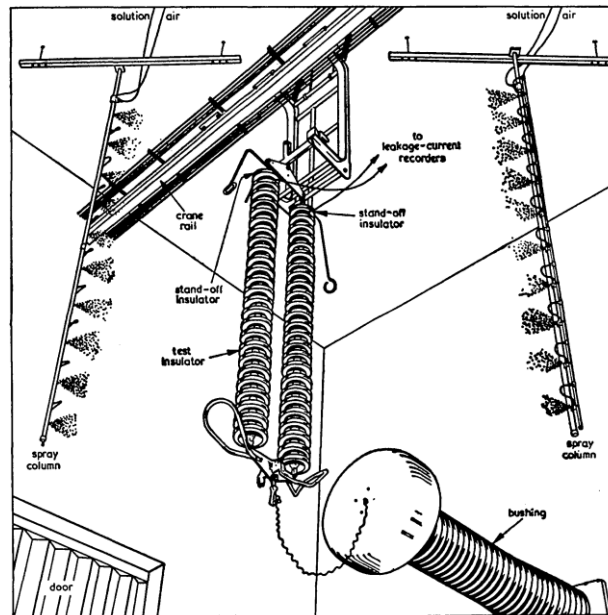


Fig. II. 3 : Dispositif d'essai pour isolateur de suspension 400 kV [53]

Lambeth, P. J., et autres [54], ont montré en 1973, au moyen de comparaisons entre les résultats de laboratoire et les résultats obtenus en milieu naturel, que le comportement des isolants en brouillard salin est très similaire à leur comportement aux conditions naturelles. Ils ont ainsi établi certaines règles fondamentales relatives au comportement des isolants en brouillard salin en fonction de leurs caractéristiques géométriques et de surface (Figure II. 4). L'importance de ces règles est soulignée par rapport au choix, sur une base quantitative, des isolants pour les zones à différents degrés de pollution et des suggestions sont faites quant aux critères et méthodes à adopter pour classer ces zones.

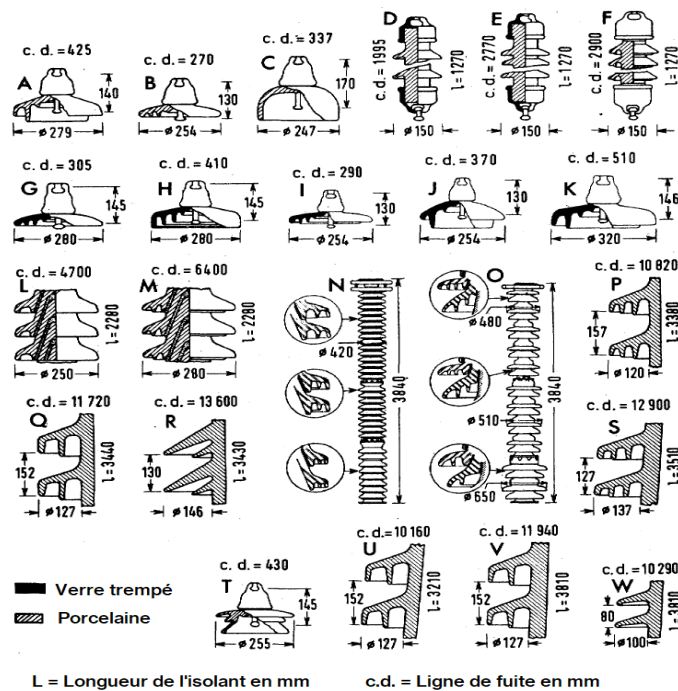


Fig. II. 4 : Principales caractéristiques des types d'isolateurs soumis à l'essai dans le brouillard salin et la pollution naturelle

Sima, W., et autres [55], ont étudié l'effet de la distribution non uniforme de la pollution sur les caractéristiques la tension de tenue d'une chaîne d'isolateurs en céramique XP-70 standard de 14 unités pour lignes de transport de 220 kV. La chaîne isolante est suspendue verticalement dans la chambre climatique et mise sous tension. La contamination est déposée par le brouillard de vapeur généré par une chaudière à vapeur. Ils ont constaté que la répartition non uniforme de la pollution le long de la surface de l'isolant entraîne la diminution de la conductivité de surface équivalente et la différence entre l'hygroscopicité entre les surfaces supérieure et inférieure, ce qui entraîne l'augmentation de la tension de tenue et la diminution de la valeur moyenne de la racine carrée de courant de fuite.

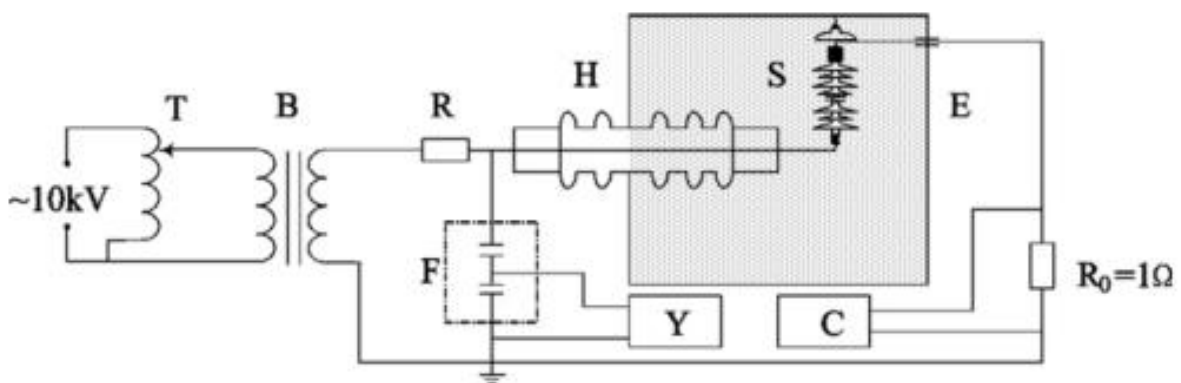


Fig. II. 5 : Circuit d'essai T: régulateur de tension; B: transformateur de test; R: résistance de protection; H: traversée HT; F: diviseur de tension capacitif; Y: multimètre; S: échantillon d'essai C; R0: dispositif de mesure du courant de fuite; E: chambre climatique

F. Bouchelga et all [56] ont effectué des travaux expérimentaux se rapportant à l'effet des décharges électriques parallèles sur la performance d'une isolation en verre non uniformément polluée sous tension continue. Afin de réaliser une telle étude, ces auteurs ont utilisé une isolation plane mise sous conditions d'une distribution transversale non uniforme de pollution. Ils ont opté pour un modèle expérimental correspondant à une plaque en verre dont sa surface est délimitée par deux électrodes planes. La ligne de fuite de celle-ci a été gardée constante et sa largeur est subdivisée en deux zones à conductivité électrique et taille variable. Sa performance électrique a été déterminée séparément en fonction du rapport de leurs conductivités électriques et leurs largeurs respectives. Ces essais ont été appuyés par la visualisation des arcs électriques parallèles se développant simultanément et indépendamment

sur les deux bandes de pollution suscitées. L'installation électrique utilisée dans le cadre de cette étude est illustrée par le schéma de mesure de la tension de contournement (Figure II. 6).

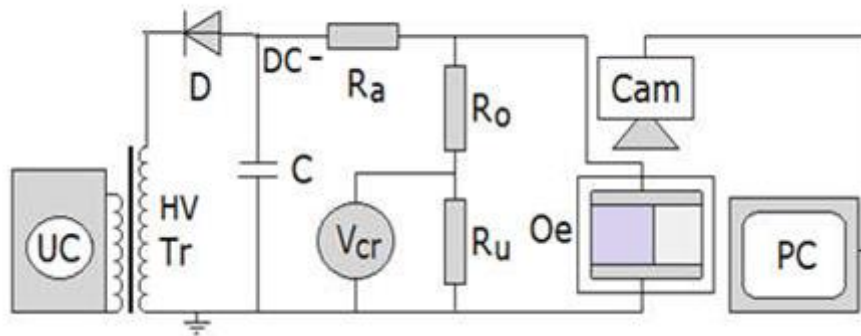


Fig. II. 6 : Schéma de mesure de la tension de contournement de l'isolation polluée et de visualisation des décharges électriques résultantes

R. Boudissa [57], a étudié l'effet de la catégorie de distribution de pollution sur le contournement des isolateurs sous tension alternative. Dans ce cadre, trois catégories de non uniformité de répartition: transversale, longitudinale périodique et non périodique ont été investiguées sur des isolateurs de laboratoire et réels illustrés par la figure II. 7.

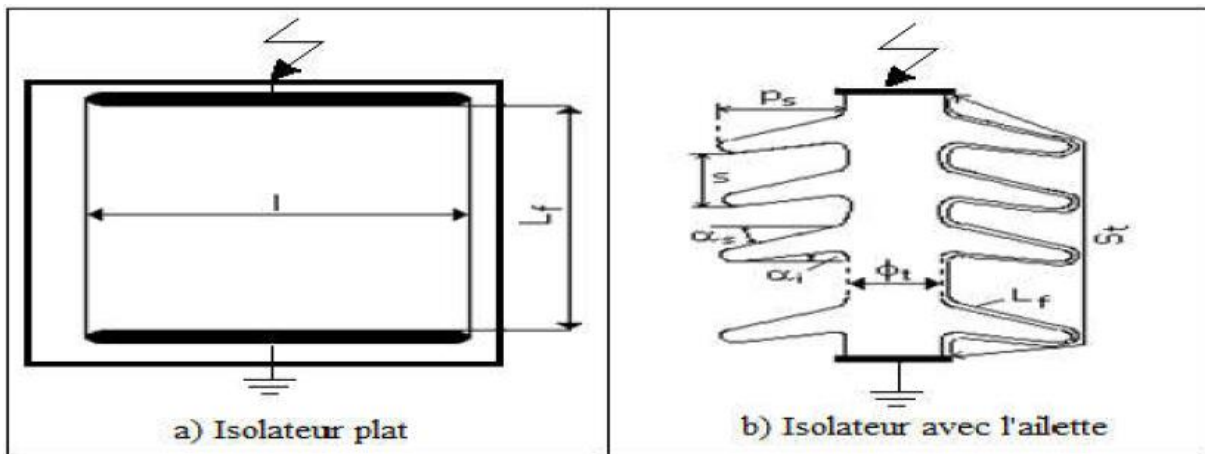


Fig. II. 7 : Modèles et grandeurs caractéristiques des isolateurs utilisés (L_f : longueur de la ligne de fuite, l : largeur totale de l'isolation, S_t : longueur d'arc minimale, α_s : inclinaison de la face supérieure de l'ailette, α_i : inclinaison de la face inférieure de l'ailette, p_s : portée de l'ailette, s : pas de l'ailette, ϕ_t : diamètre du tronc de l'isolateur)

Les résultats de la première catégorie montrent que la tension de contournement pour les isolateurs pollués avec une répartition transversale non uniforme est 21 % plus élevée que celle obtenue avec une pollution uniforme. Dans le cas d'une distribution périodique de pollution longitudinale (deuxième catégorie), la tension d'éclatement maximale d'une surface isolante est jusqu'à 30 % plus basse que celle obtenue avec une pollution uniforme. La troisième catégorie révèle l'existence d'une tension alternative minimale, estimée à 42 % de celle observée lorsque les isolateurs sont uniformément pollués.

La visualisation du phénomène électrique montre que la tension seuil minimale peut être due à un raccourcissement maximal de la partie légèrement polluée de la distance de fuite de l'isolateur avant l'éclatement complet. La séparation de l'arc précurseur électrique de la surface de la zone légèrement polluée de l'isolateur testé peut s'expliquer par la prédominance de la force thermique de répulsion sur la force électromagnétique d'adhérence de l'arc sur la surface contaminée de l'isolateur.

Les auteurs ont conclu que c'est toujours la surface de la zone fortement polluée qui est souvent contournée par une décharge électrique indépendamment du rapport des conductivités examinées. La zone fortement polluée est dotée d'une conductivité très grande et par conséquent une résistance de la couche de pollution recouvrant sa surface plus faible. Ceci explique son court-circuit très fréquent par l'arc électrique de contournement de cette zone et l'extinction de l'arc évoluant dans la zone faiblement contaminée.

II.4 Performance électrique des isolateurs hydrophobes sous pollution

F. Aouabed [58] s'est intéressée dans son travail à la quantification de l'effet du nombre de gouttes d'eau, leur conductivité électrique et la localisation d'une zone sèche au niveau d'une surface isolante en silicone hydrophobe sur sa performance électrique sous tension alternative (Figure II. 8). La position et la largeur des bandes sèches sur la tension de contournement de la surface isolante en silicone. Ces tests ont été effectués sur plusieurs échantillons d'un matériau en silicone sur lesquels ont été déposés deux électrodes pointe - pointe.

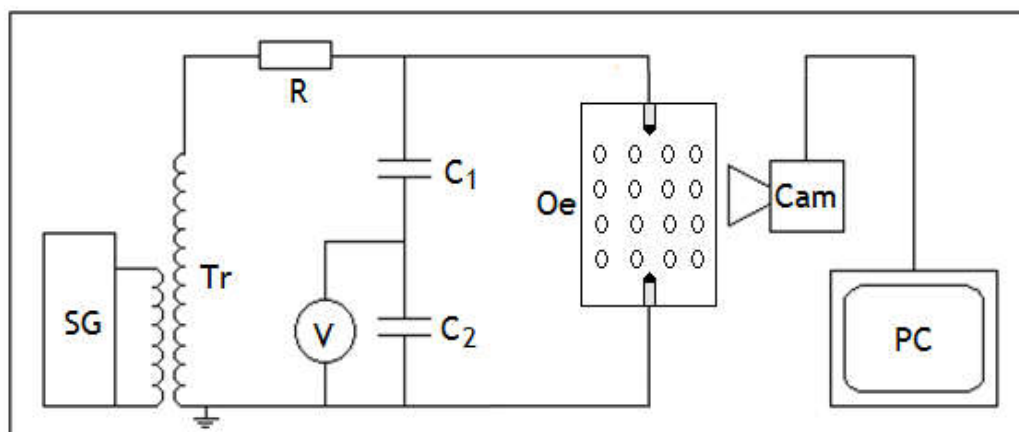


Fig. II. 8 : Schéma de mesure de tension de contournement et de visualisation de la décharge électrique (Tr: Transformateur, SG: Appareil de commande de la tension, Oe: Objet d'essai, Cam: Caméscope, PC: Ecran Ordinateur)

Les essais sont effectués sur un modèle plan simulant l'isolateur plat en silicone. Celui-ci est constitué d'une plaque en silicone de dimensions 8 cm x 12 cm x 0,5 cm, sur laquelle sont posées deux électrodes pointues, l'une mise à la terre et l'autre sous haute tension. Leur diamètre

est de 0,5 cm et leur rayon de courbure est égal à 0,5 mm. La distance entre les extrémités des deux électrodes est de 6 cm (Figure II. 9). La tension de contournement représente la moyenne arithmétique des dix essais aux quels est soumis chaque échantillon. Le nombre d'échantillons est pris égal à 6. L'intervalle de temps de pause entre deux essais successifs sur une même éprouvette est de 30 mn. Celui-ci a été choisi afin de permettre à l'échantillon essayé de retrouver l'hydrophobie de sa surface. Les valeurs de tension contournement trouvées sont corrigées conformément à la norme CEI 60-1. Les gouttes d'eau de volume égal à $40 \mu\text{l}$ sont déposées à l'aide d'une seringue sur la surface en silicone selon des arrangements caractérisés par le couple de grandeurs variable (a_r , d_g) correspondant à la largeur entre deux rangées successives de gouttes d'eau a_r , et la distance entre deux gouttes d'eau déposées sur la distance d'amorçage entre les deux pointes d_g (Figure II. 9). Le volume des gouttes d'eau ainsi que la conductivité électrique de la solution d'eau utilisée sont gardés constants dans cette étude.

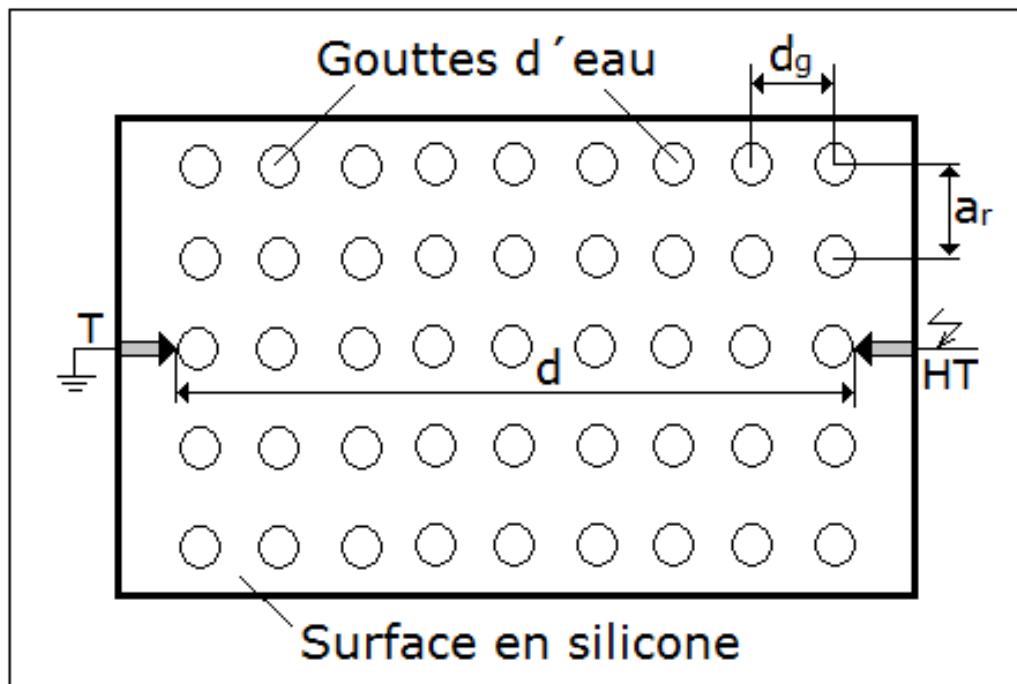


Fig. II. 9 : Arrangement des gouttes d'eau sur une surface en silicone hydrophobe.

L'influence de la conductivité des gouttelettes d'eau sur la valeur moyenne de la tension d'amorçage d'isolateur pour deux différents nombre de rangées. Les résultats obtenus montrent que les valeurs choisies des lignes n'affectent pas significativement la caractéristique $\hat{U}_c = f(\sigma_v)$. La tension de contournement de la surface isolante en silicone hydrophobe diminue dans un premier temps et finit par devenir constante par la suite.

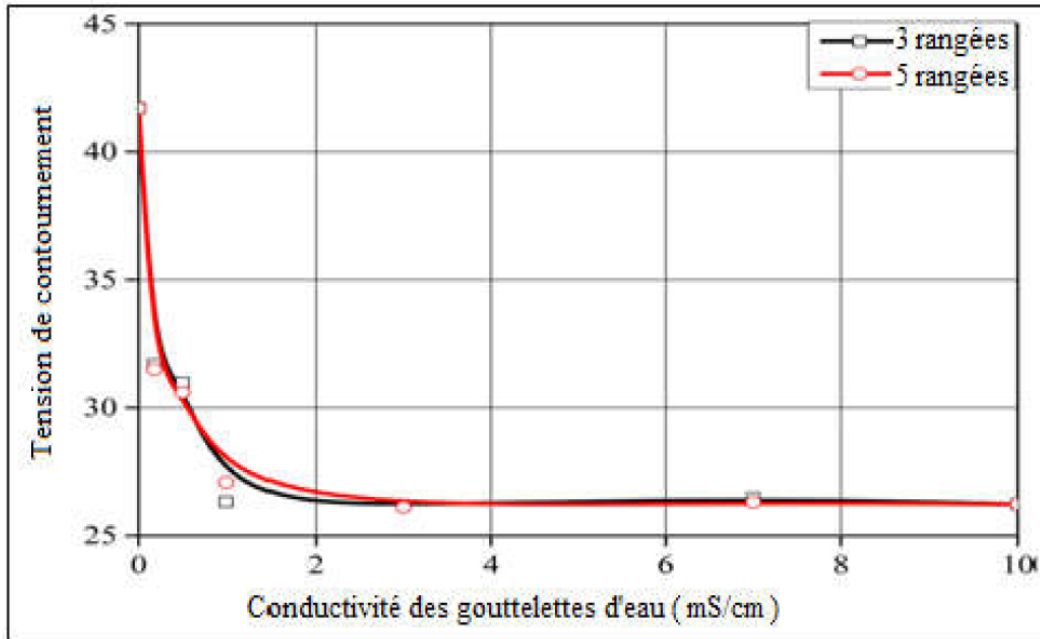


Fig. II. 10 : $\hat{U}_c = f(\sigma_v)$ d'une isolation hydrophobe recouverte de gouttes d'eau

L'influence des gouttelettes sur le nombre de rangées entre les électrodes, ce dernier varie de 1 à 11 et la conductivité volumique 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Quand un champ électrique est appliqué, on observe que les gouttelettes d'eau se déforment le long de l'axe électrode entraînant la diminution de la distance d'amorçage par le volume d'occupation des gouttes d'eau avant leur déformation (Figure II. 11a) et celui résultant de leur étirement le long du chemin emprunté par la décharge électrique de rupture (Figure II. 11b, 11c et 11d).

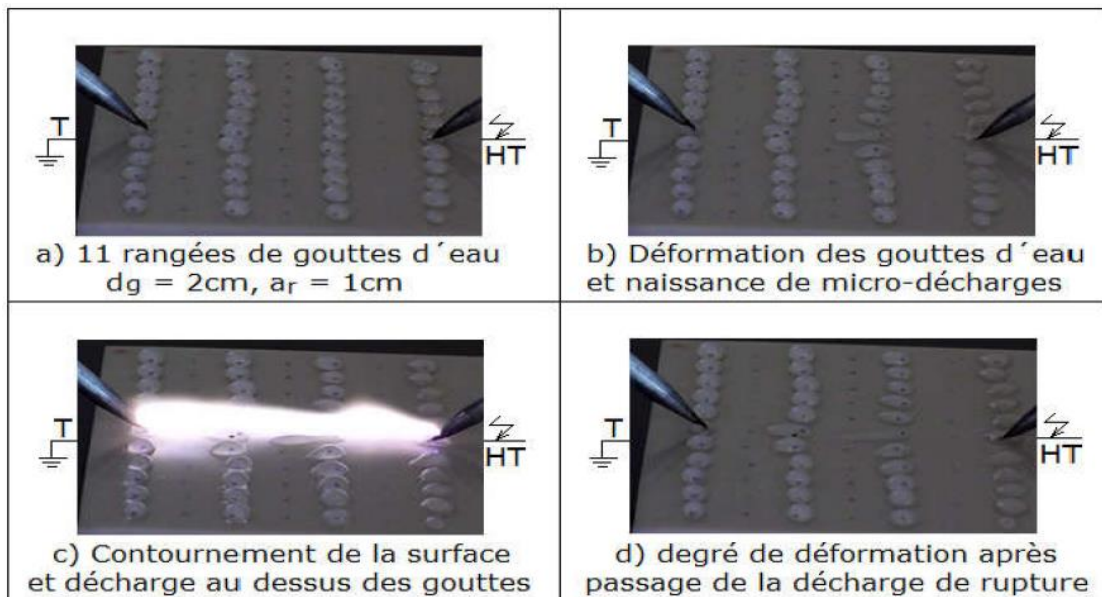


Fig. II. 11: Phases de développement d'une décharge électrique sur une surface en silicone recouverte de gouttes d'eau ($d_g = 2\text{ cm}$, $a_r = 1\text{ cm}$, $n_r = 11$ rangées)

Pour une distance quelconque entre deux rangées successives, les auteurs ont remarqué une décroissance rapide de la tension de contournement jusqu'à une valeur limite du nombre de rangées de gouttes d'eau. A partir de celle-ci, elle devient constante. La valeur de cette limite est fonction de la distance entre deux rangées successives (Figure II .12).

