

EPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement

Supérieur et de la Recherche

Scientifique

Université A. MIRA – BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie électrique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie électrique

Option

Réseaux électriques

Thème

Simulation de la repartition du champ et potentiel électrique sur une surface isolante superhydrophobe recouverte de gouttes d'eau sous tension alternative

Présenté par :

M^{elle} ALLOUACHE Lydia

M^{elle} HAMAM Sarah

Encadré par :

Pr. R. BOUDISSA

Dr. F. BOUCHELGA

Année universitaire 2019-2020

Remerciements

Remerciements

Nous tenons à témoigner toute notre reconnaissance au bon DIEU de nous avoir donné le courage, la patience et la force durant nos études.

En premier lieu, nos plus sincères remerciements et reconnaissances vont spécialement à notre promoteur Mr R. Boudissa, professeur à l'université de Bejaia, pour sa patience, sa disponibilité tout au long de la réalisation de cette étude et surtout ses judicieux conseils, ainsi que pour son aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer qui nous ont permis de mener à terme ce travail.

Nous tenons aussi à remercier notre Co-promotrice Dr F. Bouchelga qui a mis à notre disposition tous les moyens nécessaires pour le bon déroulement de notre travail. Elle a été d'un grand soutien dans l'élaboration de ce mémoire.

Nos remerciements vont aux membres du jury, d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Pour finir, nous aimerions exprimer notre gratitude et remerciements à nos parents, pour leur soutien et leurs encouragements.

Dédicaces

Dédicaces

Je dédie ce travail ;

Für meinen lieben professor, ohne Ihn diese Arbeit nicht erfolgreich gewesen wäre. Sie haben uns Ihre Zeit und Energie angeboten, Sie waren geduldig für den Erfolg dieses Projekts.

Ich bin so dankbar, dass ich ihnen nicht genug danken und meinen Dank aussprechen kann.

A mes chers parents ;

En témoignage de mon affection, sans qui je n'aurais pu achever mon parcours pédagogique et qui n'ont jamais douté de mon potentiel et m'ont soutenu durant mon cursus ;

A mes frères Nabil et Sofiane que j'aime inconditionnellement ;

A la mémoire de mes grands-parents que j'aime énormément ;

A ma grande famille sans qui je ne serai pas cette personne que je suis devenue maintenant, mes tantes Chafiaa, Wardia, Noria et tonton Zahir, mes cousines Cici, Dania, je les aime de tout mon cœur.

A mes ami(e)s sans qui je me lacerai si vite, je vous aime tant, Sarah Mila, Soraya, Lahna, Sabrina A. I, Sissoko, Yanis et Fares et tous mes ami(e)s du groupe réseau électrique.

A mon amie, mon bras droit LYDIA avec qui j'ai fait ce travail d'arrache pieds, qui m'a accueillie durant cette dure période de confinement chez sa très chère famille, elle qui m'inspire et me motive, je lui souhaite le succès dans ses projets, et je lui dis grand merci, chère Lydia.

Sarah Hamam

Je dédie ce mémoire à :

Mes très chers parents ; qui sont à l'origine de mon existence ; que dieu les protège ; pour le sens du devoir qu'ils m'ont enseigné depuis mon enfance ; Merci chers parents pour les valeurs nobles et l'éducation venues de vous.

Mes chers et adorables frères et sœur ; Youdace mon âme sœur ; Adem et Anas que j'aime profondément ; Melissa la prunelle de mes yeux, puisse Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

Mes chers ami(e)s ; Hamam Sarah qui ne cesse jamais de m'aider merci chers Sarah, Fatima, Romaïssa, Celia, Djahida, Hida, Sarah, Yanis et Faycel.

Toute ma famille ; pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

Ma chère Samira qui m'a aidé et encouragé merci beaucoup.

Mon encadreur, Pr. R. Boudissa pour sa disponibilité et sa précieuse attention, grand merci à vous.

Allouache Lydia

Liste des figures

Chapitre I : la superhydrophobie et les travaux antérieurs sur sa performance électrique sous tension alternative

Fig. I. 1: Comportement d'une goutte sur une surface.....	4
Fig. I. 2: Représentation de l'angle de contact.....	4
Fig. I. 3: Modèle de Wenzel et de Cassie.....	6
Fig. I. 4: Mesure de l'hystérésis de l'angle de contact. L'angle à droite est l'angle d'avancée et celui à gauche est l'angle de reculée.....	6
Fig. I. 5: Démonstration de la propriété autonettoyante.....	7
Fig. I. 6: Illustration de la tension de surface.....	7
Fig. I. 7: Dolomède.....	8
Fig. I. 8: Ailes du Libellule superhydrophobe.....	8
Fig. I. 9: Images montrant la surface superhydrophobe et autonettoyante de la feuille de lotus : (a : Une feuille de lotus, b : Une feuille de lotus contaminée avec de l'argile, c : Élimination de l'argile par l'eau, d-f : Des images de MEB montrant la surface des feuilles de lotus avec différents grossissements).....	9
Fig. I. 10: Cellule polymère fluorée sous microscope.....	10
Fig. I. 11: Céramique microscopique.....	11
Fig. I. 12: Plots de taille micrométrique sur le téflon.....	11
Fig. I. 13: Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension.....	12
Fig. I. 14: Rigidité diélectrique transversale et longitudinale (décharge électrique disruptive ou de contournement).....	12
Fig. I. 15: Résistances volumique, superficielle et d'isolement électrique.....	13
Fig. I. 16: Circuit électrique équivalent série et parallèle.....	13
Fig. I. 17: Béton intelligent.....	15
Fig. I. 18: Traitement Ultra-Ever dry sur des gants et des chaussures.....	15
Fig. I. 19: Images topographiques 3D de la surface obtenue par profilomètre.....	17
Fig. I. 20: Effet du nombre de couches sur la stabilité des revêtements superhydrophobes à 10 % de TiO ₂ en milieu acide ; (a : une seule couche avant l'immersion , b : une seule couche après l'immersion , c : trois couches avant l'immersion , d : trois couches après l'immersion).....	18
Fig. I. 21: Variation de l'angle de contact statique (AC) en fonction du temps d'immersion dans différentes solutions.....	19

Figure I. 22: Variation de l'angle de contact statique (AC) en fonction de l'exposition au rayonnement UV + condensation d'humidité.....	20
Fig. I. 23: Etapes essentielles de fabrication d'un revêtement en suie sur une plaque en verre.....	21
Fig. I. 24: Caractéristiques du modèle expérimental.....	22
Fig. I. 25: Schéma de mesure de la tension d'expulsion des gouttes d'eau de la surface superhydrophobe et de visualisation du mouvement des gouttes d'eau.....	22
Fig. I. 26: Variation du volume, de la conductivité électrique et la concentration en kaolin des gouttes d'eau d'une rangée déposée au milieu de l'isolation.....	23
Fig. I. 27: Images des lignes du champ électrique entre les deux électrodes délimitant une isolation recouverte de gouttes d'eau sans (a) ou avec couvert isolant (b).....	23
Fig. I. 28: $U_{AC} = f(V_d)$ pour une goutte d'eau d'une rangée du milieu de l'isolation avec ou sans couvert.....	24
Fig. I. 29: $U_{AC} = f(\sigma_v)$ pour une goutte d'eau d'une rangée du milieu de l'isolation avec ou sans couvert.....	25
Fig. I.30: $U_{AC} = f(C_k)$ pour une goutte d'eau d'une rangée du milieu de l'isolation avec ou sans couvert.....	26

Chapitre II : pollution des isolations superhydrophobes

Fig. II. 1: Couche de pollution sur des isolateurs.....	29
Fig. II. 2: Schéma et procédé de mesure de la DDNS.....	31
Fig. II. 3: Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe en position horizontale et recouverte de gouttes d'eau (a – c : Coalescence de gouttelettes d'eau sous une tension croissante, d : Coalescence de gouttelettes d'eau et formation de multiples zones sèches sur la surface inter électrode, e : contournement de l'isolation).....	34
Fig. II. 4: Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe inclinée de 20 ° et recouverte de gouttes d'eau (a: Dépôt par pulvérisation de gouttes d'eau sur la surface hors tension, b: Mouvement et coalescence de quelques gouttes d'eau et formation de petites zones sèches, c: Poursuite de la coalescence des gouttes d'eau et augmentation de la surface de zones sèches, d: Formation d'une grande zone sèche (indiquée sur la figure par un cercle rouge), e: Poursuite de l'agrandissement de la zone sèche inter électrodes, diminution accrue	

du nombre de gouttelettes d'eau, f : Contournement de la surface isolante inter électrodes).....	35
Fig. II. 5a : Tension de contournement de deux surfaces différentes en fonction de leur inclinaison.....	36
Fig. II. 5b : Tension de contournement de deux surfaces différentes en fonction du volume des gouttes d'eau les recouvrant.....	36
Fig. II. 6 : Allongement de la ligne de fuite.....	38
Fig. II. 7 : Graissage des surfaces isolantes.....	39
Fig. II. 8 : Utilisation d'hélicoptère pour le lavage des isolateurs électriques.....	40
Fig. II. 9 : Isolateur plat.....	40
Fig. II. 10 : Revêtement silicone.....	41
Fig. II. 11 : Isolateurs composites.....	41

Chapitre III : Simulation du champ et potentiel électrique

Fig. III. 1 : Etapes de confection d'une isolation à multicouches superhydrophobes.....	44
Fig. III.2 : Profil de l'isolation à une et quatre couches de suie superhydrophobe.....	44
Fig. III. 3 : Photo d'un profilomètre du laboratoire de HT de Zittau (Allemagne).....	45
Fig. III. 4 : $\theta = f(n_c)$ pour un volume de la goutte d'eau égal à 5 μl	45
Fig. III. 5 : $\theta = f(n_c)$ pour un volume de la goutte d'eau égal à 10 μl	46
Fig. III. 6 : Composition chimique de l'isolation superhydrophobe à base de suie.....	46
Fig. III. 7 : Modèle expérimental et de simulation.....	47
Fig. III. 8 : Ensemble des forces électriques exercées sur un dépôt de 10 ou 5 gouttes d'eau sous alternance positive de la tension alternative et sous arrangement en lignes droites (A_d) (F_{ci} : Force de Coulomb, F_{ai} : Force d'attraction mutuelle, F_{ri} : Force de répulsion mutuelle).....	48
Fig. III. 9 : Répartition du potentiel et champ électrique sur un nombre variable de gouttes déposées sur une isolation sans couvert ($n_c = 1$; $\sigma_v = 5,5 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$).....	51
Fig. III. 10 : Distribution du potentiel et champ électrique en fonction du nombre de gouttes d'eau d'une isolation avec couvert ($n_c = 1$; $\epsilon_r = 20$; $\sigma_v = 5,5 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$).....	52
Fig. III. 11 : Arrangement d'une multitude de gouttes d'eau sur une surface isolante superhydrophobe sous tension continue avec ou sans couverture diélectrique.....	53

Fig. III. 12: Répartition du potentiel et champ électrique sur un nombre variable de gouttes d'eau d'une isolation sans couvert ($n_c = 4$; $\epsilon_r = 20$; $\sigma_v = 5,5 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$).....	54
Fig. III. 13: Distribution du potentiel et champ électrique sur 1 goutte d'eau d'une isolation avec couvert à permittivité variable ($n_c = 1$; $\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100\mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$).....	55
Fig. III. 14: Répartition du potentiel et champ électrique sur 5 gouttes d'eau d'une isolation avec couvert à permittivité variable ($n_c = 1$; $\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100\mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$).....	56
Fig. III. 15: Distribution du potentiel et champ électrique sur une goutte d'eau d'une isolation avec couvert à permittivité variable ($n_c = 4$; $\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100\mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$).....	57
Fig. III. 16: Répartition du potentiel et champ électrique sur 5 gouttes d'eau d'une isolation avec couvert à permittivité variable ($n_c = 4$; $\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$).....	58
Fig. III. 17a: Distribution du potentiel et champ électrique sur une goutte à volume variable sur une isolation superhydrophobe ($\epsilon_r = 1$, $\sigma_v = 5,5 \mu\text{S/cm}$, $t_s = 10 \text{ s}$, $U_a = 25 \text{ kV}$, $d = 10 \text{ cm}$).....	59
Fig. III. 17b: Distribution du potentiel et champ électrique sur cinq gouttes à volume variable sur une isolation superhydrophobe ($\epsilon_r = 1$, $\sigma_v = 5,5 \mu\text{S/cm}$, $t_s = 10 \text{ s}$, $U_a = 25 \text{ kV}$, $d = 10 \text{ cm}$).....	60
Fig. III. 18: Etapes d'expulsion d'une rangée de 5 gouttes du milieu de l'isolation: a ($V_d = 10 \mu\text{l}$) et b ($V_d = 80 \mu\text{l}$).....	60
Fig. III. 19: Répartition du potentiel et champ électrique le long d'une goutte déposée sur une isolation superhydrophobe sous tension variable ($\epsilon_r = 20$, $n_c = 1$, $V_d = 100 \mu\text{l}$).....	61
Fig. III. 20: Distribution du potentiel et champ électrique le long d'une goutte déposée sur une isolation superhydrophobe sous tension variable ($\epsilon_r = 20$, $n_c = 1$, $V_d = 100 \mu\text{l}$, $d = 4 \text{ cm}$).....	62

Liste des tableaux

Chapitre III : Simulation du champ et du potentiel électrique

Tab. III. 1: Propriétés physiques des matériaux utilisés dans le logiciel

Liste des abréviations et des symboles

A : surface lavée de la barrière ;
C : carbone ;
 C_k : Concentration en kaolin ;
CS : Couche superhydrophobe ;
DDSE : Densité du dépôt de sel équivalent ;
DDNS : Densité de dépôt non soluble ;
d : Densité du fluide ;
d : Distance interélectrode ;
 E_e : Champ électrique extérieur ;
 E_p : Champ électrique propre ;
E : Champ électrique ;
 e_e : Epaisseur ;
 F_{ci} : Force de coulomb ;
 F_{ai} : Force d'attraction mutuelle ;
 F_{ri} : Force de répulsion mutuelle ;
HT : haute tension ;
I : Courant électrique qui traverse l'isolateur ;
HAC : Hystérésis de l'angle de contact ;
 l_e : Largeur ;
 L_e : Longueur ;
 L_c : Ligne de fuite de l'isolation ;
MT : Distance entre le milieu de l'isolation et l'électrode terre ;
MHT : Distance entre le milieu de l'isolation et l'électrode haute tension ;
M : Milieu de l'isolation ;
MEB : Microscope électronique à balayage ;
 m_f : Masse du papier filtre contenant la pollution après séchage ;
 m_i : Masse initiale du papier filtre ;
Na Cl : Chlorure de Sodium ;
 n_c : Nombre de couches ;
O : oxygène ;
r : Rugosité ;
 R_q : Rugosité moyenne ;
RDT : Rigidité diélectrique transversale ;

- RDL : Rigidité diélectrique longitudinale ;
- R_v : Résistance transversale ou volumique ;
- R_s : Résistance superficielle ;
- R_i : Résistance d'isolement ;
- Si : Silicium ;
- Sa : Salinité de la suspension ;
- S : Surface de l'isolateur ;
- TiO₂ : Dioxyde de titane ;
- t_s : Temps de simulation ;
- T : Terre ;
- UV : Ultraviolets ;
- U_{AC} : Tension d'expulsion des gouttes d'eau en alternatif ;
- U : Tension d'alimentation de l'isolateur ;
- V_d : Volume des gouttes d'eau ;
- V : Vitesse du fluide
- V_i : Volume variable ;
- V : Volume de la solution ;
- θ : Angle de contact sans la rugosité ;
- θ* : Angle de contact avec la rugosité ;
- γ : Coefficient de tension superficielle ;
- γ_{SG} : Tension superficielle solide-vapeur ;
- γ_{SL} : Tension superficielle solide-liquide ;
- γ_{LG} : Tension superficielle liquide-vapeur ;
- \bar{F} : Force électrostatique sur la goutte d'eau ;
- φ_s : Fraction de surface occupée par le sommet des créneaux sur laquelle la goutte repose ;
- (1 - φ_s) : Proportion de surface d'air sur laquelle la goutte est posée ;
- ε_r : Permittivité relative ;
- σ_i : Conductivité volumique de la solution polluante ;
- δ : Conductance superficielle ;
- Θ : Température de la suspension ;
- σ₀ : Conductivité volumique à 0 °C ;

σ_{20} : Conductivité volumique à 20 °C ;

μ : Viscosité du fluide ;

∇P_{Δ} : Pression exercée sur la goutte d'eau ;

$\mu \nabla^2 \vec{V}$: Viscosité sur la goutte d'eau ;

ρ_t : Charge totale ;

ε : Permittivité absolue ;

ρ_m : Densité volumique ;

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : La superhydrophobie et les travaux antérieurs sur sa performance électrique sous tension alternative	
I.1 Introduction	3
I. 2 Propriétés hydrophobes et superhydrophobes	3
I. 2. 1 Classification des surfaces par rapport à leur angle de contact	3
I. 2. 1. 1 Surface superhydrophile.....	3
I. 2.2. 2 Surface hydrophile.....	3
I. 2. 2. 3 Surface hydrophobe.....	3
I. 2. 2. 4 Surface Superhydrophobe.....	3
I. 2. 2 Mouillabilité.....	4
I. 2. 3 Angle de contact θ	4
I. 2. 4 Modèles de surfaces superhydrophobes.....	5
a) Modèle de Wenzel.....	5
b) Modèle de Cassie-Baxter.....	5
I. 2. 5 L'hystérésis de l'angle de contact.....	6
I.2.6 Tension de surface.....	7
I. 3 Différents types de matériaux superhydrophobes.....	8
I. 3. 1 Matériaux superhydrophobes naturels.....	8
I.3. 1. 1 Insectes.....	8
I. 3. 1. 2 Plantes.....	9
I. 4 Matériaux superhydrophobes artificiels.....	10
a) Métal superhydrophobe.....	10
b) Polymères fluorés.....	10
c) Céramique et le Never Wet.....	9
d) Téflon.....	11
I. 5 Propriétés électriques.....	11
I. 5. 1. Permittivité.....	12
I. 5. 2 Rigidité diélectrique.....	12
I. 5. 3 Résistance d'isolement.....	13
I. 5. 3. 1 Résistance transversale ou volumique (R_v).....	13
I. 5. 3. 2 Résistance superficielle (R_s).....	13
I. 5. 3. 3 Résistance d'isolement (R_i).....	13

I. 5. 4 Facteur des pertes.....	13
I. 6. Techniques de préparation de surfaces superhydrophobes.....	14
I. 6. 1 Dépôt par vapeur chimique.....	14
I. 6. 2 Dépôt électrochimique.....	14
I. 6. 3 Photolithographie.....	14
I. 6. 4 Techniques utilisant le plasma.....	14
II. 6. 5 Processus sol-gel.....	14
I. 6. 6. 1 Applications.....	14
a) Béton intelligent.....	14
b) Ultra - Ever Dry.....	15
I. 7 Travaux antérieurs sous tension alternatif.....	16
I. 7. 1 Effet du nombre de couches sur la stabilité des revêtements superhydrophobes.....	16
I. 7. 2 Stabilité en milieu aqueux.....	18
a) Milieu acide.....	18
b) Eau potable.....	19
I. 7. 3 Stabilité au rayonnement UV et à la condensation.....	20
I. 7. 4 Stabilité mécanique.....	20
I. 8 Effet des propriétés géométriques et électrique des gouttes d'eau sur la performance d'une isolation superhydrophobe.....	21
Conclusion.....	27

Chapitre II : Pollution des isolations superhydrophobes

II. 1 Introduction.....	28
II. 2 Pollution.....	28
II. 3 Salinité.....	28
II.4 Couche de pollution.....	29
II. 5 Sources de pollution.....	29
II. 5. 1 Pollution industrielle.....	29
II. 5. 2 Pollution naturelle.....	29
II. 5. 3 Pollution mixte.....	29
II. 6 Mesure de la sévérité de pollution d'un site.....	30
II.7.1 Conductance superficielle.....	30

II.7.2 Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE).....	30
II. 7.3 Densité de dépôt non soluble (DDNS).....	31
II. 7. 4 Mesures optiques.....	32
II. 7. 5 Contrainte de contournement.....	32
II. 8 Influence des facteurs climatiques sur les isolateurs pollués.....	32
II. 8. 1 Humidité.....	32
II. 8. 2 Pluie.....	32
II. 8. 3 Température.....	33
II. 8. 4 Vent.....	33
II. 9 Classification des sites pollués.....	33
II. 9. 1 Classe 1.....	33
II. 9. 2 Classe 2.....	33
II. 9. 3 Classe 3.....	33
II. 9. 4 Classe 4.....	33
II. 10 Conséquences de la pollution sur les équipements électriques.....	34
II. 10. 1 Contournement d'une surface isolante superhydrophobe.....	34
II. 10. 1. 1 Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe en position horizontale.....	34
II. 10. 1. 2 Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe inclinée de 20 °.....	34
II. 11 Simulation de la pollution au laboratoire.....	37
II. 11. 1 Essai sous pollution naturelle.....	37
II. 11. 2 Essais sous pollution artificielle.....	37
II. 11. 2. 1 Méthode de la couche solide.....	37
II. 11. 2. 2 Méthode du brouillard salin.....	37
II. 11. 2. 3 Méthode de pollution liquide	38
II. 12. 3 Nettoyage de l'isolation.....	39
II.12. 4 Utilisation des isolateurs plats.....	40
II. 12. 5 Revêtements à base de silicones.....	40
II. 12. 6 Isolateurs composites.....	41
II. 13 Conclusion.....	42

Chapitre III : Simulation du champ et potentiel électrique

III. 1 Introduction.....	43
III. 2 Confection et caractérisation d'une isolation multicouches superhydrophobes.....	43
III. 3 Logiciel de simulation du champ et potentiel électrique.....	47
III.4 Paramètres d'influence du champ et potentiel électrique.....	48
III.4.1 Nombre de gouttes d'eau, permittivité du couvert de l'isolation et nombre de couches superhydrophobes de celle-ci.....	48
III. 4. 2 Volume des gouttes d'eau reposant sur l'isolation superhydrophobe sans couvert....	59
III. 4. 3 Tension appliquée aux gouttes d'eau reposant sur l'isolation avec couvert.....	61
III. 5 Conclusion.....	63
Conclusion générale.....	64

Introduction générale

La performance électrique des isolations hydrophiles de protection des réseaux électriques mondiaux est énormément affectée par la pollution humide à cause de la facilité et la rapidité de leur mouillage par celle-ci par temps de pluie ou de condensation. Ceci entraîne la rupture de la continuité de service, le vieillissement, la défaillance et la dégradation de certains de leurs équipements électriques [1 - 5].

Afin de réduire le taux de telles perturbations, des isolations hydrophobes ont été mises sur le marché. Malgré la très forte élévation de leur performance électrique par rapport aux céramiques, Elles s'altèrent en service sous conditions d'une forte humidité très récurrente. Pour éviter l'effet néfaste de contournement de ces isolations hydrophiles et hydrophobes sous conditions de pollution très humide, plusieurs chercheurs se sont donc inspiré de la nature afin de développer des matériaux isolants artificiels à surface superhydrophobe et à degré de mouillage nul [1 - 5].

Notre travail consiste à valider, par simulation au moyen du logiciel COMSOL Multiphysics, version 5.0, des résultats expérimentaux obtenus très récemment dans ce sens.

A travers cette simulation, nous recherchons la répartition du champ et du potentiel électrique alternatif résultant d'un dépôt de gouttes d'eau reposant sur une surface d'une isolation à multicouches superhydrophobes mise sous tension alternative au moyen de laquelle nous pouvons prédire le mouvement de leur expulsion à l'extérieur de l'isolation.

Dans cette étude théorique, les paramètres géométriques et électriques des gouttes d'eau ont été variés. L'isolation est dotée d'une couverture isolante solide à permittivité variable, de même pour le nombre de couches superhydrophobes de l'isolation ainsi que la valeur de la tension alternative appliquée à celle-ci.

Ceci explique la subdivision de ce présent travail en trois chapitres suivants:

Dans le premier chapitre, nous caractérisons les divers états de surface, nous présentons leur propriétés électriques et spéciales, nous citons les principaux matériaux superhydrophobes, les différents techniques de fabrication de matériaux superhydrophobes ainsi que leurs domaines essentiels d'application. Enfin nous clôturons ce chapitre par quelques travaux essentiels très récents sur la performance électrique d'une isolation superhydrophobe sous tension alternative.

Le deuxième chapitre est dédié à la description des phénomènes de pollution atmosphérique et leurs conséquences sur les équipements électriques, les méthodes de détermination du degré de pollution des sites, leur simulation au laboratoire et les techniques de lutte contre celle-ci.

Le troisième chapitre portera sur la prédiction du mouvement d'un dépôt de gouttes d'eau reposant sur la surface d'une isolation superhydrophobe par simulation au moyen du logiciel COMSOL Multiphysics version 5.0, sur la base de la distribution de l'intensité du champ et du potentiel électrique alternatif résultant, indépendamment du nombre de couches de l'isolation électrique superhydrophobe, du nombre et du volume des gouttes d'eau la recouvrant, du degré de couverture diélectrique de l'isolation et de sa permittivité relative et enfin de la valeur de la tension qui lui est appliquée. Ces résultats y seront enfin comparés à ceux issus des travaux expérimentaux très récents.

Nous clôturons ce travail par une conclusion générale permettant de synthétiser les résultats obtenus.

Chapitre I

La superhydrophobie et les travaux
antérieurs sur sa performance électrique
sous tension alternative

I. 1 Introduction

Moyennant la vertu de la superhydrophobicité naturelle du lotus, de nombreux chercheurs ont développé, des matériaux artificiels à surfaces superhydrophobes. Celles-ci ont été déjà largement exploitées comme autonettoyantes, antigivrage ainsi que dans le transfert de chaleur et l'électronique [1]. Leur conception repose sur la très forte mobilité de toute sorte d'humidité entrant en contact de leur surface lors de la pluie ou de condensation naturelle et la très forte possibilité de son évacuation immédiate à l'extérieur de celle-ci sous l'action de forces extérieures. Ceci permet la conservation de leur sécheresse pendant très longtemps. Par conséquent, en cas de leur emploi en tant qu'isolations électriques, leur pouvoir d'isolement demeurera constamment inchangé, indépendamment du degré d'humidification du milieu de leur utilisation. Les isolateurs sont des composants importants des réseaux aériens de transport et de distribution de l'énergie électrique. Le mouvement sans frottement des gouttes d'eau sur une surface superhydrophobe a drainé une forte attention chez les chercheurs sur le plan expérimental [1] et théorique [2]. Par contre, l'application de la superhydrophobie aux isolateurs des lignes et des postes électriques est encore à l'état embryonnaire bien que, sur la base de leur profil très adéquat, ils offrent une très grande opportunité à l'exploitation de cet avantage dans le domaine de l'énergie électrique [3–7].

Dans ce qui suit nous allons faire une synthèse des travaux de recherches théoriques et expérimentaux sur la performance électrique des surfaces superhydrophobes multicouches sous tension alternative.

I. 2 Mouillabilité

La mouillabilité représente l'étalonnage d'un liquide sur une surface solide. Elle est caractérisée par un facteur appelé angle de contact, entre le liquide et la surface solide [11]8.

I. 3 Propriétés hydrophobes et superhydrophobes

I. 3. 1 Classification des surfaces par rapport à leur angle de contact

I. 3. 1. 1 Surface superhydrophile [8]9

Si l'angle de contact est presque égal à 0° , alors la surface ne repousse pas l'eau (**Fig. I. 1a**).

I. 3. 1. 2 Surface hydrophile [9]10

Si l'angle de contact est inférieur à 90° , la surface ne repousse pas l'eau (**Fig. I. 1b**).

I. 3. 1. 3 Surface hydrophobe [9] 10

Si l'angle de contact est compris entre 90° et 150° , alors la surface et la goutte d'eau forme un demi-cercle (**Fig. I. 1c**).

I. 3. 1. 4 Surface Superhydrophobe [8]9

Si l'angle de contact est compris entre 150 ° et 180 °, la goutte d'eau sera presque sphérique (Fig. I. 1d).

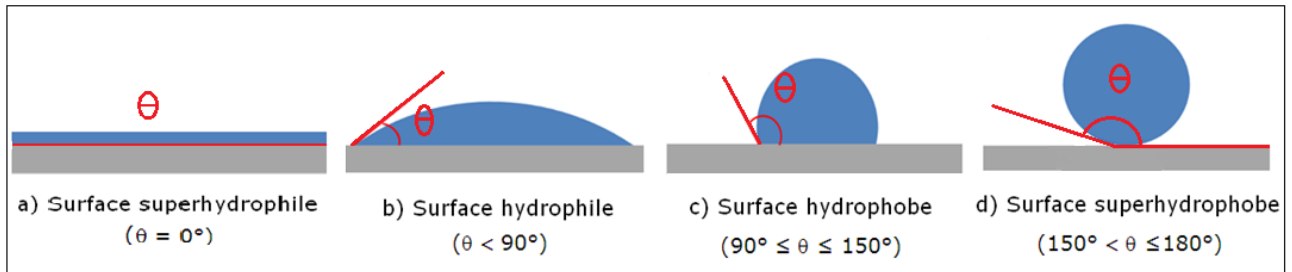


Fig. I. 1 : Comportement d’une goutte sur une surface [10]11

Ci-dessous est exprimée l’équation de Young reliant les énergies de surface de la goutte (Équation I.1) [11]8 :

$$0 = \gamma_{LG} \cdot \cos\theta + \gamma_{SL} - \gamma_{SG} \tag{I. 1}$$

$$\cos\theta = \frac{(\gamma_{SG} - \gamma_{SL})}{\gamma_{LG}} \tag{I. 2}$$

Avec :

γ : est le coefficient de tension superficielle (Nm⁻¹);

γ_{SG} : La tension superficielle solide-vapeur (Nm⁻¹);

γ_{SL} : La tension superficielle solide-liquide (Nm⁻¹);

γ_{LG} : La tension superficielle liquide-vapeur (Nm⁻¹).

I. 3. 2 Angle de contact θ

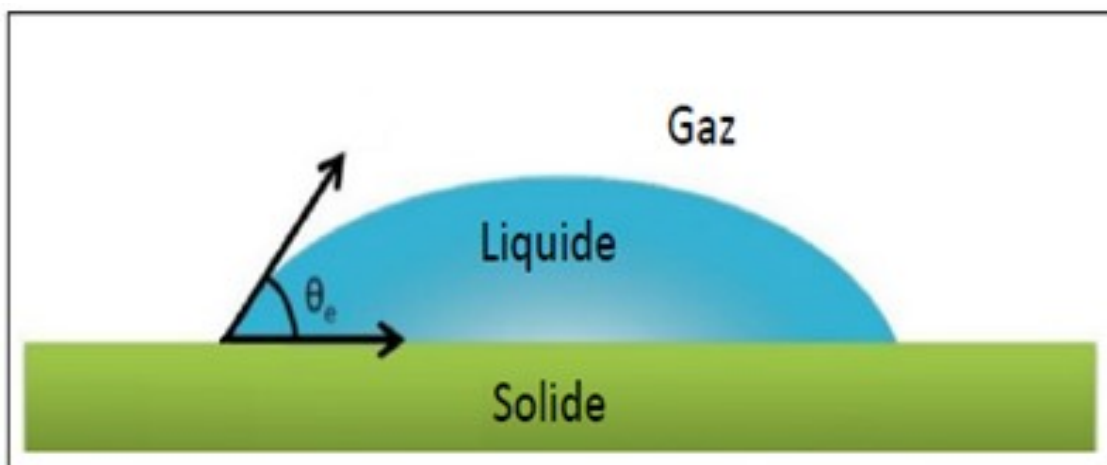


Fig. I. 2 : Représentation de l’angle de contact

Représente l'angle formé par l'intersection de la goutte d'eau avec la surface sur laquelle elle est déposée et ses valeurs varient de 0 à 180 [12].

