

REPUBLIQUE 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

Distribution du champ et potentiel électrique sur une isolation superhydrophobe avec gouttes d'eau sous tension continue

Présenté par:

M^{elle} ALOUACHE Sara

M^{elle} KADRI Radia

M^{elle} BOUYAHMED Ryma

Encadré par :

Pr. R. BOUDISSA

Dr. F. BOUCHELGA

Année universitaire 2019-2020

Je dédie ce mémoire :

A mes parents qui peuvent être fier et trouvent ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de vous.

A mes frères et sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité (Linda, Sonia, Rabah et Laid).

A mes chères grand-mères, Je vous rends hommage par ce modeste travail.

A la famille ALOUACHE et YAHIAOUI sans oublier la famille BENGHILAS pour leur grand soutien.

A mes amis et amies de par le monde qui n'ont cessé de m'encourager (Souad, Rima, Sara, Lydia, Sabria, Hanane, Imane, Sonia, Nabil, Mourad, Nabil, Yacine, Menad).

A tous ceux qui je n'ai pas mentionné mais qui sont dans mon cœur.

A tous les étudiants de ma section.

Sans oublier mes chères coéquipières (Ryma et Radia), ainsi qu'à toute leur famille.

A mon encadreur, Pr. R. BOUDISSA pour la précieuse formation scientifique que j'ai acquise, grand merci à vous.

SARA

Dédicace

Je dédie ce travail aux plus chers êtres au monde : ma douce mère et mon adorable père qui ont tout fait pour m'offrir un climat idéal de travail et qui m'ont apporté leur soutien depuis toujours, leur encouragement et leurs conseils dans les soucis de ma réussite.

A mes très chers frères, « Lamine et Islam »

A mes très chères sœurs, « Fahima, Kahina, Siham »

A mon très cher mari Nabil qui m'a soutenu durant le long de mon travail ainsi que sa famille, particulièrement Toufik et Souhila.

A mon oncle Dada « Amar KADRI » et sa famille

A mon oncle Idir Mehdaoui et sa famille

A mes amis (es) sans exception et à tous les étudiants de mon groupe RE, sans oublier mes chères amis de la résidence 17 octobre (Missou et Fahem)

A mon promoteur Mr R. BOUDISSA pour Sa précieuse aide que j'ai acquise grand merci à vous.

A mes très chères coéquipières « Sara et Ryma »

RADIA

Dédicace

*Je dédie à toutes les personnes qui se sont trouvées à mes cotés pour
m'encourager*

*A ma très chère mère « Salima » et mon très cher père « Md
Tahar », de leur soutien permanent durant toutes mes années
d'études, leurs sacrifices illimités, eux qui ont consenti tant
d'efforts pour mon éducation et pour me voir atteindre cette étape de ma vie.*

*A mes chères sœurs « Sabrina, Hassiba, Lila, Didah et Nassrine » qui ont été à
mes cotés pour la réalisation de ce travail.*

A mon cher frère « Lamri », et sa femme « Sabrina »

*A Mes beaux-frères, Mustapha et Hamza, Dradji, Bilal qui m'on apporté leur
soutien matériel ainsi que leurs Connaissances dans divers domaines.*

*A mes tous neveux « Ilyes, Amine, fofo et yoyou » et nièces « Sarah, Yassemine
, Cyline et Djana »*

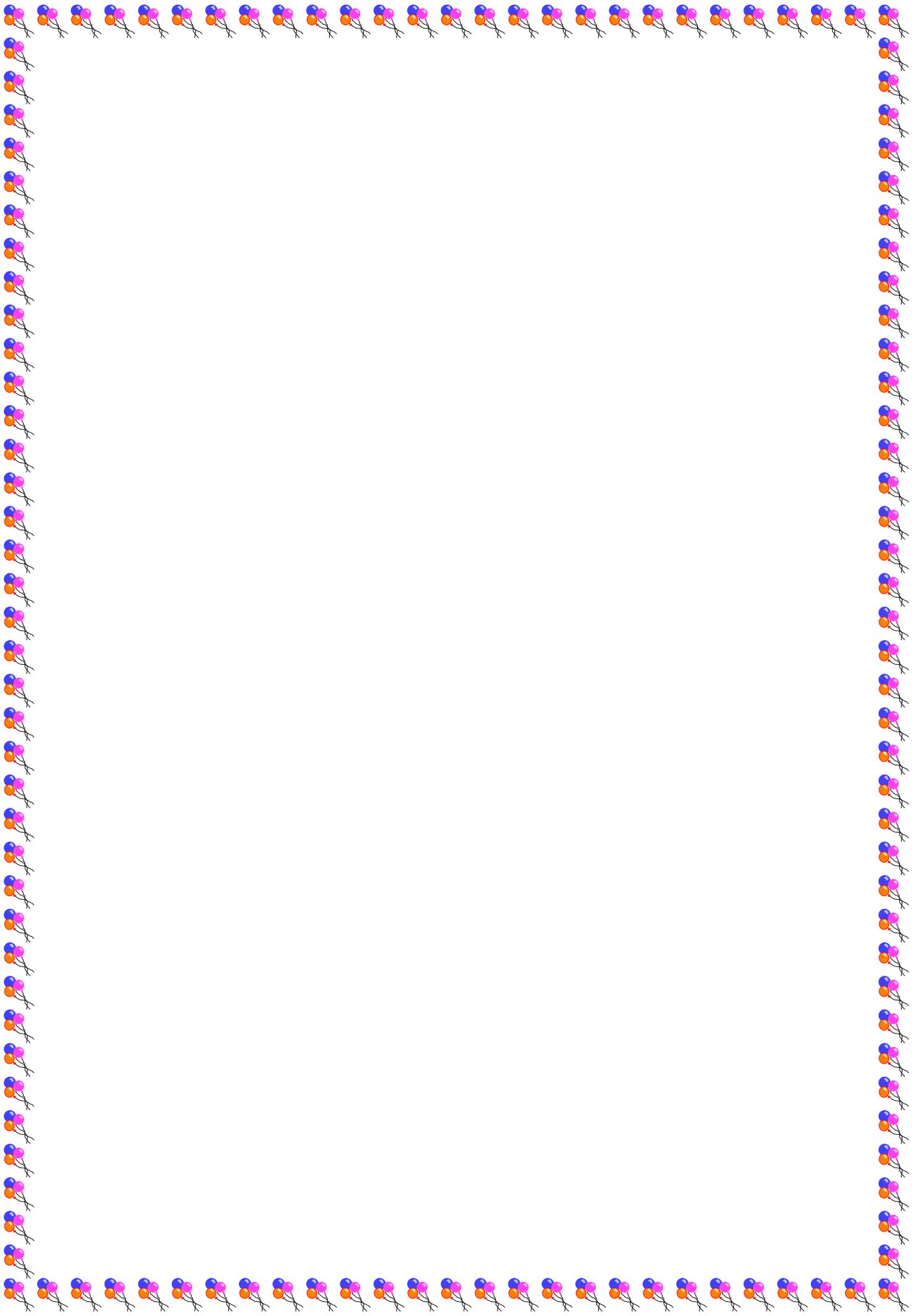
A tous mes cousins et cousines et tout mon village d'Ighil Larbaa

A mes coéquipières « Sara » et « Radia », merci pour leur patience,

*A toutes mes chers amis « Mohamed, Nadia, Lahna, Youva, Ghilas, Lyes,
Djidji, Alysia » et tous les étudiants de ma promo*

*A mon encadreur M^r « Rabah BOUDISSA » pour la précieuse formation
scientifique que j'ai acquise, un grand merci a vous*

RYMA





Remerciement

Avant tout nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années.

Nous tenons à remercier sincèrement et particulièrement Mr R. BOUDISSA en tant que promoteur, qui a été toujours à notre écoute et notre disposition tout au long de la réalisation de ce projet de fin d'étude (2ème Année Master LMD), ainsi que pour ses conseils et sa bonne humeur et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Nous tenons à remercier Dr F. BOUCHELGA (notre Co-promotrice) qui a mis à notre disposition tous les moyens nécessaires pour un bon déroulement de notre travail.

Nous remercions également tous les membres du jury pour avoir bien voulu évaluer et examiner notre travail.

Enfin, tous nos respects sont adressés à nos chers parents qui nous ont encouragés et soutenu beaucoup durant nos études.



Tables de matières



Introduction générale.....	1
Chapitre I : Isolations superhydrophobes et travaux antérieurs sur leur performance électrique	
I. 1 Introduction.....	3
I. 2 Définition d'une isolation électrique.....	3
I. 3 Propriétés électriques importantes d'un isolateur	3
I. 3. 1 Résistivité.....	3
I. 3. 2 Rigidité diélectrique.....	4
I. 3. 3 Permittivité relative.....	4
I. 3. 4 Facteur de perte.....	4
I. 4 Propriétés particuliers.....	5
I. 4. 1 Mouillabilité.....	5
I. 4. 2 Non mouillabilité.....	5
I. 4. 3 Tension superficielle.....	5
I. 4. 4 Angle de contact.....	6
I. 4. 4. 1 Effet Wenzel.....	7
I. 4. 4. 2 Effet Cassie.....	7
I. 5 Surfaces superhydrophobes.....	8
I. 5. 1 Surface hydrophile.....	8
I. 5. 2 Surface superhydrophile.....	8
I. 5. 3 Surface hydrophobe.....	8
I. 5. 4 Surface superhydrophobe.....	8
I. 6 Différents types des matériaux superhydrophobes.....	9
I. 6. 1 Matériaux naturels.....	9

I. 6. 2 Matériaux artificiels.....	11
I. 7 Techniques de production de surfaces superhydrophobes.....	11
I. 7. 1 Dépôts.....	12
I. 7. 1. 1 Dépôt par bain chimique.....	12
I. 7. 1. 2 Dépôt par vapeur chimique.....	12
I. 7. 1. 3 Dépôt électrochimique.....	12
I. 7. 2 Photolithographie.....	12
I. 7. 3 Gravure chimique.....	13
I. 7. 4 Technique utilisant le plasma.....	13
I. 8 domaines d’application des surfaces superhydrophobe.....	13
I. 8. 1 Domaine de l’optique.....	13
I. 8. 2 Domaine de transport maritime.....	14
I. 8. 3 Domaine médical.....	14
I. 8. 4 Domaine de bâtiment.....	14
I. 9 Quelques travaux antérieurs sur la performance d’une isolation superhydrophobe.....	15
I. 10 Conclusion.....	21
Chapitre II : pollution des isolations électrique	
II. 1 Introduction.....	23
II. 2 Définitions.....	23
II. 2. 1 Pollution.....	23
II. 2. 2 Salinité.....	23
II. 2. 3 Couche de pollution.....	23
II. 2. 4 Degré de pollution.....	23

II. 3 Source de pollution.....	24
II. 3. 1 Pollution naturelle.....	24
II. 3. 2 Pollution industrielle.....	24
II. 3. 3 Pollution mixte.....	24
II. 4 Méthodes de mesure de sévérité de degré de pollution d'un site.....	25
II. 4. 1 Conductivité électrique des couches de pollution	25
II. 4. 2 Densité de dépôt de sel équivalent DDSE.....	26
II. 4. 2. 1 Densité de dépôt non soluble DDNS.....	26
II. 5 Influence des facteurs climatiques sur les isolateurs pollués.....	27
II. 5. 1 Vent.....	27
II. 5. 2 Pluie.....	27
II. 5. 3 Humidité.....	27
II. 5. 4 Température.....	27
II. 6 Méthode de simulation de pollution en laboratoire.....	28
II. 6. 1 Essai sous pollution artificiel.....	28
II. 6. 2 Méthode de la couche solide	28
II. 6. 3 Méthode du brouillard salin.....	28
II. 6. 4 Méthode de pollution liquide.....	28
II. 7 Conséquence de la pollution.....	28
II. 7. 1 Arc non localisé.....	29
II. 7. 2 Arc fixe.....	29
II. 7. 3 Contournement des surfaces isolantes.....	29
II. 7. 3. 1 Contournement d'une surface isolante superhydrophobe sous DC.....	29

II. 7. 3. 2 Contournement d'une surface isolante hydrophile.....	31
II. 7. 3. 3 Contournement d'une surface isolante hydrophobe inclinée sous arrangement en ligne droite.....	32
II. 8 Technique de lutte contre la pollution.....	34
II. 8. 1 Allongement de ligne de fuite.....	34
II. 8. 2 Isolateurs plats.....	34
II. 8. 3 Graissage périodique.....	34
II. 8. 4 Revêtement silicone.....	34
II. 8. 5 Isolateurs composites.....	35
II. 8. 6 Nettoyage des isolateurs.....	35
II. 9 Conclusion.....	35
Chapitre III : Simulation du champ et potentiel électrique	
III. 1 Introduction.....	36
III. 3 Confection et caractérisation d'une isolation multicouches superhydrophobes.....	36
III. 3 Logiciel de simulation du champ et potentiel électrique.....	40
III. 4 Paramètres d'influence du champ et du potentiel électrique.....	41
III. 4. 1 Nombre de gouttes d'eau, permittivité du couvert de l'isolation et nombre de couches superhydrophobes de celle-ci.....	41
III. 4. 2 Tension appliquée aux gouttes d'eau reposant sur l'isolation et leur volume.....	53
III. 4. 3 Conductivité électrique des gouttes d'eau et épaisseur du couvert.....	58
III. 5 Conclusion.....	61
Conclusion générale.....	62

Fig. I. 1: Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension	4
Fig. I. 2: Circuit électrique équivalent série et parallèle	5
Fig. I. 3: illustration de la tension de surface	6
Fig. I. 4: Représentation de l'angle de contact	7
Fig. I. 5: Modèle de Wenzel et Cassie	8
Fig. I. 6 : Goutte d'eau sur une surface hydrophile à superhydrophobe	9
Fig. I. 7: Schéma montrant la gravure chimique et physique avec un masquage identique. La largeur du motif gravé sera différente selon la méthode de gravure utilisée isotrope ou anisotrope	13
Fig. I. 8 : application de la superhydrophobie avec les bateaux	14
Fig. I. 9: Goutte d'eau sur la surface du béton intelligent	15
Fig. I. 10: Etapes essentielles de fabrication d'un revêtement en suie sur une plaque en verre	15
Fig. I. 11: Caractéristiques du modèle expérimental	16
Fig. I. 12: 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	16
Fig. I. 13: 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	17
Fig. I. 14: 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)	17
Fig. I. 15: $U_{DC} = f(V_d)$ pour une goutte d'eau d'une rangée du milieu de l'isolation avec ou sans couvert	17
Fig. I. 16: $U_{DC} = f(\sigma_v)$ pour une goutte d'eau d'une rangée du milieu de l'isolation avec ou sans couvert	18
Fig. I. 17: $U_{DC} = f(C_k)$ pour une goutte d'eau d'une rangée du milieu de l'isolation avec ou sans couvert	19
Fig. I. 18 : Images topographiques 3D de la surface obtenue par profilométrie: (a) une seule couche super hydrophobe. (b) trois couches super hydrophobes	19
Fig. I. 19 : 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	20
Fig. I. 20: Variation de l'angle de contact statique fonction de l'exposition au rayonnement UV + condensation d'humidité	21
Fig. II.1: Photo d'un conductimètre à sonde mobile	25
Fig. II.2: Sonde à électrodes linéaires (1: électrode linéaire à extrémités arrondies 2: poignée de la sonde, 3: câble de liaison avec le conductimètre)	25
Fig. II. 3: Sonde à électrode planes avec papier absorbant (1: Tête de la sonde, 2: électrodes planes, 3 : poignée de la sonde, 4 : câble connexion au conductimètre	26
Fig. II. 4: Schéma a procédé de mesure de la DDNS	27

Fig. II. 5 : 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)	30
Fig. II. 6 : Expulsion partielle des gouttes d'eau de la surface de l'isolation à électrodes pleines et contournement de celle-ci ($V_d = 40 \mu\text{l}$, $m_k = 0 \text{ g/l}$, $\sigma_v = 10 \mu\text{S/cm}$)	30
Fig. II. 7 : Etape d'expulsion des gouttes d'eau de 40 g de masse de kaolin recouvrant la surface de l'isolation superhydrophobe	31
Fig. II. 8 : Phases de contournement d'une surface hydrophile plan-plan polluée sous tension continue positive	31
Fig. II. 9 : Phases de contournement d'une surface isolante contaminée délimitée par deux plans.	31
Fig. II. 10 : Contournement d'une isolation en silicone hydrophobe sous inclinaison critique ($V_d = 45 \mu\text{l}$, $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$, $\alpha_{cr} = 40^\circ$)	32
Fig. II. 11 : Couleur jaune orange de la lumière émise par la décharge pour $\alpha = 0^\circ$, $\sigma_v = 7 \text{ mS/cm}$ et $V_{g1} = 45 \mu\text{l}$	33
Fig. II. 12 : Couleur blanche-rose de la lumière émise par la décharge pour $\alpha = 0^\circ$, $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$ et $V_{g1} = 45 \mu\text{l}$	33
Fig. III. 1 : Etapes de confection d'une isolation à multicouches superhydrophobes	37
Fig. III. 2 : Profil de l'isolation à une et quatre couches de suie superhydrophobes	37
Fig. III. 3 : Photo d'un profilomètre du laboratoire de HT de Zittau (Allemagne)	38
Fig. III. 4 : $\theta = f(n_c)$ pour un volume de la goutte d'eau égal à $5 \mu\text{l}$	38
Fig. III. 5 : $\theta = f(n_c)$ pour un volume de la goutte d'eau égal à $10 \mu\text{l}$	39
Fig. III. 6 : Composition chimique de l'isolation superhydrophobe à base de suie	39
Fig. III. 7 : Modèle expérimental et de simulation	40
Fig. III. 8 : Ensemble des forces électriques exercées sur 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)	42
Fig. III. 9 : Répartition du potentiel et champ électrique sur un nombre de gouttes variable reposant sur une isolation à une couche ($\epsilon_r = 1$; $\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)	44
Fig. III. 10 : Distribution du potentiel et champ électrique sur un nombre variable de gouttes déposées sur une isolation à 1 couche avec couvert ($\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)	45
Fig. III. 11 : Arrangement d'une multitude de gouttes d'eau sur une surface isolante superhydrophobe sous tension continue avec ou sans couverture diélectrique	46
Fig. III. 12 : Répartition du potentiel et champ électrique sur un nombre variable de gouttes reposant sur une isolation à 4 couches sans couvert ($\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)	47
Fig. III. 13 : Distribution du potentiel et champ électrique sur un nombre variable de gouttes d'eau sur une isolation à 4 couches avec couvert ($\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)	48
Fig. III. 14 : Répartition du potentiel et champ électrique sur une goutte d'une isolation à une couche avec couvert à permittivité variable ($\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)	49

Fig. III. 15: Distribution du potentiel et champ électrique sur 5 gouttes d'une isolation à une couche avec couvert à permittivité variable ($\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100\mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)	50
Fig. III. 16: Répartition du potentiel et champ électrique sur une goutte d'une isolation à 4 couches avec couvert à permittivité variable ($\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100\mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)	51
Fig. III. 17: Distribution du potentiel et champ électrique sur 5 gouttes d'une isolation à 4 couches avec couvert à permittivité variable ($\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100\mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)	52
Fig. III. 18: Répartition du potentiel et champ électrique sur une goutte déposée sur une isolation	53
Fig. III. 19: Distribution du potentiel et champ électrique sur une goutte reposant sur une isolation sous tension variable avec couvert ($\epsilon_r = 7$; $\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $n_c = 1$; $V_d = 100 \mu\text{l}$) sous tension variable sans couvert ($\epsilon_r = 1$; $\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $n_c = 1$; $V_d = 100 \mu\text{l}$)	54
Fig. III. 20: Répartition du potentiel et champ électrique d'une goutte à volume variable sur une isolation à une couche superhydrophobe ($\epsilon_r = 1$; $\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $U_a = 25 \text{ kV}$; $d = 10 \text{ cm}$)	55
Fig. III. 21: Distribution du potentiel et champ électrique de 5 gouttes à volume variable sur une isolation à une couche superhydrophobe ($\epsilon_r = 1$; $\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $U_a = 25 \text{ kV}$; $d = 10 \text{ cm}$)	56
Fig. III. 22: Etapes d'expulsion d'une rangée de 5 gouttes: a ($V_d = 10 \mu\text{l}$) et b ($V_d = 80 \mu\text{l}$)	57
Fig. III. 23: Distribution du potentiel et champ électrique de 1 et 5 gouttes pour deux conductivités différentes sur une isolation superhydrophobe ($\epsilon_r = 1$; $U_a = 25 \text{ kV}$; $d = 10 \text{ cm}$)	58
Fig. III. 24: Etapes d'expulsion d'une rangée de 5 gouttes d'eau de conductivité (a: $\sigma_v = 0.5 \text{ mS/cm}$ et b: $\sigma_v = 20 \text{ mS/cm}$)	59
Fig. III. 25: Distribution du potentiel et champ électrique de 1 et 5 gouttes pour deux épaisseurs différentes sur une isolation superhydrophobe ($\epsilon_r = 1$, $U_a = 25 \text{ kV}$, $d = 10 \text{ cm}$)	60

Tab I.1: Matériaux naturels superhydrophobes	9
Tab I.2 : matériaux artificiels à différents degrés d'hydrophobie	11
Tab. I. 3 : Angle de contact statique après 240 heures d'immersion dans l'eau potable	21
Tab I.4 : Force de pelage pour deux différents échantillons	22
Tab. III. 1: Propriétés physiques des matériaux utilisés dans le logiciel	40

R_s : Résistance superficiel en Ω

R_v : Résistance transversale en Ω

R_i : Résistance d'isolement en Ω

E_p : champ électrique propre en V/m

E_e : champ électrique extérieur en V/m

ϵ_r : permittivité relative

δ : angle de perte en degré ($^\circ$)

θ : angle de contact en degré ($^\circ$)

γ_{LG} : Tension de l'interface Liquide Gaz en V

γ_{SL} : Tension de l'interface Solide Liquide en V

γ_{SG} : Tension de l'interface Solide Gaz en V

r : rugosité en μm

θ_E : angle de contact sans la rugosité en degré ($^\circ$)

θ^* : angle de contact avec la rugosité en degré ($^\circ$)

ϕ_s : fraction de surface occupée par le sommet de créneaux sur laquelle la goutte repose

DDSE : Densité de dépôt de sel équivalent mg/cm^2

V : volume de dépôt de sel équivalent m^3 ou l

S : surface nettoyée en cm^2

Sa : salinité exprimé en Kg/m^3

DDSN : Densité de dépôt non soluble

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

m_i : masse initiale du papier filtre en g

A : surface lavée de l'isolateur en cm^2

V_d : volume variable en m^3 ou l

σ_v : conductivité variable en $\mu\text{S}/\text{cm}$

α : Angle d'inclinaison en degré ($^\circ$)

e_e : épaisseur de l'électrode mm

l_e : Largeur de l'électrode cm

L_e : Longueur de l'électrode cm

L_c : Longueur de la ligne de fuite cm

F_{ci} : Force de Coulomb

F_{ai} : Force d'attraction mutuelle

F_{ri} : Force de répulsion mutuelle

E_r : Intensité du champ électrique résultant en V/m

HT : Haute tension

T : Terre

M : Milieu

MHT : Milieu haute tension

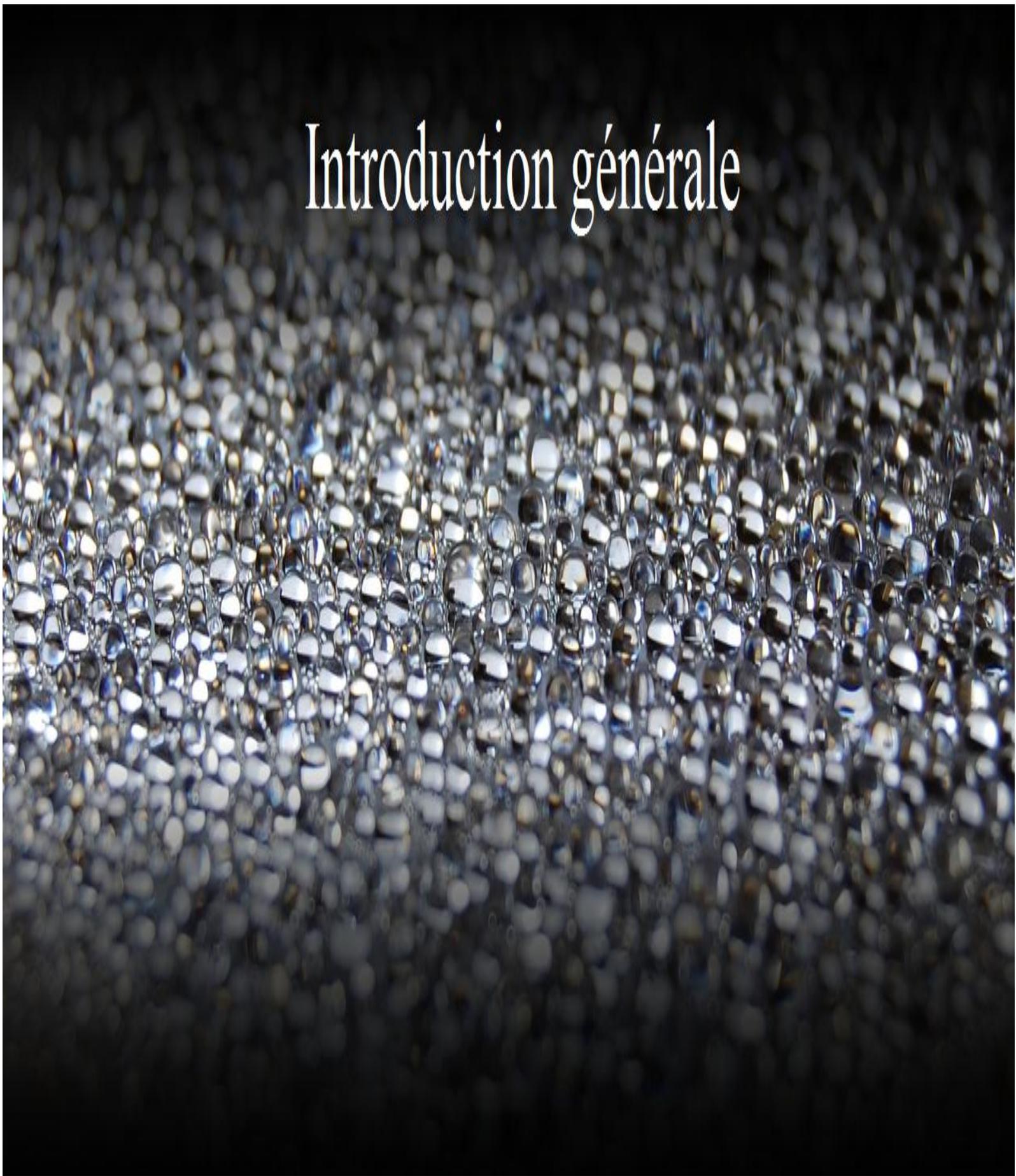
MT : Milieu terre

G_i : Gouttes (i)

n_c : nombre de couches

U_a : Tension appliquée en kV

Introduction générale



De nos jours, l'énergie électrique joue un rôle très important dans le développement et l'évaluation de l'industrie et l'économie du pays. De ce fait, il faut assurer l'équilibre entre la production et la demande de l'énergie électrique. Les lignes à haute tension nous garantissent le transport de l'énergie électrique des centrales de production vers les consommateurs.