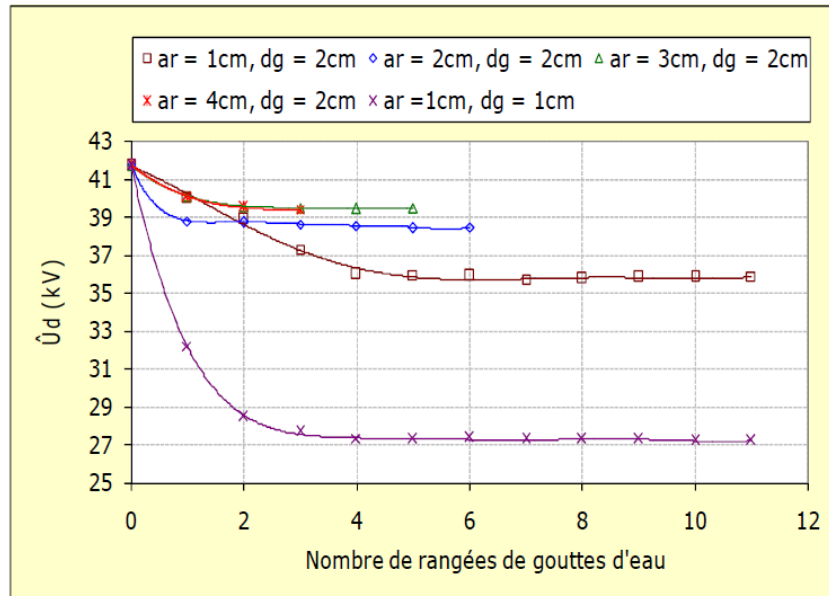


Fig. II. 12 : Tension de contournement d'une isolation hydrophobe en fonction du nombre de rangées de gouttes et la distance entre elles.

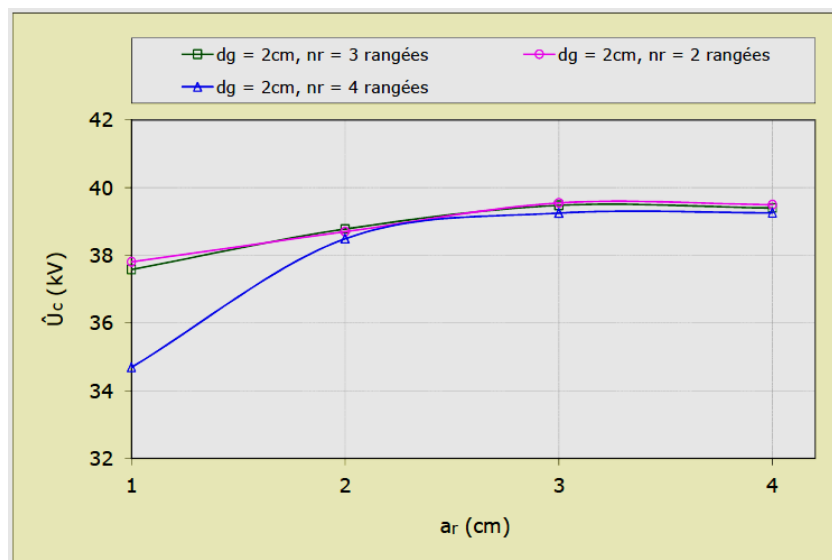


Fig. II. 13 : Tension de contournement en fonction de la distance entre les rangées de gouttes d'eau recouvrant une surface en silicone hydrophobe.

L'arrangement des gouttes d'eau sur la surface en silicone est conçu de telle sorte qu'il n'y ait pas de rangée sur la droite joignant les électrodes (Figure II .13). Il en résulte que quel que soit le nombre de rangées apportées sur la surface en silicone, la performance du système augmente avec la distance entre deux rangées successives jusqu'à une valeur limite à partir de laquelle

aucune amélioration n'est décelée. Ceci est dû probablement à la largeur effective de la décharge électrique, qui lorsqu'elle est inférieure à celle séparant deux rangées successives de gouttes, se trouve non influencée par ces perles d'eau supplémentaires.

L'évolution de la performance d'une isolation hydrophobe en fonction de la position et la largeur d'une bande sèche créée sur sa surface contaminée par 11 rangées de gouttes d'eau à conductivité électrique égale à $180 \mu\text{S}/\text{cm}$ et distantes respectivement de $a_r = 1 \text{ cm}$ et $d_g = 2 \text{ cm}$ est illustrée par la Figure II. 14. Il en résulte que l'apport d'une zone sèche sur la ligne joignant les électrodes, par suppression de la seule rangée du milieu (Figure II. 15), engendre une élévation de la tenue du système à sa valeur maximale. A partir de cette limite l'enlèvement de toute autre rangée ne produit aucune amélioration de celle-ci. Ceci signifie que l'existence de la rangée le long de la ligne joignant le deux électrodes contribue énormément au raccourcissement de la ligne de fuite entre les deux pointes par l'étirement maximal des gouttes d'eau au voisinage de la pointe sous tension. Son élimination n'entraîne pas automatiquement le changement du chemin de la décharge de rupture, malgré la croissance de la distance d'amorçage et la déformation partielle des gouttes d'eau des rangées voisines.

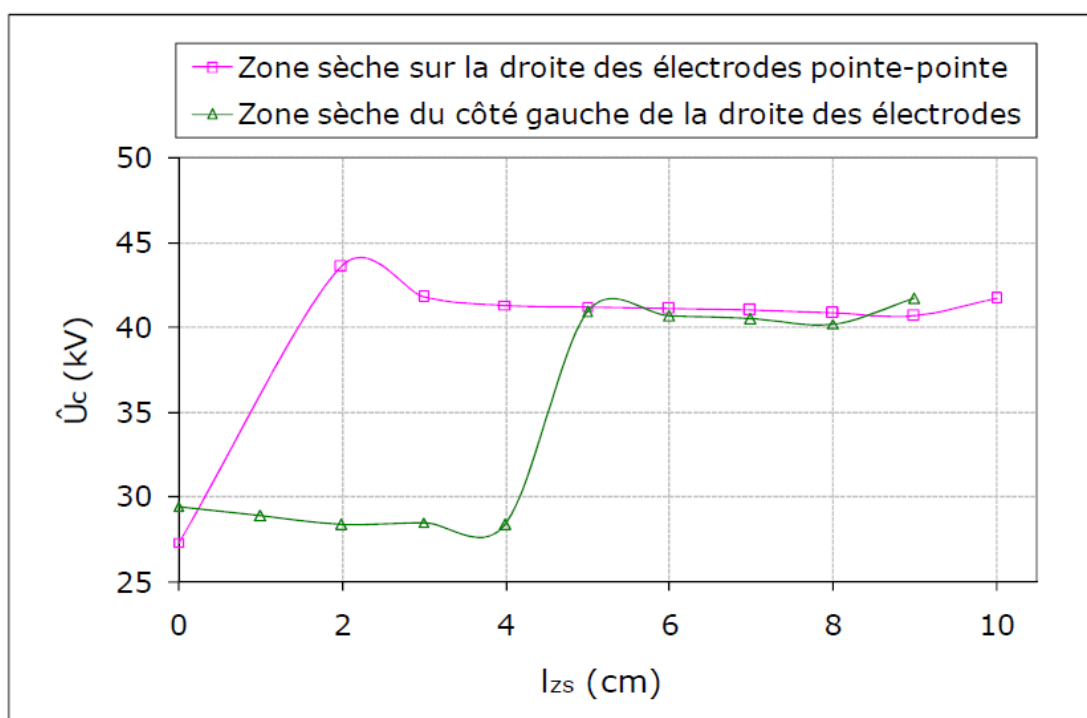


Fig. II. 14 : Tension de contournement en fonction de la largeur et la position d'une bande parallèle à la droite joignant les électrodes ($a_r = 1 \text{ cm}$, $d_g = 2 \text{ cm}$, $n_r = 11$ rangées, $\sigma_v = 180 \mu\text{S}/\text{cm}$)

La figure II. 14 montre aussi que la création d'une zone sèche de largeur inférieure ou égale à 5 cm, par suppression de 5 rangées de gouttes d'eau à gauche de la ligne passant par les deux pointes, la performance du système reste toujours à sa valeur minimale.

Par contre, l'enlèvement de la sixième rangée sur la ligne des électrodes, engendre l'élévation de la tenue du système à sa valeur maximale. A partir de cette largeur limite, la suppression de toute autre rangée de gouttes d'eau n'apporte aucune amélioration de la performance du système. En conséquence, seule la rangée de gouttes d'eau créée sur la ligne des électrodes d'un système pointe - pointe exerce un rôle prépondérant sur la tenue d'une telle configuration.

La performance d'une isolation hydrophobe en fonction du nombre de rangées de gouttes d'eau posées sur sa surface perpendiculairement à la ligne des électrodes est illustrée par la figure (Figure II. 16). Le nombre total est égal à 7. La distance entre deux rangées successives est de 1 cm, la conductivité électrique des gouttes d'eau est de l'ordre de $180 \mu\text{S}/\text{cm}$. Le nombre de rangées de gouttes d'eau parallèles à l'axe des électrodes est égal à 5. La distance les séparant est prise égale à 1 cm.

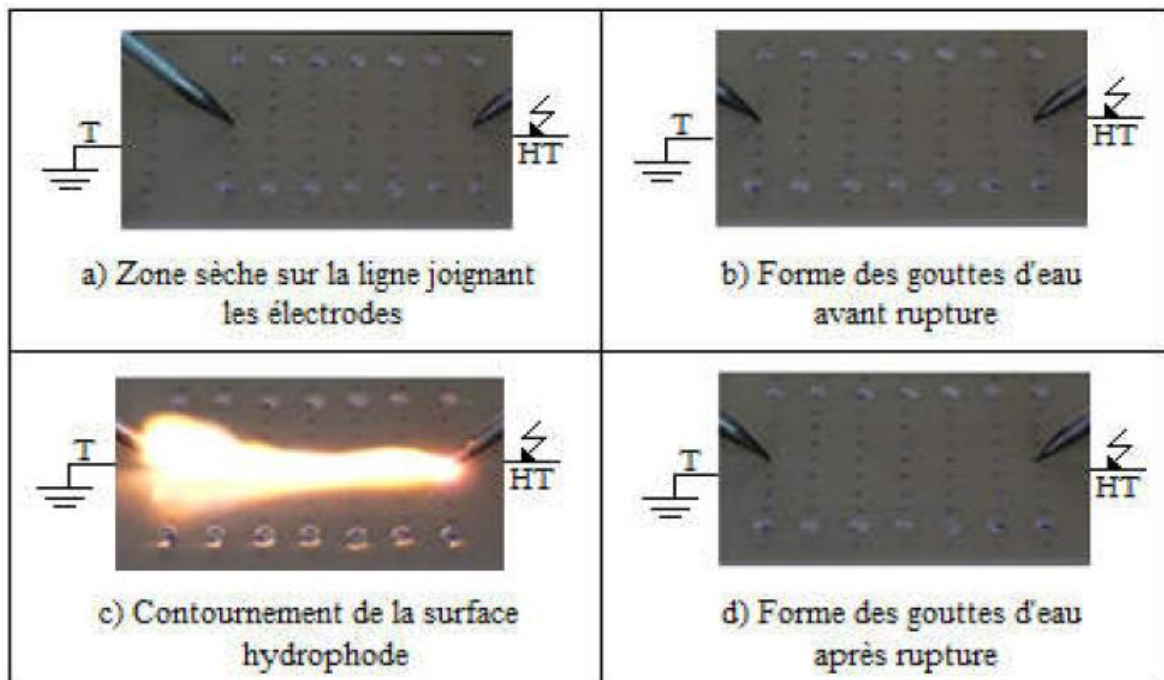


Fig. II. 15: Phases de décharge de rupture dans le cas d'une zone sèche parallèle à la ligne des deux électrodes

Il résulte que lors de la création d'une zone sèche au voisinage de l'électrode à la terre, la performance du système passe par un maximum lorsque une seule rangée de gouttes d'eau est mise en contact avec la pointe sous tension. Cet optimum peut être expliqué par le fait qu'après déformation des gouttes d'eau (Figure II. 17a, 17b, 17d), la décharge de disruption de l'air au-dessus des gouttes d'eau prend naissance plus loin de l'extrémité de l'électrode haute tension en empruntant un chemin marqué par une crête au milieu de son parcours (Figure II. 17c).

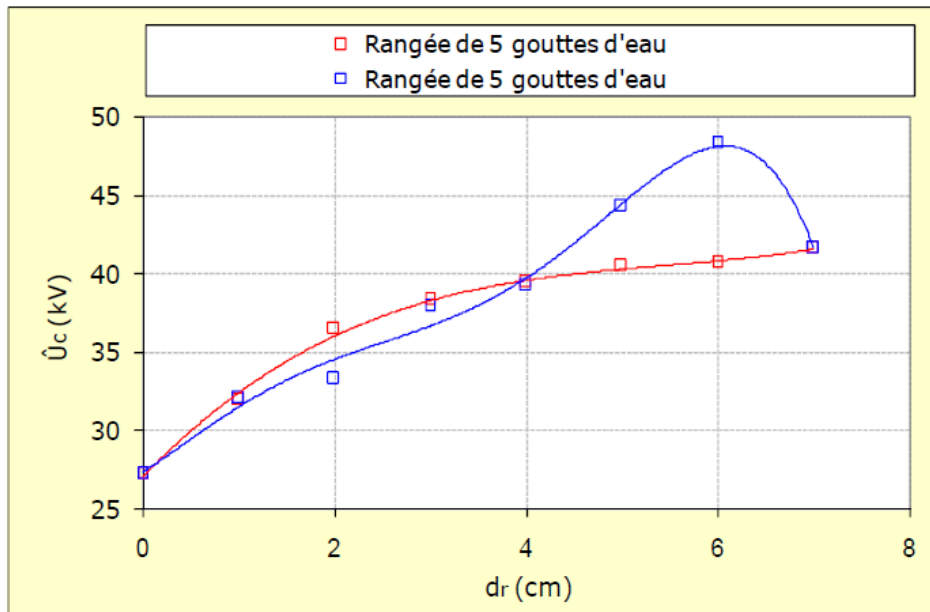


Fig. II. 16: Tension de contournement en fonction du nombre de rangées perpendiculaires à l'axe des électrodes.

Ce trajet s'avère être plus long que celui séparant les deux pointes sans gouttes d'eau. Le système dans ce cas de figure est plus rigide que lorsque la zone sèche est du côté haute tension. Par contre lorsque la largeur de la zone sèche est égale pratiquement à la moitié de la distance interélectrode, la tension de tenue du système à zone sèche au voisinage de la haute tension est plus élevée que celle du même système à zone sèche du côté terre. Cet écart est dû au fait que le dépôt de gouttes d'eau au voisinage de la pointe sous tension raccourcissent le chemin d'amorçage par leur étirement dans le sens de la ligne des électrodes (Figure II. 16).

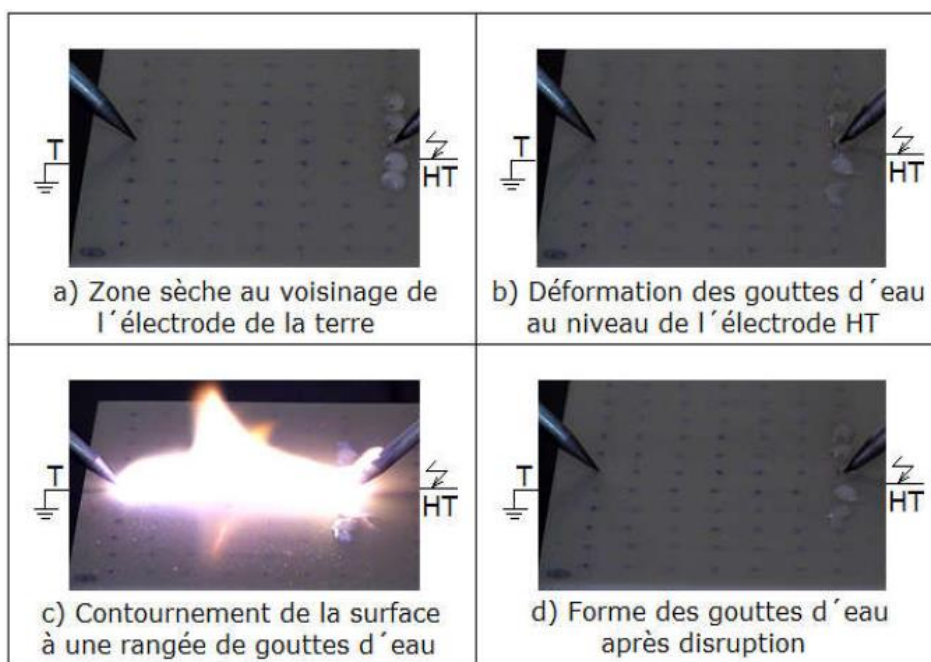


Fig. II. 17 : Phases de contournement d'une surface hydrophobe à une seule rangée de gouttes d'eau en contact avec la pointe sous tension.

II.5 Dégradation des isolants polymères sous pollution

Les matériaux polymères utilisés pour fabriquer des isolants, contrairement aux matériaux traditionnels tels que la porcelaine et le verre, sont susceptibles de subir une dégradation significative au fil du temps. Cette dégradation est due à une combinaison de facteurs tels que le vieillissement dû aux rayons UV, à l'humidité et à la chaleur, ainsi que des décharges électriques pouvant se produire sur les surfaces des isolants dans des conditions humides et polluées. Ces conditions peuvent entraîner des changements dans les propriétés de surface, réduisant ainsi les performances électriques et augmentant l'activité de décharge de surface, ce qui peut provoquer la dégradation de la surface du matériau et, dans des cas extrêmes, la rupture du boîtier de protection, précipitant ainsi la défaillance ultime du noyau structurel [59]. Dans une étude récente [60], les auteurs ont examiné en détail les principaux facteurs de vieillissement conduisant à la dégradation des isolants polymériques. Les photographies illustrées dans la Figure II. 18 mettent en évidence les dommages et le vieillissement les plus significatifs observés sur les isolateurs SiR [61, 62].

- **Érosion:** dégradation irréversible et non conductrice de la surface de l'isolant qui se produit par une perte importante de matière comme illustré à la Figure II. 18 (a).
- **Suivi:** lorsque les liaisons chimiques dans les polymères d'hydrocarbures sont rompues, du carbone libre est généré, formant un réseau de chemins conducteurs commençant à se développant en surface, même à l'état sec [63], et conduisant à un contournement. Voir la Figure II. 18 (b).
- **Fendage:** cassures ou fissures dans le boîtier en polymère, où une panne électrique résulte de la pénétration d'eau entre ou dans les pièces de l'isolant. Voir la Figure II. 18 (c).
- **Perforation:** trous dans la gaine / la tige de l'isolant ou le hangar. Voir la Figure II. 18 (d).
- **Farinage:** apparence de surface rugueuse ou poudreuse due à l'exposition de particules de charge du matériau du boîtier, voir Figure II. 18 (e).
- **Défaillance mécanique de la tige du noyau:** résultant de l'érosion et de l'endommagement du noyau, ou du dépassement de la résistance mécanique spécifiée. En conséquence, la ligne aérienne tombera, provoquant un court-circuit du système. Voir la Figure II. 18 (f).
- **Craquelure:** consiste en des micro-fractures de surface à des profondeurs de l'ordre de 0,01 à 0,1 mm. Ces micro-fractures sont l'une des causes d'une contamination extrême de la surface de l'isolant, conduisant à un flashover [3]. Voir la Figure II. 18 (g).

- Changements de couleur: changements de couleur du matériau du boîtier de l'isolant SiR en raison d'une réaction chimique avec des polluants environnementaux. Voir la Figure II. 18 (h).

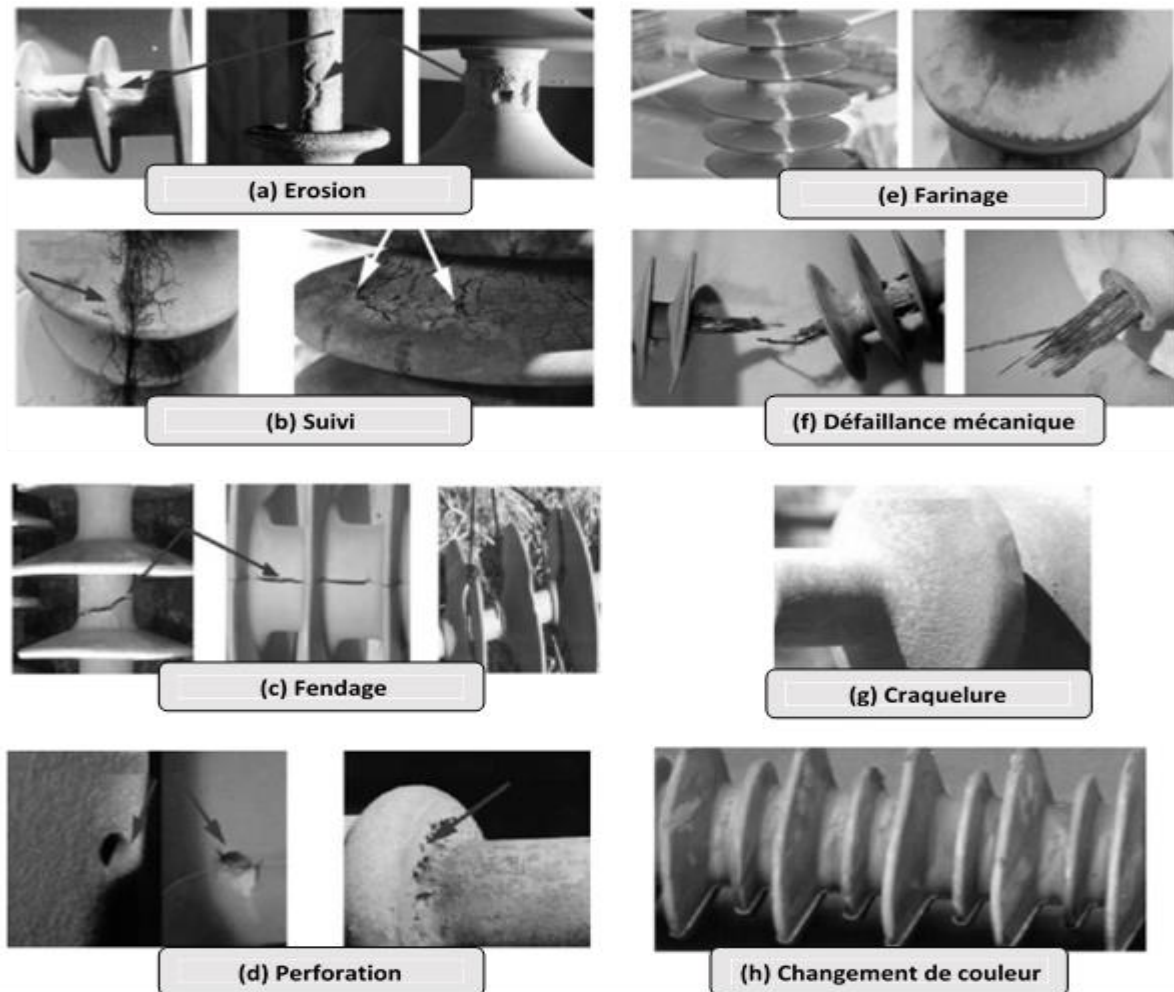


Fig. II. 18 : Vieillesse le plus courant des isolants SiR [61, 62]

II.6.Conclusion

Ce chapitre permet de conclure, à travers une caractérisation des surfaces hydrophobes et une comparaison avec les surfaces hydrophiles, que l'accumulation de la pollution atmosphérique et de l'humidité fait diminuer la performance électrique des isolateurs. Soulignant les propriétés distinctes et implications pratiques de ces derniers, les isolateurs en verre et en porcelaine (hydrophile) sont moins performants en présence d'eau et de pollution, favorisant les contournements et les claquages. En revanche, les isolateurs hydrophobes (silicone) repoussent l'eau, limitant la formation de films conducteurs et améliorant ainsi leur performance en milieu humide et polluée.