I. 3. 3 Modèles de surfaces superhydrophobes

D'après la littérature, on trouve deux modèles permettant de décrire l'influence de la morphologie des surfaces texturées sur le mouillage : le modèle de Wenzel [13] qui considère une surface rugueuse imprégnée par le liquide, et le modèle de Cassie-Baxter [14] qui modélise le mouillage d'un substrat rugueux lorsque le liquide n'envahit pas la rugosité.

a) Modèle de Wenzel [13]

Lorsqu'on pose une goutte d'eau sur une surface présentant une faible densité d'aspérités, elle retient la goutte sur son support, dans ce cas, le mouillage est partiel (Fig. I. 3a).

La relation de Wenzel est de la forme :

$$\cos\theta^* = r\cos\theta \tag{I. 3}$$

θ : Angle de contact sans la rugosité ;

θ^* : Angle de contact avec la rugosité ;

r (la rugosité) = (Surface réelle/surface apparente) ; $r \geq 1$

b) Modèle de Cassie-Baxter [14]

Une goutte posée sur une surface ayant un grand nombre d'aspérités sera en contact avec leurs sommets. Sans qu'elle s'accroche à son support, grâce aux poches d'air produites entre le solide et le liquide (Fig. I. 3b).

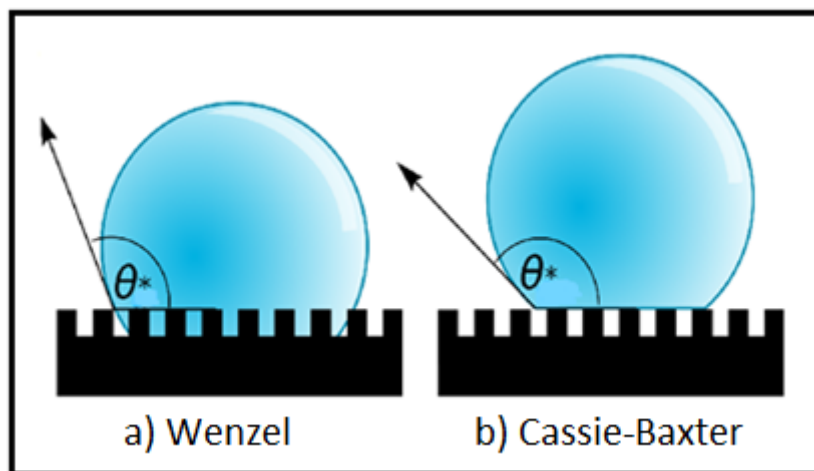


Fig. I. 3 : Modèle de Wenzel et de Cassie

Equation de Cassie est la suivante :

$$\cos\theta^* = \varphi_s \cos\theta - (1 - \varphi_s) \tag{I. 4}$$

Avec

φ_s : Fraction de surface occupée par le sommet des créneaux sur laquelle la goutte repose;

$(1 - \varphi_s)$: Proportion de surface d'air sur laquelle la goutte est posée.

I. 3. 4 L'hystérésis de l'angle de contact

Un angle de contact supérieur à 150° n'est pas le seul critère permettant de qualifier les surfaces superhydrophobes. Ces surfaces démontrent aussi une faible hystérésis de l'angle de contact (HAC) [15]. Ce dernier nous permet de comprendre le comportement d'une goutte d'eau vis-à-vis d'une surface en mouvement. C'est-à-dire de savoir si la goutte va s'accrocher ou glisser sur la surface. Pour cela, on mesure l'angle d'avancée et de reculée (Fig. I. 4).

On note HAC la différence entre l'angle d'avancée (θ_a) et l'angle de reculée (θ_r) (Équation I. 4) Plus l'hystérésis de l'angle de contact est petit plus la goutte glisse facilement sur la surface.

L'importance de l'hystérésis de l'angle de contact est souvent attribuée aux surfaces chimiquement et morphologiquement hétérogènes et aussi à la présence d'une rugosité [16].

$$HAC = \theta_a - \theta_r \tag{I. 5}$$

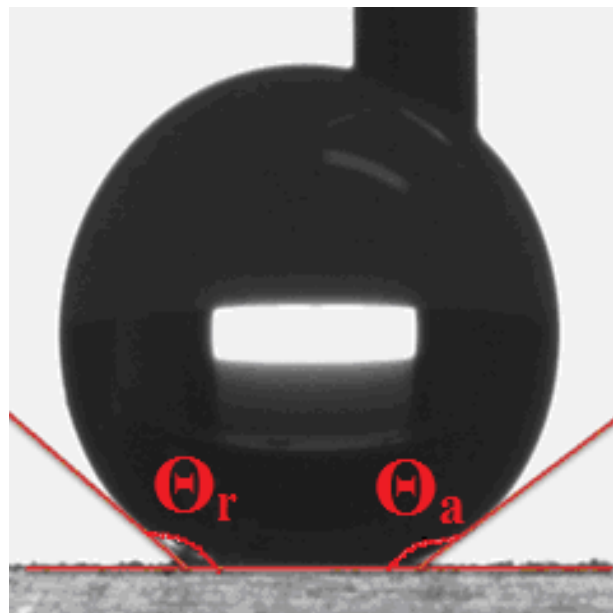


Fig. I. 4: Mesure de l'hystérésis de l'angle de contact. L'angle à droite est l'angle d'avancée et celui à gauche est l'angle de reculée.

Les surfaces superhydrophobes possèdent un large champ d'applications dans divers domaines. L'application la plus courante est celle des surfaces autonettoyantes [17-18].

Cette propriété permet l'élimination de poussières et autres saletés des surfaces (Fig. I. 5).

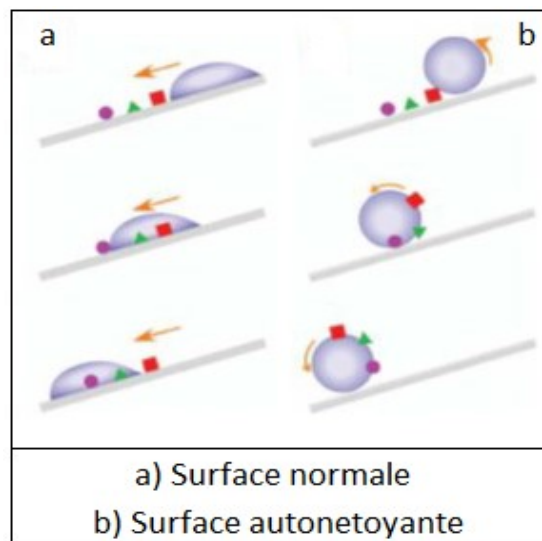


Fig. I. 5: Démonstration de la propriété autonettoyante [19]

Les surfaces superhydrophobes sont souvent utilisées dans le domaine biomédical [20-21], empêchant les contaminants de se propager sur les surfaces. De plus, ces surfaces peuvent servir comme des agents anticorrosifs [22]. Aussi, ils sont applicables afin de protéger différentes structures et équipements de la neige ou le givre qui y adhère [23].

I. 3. 5 Tension de surface [24]

Dans les liquides, les différentes molécules sont maintenues groupées sous l'action de forces intermoléculaires faibles. Les molécules qui se trouvent à la surface du liquide peuvent simultanément entrer en liaisons intermoléculaires avec des molécules d'une autre nature provenant de l'environnement ou avec des molécules de même nature provenant du liquide, celle-ci recherchent la liaison la plus forte possible avec d'autres molécules. Si les liaisons sont des atomes de même nature issus du liquide, ceci conduit dans le liquide à une tension orientée vers l'intérieur, la tension de surface (Fig. I. 6).

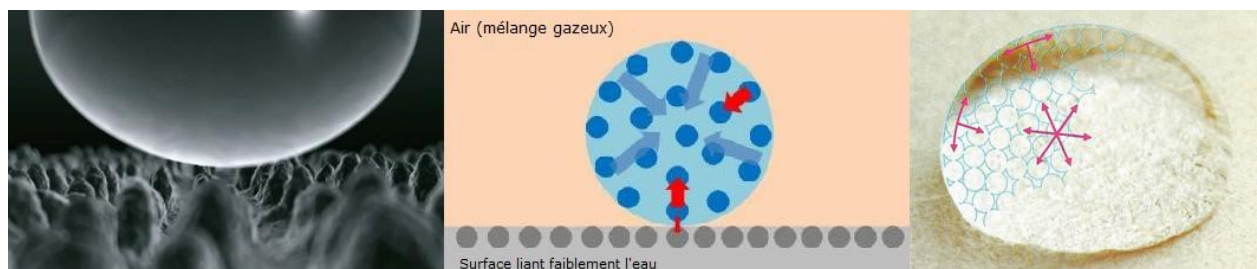


Fig. I. 6: Illustration de la tension de surface

I. 4 Différents types de matériaux superhydrophobes

I. 4. 1 Matériaux superhydrophobes naturels

De nombreuses plantes ont cette propriété superhydrophobe [25] : Barthlott et Neinhuis ont classé environ 200 plantes, dont le *Magnolia* et l'*Eucalyptus*. Certains animaux et insectes possèdent également cette propriété [26] on cite le Dolomède des marais et les plumes ou les ailes de Canard.

I. 4. 1. 1 Insectes

- **Dolomède des marais [27]**

Les Dolomèdes sont des araignées aquatiques. Elles peuvent rester sèches sur l'eau grâce à leurs poils minuscules qui empêchent l'eau d'entrer en contact avec leur corps (**Fig. I. 7**).

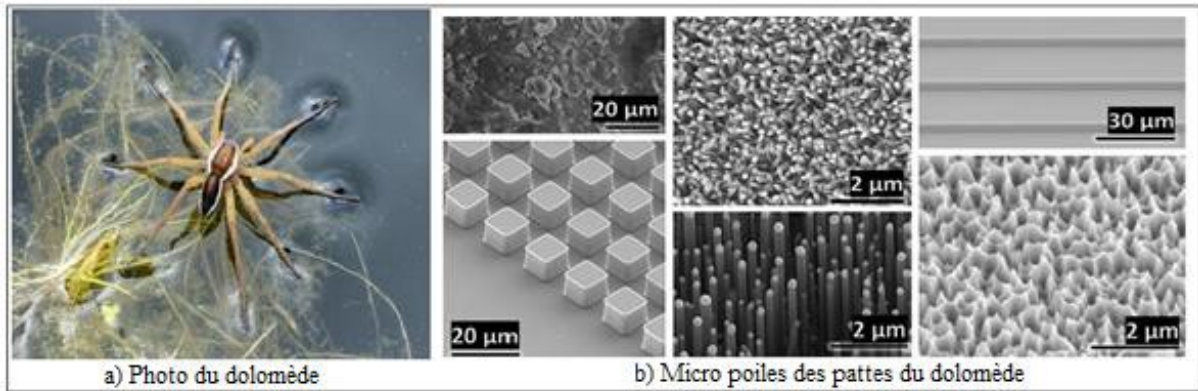


Fig. I. 7: Dolomède

- **Libellule [28]**

Vie dans des espaces aquatiques (**Fig. I. 8**). Ces ailes sont revêtues de plots micro et nanostructures, formant une surface superhydrophobe (les gouttes d'eau roulent et évacuent la poussière sans mouiller ces surfaces).



Fig. I. 8: Ailes du Libellule superhydrophobe

I. 4. 1. 2 Plantes

- Lotus

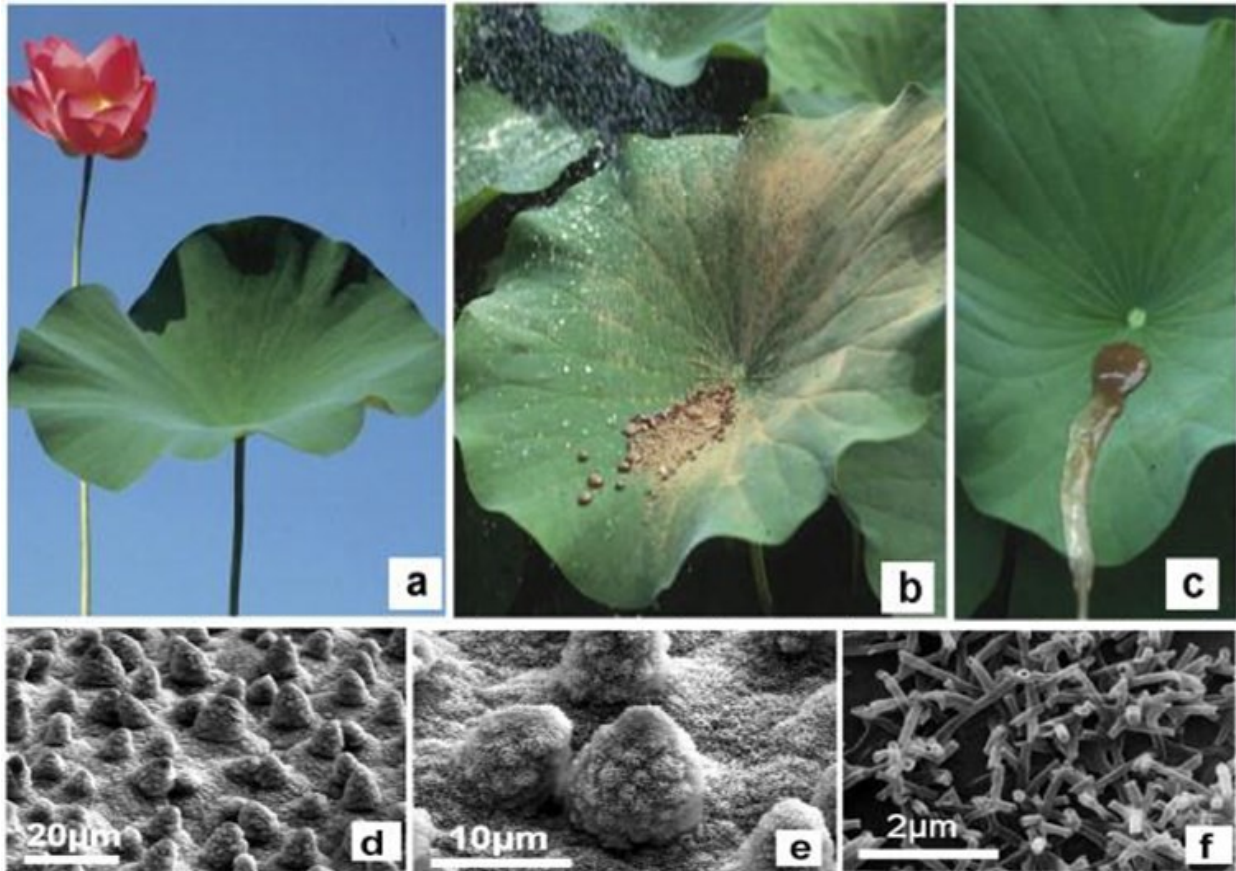


Fig. I. 9 : Images montrant la surface superhydrophobe et autonettoyante de la feuille de lotus: (a) feuille de lotus, (b) feuille de lotus contaminée avec de l'argile, (c) élimination de l'argile par l'eau, (d-f) images de MEB montrant la surface des feuilles de lotus avec différents grossissements [29-30]

Une surface est dite superhydrophobe lorsqu'elle est très difficile à mouiller, c'est le cas de la feuille de lotus (**Fig. I. 9a**). Cet aspect est aussi nommé l'effet lotus [25].

L'analyse de la surface de cette feuille au microscope électronique à balayage (MEB) a montré qu'elle présente une rugosité hiérarchique à la fois microscopique et nanoscopique. Par ailleurs, la surface de la feuille de lotus est formée de papilles de quelques microns (**Fig. I. 9d**) sur lesquelles reposent des cristaux de cire (**Fig. I. 3e-f**). Cette couche de cire est hydrophobe, ce qui confère à la surface de la feuille de lotus des capacités autonettoyantes (**Fig. I. 9b-c**) : L'eau ne touche que le haut des papilles, donc peu de solide et beaucoup d'air, ce qui permet à la goutte d'être ultra-mobile.

I. 5 Matériaux superhydrophobes artificiels [31]

a) Métal superhydrophobe

Les deux chercheurs Anatoliy Vorobyev et Chunlei Guo ont créé des plaques de métal superhydrophobe. Ils ont gravé dans des plaques de platine, de titane et de cuivre des rainures parallèles espacées de 100 micromètres et profondes de 75 micromètres. Ils ont ajouté un deuxième niveau de stries de 5 à 10 nanomètres de longueur. Alors la goutte d'eau peut glisser sur la plaque. Ces plaques sont utilisées dans les panneaux solaires ou des chaudières solaires et la formation des ailes d'avion, mais restent sensibles aux liquides gras.

b) Polymères fluorés

L'angle de contact est clairement mis en valeur lorsque le polymère est composé de fluor, c'est l'état de la surface superhydrophobe avec un angle maximal de 160 °. Cela a été observé dans les travaux de Mr Thierry Darmanin (**Fig. I. 10**).

L'imperméabilité des polymères fluorés repose sur la diminution de l'énergie de surface du matériau traité. Ce qui permet aux forces d'attraction de la goutte d'être prépondérantes et la goutte aura tendance à minimiser la surface de contact avec le solide. Cette propriété est apportée par les atomes de fluor, qui confère une tension superficielle très basse au support.

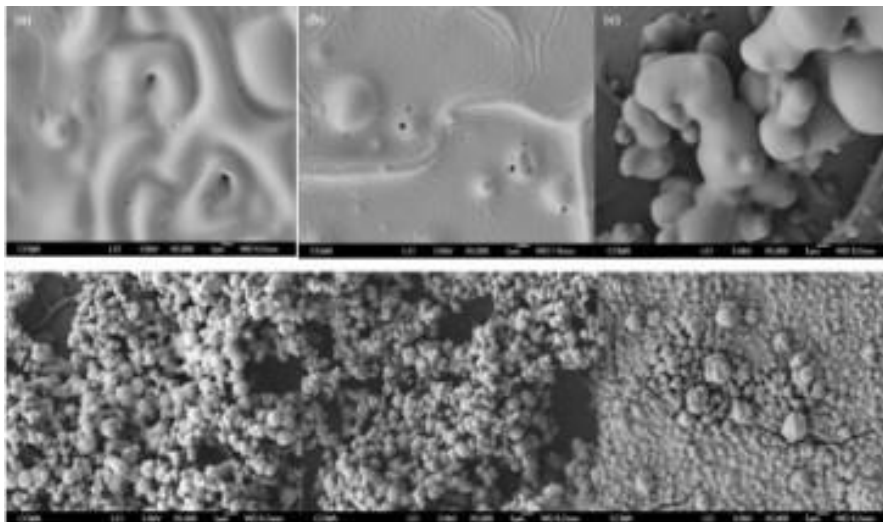


Fig. I. 10: Cellule polymère fluorée sous microscope

c) Céramique et le Never Wet

En passant un morceau de céramique au-dessus de la flamme de l'allumette, il noircit en se couvrant de suie. La suie étant un agglomérat de microparticules de carbone qui structure donc la surface du verre tout en la rendant superhydrophobe. De ce fait, une goutte d'eau posée sur la suie atteint un angle de l'ordre de 160 ° à 170 °.

Il existe aussi un spray, Never Wet. C'est un système de produit destiné à créer une barrière d'humidité à effet répulsif sur une variété de surfaces. Il est adapté pour une utilisation sur l'aluminium, PVC et les plastiques (Fig. I. 11).

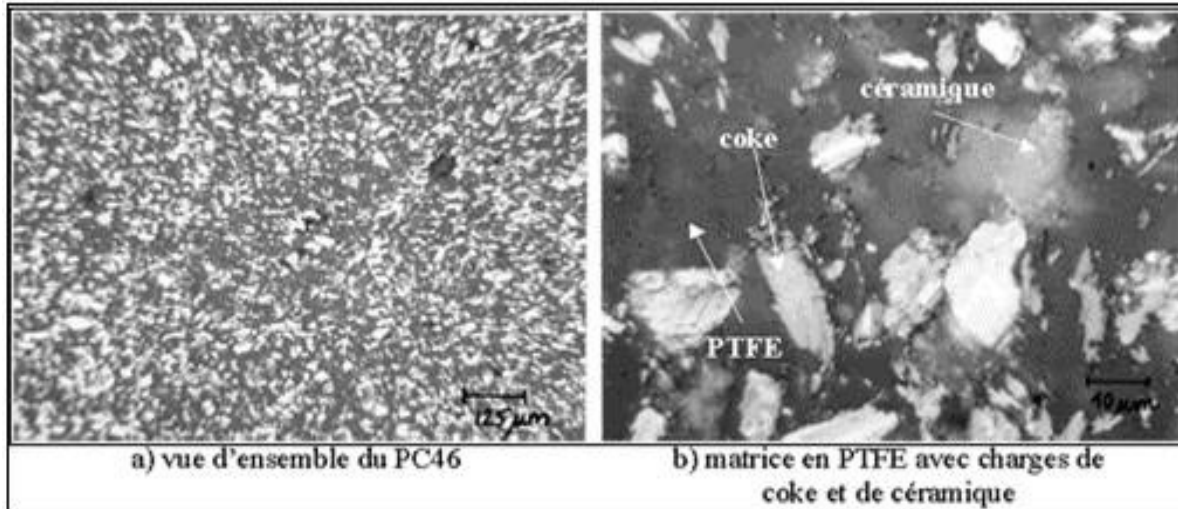


Fig. I. 11: Céramique microscopique

d) Téflon [32]

Lorsqu'une goutte d'eau est posée sur une surface hydrophobe lisse comme le téflon, l'angle de contact entre la goutte et la surface est à peine supérieur à 90° . Cet angle atteint 160° sur la deuxième et la troisième surface, hérissée d'un réseau ordonné de plots de taille micrométrique, ce qui rend la surface superhydrophobe (Fig. I. 12).

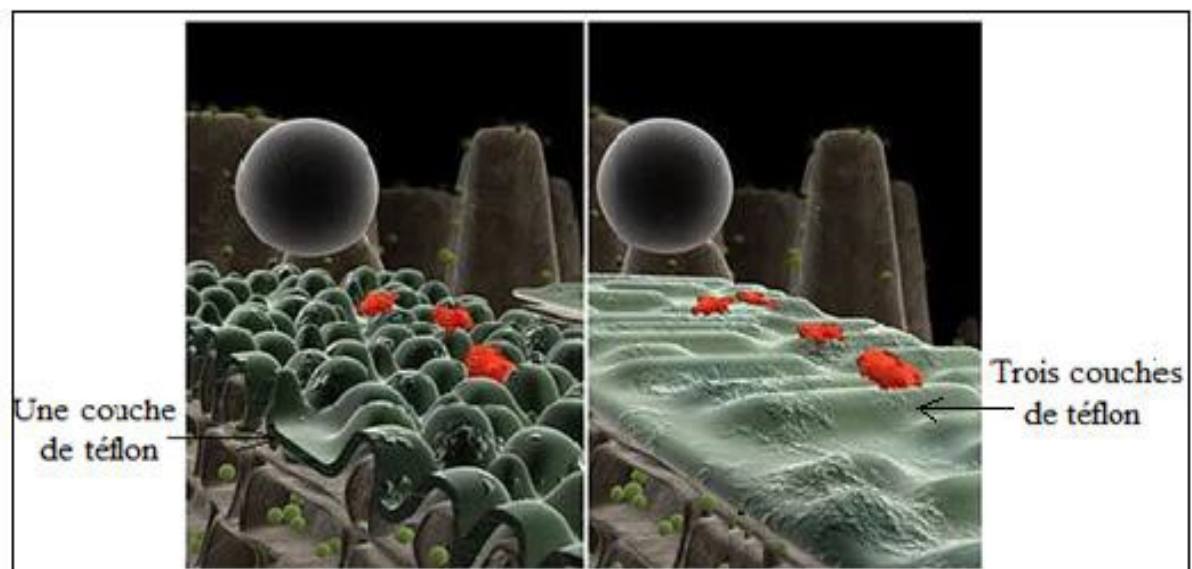


Fig. I. 12: Plots de taille micrométrique sur le téflon

I. 6 Propriétés électriques [33]

I. 6. 1. Permittivité

Un diélectrique soumis à un champ électrique (E_e), crée un champ électrique opposé (E_p) à l'intérieur de la substance (Fig. I. 13). Cette caractéristique des isolants solides et liquides porte le nom de la permittivité relative ϵ_r .

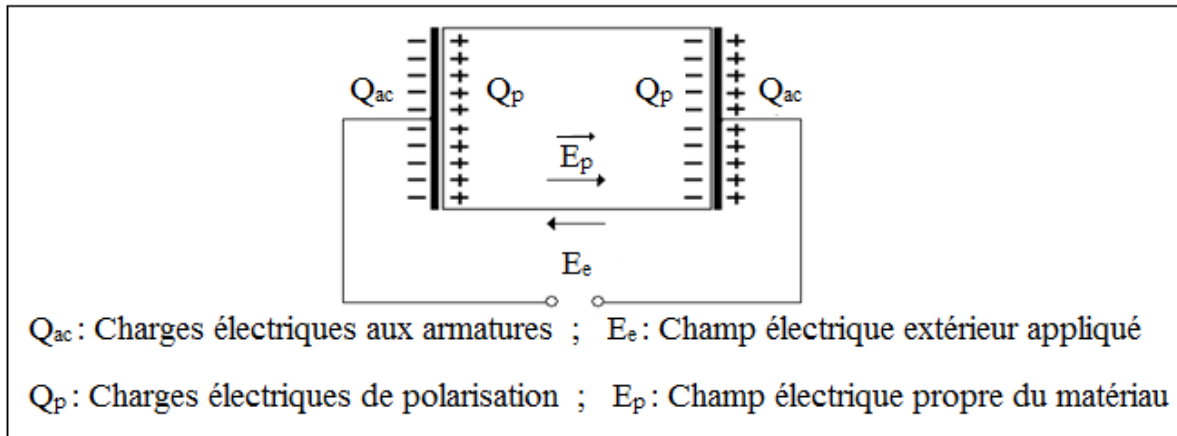


Fig. I. 13: Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension

I. 6. 2 Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un milieu isolant est la valeur maximale du champ électrique que le milieu peut supporter avant le déclenchement d'un arc électrique. La rigidité diélectrique est le rapport entre la tension à laquelle se produit une perforation dans les conditions d'essai spécifiées et la distance entre les deux électrodes auxquelles est appliquée la tension.

Il existe deux types de rigidité :

- la rigidité diélectrique transversale (RDT), lorsque le champ électrique appliqué est perpendiculaire aux surfaces principales du matériau.
- la rigidité diélectrique longitudinale (RDL) est obtenue entre deux conducteurs (Fig. I. 14).

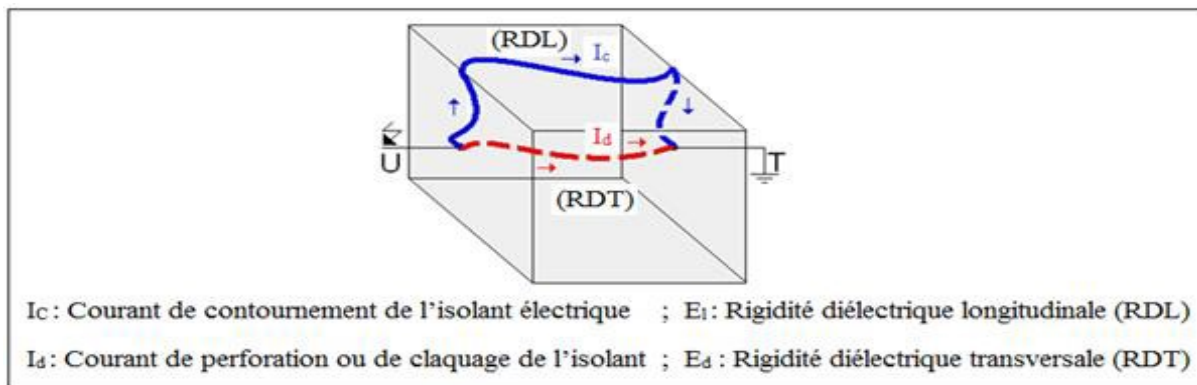


Fig. I. 14: Rigidité diélectrique transversale et longitudinale (décharge électrique disruptive ou de contournement)

I. 6. 3 Résistance d'isolement

On distingue trois types de résistances (Fig. I. 15).

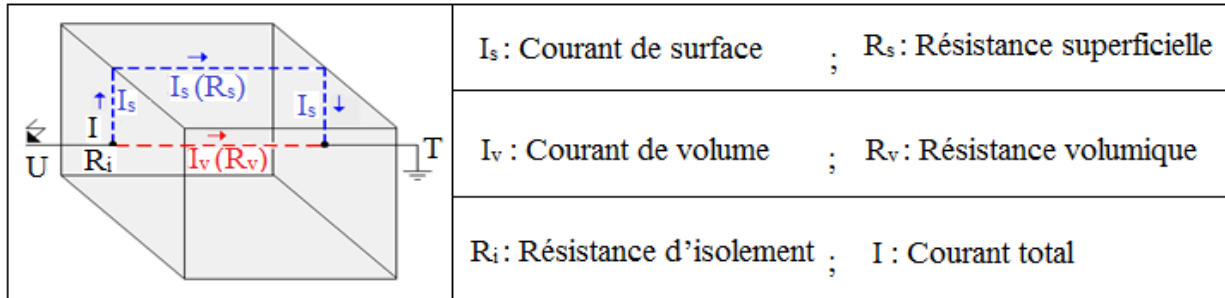


Fig. I. 15: Résistances volumique, superficielle et d'isolement électrique

I. 6. 3. 1 Résistance transversale ou volumique (R_v)

Pour la déterminer on applique un champ perpendiculaire à la surface d'une éprouvette et on mesure le courant transversal résultant. Elle est relative aux propriétés internes du matériau.

I. 6. 3. 2 Résistance superficielle (R_s)

Elle intervient entre deux conducteurs sur une même surface isolante.

I. 6. 3. 3 Résistance d'isolement (R_i)

Elle fait appel aux deux résistances transversale et superficielle d'un matériau, d'une façon représentative des conditions pratiques d'emploi des matériaux.

I. 6. 4 Facteur des pertes

Les pertes diélectriques peuvent être engendrées par le passage des courants de conduction et d'absorption dans un isolant soumis à un champ électrique alternatif. Le diélectrique réel est représenté par les schémas équivalents suivants (Fig. I. 16).