Les isolateurs sont des éléments très importants dans la conception et la protection des lignes à haute tension, le phénomène menaçant leur sécurité est la pollution. Pour éviter l'effet néfaste de contournement des isolateurs hydrophiles et hydrophobes sous conditions de pollution humide très récurrente, plusieurs chercheurs se sont donc inspiré de la nature afin de développer des isolations artificielles à surface superhydrophobe et à degré de mouillage nul.

Notre travail a pour objectif la validation, par simulation au moyen du logiciel COMSOL multiphysics, version 5.0, des résultats expérimentaux obtenus très récemment. A travers cette simulation, nous recherchons la distribution du champ et le potentiel électrique continu résultant d'un dépôt de gouttes d'eau sur une surface d'une isolation à multicouches superhydrophobes mise sous tension continue afin de pouvoir 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 et épaisseur variable, de même pour le nombre de couches superhydrophobes de l'isolation ainsi que la valeur de la tension continue appliquée à celle-ci.

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

Dans le premier chapitre, nous rappelons et discutons les différents 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 continue.

Le deuxième chapitre est dédié à la caractérisation 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 sera consacré particulièrement à la prédiction du mouvement d'un dépôt de gouttes d'eau 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 continu résultant, indépendamment du nombre de couches de

l'isolation électrique superhydrophobe, du nombre, du volume et de la conductivité électrique des gouttes d'eau reposant sur celle-ci, 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:
Isolation superhydrophobes et travaux
anterieurs sur leur performance électrique



I. 1 Introduction

Le présent chapitre fera l'objet d'une étude bibliographique sur la superhydrophobicité. À travers ce chapitre nous définirons l'isolation électrique. Afin de décrire les différentes natures de surfaces des matériaux (hydrophile, superhydrophile, hydrophobe, superhydrophobe), il est indispensable d'étudier leurs propriétés électriques. Des exemples de matériaux superhydrophobes ont été cités ainsi que les techniques qui permettent de les produire. Les domaines d'application des surfaces superhydrophobes sont larges et variés. Pour finir le chapitre nous avons présenté une synthèse sur quelques travaux récents effectués dans ce sens par différents chercheurs.

I. 2 Définition d'une isolation électrique

En électricité, on dit isolation lorsqu'on parle d'un matériau qui peut empêcher le passage du courant entre deux conducteurs. Le matériau en question est appelé un matériau isolant.

L'isolation autorégénératrice est toute isolation qui peut être remise sous tension immédiatement après claquage. Par contre l'isolation non autorégénératrice, c'est toute isolation qui nécessite une intervention qui immobilise plus ou moins longtemps l'appareil touché [1].

I. 3 Propriétés électriques importantes d'un isolant

Une propriété d'un matériau est définie comme étant la mesure d'un comportement par un essai [1]. C'est grâce aux propriétés que les matériaux sont choisis pour une utilisation donnée. Parmi ces propriétés électriques importantes:

I. 3. 1 Résistivité [1]

On peut distinguer trois types :

Résistivité superficielle (R_s): c'est la résistance qui intervient entre deux conducteurs sur une même surface isolante. C'est une notion qui fait intervenir outre la qualité du matériau, le dépôt d'une mince couche conductrice (humide ou autre) à travers laquelle s'effectue en tout ou en partie la conduction.

Résistance transversale (R_v): elle est déterminée en appliquant un champ électrique perpendiculaire à la surface d'une éprouvette et en mesurant le courant transversal qui résulte de l'application de ce champ ; elle est relative aux propriétés internes du matériau.

Résistance d'isolement (R_i): elle fait intervenir à la fois la résistance transversale et la résistance superficielle d'un matériau, d'une façon représentative des conditions pratiques d'emploi des matériaux.

I. 3. 2 Rigidité diélectrique

C'est la valeur ou le champ électrique d'un milieu isolant qui forme un arc électrique ou bien un claquage, elle est aussi connue sous le nom court-circuit. Par rapport aux positions relatives de la direction du champ électrique et des surfaces principales de l'isolant, la rigidité diélectrique peut être transversale ou longitudinale. Elle dépend de:

- La fréquence, la forme et la durée d'application de la tension, La température, la pression et l'humidité de l'atmosphère ainsi que de la présence d'impuretés dans l'isolant (bulles d'air, humidité, ...) [2].

I. 3. 3 Permittivité relative [1]

Lorsqu'un diélectrique est soumis à l'action d'un champ électrique, il se produit à l'échelle moléculaire diverses modifications qui ont pour effet de créer un champ électrique propre (E_p) à l'intérieur de la substance (**Fig. I. 1**). Ce dernier s'opposant au champ électrique (E_e) extérieur appliqué. Cette caractéristique des isolants solides et liquides porte le nom de permittivité relative ϵ_r .

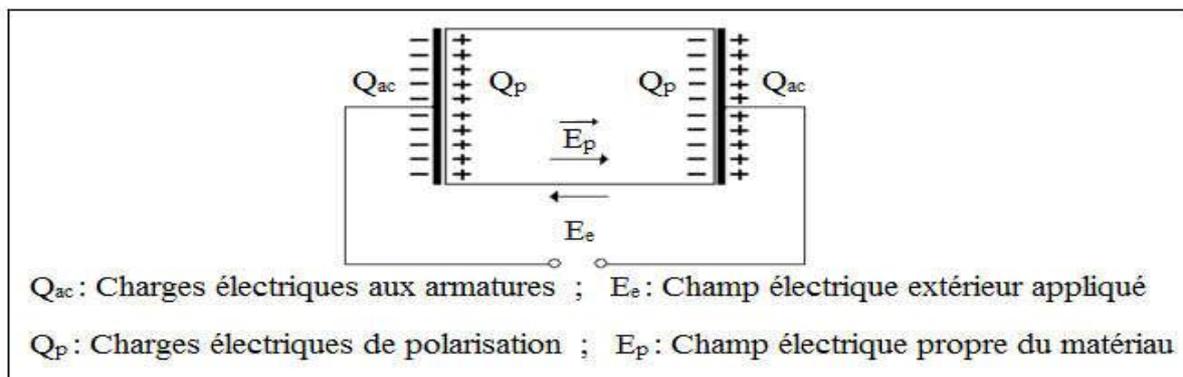


Fig. I. 1: Champ électrique propre à l'intérieur d'un matériau isolant sous tension

I. 3. 4 Facteur de pertes [3]

Tout isolant soumis à un champ électrique alternatif est traversé par des courants de conduction et d'absorption qui donnent lieu à des pertes diélectriques. Le diélectrique réel peut être représenté par les schémas équivalents suivants (**Fig. I. 2 a et b**). Le courant total qui traverse l'ensemble du circuit est déphasé en avance sur la tension d'un angle $\varphi < \pi/2$. Son

complément δ est appelé angle de pertes. La tangente de cet angle $\text{tg } \delta$ est appelée facteur de dissipation (ou de pertes).

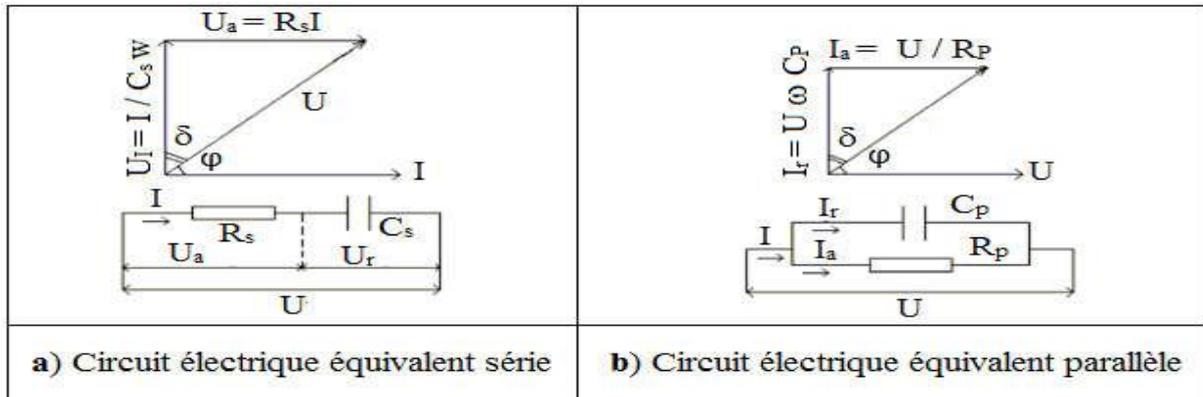


Fig. I. 2: Circuit électrique équivalent série et parallèle

I. 4 Propriétés particuliers

I. 4. 1 mouillabilité

La mouillabilité est la fonction du mouillage qui correspond à la capacité d'un produit à mouiller une surface. Le mouillage est l'un des phénomènes importants intervenant dans les collages.

De façon générale, lorsqu'un liquide est mis en contact avec la surface d'un solide, il se forme un angle de raccordement du premier sur le deuxième. Lorsque le mouillage est parfait, l'angle de raccordement devient nul. Dans ce cas l'énergie d'adhésion est maximum. Pour un système liquide-solide donné, le mouillage dépend de la pression, de la température et de l'hygrométrie [4].

I. 4. 2 Non mouillabilité

La non-mouillabilité désigne la capacité de la surface d'un matériau à ne pas pouvoir créer des liaisons d'hydrogènes avec une goutte d'eau, c'est ce qui l'empêche de s'étaler sur la surface [5].

I. 4. 3 Tension superficielle

La tension superficielle appelée aussi tension de surface ou énergie d'interface ou bien encore énergie de surface. C'est une force qui s'exerce à la limite entre deux milieux différents en raison des forces d'attraction et de répulsion des molécules. Au sein du liquide, ces forces s'annulent mais à la surface de celui-ci, ce n'est plus le cas. Elles créent alors la forme bombée

que l'on peut observer à la surface de l'eau. C'est également elle qui donne la forme d'une goutte à l'eau lorsqu'elle est dans un milieu gazeux, cette force contraint l'eau à n'avoir qu'une petite surface de contact, la forme d'une sphère est alors privilégiée car c'est la forme qui possède la plus petite surface de contact (**Fig. I. 3**).

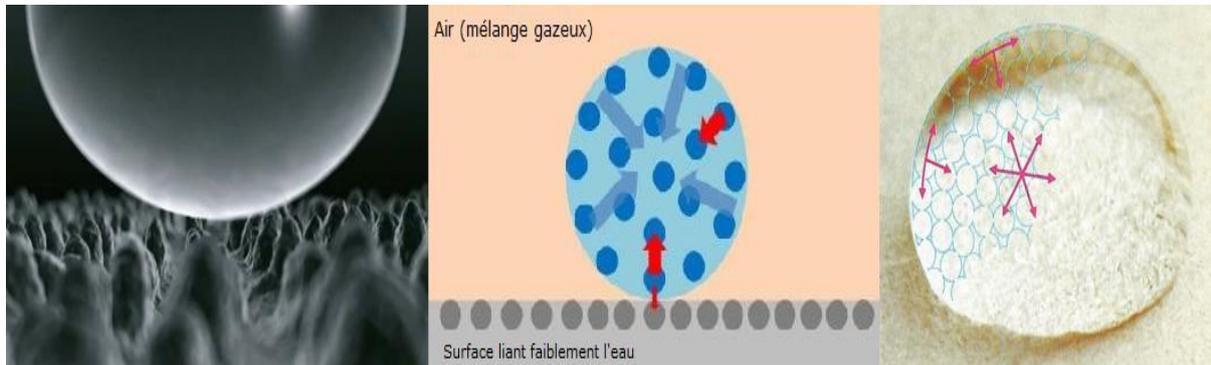


Fig. I. 3: illustration de la tension de surface

La forte tension superficielle de l'eau fait que l'angle de contact dépasse pratiquement toujours les 90° lorsqu'aucune force de cohésion n'intervient entre l'eau et le milieu [6].

I. 4. 4 Angle de contact [7]

On appelle angle de contact θ , l'angle que forme la goutte d'eau avec la surface sur laquelle elle est déposée (**Fig. I. 4**). Ses valeurs varient de 0 à 180°, en fonction de la nature de la surface (Superhydrophile, hydrophile, hydrophobe, superhydrophobe) avec laquelle elle est en contact. La valeur de cet angle peut se calculer par la loi de Young-Dupé suivante (eq I.1):

$$\begin{aligned} \theta &= \gamma_{LG} \cdot \cos \theta + \gamma_{SL} - \gamma_{SG} \\ \cos \theta &= \frac{(\gamma_{SG} - \gamma_{SL})}{\gamma_{LG}} \end{aligned} \quad (I.1)$$

Avec :

$\cos \theta$: Coefficient de tension superficielle;

γ_{LG} : Tension de l'interface Liquide Gaz;

γ_{SL} : Tension de l'interface Solide Liquide;

γ_{SG} : Tension de l'interface Solide Gaz.

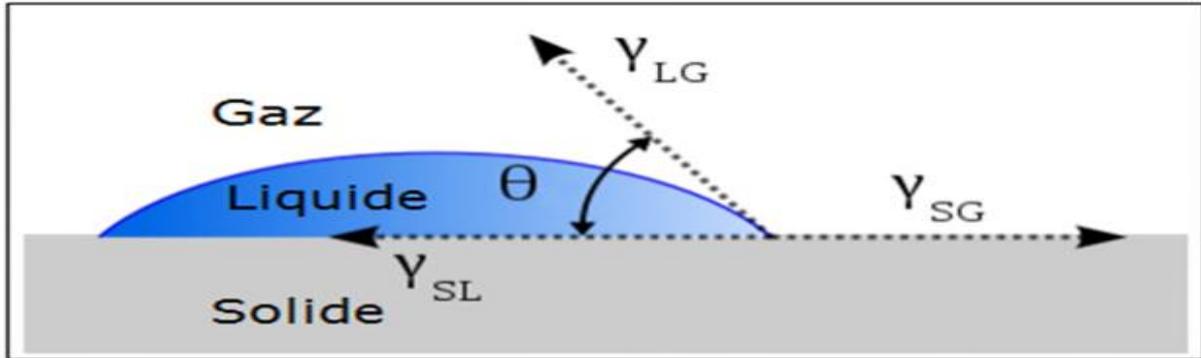


Fig. I. 4: Représentation de l'angle de contact

I. 4. 4. 1 Effet Wenzel [8]

Dans le modèle du mouillage développé par Wenzel, la goutte est déposée sur une surface chimiquement homogène et rugueuse et le liquide formé envahit complètement les vides de la surface (**Fig. I. 5a**). Pour une telle surface, on note r la rugosité, rapport de la surface réelle du matériau sur sa surface apparente ($r > 1$). On en déduit que l'angle apparent θ^* de la goutte s'écrit, en fonction de l'angle de Young θ (eq I.2)

$$\cos \theta^* = r \cos \theta_E \quad (\text{I.2})$$

Avec :

r : Rugosité ($r > 1$) ;

θ_E : Angle de contact sans la rugosité ;

θ^* : Angle de contact avec la rugosité ;

I. 4. 4. 2 Effet Cassie [9]

Le liquide risque de ne pas se conformer à un solide pour lequel il n'a pas d'affinité, il reposera plutôt sur les sommets de ces aspérités, en laissant de l'air sous lui (**Fig. I. 5b**), en raisonnant sur le cas simple d'une structure crénelée, on voit que la base d'une telle goutte touchera le solide sur la fraction ϕ_s de surface occupée par le sommet des créneaux, et l'air sur la fraction $(1 - \phi_s)$, les angles sur ces deux milieux sont θ et 180° , et l'angle observé sera une moyenne entre ces deux valeurs (qui s'obtient via les cosinus de ces angles, comme nous l'apprend la relation de Young. On trouve ainsi pour l'angle apparent sur une telle surface composite (eq I.3):

$$\cos \theta^* = \phi_s \cos \theta - (1 - \phi_s) \quad (\text{I.3})$$

Avec :

θ : Angle de contact sans rugosité ;

θ^* : Angle de contact avec rugosité ;

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

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

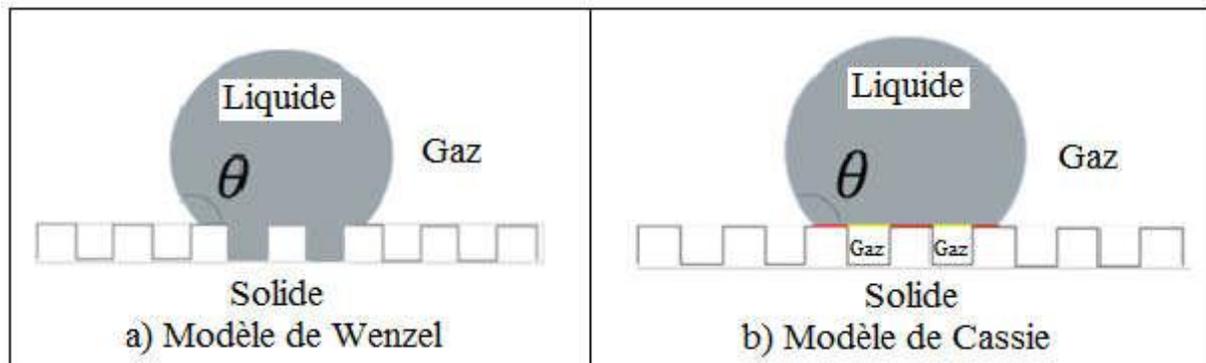


Fig. I. 5: Modèle de Wenzel et Cassie

I. 5 types Surfaces

D'après la mesure de l'angle de contact on peut classer les surfaces en quatre catégories :

I. 5. 1 Surface hydrophile [10]

Un composé est dit hydrophile, s'il possède une affinité pour l'eau et il peut même être dissout dans l'eau. Un composé hydrophile est typiquement polaire ce qui lui permet de créer des liaisons hydrogènes avec l'eau ou un solvant polaire. Pour qu'un composé soit polaire il doit être constitué d'au moins un groupe fonctionnel qui contient un azote ou un oxygène (groupe amine, hydroxyle, carbonyle).

I. 5. 2 Surface superhydrophile [11]

Une surface superhydrophile est une surface ayant un angle de contact presque égal à 0° avec une goutte d'eau (Fig. I. 6a).

I. 5. 3 Surface hydrophobe

Contrairement aux surfaces hydrophiles, les surfaces hydrophobes ont du mal à créer des liaisons hydrogènes avec les gouttes d'eau, déposées en surface. Ces dernières se rassemblent afin de minimiser la surface de contact avec le matériau [12].

L'angle de contact d'un matériau hydrophobe est compris entre 90° et 150° (Fig. I. 6b), et la goutte d'eau sera bombée [7].

I. 5. 4 Surface superhydrophobe

La superhydrophobie est une propriété d'un matériau dont l'angle de contact se rapproche de 180° (**Fig. I. 6c**), elle se réalise à froid et de façon permanente. On dit qu'une surface est superhydrophobe si et seulement si une goutte d'eau reposant sur cette surface atteint un angle de contact d'au moins 120° (**Fig. I. 6b**). Pour cela une surface doit posséder deux caractéristiques: premièrement son matériau de surface est apolaire, dans un second temps sa texture de surface suit le modèle Cassie [13].

La caléfaction est le degré extrême de la superhydrophobicité, on l'atteint en déposant une goutte d'eau sur une plaque chauffante à 300°. La goutte ne s'évapore pas, ceci est dû au film de vapeur qui se crée entre elle et la plaque chauffante, ce qui explique sa mobilité, longévité et son angle de contact proche de 180° [14].

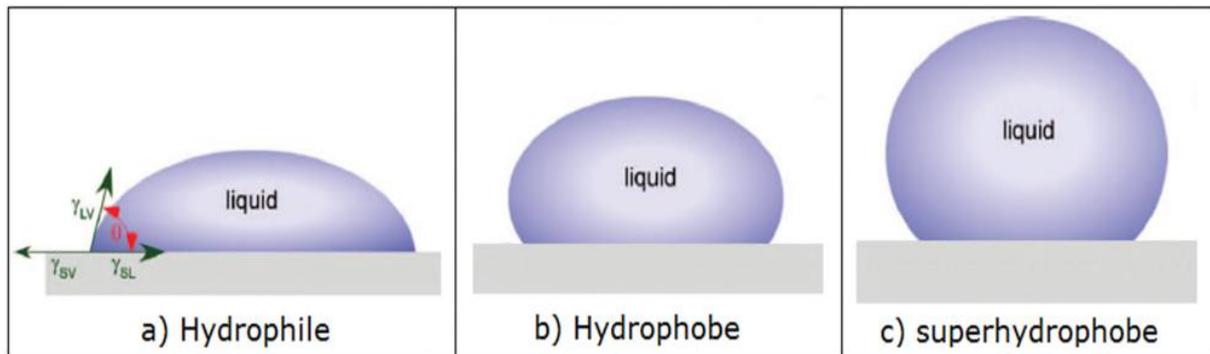
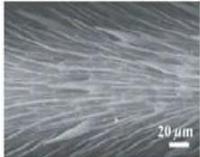


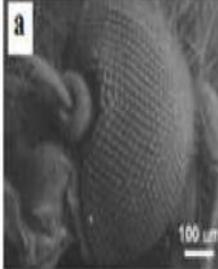
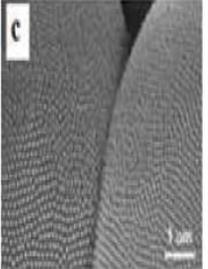
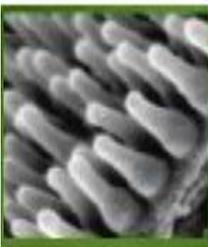
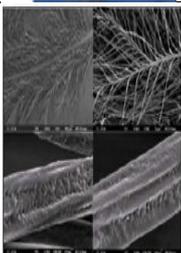
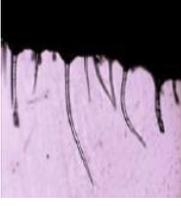
Fig. I. 6: Goutte d'eau sur une surface hydrophile à superhydrophobe [15]

I. 6 Différents types des matériaux superhydrophobes

I. 6. 1 Matériaux naturels [6], [16], [17]

Le tableau I.1 représente un groupe d'espèces superhydrophobes : insectes, animaux et végétaux

Type de matériau	Valeur de l'angle	Type de surface	Exemple	photos	caractéristiques	Photo microscopique
Insectes	167.6°	Hydrophobe	Gerris		Micro poiles hydrophobes sur ses pattes	

Insectes		superhydrophobe	Moustique		Dotés de plots, assemblés en réseaux hexagonaux, recouverts de petits piliers d'une certaine nm	
	160°	Superhydrophobe	Ailes de cigales		Structure nanométrique	
Animaux	58°	Hydrophobe	Ecaille de poisson		Superoléophobie	
	<150°	superhydrophobe	Plume canard		Une grisse superhydrophobe secrétée par son bec	
	170°	Hydrophobe	Plume de paon			
Plantes	<150°	Superhydrophobe	Lotus		L'effet lotus est du à la présence de micro et nano structures rugueuses	
	41°	Hydrophobe	Géranium		Trichomes très espacés couleur terne	

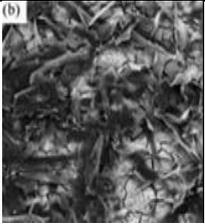
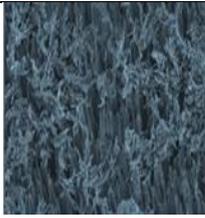
Plantes	79°	Hydrophobe	Plante grasse, Crassula		Pas de trichomes pellicule, probablement de la cire	
---------	-----	------------	-------------------------	---	---	---

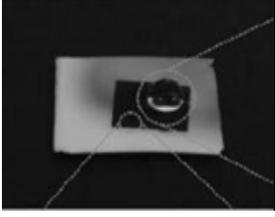
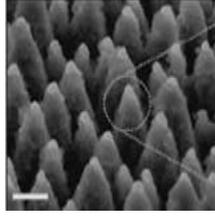
Tab I. 1: Matériaux naturels superhydrophobes

I. 6. 2 Matériaux artificiels

Aujourd’hui, il est aisé de créer une surface superhydrophobe en s’inspirant de la nature. En effet, le phénomène de la superhydrophobie donne naissance à des applications variées. Produire des surfaces superhydrophobes à partir de surfaces hydrophobes est devenue possible. Ainsi on pourrait créer des matériaux superhydrophobes comme des vitrages, du béton ou encore des tissus superhydrophobes. L’effet lotus pourrait aider à rendre plus commode la vie quotidienne grâce à la superhydrophobie en ne laissant pas les saletés et les liquides se répandre à la surface des matériaux [18-19].

Le tableau I.2 regroupe quelques exemples des matériaux superhydrophobes artificiels:

Matériau artificiel	Photo	Angle de contact	Echelle macroscopique	Photo de microscope
Zn Ni + Na OH		Superhydrophobe 164°	Trichomes en forme de protubérances et des poils	
Tissu nano-tex		Superhydrophobe 150°	Trichomes en forme de protubérances et des poils	
H ₂ O Et H ₂ SO ₄		Superhydrophobe 161°	Multiples trichomes à extrémités arborescentes	

<p>Silicium + nanostructure SF₆</p>		<p>Superhydrophobe 154°</p>	<p>Multiples trichomes coniques</p>	
--	---	---------------------------------	---	---

Tab. I. 2: matériaux artificiels à différents degrés d'hydrophobie

I. 7 Techniques de production de surfaces superhydrophobes

Pour obtenir une surface superhydrophobe, il suffit que cette dernière soit hydrophobe, avec une basse énergie de surface, mais surtout rugueuse. Dans les échelles micrométriques et nanométriques, en favorisant l'emprisonnement d'air dans la topographie, le procédé qui permet d'avoir une surface superhydrophobe peut se faire en deux étapes: rendre un substrat rugueux dans le mode nano-micro et abaisser l'énergie de surface [20]. Parmi les techniques les plus communes, on distingue :

I. 7. 1 Dépôts

I. 7. 1. 1 Dépôt par bain chimique

Le dépôt par bain chimique est l'une des méthodes les plus simples qui consiste à déposer des couches minces ou de nanomatériaux. Cette technique permet de faire de grandes quantités de substrats ou encore de travailler en continu. L'avantage majeur de cette technique c'est qu'elle ne requiert pas d'équipements dispendieux, seulement un contenant, une solution de déposition et un substrat. Lorsque le substrat est mis en contact avec la solution, il y a une réaction ou une décomposition survenant près de la surface formant des dépôts de topographie distincte [16].

I. 7. 1. 2 Dépôt par vapeur chimique

Le procédé de cette technique consiste à exposer un substrat à une vapeur chimique produisant un certain dépôt désiré qui se décompose ou réagit à la surface. C'est une méthode assez coûteuse, du fait qu'elle nécessite une chambre qui contrôle la pression et la température [21].