Chapitre III

CHAPITRE III : Surface superhydrophobe

III.1 Introduction

Les surfaces superhydrophobes sont souvent inspirées dans la nature, notamment sur de nombreuses plantes et fourrures animales [64], avec la feuille de lotus étant l'exemple le plus cité. Ce comportement non-mouillant inspire les scientifiques et les ingénieurs à créer artificiellement des surfaces superhydrophobes. Grâce aux récents progrès dans les techniques de fabrication de ces surfaces, leurs applications potentielles ont connu une forte expansion [65]. C'est précisément le cas dans ce chapitre où nous avons détaillé les différentes caractéristiques, types et techniques de préparation des surfaces superhydrophobes en donnant des exemples inspirés de la nature.

III.2 Définition

La superhydrophobicité est une propriété physique d'un matériau. Lorsqu'un matériau est dit superhydrophobe l'eau n'adhère pas à sa surface. On dit que l'eau ne mouille pas sa surface.

III.3 Propriétés des surfaces superhydrophobes

III.3.1 Propriétés spécifiques

III.3.1.1 Mouillage

Quand on dépose une goutte de liquide sur une surface solide, son comportement dépend des caractéristiques de cette surface. Parfois, la goutte s'étale pour former un film mince, cherchant à maximiser son contact avec la surface, ce qui se traduit par une bonne capacité de mouillage. Dans d'autres situations, le liquide ne s'étale que peu, prenant une forme sphérique en raison d'un faible degré de mouillage.

Il existe une équation qui définit les différents types de mouillage selon les valeurs des énergies inter faciales et donc de l'angle de contact. Cette équation est donnée par la relation de Young-Dupré [4] :

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma} \dots \dots \dots (III.1)$$

γ : Tension de surface du liquide ;

γ_{sv} : Energies de surface solide-vapeur ;

γ_{sl} : Energies de surface solide-liquide ;

θ : Angle de contact.

- **Modèle de Young :**

En 1805, le pionnier de la théorie de la mouillabilité Thomas Young a développé une équation où l'angle entre les interfaces solide, liquide et vapeur est lié à leur tension de surface. L'équation de Young s'exprime comme suit : [18]

$$\cos \theta^Y = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \dots \dots \dots (III.2)$$

Où θ^Y est l'angle de Young pour une surface plate et lisse et γ_{SV} , γ_{SL} et γ_{LV} représentent la tension superficielle aux interfaces solide-vapeur, solide-liquide et liquide-vapeur, respectivement. Une illustration du modèle proposé par Young est représentée à la figure III. 1.

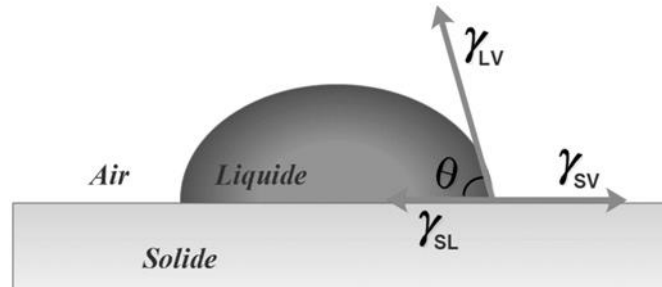


Fig. III. 1 : Illustration du comportement de mouillage proposé par Young.

Cependant, la théorie de Young a été proposée pour une surface idéale: plate, lisse, homogène et inerte. Dans ce cas, lorsque des surfaces réelles ont été analysées, la mouillabilité n'a souvent pas pu être expliquée par l'équation (I.1) et, par conséquent, le modèle de Young n'a pas pu être appliqué. Puis, dans les années 1930-1940, deux autres modèles proposés par Wenzel et Cassie Baxter ont tenté d'expliquer la mouillabilité des surfaces réelles en fonction de l'influence de la rugosité et de la morphologie de la surface.

- **Modèle de Wenzel :**

En 1936, Wenzel a créé une nouvelle équation où il a pris en compte un facteur de rugosité (r) dans l'équation de Young, générant θ^W comme l'a montré l'équation (I. 2): [19]

$$\cos \theta^W = r \cdot \cos \theta^Y \dots \dots \dots (III.3)$$

où θ^W est l'angle de contact apparent proposé par Wenzel pour une surface rugueuse et r est le paramètre de rugosité qui est le rapport entre la surface réelle de solide (rugueuse) et la surface idéale (lisse). Dans ce cas, pour des surfaces rugueuses $r > 1$, améliorer l'hydrophobie intrinsèque ou l'hydrophilie de la surface rugueuse. Dans le modèle de Wenzel, illustré à la figure III. 2, la goutte de liquide maintient le contact avec la surface et pénètre dans les aspérités

augmentant la surface de contact. En conséquence, une adhérence liquide élevée existe souvent entre la surface et la goutte. Dans ce cas, des propriétés hautement hydrophobes peuvent être prédites pour des surfaces intrinsèquement hydrophobes ($\theta^{\text{Yeau}} > 90^\circ$), mais avec une forte adhérence à l'eau.

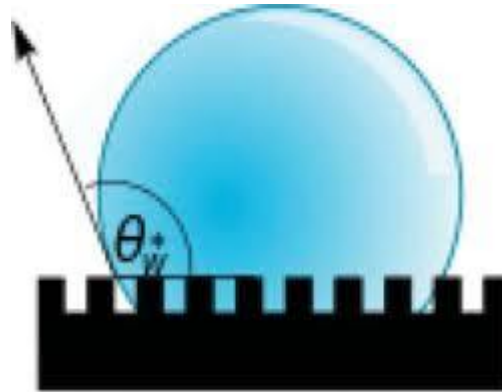


Fig. III. 2 : Illustration du comportement de mouillage proposé par Wenzel

- **Modèle de Cassie et Baxter :**

Contrairement à Wenzel, en 1944-1945, Cassie et Baxter ont considéré que la gouttelette de liquide se trouve sur un substrat rugueux et poreux et, dans ce cas, la goutte est suspendue sur les microstructures et l'air est emprisonné à l'intérieur, comme le montre la figure III. 3. Ensuite, dans l'équation de Cassie-Baxter, la fraction solide (φ_s) est ajoutée à l'équation de Young (I. 3): [20]

$$\cos \theta^{CB} = \varphi_s (\cos \theta^Y + 1) - 1 \dots \dots \dots (III.4)$$

où θ^{CB} est l'angle de contact apparent proposé par Cassie et Baxter pour une surface rugueuse et poreuse, φ_s est la fraction solide en contact avec la goutte et $(1 - \varphi_s)$ est la fraction d'air. Dans l'équation de Cassie-Baxter, la présence d'air à l'intérieur de la rugosité de surface peut induire à une augmentation de θ quel que soit θ^Y car l'interface solide-liquide diminue tandis que l'interface liquide-vapeur augmente. Il est également possible d'obtenir une adhérence ultra-faible (propriétés superhydrophobes) si la quantité d'air entre la surface et la goutte d'eau est suffisamment importante.

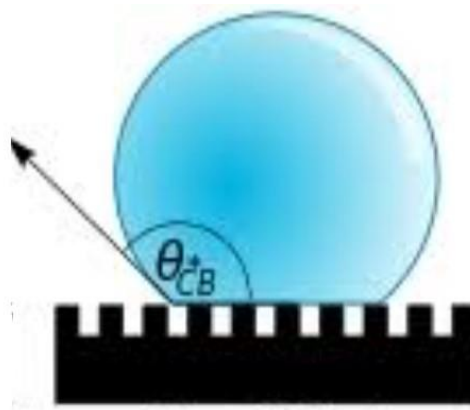


Fig. III. 3 : Illustration du comportement de mouillage proposé par Cassie-Baxter

Les équations de Wenzel et de Cassie-Baxter sont toutes deux liées à celle de Young, ce qui signifie qu'elles dépendent de l'énergie de surface (γ_{SV}), mais aussi de la tension superficielle du liquide (γ_{LV}) déposé dessus. Par conséquent, si le γ_{LV} diminue, la difficulté pour la surface d'empêcher son étalement augmente. En raison de la présence de nombreuses liaisons hydrogène, l'eau est un liquide de tension superficielle élevée ($\gamma_{LV} = 72,8 \text{ mN/m}$) tandis que les huiles ont une tension superficielle beaucoup plus faible ($\gamma_{LV} < 35 \text{ mN/m}$).

III.3.1.2 Angle de contact

On appelle angle de contact, l'angle que forme la goutte d'eau avec la surface sur laquelle elle est déposée (Figure III. 4). Ses valeurs varient entre 0 et 180° [66], en fonction de la nature de la surface (superhydrophile, hydrophile, hydrophobe, superhydrophobe) avec laquelle elle est en contact.

- **Surface superhydrophile [67] :** Si l'angle de contact est presque égale à 0° , alors la surface ne repousse pas l'eau (Figure III. 4a).
- **Surface hydrophile [68] :** Si l'angle de contact est inférieur à 90° , et la surface ne repousse pas l'eau (Figure III. 4b).
- **Surface hydrophobe [68] :** Si l'angle de contact est compris entre 90° et 150° , alors la surface et la goutte d'eau forme un demi-cercle (Figure III. 4c).
- **Surface superhydrophobe [69] :** Si l'angle de contact est compris entre 150° et 180° , la goutte d'eau sera presque sphérique (Figure III. 4d).

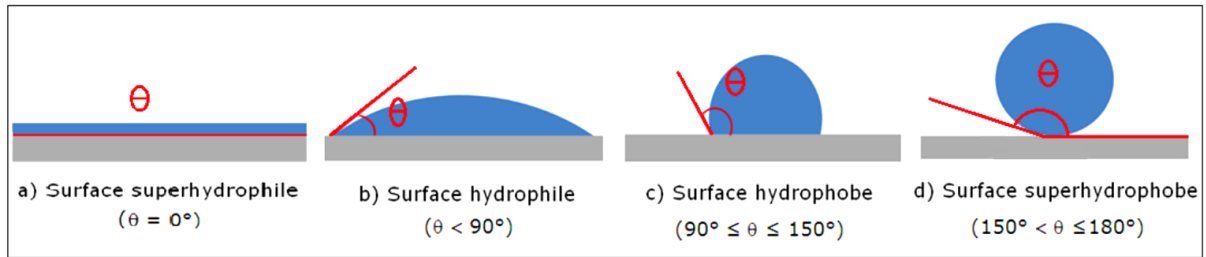


Fig. III. 4 : Comportements d'une goutte d'eau sur (a) une surface superhydrophile ($\theta = 0^\circ$), (b) une surface hydrophile ($\theta < 90^\circ$), (c) une surface hydrophobe ($\theta > 90^\circ$) et (d) une surface superhydrophobe ($\theta > 150^\circ$).

III.4 Caractérisation des surfaces superhydrophobes

Par conséquent, pour caractériser une surface superhydrophobe, non seulement l'angle de contact apparent θ est nécessaire, mais également les angles de contact dynamiques, qui sont caractérisés par divers paramètres, afin de fournir le comportement adhésif de la surface. L'angle de glissement (α), qui est l'angle d'inclinaison de la surface à partir duquel la gouttelette peut rouler, et l'angle de contact d'hystérésis (H) qui est la différence entre l'angle d'avancement (θ_a) et l'angle de recul (θ_r) sont les mesures les plus utilisées pour évaluer la superhydrophobicité d'une surface [21].

III.4.1 Angle de contact statique

La mesure de l'angle de contact statique de l'eau est souvent utilisée pour caractériser la superhydrophobicité d'une surface et la mesure de cet angle s'effectue à l'aide d'un goniomètre qui consiste généralement d'une source optique grossissante avec une caméra intégrée qui permet d'enregistrer l'angle de contact, qui est généralement mesuré via un logiciel. Le calcul de l'angle de contact peut être effectué par quatre modes d'évaluation différents, comme montre la Figure III. 5 [22].

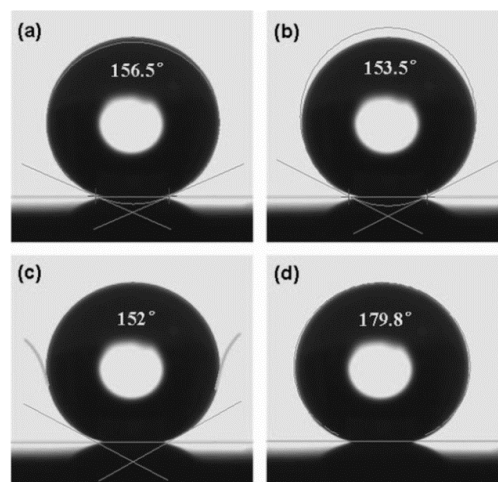


Fig. III. 5 : Images d'une goutte d'eau sur une surface superhydrophobe sous différents modes d'évaluation de l'angle de contact statique : (a) évaluation d'ellipse ; (b) évaluation circulaire ; (c) recherche de la tangente ; (d) évaluation par l'algorithme Laplace – Young [22]

III.4.2 Angle de contact dynamique

La mesure d'angle de contact dynamique est une technique qui mesure l'angle de contact d'une goutte d'eau durant un mouvement. Ceci est généralement s'effectué en ajoutant du liquide à une goutte statique sur une surface et en poussant ainsi l'avant du liquide à travers la surface non mouillée [23]. L'angle de contact mesuré pendant l'expansion de la goutte est appelé angle de contact avancé θ_a (Figure III. 6a). Il s'agit d'une mesure du comportement de mouillage d'une surface. D'un autre côté, l'élimination continue du liquide de la goutte diminuera sa taille et provoquera ainsi un démouillage de la surface. L'angle de contact qui se forme pendant le rétrécissement de la goutte est appelé angle de contact de recule θ_r (Figure III. 6b).

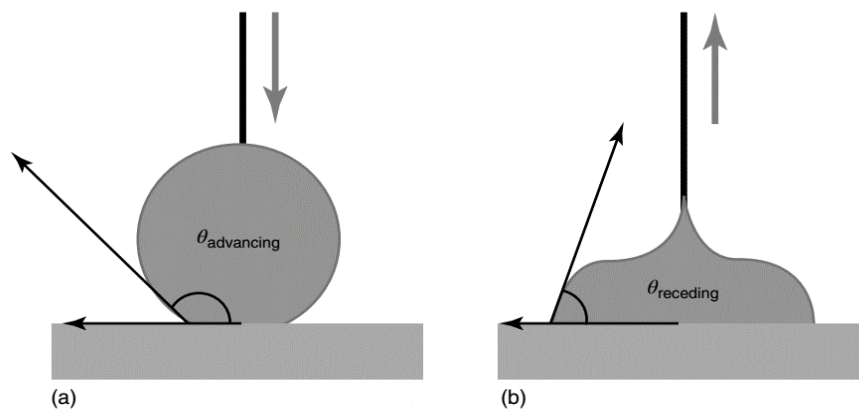


Fig. III. 6 : Mesure d'angle de contact d'avancé et de recul [21]

III.4.3 Angle d'hystérésis

Comme indiqué précédemment, le critère pour juger une surface superhydrophobe est non seulement l'angle de contact statique avec le liquide, mais aussi l'angle de contact dynamique. La différence entre l'angle de contact avancé (θ_a) et l'angle de contact de recul (θ_r) est définie comme angle d'hystérésis (H). D'une manière générale, une véritable surface superhydrophobe signifie une hystérésis à faible angle de contact car la faible hystérésis garantit un roulement facile des gouttes d'eau sur la surface. Dans ce cas, l'angle d'hystérésis est un paramètre essentiel pour la caractérisation de la surface superhydrophobe [53].

III.4.4 Angle de glissement

L'angle de glissement fait référence à l'angle d'inclinaison d'une surface par rapport à l'horizontale, au moment auquel une goutte d'eau commence à se déplacer sur elle. Cette méthode reflète aussi, la différence entre les angles de contact avançant et reculant ; généralement l'angle de glissement est inférieur à 10° chez les surfaces superhydrophobes. Ce

que donne à ces surfaces la propriété autonettoyante. La relation entre l'angle d'avancé, l'angle de recul et l'angle d'inclinaison sont illustrées à la figure III. 7. [54, 55]

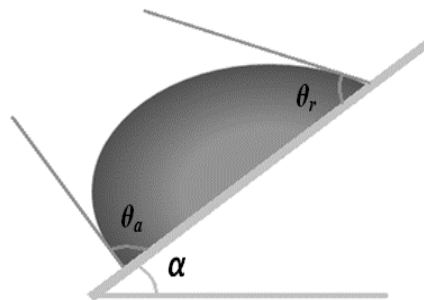


Fig. III. 7 : Angle d'avancé et de recul sur un plan incliné juste avant le début du mouvement de la goutte

III.4.5 Rugosité

Selon la théorie de Wenzel, le facteur de rugosité joue un rôle important dans la détermination de la mouillabilité de la surface où les effets de rugosité améliorent à la fois l'hydrophobicité et l'hystérésis de l'angle de contact, une forte rugosité limite le contact d'une goutte d'eau avec le solide et favorise le contact avec l'air (Figure III. 8). La double rugosité, à une faible échelle, permet très souvent d'amplifier l'aspect superhydrophobe en accentuant le contact avec l'air sur le sommet des aspérités [56].

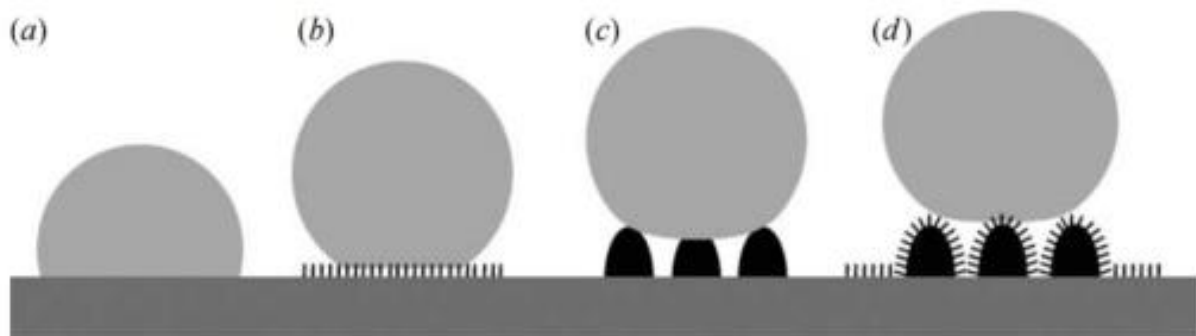


Fig. III. 8 : La forme d'une goutte sur différentes texturations de surface (a) surface parfaitement lisse, (b) rugosité à l'échelle nanométrique, (c) l'échelle micrométrique et (d) une surface a double rugosité [56]

III.4.6 Auto-nettoyage

L'auto-nettoyage est l'une des caractéristiques les plus étonnantes et les mieux documentées des surfaces superhydrophobes. En effet, la structure morphologique d'une surface superhydrophobe tient les particules de poussière en suspension sur les aspérités des surfaces, ce qui se traduit par une très faible surface de contact et une faible force d'adhérence physique [26] entre la particule et la surface [27]. Lorsque les gouttes d'eau entrent en contact

avec ces particules, elles sont captées facilement en raison de forces capillaires plus fortes entre les particules et les gouttes [28] lorsque celles-ci roulent sur la surface (Figure III. 9).

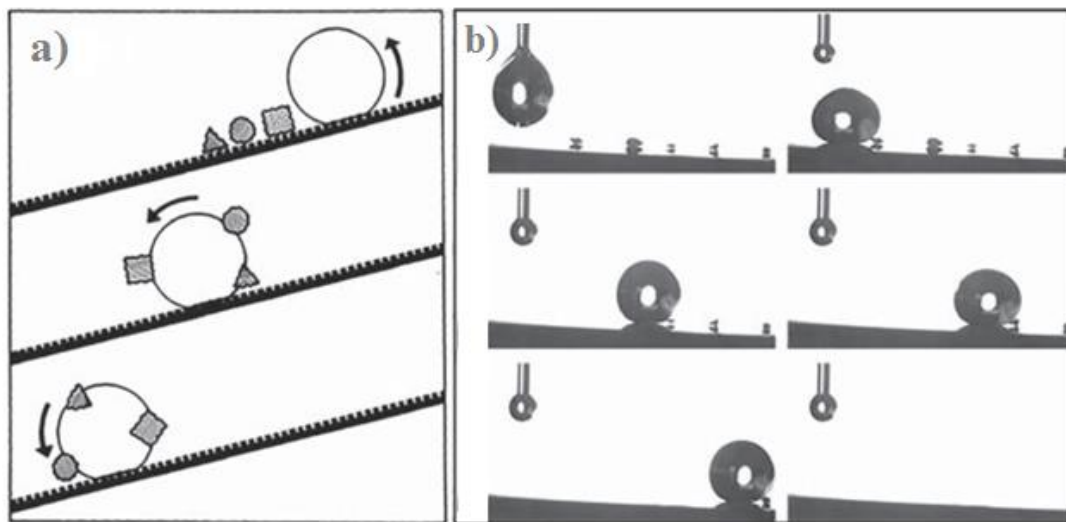


Fig. III. 9 : Mécanisme d'auto-nettoyage. (a) Illustration schématique des particules de poussière adhérant à une goutte d'eau, qui roule sur une surface superhydrophobe rugueuse [27]. (b) Expérience montrant une goutte d'eau sur une surface superhydrophobe artificielle ramassant des particules de poussière lorsqu'elle roule sur la surface [29].

III.5 Différents types des surfaces superhydrophobes naturelles et artificielles

III.5.1 Surfaces superhydrophobes naturelles

La nature est une source de nombreuses espèces superhydrophobes: Végétaux, insectes, animaux. Parmi ces espèces, on citera : le lotus, La salvinia, Le gerris...etc.

➤ Végétaux

Dans la nature, diverses plantes présentent des propriétés hydrophobes, parmi lesquelles on trouve les feuilles de lotus, *Salvinia molesta* et *petale*.

a) Lotus :

La feuille de lotus est une surface superhydrophobe ayant un angle de contact supérieur ou égale à 150° . De nos jours, les feuilles de lotus sont l'exemple le plus célèbre de superhydrophobicité dans la nature. C'est aussi un symbole de pureté dans de nombreuses religions asiatiques, car sa feuille reste toujours propre et exempte de toute contamination ou pollution bien qu'elle soit née dans des régions marécageuses (Figure III. 10a). A l'échelle microscopique, la surface de la feuille de lotus est composée de petites collines micrométriques (Figure III. 10b). Par conséquent, la gouttelette d'eau ne peut pas se fixer sur la surface du lotus

et glisse le long de la surface facilement en prenant tous les contaminants présents à la surface des feuilles. Plus tard, ce phénomène a été appelé « Effet Lotus » [55].

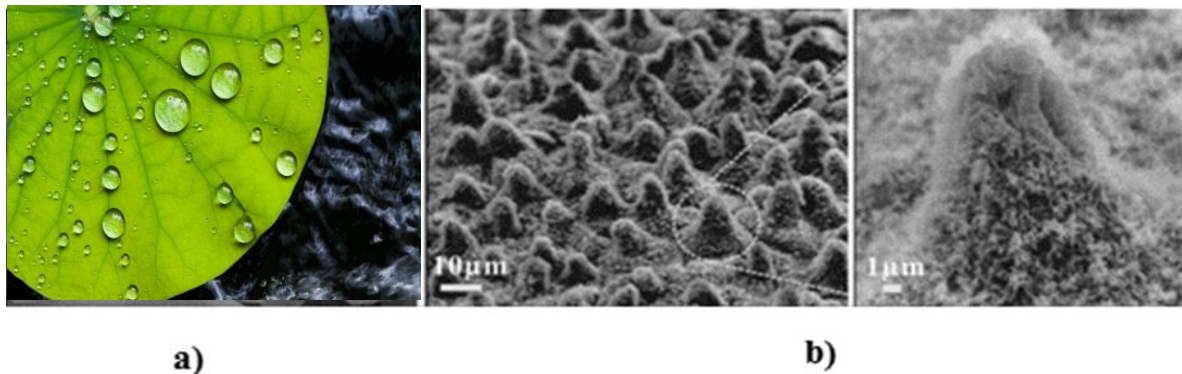


Fig. III. 10 : a) Feuille de lotus. b) Images microscopiques montrant des micro et nanostructures morphologiques de la surface de la feuille de lotus [31].

b) *Salvinia molesta* : [70]

La *Salvinia molesta* est une algue aquatique (fougère) superhydrophobe. Sa surface n'étant pas lisse, mais recouverte de petits fouets hydrophiles qui en contact avec l'eau piègent ses molécules, ce qui crée une barrière d'air entre ces molécules et la surface de la fougère qui reste sèche (Figure III. 11c).