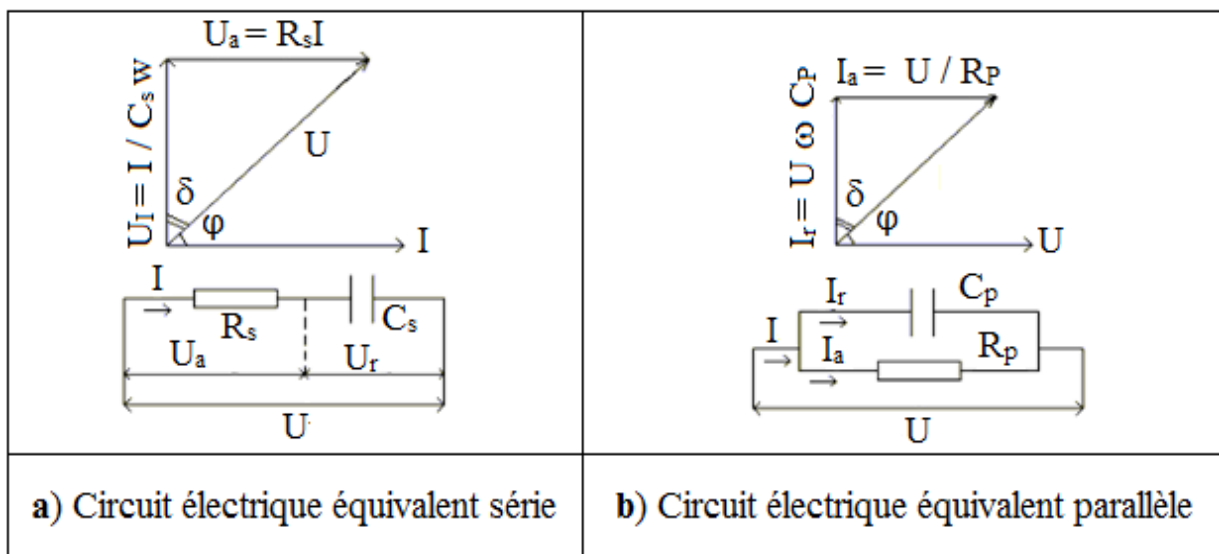


Fig. I. 16: Circuit électrique équivalent série et parallèle

I. 7. Techniques de préparation de surfaces superhydrophobes

I. 7. 1 Dépôt par vapeur chimique

Cette technique [34] consiste à exposer un substrat à une vapeur chimique produisant un certain dépôt désiré qui se décompose ou réagit à la surface, dans la pression et la température désirée.

I. 7. 2 Dépôt électrochimique

Cette méthode [35] consiste à déposer deux substrats dans un liquide, l'un est considéré anode et l'autre joue le rôle d'une cathode. Le substrat (anode ou cathode) déterminé comme la nature et la forme des composés déposés sur la surface. En effet, l'électrochimie est un outil efficace pour élaborer des surfaces superhydrophobes.

I. 7. 3 Photolithographie

Permettant d'obtenir des topographies continues [36]. Il consiste à couvrir une surface d'un film mince de photo résine ou de polymère, puis la radier avec un faisceau lumineux de haute précision.

I. 7. 4 Techniques utilisant le plasma

Le plasma [37] est une technique de déposition (les ions déposent ceux pris dans un bain de vapeur chimique sur la surface) ou d'arrachement de matière (nano-fabrication des surfaces).

I. 7. 5 Processus sol-gel

La méthode sol-gel permet de contrôler la rugosité de la surface en modifiant le protocole du procédé et la composition du mélange réactionnel [38]. Généralement, un sol est préparé par hydrolyse et par polycondensation de l'oxyde correspondant. Pendant le processus de formation de réseau, une grande quantité de solvant est également imprégnée dans le réseau et donc un gel se forme. Le sol peut être appliqué sur les substrats soit directement, soit en combinaison avec des charges [39].

I. 8 Applications

Les industriels s'intéressent de plus en plus au phénomène de la superhydrophobie car elle doit servir dans de nombreux besoins et problèmes des industriels et consommateurs.

a) Béton intelligent [40]

Des chercheurs américains ont mis au point un type de béton qui résiste à l'eau et aux fissures. Ce béton est intelligent grâce à sa composition moléculaire (une surface "pointue") le rendant presque complètement étanche. En versant de l'eau sur ce type de béton, elle forme des gouttelettes qui roulent hors de sa surface (**Fig. I. 17**).



Fig. I. 17 : Béton intelligent

b) Ultra - Ever Dry

Ultra-Ever Dry est un revêtement superhydrophobe qui repousse la majorité des liquides. Ce produit crée une barrière d'air sur la surface d'un objet. Cette barrière repousse l'eau, l'huile, le béton humide et autres liquides (Fig. I. 18).

Ultra Ever Dry s'applique en 2 couches par vaporisation, ce produit est adapté à un usage intérieur et extérieur, on peut citer : Anti humidité, anti corrosion, anti gel, anti contamination.



a) Des gants sans et avec traitement Ultra-ever dry

b) Chaussures avec Ultra-ever dry

Fig. I. 18: Traitement Ultra-Ever dry sur des gants et des chaussures [41]

I. 9 Travaux antérieurs sous tension alternatif

I. 9. 1 Effet du nombre de couches sur la stabilité des revêtements superhydrophobes

L'objectif principal de la thèse de Madidi [42] vise à l'élaboration de revêtements superhydrophobes multicouches et l'étude de stabilité de l'isolation vis-à-vis des milieux aqueux, aux rayonnements UV, ainsi que l'étude de leur stabilité mécanique.

L'auteur a choisi le caoutchouc de silicone, qui est exploité pour son énergie de surface faible et ses propriétés hydrophobes et sa tenue aux rayons ultraviolets, mais le problème de ces matériaux est la perte de leur hydrophobicité avec le temps qui est influencé par ces contraintes principales suivantes :

- ✓ Les décharges électriques ;
- ✓ L'absorption des couches de pollution ;
- ✓ Les rayonnements UV [43].

Remarque :

Dans cette étude l'auteur s'est limité à 3 couches superhydrophobes car à partir de 4 couches l'angle de contact diminuait de $163,2^\circ \pm 3,65^\circ$ à $154,3^\circ \pm 4,9^\circ$. Cela est dû à la modification de la rugosité de la surface.

La technique d'élaboration de ce revêtement dans le travail de Madidi [42] consiste à ajouter des nanoparticules de dioxyde de titane (TiO₂) au caoutchouc de silicone, par pulvérisation avec un pistolet à jet.

La rugosité est un paramètre clé qui amplifie la mouillabilité d'une surface et qui est responsable de la superhydrophobicité. C'est pour cette raison que l'auteur s'est intéressé à étudier la rugosité des surfaces. L'analyse de la rugosité a été effectuée à l'aide du profilomètre confocal CHR 150-L [42].

La variation des caractéristiques morphologiques de la surface a été mise en évidence sur la (**Fig. I. 19a, 19b**). La valeur de la rugosité est estimée à partir de la moyenne quadratique, (Rq), donnée en micromètre.

L'auteur a observé sur les images ci-dessous un état de surface moins perturbé pour le revêtement monocouche et une rugosité maximale dans le cas des revêtements multicouches. Après l'analyse quantitative basée sur ces images l'auteur montre que la rugosité moyenne (Rq) est de 1,88 μm pour l'échantillon (**a**) composé d'une seule couche, tandis qu'elle augmente à 11,6 μm pour l'échantillon (**b**) composé de trois couches.

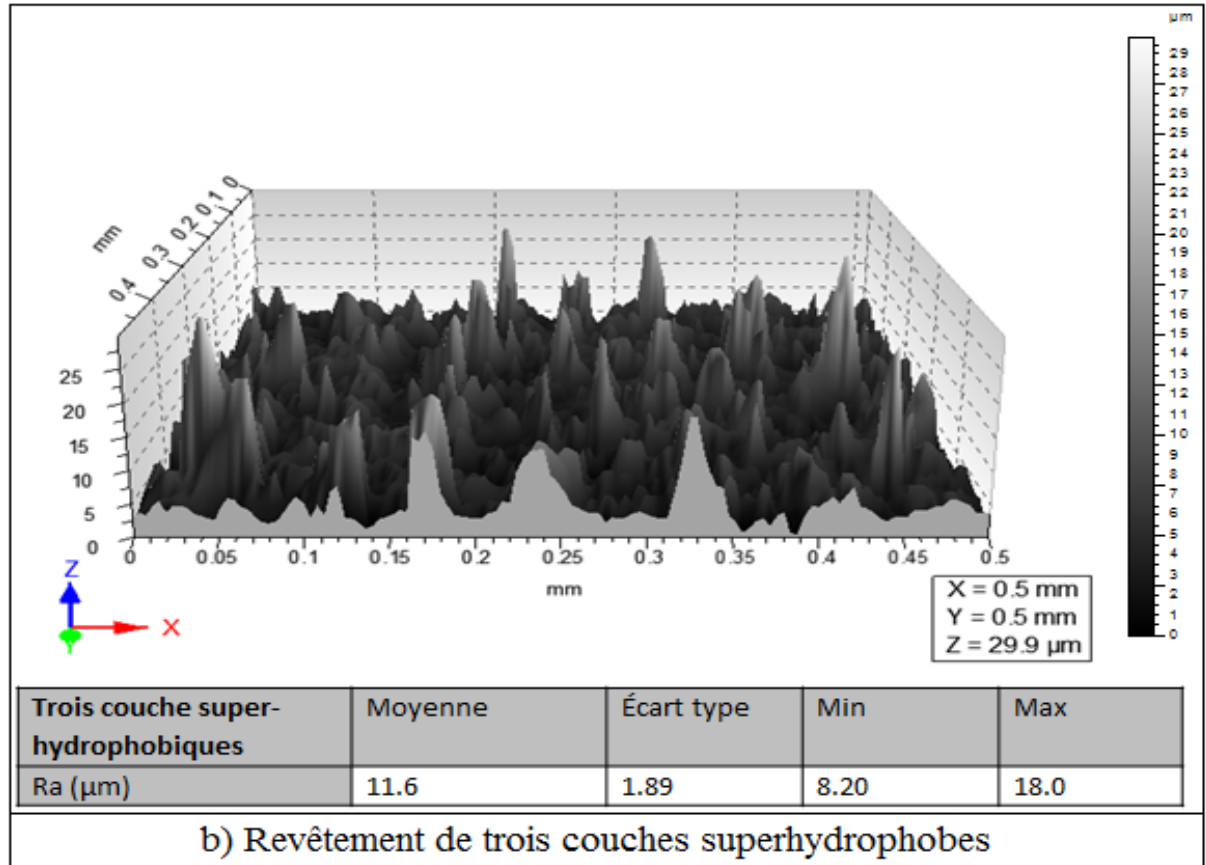
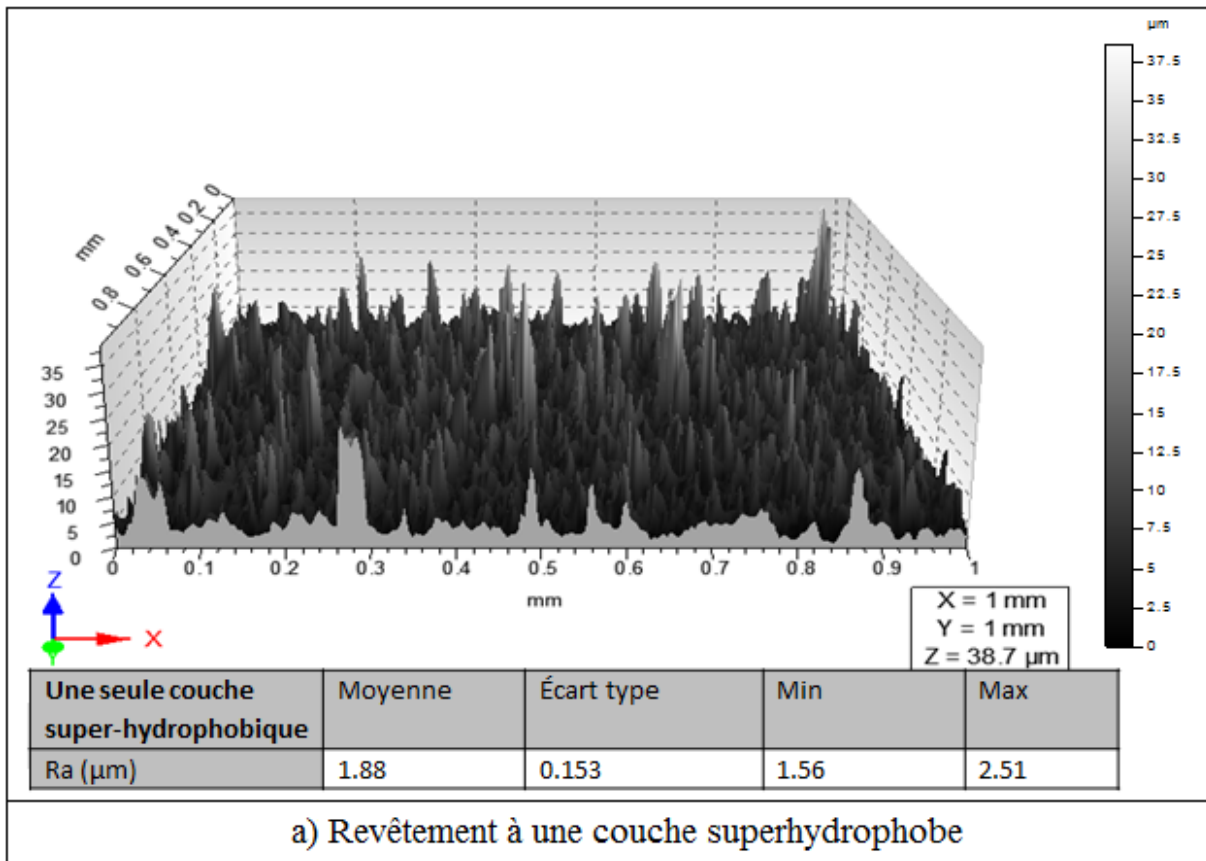


Fig. I. 19: Images topographiques 3D de la surface obtenue par profilomètre

I. 9. 2 Stabilité en milieu aqueux

Cette section met l'accent sur la stabilité de surfaces à une couche et trois couches superhydrophobes contre la dégradation en milieu acide et basique (l'eau potable). Afin d'évaluer la durabilité des revêtements superhydrophobes multicouches élaborés, ont été immergés dans des solutions aqueuses à différents pH (2, 4, 12). Ces valeurs ont été choisies par l'auteur en considérant le pH de la solution de lavage qui est de 9 à 12 [44] et celui des pluies acides est de 4 [43].

a) Milieu acide

Dans le but d'évaluer la stabilité des revêtements, l'auteur a fait analyse de deux échantillons par microscope électronique à balayage avant et après 40 jours d'immersion dans une solution acide (pH=4). Les figures I. 20a et 20b révèlent un revêtement avec une seule couche superhydrophobe, d'après l'auteur la dégradation du caoutchouc de silicone a été observée. En effet, l'acide attaque les molécules dans la masse du caoutchouc de silicone et les brises en petites molécules ou radicaux [45].

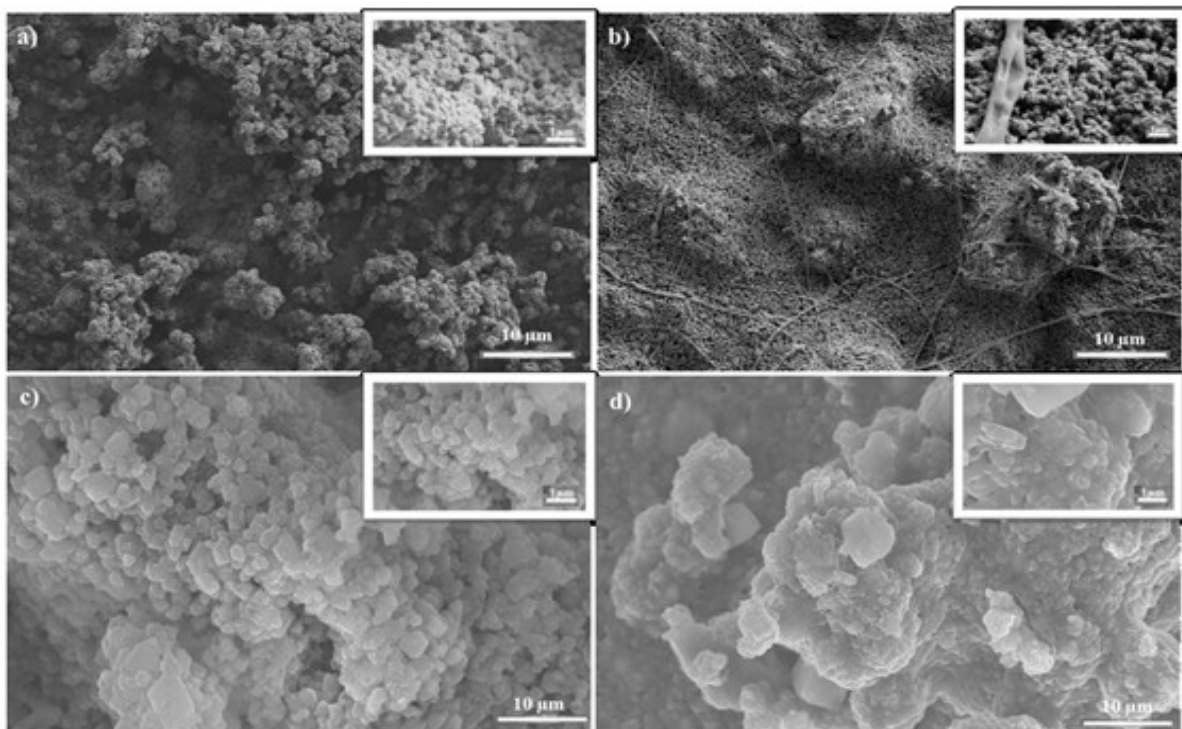


Fig. I. 20: Effet du nombre de couches sur la stabilité des revêtements superhydrophobes à 10 % de TiO₂ en milieu acide ; **a)** une seule couche avant l'immersion ; **b)** une seule couche après l'immersion ; **c)** trois couches avant l'immersion ; **d)** trois couches après l'immersion

Les figures I. 20c et 20d, quant à elles, montrent un revêtement avec trois couches superhydrophobes avant et après 40 jours d'immersion dans la même solution respectivement.

Ce même auteur affirme que ce revêtement a maintenu un recouvrement presque continu de la surface par le polymère. Il note aussi une présence significative d'agglomération et de rugosité qui représente la structure responsable de la superhydrophobicité.

Les résultats obtenus montrent que l'échantillon traité avec trois couches superhydrophobes est beaucoup moins affecté par l'acide que l'échantillon traité avec une seule couche.

b) Eau potable

Des échantillons recouverts d'un seul dépôt de couche superhydrophobe et trois dépôts de couches superhydrophobes ont été immergés dans l'eau potable pendant 240 heures. L'auteur a constaté que l'angle de contact l'échantillon recouvert d'un seul dépôt de couche superhydrophobe passe de $160,0^\circ \pm 2,26^\circ$ à $148,1^\circ \pm 2,54^\circ$ perdant sa superhydrophobicité, alors que pour l'échantillon recouvert de trois couches superhydrophobes, l'angle de contact reste presque constant, il passe de $163,2^\circ \pm 3,65^\circ$ à $160,1^\circ \pm 4,74^\circ$. La diminution dans le cas d'une seule couche peut être due au phénomène de vieillissement physique.

Dans le travail de Madidi, les résultats d'une étude de durabilité d'un revêtement CS/TiO₂ multicouche a été présenté. La résistance aux solutions aqueuses à différents pH et à différentes conductivités a été évaluée en termes d'angle de contact et d'hystérésis d'angle de contact. La mouillabilité des surfaces est suivie pendant 922 heures d'immersion. La figure I. 21 présente l'évolution de l'angle de contact statique en fonction du temps d'immersion dans les solutions citées ci-dessous.

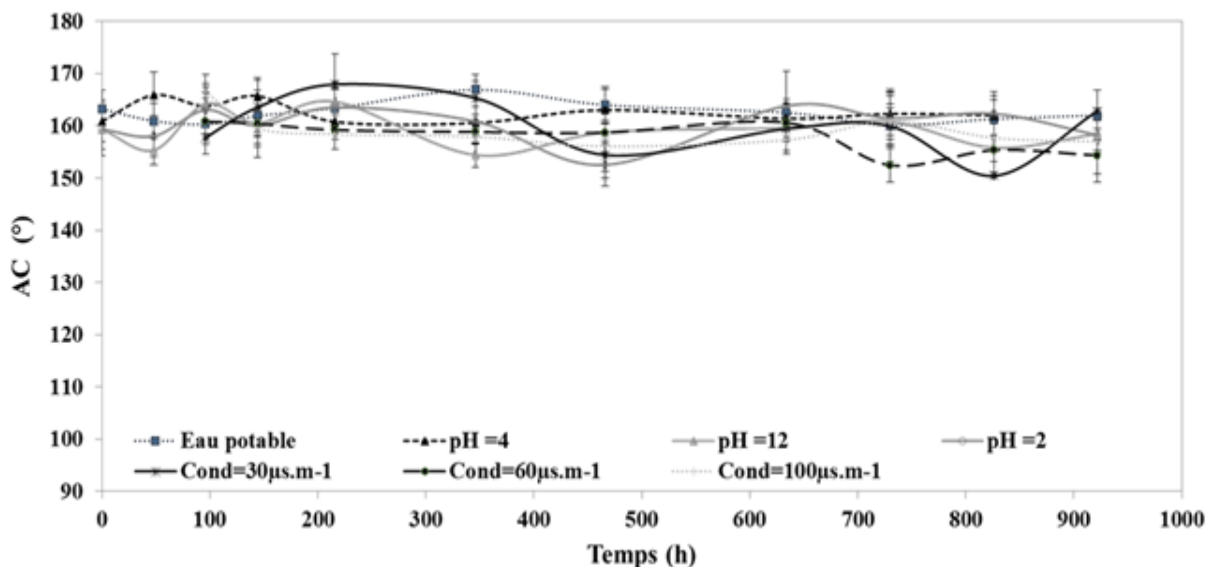


Fig. I. 21: Variation de l'angle de contact statique (AC) en fonction du temps d'immersion dans différentes solutions

D'après l'auteur, les résultats de la figure I .21 ont indiqué une diminution marquée de l'angle de contact pour l'échantillon immergé dans la solution à $30 \mu\text{S.m}^{-1}$ après 820 heures d'immersion ($AC=150,4^\circ \pm 4,9^\circ$). Tous les échantillons immergés dans les solutions indiquées plus haut avaient maintenu leur superhydrophobie ($AC>150^\circ$) après 922 heures.

D'après l'auteur, les résultats montrent une légère augmentation des valeurs de l'hystérésis de l'angle de contact après 922 heures d'immersion dans des solutions à $\text{pH}=4$ ($HAC=12,7^\circ$) et $\text{pH}=12$ ($HAC=9,3^\circ$). D'après l'auteur cela pourrait être attribué à une légère perte de rugosité ou bien à une faible dégradation des revêtements. Toutefois, les échantillons n'ont pas perdu leurs propriétés « *roll-off* ».

I. 9. 3 Stabilité au rayonnement UV et à la condensation

La lumière UV est responsable de la quasi-totalité des photo-dégradations des matériaux exposés à l'extérieur. Pour reproduire l'endommagement des propriétés physiques sur les revêtements multicouches causé par les rayonnements UV et la condensation, l'auteur a utilisé les enceintes de vieillissement accéléré QUV en laboratoire QUV [42]. L'auteur a constaté que les angles de contact restent constants pour les revêtements après 212 heures de rayonnement UV et 80 heures de condensation figure I. 22.

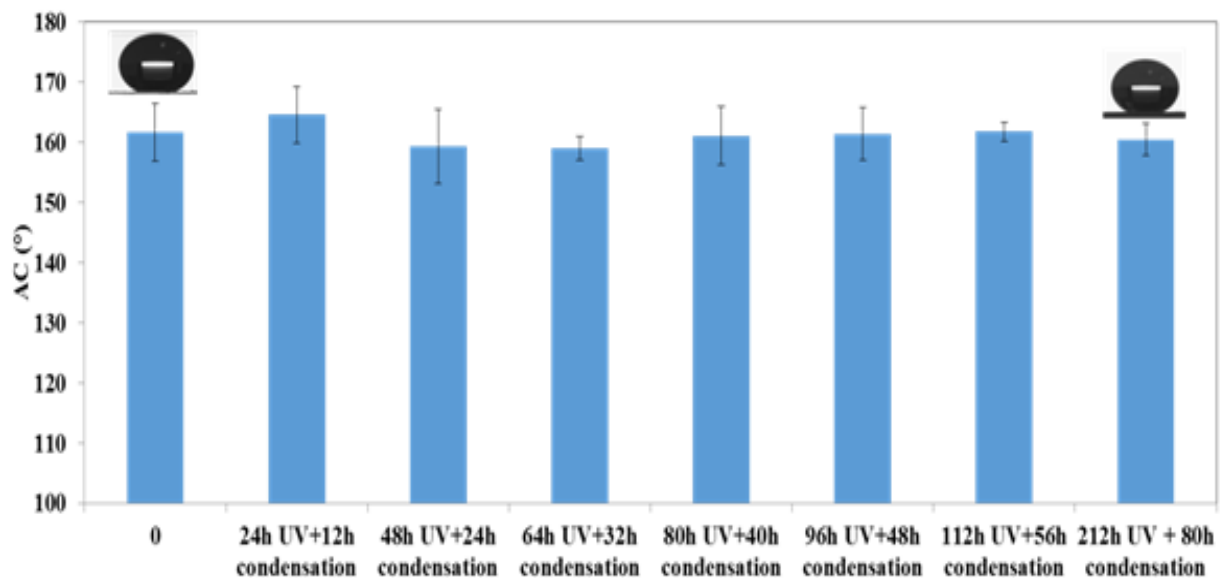


Fig. I. 22: Variation de l'angle de contact statique (AC) en fonction de l'exposition au rayonnement UV + condensation d'humidité

I. 9. 4 Stabilité mécanique

Les propriétés d'adhérence d'un système sont généralement évaluées à l'aide de tests mécaniques. Le test d'adhésion «*pull-off adhesion testers*» exploité par l'auteur consiste à effectuer une traction uniaxiale, perpendiculaire au plan de l'interface revêtement-substrat, sur une éprouvette se présentant sous la forme d'une structure stratifiée de type joint de colle.

L'auteur a remarqué que la force d'adhésion atteint 0,87 MPa pour le revêtement à trois couches alors que pour le revêtement à une seule couche, elle n'est que de 0,59 MPa. En effet, une augmentation du nombre de couches engendre une amélioration de la ténacité et par conséquent un accroissement de la force d'adhésion et la stabilité mécanique.

I. 10 Effet des propriétés géométriques et électriques des gouttes d'eau sur la performance d'une isolation superhydrophobe

Les étapes essentielles de revêtement superhydrophobe d'une isolation en verre effectuées par M. Haddadi et N. Hallouane [46] sont résumées en figure I.23, quant au support de l'isolation et des électrodes HT et terre, celui-ci est illustré par la figure. I. 24.

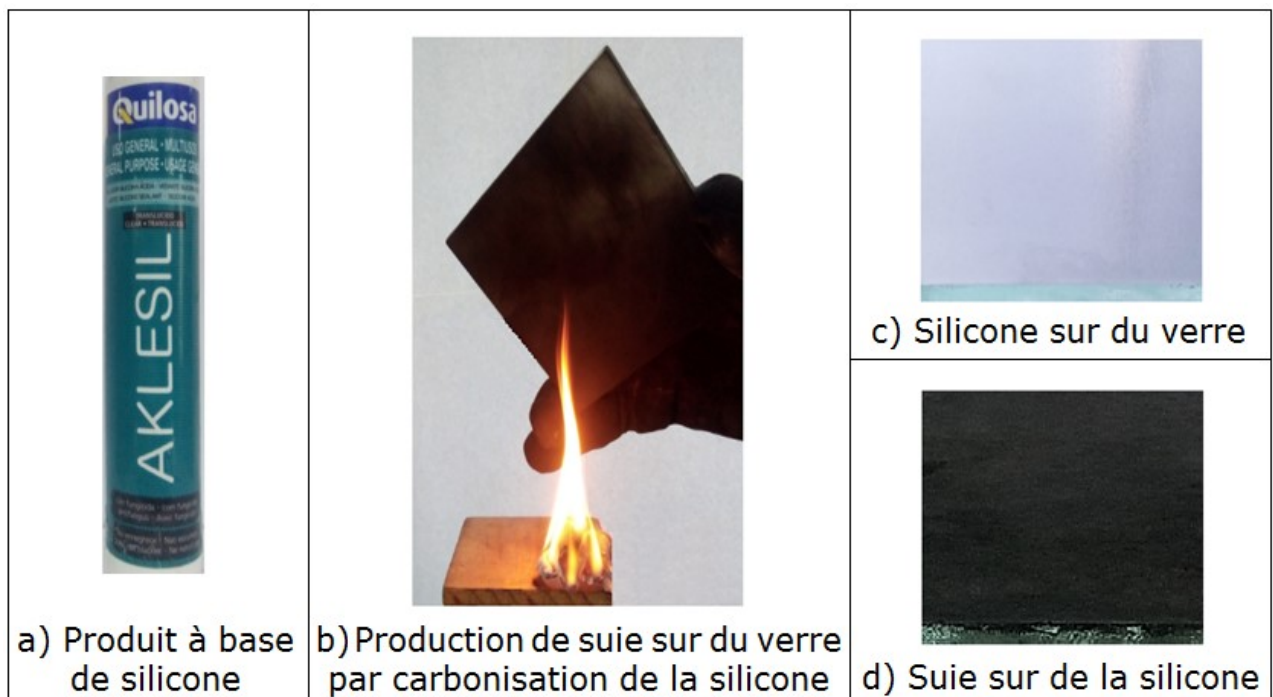


Fig. I. 23: Etapes essentielles de fabrication d'un revêtement en suie sur une plaque en verre [1]

La mesure du volume des gouttes d'eau et leur dépôt sur la surface de l'isolation superhydrophobe ont été effectués au moyen d'une micropipette, graduée de 10 à 100 μl . La tension continue d'expulsion des gouttes d'eau en dehors de l'isolation superhydrophobe est fournie par la station de mesure illustrée par la figure I. 25.