I. 7. 1. 3 Dépôt électrochimique

Le dépôt électrochimique (électrodéposition) est une technique d'application de couche mince sur des métaux. Cette technique est rapide, peu coûteuse et permet des procédés à des

températures normales. Le procédé consiste à placer deux substrats dans un liquide (produit chimique basique ou acide). L'un est la cathode, l'autre est l'anode. En utilisant un courant continu de différents voltages, certains composés sont déposés sur les surfaces. Il est possible de varier la grosseur et la quantité de composés sur la surface. La nature du composé déposé et sa géométrie varient selon si la pièce est anode ou cathode [16].

I. 7. 2 Photolithographie

Le procédé de photolithographie est un procédé très utilisé en électronique, il est utilisé pour la déposition de couches minces sur une surface. Le procédé est simple au début, mais devient par la suite plus complexe. Dans la première, étape il faut enduire la surface avec un film mince de polymère ou avec une photo résine laquelle est radiée par un faisceau lumineux de haute précision donnant la topographie requise. L'équipement s'avère coûteux, toute fois il permet d'obtenir des topographies continues [16].

I. 7. 3 Gravure chimique [16]

La gravure chimique est un procédé qui consiste à enlever des couches microscopiques de métaux à l'aide d'une solution acide ou basique (**Fig. I. 7**). Dans ce cas le substrat métallique est mis dans une solution (acide ou basique) qui décape la surface de substrat. Cette technique est peu coûteuse, et elle permet de contrôler ou varier plusieurs paramètres comme le temps d'attaque, la concentration de la solution ou/et la température du procédé. Ainsi, elle permet de modifier la géométrie et la nature des surfaces.

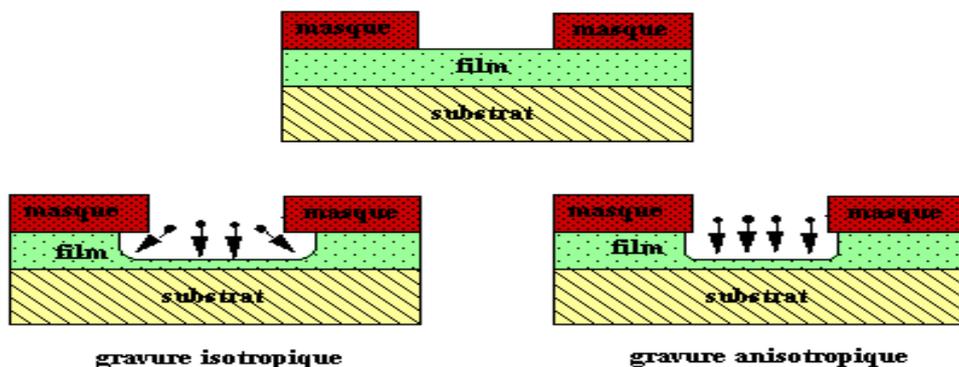


Fig. I. 7: Schéma montrant la gravure chimique et physique avec un masquage identique. La largeur du motif gravé sera différente selon la méthode de gravure utilisée isotrope ou anisotrope

I. 7. 4 Techniques utilisant le plasma

Le plasma peut être utilisé comme étant une technique de déposition (les ions déposent ceux pris dans un bain de vapeurs chimiques sur la surface) ou d'arrachement de matière, ce dernier est généralement utilisé en nano-fabrication des surfaces [22].

I. 8 Domaines d'application des surfaces superhydrophobes

Grâce à l'avancement des recherches sur la superhydrophobie, on remarque son implication dans des domaines divers, tels que :

I. 8. 1 Domaine de l'optique

La structuration de la surface lui apporte plusieurs fonctionnalités. Elle permet de diminuer la réflexion et d'augmenter la capacité d'absorption de la lumière incidente. Par ailleurs, elle permet aussi d'apporter une coloration à un matériau sans utilisation de colorant. Au-delà de ces effets, la structuration de la surface peut présenter des caractéristiques très sélectives en longueur d'onde ou/et en polarisation. Cette propriété apporte à ces dispositifs la capacité de se comporter comme un filtre optique que l'on peut ajuster par le contrôle des paramètres géométriques des motifs en surface [16].

I. 8. 2 Domaine de transport maritime [23]

Les consommations des carburants fossiles, dans le domaine des transports, ne cessent d'accroître. Dans le but de diminuer ces consommations, plusieurs équipes travaillent à obtenir des alliages plus légers, ou encore des géométries plus aéro-hydrodynamique.

Toutefois, ces modifications atteignant un apogée, l'utilisation d'un revêtement de surface superhydrophobe offrant une mouillabilité faible, pourrait être la solution. En effet, une surface de contact réduite entre l'eau et le solide en addition à une affinité chimique réduite avec l'eau pourrait diminuer la friction en surface (**Fig. I. 8**).



Fig. I. 8: application de la superhydrophobie avec les bateaux [24]

I. 8. 3 Domaine médical

Dans le domaine des applications médicales, la micro et la nanostructuration de surface des implants est un paramètre à prendre en compte dans la réponse cellulaire. Des réactions osseuses positives ont été observées sur les implants dentaires, liées à leur nanostructuration [16].

I. 8. 4 Domaine du bâtiment

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 (surface "pointue") le rendant presque complètement étanche (**Fig. I. 9**). En versant de l'eau sur ce type de béton, elle forme des gouttelettes qui roulent hors de sa surface [25].



Fig. I. 9: Goutte d'eau sur la surface du béton intelligent

I. 9 Quelques travaux antérieurs sur la performance d'une isolation superhydrophobe

Z. Adnani et K. Benamara [6] et S. Iouknane et C. Meziane [25] ont fabriqué et élaboré plusieurs échantillons d'une isolation en verre a base de silicone superhydrophobe, illustrée par la figure I. 10. Quant au dispositif supportant l'isolation et les électrodes HT et terre sont représentés en la figure I. 11.



Fig. I. 10: Etapes essentielles de fabrication d'un revêtement en suie sur une plaque en verre

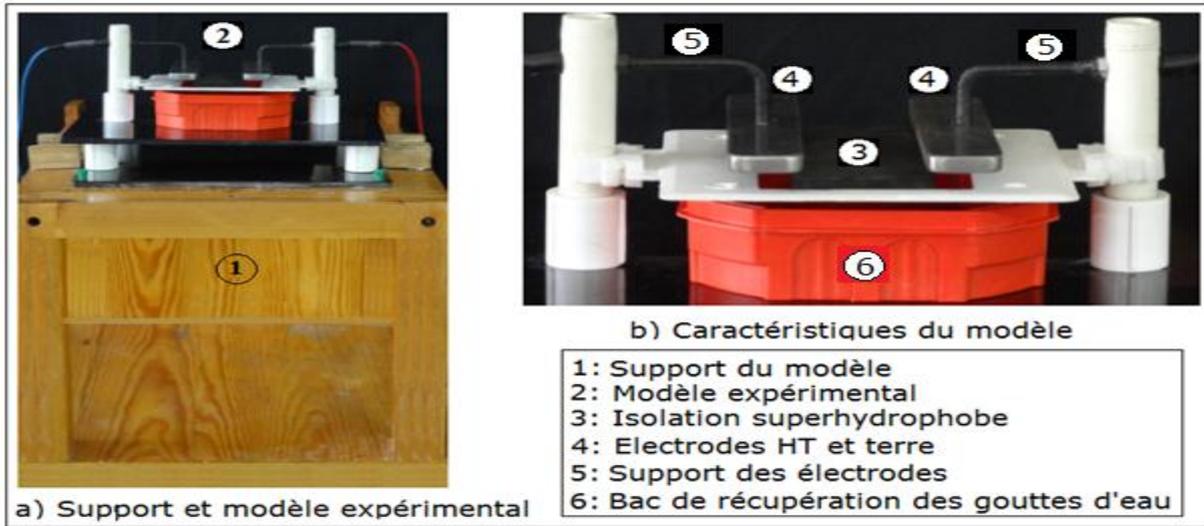


Fig. I. 11: Caractéristiques du modèle expérimental [6]

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. 12.

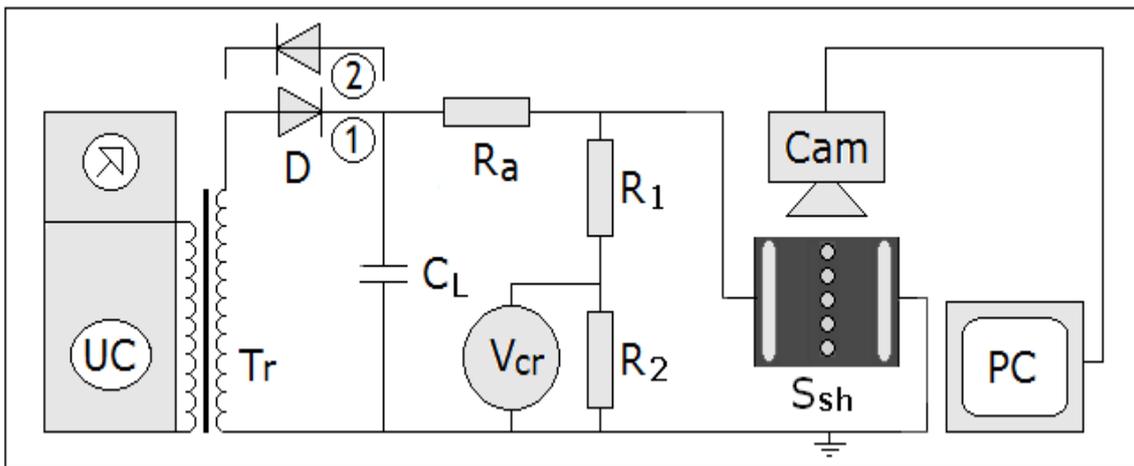


Fig. I. 12: Schéma de mesure de la tension d'expulsion des gouttes d'eau de la surface superhydrophobe et de visualisation du mouvement des gouttes d'eau

Pour des raisons de reproduction des différentes valeurs prises par le volume des gouttes d'eau de condensation et/ou de pluie naturelle, le degré de leur pollution et de leur viscosité, la position d'une rangée de ces gouttes au milieu de l'isolation a été choisie par ces autres (Fig. I. 13). Leur volume est égal à (10, 30, 40, 60 et 80) μl . Leur conductivité électrique est variée entre 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 20 mS/cm . Leur concentration en kaolin s'étend entre 0 et 120 g/l . La couverture ou non des gouttes d'eau reposant sur la surface de l'isolation est illustrée par la figure I. 14 [6 et 25].

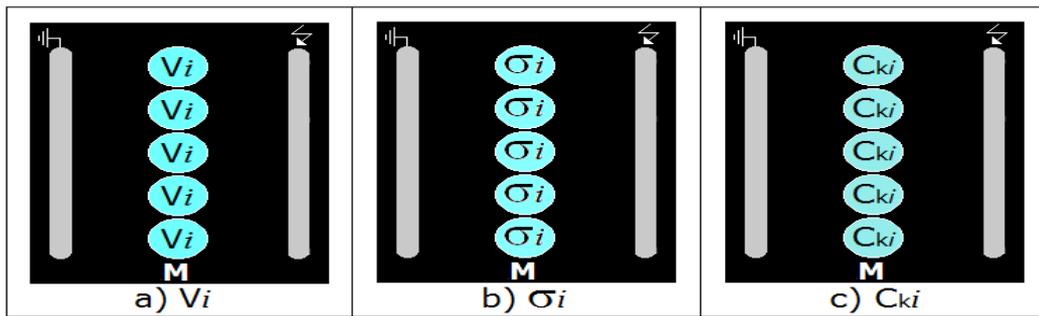


Fig. I. 13: Variation du volume, de la conductivité électrique et la concentration en kaolin des gouttes d'eau d'une rangée déposée au milieu de l'isolation

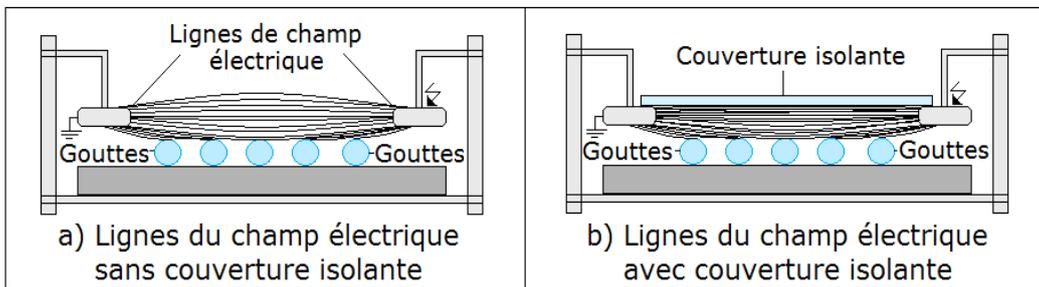


Fig. I. 14: Images des lignes du champ électrique entre les deux électrodes délimitant une isolation recouverte de gouttes d'eau sans (a) ou avec couvert isolant (b)

Les auteurs [6 et 25] ont observé un déclin de la tension d'évacuation de la dernière goutte d'eau en fonction de son volume quels que soient le degré de couverture de l'isolation et la polarité de la contrainte de tension appliquée à celle-ci (Fig. I. 15). La tension d'éviction des gouttes d'eau avec couvert isolant en verre est plus faible que sans celui-ci. De plus, cette tension d'éjection est plus élevée sous polarité négative que sous celle positive de la tension continue.

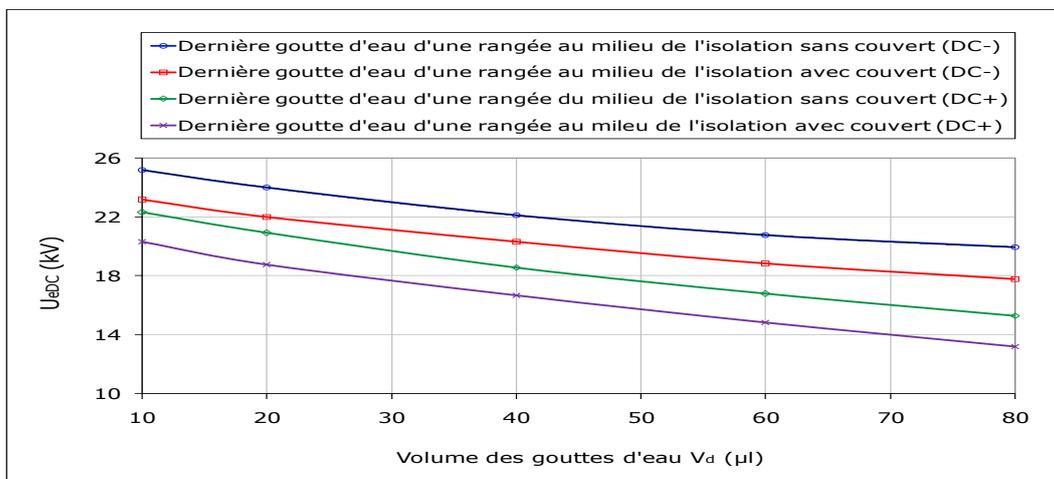


Fig. I. 15: $U_{DC} = f(V_d)$ pour une goutte d'eau d'une rangée du milieu de l'isolation avec ou sans couvert

Concernant l'effet de la conductivité électrique sur la tension d'expulsion des gouttes d'eau (**Fig. I. 16**), les mêmes auteurs [6 et 25] ont remarqué la décroissance de la tension d'expulsion avec l'augmentation de la conductivité jusqu'à 1 mS/cm, au-delà de cette valeur, la tension d'expulsion demeure pratiquement constante. Selon d'autres auteurs [6 et 25], 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 Z. Adnani et K. Benamara [6] et S. Iouknane et C. Meziane [25], la tension d'évacuation des gouttes d'eau sans couvert isolant est plus grande qu'avec. De plus, cette tension d'éviction est plus faible sous une polarité positive que sous une polarité négative de la tension continue. Ils rajoutent, l'allure de la courbe $U_{DC} = f(C_k)$, illustrée par la figure I. 17, est 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 croissance 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. Cela 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 petite avec couvert et elle est plus grande sous polarité négative de la contrainte de tension appliquée.

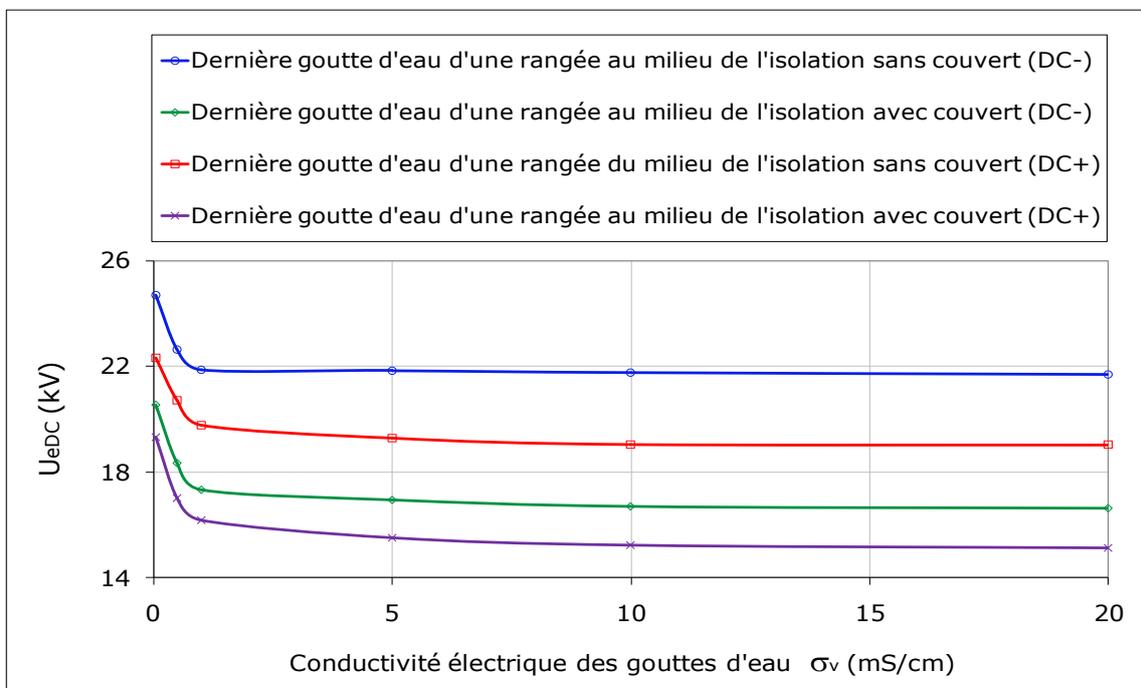


Fig. I. 16: $U_{DC} = f(\sigma_v)$ pour une goutte d'eau d'une rangée du milieu de l'isolation avec ou sans couvert

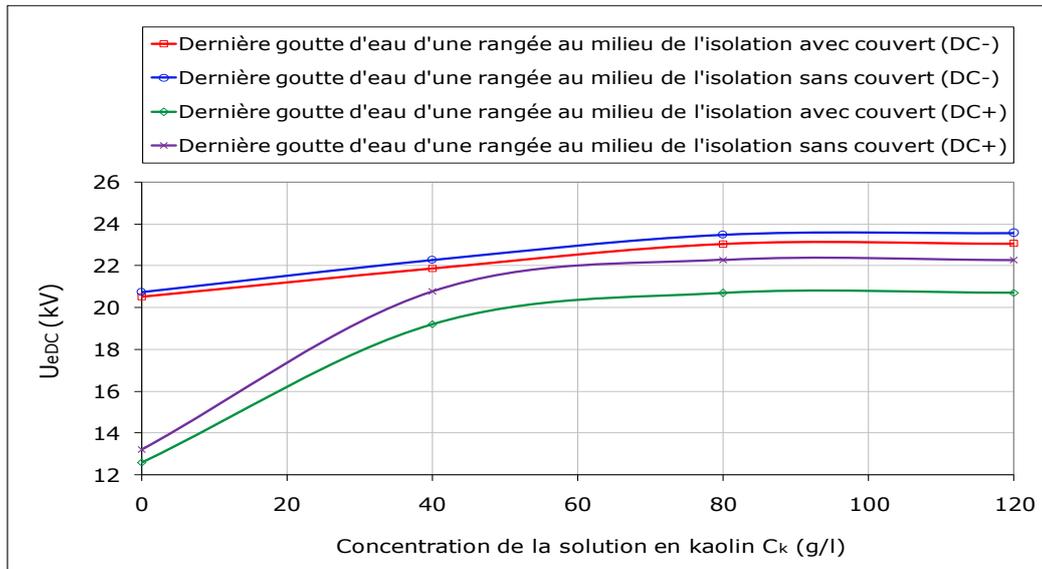


Fig. I. 17: $U_{DC} = f(C_k)$ pour une goutte d'eau d'une rangée du milieu de l'isolation avec ou sans couvert

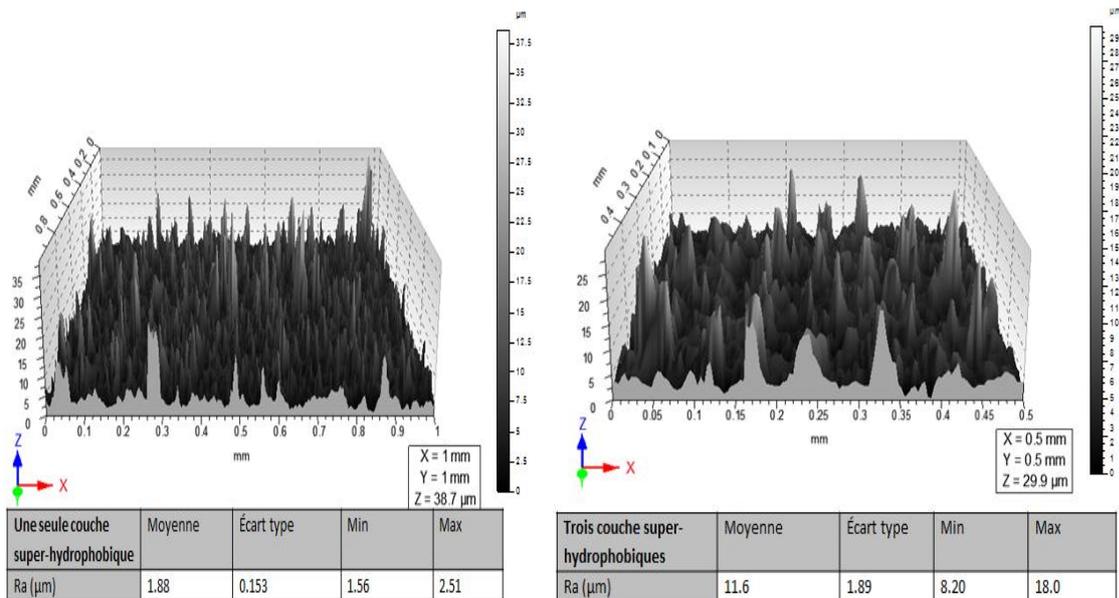


Fig. I. 18: Images topographiques 3D de la surface obtenue par profilométrie: (a) une seule couche super hydrophobe. (b) trois couches super hydrophobes [8]

Afin d'améliorer la performance électrique sous des conditions de pollution de certains revêtements pouvant être appliqués aux isolateurs externes, F Z. Madidi [8] ont effectué des travaux expérimentaux sur leurs propriétés superhydrophobes et diélectriques. Elle a élaboré en premier temps revêtements superhydrophobes via une méthode simple et efficace [8].

Elle a commencé d'abord par le choix de la distance de pulvérisation, puis elle a étudié l'effet de différents paramètres à savoir : le temps de pulvérisation, la concentration de TiO_2 ainsi

que l'introduction des nanoparticules dans le polymère. Elle a préparé deux systèmes de revêtement : mono et multicouches. Elle a étudié la morphologie et la stabilité des revêtements préparés à l'aide du profilomètre confocal CHR 150-L, et elle a analysé la rugosité de leur surface.

Les images représentées sur les figures I. 18a et 18b montrent un état de surface moins perturbé pour le revêtement monocouche et multicouches (avec une rugosité maximale).

A partir de ces images, l'analyse quantitative indique que la rugosité moyenne (R_q) est de 1,88 μm pour l'échantillon a. Ce dernier qui est composé d'une seule couche, tandis qu'elle augmente à 11,6 μm pour l'échantillon b composé de trois couches [8].

Ils ont effectué des études sur la stabilité de surfaces à une couche et trois couches super hydrophobes contre la dégradation en milieu acide et basique (l'eau potable).

Dans un milieu acide ils ont analysé des échantillons révèlent un revêtement avec une seule couche superhydrophobe (Fig. I. 19a et 19b) et des échantillons et revêtus avec trois couches superhydrophobes (Fig. I. 19c et 19d). Les échantillons ont été analysés par microscope électronique à balayage. Ces figures montrent l'état des échantillons avant et après 40 jours d'immersion dans la même solution respectivement.

Les résultats obtenus montrent que les échantillons traités avec trois couches superhydrophobes sont beaucoup moins affectés par l'acide que les échantillons traités avec une seule couche [8].

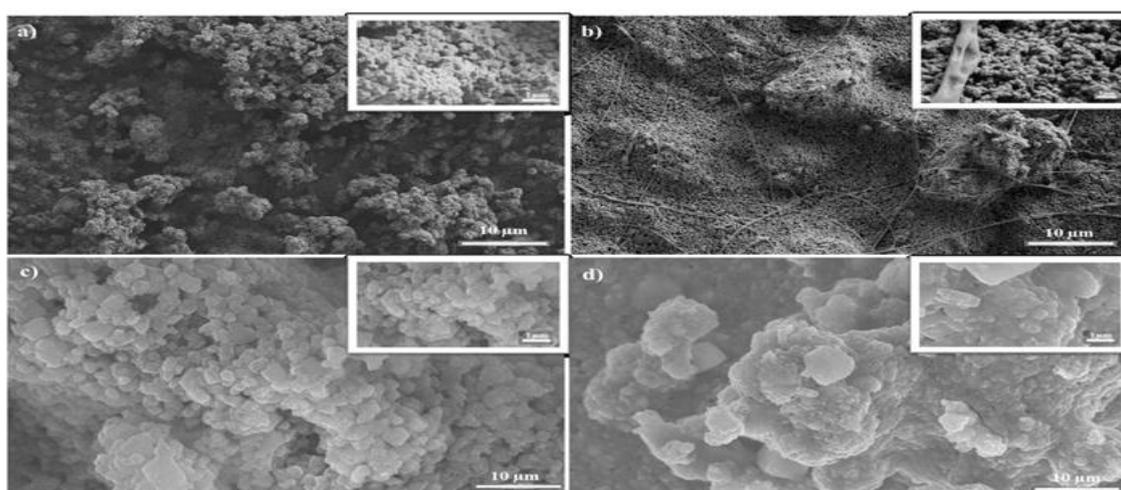


Fig. I. 19 : Effet du nombre de couches sur la stabilité des revêtements superhydrophobes à 10% de TiO_2 en milieu acide. a) une seule couche avant l'immersion ; b) une seule couche après l'immersion ; c) trois couches avant l'immersion ; d) trois couches après l'immersion

[8]

Après immersion des échantillons dans l'eau pendant 240 h et elle a obtenus les résultats présentés dans le tableau I. 3:

Temps (h)	CS/TiO ₂ - Angle de contact d'une couche superhydrophobe	CS/TiO ₂ - Angle de contact de trois couches superhydrophobes
0	160,0° ± 2,26°	163,2° ± 3,65°
240	148,1° ± 2,54°	160,1° ± 4,74°

Tab. I. 3 : Angle de contact statique après 240 heures d'immersion dans l'eau potable [8]

Elle a été remarquée que l'échantillon à une couche superhydrophobe perdre la super hydrophobicité par contre l'échantillon à trois couches super hydrophobes, l'angle de contact diminuait mais il est toujours superhydrophobe.