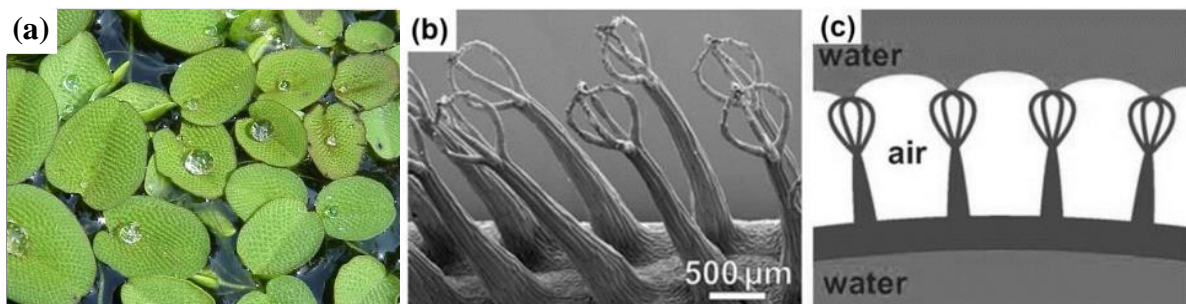


Fig. III. 11 : Morphologie de la feuille flottante de *Salvinia molesta*. a) Face supérieure de la surface densément couverte de poils. La forme sphérique de la goutte d'eau sur la feuille indique le caractère superhydrophobe de la surface. b) Images SEM des structures capillaires complexes. c) La cellule terminale de chaque cheveu est affaissée pour former un patch de quatre cellules [32].

c) Pétale :

Le pétale de rose illustre un autre phénomène naturel bien connu, comme illustré dans la figure III. 12. Contrairement aux feuilles de lotus, le "effet pétale" se produit lorsque l'eau forme une goutte sur la surface du pétale, prenant une forme sphérique et refusant de rouler même lorsque le pétale est incliné [33]. Cette propriété est due à la structure de surface unique qui consiste en des cellules appelées micropapilles, avec un nanofolding cuticulaire. Lorsqu'une goutte d'eau touche la surface du pétale, elle peut pénétrer les grands espaces entre les micropapilles, mais

pas les nanofolds. Des études ont montré que le comportement d'humectation du pétale de rose suit le modèle de Cassie [33].

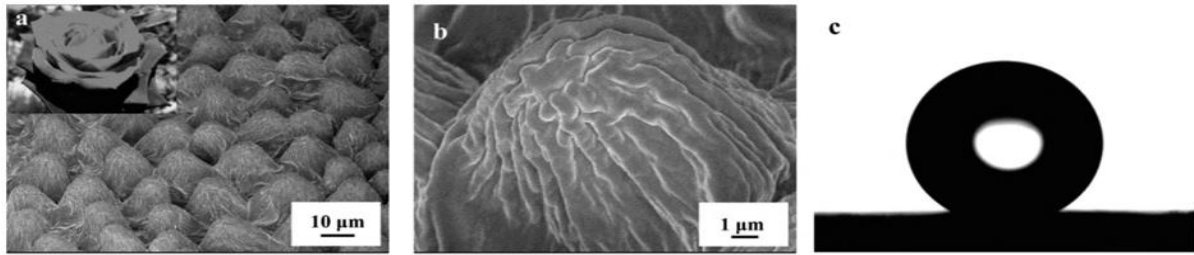


Fig. III. 12 : (a, b) Images SEM de la surface d'un pétale de rose rouge, montrant des micropapilles et des nanofolds sur chaque sommet de papilles. c) Forme d'une gouttelette d'eau à la surface du pétale, indiquant sa superhydrophobicité avec un angle de contact de $152,4^\circ$ [33].

➤ Animaux

a) Canard :

Les plumes de canard disposent d'un fort pouvoir hydrofuge, grâce à leurs structures poreuses et à leur revêtement de graisse, ce qui lui permet de rester sec à la sortie de l'eau (Figure III. 13). Les structures poreuses ainsi que la graisse à faible tension superficielle doteront les plumes d'une grande interface air-eau, c'est-à-dire d'une grande proportion superhydrophobe [34].

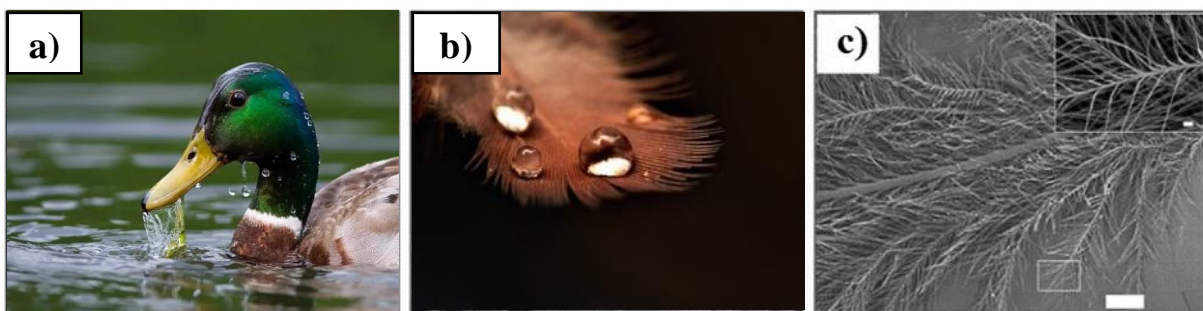


Fig. III. 13 : a) Images optiques de canard (Anatidés). b) Image optique d'un morceau de plume de canard avec une goutte d'eau. c) Structures multi-échelles de plumes de canard [34]

b) Poisson :

Les poissons peuvent nager librement dans l'eau contaminée par l'huile sans que leur peau ne soit tachée. L'excellente capacité anti-huile de la peau de poisson est dérivée de la superoléophobicité des écailles en milieu aqueux [35]. Les écailles de poisson sont principalement formées par un squelette de phosphate de calcium hydrophile et une protéine, couche de mucus relativement mince. Les écailles en éventail sont imbriquées sur la peau du poisson. De nombreuses micropapilles orientées d'une longueur de 100 à 300 μm et d'une largeur de 30 à 40 μm sont réparties sur la surface des écailles (Figure III. 14) [34].

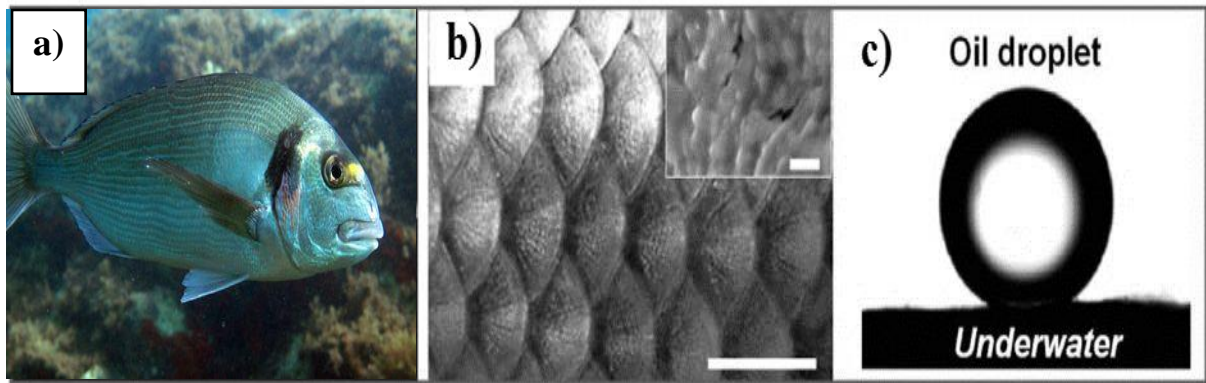


Fig. III. 14 : a) Image d'un poisson dans l'eau. b) Image MEB d'écaillés de poisson montrant les micropapilles. Des nanostructures peuvent être observées sur les papilles. c) Goutte de l'huile sur une surface en écaillés de poisson [34]

➤ **Insectes**

a) **Gerris :**

Le gerris se déplace librement sur l'eau grâce aux micros poiles hydrophobes sur ses pattes qui accentuent l'effet de la tension superficielle (c'est le résultat de l'augmentation de l'énergie à l'interface entre deux fluides) entre ces dernières et la surface de l'eau ; ce qui crée une pellicule suffisante pour supporter le poids de l'insecte sur la surface de l'eau. Les pattes du gerris semblent réaliser le plus grand angle de contact avec de l'eau connu pour les systèmes naturels : $167.6 \pm 4.4^\circ$ (Figure III. 15) [31].

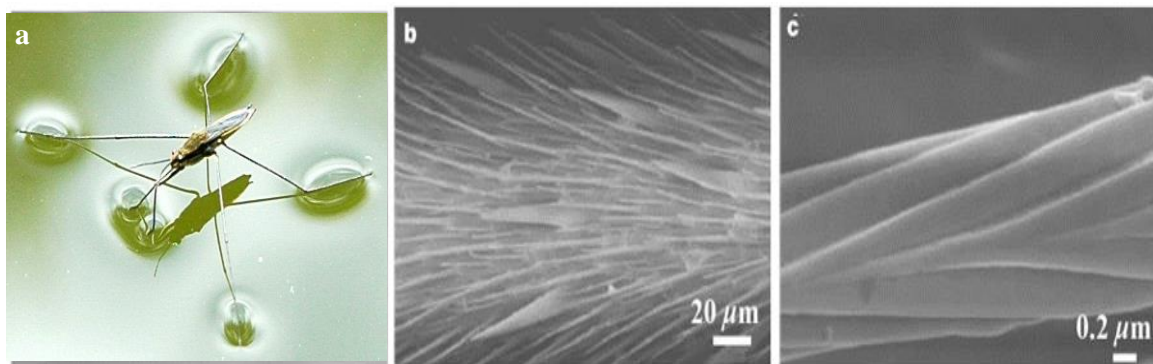


Fig. III. 15 : a) Gerris en équilibre sur l'eau. b) Image MEB des pattes du Gerris. c) Grossissement plus élevé des micros poiles [31]

b) **Papillons :**

Les ailes de divers insectes présentent également des propriétés superhydrophobes. Ceux-ci peuvent réduire la contamination par la poussière et améliorer leur capacité de vol. Certaines ailes de papillons ont des écaillés régulièrement disposées qui se chevauchent comme des tuiles, dont la longueur et la largeur de ces écaillés varient respectivement de 50 à 150 μm et de 35 à 70 μm , ce qui leur confère des propriétés superhydrophobes [36].

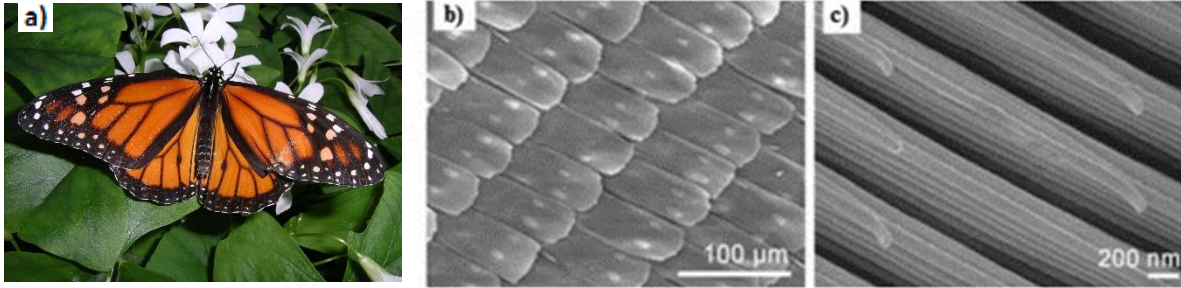


Fig. III. 16 : a) Image d'un papillon bleu irisé, b-c) Images MEB montrent des micro-échelles hiérarchiques sur la surface de l'aile d'un papillon [36].

III.5.2 Surfaces superhydrophobes artificielles

Dans la section précédente, nous avons résumé les étonnantes propriétés de mouillage des surfaces superhydrophobes. Une question pertinente est de savoir s'il est possible d'imiter ces bios surfaces et de fabriquer des surfaces artificielles aux propriétés similaires. Les phénomènes naturels ont non seulement fasciné les scientifiques et les ingénieurs pendant des décennies, mais ils ont également été une inspiration et une source d'informations pour de grandes inventions nouvelles [39]. Dans la section suivante, nous discuterons brièvement des nombreuses techniques disponibles pour fabriquer des substrats avec des propriétés de mouillage contrôlables, on pourrait créer des matériaux superhydrophobes comme des vitrages, du béton ou encore des tissus superhydrophobes. L'effet lotus pourrait aider à rendre plus commode la vie quotidienne grâce à la superhydrophobie en ne laissant pas les saletés et les liquides se répandre à la surface des matériaux.

III.6 Techniques de préparation de surfaces superhydrophobes

Il existe plusieurs méthodes d'élaboration de surfaces superhydrophobes. Dans les paragraphes suivants, nous examinerons en détail ces méthodes, en mettant en avant les recherches les plus remarquables dans le domaine de la superhydrophobicité.

III.6.1 Dépôt électrochimique :

C'est une technique d'application de couche mince sur des métaux. Cette technique est efficace pour élaborer des surfaces superhydrophobes, peu coûteuse et permet des procédés à des températures normales [40]. Cette méthode consiste à déposer deux substrats dans un liquide l'un est la cathode, l'autre est l'anode. En utilisant du courant continu de différent voltage, certain composé sont déposés sur les surfaces. Leur nature ainsi que leur forme dépendent du substrat (anode ou cathode).

III.6.2 Photolithographie :

Cette technique permet d'obtenir des topographies continues. Il consiste à enduire une surface d'un film mince de photo résine ou de polymère, puis la radier avec un faisceau lumineux de haute précision. Cette méthode est utilisée en électronique [37].

III.6.3 Processus sol-gel :

La technique du sol-gel est utilisée pour maîtriser la rugosité des surfaces solides telles que le métal, les plaquettes de silicium, le verre et les textiles, afin de produire des revêtements superhydrophobes. Ce processus implique l'utilisation d'une solution ou d'un sol comme précurseur, qui subit ensuite une série de réactions d'hydrolyse complexes pour former un gel. Cette approche est largement adoptée et reste une méthode pratique pour la fabrication de revêtements nanométriques superhydrophobes. Le sol-gel, l'une des techniques chimiques humides les plus courantes, est généralement réalisé à des températures douces, notamment à basse température. Bien que cette méthode soit relativement simple et économique, elle présente l'inconvénient d'être assez lente dans son processus [21].

III.6.4 Traitement par plasma :

Les surfaces superhydrophobes peuvent être obtenues par un traitement plasma. En utilisant deux procédés. Le premier procédé consiste à anodiser la surface pour obtenir la micro-nanostructure, et le deuxième procédé se base sur la polymérisation par plasma pour créer des revêtements sur la surface anodisée. Le revêtement obtenu offre un angle de contact statique d'environ 152° à faible puissance de plasma [37].

III.6.5 Dépôt par bain chimique :

Cette technique permet de faire de grandes quantités de substrats ou encore de travailler en continu. L'avantage majeur de cette technique c'est qu'elle ne requiert pas d'équipement dispendieux, seulement un contenant, une solution de déposition et un substrat. Lorsque le substrat est mis en contact avec la solution, il y a une réaction ou une décomposition survenant près de la surface formant des dépôts de topographie distincte [41].

III.7 Domain d'application des surfaces superhydrophobes

L'affectation de l'effet superhydrophobe présente un potentiel prometteur tant pour la recherche scientifique que pour l'industrie et les consommateurs. Que ce soit pour réduire la formation de buée, de givre ou de dépôt de salissures, de nombreuses situations pratiques exigent des solutions qui empêchent les gouttes de se fixer sur leur surface.

III.7.1 Dans la recherche scientifique :

Des scientifiques envisagent d'exploiter la salvinia molesta, une plante aquatique hydrophobe, dans le domaine maritime en l'appliquant sur les coques des navires. Cette approche viserait à réduire les frottements avec l'eau, améliorant ainsi l'efficacité du glissement et permettant potentiellement une économie de carburant pouvant atteindre 10 %. Cette innovation, inspirée du biomimétisme, s'inscrit dans une perspective de développement durable et, si elle se effective, pourrait être étendue à l'ensemble des revêtements de bateaux.

III.7.2 Chez les industriels :

- **Superhydrophobie :**

Depuis quelques années, des peintures de façade autonettoyantes sont disponibles sur le marché, le premier produit commercialisé étant la peinture Lotusan. Plus de 50 000 façades de bâtiments ont été recouvertes de cette peinture auto-nettoyante. En 2012, le fabricant a lancé une nouvelle peinture utilisant une technologie innovante, reproduisant la microstructure des feuilles de lotus une fois appliquée sur une surface, offrant ainsi une propriété hydrophobe.

L'application de cette peinture facilite grandement le nettoyage et le lavage des murs et des plafonds, il suffit simplement de les arroser d'eau pour que la poussière et les résidus soient éliminés. Ainsi, ces surfaces deviennent extrêmement simples à entretenir.

- **Superhydrophilie :**

Les verres autonettoyants reposent en partie sur ce principe. Ce type de verre, ordinaire à la base, est doté d'une couche photo catalytique spéciale contenant des nanoparticules de dioxyde de titane appliquée lors de sa fabrication sur sa face extérieure.

Sous l'influence des rayons ultraviolets du soleil, la couche provoque une dégradation progressive des salissures, grâce à un phénomène appelé effet photocatalytique. En d'autres termes, cette réaction chimique sur la surface du verre, déclenchée par l'absorption des rayons ultraviolets, entraîne la destruction des salissures, principalement de la matière organique, les détachant ainsi du verre.

Ce type de verre possède également des propriétés hydrophiliques, ce qui signifie que lorsque de l'eau tombe sur la plaque de verre, elle le nettoie plutôt que de le laisser sale comme un verre ordinaire. Contrairement à un verre traditionnel où les gouttes d'eau restent sur la surface et s'évaporent, laissant souvent des traces, sur ce verre, l'eau forme progressivement un film qui glisse le long de la surface, la nettoyant au passage.

L'utilisation d'une couche superhydrophobe pour les verres autonettoyants produirait un résultat similaire, mais étant donné que le verre de base est hydrophobe, il ne retient pas l'eau. Par conséquent, il est bien plus efficace d'opter pour une couche hydrophile.

III.7.3 Chez les consommateurs :

Les surfaces superhydrophobes offrent aux consommateurs une gamme variée de produits qui simplifient et améliorent leur quotidien. Parmi ces produits :

- Les sprays superhydrophobes (Figure III. 17 (a)) : tels que (Ultra-Ever-Dry, Never-Wet, Visio-Dry ...etc.) dont la capacité de conférer une superhydrophobie à diverses surfaces telles que le béton, le bois, le métal, les tissus et même les composants électroniques. Ces sprays peuvent rendre des objets tels que les smartphones étanches. Leur effet principal est de repousser l'eau et les huiles, tout en offrant des propriétés antigel, anti-érosion et autonettoyantes.

- Les vêtements superhydrophobes (Figure III. 17 (b)) : qui sont devenus populaires ces derniers temps. Les vestes et les chaussures superhydrophobes repoussent l'eau et évitent la pénétration de l'humidité, gardant ainsi les utilisateurs au sec même par temps pluvieux.

- Les vitres de voiture (Figure III. 17 (c)) avec des revêtements superhydrophobes offrent une visibilité améliorée sous la pluie en permettant à l'eau de s'écouler rapidement, réduisant ainsi le besoin d'essuie-glaces.

- Les revêtements de surface (Figure III. 17 (d)) : pour les meubles d'extérieur et les équipements de jardinage, sont également appréciés, car ils facilitent le nettoyage en empêchant l'eau et la saleté de s'accumuler.

Ces produits superhydrophobes sont devenus des choix populaires pour les consommateurs soucieux de la praticité et de la facilité d'entretien dans leur vie quotidienne.

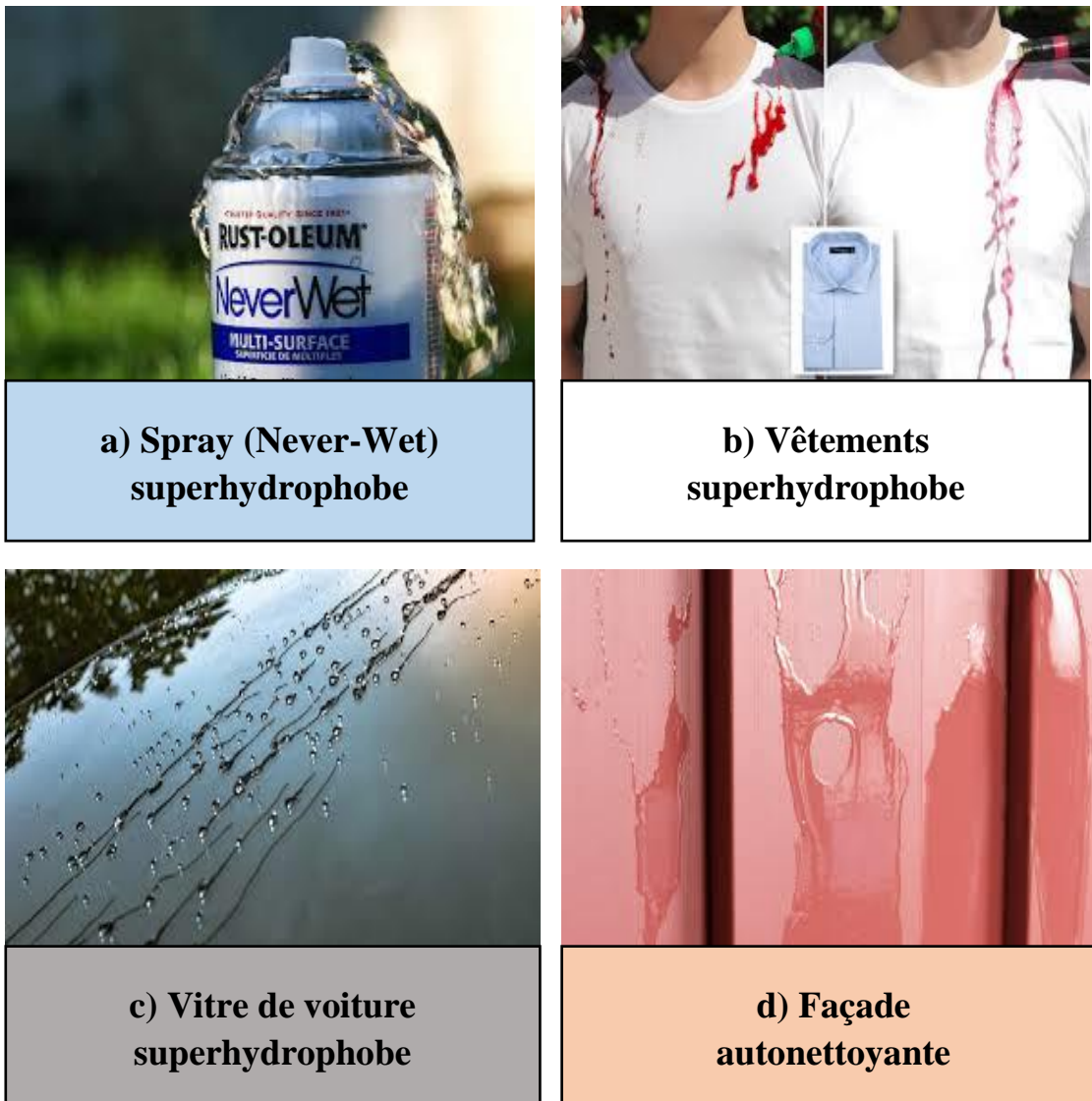


Fig. III. 17 : Produits superhydrophobe.