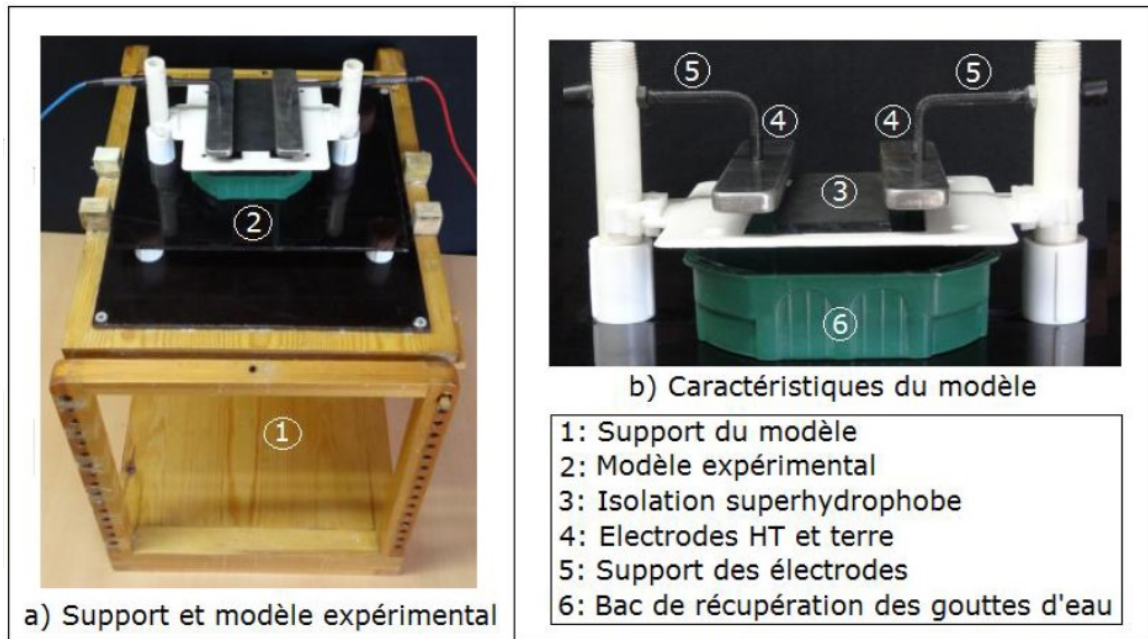


Fig. I. 24: Caractéristiques du modèle expérimental [46]

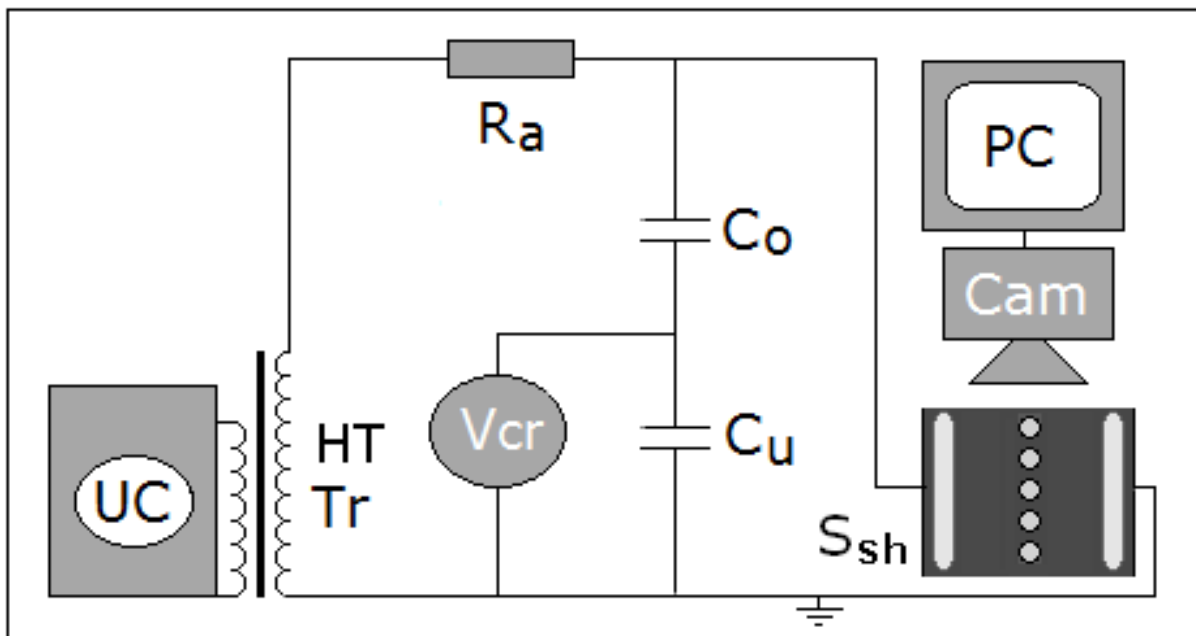


Fig. I. 25: Schéma de mesure de la tension d'expulsion des gouttes d'eau de la surface superhydrophobe et de visualisation du mouvement des gouttes d'eau

Afin de reproduire les différents volumes des gouttes d'eau de pluie naturelle, leurs divers degrés de pollution et leur viscosité, les auteurs ont varié le volume (V_i) des gouttes d'eau sur l'isolation de (10, 30, 40 et 60) μl , leur conductivité électrique entre 10 mS/cm et 20 mS/cm et la concentration du kaolin entre 0 et 120 g/l (Fig. I. 26).

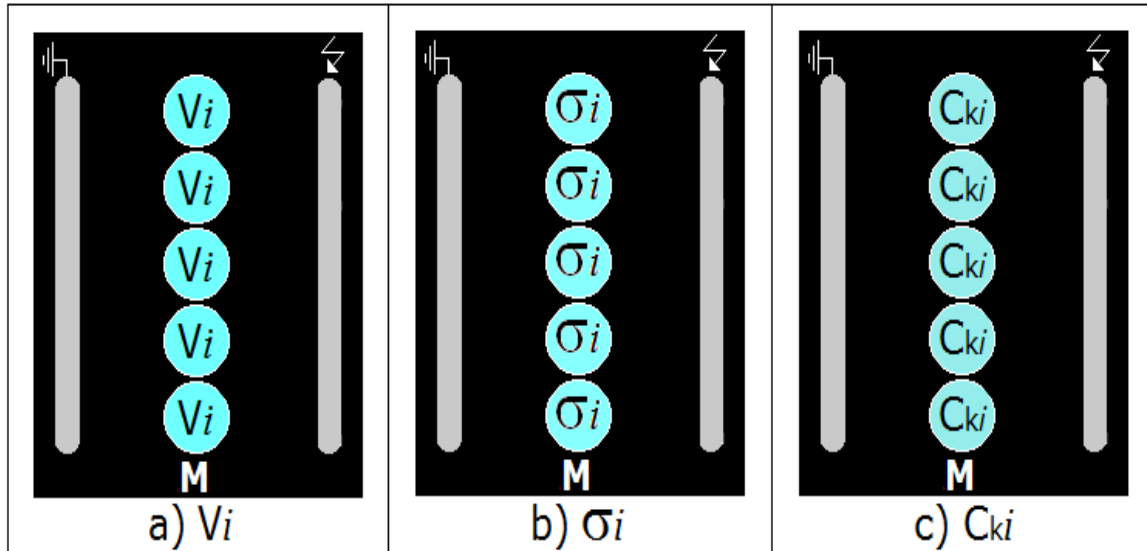


Fig. I. 26: Variation du volume, de la conductivité électrique et la concentration en kaolin des gouttes d'eau d'une rangée déposée au milieu de l'isolation

Avec l'application de la haute tension aux bornes des électrodes, les lignes de champs électriques vont parcourir la surface de l'isolation superhydrophobe et feront évacuer les gouttes d'eau de la surface de l'isolation (fig. I. 27a). Dans le cas de la configuration avec couverture isolante, il a été remarqué que les lignes du champ électrique sont plus concentrées sur la surface de l'isolation superhydrophobe (fig. I. 27b).

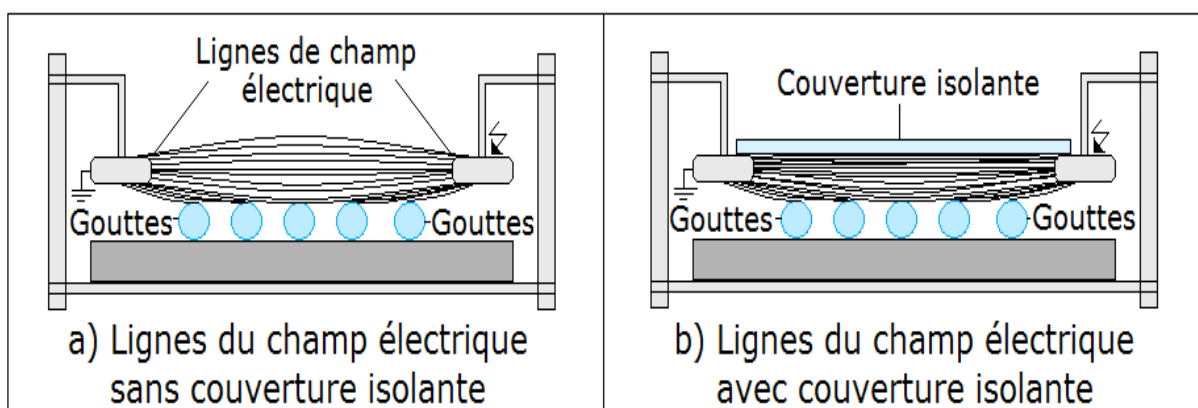


Fig. I. 27: Images des lignes du champ électrique entre les deux électrodes délimitant une isolation recouverte de gouttes d'eau sans (a) ou avec couvert isolant (b)

Les auteurs ont observé un déclin de la tension d'évacuation de la dernière goutte d'eau en fonction de son volume quel que soit le degré de couverture de l'isolation (**Fig. I. 28**). La tension d'éviction des gouttes d'eau avec couvert isolant en verre est plus faible que sans celui-ci.

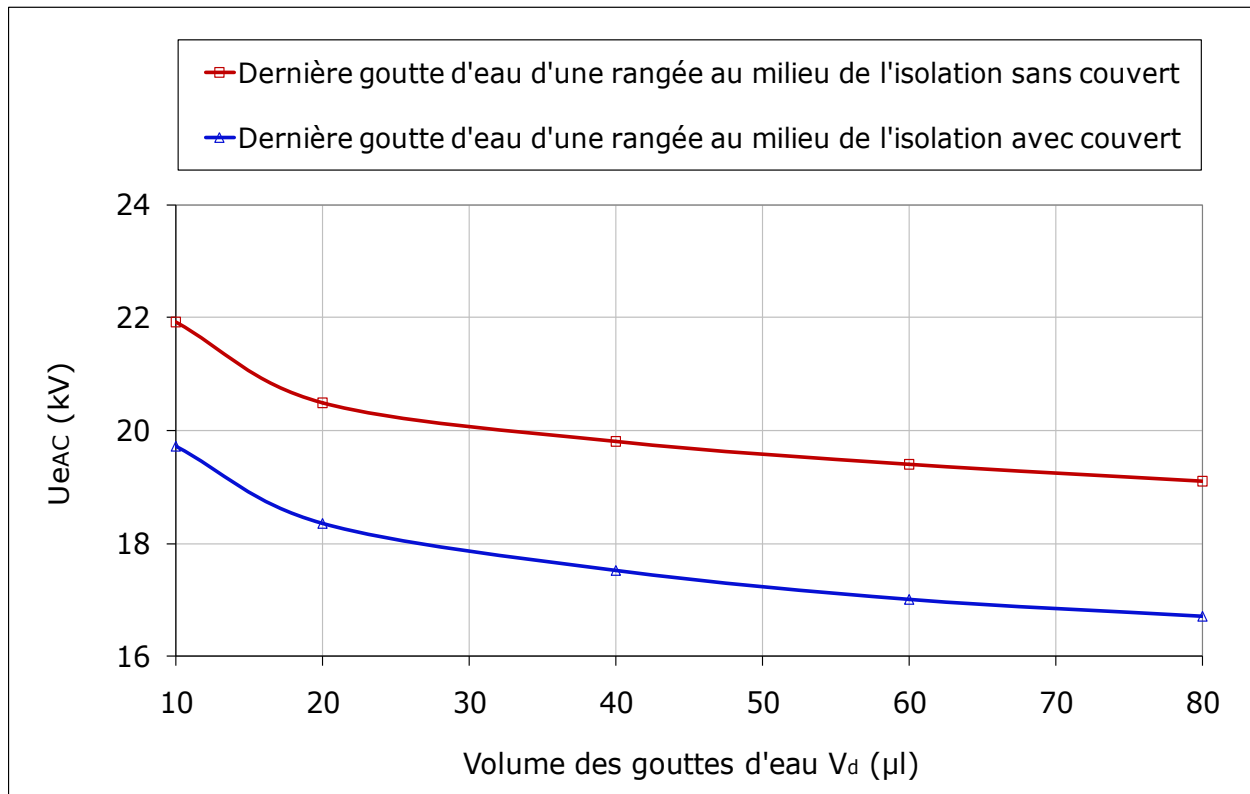


Fig. I. 28: $U_{AC} = f(V_d)$ pour une goutte d'eau d'une rangée du milieu de l'isolation avec ou sans couvert

Pour ce qui est de l'influence de la conductivité électrique sur la tension d'expulsion des gouttes d'eau (**Fig. I. 29**), les mêmes auteurs [46] ont constaté son déclin avec l'élévation de la valeur de cette grandeur jusqu'à 1 mS/cm, au-delà de laquelle de celle-ci demeure pratiquement constante.

Selon ces auteurs, le degré de rapprochement des lignes de champ électrique est en étroite liaison avec l'élévation de la conductivité électrique des gouttes d'eau. D'après ces mêmes auteurs, la tension d'évacuation des gouttes d'eau avec couvert isolant est plus petit que sans celui-ci.

Selon les auteurs [41], Il résulte de la caractéristique $U_{AC} = f(C_k)$, son allure strictement croissante jusqu'à une valeur limite de $C_k = 80 \text{ g/l}$, au-delà de laquelle celle-ci demeure

constante. Ils ont expliqué cette élévation par le fait que les gouttes les plus visqueuses s'accrochent aux aspérités de l'isolation au moyen du kaolin insoluble qui se dépose à leur fond. Ceci entraîne le collage des gouttes à ces points d'impact, par conséquent la tension d'essai devient plus grande. De plus, celle-ci est plus élevée sans couvert qu'avec celui-ci (Fig. I. 30).

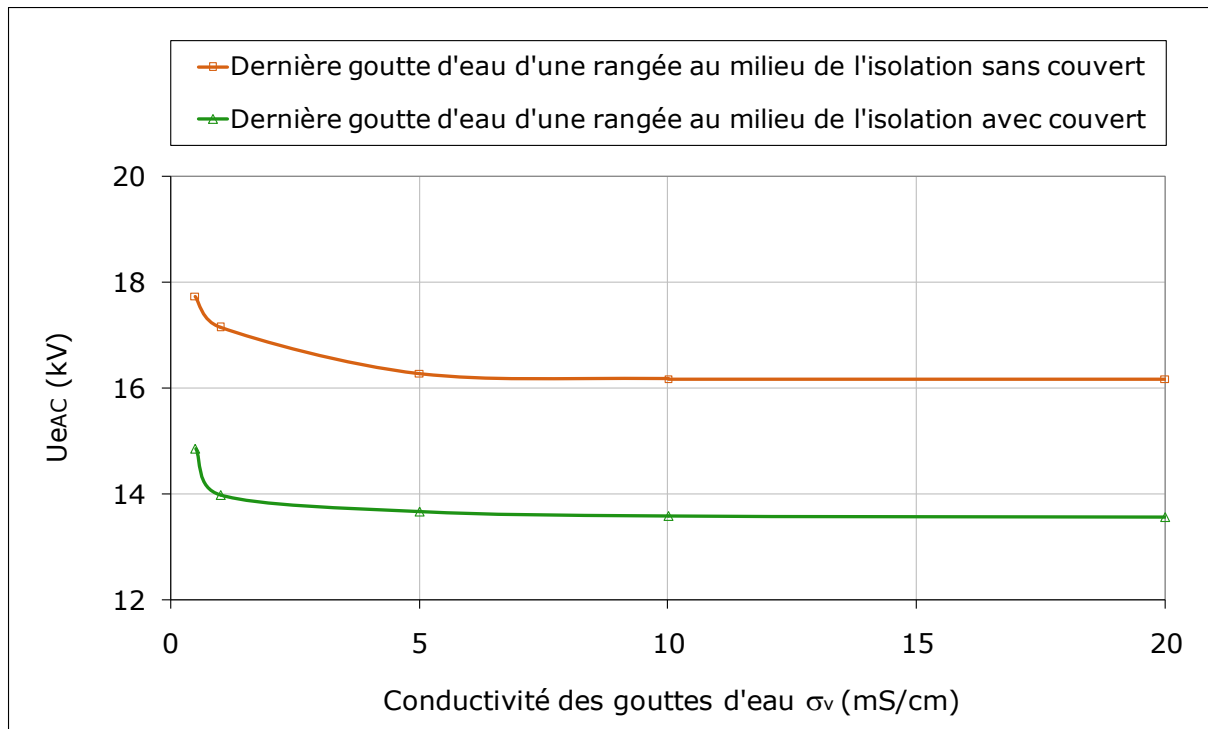


Fig. I. 29: $U_{AC} = f(\sigma_v)$ pour une goutte d'eau d'une rangée du milieu de l'isolation avec ou sans couvert

Les travaux de Haddadi [46] ont démontré que la tension d'évacuation des gouttes diminuait lorsque le volume de celle-ci augmentait, et la tension est plus faible avec couverture isolante en verre que sans celle-ci.

Pour ce qui est de l'effet de la pollution, lorsque la conductivité et le degré de kaolin augmentait la tension d'expulsion augmentait aussi (figs. I. 29 et I. 30).

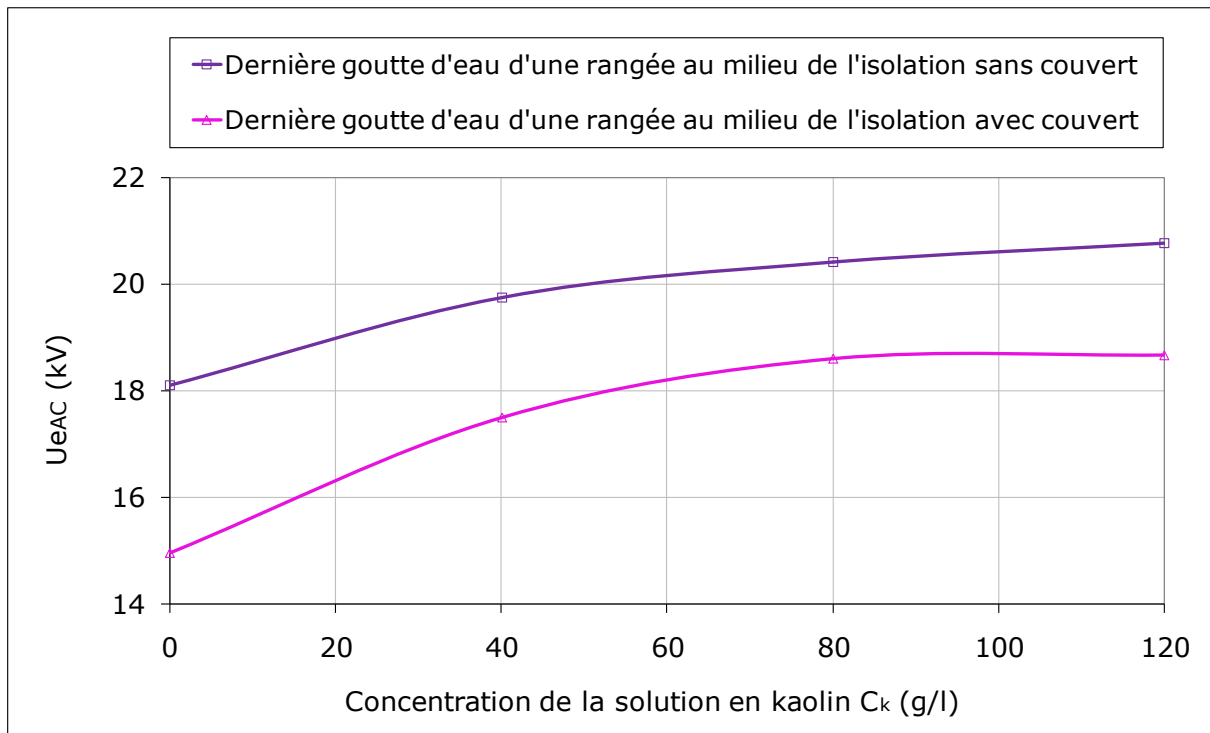


Fig. I. 30 : $U_{AC} = f(C_k)$ pour une goutte d'eau d'une rangée du milieu de l'isolation avec ou sans couvert

D'après l'auteur l'évacuation des gouttes d'eau sous la variation des grandeurs étudiés n'engendre aucune formation de décharge électrique ou de contournement de l'isolation et entraîne pas d'altération apparente de l'isolation, par conséquent la superhydrophobie du matériau utilisé dans cette étude reste conservée.

I. 11 Conclusion

Les auteurs cités précédemment ventent les bien faits et les qualités de la superhydrophobie et n'ont pas torts puis ce que c'est le matériau miracle de l'isolateur du futur.

Les caractéristiques de la superhydrophobie sont les aspérités qu'on peut observer seulement par MEB et avec le nombre de couches élevé on pourra observer l'homogénéité des aspérités à travers toute la surface de l'isolation, donc l'angle de contact sera plus élevé. Les surfaces dont le matériau est superhydrophobe sont auto nettoyante alors puisqu'il ne se pollue pas et donc subira pas de décharge électrique par conséquent ça durée de vie va s'allonger.

Pour conclure d'après les recherches bibliographique les isolateurs performant du futur seront à base de matériau superhydrophobe.

Chapitre II

*Pollution des isolations
superhydrophobes*

II. 1 Introduction

La pollution humide affecte énormément la performance électrique des isolations hydrophiles de protection des réseaux électriques. Elles se mouillent facilement et rapidement sous un dépôt de pollution par temps de pluie ou de condensation. Ce qui engendre la diminution drastique de leur résistance électrique. Il en résulte des contournements récurrents de ces isolations par des arcs électriques. Afin de réduire le taux de telles perturbations, des matériaux hydrophobes ont été mis sur le marché. Ce type d'isolation est doté d'un très haut pouvoir imperméabilisant à long terme. Cet avantage se traduit évidemment par une minimisation des courants de cheminement. Malgré toutes ces qualités, ils s'altèrent en service sous conditions d'une forte humidité. Moyennant la vertu de la superhydrophobicité naturelle du lotus, des matériaux artificiels à surfaces superhydrophobes ont été développés. Leur conception repose sur la très forte mobilité de toute sorte d'humidité entrant en contact de leur surface lors de la pluie ou de condensation naturelle et la très forte possibilité de son évacuation immédiate à l'extérieur de celle-ci sous l'action de forces extérieures. Ceci permet la conservation de leur sécheresse pendant très longtemps. Par conséquent, en cas de leur emploi en tant qu'isolations électriques, leur pouvoir d'isolement demeurera constamment inchangé, indépendamment du degré d'humidification du milieu de leur utilisation [1].

II. 2 Pollution

La pollution est la dégradation de l'environnement par des substances (naturelles, chimiques ou radioactives), des déchets (ménagers ou industriels) ou des nuisances diverses (sonores, lumineuses, thermiques, biologiques, etc.). Bien qu'elle puisse avoir une origine entièrement naturelle (éruption volcanique, par exemple), elle est principalement liée aux activités humaines [47]. Celle-ci engendre une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en totalité ou en partie, au travers d'effets directs ou indirects altérant les modalités de répartition des flux d'énergie, les niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel [48].

II. 3 Salinité

La salinité peut être définie comme étant la quantité globale des sels contenus dans « la solution du sol » [49]. Elle se produit après l'évaporation de l'eau dans son état pur laissant derrière elle les sels et les autres substances [50]. Elle se produit en raison de l'augmentation des concentrations de ces sels comme le chlorure de sodium [51]. Elle est définie par le rapport entre la masse de sel sur le volume de la solution (kg/m^3).

II.4 Couche de pollution

C'est une couche portée par le vent et déposée sur une surface isolante. En présence d'humidité, les divers dépôts polluants deviennent plus ou moins conducteurs.



Fig. II. 1: Couche de pollution sur des isolateurs

II. 5 Sources de pollution

La pollution atmosphérique peut être d'origine naturelle ou être issue des activités humaines. Selon les normes CEI, IEEE et le CIGRE [52-53], la nature de la pollution des isolateurs peut dépendre de leur situation climatique et géographique. Ainsi, les sources de pollution fréquemment observées peuvent être classées comme suit [54] :

✚ II. 5. 1 Pollution industrielle

Cette pollution est engendrée par l'évacuation des fumées des usines. Pour les régions exemptées des fumées, cette pollution peut être d'origine domestique (appareils de chauffage polluants, véhicules automobiles, ...).

✚ II. 5. 2 Pollution naturelle

Cette pollution provient des sels marins dans les régions côtières ou des dépôts de sable provenant des vents de sable.

✚ II. 5. 3 Pollution mixte

Elle est la plus fréquente et la plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques. La pollution mixte résulte de la combinaison entre les différents types de pollution, comme par exemple les pollutions naturelles et industrielles.

II. 6 Mesure de la sévérité de pollution d'un site

La connaissance de cette sévérité consiste à étudier les différents paramètres qui définissent l'état de dégradation de l'isolation. Il n'en demeure pas moins que trois années sont au minimum nécessaires pour déterminer la sévérité d'un site [55].

Dans ce qui suit, nous passerons en revue les différentes méthodes de mesure largement employées. Elles sont basées sur des théories et des données expérimentales, dont certaines sont encore controversées [56].

II. 7. 1 Conductance superficielle

La conductance superficielle (δ) des isolateurs témoins, installés sur site, est obtenue à partir du rapport du courant électrique (I) qui traverse l'isolateur, à la tension d'alimentation de l'isolateur témoin (U), selon la relation suivante :

$$\delta = I/U \quad (\text{II. 1})$$

Pour mesurer la conductivité superficielle on multipliera la conductance (δ) par un facteur de forme de l'isolateur [57].

Ainsi, la mesure de la conductance superficielle est une méthode satisfaisante pour évaluer la sévérité de la pollution d'un site. Elle peut être représentative d'un type de site étudié, mais en général, elle présente des résultats dispersés [58].

II.7.2 Densité du dépôt de sel équivalent (DDSE)

La densité du dépôt de sel équivalent est le dépôt équivalent exprimé en mg de Na Cl/cm² de la surface d'un isolateur, ayant une conductivité équivalente égale à un dépôt polluant réel dissous dans la même quantité de solution. Des échantillons de sel sont prélevés à la surface d'un isolateur témoin, en utilisant un matériau absorbant (coton, ...) et de l'eau distillée. Le dépôt est ensuite dissout dans une quantité de solution connue. La conductivité de la solution obtenue ainsi que les caractéristiques de l'isolateur permettent de déterminer la salinité équivalente. Les mesures doivent être répétées avec une fréquence suffisante, afin d'obtenir les niveaux entre les périodes de lavage naturel [59].

Cette méthode permet d'établir une relation avec les méthodes d'essais sous pollution artificielle, ce qui est un avantage. Comme elle peut présenter certains inconvénients tels que les fréquences de prélèvements, les fluctuations de l'humidité et l'amorçage des arcs électriques qui ne sont pas pris en considération [60].

A partir de la conductivité de la solution obtenue de la surface utilisée de l'isolateur, du volume d'eau et de sa température, on peut calculer la DDSE, comme suit :

$$DDSE = \frac{Sa.V}{S} \tag{II.2}$$

$$Sa = 5,7(\sigma_{20})^{1,03} \tag{II.3}$$

$$\sigma_{20} = \sigma_0 [1 - b(\theta - 20)] \tag{II.4}$$

$$b = -3,2 \cdot 10^{-8} \theta^3 + 1,032 \cdot 10^{-5} \theta^2 - 8,272 \cdot 10^{-4} \theta + 3,544 \cdot 10^{-2} \tag{II.5}$$

Où:

Sa: Salinité de la suspension en (kg/m³);

V: Volume de la solution en (m³);

S: Surface de l'isolateur en (m²);

θ: Température de la suspension en °C;

σ₀: Conductivité volumique à 0 °C en (S/m);

σ₂₀: Conductivité volumique à 20 °C en (S/m);

II. 7.3 Densité de dépôt non soluble (DDNS) [61]

La densité de dépôt non soluble représente la quantité de produits non solubles dans une couche de pollution. La détermination de la DDNS (**Fig. II. 2**) s'effectue comme suit:

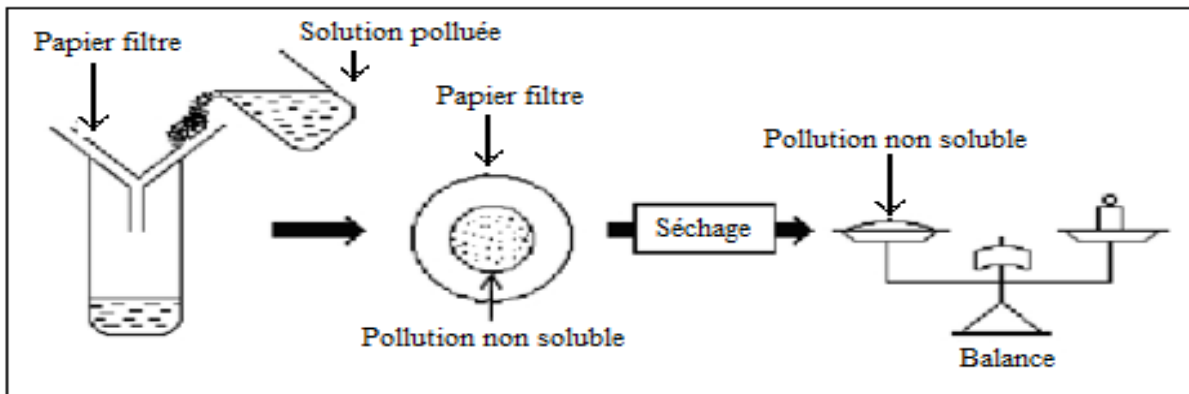


Fig. II. 2: Schéma et procédé de mesure de la DDNS

La solution obtenue par la méthode de la DDSE est filtrée à l'aide d'un papier filtre. Le dépôt non soluble restant après filtrage est séché puis pesé. La DDNS peut être calculée par la formule suivante :

$$DDNS = 1000 \frac{m_f - m_i}{A} \tag{II.6}$$

Où:

DDNS: Densité de dépôt non soluble en mg/cm^2 ;

m_f : Masse du papier filtre contenant la pollution après séchage en mg;

m_i : Masse initiale du papier filtre en mg;

A: Surface lavée de la barrière en cm^2 .

II. 7. 4 Mesures optiques

Le but des mesures optiques est d'évaluer l'épaisseur de la couche de pollution déposée à la surface de l'isolateur. Un dispositif à rayons lasers permet à partir des rayons réfléchis (amplitude, décalage de phase, ...etc.), de calculer la constante diélectrique et l'épaisseur de la couche de pollution. La mesure de la sévérité de la pollution peut ainsi se faire sans toucher à cette couche [61-62].

II. 7. 5 Contrainte de contournement

La contrainte de contournement d'un isolateur est la tension de contournement divisée par la longueur totale de l'isolateur. Sur site, la contrainte de contournement peut être mesurée de différentes façons [52].

- Installation de chaînes d'isolateurs de même type, mais de différentes longueurs, et soumises à une tension constante. On estime les probabilités de contournement à partir des proportions d'amorçage enregistrées.
- Une autre méthode consiste à disposer des fusibles sur chaque chaîne, afin que la chaîne accroisse sa longueur effective jusqu'à atteindre le niveau de tenue en tension.

II. 8 Influence des facteurs climatiques sur les isolateurs pollués

Parmi les facteurs météorologiques qui créent des dépôts polluants et par conséquent influent sur la tenue électrique des isolations on distingue [63].

II. 8. 1 Humidité

L'humidification influe négativement sur la tenue électrique des isolations puisqu'elle accroît la conductivité électrique des agents polluants déposés sur leur surface et entraîne par conséquent la diminution de leur tenue.

II. 8. 2 Pluie

Les fortes pluies permettent en général le nettoyage des surfaces, isolantes polluées, cependant, les fines peuvent les mouiller, ce qui augmente le risque de leur contournement.