L'échantillon CS/TiO₂ multicouches a été placé dans l'enceinte de vieillissement accéléré. Aux intervalles réguliers, l'échantillon a été retiré et caractérisé par l'angle de contact statique avant d'être remis à nouveau dans le QUV. La durée d'exposition des échantillons de 212 heures au rayonnement UV.

Les comportements en mouillabilité des surfaces traitées par le rayonnement UV et la condensation de l'humidité pour le revêtement composite (CS/TiO₂), ont été résumés en figure I. 20.

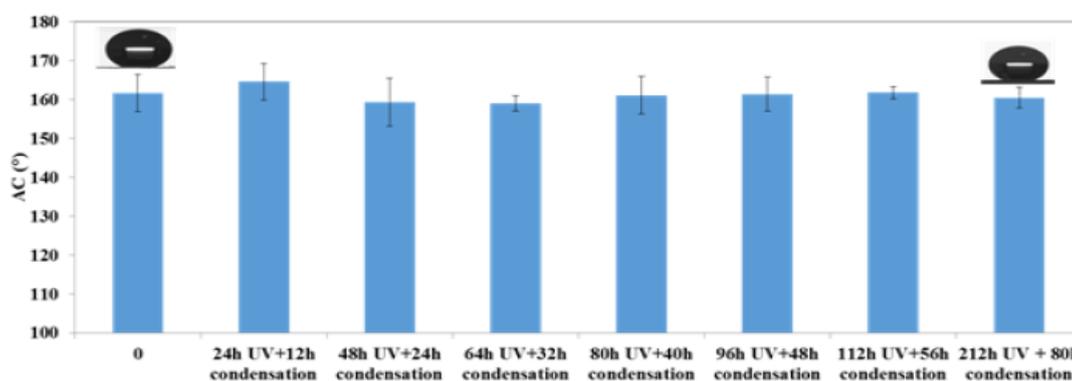


Fig. I. 20: Variation de l'angle de contact statique fonction de l'exposition au rayonnement UV + condensation d'humidité [8]

La force de pelage est donnée dans le tableau I. 4. Les conclusions qu'ils ont retirées:

L'augmentation du nombre de couches engendre une amélioration de la ténacité;

Les échantillons aux multicouches possèdent une meilleure rugosité;

Les échantillons aux multicouches sont plus stables mécaniquement et chimiquement.

Échantillons	Force de pelage (MPa)
Une seule couche superhydrophobe (CS/TiO ₂)	0,59 MPa
Trois couches superhydrophobes (CS/TiO ₂)	0,87MPa

Tab. I. 4: Force de pelage pour deux différents échantillons [8]

I. 10 Conclusion

Nous avons entamé ce chapitre avec des généralités et définitions. L'intérêt de ces définitions, est de pouvoir expliquer la superhydrophobicité. Les matériaux superhydrophobes peuvent être d'origine naturel ou synthétique, nous avons donné quelques exemples pour les deux types. Il existe plusieurs méthodes de production de matériaux superhydrophobes dont nous avons cité les plus répandues les domaines essentiels d'emploi des matériaux superhydrophobes. En fin, nous avons résumé quelques travaux réalisés sur la synthèse et la caractérisation des performances des matériaux superhydrophobes multicouches trouvés dans la littérature.

Chapitre II:

pollution des isolations électriques



II. 1 Introduction

La pollution des isolateurs est un facteur essentiel dont il faut tenir compte dans la conception des lignes électriques de haute tension. C'est l'un des facteurs déterminant la fiabilité et la qualité de transport de l'énergie électrique. En effet, en temps de pluie ou de brouillard, les dépôts polluants se fixent sur les surfaces isolantes et ils réduisent considérablement la résistivité superficielle et le contournement peut alors survenir.

L'humidification des dépôts polluants facilite la circulation d'un courant de fuite sur les surfaces isolantes en provoquant des échauffements locaux qui induit l'assèchement de la couche de pollution. Des arcs électriques prennent naissance à la surface isolante, en provoquant le contournement total des isolateurs, ce qui fait la tension de contournement d'un isolateur pollué dépend essentiellement de la conductivité des dépôts polluants, c'est-à-dire du degré de pollution, ainsi que la répartition de cette couche sur les surfaces des isolateurs.

II. 2 Définitions

II. 2. 1 Pollution

La pollution est une dégradation ou une altération de l'environnement. Elle est liée en général à activité humaine par diffusion directe ou indirecte de substances chimiques, physiques ou biologiques qui sont potentiellement toxiques pour les organismes vivants ou qui perturbent de manière plus ou moins importante le fonctionnement naturel des écosystèmes. Outre ses effets sur la santé humaine et animale, elle peut avoir pour conséquence la migration ou l'extinction de certaines espèces qui sont incapables de s'adapter à l'évolution de leur milieu naturel.

II. 2. 2 Salinité

La salinité est définie comme la concentration du sel dans l'eau. Elle correspond au quotient de la masse du sel et le volume de la solution, exprimée en kg/m^3 (ou en g/l (ppm)) [26].

II. 2. 3 Couche de pollution

La couche de pollution est toute couche de particules qui se dépose sur la surface de l'isolateur, elle peut contenir des sels et/ou des particules inertes. De ce fait, elle peut être conductrice en jouant le rôle d'un électrolyte [26].

II. 2. 4 Degré de pollution

C'est la quantité de salinité qui caractérise la pollution artificielle appliquée à l'isolateur en essai [26].

II. 3 Source de pollution

La nature de la pollution dépend de la situation géographique et climatique. Les sources de pollution des isolateurs les plus fréquemment observées peuvent être regroupées selon leur origine sont classées comme suit :

II. 3. 1 Pollution naturelle

Cette pollution peut être marine, désertique ou autre, provenant des dépôts de poussières (aérosols) véhiculés par les vents.

a. Pollution marine

Dans les installations en bordure de mer, les embruns portés par le vent se déposent progressivement sur les isolateurs, formant ainsi une couche de sel qui devient conductrice lorsqu'elle est humidifiée par le brouillard ou simplement par condensation. Un courant de fuite s'établit alors à travers la couche superficielle et des arcs électriques peuvent prendre naissance [27].

b. Pollution désertique

Dans les régions désertiques, les fréquentes tempêtes de sables déposent progressivement sur les surfaces des isolateurs une couche de pollution contenant des sels. Une fois humidifiée, cette couche devient beaucoup plus conductrice. Un courant de fuite apparaît brusquement accompagné d'arcs partiels pouvant conduire à un contournement total de l'isolateur [28].

II. 3. 2 Pollution industrielle

Ce type de pollution est fréquent dans les zones industrielles surtout à proximité des usines ou des entreprises de production éjectant des fumées (raffinerie, cimenterie,.....).

Par ailleurs les gaz d'échappements (centrales thermiques) et les engins utilisés en agriculture contribuent aussi aux dépôts observés à la surface des isolateurs.

En présence d'une humidité intense, les sels contenus dans ces polluants réduisent considérablement la résistivité superficielle des isolateurs et le contournement peut parfois avoir lieu [27].

II. 3. 3 Pollution mixte

C'est le type de pollution le plus fréquent et le plus sévère pour l'exploitation des ouvrages électriques. La pollution mixte résulte de la combinaison entre les différents types de

pollution (cités en haut), comme par exemple les pollutions marines et industrielles lorsque des installations industrielles sont situées en bord de mer [28].

II. 4 Méthodes de mesure de sévérité du degré de pollution d'un site

II. 4. 1 Conductivité électrique des couches de pollution [29]

La méthode est basée sur la mesure de la conductivité d'un dépôt polluant à l'aide d'un conductimètre à sonde mobile (**Fig. II. 1**).



Fig. II. 1: Photo d'un conductimètre à sonde mobile

La sonde est composée essentiellement d'une tête qui est constituée de deux électrodes, un poignet et le câble de liaison entre la sonde et l'appareil de mesure. Il existe plusieurs types se distinguant par l'humidification sonde qui se de la pollution de la géométrie des électrodes. Les ondes à électrodes linéaires et planes sont illustrées par les figures **II. 2 et II. 3**.

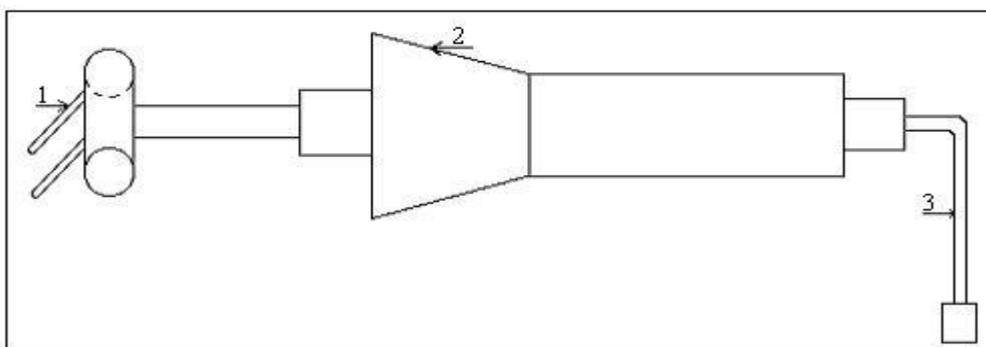


Fig. II. 2: Sonde à électrodes linéaires (1: électrode linéaire à extrémités arrondies 2: poignée de la sonde, 3: câble de liaison avec le conductimètre)

Dans le cas de la sonde à électrodes linéaires, l'humidification du dépôt de polluant est réalisée à l'aide de l'eau distillée. Elle doit être effectuée de telle sorte qu'il n'y ait pas d'écoulement de l'eau pulvérisée sur la surface polluée. Après humidification de la surface contaminée, des mesures peuvent être effectuées sur différents points de la surface isolante.

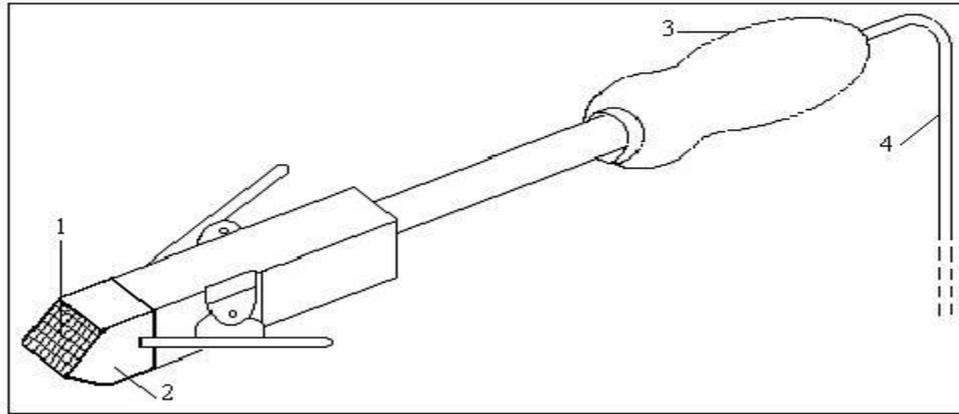


Fig. II. 3: Sonde à électrode planes avec papier absorbant (1: Tête de la sonde, 2: électrodes planes, 3 : poignée de la sonde, 4 : câble connexion au conductimètre

II. 4. 2 Densité de dépôt de sel équivalent DDSE [27]

La DDSE est utilisée comme un paramètre de base pour évaluer le comportement d'un isolateur sur un site. C'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 d'eau.

La densité du dépôt de sel équivalent est donnée comme suit :

$$DDSE = S_a \frac{V}{S} \quad (\text{II.1})$$

Telle que :

V est le volume de la suspension en cm³;

S est la surface nettoyée en cm²;

S_a est la salinité exprimé en kg/m³.

II. 4. 2. 1 Densité de dépôt non soluble DDNS [27]

Elle correspond à la quantité de produit non soluble présent dans une couche de pollution. La détermination de la DDNS s'effectue comme suit :

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 et pesé.

La DDNS peut être calculée par la formule suivante :

$$DDNS = 1000 \frac{m_f - m_i}{A} \quad (\text{II.2})$$

Où :

DDNS est la densité de dépôt non soluble ;

m_f : est la masse du papier filtre contenant la pollution après séchage en g ;

m_i : est la masse initiale du papier du papier filtre en g;

A : est la surface lavée de l'isolateur en cm^2 .

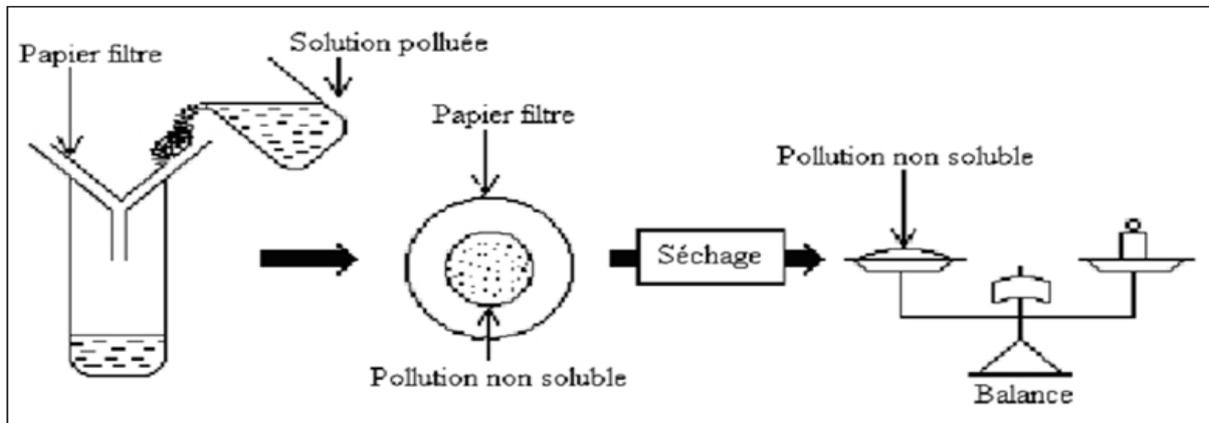


Fig. II. 4: Schéma a procédé de mesure de la DDNS

II. 5 Influence des facteurs climatiques sur les isolateurs pollués [30]

La tenue électrique d'isolateurs dépend de plusieurs facteurs météorologiques et parmi eux on distingue :

II. 5. 1 Vent

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

II. 5. 2 Pluie

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

II. 5. 3 Humidité

L'humidification accroît la conductivité électriques des agents polluants déposés à leur surface et entrainer par conséquent la diminution de leur tenue.

II. 5. 4 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 isolateurs contaminés 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. 6 Méthode de simulation de pollution en laboratoire [27]

II. 6. 1 Essai sous pollution artificiel

Afin de comprendre l'effet de la pollution sur le fonctionnement des isolateurs électriques, des conditions de pollution sont reproduites en laboratoire. Ils consistent de reproduire en laboratoire les environnements de la pollution naturelle. Actuellement, parmi les méthodes d'essais normalisées utilisées en laboratoire on trouve : les méthodes de la couche solide, la méthode du brouillard salin et la méthode de la pollution liquide.

II. 6. 2 Méthode de la couche solide

Comme son nom l'indique, la méthode de la couche solide, le polluant est un solide constitué de chlorure de sodium (NaCl) piégé dans un liant inerte. Le polluant solide recouvre la surface isolante par pulvérisation. La conductivité de cette suspension est réglée par addition d'une quantité définie du chlorure de sodium. Dans ce cas la sévérité peut être définie soit par la densité de dépôt de sel en mg/cm², si l'humidification s'effectue après application de la tension (méthode du brouillard à vapeur), soit par la conductivité de la couche polluante si l'humidification a lieu avant l'application de la tension.

II. 6. 3 Méthode du brouillard salin

La méthode de brouillard salin est inspirée de la pollution marine. L'isolateur soumis à la tension d'essais, est placé dans un environnement du brouillard salin (avec un peu de matière insoluble (sel)). Le taux de salinité du brouillard définit la sévérité.

D'après la classification des sites pollués, les valeurs de salinités appliquées sont choisies selon une progression allant de 2.5 à 160 kg/m³.

II. 6. 4 Méthode de pollution liquide

Dans cette méthode le polluant est constitué d'eau, de craie (CaCO₃) et de méthylcellulose ou de kaolin. Il est appliqué sur la surface de l'isolateur avant l'essai. Après quelques minutes d'égouttage, la tension d'essai est appliquée à l'isolateur sans humidification supplémentaire ni séchage. La conductivité, comme pour la méthode de la couche solide, est ajustée par addition de chlorure de sodium (NaCl).

II. 7 Conséquence de la pollution

Quelle que soit la nature du dépôt de pollution accumulé progressivement sur les surfaces des isolateurs, son humidification provoque la formation d'une couche électrolytique, caractéristique du phénomène de pollution [31]. Ces cas peuvent se présenter selon les contraintes auxquelles l'isolateur est soumis :

II. 7. 1 Arc non localisé

On dit qu'un arc est non localisé, lorsque la surface d'un isolateur est amorcée par un arc et qui s'éteint rapidement pour se réamorcer à un autre endroit. Ce phénomène ne cause pas de dommages pour l'installation, malgré l'apparition de courant de fuite à la surface de l'isolateur [31].

II. 7. 2 Arc fixe

L'arc se fixe sur la surface de l'isolateur, soit en s'y maintenant (courant continu), soit en s'y réamorçant au même endroit (courant alternatif). Il peut provoquer une dégradation de l'isolation par son effet thermique [31].

II. 7. 3 Contournement des surfaces isolantes

II. 7. 3. 1 Contournement d'une surface isolante superhydrophobe sous DC [6 et 25]

Le processus de contournement d'une surface en silicone placée horizontalement sous DC positif contient deux étapes : la coalescence de gouttelettes d'eau (**Figs. II. 5a, 5b, 5c et 5d**) et le contournement (**Fig. II. 5e**) de l'isolation. Après l'application de la tension, les petites gouttelettes, se coalescent et forment de grosses gouttelettes. L'élévation de la contrainte de tension entraîne l'augmentation du volume de ces grosses gouttelettes d'eau sur la surface. 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'isolateur.

Le phénomène de contournement d'une surface superhydrophobe délimitée par deux électrodes pleines sous DC négatif est illustré par la **figure II. 6**.

Les figures **II. 6b, II. 6c, II. 6d, II. 6e et II. 6f**, montrent qu'en quittant la surface du matériau sous l'action d'un champ électrique, les premières gouttes d'eau viennent s'accrocher respectivement sur les électrodes HT et terre. Suite à leur accumulation et leur effilement avec la croissance du champ électrique, elles réussissent, en compagnie des autres gouttes non encore évacuées ou celles refoulées par les électrodes, à raccourcir au maximum la ligne de

fuite sèche de l'isolation, ce qui engendre dans un premier temps la formation de décharges électriques partielles entre les filets d'eau partiels, qui, en se développant avec l'augmentation de la tension appliquée, finissent par entraîner le contournement du matériau.

Contrairement à la figure II. 6, la figure II. 7 montre une évacuation totale des gouttes d'eau et l'absence de contournement de l'isolation. Ceci est favorable pour la conservation de la superhydrophobicité de la surface du matériau considéré [25].

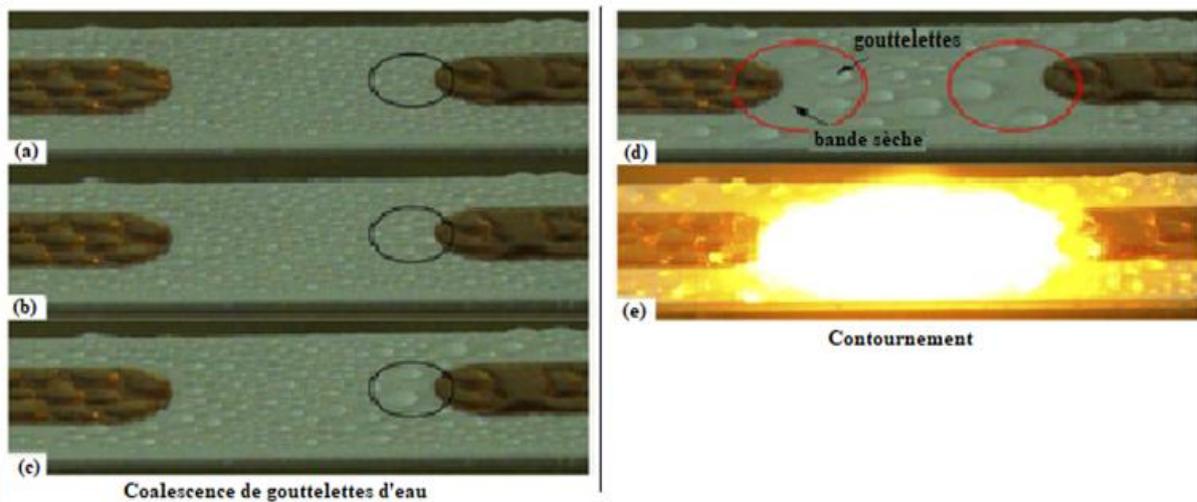


Fig. II. 5 : Processus de contournement d'une surface en silicone superhydrophobe en position horizontale et recouverte de gouttes d'eau (a – c: Coalescence de gouttelettes d'eau sous une tension croissante, d: Coalescence de gouttelettes d'eau et formation de multiples zones sèches sur la surface inter-électrode, e: contournement de l'isolation)

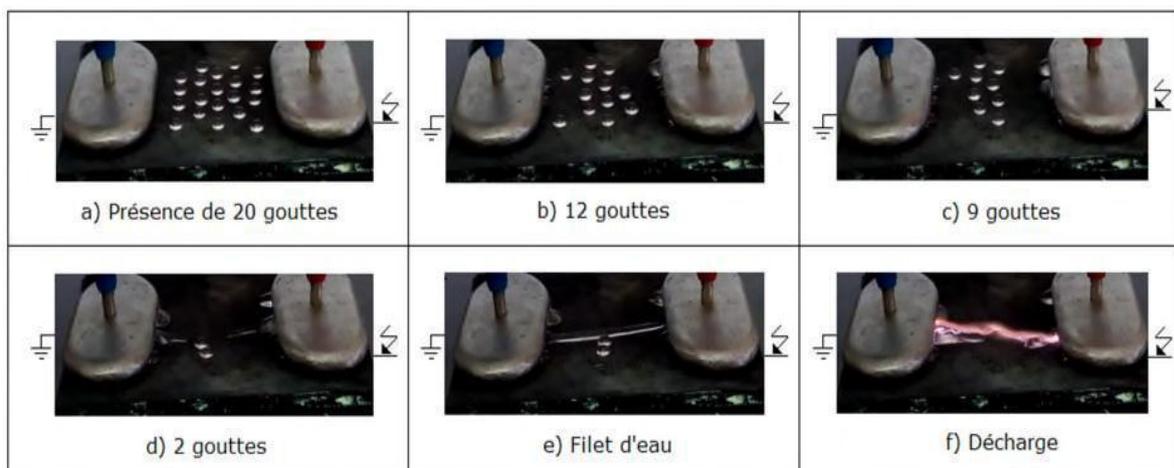


Fig. II. 6: Expulsion partielle des gouttes d'eau de la surface de l'isolation à électrodes pleines et contournement de celle-ci ($V_d = 40 \mu\text{l}$, $m_k = 0 \text{ g/l}$, $\sigma_v = 10 \mu\text{S/cm}$)

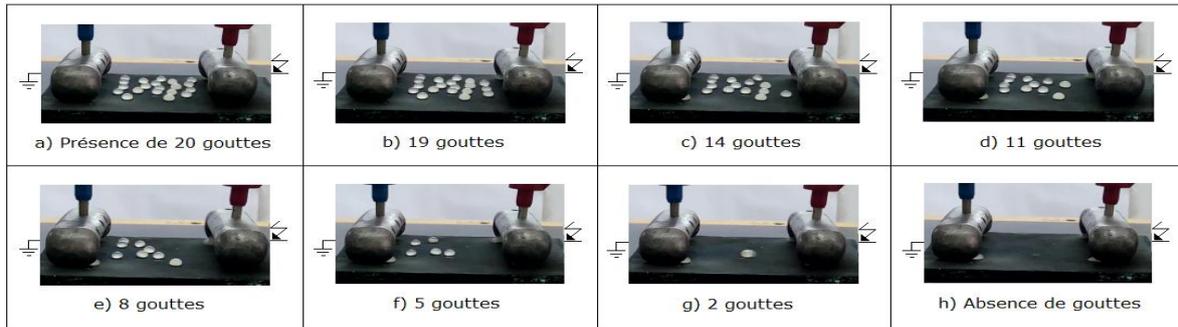


Fig. II. 7: Etape d’expulsion des gouttes d’eau de 40 g de masse de kaolin recouvrant la surface de l’isolation superhydrophobe

II. 7. 3. 2 Contournement d’une surface isolante hydrophile

- **Tension continue positive [32]**

Le contournement d’une surface hydrophile délimitée par deux électrodes planes mise sous conditions de pollution et sous tension continue positive est régi par deux arcs électriques en série, dont l’un est issu du plan sous haute tension et l’autre du plan mis à la terre. Chacun de ces deux arcs est le résultat de l’évolution de plusieurs décharges électriques en parallèle au niveau de chacune des électrodes planes suscitées dont le nombre restant au moment du contournement de l’isolation est fonction de la largeur de ces deux plans. Il est à signaler que les décharges positives sont plus longues, intenses et rapides par rapport aux décharges négatives (**Fig. II. 8**).