III.8 Comportement électrohydrodynamique des gouttelettes d'eau sur une surface isolante superhydrophobe

J. li et all [71] ont développé une méthode de fabrication d'une surface superhydrophobe à base de silice de taille nanométrique (particules de SiO_2) et de copolymère méthacrylique perfluoroalkyle (PMC), la surface telle que préparée présente un angle de contact avec l'eau (WCA) de $160,4 \pm 2^\circ$, un angle de glissement (SA) inférieur à 1° (Figure III. 18). Ensuite, ont étudié le comportement électro-hydrodynamique des gouttelettes d'eau sur la surface superhydrophobe et celle de la silicone RTV sous un champ électrique alternatif.

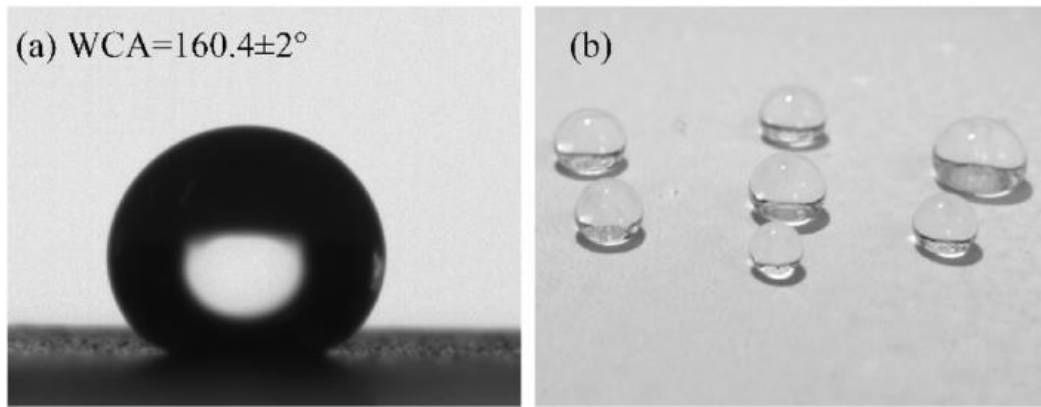


Fig. III. 18 : Angle de contact des gouttelettes d'eau sur la surface superhydrophobe [72]

Ils ont constaté que les gouttelettes d'eau avaient tendance à un mouvement autopropulsé sur la surface superhydrophobe alors qu'elles avaient tendance à s'allonger et à se déformé sur la surface RTV Figure III. 19. La structure de surface micro / nano hiérarchique et les composants chimiques à faible énergie de la surface superhydrophobe ont conjointement contribué à la réduction de la traînée de la fraction de peau et ont par la suite rendu possible le mouvement de gouttelettes d'eau entraînées par un champ électrique. En outre, le mouvement autopropulsé des gouttelettes d'eau pourrait également balayer les contaminations le long de sa trace en mouvement, ce qui offre à la surface superhydrophobe une perspective anti-pollution prometteuse dans les systèmes électriques.

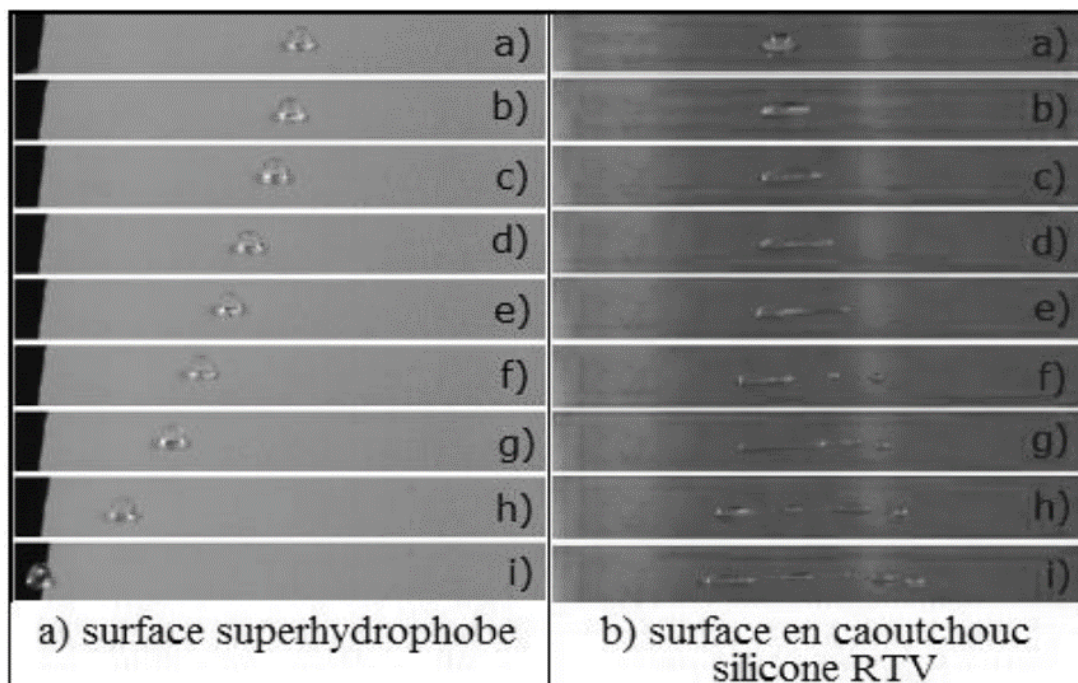


Fig. III. 19 : Comportement électrohydrodynamique de gouttelettes d'eau sur la surface superhydrophobe et la surface en silicone RTV [72]

III.9 Effet de la superhydrophobicité sur les caractéristiques de contournement des isolateurs de haute tension dans des conditions humides

Y Li et al [73] ont étudié l'influence de la faible adhérence de la surface superhydrophobe sur les caractéristiques de la tension de contournement dans des conditions humides. Les expériences de contournement ont été menées dans deux conditions humides différentes. L'une consistait à placer une gouttelette à volume constant sur différents échantillons délimités par deux électrodes Figure III. 20 (a). L'autre était que les échantillons étaient mouillés par du brouillard salin Figure III. 20 (b).

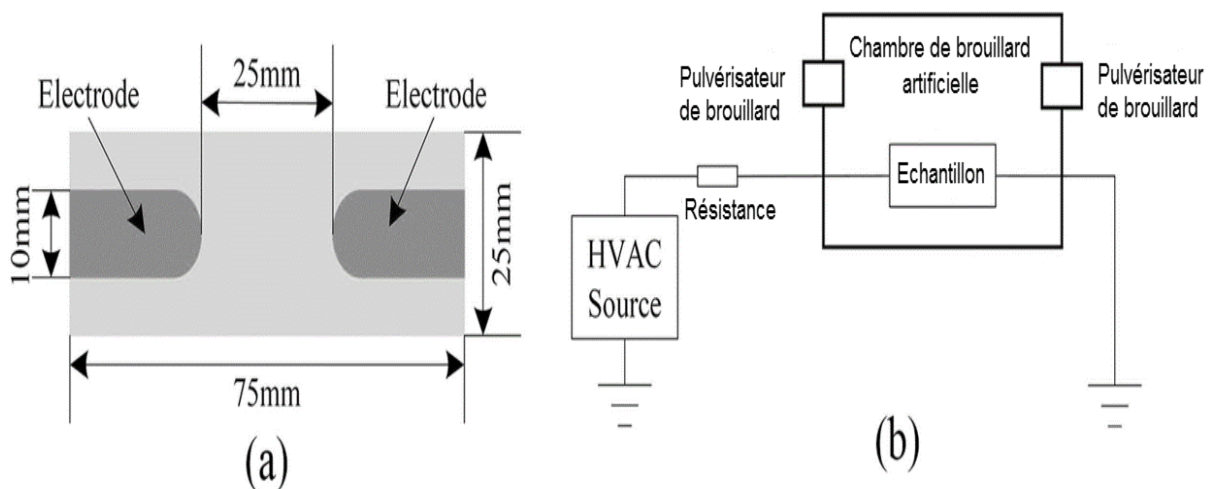


Fig. III. 20 : Dispositif expérimental (a) Echantillon avec deux électrode (b) Echantillon dans une chambre de brouillard [73]

Les caractéristiques des surfaces hydrophobe et superhydrophobe ont été comparées. Une goutte d'eau reste sphérique sur une surface superhydrophobe et son angle de contact est supérieur. Et glisse sans s'allonger sur celle-ci en raison de sa faible adhérence (Figure III. 21 a). La gouttelette quitte la surface superhydrophobe avant que le contournement surgir. Par contre une goutte d'eau de même volume sur une surface hydrophobe sous forme hémisphérique s'allonge vers les deux électrodes au cours de l'application de la tension. Après le contournement, la gouttelette reste encore sur la surface (Figure III. 21 b).

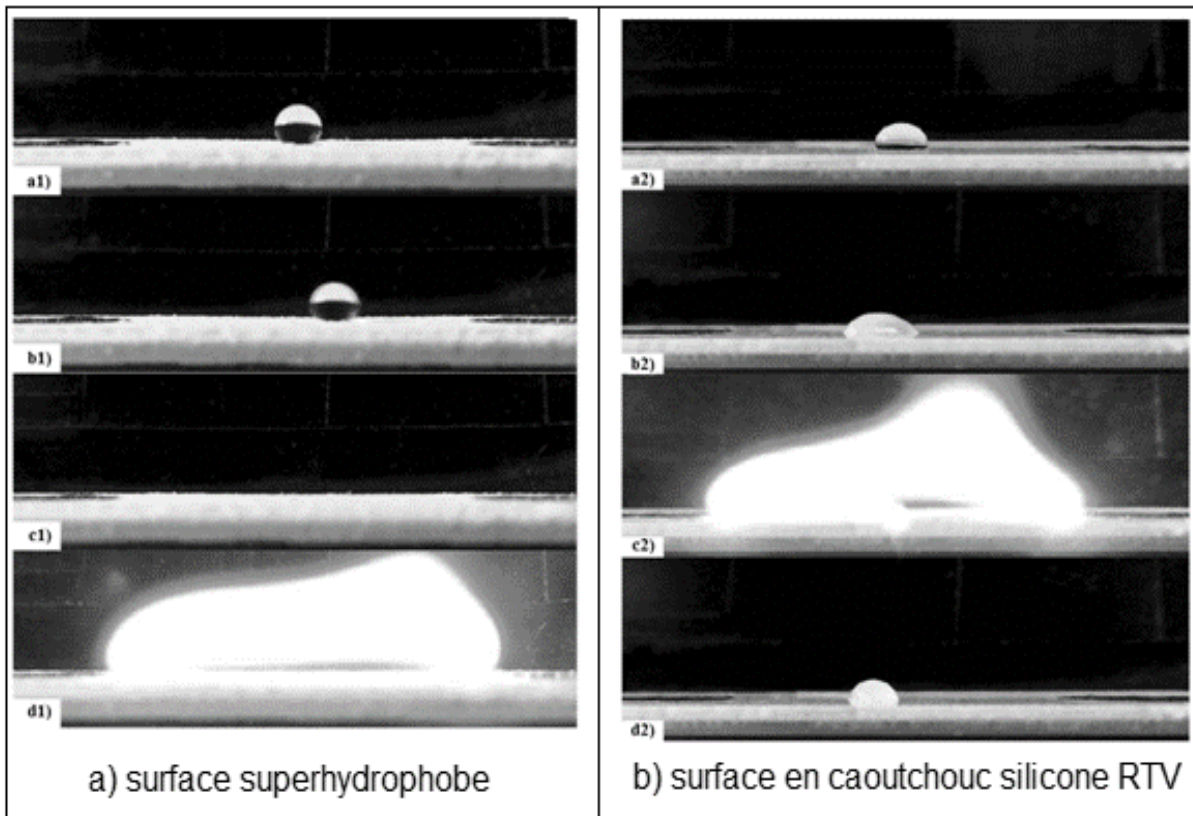


Fig. III. 21 : Processus de contournement de la surface a) en silicone superhydrophobe. b) en silicone hydrophobe [73]

Dans le cas où les échantillons sont mouillés par un brouillard salin. Les gouttelettes atterrissant sur la surface superhydrophobe en position horizontale, se coalescent afin de diminuer leur nombre et augmenter leur volume et le contournement finit par se produire. Contrairement à la surface hydrophobe en position horizontale, la coalisation des gouttes fait augmenter le nombre de zones sèches, mais le contournement de la surface reste inférieur au cas d'une surface superhydrophobe. Ils ont déduit que l'amorçage d'une surface superhydrophobe sous un angle d'inclinaison égal à 20° peut être décrit en trois parties : coalescence puis le glissement des gouttelettes d'eau et enfin le contournement de la surface. Au début, des gouttelettes d'eau coalescent. Cependant, en raison de la faible adhérence de la surface superhydrophobe, les gouttelettes coalescées glissent très facilement sur la surface, et puis beaucoup d'entre-elles quittent celle-ci. Le même processus est appliqué pour la surface hydrophobe sous un même angle d'inclinaison. Mais la tension de contournement reste inférieure par rapport à la surface superhydrophobe Figure III. 22.

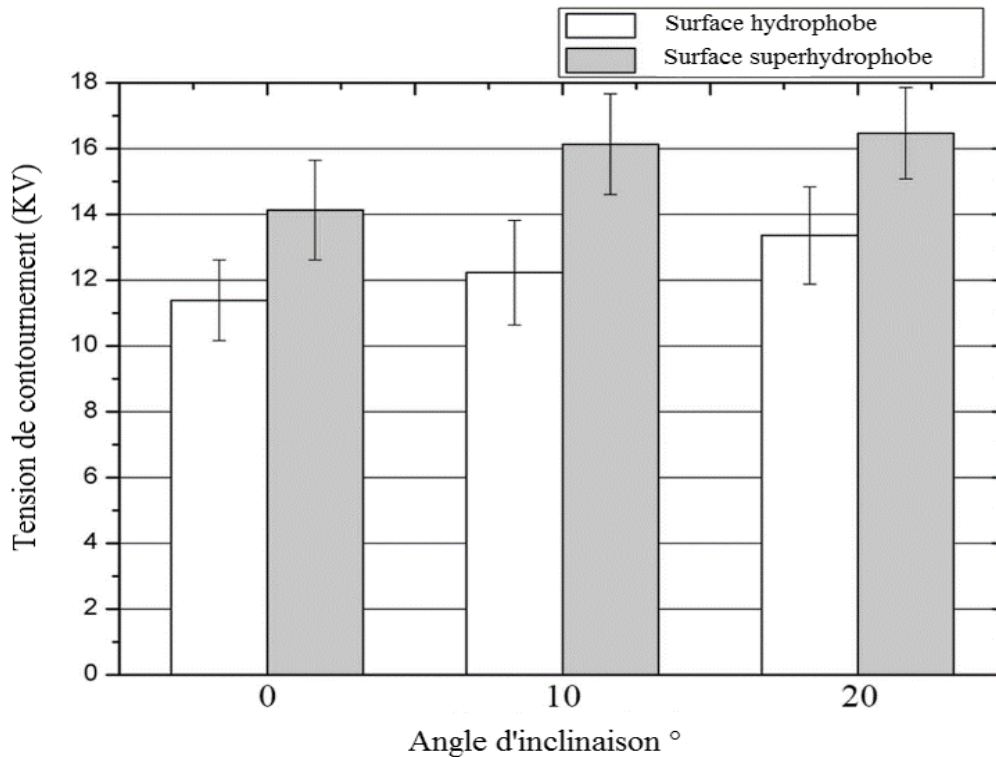


Fig. III. 22 : Tension de contournement de différentes surfaces sous test de brouillard salin [73]

III.10 Propriétés d'antigivrage des revêtements superhydrophobe pour les isolants électriques

L'accumulation de glace sur les isolateurs électrique est l'un des problèmes majeurs des systèmes électriques dans des régions froides. Cette accumulation entraîne souvent un contournement des isolateurs, une rupture de la ligne, et une interruption de la communication, ce qui peut entraîner d'énormes pertes économiques. Des recherches plus récentes ont été consacrées à l'antigivrage et au dégivrage des lignes de transport d'énergie électrique. Parmi ces recherches, la superhydrophobicité a été proposée comme un moyen efficace pour lutter contre le givrage [74], vu que les revêtements superhydrophobe ont un angle de contact d'hystérésis faible avec l'eau, mais aussi une très faible adhérence à la glace [75]. J Li et al [76] ont étudié les propriétés antigivrage du revêtement superhydrophobe sur des isolants électrique. Les expériences de givrage ont été réalisées sur des isolants, traités avec le revêtement hybride PDMS / nano silice superhydrophobe et le revêtement en caoutchouc de silicone RTV, respectivement Figure III. 23. (a et b) Les performances de contournement électrique des chaînes d'isolateurs ont été mesurées.

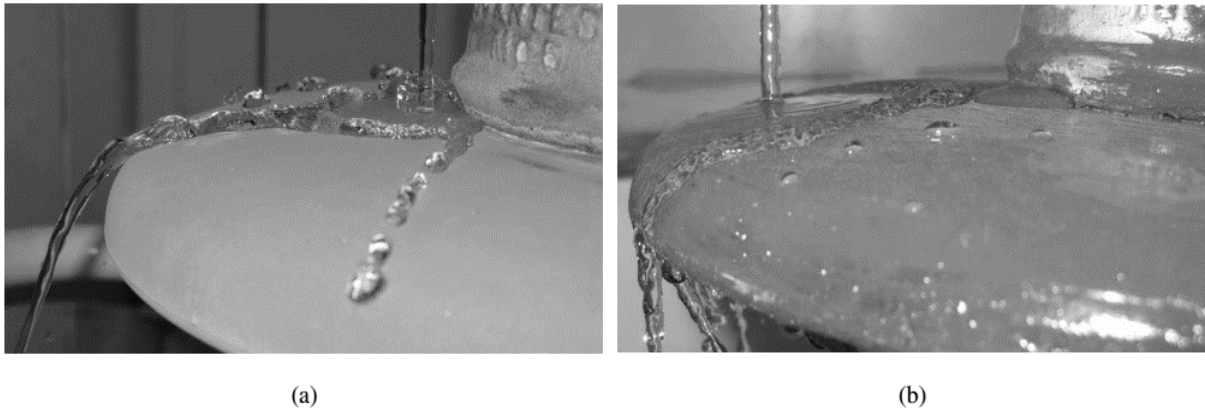


Fig. III. 23 : Image de l'écoulement de l'eau sur les surfaces de (a) surface isolante superhydrophobe (b) surface isolante en silicone RTV [76]

D'après cette étude. Ils ont constaté que le revêtement superhydrophobe par rapport au revêtement en caoutchouc de silicone RTV est le plus efficace pour retarder la formation de la couche de glace, affaiblir l'adhérence de la glace aux isolants et ralentir s'accumulation (Figure III. 24). Dans ce cas, la tension de contournement de l'isolant superhydrophobe est supérieure par rapport à celles du revêtement en caoutchouc de silicone RTV.

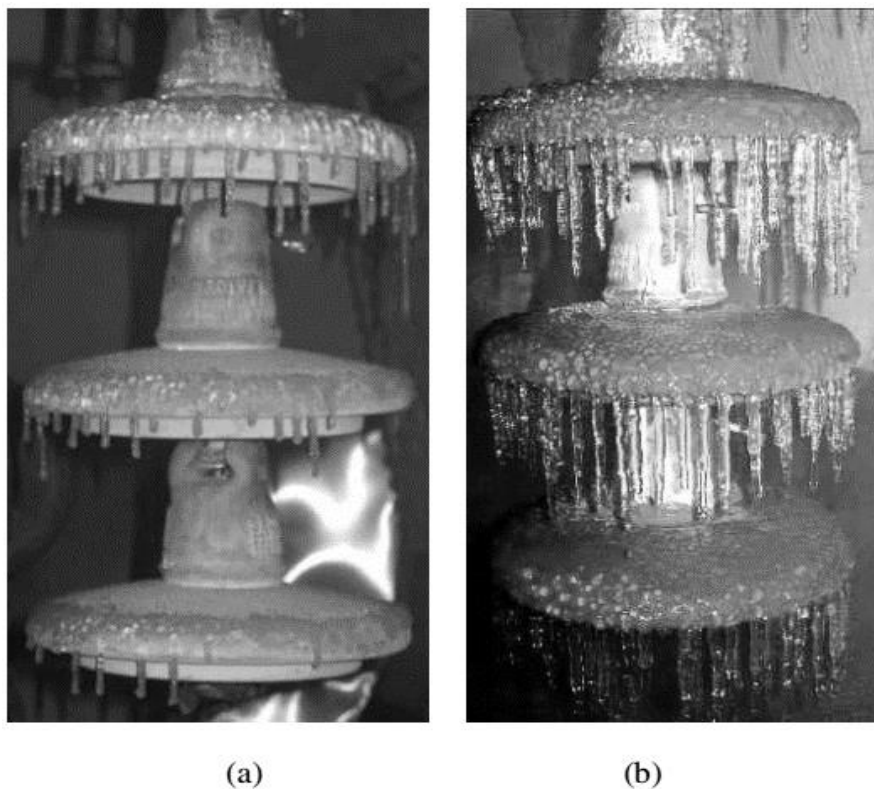


Fig. III. 24 : Accumulation de glace sur les isolants avec (a) revêtement superhydrophobe et (b) avec revêtement en caoutchouc silicone RTV après 3 heures de givrage [76].

III.11 Conclusion

L'étude approfondie des surfaces superhydrophobes révèle leur potentiel révolutionnaire dans divers domaines technologiques. Définies par leur capacité à repousser efficacement l'eau et à minimiser l'adhésion des contaminants. Ces surfaces offrent des propriétés uniques telles que la résistance à l'humidité, l'amélioration de l'efficacité électrohydrodynamique, et des applications prometteuses dans la prévention du givrage.

Cette exploration ouvre la voie à de nouvelles innovations dans la conception d'isolantes hautes performances et de revêtements fonctionnels pour répondre aux défis modernes de l'ingénierie électrique et au-delà.

Chapitre IV

CHAPITRE IV : PARTIE EXPERIMENTALE SUR L'EFFET DE L'ANGLE DE CONTACT DES GOUTTES D'EAU SUR LES SURFACES ISOLANTES

IV. 1 Introduction

Dans l'ingénierie électrique, l'isolation des systèmes haute tension est essentielle pour garantir la fiabilité et la sécurité des réseaux électriques. Les matériaux isolants jouent un rôle crucial en prévenant les décharges électriques susceptibles de provoquer des pannes ou des dommages [19].

Ce chapitre décrit l'étude comparative de diverses propriétés de surfaces isolantes, notamment le verre hydrophile, la silicone hydrophobe et les surfaces superhydrophobes. L'objectif principal est de comprendre les mécanismes de mouillabilité de ces matériaux et comment la contamination à base d'eau affecte leurs performances électriques sous tension. Nous réaliserons des expériences dans lesquelles les angles de contact, les surfaces mouillantes et les tensions de contournement seront mesurés pour ces matériaux, dans le but de trouver le matériau le plus approprié comme isolant dans des conditions humides en fonction de ces propriétés.

IV. 2 Modèle expérimental et techniques de mesure

IV. 2. 1 Modèle expérimental

Le dispositif expérimental utilisé dans ce travail est illustré dans la figure IV.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.