II. 8. 3 Température

Contrairement à l'humidité, l'élévation de la température favorise l'assèchement des dépôts polluants, ce qui fait augmenter leur résistivité et par conséquent la tenue des isolations contaminées devient plus important. Cependant, la différence de température entre le jour et la nuit peut provoquer le phénomène de condensation et l'humidification de la couche de pollution.

II. 8. 4 Vent

Le vent joue un double rôle. Il assure d'une part le transport et la distribution des dépôts polluants formés sur les surfaces isolantes, d'autre part il peut se comporter comme agent d'auto nettoyage lorsque sa vitesse est élevée.

II. 9 Classification des sites pollués

Afin d'évaluer l'isolement des lignes de transport et d'établir la corrélation entre la méthode de brouillard salin et les conditions de pollution naturelle, quatre classes de sévérité ont été proposées [63].

II. 9. 1 Classe 1

Cette classe correspond à une pollution faible. Cette pollution est généralement naturelle (sauf marine) ou légèrement industrielle. La salinité équivalente maximale retenue pour cette classe correspond à une pulvérisation d'une solution de chlorure de sodium à 2,5 g/l de concentration.

II. 9. 2 Classe 2

La classe 2 correspond à une pollution moyenne. En général, cette pollution est naturelle (sauf marine) ou faiblement industrielle. En classe 2, la sévérité équivalente maximale retenue est de 10 g/l.

II. 9. 3 Classe 3

Cette classe correspond à des zones très localisées où l'on trouve simultanément une forte pollution marine et industrielle. Il s'agit donc de zones à densité industrielle importante, de grandes villes ou de zones proches de la mer soumises à l'action directe des embruns. Ces sites nécessitent un isolement important. La salinité équivalente maximale, concernant cette classe, est de 80 g/l.

II. 9. 4 Classe 4

La classe 4 correspond aux zones où le niveau de pollution est exceptionnel. La pollution est éventuellement naturelle ou mixte, la salinité équivalente maximale pour la classe 4 est de 160 g/l.

II. 10 Conséquences de la pollution sur les équipements électriques

II. 10. 1 Contournement d'une surface isolante superhydrophobe [64]

II. 10. 1. 1 Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe en position horizontale

Le processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe placée horizontalement passe par 2 étapes: la coalescence de gouttelettes d'eau (Figs. II. 3a, 3b, 3c et 3d) et le contournement (Fig. II. 3e) de l'isolation. Après l'application de la tension, les petites gouttelettes, se coalescent et forment de grosses gouttelettes. L'élévation au niveau de la tension fait augmenter le volume de ces grosses gouttelettes d'eau après leur coalisation sur sa surface. Avec l'élévation du volume le nombre total des gouttelettes d'eau diminue. Par conséquent il en résulte la génération de plusieurs zones sèches réparties sur toute la surface de l'isolation.

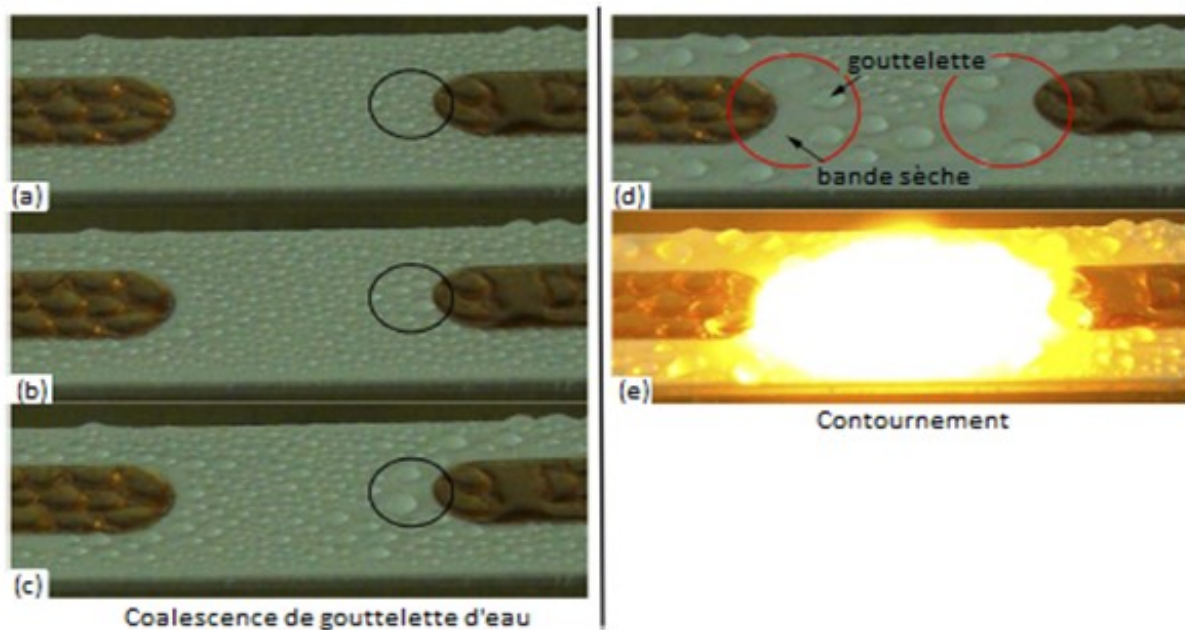


Fig. II. 3: Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe en position horizontale et recouverte de gouttes d'eau (a – c: Coalescence de gouttelettes d'eau sous une tension croissante, d: Coalescence de gouttelettes d'eau et formation de multiples zones sèches sur la surface interélectrode, e: Contournement de l'isolation)

II. 10. 1. 2 Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe inclinée de 20 °

Le processus d'amorçage lorsqu'une surface superhydrophobe est inclinée de 20 °, contient trois parties: coalescence de gouttelettes d'eau, glissement des gouttelettes d'eau et

contournement de l'isolation (**Fig. II. 4f**). En présence de tension, les gouttelettes d'eau coalescent pour former de grosses gouttelettes d'eau (**Figs. II. 4b. 4c. 4d et 4e**). Ces gouttelettes coalescées glissent très facilement sur la surface superhydrophobe, en raison de sa faible adhérence, et puis beaucoup de gouttelettes quittent la surface pour qu'il reste à la fin Une petite quantité, et la bande sèche est plus grande que dans le cas d'une surface hydrophobe (**Figs. II. 4d et 4e**).

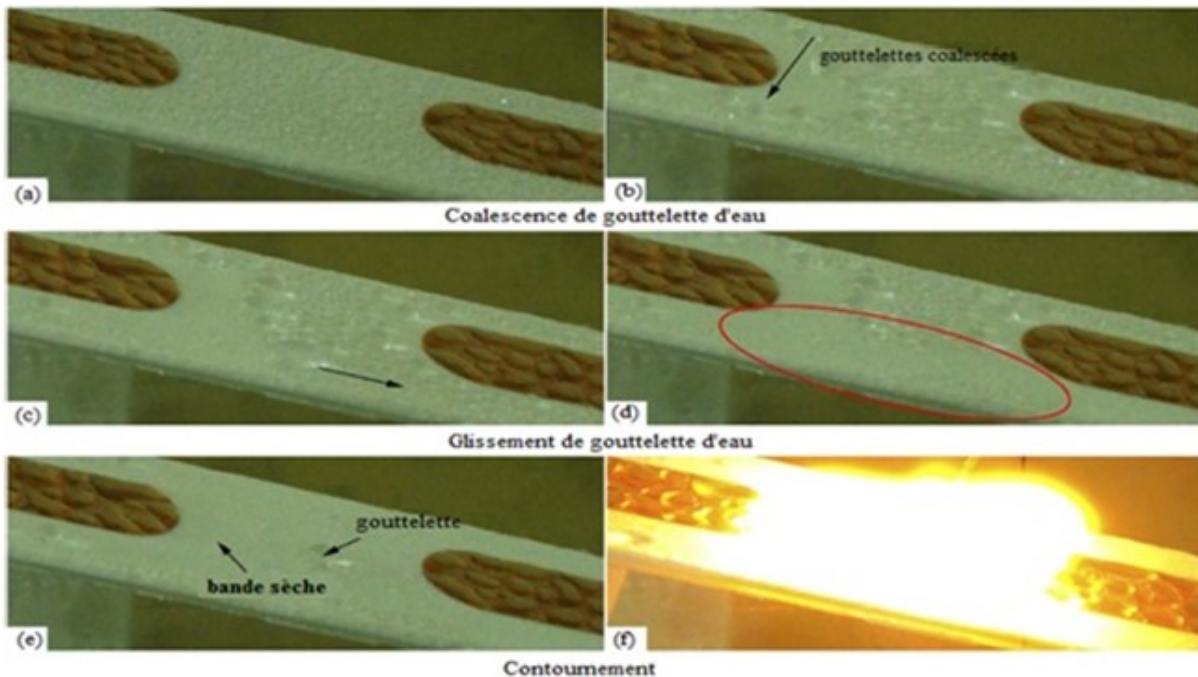


Fig. II. 4: Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe inclinée de 20° et recouverte de gouttes d'eau (**a**: Dépôt par pulvérisation de gouttes d'eau sur la surface hors tension, **b**: Mouvement et coalescence de quelques gouttes d'eau et formation de petites zones sèches, **c**: Poursuite de la coalescence des gouttes d'eau et augmentation de la surface de zones sèches, **d**: Formation d'une grande zone sèche (indiquée sur la figure par un cercle rouge), **e**: Poursuite de l'agrandissement de la zone sèche interélectrodes, diminution accrue du nombre de gouttelettes d'eau, **f**: Contournement de la surface isolante interélectrodes)

Sous brouillard salin, la tension d'amorçage augmente en fonction de la croissance de l'angle d'inclinaison de l'isolation (**Fig. II. 5a**). La tension de contournement de l'isolation superhydrophobe ne dépend pas du volume des gouttes d'eau déposées sur sa surface (**Fig. II. 5b**). Enfin l'auteur a démontré que la tension de contournement d'une surface superhydrophobe est supérieure à celle hydrophobe.

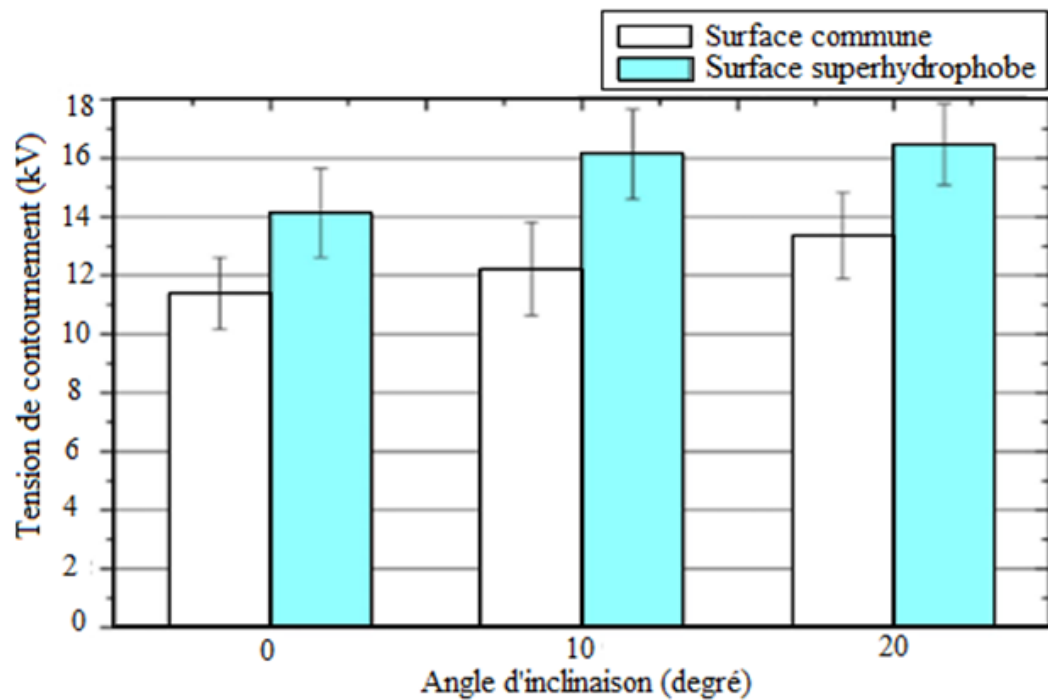


Fig. II. 5a: Tension de contournement de deux surfaces différentes en fonction de leur inclinaison

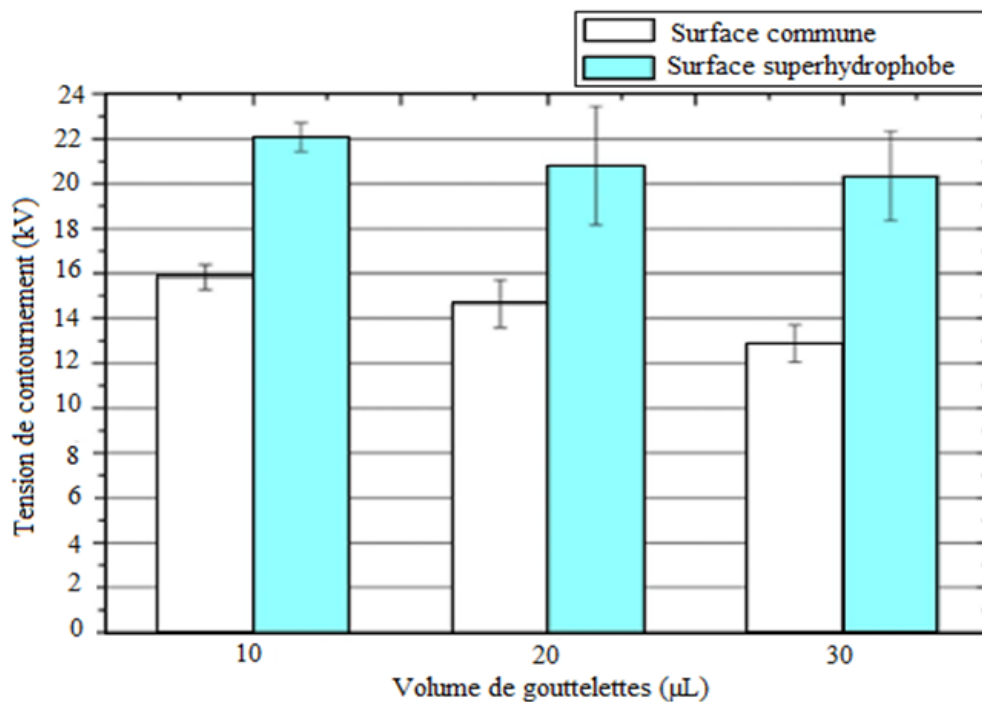


Fig. II. 5b: Tension de contournement de deux surfaces différentes en fonction du volume des gouttes d'eau les recouvrant

II. 11 Simulation de la pollution au laboratoire

Afin de déterminer le meilleur comportement des isolateurs sous pollution, on effectue des essais, pour deux méthodes: une sous pollution naturelle et l'autre sous pollution artificielle. Ces essais peuvent être effectués sur site dans les conditions naturelles ou au laboratoire [48].

II. 11. 1 Essai sous pollution naturelle

Dans ce type d'essai, on installe dans différents sites pollués, des stations dans le but de suivre le comportement d'une chaîne d'isolateurs. Comme la pollution naturelle est un phénomène à évolution lente, ses essais peuvent prendre beaucoup de temps ce qui est un inconvénient. La qualité des isolateurs est déterminée à partir de temps au contournement.

Ce type d'essais est nécessaire pour étudier les principales sources de pollution et leurs impacts sur l'isolement des ouvrages [48].

II. 11. 2 Essais sous pollution artificielle

Les essais au laboratoire consistent à reproduire les conditions de la pollution naturelle. Elles sont basées sur la transformation de la couche de pollution par des solutions réparties en surface isolante et dont la conductivité est différente. Ils sont aujourd'hui très utilisés et ont l'avantage d'être rapides. Les méthodes d'essais qui demeurent actuellement normalisées sont celle de la couche solide, du brouillard salin et la méthode de la pollution liquide [63].

II. 11. 2. 1 Méthode de la couche solide

La surface isolante est recouverte d'une couche de pollution solide constituée de chlorure de sodium et d'un agent liant inerte. On règle la conductivité de cette solution en ajoutant une certaine quantité de chlorure de sodium. Si l'humidification s'effectue après application de la tension (méthode du brouillard à vapeur), la sévérité est déterminée par la densité de dépôt de sel en mg/cm^2 . Par contre, si l'humidification se fait avant l'application de la tension, le paramètre de sévérité est défini par la conductivité de la couche polluante. Quelques chercheurs utilisent la couche semi-conductrice comme agent polluant [66].

II. 11. 2. 2 Méthode du brouillard salin

La solution saline utilisée dans la méthode du brouillard salin représente la pollution marine contenant une quantité de matière insoluble. L'isolateur dans cette méthode soumis à la tension d'essai est placé dans un brouillard salin avec un taux de salinité déterminant la sévérité. Les valeurs de salinités appliquées sont choisies selon la classification des sites pollués allant de 2.5 à 160 kg/m^3 [66].

II. 11. 2. 3 Méthode de pollution liquide

Cette méthode s'apparente à la méthode du brouillard propre dans la mesure où un mélange liquide est appliqué sur l'isolateur avant l'essai. Ce qui implique que la pollution n'est pas séchée avant l'essai. Elle contient de l'eau, de craie et de méthylcellulose ou de kaolin.

Le même principe que la méthode de la couche solide, la conductivité est ajustée par addition de chlorure de sodium. Comme la surface de l'isolateur n'est pas séchée, la tension d'essai peut être appliquée sans humidification supplémentaire [66].

II. 12 Techniques de lutte contre la pollution

Les techniques essentielles de lutte contre la pollution les plus utilisées sont résumées comme suit:

II. 12. 1 Allongement de la ligne de fuite

Cette méthode permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution (Fig. II. 6). Deux techniques sont utilisées :

- Le changement de type d'isolateur (pour rallonger la ligne de fuite) : c'est une technique très coûteuse et souvent impossible à réaliser en poste.
- L'utilisation de prolonger de ligne de fuite en matériaux polymères, qui sont collés sur la surface des isolateurs existants [67].



Fig. II. 6: Allongement de la ligne de fuite

II. 12. 2 Graissage périodique des isolateurs



Fig. II. 7: Graissage des surfaces isolantes

Par mesure économique, seuls les isolateurs de postes sont concernés. On utilise des graisses silicones (**Fig. II. 7**). Grâce à ses propriétés hydrophobes, la graisse protège temporairement les isolateurs [68].

La durée du graissage dépend à la fois de deux facteurs, l'environnement (pollution, conditions climatiques) et la qualité du produit utilisée. Elle est généralement d'une durée qui varie entre 1 et 4 ans. Le graissage est largement utilisé dans le monde, mais l'opération de nettoyage puis de graissage est difficile à réaliser, longue et coûteuse et nécessite une interruption de service [56].

II. 12. 3 Nettoyage de l'isolation

Le nettoyage manuel (hors tension), peut être périodique, en particulier dans les postes. Ces méthodes nécessitent des interruptions de service long puisqu'elles se font hors tension. Afin d'éviter ces coupures on utilise le lavage sous tension qui permet de garder l'isolateur propre (**Fig. II. 8**). Ce dernier est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. En appliquant des règles concernant la qualité de l'eau de lavage, et les distances de sécurité à respecter afin d'éliminer tout risque de contournement durant le lavage. Le nettoyage des isolateurs se fait à l'aide d'un abrasif pulvérisé sous pression. Cette technique est utilisée pour des pollutions très adhérentes (ciment) et la graisse sur les isolateurs [69].

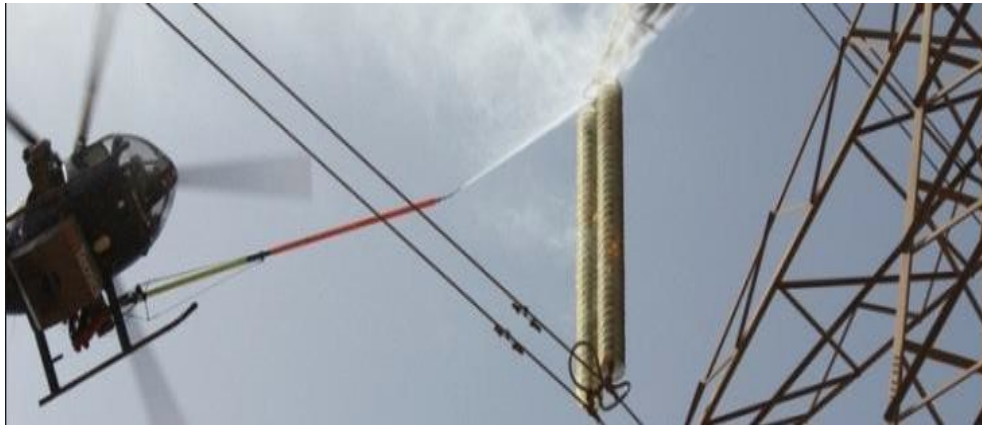


Fig. II. 8: Utilisation d'hélicoptère pour le lavage des isolateurs électriques

II. 12. 4 Utilisation des isolateurs plats



Fig. II. 9: Isolateur plat

Les isolateurs plats sont très utilisés car ils conduisent à la diminution de la ligne de fuite des isolateurs (**Fig. II. 9**). En effet, ces derniers sans nervures peuvent accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'auto-nettoient très bien sous l'effet du vent. Ils sont généralement utilisés dans les régions désertiques [57].

II. 12. 5 Revêtements à base de silicones

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou avec un pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à une température ambiante à la surface des isolateurs (**Fig. II. 10**). Le même principe que le graissage, grâce à ses propriétés hydrophobes, ce revêtement protège et améliore leur tenue sous pollution. Par contre sa longévité est, en général, nettement supérieure à celle du graissage [69].



Fig. II. 10: Revêtement silicone

II. 12. 6 Isolateurs composites

Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères (Fig. II. 11). Cependant, ces isolateurs, revêtus d'un polymère voient leurs caractéristiques changer au cours du temps ; ils peuvent vieillir sous l'effet des différentes contraintes (électriques et climatiques) auxquelles ils sont soumis en service [70].

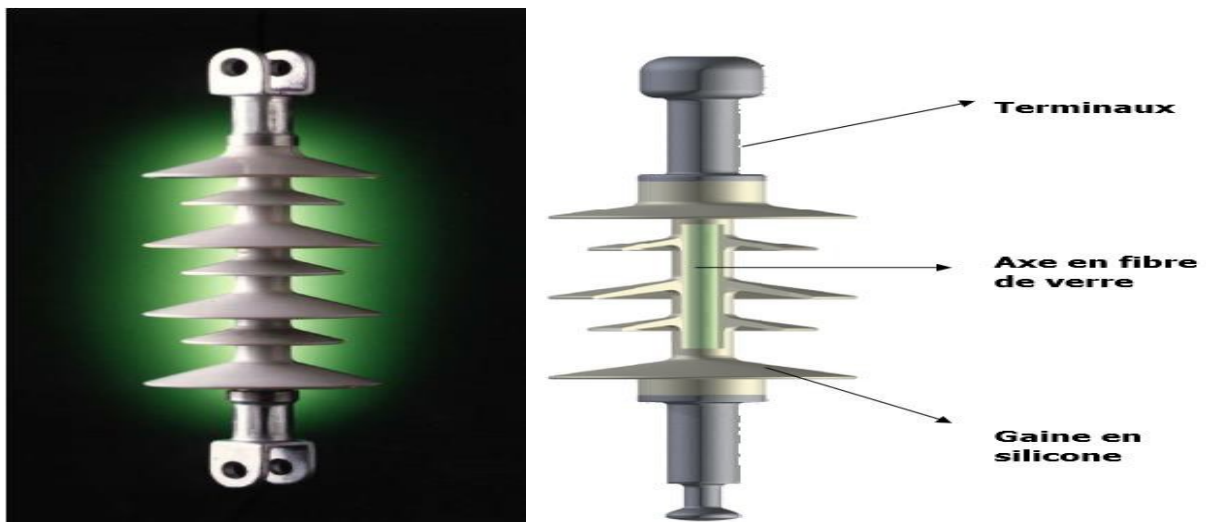


Fig. II. 11: Isolateurs composites

II. 13 Conclusion

La pollution des isolateurs est un facteur essentiel dont il faut tenir compte dans la conception des lignes électriques de haute tension. La connaissance de la source de pollution, son degré et les facteurs climatique sont nécessaires pour la détermination du bon emplacement d'un isolement dans une installation dans le but d'assurer la meilleure qualité et la fiabilité du transport d'énergie.

L'optimisation de l'isolement est importante pour minimiser les pertes occasionnées par le contournement. L'étape essentielle pour le dimensionnement d'une chaîne d'isolateur est la connaissance de la sévérité de la pollution des sites concernés, en effectuant une étude dans le but de déterminer les différents paramètres de la dégradation d'une isolation.

L'inconvénient de cette étude est sa temporisation qui peut durer trois ans au moins. Et pour cela la meilleure méthode est la technique d'essai sous pollution artificielle qui se base sur la reproduction des conditions de pollution naturelle au laboratoire, ainsi qu'elle possède l'avantage d'être rapide.

Les techniques de lutte contre la pollution utilisées (graissage, lavage, revêtements hydrophobes...), permettent de disposer aujourd'hui des solutions curatives à la plupart des problèmes de pollution rencontrés par les exploitants sur le terrain.

La performance électrique d'une isolation dans un milieu pollué et humidifié varie en fonction de l'état de surface de l'isolation. Elle croit en passant d'une surface hydrophile à hydrophobe puis superhydrophobe.

Chapitre III

Simulation du champ et potentiel
électrique

III. 1 Introduction

Les résultats des travaux expérimentaux antérieurs, se rapportant au mouvement électrohydrodynamique d'un ensemble de gouttes d'eau, reposant sur la surface d'une isolation à base de suie superhydrophobe et mise sous tension alternative, ont mis en évidence un mode d'évacuation groupo-individuelle et bidirectionnelle des gouttes d'eau quels que soient le type d'arrangement, le volume et la conductivité électrique des gouttes d'eau ainsi que le degré de couverture de l'isolation. Concernant la direction de leur évacuation, celles se trouvant dans la zone avoisinant l'électrode haute tension transitent par celle-ci et celles déposées dans la zone proche de l'électrode terre transitent par cette dernière. Celles de la rangée du milieu de l'isolation, se répartissent de telle sorte que le nombre de gouttes d'eau transitant par l'électrode HT est légèrement supérieur à celui des gouttes passant par l'électrode T.

Justement, l'objectif visé à travers ce présent chapitre consiste en la prédiction du sens du mouvement de ces gouttes d'eau au moyen de la distribution de l'intensité du champ et potentiel électrique alternatif résultant au niveau de celles-ci à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics version 5.0. Lors de cette étude de simulation, les paramètres d'influence du champ et potentiel électrique, comme le volume des gouttes d'eau, le nombre de couches superhydrophobes de revêtement en suie de l'isolation, la permittivité du couvert diélectrique du matériau essayé ainsi que le niveau de tension alternative appliquée à l'isolation ont été pris en considération.

III. 2 Confection et caractérisation d'une isolation multicouches superhydrophobes

La première couche de revêtement 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. III. 1a**). 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. III. 1b**). En dernier lieu, la plaque en verre, de dimensions 120 mm x 50 mm x 5 mm, est approchée de la flamme pour la recouvrir de suie émanant de la carbonisation de la silicone (**Fig. III. 1b**). La figure **III. 1c** montre la plaque totalement noircie et nettoyée à l'eau du robinet. Les couches suivantes sont apportées de la même façon que la première mais à des intervalles de temps dont la durée est de l'ordre de 24 heures. Le nombre de couches est varié entre 1 et 4. Leur structure est illustrée par la figure **III. 2**. Ces images ont été obtenues à l'aide d'un profilomètre (**Fig. III. 3**). Il est à remarquer

une augmentation légère de l'uniformisation de la même couleur (par exemple: couleur orange) avec la croissance du nombre de couches, en d'autres termes les sommets des aspérités de l'isolation superhydrophobes s'érigent pratiquement au même niveau au dessus de l'isolation (Fig. III. 2b).

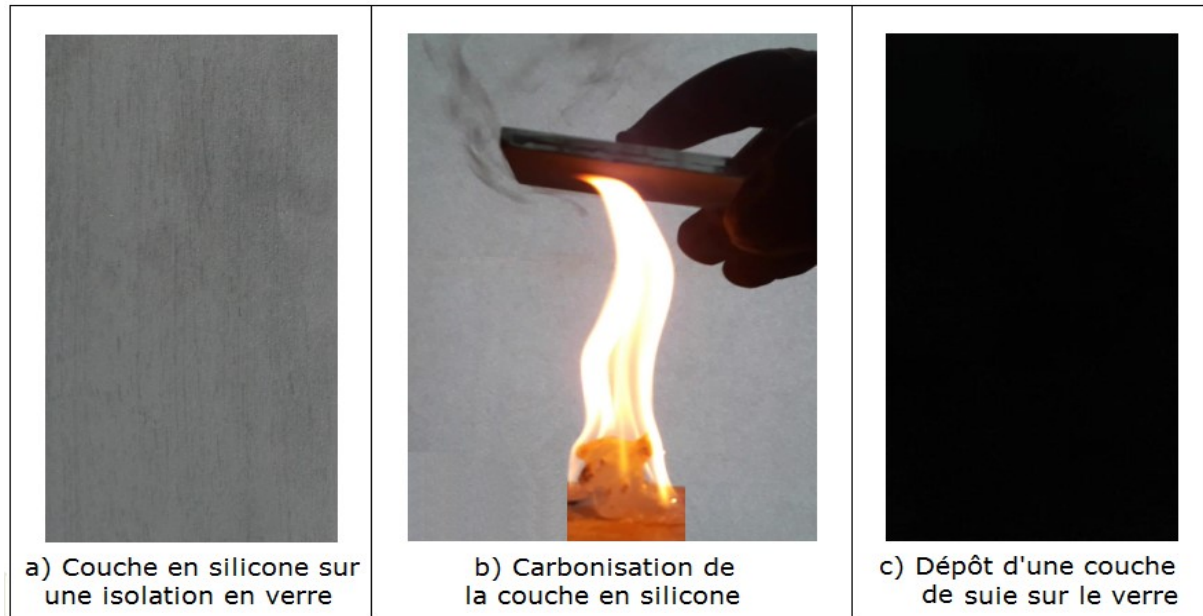


Fig. III. 1: Etapes de confection d'une isolation à multicouches superhydrophobes

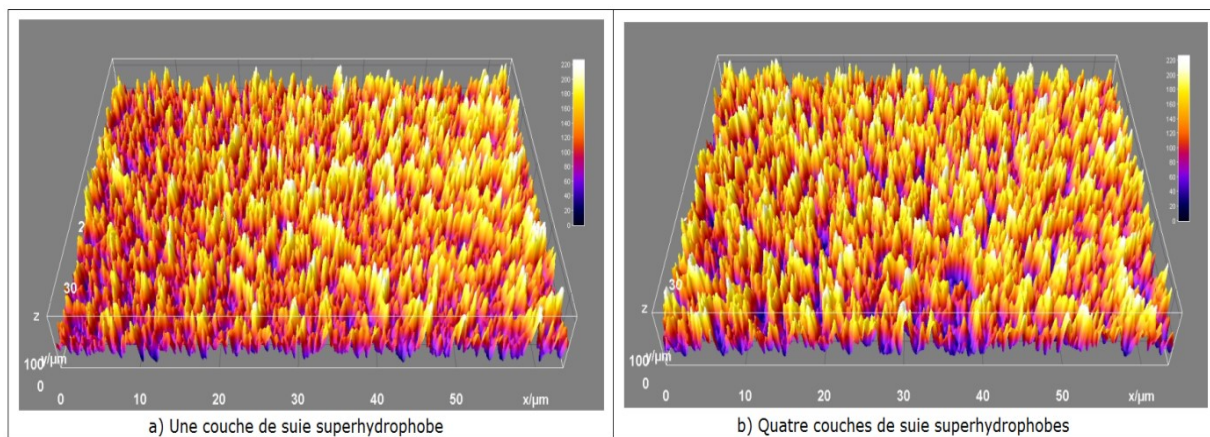


Fig. III. 2: Profil de l'isolation à une et quatre couches de suie superhydrophobes

La mesure de l'angle de contact a été faite au laboratoire de très haute tension de Zittau (Allemagne) à l'aide d'un goniomètre. La valeur de l'angle de contact statique d'une goutte d'eau est de l'ordre de 160° . Elle est pratiquement identique pour deux volumes ($V_d = 5$ et $10 \mu\text{l}$) et quel que soit le nombre de couches de suie superhydrophobes n_c variant de 1 à 4 (Figs. III. 4 et III. 5). Par contre la figure III. 6, montre que pour une même quantité de carbone

(C), celle en oxygène (O) et silicium (Si) est légèrement inférieure dans le cas d'une couche de suie (Fig. III. 6a) que dans le cas de 4 couches (Fig. III. 6b).