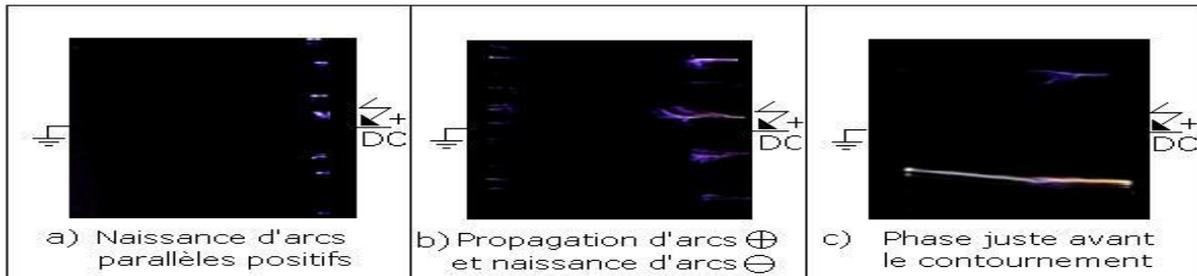


Fig. II. 8: Phases de contournement d’une surface hydrophile plan-plan polluée sous tension continue positive

- **Tension continue négative [17]**

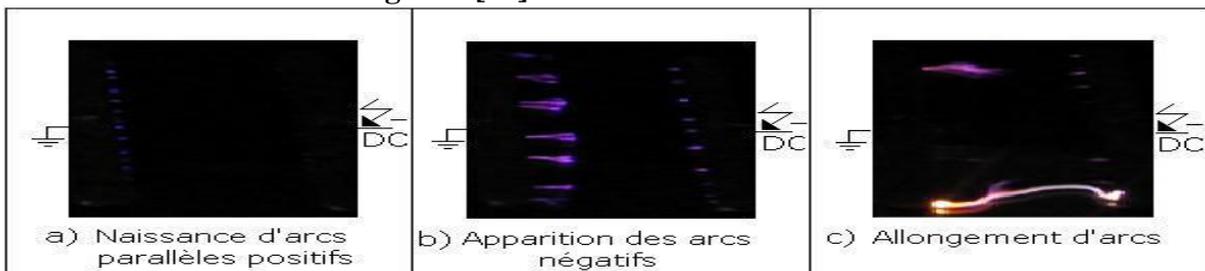


Fig. II. 9: Phases de contournement d’une surface isolante contaminée délimitée par deux plans

Le contournement d'une surface hydrophile, délimitée par deux électrodes planes mise sous conditions de pollution et sous tension continue négative, est régi par l'apparition des arcs électriques parallèles brûlant simultanément au-dessus de deux zones sèches connectées en série. Ces deux zones apparaissent très fréquemment au sein des électrodes haute tension et terre. Il est à remarquer que les arcs formés au niveau de l'électrode mise à la terre sont très lumineux et à élancement plus élevée que ceux issus de l'électrode haute tension. La différence de taille entre ces deux types d'arcs est justifiée par le fait que la naissance et le développement des décharges électriques parallèles positives ont eu lieu bien avant celles de signe contraire (**Fig. II. 9**).

II. 7. 3. 3 Contournement d'une surface isolante hydrophobe inclinée sous arrangement en ligne droite

- Tension continue positive [32]

La figure **II. 10** illustre le contournement d'une surface isolante inclinée et recouverte de gouttes d'eau. Celui-ci est subordonné à une évolution successive de la décharge électrique pratiquement sur la largeur totale occupée par les cinq rangées pour provoquer finalement le court-circuit de l'isolation. Ce phénomène diffère évidemment de celui engendrant le contournement de la même isolation avec gouttes d'eau en position horizontale.

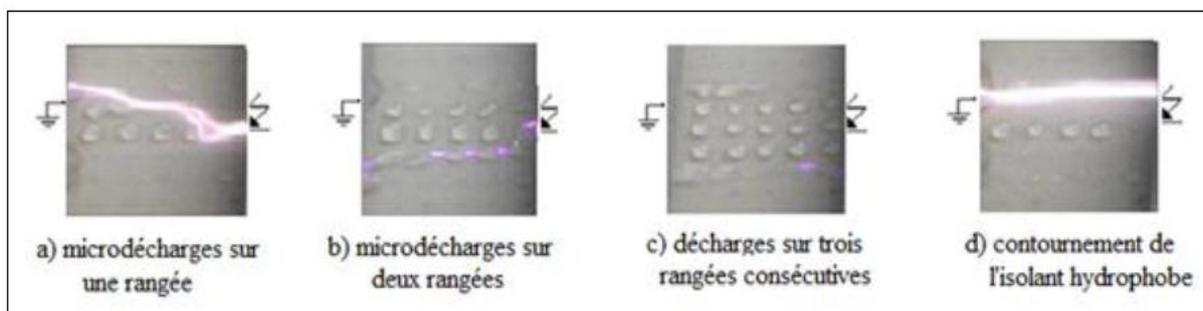


Fig. II. 10: Contournement d'une isolation en silicone hydrophobe sous inclinaison critique ($V_d = 45 \mu\text{l}$, $\sigma_v = 180 \mu\text{S/cm}$, $\alpha_{cr} = 40^\circ$)

Avant l'application de la tension, la première déformation des gouttes d'eau est d'abord engendrée par l'action de leur propre poids et la force de frottement. Sous l'effet de la contrainte de tension, celles-ci continuent à se déformer et à se déplacer en direction de l'électrode mise à la terre. Pendant ce mouvement, les gouttes proches de l'électrode sous tension, plus rapides, arrivent à joindre celles, lentes et éloignées de l'électrode active. Leur jonction peut donner naissance à un filet d'eau partiel en forme d'un ver de terre à diamètre variable et dont l'extrémité en regard de l'électrode sous tension est de forme conique. A ce

moment-là, une décharge électrique émanant de l'électrode haute tension, s'amorce dans l'intervalle d'air entre celle-ci et l'extrémité de ce filament et relie celui-ci au suivant (**Fig. II. 10a**). D'autres décharges électriques s'ensuivent en connectant entre eux les filaments d'eau subséquents (**Fig. II. 10b**). Généralement le filament d'eau partiel crée au voisinage de l'électrode active s'allonge vers ceux formés aux alentours de l'électrode terre.

Parallèlement, la distance dans l'air séparant l'extrémité du premier filament de l'électrode active s'accroît à cause de son déplacement vers l'électrode terre. L'arc électrique précurseur, brûlant au-dessus de cette zone, finit par s'éteindre pour se réallumer au niveau d'une seule ou latéralement sur plusieurs rangées parallèles (**Fig. II. 10b** et **10c**) lui offrant de par leur déformation avancée des conditions de propagation plus favorables.

- Tension continue négative [17]

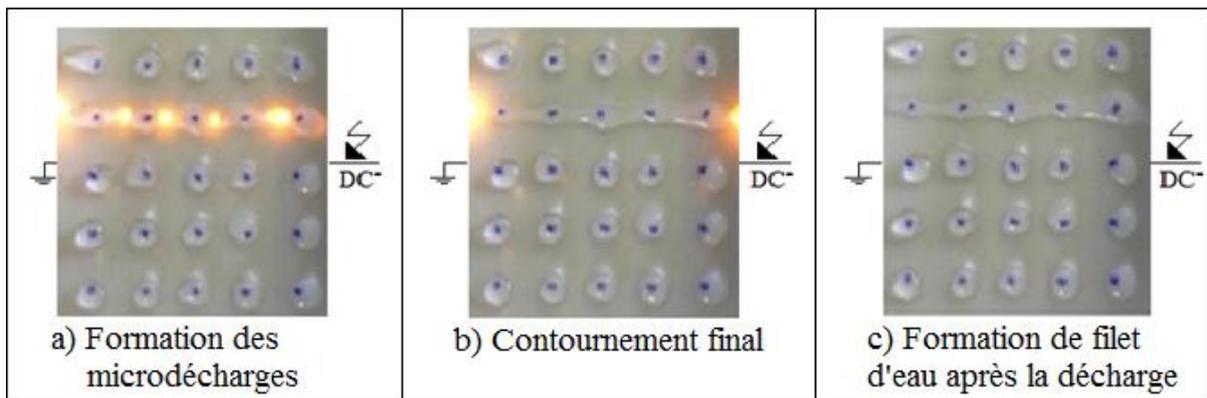


Fig. II. 11: Couleur jaune orange de la lumière émise par la décharge pour $\alpha = 0^\circ$, $\sigma_v = 7$ mS/cm et $V_{g1} = 45\mu\text{l}$

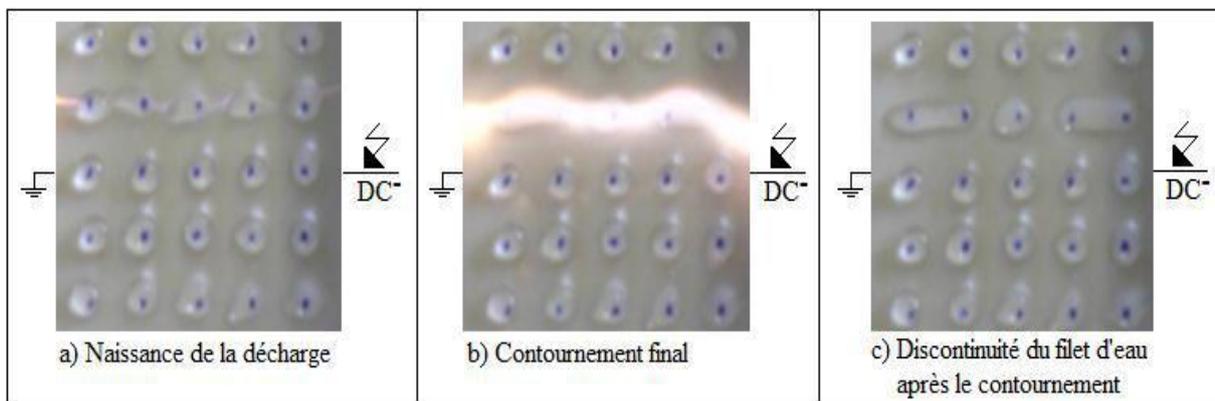


Fig. II. 12: Couleur blanche-rose de la lumière émise par la décharge pour $\alpha = 0^\circ$, $\sigma_v = 180$ $\mu\text{S/cm}$ et $V_{g1} = 45\mu\text{l}$

Les figures **II. 11** et **II. 12** expliquent les principales phases de contournement d'une surface horizontale en silicone recouverte de gouttes d'eau de 45 μl de volume et pour deux conductivités volumiques différentes (180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 7 mS/cm) et mise sous tension continue négative.

La différence de couleur émise par ces deux décharges est due probablement aux différentes longueurs d'ondes émises par les gouttes d'eau à divers degrés de salinité. Concernant le trajet de la décharge, il y'a discontinuité sur celui donné en figure **II. 12b** par rapport celui indiqué sur la figure **II. 11b**. Enfin le dégagement de chaleur est plus fort en figure **II. 11c** qu'en figure **II. 12c**. L'empreinte laissée par la décharge électrique de contournement sur la deuxième rangée de gouttes d'eau, est illustrée par les figures **II. 11d** et **II. 12d**. Il est à remarquer que le chemin de gouttes d'eau est plus discontinu lorsque la conductivité des gouttes d'eau est plus faible.

II. 8 Techniques de lutte contre la pollution [33]

L'augmentation du degré de pollution représente un risque immense pour les installations électriques. Pour cela plusieurs techniques de lutte contre la pollution sont utilisées. Nous allons résumer comme suit:

II. 8. 1 Allongement de la ligne de fuite

Cette méthode permet d'adapter le dimensionnement aux nouvelles conditions de pollution.

Deux techniques sont employées:

- Le changement de type d'isolation (pour rallonger la ligne de fuite): c'est une technique très couteuse et souvent impossible à réaliser en poste.
- L'utilisation de prolongateurs de ligne de fuite en matériaux polymère, qui sont collés sur surface des isolateurs existants.

II. 8. 2 Isolateurs plats

Les isolateurs à nervures ont la propriété d'accumuler moins de pollution que les isolateurs traditionnels et s'autonettoyant très bien sous l'effet du vent.

II. 8. 3 Graissage périodique

Par mesure économique, seuls les isolateurs de postes sont concernés. On utilise des graisses silicones. Grace à ses propriétés hydrophobes, la graisse protège temporairement les isolateurs.

II. 8. 4 Revêtement silicone

Cette méthode consiste à appliquer, par pulvérisation ou au pinceau, un caoutchouc silicone qui se vulcanise à température ambiante à la surface des isolateurs. Ce revêtement protège les isolateurs et améliore leurs tenues sous pollution.

II. 8. 5 Isolateurs composites

Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères. 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.

II. 8. 6 Nettoyage des isolateurs

Le nettoyage manuel et le lavage périodique hors tension sont fréquemment utilisés à travers le monde. Néanmoins, l'application de ces méthodes pose des problèmes majeurs à cause des interruptions de service, parfois assez longues. Pour éviter ces coupures, un lavage sous tension des isolateurs est réalisé à l'aide d'installations fixes ou mobiles. Dans les deux cas, il est effectué selon des règles strictes concernant la qualité de l'eau du lavage, le processus de lavage et les distances de sécurité, et ce afin d'éliminer tout risque de contournement pendant le lavage.

II. 9 Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons fait un aperçu sur la pollution des isolateurs ainsi que les effets néfastes qu'elle cause sur le fonctionnement. Nous avons cité différents types de polluants, des techniques utilisées pour l'évaluation de la pollution des isolateurs sur site et en laboratoire. Enfin, il existe des méthodes qui permettent de protéger les isolateurs dont nous avons donné les plus connus.

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 continue, ont mis en évidence un mode d'évacuation grupo-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 de l'ordre et du sens du mouvement de ces gouttes d'eau au moyen de la distribution de l'intensité du champ et potentiel électrique continue résultant au niveau de celles-ci à l'aide du logiciel COMSOL multiphysique 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 continue 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: Étapes de confection d'une isolation à multicouches superhydrophobes

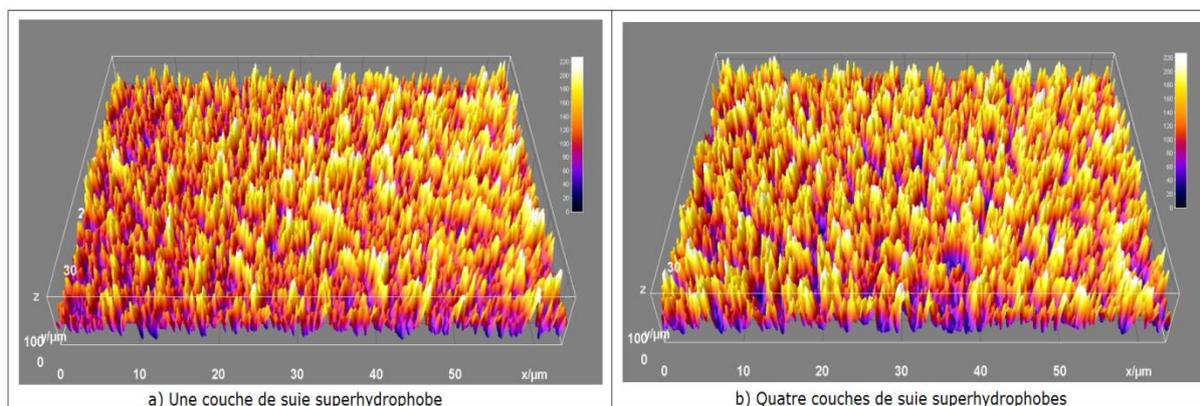


Fig. III. 2: Profil de l'isolation à une et quatre couches de suie superhydrophobes

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)

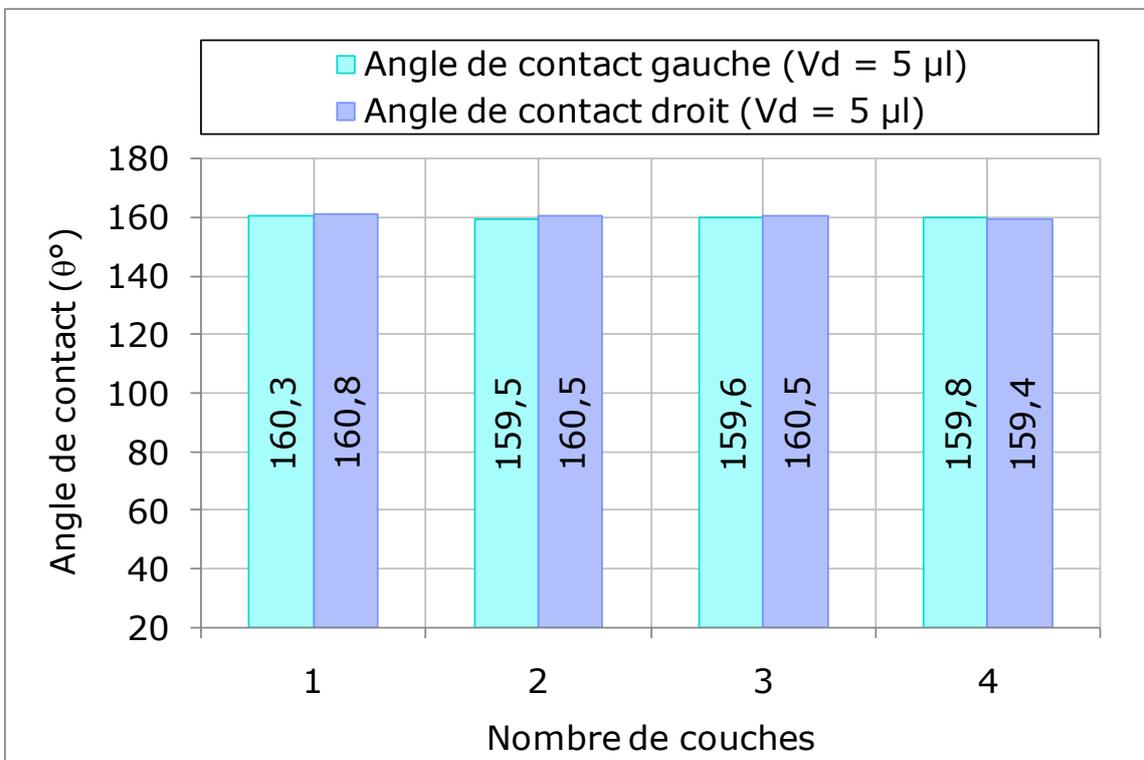


Fig. III. 4: $\theta = f(n_c)$ pour un volume de la goutte d'eau égal à 5 µl

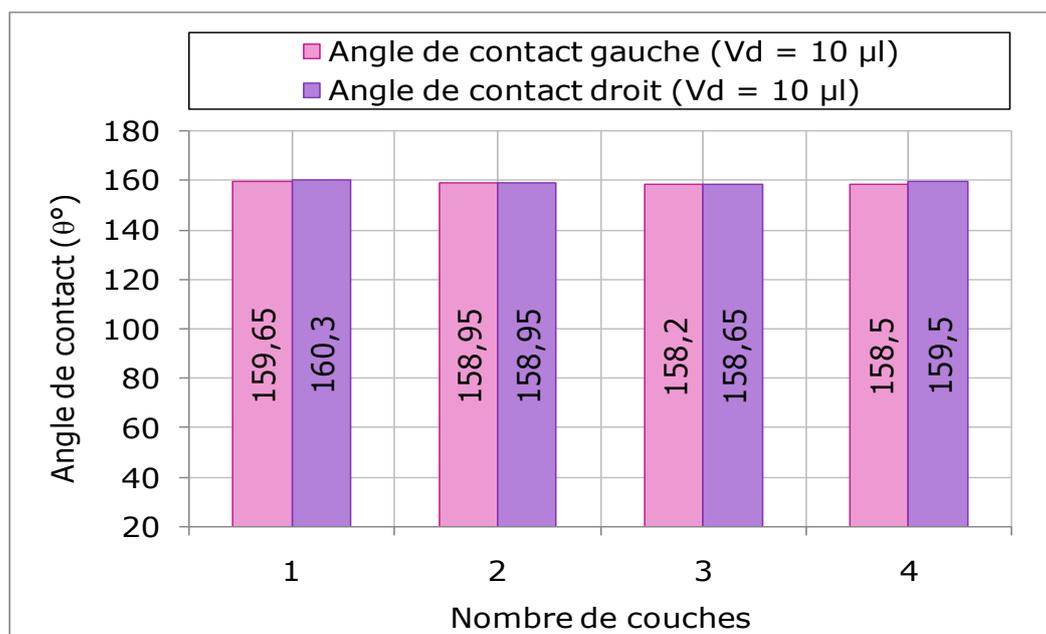


Fig. III. 5: $\theta = f(n_c)$ pour un volume de la goutte d'eau égal à $10 \mu\text{l}$

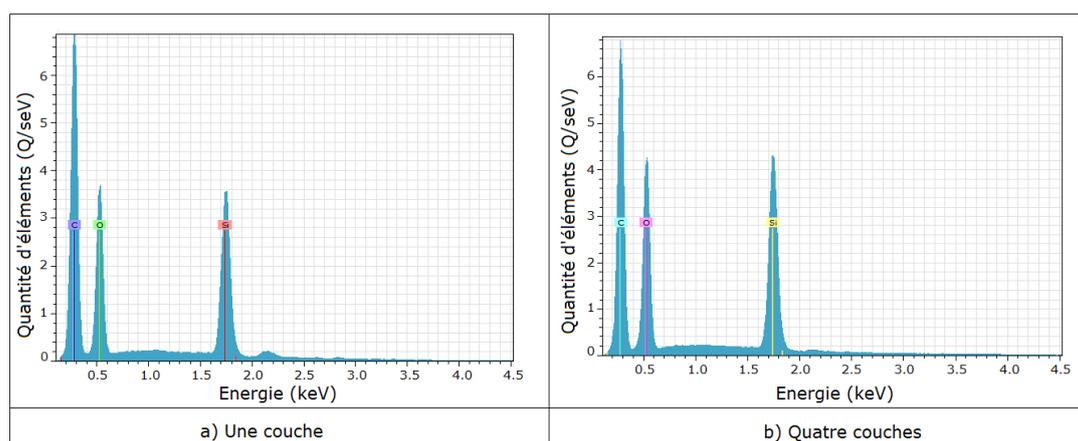


Fig. III. 6: Composition chimique de l'isolation superhydrophobe à base de suie

Les électrodes confectionnées lors des travaux antérieurs [6 et 25], 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 ultérieure. La ligne de fuite de l'isolation (L_c) délimitée par ces électrodes est prise égale à 4 ou 10 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 continue appliquée à l'isolation ont été pris en considération.

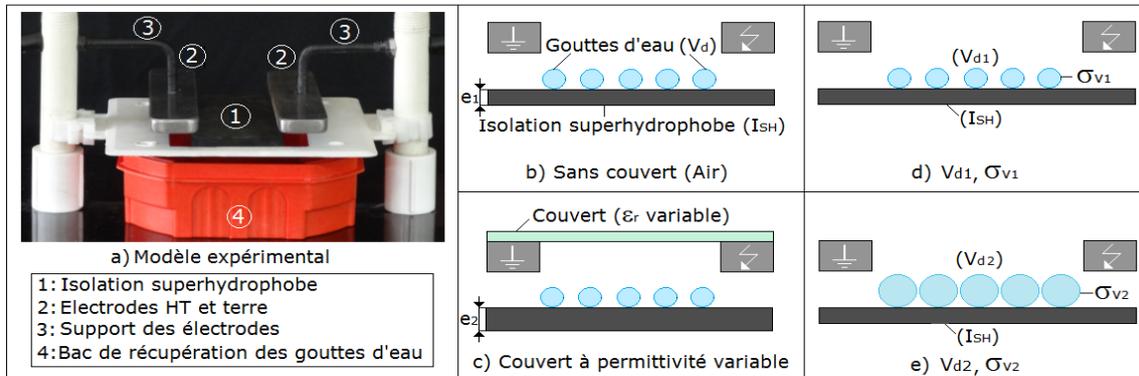


Fig. III. 7: Modèle expérimental et de simulation

III. 3 Logiciel de simulation du champ et potentiel électrique

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

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

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 Multiphysique. Le modèle géométrique utilisé est basé sur le modèle expérimental (**Fig. III. 7a**) étudié précédemment en référence [34]. 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 x 0,5) cm, celles de la couche superhydrophobe: (16 x 0,01) cm et celles du couvert isolant sont: (16 x 0,5) cm. Celles des électrodes planes sont: (3 x 1,2) cm, 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 du 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 [35] 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-Stokes. 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 les effets de forces dues respectivement à la pression, la viscosité et la force électrostatique exercées sur la goutte;
 - Le membre droit de la formule III.1 désigne l'accélération de la goutte sous ces trois forces.
- Pour la fréquence $f = 50$ Hz, la goutte garde sa forme sphérique pendant son mouvement [36 - 37] 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 d'eau sur la surface superhydrophobe de l'isolation [36, 38 et 39].

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 [34]:

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

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 [40]. 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.

Dans le cadre de la présente étude, le nombre maximal de gouttes d'eau déposées sur l'isolation superhydrophobe horizontale est égal 5. Ces gouttes d'eau sont arrangées en ligne droite perpendiculaire aux électrodes HT et terre. Cette rangée est placée au milieu de la surface de l'isolation (**Fig. III. 8b**).

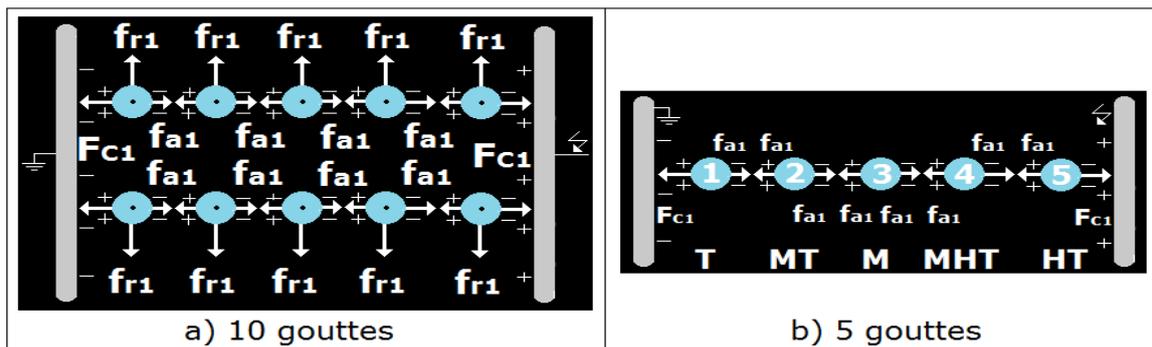


Fig. III. 8: Ensemble des forces électriques exercées sur un dépôt de 10 ou 5 gouttes d'eau sous polarité positive de la tension continue et sous arrangement en lignes droites (A_d) (F_{c1} : Force de Coulomb, F_{a1} : Force d'attraction mutuelle, F_{r1} : Force de répulsion mutuelle)

Dans le cadre de la présente étude, le nombre maximal de gouttes d'eau déposées sur l'isolation superhydrophobe horizontale est égal 5. Ces gouttes d'eau sont arrangées en ligne droite perpendiculaire aux électrodes haute tension (HT) et terre (T). Cette rangée est placée au milieu de la surface de l'isolation (**Fig. III. 8b**). La goutte 1 est déposée 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 notre étude, nous allons essayer de prédire le sens du mouvement des gouttes d'eau au moyen de la distribution du champ électrique le long d'une rangée de 5 gouttes d'eau reposant sur une isolation superhydrophobe. 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. 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_5 (HT); G_1 (T); G_4 (MHT); G_2 (MT) et G_3 (M). Cette séquence d'évacuation sous-entend que la goutte G_5 , qui génère un champ d'intensité plus élevée, part en premier lieu et se dirige vers l'électrode sous haute tension (HT). Ensuite, vient le tour de la goutte G_1 dont l'intensité du champ électrique est légèrement inférieure à celle de G_5 , mais largement supérieure à celle des autres, part donc en direction de l'électrode terre (T). Selon la valeur de l'intensité du champ résultant la goutte G_4 ($E_4 = 5.25$ 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 terre. Nous constatons l'apparition d'une séquence de mouvement quasi similaire (G_5 (HT); G_1 (T); G_4 (MHT); G_3 (M) et G_2 (MT)) pour une isolation 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 [6 et 25] indépendamment de la présence ou de l'absence de couvert de l'isolation (**Fig. III. 11**). 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**) quels que soient le nombre de gouttes déposées et le degré de couverture de l'isolation (**Fig. III. 13** et **III. 10**).