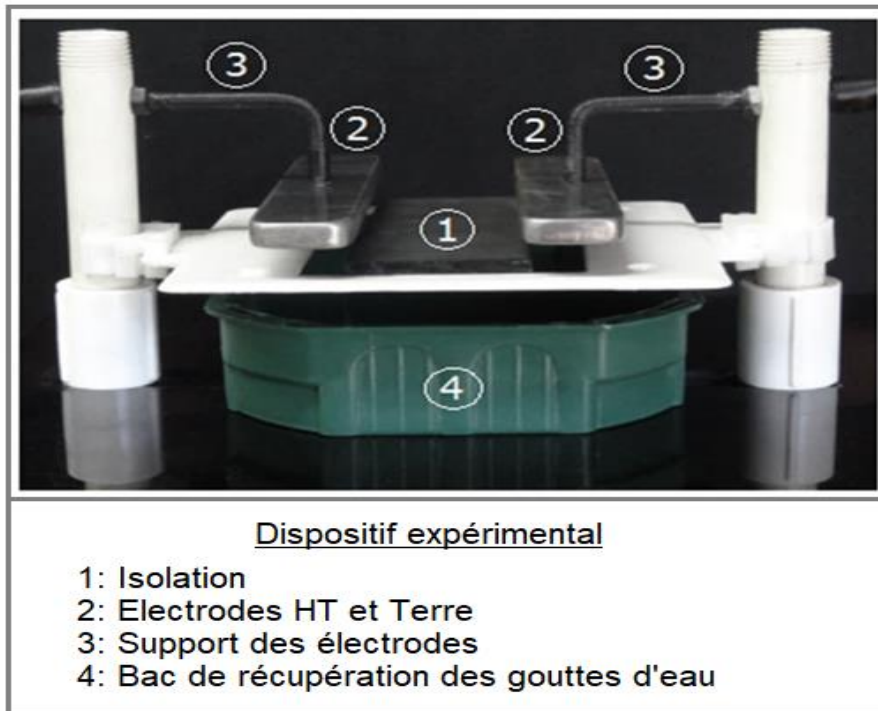


Fig. IV. 1 : Modèle expérimental

IV. 2. 2 Différents types d'isolations

Dans ce travail nous avons choisir deux matériaux isolants les plus utilisés dans le domant de haute tension, telque le verre et le silicone. Les figures IV. 2a et 2b, montrent respectivement une plaque en verre à surface hydrophile et une plaque en silicone HTV à surface hydrophobe de dimensions : 12 cm x 5 cm x 0,5 cm. La figure IV. 2, illustre est une plaque en verre recouverte par une couche superhydrophobe.

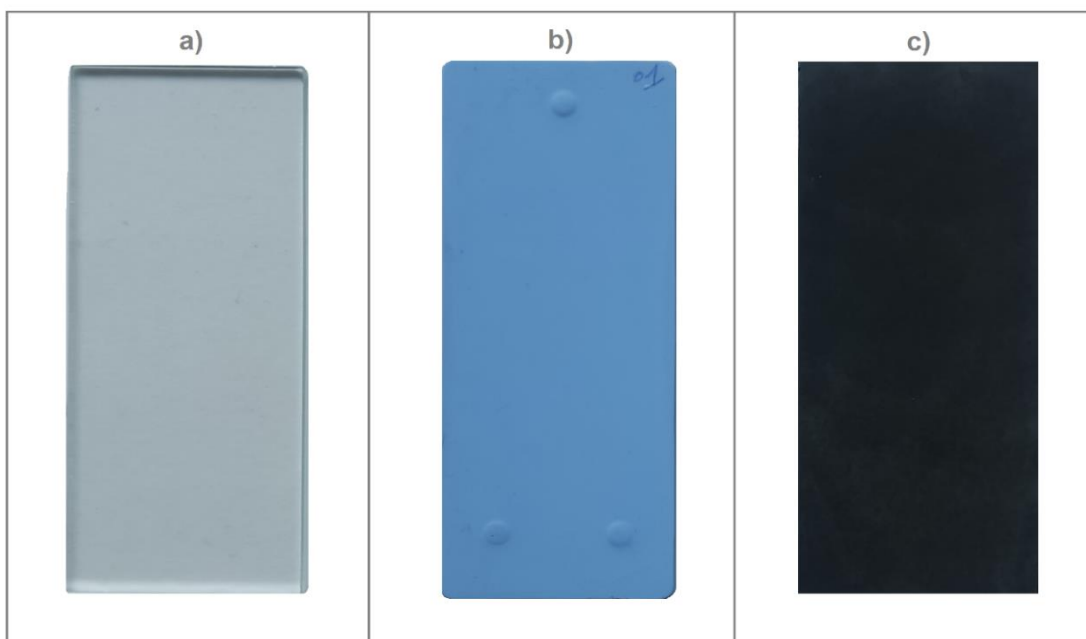


Fig. IV. 2 : Surfaces des isolations

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. IV. 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. IV. 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. IV. b). La figure IV. 3c montre la plaque totalement noircie et nettoyée à l'eau du robinet.

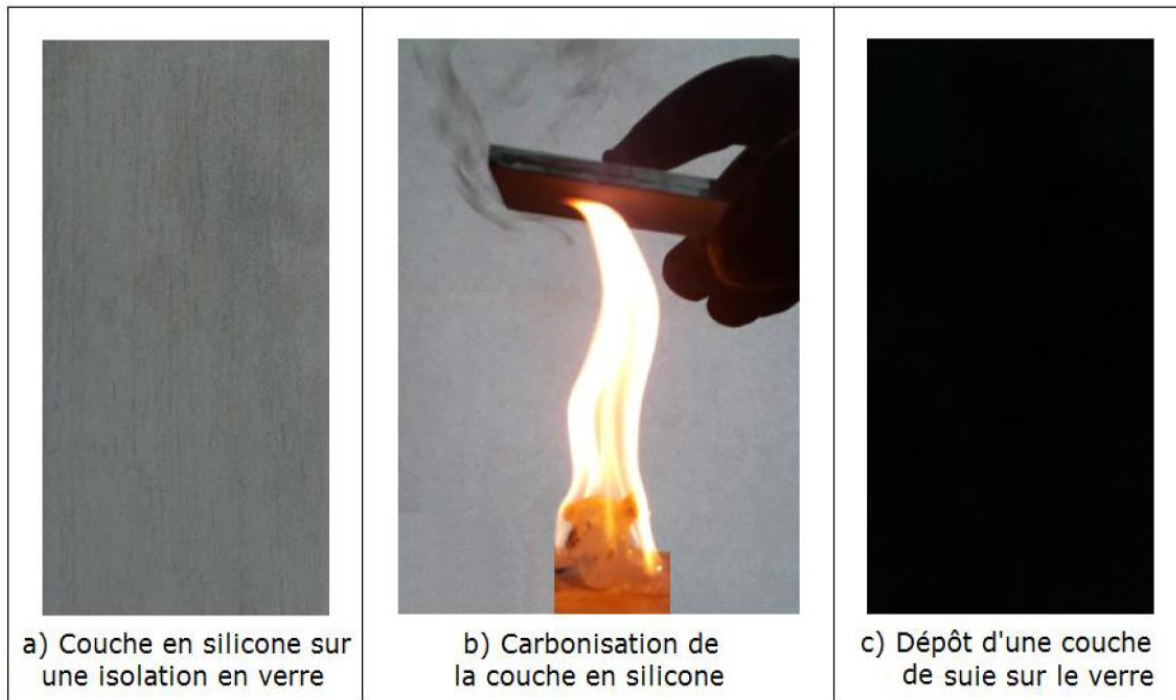


Fig. IV. 3 : Etapes de confection d'une surface en verre superhydrophobe

IV. 2. 3 Arrangement des gouttes d'eau

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. IV. 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.

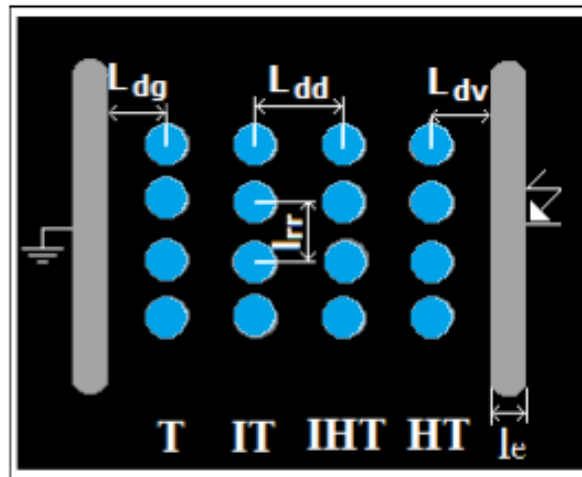


Fig. IV. 4 : Arrangement en lignes droites des gouttes d'eau recouvrant la surface des isolations

IV. 2. 4 Mesure d'angle de contact et de surface de mouillage

Pour réaliser cette partie, nous avons utilisé le logiciel 'ImageJ', qui permet de visualiser, traiter et analyser des images en 2D et 3D, et de mesurer divers paramètres tels que les distances, l'angle de contact, et la surface de mouillage...etc.

Ce logiciel a été développé par le National Institutes of Health (NIH) des États-Unis.

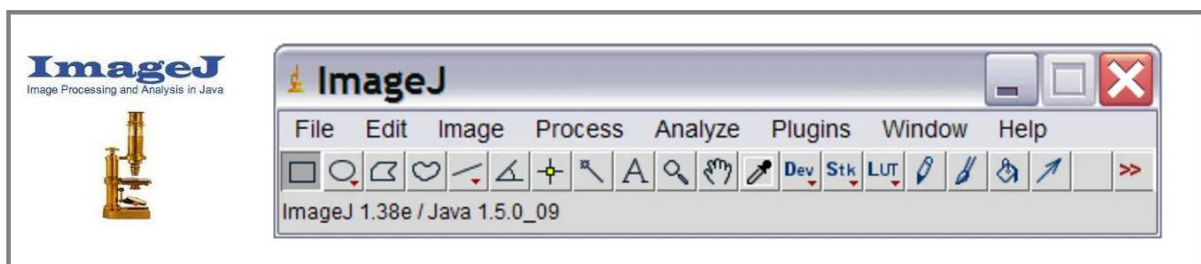


Fig. IV. 5 : Logiciel ImageJ

a) Mesure de l'angle de contact

Pour calculer l'angle de contact avec ImageJ, voici les étapes suivies :

- On commence par l'importation de l'image de la goutte d'eau sur la surface dans ImageJ, puis on sélectionne la zone à travailler et on l'agrandisse ;
- On trace une ligne tangente au point de contact de la goutte avec la surface ;
- On utilise l'outil d'angle d'ImageJ pour mesurer l'angle formé entre cette tangente et la surface ;
- On effectue plusieurs mesures pour obtenir une moyenne afin de minimiser les erreurs.

b) Mesure de la surface de contact

Pour calculer la surface de contact avec ImageJ, voici les étapes générales :

- On commence par l'importation de l'image de la goutte d'eau sur la surface dans ImageJ, puis on sélectionne la zone à travailler ;
- On calibre l'image pour convertir les pixels en unités réelles (dans notre cas, en millimètres) ;
- On sélectionne manuellement et précisément la zone de mouillage en utilisant des outils de détection de seuils ou de contours pour la goutte d'eau ;
- On utilise l'outil de mesure d'aire d'ImageJ pour calculer la surface de la zone de mouillage ;
- On effectue plusieurs mesures pour obtenir une moyenne et minimiser les erreurs.

IV. 2. 5 Station de mesure de la tension alternative

La mesure de la tension d'expulsion de chacune des gouttes d'eau et celle de contournement à sec de l'isolation, est effectuée à l'aide de la station d'essai, illustrée par la figure IV. 6. Celle-ci est constituée d'un transformateur de haute tension (0,08A/135kV), un diviseur de tension capacitif (Co/Cu), un voltmètre de crête (Vcr) à affichage numérique et une surface d'isolation (S). Le circuit de visualisation comprend une caméra (Cam) pour l'enregistrement du mode d'évacuation des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation et un PC pour le traitement d'images à l'aide d'un logiciel Free Vidéo. La valeur de la longueur de la ligne de fuite de l'isolation (Lc) est égale à 4 cm. La tension d'essai appliquée à l'isolation superhydrophobe avec gouttes d'eau est augmentée manuellement par pas de 0.5 kV jusqu'à l'expulsion de la dernière goutte d'eau. La tension d'essai correspondant à l'éjection de chacune des gouttes d'eau ainsi que leur destination ont été relevées.

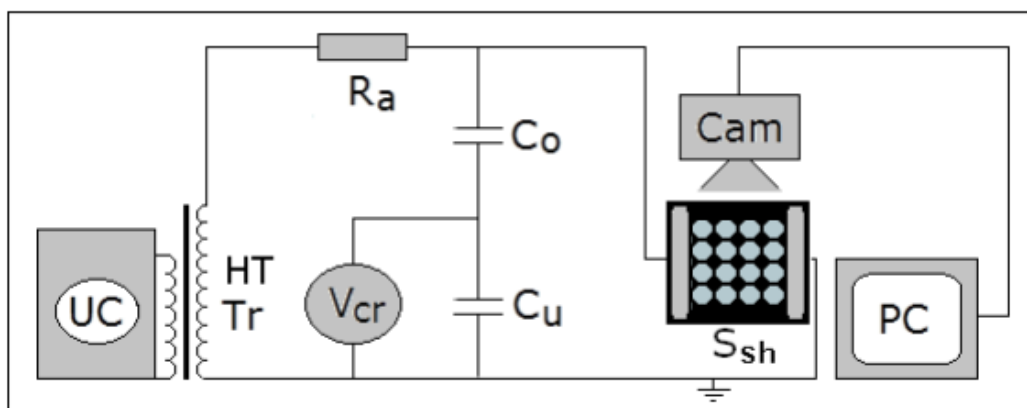


Fig. IV. 6 : Schémas de mesure de la tension alternative

IV. 3 Résultats et discussion

IV. 3. 1 Angle de contact

Après avoir préparé plusieurs échantillons de trois types d'isolation : hydrophile, hydrophobe et superhydrophobe, nous avons observé une différence significative de comportement des gouttelettes d'eau sur les trois matériaux, comme illustre la figure IV.7.

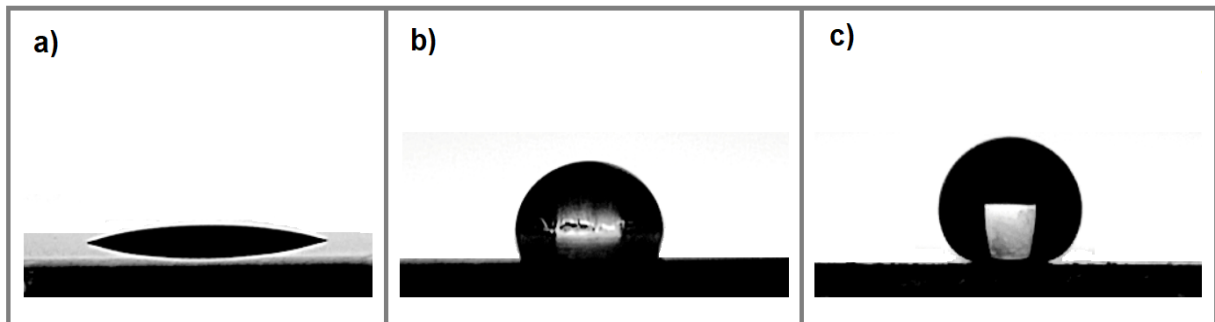


Fig. IV. 7 : Angle de contact d'une goutte d'eau de $V=20 \mu\text{l}$, sur les trois surfaces isolantes. (a) : Verre ; (b) : Silicone ; (c) : Superhydrophobe

La figure IV.7a illustre le comportement d'une goutte d'eau déposée sur une surface en verre, L'angle de contact de celle-ci démontre une interaction hydrophile, caractérisée par un faible angle de contact, avec une valeur de l'ordre de 27° (Fig. IV. 8) et un étalement large sur la surface. Indiquant une faible tension superficielle entre l'eau et le verre.

La figure IV.7b montre le comportement d'une goutte d'eau sur une surface en silicone RTV. Sur celle-ci, la goutte forme un angle de contact élevé par rapport à celui mesuré sur la surface hydrophile, qui est de l'ordre de 101° (Fig. IV. 8), ce qui donne à cette surface une propriété hydrophobe. L'eau forme une goutte plus arrondie (semi-sphérique), suggérant une interaction moins favorable entre l'eau et la surface.

La figure IV.7c présente la forme d'une goutte sur une surface superhydrophobe avec un angle de contact très élevé 106° (Fig. IV. 8). L'eau forme des gouttelettes presque sphériques en minimisant le contact avec la surface, cela démontre une forte tension superficielle entre les deux matériaux.

Pour mieux comprendre ce phénomène, nous avons réalisé une série d'essais sur les trois types de surfaces en augmentant progressivement le volume des gouttes d'eau (5, 10, 20, 40, 60, 80, 100) μL . Ensuite, nous avons observé et analysé les variations de leurs angles de contact sur chaque surface à travers l'histogramme suivant (Fig. IV. 8).

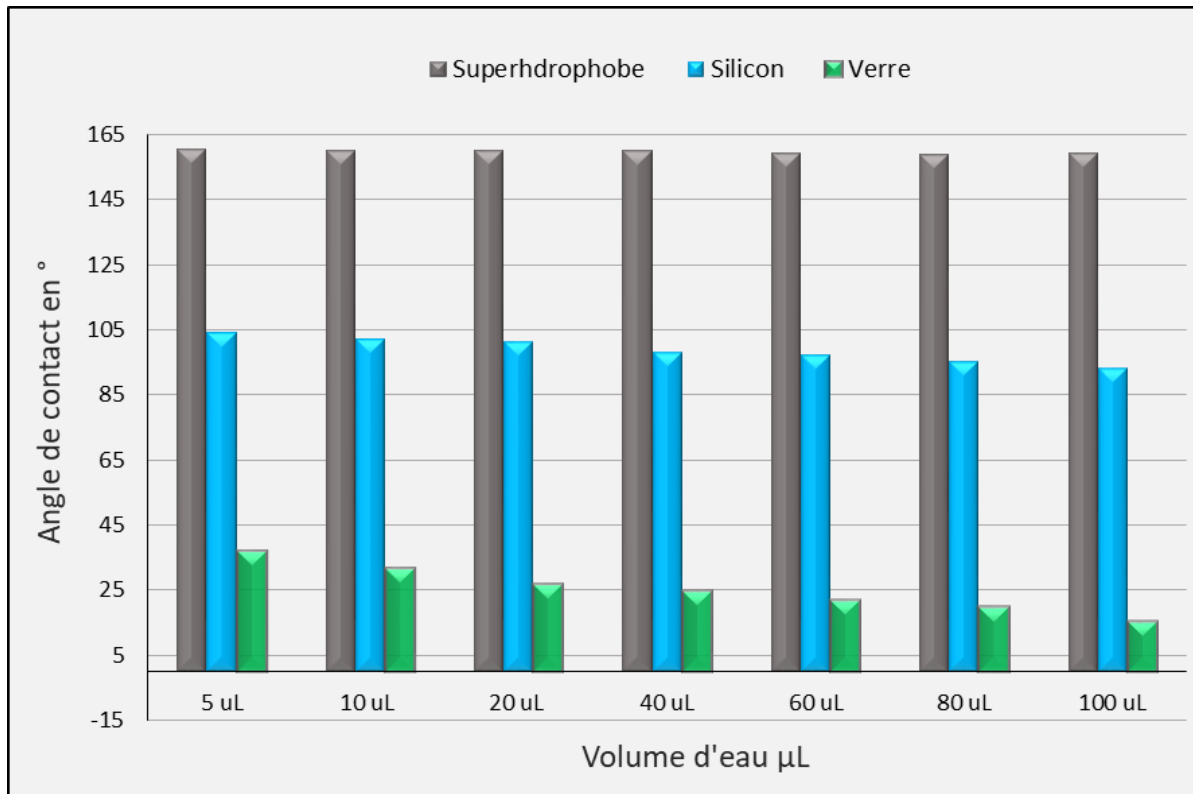


Fig. IV. 8 : Variation de l'angle de contact (°) en fonction de volumes d'eau (μL).

D'après les résultats obtenus, on constate une disproportion significative des angles de contact entre les trois types de surface :

- Les surfaces superhydrophobes maintiennent des valeurs d'angle de contact très élevés et relativement constantes ($159^\circ \pm 1^\circ$) quel que soit le volume d'eau.
- Pour les surfaces hydrophobe (silicone), Les angles de contact sont plus bas que ceux des surfaces superhydrophobes, avec une faible diminution ($\sim 105^\circ$ à 95°) à mesure que le volume d'eau augmente (de 5 à 100 μL).
- Le verre, en tant que matière hydrophile, présente les valeurs d'angle de contact les plus bas parmi les trois matériaux, qui diminuent légèrement avec l'augmentation du volume d'eau (d'environ 30° à 15°).

IV. 3. 2 Surface de mouillage

La Figure IV.9 donne l'histogramme des surfaces de mouillage en fonction des volumes d'eau déposés sur les mêmes trois types de surfaces qui font l'objet de notre étude.

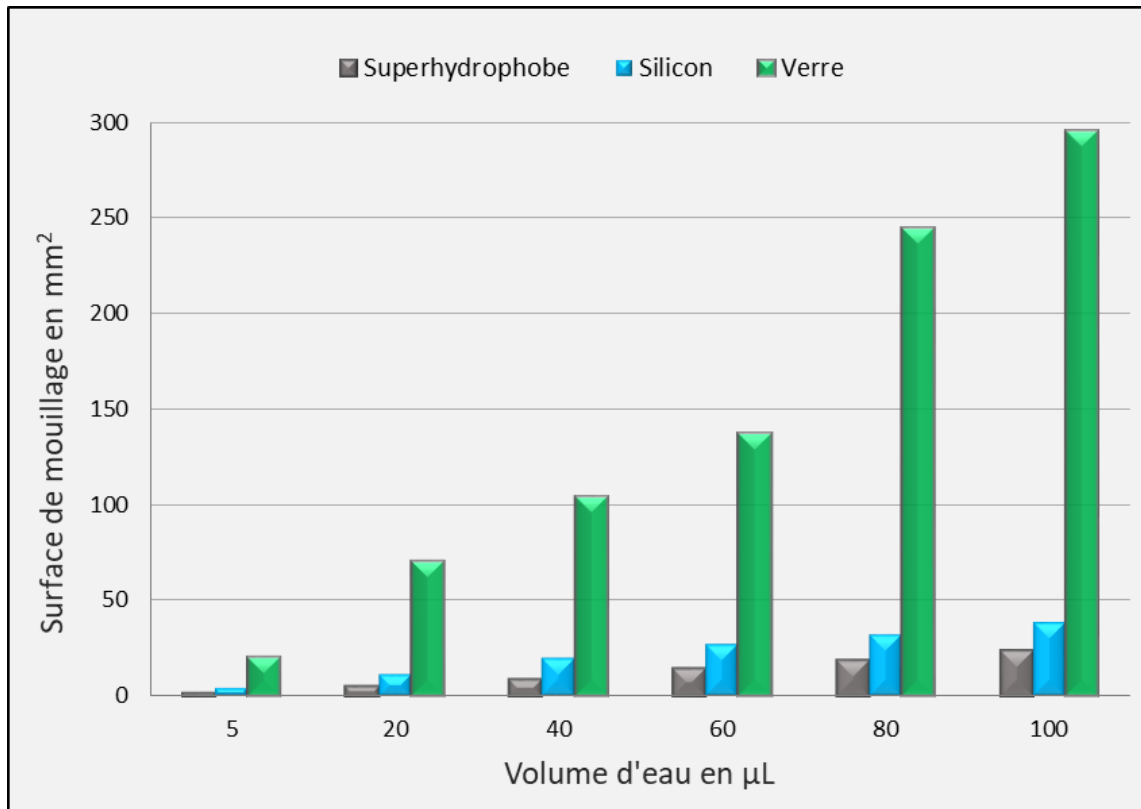


Fig. IV. 9 : Variation de surface de mouillage (mm²) en fonction de volumes d'eau (µL).

Il est évident que le verre présente la plus grande surface mouillante pour chaque volume d'eau, ce qui indique son hydrophobie assez faible par rapport aux autres matériaux. En revanche, les surfaces superhydrophobes présentent les plus petites surfaces mouillantes, mettant en valeur leurs propriétés hydrophobes exceptionnelles. Les surfaces en silicone se situent entre ces deux extrêmes, avec des surfaces mouillantes plus grandes que celles des matériaux superhydrophobes mais plus petites que celles du verre. Cette tendance constante est observée sur différents volumes d'eau testés, allant de 5 à 100 µL.

En résulte que, le verre, étant un matériau hydrophile, présente une forte affinité de sa surface avec des gouttes eau déposées dessus, engendrent un étalement assit large, ce qui correspond à une déformation complète de ces gouttes sur ce type de surfaces (Fig. IV. 10). Contrairement à la surface hydrophile, la surafec 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. IV. 12). 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. IV. 11).