Fig. III. 3: Photo d'un profilomètre du laboratoire de HT de Zittau (Allemagne)

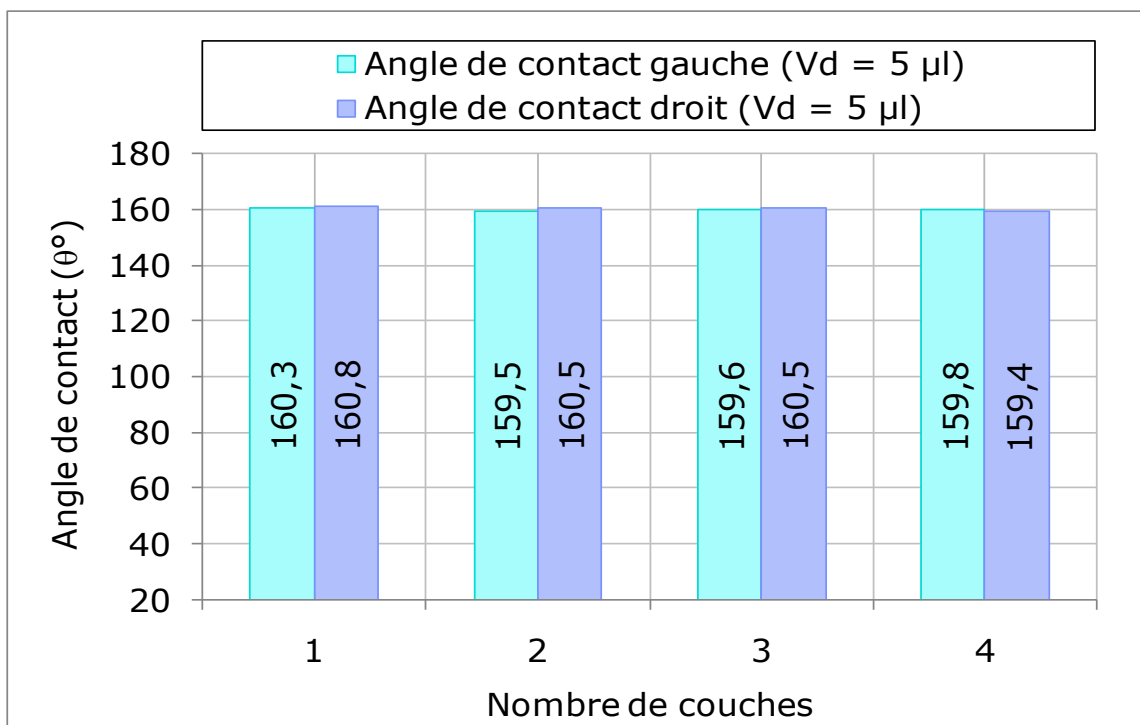


Fig. III. 4: $\theta = f(n_c)$ pour un volume de la goutte d'eau égal à 5 μl

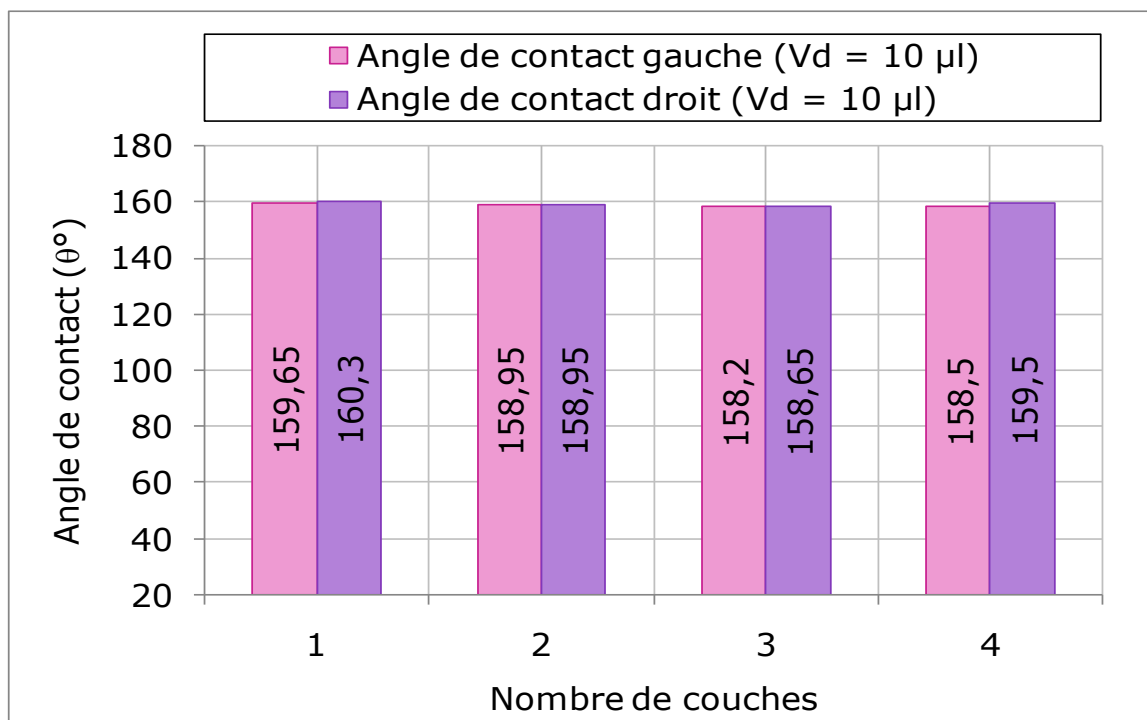


Fig. III. 5: $\theta = f(n_c)$ pour un volume de la goutte d'eau égal à 10 μl

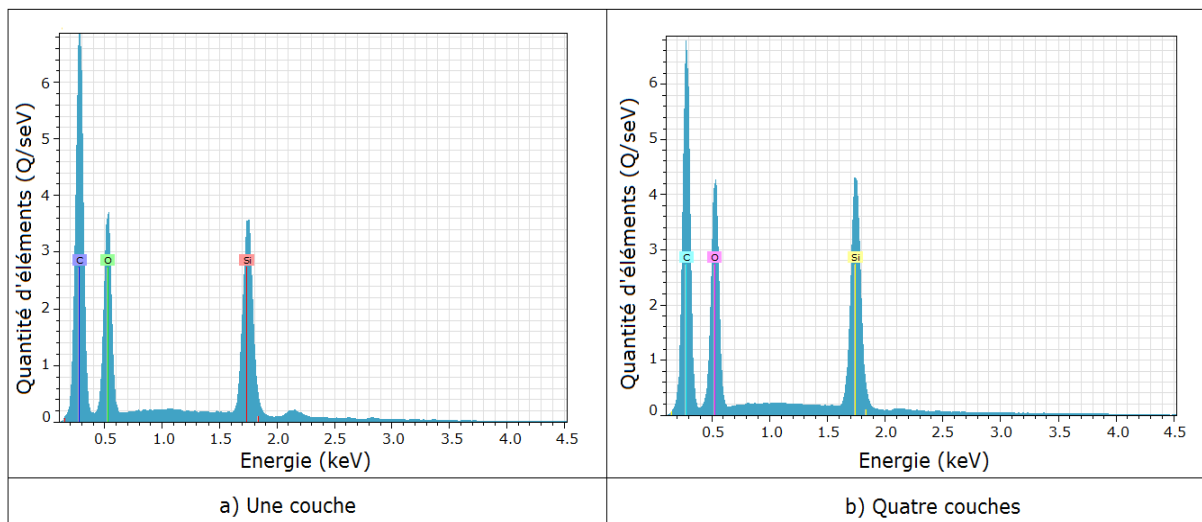


Fig. III. 6: Composition chimique de l'isolation superhydrophobe à base de suie

Les électrodes confectionnées lors des travaux antérieurs [39], sont en acier inoxydable, de forme parallélépipédique et très arrondies à leurs extrémités. Leurs caractéristiques sont illustrées par la figure III. 7a. Leur largeur (l_e) est de 30 mm, leur épaisseur (e_e) est égale à 8 mm et leur longueur (L_e) de 120 mm. Elles sont suspendues à 10 mm de la surface de l'isolation superhydrophobe à l'aide de deux pitons. La taille de cet interstice est choisie de telle sorte à faciliter l'évacuation des gouttes d'eau volumineuses de la surface de l'isolation

et leur récupération par le bac en couleur verte et leur réutilisation. La ligne de fuite de l'isolation (L_c) délimitée par ces électrodes est de 4 cm. Lors de notre étude, les paramètres variables d'influence du champ et potentiel électrique, comme le degré de couverture de l'isolation (sans couvert - **Fig. III. 7b**) ou avec couverture diélectrique à permittivité ϵ_r variable (**Fig. III. 7c**), le nombre de couches superhydrophobes de revêtement en suite de l'isolation ou son épaisseur e_i (**Figs. III. 7b et III. 7c**), le volume des gouttes d'eau (**Figs. III. 7d et III. 7e**) ainsi que le niveau de tension alternative appliquée à l'isolation ont été pris en considération.

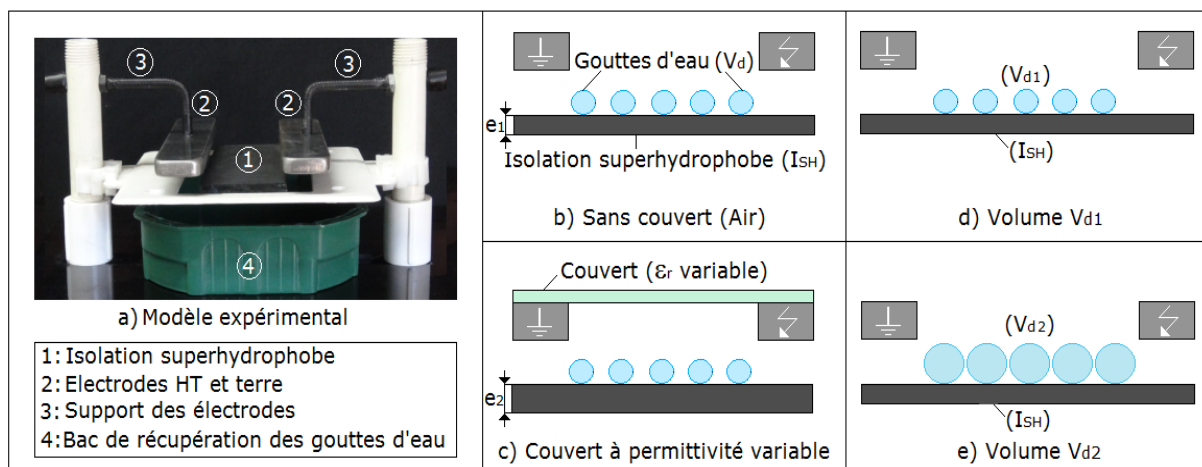


Fig. III. 7: Modèle expérimental et de simulation

III. 3 Logiciel de simulation du champ et potentiel électrique

Tab. III. 1: Propriétés physiques des matériaux utilisés dans le logiciel

Matériau	Permittivité relative	Conductivité électrique (S/m)
Air	1	10^{-14}
Cuivre	1	5.99×10^7
Verre	5,5	10^{-14}
Couche superhydrophobique	2,8	10^{-12}
Eau	81	20×10^{-6} à 20×10^{-3}
Couvert diélectrique	2.8 à 160	variable

La technique de modélisation et de simulation utilisée dans le cadre de cette étude repose sur la méthode des éléments finis au moyen du logiciel COMSOL Multiphysics. Le modèle géométrique utilisé est basé sur le modèle expérimental (**Fig. III. 7a**) étudié précédemment en référence [39]. La figure **III.7 (b, c, d et e)** présente le modèle de simulation. Celui-ci est

conçu sous la forme d'un modèle simplifié de surface en verre avec face supérieure superhydrophobe. Deux électrodes planes sont placées aux deux extrémités de la surface isolante, de manière à obtenir un champ E homogène dans l'air. La distance séparant les deux électrodes est prise égale à 4 ou 10 cm. La surface du verre a pour dimensions $(16 \times 0,5) \text{ cm}^2$, celles de la couche superhydrophobe: $(16 \times 0,01) \text{ cm}^2$ et celles du couvert isolant sont: $(16 \times 0,5) \text{ cm}^2$. Celles des électrodes planes sont : $(3 \times 1,2) \text{ cm}^2$, elles sont suspendues à 1 cm au-dessus de la surface isolante superhydrophobe. Les propriétés physiques des matériaux utilisés dans ce modèle sont résumées dans le tableau **III. 1**.

III.4 Paramètres d'influence du champ et potentiel électrique

III.4.1 Nombre de gouttes d'eau, permittivité du couvert de l'isolation et nombre de couches superhydrophobes de celle-ci

Selon les résultats des travaux expérimentaux publiés récemment par K. Hamour et all [1] Les forces hydrodynamiques et électriques engendrant l'évacuation des gouttes d'eau à l'extérieur de l'isolation, sont caractérisées par l'équation de Navier-Stockes. Cette dernière est basée sur la conservation des forces de mouvement par modélisation du déplacement d'une incompressible goutte d'eau selon la formule suivante:

$$-\nabla P_{\Delta} + \mu \nabla^2 \vec{V} + \vec{F} = d \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right) \quad (\text{III. 1})$$

Où :

- d , V et μ caractérisent respectivement la densité du fluide, sa vitesse et sa viscosité;
- Les trois termes: ∇P_{Δ} , $\mu \nabla^2 \vec{V}$ et \vec{F} représentent respectivement les effets de forces dues respectivement à la pression, la viscosité et la force électrostatique exercées sur la goutte;
- Le membre droit de l'égalité **III. 1** désigne l'accélération de la goutte sous l'action des trois forces suscitées.

Pour la fréquence $f = 50 \text{ Hz}$, la goutte garde sa forme sphérique pendant son mouvement [2 - 71] et pratiquement la surface de l'isolation est superhydrophobe (Figs. **III. 4** et **III. 5**), la force électrostatique \vec{F} joue un rôle très prédominant sur le mouvement de la goutte sur la surface superhydrophobe de l'isolation [71, 72 et 73].

Pour une goutte individuelle, reposant sur cette surface et mise sous l'action d'un champ électrique non nul, l'expression de cette force électrique est de la forme [74]:

$$F = \rho_t E - \frac{1}{2} |E|^2 \nabla \varepsilon + \frac{1}{2} \nabla \left(|E|^2 \frac{d\varepsilon}{d\rho_m} \rho_m \right) \quad (\text{III. 2})$$

Où:

E , ρ_t , ε et ρ_m représentent respectivement le champ électrique, la charge totale, la permittivité absolue de l'eau et la densité volumique.

Les trois termes du membre droit de l'équation III. 2 représentent respectivement la force de Coulomb, la force diélectrophorétique et la pression d'électrostriction.

Dans le cadre de cette investigation, les deux derniers termes sont négligés à cause de l'uniformité du champ électrique régnant entre les d'électrodes planes et parallèles ainsi que la conservation de la forme sphérique de la goutte d'eau lors de son éviction de l'isolation. Donc, l'éjection d'une goutte d'eau individuelle de l'isolation est provoquée pratiquement par la force de Coulomb.

Dans le cas de plusieurs rangées de gouttes d'eau (Fig. III. 8a), l'expulsion de l'une d'elles, d'une rangée parallèle aux électrodes et très proche de celles-ci est régie par la résultante des forces de Coulomb, d'attraction mutuelles entre les gouttes d'une rangée perpendiculaire aux électrodes et de répulsion des gouttes d'eau d'une rangée parallèle à celles-ci [75]. Comme les gouttes d'eau d'une rangée quelconque se déplacent parallèlement à la direction du champ appliqué, donc les forces de répulsion sont considérées négligeables dans ce cas. Par conséquent, une goutte d'eau d'une rangée, située entre le milieu de l'isolation et l'une des deux électrodes HT et T, est expulsée selon la résultante des forces de coulomb et d'attraction mutuelle entre les gouttes d'eau dans le cas de deux rangées (Fig. III. 8a) et d'une seule rangée (Fig. III. 8b) en transitant par les électrodes correspondantes.

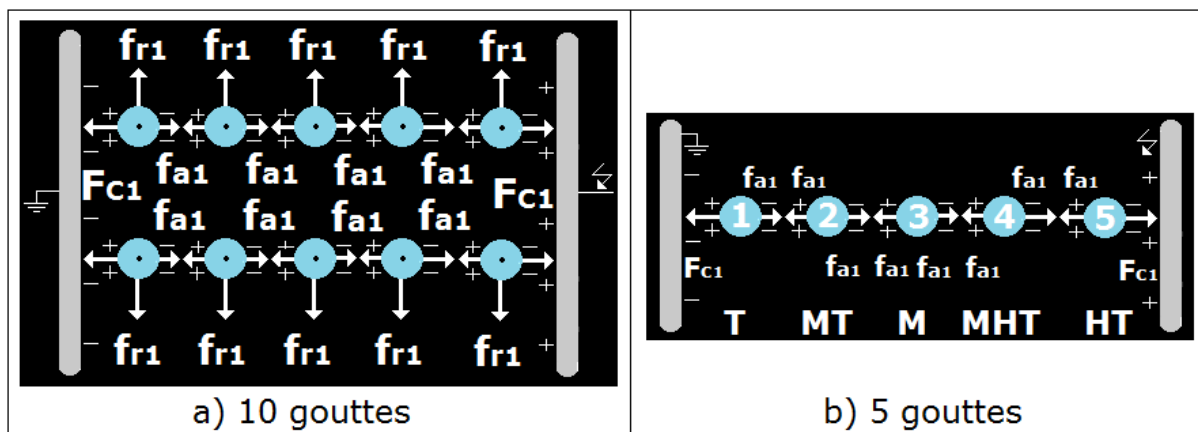


Fig. III. 8: Ensemble des forces électriques exercées sur un dépôt de 10 ou 5 gouttes d'eau sous alternance positive de la tension alternative et sous arrangement en lignes droites (A_d) (F_{ci} : Force de Coulomb, F_{ai} : Force d'attraction mutuelle, F_{ri} : Force de répulsion mutuelle)

Dans le cadre de ce travail, le nombre maximal de gouttes d'eau déposées sur l'isolation superhydrophobe horizontale est égal à 5. Ces gouttes d'eau sont disposées en ligne droite

perpendiculaire aux électrodes haute tension (HT) et terre (T). Cette rangée est placée au milieu de la surface de l'isolation superhydrophobe (**Fig. III. 8b**). La goutte 1 est posée au voisinage de l'électrode terre (T), la deuxième (MT) entre le milieu de l'isolation (M) et la terre, la troisième au milieu de l'isolation, la quatrième (MHT) entre le milieu de l'isolation et l'électrode haute tension et enfin la cinquième (HT) au voisinage de l'électrode sous tension.

Dans cette étude, nous allons essayer de prédire l'ordre et le sens du mouvement des cinq gouttes d'eau au moyen de la distribution du champ électrique résultant le long de celles-ci. Les résultats de simulation de la répartition du potentiel et du champ électrique sur un nombre de gouttes d'eau variable recouvrant une isolation à 1 ou 4 couches de revêtement en suie superhydrophobe sans ou avec couvert à permittivité variable sont résumés en figures **III. 9** à **III. 16**. La tension appliquée à l'isolation est de 25 kV. Il résulte des figures **III. 9** et **III. 10**, une amplification de l'intensité du champ électrique avec l'augmentation du nombre de gouttes d'eau de 1 à 5, indépendamment du degré de couverture diélectrique de l'isolation. Cependant le champ électrique résultant est plus élevé dans le cas d'une isolation avec couvert que sans celui-ci quel que soit le nombre de gouttes d'eau considéré. Pour un nombre de gouttes bien déterminé, par exemple 5 gouttes, nous pouvons prédire qualitativement le sens et l'ordre d'évacuation des 5 gouttes d'eau selon l'intensité du champ électrique résultant et illustré respectivement par les figures **III. 9b5** et **III. 10b5**. Par exemple, selon la figure **III. 9b5**, on obtient la série suivante: $G_1(T)$; $G_5(HT)$; $G_4(MHT)$; $G_2(MT)$ et $G_3(M)$. Cette séquence d'évacuation sous-entend que la goutte G_1 , qui génère un champ d'intensité plus élevée, part en premier lieu et se dirige vers l'électrode terre (T). Ensuite, vient le tour de la goutte G_5 dont l'intensité du champ électrique est légèrement inférieure à celle de G_1 , mais largement supérieure à celle des autres, part donc en direction de l'électrode haute tension (HT). Selon la valeur de l'intensité du champ résultant la goutte G_4 ($E_4 = 5$ kV/cm) est classée troisième, donc c'est elle qui sortira à l'extérieur du dispositif en passant par l'électrode HT. Celle-ci sera suivie par l'évacuation de la goutte G_2 via l'électrode terre. Enfin, la goutte G_3 sort en dernier lieu en transitant par l'électrode haute tension. Nous constatons l'apparition d'une séquence de mouvement similaire ($G_1(T)$; $G_5(HT)$; $G_4(MHT)$; $G_2(M)$ et $G_3(MT)$) pour une isolation superhydrophobe avec couverture (**Fig. III. 10b5**). Il découle de ce fait que nos résultats de simulation avec le logiciel COMSOL Version 5.0 du mouvement des gouttes d'eau, sont conformes à ceux établis expérimentalement dans les cas de 25 gouttes ou 5 gouttes disposées perpendiculairement ou parallèlement aux électrodes [46] indépendamment de la présence ou de l'absence de couvert de l'isolation (**Fig. III. 11**).

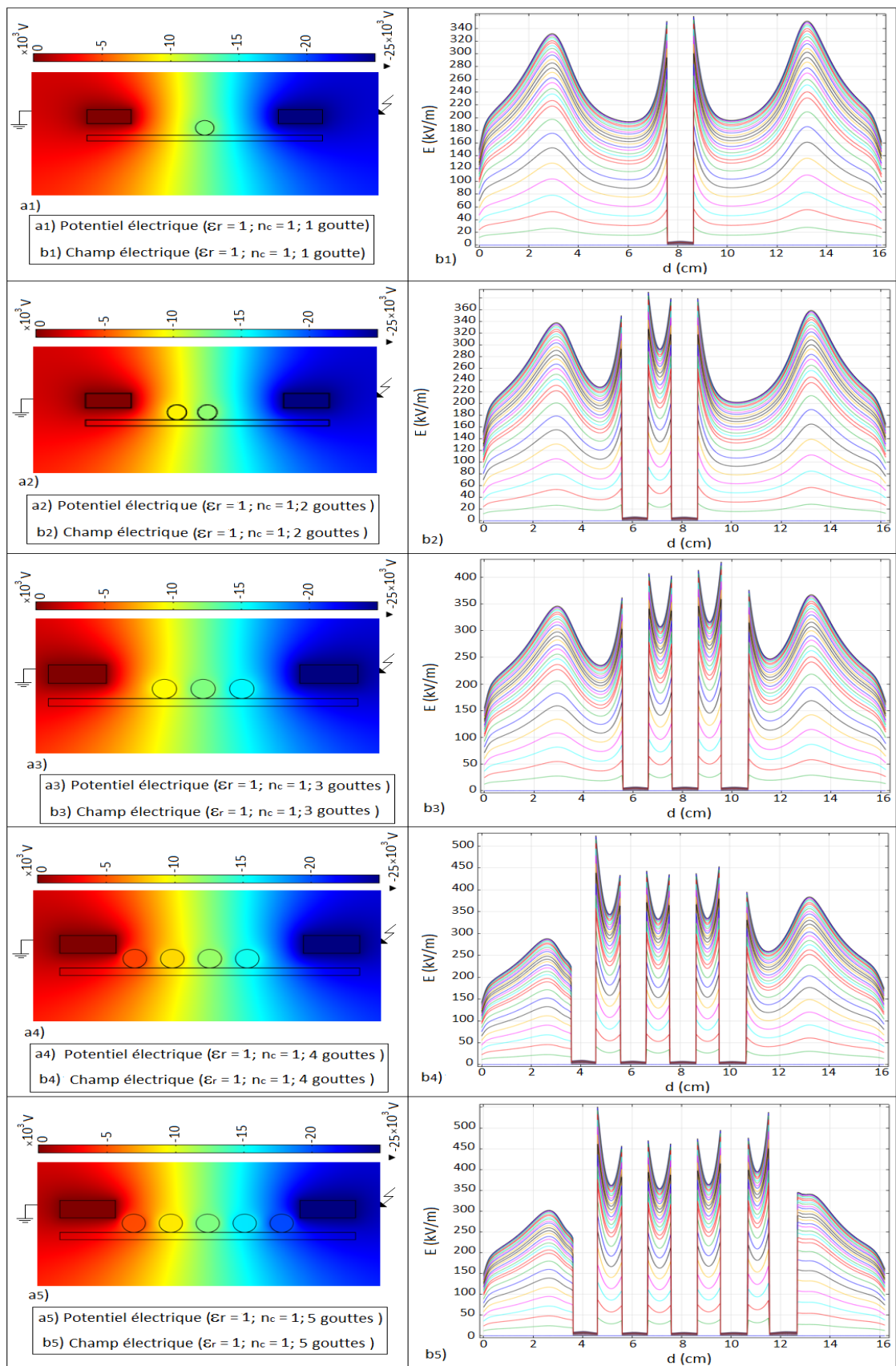


Fig. III. 9: Répartition du potentiel et champ électrique sur un nombre variable de gouttes déposées sur une isolation sans couvert ($n_c = 1$; $\sigma_v = 5,5 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)

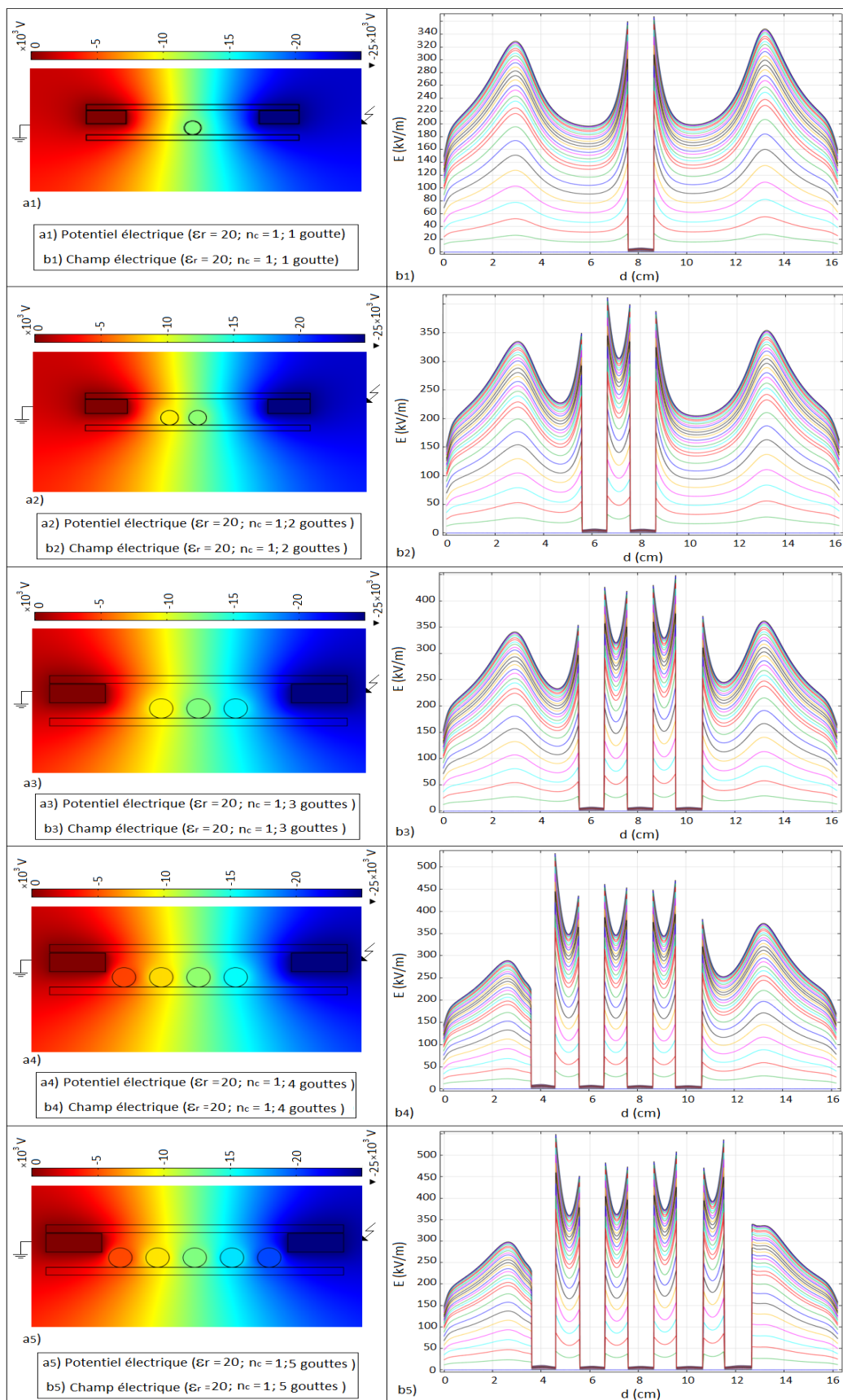


Fig. III. 10: Distribution du potentiel et champ électrique en fonction du nombre de gouttes d'eau d'une isolation avec couvert ($n_c = 1$; $\epsilon_r = 20$; $\sigma_v = 5,5 \mu\text{S}/\text{cm}$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)

Il ressort de la caractéristique $E_r = f(n_c)$, que l'intensité du champ électrique résultant (E_r) d'une isolation à 4 couches de suie superhydrophobe (Fig. III. 12) est légèrement supérieure à celle du champ résultant d'une isolation à une seule couche (Fig. III. 9) quel que soit le nombre de gouttes déposées sur la surface de l'isolation.