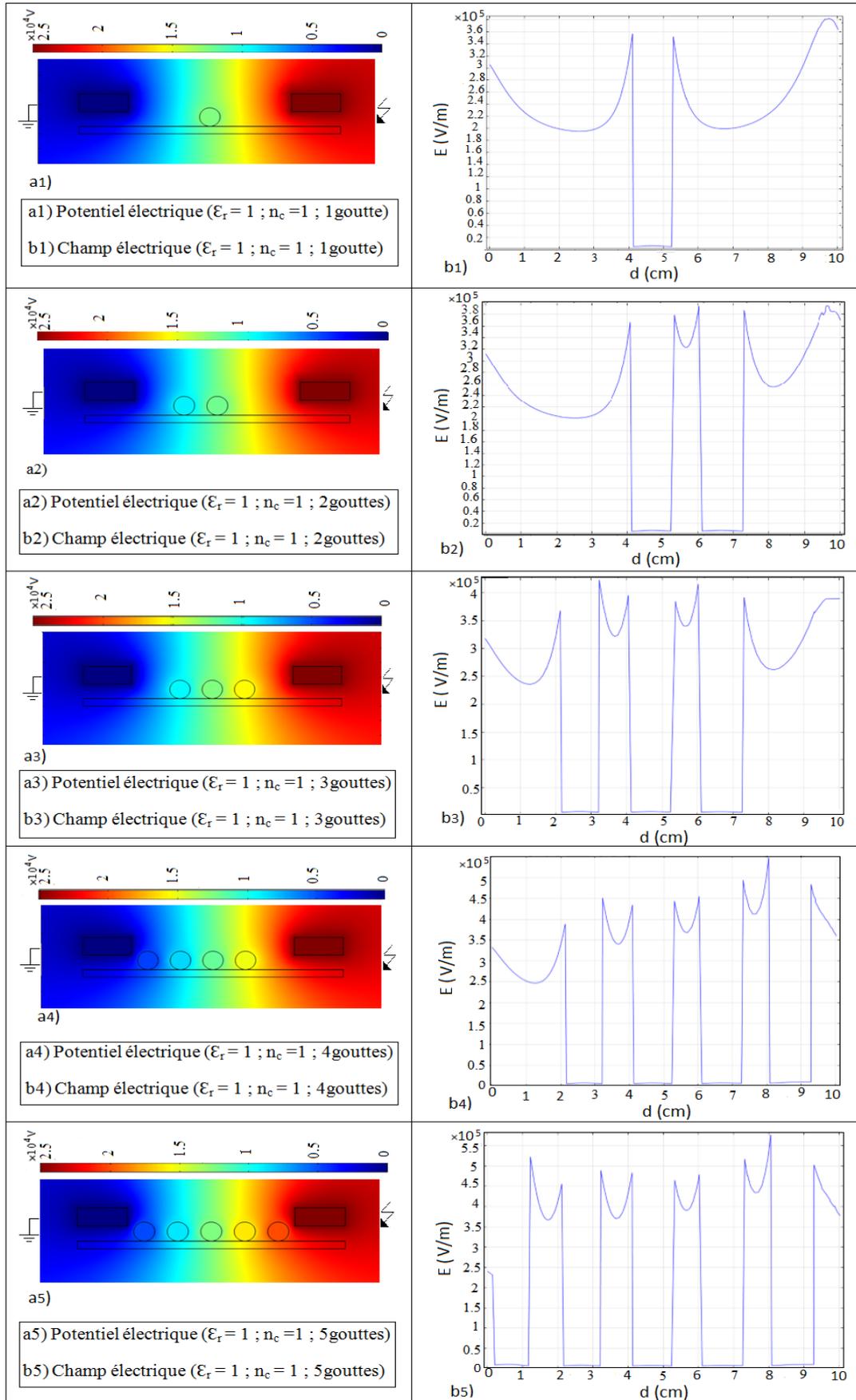


Fig. III. 9 : Répartition du potentiel et champ électrique sur un nombre de gouttes variable reposant sur une isolation à une couche ($\epsilon_r = 1 ; \sigma_v = 20 \mu\text{S/cm} ; V_d = 100 \mu\text{l} ; U_a = 25 \text{ kV}$)

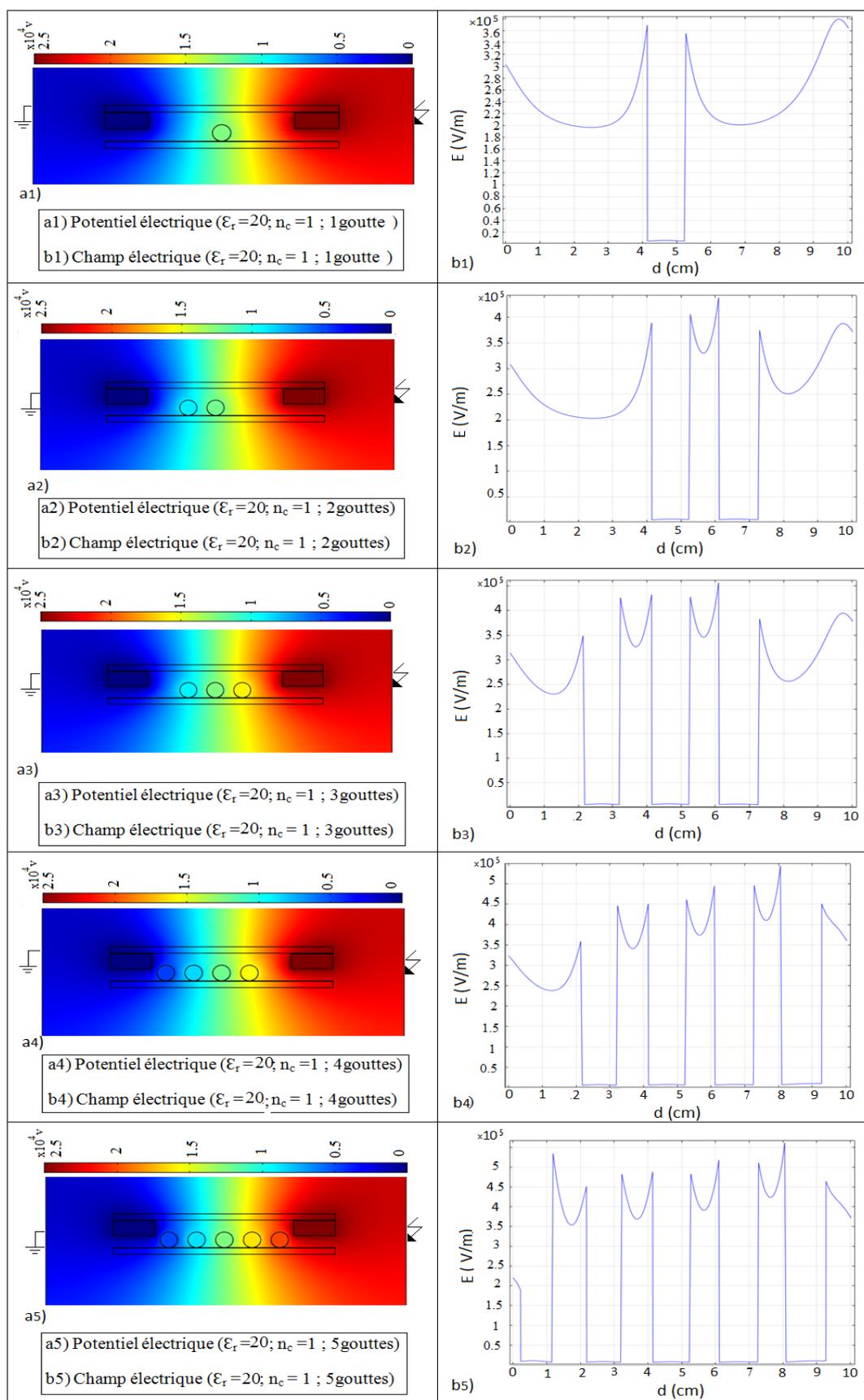


Fig. III. 10: Distribution du potentiel et champ électrique sur un nombre variable de gouttes déposées sur une isolation à 1 couche avec couvert ($\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100\mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)

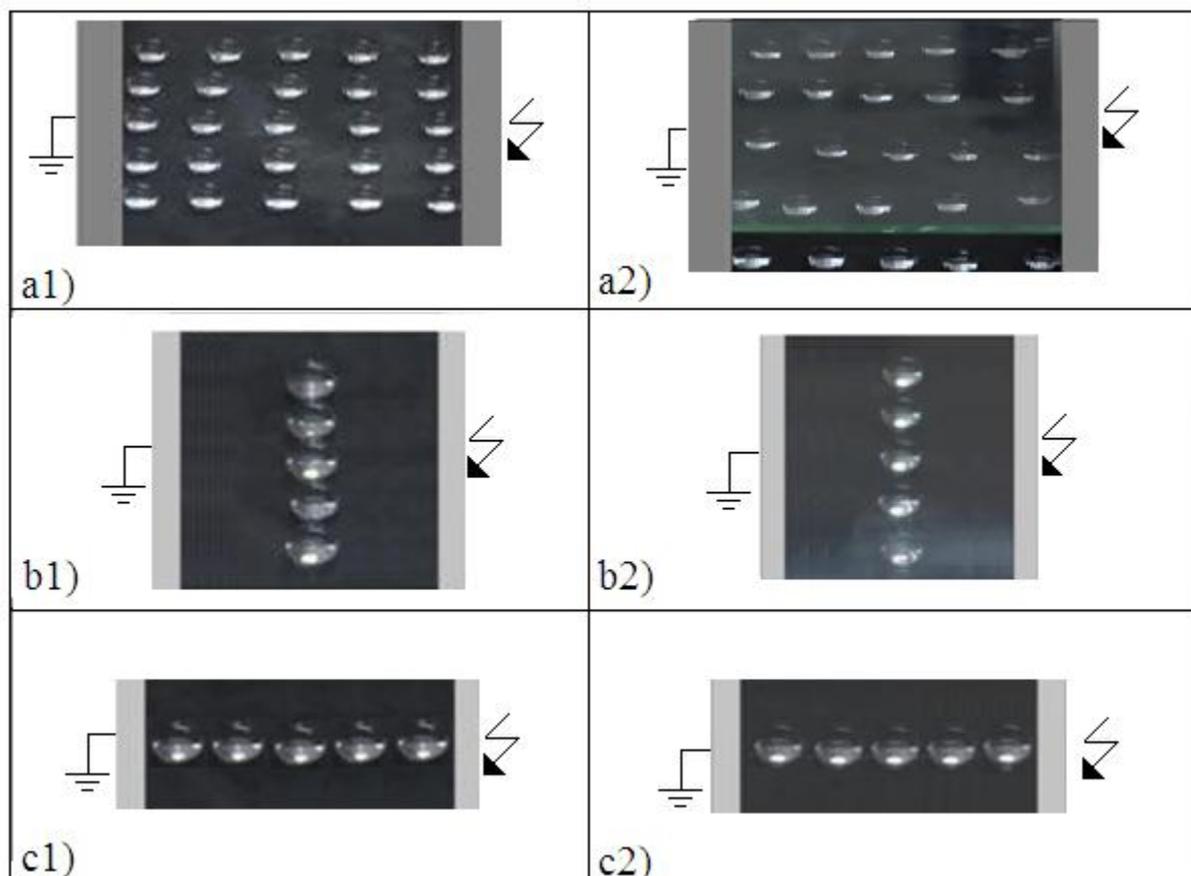


Fig. III. 11: Arrangement d'une multitude de gouttes d'eau sur une surface isolante superhydrophobe sous tension continue avec ou sans couverture diélectrique

- 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

Les figures **III. 14**, **III. 15**, **III. 16** et **III. 17** montrent l'évolution de l'intensité du champ et potentiel électrique résultant en fonction de la permittivité relative (ϵ_r) du couvert diélectrique pour un nombre de gouttes d'eau et de couches de suie superhydrophobe variable. Il en résulte un déclin très léger de l'intensité du champ électrique résultant avec l'élévation de la permittivité relative indépendamment du nombre de gouttes et de couches de l'isolation superhydrophobe. Il est à remarquer la similitude de l'effet du nombre de gouttes d'eau et de couches de suie superhydrophobe sur le champ et le potentiel électrique résultant dans ces figures que ce qui a été signalé précédemment. Ainsi l'effet du nombre sur la qualité de la rugosité de la surface de l'isolation s'avère en conformité avec les résultats de notre simulation [8].

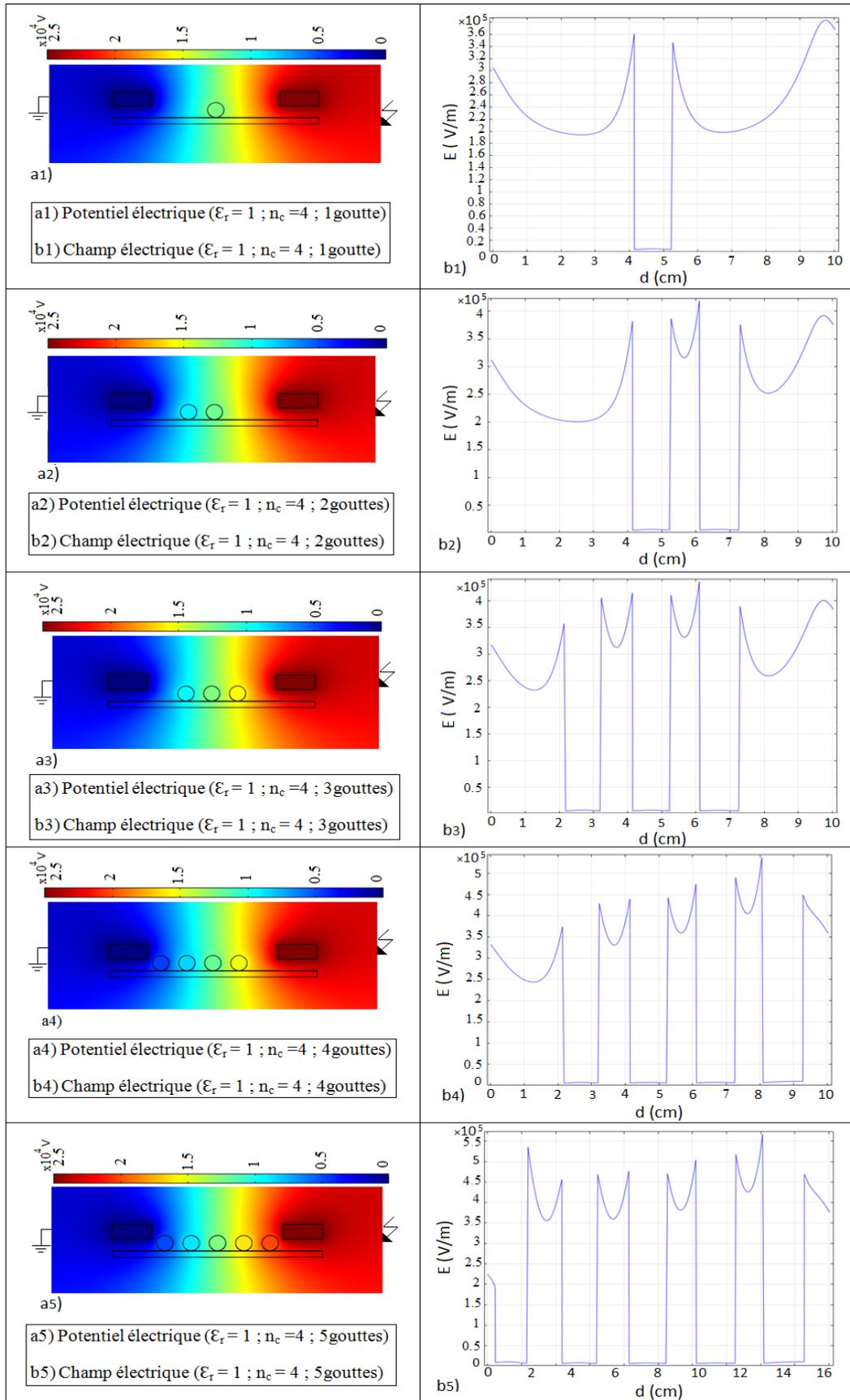


Fig. III. 12: Répartition du potentiel et champ électrique sur un nombre variable de gouttes reposant sur une isolation à 4 couches sans couvert ($\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100\mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)

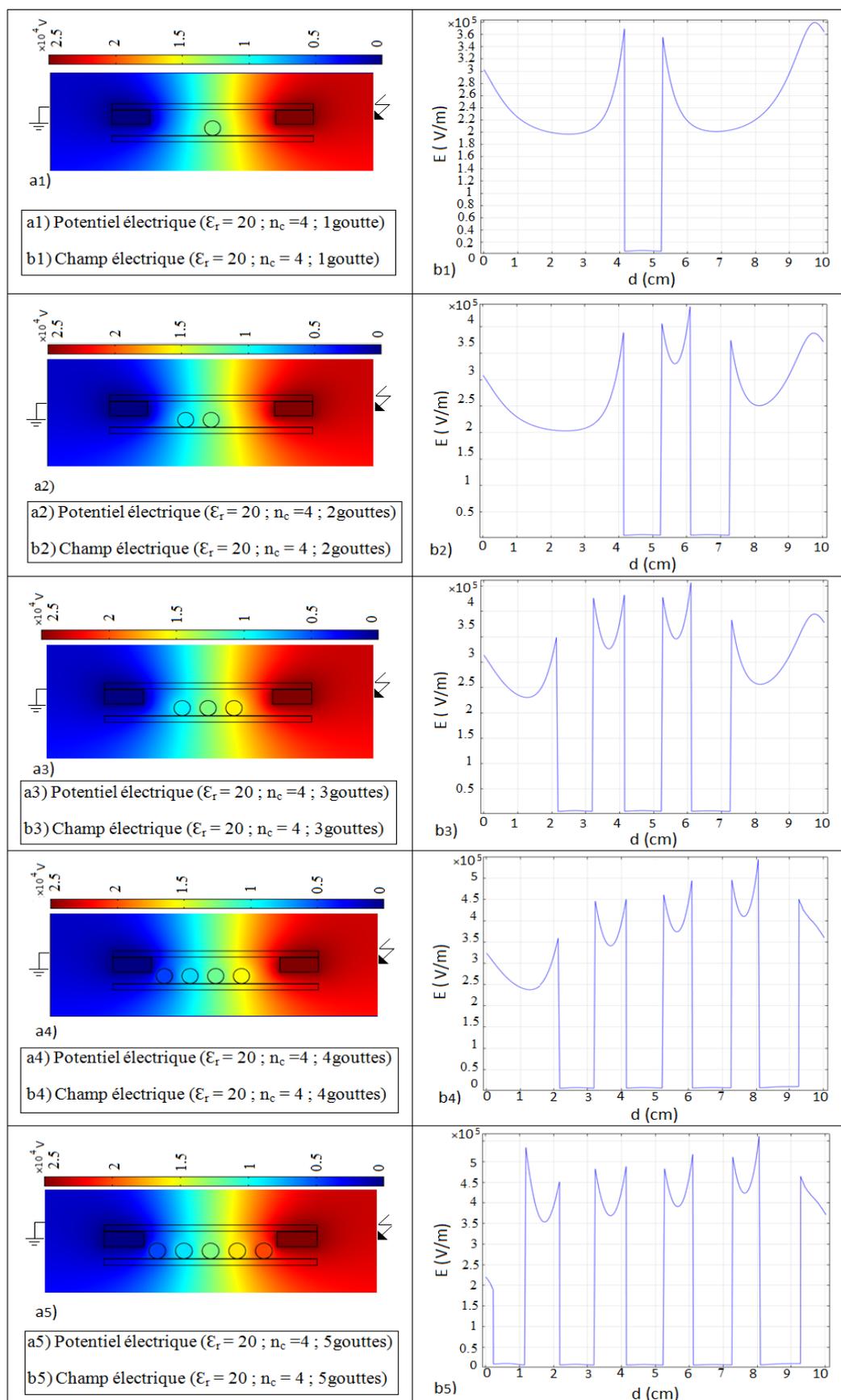


Fig. III. 13: Distribution du potentiel et champ électrique sur un nombre variable de gouttes d'eau sur une isolation à 4 couches avec couvert ($\sigma_v = 20 \mu\text{S}/\text{cm}$; $V_d = 100\mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)

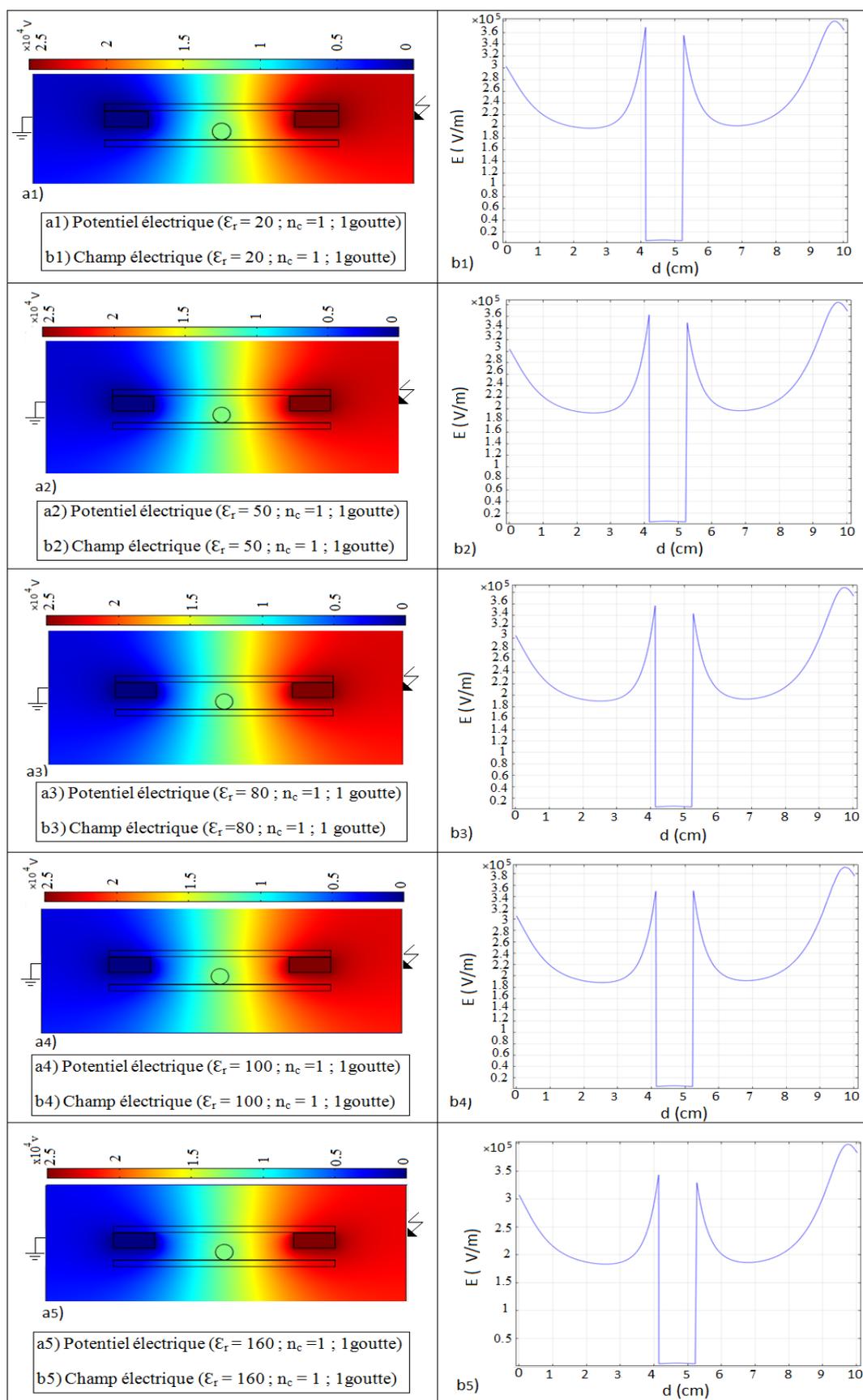


Fig. III. 14: Répartition du potentiel et champ électrique sur une goutte d'une isolation à une couche avec couvert à permittivité variable ($\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100\mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)

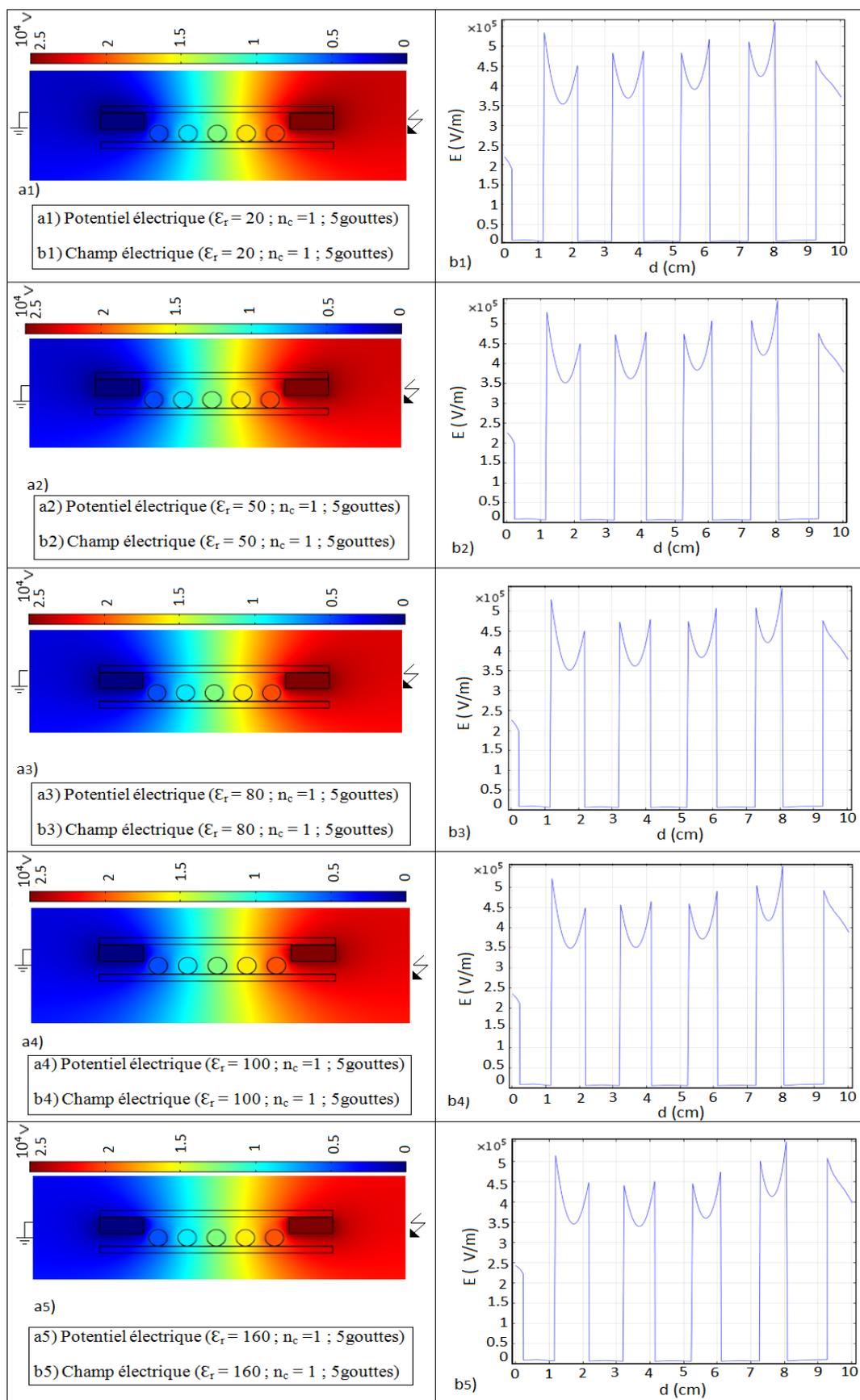


Fig. III. 15: Distribution du potentiel et champ électrique sur 5 gouttes d'une isolation à une couche avec couvert à permittivité variable ($\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100\mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)