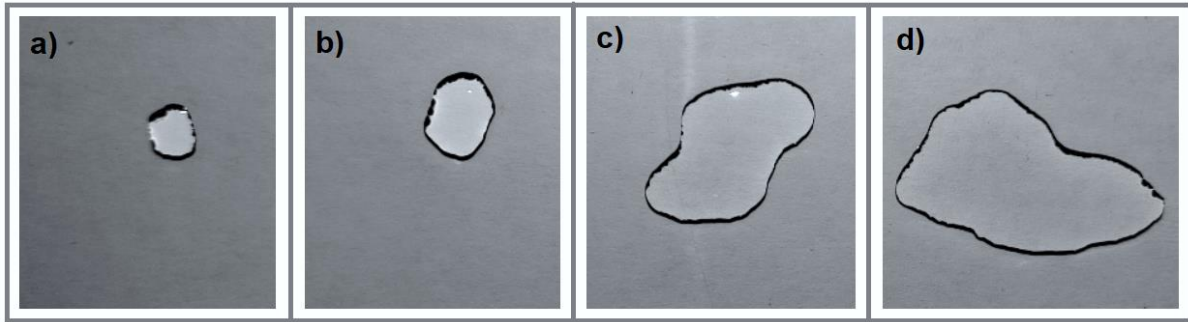


Fig. IV. 10 : Surface de mouillage des gouttes d'eau de volumes distincts (a = 5 μ L, b = 20 μ L, c = 60 μ L, d = 100 μ L) déposées sur une surface hydrophile.

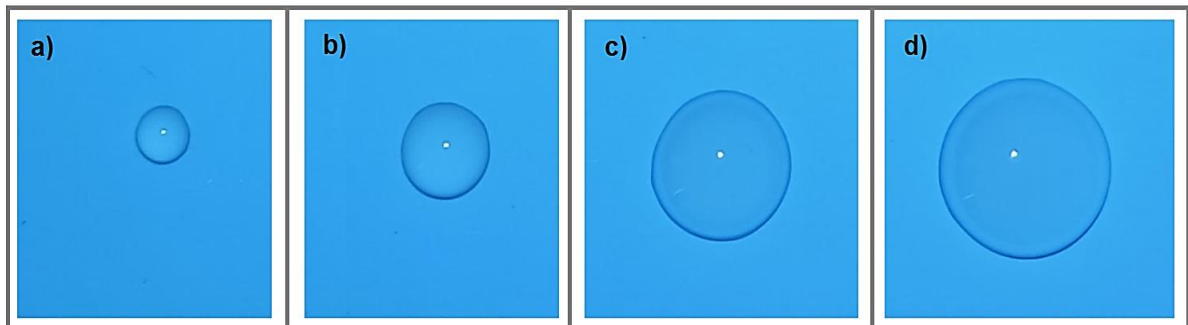


Fig. IV. 11 : Surface de mouillage des gouttes d'eau de volumes distincts (a=5 μ L, b =20 μ L, c = 60 μ L, d = 100 μ L) déposées sur une surface hydrophobe.

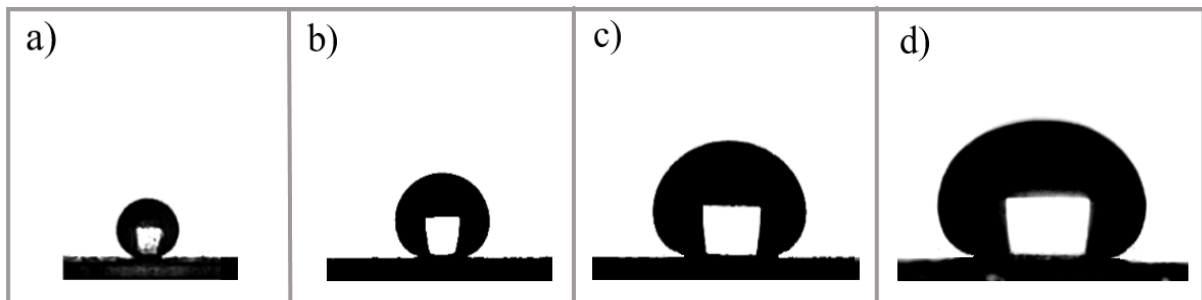


Fig. IV. 12 : Surface de mouillage des gouttes d'eau de volumes distincts (a = 5 μ L, b = 20 μ L, c = 60 μ L, d = 100 μ L) déposées sur une surface superhydrophobe.

IV. 3. 3 Performance électrique des surfaces isolantes sous tension alternative

Dans cette partie, nous avons étudié la tension de contournement sur les trois surfaces susmentionnées. En premier lieu, nous avons réalisé des contournements sur ces surfaces sans présence des gouttes d'eau sur elles. Les résultats de ces essais serviront comme référence à des tensions de contournements en présence des gouttes d'eau sur les surfaces. La deuxième étape, a déposé les 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 jusqu'à le contournement total.

Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure IV.13, qui montre la variation de la tension de contournement en fonction du volume d'eau.

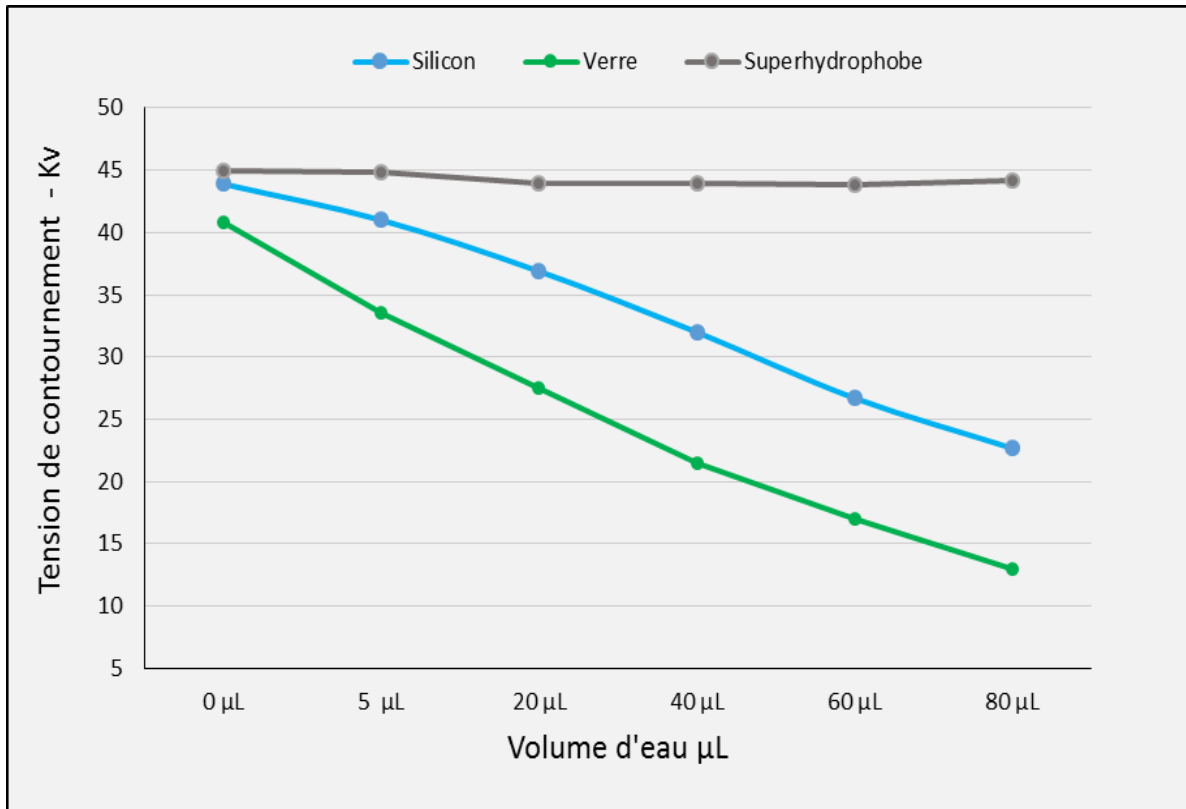


Fig. IV. 13 : Variation de la tension de contournement (kV) en fonction de volumes d'eau (µL).

Ces résultats indiquent que les surfaces superhydrophobes maintiennent une tension de contournement relativement stable autour de 45 kV, indépendamment du volume d'eau appliqué. Cela démontre leur efficacité à repousser l'eau et à empêcher la formation d'un chemin conducteur à travers la surface.

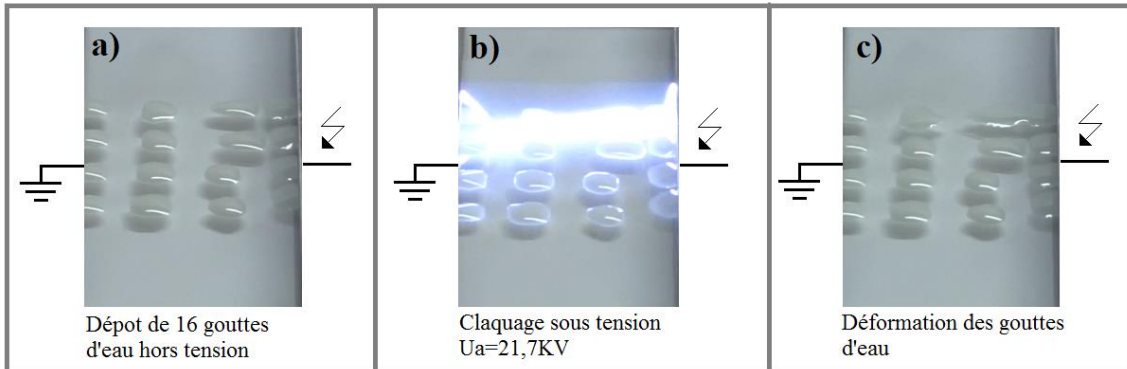
En revanche, la silicone montre une diminution progressive de la tension de contournement, passant de 44 kV sans gouttes d'eau à environ 23 kV avec 16 gouttes d'eau de 80 µL, indiquant une performance de plus en plus dégradée avec l'augmentation du volume d'eau.

Le verre présente la plus forte diminution de la tension de contournement, débutant à environ 40 kV à vide et elle décline à environ de 13 kV avec 80 µL d'eau. Cela suggère une sensibilité élevée à la présence d'eau et une performance globalement inférieure par rapport aux autres matériaux testés. Selon les représentations graphiques de données obtenues, il est évident que la nature de la surface isolante influence sur la tension de contournement.

Les figures ci-dessous représentent l'effet de dépôt de 16 gouttes d'eau, de 40µL de volume, arrangées en ligne droite, sur les trois types de surface :

a) Surface hydrophile (Verre) :

La figure IV.14 représente l'effet des gouttes d'eau déposées sur une surface hydrophile. Pour cette expérience, nous avons déposé 16 gouttes de 40 μL en les arrangeant en ligne droite, et nous avons observé cette disposition hors tension (0 kV) (Fig. IV. 14a). La figure IV. 14. b



montre le moment où l'arc électrique se produit à la surface, c'est ce qui cause la déformation de toute les gouttelettes d'eau et la création des lignes de fuite indésirable (Fig. IV. 14c).

Fig. IV. 14 : Application d'une tension sur une surface hydrophile en présence de 16 gouttes d'eau, de 40 μL de volume, sous arrangement en lignes droites.

b) Surface hydrophobe (Silicone) :

Après avoir déposé 16 gouttes d'eau sur la surface hydrophobe en les arrangeant en ligne droite (Fig. IV. 15a), nous avons appliqué une tension sur cette surface.

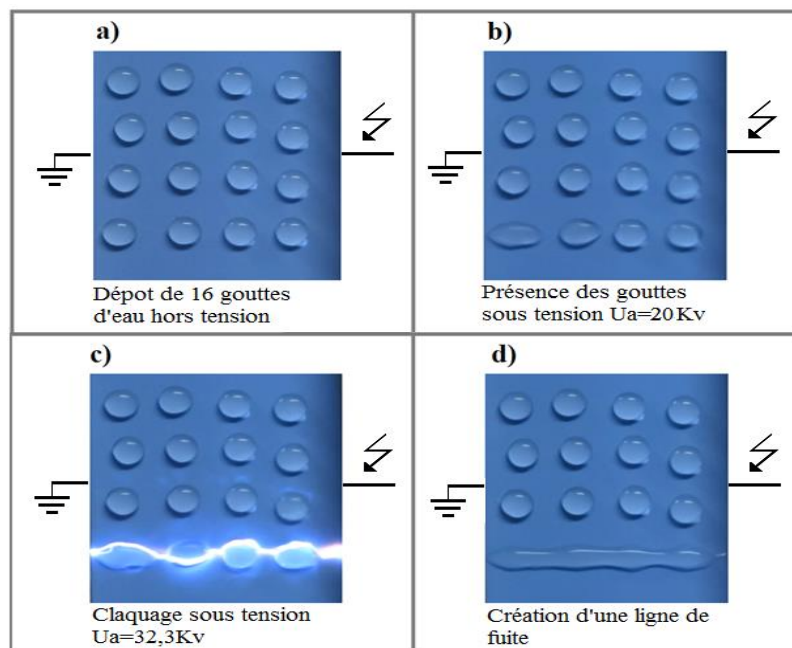


Fig. IV. 15 : Application d'une tension sur une surface hydrophobe en présence de 16 gouttes d'eau, de 40 μL de volume, sous arrangement en lignes droites.

L'observation de la partie (Fig. IV. 15b) nous indique que les gouttes commençaient à se déformer à une tension de 20 kV. Le claquage s'est produit à 32.3 kV (Fig. IV. 14c), créant ainsi un chemin de fuite sous forme d'un fil d'eau qui court-circuite les électrodes.

c) Surface superhydrophobe :

Dans le cas de la surface superhydrophobe (Fig. IV. 16) et après l'application d'une tension alternative, nous avons constaté l'évacuation de toutes les gouttes sauf cinq à une tension de 14 kV, comme le montre la figure IV. 16. b.

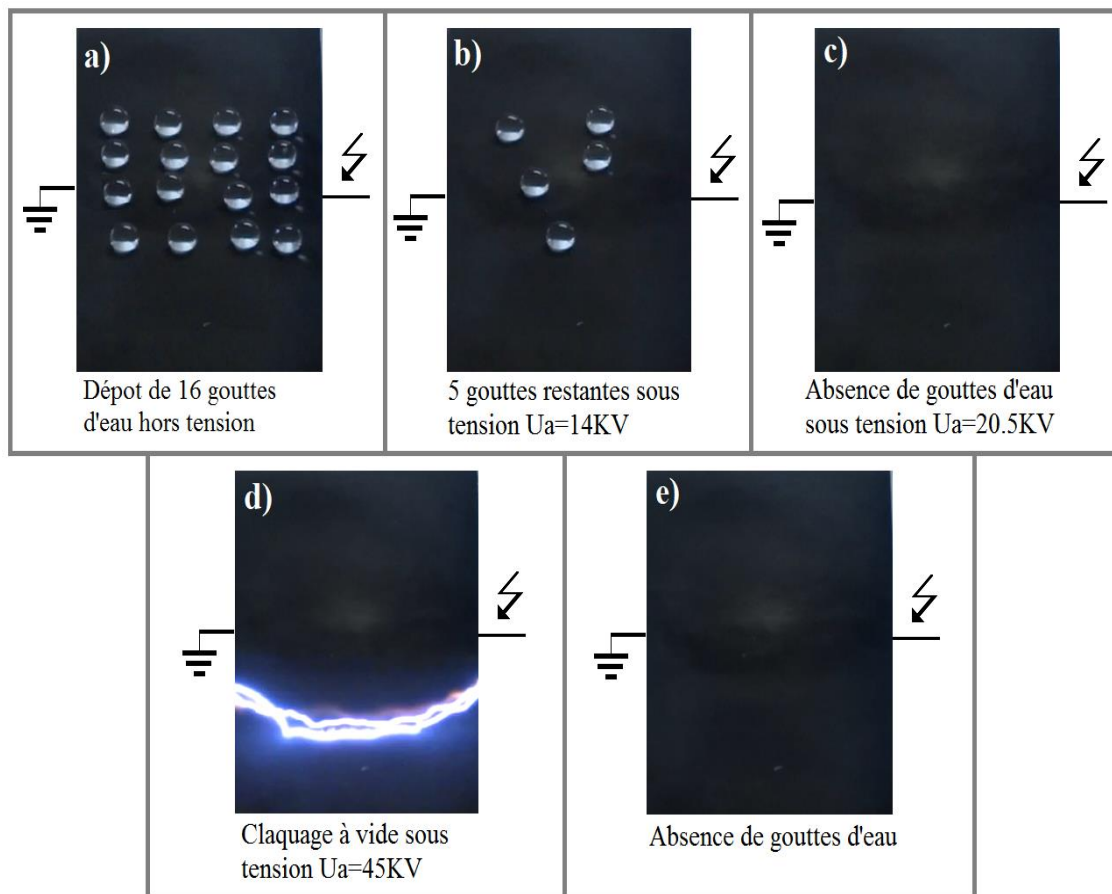


Fig. IV. 16 : Phases essentielles d'expulsion de 16 gouttes d'eau, de 40µL de volume, en dehors de l'isolateur superhydrophobe sous arrangement en lignes droites.

La figure IV. 16. c présente une surface complètement débarrassée de ses gouttes, celles-ci ayant été évacuées de manière uniforme vers les côtés des électrodes haute tension et terre sous une tension de 20,5 kV. Le claquage s'est produit à vide sous une tension de 45 kV (Fig. IV.16d), laissant ainsi la plaque sèche et propre (Fig. IV. 16e). Ce phénomène démontre la capacité des surfaces superhydrophobes à conserver leurs caractéristiques autonettoyantes avant et après le contournement.

La figure IV. 17 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 : verre, silicone et superhydrophobe

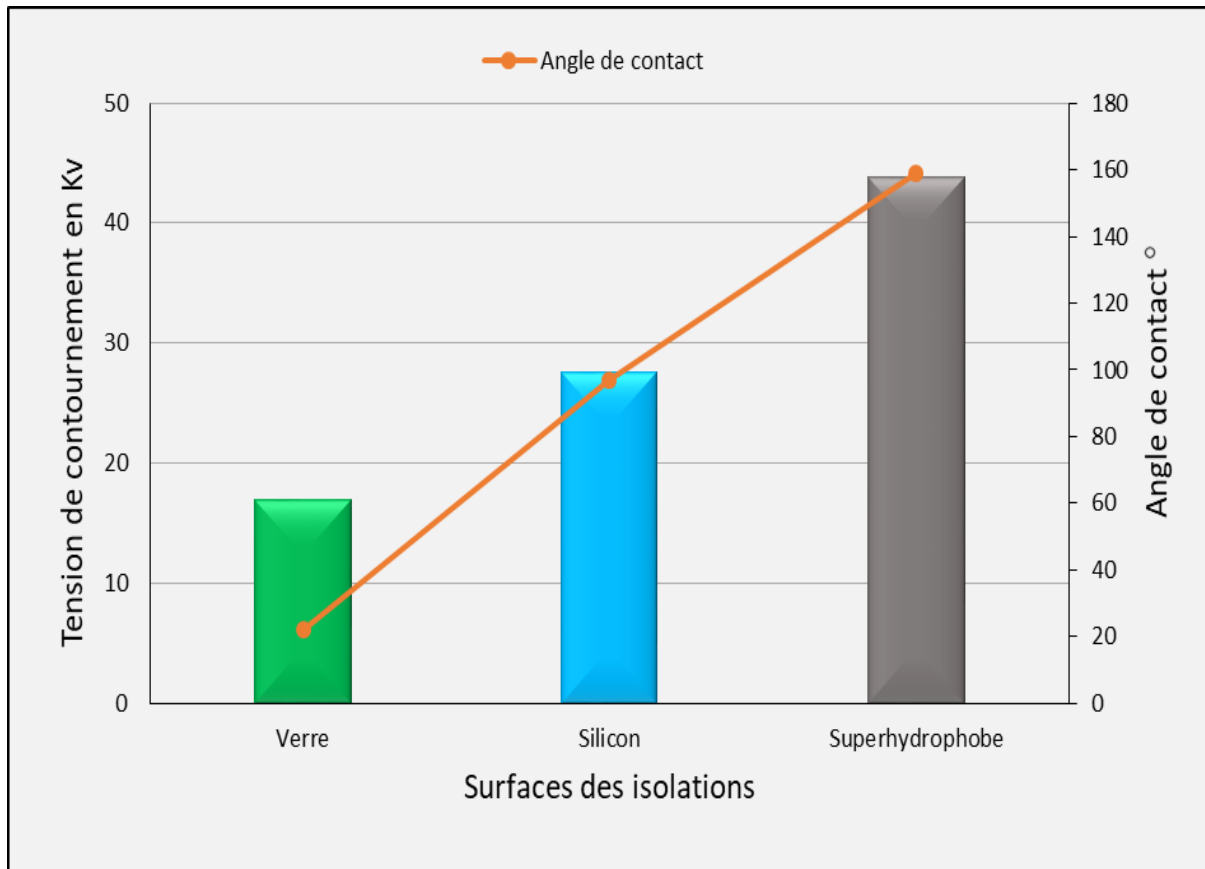


Fig. IV. 17 : Relation entre la tension de contournement (kV) et l'angle de contact des gouttes d'eau (°) pour les trois surfaces des isolations.

On observe que la tension de contournement augmente avec l'angle de contact. 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.

IV. 3. 4 Tension d'expulsion sur surface superhydrophobe

La figure IV.18 montre la relation entre le volume d'eau (μL) et la tension appliquée (kV) sur la surface superhydrophobe pour trois paramètres différents : la tension de contournement, la tension d'expulsion de la première goutte, et la tension d'expulsion de la dernière goutte. Bien que la tension d'expulsion de la première goutte (environ 8 kV à 5 μL et descendant à environ 6 kV à 80 μL) et celle de la dernière goutte (environ 22 kV à 5 μL et descendant à 20 kV à 80 μL) diminuent légèrement avec l'augmentation du volume d'eau, la tension de contournement reste presque constante autour de 45 kV, indépendamment du volume d'eau. Cela pourrait indiquer que les propriétés électriques du système restent largement stables malgré les variations du volume d'eau.

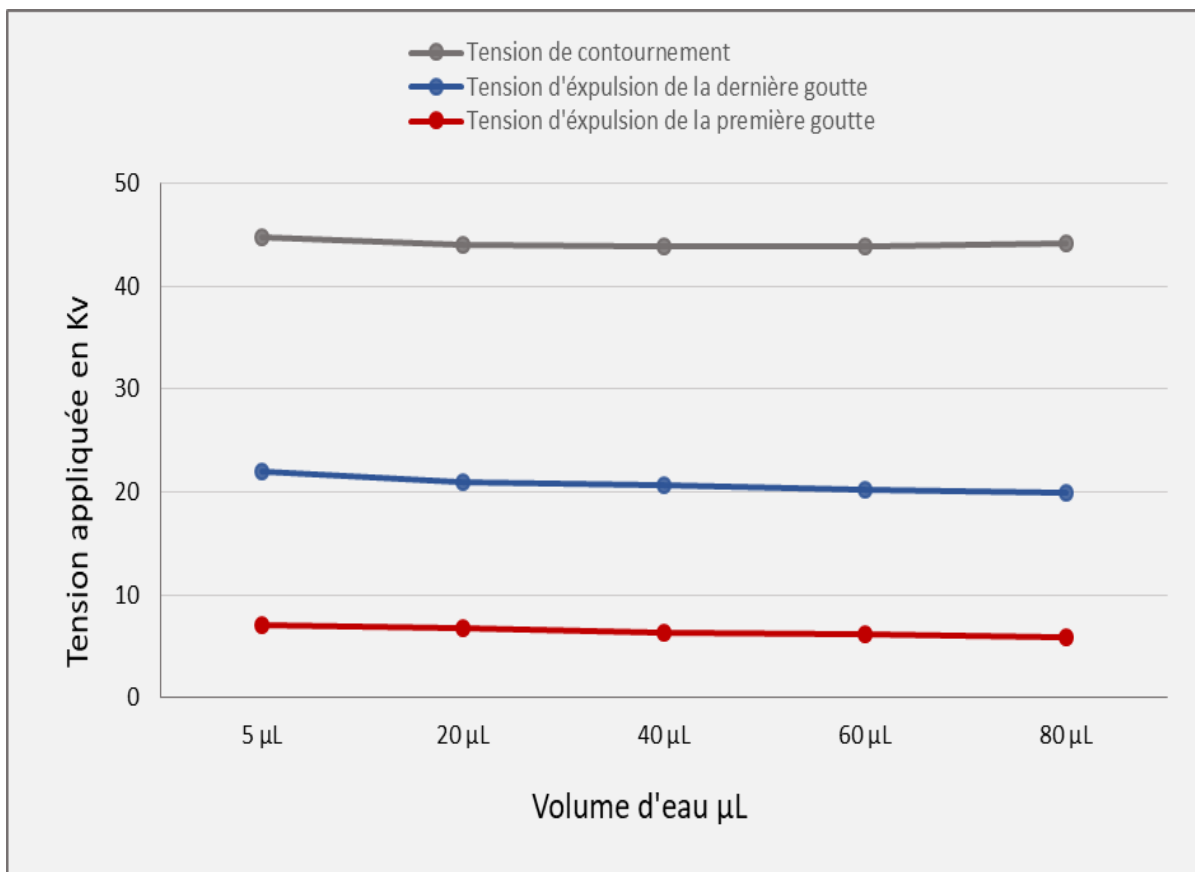


Fig. IV. 18 : Variation de la tension appliquée (de contournement, d'expulsion de la première et de la dernière goutte) (kV) en fonction de volumes d'eau (μL).