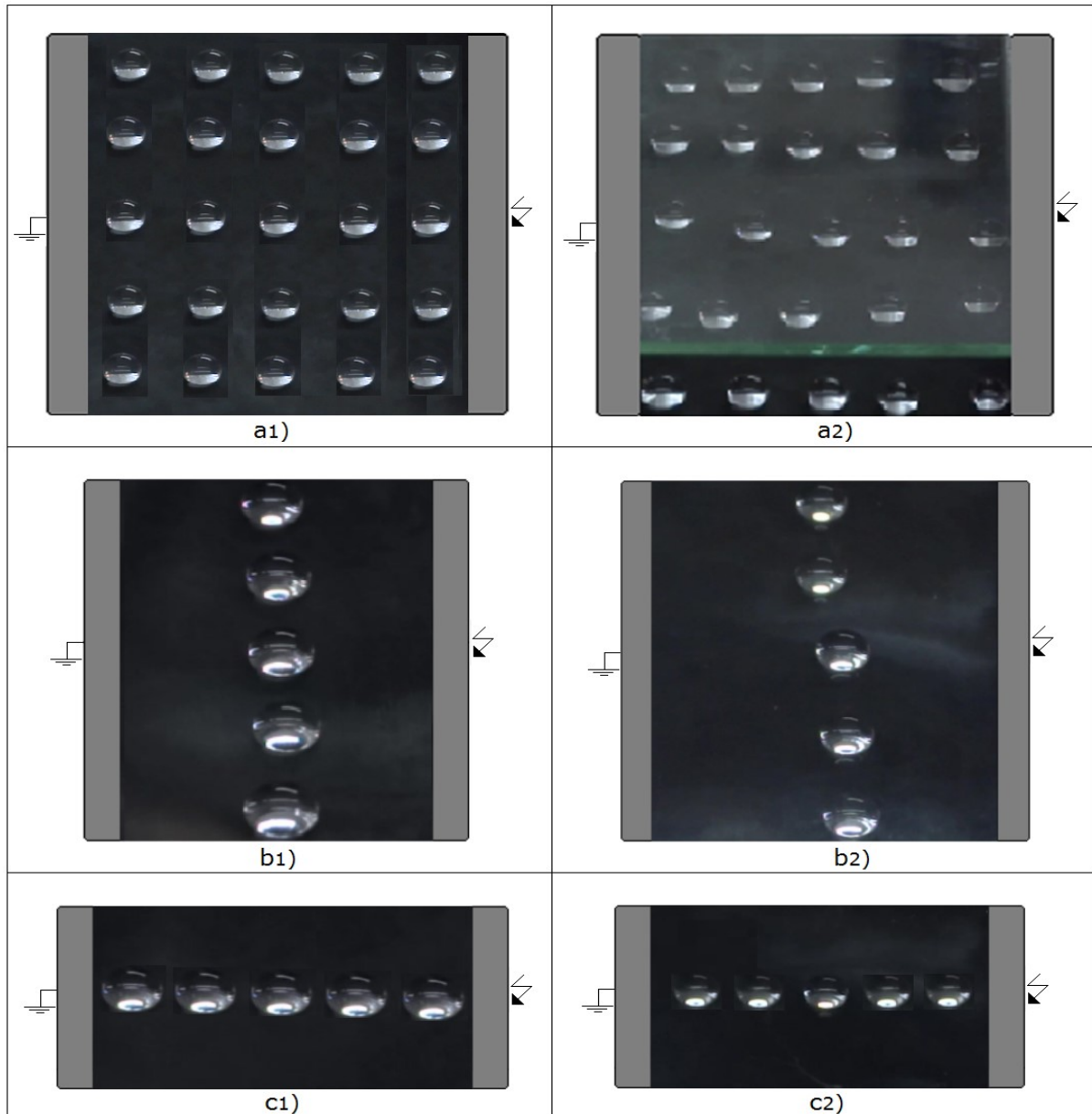


Fig. III. 11: Arrangement d'une multitude de gouttes d'eau sur une surface isolante superhydrophobe sous tension alternative avec ou sans couverture diélectrique

a1: Arrangement de 25 gouttes d'eau en lignes droites sans couvert;

a2: Arrangement de 25 gouttes d'eau en lignes droites avec couvert;

b1: Arrangement de 5 gouttes d'eau en lignes droites sans couvert parallèles aux électrodes;

b2: Arrangement de 5 gouttes d'eau en lignes droites avec couvert parallèles aux électrodes;

c1: Arrangement de 5 gouttes en lignes droites sans couvert perpendiculaires aux électrodes;

c2: Arrangement de 5 gouttes en lignes droites avec couvert perpendiculaires aux électrodes

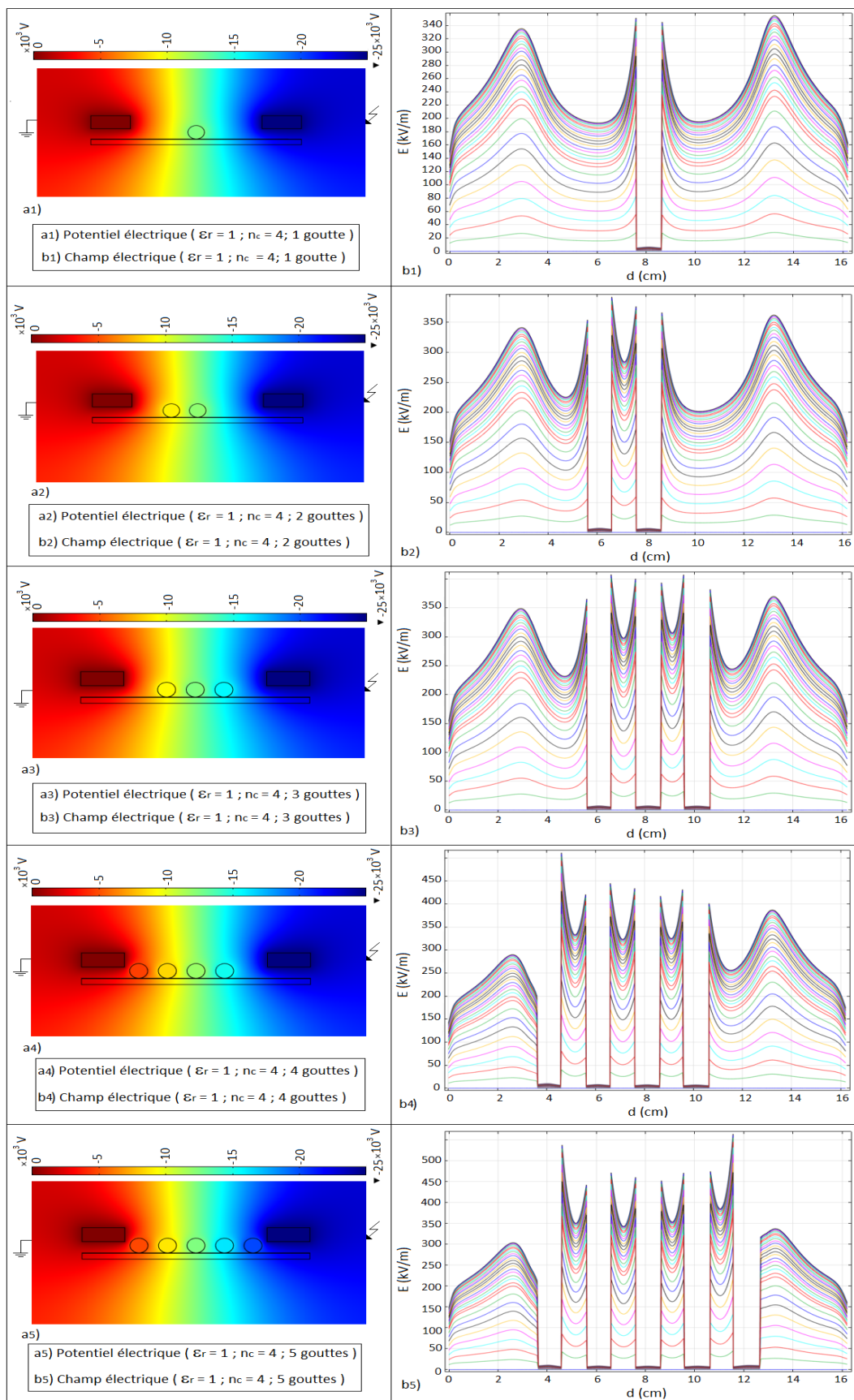


Fig. III. 12: Répartition du potentiel et champ électrique sur un nombre variable de gouttes d'eau d'une isolation sans couvert ($n_c = 4$; $\epsilon_r = 20$; $\sigma_v = 5,5 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)

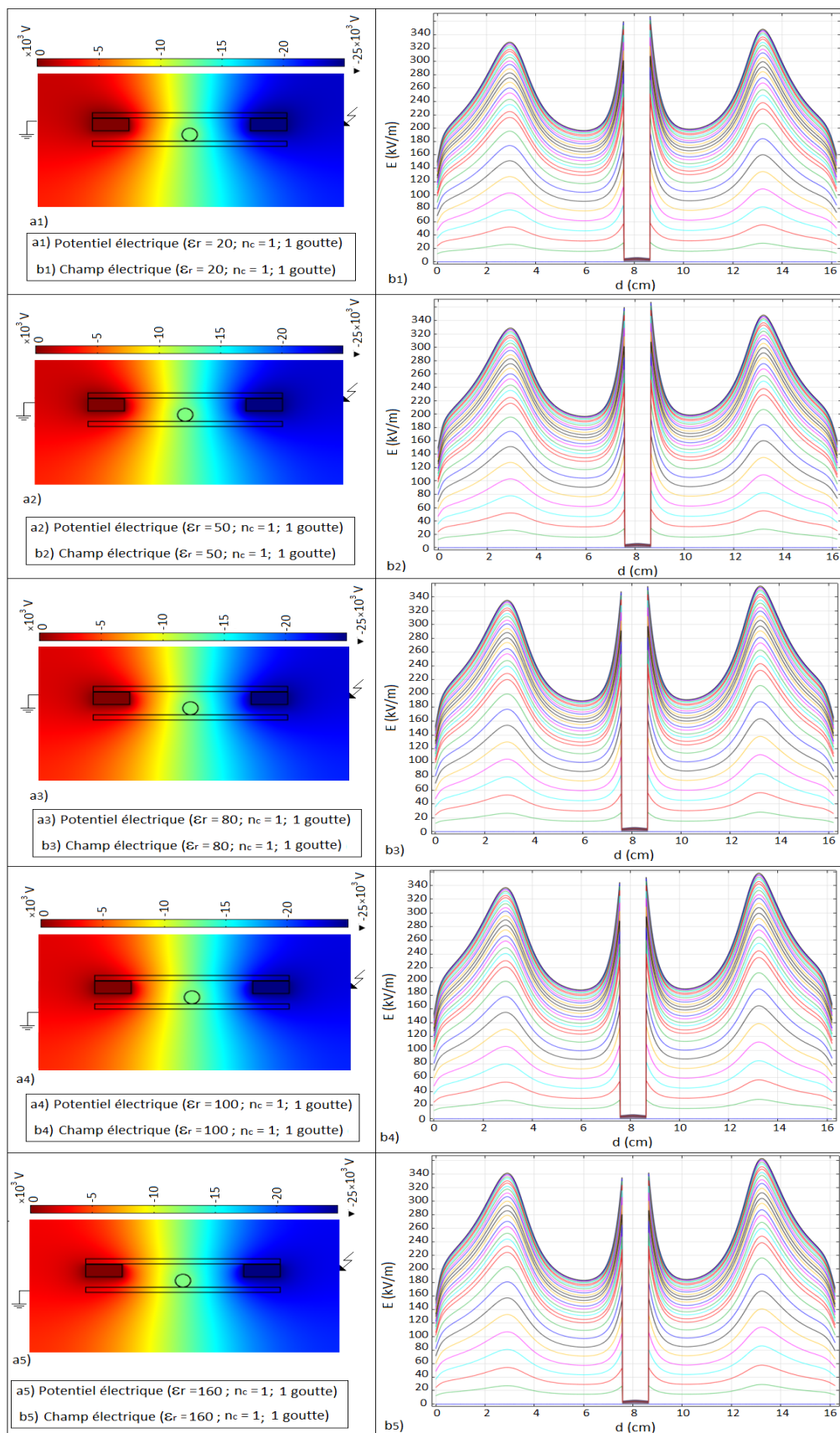


Fig. III. 13: Distribution du potentiel et champ électrique sur 1 goutte d'eau d'une isolation avec couvert à permittivité variable ($n_c = 1$; $\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100\mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)

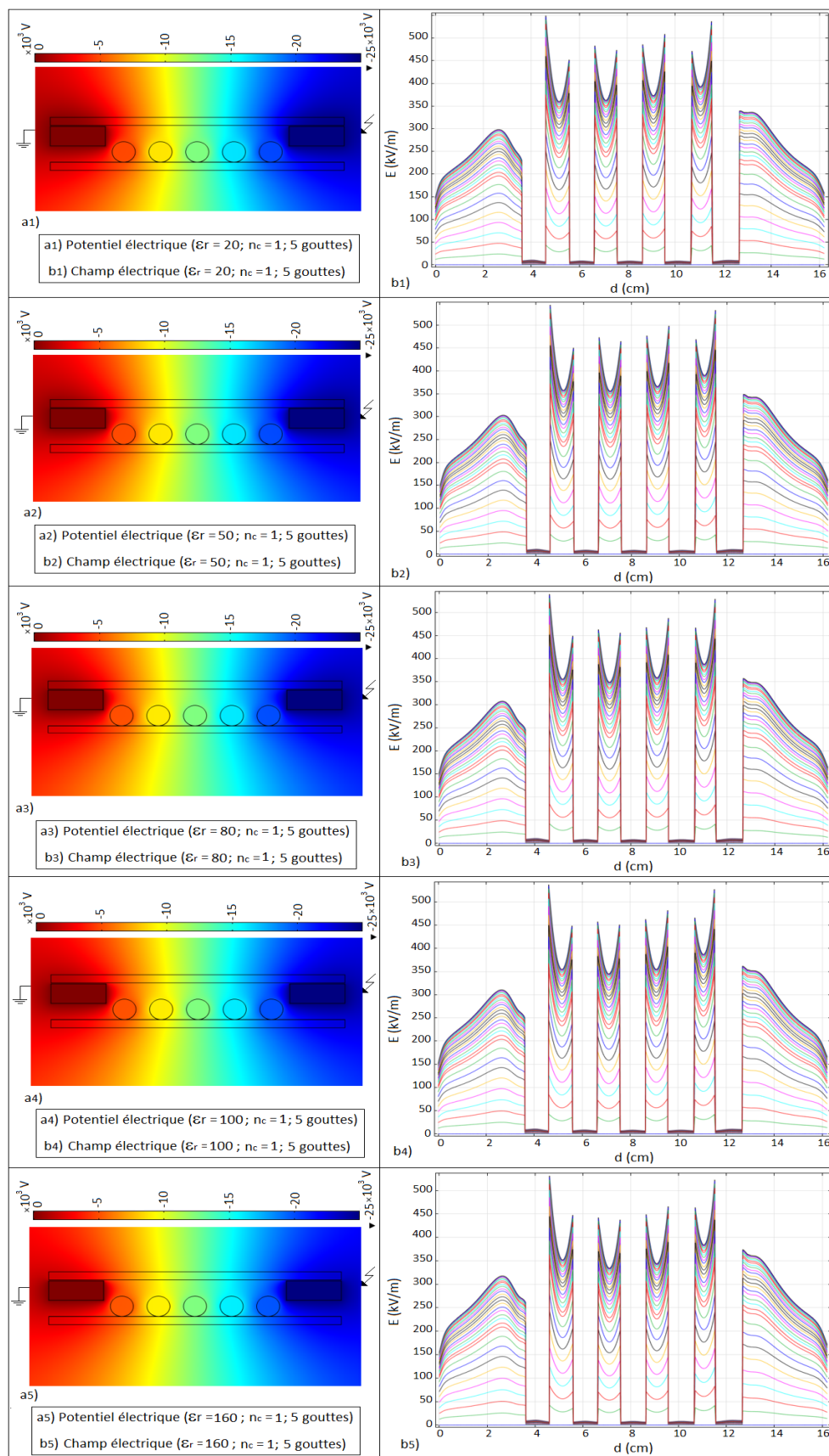


Fig. III. 14: Répartition du potentiel et champ électrique sur 5 gouttes d'eau d'une isolation avec couvert à permittivité variable ($n_c = 1$; $\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)

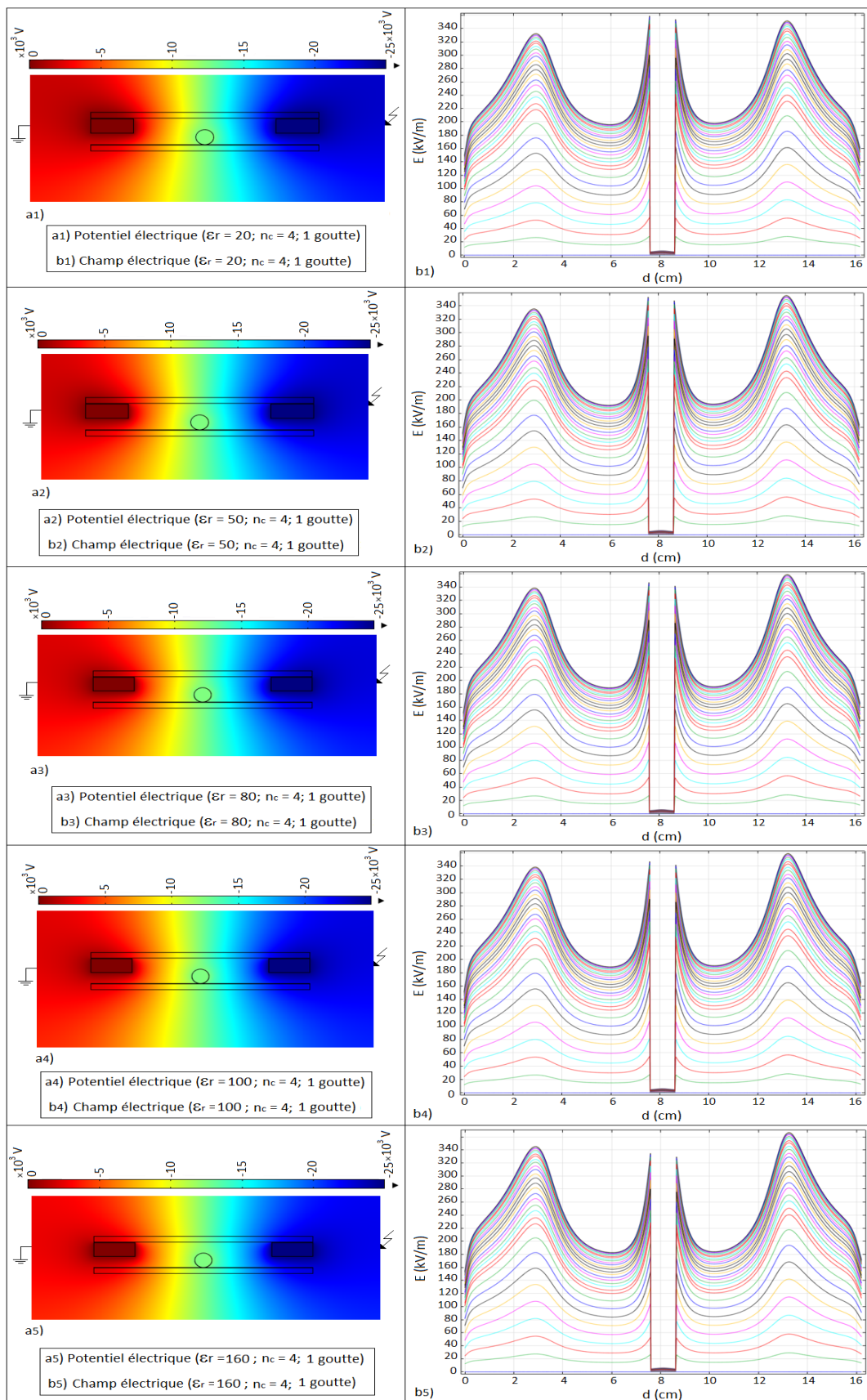


Fig. III. 15: Distribution du potentiel et champ électrique sur une goutte d'eau d'une isolation avec couvert à permittivité variable ($n_c = 4$; $\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)

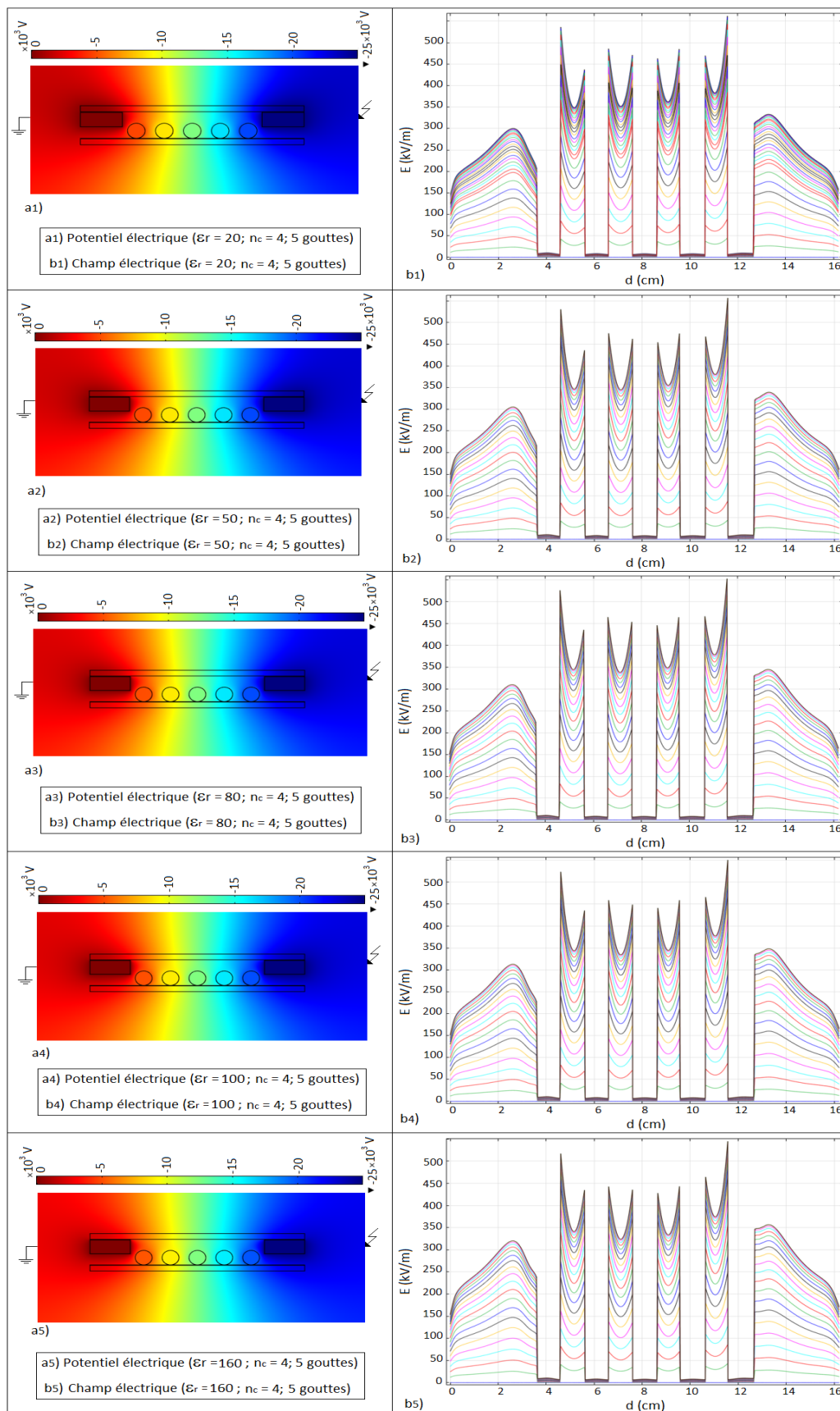


Fig. III. 16: Répartition du potentiel et champ électrique sur 5 gouttes d'eau d'une isolation avec couvert à permittivité variable ($n_c = 4$; $\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)

Les figures III. 13, III. 14, III. 15 et III. 16 montrent l'évolution de l'intensité du champ et potentiel électrique résultant en fonction de la permittivité relative ϵ_r du couvert diélectrique pour une et cinq gouttes d'eau et pour une et quatre couches de suie superhydrophobe. Il en résulte un déclin très léger de l'intensité du champ électrique résultant avec l'élévation de la permittivité relative du couvert et du nombre de couches de suie superhydrophobe indépendamment du nombre de gouttes recouvrant l'isolation considérée. Il est à remarquer la similitude de l'effet du nombre de gouttes d'eau sur le champ et le potentiel électrique résultant dans ces figures que ce qui a été signalé précédemment. Ainsi l'effet du nombre de couches de suie superhydrophobe sur la qualité de la rugosité de la surface de l'isolation s'avère en conformité avec les résultats de notre simulation [42].

III. 4. 2 Volume des gouttes d'eau reposant sur l'isolation superhydrophobe sans couvert

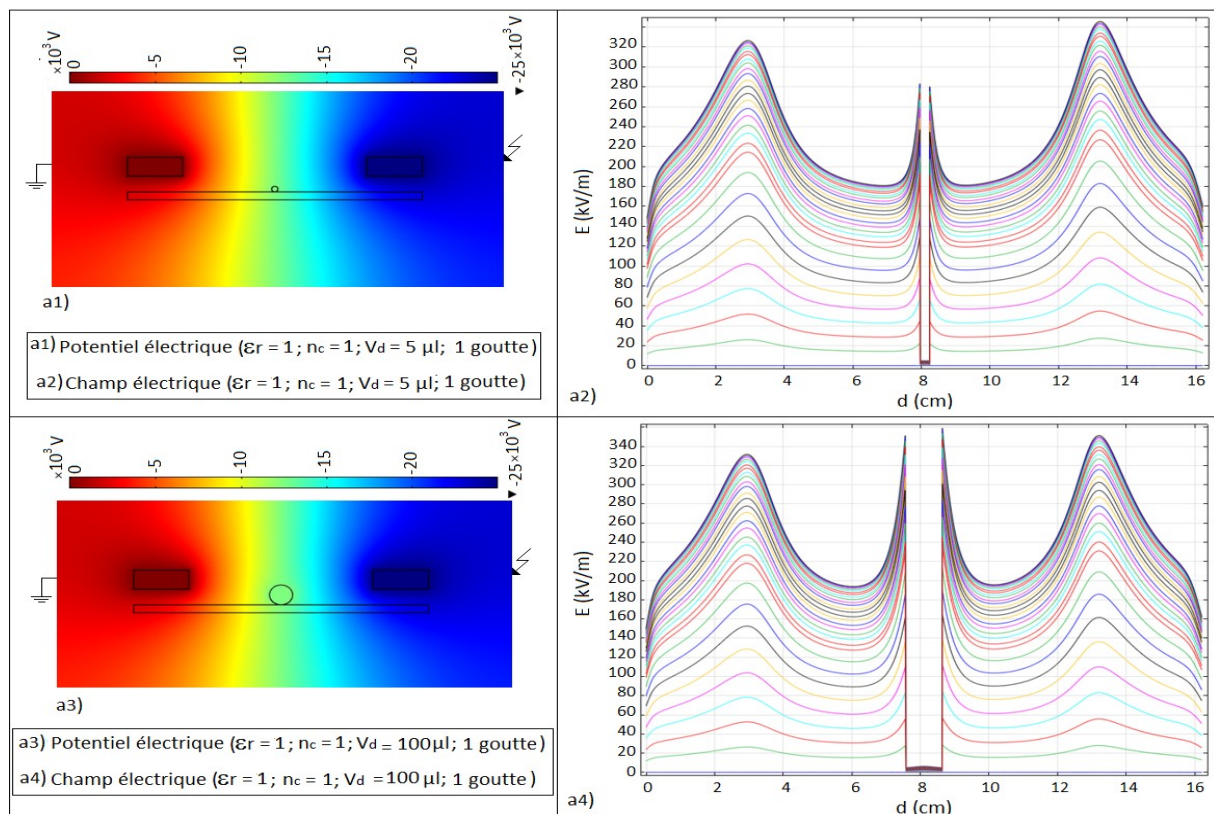


Fig. III. 17a: Distribution du potentiel et champ électrique sur une goutte à volume variable sur une isolation superhydrophobe ($\epsilon_r = 1$, $\sigma_v = 5,5 \mu\text{S/cm}$, $t_s = 10 \text{ s}$, $U_a = 25 \text{ kV}$, $d = 10 \text{ cm}$)

La figure III. 17 décrit l'allure de l'intensité du champ et du potentiel électrique résultant en fonction du volume d'un nombre de gouttes d'eau quelconque. Il en ressort une croissance de l'intensité du champ électrique avec celle du volume quel que soit le nombre de gouttes considéré. Il est à remarquer que les résultats de simulation de l'effet du volume des gouttes

d'eau sur l'intensité du champ électrique ne sont pas conformes à ceux obtenus expérimentalement [46] car théoriquement, lorsque le volume croît, le champ électrique et la tension appliquée augmentent, contrairement à l'expérimentation où la tension appliquée pour faire expulser la goutte d'eau diminue avec l'élévation du volume (Figs. I. 28 et III. 18).