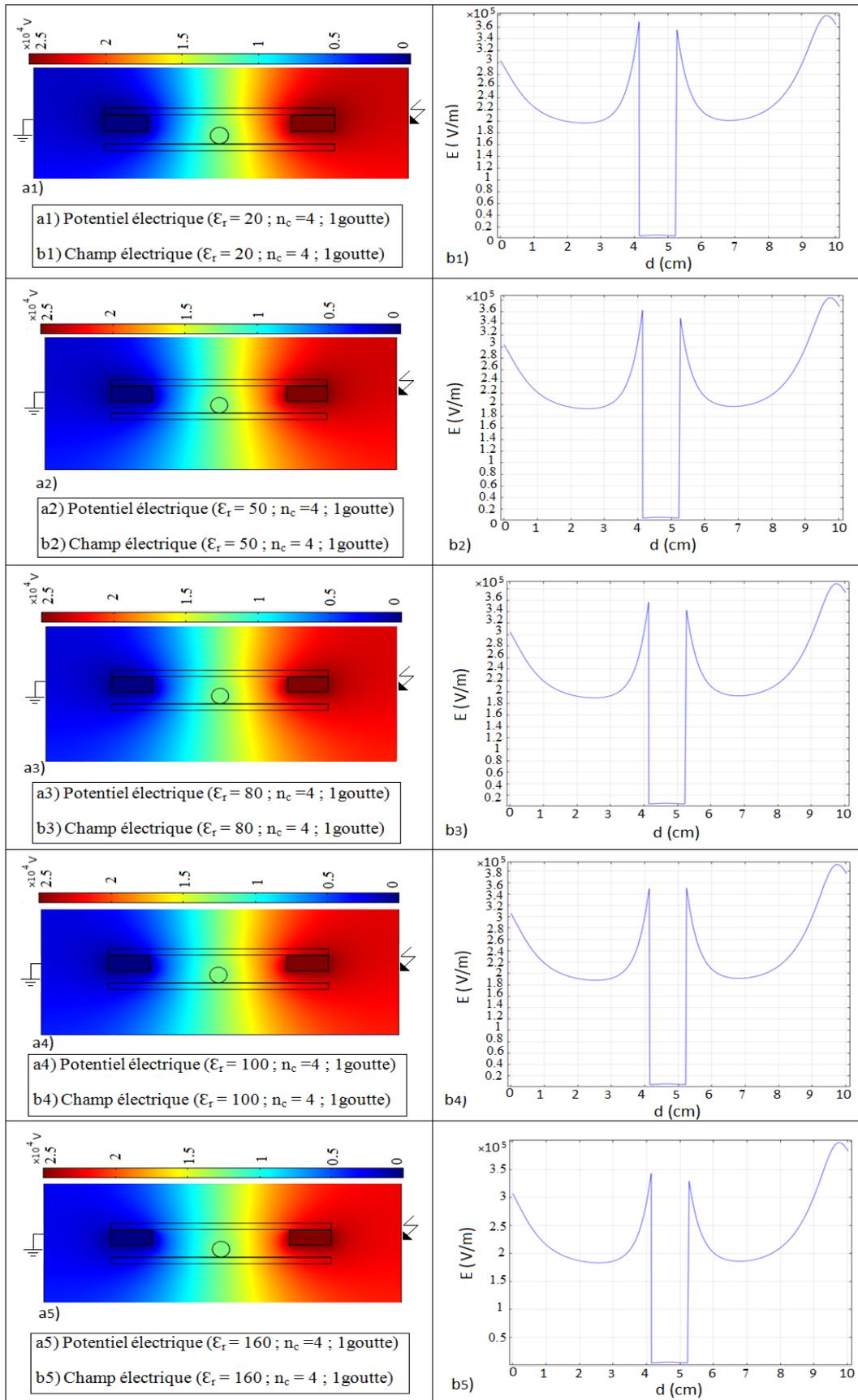


Fig. III. 16: Répartition du potentiel et champ électrique sur une goutte d'une isolation à 4 couches avec couvert à permittivité variable ($\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100 \mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)

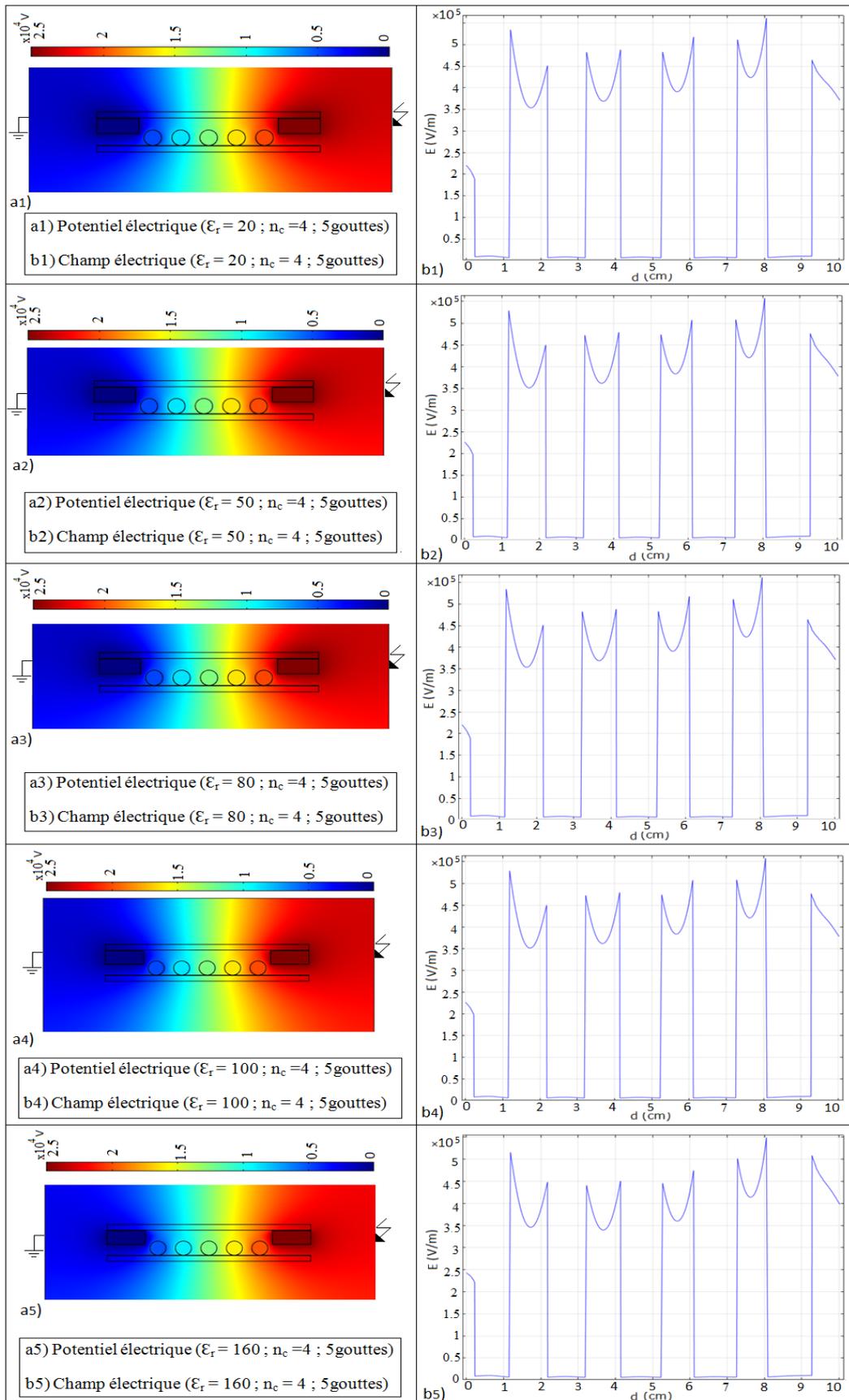


Fig. III. 17: Distribution du potentiel et champ électrique sur 5 gouttes d'une isolation à 4 couches avec couvert à permittivité variable ($\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $V_d = 100\mu\text{l}$; $U_a = 25 \text{ kV}$)

III. 4. 2 Tension appliquée aux gouttes d'eau reposant sur l'isolation et leur volume

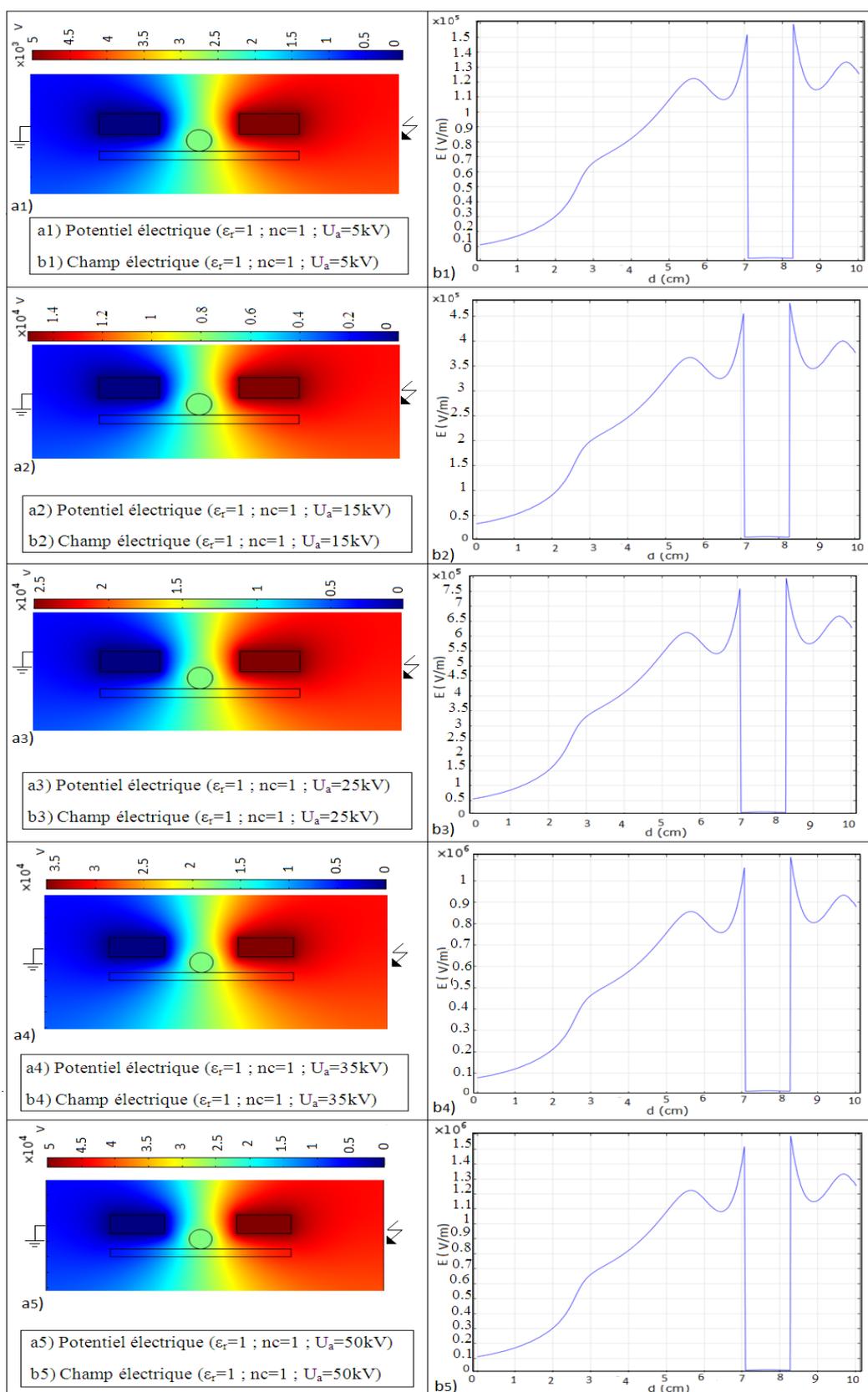


Fig. III. 18: Répartition du potentiel et champ électrique sur une goutte déposée sur une isolation sous tension variable sans couvert ($\epsilon_r = 1$; $\sigma_v = 20\ \mu\text{S/cm}$; $n_c = 1$; $V_d = 100\ \mu\text{l}$)

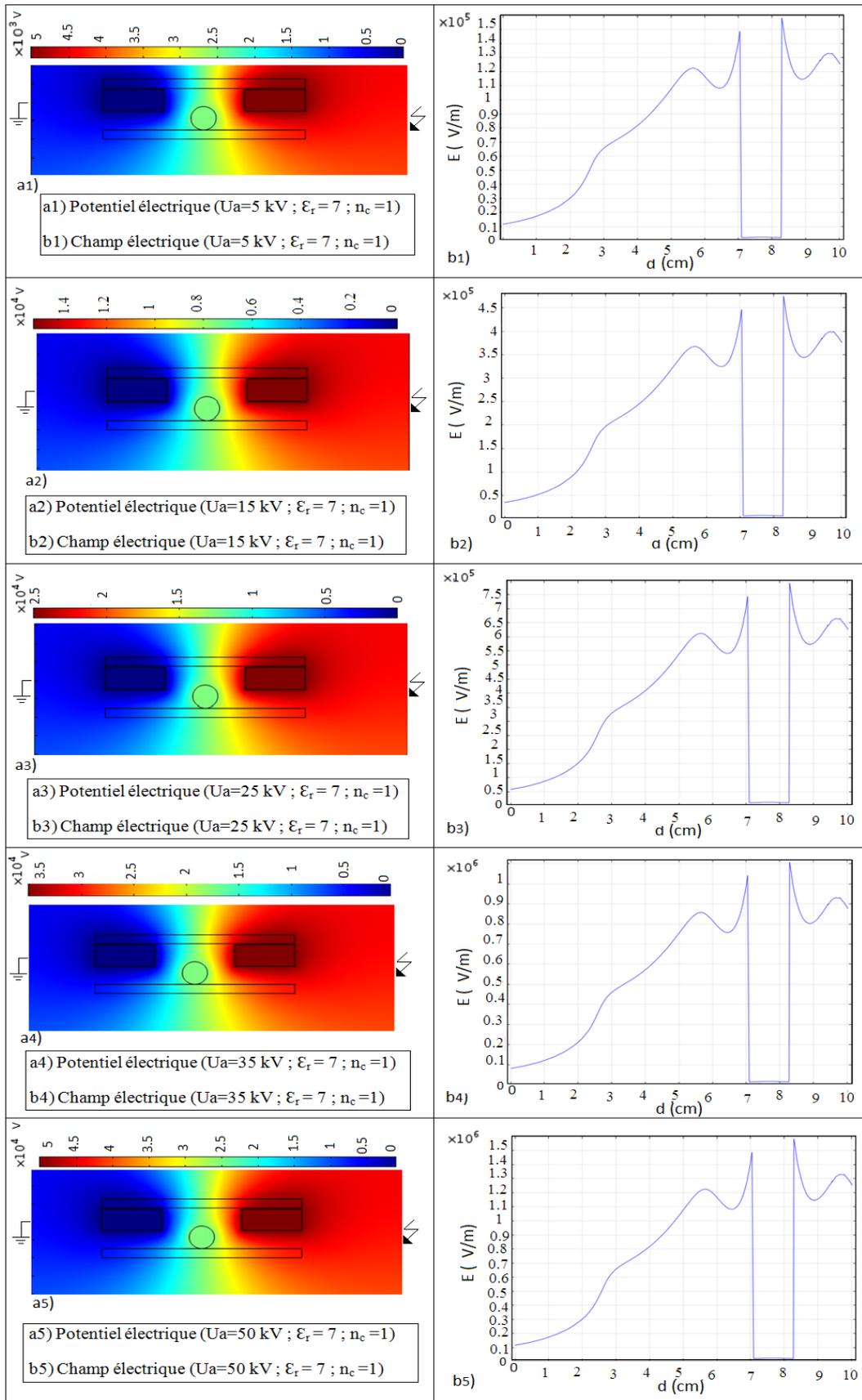


Fig. III. 19: Distribution du potentiel et champ électrique sur une goutte reposant sur une isolation sous tension variable avec couvert ($\epsilon_r = 7$; $\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $n_c = 1$; $V_d = 100 \mu\text{l}$)

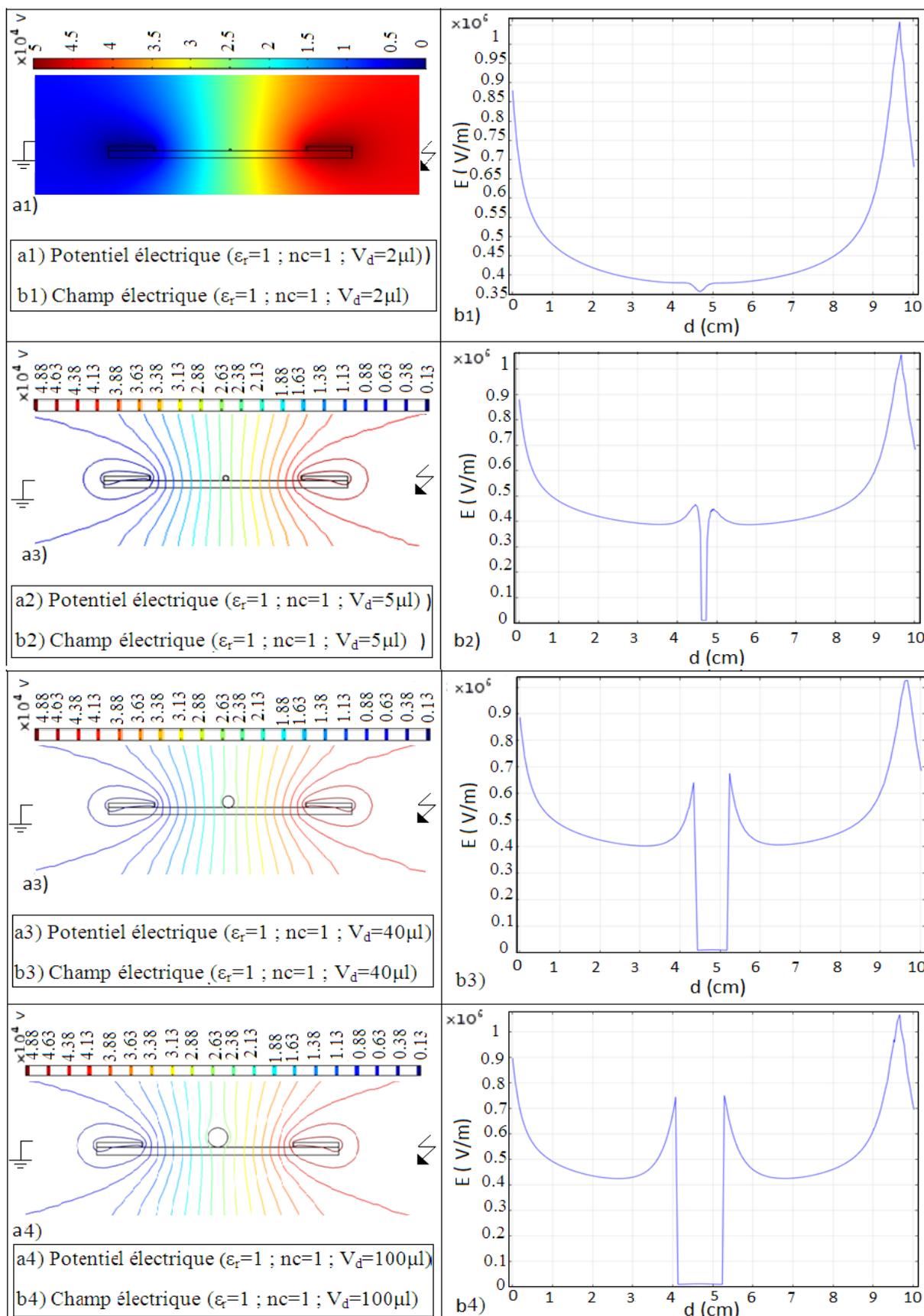


Fig. III. 20: Répartition du potentiel et champ électrique d'une goutte à volume variable sur une isolation à une couche superhydrophobe ($\epsilon_r = 1$; $\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $U_a = 25 \text{ kV}$; $d = 10 \text{ cm}$)

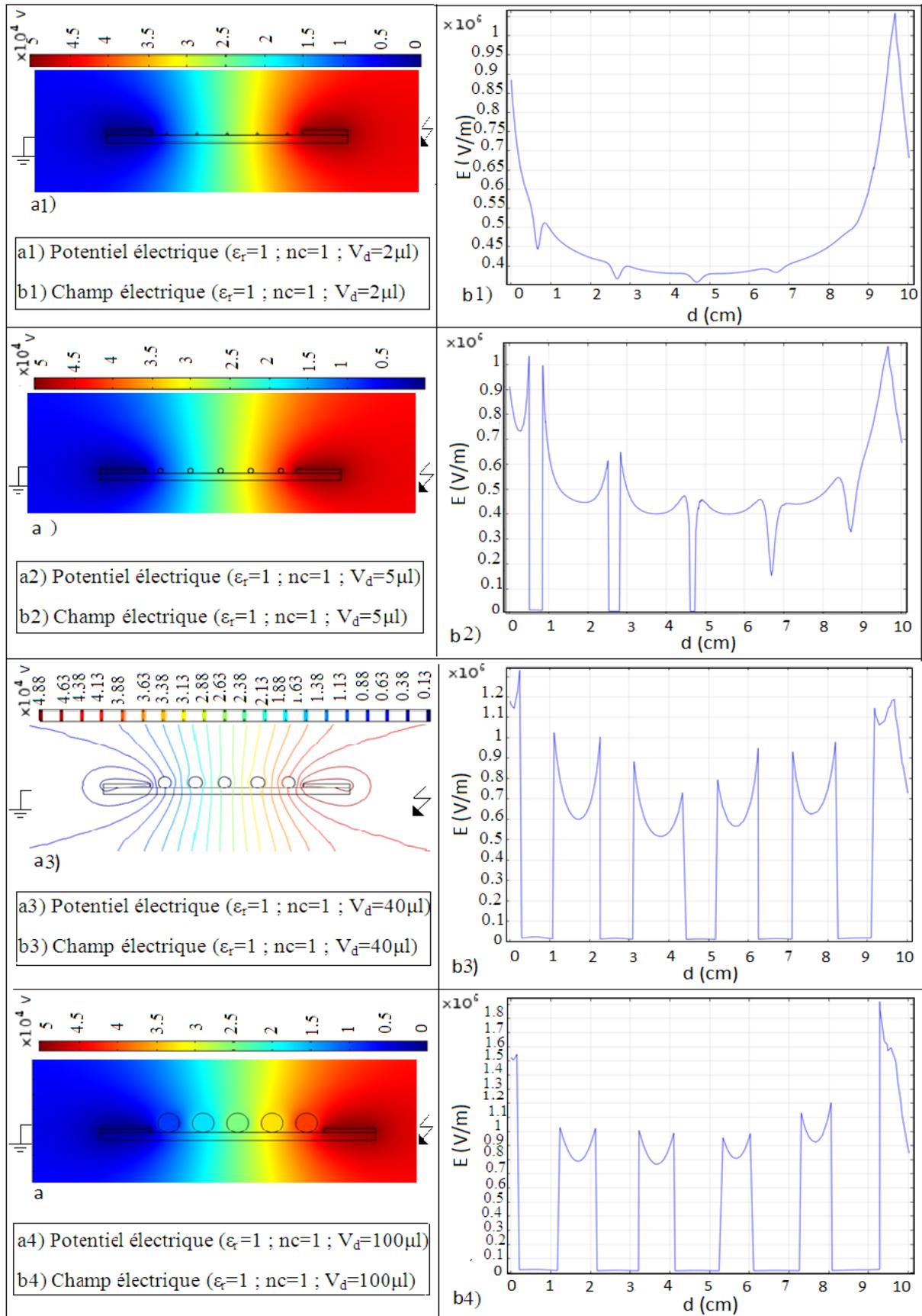


Fig. III. 21: Distribution du potentiel et champ électrique de 5 gouttes à volume variable sur une isolation à une couche superhydrophobe ($\epsilon_r = 1$; $\sigma_v = 20 \mu\text{S/cm}$; $U_a = 25 \text{ kV}$; $d = 10 \text{ cm}$)

Les figures III. 18 et III. 19 donnent l'allure de l'intensité du champ et du potentiel électrique résultant d'une goutte d'eau, reposant sur la surface d'une isolation superhydrophobe sans ou avec couvert en fonction de la valeur de la tension continue 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 l'isolation indépendamment de la présence ou l'absence du couvert diélectrique de l'isolation. Il est à constater la reproductibilité de l'effet de la couverture sur la grandeur du champ électrique dans ce cas de figure.

Les figures III. 20 et III. 21 décrivent 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 [6 et 25] car théoriquement, lorsque le volume croît le champ électrique résultant 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. 15 et III. 22).