La figure (Fig.IV.19) présente histogramme de pourcentage du rapport de tension pour différents paramètres de performance d'un isolateur superhydrophobe.

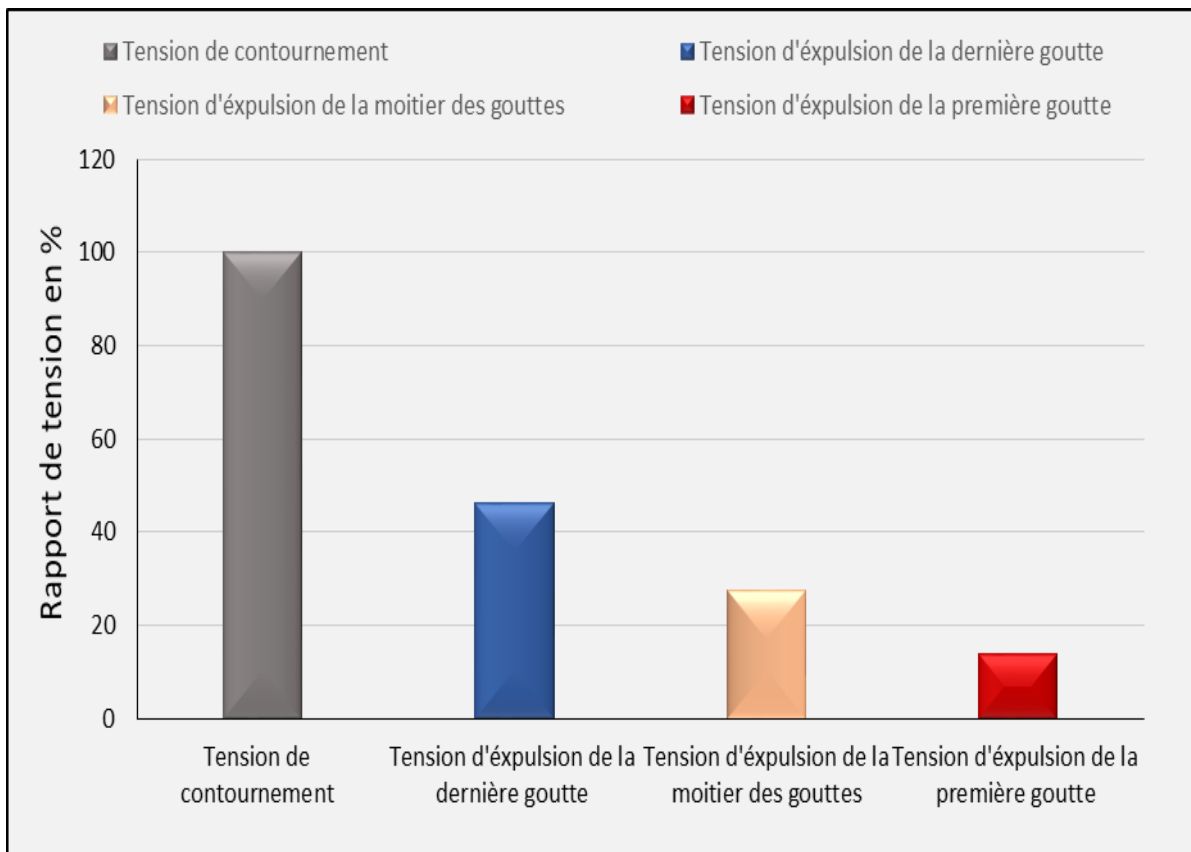


Fig. IV. 19 : Rapport de tension (%) par rapport à la tension appliquée (de contournement, d'expulsion de la première goutte, de la dernière goutte et de la moitié des gouttes) (kV)

La tension de contournement est utilisée comme référence à 100%, significativement plus élevée que les tensions requises pour expulser les gouttes d'eau. La tension d'expulsion de la dernière goutte correspond à environ 50% de la tension de contournement, ce qui montre qu'elle reste en place jusqu'à ce que la moitié de la tension maximale soit atteinte. La tension nécessaire pour expulser la moitié des gouttes est légèrement inférieure à celle pour la dernière goutte, environ 35% de la tension de contournement, suggérant que la majorité des gouttes sont expulsées avant que la tension n'atteigne la moitié de sa valeur maximale. Enfin, la tension d'expulsion de la première goutte est d'environ 18% de la tension de contournement, indiquant que la première goutte est expulsée à une tension relativement faible par rapport à la tension maximale.

IV. 4 Conclusion

Les résultats de cette étude mettent en évidence l'impact significatif des propriétés hydrophobes des matériaux isolants sur leur performance électrique sous tension.

Les surfaces superhydrophobes avec leur angle de contact très élevé, ont démontré une capacité exceptionnelle à repousser l'eau et à maintenir une tension de contournement stable même avec des volumes d'eau croissants. Cette caractéristique réduit considérablement le risque de décharges électriques non désirées et augmente la fiabilité des systèmes haute tension dans des environnements humides. Les matériaux en silicone, bien qu'offrant de meilleures performances que le verre, avec leur angle de contact important, montrent une diminution progressive de la tension de contournement avec l'augmentation du volume d'eau. Quant au verre hydrophile, il présente la plus faible performance en raison de sa forte affinité pour l'eau, et avec angle de contact très faible, cela entraîne une baisse significative de la tension de contournement.

En conclusion, les surfaces superhydrophobes représentent une avancée prometteuse pour l'amélioration de l'isolation des systèmes électriques en milieu humide, offrant une solution viable pour minimiser les risques et optimiser la durabilité des infrastructures électriques.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Ce travail de recherche rentre dans le cadre d'apporter une contribution à une meilleure compréhension sur l'effet de l'angle de contact des gouttes d'eau recouvrant différents types de surfaces isolantes sur leur performance électrique sous haut tension.

Dans ce contexte, notre objectif était d'analyser en profondeur les caractéristiques des isolateurs, et de comprendre comment ces caractéristiques influencent leur performance électrique sous tension alternative en présence d'eau.

Pour parvenir à cet objectif, nous avons utilisé une série de méthodes et de matériels, notamment des essais qui consistent à déposer des gouttelettes d'eau sur trois types d'isolateurs : hydrophile en verre, hydrophobe en silicone et superhydrophobe préparé manuellement en étalant du gel en silicone sur une plaque en verre. Puis nous avons observé leurs comportements en variant la tension appliquée.

L'analyse des résultats de ces essais, a permis de conclure que l'angle de contact, la surface mouillante et la tension de contournement mesurés pour ces matériaux, jouent un rôle crucial dans leur performance électrique, influençant leur résistance et durabilité.

En fonction de ces propriétés obtenues, et dans le but de déterminer le matériau isolant le plus adapté aux conditions humides et polluées, les surfaces superhydrophobes se sont avérées supérieures par rapport aux deux autres types de surfaces. Leur performance dominante garantit qu'elles offrent une solution viable pour minimiser les risques et optimiser la durabilité des infrastructures électriques.

Notre modeste travail est une suite de nombreuses recherches, et elle n'a porté que sur quelque type d'analyses et de caractérisation des systèmes d'isolation, ainsi que pour une seule condition (présence d'eau).

Toutefois, cette étude pourrait être complétée et poursuivi à long terme en vue de l'importance de ces matériaux et de leurs propriétés sur la résistance et la durabilité des lignes électriques.

Références Bibliographiques

- [1] Sims S, "High-voltage Overhead Transmission Lines (HVOTLs) and House Prices," Towers, Turbines Transm. Lines Impacts Prop. Value, pp. 45–53, 2013.
- [2] Gencoglu M. T, "The Comparison of Ceramic and Non-Ceramic Insulators," E-Journal of New World Sciences Academy, vol 2, no 4, pp. 274–294, 2007.
- [3] Vlastos, A.E., Gubanski S.M., "Surface structural changes of naturally aged silicone and EPDM composite insulators," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 6, no. 2, pp. 888-900, Apr. 1991.
- [4] GAVEY, J.: 'Insulators for aerial telegraph lines', / . Soc. Tel. Engrs., 1878, 7, (22) & (23)
- [5] Looms, J.S.T., "Insulators for high voltages," IEE Power Engineering Series, vol.7, Peter Peregrinus Ltd., ISBN 9780863411168, 1988.
- [6] Carver M and Barbara S "The Evolution of High Tension Power Distribution" at the 36th Annual National Insulator Association Convention in San Jose, California July 8 - 10, 2005
- [7] https://classicconnectors.com/downloads/Transmission_and_Distribution_Hardware.pdf
- [8] <https://www.r-infinity.com/index.htm>
- [9] Hewlett, E. M. "A new type of insulator for high-tension transmission lines." Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers 26.6 (1907): 975-979.
- [10] <http://www.cjow.com/archive/article.php?month=2&a=02The+High+Voltage+Transmission+Insulator.htm&year=1972>
- [11] CHERNEY, E. A.: 'Cement growth failure of porcelain suspension insulators'. AMEU, Ottawa, 1982
- [12] ELY, C. H. A., and LAMBETH, P. J.: 'Artificial pollution test for high voltage outdoor insulators'. Proc. IEE, 1964, 111, pp. 991-998
- [13] FUJIMURA, T., NAITO, K., and IRIE, T.: 'Performance of semiconducting glaze insulators under adverse conditions'. IEEE Trans., 1978, PAS-97, pp. 763-771
- [14] NIGOL, O., REICHMAN, J., and ROSENBLATT, G.: 'Development of new semiconductive glaze insulator', IEEE Trans., 1974, PAS-93, pp. 614-621
- [15] SMITH, E. J. D.: 'The corrosion of semiconducting glazes', Trans. Brit. Ceram. Soc, 1959,58, pp. 277-300
- [16] Gillespie, T., "Australian experience with composite insulators," vol.1, presented at Symposium on Outdoor Insulators, Brisbane, Australia, 2002.
- [17] Chang, J., and Gorur, R., "Hydrophobicity of silicone rubber used for outdoor insulation," Properties and Applications of Dielectric Materials, Proceedings of the 4th International Conference on, 1994.
- [18] Swift, D., Spellman, C. and Haddad, A., "Hydrophobicity transfer from silicone rubber to adhering pollutants and its effect on insulator performance," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 13, no. 4, pp. 820-829, 2006.

- [19] Kim, S., Cherney, E., and Hackam, R., "Hydrophobic behavior of insulators coated with RTV silicone rubber," *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 27, pp. 610-622, 1992.
- [20] Lambeth P., "The use of semiconducting glaze insulators," *Cigre, Electra*, Vol. 86, pp. 89-106, 1/1983.
- [21] Mackevich, J., and Shah, M., "Polymer outdoor insulating materials. Part I: Comparison of porcelain and polymer electrical
- [22] insulation," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 13, pp. 5-12, 1997. www.sevespower.com: "Sediver High Resistivity insulators for HVDC applications", USA/Canada 2013.
- [23] Cherney, E. A. "Cement growth failure of porcelain suspension insulators." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 8 (1983): 2765-2774.
- [24] Munz D and Fett T, "Ceramics: mechanical properties, failure behaviour, materials selection," Springer Science & Business Media, vol. 36, 2013.
- [25] Ndoumbe, J. (2014, March 11). "Etude comportementale des gouttelettes d'eau déposées sur la surface d'un isolateur composite haute tension en présence du champ électrique." <https://theses.hal.science/tel-00985438>.
- [26] 4. Barrie, J. A. "Diffusion in polymers." In *Polymers in a Marine Environment Conference*. 1968.
- [27] 5. "History of Composite Insulators", Hoechst CeramTec Communique, Wunsiedel, 05.06. 1990, V/H-Dr.Ki/GO
- [28] 6. Dey, P., B. J. Drinkwater, and S. H. R. Proud. "Developments in insulation for high voltage overhead transmission systems." 1969 9th Electrical Insulation Conference. IEEE, 1969.
- [29] 7. 9 Bruins PF, editor. *Epoxy resin technology*. Wiley-Interscience; 1968.
- [30] 8. Lambeth, P. J., J. S. T. Looms, M. Sforzini, C. Malaguti, Y. Porcheron, and P. Claverie. "International research on polluted insulators." In *CIGRE*. 1970.
- [31] 10. Dakin, Thomas W., and G. A. Mullen. "Continuous recording of outdoor insulator surface conductance." In 1971 EIC 10th Electrical Insulation Conference, pp. 285-289. IEEE, 1971.
- [32] 11. Dey, P., B. J. Drinkwater, and S. H. R. Proud. "Developments in insulation for high voltage overhead transmission systems." In 1969 9th Electrical Insulation Conference, pp. 38-43. IEEE, 1969.
- [33] 12. R. G. Niemi, "Self-Priming Silicone Elastometric Coating for High Voltage Insulator Bodies", *Proceedings of IEEE Electrical Insulation Symposium*, 1971
- [34] J. F. Hall, "History and bibliography of polymeric insulators for outdoor applications," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 1, pp. 376-385, Jan. 1993, doi: 10.1109/61.180359

- [35] X. Ducouret, "Overhead lines: equipments. Insulators", *Techniques de l'ingénieur. Génie Electrique*, vol. D9, Iss, D181, pp. D4423-1-D4423-10, Feb 2004.
- [36] G.G. Karady, H.M. Schneider et F.A.M. Rizk, "Review of CIGRE and IEEE Research into Pollution Performance of Nonceramic Insulators : Field aging Effects and Laboratory Test Techniques", *CIGRE 33-103*, Août/Septembre 1994.
- [37] STRI, "Hydrophobicity Classification Guide," vol. Guide 1, 92/1, 1992.
- [38] Y. Zhu, M. Otsubo, C. Honda, and S. Tanaka, "Loss and recovery in hydrophobicity of silicone rubber exposed to corona discharge," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 91, no. 7, pp. 1448–1454, juillet 2006.
- [39] 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, pp. 299–306, 1996.
- [40] H. Hillborg, *Loss and Recovery of Hydrophobicity of Polydimethylsiloxane after Exposure to Electrical Discharges*. GRIN Verlag, 2012.
- [41] A. J. Phillips, D. J. Childs, and H. M. Schneider, "Aging of nonceramic insulators due to corona from water drops," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, no. 3, pp. 1081– 1089, 1999.
- [42] J. P. Reynders, I. R. Jandrell, and S. M. Reynders, "Review of aging and recovery of silicone rubber insulation for outdoor use," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 6, No. 5, pp. 620–631, 1999.
- [43] W. Shaowu, L. Xidong, G. Zhicheng, Y. Jun, and S. Qinghe, "Investigation on hydrophobicity and pollution status of composite insulators in contaminated areas," in *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2001 Annual Report*, pp. 628–631, 2001.
- [44] T. Tahri, "Élaboration D'un Modèle Dynamique De Contournement D'un Isolateur Pollué Sous Tension Alternative", *Mémoire de fin d'études, N° d'ordre : REs 225 Université de Mohamed Boudiaf-Msila*, 2016.
- [45] Les résultats de la recherche en science du développement durable, "La pollution dans tous ses états", 2013 *Planète viable*. <http://www.planeteviable.org>.
- [46] L.A. Richards, "Diagnosis and improvements of saline and alkali soils". 1954, U.S. Salinity Laboratory DA, US Dept. Agr. Hbk 60, 160 p.
- [47] CEI 815, Commission Électrotechnique Internationale, rapport de la CEI, "Guide pour le choix des isolateurs sous pollution", publication 815, première édition, Genève, Suisse, 1986.
- [48] A. El- Sulaiman and M. I. Qureshi, "Effect of contamination on the leakage current of inland desert insulators", *IEEE. Trans. On E.I*, Vol. E.I-19, no 4, August, 1984.
- [49] D'M.E.A, SLAMA, « Haute tension isolation externe », Université des sciences et de technologies d'Oran, www.slideshare.net/AmineSLAMA/Hautetension-extreme-pollution65397457, mai 2019.
- [50] R. Ydjedd, *Mémoire de fin de cycle « Performance d'une surface en silicone recouverte des gouttes d'eau sous tension alternative »*, 06/2013.

- [51] F. Bouchelga, "Etude du développement des décharges électriques parallèles sur une surface isolante large et polluée sous tension continue", Thèse de doctorat, Université A. Mira de Bejaia, juin 2016.
- [52] CEI 815, Commission Électrotechnique Internationale, rapport de la CEI, "Guide pour le choix des isolateurs sous pollution", publication 815, première édition, Genève, Suisse, 1986.
- [53] C. H. A. ELY et P. J. LAMBETH Ely, C. H. A., and P. J. Lambeth. "Artificial-pollution test for high-voltage outdoor insulators." *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. Vol. 111. No. 5. IET Digital Library, 1964.
- [54] Lambeth, P. J., et al. "The salt fog test and its use in insulator selection for polluted localities." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 6 (1973): 1876-1887.
- [55] Sima, W., et al. "Effect of non-uniform pollution on the withstand characteristics of extra high voltage (EHV) suspension ceramic insulator string." *IET generation, transmission & distribution* 4.3 (2010): 445-455.
- [56] Bouchelga, R. Boudissa, T. Boughani, "Effet des décharges électriques parallèles sur la performance d'une isolation en verre non uniformément pollué sous tension continue", Conférence SFE2016, Université de Poitiers, France, 2016.
- [57] R. Boudissa, A. Bayadi, R. Baersch, "Effect of Pollution Distribution Class on Insulators Flashover under AC Voltage", *Electric Power Systems Research* 104, pp.176 – 182, 2013.
- [58] F. Aouabed, A. Bayadi, R. Boudissa, "Flashover voltage of silicone insulating surface covered by water droplets under AC voltage", *Electric Power Systems Research* 143, pp. 66–72, 2017.
- [59] Amin, M., Akbar, M., and Khan, M.N., "Aging Investigations of Polymeric Insulators: Overview and Bibliography," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 23, no. 4, pp. 44-50, 2007.
- [60] Spellman, C., Young, H., Haddad, A., Rowlands, A., and Waters, R., "Survey of polymeric insulator ageing factors," *XI International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)*, vol. 4, pp. 160-163, London, UK, 1999.
- [61] STRI Guide: "Composite insulator status program: field inspection of composite line insulators," *STRI Guide* 3, 2005.
- [62] STRI Guide: "Visual identification of deterioration and damages on suspension composite insulators", *STRI Guide* 5, 1/1998.
- [63] Lambeth, P., "Effect of pollution on high-voltage outdoor insulators," *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 118, no. 9, pp. 1107-1130, 1971.
- [64] M. Nosonovsky and B. Bhushan, *Multiscale Dissipative Mechanisms and Hierarchical Surfaces: Friction, Superhydrophobicity, and Biomimetics*, Springer Science & Business Media, 2008.
- [65] J. Drelich and A. Marmur, "Physics and applications of superhydrophobic and superhydrophilic surfaces and coatings," *Surf. Innov.*, Vol. 2, No. 4, pp. 211–227, 2014.

- [66] Laforte, C, “ Étude de l’adhérence de la glace sur des solides à caractère glaciophobe”, in Sciences appliquées 2001, Université du Québec à Chicoutimi : Chicoutimi, PQ.p. 152.
- [67] <https://tpesuperhydrophobienmgs.wordpress.com/>.
- [68] P. Dellise, L. Fache, “ Olympiade de physique 2015”, Lycée des Flandres Hezbrouck, 2015.
- [69] Thomas Young, “An essay on the cohesion of fluids”, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 95:65-87, 1805.
- [70] Zdenek Cerman, Boris F Striffler, and Wilhelm Barthlott. Dry in the water: the superhydrophobic water fern *Salvinia*—a model for biomimetic surfaces. In *Functional surfaces in biology*, pages 97–111. Springer, 2009.
- [71] M. Farzaneh (Convener), H. Gauthier, G. Castellana, C. Engelbrecht, A. Eliasson, M. S. Fikke, C. Greyling, I. Gutman, T. Hayashi, F. Jakl, Z. Jia, H. Lugschitz, V. Shkaptsov, L. Riera, N. Sugawara, N. Vaga and B. Warieng, “Coatings for Protecting Overhead Power Network Equipment in Winter Conditions.” CIGRE Working Group B2.44, 2015.
- [72] Li, Jian, et al. "Electrohydrodynamic behavior of water droplets on a horizontal superhydrophobic surface and its self-cleaning application." *Applied Surface Science* 403 (2017): 133-140.
- [73] Li, Yufeng, et al. "Effect of superhydrophobicity on flashover characteristics of silicone rubber under wet conditions." *AIP Advances* 8.1 (2018): 015313.
- [74] Kulinich, S. A., and M. Farzaneh. "Ice adhesion on super-hydrophobic surfaces." *Applied Surface Science* 255.18 (2009): 8153-8157.
- [75] Kulinich, S. A., and M. Farzaneh. "How wetting hysteresis influences ice adhesion strength on superhydrophobic surfaces." *Langmuir* 25.16 (2009): 8854-8856.
- [76] Zhao, Yushun, et al. "Icing performances of super-hydrophobic PDMS/Nano-silica hybrid coating on insulators." 2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application. IEEE, 2010.

Résumé:

Les isolateurs électriques jouent un rôle crucial dans la fiabilité et la sécurité des réseaux de distribution d'électricité. Ce mémoire vise à étudier l'impact des propriétés hydrophobes des matériaux isolants sur leur performance électrique en présence d'eau. Pour évaluer l'effet de l'eau sur ces matériaux nous avons réalisé une série d'essais qui impliquent la dépose de gouttelettes d'eau sur les différentes surfaces isolantes et l'observation de leurs comportements sous des tensions variées. Les paramètres clés étudiés incluent l'angle de contact des gouttes, la surface mouillante, et la tension de contournement mesurée. Les résultats obtenus montrent que les surfaces superhydrophobes offrent une performance supérieure en matière d'isolation électrique dans des conditions humides, en maintenant une tension de contournement stable et en réduisant les risques de décharges électriques. Ce qui en fait une solution viable pour améliorer la durabilité et la sécurité des infrastructures électriques dans des environnements défavorables.

Mots clés : Isolateur, Angle de contact, Surface de mouillage, Hydrophile, Hydrophobe, Superhydrophobe, Verre, Silicone, Goutte d'eau, Pollution.

Abstract:

Electrical insulators play a crucial role in the reliability and safety of electricity distribution networks. This dissertation aims to study the impact of the hydrophobic properties of insulating materials on their electrical performance in the presence of water. To evaluate the effect of water on these materials we carried out a series of tests which involve depositing water droplets on the different insulating surfaces and observing their behavior under various voltages. Key parameters studied include droplet contact angle, wetting surface area, and measured flashover voltage. The results obtained show that superhydrophobic surfaces provide superior electrical insulation performance in humid conditions, maintaining a stable flashover voltage and reducing the risk of electric shocks. Making it a viable solution to improve the durability and security of electrical infrastructure in adverse environments.

Key words: Insulator, Contact angle, Wetting surface area, Hydrophilic, Hydrophobic, Superhydrophobic, Glass, Silicone, Water drop, Pollution.