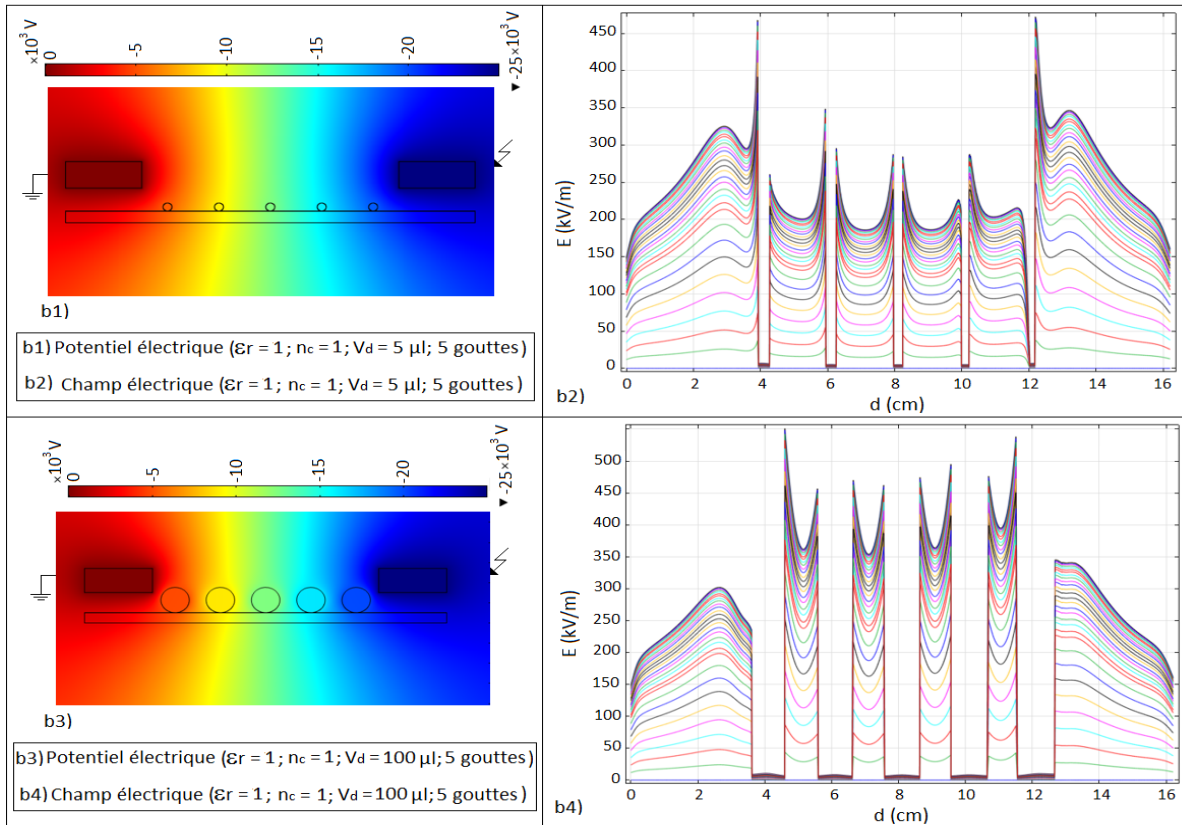


Fig. III. 17b: Distribution du potentiel et champ électrique sur cinq gouttes à volume variable sur une isolation superhydrophobe ($\epsilon_r = 1, \sigma_v = 5,5 \mu\text{S/cm}, t_s = 10 \text{ s}, U_a = 25 \text{ kV}, d = 10 \text{ cm}$)

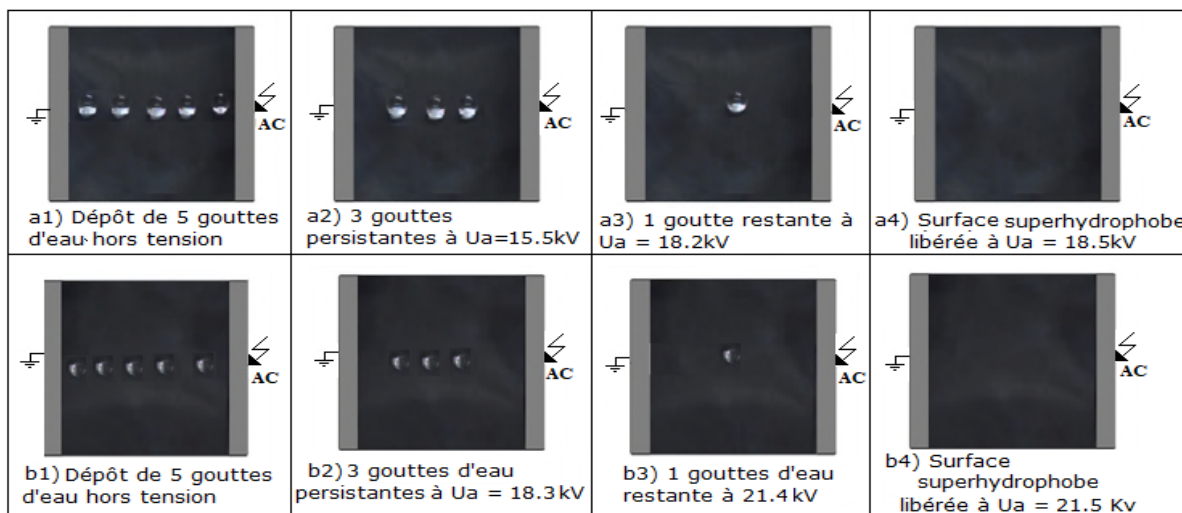


Fig. III. 18: Etapes d'expulsion d'une rangée de 5 gouttes du milieu de l'isolation: a ($V_d = 80 \mu\text{l}$) et b ($V_d = 10 \mu\text{l}$)

III. 4. 3 Tension appliquée aux gouttes d'eau reposant sur l'isolation avec couvert

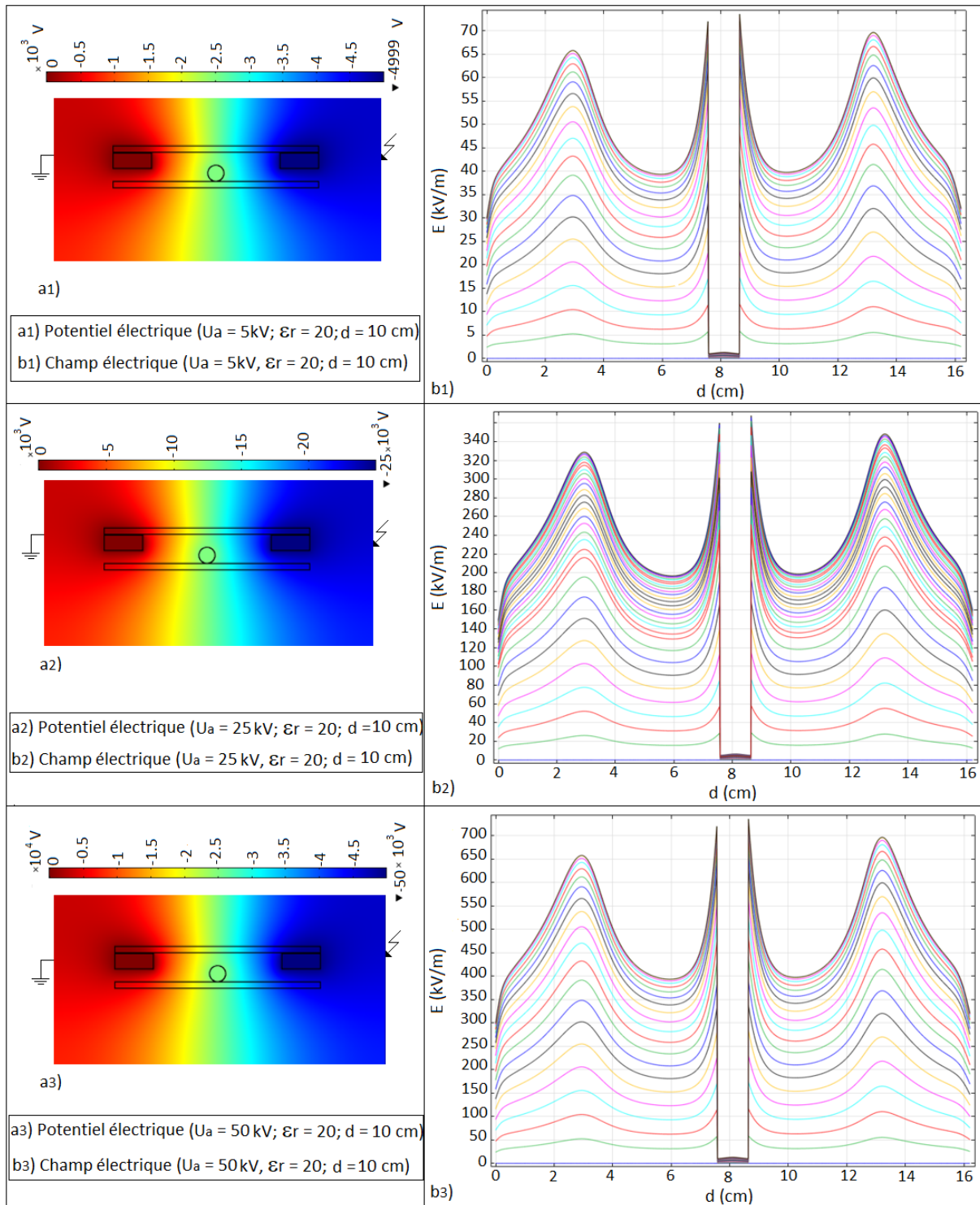


Fig. III. 19: Répartition du potentiel et champ électrique le long d'une goutte déposée sur une isolation superhydrophobe sous tension variable ($\epsilon_r = 20$, $n_c = 1$, $V_d = 100\ \mu\text{l}$)

Les figures III. 19 et III. 20 décrivent l'allure de l'intensité du champ et du potentiel électrique résultant d'une goutte d'eau, déposée sur la surface d'une isolation superhydrophobe avec couvert, en fonction de la valeur de la tension alternative appliquée à

celle-ci. Il en découle une croissance de l'intensité du champ et du potentiel électrique résultant avec l'augmentation de la tension appliquée à celle-ci quelle que soit la distance entre les deux électrodes.

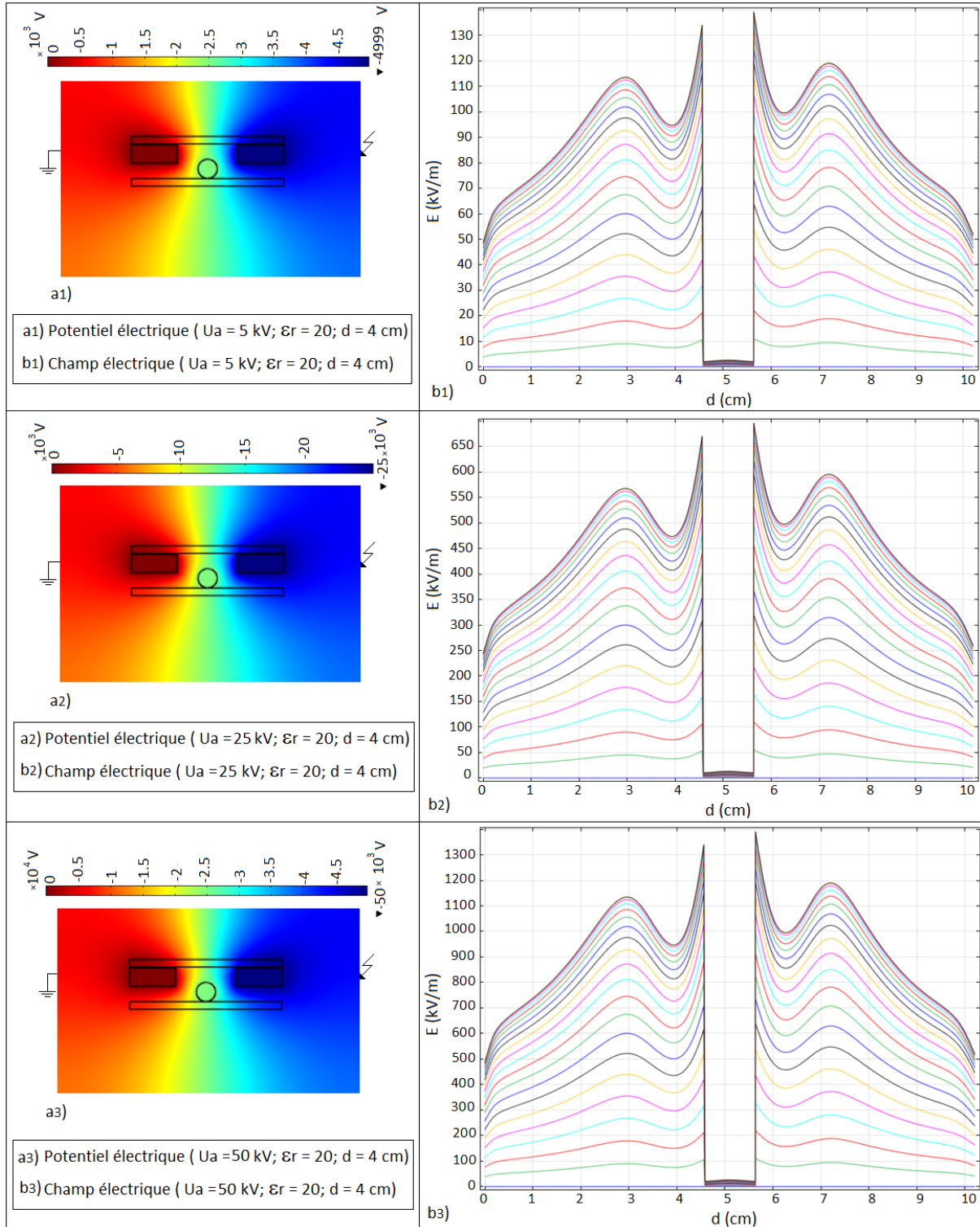


Fig. III. 20: distribution du potentiel et champ électrique le long d'une goutte déposée sur une isolation superhydrophobe sous tension variable ($\epsilon_r = 20$, $n_c = 1$, $V_d = 100 \mu\text{l}$)

III. 5 Conclusion

Les résultats émanant de cette investigation, nous ont permis de quantifier par simulation l'intensité du champ et du potentiel électrique résultant d'un dépôt de gouttes d'eau à nombre, et volume variable, reposant sur une surface isolante multicouches superhydrophobes avec couvert diélectrique de différentes permittivités relatives et soumise à une tension alternative variable. Ces résultats sont résumés comme suit:

- Le logiciel COMSOL 5.0 nous permet de prédire qualitativement le sens et l'ordre d'expulsion d'un dépôt de 5 gouttes d'eau sur une isolation superhydrophobe au moyen de la détermination de l'intensité du champ électrique résultant au niveau de celles-ci;
- L'augmentation du nombre de gouttes d'eau entraîne l'élévation de l'intensité du champ électrique résultant quel que soit le nombre de couches superhydrophobes de l'isolation considéré;
- La croissance du nombre de couches de suie superhydrophobes engendre une légère augmentation de l'intensité du champ électrique;
- Une élévation de la permittivité relative crée un très léger déclin de l'intensité du champ indépendamment du nombre de gouttes d'eau recouvrant l'isolation superhydrophobe;
- La croissance de la tension appliquée à l'isolation superhydrophobe, génère une augmentation de l'intensité du champ et du potentiel électrique indépendamment de la distance interélectrode;
- L'intensité du champ électrique croît avec celle du volume, quel que soit le nombre de gouttes reposant sur l'isolation;
- La présence d'un couvert solide engendre le renforcement des lignes du champ électrique entre celui-ci et les sommets des gouttes d'eau. Ce qui entraîne une élévation du champ électrique;

Les résultats issus de cette simulation sont conformes à ceux établis expérimentalement sauf pour le volume des gouttes d'eau où les résultats sont en nette contradiction.

Conclusion générale

Il découle des résultats obtenus à l'état actuel des connaissances dans le domaine de la superhydrophobicité de la surface des matériaux artificiels, que malgré leur exploitation comme autonettoyants, antigivrage, etc., l'application de la superhydrophobie aux isolations des lignes et postes électriques est encore à l'état embryonnaire bien que, sur la base de leur géométrie très adéquate, elles offrent une très grande opportunité à l'exploitation de cet avantage dans le domaine de l'énergie électrique.

Les résultats issus de notre investigation, sont le fruit d'une quantification par simulation de l'intensité du champ et du potentiel électrique résultant d'un dépôt de gouttes d'eau à nombre et volume variable, reposant sur une surface isolante à multicouches superhydrophobes avec ou sans couvert diélectrique à permittivité variable, lorsqu'elle est soumise à une contrainte de tension alternative quelconque. Ces résultats sont résumés en points essentiels suivants:

- Le logiciel COMSOL version 5.0 permet bien la prédiction qualitative du sens et de l'ordre d'expulsion d'un dépôt de gouttes d'eau recouvrant une isolation à multicouches superhydrophobes au moyen de la détermination de l'intensité du champ électrique résultant au niveau de celles-ci;
- La croissance du nombre de gouttes d'eau entraîne l'élévation de l'intensité du champ électrique résultant quel que soit le nombre de couches superhydrophobes apportées sur l'isolation considérée;
- L'augmentation du nombre de couches superhydrophobes de suie engendre une légère élévation de l'intensité du champ électrique résultant au sein du dépôt de gouttes d'eau reposant sur la surface de l'isolation;
- Une croissance de la permittivité relative du couvert diélectrique solide génère un léger déclin de l'intensité du champ électrique indépendamment du nombre de gouttes d'eau et de couches superhydrophobes de suie recouvrant l'isolation;
- L'élévation de la tension appliquée à l'isolation superhydrophobe, entraîne une augmentation de l'intensité du champ et du potentiel électrique en présence du couvert diélectrique de l'isolation quelle que soit la distance interélectrode;
- L'intensité du champ électrique croît avec celle du volume des gouttes d'eau recouvrant l'isolation, indépendamment du nombre considéré des perles de ce liquide;

- La présence d'un couvert diélectrique solide engendre le renforcement des lignes du champ électrique entre celui-ci et les sommets des gouttes d'eau. Ce qui entraîne une élévation du champ électrique résultant;

Les résultats émanant de cette étude théorique sont en conformité avec ceux acquis expérimentalement sauf pour le volume des gouttes d'eau où ils en sont en nette contradiction.

Références bibliographiques

- [1] K. Hamour, F. Bouchelga, R. Boudissa, S. Kornhuber, K.D. Haim, “Optimization of the superhydrophobic insulation longevity by expulsion of any wet deposit with a weak alternating electrical field”, *Journal of electrostatics* 105 (2020) 103451.
- [2] J. Liu, S. Zhou, Y. Yan, H. Zheng, S. Liu, Study on droplet movement on superhydrophobic surfaces under electric fields, in: 19th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT18), 2018, pp. 681–686. Chicago (USA).
- [3] K. Hamour, S. Soudani, B. Smati, F. Bouchelga, R. Boudissa, St. Kornhuber, K. D. Haim, Contribution to the optimization of the electrical performance of a superhydrophobic insulation covered with water drops under DC voltage, *J. Electrostat.* 102 (2019) 103375, 1 - 9.
- [4] X. Wang, X. Li, Q. Lei, W. Li, Y. Wu, Influence of alternating current (AC) corona discharge on the superhydrophobicity of SiO₂/fluorosilicone resin nano-composite coating, *Appl. Surf. Sci.* 478 (2019) 642–650.
- [5] S. Wei, H. Jin, H. Zhou, K. Yang, N. Gao, W. Li, Dynamic behavior of water droplets on wetted superhydrophobic surfaces under a high AC electric field, *AIP Adv.* 9 (2019), 065307, 1-6.
- [6] S. Vallabhuneni, S. Movafaghi, W. Wang, A.K. Kota, Superhydrophobic coatings for improved performance of electrical insulators, *Macromol. Mater. Eng.* 303 (9) (2018) 1–9, 1800313.
- [7] Y. Li, H. Jin, S. Nie, C. Tong, N. Gao, Effect of superhydrophobicity on flash over characteristics of silicone rubber under wet conditions, *AIP Adv.* 8 (2018), 015313, 1 – 11.
- [11] Thomas Young, “An essay on the cohesion of fluids”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 95:65-87, 1805.
- [9] <https://tpesuperhydrophobienmgs.wordpress.com/>.
- [10] P. Dellise, L. Fache, “ Olympiade de physique 2015”, Lycée des Flandres Hezbrouck, 2015.
- [11] Wilhelm Barthlott and Christoph Neinhuis, “Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces”. *Planta*, 202(1):1-8, 1997.
- [12] 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.
- [13] R. N. Wenzel, “Resistance of solid surfaces to wetting by water”, *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 28, no .8, pp.988-944, 1936.
- [14] A. Cassie and S. Baxter, “Wettability of porous surfaces”, *Transactions of the Faraday Society*, vol. 40, pp. 546-551, 1944.

- [15] C. Huraux, A.M. Rahal, "Le contournement des isolatrices hautes tensions approché à l'aide d'un modèle de laboratoire", RGE, tome 84, N°6, juin 1975, pp.425-429.
- [16] B. Hammoum, A. Kerbouche, "Etude du Phénomène de Pollution des Isolateurs de Haute Tension dans la Région Electrique du Centre Algérien", PFE Ingénieur, Génie Electrique, ENP 2007.
- [17] T. Hang, A. Hu, H. Ling, M. Li, and D. Mao, "Super-hydrophobic nickel films with micro-nano hierarchical structure prepared by electrodeposition," *Applied Surface Science*, vol. 256, no. 8, pp. 2400-2404, 2010.
- [18] D. Kumar, X. Wu, Q. Fu, J. W. C. Ho, P. D. Kanhere, and L. Li, "Hydrophobic sol-gel coatings based on polydimethylsiloxane for self-cleaning applications," *Materials & Design*, vol. 86, pp. 855-862, 2015.
- [19] X. Zhang, F. Shi, J. Niu, Y. Jiang, and Z. Wang, "Superhydrophobic surfaces: from structural control to functional application," *Journal of Materials Chemistry*, vol. 18, no. 6, pp. 621-633, 2008.
- [20] M. Karlsson, P. Forsberg, and F. Nikola Jeff, "From hydrophilic to superhydrophobic: fabrication of micro meter-sized nail-head-shaped pillars in diamond," *Langmuir*, vol. 26, no. 2, pp. 889-893, 2009.
- [21] Y. Xiu, D. W. Hess, and C. Wong, "A novel method to prepare superhydrophobic, self-cleaning and transparent coatings for biomedical applications," *2007 Proceedings 57th Electronic Components and Technology Conference*, pp. 1218-1223, 2007.
- [22] K. Chang, T. Chuang, W. Ji, C. Chang, Y. Peng, and H. Shih, "UV-curable nano casting technique to prepare bioinspired superhydrophobic organic-inorganic composite anticorrosion coatings," *Express Polymer Letters*, vol. 9, no. 2, 2015.
- [23] D. Sarkar, and M. Farzaneh, "Superhydrophobic coatings with reduced ice adhesion," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 23, no. 9, pp. 1215-1237, 2009.
- [24] P.A. Tipler, G. Mosca, *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*, (La physique à l'intention des scientifiques et ingénieurs) 2e édition allemande, éditions Spektrum Akademischer Verlag, 2004.
- [25] Y. Li, X. Men, X. Zhu, B. Ge, F. Chu, and Z. Zhang, "One-step spraying to fabricate nonfluorinated superhydrophobic coatings with high transparency," *Journal of Materials Science*, vol. 51, no. 5, pp. 2411-2419, 2016.
- [26] C. Neinhuis and W. Barthlott, "Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces," *Annals of botany*, vol. 79, no. 6, pp. 667-677, 1997.

- [27] R. Evershed, R. Berstan, F. Grew, M. Copley, A. Charmant, and E. Barham, "Water-repellent legs of water striders," *Carbohyd. Res*, vol. 113, pp. 291-299, 1983.
- [28] <https://www.artmajeur.com/>.
- [29] S. Soni, *Handbook of Research on Diverse Applications of Nanotechnology in Biomedicine, Chemistry, and Engineering*: IGI Global, 2014.
- [30] H. Liu, S.-W. Gao, J.-S. Cai, C.-L. He, J.-J. Mao, and T.-X. Zhu, "Recent Progress in Fabrication and Applications of Superhydrophobic Coating on Cellulose-Based Substrates", *Materials*, vol. 9, no. 3, p. 124, 2016.
- [31] <https://tribologie.free.fr/>.
- [32] <https://clairrefischer.wixsite.com/>.
- [33] A. Kuechler, "Hochspannungstechnik: Grundlagen – Technologie- Anwendungen", 3^{ème} édition, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, avril 2009, Germany.
- [34] Lau, K.K.S.; Bico, J.; Teo, K.B.K.; Chhowalla, M.; Amaratunga, G.A.J.; Milne, W.L.; Mckinley, G.H.; Gleason, K.K., "Superhydrophobic Carbon Nanotube Forests", *Nano Lett.* (2003), 3, 1701-1705.
- [35] Huang, Y.; Sarkar, D.K.; Chen, X.G., *Master. Lett.*, "A one-step process to engineer superhydrophobic copper surfaces", (2010), 64, 2722-2724.
- [36] Chen, L; Xiao, Z.; Chan, P.C.H.; Lee, Y.K., "Dual-scaled stable superhydrophobic nano-flower surfaces", *TRANSDUCERS 2009 -15th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and microsystems* (2009), 441-444.
- [37] Lim, H.; Jung, D.H.; Noh, J.H.; Choi, G.R.; Kim, W.D., "Simple nanofabrication of a superhydrophobic and transparent biomimetic surface", *Chinese Science Bulletin* (2009), 54, 3613-3616.
- [38] S. S. Latthe, H. Imai, V. Ganesan, and A. V. Rao, "Ultrahydrophobic silica films by sol-gel process," *Journal of porous materials*, vol. 17, no. 5, pp. 565-571, 2010.
- [39] A. B. Gurav, S. S. Latthe, C. Kappenstein, S. Mukherjee, A. V. Rao, and R. S. Vhatkar, "Porous water repellent silica coatings on glass by sol-gel method," *Journal of Porous Materials*, vol. 18, no. 3, pp. 361-367, 2011.
- [40] <https://www.newswire.ca/fr/>.
- [41] <https://www.astrosurf.com/>.
- [42] F. Z. Madidi, "Élaboration de revêtements nanocomposites avec des propriétés superhydrophobes, semi-conductrices et photocatalytiques," Thèse de doctorat, Université du Québec, 2016.

- [43] G. Momen and M. Farzaneh, "A ZnO-based nanocomposite coating with ultra-water repellent properties," *Applied Surface Science*, vol. 258, no. 15, pp. 5723-5728, 2012.
- [44] J. Zimmermann, F. A. Reifler, G. Fortunato, L. C. Gerhardt, and S. Seeger, "A Simple, One-Step Approach to Durable and Robust Superhydrophobic Textiles," *Advanced Functional Materials*, vol. 18, no. 22, pp. 3662-3669, 2008.
- [45] M. Amin, M. Akbar, and S. Amin, "Hydrophobicity of silicone rubber used for outdoor insulation (an overview)," *Rev. Adv. Mater. Sci*, vol. 16, pp. 10-26, 2007.
- [46] M. Haddadi et N. Hallouane., "Effet des paramètres électrogéométriques des gouttes d'eau recouvrant une isolation superhydrophobe sur sa performance électrique sous tension alternative 50 Hz ", PFE, Université de Bejaia, juin 2019.
- [47] <http://www.larousse.fr>
- [48] A. Mekhaldi, "Etude des phénomènes de conduction et de décharge électrique sur des surfaces isolantes polluées sous tensions alternative Hz", Thèse de doctorat d'état, Génie Electrique, ENP, juin 1999.
- [49] R. Imalet, " Influence de différentes concentrations de sels (NaCl, Na₂SO₄, MgSO₄) des eaux d'irrigation de l'agriculture sur le rendement du haricot", Thèse Ing, INA, EL Harrach, 43p,1979.
- [50] D.I. Carter, "Problems of salinity in agriculture. Plants in Saline Environments". Springer-Verlag Berlin. pp. 25-35, 1975.
- [51] F. Sun et al, "Salt Modulates Gravity Signaling Pathway to Regulate Growth Direction of Primary Roots in Arabidopsis". *Plant Physiol*. pp178-188, 2007.
- [52] W. CIGRE, "33-04, The measurement of site pollution severity and its application to insulator dimensioning for ac systems," *Electra*, vol. 64, p. 101, 1979.
- [53] I. E. Commission, Guide for the Selection of Insulators in Respect of Polluted Conditions: Bureau Central De La Commission Electrotechnique Internationale, CEI 815, 1986.
- [54] H. S. Nezhad, A. Gholami, and A. Jalilian, "Performance improvement of Insulator string in polluted conditions". *Journal of Electrical Systems*, vol. 4, no. 3, 2008.
- [55] F. Aouabed, "Contribution à l'étude d'un circuit équivalent des isolateurs synthétiques sous pollution en utilisant l'EMTPI" Université Ferhat Abbas — Sétif (ALGERIE), Juin 2018.
- [56] A. Mekhaldi, H Boudjelthia, "Contribution à l'étude de la pollution des isolateurs de haute tension dans la région électrique de Annaba", PFE, Génie Electrique, ENP 1984.

- [57] A. Mekhaldi, "Etude du développement d'un arc électrique sur des surfaces isolantes contaminées par la pollution désertique", Mémoire de Magister, Génie Electrique, ENP 1990
- [58] A. Meziane, Y. Thaminy, "Modélisation dynamique du phénomène de contournement des isolateurs pollués sous tension continue", PFE, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, 2002.
- [59] A. Boubakeur, "Essais d'isolateurs pollués dans les conditions naturelles", rapport interne, I. W. N, politeknika WARSZAWKA, Varsovie 1978.
- [60] D. Namane, "Effet de la discontinuité de la pollution sur le comportement d'isolateur haute tension, sous la fréquence de 50 Hz ", Thèse de magister, ENP Alger, 1998.
- [61] Groupe d'action 33-4-03, "Dispositions de Surveillance des isolateurs soumis à la pollution", Electra, N° 152, Février 1994, p. 78-90.
- [62] P. J. Lambeth, H. Auxel et M. P. Verma, " Méthode de mesure de la sévérité de la pollution compte tenu de son influence sur le comportement des isolateurs à haute tension", Electra N°. 20, pp 95-100, Janvier 1972.
- [63] M. Teguar, "Etude mathématique des mécanismes de développement des décharges électriques sur des isolateurs installés en régions polluées", Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Haute Tension, Algérie, Juillet 1993.
- [64] W. Heise, G. F Luxa, G. Revrery, M. P. Verma, "Estimation de la méthode d'essais sous pollution artificielle par couche solide", CIGRE, Rapport 33-09, Paris. France, 1982.
- [65] Y. Li and all, "Effect of superhydrophobicity on flashover characteristics of silicone rubber under wet conditions", AIP ADVANCES 8, 015313 (2018), pp.1-12.
- [66] CEI 60-1. "Techniques des Essais à Haute Tension ". Définition et prescriptions générales relatives aux Essais, Deuxième Edition, 1989.
- [67] C. H. A. ELY, P. J. Lambeth, J. S. T. Looms et D. A. Swift, C.E.G.B " Contournement des polymères humides et pollués l'ailette BOOSTER", CIGRE, Rapport 15 - 02, Paris, France, 1978.
- [68] Guia Talal, "Comportement d'un Modèle D'isolateur Sous Tension Impulsionnelle " Mémoire de Magister, en Génie Electrique (Electrotechnique) à l'ENP, El-Harrach, Alger, Algérie.
- [69] F. Midi, K. Ouerdane, "Les effets de la pollution sur les ouvrages électriques à 30 kV en régions littorales", Mémoire de fin d'études, département d'électrotechnique. USTHB Alger, 1998.

- [70] R. Sebti, A. Boudjamaa, "Modélisation des phénomènes de pollution des isolateurs de haute tension", projet de fin d'étude en vue d'obtention diplôme de master en électrotechnique industriel.
- [71] K. Takeda, A. Nakajima, Y. Murata, k. Hashimoto and T. Watanabe, "Control of water droplets on super-hydrophobic surfaces by static electric field", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 41 (2002), Part. 1, No. 1, pp. 287-291.
- [72] J. Li, Y. Wei, Z. Huang, F. Wang, X. Yan, "Investigation of the Electric Field Driven Self-propelled Motion of Water Droplets on a Super-hydrophobic Surface", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 23, No. 5, pp. 3007 – 3015, 2016.
- [73] A. Torkkeli, J. Saarilahti, A. Haara, H. Harma, T. Souka, and P. Tolonen, "Electrostatic transportation of water droplets on superhydrophobic surfaces", IEEE Conf. Micro electro Mechanical Systems (MEMS), pp. 475-478, 2001.
- [74] H. Morgan *and* N. G. Green, "AC Electrokinetics: colloids and nanoparticles", Research Studies Press LTD, Baldock, Hertfordshire, England, 2003.
- [75] J. Ndoumbe, A. Beroual and A. Moukengue Imano, "Simulation and Analysis of Coalescence of Water Droplets on Composite Insulating Surface under DC Electric Field", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 22, No. 5 (2015), pp. 2669-2675.