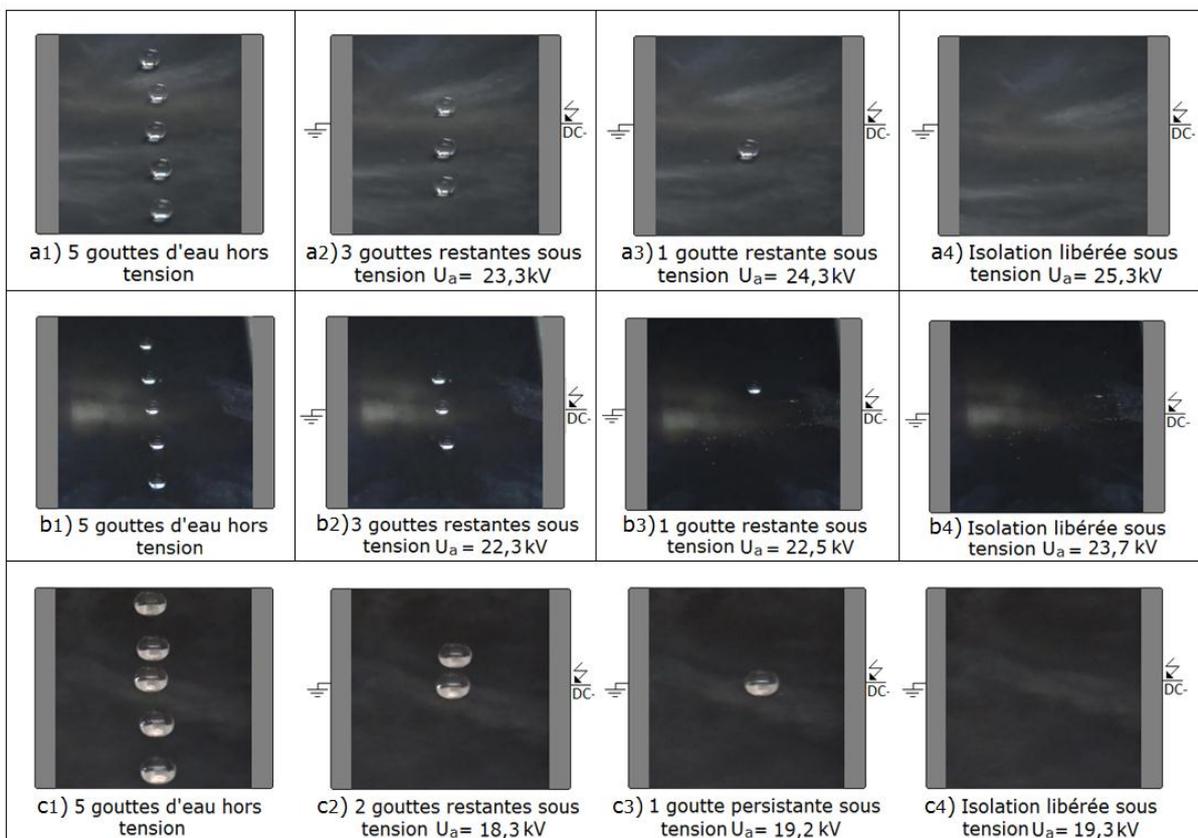


Fig. III. 22: Etapes d'expulsion d'une rangée de 5 gouttes: a ($V_d = 10 \mu\text{l}$; sans couvert), b ($V_d = 10 \mu\text{l}$; avec couvert) et c ($V_d = 80 \mu\text{l}$; sans couvert)

III. 4. 3 Conductivité électrique des gouttes d'eau et épaisseur du couvert

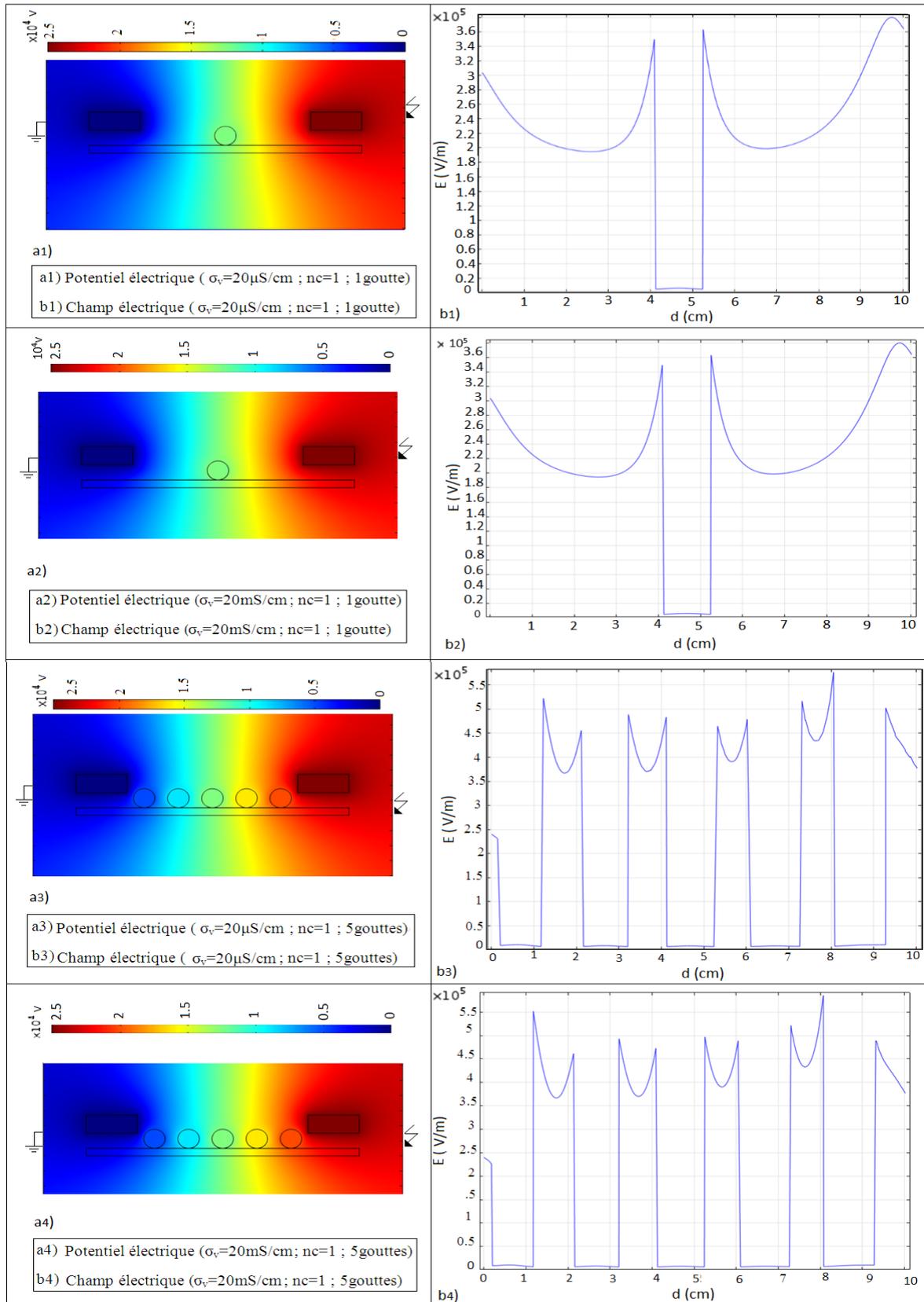


Fig. III. 23: Distribution du potentiel et champ électrique de 1 et 5 gouttes pour deux conductivités différentes sur une isolation superhydrophobe ($\epsilon_r = 1$; $U_a = 25 \text{ kV}$; $d = 10 \text{ cm}$)

La figure **III. 23** illustre l'évolution de l'intensité du champ et du potentiel électrique régnant sur un nombre de gouttes d'eau variable, déposées sur la surface d'une isolation superhydrophobe en fonction de leur conductivité électrique. Celle-ci montre que la conductivité électrique des gouttes d'eau n'exerce aucune influence sur l'intensité du champ électrique résultant quel que soit leur nombre. Ces résultats sont en très bonne conformité avec ceux établis expérimentalement [6 et 25] (voir **Figs. I. 16** et **III. 24**).

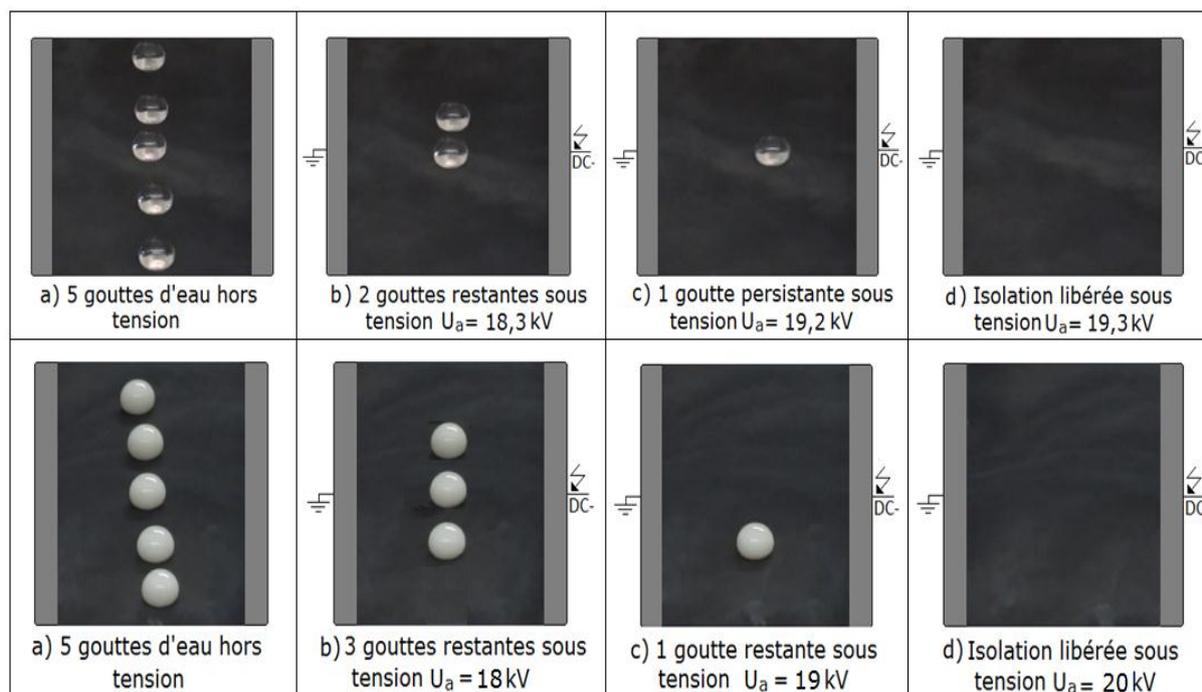


Fig. III. 24: Etapes d'expulsion d'une rangée de 5 gouttes d'eau en fonction de la conductivité électrique (a: $\sigma_v = 0.5 \text{ mS/cm}$ et b: $\sigma_v = 20 \text{ mS/cm}$)

La figure **III. 25** donne l'allure de l'intensité du champ et du potentiel électrique résultant d'un nombre de gouttes d'eau quelconque, reposant sur une isolation à couverture de différentes épaisseurs. Il est à signaler la croissance du champ électrique résultant avec celle de l'épaisseur du couvert diélectrique. En effet avec son augmentation, la densité des lignes du champ électrique se trouve renforcée entre le couvert et les sommets des gouttes d'eau, ce qui entraîne l'élévation de l'intensité du champ électrique à cet endroit (voir **Fig. I. 14**). La comparaison de ces résultats de simulation à ceux expérimentaux ne peut être faite pour la simple raison que la grandeur suscitée n'a pas fait l'objet d'investigation expérimentale.

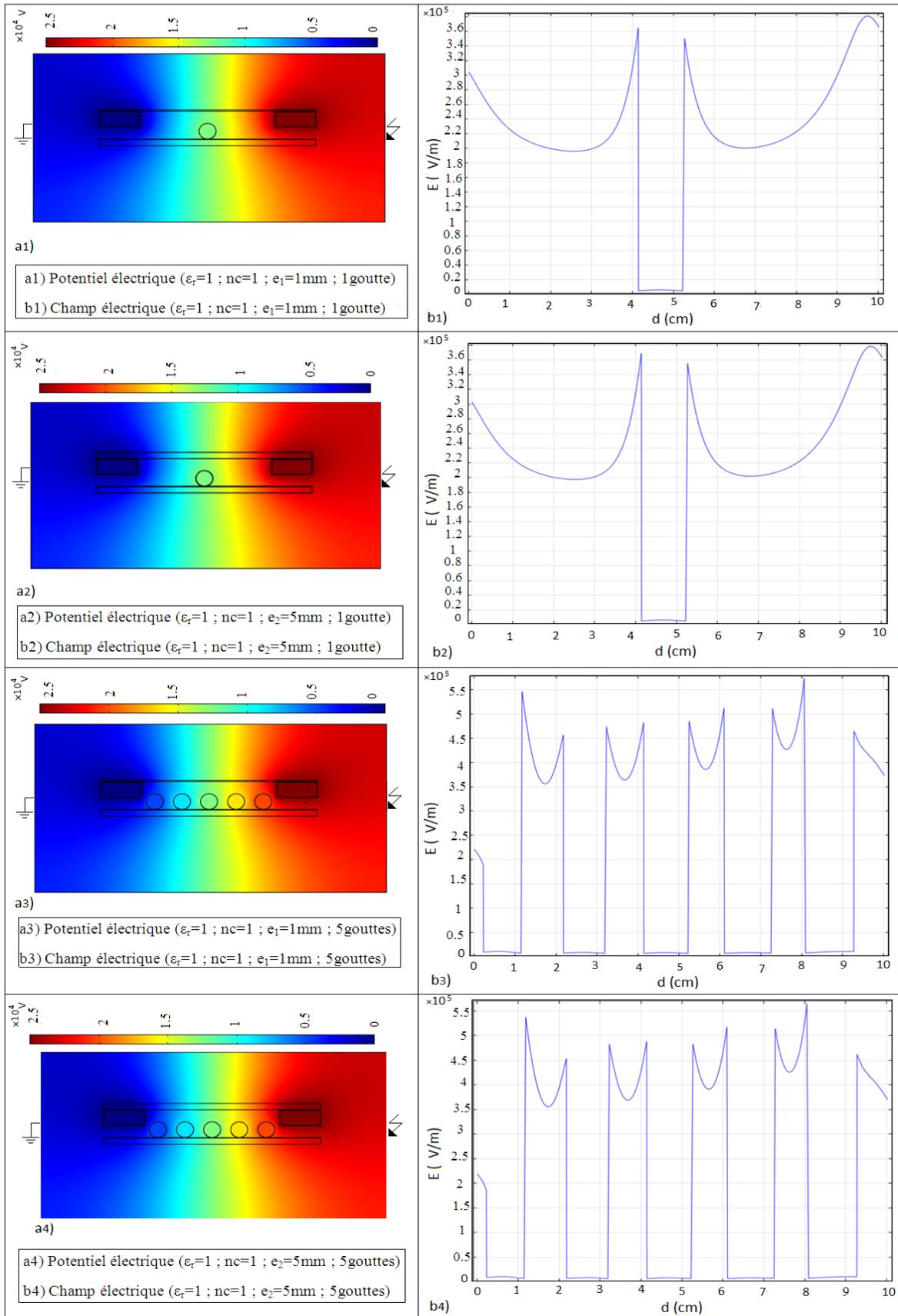


Fig. III. 25: Distribution du potentiel et champ électrique de 1 et 5 gouttes pour deux épaisseurs différentes sur une isolation superhydrophobe ($\epsilon_r = 1$, $U_a = 25$ kV, $d = 10$ cm)

III. 5 Conclusion

Les résultats issus de cette étude, 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, volume et conductivité électrique variable, reposant sur une surface isolante multicouches superhydrophobes sous tension continue variable. Ces résultats sont résumés comme suit:

- Le logiciel COMSOL 5.0 nous permet de prédire qualitativement le sens et l'ordre d'évacuation d'un dépôt de 5 gouttes d'eau reposant 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 du couvert isolant solide crée un très léger déclin de l'intensité du champ indépendamment du nombre de gouttes d'eau et de couches superhydrophobes de l'isolation;
- La croissance de la tension appliquée à l'isolation superhydrophobe, génère une augmentation de l'intensité du champ et du potentiel électrique en absence ou en présence d'un couvert diélectrique de l'isolation;
- L'intensité du champ électrique croît avec celle du volume, quel que soit le nombre de gouttes d'eau reposant sur l'isolation;
- La conductivité électrique des gouttes d'eau n'exerce aucune influence sur le potentiel et l'intensité du champ électrique résultant;
- L'élévation de l'épaisseur du couvert diélectrique entraîne une croissance du champ électrique;
- La présence d'un couvert isolant 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 la grandeur concernant le volume des gouttes d'eau où les résultats sont contradictoires

Conclusion générale



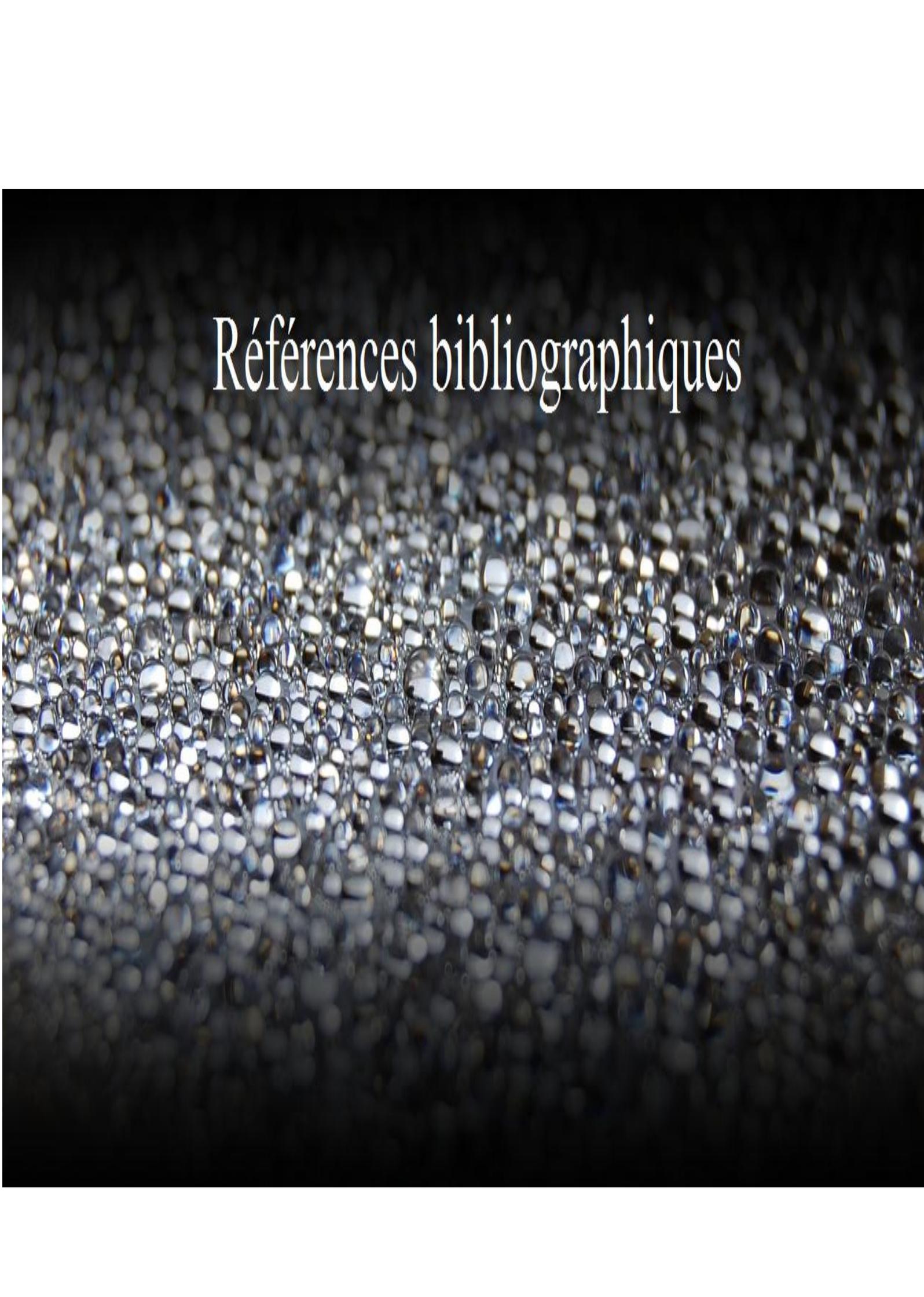
Les résultats de recherche bibliographique sur la superhydrophobicité de la surface des matériaux artificiels, ont fait ressortir de cette étude que malgré leur large exploitation comme autonettoyants, antigivrage, etc., l'application de la superhydrophobie aux isolateurs des lignes et des postes électriques 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.

Les résultats émanant 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, volume et conductivité électrique variable, reposant sur une surface isolante à multicouches superhydrophobes lorsqu'elle est soumise à une contrainte de tension continue 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;
- L'augmentation du nombre de gouttes d'eau entraîne l'amplification de l'intensité du champ électrique résultant indépendamment du nombre de couches superhydrophobes apportées sur l'isolation considérée;
- La croissance du nombre de couches superhydrophobes de suie génère une légère élévation de l'intensité du champ électrique résultant au sein des gouttes d'eau recouvrant l'isolation;
- Une augmentation de la permittivité relative du couvert diélectrique solide crée un très léger déclin de l'intensité du champ électrique quels que soient le nombre de gouttes d'eau et de couches superhydrophobes de suie déposées sur l'isolation;
- La croissance de la tension appliquée à l'isolation superhydrophobe, engendre une augmentation de l'intensité du champ et du potentiel électrique en absence ou en présence du couvert diélectrique de l'isolation;
- L'intensité du champ électrique croît avec celle du volume des gouttes d'eau reposant sur l'isolation, indépendamment du nombre considéré des perles de ce liquide;
- La conductivité électrique des gouttes d'eau n'exerce aucune influence sur le potentiel et l'intensité du champ électrique résultant;

- L'élévation de l'épaisseur du couvert diélectrique de l'isolation entraîne une croissance du champ électrique;
- 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 issus de cette simulation sont conformes à ceux obtenus expérimentalement sauf pour la grandeur se rapportant au volume des gouttes d'eau où ils en sont en nette contradiction.



Références bibliographiques

- [1] A. Kuechler, “Hochspannungstechnik: Grundlagen-Technologie-Anwendungen”, 3^{ème} édition, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, Avril 2009, Germany.
- [2] Microsoft Word-7.Di \351 electriques.doc
- [3] Jean-Denis brassard, «revêtements nanostructures superhydrophobes en vue d’application en aérodynamique», l’université du Québec à Chicoutimi, Novembre 2011, pp [1-128]
- [4] Futuro-Science, article ,2001-2019
- [5] http://wwwmineralogie.fr/structure_matiere.htm/. consulter le 17/05/2020
- [6] K. Benamara, Z. Adnani «performance électrique d’une isolation superhydrophobe avec gouttes d’eau sous tension continue positive», PFE Master, Génie électrique, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, Juin 2019.
- [7] C. Neinhuis, W. Barthlott, A. Botan “characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces”, 1997, pp.79, 667, 677
- [8] F Z. Madidi « Elaboration de vêtements nanocomposites avec des propriétés superhydrophobes, Semi-conductrices et photocatalytiques », thèse de doctorat, université de Québec, Novembre 2016.
- [9] David Quéré, «les surfaces superhydrophobes», laboratoire de physique de la matière condensée, CNRS/collège de France, pp. 1-244.
- [10] P.Dellise, L.Fache, « Olympiade de physique 2015 », lycée des Flandres Hezbrouck, 2015.
- [11] Emmanuelle Guerret Elina Moncada-Potignon professeur encadrant : M. Merilhou lycée Clément Marot CAHORS, « Super-hydrophobe », olympiades de physique 2014-2015, pp.15-16
- [12] IEEE Std 957 “IEEE guide for cleaning insulators”, 1995.
- [13] <https://tpesuperhydrophobiemgs.wordpress.com/>. consulter le 17/05/2020
- [14] <https://hydrophobe.moonfruit.fr/superhydrophobie-naturelle/4422516>. consulter le 19/05/2020
- [15] J. Genzer and K. Efimenko, “Recent developments in superhydrophobic surface and their relevance to marine fouling: a review”, the journal of bioadhesion and biofilm Research, 2007.

- [16] Xue Yanpeng, « Voie innovante pour la nano micro texturation de surfaces métalliques à base d'assemblage nano particules d'AU : application superhydrophobe », thèse doctorat, université Pierre et Marie Curie, 26 juin 2014.
- [17] B.Smati, S.Soudani « Impact du dépôt des gouttes d'eau sur le comportement électrique d'une surface superhydrophobe sous tension continue négative », PFE Master, Génie électrique, université Abderrahmane Mira-Bejaia, Juin 2017.
- [18] E.Guerret, E.Moncada, « superhydrophobie », Olympiades de physique lycée clément Marot cahrs, 2014-2015.
- [19] Nan Wanga,b,c, Dangsheng Xionga,b,c,* ,Mengtong Lia, Yaling Denga ,Yan Shib, Kun Wang , “ superhydrophobic surface on steel substrate and its anti-icingproperty in condensing conditions”, Applied Surface Science 355(2015) 226-232.
- [20] Saleema, N. Sarkar ,D. K. Gallant ,D. paynter, R. W.; chen, X. G, “chemical nature of superhydrophobic aluminum alloy surfaces produced via a one-step process using fluoroalkyl-silane in a base medium”, ACS Appl.Mater. Interfaces (2011), 3, 4775-4781.
- [21] Lau, K.K.S.; Bico, J.; Teo, K.B.K; chhowalla, M; Amaratunga G.A.J.; Mckinley, G.H.; Gleason, K.K. “ superhydrophobic carbon Nanotube forests”, Nano Lett.(2003),3,1701-1705.
- [22] 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.,
- [23] <https://www.industrie-techno.com/du-beton-intelligent-qui-dure-plus-d-un-siencle-29538>, consulter le 19/05/2020
- [24] J D. Barassard, “revêtements nanostructures superhydrophobes en vue d'application en aérodynamique”, mémoire (M. Sc. A), université du Québec à Chicoutimi, Canada, 2011.
- [25] S. Ioukane, C. Meziane « Effet des paramètres électrogéométriques des gouttes d'eau recouvrant une isolation superhydrophobe sur sa performance électrique sous tension continue négative », PFE Master, Génie électrique, université Abderrahmane Mira-Bejaia, Juin 2019.

- [26] A. Oudani « performance d'une surface isolante hydrophobe en silicone recouverte de gouttes d'eau sous tension continue positive », PFE Master, Génie électrique, université Abderrahmane MIRA-BEJAIA, juin 2013.
- [27] F. Aouabed « contribution a l'étude d'un circuit équivalent des isolateurs synthétique sous pollution en utilisant l'EMTP », Magister, Génie électrique, université Ferhat ABBAS Sétif.
- [28] A. Tilmatine « Isolation des lignes aériennes haute tension » cours, chapitre 6, pp.04 www.Univ-Sba.dz.
- [29] Md. T. Tamart, M. Dahdah « performance d'un écran en silicone recouvert de gouttes d'eau dans un système à champ non uniforme sous tension continue positive », PFE Master, Génie électrique, université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2012.
- [30] T. Meraghni, I. Guia « l'effet de la pollution désertique sur l'isolateur de haute tension », PFE Master, Génie électrique, université d'El Oued, 2015.
- [31] S. Sata « contribution à l'étude de l'influence de la pollution discontinue sur le comportement des isolateurs : expérimentation et simulation », magister, Génie électrique, université Ferhat ABBA-Sétif.
- [32] A. Belguendouz, R. Kaouane « Etude du comportement électrique d'une isolation superhydrophobe sous l'impact de gouttes d'eau et tension continue négative », PFE Master, génie électrique, université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2018.
- [33] S. allali, Y. Nakes « Etude de contournement des isolateurs à haute tension », PFE Master, Génie électrique, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, juin 2019.
- [34] H. Morgan *and* N. G. Green, "AC Electrokinetics: colloids and nanoparticles", Research Studies Press LTD, Baldock, Hertfordshire, England, 2003.
- [35] 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.
- [36] 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.

- [37] J. Liu, S. Zhou, Y. Yan, H. Zheng and S. Liu, "Study on Droplet Movement on Superhydrophobic Surfaces under Electric Fields", 19th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT18), pp. 681-686, Chicago (USA), 2018.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.